



Mehis Juhkam

RAUDTEETRASSI EHTAMINE LÄBI MÄRGALADE

LÕPUTÖÖ

Logistikainstituut

Transpordi- ja liikluskorralduse õppekava

Juhendaja: Rita Ojala

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Mehis Juhkam tõendan,

et lõputöö minu kirjutatud. Töö koostamisel on kasutatud teiste autorite materjale ja neile on viidatud õiguspäraselt. Kõik isikulised ja varalised autoriõigused antud lõputöö osas kuuluvad ainuisikuliselt autorile ning on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Rita Ojala

Lõputöö on kaitsmisele lubatud logistikainstituudi direktori korraldusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mehis Juhkam

Sünnikuupäev 03.12.1981

Annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) loa (lihtlitsentsi) enda kirjutatud lõputöö

RAUDTEETRASSI EHTAMINE LÄBI MÄRGALADE

1. Reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil
2. Elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu
3. Kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka lõputöö koostajale ja kinnitan, et

1. Lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaaliomandi ja isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õiguseid
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas Mehis Juhkam 04.01.2024 /allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 VAIAMISE LAHENDUSED.....	7
1.1 Vaiade vibratsiooniga paigaldamine	7
1.2 Vaiade kruvimise meetod	8
1.3 Vaiade paigaldamine löögijõul.....	9
2 MASSI STABILISEERIMISE MEETODID	10
2.1 Pehmele muldade mass-stabiliseerimine kohapeal	11
2.2 Pinnase massiline stabiliseerimine väljaspool kaeva kohta.....	12
3 MASSI STABILISEERIMISE MÕJU TURBA OMADUSTELE	14
3.1 Esialgne neutraliseeriv toime	14
3.2 Sideained	14
3.3 Massi stabiliseerimise rakendused	15
4 PEHMELE PINNASELE TEE PROJEKTEERIMINE	17
4.1 Raudteemaa ja kaitsevöönd	19
4.2 Rööbastee	20
5 TURBA STABILISEERIMISKATSED	22
5.1 Stabiliseerimisekatsed turbaproovide kogumisega rabadest.	22
5.2 Kaigepere raba.....	22
5.3 Rae raba	22
5.4 Männiku raba.....	23
6 TURBA OMADUSED	24
6.1 Lagunemisaste ning humiinainete sisaldus	24
6.2 Turba füüsikalised omadused	25
7 PÕLEVKIVI CFB TUHK	28
7.1 Põlevkivituha proovid (CFB)	28
7.2 Põlevkivi CFB tuha omadused	28
8 STABILISEERIMISEL KASUTATUD RETSEPTID	30
8.1 Kasutatavad lahendused	30
9 TEE VAJUMIPROGNOOS	31
9.1 Tee vajum ja vajumisprognoos.....	31
9.2 Vajaminevad andmed	31
9.3 Algandmete kogumise viis	31

9.4	Kontrollimine	32
9.5	Lahendused vajumite vähendamiseks	33
10	MASSI STABILISEERIMISE JA VAIAMISE SEADMED, MASINAD, TEHNOLOOGIAD.....	34
10.1	Massi stabiliseerimise seadmed.....	34
10.2	Vaiamise seadmed ja masinad.....	36
11	KOKKUVÕTE	40
12	SUMMARY	42
	VIIDATUD ALLIKAD.....	44

SISSEJUHATUS

Raudteetrasside ja maanteetrasside rajamine pehmetele ja soistele aladele on Eesti riigis suur murekoht. Seoses uute maanteed ja raudteelõikude ehitamisega tuleb arvestada pinnase eripärasusi. Pealisehitiste ja muu taristu ehitamine pehmele pinnasele on väga probleemne. Enimlevinud probleemideks on turba suur kokkupressitavus ja madal nihketugevus. Maanteid ja Raudteid üldiselt pehmetele pinnastele ei ehitata, kuid kui see on vältimatu tuleb uurimistöö käigus koguda piisavalt vajalikke andmeid, mis võimaldaksid arvutada mulde püsivuse ja konsolideerumise ulatuse. Selleks, et andmeid arvutada, on vaja teada pinnase dreenimata nihketugevust, konsolidatsioonimoodulit (pinnase suhtelise kokkusurutavuse moodul), kompressiooniindeksit (poorsuse vähenemine pinge muutusel ühe ühiku võrra), sekundaarse konsolidatsiooni moodulit. Vajaminevad andmed saadakse laborikatsete rikkumata struktuuriga proovidest, objektil tehtavatest mõõtmistest või läbi pinnaseomaduste korrelatsioonide. Turvas koosneb erinevate lagunemisastmetega orgaanilistest materjalidest, sisaldades jääktaimestikku ning võib olla täielikult lagunenu või amorfne. Turbapinnased asuvad erinevates maailmapaikades, kus taimestik ei lagune täielikult ja selline pinnas akumuliseerub ja hoiab vett. Eestis on turbaaladega kaetud 22,5% maa- alast ja soiseid pinnaseid on 5,3%, kuid siiski hõlmavad alad teede ja raudteede läbimist. Tänapäevaks on kasutusel teede- ning raudteetrasside rajamisel läbi pehmete alade erinevaid mooduseid. Ehitatud on katselõike ja uuritud tee vajumid ning on arvestatud vajumite prognoosiga. Seoses Rail Balticu (edaspidi RB) raudtee ehitamisega on tehtud erinevaid uuringuid raudteetrassi kulgemisel läbi rabade ning antud töö uurib millised on lahendused alusehitise ehitamisel märgadele aladele. Käesolevas töös uuritakse erinevaid rabapinnaseid, nendega seonduvaid probleeme ning enamlevinuid tehnoloogiaid, mida kasutatakse. Töö eesmärgiks on välja selgitada kas ja millisel moel oleks võimalik kasutada raudteealuse pinnase tugevdamiseks pehmetel pinnastel põlevkivi tuhka. Välja tuuakse erinevate segude retseptid, mida on võimalik kasutada pinnase stabiliseerimisel. Raudteed ja maanteed on oluline osa riigis kauba liigutamiseks ning reisijate veoks. Enamasti on teed ehitatud tugevale ja tihedale pinnasele, kuid on lõike, mis läbivad soid, rabasid ja teisi ebastabiilseid ning pehmeid pinnaseid. Käesoleva töö käigus uuritakse, milliseid enamlevinud meetodeid kasutatakse raudteetrassi ehitamisel just märgadele aladele, ehitusega seonduvaid eripärasid ning projekteerimisel arvestatavaid tegureid. Välja tuuakse erinevad seadmed ning lahendused, mida kasutatakse ja on katsetatud Eesti tingimustes. Töös on küsitletud erinevaid maantee ning raudtee ettevõtete projektijuhte, samuti turbamaardlate omanikke saamaks selgust millist tehnoloogiat tänapäevastes valdkondades kasutatakse. Laialdaselt on kasutatud ühte tehnoloogiat, kuid seoses erinevate murede ning probleemidega on Eestis kasutuses valdavalt üks meetod. Töös tuuakse välja milline lahendus oleks parim lahendus Eesti mõistes ning

kuidas oleks võimalik keskkonda säästa ehitades teid ja raudteid nii, et võimalikult vähe loodust kahjustada. Eestis kasutatakse laialdaselt koormamise meetodit mõlemas tee-ehitusvaldkonnas, kuid töö uurib kas on paremaid lahendusi kui hetkel kasutatav. Töös kirjeldatakse meetodit, mis võiks RB ehitamisel suureks abiks maavarade säästmisel olla. Levinumaks pinnaseparandusmeetodiks pehmete pinnaste tugevdamisel on pinnase stabiliseerimine ja vähemlevinud on vaiamine, kuid viimast meetodit ei saa samuti välistada, kuna vaiamisele alternatiivi viaduktide ning sildade ehitamisel hetkel ei leidu. Töös tuuakse välja erinevad võimalused põlevkivi tuha kasutamiseks pehmete pinnaste parandamiseks.

1 VAIAMISE LAHENDUSED

Vaiamise lahendus on pehmetel pinnastel vähem levinud, kuna tegemist on mahukama tööga ning sellest sõltuvalt on töö kulukam kui massi stabiliseerimine. Vaiad paigaldatakse löökide tagajärjel maasse, vaiade peale paigaldatakse betoonplaadid ja seejärel saab paigaldada nende peale vajamineva rajatise. Rohkem kasutatakse vaiamistehnoloogiat sildade ning maanteeviaduktide või raudteeviaduktide kandepostide maasse paigaldamiseks. Tänapäeval raudtee ja maantee sektoris vaiamise lahendust väga ei kasutata, kuid lahendust läheb vaja viaduktide ning sildade ehitamisel. Lisaks on olemas võimalus, et mõlemaid lahendusi kasutataks koos. Kooskasutatav lahendus on siiski ebapraktiline ja võrreldes mass-stabiliseerimisega oluliselt kulukam. Vaiade paigalduse sõltub õigest vaia valikust ja abitöödest, mille kestus kogutööst moodustab 80%. Vaiamisel kasutatakse kraanasid, nool- ning pukk-kraanasid, millele on paigaldatud juhtpoomid ja teised abiseadmed. Vaiade suunamiseks kasutatakse juhtseadmeid, milleta tööprotsess ei oleks võimalik. Vaiade maasse paigaldamiseks kasutatakse sildade ning viaduktide ehituses vaiatõstukeid, noolkraanasid, roomikkraanasid ja portaalkraanasid. Vaiamise tehnika on väga spetsiifiline ja kulukas ning seoses sellega tuleb leida parim võimalus, mida kasutada. Tehnoloogiaid mida vaiamisel kasutatakse on erinevaid ning järgnev lõik räägib lähemalt enamkasutatavast lahendusest. [1]

1.1 Vaiade vibratsiooniga paigaldamine

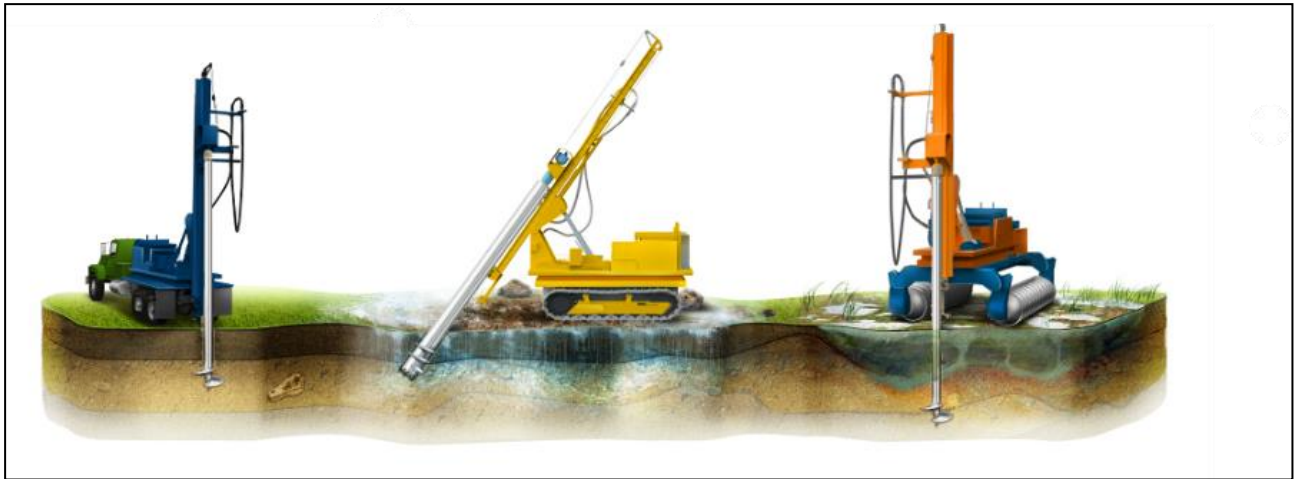
Vibratsioonimeetodil paigaldamisel vähenevad pinnase sisehõõrdeegur ning vaia külgsinna hõõrdejõud, mistõttu saab vaiad pinnasesse suruda vibreerimisel kümme korda väiksema jõuga, kui mõne teise meetodiga ning vibratsiooni meetodi puhul toimub ka pinnase enda osaline tihenemine. Vibroajam on seade, mis töötab vibratsiooniga. Seade riputatakse vaia paigaldamise masina masti külge ja ühendatakse vaia peaga. Vibroajami tööpõhimõte seisneb selles, et seadme ekstsentriskust põhjustatud tasakaalustamatusest tekkivad horisontaalsed jõud eemaldatakse vastastikku, vertikaalsed, aga liidetakse. Vibratsiooni amplituud ning mass peavad maapinna struktuuri nii kahjustama, et pinnas ei moonduks. Betoonvaiade või toruvaiade paigaldamisel kasutatavate madalsagedusvaiade amplituud on 420 p/min. Joonisel 1 on näidatud vibratsiooniga paigaldamise lahendus. [1]



Joonis 1. Vibratsiooniga vaiade paigaldamise meetod [2]

1.2 Vaiade kruvimise meetod

Vaiade kruvimine on meetod, kus kasutatakse terasotstega teras- ja raudbetoonvaiasid. Üldiselt on lahendus kasutusel veoautodele ehitatud seadmetel. Seda meetodit kasutatakse peamiselt elektriliinide ja muude ehitiste mastide vundamentide ehitamisel. Üldiselt kasutatakse seda meetodit kohtades, kuhu saab masinatega hästi ligi ning kus on antud meetod kõige otstarbekam, näiteks võib kasutada seda meetodit raudtee elektrivõrgu ehitamisel, elektripostidele vundamentide rajamisel. Sellistel seadmetel on korpus, tugijalad, hüdraulikal põhinev pöörlemisseade, ning hüdrauliline kallutusseade, juhtimisseade ning muud abiseadmed töö vajalikkus teostamiseks. Kruvivaiade paigaldamise tööetapid on samad mis vibratsioonimeetodil või tõukemeetodil, kuid samas erinevad siiski täielikult. Joonisel 2 on kujutatud erinevad vaiade kruvimisemeetodid. [3]



