



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**RAUDTEE PEALISEHITUSE STABIILSUSE TAGAMINE  
JA RÖÖPMELAIUS 1435 VS 1520 EUROOPAS**

**PROVIDING RAILWAY SUPERSTRUCTURE STABILITY  
AND GAUGE 1435 VS 1520 IN EUROPE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Indrek Sonberg

Üliõpilaskood 183264

Juhendaja: Arto Lille

# 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.

29. mai 2020

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 TEGEMISEKS

Mina, Indrek Sonberg, sünd. 18.11.1993

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Raudtee pealisehituse stabiilsuse tagamine ja rööpmelaiuse 1435 vs 1520 Euroopas,** 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.

---

\_\_\_\_\_ (allkiri)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Indrek Sonberg, 183264EAXM

Õppekava, peeriala: EAXM 15/15, Hooned ja rajatised

Juhendaja(d): Arto Lille, õppejõud, +372 5154421

Konsultant: Jaan Sonberg, juhatuse liige

OÜ Polarwerk, +372 53484966, jaan@polarwerk.ee

### Lõputöö teema:

*„Raudtee pealisehituse stabiilsuse tagamine ja rööpmelaius 1435 vs 1520 Euroopas“*

*„Providing railway superstructure stability and gauge 1435 vs 1520 in Europe“*

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vaadelda hetkest olukorda raudtee valdkonnas
2. Anda tagasisidet stabiilsuse valdkonnas
3. Võrrelda raudtee rööpmelaiusi Euroopas

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	15.01.2020
2.	Sisu kirjutamine ning täiendus	15.03.2020
3.	Lõputöö vormistuse ning sisu viimistlemine ja kontroll	04.05.2020

**Töö keel:** Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 29. mai 2020a

**Üliõpilane:** Indrek Sonberg..... ".....".....2020a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Arto Lille ..... ".....".....2020a  
/allkiri/

**Konsultant:** Jaan Sonberg ..... ".....".....2020a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....2020a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. ÜLEVAADE .....	9
2. STABIILSUS .....	11
3. LIIPRID .....	12
3.1 Puitliiprid .....	12
3.2 Betoonliiprid.....	13
3.3 Plast- ja polümeerliiprid.....	15
3.4 Terasliiprid.....	17
4. LIIPRITE VALIK.....	20
4.1 Ressursid.....	20
4.2 Sõltuvus mürast .....	20
5. LIIPRITE KINNITUSED .....	22
5.1 Puitliiprite kinnitused ja tugevus .....	22
5.2 Terasliiprite kinnitused .....	24
5.3 Betoonliiprite kinnitused .....	25
6. ALTERNATIIVSED MEETODID .....	29
6.1 Ballastiga tee .....	30
6.2 Muud lahendused.....	30
7. LIIPRID PÖÖRMEI, SILLAL JA VIADUKTII .....	32
7.1 Erilahendused .....	33
8. RÖÖPMELAIUS .....	35
8.1 Eelised standardsel rööpmelaiusel.....	36
8.2 Erinevate rööpmelaiuste ühenduslahendused .....	36
8.3 Rööpmelaius kurvis.....	37
8.4 Rööpmelaiuse sõltuvus kaubandusest.....	38
8.5 Rööpa sõltuvus rööpmelaiusest.....	39
8.6 Ronggi sõltuvus rööpmelaiusest .....	40

9. ALUSEHITUS .....	42
9.1 Aluse stabiilsus.....	42
9.2 Geovõrgu mõju .....	42
10. RAUDTEE ÜLEMINEKUD RAJATISTELE .....	47
11. MUU STABIILSUS .....	50
11.1 Ehitustehnoloogia mõju .....	50
KOKKUVÕTE .....	51
SUMMARY .....	53
KASUTATUD KIRJANDUSTE LOETELU .....	55

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema sai valitud koos juhendaja Arto Lillega. Teema raudtee suund võeti magistritöö autori eelnevale kogemusele ja huvile.

Konsulterimine ja suhtlus toimus nii juhendaja kui ka teiste OÜ Polarwerk liikmetega.

Magistritöö eesmärk oli vaadelda Eesti raudtee infrastruktuuri pealisehituse stabiilsust ja rööpmelaiuse valiku sõltuvust. Välja sai toodud ettepanekud ja võrdlused materjali valikul ning kasutamisel. Teema läbib ka erinevate materjalide võimalusi uusehitiste põhjal. Aluseks on võetud ka Rail Baltica rajamise tehnoloogia ning ehitusdokumendid.

Võtmesõnad: raudtee, rööpmelaius, Rail Baltic, magistritöö

## **SISSEJUHATUS**

Raudteetrassi paiknemine Eestis on piisavalt hea. Ühendused tähtsamate linnade vahel on tagatud, mis omakorda soosib head liikumisvabadust. Tagamaks head ühendust on vaja teha pidevaid uuendusi ja remonte raudtee infrastruktuuril. Uute raudteede ehitamisel ning remontimisel on valikus erinevaid tehnoloogiaid, kui ka erinevaid materjale, garanteerimaks raudtee stabiilsuse ning püsivuse. See, milline materjal vastavasse lööku valitakse, on hetkel üldiselt ühekülgne. Lähtutakse tehnoloogiate ja materjalide valikul eelnevast kogemusest. Uute materjalide ning tehnoloogiate valikul jääb peamiseks lõppotsustajaks eelarve, mistõttu peab olema materjalide valik põhjalikult põhjendatud. Antud töös tuuakse ka välja erinevaid võimalusi pealisehituse valikul raudtee ehitamisel. Iga valik mängib rolli raudtee stabiilsuse saavutamisel. Välja on toodud ka alternatiivsed võimalused materjalide ja tehnoloogia puhul, mida seni Eestis kasutatud laialdaselt pole. Teema läbib ka rööpmelaiust, ning kuidas erinev rööpmelaius aitab kaasa tee stabiilsuse ning püsivuse tagamisele. Välja on toodud ka Eesti raudtee peamised probleemid ning nende põhjused. Analüüs käib nii materjalide valiku kohta Eestis kui ka välismaal, ning ka antud valikute tagajärjed- olgu nendeks nii head kui ka vead.

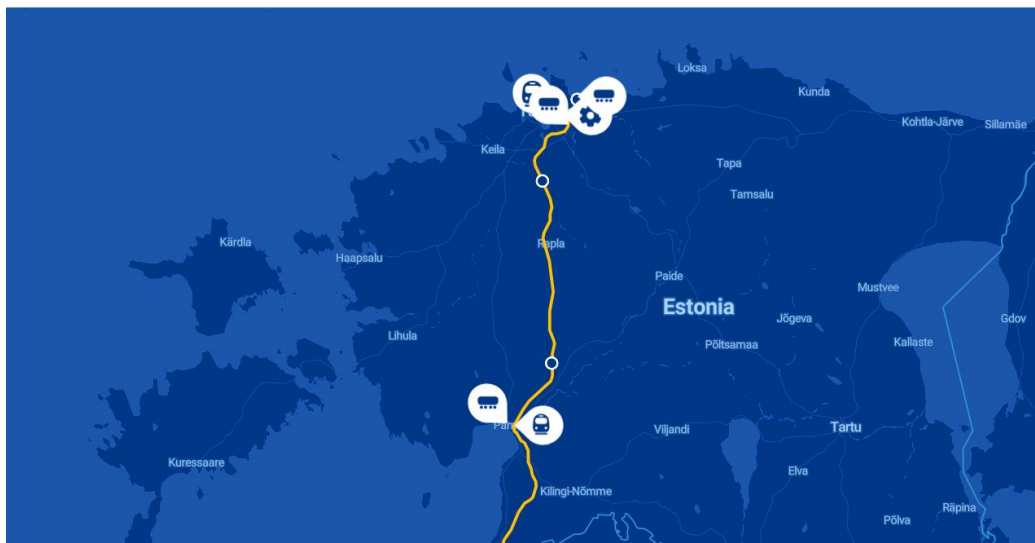


# 1.ÜLEVAADE

Raudtee uuendusliku tähelepanu määrab Rail Balticu trassi läbimine läbi Eesti. Seetõttu on ka suurem tähelepanu kasutatavate materjalide ning tehnoloogiate puhul. Rail Balticu dokumentatsioonis on toodud välja materjalidele vajaminevad nõudmised ja muud tähtsad omadused. See omakorda tähendab, et uuenduslik valikuvabadus antud juhul puudub otseselt. Samas võimalused alternatiivide valikuks olemas. Rail Balticu puhul on võetud rööpmelaiuseks 1435 mm, lähtudes Euroopas kasutatavatest normidest. Üldandmed trassi ehitamiseks on määratud projektis.

Tähtsamad andmed Rail Baltica puhul [1]:

- Eestit läbib 213 km teed (vt Joonis 1),
- Reisirongi puhul on kiirus 240 km/h,
- Kaubarongi kiirus on 120 km/h,
- Teljekoormus 22,5 tonni,
- Liikluse reguleerija – ERTMS L2,
- Kaubaveo puhul on rongi kogupikkus 740 m.



Joonis 1 . Rail Balticu paiknemine Eestis [2]

Rail Balticu puhul on tegemist teemaga, kus ühelt poolt on pooltolijad ja teiselt poolt selle keelajad. Igal ühel on oma arvamus. Palju on ka vastuolu trassi paiknemine, kuna trass läheb läbi eramaade, mida riik seejärel peab sunniviisiliselt erastama. Selle teemadel on ka tehtud uuringuid ning tasuvusnäitajaid. Ühe ülevaatliku kaardi tegi ERR, mis näitab ühe asjaolu erinevate poolte mõttekäiku.

Kaart näitas, et vastuolijad rõhuvad eelkõige uuringute ebakompetentsuse, vajalikkuse ja tasuvuse teemal. Keskenduti ka antud teemadele: keskkonnasõbralikkus, müra, maakasutus, kaubavedu, maade võõrandamine. [3] Igal ühel on argumendid olemas enda valiku põhjendamiseks.

Autori arvates on Rail Baltica eelkõige eelis Eesti riigile. Hea ühendus Euroopaga suurendaks kaubatranspordi liikumist läbi Eesti. Ning seejärel Tallinna – Helsingi tunneli ehitamine oleks viimistlus täiuslikust ühendusest läbi Eesti. Siis oleks Eestil palju ehitustööd, mis tähendab ka uusi töökohti ning majanduskasvu eeldatavasti. Tasuvuse saavutamiseks peab olema teel pidevalt liiklus, tagades ohutu liiklemise ning ehitise stabiilsuse. Antud magistritöös vaadeldakse pigem pealisehituse stabiilsuse teemat, mitte trassi paiknemise asukohta. Pealisehituse määrab eelkõige eelarve ja kogemus. Peamisteks komponentideks pealisehituse puhul on liiprid, rööpad, kinnitused ning ballastikiht. Nendest sõltub raudtee püsivus ning stabiilsus.

## 2. STABIILSUS

Tagamaks kauakestev raudtee eluiga, peab konstruktsioon olema stabiilne. Stabiilsust mõjutab raudtee puhul enam liiprid, rööpad, kinnitused, ballast ning alusehitus. Liiprite, rööbaste ning nende kinnituste puhul, on võimalused konstruktsiooni parendamiseks suured, kuna nende pakkujaid ning tootjaid on palju. Uute toodete puhul on tegemist eelneva parendamisega, mis tähendab, et pidevalt toimub uuendamine raudtee valdkonnas. Parima valiku saab teha arvestades ka teisi asjaolusid, näiteks kliimat, asukohta, koormust ning liiklust. Valik sõltub ka tehnoloogiast ja eelnevast kogemusest. Peale materjalide mõjutab stabiilust ka alusehitus ning ehitustehnoloogia protsess. Alusehituse puhul on tavaliselt tagatud tee püsimine kasutades geovõrku. Tänu tehnoloogia arenemisele on olemas ka uudsemad geovõrgud, millel on paremad tugevusomadused. Millega tagatakse parem stabiilsus ning killustiku püsivus. Stabiilsust mõjutab ka ehitusprotsess ise. Väära ehitusprotsessi tulemusel võib hiljem kannatab konstruktsioon, ning kulud on suuremad kui tulud. Selle parendamiseks eeldatakse, et ehitajal on vastav pädevus ning raudteealased teadmised. Parema kvaliteedi tagamiseks on vajalik sõltumatu järelevalve kohalolu ehitusprotsessis. Järgnevalt on ka välja toodud lähemalt eelpool mainitud stabiilsust mõjutavad tegurid detailsemalt, koos selgituste ning näidetega.

### 3. LIIPRID

Liiprite valik Eestis on hetkel piiritletud. Seda päsib liiprite kodumaine tootmine, mis piirdub enamjaolt ühega. Eestis on kasutusel peamiselt betoon- ja puitliiprid. Alternatiivideks oleks ka polümeer- ja terasliiprid, mis Eestis hetkel kasutusel pole. Järgnevalt on välja toodud iga liipritüübi iseloomustus ning eripärad.

#### 3.1 Puitliiprid

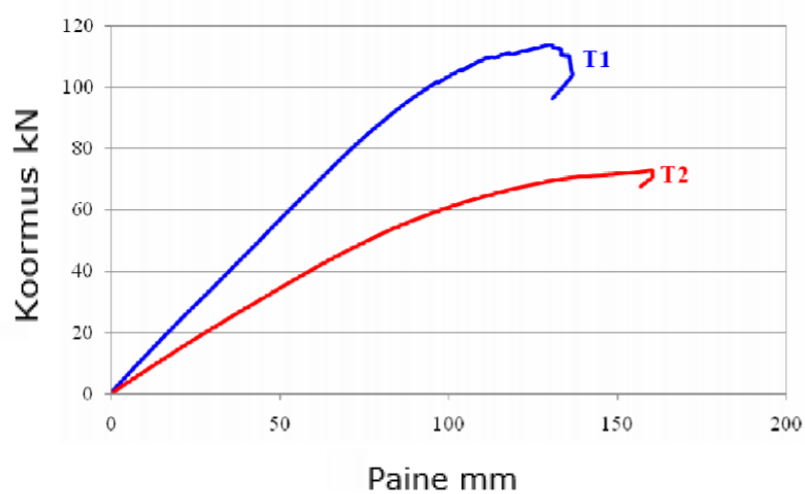
Puitliiprite kasutamine Eestis on ikka veel jõus. Enamjaolt on need kasutusel olemasolevates teedes ning jaamades. Sildadel, viaduktidel ning pöörangutel on kasutusel prussid. Pruss on sarnane puitliiprile, erinedes materjali mõõtmete poolest. Pöörangutel kasutatakse neid eelkõige kerge töödeldavuse, müra vastuvõtmise ja parema koormuse ülekandmiseks ballastikihti. Sildade puhul on eelkõige kasutusel prussid, kuna tegemist on, võrreldes betooniga, kerge materjaliga, millega saab ehitada kergema konstruktsiooni. Puitliipritest kõige enam vastupidavam on tammepuidu liiper. Selle elueaks on ca kaheksa kuni kakskümmend viis aastat. Puitliipri eluea pikendamiseks tuleb materjali immutada, mis omakorda pole keskkonnasõbralik. Miinuseks on materjali hilisem utiliseerimine. Tegu pole materjaliga, mida saab hiljem lihtsalt taaskasutusse võtta, vaid materjali tuleb käidelda pädeva ettevõtte poolt, kellel on liipri utiliseerimise luba.

Puitliiper on tavaliselt valmistatud männist, kuusest kui ka kasest. Ristlõike järgi jaguneb liiper kandituks ja kantimata. Kanditud tüübi puhul on kõik neli serva kanditud. Teise tüübi puhul ainult ülemised kaks serva. Puitliipri pikkus on tavaliselt 2750 mm. Kõrgus ja laius sõltuvad eelkõige liipri tüübist. Puitliipri peamiseks puuduseks on tema lühike eluiga. Positiivseks omaduseks on valmistamise lihtsus, materjali elastsus ning hea elektriisolatsiooni omadus. [4]

Uuring, mis tehti Austraalias puitliiprite kohta, et disainida omakorda selle näitel süsinikkiud liipreid, tõi välja liipri elastsusmooduli ja jäikuse suuruse. Uuringus võrreldi puittala painet nelja punkti koormuse asetamisel. Talade üleüldine pikkus oli ca 3,2 m - 4,1 m, ning testimis sille 2,7 m - 3,6 m. Uuringus selgus, et kahe samasuguse tala testimisel nende erinevus on kõikuv. Testitud tala lõige oli enamjaolt sama (vt Joonis 2). Samas tala number 1 vastuvõetav koormus on suurem ja paine väiksem, kui talal number 2 (vt Joonis 3). Tala number kahe puhul on näha, et vastuvõetud koormus on väiksem ja läbipaine suurem. Erinevus painde puhul on suur. [5]



Joonis 2. Testitud kahe erineva liipri otsavaade [5]



Joonis 3. Talade koormuse ja painde võrdlus [5]

Uuringust selgus veel, et kahe erineva liipri puhul on elastsusmoodul alatest 9520 MPa kuni 27600 MPa. See tähendab, et kõik liiprid pole samasuguse elastsusmooduliga ja elastsusmooduli määramisel ei saa arvestada ainult liipri pikkuse ja tüübiga, vaid tuleb arvesse võtta ka muid asjaolusid. Selle jaoks on vaja teha rohkem teste ja uuringuid. [5]

Kokkuvõttes on puidu puhul tegemist materjaliga, mille tugevuse määramine ei ole ühtselt määratav. Võimalik on sorteerida erinevaid puidu tüüpe, teades antud tüübi eeldatavat eluiga. Täpsema tugevuse saamiseks on eelistatud materjalid mille tugevust saab määrata kindlamalt, nagu näiteks betoon.

