

TARTU ÜLIKOOL  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geoloogia osakond

Merilin Paalo

**RABAPINNASTE MASS-STABILISEERIMINE  
PÕLEVKIVITUHAGA**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja: prof Kalle Kirsimäe

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

Osakonna juhataja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2018

## **Rabapinnaste mass-stabiliseerimine põlevkivituhaga**

Mass-stabiliseerimismeetodit kasutatakse pehmete pinnaste tugevusomaduste parandamiseks koos erinevate sideainetega. Üheks võimalikuks sideaineks on põlevkivituhk. Antud uurimustöö eesmärgiks on selgitada välja, kas põlevkivituhk võiks olla sobilik sideaine turbapinnaste stabiliseerimiseks. Selle selgitamiseks sooritati laboratoorne katse kolme erineva stabiliseerimisega. Tulemuste saamiseks mõõdeti katsekehadel üheteljelise survetugevus 7, 28, 91, 180 ning 360 päevase sammuga. Saadud tulemuse põhjal võib väita, et põlevkivituhk pole sobiv sideaine veega küllastunud rabapinnaste mass-stabiliseerimiseks.

*Märksõnad: põlevkivituhk, mass-stabiliseerimine, turvas, survetugevus*

T270 – Keskkonnatehnoloogia

## **Mass stabilization of peat with oil shale ash**

Mass stabilization is a technology used for improving soft soil properties with different kind of binders. One of the possible binders, that could be used, is oil shale ash. The objective of this research is to find out, if oil shale ash could be a binding material for stabilizing peat. To carry out the results, a laboratory test was set up with three different binder recipes. The results were gathered by measuring compressive strength of the samples after 7, 28, 90, 180, and 360 days. According to the results, it is evident, that oil shale ash does not suit for stabilizing water saturated peat soil.

*Keywords: oil shale ash, mass stabilization, peat, compressive strength*

T270 – Environmental technology

# Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Kirjanduse ülevaade .....	5
1.1 Mass-stabiliseerimine .....	5
1.2 Mass-stabiliseerimine tööstuslike kõrvalproduktidega .....	7
1.3 Mass-stabiliseerimine maailmas.....	8
1.4 Mass-stabiliseerimine Eestis .....	10
1.4.1 Tallinn-Tartu-Võru- Luhamaa teelõik .....	10
1.4.2 Narva-Mustjõe teelõik .....	12
1.4.4 Simuna-Vaiatu teelõik .....	12
1.5 Põlevkivituhk sidusainena .....	13
2. Materjal ja meetodika .....	15
2.1 Mass-stabiliseerimiseks kasutatud materjalid .....	15
2.1.1 Turbaproovid .....	15
2.1.2 Kaigepere raba .....	15
2.1.3 Rae raba .....	16
2.1.3 Männiku raba .....	17
2.2 Turba omadused .....	17
2.2.1 Lagunemisaste ja humiainete sisaldus .....	17
2.2.2 Turba füüsikalised omadused .....	18
2.3 Põlevkivi CFB tuha omadused .....	19
2.4 Mass-stabiliseerimiseks kasutatud retseptid.....	20
2.5 Katsekehade valmistamine .....	20
3. Tulemused.....	23
4. Arutelu .....	32
Kokkuvõte.....	35
Summary .....	37
Tänuõnad .....	39
Kasutatud Kirjandus.....	40
LISAD .....	43

## Sissejuhatus

Eesti energiatööstus põhineb põlevkivil ning selle tagajärjel tekib iga aasta ligikaudu 6 miljonit tonni põlevkivituhka, mis suuremas osas ladustatakse tuhaväljadele – vaid 2-3% tekkinud põlevkivituhast taaskasutatakse (1). Seoses Euroopa Liidu keskkonnanõuete karmistumisega on põlevkivituhale tarvis leida väljund. Üheks võimalikuks variandiks võiks olla põlevkivituha kasutamine nõrkade pinnaste tugevusomaduste parandamiseks ehk mass-stabiliseerimiseks.

Eestis on siiani põlevkivituhaga mass-stabiliseerimist kasutatud peamiselt tolmuwabade katete ja teealuste stabiliseerimiseks ning seda peamiselt Nõukogude Liidu okupatsiooni aastatel. Pehme ja veega küllastunud pinnaste mass-stabiliseerimine põlevkivituhaga on jäänud pigem tahaplaanile ning puuduvad ka laiapõhjalised uuringud tõestamaks, et põlevkivituha näitel on tegemist mass-stabiliseerimiseks sobiliku sideainega. Viimasel aastakümnel on Euroopa Liidu Life+ rahastuse toel loodud pilootprojektid, uurimaks põlevkivituha sobilikkust pinnaste stabiliseerimisel.

Seoses Eesti valitsuse plaaniga ehitada Eestit Lääne-Euroopaga ühendav Rail Balticu raudtee, mille trass läbib pehmeid turbapinnaseid, on tarvis leida ehituseks sobilik tehnoloogia, mis tasuks ennast ära nii majanduslikult kui ka vastaks nõutavatele raudtee ehitusstandarditele. Mass-stabiliseerimine põlevkivituhaga võiks olla sobilik alternatiiv raudtee trassile jäävate pehme pinnaste stabiliseerimiseks, mille abil oleks võimalik vältida kulukamaid tehnoloogiaid nagu sammu-stabiliseerimine või turba väljakaevamine ja selle asendamine mõne inertse mineraalainesega.

Uurimustöö eesmärgiks on välja selgitada:

- Kas põlevkivituhk sobib sideaineks pehme turbapinnaste mass-stabiliseerimiseks?
- Kas põlevkivituhka on võimalik kasutada sideainena koos tsemendiga turbapinnaste mass-stabiliseerimiseks?
- Milline uurimustöö läbiviimiseks kasutatud sideaine on suurima potentsiaaliga pehme turbapinnaste stabiliseerimiseks?
- Kas turba omadused mõjutavad stabiliseeritava pinnase lõpptugevusi?

Antud uurimustöö on osa Enefiti tellitud uuringust selgitamaks välja põlevkivituha omadusi hüdraulilise sideainena.

# 1. Kirjanduse ülevaade

## 1.1 Mass-stabiliseerimine

Mass-stabiliseerimine on pehmete pinnaste tugevdamise meetod, mis põhineb printsiibil, et nõrku pinnaseid töödeldakse mehaaniliselt, segades sinna kuiva või märga sidusainet (2). 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 (3; 4). Tänapäeval on mass-stabiliseerimine laialdaselt levinud Skandinaavias, eriti Soomes ja Rootsis (5).

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. (6)

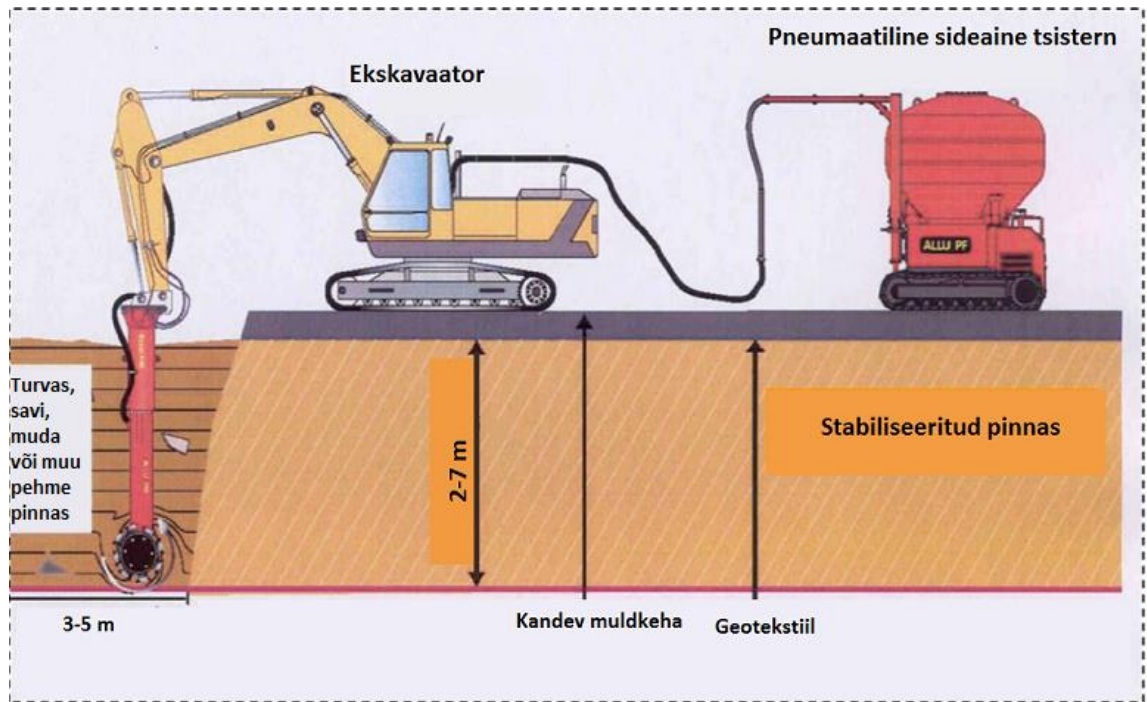
Mass-stabiliseerimist kasutatakse peamiselt nõrkade pinnaste tugevdamiseks, deformatsioonide ja vajumite vähendamiseks ning saastunud pinnaste olukorra parandamiseks. Mass-stabiliseerimise eelisteks on (7; 8):

- suhteliselt kiire pinnase omaduste muutmise meetod;
- madalate opereerimiskuludega materjal;
- parandustööde lõpetamisel ei vaja materjal teisaldamist, vähendades kulusid transpordile ning vajadust teisalduskohtade järele;
- materjali kui ka energiasäästlik meetod;
- tööstuslikke kõrvalsaaduseid on võimalik kasutada toormaterjalina;
- võimalik kasutada väga suurte alade stabiliseerimiseks.

Pinnaste mass-stabiliseerimine on keskkonnasõbralik tehnoloogia avaldades keskkonnale vähe mõju. Samuti on ehitusaegsed müra- ning vibratsiooni tasemed madalad. (7; 8; 9)

Pinnaste mass-stabiliseerimist on mõistlik kasutada kuni 7 meetri paksuste pinnaste puhul. Paksemate pinnasekihtide puhul tuleks mass-stabiliseerimist kombineerida teiste tehnoloogiatega, nagu sammu-stabiliseerimine. Mass-stabiliseerimismeetodi puhul eristatakse kahte erinevat tehnoloogiat - *in situ* ja *ex situ*. *In situ* meetodi puhul segatakse

pinnas ilma kaevamiseta kohapeal (Joonis 1). Selles protsessis toob pneumaatiline mehhanism sidusaine kohale ning sidusaine lisatakse pinnasele spetsiaalse segamispeaga, mis homogeniseerib pinnase. *Ex situ* meetodi rakendamise korral kaevatakse pehme pinnas välja ning transportitakse ladustamisalale, kus see segatakse sidusainega, et seejärel tagastada see algsesse asukohta. (8)



**Joonis 1.** Pinnaste mass-stabiliseerimise *in situ* põhimõtteline skeem (10)

Kuna mass-stabiliseerimine on majanduslikult küllaltki odav tehnoloogia ega vaja suurt tehnikaparki, siis kasutatakse seda väga laialdaselt (8):

- kavandatavate teede ja raudteede trasside tugevdamiseks;
- kaubanduskeskuste ning elamurajoonide nõrkade pinnaste stabiliseerimiseks;
- sadamate ja muude ladustamiskohtade vajaliku maa ettevalmistuseks;
- saastunud alade konserveerimiseks;
- kaldapealsete pinnaste tugevdamiseks;
- tammide läbilaskvuse vähendamiseks;
- kaablite ning torujuhtmete trasside tugevdamiseks.

Mass-stabiliseerimisega kaasneb alati vajadus viia esmalt läbi laboratoorsed katsed, leidmaks, kas antud meetod ja sideaine sobivad stabiliseeritava pinnase omadustega. Enne pinnase stabiliseerimiskatsete alustamist määratakse pehme pinnasekihi sügavus,

veesisaldus, tihedus, turba lagunemisaste ning teiste pinnaste puhul ka nende pH. Selliste parameetrite olemasolu korral on võimalik välja valida või arendada sobilik stabiliseerimisretsept. Positiivsete katsetulemuste saavutamisel ja sobiva sideaine retsepti leidmisel tuleb katseid korrata välitingimustes, kuna stabiliseeritava pinnase omadused võivad paiguti erineda ning segamisprotsess võib mõjutada sideaine omadusi. Lõplikud tulemused, kas antud pinnas ja sideaineretsept sobivad mass-stabiliseerimiseks, saadakse välitingimustes stabiliseerunud katsekehade järelhindamisel. (10)

EuroSoilStab'i poolt on koostatud ülevaade sideainete sobivusest erinevate pinnastega, mis võiks olla mass-stabiliseerimise planeerimisel esmase sideaine sobivuse määramiseks (Tabel 1).

