



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

RAIL BALTICA RAUDTEE MULDKEGA ANALÜÜS JA VÕIMALIKUD ALTERNATIIVID

ANALYSIS OF RAIL BALTICA RAILWAY EMBANKMENT AND POSSIBLE ALTERNATIVES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Siim Paulus

Üliõpilaskood 221290EAXM

Juhendaja: Arto Lille, Lektor

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Siim Paulus

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Rail Baltica raudtee muldkeha analüüs ja võimalikud alternatiivid, mille juhendaja on Arto Lille,

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Siim Paulus 221290EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/22 Hooned ja rajatised, 13 teede- ja sillaehitus
Juhendaja(d): Lektor, Arto Lille, 5154421
Konsultant: Lektor, Ain Kendra

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Rail Baltica raudtee muldkeha analüüs ja võimalikud alternatiivid
(inglise keeles) Analysis of Rail Baltica railway embankment and possible alternatives

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Rail Baltica raudtee muldkeha analüüs.
2. Võimalike alternatiivide väljapakumine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse kogumine ja läbitöötamine	
2.	Raudtee muldkeha analüüs lähtudes pinnase geoloogiast, nõutud konstruktsiooni paksustest ja kehtivatest standarditest.	
3.	Võimalike alternatiivide väljatöötamine	

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "20" aprill 2024 a

Üliõpilane: Siim Paulus ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Arto Lille ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: Ain Kendra ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	10
1. RAIL BALTICA PROJEKTI TUTVUSTUS	11
2. RB RAUDTEE MULDKAHE KONSTRUKTSIOONIKIHID JA NENDE NÕUDED	12
2.1 Mulde aluskiht (täitekiht)	13
2.2 Külmakaitsekiht	16
2.3 Mulde vahekiht	17
2.4 Alusballast	18
2.5 Muldkeha kihtide tihendusnõuded ja nõutavad kalded	19
3. ER-I RAUDTEE MULDKAHE KONSTRUKTSIOONI NÕUDED	23
4. SOOME RAUDTEEINFRASTRUKTUURIL KASUTATAVAD MULDKAHE KONSTRUKTSIOONI NÕUDED	25
4.1 Muldkeha täitekiht	27
4.2 Isolatsioonikiht/külmakaitsekiht	29
4.3 Vahekiht/alusballast	29
4.4 Muldkeha kihtide kandevõime ja tihendusnõuded	29
5. RB RAUDTEE MULDKAHE ANALÜÜS	33
5.1 Pinnase geoloogia (RB trassi lõik DS1-DPS2)	34
5.1.1 Pinnasevee tase	37
5.1.2 Kasvupinnas	37
5.1.3 UG-I (glatsiofluviaalsed setted)	37
5.1.4 UG-II (glatsiolakustrilised setted)	38
5.1.5 UG-III Moreenisetted (glatsiaalsed setted)	38
5.1.6 UG-IV Aluspõhi (siluri ajastu)	39
5.1.7 UG-V Turvas	40
5.2 Muldkeha konstruktsioon	41
5.2.1 Konstruktsiooni paksus liivpinnase läbikülmumissügavust arvestades	42
5.2.2 Konstruktsiooni paksus pinnase geoloogiat arvestades	44
5.2.3 Konstruktsiooni paksus nõutud elastsusmoodulit ja tihedustegurit arvestades	44
5.2.3.1 Standardi UIC 719r valem raudtee konstruktsiooni aluskihtide määramiseks.	45
5.2.3.2 Konstruktsioonikihtide arvutus Odemarki valemi põhjal	46
5.3 Analüüsi kokkuvõte	48

6. VÕIMALIKUD ALTERNATIIVID	50
6.1 Alternatiiv 1 – muldkeha külmakaitsekihi vähendamine	50
6.2 Alternatiiv 2 – ristlõige kaljupinnase süvendis.....	51
6.3 Alternatiiv 3 – ristlõige süvendis isolatsiooniplaadiga	53
6.4 Alternatiiv 4 – turba mass-stabiliseerimine.....	54
KOKKUVÕTE	57
SUMMARY.....	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	61

EESSÕNA

Ajal, kui teedehituse investeeringuid on oluliselt vähendatud, on Rail Baltica gigaprojekti raudteemuldkoha teedehituse valdkonnas üks peamisi fookuspunkte. Kuna Rail Baltica muldkoha kasutamisega peab vastama 100 aastale, on sellega kvaliteetsete ehitusmaterjalide, aluspinnase stabiliseerimismeetmete ja ehitustehnoloogia valimisel äärmiselt tähtis arvestada.

Magistritöö keskendub Rail Baltica raudteemuldkoha olulisusele ja selle ehitusele kuuluvatele kulutõhusatele alternatiividele. Rail Baltica projekti raames on raudteemuldkoha üks peamisi fookuspunkte, kuna selle kvaliteet mõjutab otseselt raudteeliikluse ohutust ja efektiivsust. Töö analüüsib raudteemuldkoha erinevaid aspekte, keskendudes konkreetsele projekti lõigule. Autor on uurinud ka Eesti ja Soome raudteedel kasutatavaid muldkohasid, et Rail Baltica jaoks parimad võimalikud lahendused leida.

Lõputöö teema on sõnastatud lektor Arto Lille algatusel. Põhilised algandmed pärinevad Rail Baltica projekti dokumentatsioonist, lisaks on töös kasutatud erinevaid standardeid ja ehitusnorme. Lõputöö valmimisel oli suureks abiks ka lektor Ain Kendra, kes konsultatsioonidega abistas.

Käesolev magistritöö „Rail Baltica muldkoha analüüs ja võimalikud alternatiivid“ on oluline, kuna aitab Rail Baltica muldkoha nõudeid ja nende tegelikke rakenduse vajadusi paremini mõista.

Lühendite ja tähiste loetelu

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Ameerika standardiorganisatsioon)

C_{OM} – *Coefitsent of organic material* (orgaanilise aine sisalduse koefitsent)

CPT – *Cone Penetration Test* (koonuse läbistuskatse)

CPT_u – *Piezocone Penetration Test* (piesokoonuse läbistuskatse)

C_U – *Coefitsent of uniformity* (lõimisetegur) $C_U = D_{60}/D_{10}$

DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Saksa Standardiinstituut)

D_{pr} – tihedustegur

DPS2 – DS1 alalõik Alu-Mälivere

DPSH-A – *Dynamic Proving Super Heavy* (väga raske löökpenetratsioon)

DS1– projekteerimislõik Pärnu-Rapla raudteelõik

E – elastsusmoodul

EN – Euronorm, *European Standard*. Euroopa standard, kasutatakse standardi numbrilise tähistuse ees.

ER – Eesti Raudtee AS

ERTMS – *European Rail Traffic Management System* (Euroopa raudteeliikluse juhtimissüsteem)

EVS – Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus

E_{V2} – elastsusmoodul teisel koormamisel

F – külmakindluse kategooria

fr – fraktsioon

FWD – *Falling Weight Deflectometer* (langeva raskusega deflektomeeter)

G – terakoostise kategooria

IRS – *International Railway Solution*

I_{DG} – *Index of degradability* (lagunevuse indeks)

KRP – Katendi rehkendamise programm

kN – kilonjuuton

LA – Los Angelese katse järgi purunemiskindluse määratlus

LWD – *Light Weight Deflectometer* (kerge raskusega deflektomeeter)

MDE – Micro Deval katsega kulumiskindluse määratlus

MPa – megapaskal

N_{SPT} – *Bearing capacity, standard penetration test* (kandevõime mõõdetud standardse penetratsiooni katsega)

QS – pinnase kvaliteediklasside liigitus vastavalt UIC 719R standardile

RATO – *ratatekniset ohjeet* (raudtee tehnilised juhendid)

RB – Rail Baltica

RTK – raudtee tehniline kirjeldus

RYL – *rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset* (ehitustööde üldised kvaliteedinõuded)

SO₄²⁻ – sulfaadi ioon

SP – Vene projekteerimisnormid

СНиП – *Строительные нормы и правила* (Vene ehitusnormid ja eeskirjad)

TEN-T – *Trans-European Transport Network* (üleeuroopaline transpordivõrk)

UIC – *International union of railways*

SISSEJUHATUS

Raudteemuldkeha on raudtee rajamisel oluline komponent, mis tagab rööbastee toimimise ning mille kvaliteet ja omadused on raudteeliikluse ohutuse, efektiivsuse ja pikaajalise jätkusuutlikkusega otseselt seotud. Sellest tulenevalt on raudteemuldkeha kvaliteetne ja korrektne ehitamine lahutamatu osa raudtee taristu arendamisest Balti regioonis.

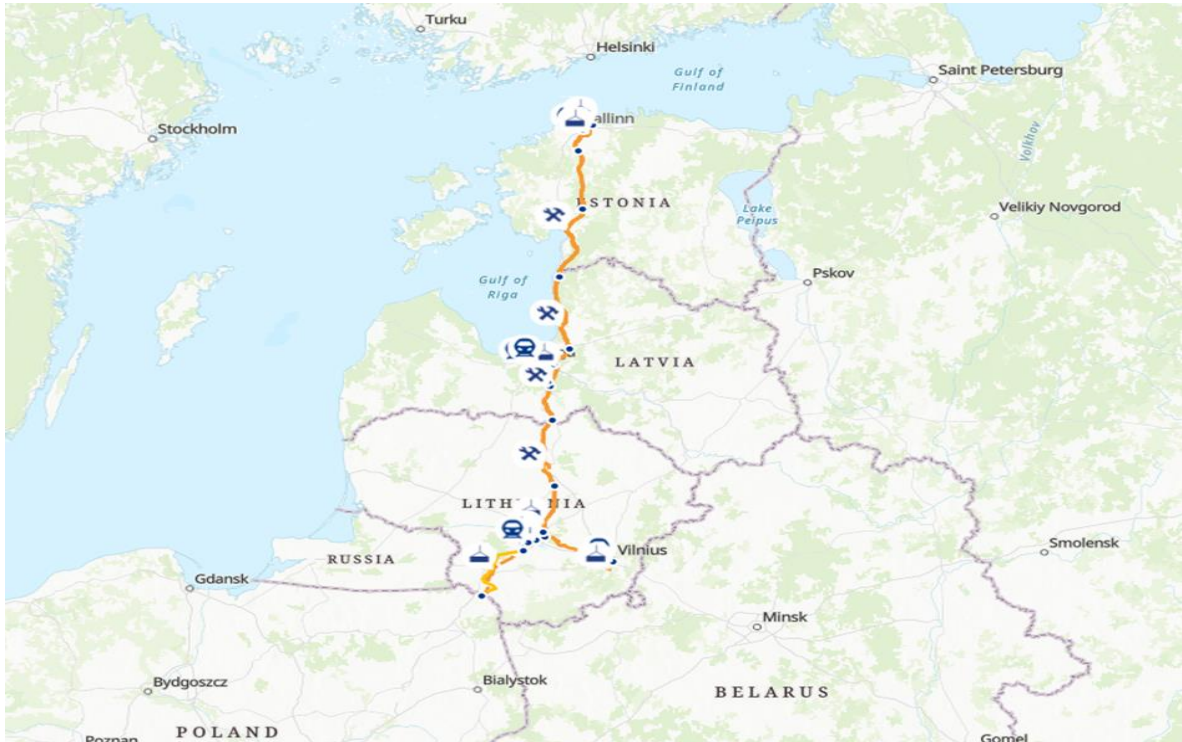
Rail Baltica gigaprojekti maksumus ulatub mitme miljardi euroni, seega on äärmiselt oluline viia läbi põhjalik uurimus pinnase geoloogiast, materjalide taaskasutamise võimalustest ning leida sobivaid ja kuluefektiivseid alternatiive. Seetõttu keskendub magistritöö Rail Baltica raudteemuldkeha analüüsile koos erinevate alternatiivide uurimisega. Käesolevas töös on näitena käsitletud projekti lõigu DS1 neljateistkümne kilomeetri pikkust alalõiku DPS2 Alu-Mälivere.

Magistritöö eesmärgini jõudmiseks tutvustatakse esmalt Rail Baltica muldkeha ja materjalide nõudeid, mis tulenevad rahvusvahelise raudteeorganisatsiooni UIC standarditest. Seejärel kirjeldatakse Eesti Raudtee ja Soome raudteedel kasutatavaid muldkehasid ning nende nõudeid, et järelduste peatükis võimalike alternatiivide analüüsini jõuda. Töö põhiosa keskendub muldkeha analüüsile, eesmärgiga võimalikult kulutõhusaid alternatiive leida. Lõpuks pakub autor välja võimalikud lahendused, mis tehtud analüüsile tuginevad.

Eesmärgist lähtudes on uurimistööluline mitmel tasandil. Esiteks, kuna Rail Baltica projekt on suur investeering, mis omab olulist mõju Balti riikide infrastruktuurile ja majandusele, on ülioluline tagada projekti pealisehitise kvaliteet ja vastupidavus. Teiseks, raudteemuldkeha materjalide analüüs ja tüüpide võrdlemine võimaldab paremini mõista nende sobivust erinevates geograafilistes ja kliimaatilistes tingimustes ning teenindavate rongide spetsiifilistele vajadustele vastata.

1. RAIL BALTICA PROJEKTI TUTVUSTUS

Rail Baltica projekt loodi Eesti, Läti ja Leedu Vabariigi valitsuste sooviga saada osaks üleeuroopalisest transpordivõrgust TEN-T ja liita Balti riigid täielikult Euroopa Liidu raudtee süsteemiga. Eestit, Lätit ja Leedut Poolaga ühendava raudteetrassi kogupikkus on 870 kilomeetrit, millest Eestis paikneb 213 kilomeetrit [1].



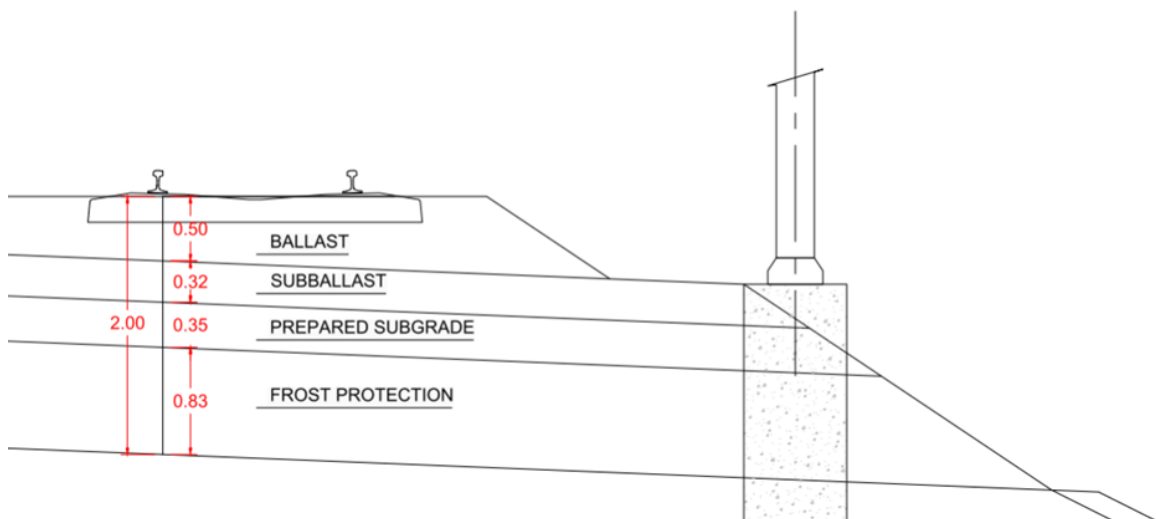
Joonis 1 Rail Baltica Balti riikide trassi trajektoor [2]

Planeeritud on rajada elektrifitseeritud kaheööpmeline raudteetrass (rööpmelaiusega 1435 mm). Lisaks varustatakse kogu trass juhtimis-, side- ja turvangu süsteem ERTMS varustusega, mis on ühtne Euroopa signalisatsiooni kontrollsüsteem. Raudteel hakkavad liikuma rongid teljekoormusega 25 tonni, seejuures projektkiirus reisirongidel on 249 km/h ja kaubarongidel 120 km/h [2].

2. RB RAUDTEE MULDKEHA KONSTRUKTSIOONIKIHID JA NENDE NÕUDED

Rail Baltica raudtee muldkeha konstruktsioon on projekteeritud nii, et see tagaks nõutava kandevõime ja külmakaitse. Raudteelt nõutav funktsionaalsus, töökindlus ja ohutu kasutatavus esitavad selle konstruktsioonidele suhteliselt rangeid kvaliteedinõudeid. Lähtudes mullatööde tehnilisest kirjeldusest, on raudtee muldkeha projekteeritud kasutusiga 100 aastat, mille saavutamiseks peavad ehitajad ehitusmaterjalide, aluspinnase stabiliseerimise meetmete ja ehitustehnoloogia valimisel arvestama. Kasutusea nõue seab konstruktsioonides kasutatavatele materjalidele kõrged kvaliteedistandardid [3]. Lisaks peavad rööbastee aluskonstruktsioonis kasutatavate materjalide omadused olema sellised, et neile oleks võimalik peale rajada stabiilne ja ohutu raudtee rööbastel sõitvatele veeremitele.