Joonis 2. Vaiade kruvimise erinevad lahendused [3]

1.3 Vaiade paigaldamine löögijõul

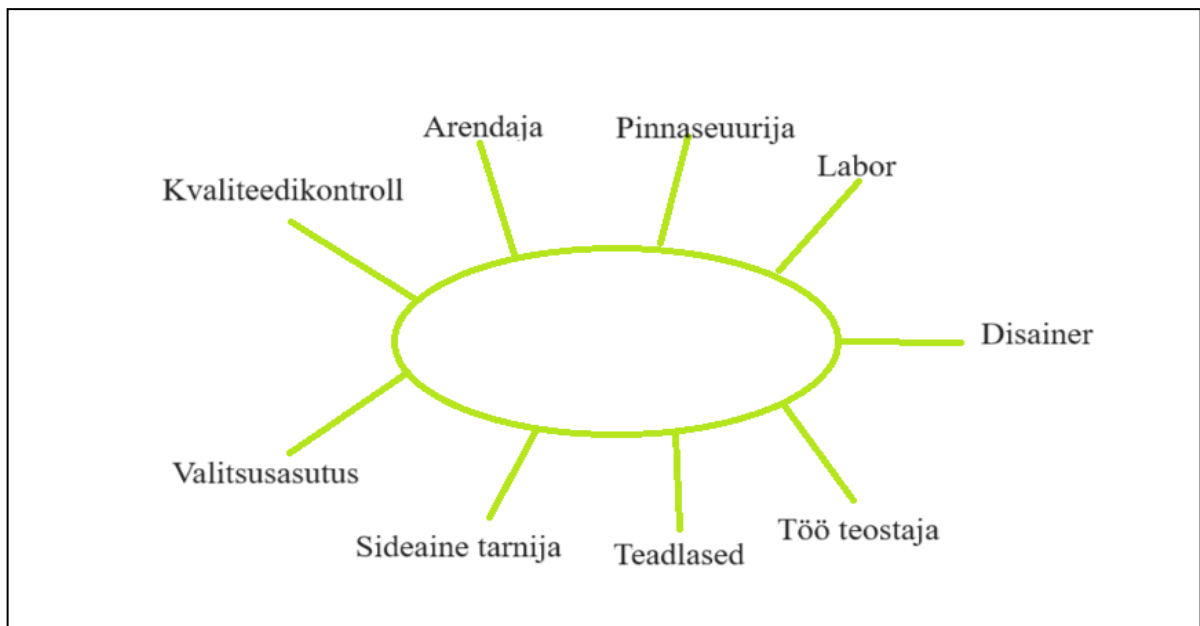
Selline lahendus on üks levinumaid, kus vaiad surutakse maasse löökide tagajärjel. Tänapäeval on olemas diiselveikarid ja hüdraulilisi vaihaamerid. Diiselveikarid on oma olemuselt odavamad ning rohkem kasutuses olnud nõukogude ajal, tänapäevaseks on hüdrauliline vaihaamer. Tänapäevased hüdraulilised vaihaamerid on väga kallid ning seetõttu neid väga ettevõtete kasutuses ei ole. Hüdrauliline vaihaamer on oma parameetritelt otstarbekam, kuna tema töötamise iga on oluliselt pikem, pinnase vibratsioonitase on madalam ning müra tase samuti oluliselt madalam. Lisaks sellele saab sõita naaberhoonete läheduses, midagi kahjustamata. Hüdrauliline veikar on efektiivne kuna tema löögijõudu saab reguleerida väga täpselt, ning kergelt. Joonisel 3 on välja toodud eespool kirjeldatud seade. [3]



Joonis 3 Hüdrauliline vaihaamer [3]

2 MASSI STABILISEERIMISE MEETODID

Massi stabiliseerimise meetodit kasutatakse pinnase vahetamise, vaiade või muude alternatiivsete meetodite asendamiseks. Võrreldes teiste meetoditega on see meetod väga ökonoomne, kui kaevandatava pinnase veokaugused ja vahemaad on pikad, kaevandatava pinnase asendamiseks ei jätku materjali või pole piisaval määral ruumi pinnase prügilasse ladustamiseks. Massi stabiliseerimisel moodustab suurema osa sideaine. Sideaine (nt tsemendi) CO₂ emissioon on sageli kõrge, kuid lisatud sideaine tõttu on stabiliseeritud turval suur CO₂ neeldumispotentsiaal. Tsemendi kogust sideaines saab vähendada või optimeerida, kui sideainesegu osana kasutatakse taaskasutatud materjale. Esiteks on stabiliseerimine suhteliselt keskkonnasõbralik meetod, säästes loodusvarasid, ei nõua prügilaalasid ning vähendab oluliselt transpordivajadust, mis omakorda vähendab keskkonnasaastet. Pinnase stabiliseerimisel on alati tegu erijuhtumi projekteerimisega, kus vastavalt aluskihi omadustele valitakse otstarbekohane sideaine ning seejärel tehakse erinevad katsed. Stabiliseeritud aluspinnale võib muldkeha projekteerida kahte moodi, tüüplahendusena või erilahendusena. Erilahenduse puhul peab stabiliseerimise katsetöö sisaldama muldkeha rajamise katsetööd, tüüplahenduse korral katsetöö vajadust ei ole. Massi stabiliseerimine on mitmekülgne meetod pehmete pinnaste parandamiseks ning selle peamised kasutatavad valdkonnad võib liigitada kaheks. Tüüpiline massistabiliseerimise projekt nõuab multidistsiplinaarset lähenemist ning tihedat koostööd paljude disainivaldkondade vahel. Põhiliste parameetrite realiseerimiseks teevad insenerid tavaliselt koostööd maa-arendaja ja kohalikku arengut reguleerivate asutustega. Massistabiliseerimise projekteerimise ajal teevad töövõtja, pinnaseuuriija, sideaine tarnija ja labor konkreetse lahenduse valimiseks tihedat koostööd. Joonisel 4 on välja toodud valdkonnad, mis tegelevad tihedas koostöös mass-stabiliseerimise protsessiga ja tabelis 1 on märgitud valdkonniti erinevad tööülesanded. [4]



Joonis 4. Massi stabiliseerimise projektiga seotud valdkonnad [4]

Tabel 1. Osapooled, kes on mass-stabilisatsiooniga seotud ja nende peamised ülesanded. [4]

Valdkond	Ülesanne
Arendaja	Funktsionaalsete nõuete kehtestamine ja ehituslepingute sõlmimine
Pinnaseuuriija	Konstruksioonikihtide ja omaduste uurimine
Labor	Stabiliseerimisomaduste uurimine, retseptide koostamine
Disainer	Objekti mass-stabiliseerimise plaanide koostamine ja dokumentide koostamine
Töövõtja	Töö teostamine
Kvaliteedikontroll	Stabiliseerimistöö kvaliteedikontroll
Valitsusasutus	Juriidilised nõuete täitmine, juhendite olemasolu tagamine stabiliseerimiseks, keskkonnalubade andmine
Sideaine tarnija	Sideainete transport objektile ja arendus
Teadlased	Stabiliseerimistehnika väljatöötamine

2.1 Pehme muldade mass-stabiliseerimine kohapeal

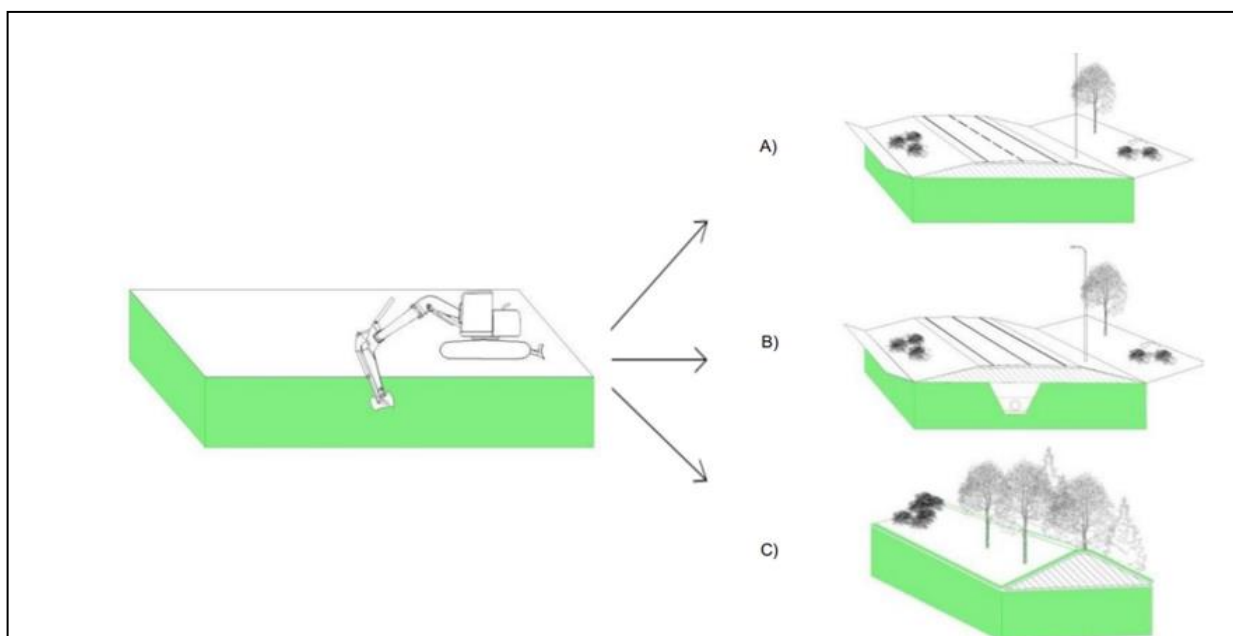
Selle meetodi puhul stabiliseeritakse pinnas kohapeal („*In situ*“). Joonisel 5 on kujutatud kohapeal pinnase stabiliseerimise lahendus. Stabiliseeritud pinnas võib olla savi, turvas ja muu pehme materjal.

Joonise 5 A puhul on tegemist kõige levinuma massistabiliseerimise meetodiga teede, raudteede ja põllubaaside tugevdamiseks. Antud meetodiga saab tagada stabiilsust ning vältida kahjulikke setteid.

Joonisel 5 B on näidatud kuidas massi stabiliseerimist saab kasutada ka torukraavide tugevdamiseks nii, et need jäävad ehituse ajaks toestamata ning lisaks sellele saab väljakaevatud stabiliseeritud pinnast kasutada.

Joonise 5 C puhul saab eemaldatava pehme pinnase ülejäägi enne väljakaevet massiliselt stabiliseerida ja pärast seda kasutada müratõkkematerjalina või mujale täitepinnaseks. Mõnel juhul on väljakaevatud pinnas nii pehme, et selle transportimiseks on vaja seda stabiliseerimise käigus tahkumaks muuta: [4]

- maantee muldkeha aluspinna stabiliseerimine;
- stabiliseeritud pinnasesse kaevatud toestamata torukraav;
- eelnevalt stabiliseeritud savimassi saab välja kaevata ja kasutada massiliselt stabiliseeritud aluspõhja peal.

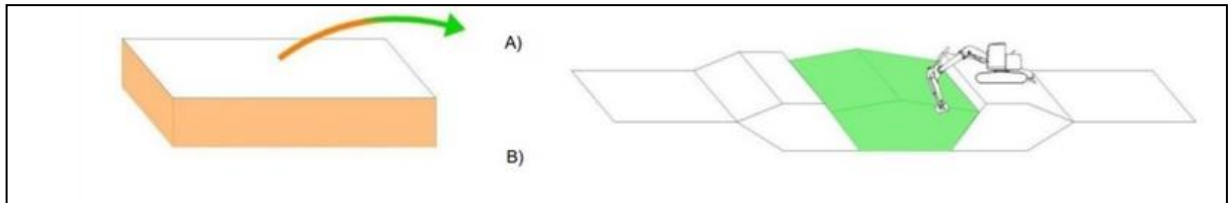


Joonis 5. Pinnase kohapeal stabiliseerimise meetod (*In situ*) [4]

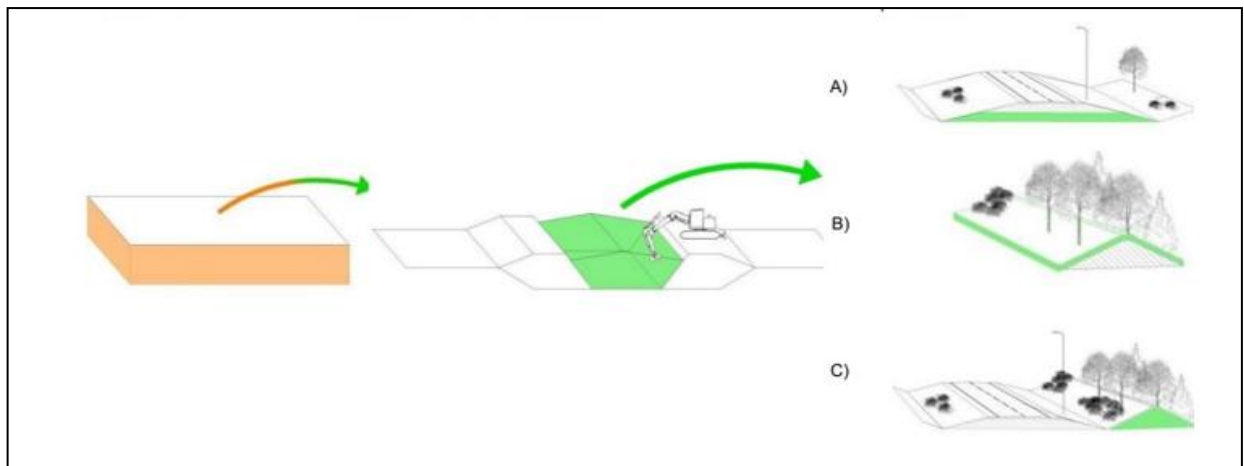
2.2 Pinnase massiline stabiliseerimine väljaspool kaeva kohta

Selle meetodi puhul kaevatakse pehme pinnas välja, veetakse kokku ladustamisalale ja seejärel stabiliseeritakse. Sellist meetodit nimetatakse (*Ex situ*) meetodiks. Joonistel 6, 7 ja 8 on välja toodud erinevad pinnase parandusmeetodid väljaspool kaevukohta: [4]

- pehme pinnas veetakse täitealale ning stabiliseeritakse, sealjuures võib protsess hõlmata savi ja turba stabiliseerimist, mis asub pinnase all;
- väljakaevatud pehme pinnas veetakse kokku basseini ja stabiliseeritakse seal, seejärel saab stabiliseeritud tädist sadamaala ehitusprotsessis kasutada;
- mass-stabiliseeritud muldasid saab kasutada müratõketeks või üleujutuskohtade kaitseks.