**Tabel 1.** Hinnanguline sideaine või segude sobivus pinnaste stabiliseerimisel (11)

Sideaine	Muda	Savi	Orgaanilised pinnased, möll, orgaanilised savid	Turvas
	Orgaanilise aine sisaldus 0-2%	Orgaanilise aine sisaldus 0-2%	Orgaanilise aine sisaldus 2-30%	Orgaanilise aine sisaldus 50-100%
Tsement	xx	x	x	xx
Tsement + kips	xx	x	xx	xx
Tsement + kõrgjahu räbu	xx	xx	xx	xxx
Lubi + tsement	xx	xx	xx	-
Lubi + kips	xx	xx	xx	-
Lubi + kõrgjahu räbu	x	x	x	-
Lubi + kips + kõrgjahu räbu	xx	xx	xx	-
Lubi + kips + tsement	xx	xx	xx	-
Lubi	-	xx	-	-

xxx – paljudel juhtudel väga hea sideaine

xx – paljudel juhtudel hea sideaine

x – osadel juhtudel hea sideaine

- ei sobi sideaineks

## **1.2 Mass-stabiliseerimine tööstuslike kõrvalproduktidega**

Tööstuslikeks kõrvalproduktideks mass-stabiliseerimismeetodi puhul loetakse šlakki, lendtuhka ja kipsi. Enamus juhtudel kasutatakse tööstuslike kõrvalprodukte koos kaubanduslike sideainetega nagu tsement ja lubi, et täiendada sideaine tehnoloogilisi kui ka keskkondlikke omadusi – sh vähendada ka sideaine maksumust. Tsement ja lubi käituvad tööstuslike kõrvalproduktidega valmistatud segudes katalüsaatorina, mis käivitavad stabiliseerumisprotsessi. (10; 12)

Harvematel juhtudel teostatakse pinnase tugevdamine ainult tööstuslike kõrvalproduktidega, mis suurendab suurel määral sidusaine kogust, kuid aitab kokku hoida kuludelt. Suures koguses sidusaine kasutamise puuduseks on, et see võib stabiliseerimisperioodi märgatavalt aeglustada. (10)

Lendtuha, räbu ja kipsi kasutamisel sideainena tuleb arvestada mitmete probleemidega nagu (10):

- toote kvaliteet ning selle kättesaadavus;
- ajutine ladustuspinna olemasolu;
- materjali transportimine;
- kahe või enam sidusaine kasutamise puhul retsepti korrektne jälgimine.

Tööstuslike kõrvalproduktidega stabiliseerimise eeliseks on, et erinevate sideainekomponentide kombineerimine laseb luua kohandatud retsepte, mis aitavad stabiliseeritaval pinnasel vajalikke omadusi saavutada. Teisalt võivad muudatused segudes mõjutada soovitud tugevuse arenemiskiirust, niiskete masside konsolideerumist, struktuuri lõplikku tugevust, deformatsiooni omadusi, potentsiaali kompenseerida ebahühtlast pinnase segamist, omadust siduda ohtlike osakesi stabiliseerunud pinnases ning muuta vee läbilaskvust. (10)

## **1.3 Mass-stabiliseerimine maailmas**

Maailmas ja eriti Skandinaavias on nõrkade pinnaste mass-stabiliseerimine laialdaselt levinud ning tihedalt kasutatav praktika, mille kohta on tehtud arvukalt uurimustöid kui ka reaalseid projekte. Skandinaavias kasutatakse mass-stabiliseerimismeetodit peamiselt erinevate teede, mille pinnas koosneb turbast või järvemudast, tugevdamiseks ning sideainena kasutatakse kuivasid materjale. Jaapanis seevastu on ülekaalus mereprojektid,

mille jaoks tuleb kasutada nn niiske sideainega stabiliseerimist (13). Vastavalt erinevate riikide maavarade olemasolule, kasutatakse sideainena mass-stabiliseerimismeetodi rakendamisel eri piirkondades erinevaid materjale. Tabelis 2 on toodud valik näiteid maailmas läbiviidud mass-stabiliseerimisprojektide kohta. (14)

**Tabel 2.** Mass-stabiliseerimise näited maailmast

Asukoht	Näide
Kokkola, Soome	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabiliseerimistööd teostati uue sadamakai ehituseks ning saastunud setete konserveerimiseks;</li> <li>• stabiliseeriti 12 500 m<sup>3</sup> pinnast;</li> <li>• stabiliseeritav materjal varieerus muda, liivase muda ja liiva vahel;</li> <li>• sidusainena kasutati tsementi ja lendtuhka;</li> <li>• soovitavaks tugevuseks oli 50 kPa, kuid järeluuring tõestas, et pinnas on saavutanud suurema tugevuse;</li> <li>• stabiliseerimistööd teostati aastal 2011. (15)</li> </ul>
Luhdanoja, Soome	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabiliseerimistöö teostati Kerava-Lahti kiirraudteeliini parandustöödeks;</li> <li>• stabiliseeriti 50 000 m<sup>3</sup> pinnast;</li> <li>• stabiliseeritavaks materjaliks oli turvas ning pehmed savid;</li> <li>• stabiliseerimiseks kasutati tsementi;</li> <li>• soovitud tugevuseks oli 400-500 kPa kandevõime, järeluuringute käigus tuli välja, et soovitud tugevus oli saavutatud;</li> <li>• stabiliseerimistööd teostati 2002-2006. (16)</li> </ul>
Kotolahti, Soome	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabiliseerimistööd teostati Kotolahti raudtee moderniseerimiseks ja uue raja aluse pinna tugevdamiseks;</li> <li>• stabiliseeriti 20 000 m<sup>3</sup> pinnast;</li> <li>• stabiliseeritavaks pinnaseks oli savi, järvemuda ja turvas;</li> <li>• stabiliseerimiseks kasutati tsemendi ja lubja segu;</li> <li>• soovitud tugevuseks oli 50 kPa;</li> <li>• stabiliseerimistööd teostati 2009-2010. (17)</li> </ul>
Roslagsbanan, Rootsi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabiliseerimistööd viidi läbi Roslagsbanani raudtee moderniseerimiseks;</li> <li>• stabiliseeriti 18 000 m<sup>3</sup> pinnast;</li> <li>• stabiliseeritavaks pinnaseks oli järvemuda ja turvas;</li> <li>• stabiliseerimiseks kasutati tsemendi räbu;</li> <li>• mass-stabiliseerimisega saavutati tugevus 75 kPa;</li> <li>• stabiliseerimistööd teostati aastal 2014. (18)</li> </ul>
Haaga, Soome	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soine ala muudeti sportimisalaks, kuhu ehitati juurde ka elamukompleksi;</li> <li>• stabiliseeriti 78 000 m<sup>3</sup> pinnast;</li> <li>• stabiliseeritavaks pinnases oli turvas, savikas muda ja pehme savi;</li> <li>• stabiliseerimiseks kasutati tsementi;</li> <li>• mass-stabiliseerimisega saavutati nihketugevus 50 kPa;</li> <li>• stabiliseerimistööd teostati 2005-2007. (19)</li> </ul>

## **1.4 Mass-stabiliseerimine Eestis**

Mujal maailmas ja Skandinaavias laialdaselt kasutatud mass-stabiliseerimismeetod on Eestis praegusel ajal suhteliselt vähekasutatud meetod. Kuid kuna Eesti energiatööstuse tagajärjel tekib aastas ligikaudu 6 tonni põlevkivituhka, mis tänasel päeval enamjaolt ladustatakse tuhaväljadele, siis püütakse sellele leida taaskasutuslikku väljundit (1). Kui 1986. aastal kasutati tekkinud põlevkivituhast ära pool, siis praegu on see vähenenud 2-3%-ni aastas (1; 20). Hetkel on põlevkivituhk liigitatud ohtlike jäätmete hulka ning Eesti jäätmemajanduse üks prioriteete jäätmetekke vältimise kõrval on selle suunamine taaskasutusse. (21)

Eestis on kasutatud mass-stabiliseerimismeetodit peamiselt teedehituses ehk põlevkivilendtuhaga mass-stabiliseerimist kasutati tolmuwabakatete või tee aluste ehitamiseks. Põlevkivituhaga alustati Eestis maanteed stabiliseerimist 1961. aastal. Väidetavalt oli esimeseks projektiks 0,5 km pikkune teelõik Saarel, Jõhvi-Tartu-Valga maanteel, mis 1970-ndate keskel kaeti mustkatte kihiga. Massiliselt alustati põlevkivituhaga teekatete ja -aluste mass-stabiliseerimist 1970-ndate alguses. Aasta lõikes kasutati keskmiselt ligikaudu 100-120 tonni põlevkivituhka pinnaste stabiliseerimiseks. Perioodil 1971-1986 ehitati Eestis ligikaudu 1000 km põlevkivituhaga stabiliseeritud katteid. (22)

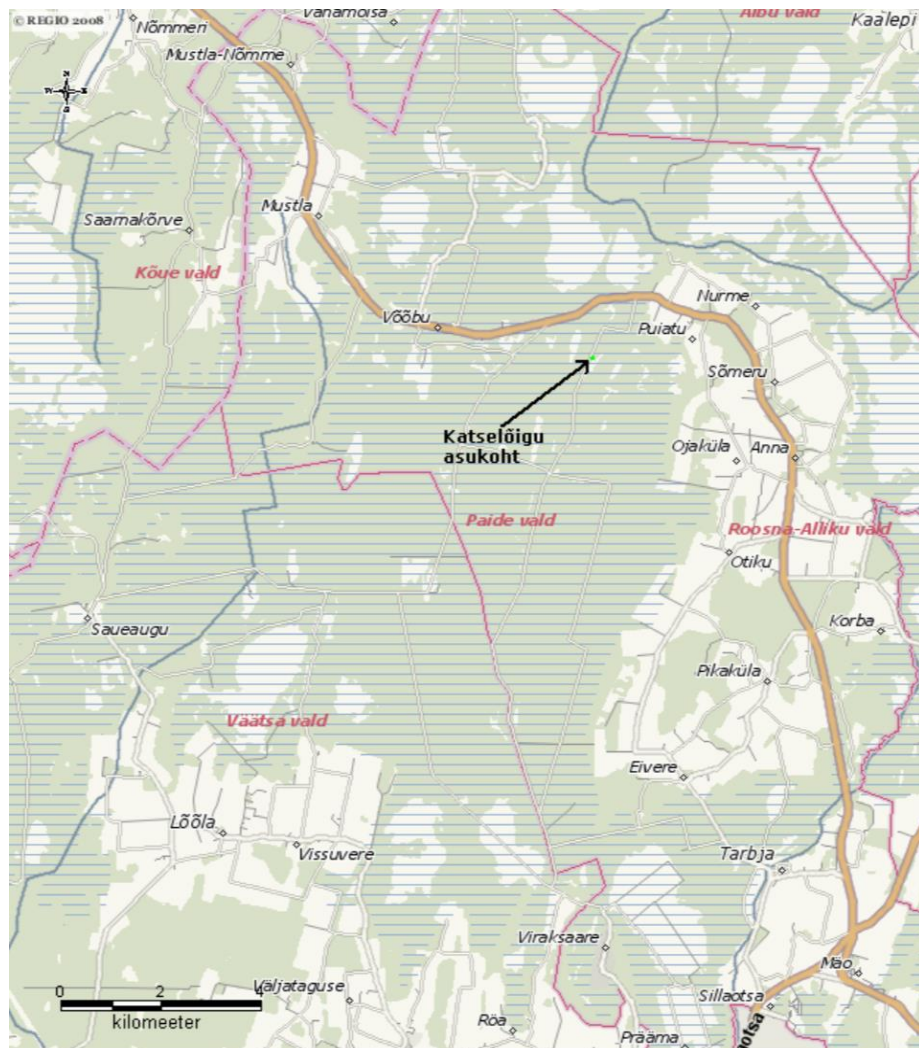
Taasiseseisvunud Eestis on siiani mass-stabiliseerimismeetodit kasutatud oluliselt vähem kui 70-ndatel. Katsetusi on tehtud seoses kahe teedehitusprojektiga. Esimene neist on Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa maantee neljarealiseks ehitamine. Antud teelõigul katsetati turbapinnaste stabiliseerimise võimalikkust Võõbu-Mäo lõigul, et vähendada uue tee ehituskulusid. Teine projekt viidi läbi tänu Euroopa Liidu LIFE+ rahastusele. Euroopa Liidu rahastatud projekti OSAMAT toel ehitati kaks testlõiku Ida-Eestisse, mis asuvad Narva-Mustjõe ja Simuna-Vaiatu maanteedel. (23)

### **1.4.1 Tallinn-Tartu-Võru- Luhamaa teelõik**

Peale Eesti iseseisvumist jäi põlevkivituhaga pehmete pinnaste stabiliseerimine pigem tahaplaanile, aga tänu järjest kasvavale survele leida otstarvet põlevkivitööstusega seotud jäätmetele ning vähendada Eesti energiatööstuse keskkonnamõju, on taaskord hakatud katsetama põlevkivituhaga kui potentsiaalse ehitusmaterjaliga.

Võõbu-Mäo teelõigu ehitamise jaoks ning sobiva stabiliseerimisretsepti leidmiseks viidi aastatel 2007-2010 läbi testprojekt. Antud projekti peamiseks eesmärgideks oli uurida põlevkivituhaga pinnaste stabiliseerimise efektiivsust ja tasuvust. Võõbu-Mäo teelõik asub Tallinn-Tartu maantee 70 km ja 80 km vahelisel alal ning selle kogupikkuseks on 8 km. Testalaks valiti sarnaste pinnaseomadustega testlõik (Joonis 2) perspektiivse uue terrassi lähedal Paide vallas. Praktiliselt paikneb terve testlõik turbapinnastel, mille paksuseks on kuni 4 m, kuid teelõigul leidub ka peenliivaga ja tolmliiduga pinnasekihte.

