

TSDD-SEADMEGA (TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE) TEEKONSTRUKTSIOONI KANDEVÕIME MÕÕTMISE UURING

Lõpparuanne

Projektijuht: Marek Truu

Analüüs: Karmen Kütt-Ehala

Anti Kasuk

Veiko Tikas

Romet Raun

© Transpordiamet [2022]

Töö tellija on Transpordiamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Transpordiameti seisukohaga ega väljenda Transpordiameti poolt heakskiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö tegijal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

SISUKORD

1	Sissejuhatus	3
2	Metoodika.....	4
2.1	Uuringu ülesehitus	4
2.2	Kandevõime mõõtmise metoodikad	4
2.3	Andmete analüüsi metoodika	9
3	Varasemad uuringud	12
4	TSD-mõõtmistulemuste analüüs	14
4.1	TSD-mõõtmistulemuste korratavus	14
4.2	TSD-mõõtmistulemuste sõltuvus teenäitajatest	21
5	TSD-mõõtmistulemuste võrdlus FWD-ga.....	25
5.1	TSD-mõõtmistulemuste kokkulangevus FWD-mõõtmistulemustega	25
5.2	Kandevõime arvutuse võrdlus.....	41
5.3	Nõrkade kohtade tuvastamine	45
5.4	Mõõtmistehniline võrdlus	46
6	TSDD-seadme rakendamine Eesti teedevõrgul	48
7	Kokkuvõte	51
8	Kasutatud kirjandus.....	54

Lisa 1 - Mõõdetud lõikude nimekiri

Lisa 2 - Regressioonimudelite kokkuvõtted

Lisa 3 - Kandevõime üldise elastsusmooduli valemi taandamine

Lisa 4 - FWD ja TSD mõõtmiste joograafikud lõiguti läbipaindele d0 ja näitajatele SCI, BDI ja BCI

1 SISSEJUHATUS

Teekonstruktsiooni tugevus on üks olulisemaid näitajaid teedevõrgu seisukorra hindamisel ja tööde planeerimisel. Praegu kasutatakse Eestis kandevõime hindamiseks FWD seadet, millega mõõdetakse läbipainet konkreetsetes mõõtepunktides. TSDD-tüüpi seadetega (*traffic speed deflecotmeter device*) on võimalik mõõta läbipainet pidevmeetodil ja lühema ajaga.

TSDD-seadme kasutamisel on selged eelised FWD mõõtmiste eest. Mõõtmised on kiiremad, sest seadet on võimalik kasutada liikluskiirusel. Seadme mõõtmistulemused on pidevad, andes seeläbi parema hinnangu terve tee seisukorrast. Samuti on mõõtmiste läbiviimine ohutum, eriti suure liiklusega teedel, sest liiklust ei pea seiskama. Samas mõjutavad TSDD-seadme tööd nii mõõtmis-, keskkonna- kui ka teetingimused (Nayak, Rawat, ja Weligamage 2012).

Käesolev uuring on koostatud Transpordiameti tellimusel. Uuringu eesmärk on hinnata TSDD-seadme kasutatavust Eesti teedevõrgu kandevõime hindamisel. TSDD-seadme kasutuse hindamiseks vastatakse uurimistöös järgnevatele uurimisküsimustele. Uurimisküsimused põhinevad lepingu tehnilisel kirjeldusel.

1. Millised tee- ja keskkonna tingimused mõjutavad TSDD-mõõtmistulemusi?
2. Milline on TSDD mõõtmistulemuste korratavus?
3. Millised on seosed FWD ja TSDD mõõtmistulemuste vahel?
4. Millised on seosed FWD ja TSDD mõõtmistulemuste läbi arvutatud kandevõimetusel?
5. Kas TSDD suudab tuvastada nõrku kohti katendis?
6. Millised on mõõtmistehnilised erinevused FWD ja TSDD-seadmete kasutamisel?
7. Kuidas rakendada TSDD-seadet Eesti teedevõrgul?

TSDD-seadme kasutuse hindamiseks viidi 2021. aasta sügisel läbi mõõtmised 9 erineval teel, enamustel teedel mõlemas suunas. Korratavuse hindamiseks viidi kahel teel läbi ka kordusmõõtmised. Tulemusi võrreldi FWD-mõõtmistulemustega, mis olid läbi viidud kas samal sügisel või eelnevate aastate kevadel, suvel või sügisel. Järgmises peatükis kirjeldatakse täpsemalt mõõteseadmeid ja tulemuste analüüsi metoodikat.

2 METOODIKA

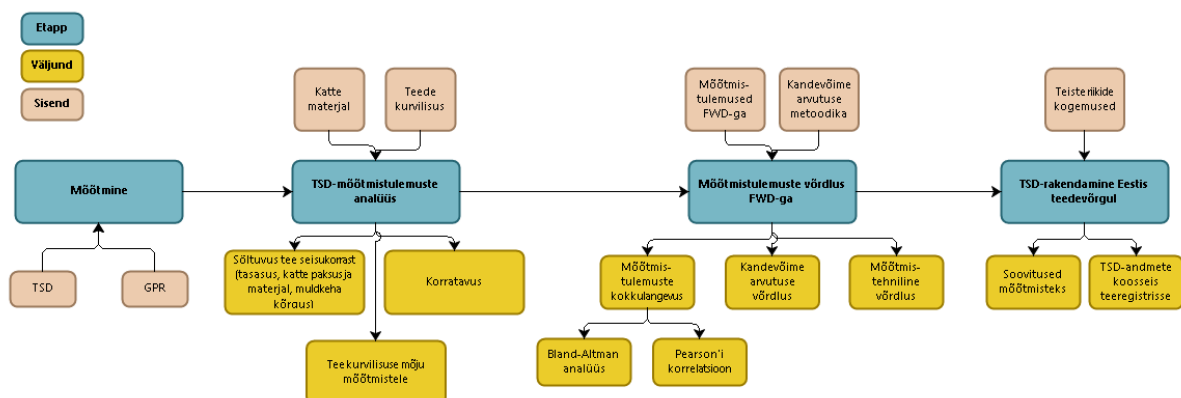
2.1 Uuringu ülesehitus

Uuring on jaotatud nelja etappi. Esimeses etapis viiakse läbi mõõtmised TSDD-seadmega, mille käigus saadakse andmed teekonstruktsiooni läbivajumite kohta. Samaaegselt mõõdetakse ka maaradariga katte paksusi.

Järgmises etapis viiakse läbi FWD-ga mõõdetud ja TSDD-seadmega mõõdetud tulemuste võrdlus. Vaadeldakse Pearsoni korrelatsiooni, korratavust ja Bland-Altmani analüüsi (Altman ja Bland 1983).

Kolmandas etapis arvutatakse Eestis kasutusel oleva meetodika põhjal mõlemale mõõtmisele kandevõime ja võrreldakse tulemusi. Lisaks uuritakse mõõtmistulemuste sõltuvust katte konstruktsioonist, katte paksusest ja muldkehast. Järgnevalt hinnatakse mõõtmistulemusi ja järeldusi varasemalt teistes riikides läbiviidud uuringutega. Viimasena viiakse läbi mõõtmistehniline võrdlus kate mõõtmismeetodi vahel.

Neljandas etapis analüüsitakse TSDD-mõõteseadme rakendamist Eesti teedevõrgul. Siinkohal võetakse arvesse nii mõõtmistehnilisi aspekte kui ka mõõtmistulemuste analüüsi. Esitatakse soovitusel ja ettepanekud TSDD-seadme edasiseks kasutamiseks.



Joonis 1: Uuringu meetoodika

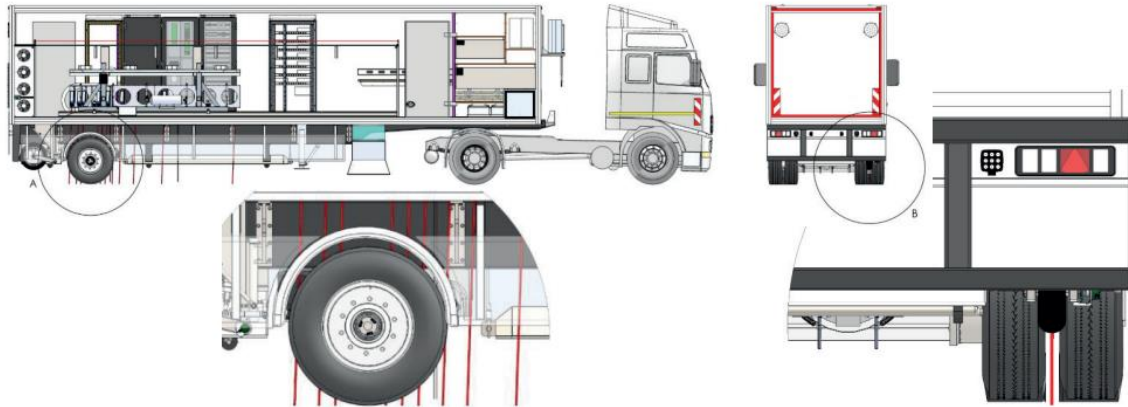
Järgnevad alapeatükid kirjeldavad täpsemalt uuringus kasutatud meetodikaid. Järgmises peatükis kirjeldatakse analüüsi kaasatud mõõtmisseadmete (TSDD, maaradar, FWD) tööpõhimõtteid. Alapeatükis Andmete analüüsi meetodika kirjeldatakse kuidas viiakse läbi FWD ja TSDD mõõtmis- ja rakendustulemuste võrdlused. Viimases alapeatükis analüüsitakse varasemaid uuringuid ja rahvusvahelisi kogemusi TSDD-seadme kasutamisest kandevõime hindamisel.

2.2 Kandevõime mõõtmise meetodikad

2.2.1 Mõõtmised TSDD-seadmega

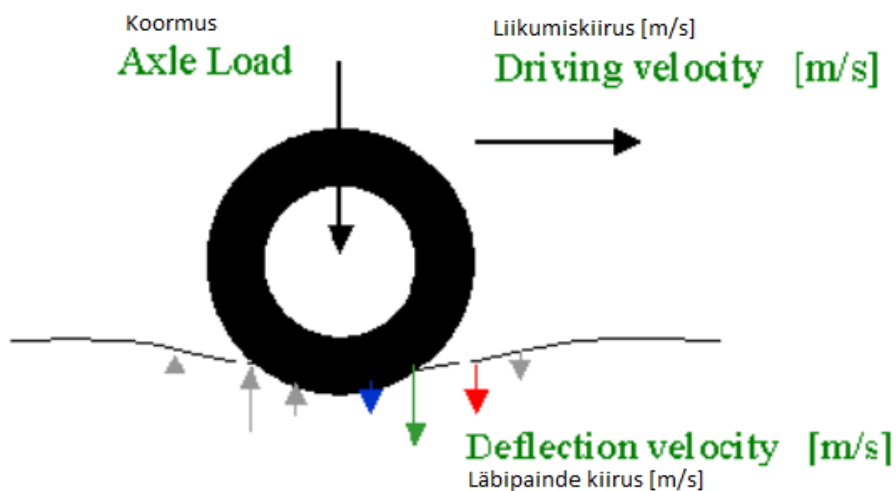
TSDD-seade (Traffic Speed Deflectometer Device) on liikuv seade läbivajumi pidevaks mõõtmiseks. TSD-seade (Traffic Speed Deflectometer) on üks TSDD-seadme alaliik. Seade koosneb pikast ja jäigast talast, mis on paigaldatud veoki haagisesse. Talale on paigaldatud Doppleri-, kiirendus- ja laseriga kauguse mõõtmise andurid. Nende anduritega jälgitakse, et tala oleks mõõtmiste ajal teega

võimalikult paralleelne ja mõõdetakse teekattes TSD-seadme massist tekkivat läbivajumit. TSD-seadme koormus on 100 kN ja see on paigutatud veoki tagumisele teljele. (Zofka ja Sudyka 2015)

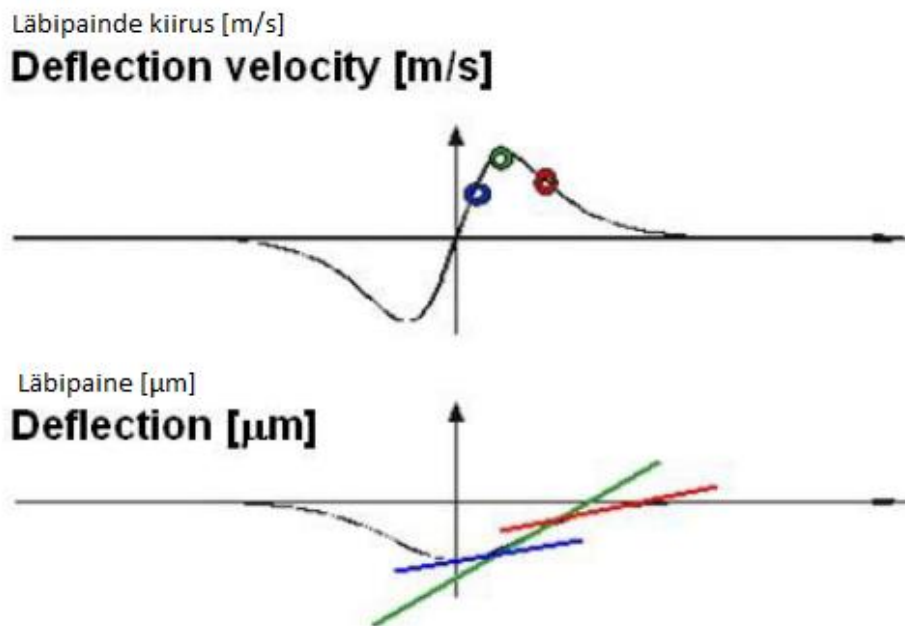


Joonis 2: TSD-seadme skeem (GREENWOOD TSD - project level assessment of the whole network 2021)

Veoki sõidu ajal registreeritakse tekkivad vertikaalsed läbivajumi kiirused (*deflection velocity*). Järgmise sammuna jagatakse läbivajumi kiirused veoki sõidukiirusega, mille tulemusena saadakse läbivajumi puutejoon (*deflection slope*) igas mõõdetud punktis. Neid tulemusi integreerides on võimalik saada arvutuslikud läbivajumid. (Rasmussen et al. 2008; Zofka ja Sudyka 2015)



Joonis 3: TSD-seadme tööpõhimõte - teekatte läbivajum liikuva koormuse all (Rasmussen et al. 2008)



Joonis 4: TSD-seadme tööpõhimõte - teekatte läbivajumi kiirus ja läbivajumi kauss koos läbivajumi puutejoonega (Rasmussen et al. 2008)

TSD-ga on võimalik mõõta läbivajumeid liikluskiiirusel (80 km/h). TSD seadet on kasutatud alates aastast 2004, alates aastast 2005 on sellega mõõdetud Taani riikliku teedevõrku. Kokku on kasutuses üle maailma 15 TSD seadet. (GREENWOOD TSD - project level assessment of the whole network 2021)

Mõõtmistel kasutatud TSD-seade kuulub Poola teede ja sildade uuringu instituudile (Instytut Badawczy Dróg i Mostów) ja selle on välja arendanud Greenwood Engineering. Seadmel on 11 andurit kaugustel -450, -300, -200, 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200 ja 1500. Selleks et vähendada temperatuuri mõju talale, on seadmesse paigaldatud kliimaseadmed ja tala on eraldatud ümbritsevast keskkonnast pleksiklaasiga.

Lisaks TSD-seadmele on maailmas laiemalt kasutusel veel RWD (Rolling Wheel Deflectometer) ja RDD (Rolling Dynamic Deflectometer) tüüpi TSDD-seadmed katte läbivajumi pidevaks mõõtmiseks. RDD seade on TSD ja RWD seadmetest aeglasem. Selle tööpõhimõte sarnaneb pigem FWD-le ning kasutab sinusoidset koormust ja geofoone läbivajumi mõõtmiseks. Samas on RDD-seade täpsem ja kõrgema lahutusvõimega, sobides seetõttu paremini projektitasandil mõõtmisteks.

RWD-seade kasutab sarnaselt TSD-seadmele liikuvat koormust ja lasersensoreid läbivajumi mõõtmiseks. Mõlemate seadmetega on võimalik mõõta liikluskiiirusel. (Nam, Stokoe, ja Youn 2019) RWD-l on kasutusel *supersingel* ratas ja mõõtmisi tehakse ratta kõrval, mitte rataste keskel nagu TSD-seadmel. Seetõttu erinevad ka nende meetodikad vajumikausside leidmiseks - RWD puhul on vajumikauss tervenisti modelleeritud.

TSD-seadmega mõõdetud lõikude nimekiri on antud Lisas 1.



Joonis 5: Mõõtmistel kasutatud TSD-seade

2.2.2 Mõõtmised maaradariga

Maaradar-tehnoloogia (GPR e. Ground Penetrating Radar) võimaldab mõõta teekatte dielektrilisi väärtusi, mille põhjal omakorda arvutatakse teekatte kihi paksused.

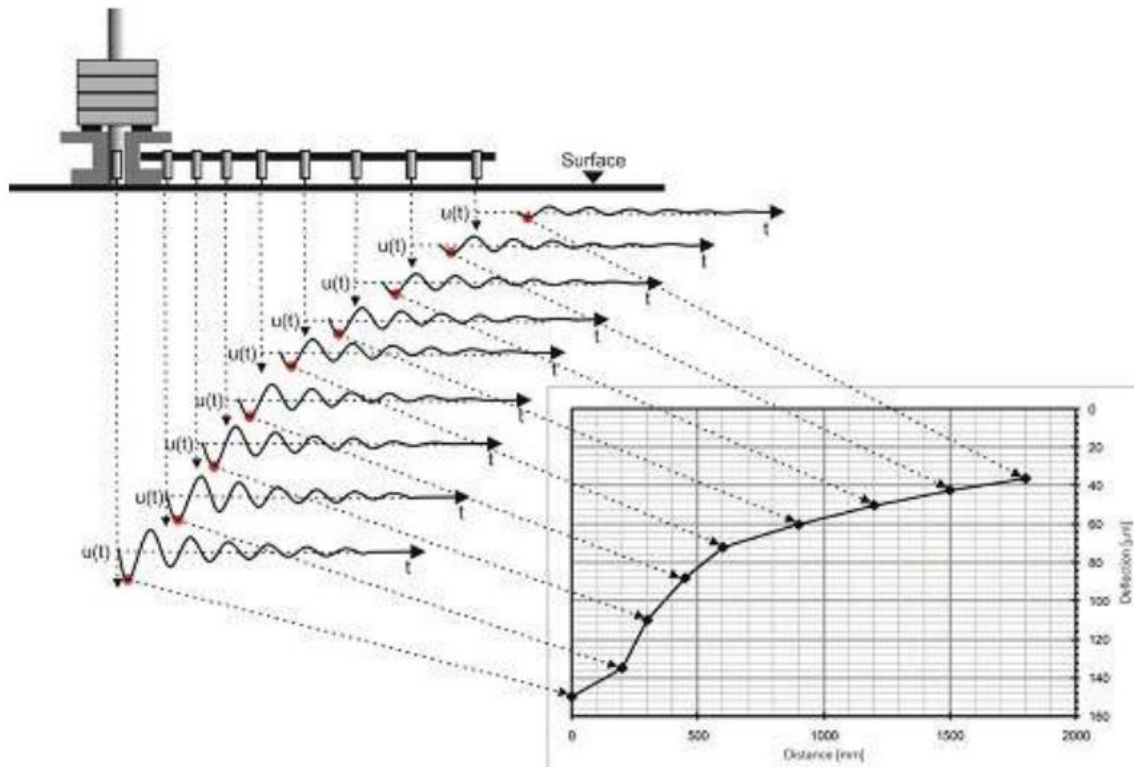
Erinevalt traditsioonilisest puurkehadega kontrollimisest saadakse radariga mõõtmisel katkematu info kontrollitava asfaltbetoonkatte jäävpoorsuste ja paksuste väärtustest mõõtmisrajal. Kuna mõõtmispunktide maht on radariga mõõtmisel tuhandeid kordi suurem tehtavate puurkehade arvust, vähendab see oluliselt hinnangute juhuslikkust (Maanteeamet 2017).

Maaradar on paigaldatud TSD-seadmele ja maaradari mõõtmised toimusid läbivajumi mõõtmistega paralleelselt.

2.2.3 Mõõtmised FWD-seadmega

Uuringus kasutatakse varasemalt PMS-mõõtmiste käigus saadud FWD andmeid.

FWD-seade on langeva raskusega koormusseade, mis imiteerib veoki ratta koormust teekattele ühes kindlas punktis kiirusel 60 km/h. FWD impulssi pikkus on 25 kuni 30 ms ja koormus 50kN. Igal seadme koormamisel mõõdetakse andurite kaudu teekattes laine levimise kiirust. Läbivajumised arvutatakse selle kiiruse kaudu (Jansen 2015). Koormamise ajal mõõteauto ei liigu. Vajumite ja katte temperatuuri kaudu on võimalik arvutada katte elastsusmoodulid (ühik MPa) ja tegurid SCI, BDI ja BCI, mis iseloomustavad vastavalt pealmiste kihtide, alumiste kihtide ja aluspinnase tugevust.



Joonis 6: FWD-seadme tööpõhimõtte läbivajumi arvutamisel(Jansen 2015)

Kõigil mõõtmistel kasutati seadet Dynatest FWD-8002. Seade asetseb mõõteauto taga haagisel. Mõõtmistel kasutatud langev koormus oli 50kN.

FWD-seadet on kasutatud laialdaselt üle maailma alates 1980ndatest nii asfalt kui ka betoonteedel (Chai et al. 2016).