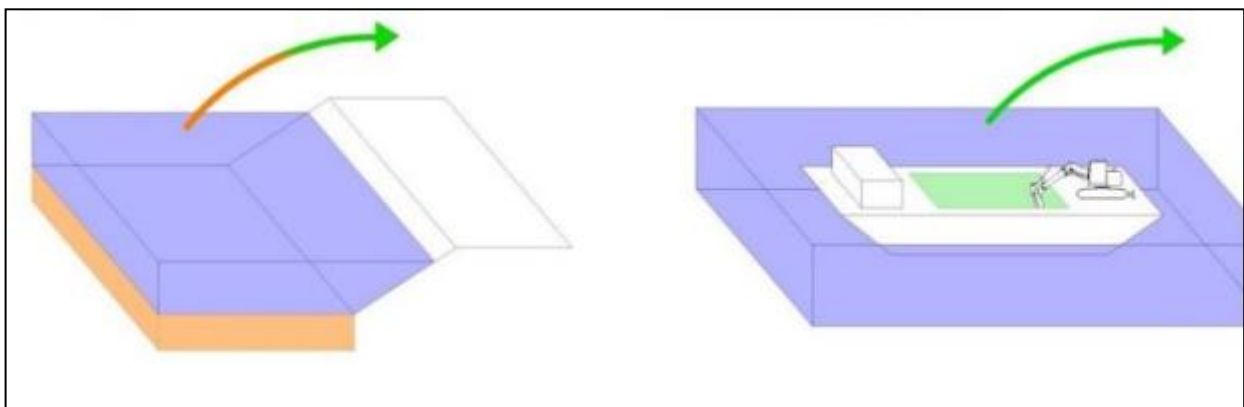


Joonis 6. Pinnase stabiliseerimine eemal ja hiljem kasutatud; a) pinnase ülejääk stabiliseeritakse ning kasutatakse täitematerjalina, b) süvendatud setted paigaldatakse basseini [4]



Joonis 7. Väljakaevatud materjali stabiliseerimine väljaspool kaevekohta [4]

Väljakaevatud materjal stabiliseeritakse basseinis ja pärast stabiilsemaks muutmist kasutatakse mujal; a) teetammi täitmine b) vett hoidev kiht kivimi peal või pinnase all c) müratõke



Joonis 8. Pinnase stabiliseerimine väljaspool kaeveala, vee peal kasutatav lahendus. [4]

3 MASSI STABILISEERIMISE MÕJU TURBA OMADUSTELE

Massi stabiliseerimise eesmärgiks on parandada pinnase geotehnilisi omadusi. Stabiliseerimisel kasutatakse sideainet, mida segatakse pehme pinnasega. Stabiliseerimine mõjutab pinnase geotehnilisi omadusi nii suurel määral, et pinnase tugevus muutub keemiliste protsesside tõttu oluliselt tugevamaks. Pinnase sihtnihetugevus varieerub vahemikus 40 – 70 kPa, kuid on ka juhtumeid, kus pinnase tugevus on üle 100 kPa. Massi stabiliseerimise protsessi tulemust ning protsessi kiirust mõjutavad paljud tegurid, nagu sideaine retsept, turba koostis, eellaadimise tase ja aeg ning temperatuur. Massi stabiliseerimine muudab turba koostises vee sisaldust, puistetihedust, tugevus- ning deformatsiooniomadusi ning vee läbilaskevõimet. Kagu-Soomes asuv Veittostensuo soo oli esimene soo Soomes, mida uuriti põhjalikult ning seetõttu on olemas märkimisväärne uurimustöö pinnase stabiliseerimise kohta. [4]

3.1 Esialgne neutraliseeriv toime

Stabiliseerimise protsess toimub nii, et sideaine neutraliseerib esmalt pinnase ja seejärel loob lisatav sideaine soovitud stabiliseerimiseefektid. Algselt neutraliseerib esialgne leeliselise sideaine lisamine pinnase ning pärast seda protsessi saab alustada sidumist. Varasemates Veittostensuo juhtumiuuringutes on kasutatud sideaine kogus ületanud selgelt minimaalse läviväärtuse ja stabiliseerimine on õnnestunud. [4]

3.2 Sideained

Kõikides massistabiliseerimise projektides kasutatakse sideainet ehk keemilist stabilisaatorit, mis reageerib turbamassiga, muutes turba tugevust ja deformatsiooniomadusi. Segamise ja kõvenemise käigus muutuvad ka muud mulla omadused, nagu veesisaldus, küllastusaste ja läbilaskvus. Uurimuste tulemusel optimeeritakse sideaine kogust ja kvaliteeti, saavutades sihtomadused minimaalse investeeringuga. [4]

Veittostensuo soo turba stabiliseerimisel kasutatud tsement, tsemendi ja kipsi või tsemendi ja ahjuräbu segud on üldiselt sobivad Põhjamaade turbasõlmede stabiliseerimiseks. Lisaks on tsement koos põlevkivituhaga osutunud väga tõhusaks Läänemere turba sideaineaks. Soomes tehtud uuringutest lähtuvalt tuleb välja, et kiudturvast on kergem stabiliseerida kui amorfset ning vanemtaime tüüp mõjutab stabiliseerimisprotsessi oluliselt. Hiljem on põhjalikumad uuringud näidanud, et turvas on keeruline materjal ning need argumendid võivad olla liiga lihtsustatud.

Uuringud näitavad, et stabiliseeritud turba soojusjuhtivus on samade näitajatega mis puutumatul turbal, mistõttu moodustab see pinnases soojusisolatsiooni. [4]

3.3 Massi stabiliseerimise rakendused

Massi stabiliseerimist saab läbi viia kolme erineval viisil: [4]

- täielik läbitungimissügavus läbi pehmete pinnasekihtide kogu paksuse;
- osaline tungimine etteantud sügavuseni (s.t. ujuv struktuur);
- optimeeritud kombineeritud struktuur.

Täissügavusel massistabiliseerimisel on võimalik saavutada peaaegu mittesettiv pinnaseparandustulemus. Massi osalise stabiliseerimise korral antud projekteerimissügavuseni jäetakse stabiliseeritud tsooni alla kokkusurutavad pinnasekihid, kuid muldkeha poolt tekitatud koormus jaotub massistabiliseeritud kihi kaudu alumistele kihtidele, ühtlustades nii vajumeid ja vähendades erinevusi. Setted võivad olla märkimisväärsed, kui rakendatavad pinged ületavad alumiste pinnasekihtide tihenemiseelset pinget, s.t. kui pehme pinnas koormatakse liigselt üle ning murdub. Mass-stabiliseerimisel läbi viidud kolonnide stabiliseerimine vähendab pehmete pinnasekihtide settimist massistabiliseerimise all. Kolonnide stabiliseerimine tähendab seda, et enne massi stabiliseerimist stabiliseeritakse selle alune pinnas osaliselt ja tekib nagu vaivundament, mille peale stabiliseeritakse pehme pinnase kiht. Antud meetod parandab lisaks muldkeha stabiilsust, takistades libisemispinna teket. Enamasti kasutatakse massi- ja kolonnistabiliseerimise kombinatsiooni juhtudel, kui kõige ülemise mullakihi moodustab turvas või muda, sest kolonni stabiliseerimise meetod üksi ei anna ülemise osa jaoks piisavalt tugevaid sambaid. Massistabiliseerimist saab kasutada ka stabiliseerimismasinade tööplatvormina piirkondades, kus on eriti nõrk pinnas. Joonisel 9 on kujutatud pinnasesegamismasinad teekatte stabiliseerimisel ning joonisel 10 on kujutatud pinnase stabiliseerimine väljakaevet teostamata. [4]



Joonis 9. Pinnase segamine pealiskihis [5]

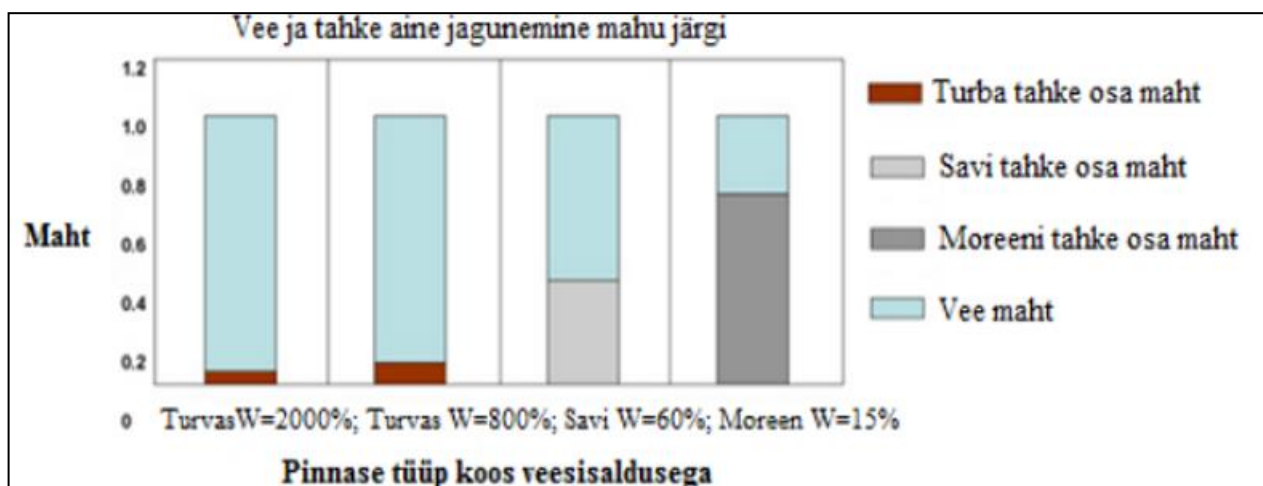


Joonis 10. Pinnase massi stabiliseerimine Soomes [4]

4 PEHMELE PINNASELE TEE PROJEKTEERIMINE

Pehmed pinnased on sellised, mille pinnase hetktugevus on väiksem kui 20 kPa. Projekteerimisel pehmele pinnasele tuleb kasutada meetmeid, mis kaitsevad muldkeha deformatsiooni eest. Kui muldkeha püsivus ei ole tagatud, tuleb arvestada pinnase vajumisega. Enne pealiskatte ehitamist peab olema muldkeha vajumine lõppenud. Pinnase vajumise lõppemiseks loetakse seda, kui vajumine on saavutanud oma lõppväärtusest 90%. [5]

Turvas on orgaaniline loodusvara koosnedes taimeosadest ja veest. Turbapinnase parameetrid sõltuvad põhiliselt lagunemisastmest ning tihedusest. Turba pinnased on erineva tihedusega kuna veemaht pinnases on väga kõikuv. Loodusliku turba kuiva mahu mass on keskmiselt 200 kg/m³ ja vee mahu mass (1000 kg/m³), mis on ligikaudu viis korda raskem. Vee sisaldus turbas protsendina on alati turba osakaalust kordades suurem, seega on vee sisalduse väärtuseks alati rohkem kui 100%. Joonisel 11 on välja toodud pinnaste võrdlus tahke aine ja vee jagunemine mahu järgi. [5]



Joonis 11. Vee ja tahke aine jagunemine erinevates pinnastes [5]

Turba veesisaldust saab hinnata lagunemisastme järgi saada erinevaid andmeid, aga vee sisaldust turbas on tee projekteerimiseks vaja kuidagi mõõta. Vee sisaldust turbas saab mõõta turba märja proovi pigistamisega. Kui turba pigistamine ei anna tulemust, tuleb hinnata turba välimust. Järgnevas tabelis nr 2 on välja toodud turba lagunemisaste ning tabelis 3 kokkuvõte turbaomadustest lagunemisastme järgi. [5]