(7)



**Joonis 2.** Katselõigu asukoht (24)

Testlõigu stabiliseerimiseks kasutati kokku 5 sideainet, millest 2 on tsemendid ja 3 põlevkivituhad. Tsemendina kasutati Kunda Nordic Cement toodangut:

- Portlandtsement CEM I 42,5 N,
- Teetsement HRB 32,5 E.

Tuhkadena kasutati Eesti Elektriijaama 3 erinevat tuhka (7):

- Tuhk 1 – Elektrifiltrituhk (tolmpõletus katel),
- Tuhk 2 – Tsüklontuhk (tolmpõletus katel),
- Tuhk 3 – Keevihis põletamise katla tuhk.

Järeluuringutes selgus, et vaid 8-st katsetatud segust 1 ei saavutanud vajalikku tugevust ega stabiliseerunud piisavalt kiiresti. Rambolli 2011 aasta uurimustöö lõpparuandest selgub, et põlevkivituhk-tsement sideainesegu võiks kasutada sarnaste pinnaste mass-stabiliseerimiseks. (25)

#### **1.4.2 Narva-Mustjõe teelõik**

Euroopa Liidu Life+ rahastatud OSAMAT projekt on võtnud endale eesmärgiks tõestada, et põlevkivituhk on sobilik sideaine pehmete pinnaste tugevdamiseks. OSAMAT pilootprojekti tulemusena valmis kaks testlõiku. Üks Ida-Virumaal ning teine Lääne-Virumaal. (23)

Aastal 2010 teostati Narva-Mustjõe teelõigul tuhaga stabiliseeritud kihtide rajamise katsetööd. Selle käigus rajati antud teelõigule põlevkivi kaevandamisel tekkinud aherainetest ja põlevkivituhast kihtstabiliseeritud alus (26). Täpsemalt kasutati sideainena põlevkivi elektrifiltri 3-bloki tuhka ning tsüklontuhka. Lõigule, mille kogupikkuseks on 900 m, rajati kahe erineva tuhaga tuhkstabiliseeritud katendikihid paksusega 25 cm. Lisaks tuli eelnevate stabiliseerimiskatsetuste põhjal lisada retseptile tsementi, et tagada vajalike tugevusomaduste saavutamine. (27)

Kuna Narva-Mustjõe teelõigul moodustab raskeliiklus ca 25% osatähtsuse, siis peale pinnase mass-stabiliseerimist rajati teelõigule kahekihiline asfaltkate. (27)

#### **1.4.4 Simuna-Vaiatu teelõik**

OSAMAT projekti teise osana rajati Lääne-Virumaale 500 meetri pikkune Simuna-Vaiatu teelõik, mille mass-stabiliseerimiseks kasutati Eesti Energia Narva elektrijaamade põlevkivituhka. Antud teelõigu stabiliseerimiseks kasutati põlevkivituha ja tsemendi segu, mida segati turbapinnasega kuni 4 meetri sügavusel. Poolekilomeetrine lõik jagati viieks võrdseks osaks. Igal osal kasutati stabiliseerimiseks erineva retseptiga tsemendi ja põlevkivituha segu. (23)

Turbapinnase stabiliseerimine Simuna-Vaiatu pilootprojekti teelõigul lõpetati 2013. aasta oktoobris. Suvel 2014 ehitati kivistunud alusele teekate, mille alumised kihid ehitati poole teelõigu ulatuses tsemendi kasutamata keevkihttuhast ja teine traditsioonilisel meetodil ehk kompleksstabiliseerimist kasutades. (23)

Simuna-Vaiatu pilootprojekti tehnilistest näitajatest kontrolliti monitooringu käigus nihketugevust, stabiliseeritud kehade kahanemist, puurkehade survetugevust ja tee kandevõimet. Teelõigu kandevõime hinnati lõpp-aruandes kõrgeks, lisaks tõdeti, et keskkonnamõju ei ole ning CFB (keevkihi) tuhka on võimalik kasutada ka ilma tsemendita. (28)

#### **1.5 Põlevkivituhk sidusainena**

Põlevkivituhk on põlevkivi mineraalne osis, mis jääb järele põlevkivi orgaanilise aine põletamisel, lisaks leidub tuhas mingil määral lupja, mis tekib põlevkivi hulka jäänud lubjakivi põletamisel. Samuti sisaldab põlevkivituhk praktiliselt kõiki perioodilisustabeli elemente, kaasaarvatud raskemetalle. Põlevkivituhka loetakse hüdrauliliseks sideaineks, mis võib kivistuda ja tarduda õhus, kuid vajab selle protsessi käivitamiseks niiskust. Nagu portlandtsement, võib põlevkivituhk kivistuda vees ilma, et õhu juurdepääs oleks vajalik. (29)

Põlevkivituhk kuulub oma koostiselt lubjakivist toodetavate sideainete rühma. Põlevkivituhast võib saada olenevalt selle omadustest, st jahvatusastmest ja kvaliteedist sõltudes, nii madala kui ka keskmise tugevusega sideainet. Võrreldes teiste madala ja keskmise tugevusega sideainetega kivistub põlevkivituhk sideainena tavaliselt aeglasemalt; 56-päevaste katsekehade tugevus võib osutada 1,5 kuni 2 korda suuremaks kui 28-päevastel katsekehadel. Põlevkivituhk sarnaneb oma omadustelt

portlandtsemendile ehk nende tardumiskiirused on samalaadsed. Põlevkivituha tardumisaega mõjutab otseselt vabalubja sisaldus (30). Põlevkivituha kui sideaine omadusi mõjutavad oluliselt ka pikema ajalised ladustamised, kus sellele pääseb ligi õhus leiduv CO<sub>2</sub> kui ka õhus leiduv niiskus, seetõttu pikendab pikaajaline ladustamine põlevkivituha tardumisaega. Põlevkivituha kui sideaine omadusi on võimalik parandada lisanditega, mis aitavad tõsta lõplikke tugevusomadusi ja veekindlust. (29)

## **2. Materjal ja metoodika**

Uurimustöö põhineb laborikatsetel, mis viidi läbi Tartu Ülikooli geoloogia osakonna laboris. Stabiliseerimiskatseks vajalik turvas koguti välitööde käigus Rail Balticu trassilt, põlevkivi keevkiht katelde (KK) tuhk koguti Eesti Energia AS tootmisprotsessi käigus. Laborikatsete käigus tehti kindlaks tuha ning turba omadused, töötati välja sobivad tuhktsement retseptid turbapinnaste mass-stabiliseerimise uurimiseks, seejärel valmistati laboris katsekehad vastavalt väljatöötatud retseptidele ja selgitati välja nende tehnilised omadused.

### **2.1 Mass-stabiliseerimiseks kasutatud materjalid**

#### **2.1.1 Turbaproovid**

Mass-stabiliseerimiskatse läbiviimiseks kasutatud turbaproovid puuriti 2016 aasta detsembris erinevatelt Rail Balticu ehitustrassile jäävatelt rabadest, milleks on:

- Kaigepere raba,
- Rae raba,
- Männiku raba.

Turbaproovid koguti järgnevalt:

- Kaigepere raba – 3 proovi, millest 2 puuriti erinevatelt sügavuselt ning üks paralleelproov terveist läbilõikest;
- Rae raba – 2 erineva lagunemisastmega turbaproovi, millest esimene puuriti alumisest ja teine ülemisest läbilõike osast;
- Männiku raba – 2 paralleelproovi, millest ühega viidi stabiliseerimiskatse läbi nõrgalt happelises keskkonnas ehk pooled Männiku rabast võetud proovid säilitati rabavees.

#### **2.1.2 Kaigepere raba**

Kaigepere raba proovivõtu asukoha koordinaadid on  $x = 6528434$  m ja  $y = 546125$  m.

Turbaproov puuriti mõne ruutmeetri suuruselt alalt, mille piires varieerus turba paksus 3,25-3,35 m. Visuaalselt oli turbalasund võimalik jagada kaheks – ülemine kiht oli tumepruun turvas paksusega 1,25-1,50 m ja alumine helepruun kuni pruun, kohati punakas turvas paksusega 1,8-2 m.

Kaigepere rabast võetud proovid on uurimustöös tähistatud järgmiselt:

- Kaigepere1 – ülemine tumepruun turvas, 0.0-1.5 m (tähis K1);
- Kaigepere2 – helepruun/pruun turvas, kohati punakas alumises lasundis paiknev turvas, 1.5-3.3 m (tähis K2);
- Kaigepere3 – kogu läbilõige 0.0-3.3 m (tähis K3).

### 2.1.3 Rae raba

Rae raba proovivõtu asukoha koordinaadid on  $x = 6583792$  m ja  $y = 551709$  m.

Rae raba turbaproovid on võetud turba tootmisala servalt, ligikaudu 20-50 cm sügavuselt kraavikalda välispinnalt. Rae rabas saab turbalasundi jagada kolmeks oskaks: ülemine heledam vähelagunenud turvas, keskmine punakaspruun keskmiselt kuni vähelagunenud turvas ja alumine tumedam keskmiselt kuni vähelagunenud turvas (Joonis 3).



**Joonis 3.** Rae raba turbakihid ja proovitud intervall. (foto Aivo Averin)

Pealmisest kuivendatud turbakihist proovi ei võetud. Proovid võeti keskmisest ja alumisest kihist. Alumine tumedam kiht algas kraavi veetasemest veidi kõrgemal ning turbaproov võeti ülevalt pool veepiiri kui ka 50-60 cm veepiiri alt.

Rae rabast võetud proovid on uurimustöös tähistatud järgmiselt:

- Rae 1 - keskmine turbakiht, punakaspruun turvas, kihi paksus ca 1,30 m (tähis R1);
- Rae 2 - alumine turbakiht, tumepruun turvas, kihi paksus 0,80 m (tähis R2).

### **2.1.3 Männiku raba**

Männiku raba proovivõtu asukoha koordinaadid on  $x = 6576570$  m ja  $y = 543125$  m.

Männiku raba turbaproovid, sarnaselt Kaigepere rabale, puuriti mõne ruutmeetri suuruselt pindalalt. Välitöödel antud esmase hinnangu kohaselt on turbalasund võimalik jagada kolmeks erinevaks osaks. Ülemine 1,35 m paksune kiht on pruun halvasti kuni keskmiselt lagunenu turvas, keskosas 3,15 m sügavusel lasub punakaspruun halvasti kuni keskmiselt lagunenu turvas ja alumises osas leidub 0,15 m paksune pruuni sapropeeli või turbasegust muda saviliivaga. Orgaanikarikaste kihtide lamamiseks oli savikas kruus ja kruusliiv.

Männiku rabast võetud proovid on tähistatud järgmiselt:

- Männiku 1 – 0...4,5 m halvasti kuni keskmiselt lagunenu turvas (tähis M1),
- Männiku 2 – 0...4,5 m halvasti kuni keskmiselt lagunenu turvas (tähis M2R – hoitud rabavees).

## **2.2 Turba omadused**

### **2.2.1 Lagunemisaste ja humiinainete sisaldus**

Mass-stabiliseerimiskatse läbiviimiseks kasutatud turbad on erinevate lagunemisastmetega (Tabel 3). Kõige madalamas Von Posti faasis, milleks on H2, on Männiku raba turbaproovid M1 ja M2R. Samuti on Männiku rabast puuritud turbaproovid madalaima humifikatsioonistmega, need jäävad vahemikku 0,27–0,29. Männiku raba proovidele on küllaltki sarnane Rae alumise turbakihi näitajad. Von Posti faas on H3 ning humifikatsioonistmeks on 0,56. Ülejäänud turbaproovide Von Post'i faasid jäävad vahemikku H5–H6 ning humifikatsioonistaste 0,44–0,75. Humiinainete (humiinhape, hümatomelaanhape ja fulvohape) sisaldused on vastavalt 12–20%, 3–10% ja 1–2%

piirides ning on sarnased keskmistele näitajatele, mida omavad erineva lagunemisastmetega turbad Eestis.

**Tabel 3.** Lennart Von Post faas, humifikatsiooniaste ja humiainete sisaldused. HA- humiinhape, HMA-hümatomelaanhape, FA- fulvohape.

Proov	Tähis	Humi- fikatsiooni aste	Von Post faas	HA, %	HMA, %	FA, %
Männiku 1	M1	0.29	H2	14.5	3.2	1.3
Männiku 2	M2R	0.27	H2	12.2	4.9	1.1
Rae alumine	R2	0.56	H3	16.7	7.8	1.7
Rae ülemine	R1	0.75	H5	18.0	10.1	2.1
Kaigepere 1	K1	0.46	H6	17.3	8.4	1.6
Kaigepere 2	K2	0.44	H6	19.7	9.9	1.6
Kaigepere 3	K3	0.50	H6	20.1	6.6	1.8

Lennart Von Posti faaside selgitused on toodud LISAS 1.

### 2.2.2 Turba füüsikalised omadused

Turbaproovide füüsikalised omadused on esitatud tabelis 4. Tabelis on välja toodud turbaproovi keskmine veesisaldus enne stabilisaatori lisamist. Kaigepere, Rae ja Männiku rabadest võetud proovid esindavad laia valikut Eesti turbatüüpidest. Stabiliseerimiskatseks kasutatud turbaproovide veesisaldused jäävad vahemikku 435% kuni 1285%.