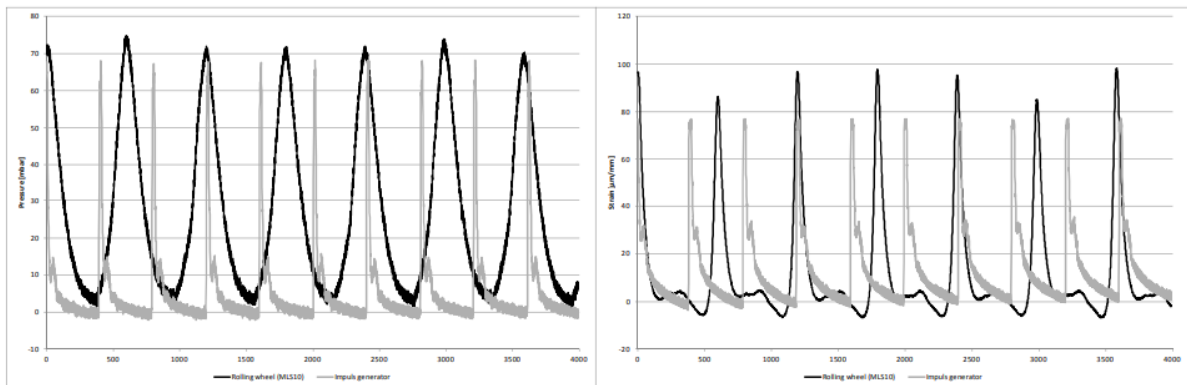
Joonis 7: Kandevõime mõõtmistel kasutatud koormusseade Dynatest FWD-8002

Tavapäraselt on kandevõimet iseloomustav elastusmoodul arvatud FWD-seadmega mõõdetud vajumite kaudu kasutades Eesti metoodikas kirjeldatud lihtsustatud valemit (Maanteeamet 2017). See võtab arvesse, et mõõdetud kandevõime on kõige madalam aprillis, kui toimub sulamine ja kõige kõrgem suvel (Aavik 2003).

2.2.4 Erinevused TSD ja FWD seadme tööpõhimõtetes

Põhiline erinevus FWD ja TSD-seadme tulemuste vahel on selles, kuidas läbivajum kattele tekitatakse. TSD on liikuv koormusseade, FWD seisab paigal. Seega mõjutavad TSD mõõtmistulemusi katte ebatasasused, näiteks IRI.

Lisaks on koormuse rakendamine erinev liikaval koormamisel ja seisval koormamisel (M. Elseifi ja Zihan 2018; Jansen 2015). FWD-ga rakendatav koormus mõjub punktile lühemat aega, kui 80 km/h liikuva ratta poolt üksikule punktile tekkiv koormus. Seda on ka laboratoorselt tõestatud vaadeldes seisva impulssi ja liikuva ratta mõju asfaldi alla. Alumisel joonisel on näha asfaldi alumisel pinnal tekkiv pinge (vasakul) ja deformatsioon sidumata kihis (paremal) liikuva ratta (must joon) ja seisva impulsi generaatoriga (hall joon).



Joonis 8: Sidumata kihis tekkiv pinge (vasakul) ja deformatsioon (paremal) liikuva ratta (must joon) ja seisva impulsi generaatoriga (hall joon) (Jansen 2015)

Kumbki seade ei mõõda ka tegelikult läbivajumist, kuigi see esitatakse väljundina seadme kasutajale. TSD-seade mõõdab läbipainde kiirust ja FWD mõõdab laine kiirust mitmes erinevas punktis, mis seejärel arvutatakse ümber läbivajumiks.

On selge, et mõõdetavate andmete vahel ei saagi olla täielikku kokkulangevust. Lisaks võib tulemuste korrelatsioon sõltuda ka teekatte muudest teguritest, kuna erinev on nii koormamise meetod, koormamise aeg kui ka see, kuidas läbipaine arvutatakse. Oluline on esiteks hinnata, millised tegurid võivad mõjutada kummalgi mõõtmisel mõõtmistulemust. Teiseks, tuleb uurida, kas TSD mõõtmismeetodit on võimalik kasutada, et hinnata konstruktsiooni kandevõimet ja tuvastada nõrgad kohad kattes.

2.3 Andmete analüüsi metoodika

2.3.1 TSD mõõtmistulemuste analüüsi metoodika

Uurimisküsimusele "Milline on TSD mõõtmistulemuste korratavus?" vastamiseks vaadeldakse lõike, millel viidi läbi TSD-ga paraleelmõõtmised. Maanteel 2 viidi läbi mõlemas suunas 4

paralleelmõõtmised, maanteel 14 viidi läbi 2 kordust ühes suunas ja 3 kordust teises suunas. Kokku on võimalik korratavust hinnata 257 km mõõdetud tee kohta. Korratavust hinnatakse läbi kogutud standardhälbe ja graafiliselt. Saadud tulemusi hinnatakse varasemalt läbi viidud uuringutega ja ka FWD mõõtmistulemuste korratavusega.

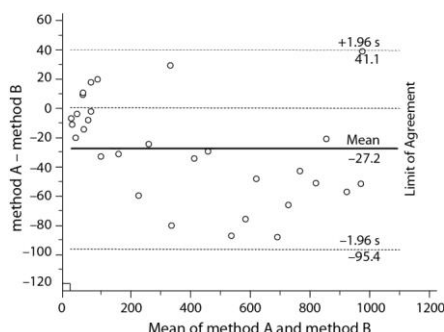
Lisaks uuritakse millised tee- ja keskkonna tingimused mõjutavad TSD-mõõtmistulemusi. Varasemad uuringud on näidanud, et nii teekatte materjal, tasasus, kurvilisus kui muud tee karakteristikud mõjutavad TSD-mõõtmistulemusi (Seyfi et al. 2013; Board, National Academies of Sciences, ja Medicine 2013; Katicha et al. 2020). Kurvilisuse mõju hindamiseks vaadeldakse lõike, kus viidi läbi mõõtmised samal sõiduteel, aga erinevates suundades. Sellised mõõtmised viidi läbi maanteedel 14, 29, 37, 14162 ja 14170. Andmetele lisatakse võimalusel roopa mõõtmistest tee kurvilisuse näitaja. Kokku hinnatakse tee kurvilisuse mõju 330 km.

Andmed teekatte materjalide ja mulde kõrguse kohta pärinevad töö käigus teostatud puurkehade analüüsist ja maanteedel 1 ja 2 projektdokumentatsioonist. Tasasuse mõõtmised teostati TSD-seadmega läbipainde mõõtmiste ajal. Kihi paksusi mõõdeti maaradariga läbipaindega samaaegselt. Kurvilisuse andmed pärinevad Teede Tehnokeskuse andmebaasidest (andmed sammuga 1m) ja teeregistrist (andmed vaid 100m sammuga) (Transpordiamet 2022).

2.3.2 TSD-mõõtmistulemuste FWD-ga võrdlemise metoodika

Et vastata uurimisküsimusele "Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste vahel?" kasutatakse kahte erinevat meetodit. Esmalt võrreldakse korrelatsiooni mõlema seadme vahel läbi SCI ja läbivajumite.

Seejärel tehakse SCI ja läbivajumite kaudu Bland-Altman analüüs. Bland-Altmani metoodikat kasutatakse väga laialdaselt kahe erineva mõõtmismetoodika omavaheliste seoste hindamiseks. Sellel kujutatakse graafiliselt *scatterplotil* kahe eri tüüpi mõõtmiste keskmine väärtus $((A+B)/2)$ ja hälve $(A-B)$. Graafikule tõmmatakse kaks horisontaalset joont, mille vahele jääb 95% mõõtmistulemustest. (Altman ja Bland 1983) Selle meetodi eelis korrelatsiooni ees seisneb selles, et korrelatsioon mõõdab vaid muutuja lineaarset sõltuvust ja võib arvestamata jätta olulisi seoseid nende kahe muutuja vahel (Mansournia et al. 2021). Katicha et al. (2020) uuringus kasutati samuti Bland-Altmani metoodikat, et võrrelda TSD ja FWD mõõtmiste omavahelisi seoseid.



Joonis 9: Bland-Altman graafiku näide (Giavarina 2015)

Kahe metoodika mõõtmistulemuste erinevuste selgitamiseks vaadeldakse eraldi erinevaid tegureid, nagu mõõtmiste läbiviimise aeg, teekatte seisukord ning asfaltkatte paksus ja muldkeha kõrgus. Analüüsitakse nende mõju kahe seadme mõõtmistulemuste erinevustele.

Eestis kasutatakse teede projekteerimisel ja võrgumõõtmistel kandevõime hindamiseks Andrus Aaviku doktoritöö põhjal väljatöötatud lihtsustatud meetodikat (Aavik 2003; Maanteeamet 2017). Aastal 2021 viidi läbi uuring ja sellega seotud magistritöö, mis täpsustas seda mõõtmismetoodikat (Kaal et al. 2020; Viljas 2021). Et leida vastust uurimisküsimusele "Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste läbi arvutatud kandevõimetele?" arvutatakse mõlema seadme mõõtmistulemuste põhjal kandevõime kasutades selleks töös leitud erinevaid konstante. Viljas (2021) leidis, et katte paksuse kasutamine analüüsis annab kandevõime arvutamisel KAP projekteerimisprogrammis leitud kandevõimele lähema tulemuse kui vaid temperatuuri ja kuuteguri arvestamine. Seega leitakse kandevõime nii Aaviku doktoritööl põhineva elastsete katendite juhendi meetodika järgi kui ka uues uuringus täpsustatud meetodikatega ETM~2003 konstantidega (E - üldine elastsusmoodul, T - temperatuur, M - kuu) ja ETMHK konstantidega (H - seotud kihtide paksus, K - katte paksus).

FWD-ga mõõdetud läbipainde andmed pärinevad Teede Tehnokeskuse andmebaasidest ja teeregistrist (Transpordiamet 2022). Teede Tehnokeskuse andmebaasidest oli võimalik saada andmeid ka mõningatel suund 2 lõikudel, millel oli näiteks uute katete vastuvõtmise raames teostatud mõõtmised. Teeregistrist võeti nende lõikude andmed, mida Teede Tehnokeskuse andmebaasides ei olnud.

Uurimisküsimusele "Millised on mõõtmistehnilised erinevused FWD ja TSDD seadmete kasutamisel?" vastamisel kasutatakse mõõtmiste käigus saadud kogemusi ja teistest selleteemalistest uuringutest kogutud infot. Uuringu käigus viidi läbi vestlused TSD-seadme operaatoritega Saksamaa riiklikust teedeuuringu instituudist BAST ning TSDD-seadme tootjatega Greenwood Engineering (TSD-seade) ja Ramboll (Raptori RWD-seade). Saadud teadmisi koos uuringu käigus kogutud informatsiooniga kasutati, et vastata uurimisküsimusele "Kuidas rakendada TSDD-seadet Eesti teedevõrgul?".

3 VARASEMAD UURINGUD

TSDD-seadme rakendamist läbipainde mõõtmiseks on väga põhjalikult uuritud alates 1980ndatest. Sel teemal on kirjutatud nii uuringuid, teaduslikke artikleid kui ka lõputöid. Järgnev peatükk annab ülevaate varasematest rahvusvahelistest uuringutest TSD rakendamisel ja selle võrdlusest kasutuseloleva FWD-seadmega.

Varasemad uuringud on näidanud TSD-seadme mõõtmistulemuste head korratavust nii üksikmõõtmistel (Chai et al. 2016; Shrestha 2017) kui ka erinevatel aastatel läbiviidud võrgumõõtmistel (Rasmussen et al. 2008). Samuti TSD-seadme poolt tekitatud müral ühtlane standardhälve ja ka mõõtmiste standardhälve on ühtlane erinevatel mõõtmistel ja mõõtjatel (Shrestha 2017). Oma katsetes näitas C. Nielsen et al. (2021), et TSD mõõdetud läbipainde kiirus vastab katte sees olevate anduritega mõõdetud läbipainde kiirusele. Samuti on varasemates uuringutes TSD-mõõtmistulemuste analüüsi kaasatud maarakadari mõõtmistulemusi kandevõime hindamiseks võrgumõõtmistel (Maser et al. 2019).

TSD-seadmega mõõtmisel on probleeme tekkinud väga jäikade asfaltkatete mõõtmisel. Analüüs näitas, et põhjuseks on kalibreerimine ja probleemi lahendamiseks tegeleb seadme tootja (Rabe 2013; Jansen 2015). Samuti on uuringud näidanud, et mõõtmistulemuste täpsust võivad mõjutada seadme töötingimused (näiteks temperatuur haagises) (Rabe 2013) ning keskkonna ja teekatte olukord (Krärup et al. 2006). Lisaks nägi Rabe (2013) Saksamaal läbiviidud uuringus, et tee kurvilisus või rea vahetamine võib avaldada suurt mõju TSD-ga mõõdetud läbipainde tulemusele. Oma uuringus tõdes ta, et vertikaalse koormuse pidev mõõtmine on seega väga oluline.

Varasemad uuringud on näidanud erinevusi TSD ja FWD seadmega mõõdetud läbipainetes. See erinevus võib tuleneda seadmete erinevast tööpõhimõtetest, katte ebatasasustest, mis mõjutavad TSD-tulemusi või koormuse rakendamise erinevustest (Rada et al. 2011).

Tavapärased kandevõime E-mooduli arvutamise mudelid põhinevad FWD-seadmetel ja üldiselt eeldavad katendi lineaar-elastset vastupanu koormusele. Katsed on näidanud, et TSD mõõtmistel ei käitu katend täiesti elastselt, vaid esineb märkimisväärset sumbumist. Seega ei pruugi tavapärased FWD kandevõime arvutusmeetodid sobida TSD-andmetega kasutamiseks (S. Nasimifar 2015; C. P. Nielsen 2019). M. A. Elseifi, Zihan, ja Icenogle (2019) on andnud soovitusi TSD-andmete jaoks töötada välja eraldi arvutusmetoodika, mis ei eeldaks TSD andmete taandamist FWD andmetele vastavaks ning metoodika, mis võimaldaks TSD-andmete kasutamist võrgumõõtmistel ja PMS-otsustusprotsessis. M. Nasimifar, Thyagarajan, ja Sivaneswaran (2017) on ka leidnud võimaluse katte E-moodulite arvutamiseks läbi TSD läbivajumi kiiruste (ilma, et oleks vaja arvutada läbipainded). Samas on see meetod väga arvutusmahukas ja ei oleks praktiline võrgumõõtmistel. C. P. Nielsen (2019) leidis, et TSD-andmete põhjal kihtide E-moodulite arvutamiseks on oluline, et oleks hea eelnev ülevaade katte kihtidest ja nende paksustest. See aitab vältida kollineaarsust, kus väga erinevad katte parameetrid annavad sarnaseid arvutustulemusi.

Vestlusest Soren Rasmusseniga Rambollist selgus, et Raptori RWD puhul viiakse vajumikausid FWD vajumikaussidega samale tasemele läbi E-mooduli arvutuse. Esmalt leitakse RWD vajumikausside järgi selle jaoks välja töötatud metoodikaga E-moodulid (*backcalculation*) ja seejärel tehakse

tagasiarvutus FWD metoodikast (*forward calculation*), et leida FWD seadmele võrdväärseid vajumikausi arvud. Sellise metoodika puhul on kummagi seadme läbivajumid vägagi sarnased (eeldusel, et mõõtmised on läbiviidud samaaegselt ja FWD seade on seadistatud RWD-ga sarnasele kiirusele).

TSD-seadet on katsetatud ka läbipainde mõõtmistel lennujaamas. TSD-seade suutis mõõta sealseid väga jäiku katteid. Ka SCI300 väärtused vastasid varasemalt HWD-ga mõõdetud väärtustele. TSD andmetest eristusid väga jäigad ja jäigad piirkonnad kattes. Samas tekkis probleem TSD andmete põhjal kandevõime arvutamisel ning TSD ja HWD elastsusmoodulid ei langenud omavahel kokku. (C. Nielsen ja Jensen 2021)

4 TSD-MÕÕTMISTULEMUSTE ANALÜÜS

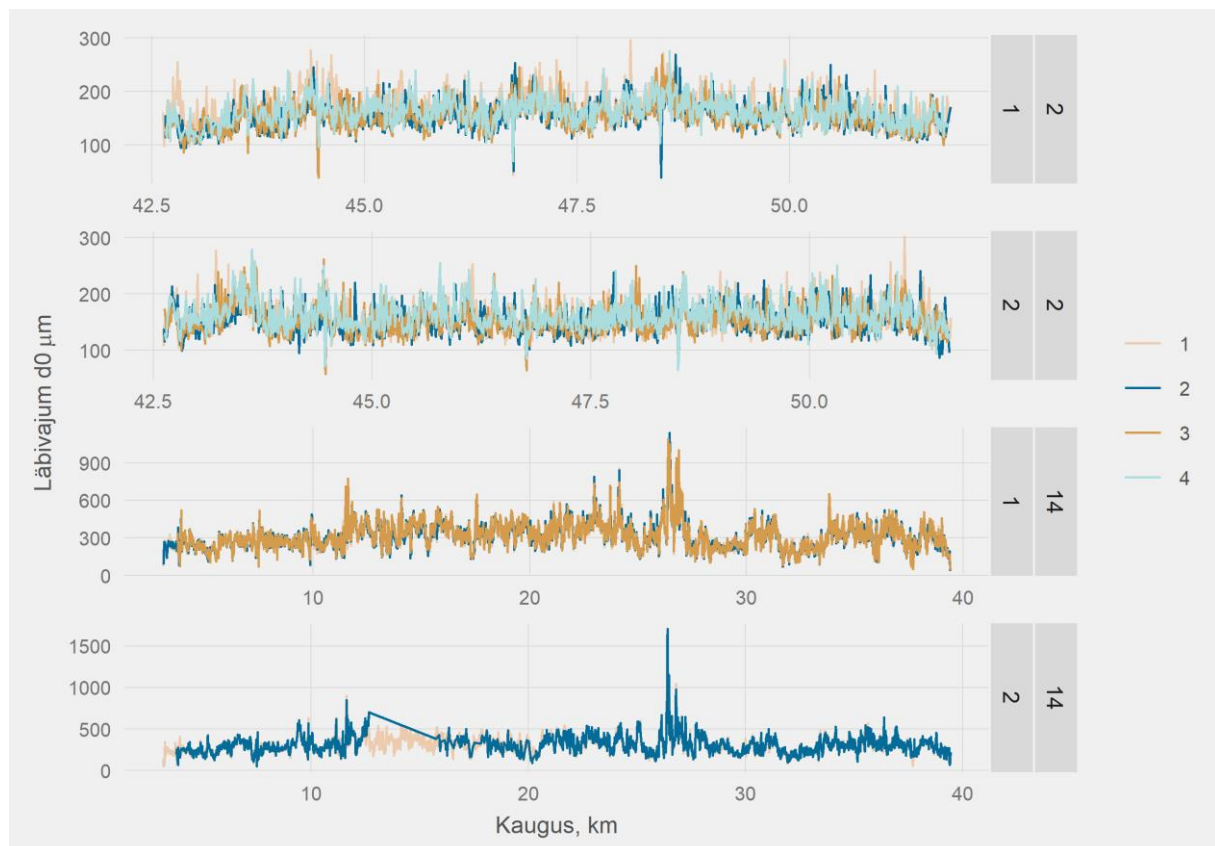
4.1 TSD-mõõtmistulemuste korratavus

TSD-mõõtmistulemuste korratavuse hindamisel vaadeldi nendel lõikudel, millel viidi läbi mitu TSD-ga mõõtmist, mõõtmistulemuste (d_0 , d_{300} , d_{900} ja SCI, BDI ja BCI) kokkulangevust. Lõigud, millel viidi läbi kordusmõõtmised olid maantee nr 2 (välimised rajad neli korda) ja maantee nr 14 (suund 1 kolm ja suund 2 kaks korda). Korratavuse hindamiseks vaadeldakse näitajate SCI, BDI ja BCI ning d_0 , d_{300} ja d_{900} kogutud standardhälvet, näitajate Pearsoni korrelatsiooni ja kokkulangevust graafiliselt.

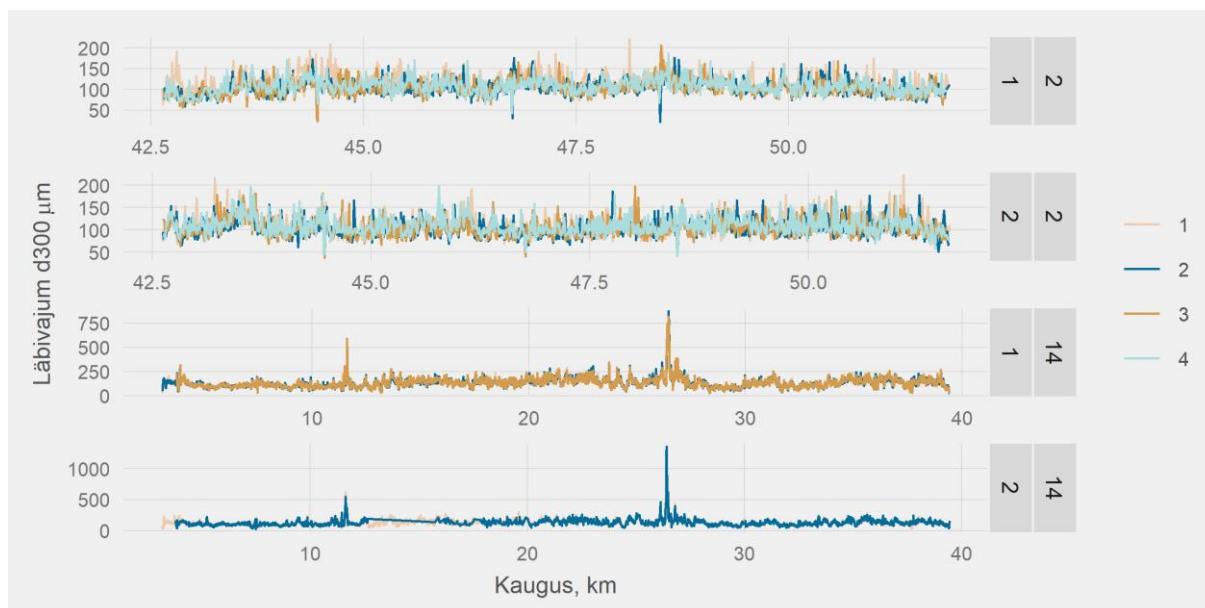
4.1.1 Graafiline kokkulangevus

Graafikute vaatlemisel on näha, et nii läbivajumite d_0 , d_{300} kui ka SCI joonised langevad omavahel kokku. Mõõdetavad suurusjärgud on kõigil kordusmõõtmistel samad. Nii suuremates tippudes kui ka langustes on näha, et kõik mõõtmised näitavad need ära.