### 3.2 Betoonliiprid

Enamjaolt uusehitiste valiku puhul piirduakse betoonliipritega, mida valmistatakse RakveresAS Swetrak-i poolt. Seda eelkõige lähima tootja asukoha poolest. Betoonliiprid on hetkel Eestis laialdaselt kasutusel. Nende eeliseks on lihtsus ja hind. Lihtne kinnitada rööpa külge tänu

eelnevalt tehases monteeritud kinnitusdetailidele. Betooni osutub valituks tänu odavale hinnale. Võrreldes tammeliipriiga on betoonliipri maksumus kaks korda odavam.

Betoonliiprite eluiga jääb enam-vähem kolmekümne kuni kuuekümmne aasta vahemikku. Väidetavalt tekitab betoonliiprite tootmine, paigaldamine ja eluiga kasvuhoonegaase kõigest kuuendiku, võrreldes näiteks puitliipritega tee heitekogusega. Uurimustöös, mille koostas Crawford, tuli välja, et ühe kilomeetri tee ehitamisel, arvestades tööeaks sada aastat, on betoonliiprite heitegaaside kogus, võrreldes puitliiprite puhul, kõigest 17% puitliiprite toodetavast kogusest. [6]. Mis tähendab, et keskkonnasõbralikkuse mõttes on betoonliiper parem kui puitliiper. Keskkonnasõbralikkus ja kasvuhoonegaasid on tänapäeval tähtis teema kliimasoojenemise tõttu. Teisalt on betoonil eeliseid kui ka miinuseid, mida tuleb arvesse võtta antud materjali valikul.

Betoonliipri eelised:

- Tootmiseks vajalikud ressursid Eestis olemas,
- Lihtne monteerimise protsess,
- Lihtsustatud kinnitusmeetod rööpa külge,
- Hilisem taaskasutus,
- Eluiga kõrge
- Raske materjal – väheneb raudtee väljaviske oht.

Betoonliipri miinused:

- Hea elektrijuhtivus segab signaale,
- Vahetamine üksikult on keeruline,
- Kergesti võib puruneda kui ballast on ebaühtlane,
- Turul on tootjaid vähe Eestis.

Betooni puhul on tegemist materjaliga, millel on pikk kasutusajalugu. Tegemist on hoolikalt konstrueeritud materjaliga, mida testitakse järjepidevalt. Üheks testiks kõveras raudtee konstruktsiooni püsivuse tagamine.

Selleks, et parendada teed kõveras, võib kasutada betoonliipreid mille alus on sakiline (vt Joonis 4). Sakkide sisse läheb killustik ja see omakorda tagab tee ühtse paigalseisu. Selline liiper kõveras aitab tee stabiilsusele kaasa ca 67 %. Kaasa aitab ka raudtee ballasti õla suurendamine. [7] Eestis on kurvide puhul kasutusel ballasti õla suurendamine, kus lisatakse tavapärasele laiusele otsa 10 cm killustikku. Teine võimalus oleks ka liiprite pikendamine, mille tulemuseks on massiivsem struktuur, hoides teed paremini paigal.



Joonis 4. Sakiline liiper [7]

Test tehti ka pikkuse sõltuvuse kohta, kus uuriti kuidas mõjutab liipri pikendamine materjali struktuuri. Testi tulemusel selgus seos liipri pikkuse ja vastuvõetava teljekoormuse vahel. Selgus, et hetkel kasutatav liiper pikkusega 2,7 m on kõige efektiivsem, võttes vastu teljekoormust kuni 285 kN. Üllatavalt, alates pikkusest 2,5 m, on vastuvõetav koormus väiksem. Samuti ka kui pikkus läks üle 2,7 m, teljekoormuse vastuvõtlikkus vähenes. Testi käigus selgus ka, et praod rööpa all ning liipri peal, hakkasid tekkima rattakoormusel ca 300 - 359 kN-it. See tähendab, et teoreetiliselt on varu koormuse vastuvõtmisel olemas. [8]

Autori arvates võiks antud liiprit kasutada ka Eestis. Enim piirkondades, kus eelnevalt on toimunud raudtee nihkumine kliima mõjul. Kasutust leiaks nii kõveras, sildade lähedal ning vahetult enne perrooni, kus tee võib nihkuda rööpa temperatuuri muutuste tõttu. Eestis antud liiprite kasutuskogemuse puudumise tõttu, vajaks antud lahendus katsetusi siinses piirkonnas.

### **3.3 Plast- ja polümeerliiprid**

Eestis polümeerliipreid (vt Joonis 5) pole hetkel otseselt kasutusel, kuigi turul nõudlust oleks taaskasutatud materjalide tootmisel. Nõudlus taaskasutatud materjalide suunal, pärsib järjest enam alternatiivsete materjalide tootmist. Üheks neist on polümeeri ja plastiku kasutamine raudtee ehituses. Polümeeri puhul on positiivseid kui ka negatiivseid omadusi. Polümeermaterjali eeliseks on hilisem taaskasutus. Liipri kõlbmatuse puhul läheb liiper taaskasutusse. Antud liiprid on mõnes riigis juba kasutusel. Näiteks võeti plastikliiprid kasutusele testimiseks aastal 2016 Rootsis (linnas Kalmar), mille ilmastik on võrreldes Eestiga analoogne. Kahjuks pole tulemused testidest kättesaadavad [9]. Selliseid liipreid on tootja (Lankhorst) sõnul kasutatud mitmetes projektides Hollandi, Belgia, Prantsusmaa, Austria, Saksamaa, Rootsi, Ühendkuningriigi, Gaboni, Malaisia, Mehhiko, Venemaa ning Austraalia ja Uus-Meremaa piirkonnas [10].



Joonis 5. Lankhorst polümeermaterjalist liiprid [11]

Arvestuslikult on plasti, ka polümeeri, materjali eluiga kuskil viiskümmend aastat. Pärast eluea saabumist vahetatakse liiprid välja uute vastu. Antud liiprid sobivad eelkõige mürarikas piirkonnas, mürataseme vähendamiseks. Eelkõige sobiksid antud liiprid Eestis puitliiprite vastu vahetada järk-järgult. Tavaliselt puitliiprid kestavad ca 25 aastat, plast seetõttu peab vastu kaks korda rohkem kui puit. Üheks eeliseks on veel liipri konstruktsiooni muutmine. Mille tulemusena on võimalik disainida erineva kujuga liipreid kitsastesse kohtadesse. [12]

Lankhorsti liipri kõrvalt on ka selline tootja nagu Sicut. Välimus sarnaneb puitliiprile (vt Joonis 6). Antud liipril on pantendeeritud muster, millega külgtakistus suureneb ca 4,5 kN – 11 kN, ületades sellega puitliiprit. Tänu mustriks on tagatud parem liipri vastasmõju ballasti suhtes. [13] Antud liiprit on ka hetkel plaanis kasutada Paldiskis. Raudtee projektijuhi sõnul on hetkel Paldiski raudtee remondil plaanis kasutada komposiitliipreid ca 170 tükki. Projektijuhi sõnul oli plaanis kasutada antud liipreid kõveras, mille raadius on 200 m, sest ette oli nähtud rööpmelaius 1535 mm, mida betoonliipriga saavutada ei ole võimalik. Lõpuks projekti muudeti kõveras, mistõttu oli võimalik kasutada hoopis betoonliipreid. Seejärel projektijuhi sõnul otsustati, et komposiitliiprid paigaldatakse pöörangu ülemineku lõiku, üleminekurööbaste alla.

Eelised Sicut liipritel [14]:

- Väga kõrge eluiga (+50 aastat),
- Vastupidav niiskusele ja putukatele,
- Käsitlemine sarnaneb puitliiprile,
- Vähendab müra, vibratsiooni,
- Tõestatud raudteel alates aastast 1996,
- Edukalt paigaldatud 16-nes riigis,
- Vähendatud elueakestel toimuvaid hooldusi.





Joonis 6. Sicut liiper [13]

Diplomeeritud raudteeinseneri sõnul, kellel on kogemus selles valdkonnas, on plastikliiprite kasutamine Eesti jäänud toppama kõrge hinna tõttu, ning kohati ka negatiivsete omaduste tagajärjel. Tema sõnul on kogemus näidanud, et üheks negatiivseks asjaoluks plastikliiprite puhul on olnud materjali sõltuvus temperatuurist, mistõttu on rööpmelaiuse tagamine küsimärgi all. Valik plastikliipritele on tasuv alates hetkest, kui plastikliipri hind langeb puitliipri hinnast madalamale. Keskkonnasäästlikuse poolelt on betoon parim materjal, võrreldes plastikliipritega, kuna betoon pole keskkonnale ohtlik materjal, mida on hiljem lihtne utiliseerida ning taaskasutada.

Autori arvates võiks Eestis selliseid liipreid kasutada ka sildadel, elamurajoonide lähedal, raudteejaamades kui ka kohtades, kus hetkel on paigaldatud puitliiprid. Polümeerliiprid vajavad testimist Eesti kliimas enne laialdast kasutusse võtmist, saades rohkem tagasisidet materjali sõltuvust põhjamaa kliima kõikumise valdkonnas. Tulemusi saab ka näha Paldiskisse paigaldatavate liiprite näol aja möödumisel.

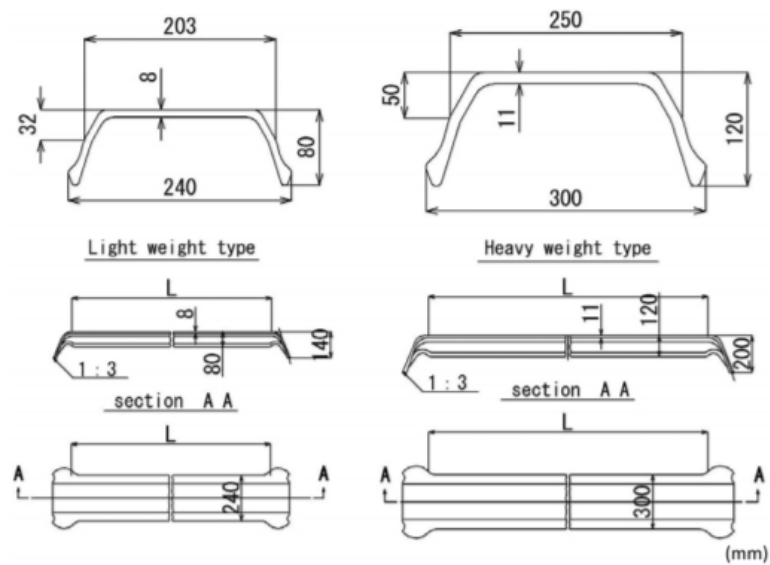
### **3.4 Terasliiprid**

Terasliiprite laialdane kasutus Eestis puudub. Terasliiper on kaudselt kasutusel ainult VAE pöörangutes, kus pöörangu ajam on terasliipril. Sellega piirdub hetkel terasliipri kasutamine Eestis. Kasutust pärsib ka materjali omadused. Terasliipri puhul on tegu materjaliga, mis korrodeerub. Selle põhjusel vajab pidevat hooldust ja häid ilmastikuolusid. Seetõttu sobiksid sellised liiprid eelkõige sooja ning kuiva piirkonda. Eesti kõikuva kliima tõttu pole terasliiprite valik põhjendatud otseselt.

Terasliipri eeliseks on selle raskus ja tugevus. Mida kiiremat rongi kiirust on vaja, seda parem peab olema pealisehitis. Terasel korral oleks püsivus tagatud. Kuna teraseväärtus on kõrge ning

pole nii lihtsasti saadaval, kui näiteks puit või betoon siis pole väga mõtet kasutada. Kulud oleks suured. Suureks eeliseks on ka see, et metallil on ka pärast kasutust väärtus juures. Tagades lihtsa edasimüügi ja hilisema taaskasutuse. [15]

Jaapani ettevõtte on alustanud raudliiprite tootmisega alles aastast 1982. Nende tootmises on ka liiprid, mis on metalli ning betooni segu (vt Joonis 8). Rööpaalune osa on pingete vähendamiseks täidetud osaliselt betooniga. Kaaluks on antud juhul 277 kilogrammi. Terasliiper aga kaalub 93 kilogrammi (vt Joonis 7).



Joonis 7. Terasliipri mõõdud [16]



Joonis 8. Koa terasliiper [16]

Terasliipri eeliseks on vähese ballasti vajadus, kerge puhastada ning transpordi lihtsus. Mõlema liipri korral on tegemist kõrgelt efektiivse konstruktsiooniga. Hübriid- ning terasliipri võrdluseks tehti ka test, võrdlemaks ajalist kulu paigaldusel. Aluseks testimisel oli võetud rööpmevahe 1067 mm. Testimisel selgus, et liiprite erinevus tuleneb paigaldusaja juurest. Test näitas, et parim nendest on selle puhul tavaline terasliiper. Hübriidliipri eeliseks teisalt on väiksem liipriepüür. Lõppkokkuvõttes kandes ehitamisele kuluv aeg üle tee pikkusele, on tulemus ajaliselt sama.

[16]

## 4. LIIPRITE VALIK

Liiprite valik sõltub erinevatest asjaoludest. Mõjutajaks on piirkonna materjalide valikuvõimalused, rahalised piirangud, ressursid ja ka muud rolli mängivad asjaolud.

Tabel 1. Liiprite erinevused valikul [17]

Omadused	Liipri tüüp			
	Lehtpuu	Okaspuu	Betoon	Teras
Töödeldavus	Lihtne	Lihtne	Keeruline	Keeruline
Käsitlemine ning paigaldus	Lihtne	Lihtne	Keeruline	Keeruline
Vastupidavus	Madal	Madal	Kõrge	Madal
Hooldus	Kõrge	Kõrge	Madal	Kõrge
Vahetamine	Lihtne	Lihtne	Keeruline	Keeruline
Maksumus	Kõrge	Madal	Väga kõrge <sup>1</sup>	Väga kõrge
Kinnitused	Hea	Kehv	Väga kehv	Kehv
Elektrijuhtivus	Madal	Madal	Kõrge	Väga kõrge
Kaal (kg)	60-70	60-70	285	70-80
Kasutusiga (aastat)	20-30	20	60	50

Tabelis on toodud välja liiprite erinevad omadused võrdluseks (vt. Tabel 1). Igale poole ei sobi ühtne liipri tüüp. Valik tehakse tavaliselt mitmest variandist ja vastavalt ressursside võimalustest.

### 4.1 Ressursid

Eestis puit-, polümeer- ja terasliiprite tootmist pole. Betoonliiprid aga toodetakse Eestis. Betoonliipri tootja asukoht on üheks suurimaks valiku mõjutajaks. Ehitaja eeliseks on liiprite saamine kiiresti, ilma suurte transpordikuludega. Tavaliselt puitliiprid ostetakse sisse Venemaalt, või lähinaabritelt. Liiprite sisseostu puhul on tootjateks tavaliselt tuntud ettevõtted, mille tootmisajalugu on pikk.

### 4.2 Sõltuvus mürast

Erinevatel liipritel on võime summutada ning peegeldada müra. Summutamine oleneb materjali omadustest. Müra iseenesest projektis arvesse ei võeta, kuid võiks lähtuda ka sellest näiteks elamurajoonide lähedal. Üldiselt mida pehmem ja elastsem on liiper, seda parem on müra ning

<sup>1</sup> Hetkel Eestis on betoonliiper kaks korda odavam, võrreldes tammepuidust liipriga.

vibratsiooni summutamine. Sellel teemal on ka tehtud test liipri valikul, võttes arvesse tekitavat müra.