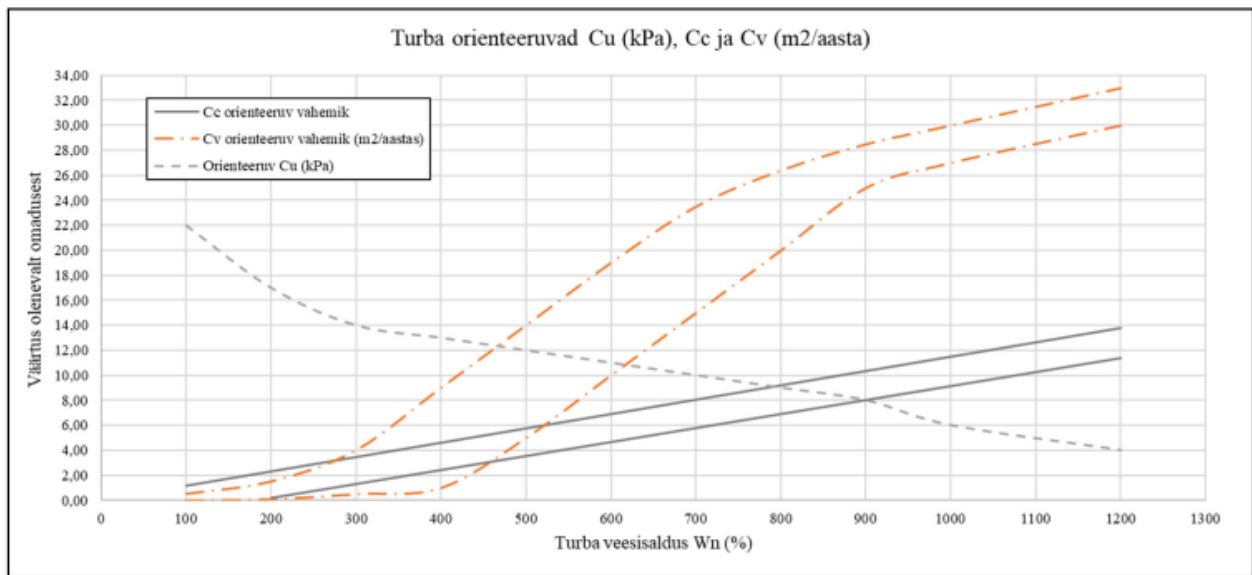
Tabel 2. Turba lagunemisaste [5]

Termin	Lagunemine	Jäänused	Pigistamisel
Amorfne	Täielik	Ei ole äratuntav	Pasta, tahkeid aineid > 50%
Pseudokiuline	Mõõdukas	Kiudude ja amorfse pasta segu	Vesi sogane, tahkeid aineid < 50%
Kiuline	Vähene või puudub	Selgelt äratuntav	Ainult vesi, tahkeid aineid ei sisalda

Tabel 3 Turba lagunemisastmed [5]

Mehhaanilised näitajad	Lagunemata turvas	Mõõdukalt lagunenu turvas	Täielikult lagunenu turvas
Veesisalduse protsent	1400 – 2500	900 – 1400	500 - 900
Tuhasisalduse protsent	1,5 - 3,0	3 – 8	8 - 30
Poorsus	22 – 40	13 – 22	913
Nihketugevus, kPa	5 – 15	5 - 15	5 - 15
Veejuhtivus, cm/s	10 - 3...10 – 4	10 - 4...10 - 5	10 - 5...10 - 6
Looduslik mahukaal, kg/m ³	900 – 1100	900 - 1100	900 - 1100

Turba veesisalduse ning kokkusurutavuse parameetrite ja tugevusparameetrite vahel on seos. Joonisel 12 toodud graafik on koostatud Tallinn – Tartu mnt. Võõbus asuva katselõigu laboriandmetel, kuid need andmed ei ole relatiivsed. Graafikul on kujutatud turba pinnase hetktugevus (C_u , kPa), kompressiooniindeks (C_c) ja konsolidatsioonimoodul (C_v , m²/aastas). [5]



Joonis 12. Turba vee sisaldus [5]

Jooniselt 12 on puudu sekundaarse konsolidatsioonimooduli C_α väärtus. Sekundaarne moodul on sõltuvuses koormuse suurusest. Turvas vajub ja tiheneb koormamise tulemusel, mistõttu surub koormus turbast vee välja ning turba poorid pressitakse kokku. Arvestades seda, tuleb pinnast koormata astmeliselt ja pikkamööda. Kiirel koormamisel pinnase kiht murdub ning kaotab stabiilsuse. Aeglasel koormamisel tagatakse vee väljumine turbast aegamööda. Kiirel koormamisel pinnase poorides vee rõhk tõuseb ja pinnase stabiilsus ei ole tagatud. Turbapinnasele aeglaselt rajatav mulle vajub raskuse all nii, et turbas olev orgaaniline aine kasvatab oma tugevust, võttes vastu järjest lisanduvat koormust. Koormuse kasvades turba tugevus samuti kasvab. Põhiline pinnase vajumine toimub üldiselt alusehitise ehitamisel. Peale tee ehitamise valmimist jätkub vajumine, kuid oluliselt aeglasemalt. [5]

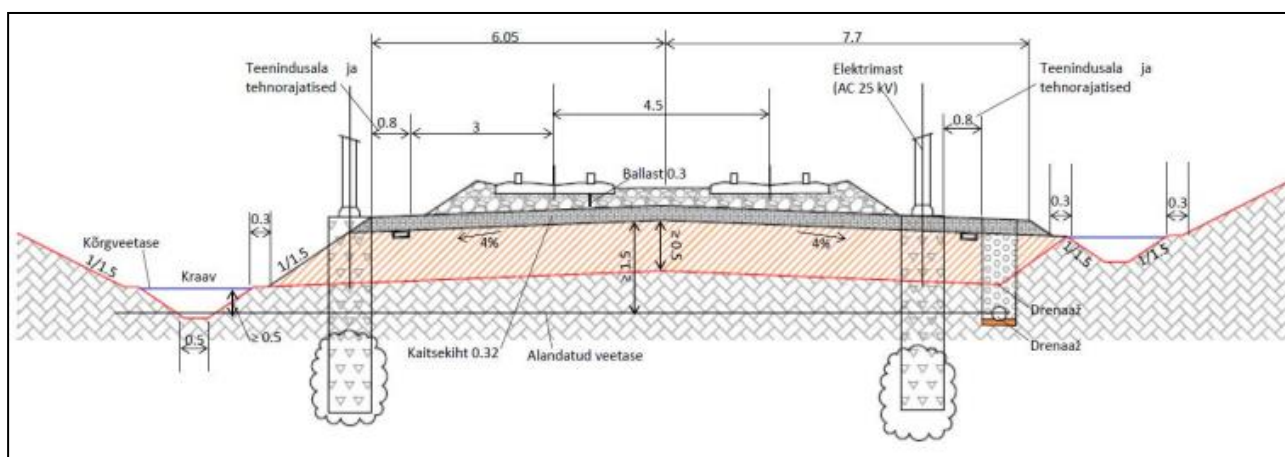
4.1 Raudteemaa ja kaitsevöönd

Raudteemaa on raudteeinfrastruktuuri, raudtee ja rajatiste maa ning nende teenindamiseks kasutatav maa. Sinna hulka kuuluvad raudtee alusehitise koos pealisehitisega, kontakivõrk ning sinna kuuluvad osad, raudtee kõrval asetsevad hooldusteed ja piirdeaiaid. Raudteemaaks loetakse 40–50 m. Laiema ulatusega võib raudteemaa olla näiteks jaamades, plokkpostides, alajaamade juures, raudtee läbimisel kõrge muldega aladel või süvendites. Inimeste ja loomade raudteelt eemale hoidmiseks kasutatakse tunnelid ja viadukte ning osaliselt kasutatakse ka piirdeaedasid. Raudteeliikluse probleemideta toimimise tagamiseks on määratud raudtee kaitsevöönd. Kaitsevööndi laiuseks on üldjuhul äärmise tee raudtee telgjoonest kuni 30 meetrit. Raudtee kaitsevöönd määratakse peale raudtee ehitamist

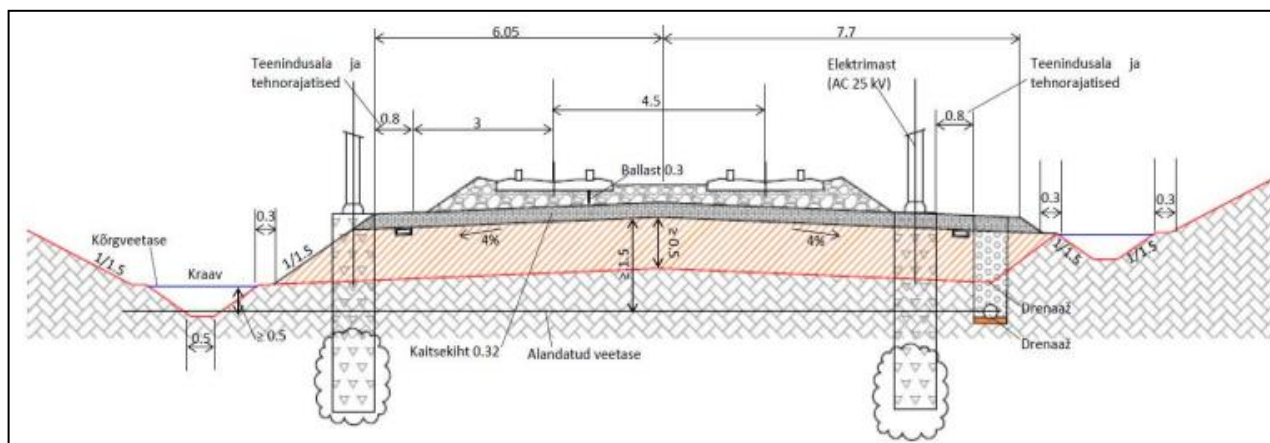
kasutusloa väljastamisel. Kaitsevööndiga arvestatakse juba raudtee projekteerimisel ning seal reguleerib tegevusi ehitusseadustik. [6]

4.2 Rööbastee

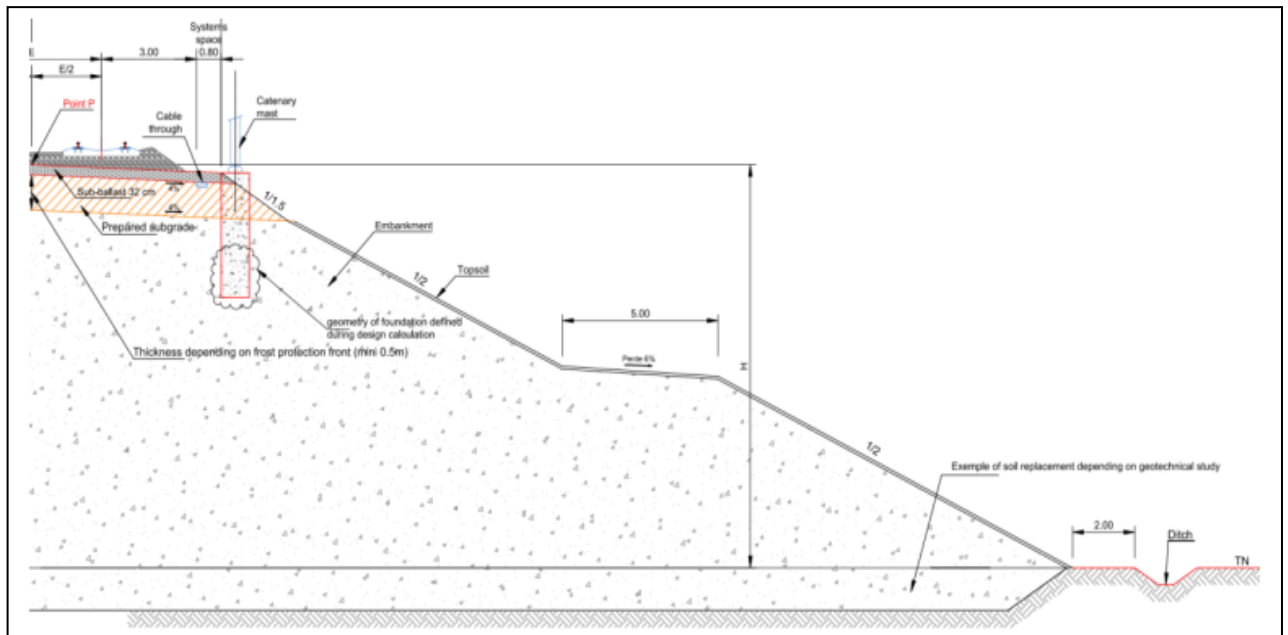
Rööbastee moodustavad raudtee pealmine ehitis (rööpad, liiprid, ballast), alusehitis ja taristu. Raudtee pealisehitis kasutatakse betoonliipreid ning pikkrööpaid, mis on omavahel keevitatud, veeremi stabiilsemaks liikumiseks ning müra vähendamiseks. Eestis on kasutuses erinevaid tüüpi rööpaid, kuid rööpamargid hakkavad ühtlustuma. Praegu on kasutuses rööpamargid R65, R50 ja UIC 60, kuid nendele lisaks on ka erandeid, mida kasutatakse erateedel. Muldkeha läbilõige sõltub pinnase koostisest, kiirusest ja paljudest muudest teguritest. Läbiviidavad uuringud, mis kaasnevad projekteerimisega annavad info õigete lahenduste valimiseks. Raudtee ehitatakse muldkehale ning täpsed eripärad täpsustatakse projekteerimise ajal. Alloleval joonistel 13, 14, 15 on illustratiivselt kujutatud rööbastee tüüpristlõikeid. [6]



Joonis 13. Kaheteelise raudtee tüüpläbilõige [6]



Joonis 14. Süvendis asuv paaristee lahendus [6]



Joonis 15. Rööbastee lõige kõrgel pinnasel [6]

5 TURBA STABILISEERIMISKATSED

5.1 Stabiliseerimisekatsed turbaproovide kogumisega rabadest

Katsete jaoks kogutud proovid on saadud puurimise teel, Rail Balticu geodeetiliste punktide lähedalt. Proovid võeti kolmest rabast, millest kaks raba asuvad Harjumaal ning üks Raplamaal. 2016 aastal võetud proovid võeti Kaigepere rabast asukohaga Raplamaa, Rae rabast asukohaga Harjumaal (lennujaama taga asuv turbamaardla) ning Männiku rabast asukohaga Männiku Harjumaal. Stabiliseerimiskatsetel kasutatud turbaproovid olid kõik erineva koostisega. [7]

5.2 Kaigepere raba

Proovid punktist koordinaatidega $X = 6528434$ m ja $Y = 546125$ võeti RB trassi punkti GL-09 IP6 lähedusest. Puurimise teel saadud proovid paari ruutmeetri suuruselt alalt. Antud kohas oli turbakihi paksuseks 3,25 – 3,35 m. Turbapinna võib selles kohas jaotada kaheks kihiks, pealmine kiht oli tumepruun, 1,25-1,5 m paksune ning alumine helepruun kiht oli 1,8 – 2 m paksune [7]:

- Kaigepere 1 (K1) – tumepruun turvas 0,0 – 1,5 m;
- Kaigepere 2 (K2) – helepruun turvas 1,5 – 3,3 m;
- Kaigepere 3 (K3) – tervest läbilõikest võetud proov 0,0 – 3,3 m.