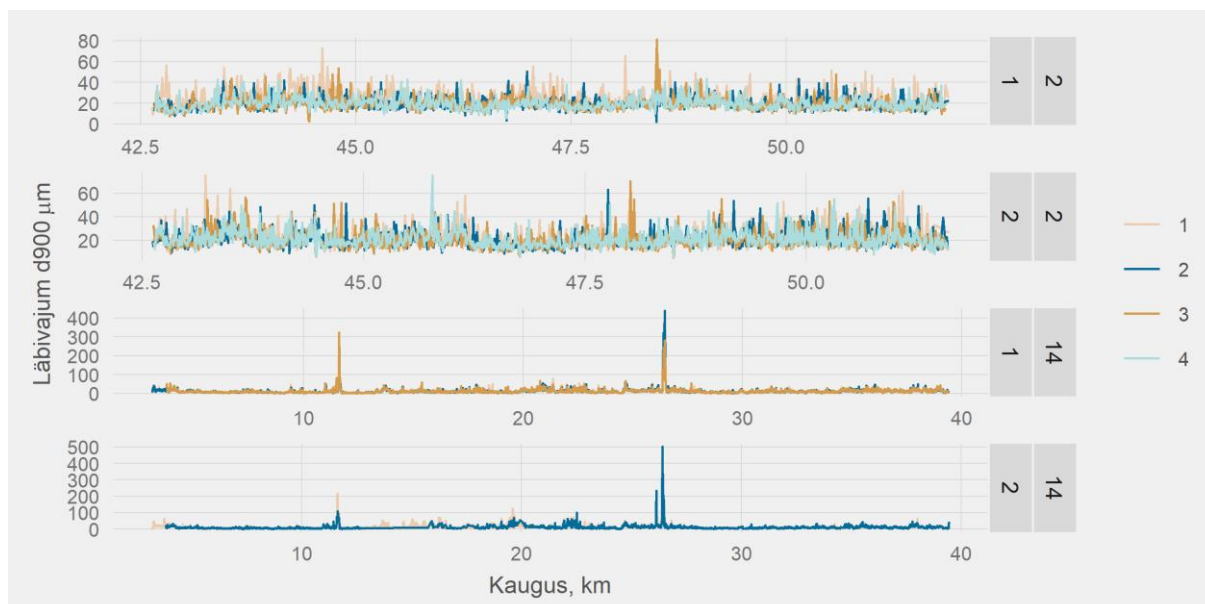
Maanteel nr 2 on näha kilomeetritel 44.4, 46.7 ja 48.5 järske langusi d_0 , d_{300} ja SCI näituses. Nendes punktides on tee peal sillad (Vardja, Kõvernõmme ja Uuejõe) (Transpordiamet 2022). Maanteel nr 14 on näha väga suurt d_0 , d_{300} ja d_{900} läbipainet km 26.4. Seal on teeregistri järgi truup. Samuti on maanteel 14 näha suurt d_{300} ja d_{900} läbipainet km 11.6. Selles piirkonnas on Maaameti kaardi järgi samuti truup ja tee läheb kahe tiigi vahelt läbi.



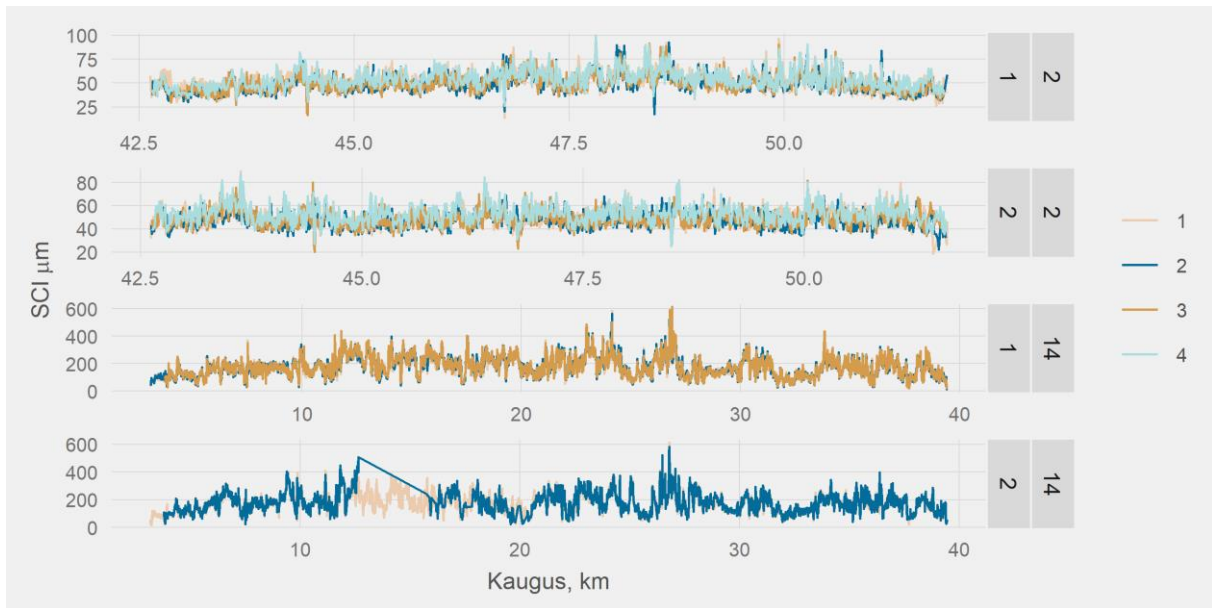
Joonis 10: Läbivajumi D_0 kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel 10m sammuga



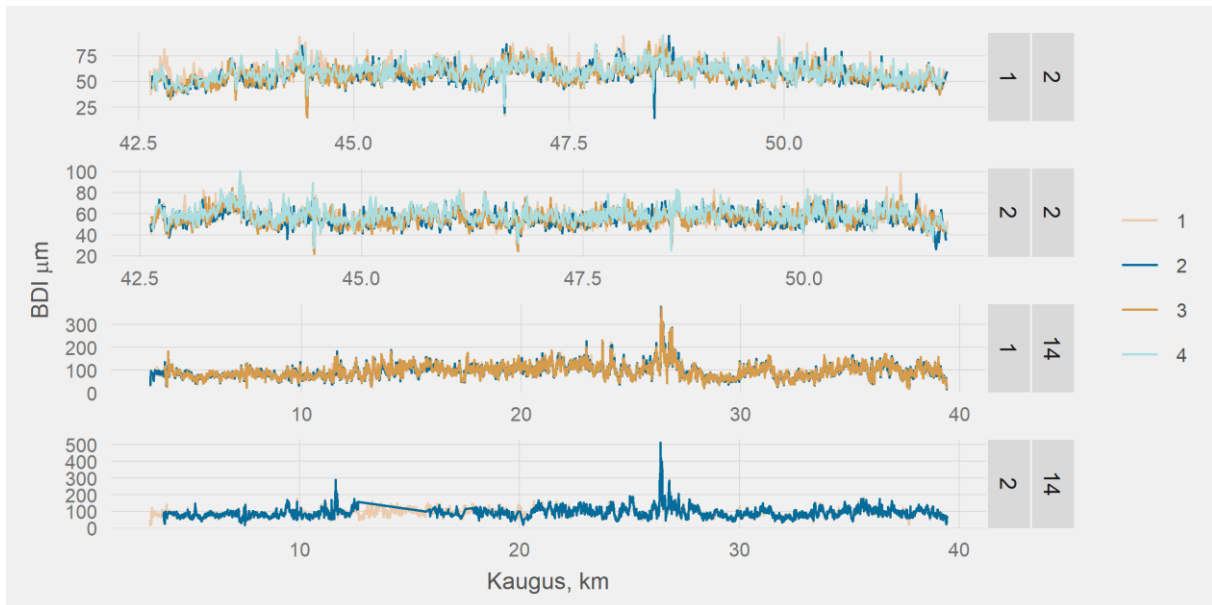
Joonis 11: Läbivajumi D300 kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel



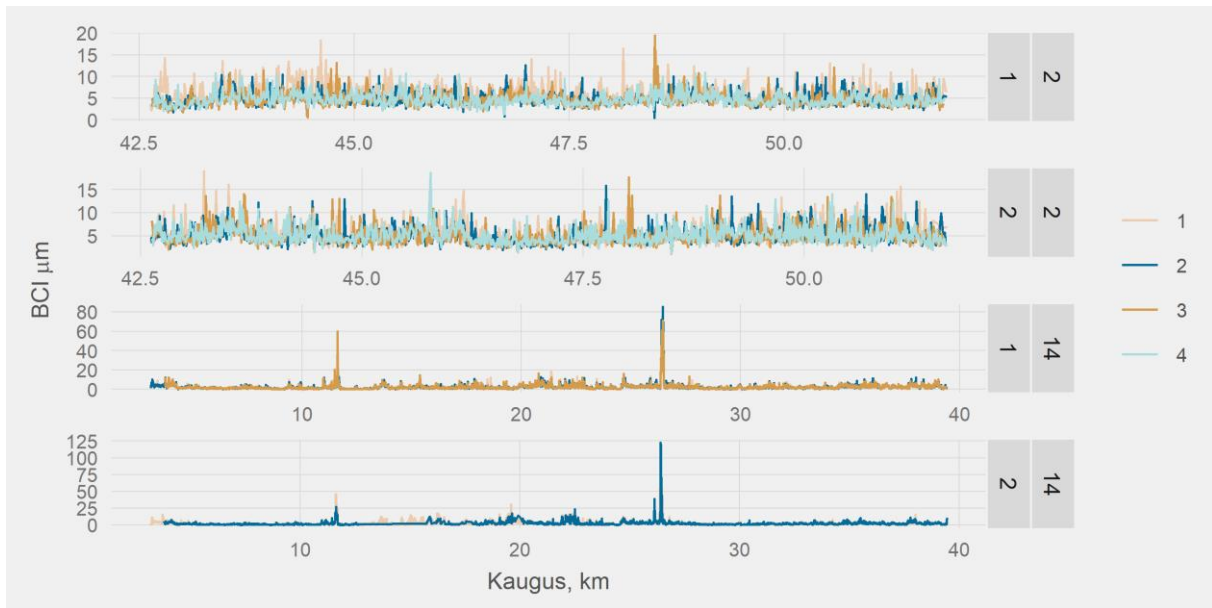
Joonis 12: Läbivajumi D900 kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel



Joonis 13: Näitaja SCI kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel



Joonis 14: Näitaja BDI kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel



Joonis 15: Näitaja BCI kokkulangevus TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmistel



Joonis 16: Maantee nr 14 km 11.6 (Aluskaart: Maa-amet [2021])

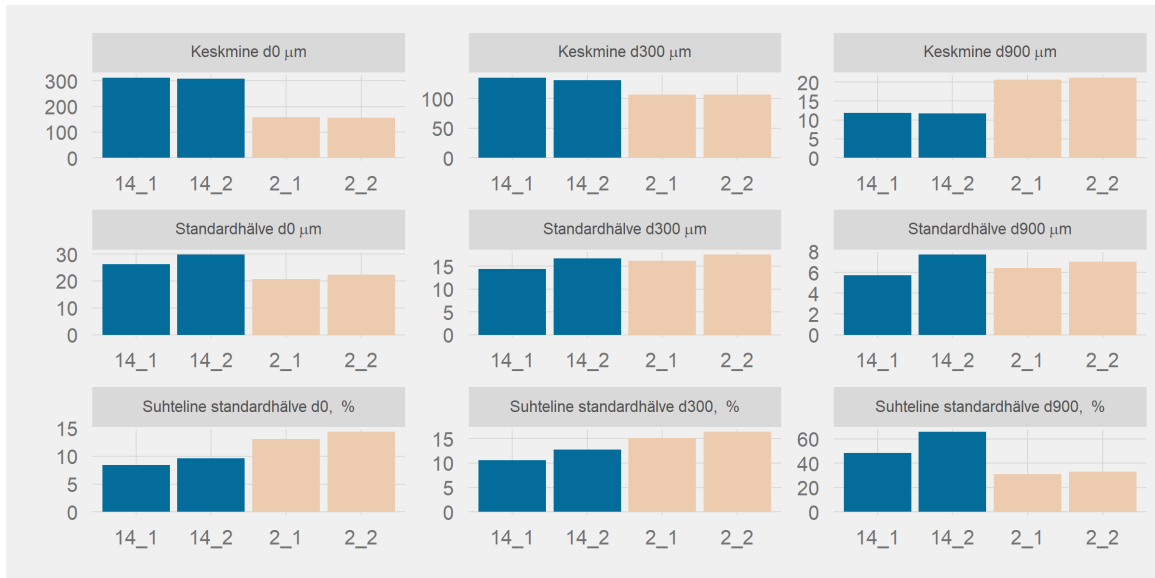
4.1.2 Kordusmõõtmiste kogutud standardhälve

Kordusmõõtmiste kokkulangevuse hindamiseks saab kasutada ka standardhälvet. Järgnevalt on kõigil kordusmõõtmiselt leitud kogutud standardhälve vastavalt selle üldvalemile kasutades mõõtmisandmeid 10m sammuga.

Suhteline standardhälve, mis arvestab ka antud lõigu keskmist mõõtmistulemust, on kõrgem maanteel 2 mõõdetud lõikudel. Maanteel 14 mõõdetud suhteline standardhälve on madalam.

Paremat mõõtmistulemuste kokkulangemist kinnitavad ka peatükis [Graafiline kokkulangevus](#) nähtavad joonised. See võib tuleneda sellest, et maanteel 2 mõõdetavad läbivajumid ongi väiksemad ja seetõttu on ka selle suhteline standardhälve suurem. Absoluutne standardhälve on madalam maanteel 2. Kõigil d0 kordusmõõtmistel on standardhälve vahemikus 20-30 mm.

Suhteline standardhälve on madalam läbivajumitel d0 ja d300 ja märkimisväärselt kõrgem läbivajumil d900. See on ka loogiline, sest läbivajumi d900 mõõtmistulemused on märkimisväärselt väiksemad kui d300 ja d0.



Joonis 17: Lämpainete d0, d300 ja d900 kogutud standardhälve kordusmõõtmistel erinevatel lõikudel



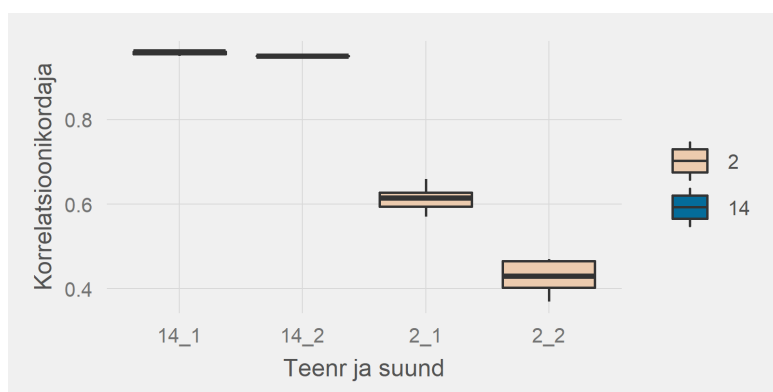
Joonis 18: SCI, BDI ja BCI kogutud standardhälve kordusmõõtmistel erinevatel lõikudel

4.1.3 Kordusmõõtmiste korrelatsioon

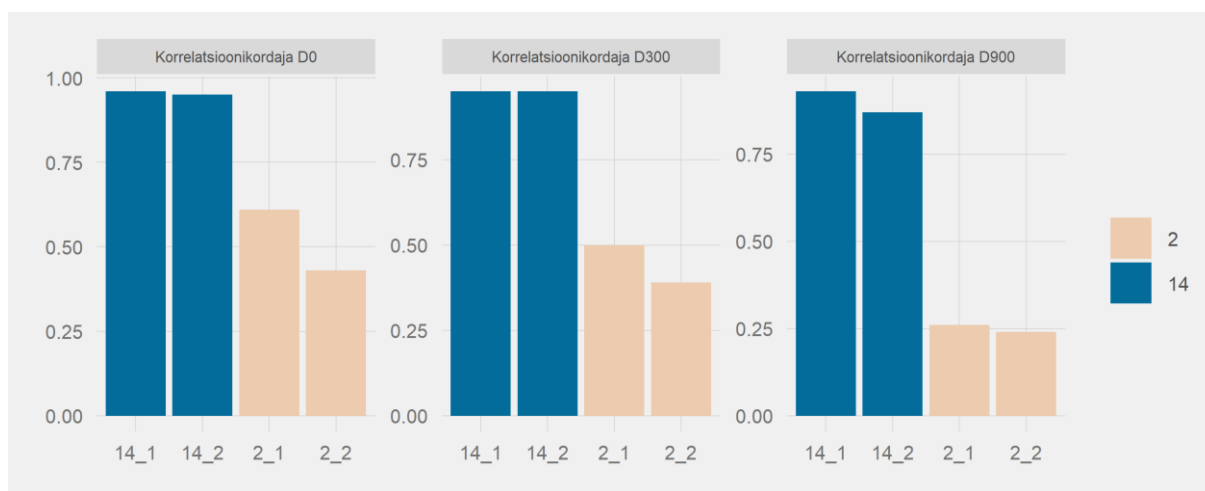
Viimaks võrdleme kordusmõõtmiste kokkulangevuseks korrelatsiooni kõigi samal lõigul läbi viidud mõõtmiste vahel. Pearsoni korrelatsioonikordaja leidmiseks taandati mõõtmisandmed 20m sammu peale.

Korrelatsioon maanteel 14 läbiviidud mõõtmiste vahel on märkimisväärselt parem kui maanteel 2 teostatud mõõtmistel. Maantee 14 mõõtmiste korrelatsioon läbipaindel d0 jääb vahemikku 0.95-0.96, samas kui maanteel 2 mõõtmiste korrelatsioon on vahemikus 0.45-0.72. Maantee nr 2 on korrelatsioonikordaja kõrgem suunal 1 võrreldes suunaga 2. Samas ei ole olnud suuna 1 ja 2 standardhälbel ja graafilisel kokkulangevusel suuri erinevusi.

Võrreldes korrelatsiooni näitajate d0, d300 ja d900 vahel, siis on näha et korrelatsioonikordaja läheb madalamaks kui kaugus anduri keskpunktist suureneb. Maantee 14 on korrelatsioonikordaja kõrge ka läbivajumi d900 juures, olles üle 0.8. Maantee nr 2 korrelatsioonikordaja langeb läbivajumil d900 alla 0.30.



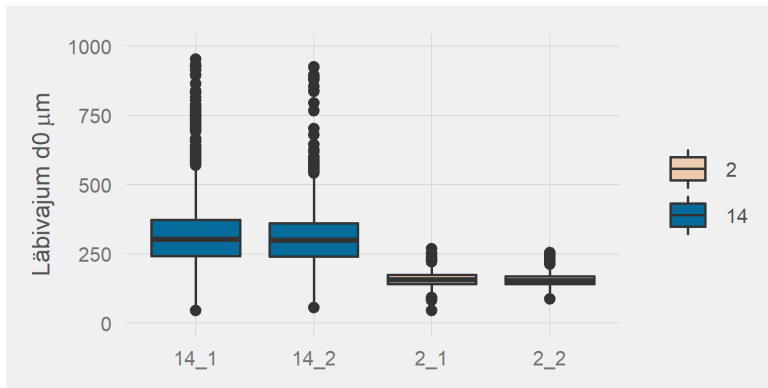
Joonis 19: Läbipainete d0 korrelatsiooni vahemik mõõtmistel



Joonis 20: Läbivajumite d0, d300 ja d900 Pearsoni korrelatsioonikordaja TSD-seadmega mõõdetud lõikudel

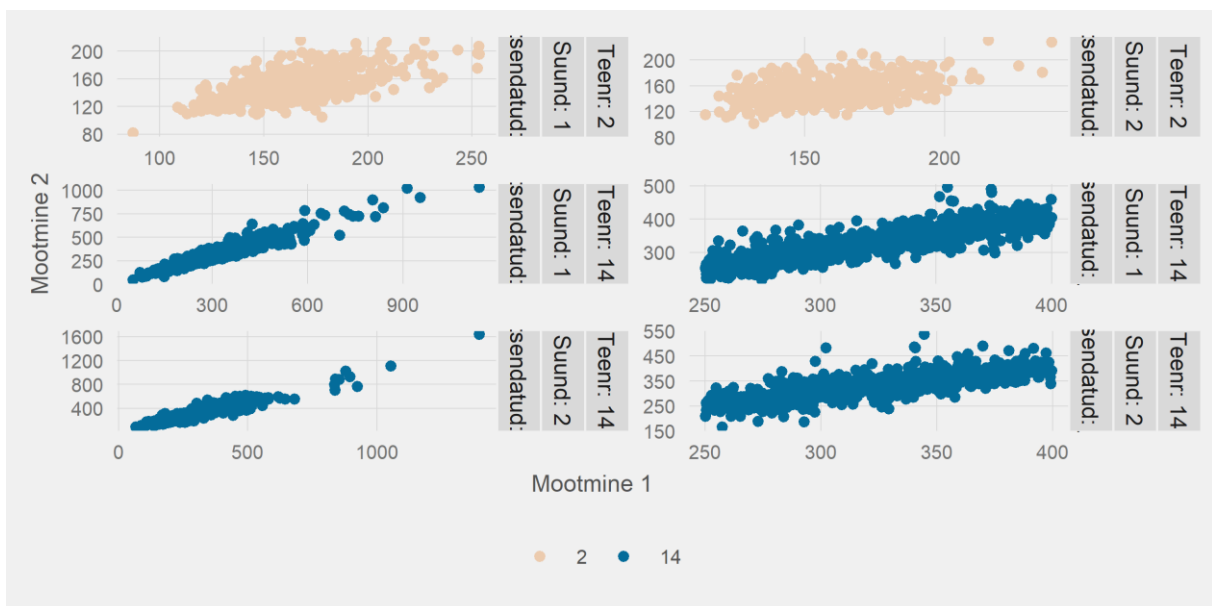
Järgmisel graafikul on näidatud läbipainde d0 mõõtmistulemuste jaotus, et uurida võimalikke põhjuseid maantee 2 ja 14 korrelatsioonikordajate suurte erinevuste vahel. Kuna maantee 14

mõõtmistulemuste vahemik on laiem ja mõõtmistulemused suuremad, siis see võib olla üks põhjuseid tulemuste paremale korreleerumisele.



Joonis 21: Läbipainde mõõtmistulemuste jaotus erinevatel mõõtmistel

Järgmisel joonisel on näha esimese ja teise mõõtmise mõõtmistulemuste võrdlus. Kui kitsendada maanteel 14 läbiviidud mõõtmised kitsamasse piirkonda, siis läheb ka nende mõõtmiste korrelatsioonikordaja madalamaks (korrelatsioonikordaja vahemikus 250 kuni 400 on 0.81) ja on võrreldav maantee 2 tulemustega. Antud analüüsi põhjal võib järeldada, et maantee 2 mõõtmistulemuste korrelatsioonikordaja on madalam, kuna mõõtmised jäävad suhteliselt kitsasse vahemikku.