**Tabel 4.** Turbaproovide keskmine erikaal  $G_s$ , veesisaldus  $w_N$  (%), veeküllastusaste  $S_r$ , poorsustegur  $e$ , poorsus  $n$ , kuivmahukaal  $\gamma_d$  ja mahukaal  $\gamma_n$ .

	$G_s$	$w_N$ , %	$S_r$	$e$	$n$	$\gamma_d$ , kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_n$ , kN/m <sup>3</sup>
Männiku 1	1.64	1284.1	1	21.06	0.95	0.73	10.09
Männiku 2	1.57	1220.8	1	19.17	0.95	0.76	10.09
Rae 1	1.46	458.1	1	6.69	0.87	1.86	10.40
Rae 2	1.52	789.1	1	11.99	0.92	1.15	10.20
Kaigepere 1	1.63	435.1	1	7.09	0.88	1.98	10.57
Kaigepere 2	1.55	632.4	1	9.80	0.91	1.41	10.31
Kaigepere 3	1.64	498.9	1	8.18	0.89	1.75	10.49

## 2.3 Põlevkivi CFB tuha omadused

Põlevkivi KK tuha omadused määrati IPT Projektijuhtimise OÜ tellimusel Tallinna Tehnikaülikooli laboris. Turbaproovide stabiliseerimisel kasutati 22.12.2016 laborisse viidud KK tuhka.

Kõik tabelis 5 esitatud näitajad nagu CFB tuha peensus, vaba kaltsiumoksiidi, kloriidi ning sulfaadisisaldus, mahupüsivus ja normaalkonsistents määrati Eesti Standardikeskuse poolt väljastatud standardite kohaselt. Märkimisväärne tardumisaegade erinevus ilmnes 22.12.2016 laborisse esitatud proovil. Kõrvutades teiste proovidega, oli 22.12.2016 laborisse viidud proovide tardumisaja algus olulise ajalise hilinemisega, võrreldes veebruaris laborisse viidud proovidega (840 minutit ja 45-50 minutit), samuti fikseeriti tardumise lõpp hilinemisega (1440 minutit ja 260-320 minutit).

**Tabel 5.** CFB tuha tihedus, eripind, vaba CaO ja kloriidide sisaldus mahupüsivus, normaalkonsistents ja tardumisajad

Proov laborisse	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Eripind, m <sup>2</sup> /kg	CaO vaba	Kloriidide sisaldus, %	SO <sub>3</sub>	Taigna normaal-konsistents, %	Tardumisaeg algus, min	Lõpp, min	Mahupüsivus, (SO <sub>3</sub> > 4%)
22.12.2016	2,73	225	9,67	0,36	5,82	64,0	ca 14 h	ca 24 h	Rahuldab nõude
02.02.2017	2,74	221	10,66	0,29	5,68	64,0	50	320	Rahuldab nõude
17.02.2017	2,75	223	9,9	0,28	5,91	64,0	45	260	Rahuldab nõude

Proovide survetugevus määrati samuti Eesti Standardikeskuse poolt väljastatud EVS-EN 196-1 standardi kohaselt. Tuha mõrdist valmistatud 3 proovi, mõõtmetega 40x40x160 mm, kivistati temperatuuril (20±2) °C 48 h ning niiskusel > 95% vormides ja edasi kuni katsetamiseni 28 ja 56 päeva vanuselt. Survetugevuse mõõtmiseks poolitati katsekehad ning saadud tulemused on esitatud Tabelis 6.

**Tabel 6.** CFB tuha mörtide survetugevus, N/mm<sup>2</sup>

Proov laborisse	Katsekeha valmistamine	28 päeva	56 päeva
22.12.2016	16.01.2017	2,5	3,4
02.02.2017	08.02. 2017	3,0	4,0
17.02.2017	21.03.2017	3,6	3,8

## 2.4 Mass-stabiliseerimiseks kasutatud retseptid

Stabiliseerimiskatse retseptide valmistamisel kasutati 22.12.2016 laborisse viidud CFB tuhka ning tsementi CEM I 42,5N. Iga retsepti puhul jälgiti, et kõikides segudes oleks võrdses koguses sideainet. Turba stabiliseerimiskatse jaoks valiti välja kolm erinevat segu:

- Segu I – portlandtsement ja turvas vahekorras 300 kg/m<sup>3</sup>;
- Segu II – portlandtsement 50 kg/m<sup>3</sup> ja keevkihi katelde tuhk 250 kg/m<sup>3</sup> turbaga. Antud segu on valimi ökonoomseim;
- Segu III – põlevkivi keevkihi katelde tuhk turbaga vahekorras 300 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.5 Katsekehade valmistamine

Mass-stabiliseerimiskatse läbiviimiseks, turbapinnaste kivistumisprotsessi uurimiseks ja tsementeeriva aine mõju selgitamiseks segude füüsikalistele ja mehaanilistele omadustele valmistati peatükis 2.4 kirjeldatud vahekordades tsement/tuhk/turvas segud ja seejärel asetati 70 mm läbimõõduga torudesse, mille pikkused jäid vahemikku 180–200 mm. Kokku valmistati 144 katsekeha. Peale segude vormi kallamist asetati neile 18 kPa vertikaalne koormus, selle abil stabiliseeritava segu mass tihendatakse ja vesi surutakse segudest välja, mis soodustab tsementeerivate sidemete tekkimist (Joonis 4). Vormi asetatud segud valmistati nende loodusliku niiskuse juures ning torudesse pakitud proove säilitati vannides veega kaetult. Stabiliseerimiskatse segude ettevalmistamisel ning torudesse valamisel järgiti EuroSoilStab juhiseid (11).



**Joonis 4.** Katsekehad vesivannis koos 18 kPa suuruse vertikaalraskusega

Erinevus EuroSoilStab juhendist seisneb selles, et antud katse käigus säilitati proove tervenisti veega täidetud vannides, kuigi EuroSoilStab juhistest sõltuvalt peaksid katsekehad olema vaid osaliselt veega kaetud. Kuid kuna reaalsuses asuks mass-stabiliseeritav raudtee alune pinnas veega küllastunud turbasoo alal ning sideainete tsementeeruvad omadused otseselt sõltuvad sellest, kas katsekehadele on õhu vaba juurdepääs või mitte, siis lähtuvalt sellest hoiti ka laboris proovid pidevalt vee all.

Vesivannide täitmiseks kasutati Tartu veevärgi kraanivett, mille  $\text{pH} = 7,32$ , välja arvatud Männiku 2 turbast valmistatud stabiliseerimissegudel, mida säilitati rabavees ( $\text{pH} = 4,72 \dots 4,98$ ). Rabavesi transporditi laborisse Tartumaal asuvast Laukasoo raba looduslikust laukast. Rabavett vahetati igal survetugevuse testimise etapil ning 240 ja 300 päeva möödumisel enne viimast testimist (Joonis 5).



**Joonis 5.** Survetugevuse mõõtja ning mõõtmata katsekehad

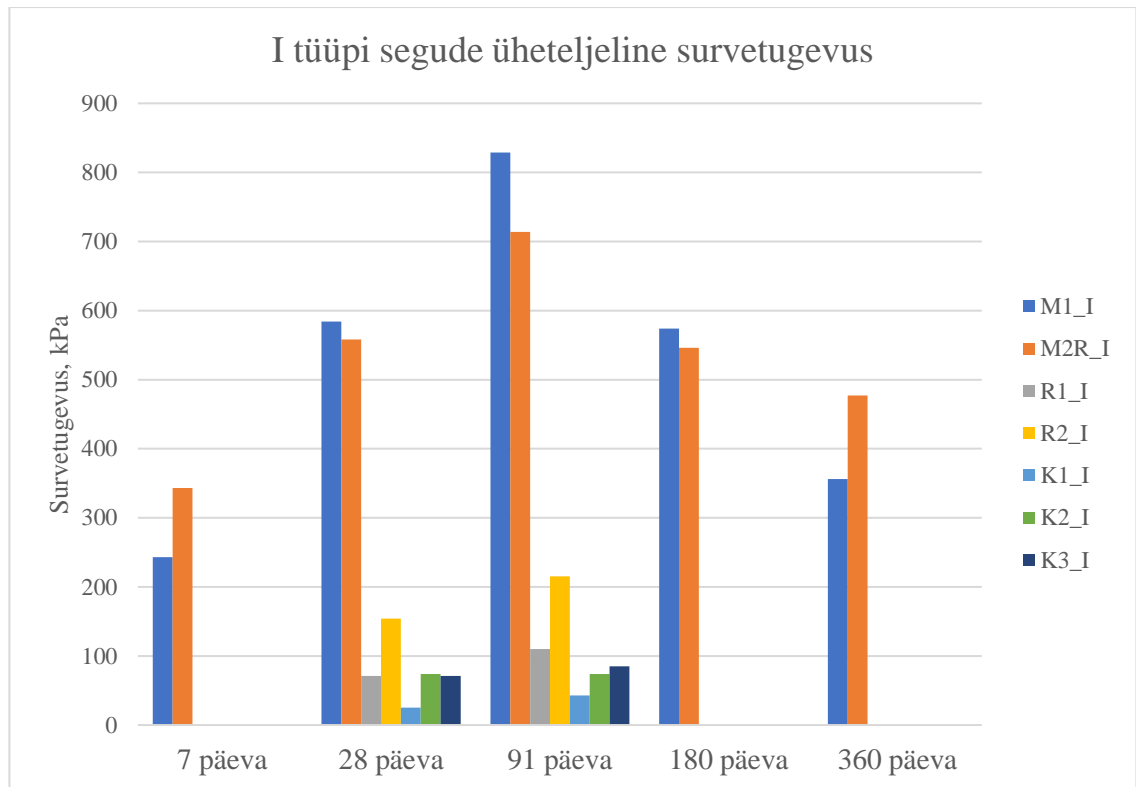
### 3. Tulemused

Katsekehadel määrati üheteljeline survetugevus segude tsementeerumisvõime selgitamiseks vastavalt CEN ISO/TS 17892-7:2004-le (31). Vesivannides olnud katsekehade survetugevusi mõõdeti peale 7, 28, 91, 180 ja 360 päeva möödumist. Männiku rabast võetud proovide puhul mõõdeti katsekehade üheteljelisi survetugevusi igal mõõtmiskorral. Võrdluseks sooritati Kaigepere ja Rae rabade katsekehadega survetugevuse katsed 28 ja 91 päeva möödumisel. Survetugevuse mõõtmistele eelnevalt lasti katsekehadel ligikaudu kaks tundi nõrguda ning seejärel tuvastati survetugevuskatse käigus katsekeha lõplik purustav koormus, mille saavutamise esimeseks indikaatoriks oli katsekehasse esimese prao tekkimine. Iga proovi puhul sooritati mõõtmine paralleelselt kahe katsekehaga ning tabelis 6 on esitatud kahe mõõtmistulemuse keskväärtus.

**Tabel 6.** Stabiliseeritud turbaproovide üheteljelise survetugevuse väärtused, kPa

Segu	7 päeva	28 päeva	91 päeva	180 päeva	360 päeva
M1_I	243	584	829	574	536
M1_II	18	35	37	53	62
M1_III	12	29	38	49	54
M2R_I	343	558	714	546	477
M2R_II	22	53	96	68	57
M2R_III	31	28	55	69	53
R1_I		71	110		
R1_II		29	48		
R1_III		18	54		
R2_I		154	215		
R2_II		29	46		
R2_III		21	46		
K1_I		25	43		
K1_II		10	21		
K1_III		12	23		
K2_I		74	74		
K2_II		17	23		
K2_III		14	25		
K3_I		71	85		
K3_II		14	19		
K3_III		14	26		