5.3 Rae raba

Rae raba proovide võtmiskoha koordinaadid $X = 6583792$ m ja $Y = 551709$ m. Sellest rabast võetud proovid on kaevatud turbamaardla äärealalt ja kuivenduskraavi küljelt, umbes poole meetri sügavuselt. Joonisel 16 on näidatud Rae raba proovide võtu asukoht: [7]

- ülemine, vähelagunenud kiht ülemisest kihist;
- keskmiselt lagunenud turbakiht;
- vähelagunenud tume turbakiht.



Joonis 16. Rae raba turbaproovide võtmise koht. Joontega on eraldatud proovide võtmise kolm kihti. [7]

5.4 Männiku raba

Proovide võtmise punktiks on $X = 6576570$ m ja $Y = 543125$ m. Koordinaatide punkt asub Rail Balticu geotehnilise punkti GL-09 IP80 lähedal. Proovid jagunevad kolmeks osaks: [7]

- ülemine osa, mis oli 1,3 m paks, vähe- kuni keskmiselt lagunenu turbamass;
- keskmine osa on 3,15 m paks turbamass;
- alumine osa 0,15 m paks turbasegune muda.

6 TURBA OMADUSED

Turbaga tehtud katsed on läbi viidud Tartu Ülikooli geoloogia laboris ning nendes kasutatud turba koostised on erinevad. Katsetes kasutatavad turbaproovid on väga erinevad ning erineva lagunemisastmega. [7]

6.1 Lagunemisaste ning humiainete sisaldus

Turba koostise erinevus on kirjas tabelis nr 4 ning joonisel 17 ja joonisel 18 olevatel graafikutel. Katsetes kasutatud turbakoostised on kõik erinevad. M1, M2R (Männiku raba turvas), R1, R2 (Rae raba turvas), K1, K2, K3 (Kaigepere raba turvas). [7]

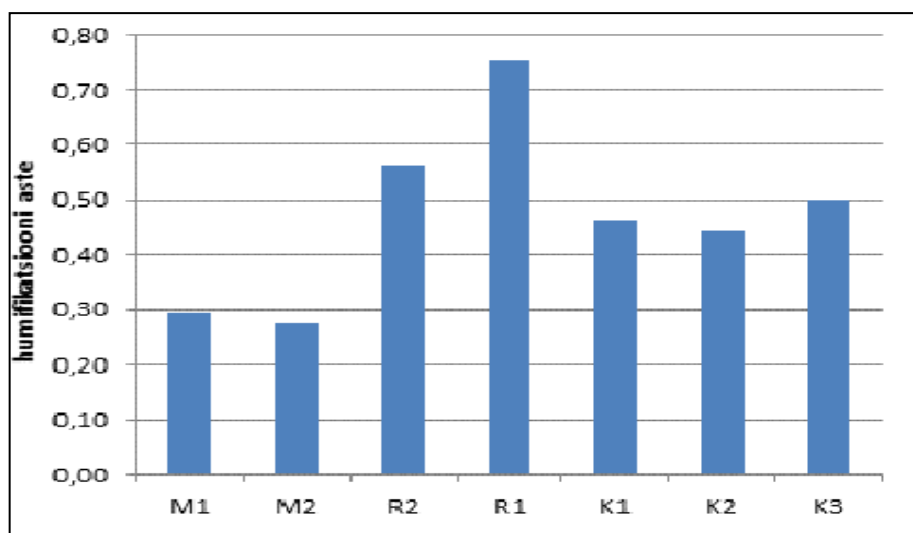
Tabel 4. Turbaproovide humifikatsiooniaste ja humiainete sisaldused. [7]

Proovi nr	Huumuse sisalduse aste	Von Post faas	HA ¹ , %	HMA ² , %	FA ³ , %
M1	0,29	H2	14,5	3,2	1,3
M2R	0,27	H2	12,2	4,9	1,1
R1	0,56	H3	16,7	7,8	1,7
R2	0,75	H5	18,0	10,1	2,1
K1	0,46	H6	17,3	8,4	1,6
K2	0,44	H6	19,7	9,9	1,6
K3	0,50	H6	20,1	6,6	1,8

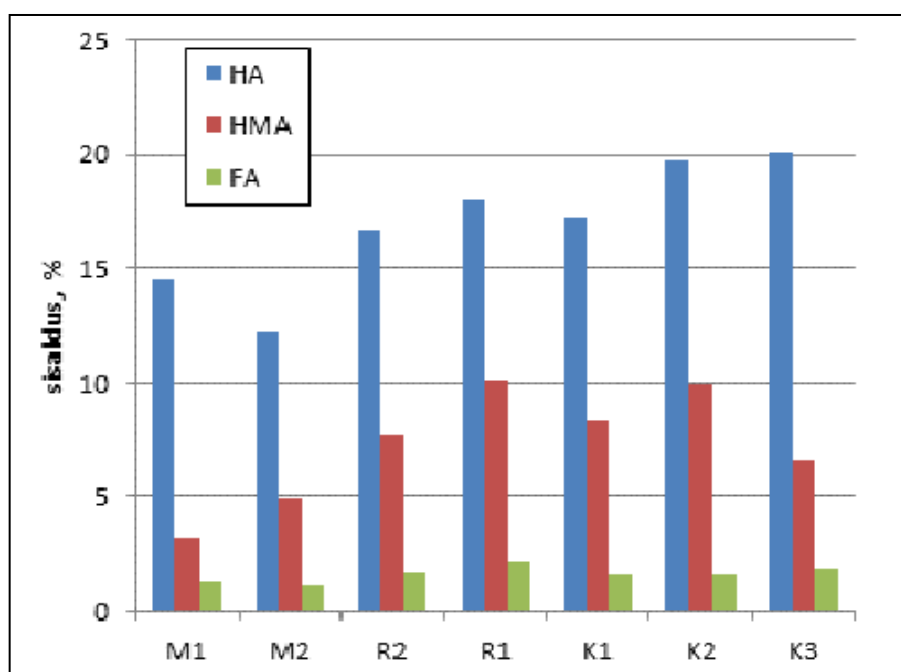
¹ HA – humiinhape

² HMA – hümatomelaanhape

³ FA – fulvohape



Joonis 17. Turbaproovide huminikatsiooniaste [7]



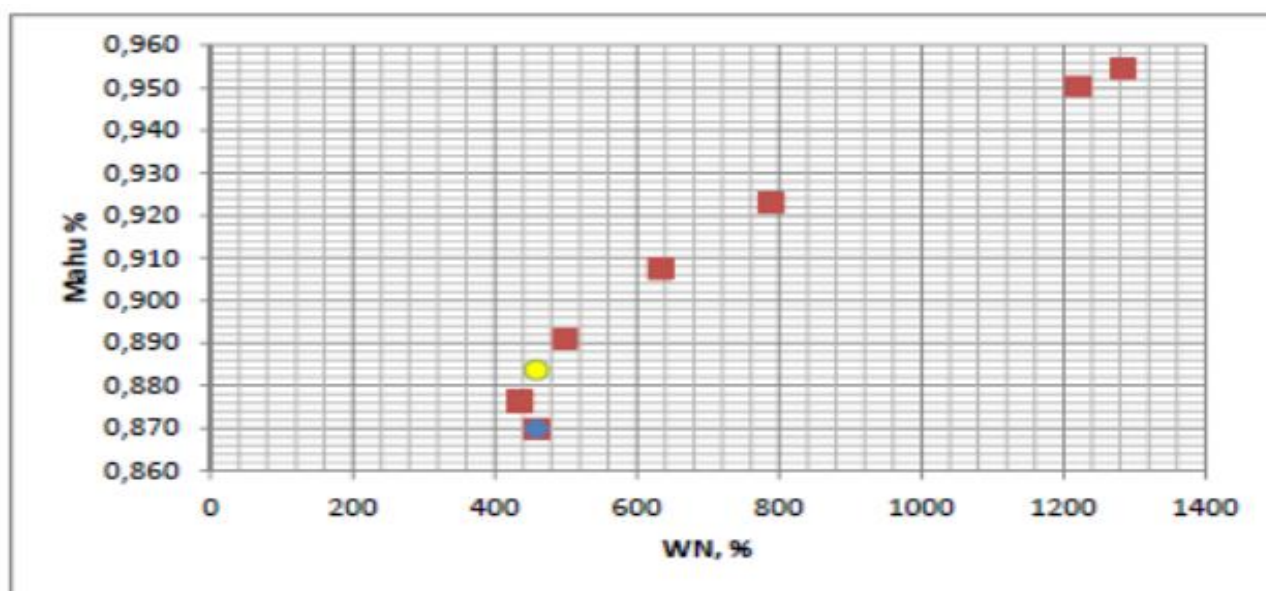
Joonis 18. Turbaproovide orgaaniliste ühendite sisaldused. *HA* – humiinhape, *HMA* – hümatomelaanhape, *FA* – fulvohape. [7]

6.2 Turba füüsikalised omadused

Alljärgnevas tabelis 5 on välja toodud proovide keskmised omadused. Laborisse viidud turbaproovi keskmine veesisaldus enne segamist ja sideaine lisamist. Võrdluseks on Eesti puutumata turbasoo veesisaldus umbes 1100–1300 %. Joonisel 19 on näidatud veesisaldusprotsent turbas.

Tabel 5. Turbaproovide veeküllastusaste – Sr, erikaal – Gs, veesisaldusprotsent – WN, kuivmahukaal – γ_d , poorsustegur E, poorsus – N, ja mahukaal – γ_n . [7]

Proovi nr	Gs	WN, %	Sr	E	N	γ_d , kN/m ³	γ_n , kN/m ³
M1	1,64	1284,1	1	21,06	0,95	0,73	10,09
M2R	1,57	1220,8	1	19,17	0,95	0,76	10,09
R1	1,46	458,1	1	6,69	0,87	1,86	10,40
R2	1,52	789,1	1	11,99	0,92	1,15	10,20
K1	1,63	435,1	1	7,09	0,88	1,98	10,57
K2	1,55	632,4	1	9,80	0,91	1,41	10,31
K3	1,64	498,9	1	8,18	0,89	1,75	10,49



Joonis 19. Veesisaldusprotsent turbas arvutatud erikaalu kaudu [7]

Männiku proovivõtukohtas oli veesisalduse jaotus järgmine: [7]

- 0,5 m sügavusel – 416,9%;
- 1,0 m sügavusel – 467,1%;
- 1,5 m sügavusel – 949,8%;
- 2,0 m sügavusel – 1220,3%;
- 2,6 m sügavusel – 1246,7%;
- 3,2 m sügavusel – 1133,3%;
- 3,8 m sügavusel – 967,3%;
- 4,5 m sügavusel – 287,5%.

Ära tuleb märkida, et proovi võtmise ajal võib olla veesisaldus mõjutatud, kuna puurimisel võib olla turbast osa vett välja surutud. Proovi võtmise vahemik oli ühest kuni nelja meetrini. [7]

7 PÕLEVKIVI CFB TUHK

7.1 Põlevkivituha proovid (CFB)

Põlevkivituha proovid on võetud 21. 12. 2016, 22. 01. 2017 ning veebruari keskel elektrijaama tavalisel tööpäeval. Veebruari keskel võetud proovil puudub info selle võtmise täpse aja kohta. Jaanuaris (22.01.2017) võetud proov oli pärit kaheksandast plokist ja veebruaris võetud proov elektrifiltri esimeselt väljalt ning vastav märge oli ka proovide lipikutel. Proovid transporditi Tallinna Tehnikaülikooli laborisse 22.12.2016, 02. 02. 2017 ja 17. 02. 2017 uurimiseks. [7]

7.2 Põlevkivi CFB tuha omadused

Põlevkivituha peenus, kaltsiumoksiid kloriidisisaldus ja sulfaadisisaldus, mahupüsivus ning normaalkonsistents ja tardumisajad määrati erinevate standardite kaudu. Katsete tulemused on esitatud Tabelis 6.