Üldiselt müra summutab suuremal määral ballastikiht ja seejärel puitliiper. Joonis 9 näitab erinevate materjalide mürasummutust. Betooni puhul on tegu materjaliga, mis peegeldab müra. Seetõttu on vaja seda tõkestada. Antud numbrid saavutati testides raudtee infrastruktuuri, millel ühel pool asetses betoonliiper raudtee, teisel pool aga puitliiper tee. Uuringus võrreldi puitliipri mürasummutust betoonliipriga. Vahe oli 0,6 – 3,1 dB(A), kus puitliiper summutas antud koguse võrra suuremat müra. [18] Tavaliselt tekitab seda rongide puhul rattad. Rattad tekitavad pidevaid lööke. Seda on kuulda hästi Eesti kaubarongide liikumisel. Üks võimalus on kasutada summutavaid liipreid. Teine võimalus on korrastada rongi alusvankrit, tagades löökide minimaalset mõju. Seejärel oleks müra kogus väiksem ja tee stabiilsus rataste löökide mõjul tagatud kindlamalt.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Betoon	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Puit	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07
Ballast	0.17	0.34	0.25	0.5	0.62	0.63

Joonis 9. Liiprite mürasummutus erineval materjalil [18]

Müra summutamine, võrreldes puitliipriga, on polümeer- ning plastikliiprite puhul parem. Hollandi inseneri ja konsulteerimis firma Movares-i poolt tehtud uuringus suudeti saavutada mürataseme vähendamine, vahetades puitliiprid plastikliiprite vastu. Vähendati mürataset ca 3-5 dB. [19] Soosides seejärel puitliiprite ning betoonliiprite asemel kasutama elamurajoonide lähedal antud liipreid. Autori arvates tuleks teha teste, uurides mürataseme sõltuvust liiprist. Parim variant oleks kasutada polümeerliipreid Tallinna linna sees olevas raudtee lõigus, seejärel analüüsides saada parem ülevaade plastikliiprite valdkonnast.

## 5. LIIPRITE KINNITUSED

Kinnitustel on suur roll stabiilsuse tagamisel. Rööpa ning liipri halva ühenduse korral hakkavad detailid väsima. Tagajärjeks on stabiilsuse kadu. Selle parendamiseks on järjest enam hakatud tootma detaile, mille kinnitusjõud on üha suurem. Liiprite kinnitus erineb vastavalt liipri tüübile, tootjale ja kasutatavale materjalile. Ka eelnevast kasutatavast tehnoloogiast, kui ka riigiti. Kinnitused on toodetud metallist. Lisaks, mida aeg edasi läheb ja tehnoloogia uueneb, seda paremaks ja lihtsamaks lähevad kinnitused. Mille tulemusena on kinnitusdetaile vähem, võrreldes eelmise sajandiga. Enamjaolt on kinnitused sarnased nii puidule, betoonile kui ka teistele liipri tüüpidele.

### 5.1 Puitliiprite kinnitused ja tugevus

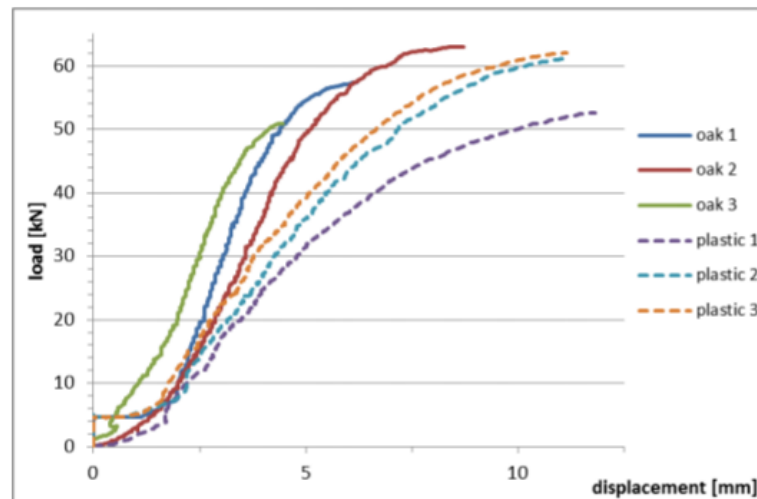
Puitliipritel on mitmeid mooduseid kinnituseks. Tavaliselt on kinnitusteks kasutusel: klemmid, klambrid, seibid, kruvid, kummid ja aluslapid. Vanasti olid kasutusel puitliipri puhul aluslapp viie auguga, koos nelja kuni viie naelaga. Naelad löödi liipri sisse raudtee haamriga. Hiljem tehnoloogia muutus ja puuriti enne auk sisse, ning seejärel haamriga või tamper mehhanismiga löödi nael sisse, et mitte käele viga teha tagasilöögi mõjul. Hetkese seisuga on mõnel kõrvalteel, kui ka jaamateel, naelkinnitus kasutusel.



Joonis 10. Naelkinnitus [20]

Nüüdseks on kinnitustehnoloogiat uuendatud. Puitliiprite puhul kasutatakse kruvi ja klemmi kinnitust koos aluskummiga, pehmedades nii koormuse vastuvõtmist. Pehmenduse puudumisel, hakkab rööpatald deformeerima liiprit ja see omakorda mõjutab kinnitusi. Aluskummi õhenemisel, hakkab ka kinnitusjõud vähenema, mille tõttu rööbas liigub vabamalt kinnituste vahel. Rööpa liikumisel hakkavad aluskummid rööpa all liikuma, mille tulemusena on vaja teha korraldust hooldust. Hooldusaja vähendamiseks on vaja kasutada õiget ning testitud materjali. Puitliiprite puhul on iseenesest tehtud mitmeid teste, kuna tegu on materjaliga millel on pikk ajalugu raudtee valdkonnas.

Üheks testiks oli kruvi väljatõmbe test Tšehhi Tehnikaülikooli poolt aastal 2015. Testi eesmärk oli võrrelda puidu ja plastiku vastupidavust kruvi mehhaanilisel väljatõmbel. Materjalidena kasutati spetsiaalseid proovikehi (vt Joonis 12). Taaskasutatud plastik oli 65% PE ja ülejäänud protsent teistest plastik tüüpidest. Plastik vormiti graanuliteks ja seejärel pressiti kahesajakahekümne kraadi juures 100 MPa jõuga raudvormi. Materjali sisse pandi kruvi kindlale sügavusele, mille puurimise diameeter oli 15 mm. Joonise (vt Joonis 11) peal on väljatõmbe tugevust. Taaskasutatud plasti puhul oli 58,4 kN ja puidu puhul ca 57 kN. [21]



Joonis 11. Kruvi väljatõmbe tugevus materjalidel [21]

Väljatõmbe puhul on visuaalselt märgata, et puitstruktuur peab üleüldise hästi vastu ja auk tekib ainult liiprisse (vt Joonis 12). Taaskasutatud plastiku puhul on väljatõmbe number hea. Samas materjali järeleandmisel on materjali deformatsioon liialt suur. Lõppkokkuvõttes on mõlema materjali puhul omadused head. Plastiku puhul võib tekkida probleeme väsimusega. Tänu piisava väljatõmbetugevusele, sobib plasti kasutada puitliipri alternatiivina. [21]



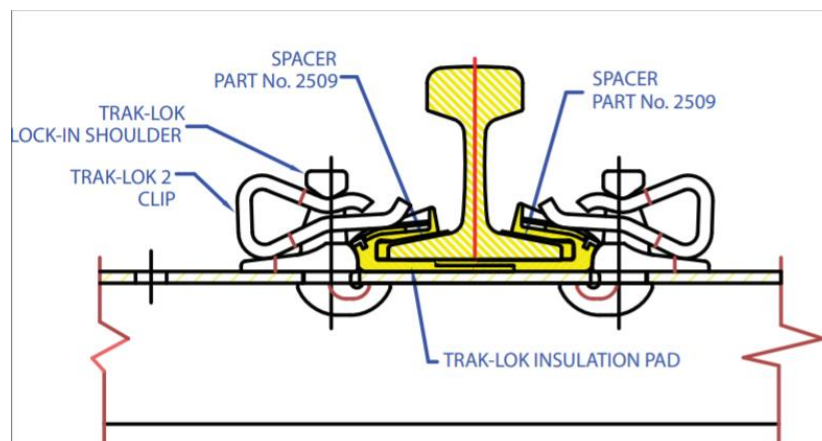
Joonis 12. Visuaalne tulemus( ülal plastik, all tamm) [21]

Võrreldes antud kinnitusi naelkinnitusega, võib naelkinnituse miinuseks tuua tihenda omavahelise materjalide ühenduse puudumise. Ei suudeta liiprit rööpa külge tihedalt kinnitada, vaid jääb väike vahe sisse, põhjustades üleüldist deformeerumist. Ebapiisaval kinnitamisel võib rööpmelaius muutuda negatiivselt. Mille tulemusena võib rööpa laius minna suuremaks. Selle ennetamiseks on vaja kogemust antud valdkonnas. Samas on palju ruumi labori testimistele ja materjalide uurimisele, tulevikus kasutatavate materjalide puhul.

## 5.2 Terasliiprite kinnitused

Terasliiprite puhul on suurimaks probleemiks automaatblokeeringuga teedel rööbaste omavahelise elektrilise ühenduse blokeerimine. Automaatblokeeringuga teel liigub tavaliselt veerem, andes ühendust kahe rööpa vahel, mille tõttu toimub tee lõigu sulgemine automaatselt punaste fooridega, näidates tee hõivatust antud lõigul. Vältimaks rööbaste elektrilist ühendust liipri tõttu, peab kasutama lisadetaile ühenduse blokeerimiseks. Liipri isolaatori puudumisel on automaatika süsteemis näha tee hõivatust, kuigi seda pole. Mille tõttu ülesõidukohtades tõkkepuud langevad alla ja sulgevad liikluse lähi piirkonnas. Selleks on tehtud liipritele isolatsioon ümber rööpa.

Terasliipri puhul on üheks kinnitustüübiks Trak-Lok 2 Clip [22]. Antud kinnituse puhul kollane isolatsioon ümbritsetud isolaatoriks rööpatalla ümber (vt Joonis 13). Tegemist lihtsa tehnoloogiaga, kus isoleeritud on rööpa tald nii liipri kui ka kinnituste vahel. Kasutusel on ka teisi kinnitustüüpe raudliiprite puhul. [22]



Joonis 13. Trak-Lok 2 Clip [22]

Teiseks tüübiks on Pandrol Fastclip, kus antud kinnitus on kasutusel ka betoonliipritel [23]. Trak-Lok 2 Clip kinnitusel otseselt avalikult pole väljatoodud katseid, mis näitaks testitud koormustulemusi. Pandroli Fastclipi puhul on tegu on testitud kvaliteetse kinnitusega, millel on mitmeid testitud tüüpkiinnituse koormustulemusi. Eelnevalt sai ka mainitud betoonliiprite peatükis antud kinnituse omadusi.



### 5.3 Betoonliiprite kinnitused

Eestis on kasutusel valdavalt betoonliiprid, mille kinnitused on läinud järjest lihtsamaks. Hetkel kõige kasutatavam kinnitus on Pandrol Fastclip (vt Joonis 14) kinnitus. Kinnitus on lihtsa konstruktsiooniga. Liipri all on aluskumm, talla kõrval elektrijuhtivust peatavad isolaatorid ning klamber koos TOP-iga. TOP on klambri otsas valge isolaator. Liipri külge on tavaliselt juba tehases monteeritud kõrvad, kuhu sisse klamber lükatakse pessa, surudes rööbast liipri peale. Samal ajal küljeisolaator hoiab rööbast paigal. Küljeisolaatorite laiusuga saab rööpmelaiust reguleerida. Üldiselt on antud kinnituses nii eeliseid kui ka miinuseid.



Joonis 14. Pandrol Fastclip kinnituse pealtvaade [Erakogu]

Kinnituse eelised:

- Vähe detaile koostamisel (tehases on ankrud külge kinnitatud),
- Lihtne remontida ja hooldada,
- Kõveras rööpmelaiuse hilisem parendus on raskendatud (kasutusel olevas rööpas võivad olla pinged, mille tõttu pärast isolaatorite eemaldamist ei ole võimalik ilma spetsiaalse instrumendita isolaatorit paigaldada).

Kinnituse miinused:

- Küljeisolaatorid kuluvad kiiresti (pärast kümnet aastat, või isegi varem, isolaator võib olla painutatud või on tekkinud rööpa ning isolaatori vahele pilu),
- Klamber annab ajajooksul järgi ehk surve rööpale nõrgeneb ,
- Aluskummid nihkuvad paigast rööpa alt,
- Hooldusel võivad betooni küljes olevad malm kõrvad murduda.

Magistritöö kirjutaja enda kogemusel raudtee hooldusel Tartu-Põlva raudteelõigul, sai vaadeldud kinnitusi, mille vahetusest oli möödas ca 10 aastat. Pärast kümneaastast materjali kasutust oli näha aluskummide liikumist rööpa ning liipri vahel (vt Joonis 15). Kinnitused mõnes lõigus olid lõdvdad, kinnitustugevus oli vähenenud ja küljeisolaatorid olid kulunud. See tähendas ca 70% klambrite vahetamist ning ca 100% kummide vahetust. Sellest tulenevalt saab arvestada korralise hooldusega iga kümne aasta tagant. Kõverates peab hooldus varem toimuma. Kuigi liiper peab ise vastu ca 50 aastat, vajavad kinnitused pidevalt hooldust. Liipri eluea jooksul peaks tegelema viis korda kinnituste vahetusega, kus vahetus peab olema 100%. Tagamaks stabiilne konstruktsioon ning korrektne rööpmelaius.



Joonis 15. Aluskummi asetus ja üldine seisukord pärast kümne aasta möödumist [Erakogu]

Betoonliipri kinnitusviisiks on ka SKL kinnitustüüp (vt Joonis 16). Eeliseks on lihtne konstruktsioon ning lihtne monteerimise protsess. Peamisteks detailideks on aluskumm, küljeisolaator, seib ning kruvi koos klambriga. Vossloh kinnitusviisi suurimaks eeliseks on hilisem kinnitusjõu parendamine. Klambri järgiandmisel saab pingutada seda kruviga. Pandroli puhul sellist võimalust pole. Pandroli ning konkurentide vahel on tehtud täpsem ülevaade, kinnitusjõu suuruste võrdlemiseks erinevate kinnitustüüpide puhul.



Joonis 16. Vossloh kinnitus [24]

Eestis eelistatuimat kinnitust, Pandrol Fast Clip, jagab kinnitusjõu poolest teist ja kolmandat kohta (vt. Tabel 2). Esimesel kohal on mitte nii tuntud Safelok III (vt Joonis 17) kinnitustüüp. Mille kinnitusjõud on pea 300 lbs-i suurem. Arengut on näha, kuna esimese ja nüüd viimaste aastate kinnitusjõud on suurenenud ca 41%. Mida parem kinnitusjõud, seda kauem püsib klamber tihendalt vastu rööbast. Kinnitusjõud on suuremad tänu tehnoloogia arengule. Samas liiprile valitakse tavaliselt kinnitus eelneva kogemuse järgi. Samuti võetakse arvesse hetkel tees olevaid kinnitusi, hoolduse lihtsustamiseks. Erinevate kinnituste korral ühes lõigus on vaja erinevaid instrumente ning tehnikat, mõjutades nii tee kvaliteeti kui hoolduseks kuluvat aega. Tihti peale toimub kinnituste väljavahetus tees, ning seejärel on vaja teha valik turul pakutavatest tüüpidest. Lähtuda võib ka valikul uuringutest või kogemusest.

Tabel 2. Kinnitusjõud ja esitlusaasta betoonliiprite kohta Põhja-Ameerikas [25]

Klassifikatsioon	Tootja	Mudel/Süsteem	Nominaalne kinnitusjõud rööpa kohta	Tutvustamis aasta Põhja Ameerikas
Screwed Clip	Vossloh	W koos SKL 1	4100	1987
Screwed Clip	Vossloh	W 14 HH koos SKL 14R	5400	2006
Screwed Clip	Vossloh	W 30 HH koos SKL 30	5400	2009
Driven Clip	Pandrol	PR	4000	1974
Driven Clip	Pandrol	E-Clip	5500	1986
Driven Clip	Pandrol	Safelok I	4800	1988
Driven Clip	Pandrol	Safelok III	5800	2000
Driven Clip	Pandrol	Fast Clip	5500	1992
Driven Clip	Unit Rail	U 2000 koos U2100 õlaga	4800	2001



Joonis 17. Safelok III [26]

Ühes uuringus, mis viidi läbi Illinoisi Ülikoolis Ameerikas, jõuti järeldusele, et pideva teljekoormuse suurendamise tagajärjel, on vaja teha uuringuid kinnituste tugevuse valdkonnas. Peamiseks probleemiks on antud juhul liipripadja kulumine ja selle purunemine vastu rööbast. Elastse aluskummi kasutusel saab vastu võtta erinevaid liikumisi. Kuid kui kasutatakse väga elastset kinnitust ja jäika kummi, siis ei ole rööpal piisavalt tuge pidevate koormuste vastuvõtmiseks. Samas ka elastse aluskummi ja jäiga kinnituse kasutusel rööbas ei liigu väga paigast, aga see eest aluskumm võtab vastu mitmeid koormuseid, millel võib olla kahjulik mõju stabiilsusele. See tähendab, et tuleks teha rohkem teste selles valdkonnas, et kinnitusmeetod oleks tasuv ja kauakestev. [25]

Eestis kahjuks antud teema ei ole aktuaalne. Pigem ostetakse kinnitused sisse ja kohapeal monteeritakse liiprisse. Aga kui kasutatakse betoonliipreid, mille kinnitusdetailid on liipri üleüldisest struktuurist lahti (vt Joonis 18), on võimalik lihtsalt demonteerida kinnitusdetailid küljest. Detailideks on klemmid, haakepoldid ja isolatsiooni kummid. Liipri monteerimiseks rööpa külge on vaja suur arv detaile, mis on antud lahenduse suurimaks miinuseks. Eeliseks on purunenud kinnitusdetailide lihtne vahetus uute vastu. Pandrol Fastclip-i puhul, kui metallist ankur läheb puru, on vaja vahetada terve liiper välja või remontida liiper. Remontimisel toimub vana ankru väljapuurimine, millele järgneb uue ankru paigaldus.