Joonis 22: Läbivajumi d0 mõõtmiste 1 ja 2 tulemuste võrdlus

4.1.4 Hinnang mõõtmistulemuste korratavusele

Analüüsis vaadeldi mõõtmistulemuste korratavust graafiliselt ja arvutati kogutud standardhälve ja Pearsoni korrelatsioonikordaja. Läbiviidud mõõtmistulemused näitavad, et TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmised langevad omavahel kokku. Head korratavust on näidanud ka varasemad uuringud (Chai et al. 2016; Rasmussen et al. 2008; Shrestha 2017).

Graafiliselt on näha, et mõõtmistulemused langevad hästi kokku. Kõik paralleelmõõtmiste tulemused on samades suurusjärgudes. Üksikud selgelt eristuvad tipud mõõtmistulemustes (näiteks sildade ja truupide kohal) langevad samasse asukohta ja on sarnases suurusjärgus.

Kogutud standardhälve andis võimaluse hinnata mõõtmiste kokkulangevust matemaatiliselt. Mõlemal maanteel oli standardhälve suurusjärgu sarnane, jäädes 8 ja 14% vahele. Absoluutne standardhälve oli madalam maanteel nr 2 mõõtmisel, kus olid ka madalamad läbipainded. Suhteline standardhälve oli madalam maanteel nr 14, millel mõõdetud väärtused olid kõrgemad. Suhteline standardhälve suurenes vastavalt kaugusele koormuse rakenduspunktist. Ka see vastab ootustele, sest mõõdetud väärtused on väiksemad just kaugemal.

Korratavuse hindamiseks vaadeldi ka korrelatsioonikordajat. Korrelatsioonikordaja oli parem maanteel nr 14 võrreldes maantee nr 2. Üheks põhjuseks on see, et maanteel 14 mõõdeti suuremaid läbipainde väärtusi ja mõõtmistulemused olid jaotunud suuremasse vahemikku. Kuna mõõtmistulemuste, eriti läbipainde d0 vahemik erinevatel teedel on nii lai, siis ei ole korrelatsioonikordaja kõige parem meetod tulemuste korratavuse hindamiseks. Paratamatult on korrelatsioonikordaja madalam teedel, mille d0 mõõtmistulemused on madalamad ja ühtlasemad. Seega on kokkulangevuse hindamiseks parem meetod kogutud standardhälve koos visuaalse hinnanguga.

4.2 TSD-mõõtmistulemuste sõltuvus teenäitajatest

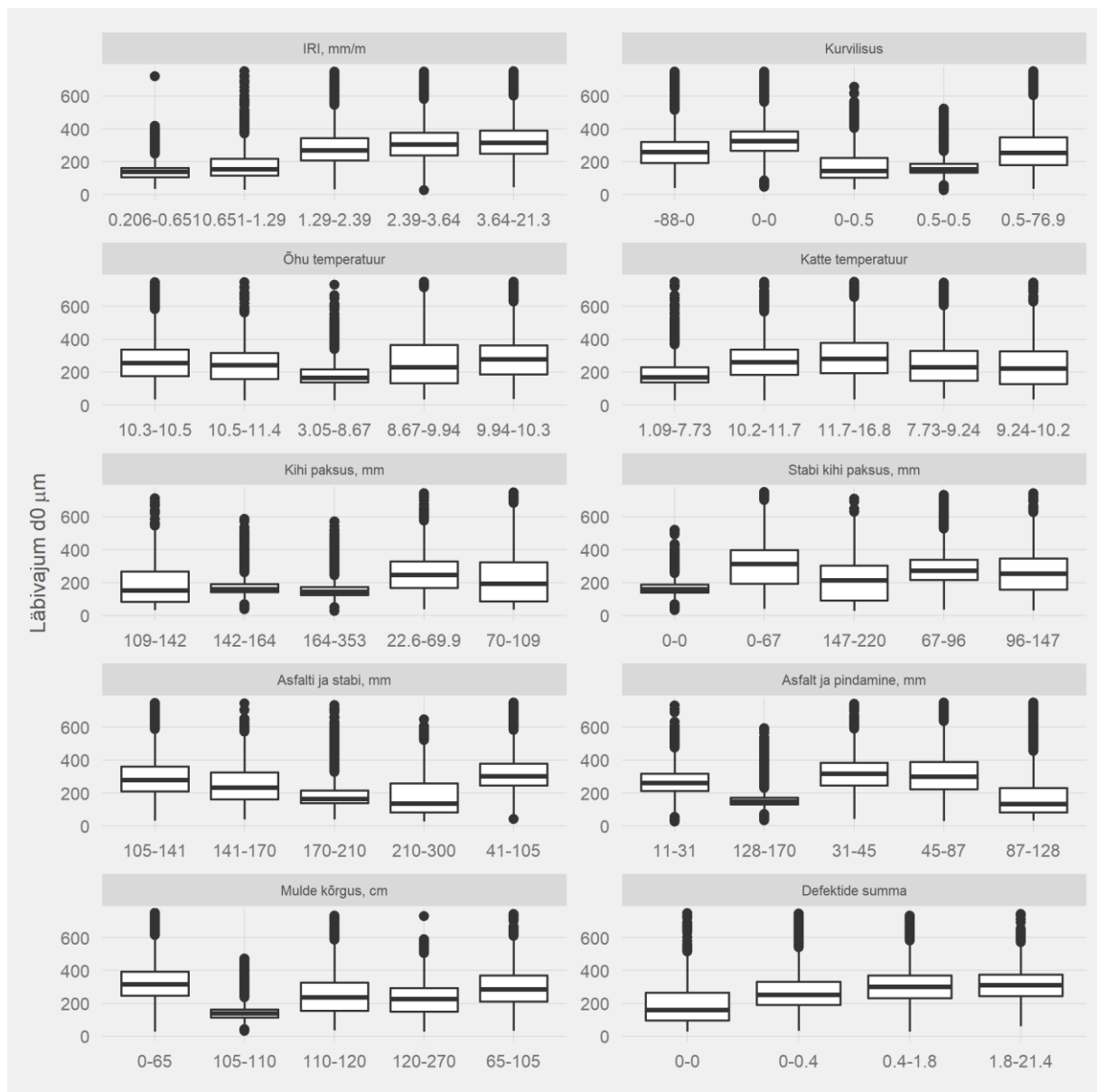
Analüüsi käigus hinnatakse erinevate teenäitajate mõju suurust TSD-ga mõõdetud läbipainde mõõtmistulemustele. Vaadeldakse tee materjale, mulde kõrgust, tee tasasust, kurvilisust ja õhu ning tee temperatuuri mõõtmiste ajal.

All olevatel joonistel on näha kõigi hinnatavate teenäitajate suhe läbipaindesse d0. Numbrilised tulemused on jagatud 5 gruppi vastavalt väärtusele. Kurvilisuse juures vaadeldakse absoluutväärtusi gruppidesse jagamisel, et tekiks lineaarne suhe. Alumisel joonisel on näha gruppidesse jagatud näitajate suhe läbipaindesse. Gruppidesse jagatuna joonistuvad lineaarsed seosed paremini välja. Seda on näha ka lineaarse regressioonimudeli koostamisel. On näha, et osadel juhtudel on suhe lineaarne (temperatuurid, asfalt_stabi), kuid kurvilisuse juures on näha pigem parabooli.

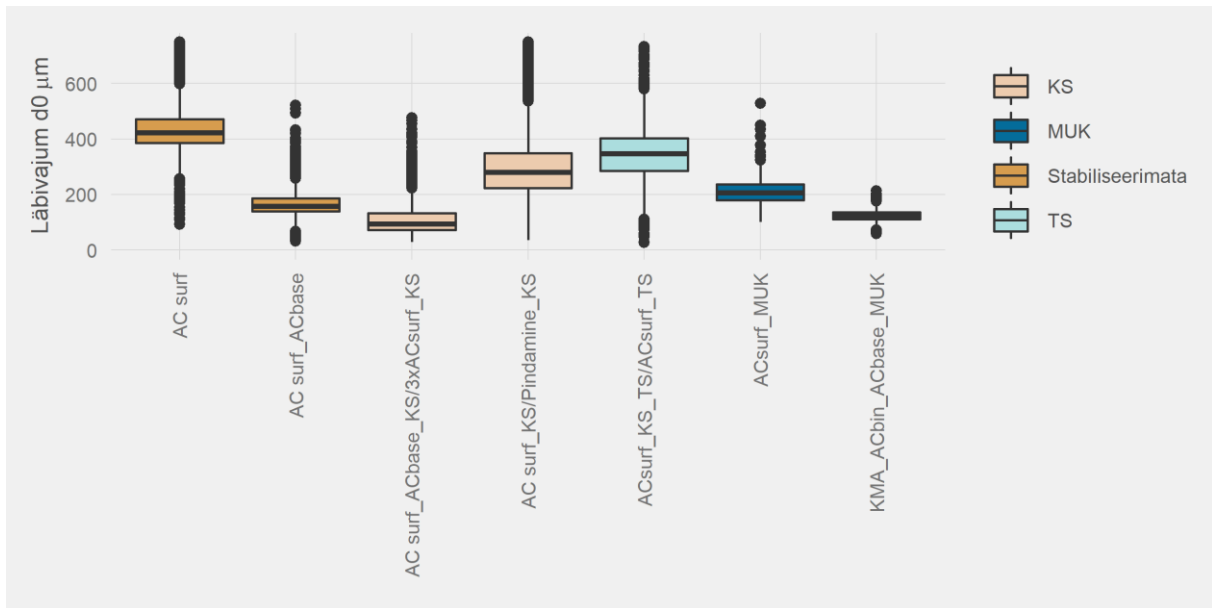
Lineaarse regressioonimudel koostamisel on näha, et gruppidesse jagatuna iseloomustavad muutujad TSD-ga mõõdetud läbipainet paremini kui numbriliste väärtustena. Selle põhjuseks on ilmselt ülejäänud mõõtmisandmetest selgelt eristuvad üksikud andmepunktid (*outlier'id*). Kasutades osasid muutujaid grupeeritult seletab 65% TSD mõõtmisandmete variatsioonist ($R^2 = 0.64$), samas kui samade muutujatega grupeerimata andmetega mudel seletab 60% variatsioonist.

Kõige olulisemateks d0 läbivajumit mõjutavateks teenäitajateks mudelites on seotud kihtide materjalid, maaradariga mõõdetud ja stabiliseeritud kihi paksused ning tee temperatuur. Samuti seletab IRI osa andmestiku varieeruvusest, kuid seda mitte põhjuslikku seose tõttu. Tugevama konstruktsiooniga teedel on IRI madalam ja seega ei pruugi kõrge IRI väärtus otseselt mõjutada TSD mõõtmistulemusi. Kui võtta lineaarsesse mudelisse vaid sama klassi teed (näiteks maanteed nr 1 ja 2), siis muutub IRI mõju andmetele marginaalseks.

Koostatud lineaarsete mudelite kokkuvõtvad tabelid on näha lisas 2.



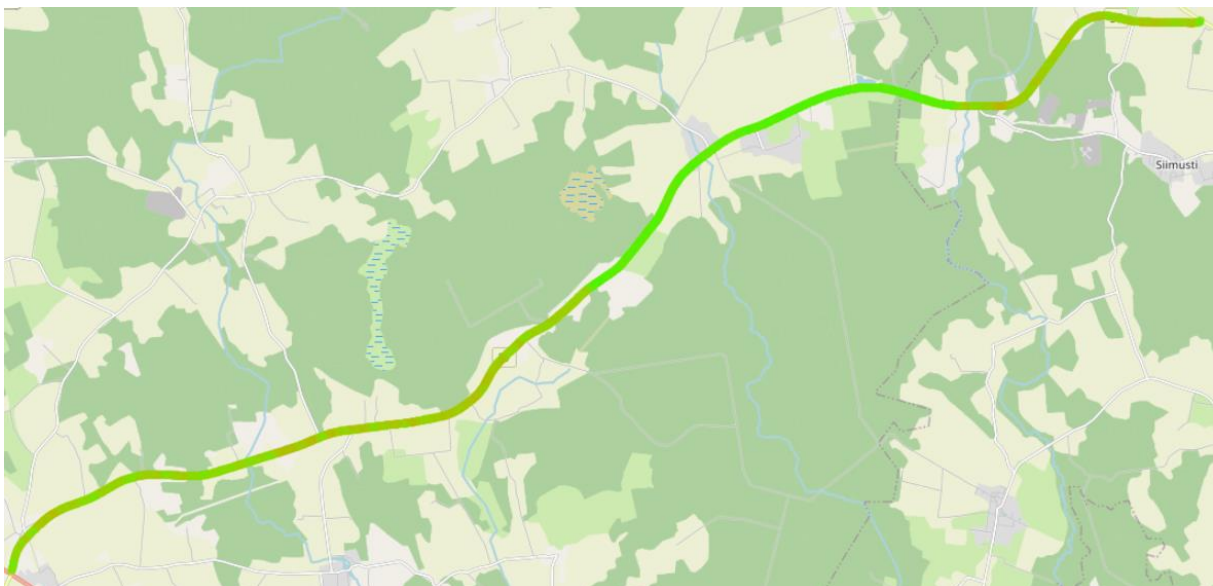
Joonis 23: Grupeeritud keskkonna ja teekatte näitajate suhe TSD-seadmega mõõdetud läbivajumisse d0



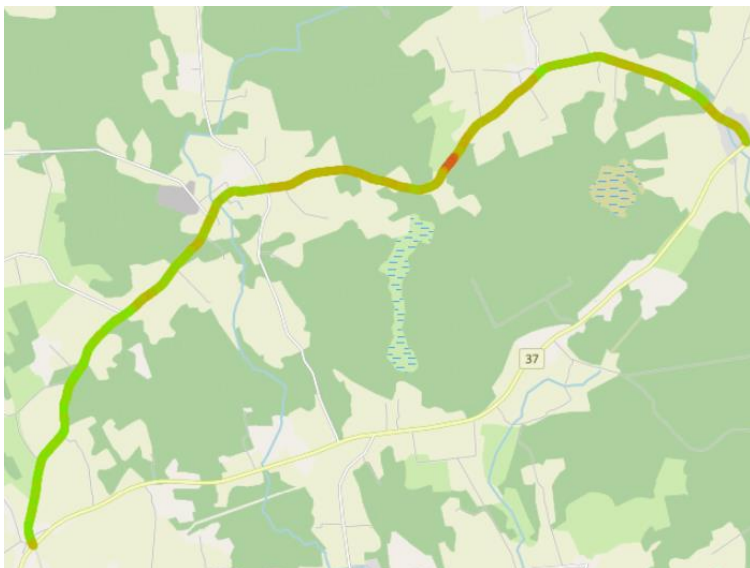
Joonis 24: Erinevate seotud kihtide suhe TSD-ga mõõdetud läbipaindesse d0

4.2.1 Tee kurvilisuse mõju TSD-mõõtmistulemustele

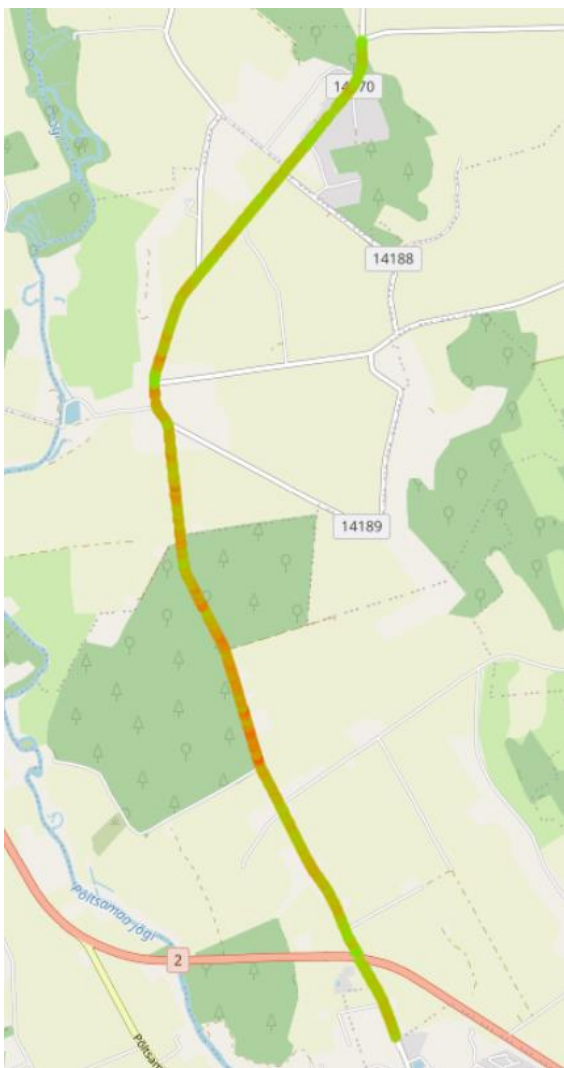
Uuringus analüüsiti ka kurvilisuse mõju TSD mõõtmistulemustele. Selleks vaadeldi eraldi sama lõigu erinevate suundade mõõtmisi, et teada saada, kas kurvidel ja sõiduki kaldumisel on mõõtmistulemused suuremad. Kurvilisust hinnati nii visuaalselt kui ka arvuliselt regressioonimudelil. Kumbki meetodika ei näidanud, et kurvilisusel oleks mõju mõõtmistulemustele. Lineaarse regressiooni mudel on näha lisas 2.



Joonis 25: Tee number 37 läbipane kaardivaates



Joonis 26: Tee number 14162 läbipaine kaardivaates



Joonis 27: Tee number 14170 läbipaine kaardivaates

5 TSD-MÕÕTMISTULEMUSTE VÕRLDUS FWD-GA

TSD-mõõtmistulemuste võrdlemisel FWD-ga proovitakse leida vastus uurimisküsimustele:

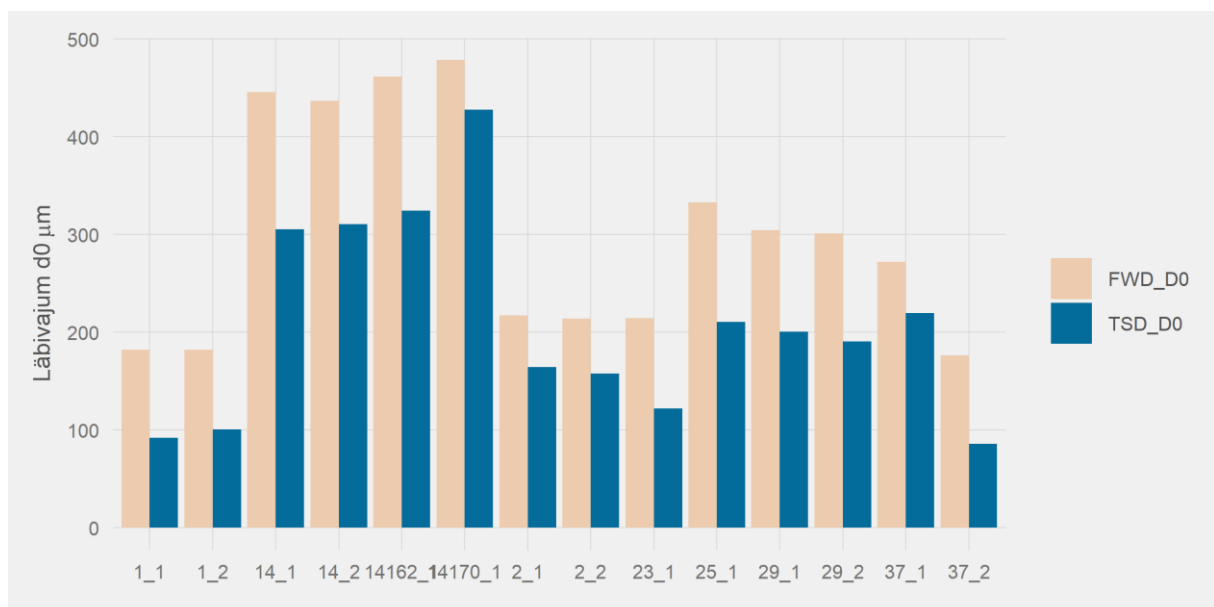
- Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste vahel?
- Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste läbi arvutatud kandevõimetal?
- Millised on mõõtmistehnilised erinevused FWD ja TSD seadmete kasutamisel?

Esmalt vaadeldakse seoseid kahe mõõteseadme tulemuste vahel. Analüüsitakse mõõtetulemsute kokkulangevust läbi kahe meetodika (korrelatsioonikordaja ja Bland-Altman analüüs) ning proovitakse leida erinevuste põhjuseid. Hinnatakse erinevate tegurite, nagu mõõtmiste läbiviimise aeg, teekatte defektid ja tasasus ning katendi paksus ja muldkeha kõrgus, mõju FWD ja TSD vaheliste mõõtmiste erinevustele.