22.12.2016 TTÜ laborisse viidud proovi tardumisaja algus oli suure ajalise hilinemisega võrdluses veebruaris laborisse viidud prooviga, mis mõjutas ka tardumisaja lõppu. Seoses sellega tuleb siinkohal täpsustada, et turbaproovide stabiliseerimisel kasutati just seda CFB tuhka. [7]

Tabel 6. Põlevkivi CFB-tuha tihedus, eripind, vaba CaO, kloriidide ja SO₃ sisaldused ning mahupüsivus, normaalkonsistents ja tardumisajad [7]

Proovi laborisse viimise aeg	Tihedus g/cm ³	Eri-pind, m ² /kg	CaO vaba %	Kloriidid %	SO ₃ %	Segu normaal konsistents %	Tardumisaja algus	Min. lõpp	Mahupüsivus
22.12.2016	2,73	225	9,67	0,36	5,82	64,0	~14 h	~24 h	Rahuldas nõude
02.02.2017	2,74	221	10,66	0,29	5,68	64,0	50 h	320 h	Rahuldab nõude
17.02.2017	2,75	223	9,90	0,28	5,91	64,0	45 h	260 h	Rahuldab nõude

Standardit järgides tehti kindlaks survetugevus, kasutades segu valmistamiseks tsemendi asemel tuhka. Segust valmistati kolm katsekeha, mille mõõtmed olid 40 x 40 x 160 mm ning need kivistati

temperatuuril 18 – 22° C 48 h. Katsekehad poolitati ning seejärel määrati nende survetugevus. Katse tulemused on toodud Tabelis 7. Segude survetugevus on 22.12.2016 laborisse viidud tuhal väikseim. [7]

Tabel 7. CFB tuha segude survetugevus [7]

Proovi laborisse viimise aeg	Katsekeha valmistamise aeg	28 päeva survetugevus N/mm²	56 päeva survetugevus N/mm²
22.12.2016	16.01.2017	2,5	3,4
02.02.2017	08.02.2017	3,0	4,3
17.02.2017	21.03.2017	3,6	3,8

Tabel 8. Segude aktiivsus. R_{põhi} koostis: 80% CEM I 42,5 N + 20% tuhka. R_{kontroll} koostis: CEM I 42,5 N. Aktiivsus $A = R_{põhi} / R_{kontroll}$ [7]

Proovi laborisse viimise aeg	Katsekeha valmistamise aeg	Proovide katsetamise aeg	R_{põhi} Survetugevus N/mm²	R_{kontroll} Survetugevus N/mm²	Aktiivsus %
22.12.2016	10.01.2017	7.02.2017	53,2	60,8	87,5
2.02.2017	8.02.2017	8.03.2017	55,0	61,7	89,1
17.02.2017	21.03.2017	18.04.2017	54,1	61,7	87,7

8 STABILISEERIMISEL KASUTATUD RETSEPTID

Katsete tulemused ning pinna tugevuse kasvamine („*In situ*“) Ussisoos rajatud katselõigul näitavad, et vajaminev tugevus on saavutatud ka ainult põlevkivituhaga pinnast stabiliseerides. Retseptis mis on välja pakutud arvestati seda parameetrit ning kui tsemendist saab loobuda annab see märgatava kokkuhoiu. Sideainete segus kasutati põlevkivi tuhka ning tsementi CEM 142,5N. Katsetes kasutati kolme tüüpi segu [7]:

- segu I – kasutati puhast tsementi, millega on ka eelnevalt katseid tehtud;
- segu II – kasutati tsementi ja põlevkivi tuhka;
- segu III – segus kasutati ainult põlevkivituhka (CFB).

Kuna parim tugevus saavutatakse sideaine suurema kogusega siis retseptiks valiti puhta tsemendiga sideaine.

Uuringud näitasid, et kõik kolm segu annavad välja vajaliku tugevuse ning selle põhjal võib eeldada, et stabiliseerimisel turvast võime tsemendist loobuda. Senised uuringud näitavad, arvestades katsete tulemusi, et sideaine retseptis saab tsemendist loobuda, samas peab arvestama, et pinnase viimane tugevus sõltub sideaine kogusest. Läbiviidud katsetes kasutati samas koguses tuhka, kui eelnevas katses tsementi ning seetõttu saab mõlemat retsepti üheselt hinnata. Siiski tuleb välja, et segude hindamisel pikas perspektiivis tuleb selgelt välja, et puhta tsemendiga tehtud katsed on kõige tugevama survetugevusega. [7]

8.1 Kasutatavad lahendused

Küsitluste käigus on selgunud, et tänapäeval kasutuses olevad lahendused ei ole kumbki need millest juttu, kuigi koormamisega meetod on osa sellest ning viaduktide puhul kasutatakse siiani vaiamist. Vesteldes erinevate tee- ja raudtee ettevõtetega selgus, et pehmele pinnasele ehitatakse teid koormamise meetodil. Antud meetod toimib pehme pinnase koormamisel ja vee välja surumise põhimõttel, mida on ka eelnevalt töös kirjeldatud. Antud meetodi puhul ei tohi pinnast üle koormata vaid aeglaselt raskusega koormata kuni pehmest pinnasest on vesi välja surutud ning sinna peale saab ehitada vajamineva rajatise, kas maantee või raudtee näol. Antud lahendus on aeganõudev, kuid samas kõige säästlikum viis tee- ja raudteetamme rajada. Vastavalt pinnasele ja vajadusele kaevatakse osaliselt pehme pinnas välja, koormatakse, kuni aluspinnas saavutab oma vajaliku tugevuse, lisatakse geotekstiil või geovõrk vastavalt projektis ettenähtule ning seejärel pealisehitis.

9 TEE VAJUMIPROGNOOS

9.1 Tee vajumine ja vajumisprognoos

Tee aluspinnas on koormus pinnases olevatele kihtidele, mille tõttu need kihid tihenevad. Üldiselt toimub pinnase tihenemine alusehitise rajamisel. Kuna ehitamisel tekivad minimaalsed siirded pinnases siis vajumisprognoosi ei vajata. Sama aga ei saa öelda pehmete pinnaste kohta, mille järkjärguline tihenemine jätkub ka tee kasutuses olles. Pinnased millest räägitakse on pehme saviliiv ning turvas. Kuna pinnase paksus kihiti on kõikuv võib see põhjustada ka tee pikikalde ja põikkalde muutumist. Vajumisel üle lubatud piiride peab aluspinnad asendama või stabiliseerima. Vajumisprognoos näitab, kas pinnas on vaja asendada või stabiliseerida. Vajumisprognoos on vajalik sildade ning viaduktide projekteerimisel, kuna need ehitatakse vaivundamentidele. Üldiselt kasutatakse pehmete pinnaste puhul sildade ning viaduktide rajamisel vaiade lahendust, kuna need võimaldavad rajatised ehitada mittevajuvatena. [8]

9.2 Vajaminevad andmed

Tee vajumise arvutamiseks on vaja järgnevaid andmed [8]:

- Pinnaste trassialune koostis;
- põhjavee tase enne alusehitise rajamist ;
- põhjavee tase peale mulde ehitamist teetrassi all;
- pinnaste tihenemise parameetrid, pinnaste maht;
- parameetrid pinnase tihenemisel ajas;
- mulde kõrgus, materjalide mahukaal;
- pikikalle, põikikalle ning lubatud kõikumised.

Andmete puudumisel ei ole võimalik arvutusi teostada, lahenduse jaoks on vajalik kõikide andmete olemasolu.

9.3 Algandmete kogumise viis

Pinnaseuuringud ning nende tulemusel koostatud mudel kirjeldab pinnase levikut ning iseloomustab pinnaseid vajalike normsuurustega. [8]

Arvutamiseks on vajalik info muldkeha kõrgusest, nõlva kalakust ning on vaja teada kasutatud materjalide normsuuruseid. Andmed on leitavad projektide joonistelt. Põhjavee tase arvestatakse

võrdseks veetaseme alandamise lahendusega määratud maksimaalse veetasemega. Kuivendamise projekt kooskõlastatakse teealade kuivenduse projekteerimise juhendiga. Kontrollarvud mille järgi kontrollitaks siirete kõrvalekaldeid võetakse erinevatest juhenditest: [8]:

- tee ehitamise kvaliteedi nõuded;
- *tien geotekninen suunnittelu*;
- muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised.

Tee kandevõime arvutusteks peavad olema olemas järgnevad andmed [8]:

- pinnaste levik teetammi alla;
- teetammi all olev põhjaveetase;
- pinnaste kandevõime;
- tihendamisega saavutatud kandevõim;
- muldkeha kihtide paksus;
- normaalelastsusmoodul.

Algandmete puudumisel arvutada ei ole võimalik ning arvutuste tegemiseks peavad olema olemas eelloetletud andmed.

9.4 Kontrollimine

Savipinnaste tihenemine võib kesta aastaid, mistõttu tuleb pinnase siirete teada saamiseks koostada vajumisprognoos ning vajumi ajaline prognoos. Detailsed arvutused ning näited leiab juhendist „*Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu, 9/2010 Liikenneviraston ohjeita*“. Vajumisprognoos peab andma info kuidas hinnata tee alusehituse vajumist. Tabelis 9 on näidatud erinevate maanteede vajumite ja kallete lubatud kõikumised. [8]

Tabel 9 Maksimaalse vajumise ja piki- ning põikkallete lubatud piirväärtused. [8]

Kiiruse seos	Maksimaalne vajumine, mm	Pikikalde maksimaalne muutus, %	Põikkalde maksimaalne muutus, %
Põhimaantee	300	0,4	1,5
Tugimaantee	400	0,5	1,5
Kõrvalmaantee	500	0,6	2,0

9.5 Lahendused vajumite vähendamiseks

Tee vajumi vähendamiseks saab kasutada pinnase üle- ja eelkoormamist. Alljärgnevalt on välja toodud erinevad eelised ja puudused lahendamaks vajumi vähendamiseks. [8]:

- eelised – väljakaevet saab kasutada samal objektil;
- eelised – lihtne kaevetöö;
- puudused – pinnase tihenemiseks vajaminev aeg on suhteliselt pikk;
- puudused – väljakaeve on vaja vedada objektilt ära, kaevetööde maht on suur;[8]:

Aluspinnase stabiliseerimine pehmete pinnaste korral:

- eelised – väljakaeve maht on väike, aeg alusehitise ehitamisel on oluliselt lühem kui muude lahenduste puhul;
- puudused – tegemist on erilahendusega ning vajaminev eeltöö on mahukas ning aeganõudev.

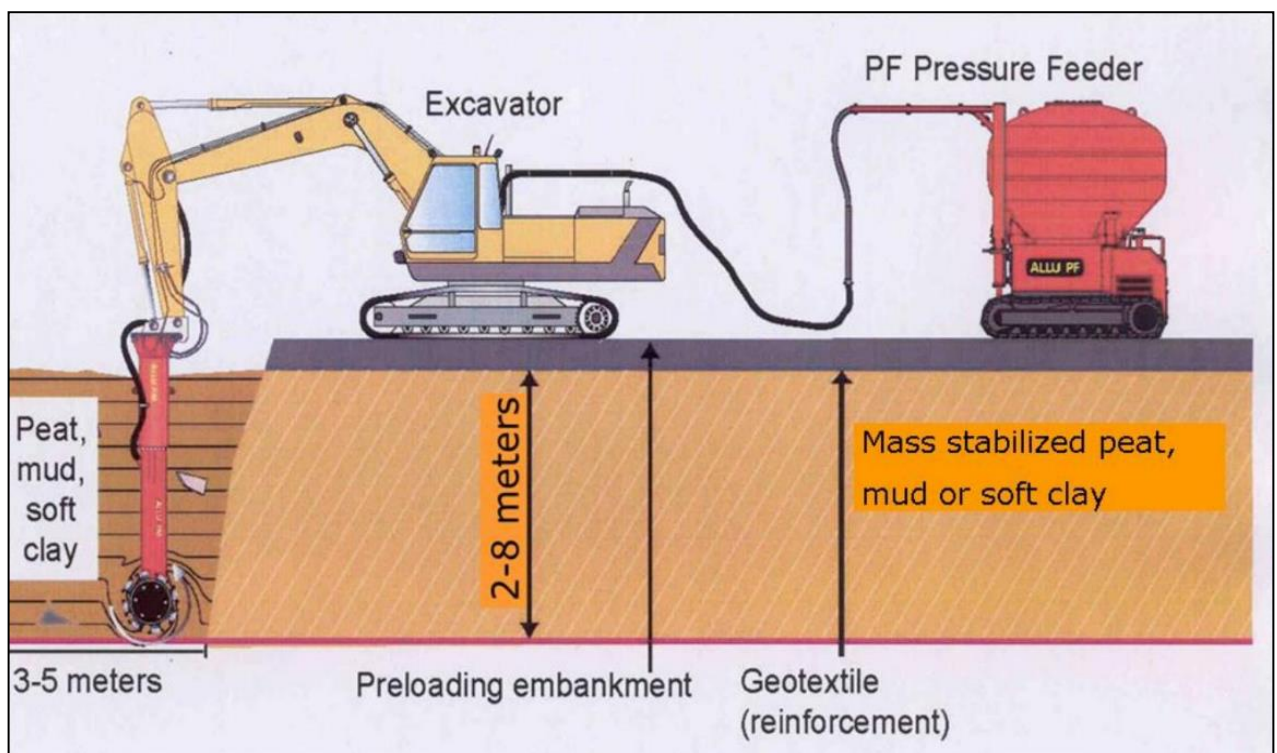
Vajumisprotsessi kiirendamine, kasutades vertikaaldreene.[8]:

- eelised – paigaldus on väikse mahuga ning suhteliselt madala maksumusega;
puudused – On vaja kasutada koos üle-ning eelkoormamisega, seetõttu ei kasutata väikestel objektidel;
- eelised – kindlate omadustega materjal;
- eelised – võimalusel saab muuta vaiade arvu ning vastavalt vajadusele paigaldada erinevale kõrgusele ja erineva tihedusega.);
- puudused – raske paigaldus kui drenid on veest kergemad.