Joonis 18. Vana kinnitustüüp [Erakogu]

## 6. ALTERNATIIVSED MEETODID

Peale betooni ning puidu on ka teisi võimalusi raudtee pealisehituse loomiseks. Üheks alternatiivseks meetodiks on ballasti mittekasutamine. Ehk ballastita tee loomine. Sama tehnoloogia oli kasutusel ka Tallinnas trammitee uuendamisel puitliipritelt betoonile. Vahe on selles, et ei valata kõike betooni, vaid ainult osa sellest. Samas on ka alternatiivsetel võimalustel omad eelised ning miinused, mida arvesse võtta antud lahenduse valikul. Selleks on tehtud mitmeid teste.

Ühes testis ballastita tee (vt Joonis 19) teemal selgus, et koormused betooni all jagunevad ühtlaselt maapinnale, kui tegu on ballastita teega. Võrreldes ballastiga teega on betoon rohkem ühtehoidvam. Seetõttu on ka võimalus kasutada antud lahendust kiirete rongide puhul, mille kiiruseks on koguni ca 354 km/h. Ballastita tee puhul summutatakse dünaamilisi koormuseid paremini, kasutades elastseid kinnitusi, kui näiteks ballastiga tee puhul. Ehk tee võib olla jäik ning samal ajal ka edukalt jaotada koormuseid. [27] Ballastita teel on veel teisigi positiivseid ning negatiivseid omadusi.



Joonis 19. Ballastita raudtee [27]

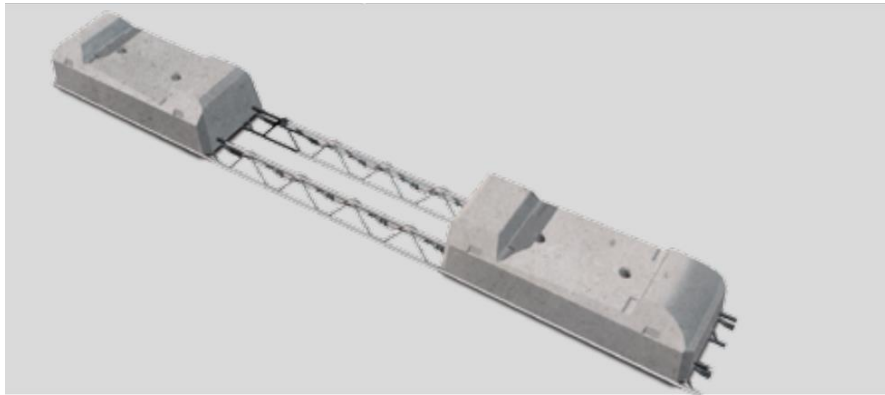
Üldised ballastita tee eelised:

- Hoolduskulude vähenemine,
- Madala konstruktsiooni paksuse saavutamine,
- Ühtne konstruktsioon.

Ballastita tee miinused:

- Teelt väljasõit toob kaasa kalli remondi,
- Hooldus on keerukas.

Plussiks antud juhul on veel kiiruste suurendamise võimalused. Antud lahendusega on võimalik rongide kiirust tõsta koguni 350 km/h. Selleks aga tuleb teha ballastita tee, kus tuleb kasutada alljärgnevat liiprit [28].



Joonis 20. Liiper B355.4 [28]

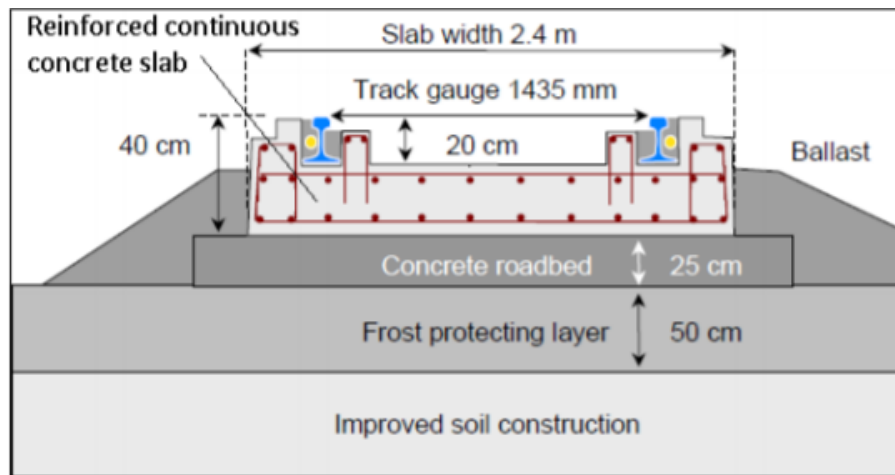
Tegemist on liipriga (vt Joonis 20), mida kasutatakse konstruktsioonis ja seejärel paigaldatakse rööpad ja kinnitused. Protsess toimib analoogselt Tallinna trammitee rekonstrueerimisele, kui tee on paigas ja rihitud, valatakse betoon vajalikku kõrgusele. Antud lahendust saab kasutada kohas, kus tee püsivus peab olema märgatavalt hea ja vastupidav.

## 6.1 Ballastiga tee

Ballastiga tee suureks miinuseks on ballasti killustiku kulumine. Probleemiks on ka ballastis lirtsmete teke, ehk killustik seguneb peene fraktsiooniga ja seetõttu ballastist veeäravool on kehv. Deformeerides raudtee üleüldist struktuuri ja materjali. Mistõttu tuleb antud koht välja kaevata ja paigaldada uus killustik.

## 6.2 Muud lahendused

Selleks, et ballastita teed ehitada stabiilsena, on INFUNDO ja EDILON teinud koostööd konstruktsiooni tootmisel (vt Joonis 21). Antud lahenduse eeliseks on mürataseme langus, minimaalsete detailide vajamine monteerimiseks, kiire monteerimine, hea lahendus kombineeritud teede puhul ja rööpa väiksem kulu. Kuna rööpa kulu on väiksem, siis saab kasutada kergemat tüüpi rööbast, mis on soodsaim kui tavapärase UIC60. Antud lahenduse puhul saab teel, kus rööpa tüüp on UIC 54, kanda teljekoormust 225 kN ja vähendada 5dB võrra vähem müra. Uuringute käigus selgus veel, et ballastita tee peab vastu ca 40 aastat. [29]



Joonis 21. INFUNDO meetodi läbilõige [29]

Autori arvates on antud lahendus hea alternatiiv ballastiga teele. Betooni purunemisel või õnnetuse juhtumisel, kui tee konstruktsioon saab kannatada, on tagajärjed hullemad kui ballastiga teel. Õnnetuse tagajärjel tuleb vahetada betoonplokk välja. Tuleks betooni piigata ning uus betoon valada lõiku, mis tähendab, et pärast seda konstruktsioon pole täiuslikult ühtne. Lõputöö autor arvab, et Eesti raudtee puhul võiks teha testlõik konstruktsiooni analüüsimiseks antud kliimas. Üldjuhul ballastita tee puhul säästetakse kulude pealt, mis on suunatud jällegi rohkete kinnitusdetailide vahetuse peale.

## 7. LIIPRID PÖÖRMEL, SILLAL JA VIADUKTIL

Hetkel Eestis on pigem sildade ja viaduktide puhul kasutusel puitliiprid. Seda põhjusel, kuna puit summutab paremini vibratsiooni, ning on kergem ja pehmem. Sama on ka pöörangute puhul. Kuigi nüüd juba ehitatakse ka raudteesildu, kus pealisehitusel kasutatakse betoonliipreid. Ka pöörangutes hakati kasutama raudbetoonliipreid, et saada parem tugevus ja ühtsem struktuur.

Üheks sillaks, kus on kasutusel Pandrol Fastclip kinnitusega betoonliiprid, on Tallinnas A. H. Tammsaare teel, mis on Järve raudteepeatuse lähedal (vt. Joonis 22). Kasutusel on pikkrööbas. Tee keskel on metallist kontrarööbas, mis on kinnitatud liipri sisse kruvidega. Välisel vaatlusel ei täheldanud mingeid deformeerumisi silla peal. Ka on teisi kohti kus on analoogsed lahendused, kus on kasutatud betoonliipreid viaduktidel ja sildadel. Näiteks Põlva-Tartu raudteelõigu vahel.



Joonis 22. Betoonliiprid viaduktil [Erakogu]



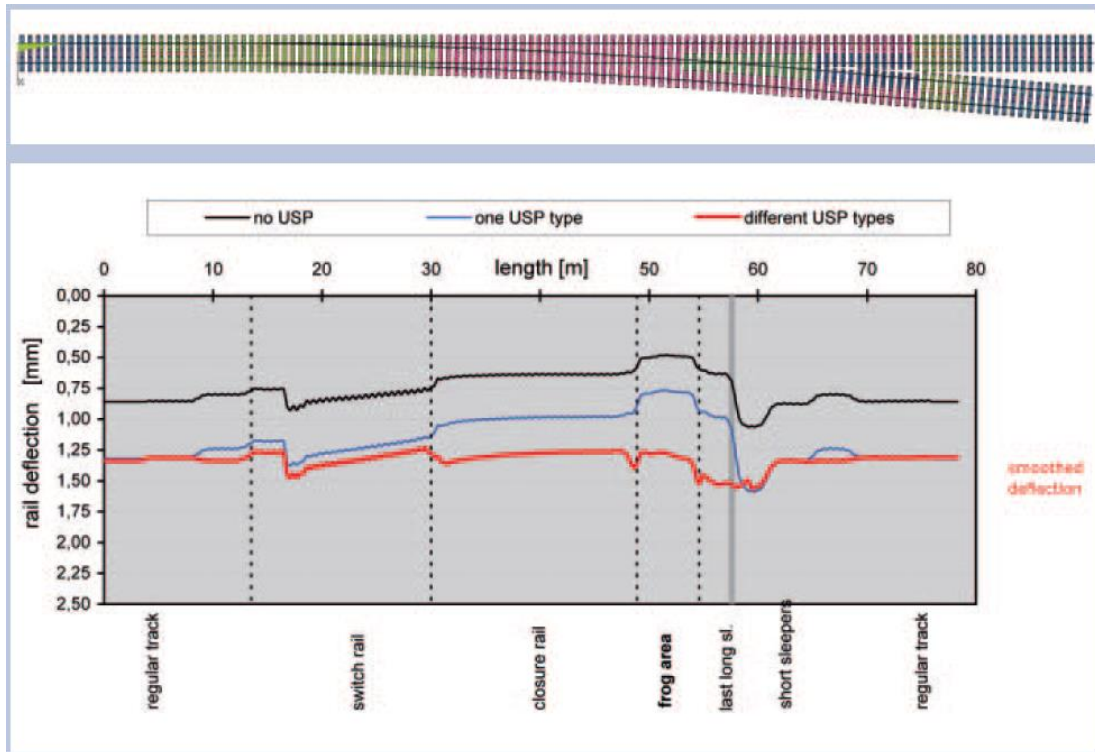
## 7.1 Erilahendused

Selleks, et sildadel, viaduktidel ja pöörmudel säilitada stabiilsust, toodetakse betoonliiprile kummist kaitsekihti ehk USP(Under Sleeper Pad). Paksus liipri all võib olla 7-20 mm vastavalt soovile ja elastsuse vajadusele. Eelkõige on selle põhimõtte vähendada hooldust, tõsta tee kvaliteeti ja pakkuda müra vähendamist liipri all. [30]

Eelised [30] :

- Stressi vähendamine ja koormuste parem jagunemine,
- Ballastikihi ja muude detailide parem säilitamine,
- Vibratsiooni isoleerimine kuni 15 dB-ni,
- Müra vähendamine 1dBA,
- Ballastikihi parem ühtsus.

Antud teemal on ka tehtud test, võrdlemaks betoonliipri käitumist pöörangus USP-ga ja ilma. Joonisel on näha terve pöörangu ulatuses tee läbipainet millimeetrites (vt Joonis 23). Antud test näitas, et liiper USP-ga vähendab tee kõrvalekallet koormusest paremini, kui seda mitte kasutada pöörangu puhul. USP-d saab paigalda liimides seda liipri külge. Kõige parem on juba tehases ühtse komponendina toota. Isegi jäikade patjade kasutamisel on võimalik koormusi, mis kantakse üle raudtee pealisehitusele, alandada 10 kuni 30% sõltuvalt pöörangu osast. Tänu sellele on võimalik saavutada struktuuri elastsust ilma eelarvet mõjutades. Antud numbrit saab muuta kasutades erineva jäikusega patju. Ka Austrias tehtud testid aastal 2002 näitasid, et liipri padjad suudavad vibratsiooni alandada 40 – 50Hz vahemikus. Austrias hakati USP-d pöörangutes kasutama kui ehitusstandardina. Valiku tegemisel tuleks kasutada FEM (Finite Elements Method) ja USP-d koos, millega saab arvutada välja milline on kõige parem lahendus antud pöörangul. Tänu sellele saab koormuseid stabiliseerida. [31]



Joonis 23. USP test [31]

Samas on testid näidanud, et mõnes kohas USP kasutamine on kohati kehvem variant. USP mõju analüüsimisel üleminekukohtades leiti, et USP kasutamisel pole märgatavat stressi vähendamist ballastikihi all. Kuigi ballastikiht säilis paremine USP-ga teel ja seetõttu on hoolduskulud väiksemad. Teisalt tee geomeetiline püsivus on probleemiks. Samas USP ja aluskummi kasutamine samal ajal, kus aluskumm on jäik ning USP pehme, on tulemus kehv ja selle tulemusena põhjustas liipri purunemist. Kõige enam sobib antud lahendus sagedusel üle 40Hz. Tuleb hoolikalt valida parameetrite ja tee konstruktsiooni järgi antud tehnoloogia sobivust. [32]

Autori kogemus näitab, et kui kasutatakse rööpa ja liipri vahel spetsiaalseid kumme, siis need ajapikku väsivad ja lähevad õhemaks tänu koormusele. Kummid liiguvad rööpa ja liipri vahelt pesast välja, sest rong ratastega lükkab ja tõmbab rööbast ning seejärel on vaja need kummid välja vahetada. Eestis on nüüd muudetud kasutatavat tehnoloogiat nii, et need kummid mis algselt pandi õhukesed, hakati kasutama pakse ja jäiksid kumme kuna väga elastsed kummid deformeerusid erineval moel. Autori arvates USP kasutamine Eesti puhul võiks tasuda ära hoolduskulult. Aga teema vajaks testimist Eesti kliimas, kus pidevalt ilmastik kõigub.

## 8. RÖÖPMELAIUS

Rööpmelaius on raudtee kahe rööpa omavaheline kaugus, mõõdetud rööpa pea siseküljest teise rööpa siseküljeni. Rööpmelaiuse suuruseks Eestis on hetkel valdavalt 1520 mm või 1524 mm. Tava standardi järgi on rööpmelaiuse suuruseks 1435 mm. Kuulujutu järgi pidavat olema esialgu 1435 mm, seejärel üks insener teadmatult mõõtis rööpmelaiust rööpapea välisküljest ning rööpmelaiuse suurus saadi selle tulemusena 1520 mm.

Erinevad rööpmelaiused [33]:

- Standardne laius – 1435 mm; kasutusel enamikes riikides,
- Meetrine laius – 1000 mm või 1067 mm; kasutusel Jaapanis, Indias, Lõuna-Aafrikas, Austrias, Uus-Meremaal, Lõuna-Ameerikas ja mujal,
- Lai laius – 1524 mm või 1672 mm; valiti peamiselt poliitilistel põhjustel, et hoida ära teiste riikide volitamata rongide sissetung võõrasse riiki; kasutab peamiselt Venemaa.