Antud lõputöös on käsitletud raudtee muldkehasid, mis on tehnilikult looduslikust maapinnast kõrgemale tõstetud. Muldkeha kõrgust mõõdetakse ballastialuse kihi (*subballast*), pealispinna ja maapinna vahel. Muldkeha hulka kuuluvad järgnevad kihid: alusballast (*subballast*), mulde vahekiht (*prepared subgrade*), külmakaitsekiht (*frost protection*) ja mulde aluskiht (*täide*). Raudtee katendi kihtide, mulde vahekihi ja külmakaitsekihi mõõtmed peavad UIC 719r standardile vastama. Nõutud muldkeha kihtide mõõtmed on toodud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Muldkeha (töökihtide) ristlõige koos mõõtudega [4]

2.1 Mulde aluskiht (täitekiht)

Täitekihi ülesandeks on tasandada maapinna loomulikud kõrguste kõikumised, et sellele saaks muldkeha konstruktsioonikihid rajada. Kihi paksus muldkeha ristlõikes on vastavalt konstruktsiooni kõrgusliku tõste vajadusele varieeruv – näiteks maastiku muutumisel. Väljaspool muldkeha töökihti on lubatud vastavalt mullatööde juhendile taaskasutada objektil kaevandatud materjali juhul, kui materjal vastab UIC 719R standardis loetletud pinnaseklasside kvaliteedile [3]. Selleks tuleb ehitajal väljakaeve materjali kvaliteeti hinnata ja pinnas vastavalt kvaliteediklassile sorteerida.

Tabel 2.1 QS Pinnase kvaliteediklasside liigitus vastavalt UIC 719R standardile [5]

Klass	Kirjeldus
QS0	„Sobimatud” pinnased, mis ei moodusta sobivat aluspinda ning vajavad seetõttu parendamist. Neid pinnaseid ei peeta raudtee muldkeha kihtide ehitamisel sobivaks.
QS1	„Kehvad” pinnased, mis on aktsepteeritavad nende naturaalses olekus eeldusel, et on tagatud nende piisav drenaaž ja hooldus. Nende pinnaste puhul võib nende parendamist asjakohaste töötluste abil kaaluda (nt stabiliseerivate sideainete kasutamine).
QS2	„Keskmised” pinnased
QS3	„Head” pinnased

Tabel 2.2 Pinnase kvaliteediklassid vastavalt UIC 719R standardile [5]

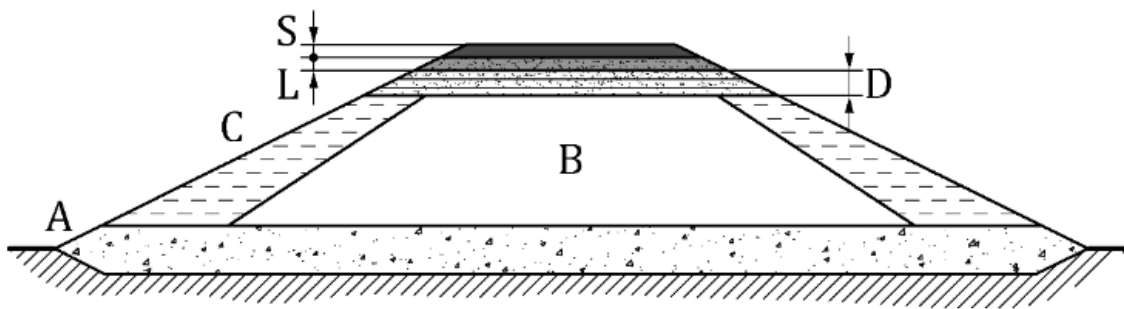
Pinnase tüüp (geotehniline klassifikatsioon)		Pinnase kvaliteedi klass
0.1	Kõrge orgaanika sisaldusega pinnased	QS0
0.2	Pehmed pinnased, mis sisaldavad rohkem kui 15% peenosiseid ^a , kõrge niiskuse sisaldusega, tihendamiseks mittesobivad	
0.3	Tiksotroopsed pinnased ^b (nt vesisavi)	
0.4	Lahustuvat materjali sisaldavad pinnased (nt kivisool, kips)	
0.5	Saastunud pinnas (nt tööstuslik jääde)	
0.6	Keskmise orgaanika sisaldusega pinnased ^b	
0.7	Kõrge plastsusega pinnased, milles on rohkem kui 15% peenosiseid ^a , kokkuvarisevad pinnased ^c või paisuvad pinnased ^d	
1.1	Pinnased, mis sisaldavad rohkem kui 40% peenosiseid ^a (välja arvatud pinnased punktides 0.2 või 0.7)	QS1
1.2	Kaljupinnased, mis on keskkonnatingimuste suhtes tundlikud nt.: Kriit tihedusega $r_d < 1.7 \text{ t/m}^3$ ja suure murenevusega Mergel Murenenud kiltkivi	
1.3	Pinnased, mis sisaldavad 15 kuni 40% peenosiseid ^a (välja arvatud pinnased punktides 0.2 or 0.7)	
1.4	Kaljupinnased, mis on keskkonnatingimustele keskmiselt tundlikud nt.: Kriit tihedusega $r_d < 1.7 \text{ t/m}^3$ ja madala murenevusega Murenemata kiltkivi	QS1 ^e
1.5	Pehme kaljupinnas nt.: Microdeval MDE > 40 ja Los Angeles LA > 40	
2.1	Pinnased, mis sisaldavad 5 kuni 15% peenosiseid ^a välja arvatud kokkuvarisevad pinnased ^c	QS2 ^f
2.2	Ühtlase terakoostisega pinnased, mis sisaldavad alla 5% peenosiseid ^a ($CU \leq 6$) välja arvatud kokkuvarisevad pinnased ^c	
2.3	Keskmise tugevusega kaljupinnas nt.: kui $25 < MDE \leq 40$ ja $30 < LA \leq 40$	
3.1	Ebaühtlase terakoostisega pinnased, mis sisaldavad alla 5% peenosiseid ^a	QS3
3.2	Kõva kaljupinnas nt.: kui $MDE \leq 25$ ja $LA \leq 30$	

Tabel 2.2 Märkused [5]:

- a) Materjali terakoostise peenosiste sisalduse protsendid kehtivad materjalile, mis läbib 63 mm sõela. Tabelis esitatud protsendid on väiksemaks ümardatud; neid võib tõsta kuni 5% juhul, kui ehitamise käigus võetakس piisav kogus katseproove.
- b) Teatud raudtee ettevõtted hõlmavad antud pinnased QS1 kvaliteediklassi.
- c) Kokkuvarisemise vajum suurem kui 1% rikkumata pinnasproovidele või rikutud pinnasproovidele standard Proctori tiheduse juures rõhu 0.2 MPa rakendamisel.
- d) Vaba paisumine suurem kui 3% rikkumata või rikutud pinnasproovidele standard Proctori tiheduse juures.

- e) Need pinnased võivad kuuluda QS2 kvaliteediklassi, kui hüdrogeoloogilised ja hüdroloogilised tingimused on head.
- f) Need pinnased võivad kuuluda QS3 kvaliteediklassi, kui hüdrogeoloogilised ja hüdroloogilised tingimused on head.

Vastavalt mullatööde juhendile on muldkeha lubatud ehitada QS2 ja QS3 kvaliteediklassile vastavast materjalist, kui seda kasutatakse mulde aluskihi täite tsoonis (B) [3]. Lisaks on võimalik kasutada QS1 kvaliteediklassile vastavaid materjale, kui neid näiteks stabiliseerivate sideainetega segades parendada. Viimane ei sobi aga kasutamiseks täitekihi külgnevas tsoonis (C), kuna on külmakerke oht, vaid nii-öelda „keha“ tuumas (B) [3].



Joonis 2.2 Muldkeha täitematerjalide tsoonid [6]

- A – alus
- B – täitekihi tuum (keha)
- C – külgtsoon
- D – töökiht
- L – kattekiht (osa ülemisest tsoonist), raudtee ballast
- S – pealisrajatis (raudteerööpad), (ei ole mullatööde osa)

Muldkeha alus (A) peab tavalistes tingimustes ja niisketel aladel tabelis 2.3 välja toodud tingimustele vastama.

Tabel 2.3 Miinimumnõuded muldkeha põhja materjalile tavalistes tingimustes ja niisketel aladel [7]

Omadus	Nõue	Viide
<i>Vee, täitematerjali väljauhtumise ja külmumise suhtes mittetundlikud teralised materjalid või kivid</i>		
Täitematerjali maksimaalne terasuurus D	$D \leq 630 \text{ mm}$	
Peenosiste sisaldus (0,063 mm sõela läbind massiprotsentides) ^(a)	$\leq 15\%$	EN 933-1
Orgaaniliste ainete sisaldus	$C_{OM} \leq 2\%$	EN 17685-1
<i>Märkus (a): peenosiste sisaldus on kohalduv ja määratakse kuni 63 mm terasuurusega materjalile.</i>		

Soistel ja üleujutatavatel aladel kohaldub nõue, kus peenosiste sisaldus on $\leq 5\%$ [3].

2.2 Külmakaitsekiht

Külmakaitsekihi funktsioon on täite või süvendi aluspinnase kaitsmine ilmastiku mõjude eest [6]. Kihi funktsionaalsuse saavutamiseks tuleb materjal enne konstruktsiooni paigaldamist hoolikalt valida ja kontrollida. Vastavalt meteoroloogia andmetele, kalkuleeritud külma-indeksile jne on Eestis maksimum läbikülmumise sügavus muldkehas 2,05 m [3]. Sellest lähtudes peaks muldkeha külmakindlate materjalide kihi paksus olema ballasti pealt kokku mõõdetuna vähemalt 2,05 meetrit. Külmakaitsekihi miinimumnõuded on toodud tabelis 2.4.

Tabel 2.4 Külmakaitsekihi materjali miinimumnõuded [7]

Omadus	Nõue	Viide
Segu tähistus Terasuuruse ülemine mõõde D ^(a)	$D \leq 63 \text{ mm}$	EN 13285
Peenosiste sisalduse kategooria (0,063 mm sõela läbind massiprotsentides)	UF15 ($\leq 15\%$)	EN 13285

Omadus	Nõue	Viide
Alla 0,02 mm läbimõõduga osakeste sisaldus	≤ 5%	EN 14688-2
Ülemõõdulised terad	OC90	EN 13285
Terakoostise kategooria	G _v	EN 13285
Külmakindluse kategooria ^(b)	F ₄	EN 13242
Orgaaniliste ainete sisaldus	C _{OM} ≤ 2%	EN 17685-1
Märkused a) Segu terasuuruse ülemine mõõde ja terakoostise kategooria valitakse selliselt, et see vastaks lõimiseteguri väärtusele C _U ≥ 3. b) Kohaldatav üksnes purustatud kruusast ja killustikust valmistatud sidumata segudele. Ei ole kohaldatav looduslikule liivale, kruusasele liivale ega liivasele kruusale. Purustatud kruus ja killustik on lubatud ainult juhul, kui sidumata segu vastab käesolevas tehnilises kirjelduses peatükis 2.4.1 alapunktis E kirjeldatud nõuetele.		

2.3 Mulde vahekiht

Mulde vahekiht toetab alusballasti kihti ja kaitseb muldkeha konstruktsiooni läbikülmumise eest. Vastavalt UIC 719R standardile võib mulde vahekihi ehitada materjalidest, mis vastavad kvaliteediklass QS3 nõuetele [3].

Tabel 2.5 Mulde vahekihi materjali miinimumnõuded [3] [7]

Omadus	Nõue	Viide
Segu tähistus Terasuuruse ülemine mõõde D ^(a)	D ≤ 63mm	EN 13285
Peenosiste sisalduse kategooria (0,063 mm sõela läbind massiprotsentides)	UF5 (≤ 5%)	EN 13285
Alla 0,02 mm läbimõõduga osakeste sisaldus	≤ 3%	EN 14688-2
Ülemõõdulised terad	OC90	EN 13285

Omadus	Nõue	Viide
Terakoostise kategooria	G _v	EN 13285
Külmakindluse kategooria ^(b)	F ₄	EN 13242
Orgaaniliste ainete sisaldus	C _{OM} ≤ 2%	EN 17685-1
Märkused		
<p>a) Segu terasuuruse ülemine mõõde ja terakoostise kategooria valitakse selliselt, et see vastaks lõimiseteguri väärtusele C_U ≥ 6.</p> <p>b) Kohaldatav üksnes purustatud kruusast ja killustikust valmistatud sidumata segudele. Ei ole kohaldatav looduslikule liivale, kruusasele liivale ega liivasele kruusale.</p>		

2.4 Alusballast

Alusballasti kiht toetab põhifunktsioonina ballasti. Lisaks jaotab raudteelt tuleva koormuse alumistesse muldkeha kihtidesse, juhib raudtee muldkehalt veed eemale, kaitseb muldkeha külmumise eest ning on vahekihi ballasti ja muldevahekihi vahel vältimaks materjalide segunemist [3].

Ballastialuse kihi ehitamiseks tuleb kasutada sidumata segu, mille materjalid vastavad tabelile 2.6.

Tabel 2.6 Alusballasti kihi materjali miinimumnõuded [3]

Omadus	Nõue	Viide
Segu tähistus	0/32, 0/45, 0/56	EN 13285
Peenosiste sisalduse kategooria (0,063 mm sõela läbind massiprotsentides)	UF5 (≤ 5%)	EN 13285
Alla 0,02 mm läbimõõduga osakeste sisaldus	≤ 3%	EN 14688-2
Ülemõõdulised terad	OC90	EN 13285
Terakoostise kategooria	G _B	EN 13285

Omadus	Nõue	Viide
Purustatud või murenenud terade ja täielikult ümardunud terade protsent	C _{50/30}	EN 13242
Purunemiskindlus	LA ₃₀	EN 13242
Külmakindluse kategooria	F ₂	EN 13242
Orgaaniliste ainete sisaldus	C _{OM} ≤ 2%	EN 17685-1

2.5 Muldkeha kihtide tihendusnõuded ja nõutavad kalded

Konstruksiooni tihedus on üks olulisemaid tegureid, mis jämedateraliste materjalide pikaajalist deformatsioonikäitumist mõjutab. Muldkeha stabiilsuse saavutamiseks vajalikud kandevõimed on välja toodud tabelis 2.7.

Tabel 2.7 Miinimumnõuded konstruktsioonikihtide tihendamisel [5]

Kiht	E _{v2}	
	Miinimumnõue	Katsetus tihedus
Alusballast	≥ 120 MPa	Üks kord 100 m kohta, 2 asukohas – raudtee all ja serva lähedal (≤ 1.0 m)
Mulde vahekiht	≥ 80 MPa – töötlemata materjalid	
	≥ 120 MPa – töödeldud materjalid	
Külmakaitsekiht	≥ 60 MPa – liivased või kruusased materjalid	
	≥ 80 MPa – töödeldud materjalid	
Muldkeha täitekiht, mulde aluskiht	≥ 45 MPa – peened materjalid	
	≥ 60 MPa – liivased või kruusased materjalid	
	≥ 80 MPa – töödeldud materjalid	

Muldkeha konstruktsioonikihtidele esitatud põikikalded vete muldkehast kaugemale juhtimiseks ja nõlvused muldkeha stabiilsuse tagamiseks on toodud tabelis 2.8.

Tabel 2.8 Nõuded muldkeha konstruktsioonikihtide nõlvusele ja põikkaldele [3]

Kihi nimetus	Põikkalle (kihi alt)	Nõlvus
Ballast	4%	1:1.5
Alusballast	4%	1:1.5
Mulde vahekiht	4%	1:1.5
Külmakaitsekiht	4%	1:1.5
Täitekiht	0%	1:2

RB RTK mullatööde juhend sätestab, et tihendustegurit Dpr tuleb mõõta igalt paigaldatud kihilt ja iga 20 meetri tagant kahest kohast – raudtee alt ja serva lähedalt (≤ 1.0 m). Tihendusteguri (Dpr) minimaalsed sätestatud nõuded on [7]:

- muldkehalt ja külmakaitsekihilt $\geq 97\%$ EN 13286-2 Standard Proctor tihedusest;
- mulde vahekihilt $\geq 100\%$ EN 13286-2 Standard Proctor tihedusest;
- alusballasti kihilt $\geq 103\%$ EN 13286-2 Standard Proctor tihedusest.

Vastavalt RB RTK osa 2 juhendile võib selleks kasutada kolme standardiseeritud katse meetodit – liivakoonus (ASTM D1556), radioaktiivne meetod ehk Troxler (ASTM D6938) või kummiballoon (DIN 18125-2) [7] [8]. Juhul, kui projektjärgselt tuleb paekillustikku kasutada, siis laboratoorne Proctori katse võib materjali kahjustada ning laboratoorne võrdlus Hardo Pajuse magistritöös „MEETOD TÄITEMATERJALI VERTIKAAL- JA HORISONTAALSUUNALISE FILTRATSIOONIMOODULI MÄÄRAMISEKS PÜSIVA RÕHUGA PERMEAMEETRIGA“ näitas, et vibrotihendamise saavutati 90–92% proctorist, mis teeb 97% saavutamise paekillustiku puhul ebareaalseks [9]. Alternatiivse lahendusena on võimalik vibrotihendust näiteks vibrohaamriga otse proctori-vormis teostada (vastavalt standardile EVS-EN 13286-4:2021) [8].



Joonis 2.3 Vibrohaamer [10]

Välitingimustes, kus iga 20 meetri järel on vajalik teostada kaks tiheduskontrolli mõõtmist koos GPS-asukohaga, on Troxler 3440GPS seade ideaalne valik [8]. Selle seadme abil on vastavalt vajadusele võimalik täpselt tihenduskontrollide asukohti jälgida [11].



Joonis 2.4 Troxler 3440GPS tihenduse ja niiskuse mõõtesead [11]

Deformatsioonimoodulit pärast teist koormustsüklit (E_{V2}) ja deformatsioonimoodulite suhet (E_{V2}/E_{V1}) tuleb lähtuvalt RTK mullatööde juhendile mõõta iga 100 meetri järel 2 kohast – raudtee alt ja serva lähedalt (≤ 1.0 m). Deformatsioonimooduli mõõtmine tuleb teostada plaatkoormuskatsega (DIN 18134 või EVS 934) [7]. Nõutud deformatsioonimooduli (E_{V2}) väärtused on: peenpinnastel 45 MPa, liival-kruusal 60 MPa ja töödeldud kihtidel 80 MPa. Suhtarv E_{V2}/E_{V1} , mis näitab tihendamise kvaliteeti, ei tohi ületada 2,5 [7] [8].