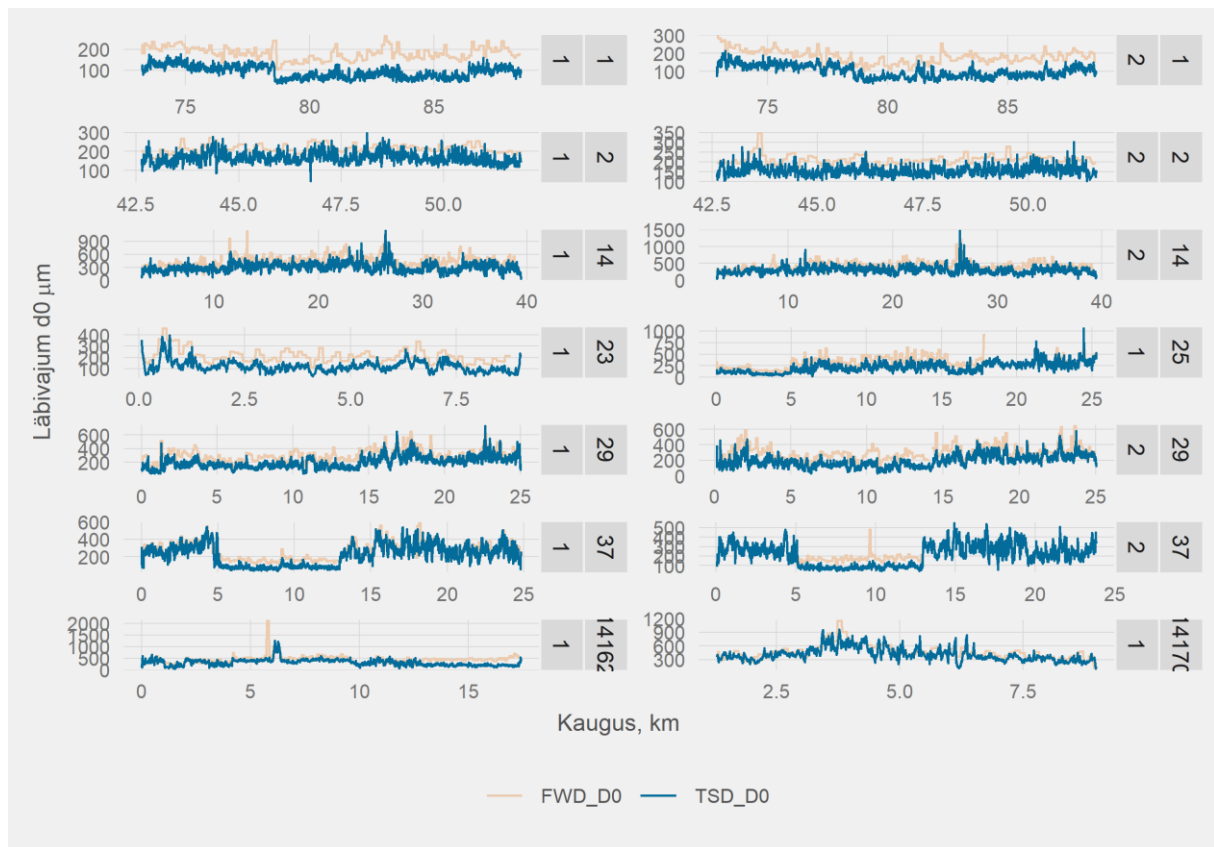
Seejärel viiakse läbi kandevõime arvutus Eestis kasutusel oleva meetodikaga ja võrreldakse erinevate meetoditega saadud tulemusi. Kõigile teelõikudele leitakse vajalik kandevõime E-vaj ning võrreldakse TSD ja FWD seadmega arvutatud kandevõimet E-vajalikuga, et määrata kummagi seadmega nõrgad kohad katendis. Viimaks selgitatakse mõõtmiskogemuse ja kirjanduse põhjal välja mõõtmistehnilised erinevused.

5.1 TSD-mõõtmistulemuste kokkulangevus FWD-mõõtmistulemustega

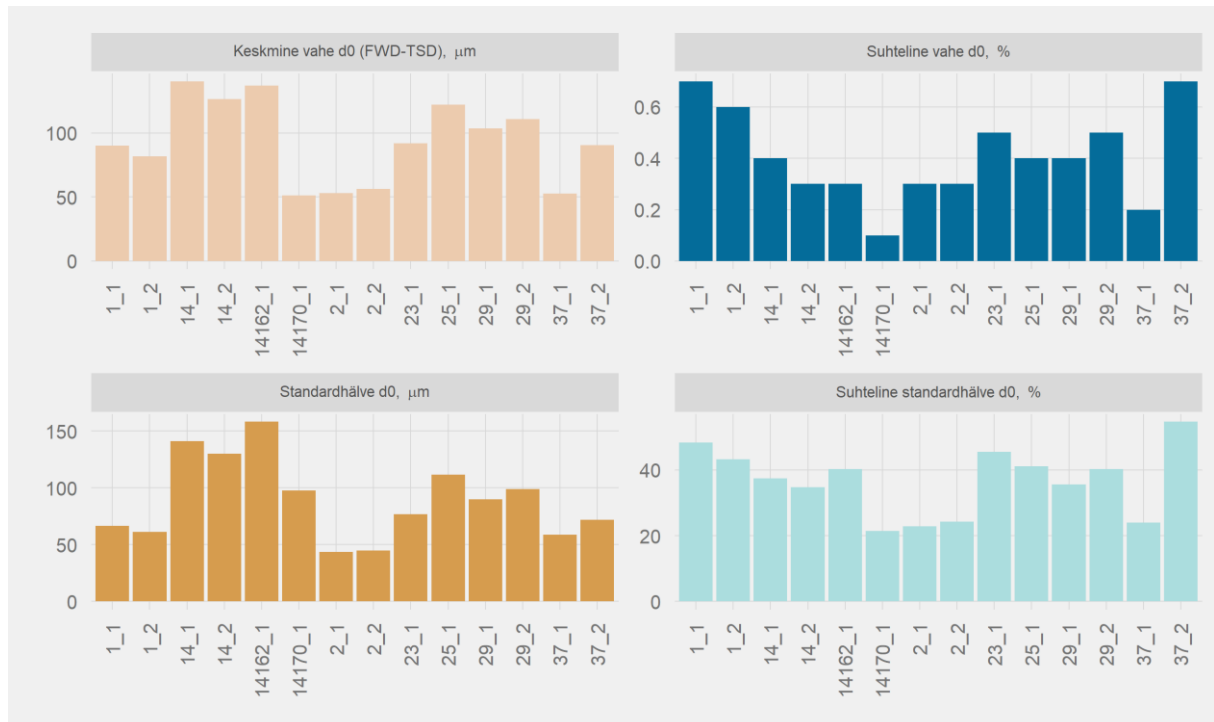
Võrreldes graafiliselt TSD ja FWD-seadmega tehtud läbipainde mõõtmisi, siis on näha, et FWD-ga mõõdetud läbipaine on kõigil lõikudel suurem kui TSD seadmega mõõdetud läbipaine. Samas on ka näha, et mõõtejooned üldiselt langevad kokku - teekonstruktsiooni muutumist ja läbipainde tõusu või langust on näha mõlema seadmega.



Joonis 28: Keskmine läbipaine d0 lõiguti



Joonis 29: TSD-ga mõõdetud läbipaine võrreldes FWD-seadmega mõõdetud läbipaindega



Joonis 30: Keskmine d0 ja kogutud standardhälve FWD ja TSD mõõtmistulemuste põhjal

Vahed TSD ja FWD mõõtmiste d0 väärtuste vahel on muutuvad, aga madalama läbipaindega teedel tunduvad olevad ka suhtelised vahed FWD ja TSD mõõtmiste vahel suuremad. Seda on näha ka

ülemisel joonisel, kus suhteline standardhälve on kõrgem lõikudel, mille keskmine läbipaine on väiksem. Samast seost oli näha ka korratavuse uurimisel peatükis 4, kus suhteline standardhälve kordusmõõtmisel oli kõrgem maanteel, mille keskmine mõõtmistulemus oli madalam.

Samas tuleb läbipainete omavahelisel võrdlemisel arvestada ka, et mõõtmised on läbi viidud erinevatel aegadel. Läbipaine on ajas muutuv ja sõltub mitmetest väliskeskkonna teguritest, nagu temperatuur ja niiskus konstruktsioonis (Saarenketo, T. and Pyhähuhta, M. and Munro, R. 2022). FWD mõõtmise läbiviimise aeg kui mõjutegur on kirjeldatud peatükis 5.1.3.1.

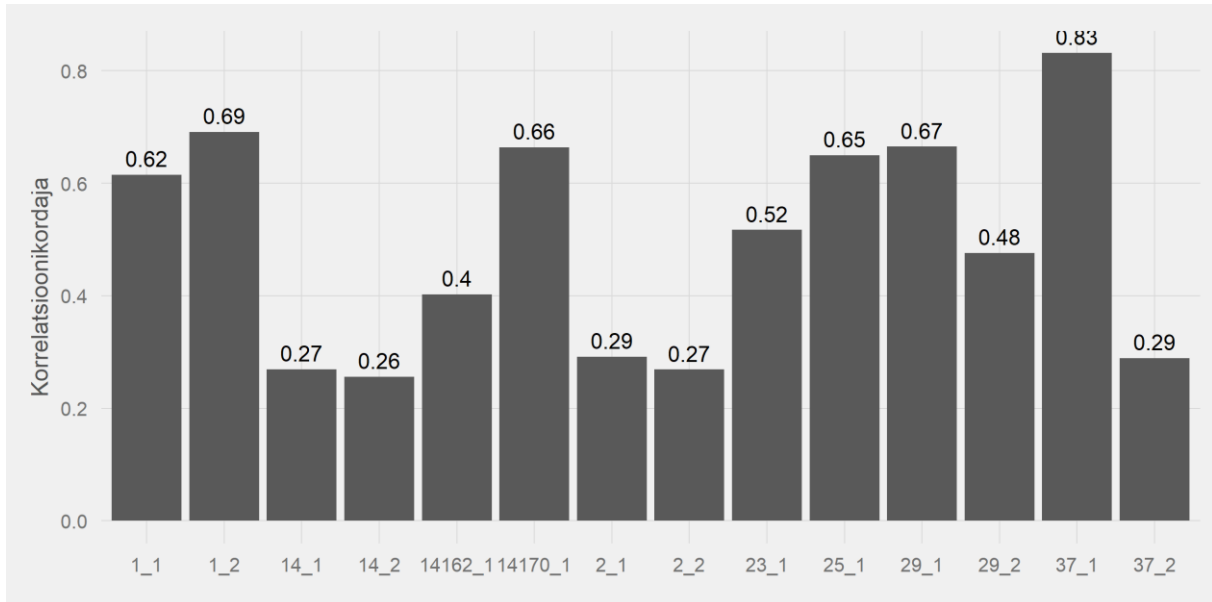
SCI, BDI ja BCI väärtuste puhul ei ole näha, et suurema keskmise väärtusega lõikudel oleks suhtelised standardhälbed kõrgemad või madalamad. Samas on näha, et FWD-ga mõõdetud näitajad on ühtlased suuremad kui TSD-ga mõõdetud näitajad. Joongraafikud SCI, BDI ja BCI väärtustega on näha Lisas 4.



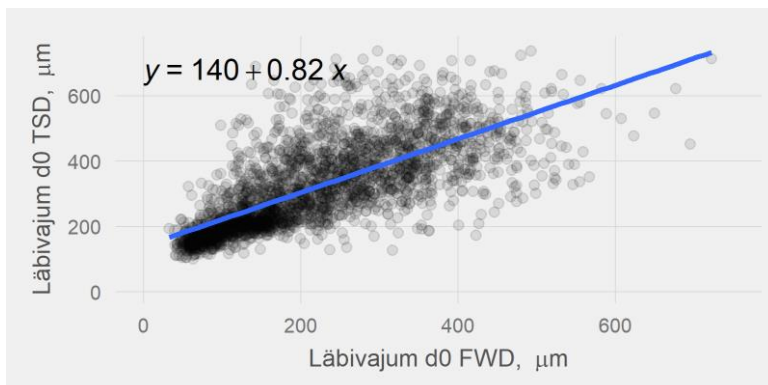
Joonis 31: Keskmine SCI, BDI ja BCI ja kogutud standardhälve FWD ja TSD mõõtmistulemuste põhjal

5.1.1 Pearsoni korrelatsioon

FWD ja TSD-seadme läbipaine mõõtmistulemuste vahel on näha, et korrelatsioon varieerub sõltuvalt mõõtmislõigust. Terve andmemahu läbipainde d0 korrelatsioonikordaja on 0.69. Samas lõiguti kõigub tulemus 0.26 kuni 0.83.



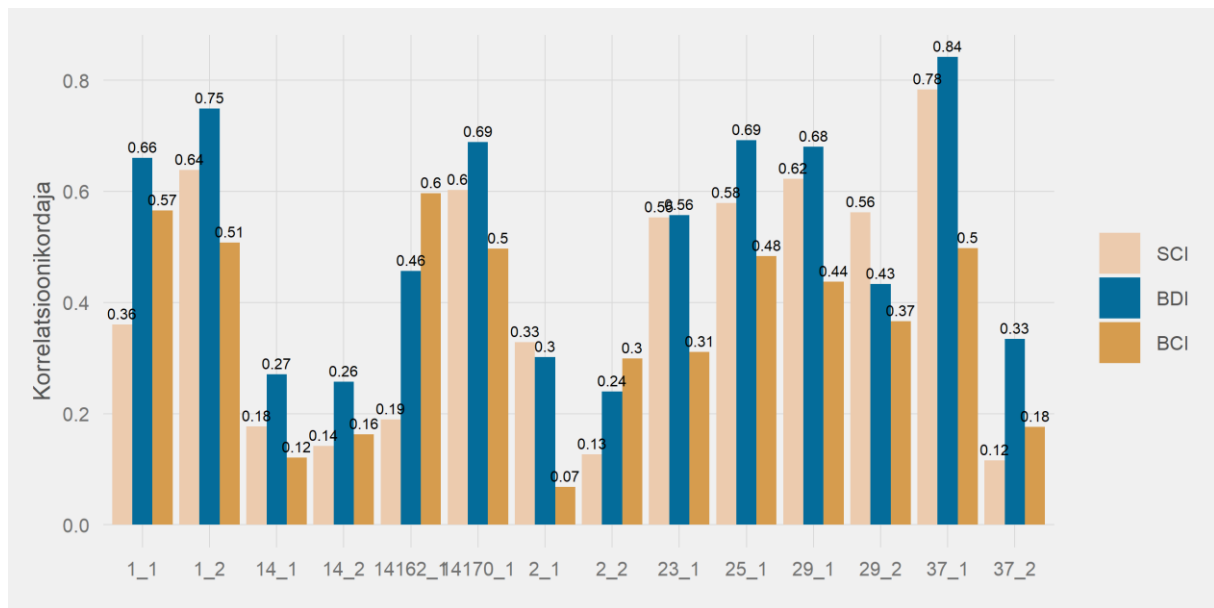
Joonis 32: Mõõdetud läbipainde d0 korrelatsioonikordaja lõiguti



Joonis 33: FWD ja TSD-seadmega mõõdetud läbipainete d0 suhe

Seda, et kahe seadmega mõõdetud läbipainded ei ole otseselt korreleeruvad on ka näidanud varasemad uuringud. Samas nagu ka mõõtmistulemuste korratavuse juures sai kirjeldatud, ei pruugi korrelatsioon olla kõige parem meetod kokkulangevuse hindamiseks.

Vaadeldes SCI, BDI ja BCI on näha, et kõige kõrgem on korrelatsioon näitajal BDI. Keskmise korrelatsioon SCI-l on 0.64, BDI-l 0.68 ja BCI-l 0.27.

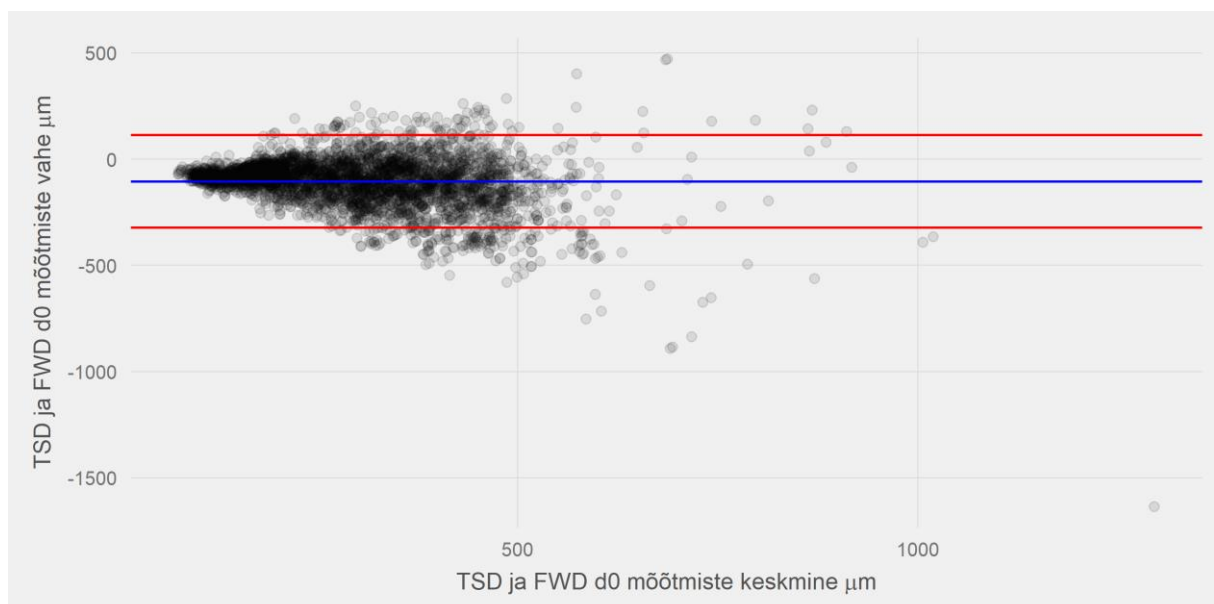


Joonis 34: SCI, BDI ja BCI korrelatsioonikordaja lõiguti

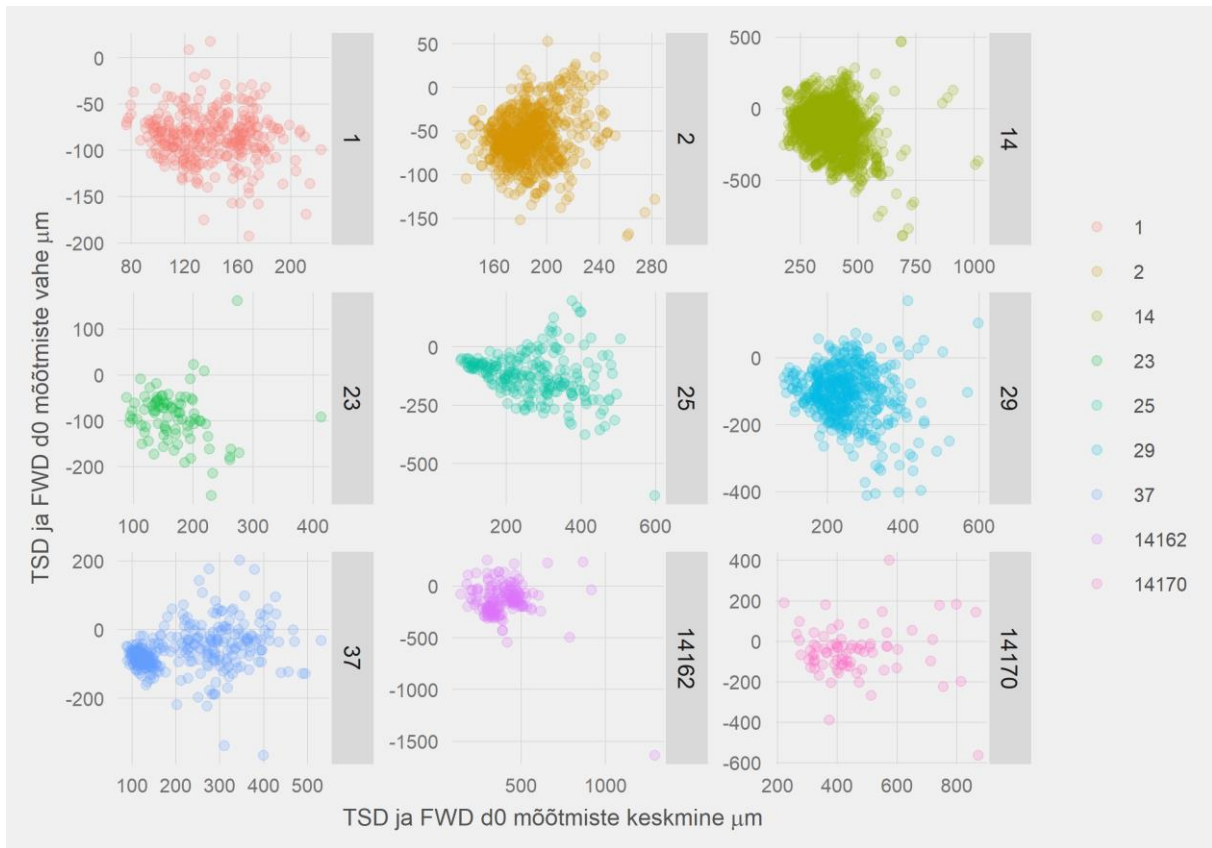
5.1.2 Bland-Altman'i analüüs

Erinevalt korrelatsiooni ja lineaarse regressiooni mudelitest võimaldab Bland-Altmani graafik süstemaatilisi erinevusi mõõtmismetoodikate vahel ja võimalikke kõrvalekaldeid mõõteväärtustes.

Sinine joon näitab kahe mõõtmise keskmist vahet; väärtus -104.2 näitab, et keskmiselt annab TSD 104.2 võrra väiksema tulemuse kui FWD meetod. Läbipainde hindamisel Bland-Altman graafikuga jääb alla 1% väärtustest väljapoole *limits of agreement* jooni (keskmine $\pm 1.96 \cdot SD$). See viitab meetodite väiksele süstemaatilisele erinevusele.

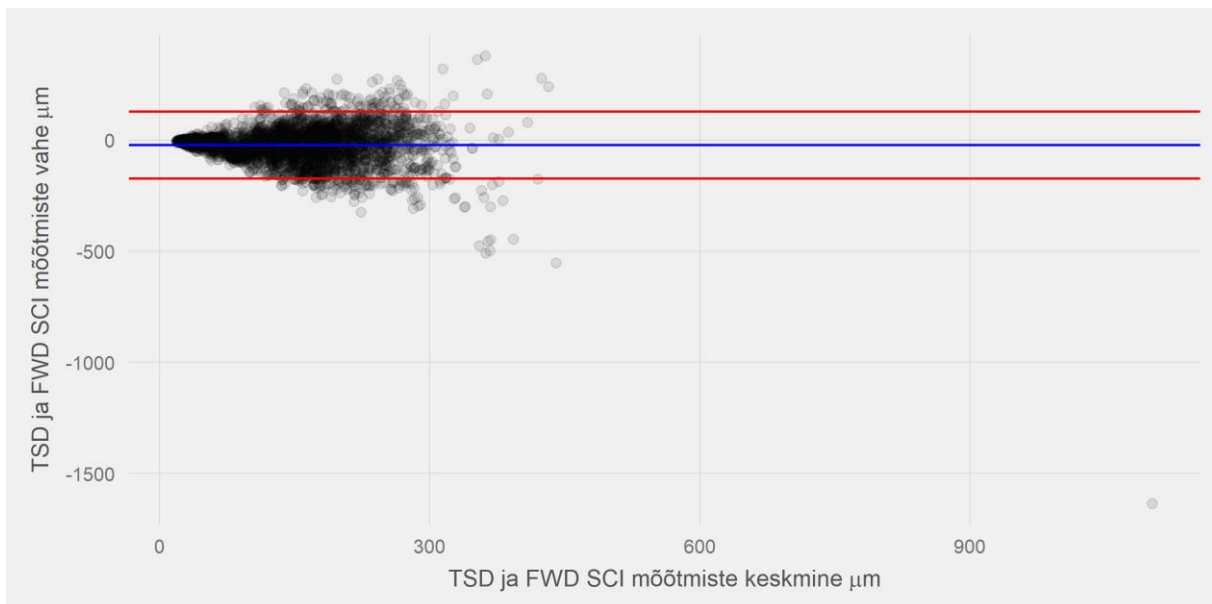


Joonis 35: Bland-Altmani graafik läbipaindele d0



Joonis 36: Bland-Altman graafik lõikude kaupa läbipaindel d0

SCI hindamisel on näha, et TSD meetodiga on SCI ligi 22.0 võrra väiksem kui FWD meetodiga. Vaid ligi 1% andmeid on väljaspool *limits of agreement* jooni (keskmine $\pm 1.96 \cdot SD$). See viitab, et meetodid on ka SCI hindamisel teineteisega paralleelselt kasutatavad.