Nominaal rööpmelaiused riigiti [34]:

- Valgevene: 1520 mm (tolerants +8mm, -4mm), kiirusel 50km/h (tolerants +10 mm, -4 mm),
- Läti: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm), kiirusel 50km/h (tolerants +10 mm, -4 mm),
- Leedu: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm),
- Poola: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm),
- Venemaa: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm),
- Slovakkia: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm),
- Ukraina: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm), kiirusel 50km/h (tolerants +10 mm, -4 mm),
- Eesti: 1520 mm (tolerants +6mm, -4 mm) ja 1524 mm.

Euroopa puhul on Standardne laius 1435 mm. Enamjaolt määrab rööpmelaiuse valikut lähisnaabrite teede laiused. Kuna suurim raudtee infrastruktuuri riik on Venemaa, siis Eesti puhul Venemaaga ühenduse puhul, on parim variant 1520 mm. Teisalt, 1435 mm on Euroopa üldine standard. Et hoida ka teiste Euroopa riikidega ühendust, on üks võimalikest lahendustest, et Venemaa suunas kasutame üht lahendust ja Euroopa puhul teist. Lahendus oleneb mitmest asjaolust. Tänu tehnoloogia arengule on ka alternatiivseid lahendusi, et ühe ja sama rongiga sõita mõlemal laiusel.

## 8.1 Eelised standardse laiuse rööpmelaiusel

Üheks eeliseks standardse laiuse kasutusse võtmiseks on ühise raudteestruktuuri tegemine. Tagades rongi liiklemise kõikides riikides, ilma et rööpmelaius oleks probleemiks. Näiteks taheti Ameerikas aastal 1862, president Abraham Lincolni poolt, teha raudteed laiusega 1520 mm aga seda ignoreeriti raudteega seotud osapoolte poolt, kuna pigem taheti teha laiust 1435 mm. Teine põhjus, miks veel valida standardne laius, on rongi kiiruste tõstmine. Lubatud kiirused on suuremad tänu tehnoloogia arendusele. Ka kuna enamuse riike kasutab 1435 mm teed, siis uuringud ja täiendused selle suunas on ka rohkem tähelepanuväärsemad, kui näiteks 1520 mm. Teel laiusega 1435 mm on võimalik juba saavutada kiiruseks ca 210 km/h tänu tehnoloogia uuendusele ja kaasaegsusele. Jaapanis on väidetavalt ka rongid mis sõidavad väiksel rööpmelaiusel 120 km/h, teljekoormusega 25 t ja suudab vedada kuni 200 vagunit ning 40 000 tonni rongi kohta. [35] Samas on ka võimalik ilma rongi alusvankrit muutmata liikuda ühelt laiuselt teisele, kasutades ühenduslahendusi.

## 8.2 Erinevate rööpmelaiuste ühenduslahendused

Hetkel on nii, et seal kus on laiuseks 1520 mm, ei saa sõita samal teel veeremiga, mis on tehtud näiteks 1435 mm ja vastupidi. Iseenesest on võimalik tuua masin, mis sõidab teel laiusega 1435 mm, ning teha sobivaks teele, mille laius on 1520 mm. See tähendab alusvankri väljavahetust, mis ei tasu ära kui seda teha pidevalt. Samas on ka hetkel välja pakkuda kahte alternatiivset lahendust, mis tagab mõlemal teel liiklemise.

Üks väljapakutud lahendus on see, et teha piirkondades, kus on mõlemad teed kasutusel, nelja rööpaga tee (vt Joonis 24). Ehk kaks laiust, 1435 mm ja 1520 mm, pandud samale liiprile nelja rööpaga. [34]



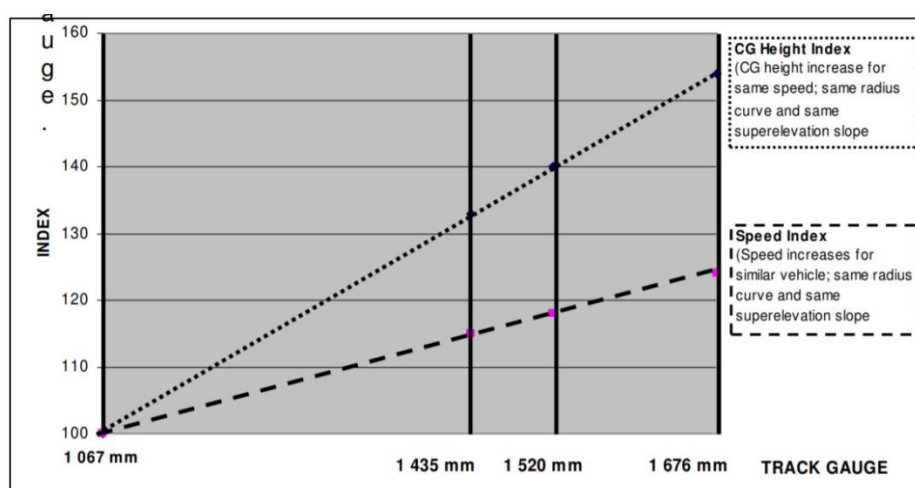
Joonis 24. Nelja rööpaga tee [36]

Kui valida nelja rööpaga raudtee, siis selle üheks miinuseks on välisrööpa kõrgenduste erinevus kurvi puhul. Optimaalne väärtus ei tohi ületada 140 mm, mis võib ametnike loaga kõikuda ca kahekümne protsendi piires. Antud lahenduse eeliseks on raha säästmine kinnistu pealt, kui on kindlasti vaja kahte erineva laiusega teed. Veel on eeliseks ehitamise soodsus ja lihtsus. Kui valida kas ehitada ühele liiprile neli rööbast, või teha kaks erinevat teed teineteise kõrvale, siis soodsaim on teha nelja rööpaga tee. Samas on suureks miinuseks unikaalsete materjalide ressursid turul ja tänu unikaalsusele on ka hinnad kõrgemad. Veel on miinuseks pöörangute hankimine. Ainuke lahendus on kahe erineva pöörangu ehitus, mis on kokkuvõttes kallim. Miinuseks on ka standardite puudumine antud valdkonnas, kuna tegu on keerukate lahendustega mis pole laialdaselt levinud. [36] Teste nelja rööpaga raudtee puhul on vähe, seetõttu vajab suuremat tähelepanu antud konstruktsioon.

### 8.3 Rööpmelaius kurvis

Rööpmelaius kurvis sõltub eelkõige kurvi raadiusest, pikkusest ja nurgast. See omakorda mõjutab rongi kiirust kurvis.

Tšehhi Tehnikaülikooli uuringus rööpmelaiuse kohta näitas, et mida laiem on rööpmelaius, seda kiiremini saab rong läbida kurvi. Väiksem laius tähendab väiksemaid kiiruseid kurvides. Kui võrrelda teed laiusega 1435 mm ja laiust 1520 mm, siis sama kurvi saab läbida kiiremini rong, mis sõidab teel laiusega 1520 mm (vt. Joonis 25). Et saada rongi kiirust kurvis tõsta rööpmelaiusel 1435 mm, on vaja suurendada rongi raskuskeskme punkti. [37]



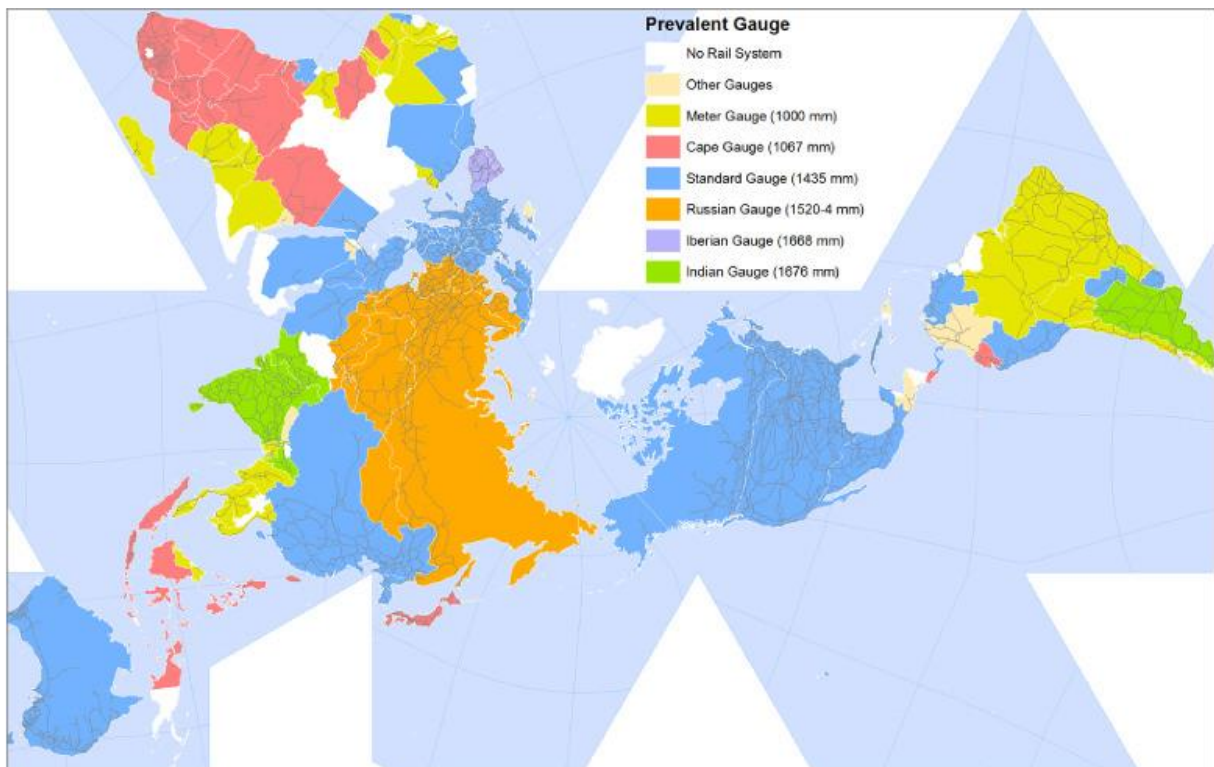
Joonis 25. Rööpmelaiuse kiiruste erinevus kurvis [37]

Trammitee ja raudtee puhul on tehtud sujuvuse tagamiseks kurvis, nagu ka maanteede puhul, välisrööpa kõrgendus. Maksimum välisrööpa kõrgendus 1520 mm ja 1524 mm rööpmelaiuse puhul on 150 mm. Välisrööpa kõrgendust alustatakse kõvera algusest sujuvalt, kus maksimum kõrgus saavutatakse teatud pikkusega. Rööpmelaiust suurendatakse kurvis vastavalt kõvera suurusele. Mida väiksem kurv seda suurem on laiendus. Kui laiust ei suurendata väikeste raadiuste puhul, siis rattad hakkavad rööbast nn sööma ja tekib kulum. Mistõttu läheb ikka vahe suuremaks kui sirgel teel.

#### 8.4 Rööpmelaiuse sõltuvus kaubandusest

Üks mõjutav asjaolu rööpmelaiuse puhul on veel naaberriikide ühendused. Joonis 26 toob välja, et peamiselt Venemaa kasutab 1520-1524 mm raudtee laiust, standardset laiust aga suurem osa maailmast. Kui nüüd aga soovitakse ka Eestis ühendust teha Euroopaga, siis tuleb kasutusele võtta 1435 mm rööpmelaius, et raudtee vastaks Euroopa normidele.

Standardse laiusega on kaetud 60% raudtee lõigust maailmas. Eestis kasutatav rööpmelaius 1520 mm, kasutab kõigest 17%. Raudtee transpordiga saab transportida soodsalt ning loodussõbralikult kaupa kohale. Väidetavalt transpordist tulenevat energia kulusid katab raudtee transport kõigest 3% kasutatavast energiast. Säästlikkuse hoidmiseks, peab leidma ühise lahenduse transpordil. Hetkel aga rööpmelaiuste erinevus pärsib seda ja on igati takistuseks. [38]



Joonis 26. Rööpmelaiused maailmas [38]

## 8.5 Rööpa sõltuvus rööpmelaiusest

Tavapärane laius 1520 mm, mis on ka Eestis kasutusel, suudab tänu laiemale rööpmelaiusele kanda rohkem teljekoormust, kui näiteks kitsamad teed. Kuigi on ka riike kus on ka raskemad teljekoormused standardsel laiusel kasutusel. Kasutusel on ka raskemad rööpad. Näiteks R65 tüüpi rööpad, mille ühe meetri kaal on ca 65 kg. Standardse laiuse puhul on kasutusel UIC 60 tüüpi rööbas, mis on juba standardisse kirjutatud sobiva valikuna. UIC puhul on tegu rööpaga, mis võtab vastu keskmist ja raskemat liikluskoormust. Tutvustatud on ka rööbast UIC 71, mis pole hetkel veel nii tuntud. Kui liikluskoormused on suuremad kui 35 000 t, siis parim valik on UIC 60 tüüpi rööbas. [33]

UIC 60 kasutamine on hetkel juba standardites sees. Hetkel Eestis remondi ja ehituse puhul on kasutusel kas R65 või UIC60. Jaamateedel kasutatakse vanemaid väiksemaid tüüpi rööpaid, näiteks R50. Projektis on tavaliselt välja toodud rööpa kindel tüüp või minimaalne rööpa kaal meetri kohta. Tavaliselt on see 60 kg/m. Rööbastel R65 ja UIC60 on erinevus nii mõõtude kui ka kaalu poolest.

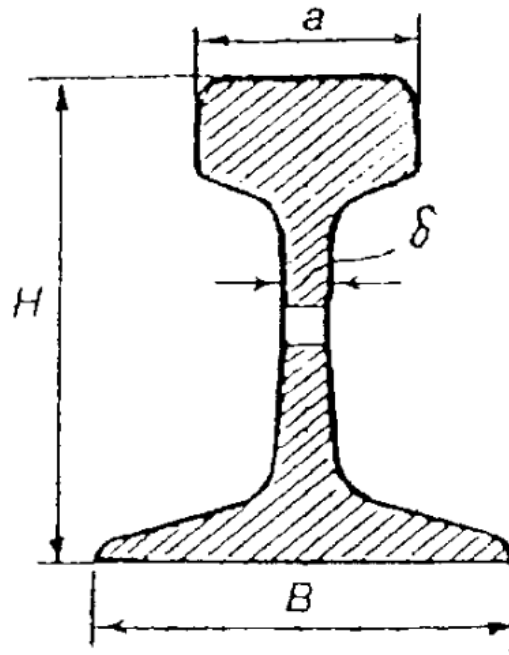
R65 tüüp parameetrid [39] :

- Kõrgus – 180 mm,
- Pea laius - 75 mm,
- Kaela kõrgus – 105 mm,
- Kaela laius – 18 mm,
- Talla laius – 150 mm,  
Talla kõrgus – 11,2 mm.

UIC60 tüüp parameetrid [39]:

- Kõrgus – 172 mm,
- Pea laius - 72 mm,
- Kaela kõrgus – 89,6 mm,
- Kaela laius – 16,5 mm,
- Talla laius – 150 mm,
- Talla kõrgus – 11,5 mm.

Näidatud on rööpapea, -talla, -kaela ning kõrguse mõõtkohad (vt. Joonis 27).



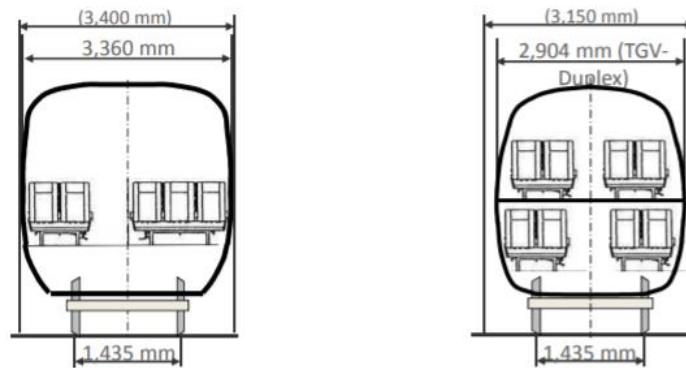
Joonis 27. Rööpa ristlõige  $a$  – pea laius,  $B$  – talle laius,  $H$  – kõrgus,  $\delta$  – kaela laius [4]

## 8.6 Rongi sõltuvus rööpmelaiusest

Tavaliselt on rong või vedur monteeritud kokku sõitmaks ainult ühel rööpmelaiusel. Seni erinevatel teedel sõitmine piirdunud tehnika alusvankri väljavahetuse, mis tehakse minimaalselt elujooksul. Selle parendamiseks on loodud alternatiivseid lahendusi. Näiteks Jaapanis on rongid, mis sõidavad mõlemal teel korraga.