Kuna RB raudteetrassi kogu lõigul tuleks teostada kokku ligikaudu 17 000 plaatkoormuskatset, on oluline deformatsioonimooduli mõõtmiseks alternatiivne lahendus leida. RTK mullatööde juhend lubab ehitusetapis kasutada mõõteseadmetena FWD ja LWD seadmeid, kuid nende seosed plaatkoormuskatse või Proctor-tiheduse saavutamise tasemega tuleks eraldi tõestada. Eestis enim kasutatavate kergmõõteseadmete Loadmani ja Inspectori kohta vastavaid standardeid ei ole [8]. Kuigi Englo väitel võimaldab andmetöötluse tarkvara mõõtetulemuste alusel pinnase staatilise elastsusmooduli E_{V2} arvutada [12].

Alternatiivina on võimalik kasutada näiteks Taani LWD seadet Dynadest, millel saab mõõtorežiimi mõõdetava kihi tegeliku töörežiimi järgi valida, kuid katsetusi tuleks eelnevalt võrrelda plaatkoormuskatsega antud konstruktsioonikihil ja kas korrelatsioon on piisavalt hea [8].



Joonis 2.5 Dynadest 3032 LWD seade [13]

3. ER-I RAUDTEE MULDKEHA KONSTRUKTSIOONI NÕUDED

ER-i raudteel kasutatavad muldkehad on vastavalt projektile erinevalt kavandatud, võttes arvesse geoloogilisi tingimusi, raudtee kiiruseid ja maksimum teljekoormust (32 t). Kuna Eesti Raudteel puudub konkreetne muldkeha rajamise juhend, lähtutakse muldkeha ehitusel peamiselt vene standarditest SP 32-104-98 Muldkeha projekteerimine raudteedel rööpmelaiusega 1520 mm (Moskva, 1996) ja СНП 32-01-95 määratud nõuetest, mis ei ole ekvivalent Euroopa standarditega [14].

Kuna projekti seletuskiri peab seletama lahti, miks on määratud konstruktsioon valitud ja millised nõuded sellele esitatud, peaks see ka määrama, kuidas või mis standardi järgi nõuet kontrollida. ER-i projekte on hakatud Euroopa standarditega kooskõlasse viima [15].

Sellest tulenevalt pärinevad käesoleva peatüki nõuded kolmest suuremast lähiaja Eesti Raudtee 1520 mm rööpmelaiusega projektidest: „Ülemiste raudteefrastrukturi rekonstrueerimine“, „Tapa raudtejaama sorteerimispargi rekonstrueerimine II“ ja „Tapa-Kaarepere õgwendused“. Nõuded muldkeha konstruktsioonikihtidele on näidatud tabelis 3.

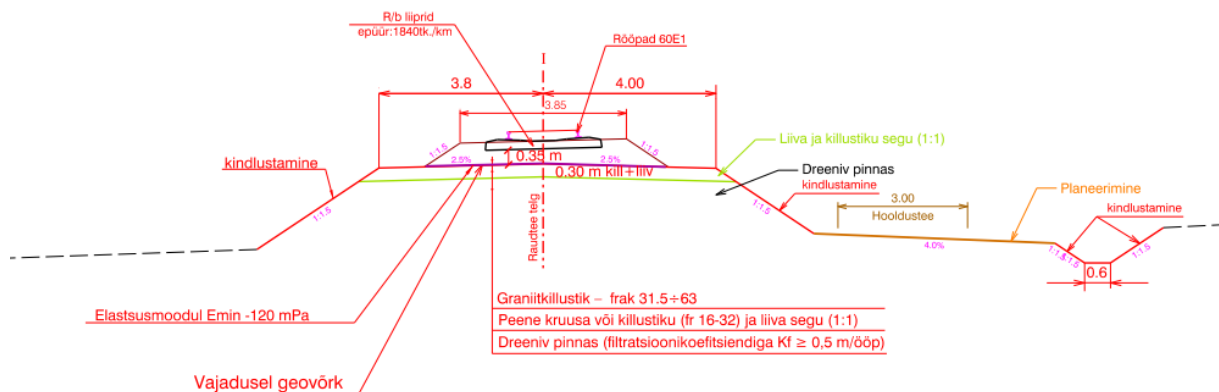
Tabel 3 Muldkeha materjali ja alusballasti kihi nõuded [16]

Filtratsioonimoodul	Muldkeha täitematerjalil 0,5 m/ööp. Ballastialuse kihi materjalil 1,0 m/ööp.
E_{v2} (MPa)	120 MPa peateel (mõõdetuna ballastialuse kihi peal) ja 80 MPa aluspinnase elastsusmoodul.
Fraktsioon	Ballastialuse kihi materjalil ≤ 32 mm.
Peenosiste sisaldus	Ballastialuse kihi materjalil $\leq 1,2\%$.

ER-i muldkeha põikprofiili tüüpilised näitajad on järgnevad [16]:

- muldkeha nõlvade kalle on 1:1,5;
- muldkeha pealispinna põikkalle 2,5% ja aluspinna põikkalle 4,0% veeviimarite poole;
- minimaalne dreniiva pinna paksus 0,5 m;
- ballastialuse kihi ja drenikihi paksus peaks kokku olema vähemalt 1,5 m.

Raudtee pealisehitise konstruktsioon M1:100



Joonis 3 ER-i raudteedel kasutusel olev ristlõige [14]

Kihtide tihendustegur peab olema vähemalt 0,98 ülemise 1 m paksusel kihil, allpool 0,95 [16].

Muldkeha ehitamisel kasutatava pinnase (täitepinnase) ja liivaluse tihendamist tuleb tihendusteguri määramise abil vastavalt MTM määrusele 101 kontrollida (10.08.2015) „Tee ehitamise kvaliteedinõuded“, Lisa 6. tiheduse määramise välikatsega. Määratud tihedust tuleb vastava materjali laboratoorsel Proctor-testil määratud võrdlustihedusega võrrelda. Kontroll tuleb teostada sobiva tiheduse määramise katseseadmega, olenevalt kasutatavast materjalist (nt penetromeeter, löikerõngas, liivakoonus või muu tiheduse määramiseks sobiv seade) [17].

Kandevõime ja filtratsioonimooduli tagamiseks kasutatakse ER-i muldkehades alusballasti kihina paekillustikku fr 4-32 mm segatud liivaga. Segamise vahekord tuleks määrata arvutuslikult. Alternatiivina on lubatud kasutada sõelutud kruusa, mille suurim terasuurus on 31,5 mm ja mille peenosiste (0,063 mm) sisaldus < 5% [14]. Kolme projekti näitel on seguvahekorra määratud 1:1. Selline segu vahekord ei pruugi nõutud elastsusmoodulit 120 MPa tagada, pigem oleks reaalsem 65/35, mida on uurinud ka Rasmur Renter oma lõputöös „Liiva ja killustiku segude elastsusmoodulid“ [18].

4. SOOME RAUDTEEINFRASTRUKTUURIL KASUTATAVAD MULDKEHA KONSTRUKTSIOONI NÕUDED

Järgnev peatükk uurib Soomes kasutatavate rööbasteede muldkeha, kuna Soome kliimatingimused on Eestile sarnased ja Soomes kasutatav raudtee konstruktsioon on Eesti raudteedel kasutatavale sarnane. Soome raudtee muldkeha projekteerimiseks on Soome Transpordiamet koostanud juhendi Rööbastee tehnilised juhised (RATO) osa 3 „rööbastee struktuur“.

Nii Rail Baltica kui ka Soome raudteeinfrastruktuuri muldkeha nõuded on väga rangelt määratletud. Eesmärgiga tagada aluskonstruktsiooni kasutusiga vähemalt 100 aastat. Rato osa 3 standardi nõuded vastavad IRS UIC 70719 standardile, mis on standardite UIC 719r ja UIC 722 täiendus, need on kohati suhteliselt sarnased ja mõlema standardi väljatöötamiseks on kasutatud ühtseid Euroopa standardeid Eurokoodeks 1 ja 7. Konstruktsiooni kogupaksuse arvutusel võetakse mõlemas külmakaitsekihi paksuse määramisel aluseks külmaindeks ja aastane keskmine temperatuur.

Raudtee ristlõigete minimaalsed väärtused on määratletud Rato 3 juhendis. Ristlõige sõltub sellest, kas raudtee rajatakse muldkehale, süvendisse või kalju sisse. Lisaks mõjutab ristlõiget trassi projektkiirus, raudtee tüüp ja asukoht. Viimane määrab külmakindlate konstruktsioonikihtide paksuse kuna, põhja- ja lõuna-Soomes on pinnase läbikülmumise sügavuse erinevus 30% [19].

Muldkeha konstruktsiooni soojuspidavuse tõstmiseks on lubatud Soomes kasutada soojusisolatsiooni plaati, mille tugevuse ja paksuse määrab projekteerija igal üksikjuhul eraldi ja mille kasutamiseks tuleb Soome transpordiameti luba taotleda. Soojusisolatsiooni kasutamisel on võimalik vajalikku konstruktsiooni kogupaksust juhendi tabelis 4.1 märgitud määral vähendada [19].

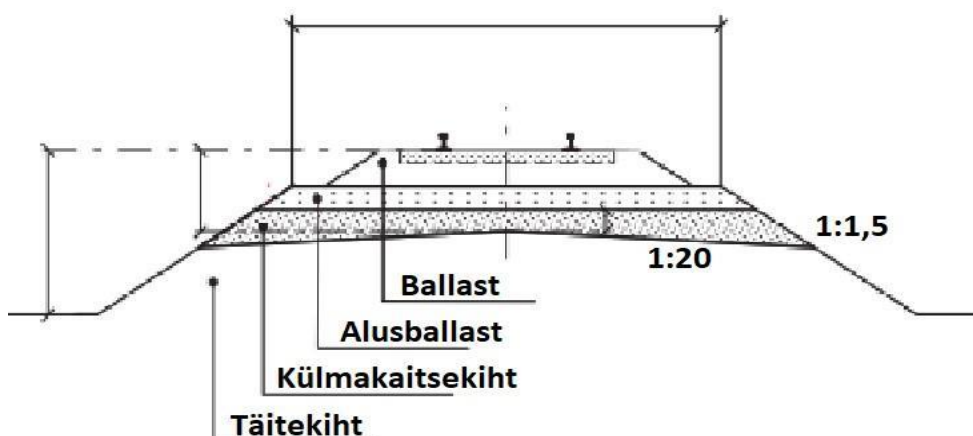
Tabel 4.1 Isolatsiooniplaadi paksuse seos konstruktsiooni külmumise sügavusega [19]

Isolatsiooniplaadi paksus (mm)	Konstruktsiooni kogupaksus (m)
0 (isoleerimata struktuur)	2,15
40	1,65
60	1,39
80	1,18
100	1,04
120	0,92

Soomes kasutatava tüüpse muldkeha ristlõike konstruktsioon koosneb täitekihist, külmakaitsekihist, mille paksust saab vajadusel isolatsiooniplaadiga vähendada, ja alusballasti kihist [19]. Muldkeha ristlõigete tüübid on kirjeldatud lühenditega, näiteks Jk-1-LB900-6,8, kus [19]:

- Jk – rööbastee tüüp;
- 1 – kõrvuti asetsevate radade arv;
- L – teave selle kohta, kas raudtee asub süvendis, kiviraies või muldkehal;
- B – liipri tüüp;
- 900 – konstruktsioonikihtide kogupaksus millimeetrites;
- konstruktsiooni muldkeha laius meetrites.

Ristlõigete lühendite tähendused on üksikasjalikumalt välja toodud RATO 3. osas. Soome raudteeinfrastruktuuril kasutatav tüüpne ristlõige on näidatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1 Soome raudtee muldkeha tüüpne ristlõige [19].

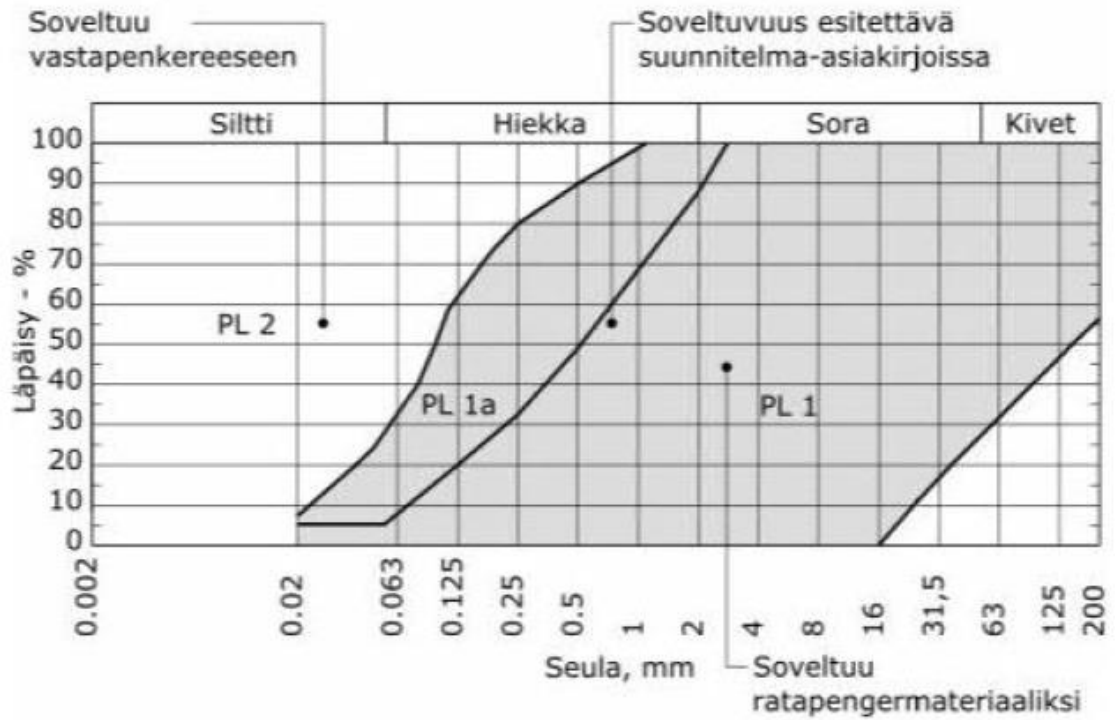
Muldkeha kihtide parameetrid on kirjeldatud standardites Rato osa 3 ja *InfraRYL Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset: maa-, pohja- ja kalliorakenteet*.

Tabel 4.2 Muldkeha konstruktsioonikihtide parameetrid [19] [20]

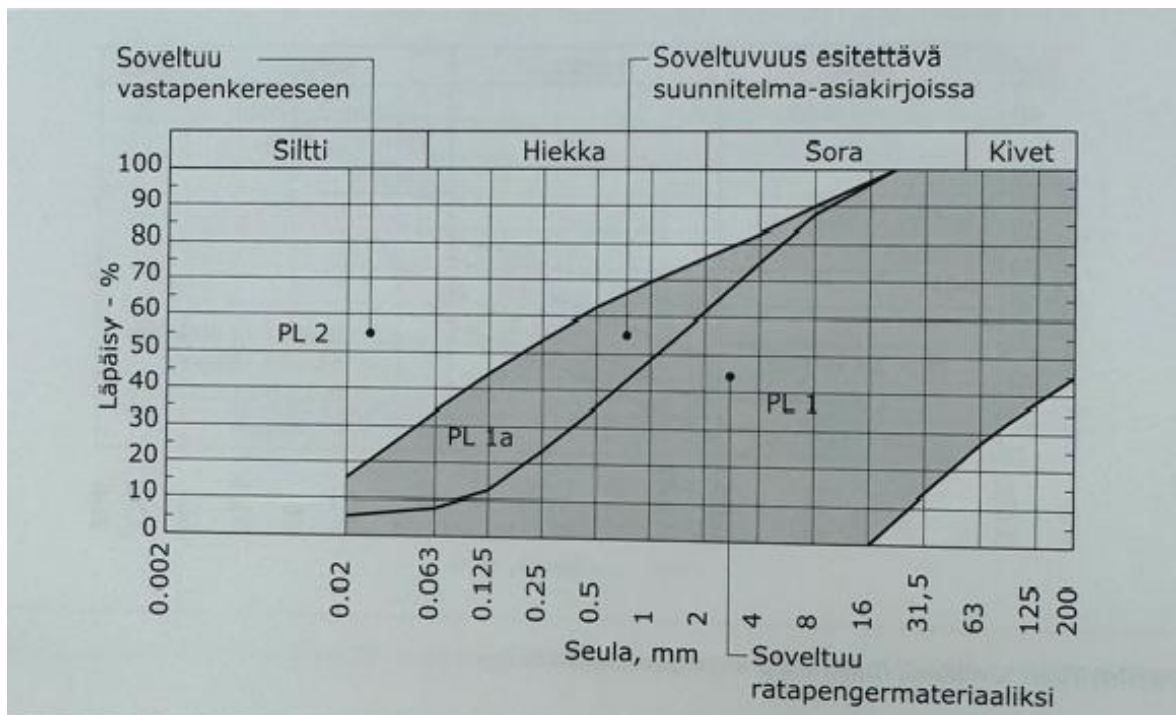
	Muldkeha täitekiht	Isolatsioonikiht	Alusballast
Kihi paksus	Varieerub vastavalt reljeefile	Varieerub vastavalt geoloogilisele asukohale	Min 300 mm
Nõlvus		1:1,5	1:1,5
Pöikalle	Peal 1:20	All 1:20	
Lubatud kapillaartõus	Ei kohaldu	0,7 m	0,7 m

4.1 Muldkeha täitekiht

Muldkeha materjalid ei tohi sisaldada suuremaid kive, kui 2/3 tihendatava kihi paksusest. Jämedateralise täitematerjali ja moreeni kasutamise sobivus täitematerjalina muldkeha täitekihis jaotatakse kolme kategooriasse: PL1, PL1a ja PL2. Arvestada tuleb nende terastikulist koostist, pinnase tüüpi ja veesisaldust. Sobivad täitematerjalid peavad jääma vahemikku PL1, mis on näidatud joonisel 4.2 ja 4.3. Kui materjali terastikuline koostis vastab piirkonnale PL1a, siis tuleb selle sobivus kirjeldada projektdokumentatsioonis, võttes arvesse kohalikke tingimusi. Piirkonna PL1a materjalides peab peenosakeste sisaldus (<0,063 mm) olema alla 35%. Vahemiku PL2 materjalid sobivad ainult muldkeha nõlva kindlustamiseks (vaata joonis 4.2 ja) [20].