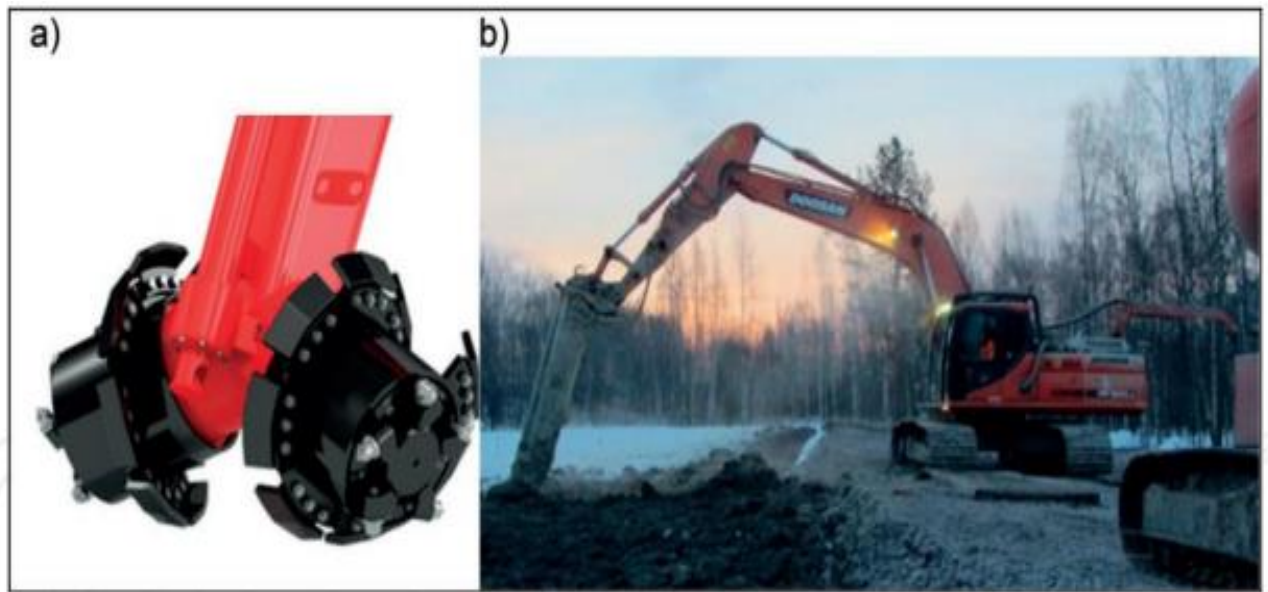
10 MASSI STABILISEERIMISE JA VAIAMISE SEADMED, MASINAD, TEHNOLOOGIAD

10.1 Massi stabiliseerimise seadmed

Massistabiliseerimise meetodi põhimõte on näidatud joonisel 21. Ekskavaatori küljes olev poom on varustatud keerleva pöördpeaga, millega pehme pinnas segatakse. Ekskavaatori taga olev mahuti on varustatud hüdraulilise pumbaga ning läbi toru pumbatakse sideaine ekskavaatori masti kaudu pinnasesse ning segatakse. Keemiliste protsesside toimele pinnas taheneb ning muutub jäigemaks. Pinnase tugevnemine võtab aega ning tugevus sõltub sideaine segust ja kogusest. Pinnase tugevust kontrollitakse kindla aja järelt sarnase seadmega, kus on segamispea asemel labadega ketas ning vastavalt koormusastmele määratakse ära pinnase tugevus. Joonisel 22 a on kujutatud poomi otsas olev segamispea ning Joonise 22 b on näidatud välifoto massistabiliseerimise rakendamisest. Praeguse varustusega võimaldab ekskavaatorile kinnitatud segamisseade soodsatel tingimustel teostada stabiliseerimist 7 – 8 m sügavusele. Optimaalne stabiliseerimissügavus on tavaliselt umbes 3 – 5 m. Kuid ka õhemaid kihte saab mass-stabiliseerida. [4]



Joonis 21. massi stabiliseerimise seadmed ja tööpõhimõte [4]



Joonis 22 Massistabiliseermise seade töötamas [4]



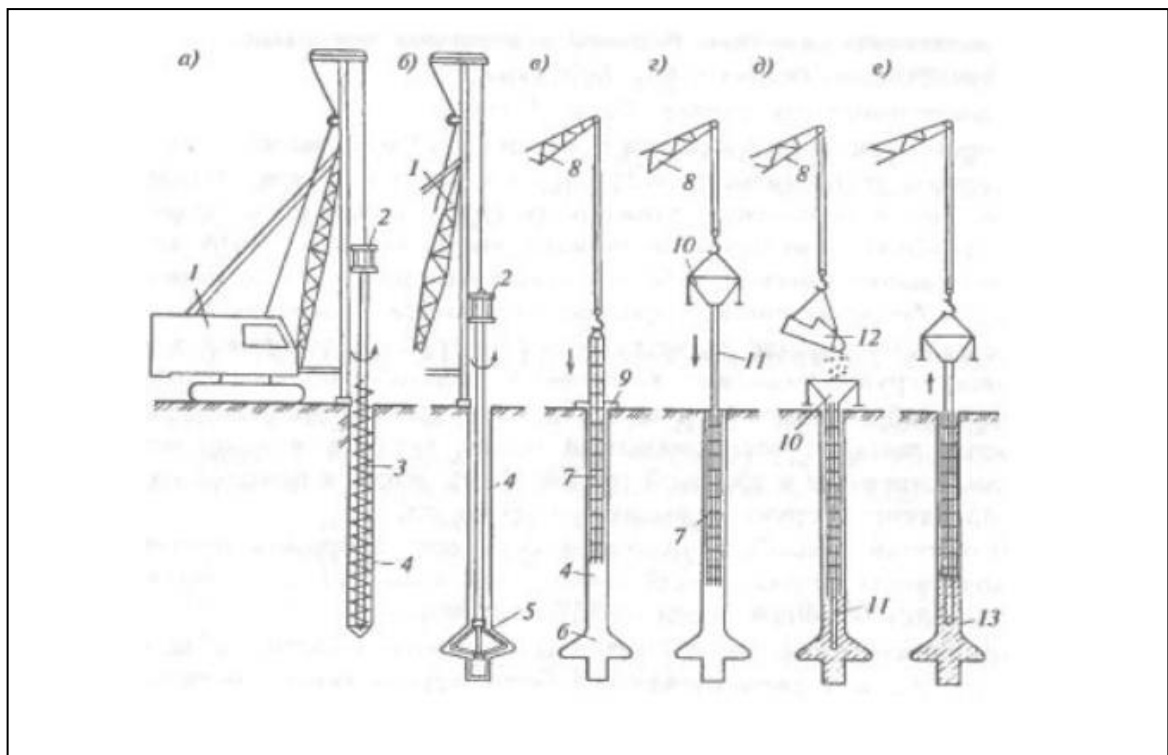
Joonis 23. Massi stabiliseerimise põhivarustus koos ekskavaatori küljes oleva survesööturiga, mis on ühendatud segamisseadmega [4]



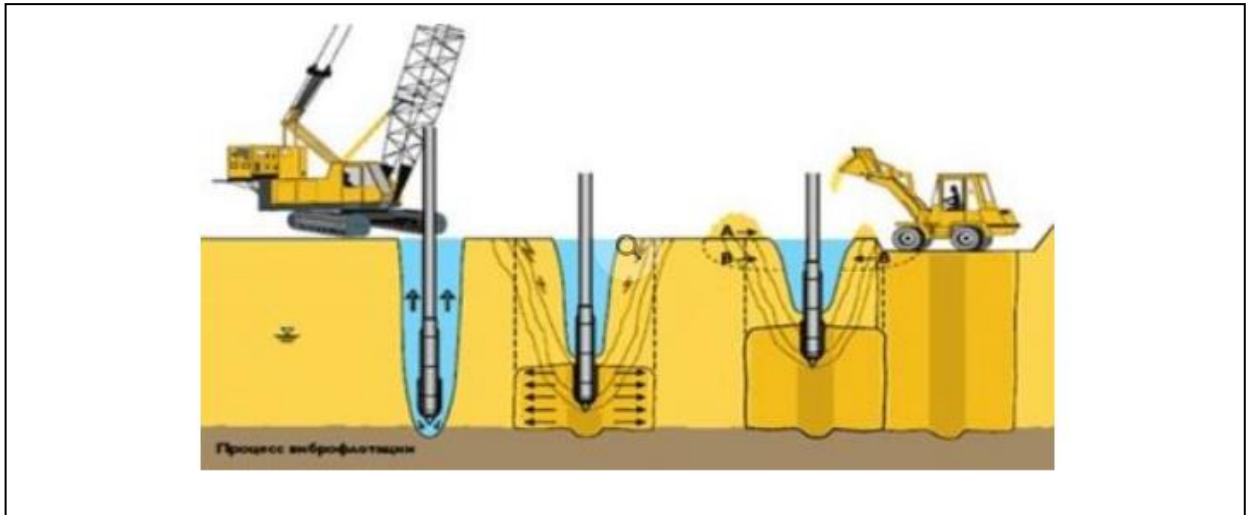
Joonis 24. Massi stabiliseerimise masina segamispea [4]

10.2 Vaiamise seadmed ja masinad

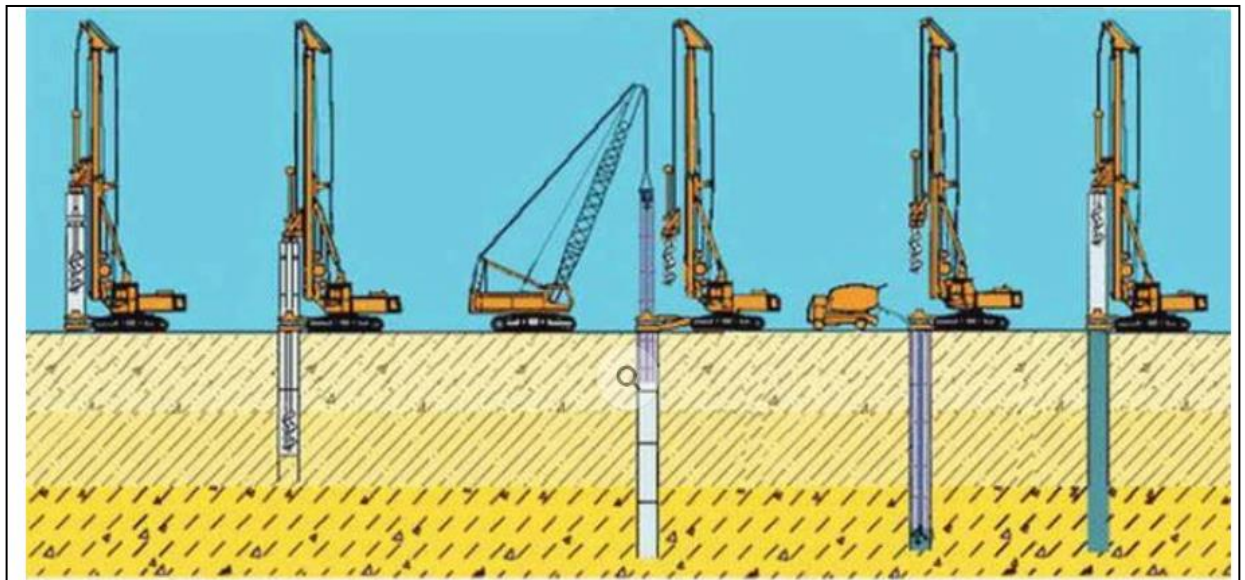
Vaiade tõmbamise tehnoloogia eripäraks on vajadus eelnevalt puurida vajaliku sügavusega kaevud. Joonistel 25-28 on kujutatud erinevad vaiamislahendused, mida kasutatakse ning nende tööpõhimõtted.



Joonis 25. Vaiade paigaldamine ilma tugiseinu kinnitamata, esmalt puuritakse vaia kaev ning seejärel paigaldatakse vaiad. [9]



Joonis 26. Kasutatakse savi, mis väldib kaevu kokku vajumise [9]



Joonis 27. Kasutatakse ümbistorusid (manteltorusid), mis võimaldavad tugede kinnitamist [9]

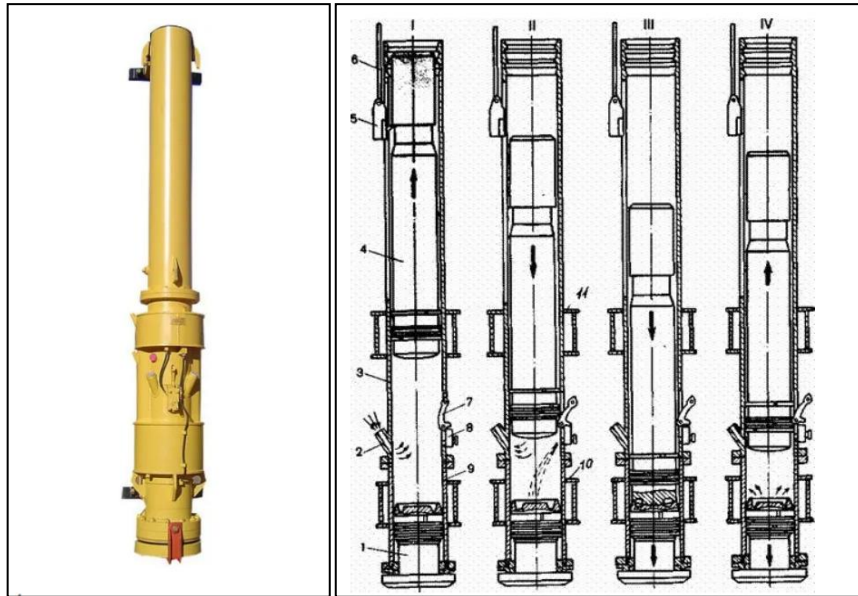


Joonis 28. Vaiade löömise masinad, mis töötavad löögisurvel [3]

Vaiade paigaldamiseks keerulistes pinnasetingimustes on kohustuslik enne puurida kaevud. See võimaldab hüdraulilise vasaraga löömisel vähendada kahjustatud vaiade arvu. Vaiamasina masti külge kinnituvad puurimisseadmed paigaldatakse mastile pärast kaevu kõrvale jätmist, enne järgmist etappi. Tabelis 10 on toodud andmed erinevate masinatüüpide võimalustele.