Erinevus seisneb selles, et rong sõidab nii teel mille laius on 1067 mm, kui ka teel mille laius on 1435 mm, mida kasutab ka Rail Baltica. Antud juhul on erinevus lahendatud kasutades rattapaari telge, mille laius muutub vastavalt lõigule kas siis laiemaks või kitsamaks. Antud protsessi võimaldab ka teostada suurtel kiirustel. Tegemist on reisirongiga mille nimetus on „Shinkansen”. Rong võimaldab saavutada kiiruse kuni 320 km/h. Võrreldes rongi laadimisgabriiti Shinkanseni ja Euroopaga siis, Euroopa laius on väiksem, mis tähendab et Shinkanseni rongi puhul on reisijatel rohkem ruumi sees, kui Euroopa rongis (vt Joonis 28). Ca 0,5 m rohkem ruumi. [40] Antud lahendus näitab, et on võimalik ehitada kitsamale teele rong, mis on saavutatud ilma rongi kitsenduseeta.

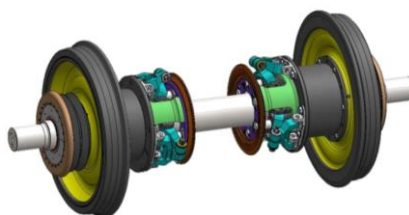




Joonis 28. Laadimisgabariidi võrdlus [40]

Edukas projekt on ka TALGO, mis tagas sujuva laiuse muutuse aastast 1969. Väidetavalt väga sujuv ja soodne lahendus. Süsteem töötab nii, et rong sõidab läbi vahetusjaama, mis ise automaatselt muudab sõites ratta asukohta, ning seejärel muutub automaatselt ka piduri konstruktsioon vastavaks. Antud lahenduse korral võtab automaatselt jaama konstruktsioon vertikaalse koormuse ratastelt ja rattad seejärel sujuvalt liigutatakse paremale või vasakule. Kiirus peab olema antud juhul 10 – 15 km/h. [41] Tegemist on variandiga, millega sujuvalt toimub rattapaari vahekauguse muutumine. Peale TALGO variandi, on ka teine variant nimega OGI.

Kasutades OGI telge (vt Joonis 29), toimub laiuse muutumine tänu telje laienemise ning kitsenemisele. Antud lahendus on eelkõige kaubavagunile mõeldud. Hetkel on arendatud seda sõitmaks laiusel 1435 mm ja 1668 mm. Ühelt laiusele teisele üleminek saab olla sõidu pealt, ilma peatumiseta. Maksimum teljekoormus on 22.5 t. Peal saab sõita Y21 või Y25 tüüpi vagunid. Seda on testitud 10 miljonit tsükli kahe erineval rattatüübil. OGI telge on võimalik kasutada teel laiusega 1520 mm, mis on Eestis kasutusel. [42] Hetkel peaks antud lahendus olema ikka testimises, kuna otseselt avalikult kirjutatud pole meedias. Antud lahendust saaks ka kasutada RailBalticu puhul. Mis tähendaks, et rongi alusvankrid vajaksid muutmist. Nii saaks rongid sõita mõlemal teel. Võimaldades Elroni rongil liikuda tavapärasel teel laiusega 1520 mm, kui ka standardisel laiusel 1435 mm.



Joonis 29. OGI telg [42]

## 9. ALUSEHITUS

Stabiilsust mõjutab peale pealisehituse ka alusehitus. Alusehitus võtab vastu koormusi nii omakaalust kui ka liiklusest. Aluse stabiilsust mõjutab ka geoloogiline struktuur ning kasutatavate materjalide kvaliteet ja omadused. Tavaliselt tagatakse aluse stabiilsus lisades killustiku kihi alla geovõrku ning stabiliseerides pinnast.

### 9.1 Aluse stabiilsus

Selleks, et pealisehitus oleks stabiilne, peab olema ka aluskonstruksioon vastupidav. Eesti puhul tavaliselt tehakse vana tee renoveerimisel nii, et vana killustik lükatakse laiali, seejärel tihendatakse, paigaldatakse geovõrk ja selle peale paigaldatakse uus ballast. Suurim probleem on hetkel ballasti puhul peenmaterjali teke transpordil. Tihti killustiku mahalaadimisel vagunitega on vaguni põhjas peenikest killustiku puru. Kuna see puru on kõige põhjas, mis võib olla tekkinud ka tänu laoplatsti korralagedusele, ja valatakse seejärel kõige peale, on see suur probleem. Tihti on nii, et selline koht on vaja puhastada. Peale killustiku peenmaterjali tekkele, võib probleeme esineda ka ballastikihi all. Aluse püsivuse tagamiseks on kasutusel mitmeid võimalusi ning tehnoloogiaid.

Stabiliseerimis viisid [43]:

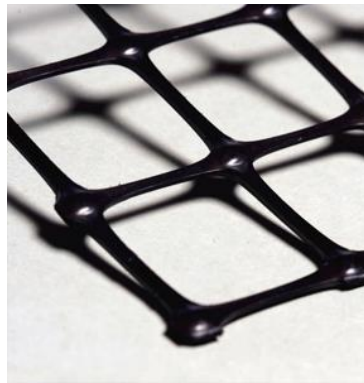
- Tsementstabiliseerimine,
- Bituumenstabiliseerimine,
- Betoonvaiade kasutamine pinnases,
- Keemiliste ühendite segamine pinnasega,
- Pinnase dünaamiline tihendamine(löökidega),
- Pealiskihi materjali kasvatamine,
- Geovõrkude ja -tekstiilide kasutamine,
- Pinnase väljakaevamine.

Eesti uusehituste puhul valitakse viimane variant. Kui pinnas on sobimatu, toimub täielik väljakaevamine. Seejärel tuuakse kohale uus materjal laost, nii liiv kui ka killustik. Meetodi valik sõltub eelkõige vastavast asukohast ja ressursside olemasolust. Tavaliselt raudtee kapitaalremondi puhul parendatakse konstruktsiooni kasutades geovõrku.

### 9.2 Geovõrgu mõju

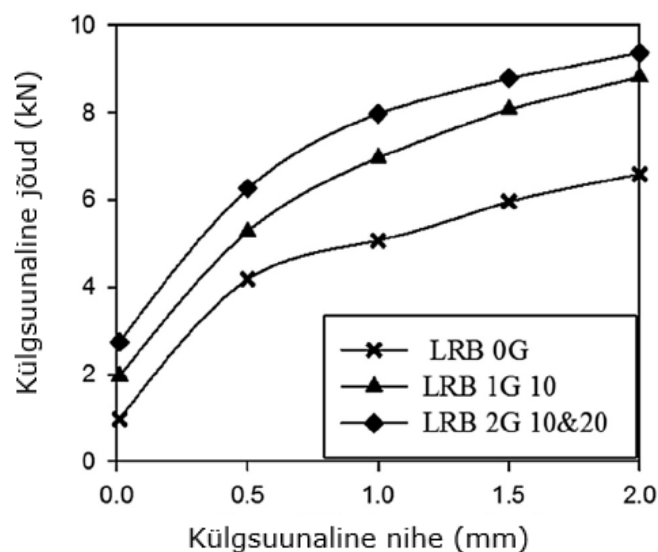
Geovõrgu kasutamine uutel ehitistel on vajalik üldiseks konstruktsiooni parendamiseks ning stabiilsuse tagamiseks. Üldiselt kasutatakse ruudukujulise auguga võrku. Parima tulemuse tagamiseks saab kasutada ka teistsuguse kujundusega materjali. Peale geovõrgu kuju, mängib rolli ka geovõrgu paigaldamise asukoht ballasti vahel.

Selle teemal on toodud välja ka täpsem ülevaade Iraani Teadus ja Tehnoloogia Ülikoolist aastal 2016 STPT test (ühe liipri lükkamise test). Katse sai välja viidud läbi 30 cm, 40 cm ja 50 cm ballastikihi paksuse puhul, kus geovõrku paigaldati erinevatele kõrgustele. Kasutusel oli geovõrk GG AZ( kaugus keskosade vahel – 40 mm, kõrgus keskosade vahel – 40 mm, raskus – 200 gr/m<sup>2</sup>, tõmbetugevus – 20/20 kN/m). [44]

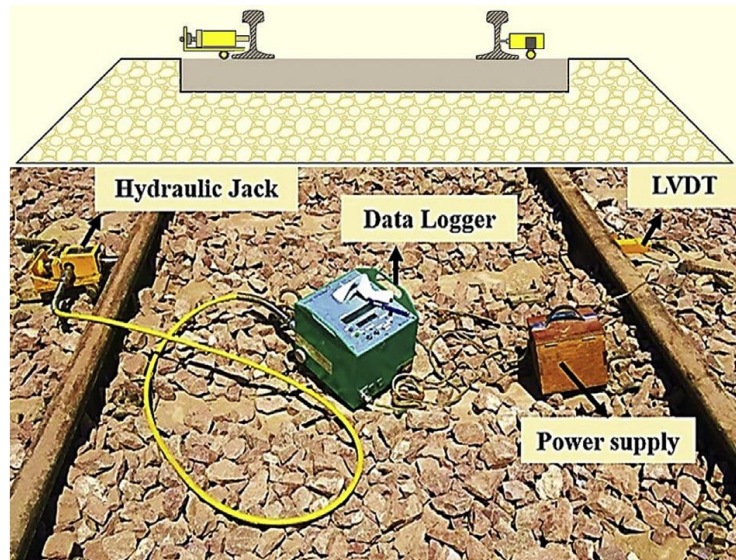


Joonis 30. Geovõrk GG AZ [45]

Testi puhul kasutati hüdraulilist tungrauda, LVDT seadet, akut ja andmekogujat (vt Joonis 32). Liiper vabastati kinnitustest ja ühendati mõõteriistad. Seejärel tungrauaga suruti liiprit ühele poole, ning seejärel teiselt poolt saadi LVDT peale liipri liikumine ja registreeriti liipri lükkamiseks vajaminev jõud 2 mm liipri liigutamiseks. Tulemused näitasid, et kõige parem vastupanu külgsuunalisele stabiilsuse saavutab, kui kasutusel oli ballastikihi paksus 30 cm ja geovõrku oli pandud kaks kihti, sügavusel 10 ja 20 cm. Kõige vähem paneb vastu külgsuunalisele jõule, kui kasutusel pole geovõrku või kui kasutatakse geovõrku sügavusel 40 cm. Joonisel (vt. Joonis 31) on näha mõõtmistulemusi erinevate lahenduste puhul. Kõige parema tulemuse andis kahe geovõrgu kasutamine, sügavusel 10 cm ja 20 cm. [44]



Joonis 31. LVDT test (LRB 0G – geovõrguta, LRB 1G 10 – 1 geovõrk sügavusel 10 cm, LRB 2G 10&20 – 2 geovõrku sügavusel 10 cm ja 20 cm) [44]

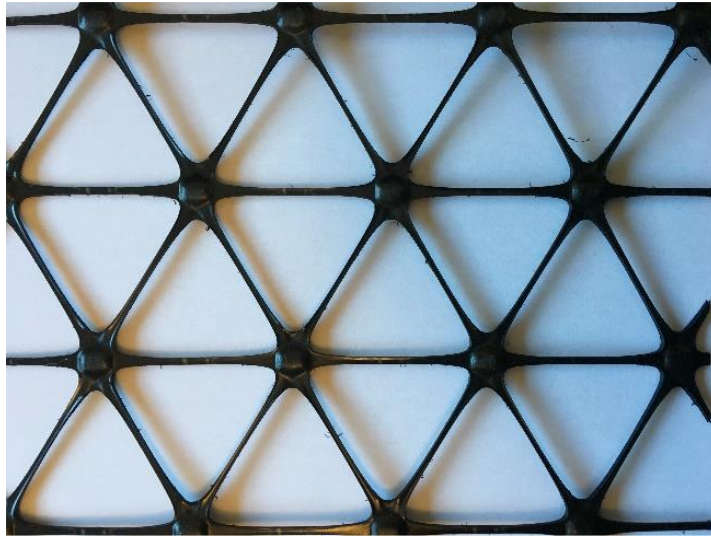


Joonis 32. STPT test [44]

Vaadeldes neid andmeid Eestiga, siis Eestis on kasutusel tavaliselt üks geovõrgu kiht. Paigaldussügavus liipri alt mõõtes on ca 30 cm. Mistõttu on vahe võrreldes kõige parema meetodiga, kus kasutatakse kahte võrku, ca 35 %. Eeldatavalt võib selline tulemus olla saavutatud tänu sellele, kuna killustik on rohkem lukustunud võrgu vahele, hoides seejärel ballasti paigas kindlamalt. Seda tehnoloogiat võiks isegi Eestis kasutada näiteks kurvides, mille raadius on väike ja kiirused suured. Kuna väikestes kurvides on rööpa pinged suuremad, ning oht tee nihkumiseks on ka suurem. Nihkumine peab olema tagatud ka sildade ja viaduktide lähedal, kus tee liikumine peab olema välistatud. Parima lahenduse saamiseks oleks vaja teha teste ka teiste geovõrgu tüüpidega.

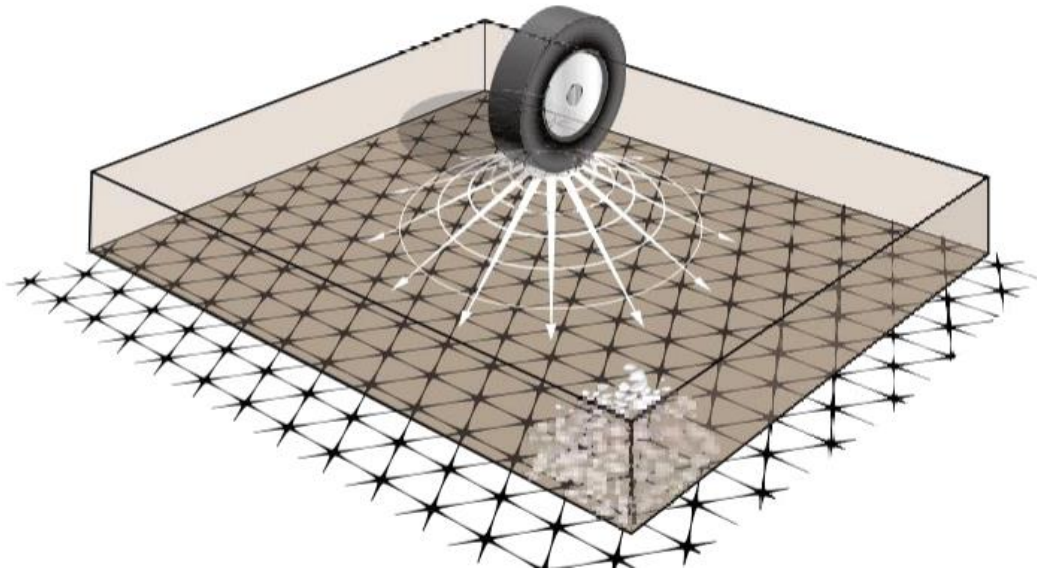
Üheks pakutavaks tüübiks oleks kolmnurkse avaga geovõrk (vt Joonis 33). Antud lahendust on testitud laboris. Labori tulemused andis kõige parema tulemuse kui antud võrku kasutada ballastikihi ja aluskihi vahel. Testi käigus toimusid testi tsüklid vertikaal ja horisontaal suunas 350000 korda. Võrgu puudumisel, andis labori tulemus vajumisel maksimum kuni 7,81 mm. Geovõrgu kasutamisel oli number aga kõigest 5,12 mm, kus vajumist parendati 34% geovõrgu kasutamisel. [46] Võrreldes tavapärase geovõrguga, mis on ruudukujuline, on antud materjal tugevam ning jäigem. Kuna raudteeballast on nurgeline, siis kolmnurkne lahendus pakub paremat sidumist ballastiga. Ballast saab lukustuda paremini kinni. Seetõttu peab silma suurus vastama killustiku fraktsiooni suurusele. Lukustuse tagab geovõrk, kus killustiku nurgelised otsad suunatakse läbi silma ava. Sellise tehnoloogiaga parendatakse killustiku püsivust. Tagades

ka korraliku lukustuse ning ühtsema konstruktsiooni stabiilsuse. Seejärel on ballastikiht ka rohkem püsivam ning ei teki vajumisi ballasti tihenemise tõttu.



Joonis 33. Geovõrk [46]

Antud geovõrgu, TG3, eeliseks on veel koormusest tuleneva stressi ühtlane jaotamine geovõrgu piires. Testimine näitas ka madalaimat mahulist laienemist, ning suurimat normaliseeritud stressisuhet. [47] Väidetavalt toimub ka koormuse jaotamine 360-ne kraadi ulatuses (Joonis 34). Võrreldes Tensar kahe-suunalise võrguga on TriAx võrgul efektiivsem ribiprofiil. Tänu antud lahendusele on võimalik täitematerjali kihi paksust vähendada. [48] Hetkel on raudteel kasutusel kõige tavalisem geovõrku ruudukujulise auguga. Arvatavasti ruudukujuline võrk on kasutusel, kuna raudteel on toimunud enamjaolt rekonstrueerimised, mis tähendab, et alus on iseenesest korraliku kandevõimega. Rail Balticu puhul tuleks kaaluda antud lahendust nii teel kui ka ristumiskohtades.