Joonis 4.2 Jämedateraliste täitematerjalide sobivus muldkeha täitematerjaliks [20]



Joonis 4.3 Moreeni sobivus muldkeha täitematerjaliks [20]

Purustatud kivimist muldkeha täitekihi rajamisel peab tera suurus jääma vahemikku 0-150 mm ja lõimisetegur $C_u (D_{60}/D_{10}) \geq 5$ [20].

4.2 Isolatsioonikiht/külmakaitsekiht

Külmakaitsekihiks sobivad materjalid, mis ei sisalda orgaanikat (nt liiv, kruus ja killustik). Pinnase veekapillaartõusu kõrgus ei tohi ületada 0,7 m. Täitematerjal peab võimalikult hästi korduvatele külmumis- ja sulamistsüklitele vastu pidama [20].

Madalama koormustasemetega oludes (näiteks külmakaitsekihi alumises osas) võib kasutada veidi vähem tugevat täitematerjali võrreldes otse alusballasti all kasutatavaga, mille purunemiskindlust kirjeldatakse Los Angelese katse meetodil. Materjali kulumiskindlust hinnatakse Micro-Devali katsega [20].

Tabel 4.3 Isolatsiooni ja vahekihi täitematerjalide tugevusnõuded [20]

	Los Angelese	Micro-Deval
1500 mm ülal	LA ₂₅	MD ₁₅
1500 mm all	LA ₃₀	MD ₂₀

4.3 Vahekiht/alusballast

Vahekihi paksus Soome raudtee muldkehades on minimaalselt 300 mm [19]. Vahekihi materjalina võib kasutada liiva, kruusa ja killustikku. Vahekihis kasutatavad materjalid ei tohi olla valmistatud erinevaid materjale omavahel segades. Pinnase kapillaartõusu kõrgus ei tohi ületada 0,7 m [20]. Vahekihi materjali nõuded on toodud väljaandes InfraRYL ja kihi üldnõudeid saab projektipõhiste nõuetega täpsustada.

Alusballasti ja külmakaitsekihi materjalide tugevusnõuded on samad juhul, kui nõuetele vastav tihedus ja elastsusmoodul on saavutatud. Täitematerjalide tugevusnõuded on toodud tabelis 4.3.

4.4 Muldkeha kihtide kandevõime ja tihendusnõuded

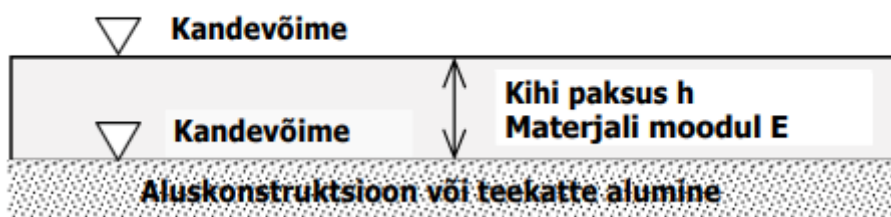
Soomes kasutatakse muldkeha vastuvõtutoimingutes elastsusmooduli väärtusi, kus on välja toodud nõutud keskmine elastsusmoodul ja vähim lubatud elastsusmoodul mõõdetuna raudteeteljest lähemal kui kolm meetrit ja kaugemal kui kolm meetrit.

Tabel 4.4 Muldkeha konstruktsioonikihtide vajalik elastsuumoodul, tihedustegur [20]

	Muldkeha täitekiht	Isolatsioonikiht	Alusballast
E-moodul E_{v2} keskmine	120 MPa	160 MPa	180 MPa
E-moodul E_{v2} min	100 MPa	140 MPa	150 MPa
Tihedustegur	0,95	0,95	0,95

Soome infrastruktuurides kasutatakse konstruktsioonikihi paksuse ja vajaliku sihtkandevõime saavutamiseks Odemarki valemit, mis on võrreldav plaatkoormuskatse reaalseste mõõtmistulemustega, mille olemust ning täpsust kirjeldab ka Simmo Talpas-Taltsepp oma magistritöös „Eestis kasutusel oleva katendiarvutusmetoodika probleemid ning alternatiivse programmi realiseerimine kasutades Soome metoodikat“ [21].

Odemarki valemi kasutamiseks on meil eelnevalt vajalik teada hinnatava kihi alust kandevõimet. Valemi rakendamisel tohib sidumata kihtide maksimaalne kihi paksus olla 0,3 meetrit. Paksemate kihtide korral jaotatakse arvutamisel kihid 0,15 kuni 0,30 meetristeks osakihtideks ja neid arvutatakse eraldi [22].



Joonis 4.4 Odemarki kandevõime tabelis kasutatavad mõisted [22]

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{0,15}\right)^2 \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}$$

kus:

- E_A arvatava kihi alapinna kandevõime (MPa)
- E_Y arvatava kihi ülapinna kandevõime (MPa)
- E arvatava kihi materjali E-moodul (MPa)
- h arvatava kihi paksus (m)
- 0,15 koormatava ratta puutepinna arvutuslik raadius (m)

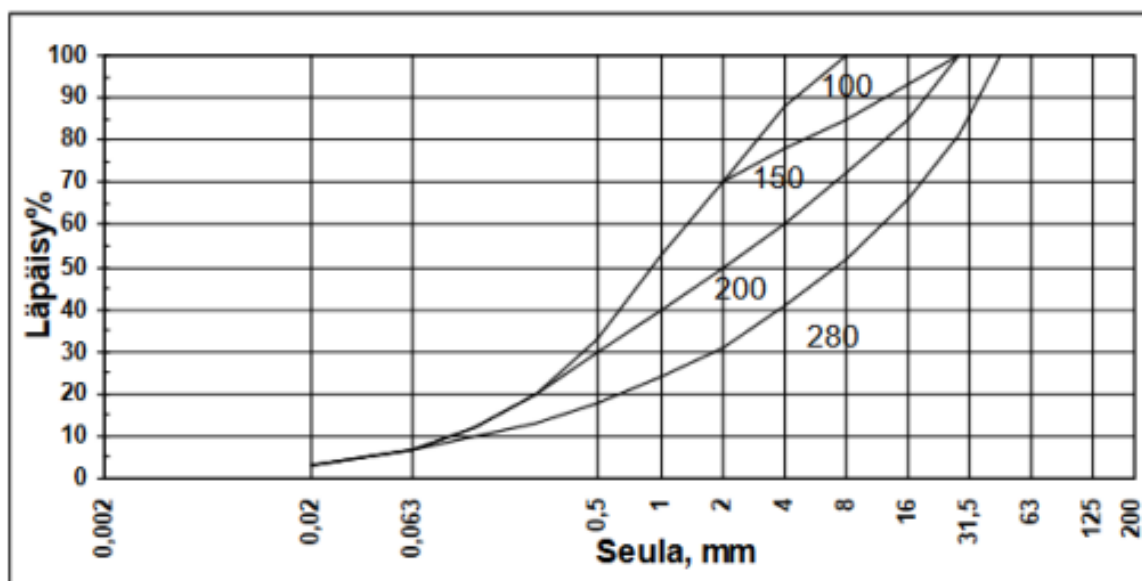
Joonis 4.5 Odemarki kandevõime arvutamise valem [22]

Sidumata kivimaterjali elastsusmoodulid Odemarki valemiga arvutamisel kasutatavad standardsete müügilolevate purustatud kivimaterjalide, lõhatud ja purustatud kivimaterjalide elastsusmoodulid on kirjeldatud tabelis 4.5.

Tabel 4.5 Standardsete purustatud kivimaterjalide E-moodulid Odemarki valemiga arvutamisel [22]

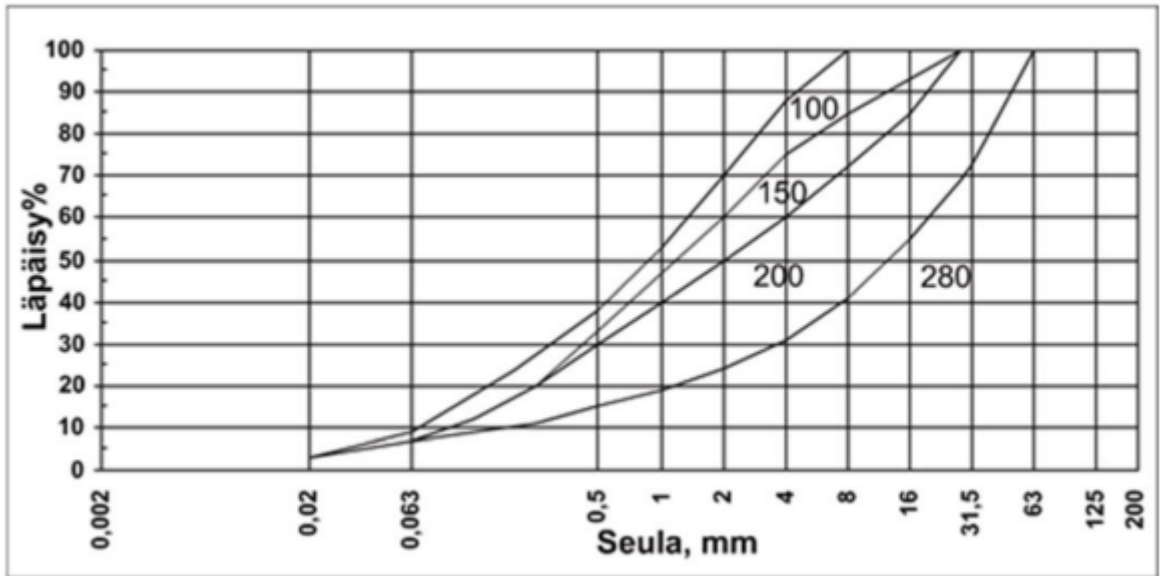
Teralisuse klass (EN 13285 ja InfraRYL)	E-Moodul, MPa			
	100	150	200	280
	Terasuurus 0/D (D = maksimaalne terasuurus), mm			
Go	0/8...0/11,2	0/16...0/22	0/31,5	0/40...0/80
Gp	-	-	0/31,5...0/63	0/80
Ga	-	-	0/31,5...0/56	0/63...0/80
Gc	-	-	0/31,5...0/63	0/80

Kui kivimaterjali ei ole standardi EN 13285 järgi klassifitseeritud, siis hinnatakse E-mooduleid joonise 4.6 põhjal, kus kõige nõrgem ala, mille kohta teralisuse kõver kehtib, määrab mooduli [22].

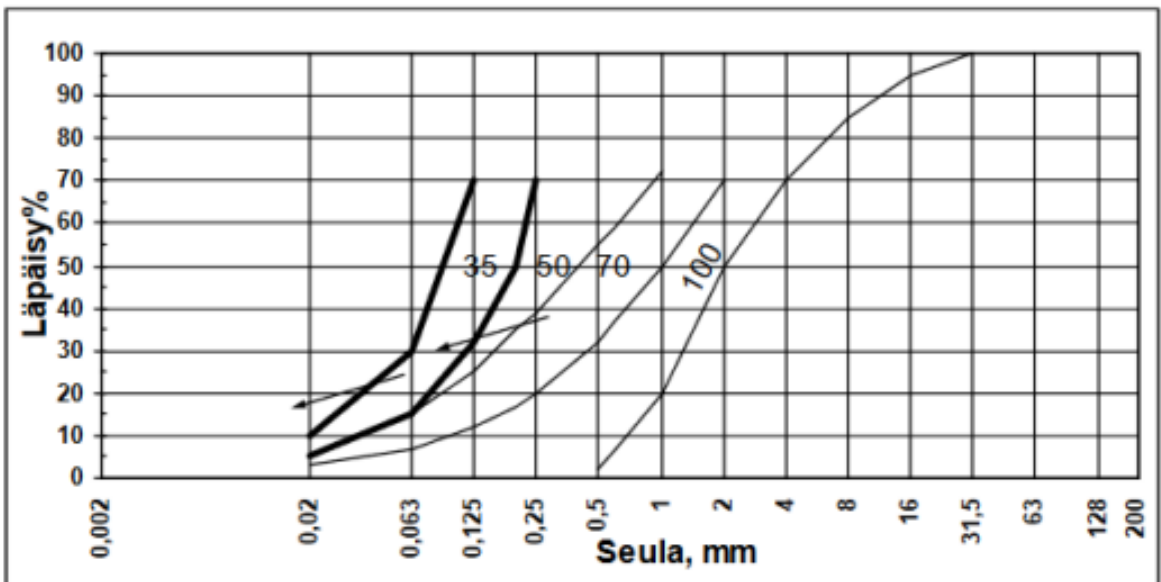


Joonis 4.6 Purustatud kivimaterjali mooduli hindamine teralisuse kõvera põhjal [22]

Muldkeha täitekihis või isolatsioonikihis (külmakaitsekihis) sobiliku kruusa ja kruusliiva E-moodulid hinnatakse terastiku sõelkõverast lähtudes. Kogu tarnepartii moodul E on väärtus, millest suuremad või millega võrdse suurusega on vähemalt 75% üksikproovide moodulitest [22].



Joonis 4.7 Kruusa ja kruusliiva E-mooduli hindamise sõelkõvera graafik [22]

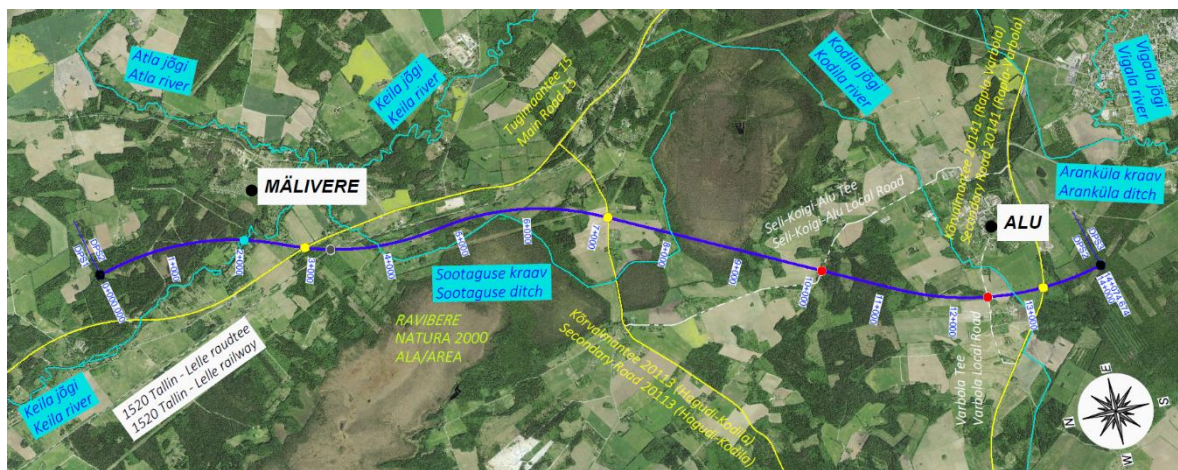


Joonis 4.8 Liiva E-mooduli hindamise sõelkõvera graafik [22]

5. RB RAUDTEE MULDKEHA ANALÜÜS

Antud peatükis analüüsib autor RB muldkeha konstruktsiooni kihtide dimensioone, materjalide valikut ning trassialuse ehitusgeoloogilisi iseärasusi, et välja selgitada, kas muldkeha on üledimensioneeritud ja soodsamaid alternatiive leida.

Muldkeha analüüsi aluseks on peamiselt RB trassi lõigu DS1-DPS2 Alu-Mälivere pinnasegeoloogia.



Joonis 5.1 DS1-DPS2 Alu-Mälivere lõik [23]

DPS2 Alu-Mälivere põhiprojekti järgi on projektis ettenähtud kaevetöid 774 084,7 m³ ja muldkeha täitmist 794 112,40 m³. Pinnasetööde aruande järgi on ainult 36% väljakaevest tulnud materjali taaskasutuskõlbulik, mis tähendab et 64% materjalist tuleks prügimäele ladustada (tagastada karjääri alale) [24].