Joonis 37: Bland-Altmani graafik SCI-le

Nii SCI kui ka d0 võrdlemisel on näha, et väiksematel väärtustel on mõõtmiste vahed väiksemad ja suurematel mõõtmiste väärtusel suurenevad ka vahed. Mõlemad graafikul on näha üksikuid mõõteväärtusi, mida võib lugeda kõrvalekalleteks (*outlier*).

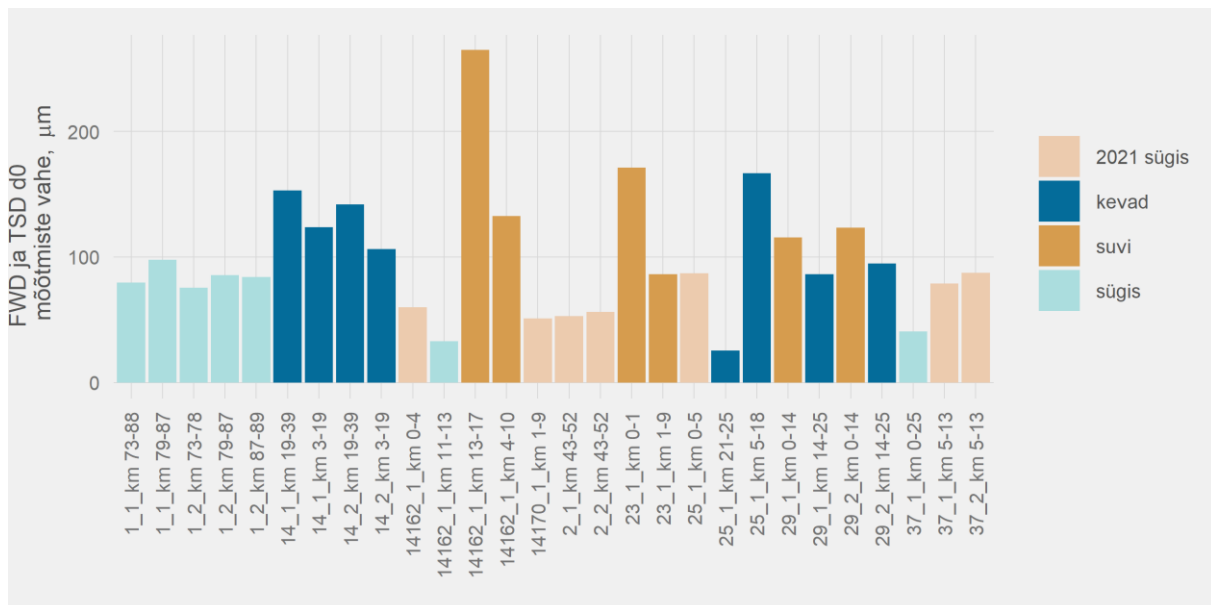
5.1.3 Mõjutegurid TSD ja FWD mõõtmistulemuste erinevustes

Järgnevas alapeatükis analüüsitakse, millised välised tegurid keskkonnas või teekattel võivad mõjutada TSD ja FWD mõõtmistulemuste kokkulangevust. Täpsemalt mõõtmiste läbiviimise aja, teekatete defektide ja ebatasasuste mõju, teekatete paksuse ja muldkeha kõrguse mõju ning katte materjali ja stabiliseerimise mõju.

Regressioonianalüüsi järgi seletavad kõik need muutujad koos 62% kahe seadmega mõõdetud tulemuste erinevusest. Samas FWD mõõtmise hooaeg seletab üksi ligi 50% sellest vahest, olles kindlasti kõige olulisem mõjutegur.

5.1.3.1 Mõõtmiste läbiviimise aeg

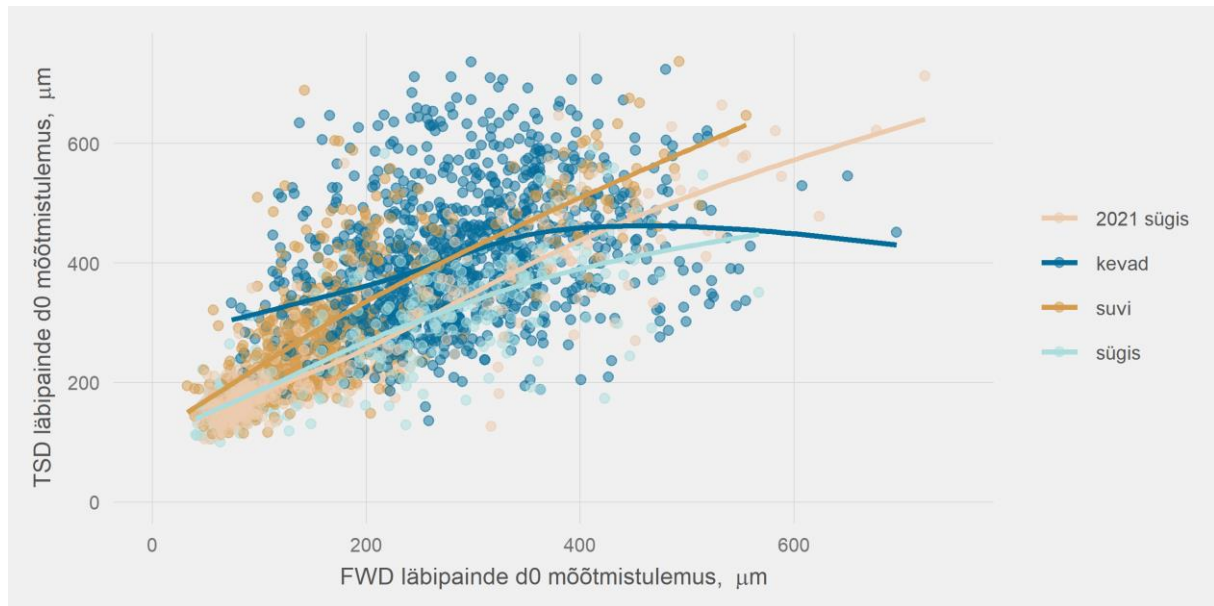
TSD kõik mõõtmised viidi läbi 12-14 oktoober. Samas FWD mõõtmistulemused pärinevad nii kevadest kui sügisest. On näha, et absoluutne vahe mõõtmiste vahel on väiksem sügisel (eriti samal sügisel) läbi viidud FWD mõõtmistega ja suurem kevadel või suvel läbi viidud mõõtmistega. Seega on omavahel paremini võrreldavad mõõtmised, mis viidi läbi samas ajavahemikus või vähemalt samal hooajal.



Joonis 38: Vahed läbipainde d0 FWD ja TSD mõõtmise vahel sõltuvalt FWD mõõtmiste hooajast

Ka lineaarne regressioonimudel, kus TSD läbipainde mõõtmistulemus d0 on võetud sõltuvaks FWD mõõtmistulemusest ja mõõtmiste hooajast näitab, et see on oluline muutuja kahe mõõtmistulemuste hindamisel. All on näha selle kahe muutujaga lineaarse mudeli joonist. Vahe kahe mõõtmise vahel on väiksem sügisestel mõõtmistel ja kõrgem kevadel mõõdetud mõõtmispunktidel. Selgelt joonistuvad välja erinevused lineaarse regressiooni joontes. Kõige ühtlasem on joon samal sügisel tehtus mõõtmisel. Suvel kui kevadel läbiviidud mõõtmiste regressioonijooned näitavad suuremas osas andmemahust (d0 vahemik 0 kuni 400) selgelt suuremat tõusunurka kui sügisel läbiviidud

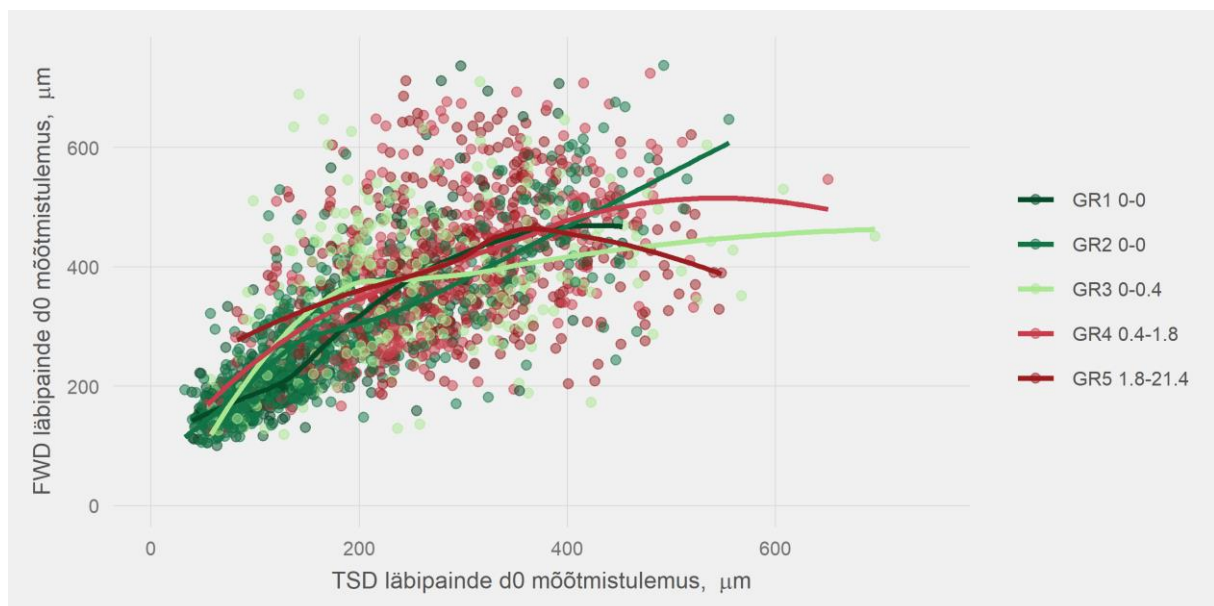
mõõtmistel. See tähendab, et kevadel ja suvel tehtud FWD mõõtmiste d0 mõõtmistulemus võrreldes TSD-ga on selgelt suurem kui sügisel tehtud mõõtmistel.



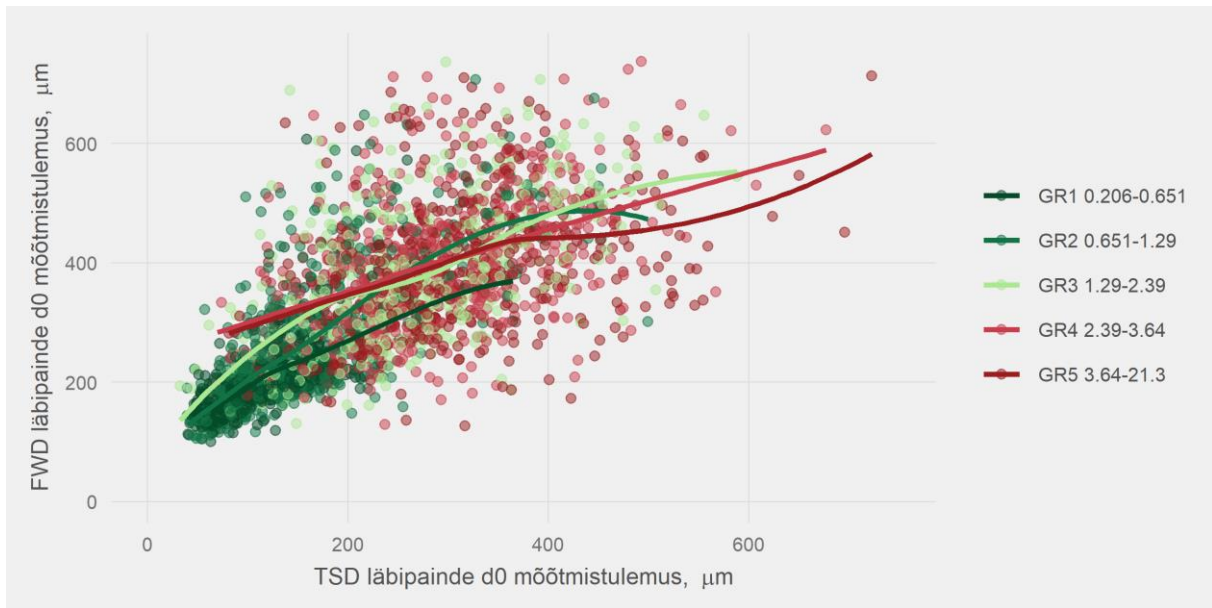
Joonis 39: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja FWD mõõtmise hooajast

5.1.3.2 Defektid ja tasetasus

Rohkemate defektide ja kõrgema IRI väärtusega lõikudel on küll mõõtmistulemused hajuvamad ja mõõdetud d0 väärtused mõlemal juhul kõrgemad, aga kumbki näitaja ei tundu mõjutavat mõõtmistulemuste vahet märkimisväärselt. Ka regressioonijooned ei eristu erinevate gruppide vahel selgelt.



Joonis 40: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja tee defektide summast

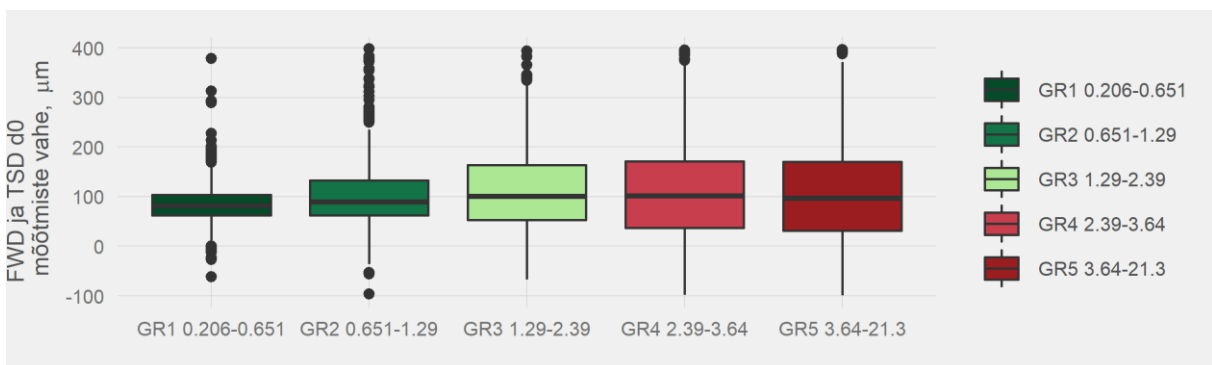


Joonis 41: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja tee tasasusest IRI [mm/m]

Järgnevatel joonistel on näha, et IRI ja defektide suurenedes suureneb küll keskmine d0 mõõtmiste vahe, aga samas märkimisväärselt enam suureneb vahemik millesse mõõtmistulemused suurema IRI ja defektide summa juures jäävad. Seega ei tundu defektid ja tasasus olevat oluline mõjutegur TSD ja FWD seadmega mõõdetud läbipainde erinevustes.



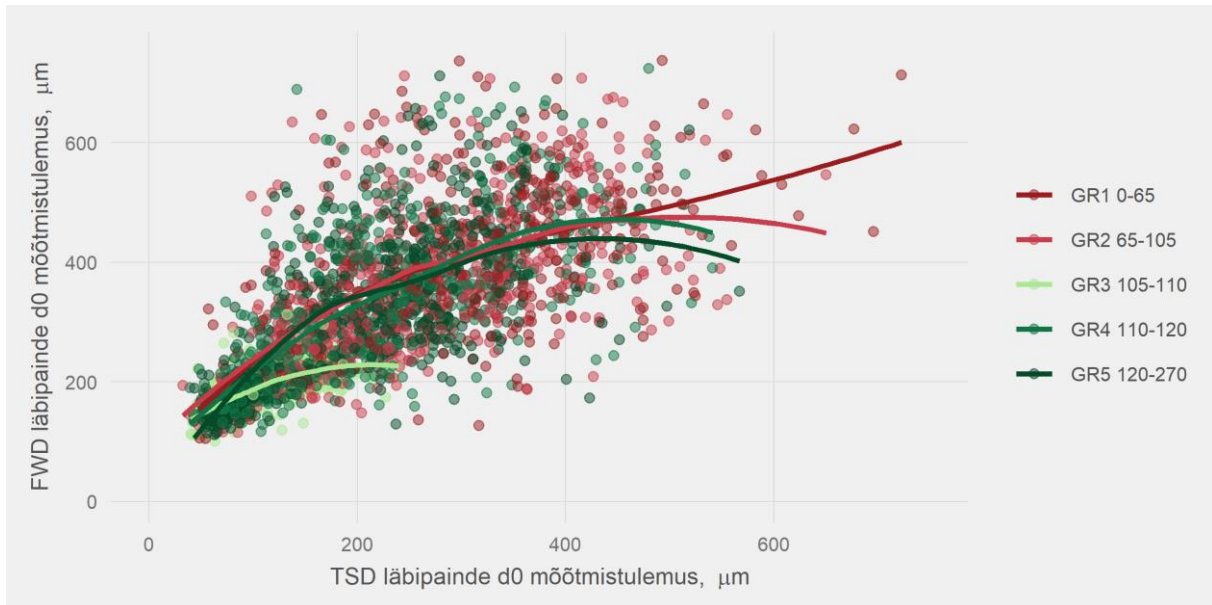
Joonis 42: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemuste vahe ja teekatte defektide vaheline seos



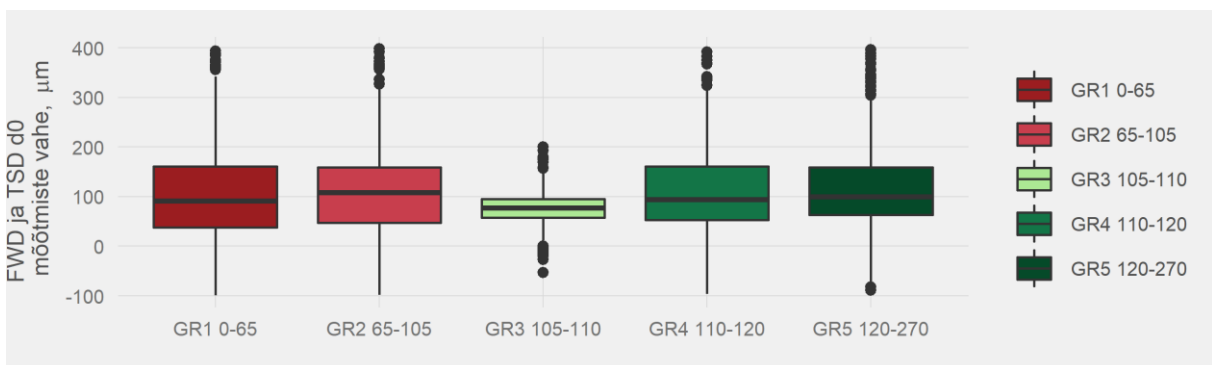
Joonis 43: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d_0 mõõtmistulemuste vahe ja teekatte tasetasuse IRI [mm/m] vaheline seos

5.1.3.3 Katendi paksus ja muldkeha kõrgus

Alumistelt graafikutelt on näha, et mulde kõrgus ei mõjuta TSD ja FWD seadmega mõõdetud läbipainde vahet. Kuigi osadel lõikudel, millel on suurem läbipaine on ka mulde kõrgus suurem, siis mõõtmiste keskmised vahed ei sõltu mulde kõrgusest. Ka regressioonijoontes erinevatel gruppidel ei on märgatavaid erinevusi.