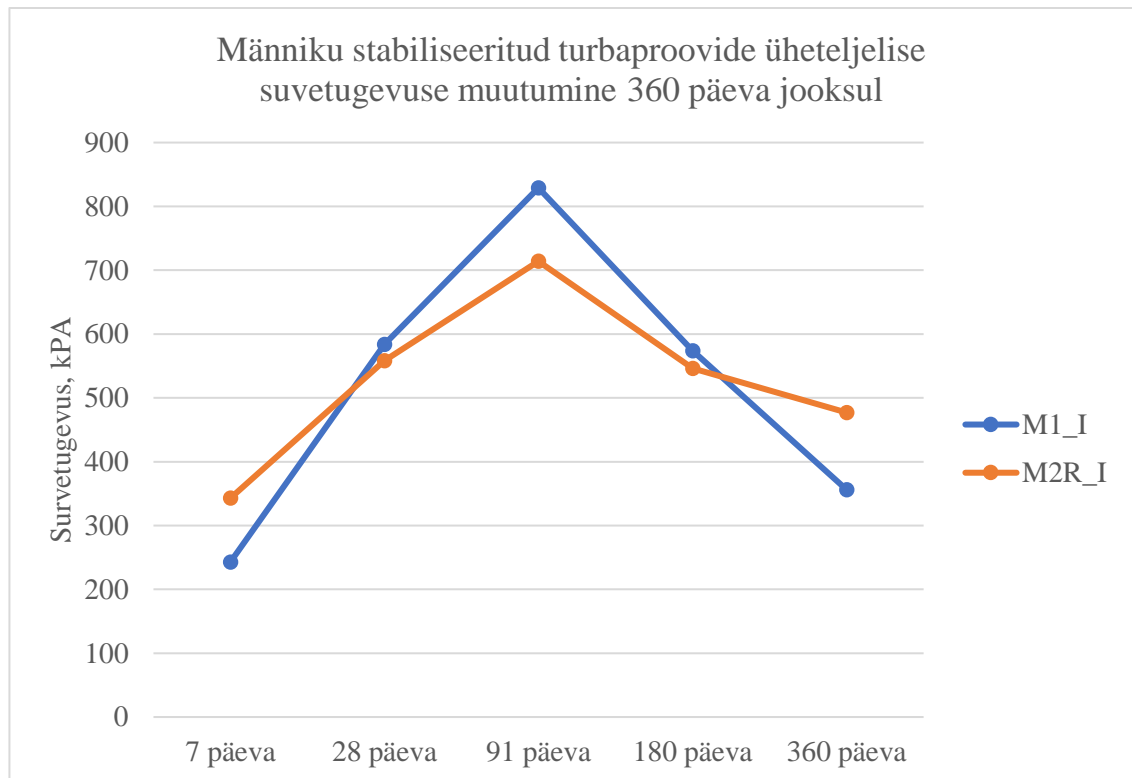
Suurimat lõpptugevust ning kiireimat tsementeerumist näitasid I segu katsekehad, milleks on tsement-turvas segud vahekorras 300 kg/m<sup>3</sup> (Joonis 6). Antud segude puhul saavutati suurim tugevus 91. päevaks. Suurimaid tugevusi näitasid Männiku raba proovid, mille segude survetugevus oli juba 7. päeval üle 200 kPa, 28. päeval üle 500 kPa. Maksimum survetugevus Männiku raba turvastega saavutati 91. päevaks, mis olid suuremad kui 700 kPa, M1 katsekehadel isegi üle 800 kPa. Järgmisel mõõtmisel, st 180. päevaks olid katsekehade tugevused langenud samale tasemele, mis 28 päeva möödudes ehk ligikaudu 550 kPa-le. Survetugevused püsisid enamvähem samad 360. päeval mõõdetud tulemustega, kuid siiski oli märgatav väike tugevuste langus. Selline langus võib viidata tsementatsiooni- ja niiskuse nõrgenemisele, mis on tingitud pidevast kontaktist veega.



**Joonis 6.** I tüüpi segude (tsement-turvas) üheteljeline survetugevus proovide kaupa 7, 28, 91, 180 ja 360 päeva vanuselt

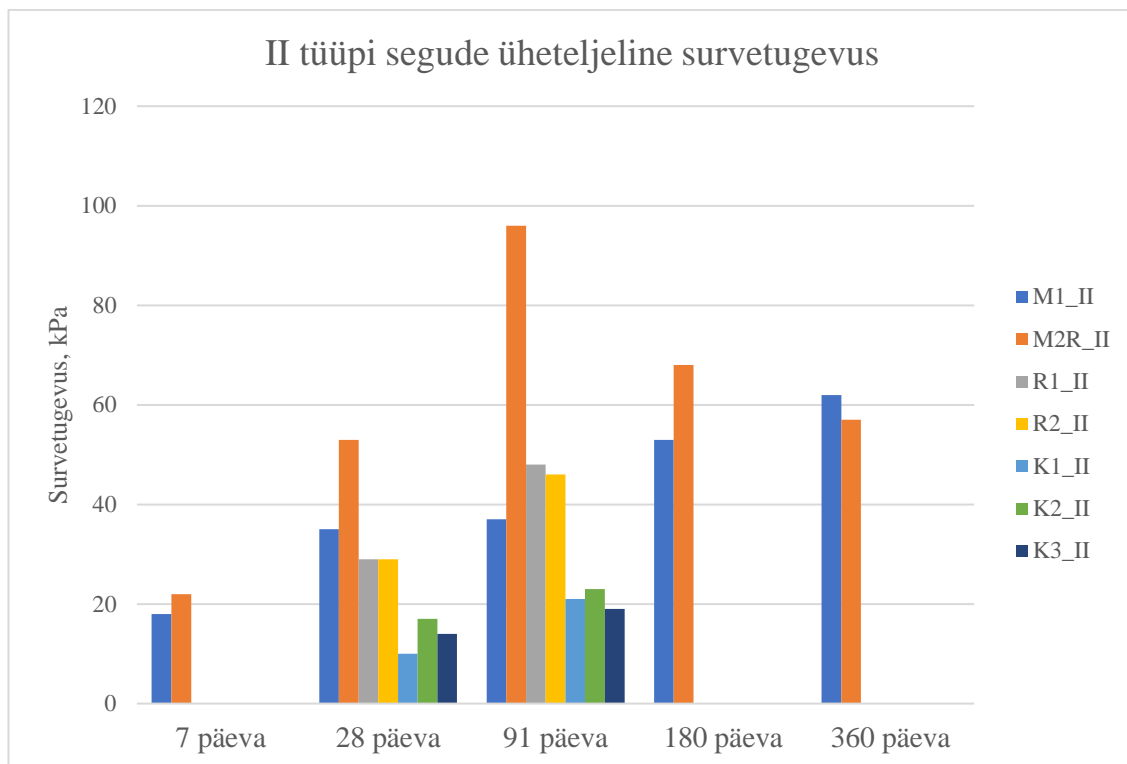
Esiolgu tsementeerumine, st 7 päeva tugevus on kõrgem rabaveega kaetud katsekehadel (Joonis 7), erinevus üheteljeliste survetugevuste vahel Männiku raba katsekehadel kaob praktiliselt 28. päevaks, kuid 91 päeva vanusetel segudel on I segu tugevus suurem kraanivees hoitud proovidel kui rabavees säilitatud proovidel. M1 segu saavutab keskmiseks tugevuseks 828 kPa ja M2R 714 kPa. Peale 180 päeva möödumist on

survetugevused Männiku raba turvastel jälle praktiliselt võrdsed – M1 572 kPa ja M2R 546 kPa. Viimase mõõtmise tulemusena saadud tugevused näitavad, et 360 päeva möödudes omavad kõrgemaid tugevusi just rabavees hoitud katsekehad. Rabavees hoitud tsement-turvas segud ehk M2R katsekehad on säilitanud tugevuse 536 kPa, kui kraanivees hoitud katsekehade keskmine tugevus on langenud 477 kPa-ni.



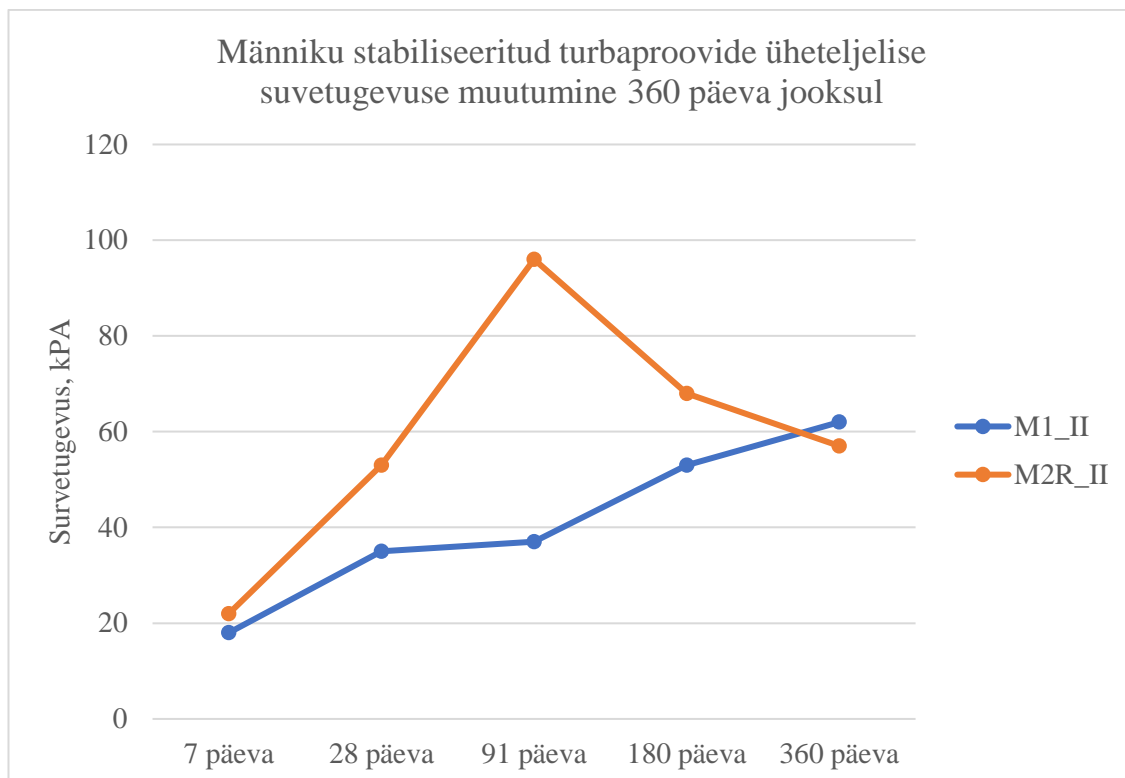
**Joonis 7.** Männiku stabiliseeritud turbaproovide üheteljelise survetugevuse muutumine 360 päeva jooksul I segu puhul

Samalaadne tendents jätkub ka II segu puhul (tsement/tuhk-turvas), mis tähendab, et parim tugevusnäitaja saavutatakse 91. päevaks, kuid segu II puhul saavutab parima tulemuse rabavees hoitud katsekehade keskmine survetugevus. Oluline on välja tuua, et segu II kui ka segu III puhul on tugevusnäitajad oma suurusjärgult oluliselt väiksemad kui segu I puhul. M1 tüüpi katsekehade kõrgeimaks survetugevuseks on 67 kPa ja M2R tüüpi proovidel 98 kPa. Tsement/tuhk-turvas segude puhul olid mõõtmistulemused neljal korral viiest paremad rabavees hoitud katsekehadel, kui Tartu kraanivees hoitud proovidel (Joonis 8).



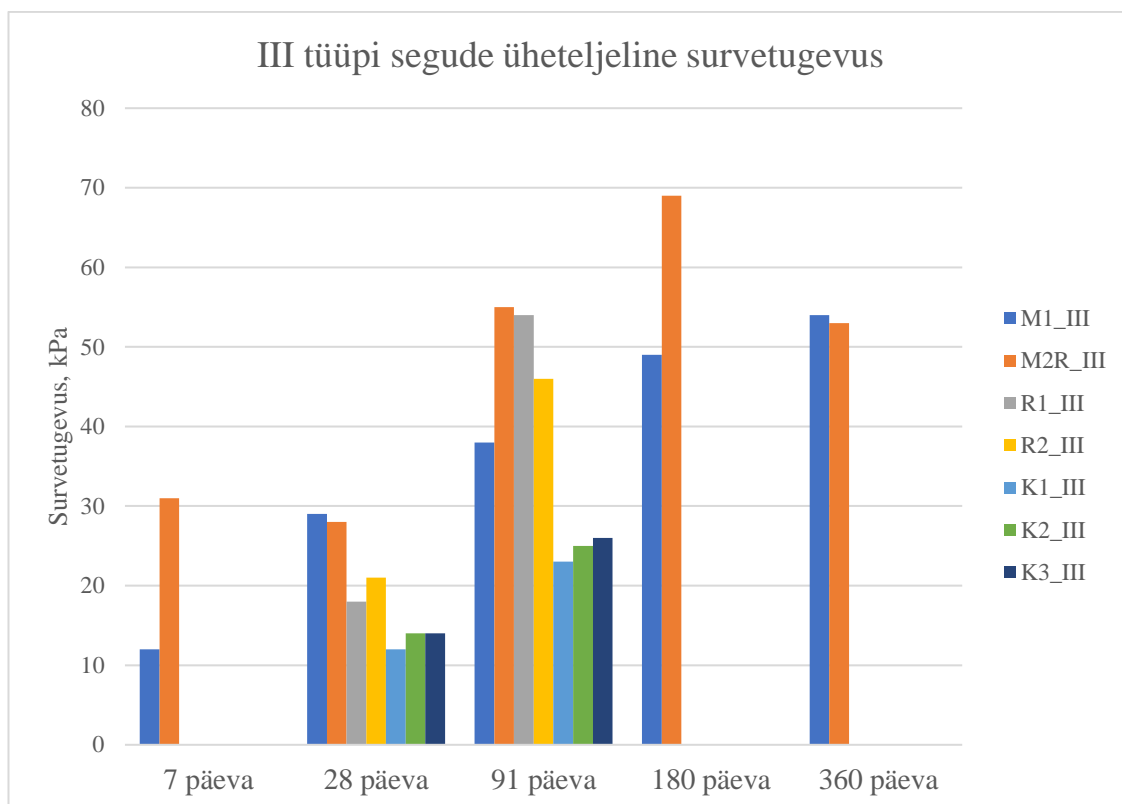
**Joonis 8.** II tüüpi segude (tsement/tuhk-turvas) üheteljeline survetugevus proovide kaupa 7, 28, 91, 180 ja 360 päeva vanuselt

Märkimisväärne näitaja segu II puhul on, et Männiku rabast võetud ning kraanivees säilitatud katsekehadel toimus 360 päeva jooksul mõõdukas survetugevusnäitajate tõus, samas, kui rabavees hoitud Männiku katsekehade tugevused vähenesid 180 päeva möödudes 96 kPa-lt 68 kPa-le. Antud langus võib viidata tsementatsioonisidemetel nõrgenemisele tänu pikaajasele viibimisele madala pH-ga keskkonnas. Aeglasemalt, kuid sarnane tendents ilmnes ka 360-päevastel proovidel ehk rabavees säilinud katsekehade tugevusnäitajad olid langenud 68 kPa-lt 57 kPa-ni. Vastandina tõusid kraanivees hoitud katsekehade survetugevused 360 päeva möödudes 67 kPa-ni, olles saavutanud peaaegu samasugused tugevusnäitajad, kui algselt suuremat tugevust näidanud M2R tüüpi katsekehad (Joonis 9).