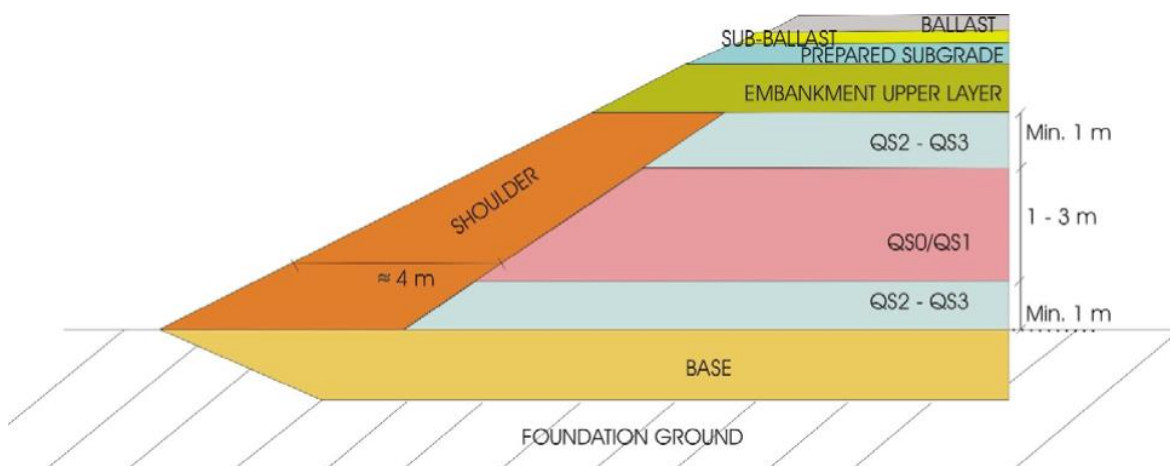
Võttes aluseks standardi IRS UIC 70719 (vt tabel 5.1) saame väljakaevest tuleva materjali kvaliteediklassidesse liigitada ja seda muldkeha täites vastavalt standardis soovitatud lõigus kasutada [25]:

- Muldkeha põhjas (*Base*) saame kasutada materjale, mis vastavad kvaliteediklassile QS1 ja QS2.
- Muldkeha südamikus on võimalik kasutada materjale, mis vastavad kvaliteediklassile QS0, QS1, QS2 ja QS3 materjale, nagu on näidatud joonisel 5.2. Kuigi QS0 materjale kasutades tuleks materjal sideainega töödelda või kapseldada, nagu on näidatud joonisel 5.2.

- Muldkeha õlgades on soovituslik QS2 ja QS3 kvaliteediklassile vastavaid materjale kasutada.

Tabel 5.1 Väljakaeve materjali klassifikatsioon vastavalt standardile IRS UIC 70719 [25]

Materjal	Parameeter	QS kvaliteediklass			
		QS0 (mitte-sobilikud materjalid)	QS1 (halvad materjalid)	QS2 (keskmised materjalid)	QS3 (head materjalid)
Pinnas	Orgaanilise aine sisaldus %	>2.0	<2.0	<1.0	<0.5
	Vees lahustuvate sulfaatide sisaldus (SO_4^{2-} , %)	>5.0	<5.0	<2.5	<1.0
	Lahustuva soola sisaldus (%)	>1.0	<1.0	<0.5	<0.2
	Kandevõime (N_{SPT})	<15	15< N_{SPT} <20	20< N_{SPT} <25	N_{SPT} >25
Kivi	Lagunevus (I_{DG})	--	>5/>2	<5/<2	<1
	Tugevus	Indikatiivne tugevus vt tabel 4 – lk 27 IRS 70719			
Pinnas ja kivi	Deformatsioonimoodul plaatkoormuskatsega	E_{v2} <25	25< E_{v2} <50	50< E_{v2} <80	E_{v2} >80



Joonis 5.2 Muldkeha kihtide struktuur ja soovitatud parameetrid [25]

5.1 Pinnase geoloogia (RB trassi lõik DS1-DPS2)

Aastatel 2019 kuni 2021 viis ettevõtte Reaalprojekt Alu-Mälivere lõigu projekteerimiseks läbi pinnase geoloogilisi ja geotehnilisi uuringuid. Geotehnilised uuringud hõlmasid puuraukude tegemist, dünaamilisi välikatsetusi, proovide võtmist ning võetud pinnaseproovide laboratoorseid katseid [26]. Alu-Mälivere lõigu väliuuringute kirjeldus on toodud tabelis 5.2.

Tabel 5.2 Lõigu DS1-DPS2 Alu-Mälivere väliuuringud [26]

Väliuuringud	Katsetulemus	Katsete arv/ Puuraugud
Koonuse läbistuskatse (CPT)	Koonuse läbistustakistus (q_c)	2
Piesokoonus (CPTu)	Koonuse läbistustakistus (q_t)/ hõõrdetakistus (f_s); poorivee rõhk (u)	5
Kombineeritud läbistuskatse	Koonuse läbistustakistus (q_c) Löökide arv 20 cm kohta (N_{20})	2
Kombineeritud läbistuskatse	Koonuse läbistustakistus (q_c) Löökide arv 20 cm kohta (N_{20})	200
Väga raske löökpenetratsioon (DPSH-A)	Löökide arv 20 cm kohta (N_{20})	9
Löökpuurimine	Pinnase stratigraafia ja pinnaseproovid	252
Löökpuurimine	Pinnase stratigraafia ja pinnaseproovid	40
Tiivikkatse	Dreenimata nihketugevus (C_{fv})	17

Pinnaseuuringu aruande järgi esineb lõigul niiskeid alasid, kus tuleks rajada 1 meetri paksune sõmera materjali kiht, mis niisketes piirkondades vee kapillaartõusu leevendaks [26]. Kirjeldatud kihi rajamiseks sobivad näiteks glatsiofluviaalsed setted ja moreenisetted. Trassi lõik läbib ka Hagudi turbaraba, kus on konstruktsiooni kandvaks osaks projekteeritud monteeritav betoonplaat. Majanduslikust aspektist vaadates tuleks lõigus pinnase mass-stabiliseerimist kaaluda.

Enamiku väljakaevatava pinnase lõigul moodustab geoloogiline üksus UG-IV lubjakivi. Geotehniliste omaduste järgi on tegemist hea materjaliga, vastab kvaliteediklassile QS2, ja UIC IRS 70719 standardi järgi saame materjali kogu muldkeha täitekihi osas kasutada. See aitab vähendada kulutusi, mis on lõigu pinnareljeefi ebatasasustest tulenevate probleemidega seotud.

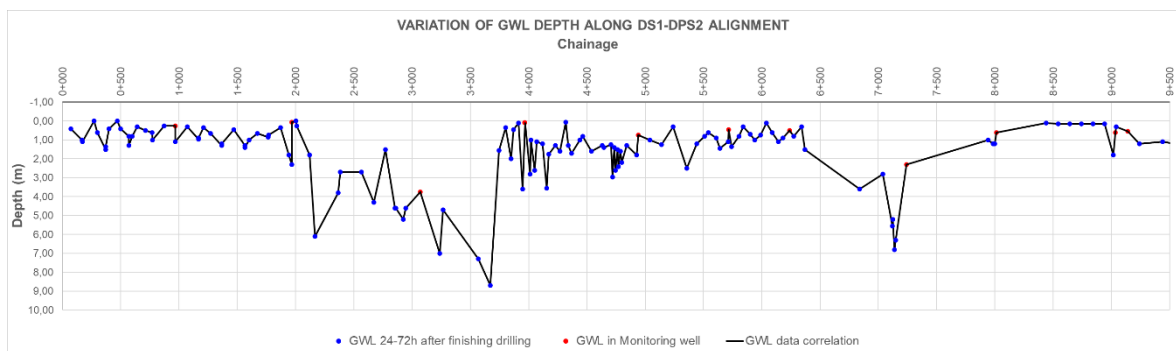
Tabel 5.3 DPS2 lõigu geotehniliste üksuste koondtabel [26]

GEOLOOGILISED ÜKSUSED		GEOTEHNILISED ÜKSUSED		
ID	Kirjeldus	Iseloom	ID	Kirjeldus
Kasvupinnas	Kasvupinnas		–	Orgaaniline pinnas
UG-I	Glatsiofluviaalsed setted	sõmer	Ia	Väga kohev liiv ja mölline liiv
			Ib	Kohev liiv ja mölline liiv
			Ic	Kesktihe liiv ja mölline liiv
			Id	Tihe liiv ja mölline liiv
			Ie	Väga tihe liiv ja mölline liiv
UG-II	Glatsiolakustrilised setted	nidus	IIa	Väga pehme savi/möll
			IIb	Pehme savi/möll
			IIc	Poolpehme savi/möll
			IId	Poolkõva savi/möll
			IIE	Kõva kuni väga kõva savi/möll
UG-III	Moreen	sõmer	IIIL	Väga kohev/kohev, savine/mölline liiv-kruus
			IIIa	Kesktihe, savine/mölline liiv-kruus
			IIIb	Tihe kruusane, savine/mölline liiv-kruus
		nidus	IIIc	Väga tihe, pisut savine/mölline liiv-kruus
			IIId	Poolkõva, kõva/väga kõva, väga savine/mölline liiv-kruus
UG-IV	Aluspõhi	–	IV (murenenuk/lõhustunud)	Murenenuk/lõhustunud lubjakivi ja mergel
		–	IV	Terve lubjakivi ja mergel
UG-V	Turvas	–	V	Turvas
UG-VI	UG-VI	nidus	VI-A	Nidus täitepinnas
(Täitepinnas)	(Täitepinnas)	sõmer	VI-B	Sõmer täitepinnas

5.1.1 Pinnasevee tase

Alu-Mälivere alalõigu pinnaseuuringu aruande järgi on avastatud piirkondi, kus pinnasevee tase on väga madal ja piirkonnad on niisked. Antud lõigul üleujutatud alasid ei tuvastatud ja vastavalt standardile UIC 719r võib muldkeha põhja rajamiseks kasutatav materjal olla samade omadustega, mida kasutatakse tavalistel tingimustel, mis on välja toodud tabelis 2.3.

Pinnase veetase on lõigul 0+000 kuni 2+250 madal, kus keskmine sügavus ulatub 0,80 meetrini. Lõigul 2+250 kuni 5+000 on pinnasevee keskmine sügavus 3,2 meetrit. Lõigul 5+000 kuni 6+400 on pinnasevee tase mitmel alal pinna lähedal, kattudes kasvupinnase ja turbakihi aladega. Lõigul 6+400 kuni 8+160 paikneb pinnasevesi keskmisel sügavusel 3,5 meetrit. Lõigul 8+160 kuni 14+000 on pinnasevee tase mitmes piirkonnas pinna lähedal [26].



Joonis 5.3 Pinnasevee taseme sügavus DPS2 trassi telgjoonel [26]

5.1.2 Kasvupinnas

Kasvupinnast esineb peaaegu terve trassi osa lõikes, varieeruva paksusega keskmiselt 0,30 kuni 0,60 meetrit. Arvestades selle materjali kohevust ja kõrget orgaanilise aine sisaldust, tuleb materjal mistahes ehitustööde korral alati eemaldada ning seda võib ainult taashaljastuse eesmärgil kasutada [26].

5.1.3 UG-I (glatsiofluviaalsed setted)

Geoloogiline üksus UG-I koosneb erineva kompaktsusastmega liivast ja möllisest liivast, mis on välja toodud tabelis 5.3 [26].

Iab – väga kohevad kuni kohevad liivad ja möllised liivad (Iab) esinevad peamiselt lõigul 0+000 kuni 1+240, paiknedes kasvupinnase all. Materjali väljakaevatav osa paikneb vahemikus 7+030 kuni 7+140 [26]. Vastavalt laboratoorsete katsete tulemusele ja standardi UIC 719r pinnase klassifitseerimistabelile saab pinnase liigitada klassi QS1. Vastavalt standardile IR UIC 70719 sobib materjal töötlemata kujul kasutamiseks muldkeha täitekihi pinnalt 1 meeter allpool [25].

Kuna tegemist on väga kohevate ja kohevate liivade ning mölliste liivadega, tuleb materjali kandvust geovõrku kasutades tugevdada, kui materjal jääb muldkeha alla. Kui materjali taaskasutada, tuleks materjali omadusi sideainega töödeldes parandada või kasutada vastavalt standardi IRS UIC 70719 kohaselt muldkeha täitekihi tuumas kapseldatuna, nagu on näidatud joonisel 5.2.

Ic – kesktihe liiv ja mölline liiv (Ic) esinevad peamiselt lõigul 4+670 kuni 5+440 ja 12+500 kuni 12+740 kasvupinnase all. Materjal on vastavalt laborikatsete omadustele kvaliteediga QS1 ja ei kuulu antud lõigus väljakaevamisele.

5.1.4 UG-II (glatsiolakustrilised setted)

Glatsiolakustrilised setted UG-II koosnevad möllist ja savist, mis on konsistentsi põhjal kolme klassi jaotatud [26]. Materjal loetakse geotehnilisel eesmärgil nidusaks materjaliks.

Pinnast esineb vahelduvalt kasvualuses kihis IIabc 1+400 kuni 2+200, IId – 3+850 kuni 6+220, IIe – 1+300-1+420. Savi/möll pinnas ei kuulu antud lõigus väljakaeve materjali alla [26]. Pinnase omaduste poolest saame materjali QS1 klassi liigitada.

Muldkeha üldise stabiilsuse parendamiseks on otstarbekas kasutada geovõrku UG IIabc materjalide kihtide peal, kui need jäävad rajatava muldkeha alla, kuna need on oma olemuselt väga pehmed kuni pool pehmed savi/möllid.

5.1.5 UG-III Moreenisetted (glatsiaalsed setted)

Kompaktsuse/konsistentsi põhjal on moreenisetted jaotatud järgmiselt [26]:

- UG-III_IIIL – väga kohev ja kohev, mölline liivane KRUUS
- UG-III_IIIa – kesktihe, mölline liivane KRUUS

- UG-III_IIIbc – tihe ja väga tihe, mölline liivane KRUUS
- UG-III_IIIId12 – väga pehme kuni poolkõva, kruusane liivane SAVI
- UG-III_IIIId3 – kõva kuni väga kõva, kruusane liivane MÖLL

Moreenisetted (keskmise tihedusega ja tiheda kuni väga tiheda möllise liivase kruusa kihid) paiknevad peamiselt lõikudes 3+020 kuni 3+860, kus see pinnas tuleb välja kaevata (muldkeha läheb süvendisse), ning 6+500 kuni 12+500, kus see jääb peamiselt muldkeha täitekihi alla [26].

Vastavalt laboratoorsete katsete tulemusele, mis on välja toodud Alu-Mälivere pinnaseuuringute aruandes, ja standardi UIC 719r pinnase klassifitseerimistabelile, saab moreenisetete pinnased QS1 klassi liigitada [5]. Vastavalt liigitusele on võimalik pinnast täitekihi pinnalt 1 meeter allpool kasutada.

5.1.6 UG-IV Aluspõhi (siluri ajastu)

Geoloogiline üksus UG-IV koosneb lubjakivist savikate kihiga, mis on jaotatud järgnevalt [26]:

- UG-IV (murenenud) – Murenenud lubjakivi ja mergel, madal geotehniline kvaliteet.
- UG-IV (murenemata) – Murenemata lubjakivi ja mergel, hea geotehniline kvaliteet.

UG-IV asub peamiselt lõigu alguses ja lõpus sügavusel 2–6 meetrit ning lõigu keskosas vahemikus 6+000 kuni 11+000 maapinna lähedal (<2 m). Lõikude vahemikes 2+780 kuni 3+840, 6+520 kuni 7+240 ja 9+840 kuni 10+600, kus on plaanitud mahukamad väljakaevamised, koosneb enamik väljakaevatavast materjalist just sellest pinnasest [26]. Peamiselt on lõikudes tegemist murenemata lubjakiviga, mis ei ole külmakerkeline materjal ning vastavalt geotehnilistele katsetustele ja UIC 719r standardile kuulub materjal QS2 kvaliteediklassi ehk seda sobib külmakaitsekihi all kasutada.

- QS2 määratlus: $Cu > 6$ ja $f_5 \dots 15$ või $Cu < 6$ ja f_5 või LA_{40} [5]
- QS3 määratlus: *well graded* ($Cu > 6$) ja f_5 või kivimaterjal LA_{30} [5]

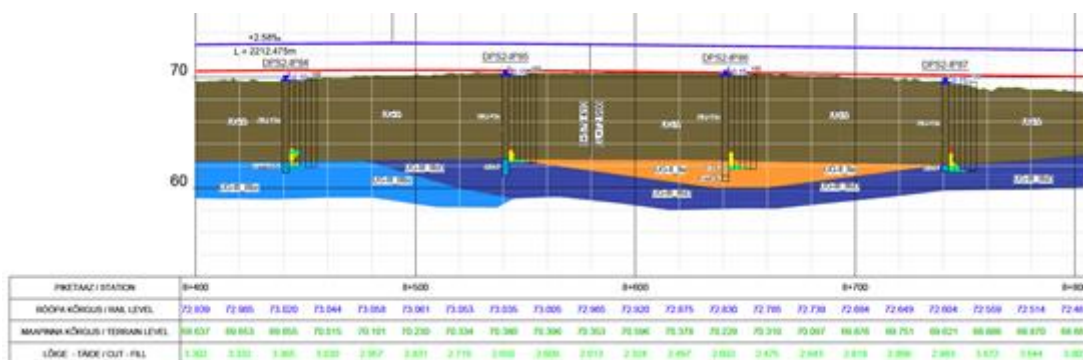
Vastavalt UIC klassifikatsioonile kuuluvad täitematerjalid QS2 klassi (kui $LA \leq 40$ ja $MDH \leq 40$). Kui neid paigutatakse hüdrogeoloogilise keskkonna korrigeerimiseks veetasemest kõrgemale, võib neid QS3 klassi liigitada [5].

UIC IRS 70719 standardi järgi saame materjali kogu muldkeha täitekihi osas kasutada.