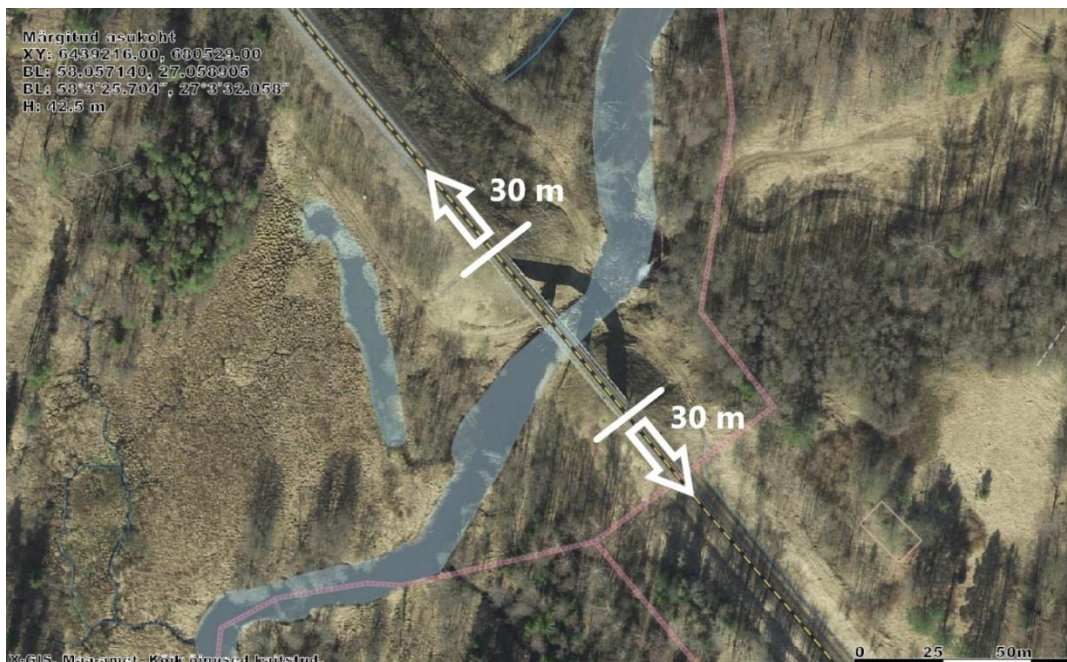


Joonis 34. Koormuse jaotamine [48]

Rail Balticu puhul ristumiskohad on lahendatud ära eritasandiliste ristumistega. Tagades parema ning ühtlase koormuste jaotamise. Autori arvates Rail Balticu ehitamisel tasuks kasutada ülaltoodud lahendust, et tagada parem tee stabiilsus ja püsivus. Sildadel on näiteks üheks probleemiks tee rihi püsivus. Valgemetsa raudteesilla puhul oli näha, et enne silda, liikudes Põlvast Tartu suunas, on tee liikunud paigast telje suhtes ca 2 cm. Sama on ka lähedal oleva raudteepeatuse puhul, kus tees on enne perrooni telg paigast nihkunud teljest ca 2 cm. Tegemist on nähtava jõnksuga. See võib olla tulenenud järsust pidurdamisest ja kiirendamisest. Kuna tegu on perrooni ja sillaga, kus tee püsivus on garanteeritud, ei saa tee deformeeruda ühiselt, vaid liigub ainult lahtiolev lüli. Selle eemaldamiseks oleks vaja toppimismasinaga läbi sõita ja rihtida teed sujuvuse tagamiseks. Teine võimalus oleks seda ennetada, ning enne perrooni või silda ballasti õlga suurendada, ning vahetult pärast kasutuses olles toppimismasinaga tee üle rihtida.

## 10. RAUDTEE ÜLEMINEKUD RAJATISTELE

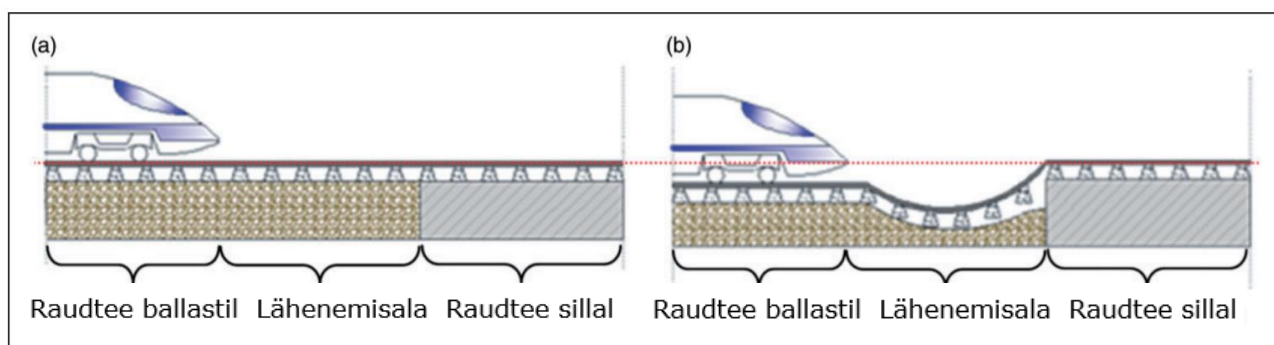
Sildade ning viaduktide lähedal on hetkel suurimaks probleemiks üleminekud. Üleminekukoht on vahetult enne silda või viadukti. Silla ning viadukti konstruktsioon on tavaliselt jäik, kus vajumisi otseselt pole. Ballastiga teel aga võib tee vajuda pidevate veeremi koormuste ning ballasti vibratsiooni tõttu. Suurimaks probleemiks on sillaeelne lõik, kus konstruktsioon muutub. Selle jaoks on Eestis tavaliselt vajalik kaks korda aastas, enne silda ning pärast silda, toppida teed. Toppimistöödega<sup>2</sup> saavutatakse õige kõrgus ning tee ühtlane stabiilsus. Parimaks tulemuseks on vaja toppimistöid teha mõlemale poole silda (vt Joonis 35). Minimaalne vajalik tööõigu pikkus on ca 30 meetrit. Jättes selline töö tegemata, võib kannatada saada sillakonstruktsioon pidevate koormuste mõjul.



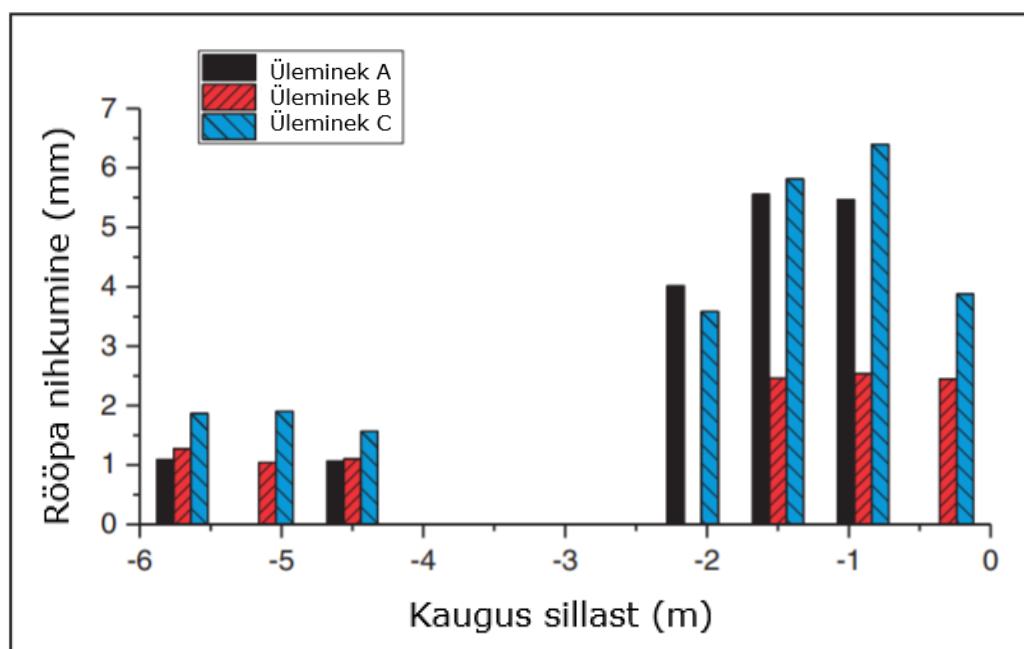
Joonis 35. Põlvamaa Orajõe raudteesild [49]

Raudtee üleminekulõikude analüüsimiseks tehti Delfti Tehnikaülikooli poolt eksperimentaalne test. Testiti mitme ülemineku pikkust reaalses olukorras kiirkaamera abil. Mõõtmise tulemusena selgus lähenemisasal (vt Joonis 36) üleminekukoha tsooni pikkus, milleks oli 4,5 m. Antud piirkonnas toimus kõige suurem vajumine. Sirgel teel ning sillal olid tee vajumised ühtsed. Deformatsioon tekkis vahetult enne silda. Allpool oleval joonisel (vt. Joonis 37) on toodud välja kolme erineva mõõtekoha tulemused. Alates sillast kuni mõõduni 4,5 m oli rööpa nihe suur. Üle selle oli rööpa vertikaalne nihkumine ühtlane, koormuste tekitatud mõju tõttu. [50]

<sup>2</sup> Protsess millega tõstetakse ning rihitakse raudteed telje suhtes, samal ajal lisades vibreerides killustikku liipri alla. Protsessi viib läbi spetsiaalne tehnika, liikudes raudteel.



Joonis 36. Tee olukord vahetult pärast ehitus või hooldust (a) ja tee olukord pärast kasutust (paari kuu möödumisel) [50]



Joonis 37. Rööpa vertikaalne nihkumine lähenemisalas [50]

Selle parendamiseks on võetud kasutusele sildade puhul mitu geovõrku. Mitu kihti paigaldatakse vastavalt projekti nõudmistele. Eelnevas peatükis näitas parimat tulemust kasutades kahte geovõrku sügavusel 10 cm ja 20 cm. Sildade puhul tuleks kasutada sama tehnoloogiat rohkemate geovõrkudega. Sellega tagatakse sillaeelse lõigu kindel stabiilsus.

Mitme geovõrgu põhimõtet kasutatakse ka Tartus Riia-Vaksali tänava ristmiku rekonstrueerimisel, mis haldab ka raudteeviadukti. Raudteeviadukti konstruktsioonis on muldkeha armeerimisel kasutusel kolm kihti geovõrku. Geovõrgu kihtide vahe on 20 cm. Geovõrgu ülemine kiht ulatub kaldasamba tagaseinale. [51]



Koidula poolsed geovõrgu pikkused, alates kaldasamba pealt või äärest, on alustades sügavaimast kihist [51]:

- Kiht 1 – 23550 mm,
- Kiht 2 – 27550 mm,
- Kiht 3 – 31550 mm.

Antud juhul on kasutusel selline lahendus muldkeha puhul. Autori arvates on selline konstruktsioon hea lahendus muldkeha armeerimise puhul. Parimaks tulemuseks soovib autor ka ballastikihis samasugust tehnoloogiat kasutada. Iga ballastikihi järelt tihendada killustik ning lisada geovõrk, seejärel vahetult enne liiprit toimub killustiku tihendamine toppimismasinaga. Toppimismasin tihendab liiprit ca 10 cm, ehk toppimismasin ei kahjusta otseselt geovõrku. Seejärel oleks tagatud ballasti ning muldkeha konstruktsiooni püsivus. Sellist lahendust võiks kasutada ka Rail Balticu üleminekukohtade alades. Tagamaks tee stabiilsus kindlamalt, vähendades seeläbi nõuet pidevatele hooldustöödele üleminekukohtades.

## 11. MUU STABIILISUS

Stabiilsust mõjutab ka tee ehitustehnoloogia. Üheks stabiilsust mõjutavaks protsessiks on rööbaste keevitustööd. Selleks, et rööbas keevitada kokku, peavad olema vastavad seadmed ja vastava kvalifikatsiooniga keevitaja. Keevitamisel peab olema arvestatud mitmete teguritega. Arvestatakse rööpa pikkust, rööpa temperatuuri, pealisehituse koefitsienti ning antud piirkonna neutraalset rööpatemperatuuri, milleks on 27°C (+/- 3 °C) [52]. Isegi kui keevitamisel ei ole arvestatud rööbaste pikenemist õigel kujul, või on keevitatud valel temperatuuril, siis võib juhtuda talvel rööpa purunemine. Suureks mõjutajaks on raudtee ühenduskohad olemasolevates teedes. Lukkudega tees saab rööbas temperatuuri soojenedes pikeneda, kuna pilu rööbaste vahel on tavaliselt maksimum 25 mm. Uutes konstruktsioonides, ka Rail Balticu puhul, on tegemist lukkudeta teega, kus paigaldatakse pikkrööbas. Keevitatud ühenduste puhul pilu puudub. Seetõttu on keevitamisel arvestatud, kui palju on antud piirkonnas rööpatemperatuur ja kui suur on pikenemine, ilmastikuolude muutudes. Keevitades talvel, kus temperatuur on nullilähedane, tuleb rööbast pikendada sellesse pikkusesse, mis ta oleks temperatuuril 27°C. Keevitamisel antud temperatuuril, ei ole vaja rööbast pikendada, vaid toimub koheselt keevitamine ja kinnitatakse rööbas liipri külge. Kui keevitus on tehtud valel temperatuuril ja näiteks rööbast oleks pidanud lõikama, aga seda ei tehtud, siis suvel tahab rööbas pikeneda. Pikenemine toimub nii, et tekib kuumalooge ehk tee väljavise. Seejärel muutub tee asukoht järsku, ning raudteeliiklus teel on peatatud ajutiselt. Teine võimalus on nii, et keevitamisel on pilu liiga suur ja tõmmatakse rööbast pikemaks või keevitatakse suurema piluga. Selle tagajärjel rööbas talvel pikkuses muutub väiksemaks ja võib tõmmata rööpa puruks keevituskohast. Õige keevitustehnoloogiaga on ka konstruktsiooni stabiilsus tagatud.

### 11.1 Ehitustehnoloogia mõju

Arvamust, seoses hetkel kasutataval Pandrol Fastclip kinnitustüübil, on andnud ka kogemustega diplomeetritud raudteeinsener, tema sõnul on suurim probleem Pandrol Fastclip kinnituste puhul ehitustehnoloogia protsess. Kinnituste püsivust ning stabiilsust mõjutab eelkõige rööbaste pea kolmekordne vahetus. Praegune protsess töötab nii, et ehitatakse raudtee sõrestikud eelnevalt kokku, kasutades rööpaid R65, ning mis hiljem omakorda vahetatakse välja rööbaste UIC60 tüübi vastu (ehk pikkrööpa vastu). Paremini oleks stabiilsus tagatud siis, kui rööbas kinnitatakse üks kord liiprite külge. Mitmekordne kinnitamine mõjutab negatiivselt kinnitusjõu omadusi.

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöös sai uuritud raudtee stabiilsuse sõltuvust pealisehitusest, alusehitusest kui ka tehnoloogiast. Analüüsida ka hetkeolukorda raudtee ehitamisel ning leida erinevaid lahendusi.

Uurimistööst võib järeldada, et raudtee püsivuse määrab materjalide valik, töö tehnoloogia kui ka muud asjaolud. Stabiilsuse tagamiseks on vaja enne ehitamist teha valik materjalidest, mis tänu rohketele tootjatele on piisavalt mitmekülgne. Samas materjali testimisel saadud näitajad laboris, ei pruugi olla reaalses kasutuses analoogsed. Seetõttu on vajalik antud kliimas ning koormuste põhjal teostada testlõike. Alternatiivsete tehnoloogiate kasutamine on mõneti positiivne ning suudetakse sellega stabiilsust parendada, kuid kõikuv kliima võib olla probleemiks.

Liiprite, rööbaste, kinnituste ning ka teiste materjalide vahel on suur seos stabiilsuse tagamisel ning püsivusel. Eestis kasutatavad materjalid on hetkel valiku poolelt piiritletud, kuid need materjalid on piisavalt testitud ning stabiilsed, tagamaks raudtee struktuuri püsivuse. Autori arvates hetkel kasutatav UIC60 rööbas, betoonliiprid ning kinnitusviis Pandrol Fastclip ning SKL on hetkel sobivaim lahendus uute projektide puhul, kuid parendada tuleks antud materjalide miinuseid. Nendeks on näiteks nii rööpa kinnitusdetailide kinnitusjõu vähenemine, kui ka rööpa- ja liiprivahelise aluskummi liikumine. Juhul kui kinnitusjõud väheneb, mõjutab see omakorda liiprit ning üleüldist stabiilsust. Samas on võimalik ka kasutada alternatiivseid lahendusi, mis ka tagavad stabiilse struktuuri. Alternatiivsete lahenduste hulgast tuleks testida polümeerliiprite ning ballastita tee vastupidavust ja püsivust Eesti kliimas. Eesti polümeerliiprite vähese kasutuskogemuse tõttu, ei sobi autori arvates antud liiprid peateesse. Kasutust leiaks eelkõige kõrval- ning jaamateedel. Autori arvates on ballastita tee kasutusele võtmine Eestis hea alternatiiv. Eelneva kogemise puudumise tõttu vajab lahendus testlõiku koos tasuvusanalüüsiga.