Tabel 10 Erineva jõudlusega diiseltasara andmed [3]

Seadme tüüp	SP 74	SP 75A	SP 76A	SP 77A	SP 78A	SP 79A
Löögi mass, t	0,6	1,25	1,8	2,5	3,5	5
Maksimaalne löögienergia, kJ	14	29	42	59	82	118
Vaiade mass, t	0,6 – 12	1,2 - 3,01	1,8-5,0	2,6-2,5	3,5-8,0	10
Kaal, t	1,5	2,7	3,85	5,5	7,7	10
Mõõtmed, mm						
Kõrgus, h	4075	4500	4500	5200	5500	5800
Pikkus, l_1	430	750	800	920	1000	1000
Laius, l_2	664	600	600	730	950	950



Joonis 29. Toru kujuline diiselvasara konstruktsioon. [3]

Joonise 29 kujutatud torukujulisi diiselvasaraid kasutatakse 1,2 – 10 tonni kaaluvate raudbetoonvaiade paigaldamiseks mistahes pinnasesse, kus ei esine kivimeid. Diiselvasarad töötavad temperatuurivahemikus -40 kuni $+40^{\circ}$ C. Madalatel temperatuuridel vajavad antud vasarad eelsoojendust. Diiselvasarat kasutatakse palju tänu tema töökindlusele ning lihtsale tööpõhimõttele ning tema jõudlus on väga kõrge. Puuduva lisavarustuse ning minimaalse hooldusvälbaga on tegu väga töökindla seadmega. Vasar töötab kahetaktilise diiselmootori põhimõttel. [3]

Diiselvasarad jagunevad toru- ja varrashaamriteks. Põrutusosa massist sõltuvalt jagunevad vasarad kergeteks, keskmisteks ja rasketeks, mis kaaluvad vastavalt kuni 600 kg, kuni 1800 kg ja üle 2500 kg. Kaasaegseid diiselvasaraid kasutatakse betoonvaiade, terastorude ja lehtvaiade paigaldamisel.[1]

Vaiamise meetodid on väga levinud kuid tehnoloogia on arenenud ning seadmed on muutunud kallimaks. Tänapäeval kasutatakse vaiamise lahendusel üldiselt hüdraulilisi seadmeid, kuna need on oluliselt töökindlamad, kui vanad diiselmootoriga seadmed.

11 KOKKUVÕTE

Massistabiliseerimist on kasutatud pinnaseparandusmeetodina mitmekülgses rakendustes pehme pinnasega alade ehitamisel viimase 25 aasta jooksul 25 – 30 riigis. Paljudel juhtudel on massiga stabiliseeritud pinnas turvas. Seadmete arendus on olnud aktiivne ja seda võib hetkel pidada tehniliselt kõrgel tasemel olevaks. Seadmed on suhteliselt kerged, mobiilsed ja seetõttu hõlpsasti kasutatav erinevates kohtades. Erinevad pikaajalised uuringud on näidanud, et stabiliseeritud turba tugevus on tõusnud keskmiselt 1,6 korda. Seetõttu võib järeldada, et massiliselt stabiliseeritud turba pikaajaline käitumine on stabiilne. Siiski rõhutatakse, et esialgsed stabiliseerimiskatsed tuleks läbi viia laboris, et tagada massistabiliseerimise läbiviimiseks optimaalse sideaine ja lisamiskiiruse valimine. Massi stabiliseerimise meetodit kasutatakse massivahetuse, vaiade või muude alternatiivsete meetodite asendamiseks. Võrreldes teiste meetoditega on see eriti ökonoomne juhtudel, kui kaevandatava turba veokaugused on pikad, kaevandatava turba asendamiseks ei jätku materjali või pole piisavalt ruumi prügilasse ladestamiseks. Sideaine moodustab massistabiliseerimisel suurima osa ühikuhinnast. Sideaine (nt tsemendi) CO₂ emissioon on sageli kõrge, kuid lisatud sideaine tõttu on stabiliseeritud turbal suur CO₂ neeldumispotentsiaal. Tsemendi kogust sideaines saab vähendada või optimeerida, kui sideainesegu osana kasutatakse taaskasutatud materjale (nt lendtuhka). Esiteks on stabiliseerimine keskkonnasõbralik meetod, kuna säästab loodusvarasid, ei vaja prügilaalasid ning vähendab oluliselt transpordivajadust ja sellega seotud heitkoguseid. Hindamise täpsemaks lõpuleviimiseks on vaja rohkem uuringuid, võttes arvesse CO₂-ekvivalendi heitkoguste vähenemist töötlemata soomassides. Seega on piisavalt kogemusi järeldamiseks, et massi stabiliseerimine on turba jaoks kasulik ja vastuvõetav pinnaseparandusmeetod. See on osutunud paindlikuks, kuluefektiivseks, keskkonnasõbralikuks ja stabiilseks turbakihtide töötlemiseks. Eestis on antud meetodit veel vähe kasutatud, kuid loodetavasti on tulevikus vastav meetod enamlevinud ka Eestis, kuna tegu on suhteliselt keskkonnasõbraliku meetodiga. Hetkel kui kõik muutub rohelisemaks võib just see meetod olla Eesti mõistes tuhamägede likvideerimisel suureks abiks. Seoses RB ehitusega on Tootsi – Pärnu lõigu keskkonnamõtjude hindamises välja toodud, et karbonaatkivimi kasutamisel kasvab kaevemaht ligikaudu 2 – 3 korda ja seetõttu on vaja avada uusi karjääre, vastasel juhul muutub karbonaatkivimi varustuskindlus kriitilise piirini juba raudtee ehitamise algusaastal, kui aga saab kasutada muid materjale kasvaks kaevemaht ligikaudu 1,5 korda ja varustuskindlus ei langeks alla kriitilist piiri kümne aasta lõikes. Siin on mõttekoht, mida kasutada alusehitise ehitamiseks. [10]

Hetkel on teada, et aherainet ning põlevkivi tuha jääke tekib aastas ca kakskümmend miljonit tonni ja sellest tuha osakaal on 9,2 miljonit tonni, millest kasutatakse ära alla nelja protsendi. [11] Arvestades eeltoodut, siis põlevkivi tuhal on potentsiaali pinnase stabiliseerimise mõistes. Hetkel kasutatakse tuhka tsemendi baasainena ning kergplokkide ehitamiseks, kuid RB trassi ehitusel põlevkivituha kasutamine oleks üks lahendus säästa Eesti maavarasid. Hetkel käsitleb Euroopa Liit põlevkivi tuhka ohtliku jäätmena, kuigi kivisöe tuhka mitte, seetõttu peaks uurima kivisöe ning põlevkivi tuhka omadusi põhjalikumalt. Siinkohal vajab märkimist ka see, et tsemendi ja lubja PH on suhteliselt sarnane põlevkivi tuhale, ometi tsementi ja lubja kasutatakse igapäevaselt.

Kokkuvõtteks tuleb katsete tulemustega Euroopa liidule selgitada, et jääde CFB tuha näol ei ole kahjulik ning seda saaks taaskasutada pinnase tugevdamisel.

12 SUMMARY

In the last 25 years, the method of mass stabilization has been utilized in various earthmoving projects across 25 to 30 countries as a means of remediating soil. Peat, a consistently high-quality soil, has been commonly treated using this technique. The development of equipment has been actively pursued and has reached a technologically advanced stage. These lightweight and portable devices can be easily employed in different locations. Extensive long-term studies have consistently demonstrated that stabilized peat experiences an average strength increase of 1.6 times. This indicates that high-quality, stabilized peat exhibits long-term stability. However, it is crucial to highlight the importance of conducting initial stability tests in a laboratory setting to ensure optimal selection of binders and addition rates for batch stabilization.

The utilization of mass stabilization techniques, such as mass exchange stacking or alternative methods, is employed to replace mined peat. This method proves to be highly cost-effective, especially when the peat needs to be transported over long distances and there is limited material or space available for landfilling. Adhesives, which contribute significantly to the unit price, are the primary components responsible for ensuring quality stability. While binders like cement tend to have higher CO₂ emissions, they also possess a greater potential for CO₂ absorption when used to stabilize peat. By incorporating recycled materials like fly ash into the binder mix, the cement content can be reduced or optimized. The adoption of stabilization techniques not only benefits the environment by conserving natural resources and eliminating the need for landfills, but it also greatly reduces transportation requirements and associated emissions. However, further research is necessary to conduct a more comprehensive evaluation of the CO₂ equivalent emission reductions achieved through the treatment of untreated peatlands.

So, there is enough experience to conclude that mass stabilization is beneficial for peat and acceptable soil remediation methods. It has proven to be flexible, cost-effective, for environmentally friendly and stable processing of peat layers. There are still a few of these methods in Estonia, but hopefully, in the future, the corresponding method will be more common in Estonia as well, as it is a relatively environmentally friendly method. Now when everything becomes greener, just this method can be of great help in the elimination of ash heaps in the Estonian sense. In connection with the construction of RB, Tootsi-Pärnu is in the environmental impact assessment of the section, it was pointed out that the excavation volume increases when using carbonate rock approximately 2 – 3 times and therefore it is necessary to open new quarries, otherwise, the carbonate rock will change security of supply reaches a critical limit already in the first year of railway construction, when other means can be used

materials, the excavation volume would increase approximately 1.5 times and the security of supply would not fall below the critical limit of ten by year. This is a thought to consider, when planning the construction of the base building.

It is a known fact that every year, approximately twenty million tons of tailings and oil shale ash residues are generated. Out of this amount, 9.2 million tons consist of ash, but only a fraction of it, less than four percent, is utilized. Considering previous, there is potential to use oil shale ash in terms of soil stabilization. Currently, ash is used as a base material for cement and lightweight blocks, but implementing use of oil shale ash in RB construction could be a viable solution to conserve Estonia's mineral resources. Interestingly, while coal ash is not considered hazardous waste in the European Union, oil shale ash is. This discrepancy calls for a more comprehensive study of the properties of both coal and oil shale ash. It is worth mentioning that the pH levels of cement, lime, and shale ash are quite comparable, and yet cement and lime are widely utilized daily. Therefore, based on the test outcomes, it is imperative to convey to the European Union that the presence of CFB ash on the surface is not detrimental and could be reused to strengthen the soil.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] cityshin, „Löögitehnoloogia aetavate vaiade löömiseks. Vaiade löömine diiselveasarataga Vaiade löömine diiselveasarataga,“ cityshin, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cityshin.ru/et/lathes/udarnaya-tehnologiya-pogruzheniya-zabivnyh-svai-zabivka-svai-dizel-molotami/> (kasutatud 27.12.2023).
- [2] „<http://ee.zzpiling.com/vibro-hammer/electric-vibro-hammer/dz30a-pile-hamme.html>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://ee.zzpiling.com/vibro-hammer/electric-vibro-hammer/dz30a-pile-hamme.html> (kasutataud 27.12.2023).
- [3] „<https://kvartalmuz.ru/et/thermo/machines-for-driving-piles-what-do-you-think-than-piles-are-hammered/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://kvartalmuz.ru/et/thermo/machines-for-driving-piles-what-do-you-think-than-piles-are-hammered/>.
- [4] H. J. P. L. T. N. I. H. Juha Forsman, „https://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/mass_stabilization_manual_2015.pdf,“ 19 09 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/59545#B50> (kasutatud 11.09.2023).
- [5] T. K. M. R. E. K. Sven Sillamäe, „https://media.rmk.ee/files/RMK_metsateede_juhis_2.1_2022.pdf (kasutatud 01.09.2023),“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://media.rmk.ee/files/RMK_metsateede_juhis_2.1_2022.pdf (kasutatud 01.09.2023).
- [6] H. OÜ, „RAIL BALTICU RAUDTEETRASSI LÕIGU „KANGRUHARJU JA RAPLA MAAKONNA PIIR “,“ 13 10 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2021/04/RBDTD-EE-DS1-ZZ_SKP_0000-00_ZZZZ_RP_ENV-AA_VE_00008_003.pdf (kasutatud 05.10.2023).
- [7] „Töö nr 16-11-1304,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.energia.ee/-/doc/8457332/ettevotteest/pdf/uuringu_tulemused_4.pdf.

- [8] Peeter Talviste, „Töö nr 19-05-1490/2,“ 30.10.2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://transpordiamet.ee/media/7947/download> (kasutatud 03.12.2023).
- [9] „Peamiste vaiade löömise meetodite kirjeldus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ibuilder-et.techinfus.com/fundament/metodi-zabivki-svaj/> (kasutatud 20.11.2023).
- [10] P. OBERMEYER, „Rail Baltica raudteetrassi lõigu “Tootsi – Pärnu” Keskkonna mõjude hindamine,“ [Võrgumaterjal]. Available: [RB%20Tootsi_Pärnu%20KMH%20programm%20ja%20Lisa%201%20\(1\).pdf](#) (kasutatud 11.11.2023).
- [11] A. Kaskov, „Põlevkivituhk ja aheraine – kas jäätmed või kõrvalsaadused,“ september 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://toostusest.ee/uudis/2018/09/04/polevkivituhk-ja-aheraine-kas-jaatmed-voi-korvalsaadused/> (vaadatud 12.12.2023).