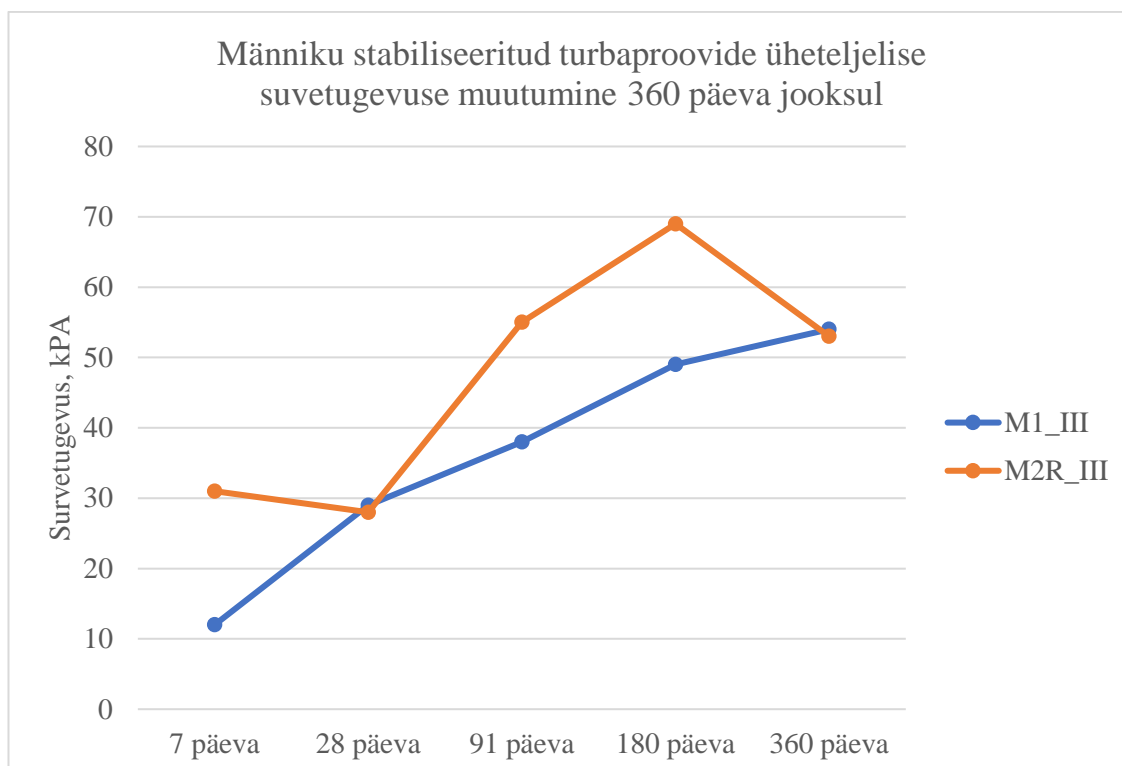
**Joonis 9.** Männiku stabiliseeritud turbaproovide üheteljelise suvetugevuse muutumine 360 päeva jooksul II segu puhul

Vaid tuhaga stabiliseeritud katsekehade maksimaalsed tugevused saavutati 180. päevaks. Rabavees hoitud Männiku raba katsekehade suvetugevused tõusid 69 kPa-ni. Kraanivees hoitud katsekehade suurim keskmine tugevus mõõdeti 360 päeva möödudes, milleks oli M1 tüüpi katsekehadel 54 kPa. Segu III puhul näitasid suhteliselt kõrgeid keskmisi tugevusi ka Rae raba proovikehad, saavutades 48 kPa tugevuse (Joonis 10).



**Joonis 10.** III tüüpi segude (tuhk-turvas) üheteljeline survetugevus proovide kaupa 7, 28, 91, 180 ja 360 päeva vanuselt

Männiku rabast võetud katsekehade tugevusnäitajate moodustamisel omas suurt tähtsust keskkond, milles kehasid hoiti. Selgelt eristuvad rabavees hoitavate katsekehade tugevusnäitajad, mis näitavad ka kiiremat tsementeerumist. Samas 360 päeva vanustel proovidel on rabavees hoitud katsekehade tugevused langenud enamvähem samale tasemele, mis kraanivees hoitud proovide tugevusnäitajad, so M1 saavutas 360 päevaga üheteljelise survetugevuse 54 kPa ning rabavees hoitud katsekehade tugevused langesid 360-ks päevaks 53 kPa-ni (Joonis 11).

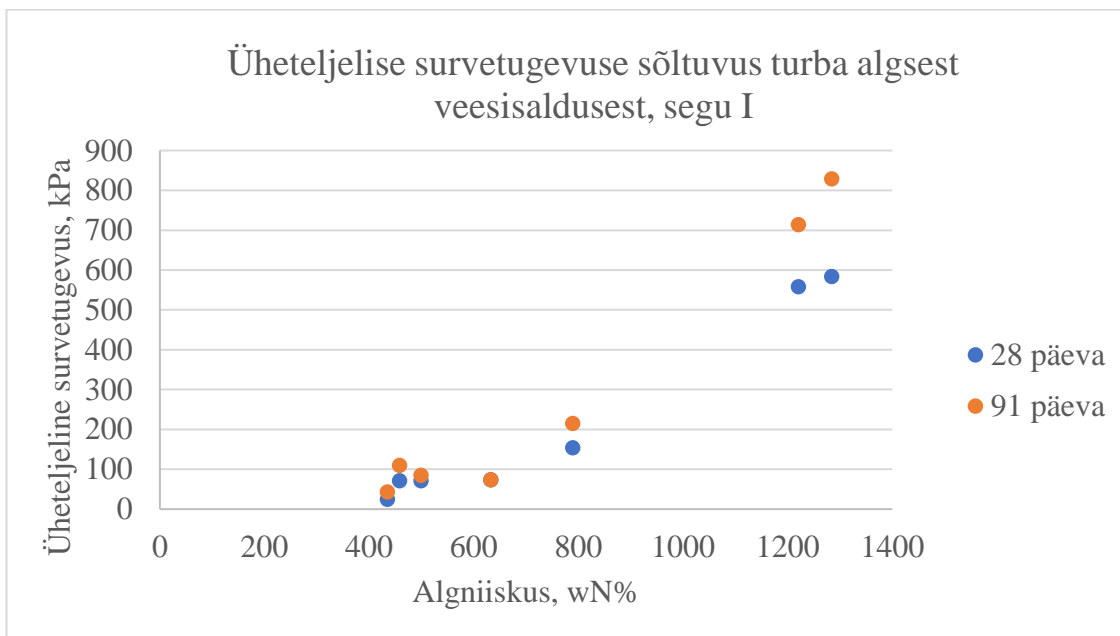


**Joonis 11.** Männiku stabiliseeritud turbaproovide üheteljelise survetugevuse muutumine 360 päeva jooksul III segu puhul

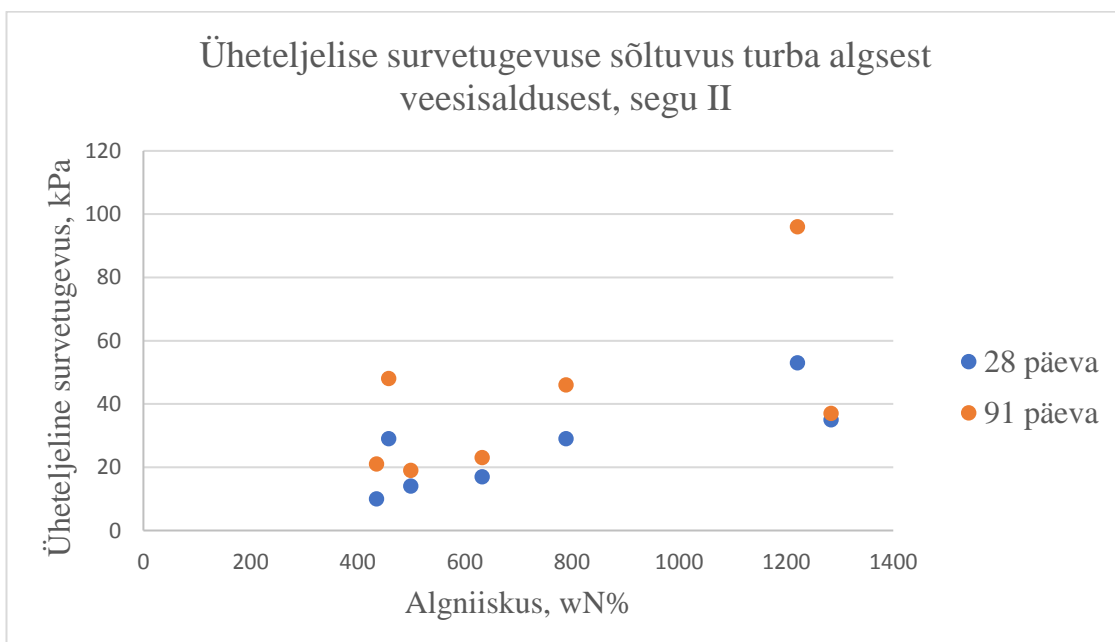
Kaigepere, Rae ja Männiku turbapinnaste võrdluses tuleb ilmsiks asjaolu, et madalaimad tugevusväärtused on saavutatud vaid tuhaga stabiliseeritud katsekehadel ning tugevaimad puhta tsemendiga stabiliseeritud katsekehadel. Üheteljeliste survetugevuste vahed I ja III segu vahel on ligi 12-kordsed. Kindlasti on oluline märkida, et peale poole ja terve aasta pikkust leostumist kraanivees, jätkus tuhka sisaldavate katsekehade üheteljelise survetugevuse suurenemine, aga rabavees säilitatud katsekehadel toimus peale 180 päeva möödumist tsementatsioonisidemete lagunemine, mis otseselt väljendub survetugevuste vähenemises. Samalaadne tugevuste vähenemine leidis aset ka I segu nii raba- kui ka kraanivees hoitud katsekehadel.

Selge seos esineb erinevate segude üheteljeliste survetugevuste ja turbapinnase algse veesisalduse vahel (Joonis 12; Joonis 13; Joonis 14). Paremini avaldub antud seos 28-päevaste katsekehade survetugevuste vaatlemisel, kui turba veesisalduse suurenedes kõikide segude (I, II ja III) puhul ka survetugevus tõuseb. Eriti hästi on see vaadeldav joonisel 12. 91-päeva vanuste katsekehade puhul nii sirgjoonelist seost ei ole, kuid suurimad tugevused saavutavad ikkagi suurima algniiskusega katsekehad. Selline

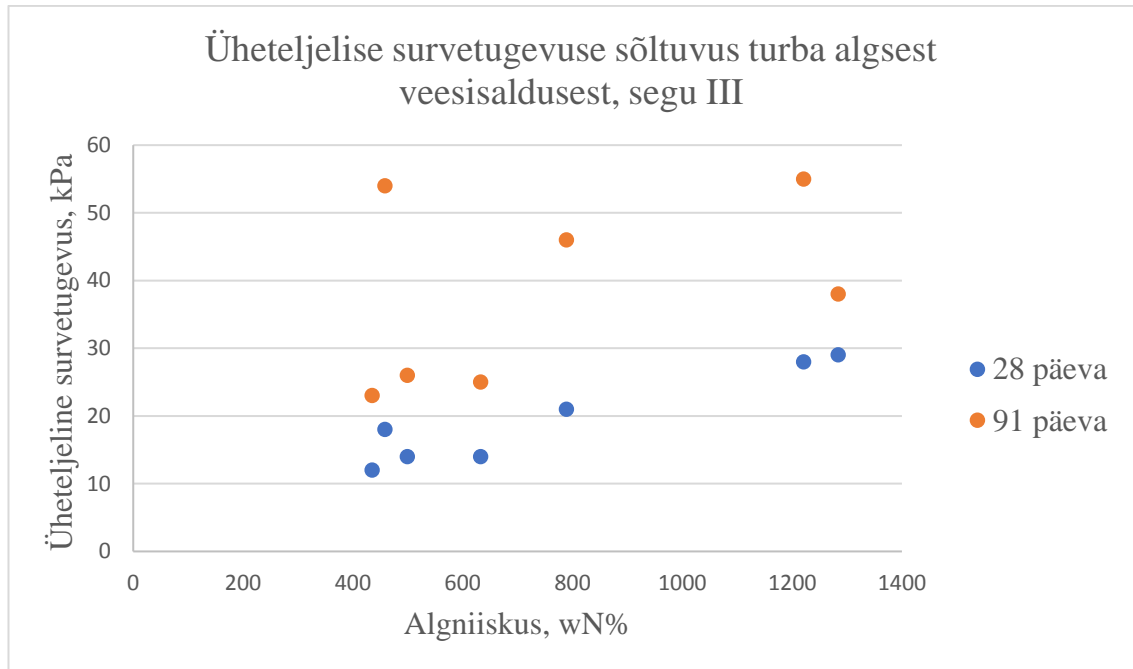
tendents võib viidata asjaolule, et madala algniiskusega turbapinnases jääb algseks hüdratiseerumiseks vaba vett väheseks ning tsementeerumise seisukohalt on väga tähtis piisava hulga vee kättesaadavus kivistumisprotsessi alguses.