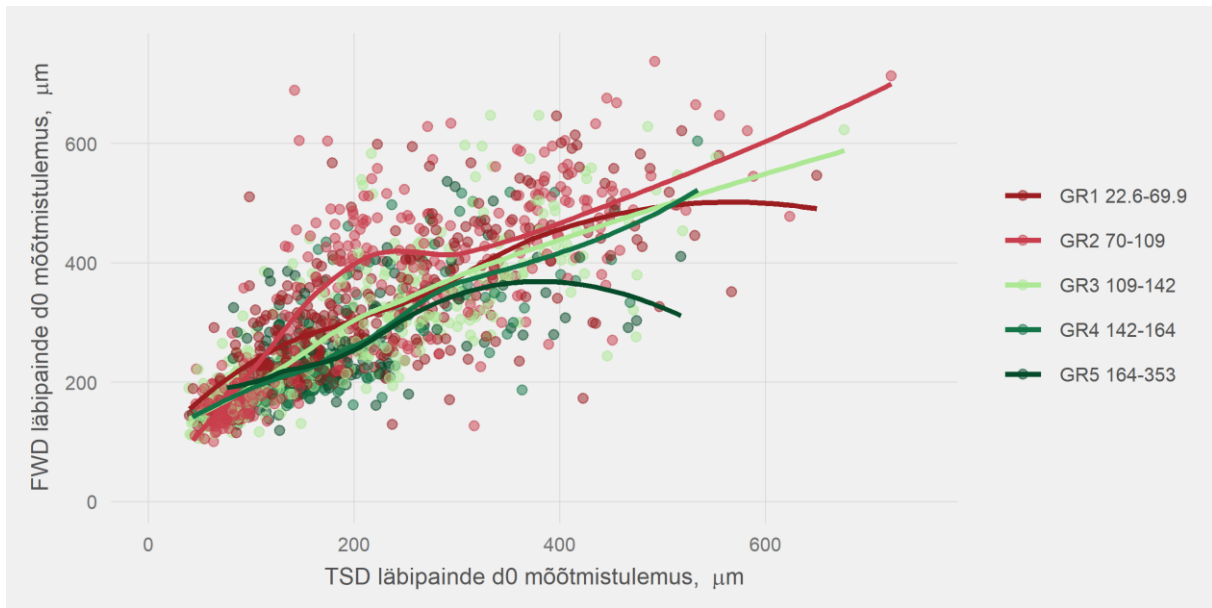


Joonis 44: TSD-ga mõõdetud läbipainde d_0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d_0 mõõtmistulemustest ja mulde kõrgusest

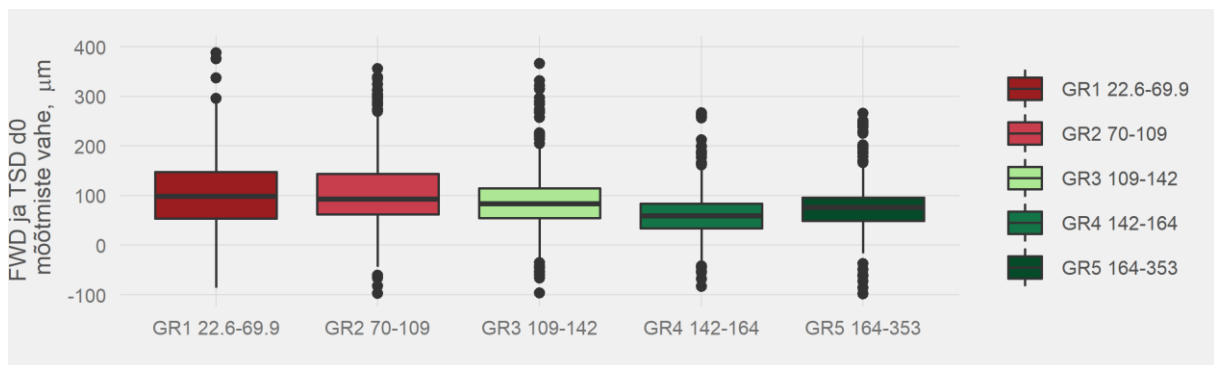


Joonis 45: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d_0 mõõtmistulemuste vahe ja mulde kõrguse vaheline seos

Ka katte paksus ei tundu andvat väga suurt mõju TSD ja FWD seadmega mõõdetud läbipainde erinevusse. Väga väikestel katte paksustel (alla 100 mm) tundub läbipainete erinevus olevat veidi suurem, aga see vahe on marginaalne.



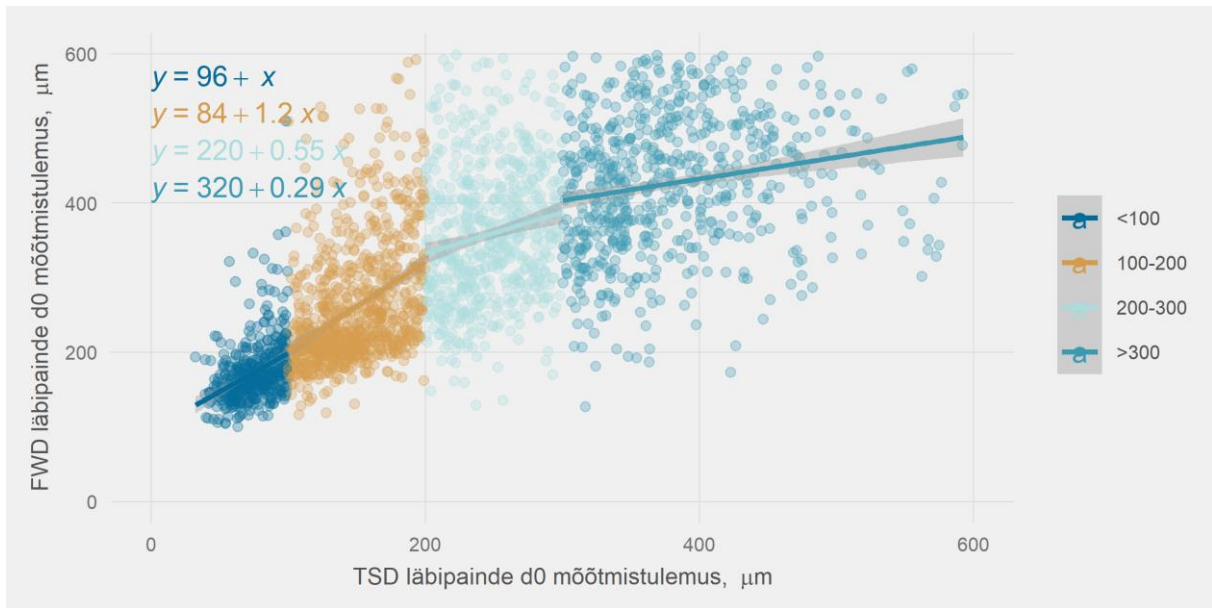
Joonis 46: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja kihi paksusest



Joonis 47: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemuste vahe ja kihi paksuse vaheline seos

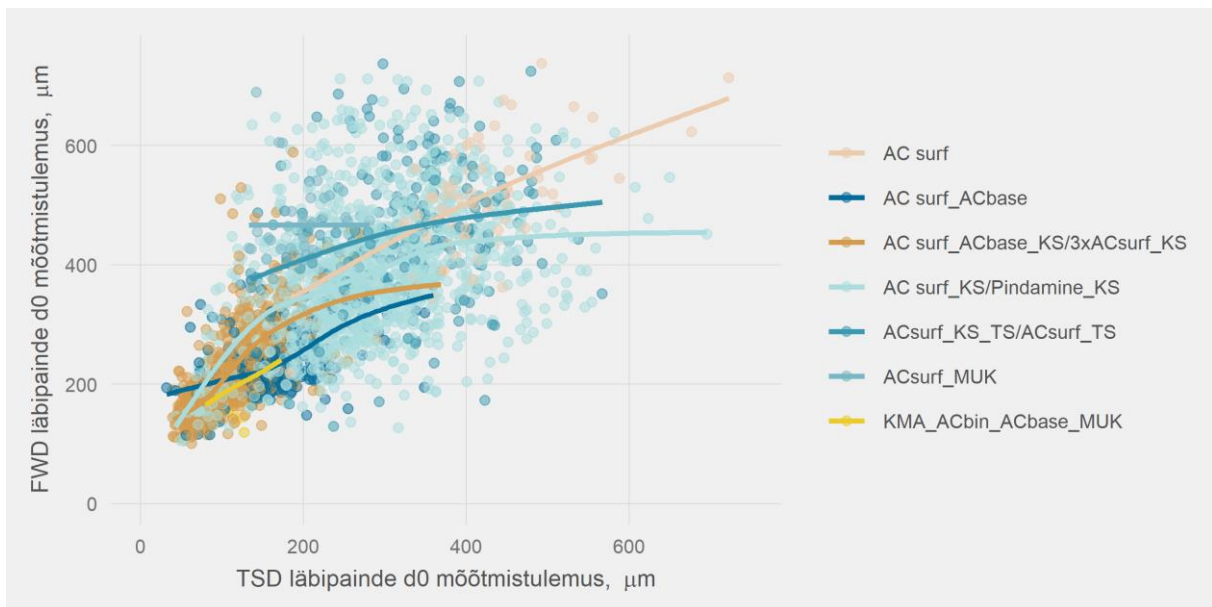
5.1.3.4 Katte jäikus, materjalid ja kompleks stabiliseerimine

Katted, millel on madalam läbipaine on jäigemad. Järgmiseks said mõõtmisandmed jagatud 4 gruppi TSD-ga mõõdetud läbipainde suuruse järgi, et hinnata jäikuse mõju TSD ja FWD tulemuste vahele. Siit on näha, et regressioonijoone tõus on märkimisväärselt suurem d0 piirkonnas 0-200 µm ($a = 1...1,2$), samas kui piirkondades >200 µm on see veidi alla 1 ja >300 µm märkimisväärselt alla 1. Piirkonnas < 200 on ka y-teljega lõikumise punkt väiksem. Ka andmete hajuvus on suurem piirkonnas >300. Suhteliselt on kokkulangevus kõige parem piirkonnas 100-200 µm, kuid kõige parem kordaja on andmete vahel piirkonnas <100 µm.

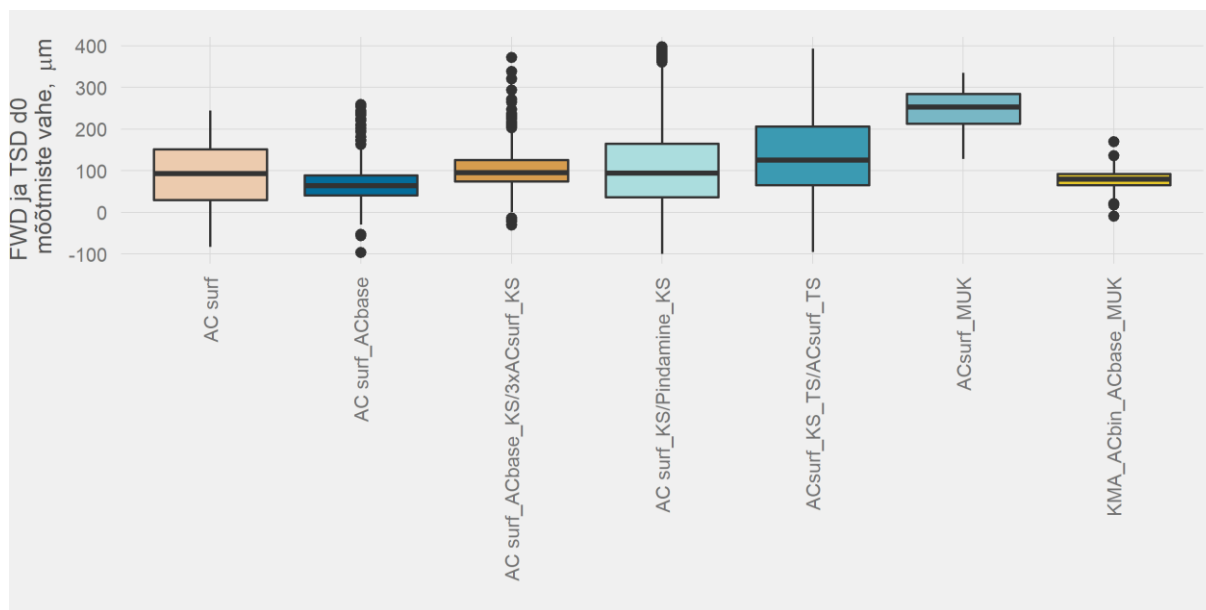


Joonis 48: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest

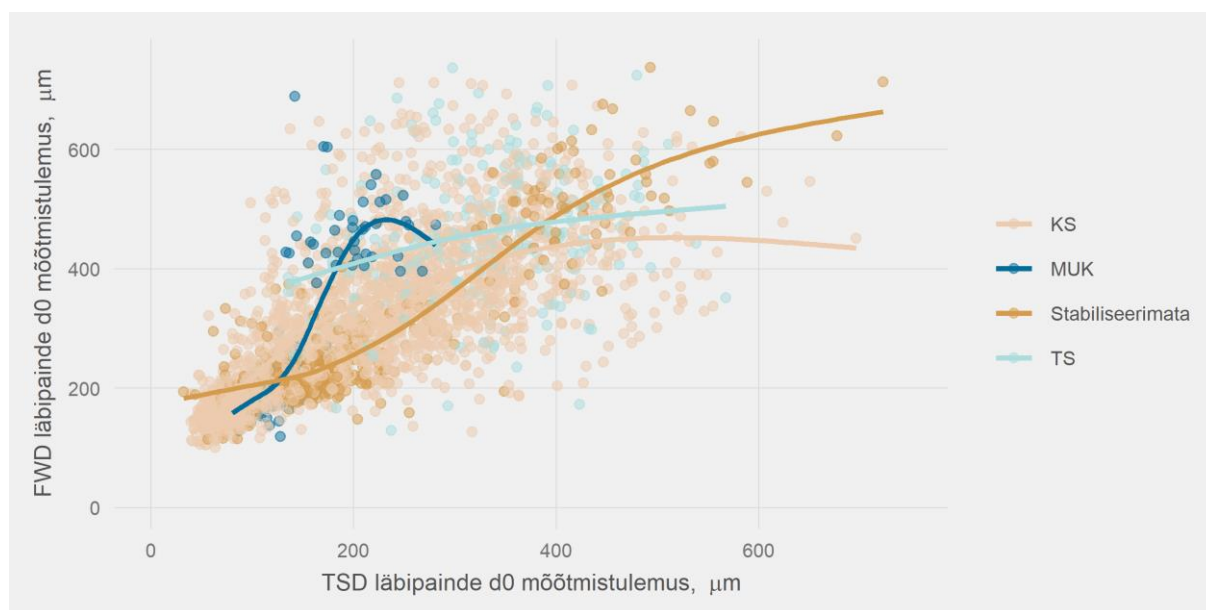
Järgnevalt vaatame katte materjali ja stabiliseerimise mõju TSD ja FWD-seadmega mõõdetud tulemuste vahele. Vahe mõõtmistulemuste vahel on kõigi materjalidega enamvähem sama, välja arvatud ACsurf ja MUK puhul, kus vahe on üle kahe korra suurem kui teiste materjalidega. Samas on sellist kattelahendust kasutatud vaid ühel lühikesel lõigul ja seetõttu võib see olla lihtsalt erandlik väärtus. On näha ka, et vahe on veidi suurem on tsementstabiliseeritud katetel ja väiksem stabiliseerimata katetel.



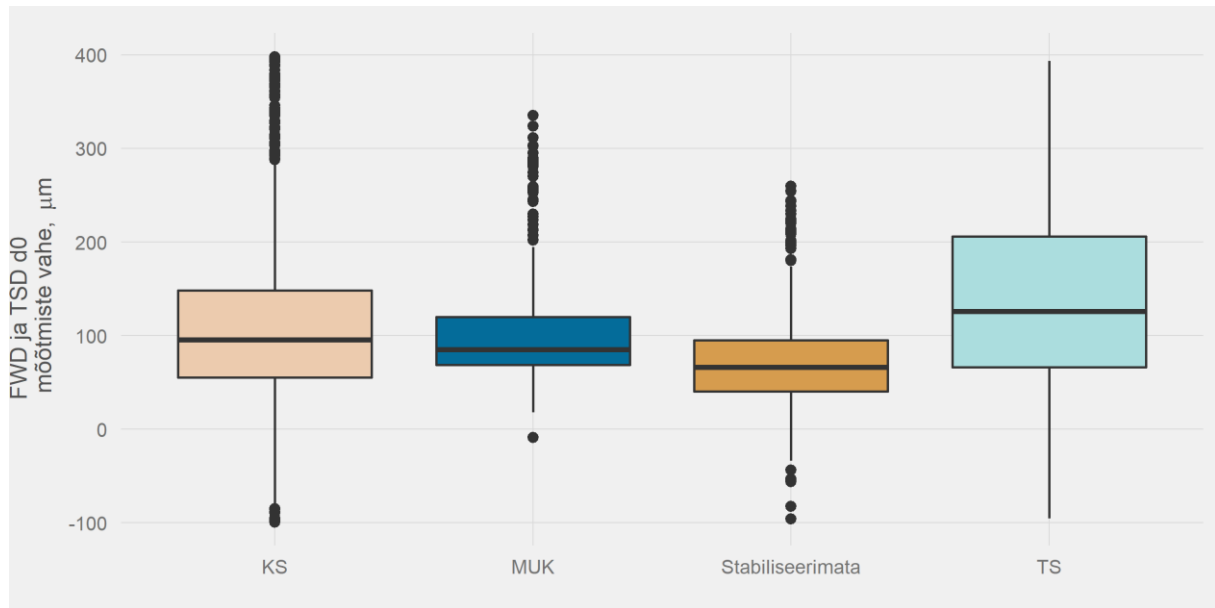
Joonis 49: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja kompleks stabiliseerimisest



Joonis 50: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemuste vahe ja katte materjali vaheline seos



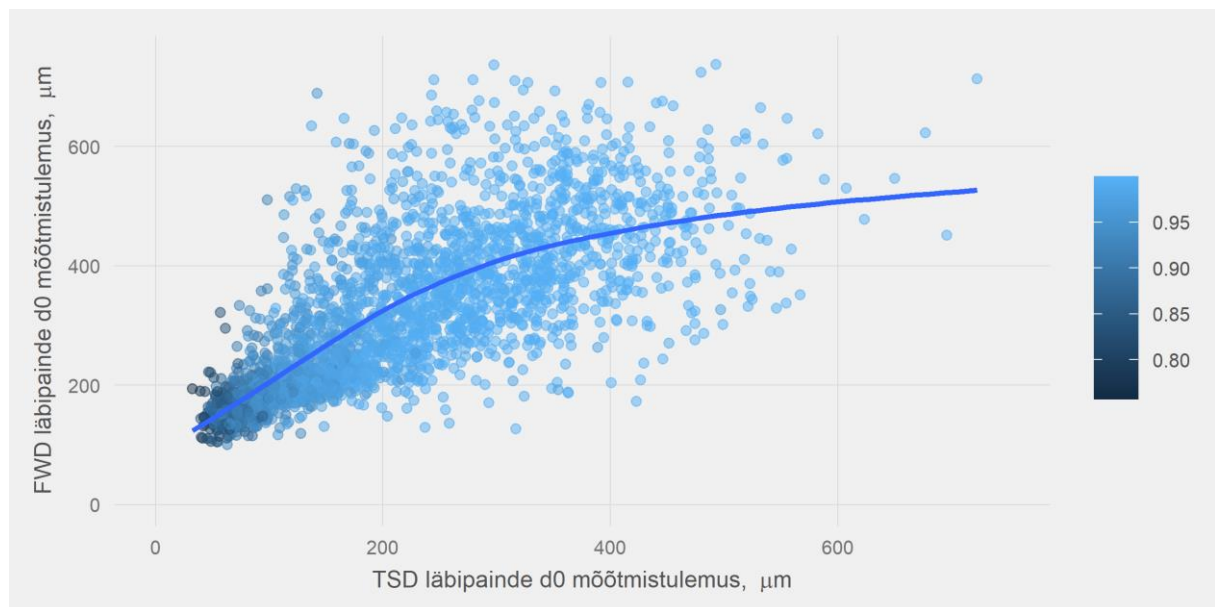
Joonis 51: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja stabiliseerimisest



Joonis 52: TSD-ga ja FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemuste vahe ja stabiliseerimise vaheline seos

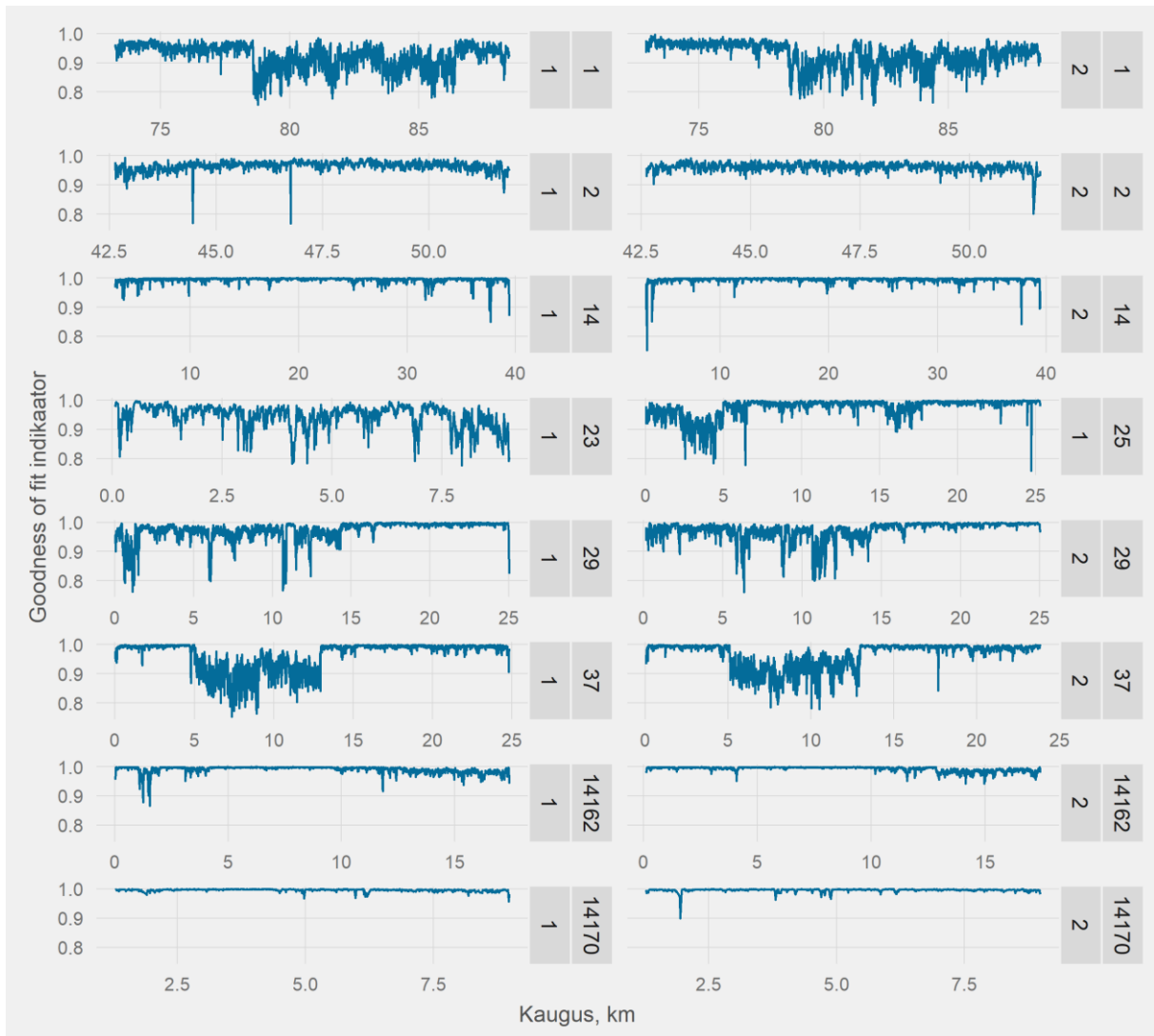
5.1.3.5 Goodness of fit hinnangu mõju

Goodness of fit on TSD-seadme läbipainde arvutusalgortimide hinnang sellele, kui hästi õnnestus määrata läbipainde vajumikauss kiirenduse kaudu. Alumiselt jooniselt on näha, et jäigemate katendite korral (FWD d0 läbipaine alla 200 μm), on *goodness of fit* madalam ja vastavad TSD-ga mõõdetud d0 väärtused veelgi madalamad. Seda, et jäikade katete korral on TSD ja FWD mõõdetud läbipainde omavaheline vastavus madalam, kinnitab nii kirjandus kui ka eksperdid, kellega uuringu käigus sai suheldud.