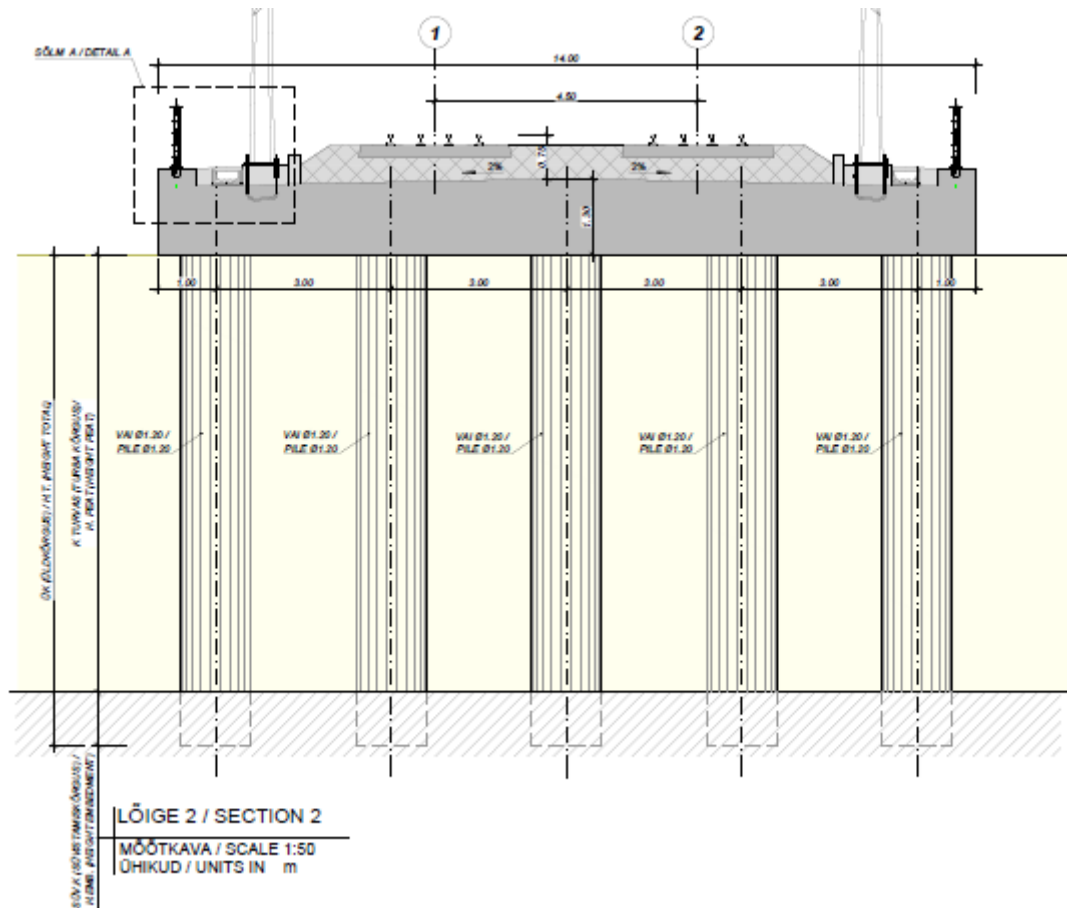
5.1.7 UG-V Turvas

Turvas on orgaaniline pinnas, mis ei sobi geotehniliste parameetrite tõttu täitematerjaliks ega konstruktsiooni kandvaks materjaliks. Pinnas tuleks muldkeha alt välja kaevata või stabiliseerida.

Lõigul vahemikus 5+800 kuni 6+360 esineb õhuke turbakiht, mille paksus võib ulatuda kuni ca 1,1 meetrini, antud lõigus on turbakihi paksus suhteliselt õhuke ja lõigus on otstarbekas pinnas eemaldada. Vahemikus 8+180 kuni 9+250 läbib trass Hagudi raba, kus keskmine turbakihi paksus on 7 meetrit. Keskkonnamõju hindamise uuringutest lähtudes tuleb veerežiim raba ala ääres muutumatuna säilitada, mistõttu tuleb arvestada vee looduslikku liikumist ja millest tulenevalt on projekteeritud järgnevad lahendused [26]. Geotehnilise lahendusena on lõigu alguses ja lõpus ligikaudu 200 meetri ulatuses, kus turba sügavus on 3 meetrit, projekteeritud materjali asendamine kandva ja vett läbilaskva pinnasega. Lõigul 8+260 kuni 8+876, kus turbakihi paksus on 8 meetrit, on geotehnilise lahendusena projekteeritud monteeritav betoonplaat [4].



Joonis 5.4 Hagudi raba geotehniline pikiprofiil [4]



Joonis 5.5 Hagudi raba projekteeritud geotehniline lahendus [4]

Hagudi raba alguse ja lõpu lõigus, kus turba paksus on kuni 3 meetrit, oleks majanduslikult otstarbekas turba mass-stabiliseerimist kaaluda.

5.2 Muldkeha konstruktsioon

Muldkeha konstruktsiooni kogupaksuse määramisel on oluline arvestada geograafilise asukohaga, kuna see mõjutab pinnase külmumissügavust. Rail Baltica muldkeha kihtide paksuse projekteerimisel võetakse arvesse Eestis maksimaalset läbikülmumise sügavust, mis on umbes 2,05 meetrit. Kuna pinnase külmumissügavust mõjutavad tegurid varieeruvad oluliselt üle Eesti, on otstarbekas lähtuda lähima liivpinnase külmumissügavuse andmetest, võttes arvesse keskmist läbikülmumissügavust.

Külmakaitsekihi paksust on võimalik vastavalt tabelile 4.1 vähendada, kui võtta arvesse standardit NATO osa 3 ja muldkeha konstruktsiooni soojuspidavuse tõstmiseks soojusisolatsiooni plaati kasutada.

Pinnase geoloogiast tulenevalt saaks lõiguti muldkeha paksust vastavalt pinnase materjali olemusele kohandada. Kui materjal asub rajatavas süvendis, siis oleks otstarbekas konstruktsiooni rajamist alates mulde vahekihist alustada, kui allajääv pinnas täidab külmakaitsekihi materjali nõudeid.

5.2.1 Konstruktsiooni paksus liivpinnase läbikülmumissügavust arvestades

Standardis UIC 719r kasutatakse külmumissügavuse määramiseks ilmajaama kõrgeima külmaindeksi väärtust ja vastava aasta keskmist temperatuuri, selles valemis ei ole pinnase soojusjuhtivuse tegurit arvestatud [5].

Kuna pinnase külmumissügavust mõjutavad mitmed erinevad tegurid, mis võivad Eestis oluliselt erineda, sealhulgas talvine välistemperatuur, talve kestvus ja pinnase soojusjuhtivus, on mõistlik objektile lähima liivpinnase külmumissügavuse andmetest lähtuda.

Eesti keskmise ja maksimaalse liivpinnase läbikülmumissügavuse vahe on väga suur. Võttes aluseks ehituskonstruktori käsiraamatu tabeli „Pinnase külmumissügavus Eestis“ on Pärnus pinnase keskmine külmumissügavus 60% suurem kord 50 aasta jooksul esinevast külmumissügavusest [27]. Seega ei ole majanduslikult ja ehituslikult otstarbekas võtta aluseks maksimaalset läbikülmumise sügavust, vaid tuleks objektile lähima mõõtmistulemuste keskmisest lähtuda.

Tabel 5.4 Pinnase külmumissügavus Eestis meetrites [27]

Koht	Keskmine	Kord 50 a jooksul
Haapsalu	1,15	1,95
Jõgeva	1,45	2,05
Keila	1,25	2
Kohtla-Järve	1,4	2,2
Kunda	1,3	2,1
Kuressaare	1,05	1,75
Kõpu	0,9	1,5
Kärdla	1,05	1,75
Narva	1,45	2,3
Narva-Jõesuu	1,4	2,25
Paldiski	1,15	1,9
Pandivere	1,45	2,1
Põltsamaa	1,4	2
Põlva	1,4	2,05
Pärnu	1,25	2
Rakvere	1,4	2,25
Rapla	1,3	2,05
Sõrve	0,85	1,4
Tahkuna	0,9	1,5
Tallinn	1,2	1,95
Tartu	1,35	1,95
Tiirikoja	1,4	2,1
Türi	1,35	2
Valga	1,35	2
Viljandi	1,35	2
Vilsandi	0,8	1,4
Võru	1,4	2,05

Tabelis 5.4 on liivpinnase külmumissügavused Eestis, mis on arvatud talvekuude keskmiste temperatuuride alusel ja ka kord 50 aasta vältel esineva külmima talve temperatuuride alusel. Teistsuguste pinnaste puhul tuleb sügavus läbi korrutada parandusteguriga, mis on toodud tabelis 5.5 [27].

Tabel 5.5 Külmutumissügavuse parandustegurid [27]

Pinnase liik	Parandustegur
Savi	0,77
Möll	0,93
Liiv	1
Kruus	1,13
Väga jäme täide (nt lõhutud paas)	1,33

5.2.2 Konstruktsiooni paksus pinnase geoloogiat arvestades

Rajatavate konstruktsioonikihtide paksuseid saab ehituslikus plaanis väga paindlikult kohendada, arvestades kohaliku pinnase geoloogiat. Vastavalt standardile UIC 719R saame kvaliteedi nõuete järgi külmakaitsekihis kasutatava materjali QS2 klassi ja muldevahekihis kasutatava materjali QS3 klassi liigitada. Alusballasti kihi jaoks kehtivad materjalinõuded on rangemad, kui need, mis on standardi UIC 719R järgi pinnaseklassi QS3 jaoks määratletud [5]. Selline olemasoleva pinnase materjali klassifitseerimise alusel taaskasutamine aitab nii tellijal kui ka ehitajal soodsamalt majandada, võimaldades nõuetes järeleandmisi tegemata muldkeha konstruktsiooni kvaliteeti ja materjali säilitada.

Näite alusel, mis hõlmab Alu-Mälivere vahelise trassi lõiku vahemikes 2+780 kuni 3+840, 6+520 kuni 7+240 ja 9+840 kuni 10+600, kus muldkeha paikneb süvendis, asub väljakaevu pinna all peamiselt murenemata lubjakivi, mis ei ole külmakerkeline materjal ning vastavalt geotehnilistele katsetustele ja UIC 719r standardile kuulub materjal QS2 kvaliteediklassi ehk seda sobiks külmakaitsekihis kasutada. Materjal on ka piisavalt tugev, et seda otse alusballasti kihi all kasutada. Antud lõigus oleks majanduslikult otstarbekas kasutada muldkeha alternatiivi nr 2.

5.2.3 Konstruktsiooni paksus nõutud elastsusmoodulit ja tihedustegurit arvestades

Kui muldkeha konstruktsioonikihtides on materjali valiku kriteeriume õigesti järgitud, võime standardis UIC 719 r esitatud valemit raudtee muldkeha konstruktsioonikihtide paksuse arvutamiseks kasutada, tagamaks soovitud kandevõime saavutamist. Lisaks

on autor kasutanud töös KRP programmi, mis baseerub Soome projekteerimismudel [21].

5.2.3.1 Standardi UIC 719r valem raudtee konstruktsiooni aluskihtide määramiseks.

Muldkeha konstruktsioonikihtide paksuste määramisel tuleb arvesse võtta [5]:

- soovitud kandevõimet (määratletud kindlas punktis);
- liivpinnase külmumissügavust (vt tabel 5.4).

Kogupaksus (ballastkiht + muldkeha töökiht) varieerub vastavalt järgnevatele teguritele [5]:

- aluspõhja kandevõime;
- liipri tüüp ja liiprite vahekaugus;
- raudtee projekteeritud liiklusomadused (toetav tonnaaž, teljekoormus ja kiirus).

Paksuse määramise valem joonisel 5.6 kehtib rööbasteedel rööpmelaiusega 1435–1668 mm, liiprite vahekaugusega 0,6 m (möödetud teljest-teljeni) ja maksimaalse teljekoormuseni 250 kN [5].

Arvestades eelnevalt kirjeldatud parameetreid ja joonisel 5.6 esitatud valemit, leiame, et vajalik konstruktsioonikihi paksus kandevõime saavutamiseks liipri alt on 0,62 m eeldusel, et alusballasti alune kiht vastab materjali klassile QS2 ja kihi alla on lisatud geotekstiil. Arvestades Rail Baltica raudtee pealisehitisele kehtestatud nõudeid, mis kohustab tagama minimaalse ballastikihi paksuse liipri alla 0,30 meetrit, võime järeldada, et UIC 719r standardis välja toodud valemi järgi on kandevõime tagamiseks vajalik 0,32 meetri paksune alusballasti kiht. Vastavalt standardi UIC 719r tabelile 6 mulde vahekihi kandevõime määramiseks, on QS1 kvaliteediklassile vastavale aluskihile paigaldatava mulde vahekihi minimaalne nõutud paksus 0,5 meetrit.

Tabel 5.6 Kandevõime tagamiseks konstruktsioonikihi paksuse arvutamine joonise 5.6 põhjal

Tähis	Väärtus	Kommentaar
E	0,55	QS2 kvaliteediklassi pinnased
a	0	UIC raudteeklass 1–4 (viide: UIC leaflet 714)
b	-0,05	Betoonliipri laius 2,60

Tähis	Väärtus	Kommentaar
c	0	Tavapäraste mõõtmete rakendamine
d	0,12	Maksimaalne teljekoormus ei ületa 250 kN
e =	0,62	

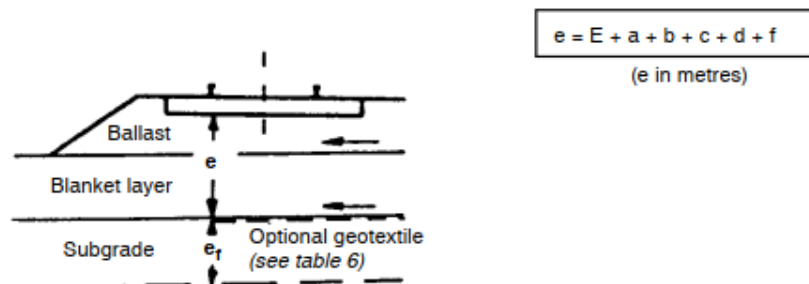


Fig. 15 - Calculation of minimum thickness (e) of track bed

E	= 0,70 m	for soils of bearing capacity class P1 ^a
E	= 0,55 m	for soils of bearing capacity class P2 ^a
E	= 0,45 m	for soils of bearing capacity class P3 ^a
a	= 0	for UIC groups 1-4 ^b
a	= - 0,10 m	for UIC groups 5 and 6 ^b
b	= 0	for wooden sleepers of length 2,60 m
b	= $\frac{2,50 - L}{2}$	for concrete sleepers of length L (b in m, L in m; b possibly negative if L > 2,50 m)
c	= 0	for usual dimensions
c	= - 0,10 m	special case for difficult working conditions on existing lines
d	= 0	when the nominal maximum axleload of hauled vehicles does not exceed 200 kN (see UIC Leaflet 700)
d	= + 0,05 m	when the nominal maximum axleload of hauled vehicles does not exceed 225 kN (see UIC Leaflet 700)
d	= + 0,12 m	when the nominal maximum axleload of hauled vehicles does not exceed 250 kN (see UIC Leaflets 700 and 724)
f	= +	the track bed should include a geotextile if the prepared subgrade is formed from soils of quality class QS1 or QS2 ^c
f	= 0	(no geotextile is required) if the prepared subgrade is formed from soils of quality class QS3 ^d

a. The bearing capacity classes are defined in table 6.

b. The UIC groups are defined in UIC Leaflet 714 (edition of 1.1.89) (see Bibliography).

c. See NB in point 2.6 - page 40

d. The UIC soil quality classes are defined in table 5.

Joonis 5.6 Konstruksioonikihtide paksuste arvutamise valem [5]

5.2.3.2 Konstruksioonikihtide arvutus Odemarki valemi põhjal

Katendi arvutusel on autor kasutanud Odemarki valemil (vt joonis 4.5) põhinevat KRP programmi, mille sisu baseerub Soome projekteerimismõõtmel ja on välja töötatud

Simmo Talpas-Taltsepp magistritööna „Eestis kasutusel oleva katendiarvutus meetodika probleemid ning alternatiivse rakenduse väljatöötamine kasutades Soome meetodikat“ [21].

KRP programmi kasutades on töö autor dimensioneerinud konstruktsiooni vastavalt nõutud kihtide kogupaksusele ja arvanud läbi vajaliku kihtide kogupaksuse vajaliku elastsusmooduli E_{v2} saavutamiseks.

Tabel 5.7 KRP programmi arvutustulemused konstruktsioonile 2,05 meetrit [28]

Materjal	Paksus (max 0,3m)	E-moodul	Arvutatud $E_y (E_{v2})$
	1.55 m	MPa	MPa
Go 0/31,5	0.12	200	150
Go 0/31,5	0.20	200	135
liiv 100	0.03	100	98
liiv 100	0.30	100	98
liiv 100	0.30	100	96
liiv 100	0.30	100	88
liiv 100	0.30	100	72
aluspinna	–	45	45

Väljakaeve järgse pinna minimaalse sihtväärtuse $E_{v2} = 45$ MPa peeneteralise pinnase korral on väärtused liivpinnase puhul alusballasti kihi alt arvutatuna 98 MPa ja 150 MPa alusballasti kihi pealt arvutatuna, kus on kasutatud vähe liivaterasid sisaldavat ja vett hästi läbilaskvat purustatud kivimaterjali.