**Joonis 12.** Üheteljeline survetugevuse sõltuvus turba algsest veesisaldusest segu I (turvas-tsement) puhul



**Joonis 13.** Üheteljeline survetugevuse sõltuvus turba algsest veesisaldusest segu II (turvas-tsement/tuhk) puhul



**Joonis 14.** Üheteljelise survetugevuse sõltuvus turba algsest veesisaldusest segu III (turvas-tuhk) puhul

Samas võib välja lugeda, et katsekehade survetugevuse kasv pidurdub pidevalt veeküllastunud tingimustes, kuna karboniseerimiseks vajalik CO<sub>2</sub> juurdepääs on piiratud ning seetõttu muutub tsementeerumine aeglasemaks. Liigne vee hulk stabiliseerimisprotsessi ajal soodustab põlevkivituhas sisalduvate klinkrimineraalide intensiivsemat lahustumist, st omakorda nõrgemate sidemete moodustumist.

## 4. Arutelu

Mass-stabiliseerimiskatse segude kõrvutamisel selgub, et kõige suuremate tugevusnäitajatega seguks osutus segu, mis ei sisaldanud põlevkivituhka vaid hoopis puhast tsementi. Seega võib järeldada, et suurima mass-stabiliseerimispotentsiaaliga on segu I, sest segude II ja III maksimaalsed survetugevused küündisid vaid 95 kPa-ni, kui tsement-turvas segu maksimaalseks tugevuseks mõõdeti 829 kPa (Joonis 6; Joonis 8; Joonis 10). Samuti omasid suurimat lõpptugevust tsement-turvas seguga katsekehad peale 360 päeva möödumist, kuigi segu I katsekehade tugevused hakkasid vähenema peale 91. päeva vesivannides leostumist. Segu I ja segude II ning III lõpptugevused erinesid üksteisest 8-10 kordselt.

Tulemustest on näha, et katsekehade üheteljeline survetugevuse kasv pidurdub veeküllastunud keskkonnas säilitamisel. Selle üheks põhjuseks võib olla karboniseerumisreaktsiooni pidurdumine, kuna selleks protsessiks vajalik õhu ning CO<sub>2</sub> juurdepääs on vesikeskkonnas piiratud. Lisaks tuleb tsemendi kivistumisel arvestada, et suurem vee hulk katsekehades põhjustab klinkrimineraalide lahustumist ning tänu sellele tekivad katsekehades nõrgemad sidemed. Samuti põhjustab veeküllastatud olek proovides mikropoorsuse tekkimist, mis samamoodi vähendab katsekehadel potentsiaali saavutada kõrgemaid survetugevusi.

Märkimisväärne on fakt, et kõikide katsekehade üheteljeline survetugevus ei hakanud langema peale 91 või 180 päeva möödumisel. Segude II ja III puhul, mis sisaldavad tuhka, toimus kraanivees hoitud proovidel mõõdukas tugevuste kasvamine, kuid tugevuse kasv absoluutväärtustes on väike. Kõikidel rabavees hoitud katsekehadel seevastu algas tsementatsiooni- ja sidemete nõrgenemine vähemalt 180 päeva möödumisel, see väljendus otseselt survetugevusnäitajate vähenemises. Survetugevusnäitajate vähenemine on selgitatav keskkonna pH-ga, milles hoiti proove. Nimelt rabavees hoitud katsekehade tsementeerumisprotsess toimus happelises keskkonnas ning madala pH-ga keskkond lahustab tsementatsiooni- ja sidemeid.

Tsement-turvas segude puhul kiirendab veega küllastunud keskkond küll algset tsementatsiooni, kuid survetugevuste vähenemine algas I segul juba 91-st päevast ning tugevuste vähenemine leidis aset nii kraanivees kui ka rabavees hoitud katsekehadel. Antud tulemuste põhjal võib arvata, et pikaajaliste mass-stabiliseerimisprojektide puhul,

kui stabiliseeritav pinnas on veega küllastunud, ei ole tsemendipõhiste stabiliseerimisretseptide kasutamine võimalik.

Mass-stabiliseerimisekatse tarvis kasutatud turbaproovides leidub väga vähe mineraalainest ehk tahkist, seetõttu toimub katsekehade kivistumine peamiselt tänu sideainele, mis moodustab nõ tugiraamistiku katsekehade sisse. Paremad tugevusnäitajad võiks saavutada, kui katsekehadele lisaks sideainele, lisada veel vee suhtes inertset mineraalainest. Nendeks materjalideks võib olla liiv, kruus, väikese plastsusega moreen või hoopis aheraine, mis jääb üle põlevkivi rikastamisel. Inertse mineraalainese abil oleks võimalik mass-stabiliseeritavasse pinnasesse tekitada tugikonstruktsioone, mida sideaine omadustega oleks võimalik tsementeerida. Põlevkivituhk sobib kooslusesse, tänu putsonaalsete tsementatsiooniliste sidemete tekkimisele, mistõttu ei pea mineraalainest tihendama. Pikema aja jooksul aitaksid putsonaalsed protsessid kaasa pinnase tugevuste suurenemisele.

Põlevkivituha ja tsemendi kasutamine stabiliseeriva sideainena veega küllastunud turbapinnaste stabiliseerimiseks antud uurimustöö põhjal ei sobi, sest sarnaselt laborikatsetes tekitatud veeküllastunud keskkonnale, oleks taoline olukord ka Rail Balticu trassile jäävate rabadega. Tee ja teetööde kvaliteedinõuete kohaselt peab hüdraulilise sideainega stabiliseeritud katsekehade survetugevus olema 7 päeva möödudes vähemal 2 MPa ning 28 päeva möödudes 4-12 MPa ning antud katse käigus taolisi tulemusi ei saavutatud (32). Katse jaoks kasutatud KK põlevkivituhk töötab mass-stabiliseerimisel peamiselt mineraalse mittetsementeeruva või vähetsementeeruva sideainena, mille abil on võimalik vähendada turbapinnase deformatsiooni ning suurendada pinnase tugevust, kuid saavutatud tugevus ei ole sobiv raudteetrassi ehitamiseks antud meetodiga.

Põlevkivituha oleks võimalik turbapinnaste mass-stabiliseerimiseks kasutada koos inertsete täitematerjalidega nagu liiv, kruus jms ning ainult juhul kui toimub suuremahuline turba asendamine mineraalpinnasega. Antud juhul moodustaks tuhk tugevad tsementatsioonisidemed täitepinnase osakeste vahel. Samuti oleks taolise stabiliseerimise alguses võimalik lisada segusse vajalikku veekogust, mille abil protsessi käivitada.

Põlevkivituha kasutamisel turbapinnaste stabiliseerimisel võiks lisavõimaluseks olla stabiliseeritava massi eelkoormamine tunduvalt suurema eelkoormuse all, kui seda on 18kPa. Eelkoormamiskihi koormus pinnasele peaks olema võrdeline raudteeliikluse poolt tekitatava koormusega. Põlevkivituha kasutamise efekt eelkoormamismeetodi puhul seisneb selles, et stabiliseeritud turbasegu mass tiheneb ajaliselt kiiremini ning absoluutväärtuses oluliselt vähem kui stabiliseerimata turvas.

Hetkel oleks põlevkivituhaga mass-stabiliseerimist mõttekas kasutada Rail Balticu trassi rajamiseks vajaminevate väiksema koormusega teenindusteede ja platside ehitamiseks, mis ei vaja suuri tugevusi ega pea vastu pidama aastakümnete pikkusele intensiivsele kasutamisele.

## Kokkuvõte

Rail Balticu ehitamiseks on tarvis leida tehnoloogia, mis täidaks ehitustehnilisi aspekte, kuid oleks ka majanduslikult võimalikult soodne. Üheks võimalikuks meetodiks on mass-stabiliseerimine, mille abil on stabiliseeritud nõrku pinnaseid nii maailmas kui ka Skandinaavias. Mass-stabiliseerides erinevate sideainetega on saadud tulemusi, mis võimaldavad ehitada pehmetele pinnastele raudteid, maanteid ning elamurajoone.

Varasemate uuringute põhjal, mis on Eestis läbi viidud, hinnatakse põlevkihituha kasutamise potentsiaali kõrgeks, kuid oluline on märkida, et nende katsete puhul on katsekehad ainult poolenisti vees viibinud. Rail Balticu trassile rajatav mass-stabiliseeritud ala aga oleks veega küllastunud konstantselt, seega ei kirjelda varasemad uuringud täpselt olukorda, mis valitseks raudteetrassi rajamisel praeguse Rail Balticu projekti kohaselt.

Käesolev magistritöö annab ülevaate mass-stabiliseerimisest kui tehnoloogiast ning tutvustab näiteid pehmete pinnaste stabiliseerimisest nii maailmas kui ka Eestis. Uurimustöö peamine eesmärk oli välja selgitada, kas põlevkivituhk eraldi või segatud tsemendiga on sobiv sideaine stabiliseerimaks veega küllastunud turbapinnaseid. Sealhulgas selgitati turba algse veesisalduse mõju stabiliseerimisprotsessi kulgemisel.

Tulenevalt töö eesmärgist viidi aasta jooksul läbi laboratoorne katse, millega uuriti erinevate katsekehade üheteljelise survetugevuse kujunemist. Kokku valmistati katsekehi kolme erineva retsepti järgi – tsement-turvas, tsement/tuhk-turvas ja tuhk-turvas. Proove säilitati nii kraanivees kui ka rabavees 18 kPa vertikaalraskuse all. Katsekehadel kujunenud survetugevusi mõõdeti 7, 28, 91, 180 ja 360 päevase sammuga.

Tulemustest selgus, et suurimad üheteljelised survetugevused saavutasid tsement-turvas segud, mille suurimaks tugevuseks oli 829 kPa. Kõrgeima survetugevusnäitajatega olid Männiku raba proovid, mida hoiti kraanivees. Parimad tulemused saavutati 91-ks päevaks, seejärel hakkasid katsekehade tugevusnäitajad langema ning 360 päeva möödudes oli parimate tulemustega katsekehade keskmiseks üheteljeliseks tugevuseks 536 (M2R) ja 477 kPa (M1). Kolmest stabiliseerimissegust näitasid teisena parimaid omadusi tsement/tuhk-turvad retseptiga proovid. Antud stabiliseerimisretsepti tulemused olid märkimisväärselt madalamad, kui ainult tsemendiga stabiliseeritud katsekehadel. Parimad tugevusnäitajad saavutas rabavees hoitud, Männiku rabast võetud turbaproov,

kuid keskmiseks tugevuseks oli vaid 96 kPa. Sarnaselt tsement-turvas segudele algas ka rabavees hoitud tsement/tuhk-turvas segudel tugevusnäitajate alanemine peale 91 päeva. Aasta möödudes olid Männiku raba turbast valmistatud katsekehade tugevused, mida hoiti rabavees ning kraanivees vastavalt 57 ja 62 kPa. Kraanivees hoitud katsekehad näitasid mõõdukat survetugevuste suurenemist aasta vältel. Kõige kehvemad survetugevused saavutati ainult tuhaga stabiliseeritud katsekehadel. Samalaadselt tsement/tuhk-turvas segudele oli kõige kiirema tsementatsiooniprotsessiga rabavees hoitud Männiku raba katsekehad, mis saavutasid suurima tugevuse 180-ks päevaks, kuid suurimaks tugevuseks mõõdeti vaid 69 kPa. Seejärel toimus rabavees hoitud katsekehade tugevuste nõrgenemine. Mõõdukat kasvutendentsi näitasid kraanivees hoitud Männiku proovid, mis saavutasid 360 päeva möödudes üheteljeliseks survetugevuseks 54 kPa, mis on samas suurusjärgus rabavees hoitud proovidega.

Võrreldes saavutatud üheteljelisi survetugevusi ning turbaproovide algniiskuseid selgus, et turba algne veesisaldus on otseselt seotud survetugevuse kujunemisega. Suurimad lõpptugevused saavutasid proovid, mille turba algniiskus oli suurim. Tähtsamat rolli mängib veesisaldus turbas esimese 28 päeva jooksul, millest võib järeldada, et piisav veeküllastatus on alus tsementatsioonisidemete tekkimiseks.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et põlevkivituhk pole sobilik sideaine üksi ega ka tsemendiga segatuna, et saavutada stabiilne pinnasekiht veega küllastunud keskkonnas. Lisaks hakkasid enamus katsekehade tugevusnäitajad langema alates 91 päevast. Seega pole pikaajalised projektid põlevkivituhaga stabiliseerimiseks perspektiivsed. Saavutatud tulemuste puhul võiks kasutada põlevkivituhaga mass-stabiliseerimist ajutise taristu loomiseks Rail Balticu ehitustööde käigus. Teise võimalusena võiks kaaluda inertse mineraalainese lisamist pinnasele koos põlevkivituhaga, et põlevkivituhale oleks võimalik tekitada tugevamaid sidemeid turba ja mineraalainese vahel.