Rööpmelaiuse teemal arvab magistritöö autor, et standardse rööpmelaiuse, 1435 mm, valik on õige. Standardse rööpmelaiuse puhul pole negatiivseid omadusi, mis kahjustaks üleüldise struktuuri püsivust, vaid pigem on tegu rööpmelaiusega, millel on pikk ajalugu. Uurimistöö käigus selgus, et rööpmelaiustel pole tehtud põhjalikke katseid, kus oleks toodud välja negatiivseid ning positiivseid omadusi. Rööpmelaiuse valik on pigem poliitiline ning majanduslik otsus, kus arvesse võetakse lähinaabrite tehnoloogiaid, eelnevat kogemust ning kaubatranspordi võimalusi.

Ballasti ning alusehitusel on ka suur roll pealisehituse stabiilsuse tagamisel. Uurimistöös selgus, et rõhku tuleks pöörata raudtee ülemineku lõike rajatistele. Ballasti ning alusehituse stabiilsusest sõltub raudtee püsivus ning deformatsioonid. Vältimaks hoolduskulusid ning tee deformatsioone, tuleks parendada ballasti ja alusehitust kasutades paremat geovõrku. Ballasti puhul tuleks testida kolmnurkse augu kujuga geovõrku erinevatel sügavustel killustikballastis, tagamaks

konstruktsiooni parim püsivus, killustiku parem lukustus ning struktuuri suurim stabiilsus. Testide puuduse tõttu Eestis oleva raudtee ballastikihis antud geovõrgu tasuvuse tõttu, tuleks koormusteste teostada vastavas kliimas ning olukorras. Autori arvates võiks lahendust kasutada suurte projekti puhul, nagu näiteks Rail Baltic.

Raudtee stabiilsus on sõltuv ka ehitustehnoloogiast. Tööprotsesside puhul eeldame, et töö toimub vastavalt projektile, kuid tuleks rohkem tähelepanu pöörata ehituskontrolli teostamisel, hilisemate probleemide ennetamiseks.

## SUMMARY

In this Master's thesis the dependence of railway stability on superstructure, the foundation construction as well as on technology is studied. The current situation in the construction of the railway and different solutions are analysed.

It can be concluded from the research that the stability of the railway is determined by the choice of materials, the work technology and other circumstances. To ensure stability, before the construction, it is necessary to choose materials which range is sufficiently diverse due to the large number of manufacturers. However, the results obtained when testing the material in the laboratory may not be the same as in actual use. Therefore, it is necessary to perform test section in the given climate and on the basis of loads. The use of alternative technologies is somewhat positive and can improve stability, but the changeable climate can be problematic.

Sleepers, rails, fasteners as well as other materials have a significant connection in ensuring stability and durability. The materials used in Estonia are currently limited in terms of selection, but these materials have been sufficiently tested and are stable to ensure the stability of the railway structure. According to the author, the currently used UIC60 rail, the concrete sleepers and the fastening method Pandrol Fastclip and SKL are currently the most suitable solution for new projects, but the disadvantages of these materials should be improved. It includes, for example, the reduction of the clamping force of the rail fasteners as well as the movement of the base rubber between the rail and the sleeper. If the clamping force decreases, the sleeper and the overall stability is affected. At the same time, it is also possible to use alternative solutions that also ensure a stable structure. Among the alternative solutions, the durability and stability of polymer sleepers and ballastless road in the Estonian climate should be tested. Due to the limited experience of using polymer sleepers in Estonia, according to the author's opinion, these sleepers are not suitable for the main road. It would be used primarily on side roads and station roads. According to the author, using the ballastless road in Estonia is a good alternative. Due to the lack of previous experience, the solution needs a test section together with a cost-benefit analysis.

Regarding the track gauge, the author of the Master's thesis thinks that the choice of the standard track gauge - 1435 mm is the right one. Standard gauge does not have negative properties that would impair the stability of the overall structure, but it is rather the gauge having a long history. In the course of the research, it has become clear that no thorough experiments have been performed on track gauges, in which the negative and positive properties have been pointed out. The choice of track gauge is rather a political and economic decision that depends on the technologies of the close neighbours, the previous experience and the possibilities of freight transport.

Ballast and substructure also play an important role in ensuring the stability of the superstructure. The study reveals that an emphasis should be placed on transition zones. The stability and deformations of the railway depend on the stability of the ballast and the foundation structure. In order to avoid maintenance costs and road deformations, better geogrids should be used in ballast and foundation structures. In case of ballast, a triangular hole-shaped geogrid should be tested at different depths in ballast to ensure the best structural stability, better gravel locking and maximum structural stability. Due to the lack of tests of the cost-effectiveness of the geogrid in the ballast layer of the railway in Estonia, load tests should be performed in the respective climate and situation. According to the author, the solution could be used for a large project, such as Rail Baltic.

The stability of the railway also depends on the construction technology. In the case of the work processes it is assumed that the work is carried out according to the project, but more attention should be paid to the performance of construction inspections in order to prevent further problems.

## KASUTATUD KIRJANDUSTE LOETELU

- [1] „Rail Baltic Estonia - Future Direct,” 2017.
- [2] „Rail Baltica,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.railbaltica.org/info/ee/interaktiivne-kaart>. [Kasutatud 28 Aprill 2020].
- [3] ERR, „ERR,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/581659/poolt-ja-vastu-rail-balticu-argumendid-kriitikutelt-ja-ministeeriumilt>. [Kasutatud 28 Aprill 2020].
- [4] M. Randlane, Teebrigadiri õpperaamat, Esimene osa, Tallinn: EVR Koehne AS, 2000.
- [5] T. A. & W. K. A. Ticoalu, „An investigation on the stiffness of timber sleepers for the design of fibre composite sleepers,” Centre of Excellence in Engineered Fibre Composites, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia, Queensland, Australia, 2006.
- [6] [Võrgumaterjal]. Available: <https://precast.org/2010/07/railroadties-precast-concrete-or-wood/>. [Kasutatud 6 Märts 2020].
- [7] J. A. Zakeri, „Lateral Resistance of Railway Track,” DOI: 10.5772/35421 · Source: InTech, 2012.
- [8] M. S. P. M. a. T. N. Javad Taherinezhad, „Strain Rates in Prestressed Concrete Sleepers and Effects on Cracking Loads,” *Electronic Journal of Structural Engineering (17)*, pp. 1-8, 2017.
- [9] „Lankhorst Engineered Products,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lankhorstrail.com/en/news/2016/trafikverket-installed-plastic-sleepers>. [Kasutatud 28 Aprill 2020].
- [10] Lankhorst, „Lankhorst,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lankhorstrail.com/en/plastic-sleepers>. [Kasutatud 9 Mai 2020].
- [11] [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rtands.com/track-structure/ballast-ties-rail/pandrol-exclusive-distributor-of-sicut-crossties-in-north-america/>. [Kasutatud 7 Märts 2020].

- [12] M. A. v. Belkom, „Recycled plastic railway sleepers,” Edinburgh, 2015.
- [13] T. J. Nosker ja A. Tewatia, „Permanent Way Institution The Institution for Rail Infrastructure Engineers,” *The Journal*, kd. 135 PART 2, pp. 1-7, 2017.
- [14] SICUT, „SICUT,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://sicut.co.uk/wp-content/uploads/2019/07/The-Rail-Engineer-Article.pdf>. [Kasutatud 11 Mai 2020].
- [15] A. M. A. S. C. E. E. E. Russell Tratman, „Use of metal railroad ties,” WASHINGTON: Government Printing Office, Washington, 1894.
- [16] H. YAMADA, K. OOBA, T. TOMINAGA, H. UEDA, K. KAWABATA, N. NOGUCHI, T. SAKATA ja H. SUSUKI, „History of Steel Sleepers and the Latest Developments,” NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 115, Chiyoda, 2017.
- [17] A. Ghorbani ja S. Erden, „Polymeric composite railway sleepers,” Karabük, Türkiye, 2013.
- [18] T. T. R. S. M. M. G. A. Bernhard Weiss, „Euronoise 2018 - Influence of Sleeper Type on Train Emission,” [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/248\\_Euronoise2018.pdf](http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/248_Euronoise2018.pdf). [Kasutatud 25 Aprill 2020].
- [19] L. Mouldings, „Lankhorst,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lankhorstrail.com/en/plastic-railway-sleepers>. [Kasutatud 25 Aprill 2020].
- [20] „American Rails,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.american-rails.com/spike.html>. [Kasutatud 23 Märts 2020].
- [21] V. Lojda, „SCREW SPIKE PULLOUT TEST OF RECYCLED PLASTIC,” *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, kd. No. 4, nr No. 02, p. 7, September 2015.
- [22] onesteel, „Liberty,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.libertygfg.com/media/2407/onesteel-rail-track-material-catalogue.pdf>. [Kasutatud 6 Aprill 2020].
- [23] Pandrol, „Unpart Rail,” Pandrol, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.unipartrail.com/WebPDF/StockPDF/Pandrol%20Products.pdf>. [Kasutatud 6 Aprill 2020].



- [24] „Vossloh russia,” [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.vossloh-russia.ru/en/products-and-solutions/produkte\\_im\\_ueberblick/](http://www.vossloh-russia.ru/en/products-and-solutions/produkte_im_ueberblick/). [Kasutatud 17 Märts 2020].
- [25] J. R. E. C. P. B. B. W. a. J. M. Mauricio J. Gutierrez Romero, „Advancements in Fastening System Design for North American Concrete Crossties in Heavy-Haul Service,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.arena.org/files/library/2010\\_Conference\\_Proceedings/Advancements\\_in\\_Fastening\\_System\\_Design\\_for\\_North\\_American\\_Concrete\\_Crossties\\_in\\_Heavy-Haul\\_Service.pdf](https://www.arena.org/files/library/2010_Conference_Proceedings/Advancements_in_Fastening_System_Design_for_North_American_Concrete_Crossties_in_Heavy-Haul_Service.pdf). [Kasutatud 17 Märts 2020].
- [26] Pandrol, „Pandrol,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pandrol.com/wp-content/uploads/2018/12/SL3-CAD.jpg>. [Kasutatud 17 Märts 2020].
- [27] P. S. David N. Bilow ja P. P. Dinqing Li, „Concrete Slab Track Test on the High Tonnage Loop at the Transportation Technology Center,” %1 *AREMA Annual Conference & Exposition*, Chicago, Illinois, 2005.
- [28] Railone, „Concrete Sleepers,” Railone, Neumarkt, 2020.
- [29] G. Michas, „Slab Track Systems for High-Speed Railways,” Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2012.
- [30] P. 2020, „Pandrol homepage,” Pandrol, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pandrol.com/product/under-sleeper-pads/>. [Kasutatud 1 Aprill 2020].
- [31] H. Loy, „Under sleeper pads in turnouts,” *Railw. Tech. Rev.*. 2., pp. 35-38, 2018.
- [32] C. Jayasuriya, S. S. Nimbalkar ja B. Indraratna, „Researchgate,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/282614442\\_Analysis\\_of\\_Performance\\_of\\_Under\\_Sleeper\\_Pads-\\_A\\_critical\\_Reveiw](https://www.researchgate.net/publication/282614442_Analysis_of_Performance_of_Under_Sleeper_Pads-_A_critical_Reveiw). [Kasutatud 4 Mai 2020].
- [33] V. A. Profillidis, *Railway Management and Engineering*, Third Edition, Section of Transportation, Democritus Thrace University, Greece: Ashgate Publishing,, 2006.

- [34] D. p. b. t. C. G. o. t. O. f. C. b. R. (. a. t. E. R. A. (ERA), „ANALYSIS OF THE BASIC PARAMETERS FOR MAINTAINING THE TECHNICAL AND OPERATIONAL COMPATIBILITY OF THE 1 520 mm AND 1 435 mm GAUGE RAIL SYSTEMS AT THE COMMONWEALTH OF INDEPENDENT STATES (CIS)-EUROPEAN UNION (EU) BORDER,” Jaanuar 2009. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/agency/docs/analysis\\_1520\\_inf\\_en.pdf](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/agency/docs/analysis_1520_inf_en.pdf). [Kasutatud 13 Märts 2020].
- [35] T. W. B. -. A. T. UNIT, „The Economics of Rail Gauge in East Africa Community,” THE WORLD BANK - AFRICA TRANSPORT UNIT, 2013.
- [36] M. G. A. L. Inesa GAILIENĒ\*, „APPROACH TO RATIONAL CALCULATION OF SUPERELEVATION IN DUAL GAUGE TRACK,” *TRANSPORT*, kd. 33, nr 3: 699–706, p. 8, 2018.
- [37] R. W. Group, „Rail gauge study report,” NATMAP 2050, South Africa, 2009.
- [38] D. M. Herold, „researchgate.net,” September 2012. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/264349120\\_Herold\\_DM\\_2012\\_Peak\\_Oil\\_-\\_Impacts\\_on\\_Trade\\_Master\\_Thesis\\_Danube\\_University\\_Krems\\_Krems\\_Austria](https://www.researchgate.net/publication/264349120_Herold_DM_2012_Peak_Oil_-_Impacts_on_Trade_Master_Thesis_Danube_University_Krems_Krems_Austria). [Kasutatud 30 Märts 2020].
- [39] G. Taujenis, „TECHNICAL SPECIFICATION FOR RAILS R65 and UIC60 (60E1) acc. EN 13674-1:2011,” PROTECHA, Vilnius, 2013.
- [40] T. ISHII, „EUSKADI - High Speed Lines Operation in Japan,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.ets-rfv.euskadi.eus/contenidos/noticia/nptv\\_clausura\\_jornadas/eu\\_def/adjuntos/TAKUMI%20ISHII.pdf](http://www.ets-rfv.euskadi.eus/contenidos/noticia/nptv_clausura_jornadas/eu_def/adjuntos/TAKUMI%20ISHII.pdf). [Kasutatud 3 Aprill 2020].
- [41] P. Costel, „NEW TECHNOLOGIES OF GAUGE VARIATION FOR WHEELSET VEHICLES CROSSING,” *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, 2015.
- [42] ADIF, „Latvias Dzelzcelš,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ldz.lv/sites/default/files/Joakin%20Jimenez%20Otero.pdf>. [Kasutatud 4 Aprill 2020].
- [43] S. N. Khan, „Numerical analysis of deformation and stability in the formation for railway tracks,” BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR GERMANY, Weimar, Germany, 2018.

- [44] M. Esmaeili, J. A. Zakeri ja M. Babaei, „Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance,“ 6 November 2017. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/312580582\\_Laboratory\\_and\\_field\\_investigation\\_of\\_the\\_effect\\_of\\_geogrid-reinforced\\_ballast\\_on\\_railway\\_track\\_lateral\\_resistance](https://www.researchgate.net/publication/312580582_Laboratory_and_field_investigation_of_the_effect_of_geogrid-reinforced_ballast_on_railway_track_lateral_resistance). [Kasutatud 28 Märts 2020].
- [45] Geoplas, „Geoplas,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.geoplas.ru/geo1.html>. [Kasutatud 8 Mai 2020].
- [46] Z. & W. P. & L. O. & C. D. Yu, „True triaxial testing of geogrid for high speed railways,“ *Transportation Geotechnics*, pp. 1-23, Mai 2019.
- [47] T. & I. B. & R. C. Ngo, „A study of the geogrid–subballast interface via experimental evaluation and discrete element modelling,“ *Granular Matter*. 19. 10.1007/s10035-017-0743-4. , pp. 2-17, 5 August 2017.
- [48] T. International. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/46298817/tensar-triaxtm-geovorkude-omadused-ja-kasutuseelised>. [Kasutatud 7 Aprill 2020].
- [49] Maa-amet, „Maainfo kaardirakendus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis>. [Kasutatud 14 Mai 2020].
- [50] H. Wang, V. Markine ja X. Liu, „Experimental analysis of railway track settlement in transition zones,“ *Journal of RAIL AND RAPID TRANSIT*, kd. Vol. 232(6) 1774–1789, 2018.
- [51] S. PROJECT, *Riia tänava ümberehitamise eelprojekt*, 2019.
- [52] A. E. Infra, „pikkrööbastega teede ehitamise ja hooldamise juhend,“ AS EVR Infra, 2011.