Tabel 5.8 KRP programmi arvutustulemused alusballasti kihi pealt vajaliku $E_{v2}=120$ MPa saavutamiseks [28]

Materjal	Paksus (max 0,3m)	E-moodul	Arvutatud $E_y (E_{v2})$
	0.8 m	MPa	MPa
Go 0/31,5	0.30	200	140
liiv 100	0.30	100	84
liiv 100	0.20	100	64
aluspinna	–	45	45

KRP programmi arvutuste põhjal leiame, et tegeliku elastsusmooduli saavutamiseks konstruktsiooni pealiskihis vajame 0,8 m paksust töökihti, millest 0,5 meetrit muldevahekiht on konstrueeritud liivast ja alusballasti kiht 0,3 meetrit, milles on kasutatud purustatud killustiku fr 0/31,5.

5.3 Analüüsi kokkuvõte

Pinnase geoloogiliste uuringute põhjal ning juhindudes standardist IRS UIC 70719, mis käsitleb väljakaevatud materjalide kvaliteedi klassifikatsiooni ja soovitatavaid kasutusvaldkondi muldkehas, on võimalik enamikku väljakaevatud materjalist muldkeha täitekihis taaskasutada. Lisaks oleks soovituslik taaskasutada väljakaevest tulevat lubjakivi muldkeha külmakaitsekihis ja vahekihis, kui katsetega on materjali vastavus tabelitele 2.4 ja 2.5 saavutatud.

Olemasolevat pinnasegeoloogiat arvesse võttes saame konstruktsiooni kihtide valikul väga edukalt varieeruda, seades kriteeriumiteks, et vajalik elastsusmoodul on saavutatud ja konstruktsiooni kogupaksus vastab keskmise liivpinnase läbikülmumissügavusele, võttes arvesse objektile lähima ilmajaama andmeid. Pinnase geoloogiast tuleneb, et trassil on mitmeid lõike, kus muldkeha tuleks hakata rajama mittekülmakerkelisele pinnasele ja seda materjali ei ole otstarbekas isegi mehhaaniliselt väljakaevamise teel kobestada. Samas esines geoloogia analüüsis käsitletud lõigul DS1-DPS2 ka niiskeid alasid, kuhu tuleks rajada 1 meetri paksune sõmera materjali kiht, mis niisketes piirkondades vee kapillaartõusu leevendaks. Antud materjaliks on sobilikud väljakaevest tulenevad liivad ja möllised liivad, mis on sõmerate materjalidena klassifitseeritud.

Lisaks on võimalik muldkeha konstruktsiooni kogupaksust vähendada, kui kasutame külmakaitsekihi peal isolatsiooniplaati, mida kasutatakse laialdaselt Soome muldkeha ehitusel.

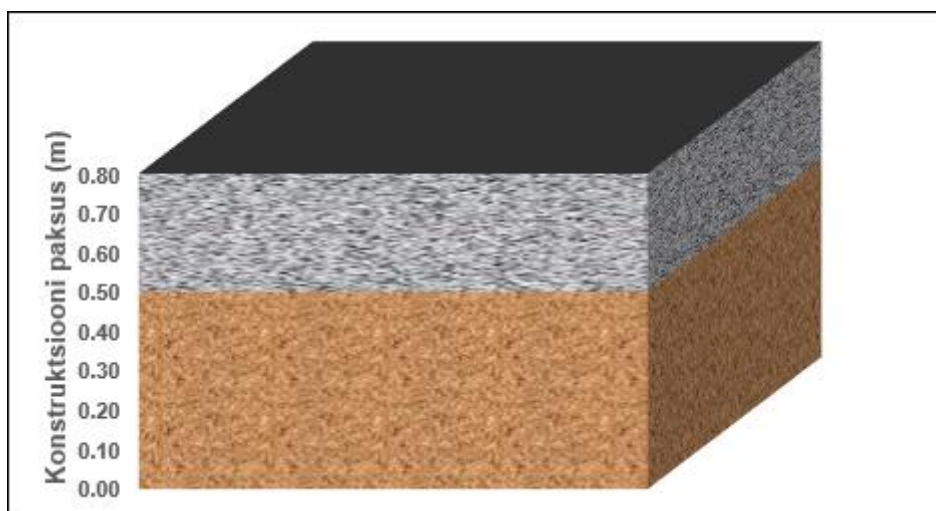
Konstruktsioonikihtide arvutusel kahe erineva meetodi vahel on tulemused sarnased, kui standardi UIC 719r meetodil vahekihi aluse pinnase kvaliteediklassiks on määratud QS1.

Tabel 5.9 Muldkeha konstruktsioonikihtide arvutused kahel erineval meetodil

Meetod	Ballast mõõdetud liipri pealt (m)	Alusballa st (m)	Vahekiht (m)	Külmakaitse kokku (m)
UIC 719r	0,5	0,32	0,5**	1,32
KRP programm	0,5	0,3	0,5	1,3

** vahekihi valikul on lähtutud, et aluspinnas kuulub pinnaseklassi QS1

Muldkeha analüüsist lähtudes on autor arvamusel, et RB muldkehas kasutatavad konstruktsioonikihtide paksuste nõuded on suuresti üledimensioneeritud, sest külmakindluse arvutamisel on kasutatud Eesti maksimaalset läbikülmumissügavust, mis võib esineda kord 50 aasta jooksul. Kui võtta arvesse Rapla keskmise läbikülmumise sügavuse 1,30 meetrit (vt tabel 5.4), saame lähtuda KRP programmiga dimensioneeritud konstruktsiooni külmakaitsest kogu paksusega 1,30 meetrit.



Joonis 5.7 KRP programmiga dimensioneeritud muldkeha konstruktsiooni kogupaksus [28]

6. VÕIMALIKUD ALTERNATIIVID

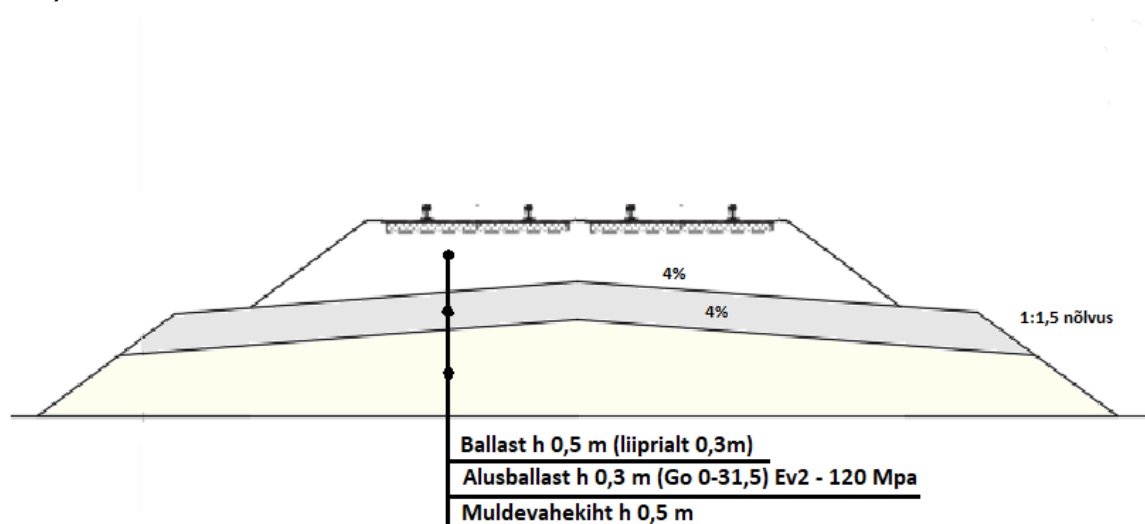
Esiletoodud alternatiivid põhinevad eelneval muldkeha analüüsil ning nende kasutamine aitab ehituskulusid oluliselt optimeerida, nagu on näidatud tabelis 6.5.

6.1 Alternatiiv 1 – muldkeha külmakaitsekihi vähendamine

Alternatiivne muldkeha vähendaks olemasolevat muldkeha konstruktsiooni paksust vastavalt objektile lähima liivpinnase keskmisele külmumissügavusele. Joonisel kasutatud ristlõikes on lähtutud Rapla andmetest 1,30 meetrit.

Alusballasti kihis on kasutatud sidumata segu O_g 0–31,5, et saavutada ballastialuselt kihilt kandevõime E_{v2} järgi 120 Mpa. Muldevahekihis on kasutatud liiva kogu paksusega 0,5 m kitsamast kohast mõõdetuna. Muldkehast nõutud tihedus 0,98. Muldkehast vee eemale juhtimiseks on säilitatud põikikalde nõue 4% ja muldkeha stabiilsuse tagamiseks on muldkeha töökihis tagatud nõlvuse nõue 1:1,5.

Muldkeha kihtidelt soovitud elastsusmoodul on arvatatud KRP programmiga (vt tabel 5.8).



Joonis 6.1 Alternatiivne muldkeha ristlõige

Alternatiivi kasutusele võttes väheneks muldkeha külmakaitsekihi ehitusele vajaliku materjali kogus ligikaudu 60%.

Tabel 6.1 Kuluvõrdlus (eur) 1 meetri muldkeha ehitamise kohta projekteeritud RB muldkeha ja alternatiivne muldkeha 1

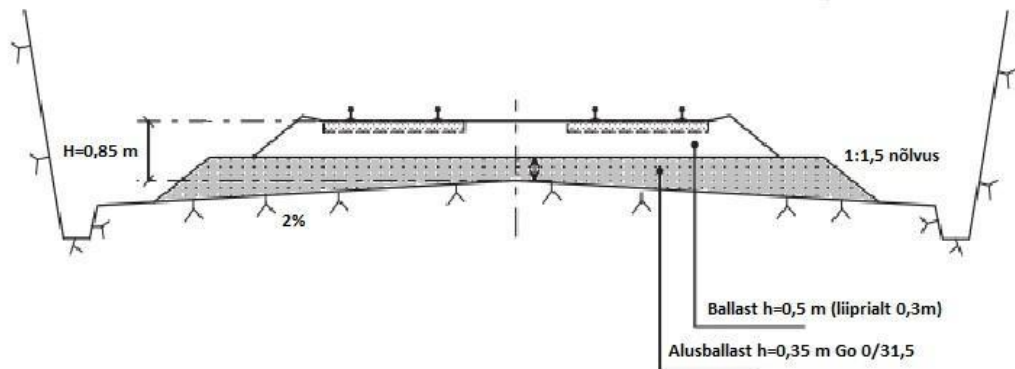
	Projekteeritud RB	Alternatiiv 1	Erinevus
Alusballast paigaldatud muldkehasse	121,36	113,7	
Muldkevahekiht/külmakaitsekiht (liiv) paigaldatud muldkehasse	393,6	140	
	514,96	253,7	102,98%

Tabeli 6.1 põhjal saame järeldada, et alternatiivne lähenemine vähendaks muldkeha ehitamise kulutusi poole võrra. Lisaks väheneb ka kasvupinnase eemaldamise kulu, kuna konstruktsiooni paksuse nõlvusega 1:1,5 vähendamisel kitseneb ka muldevahekihi/külmakaitsekihi põhja laius.

6.2 Alternatiiv 2 – ristlõige kaljupinnase süvendis

Alternatiiv 2 kirjeldab raudtee ristlõiget rajatud kaljupinnase süvendisse. Alternatiivne ristlõige pärineb Soome Raudtee tehnilisest juhendist Rato osa 3 „Rööbastee struktuur“ ja on mõeldud rongide teljekoormusega 25 tonni ja kiirusel kuni 250 km/h teenindamiseks. Kusjuures juhend lubab alusballasti aluse kaljulõike teha kaldega 1:20 või väiksem [19].

Alusballasti materjalina on kasutatud standardset purustatud kivimaterjali fraktsiooniga 0/31,5, mis on vähe liivaterasid sisaldav ja vett hästi läbilaskev võimaldamaks kalju lõikepinnal veed ära juhtida.



Joonis 6.2 Alternatiiv 2 kaljupinnasega lõikumisel

Alternatiiv aitab kulusid suurel määral optimeerida lõikude vahemikus 2+780 kuni 3+840, 6+520 kuni 7+240 ja 9+840 kuni 10+600, kus trass liigub süvendisse ja pinnas koosneb suuresti murenemata lubjakivist.

Tabel 6.2 Kuluvõrdlus (eur) 1 meetri muldkeha ehitamise kohta projekteeritud RB muldkeha ja alternatiivne muldkeha 2

	Projekteeritud RB	Alternatiiv 2	Erinevus
Kõvapinnase lõhkumine	660	0	
Alusballast paigaldatud muldkehasse	121,36	132,7	
Muldkevahekiht/külmakaitsekiht (liiv) paigaldatud muldkehasse	393,6	0	
	1174,96	132,7	785,42%

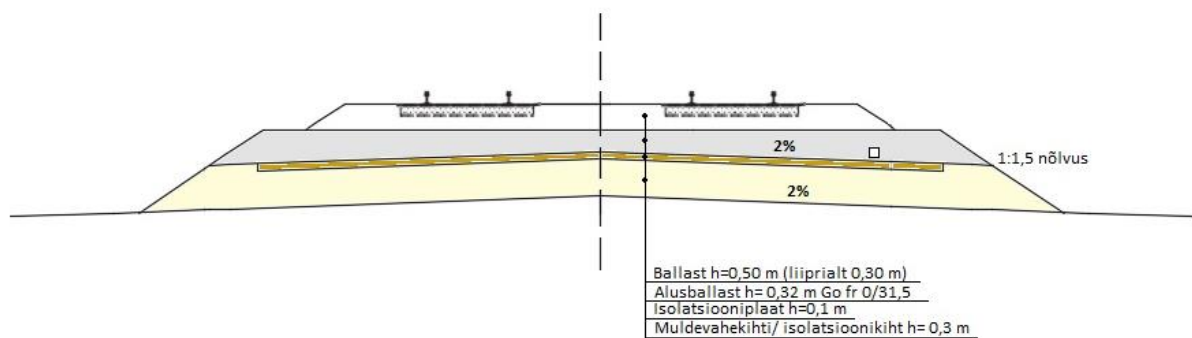
Kuluvõrdlus tabeli 6.2 järgi saame järeldada, et alternatiivse ristlõike kasutusele võtmine vähendaks muldkeha 1 meetri kulutusi ca 8,5 korda. Suurim kokkuhoid tuleb kõvapinnase lõhkumise ärajätmise korral ja lisaks ei ole vajalik muldevahekihti ega külmakaitsekihti rajada.

6.3 Alternatiiv 3 – ristlõige süvendis isolatsiooniplaadiga

Konstruksiooni külmakaitsekihi vähendamiseks on alternatiivses ristlõikes kasutatud isolatsiooniplaati, mis suurendab konstruktsiooni soojusisolatsiooni.

Alternatiivse muldkeha ristlõikega on võimalik vähendada nõutud külmakaitsekihi 2,05 m paksust 1,15 meetrit, kui kasutada 100 mm isolatsiooniplaati [19]. Isolatsiooniplaadi alla tuleb minimaalselt 0,3 meetri paksune isolatsioonikiht rajada [20].

Muldkehas on vee eemale juhtimiseks põikkaldeid 2% projekteeritud mulde alusele ja alusballasti alusele. Ballasti kihi alla ballasti kokkuhoiu mõttes kaldeid projekteeritud ei ole. Alusballast on projekteeritud standardsest purustatud kivimaterjalist fraktsiooniga 0/31,5, mis on vett hästi läbilaskev. Mulde vahekihi materjalina on kasutatud liiva.



Joonis 6.3 Alternatiiv 3 – konstruktsiooni paksuse vähendamine isolatsiooniplaadiga

Ristlõige sobib kasutamiseks eelkõige süvenditesse, millega saame olulisel määral vähendada väljakaevu mahtu raudtee süvendisse minekul külmakartliku kandva pinnase korral.

Tabel 6.3 Kuluvõrdlus (eur) 1 meetri muldkeha ehitamise kohta projekteeritud RB muldkeha ja alternatiivne muldkeha 3

	Projekteeritud RB	Alternatiiv 3	Erinevus
Ehituseks sobimatu pinnase väljakaevamine ja ladustamine	58,46	0	
Alusballast paigaldatud muldkehasse	121,36	121,36	
Isolatsiooniplaat	0	140	
Muldkevahekiht/külmakaitsekiht (liiv) paigaldatud muldkehasse	393,6	84	
	573,42	345,36	39,77%

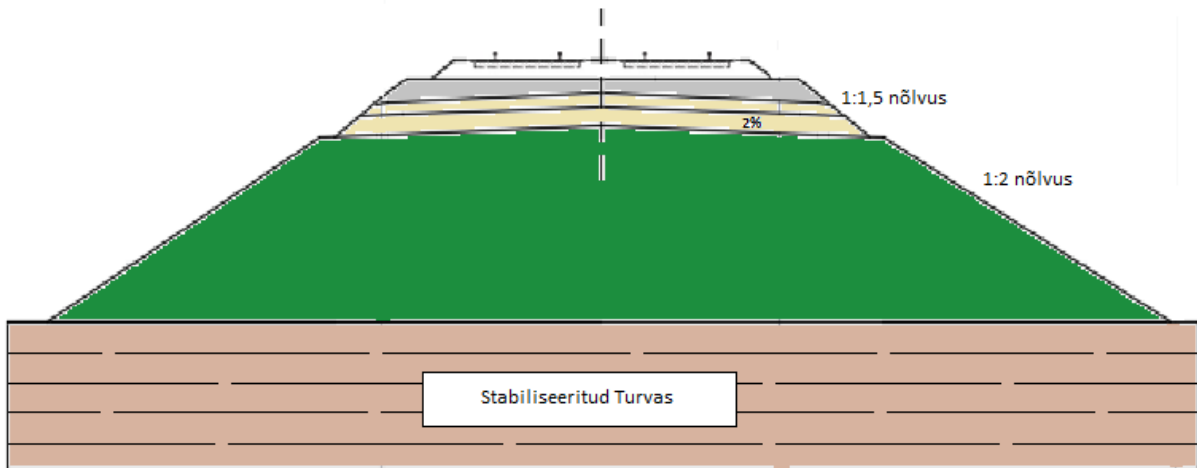
Alternatiivne ristlõige aitaks peamiselt optimeerida muldevahekihi ja külmakaitsekihi ehituskulusid. Ristlõike rakendamisel väheneks iga meetri muldkeha maksumus umbes 0,6 korda.