## Summary

To build the Rail Baltic railway system, it is necessary to find a technology, that meets all the technical needs as well as economic. One of the possibilities could be mass stabilization method, which is a widely used technology all over the world, especially in Scandinavia. Mass stabilization allows to improve the properties of soft soils like peat, clay or mud. Mass stabilization can be carried out with different kind of binders and there are a lot of examples in the world, where mass stabilization has allowed to build railways, motorways and residential areas on soft soils.

Past research, that has been carried out in Estonia, has shown, that oil shale ash as a binder has a high potential for mass stabilization, but it's important to note, that all these experiments have been executed in a way where samples are preserved in semi water saturated environments. In reality, Rail Baltic route will be going through several bogs, where the conditions will be water saturated, meaning, that the past research would be inaccurate for the Rail Baltic railway.

This dissertation gives an overall overview of mass stabilization as a technology and introduces stabilization examples from all over the world and Estonia. The main objective of this thesis is to find out, if oil shale ash alone or mixed with cement could be used as a binder for stabilizing water saturated peat. Secondly, the qualities of peat were analysed and also, if its properties somehow affect the compressive strength, that the samples achieve.

Due to the main objective of the thesis, a laboratory experiment was set up, which main purpose was to examine how the samples develop their compressive strength. For the experiment three different recipes were developed – cement-peat, cement/oil shale ash-peat and oil shale ash-peat. Samples were kept in regular tap water as well as in water, which was gathered from the bog. Samples were put under a vertical load equal to 18 kPa. Compressive strength was measured after 7, 28, 91, 180 and 360 days.

The results show that the best binding formula is with cement, which achieved a compressive strength of 829 kPa. The highest results were measured from Männiku peat mixed with cement, held in tap water. Highest result was achieved in 91 days, after that there was a decline in compressive strengths. A year after the experiment started, the samples had a compressive strength of 536 kPa in bog water and 477 kPa in tap water.

Out of the three stabilization recipes, second best results were produced from the cement/oil shale ash-peat mixture. Compressive strengths that were achieved with this recipe, were significantly lower than with cement-peat mixture. The highest result was 96 kPa, developed in 91 days. This kind of strength was achieved with Männiku peat held in bog water. Similarly to the first mixture compressive strengths started to decrease after 91 days for the samples held in bog water, but samples held in regular tap water showed a moderate increase in strengths. Compressive strengths still remained as low as 57 and 62 kPa. Third best results were achieved with the mixture, that only had oil shale ash as a binder. Similarly to cement/oil shale ash-peat, fastest cementation reaction took place in the samples held in bog water and the highest compressive strength was achieved in 180 days, which was 69 kPa, after that, the strengths of samples held in bog water, started to decrease. Samples, held in tap water, showed a moderate increase in strengths throughout the year, achieving a compressive strength 54 kPa, which is 1 kPa higher than the samples held in bog water had in 360 days.

After comparison, it appears, that the strengths of the samples and the water saturation density of the peat samples are in direct connection. The highest compressive strengths were achieved by samples, that were made with the highest water density peat. It appears, that water saturation plays a big role in the first 28 days, after that, the connection isn't that clear. The connection between compressive strengths and the water saturation of peat may be caused by the fact, that water is essential in the beginning of the cementation process.

In conclusion, oil shale ash is not suitable alone or mixed with cement for stabilizing water saturated peat. In addition, most of the compressive strengths started to decrease after 91 days, for that, the outlook of mass stabilization with oil shale ash is not perspective. Based on the results, mass stabilization with oil shale ash, may be used to build temporary infrastructure necessary to construct the Rail Baltic railway. Second possibility is to mix inert sinter into the peat, so there is more material to create cementation bonds, therefore oil shale ash can create stronger bonds.

## **Tänuõnad**

Soovin südamest tänada oma juhendajat professor Kalle Kirsimäed huvitava lõputöö teema ning oskusliku juhendamise eest. Lisaks soovin tänada kõiki teisi asjaosalisi, kes aitasid kaasa antud magistritöö valmimisele.

## Kasutatud Kirjandus

- (1) Koroljova, A. (2016) Põlevkivituhk – erineva kasutamise otstarbega materjal. (www) [http://www.estis.ee/Failid/Koolitused/2016\\_11\\_21\\_Polevkivituhk\\_otstarbega\\_materjal.pdf](http://www.estis.ee/Failid/Koolitused/2016_11_21_Polevkivituhk_otstarbega_materjal.pdf) (21.05.2018)
- (2) Lahtinen, P., Niutanen, V. (2008). Development of Mass Stabilization Technique for Contaminated Sediments. (www) <https://www.sednet.org/download/conference2008/6%20-%20abstract%20Lahtinen.pdf> (26.04.18)
- (3) Combined Soil Stabilisation Ltd. (2018). The History of Soil Stabilization. (www) <https://www.aeyates.co.uk/combined-soil-stabilisation-ltd/about/history> (03.05.2018)
- (4) McDowell, C. (1959). Stabilization of soils with lime, lime-flyash, and other lime reactive materials. Highway Res Board Bull, 231, lk 60-66
- (5) Keller Grundläggning AB. (2018). The Mass Stabilization Process. (www) <http://www.kellergrundlaggning.se/documents/Files/37-01E.pdf> (25.04.18)
- (6) Konsap, U. (2016). Pehmete pinnaste mass-stabiliseerimine põlevkivituhaga. – TeeLeht, 87, lk 14-15
- (7) Ramboll Eesti AS. (2007). Pinnaste mass-stabiliseerimise uuring. Lõpparuanne. (www) [https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/2007-4\\_mass-stabiliseerimise\\_voimalused\\_aruanne.pdf](https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/2007-4_mass-stabiliseerimise_voimalused_aruanne.pdf) (25.04.2018)
- (8) Gradex. (2012). Mass stabilization. (www) [http://gradex.hu/en/mass\\_stabilization/](http://gradex.hu/en/mass_stabilization/) (25.04.18)
- (9) Industrial Resources Council. (2017). Soil stabilization. (www) <http://industrialresourcescouncil.org/applications/soilstabilization> (26.04.18)
- (10) Forsman, J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T., Hyvönen, I. (2015). Mass stabilization manual. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/mass\\_stabilization\\_manual\\_2015.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/mass_stabilization_manual_2015.pdf) (25.04.18)
- (11) EuroSoilStab (2002). “Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils,” Design Guide Soft Soil Stabilization, Industrial &

Materials Technologies Programme (Brite- EuRam III), European Commission, CT97-0351, Project No. BE 96-3177, lk 15-60.

- (12) ENSV AT ja MM Teedehituse Kesklaboratorium. (1968). Pinnaste stabiliseerimise kogemusi välismaises teedehituses. Informatsioonimaterjal. Tallinn
- (13) Larsson, S. (2005). State of Practice Report– Execution, monitoring and quality control. Stockholm: Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing’05. lk 732-785
- (14) Kitazune, M. (2005). State of Practice Report – Field and laboratory investigations, properties of binders and stabilized soil. Stockholm: Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing’05, lk 660-684
- (15) Case port of Kokkola. (2018) Mass Stabilization. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case\\_card\\_port\\_of\\_kokkola\\_14.8.2017.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case_card_port_of_kokkola_14.8.2017.pdf) (04.05.2018)
- (16) Case Luhdanoja. (2018) Mass Stabilization. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case\\_card\\_luhdanoja\\_14.8.2017.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case_card_luhdanoja_14.8.2017.pdf) (04.05.2018)
- (17) Case Kotolahti. (2018). Mass Stabilization. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case\\_card\\_kotolahti\\_14.8.2017.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case_card_kotolahti_14.8.2017.pdf) (04.05.2018)
- (18) Case Roslagsbanan. (2018). Mass Stabilization. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case\\_card%20roslags\\_bana\\_14.8.2017.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case_card%20roslags_bana_14.8.2017.pdf) (04.05.2018)
- (19) Case Haaga Sports Park. (2018). Mass Stabilization. (www) [http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case\\_card\\_haaga\\_sports\\_park\\_14.8.2017.pdf](http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/cases/case_card_haaga_sports_park_14.8.2017.pdf) (04.05.2018)
- (20) Kuusik, R., Meriste, T., Pototski, A. (2012). Põlevkivituha kasutamise laiendamiseks on käivitunud mitu uut projekti. Keskkonnatehnika, 3, lk 8-9
- (21) Eesti Keskkonnakaitse- ja Tehnoloogia Programm. (2011) Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2007–2013. „Teadmistepeõhine Eesti” rakendusplaan aastateks 2012–2013, LISA 7. (www)

- [https://www.riigikantselei.ee/valitsus/valitsus/et/valitsus/arengukavad/haridus-ja-teadusministeerium/TAI%20lisa\\_KKTP%20programm.pdf](https://www.riigikantselei.ee/valitsus/valitsus/et/valitsus/arengukavad/haridus-ja-teadusministeerium/TAI%20lisa_KKTP%20programm.pdf) (27.04.18)
- (22) Kauge, A. (2005). Eelmise sajandi 70-80-ndatel aastatel ehitatud põlevkivituhaga stabiliseeritud katete seisukorra uuring. AS Teede Tehnokeskus, 2005-56. (www) <https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/tuhkkatted.pdf> (03.05.2018)
- (23) Vennik, E. (2014). Põlevkivituha abil valmis 500-meetrine teelõik. (www) <https://www.energia.ee/uudised/avaleht/-/newsv2/2014/09/26/polevkivituha-abil-valmis-500-meetrine-teeloik> (03.05.2018)
- (24) Maanteeamet. (2011). Pinnaste mass-stabiliseerimisvõimaluste katselõigu uurimistöö. III etapi lõpparuanne. Ramboll Eesti AS. 2007-4 (III etapp). Tallinn.
- (25) Maanteeamet. (2018). Võõbu-Mäo lõigu ehitus. (www) <https://www.mnt.ee/et/ehitus/voobu-mao-loigu-ehitus> (08.05.2018)
- (26) Viita, M. (2013). Põlevkivituha kasutamine pinnaste mass-stabiliseerimiseks. Tallinna Tehnikaülikool. (Lõputöö). Tallinn.
- (27) OSAMAT. (2018). Progress 10/2011. (www) <http://www.osamat.ee/et/uudised/26-progress-10-2011.html> (08.05.2018)
- (28) OSAMAT. (2017). Projekt OSAMAT jõudis lõpule. (www) <http://www.osamat.ee/et/uudised.html> (03.05.2018)
- (29) Oengo, H. (1949) Põlevkivituhk-sideaine kukermiit. Teaduslik kirjandus, Tartu.
- (30) Kikas, V. (1954) Eesti NSV põlevkivi-kukersiidi tuhk sideainena. (Käsikiri) Tallinna Põlutehniline Instituut, Ehituskonstruksioonide kateeder.
- (31) International Organization for Standardization (2004). Geotechnical investigation and testing -- Laboratory testing of soil -- Part 7: Unconfined compression test on fine-grained soils, ISO/TS 17892-7:2004.
- (32) Tee ja teetööde ehitusnõuded. (2014). Riigi Teataja osa I. [www] <https://www.riigiteataja.ee/akt/111032014003> (28.05.2018)

# LISAD

## Lisa 1. Lennart von Post skaala

Humifikatsiooni- klass	Lagunemis- aste, %	Turba iseloomustus
H1	10	lagunemata turvas, kokkusurumisel eraldub selge värvusetu vesi, taimejäänused on kergesti eristatavad
H2	10...15	peaaegu lagunemata turvas, kokkusurumisel eraldub peaaegu selge kollakaspruun vesi, taimejäänused on kergesti eristatavad
H3	16...25	nõrgalt lagunenud turvas, pigistamisel eraldub kergelt hägune pruunikas vesi, taimeosad on nõrgalt lagunenud
H4	26...30	kergelt lagunenud turvas, kokkusurumisel eraldub tugevalt hägune pruun vesi, taimejäänused on vähelagunenud
H5	31...35	mõõdukalt lagunenud turvas, koos veega eraldub veidi turbast, taimejäänuste eristamine palja silmaga on raske
H6	36...40	küllalt tugevalt lagunenud turvas, eralduv vesi on tumepruun, pigistamisel tuleb umbes 1/3 turbast sõrmede vahelt läbi
H7	41...45	tugevalt lagunenud turvas, pigistamisel tuleb umbes pool turbast sõrmede vahelt välja, eralduv vesi on tumepruun, taimejäänused raskesti eristatavad
H8	46...50	hästi lagunenud turvas, pigistamisel tuleb umbes 2/3 turbast sõrmede vahelt läbi, vett reeglina ei eraldu, taimejäänuseid on raske eristada
H9	51...55	peaaegu täielikult lagunenud turvas, pigistamisel tuleb praktiliselt kogu turvas ühtlase massina sõrmede vahelt läbi, taimejäänuseid ei ole näha
H10	>55	täielikult lagunenud turvas, pigistamisel tuleb kõik sõrmede vahelt läbi, vaba vett ei eraldu

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Merilin Paalo (sünnikuupäev 06.01.1992),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Rabapinnaste mass-stabiliseerimine põlevkivituhaga“, mille juhendaja on prof Kalle Kirsimäe,
  - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 31.05.2018