6.4 Alternatiiv 4 – turba mass-stabiliseerimine

Mass-stabiliseerimise tehnika rakendamine muudab pehme pinnase tehnilisi omadusi viisil, mis võimaldab sellele peale rajada kandva muldkeha või seda pinnast muldkehas ehitusmaterjalina kasutada. Lisaks on mass-stabiliseerimise tehnikat võimalik kasutada reostunud pinnase puhul, mis võimaldab stabiliseeritud pinnase kasutamist [29].

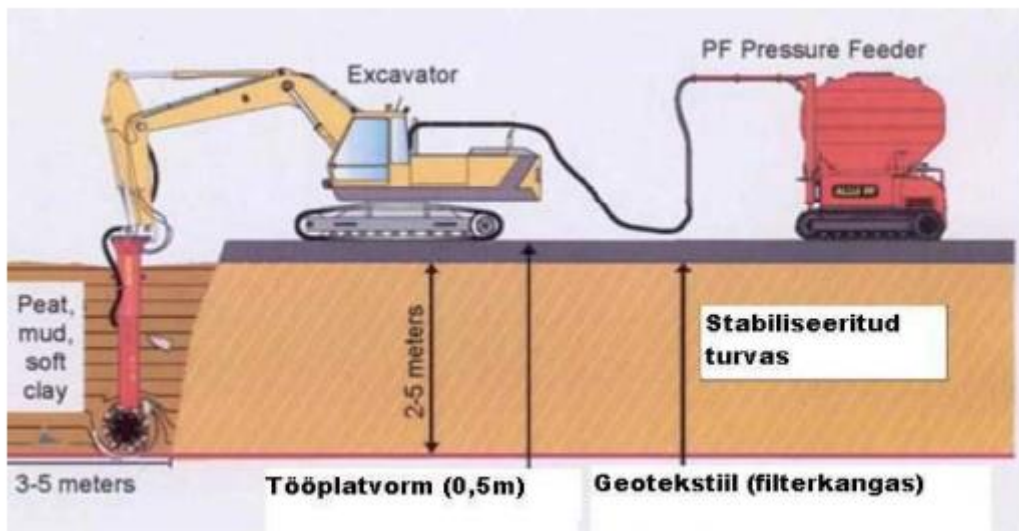
Vahemikus 8+180 kuni 9+250 läbib trass Hagudi raba ja lõigu alguses ning lõpus on ligikaudu 200 meetri ulatuses projekteeritud materjali asendamine kandva ja vett läbilaskva pinnasega, mis on mörtvaia seinaga piiratud. Alternatiivina tuleks lõigus kaaluda nõrga pinnase tugevdamist seda sideainega segades [4].

Stabilisaatorina võib kasutada kas ühte või mitut sideainet nagu tsement, lubi, lendtuhk või šlakk. Ramboll Eesti AS-i koostatud „Pinnaste mass-stabiliseerimisvõimaluste uuring“ aruande järgi koosneb parim sideainesegu turba stabiliseerimisel portlandtsemendist (100 kg/m³) ja tuhast (200 kg/m³) [30].



Joonis 6.4 Alternatiiv 4 – Hagudi raba lõigul 8+180 kuni 8+260 ja 8+876 kuni 9+250 turba mass-stabiliseerimine

Pärast turbapinna töötlemist sideainega profileeritakse segu ning seejärel paigaldatakse sellele enne koormuskihi rajamist geotekstiil. Koormuskihi paksus peaks olema määratud arvestades eeldatavat vajumist ning see peaks olema piisav, et stabiliseerimistehnikat kanda [30].



Joonis 6.5 Mass-stabiliseerimise põhimõtteline skeem [30]

Alternatiivi kasutuselevõtul on oluline võimalus suurel määral taaskasutada orgaanilist materjali, mis enda geotehniliste omaduste tõttu ei ole raudtee muldkeha all taaskasutamiseks sobilik materjal. Lisaks aitab alternatiivne lahendus ehituskuludelt märkimisväärselt kokku hoida.

Tabel 6.4 Kuluvõrdlus (eur) 1 meetri muldkeha ehitamise kohta projekteeritud RB lahendus ja alternatiivne lahendus 4

	Projekteeritud RB	Alternatiiv 4	Erinevus
Turba väljakaeve ja ladustamine	327	0	
Asendamine kandva ja vett läbilaskva pinnasega	1890	0	
Mörtvaia sein	1005	0	
Turba mass-stabiliseerimine	0	2070	
	3222	2070	35,75%

Tabel 6.5 Kuluvõrdluse kokkuvõtte alternatiivide näitel

	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2	Alternatiiv 3	Alternatiiv 4
Võimalik alternatiivide kasutuskoht	Kogu lõigu pikkus, va Hagudi raba	2+750-3+850 ja 6+500-7+100 ja 9+850-10+575	Kogu lõigu pikkus, va Hagudi raba	8+180-8+260 ja 8+876-9+250
Pikkus	13 458,00	2 475,00	13 458,00	454,00
Maksumus 1 m projektne	514,96	1 174,96	573,42	3 222,00
Maksumus projektne	6 930 331,68	2 908 026,00	7 717 086,36	1 462 788,00
Maksumus 1 m alternatiivne	253,70	132,70	345,36	2 070,00
Maksumus alternatiivne	3 414 294,60	328 432,50	4 647 854,88	939 780,00
Protsentuaalne erinevus	102,98%	785,43%	66,04%	55,65%

KOKKUVÕTE

Töö koostamisel uuris autor mitmeid Euroopa, Soome ja Eesti standardeid ning juhendeid, mille eesmärk on suunata insenere rajama kvaliteetseid infrastruktuuri muldkehasid, mis suudaksid vastu pidada aastakümneid või isegi sajandeid. Muldkeha pikaajase kvaliteedi tagamisel tuleb arvestada kliimatilisi ja geoloogilisi tingimusi ning muldkeha mõjutama hakkavaid koormusi.

Magistritööd sõnastades pandi paika töö peamised eesmärgid: analüüsida Rail Baltica projektis ettenähtud raudtee muldkeha, väljakaevatud materjalide taaskasutamise võimalust ja lähtuvalt analüüsist majanduslikult kulutõhusaid alternatiive leida.

Töö eesmärgini jõudmiseks töötati alustuseks läbi Rail Baltica raudtee ristlõike konstruktsioonikihid, nende vajalikud paksused, tiheduse ja kandevõime nõuded ning nõuded materjalidele, mis tulenevad peamiselt rahvusvahelise raudteeorganisatsiooni UIC standarditest.

Seejärel kirjeldati põgusalt Eesti Raudtee ja Soome raudtee kasutatavaid muldkehasid ning nende nõudeid, mis kehtivad pigem 1520 mm rööpmelaiusega raudteedele. Soome nõudeid, mis tulenevad peamiselt Rato ja InfraRYL juhenditest, on kajastatud, kuna Soome on kliima poolest Eestile sarnane ja Soomes lähtutakse muldkehade dimensioneerimisel pigem arvutusest, kui ettekirjutatud standardite väärtustest.

Töö põhiosa keskendub muldkeha analüüsile, kus kõigepealt uuriti projekteeritud trassi alla jäävat pinnase geoloogiat. Geoloogia uuringul võeti lähtealuseks RB trassi lõik DS1-DPS2 Alu-Mälivere. Analüüsi järgnevas lõigus uuris autor muldkeha konstruktsiooni vajalikke paksusi, lähtudes liivpinnase keskmisest külmumissügavusest, pinnasegeoloogiast ja elastsusmoodulist. Olemasolevat pinnasegeoloogiat arvesse võttes saame konstruktsiooni kihtide valikuga väga edukalt varieeruda, kui seada kriteeriumiteks, et vajalik elastsusmoodul on saavutatud ja konstruktsiooni kogupaksus vastab keskmisele liivpinnase külmumissügavusele, võttes arvesse objektile lähima ilmajaama andmeid. Pinnase geoloogiast tuleneb, et trassil on mitmeid lõike, kus muldkeha tuleks hakata rajama mittekülmakerkelisele pinnasele ja seda materjali ei ole otstarbekas väljakaevamise teel mehhaaniliselt kobestada. Lähtudes muldkeha

analüüsist leidsime, et tegelikult on raudtee teenindamiseks vajalik 1,30 meetri paksune konstruktsioon.

Töö eesmärgi järgi leida võimalikult kulutõhusaid alternatiive, on autor välja pakkunud võimalikke alternatiivseid lahendusi, mis tuginevad tehtud analüüsile:

- muldkeha külmakaitsekihi vähendamine;
- ristlõige kaljupinnase süvendis;
- ristlõige süvendis isolatsiooniplaati kasutades;
- turba mass-stabiliseerimine (Hagudi raba).

Antud alternatiivide kasutusele võtmisega saame olulisel määral vähendada väljakaeve mahtu. Autor on arvamisel, et valdavalt on väljakaevatav materjal taaskasutatav. Reaalsusest lähtudes on pinnased tavaliselt kahte klassi klassifitseeritud: kerge kaevatus ja raske kaevatus. Kerge kaevatusega materjale, milleks on pehmemad savi ja sõmerad pinnased, saaksime kasutada muldkeha täitekihi tuumas kuni 1 meeter pinnast allpool. Raskesti kaevatavaid materjale, milleks on nt murenenud kalju, saaksime kasutada muldkeha täitekihi ülemises osas.

SUMMARY

When preparing the work, the author studied several European, Finnish, and Estonian standards and guidelines, the purpose of which is to guide engineers in building high-quality infrastructure track beds that can last for decades or even centuries. When ensuring the long-term quality of the track bed, climatic and geological conditions and the loads that will affect the track bed must be taken into account.

When formulating the Master's thesis, the main goals established for the work were to analyze the railway embankment provided for in the Rail Baltica project, the possibility of reusing the excavated materials, and based on the analysis, to find economically cost-effective alternatives.

In order to reach the goal of the work, the layers of the cross-section construction of the Rail Baltica railway, their necessary thicknesses, compaction, and load-bearing capacity requirements, and requirements for materials, which mainly stem from the standards of the international railway organization UIC, have first been studied.

Then, the track beds used by the Estonian Railways and the Finnish Railways and their requirements, which apply to railways with a gauge of 1520 mm, are briefly described. Finland's requirements, which derive mainly from the Rato and InfraRYL guidelines, have been reflected in the thesis because Finland is similar to Estonia in terms of climate, and in Finland, the dimensioning of embankments is based on calculation rather than the values of prescribed standards.

The main part of the work focuses on the analysis of the track bed, where the geology of the soil under the designed route has been studied first. The geological survey is based on the RB route section DS1-DPS2 Alu-Mälivere. In the following section of the analysis, the author has studied the necessary thicknesses of the track bed structure based on the average freezing depth of the sandy soil, soil geology, and modulus of elasticity. Taking into account the existing soil geology, we can vary very successfully in the selection of the layers of the structure if we set the criteria that the necessary modulus of elasticity has been achieved and the total thickness of the structure corresponds to the average freezing depth of the sandy soil, taking into account the data of the weather station closest to the object. It follows from the geology of the soil that the route has several sections where the track bed should be built on non-frozen soil, and it is not practical to mechanically loosen this material by excavation. Based on

the analysis of the track bed, we found that a total structure of 1.30 meters thick is actually necessary to serve the railway.

According to the aim of the work to find the most cost-effective alternatives, the author has proposed possible alternative solutions based on the analysis:

- reduction of the frost protection layer of the track bed;
- cross-section in the bedrock pit;
- cross-section in the pit using an insulation board;
- peat mass stabilization (Hagudi bog).

By adopting these alternatives, we can significantly reduce the volume of excavation. The author is of the opinion that the excavated material is mostly recyclable. Based on reality, soils are usually classified into two classes: easy excavation and difficult excavation. Materials with easy excavation, such as softer clays and gritty soils, can be used in the core of the fill layer of the track bed up to 1 meter below the surface. Materials that are difficult to excavate, such as crumbled rock, could be used in the upper part of the fill layer of the track bed.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Intergovernmental Agreement,” Tallinn, 2017.
- [2] „rbestonia.ee,” Rail Baltica Estonia OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rbestonia.ee/>. [Kasutatud märts 2024].
- [3] R. Baltica, „Design guidelines: Railway substructure, Part 1 embankments and earthworks.,” 2021.
- [4] „RBDTD-EE-DS1-DPS2_IDO_ZZZZ-ZZ_ZZZZ_RP_GEO-AA_MD_00003 Põhiprojekt DPS2 (Alu-Mälivere) alalõigu geotehnilise projekteerimise aruanne (GDR) pinnasetööd- muldkehad ja süvendid”, Rail Baltica OÜ, 2023.
- [5] UIC, „UIC Code 719 R Earthwork and track bed for railway lines”, UIC-International Union of Railways, 2008.
- [6] „EVS-EN 16907-1 Mullatööd osa 1: Põhimõtted ja üldeeskiri”, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2018.
- [7] „02_RTK_Raudtee Tehniline kirjeldus Osa 2: Mullatööd”, Rail Baltic OÜ, 2024.
- [8] A. Kendra, „T-Konsult,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://t-konsult.ee/artiklid/rb-muldkeha-ehitamise-kvaliteedikontroll/>. [Kasutatud aprill 2024].
- [9] H. Pajus, „Meetod täitematerjali vertikaal- ja horisontaalsuunalise filtratsioonimooduli määramiseks püsiva rõhuga permeameetriga”, Tallinn: Magistritöö, 2020.
- [10] „Matest,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.matest.com/en/product/s197n1-vibrating-compaction-hammer>. [Kasutatud aprill 2024].
- [11] „Troxler construction testing equipment,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://troxlerlabs.com/wp-content/uploads/2022/10/3430-3440plus-20Aug2019.pdf>. [Kasutatud aprill 2024].
- [12] „Englo, Inspector -5 Pinnase Elastsusmooduli Tester,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.englo.eu/et/products-estonian/inspector-5>. [Kasutatud aprill 2024].
- [13] „3032 Light Weight Deflectometer,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://dynatest.com/wp-content/uploads/2022/09/LWD-8-pages-brochure-A4.pdf>. [Kasutatud aprill 2024].
- [14] I. L. Galina Gnatjuk, „Kaarepere-Tabivere Raudteelõigu õgvendamine. Põhiprojekt,” AS Eesti Raudtee, Tallinn, 2023.
- [15] A. Kendra, „MÕTTEID SELETUSKIRJADEST,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://t-konsult.ee/artiklid/motteid-seletuskirjadest/>. [Kasutatud aprill 2024].

- [16] „*СНИП 32-01-95 Raudtee rööpmelaiusega 1520 mm ehitusnormid ja projekteerimine*“, Moskva: Venemaa ehitusministeerium, 1995.
- [17] S. P. AS, „Tapa jaama sorteerimispargi rekonstrueerimine II. Tööprojekt“, 2023.
- [18] R. Renter, „Liiva ja killustiku segude elastsusmoodulid“, Tallinn, 2019.
- [19] „Ratatehnised ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne“, Helsinki: Liikennevirasto, 2018.
- [20] „InfraRYL Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset : maa-, pohja- ja kalliorakenteet“, Helsinki: Rakennustieto Oy, 2018.
- [21] S. Talpas-Taltsepp, „Eestis kasutusel oleva katendiarvutus meetodika probleemid ning alternatiivse rakenduse väljatöötamine kasutades Soome meetodikat“, Tallinn, 2024.
- [22] „Tierakenteen suunnittelu“, Helsinki: Liikennevirasto, 2018.
- [23] „RBDTD-EE-DS1-DPS2_IDO_RW1200-ZZ_ZZZZ_RP_RW-TR_MD_00001_004 Põhiprojekt DPS2 Alu-Mälivere (0+000 - 14+074,67) Raudtee. Seletuskiri“, Rail Baltica OÜ, 2023.
- [24] „RBDTD-EE-DS1-DPS2_IDO_ZZZZ-ZZ-ZZZZ_RP_EW-AA_MD_00001_004 Põhiprojekt DPS2 Alu-Mälivere pinnasetööde aruanne“, Rail Baltica OÜ, 2023.
- [25] IRS-70719:2020,Ed1: Railway Application - Track & Structure - "Earthworks and track bed layers for railway lines" - Design and construction principles, Paris: International Union of Railways (UIC), 2020.
- [26] „RBDTD-EE-DS1-DPS2_IDO_ZZZZ-ZZ_ZZZZ_RP_GEO-AA_MD_00002 Põhiprojekt DPS2 Alu-Mälivere alalõigu pinnaseuuringu aruanne“, Rail Baltica OÜ, 2023.
- [27] R. M. T. M. I. T. V. J. V. O. V. V. K. L. T. P. O. P. V. H. Jaan Rohusaar, „*Ehituskonstruktori käsiraamat*“, Tallinn: Ehitame-kirjastus, 2010.
- [28] „Kandevõime rehkendamise programm (KRP),“ T-Konsult OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://t-konsult.ee/rd/>. [Kasutatud aprill 2024].
- [29] T. M. H. J. N. L. M. A. Juha Forsman, „Applications of Mass Stabilization at Baltic Sea Region“, Ramboll Finland OY, 2016.
- [30] R. E. AS, „Pinnaste mass-stabiliseerimisvõimaluste uuring. Lõpuaruanne,“ Maanteeamet, Tallinn, 2007.