Joonis 53: TSD-ga mõõdetud läbipainde d0 sõltuvus FWD-ga mõõdetud d0 mõõtmistulemustest ja kompleks-stabiliseerimisest

Järgmisel joonisel on näidatud *goodness of fit* jooksvalt igale teelõigule. Maanteel nr 1 muutub näitaja väga hüppavaks mõlemal suunal km 78. Selles kohas vahetud katte materjalt KMA-lt AC-surfiks. Maantee 37 uuel lõigul (km 5-13) on madala *goodness of fit* põhjusena välja toodud laseri mittetoimimist uuel tumedal asfaldil. Nendel lõikudel, kus *goodness of fit* on madal ja kõikum, on ka vahed TSD ja FWD seadmete vahel suuremad.



Joonis 54: TSD-ga mõõdetud *goodness of fit* lõiguti

5.1.4 Hinnang TSD ja FWD-mõõtmistulemuste kokkulangevusele

TSD ja FWD mõõtmistulemuste suhteline standardhälve jääb lõiguti vahemikku 20 kuni 40%. Kõige suurem on see maanteedel nr 1 ja 37 (uue kattega osal). Samas on nendel lõikudel (mnt 1 ja 37 suund 1) näha head korrelatsiooni lõikude vahel. Korrelatsioon on keskmiselt 0.69, samas lõiguti jääb lõikudel vahemikku 0.26-0.83. Üldjuhul on korrelatsioon madalam lõikudel, mille keskmine läbipaine on madalam (vt seletust pt 4.1.3).

Oluline tegur mõõtmiste kokkulangevuses on FWD mõõtmiste läbiviimise aeg. Kõik TSD mõõtmised viidi läbi oktoobri keskel, aga samade lõikude FWD mõõtmistulemused pärinevad nii kevadest, sügisest kui ka suvest. Andmestikku uurides oli näha, et vahed läbipainete vahel on väiksemad kui

mõõtmised on läbi viidud samas ajaperioodis või vähemalt samal hooajal. Teekatte seisukord ja kattes kasutatud materjalid ei omanud väga selget mõju vahele seadmete mõõtmisandmetes. Samas oli näha, et tsementstabiliseeritud teelõikudel olid vahed kahe seadme vahel suuremad. Lisaks oli näha, et *goodness of fit* indikaator muutub hüppavaks piirkondades, kus katte konstruktsioon muutub. Seda, kas see on seotud mõningate materjali kombinatsioonidega, alumiste või ülemiste kihtidega peaks edasi uurima.

FWD ja TSDD mõõtmistulemuste vahel ei saagi olla täielikku kokkulangevust, sest nende tööpõhimõtted on erinevad. Uuringu käigus viisime läbi mitmed koosolekud välismaiste ekspertidega (TSD ja RWD operaatorid ja tootjad), mille käigus said selgemaks põhjused TSDD ja FWD seadme mõõtmistulemuste vahel.

Esiteks toodi välja, et FWD ja TSD tulemused langevad kõige paremini kokku d0 läbipainde vahemikus 180-800 μm . Seda oli näha ka meie enda andmestikus, kus kõrgematel läbivajumitel olid vahed seadmete vahel suuremad. Kinnitati veelkord, et väga jäikade katete korral annab FWD väga madalaid läbipainde tulemusi. Teiseks tõi TSD-seadme tootja Greenwood Engineering välja, et erinevate katendi konstruktsioonide, eriti nõrkade alumiste kihtide korral, võib TSD ja FWD seadme mõju katendi konstruktsioonile olla väga erinev. Seetõttu on ka seadmetega mõõdetud läbipainded erinevad. Maantee 37 uue katteosa juures tõi mõõtmiste operaator välja, et erinevusi võis põhjustada ka see, et uus asfalt on väga tume. Neil on kogemusi, et väga tumeda asfaldi korral ei suuda mõõteseadme laser korrektselt kiirusi mõõta.

Teiseks toodi välja, et TSD mõõtmiskiirus ja FWD-seadme imiteeritud kiirus meie katsetes on erinev. FWD-seade kasutatud seadistuses imiteerib kiirusi 60 km/h, TSD-seadme keskmine kiirus mõõtmislõikudel oli 70 km/h ja maksimaalne kiirus 78 km/h. Mõlemad seadmetootjad (Greenwood ja Ramboll), olid oma katsetes selgitanud, et erinevate kiirustega tekitatakse katetes erinev läbipaine.

Kolmandaks erinevad TSD-seadmega ja FWD-seadmega mõõdetud alad. FWD mõõdab läbipainet täpselt 300 mm läbimõõduga plaadi all. TSD-andmeid vaadeldi selles uuringus 10 m lõigu keskmisena. Kuna mõõdetud piirkondade vahel ei ole täielikku kattumist, ei saa olla ka andmete vahel täielikku kattumist. Ka koormuse rakendamise punkt on erinev - FWD seadme koormus rakendatakse vaid ühele punktile, samas kui TSDD-puhul jaotud koormus nelja erineva punkti peale.

TSD-seadme tootja Greenwood tõi ka välja, et liikuva koormuse tõttu ei lange TSDD-seadmel maksimaalne läbipaine ja läbipaine ratta keskel (d0) alati kokku. Olenevalt kiirusest ja teekonstruktsioonist võib maksimaalne läbipaine olla d0-st tagapool. Samas on FWD-seadme maksimaalne läbipaine alati koormuse rakendamise keskpunktis. Seetõttu võrreldes võivad d0 väärtusi võrreldes olla FWD seadme läbipainded suuremad kui TSDD väärtused. Mõõtmisandmete omavahelisele võrdlemisele aitab kaasa, kui TSDD-mõõtmistulemustel arvutada lisaks d0 väärtusele välja ka maksimaalne läbipaine.

5.2 Kandevõime arvutuse võrdlus

5.2.1 Kandevõime arvutamine erinevate meetoditega

Et vastata uurimisküsimusele millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste läbi arvutatud kandevõimel, arvutatakse kandevõime nii TSD kui FWD-ga mõõdetud näitajate kaudu. Kandevõime arvutatakse nii Aaviku doktoritöös välja toodud ETMH konstantidega (E - üldine elastsusmoodul, T - temperatuur, M - kuu, H - mulde kõrgus) ja uues kandevõime uuringus välja toodud ETM_{2003} konstantidega (E - üldine elastsusmoodul, T - temperatuur, M - kuu) kui ka ETMHK konstantidega (H - seotud kihtide paksus, K - katte paksus).¹

Üldine elastsusmoodul arvutatakse kõigil meetoditel järgmise valemi järgi. Valem põhineb Bousinnesqi valemil ja on taandatud A. Aaviku doktoritöös väljatoodud kujult (Aavik 2003), et seda oleks võimalik kasutada ka TSD-mõõtmistulemustega. Taandamise protseduur on näha Lisas 3.

$$E_{eq}[MPa] = \frac{10^3 * F * (1 - \mu^2)}{2 * r * d_0},$$

kus F - koormusplaadile või rattale rakendatav jõud, kN;

μ - Poisson'i tegur;

r - koormusplaadi või ratta kontaktpinna raadius, m;

d_0 - vajum koormusplaadi või kontaktpinna keskel, μ m.

Aaviku doktoritöös ja elastsete katendite juhendis on kirjeldatud järgmine valem katendi kandevõime arvutamiseks. Vastavate koefitsientide väärtused pärinevad elastsete katendite juhendist.

$$E_{ETMH}[MPa] = C * E_{eq}^e * T^t * M_i * H_j$$

kus C, e, t - empiirilised koefitsiendid vastavalt valitud meetodikale;

M_i - kuu koefitsient vastavalt valitud meetodikale;

T - temperatuur, C;

H_j - mulde kõrguse järgi leitud koefitsient.

Uues kandevõime uuringus väljatoodud valemid kandevõime arvutamiseks on järgmised. Vastavate koefitsientide väärtused on võetud uurimustööst.

$$E_{ETMKH}[MPa] = C * E_{eq}^e * T^t * H^h * K^k * M_i$$

$$E_{ETM_{2003}}[MPa] = C * E_{eq}^e * T^t * M_i$$

kus C, e, t, h, k - empiirilised koefitsiendid vastavalt valitud meetodikale;

M_i - kuu koefitsient vastavalt valitud meetodikale;

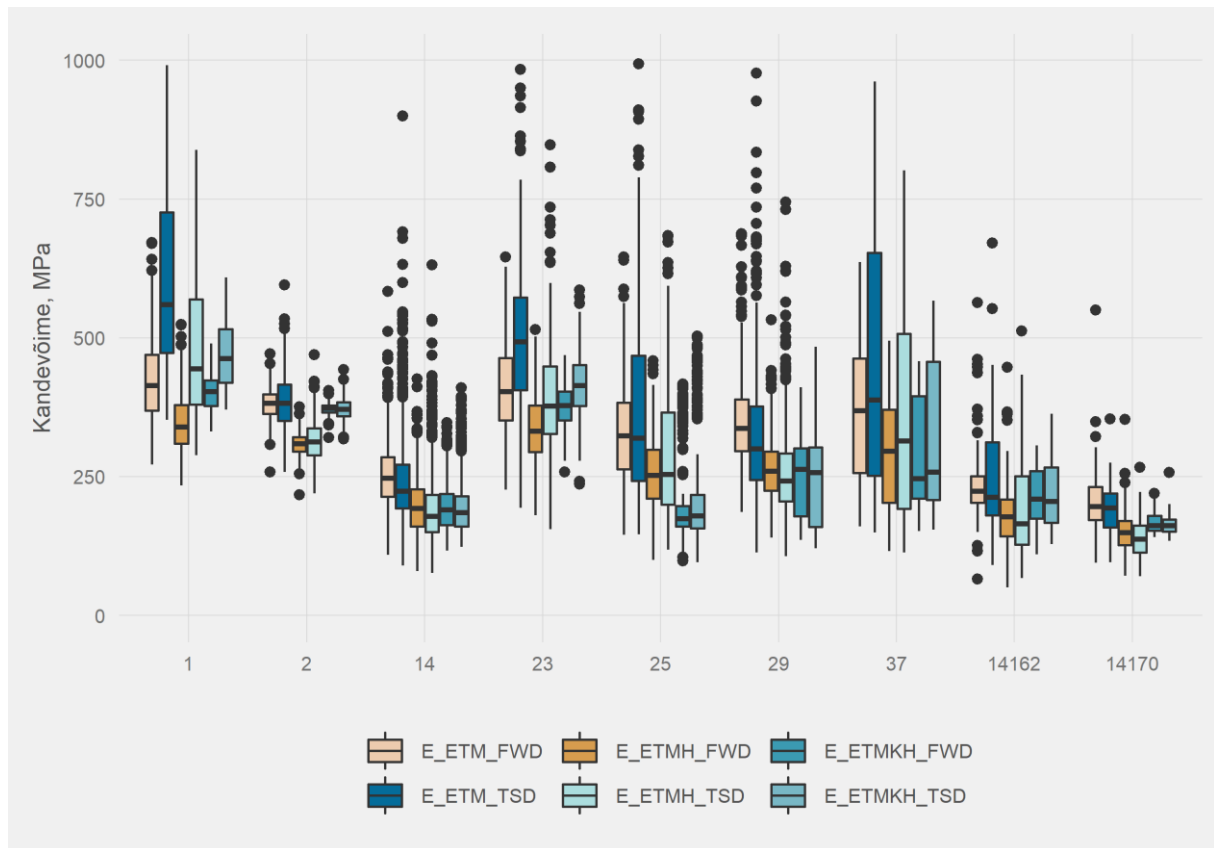
T - temperatuur, C;

K - asfaltkihtide paksus, cm;

H - seotud kihtide paksus, cm.

¹ Maantee 37 ühel osal, kus olid FWD mõõtmised läbi viidud novembri kuus, kasutati oktoobrikuu koefitsiente.

Järgnevalt on toodud arvutustulemused *boxplotina* erinevatel lõikudel. On näha, et mudelite enda vahel on suuremad vahed kui erinevates mudelites kasutatud mõõtmisandmete vahel. Mitmetel lõikudel on TSD ja FWD seadme kaudu arvutatud keskmised kandevõime väärtused väga sarnased.



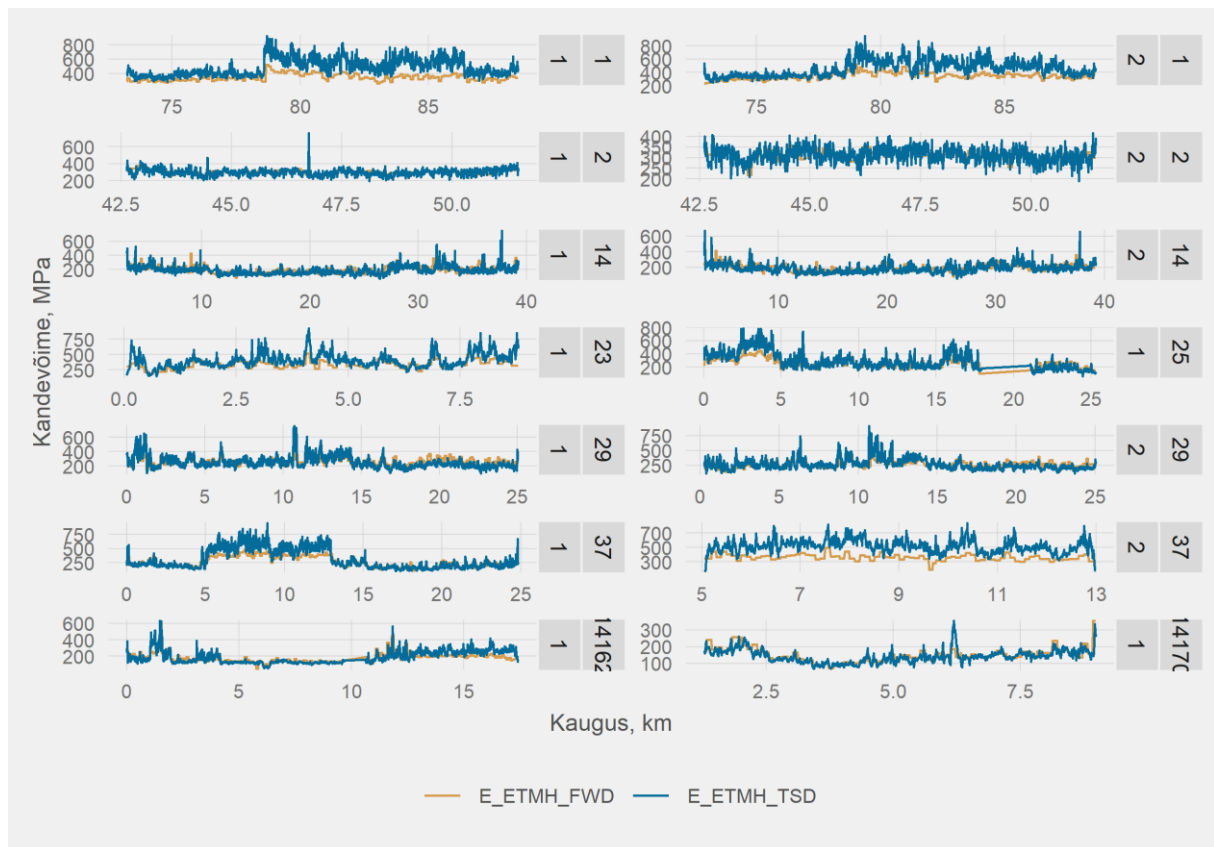
Joonis 55: Erinevate meetodite ja mõõtmisandmetega arvutatud kandevõime lõiguti

5.2.2 Kandevõime kokkulangevus eri seadmete vahel

Järgnevalt vaatame praegu kasutusel oleva ETMH meetodiga arvutatud kandevõimet kummagi seadme tulemustega lõiguti.

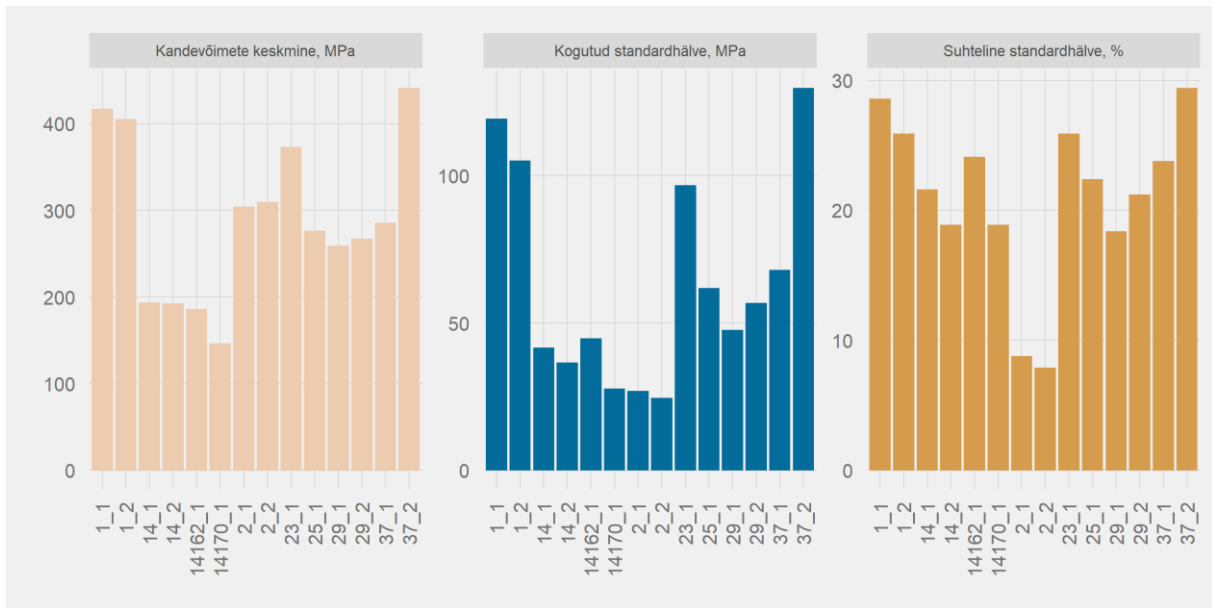
Kandevõime väljaarvutamisel on näha, et TSD ja FWD tulemused langevad siinkohal paremini kokku kui vaid läbipainete võrdlemisel. See on ka igati loogiline, sest näiteks läbi kuukoefitsientide võetakse arvesse mõõtmiste erinevaid perioode.

Lisaks on näha, et FWD mõõtmiste kaudu nähtavad nõrgemad ja tugevamad kohad katendis avalduvad ka TSD-ga arvutatud tulemustes. Näiteks maantee 37 suunal 1 eraldub mõlemal mõõtmisel selgelt km 5-13 ehitatud uue katte osa vanast. Samuti eristuvad mõlemal mõõtmisel maanteedel 25, 29 ja 14162 kõrgema kandevõimega kohad madalamatest.

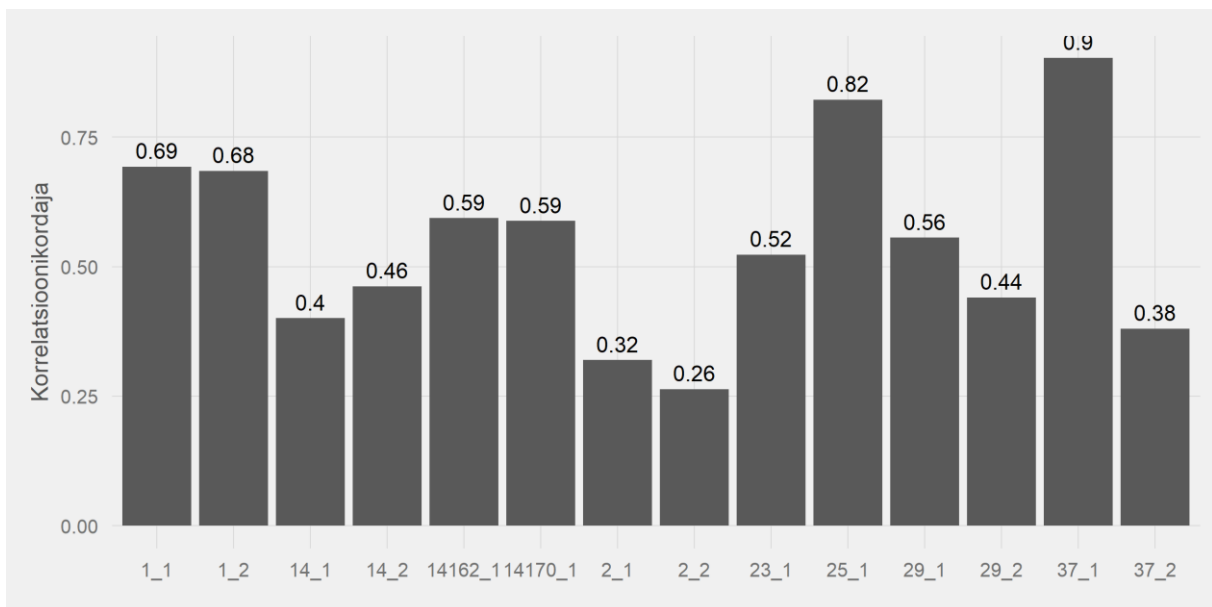


Joonis 56: TSD-ga mõõdetud läbipaine võrreldes FWD-seadmega mõõdetud läbipaindega

Tasub välja tuua maantee 37 km 5-13, mille mõlemal suunal on just valminud uus kate. Seal näitavad TSD mõõtmistulemused märkimisväärselt kõrgemat kandevõimet kui FWD mõõtmistulemused (keskmiste vahe 150 MPa). TSD ja FWD mõõtmised nendel lõikudel viidi läbi samadel päevadel. Maantee 37 teistel osadel kattuvad arvutatud kandevõime tulemused aga väga hästi. Samuti on suuremad erinevused maanteel 1 km 78-86. Mõlemal lõigul on arvutatud kandevõime väärtused suhteliselt kõrged. Arutelus TSD-seadme operaatoritega pakuti, et erinevusi seadmete mõõtmistulemuste vahel võis põhjustada see, et mõõdetud tee number 37 lõik oli uue asfaltiga. Nad tõid välja, et väga tumedalt kattelt mõõtmisel ei pruugi seade mõõta õiget läbipainde kiirust. Seda näitas ka tolle lõigu pigem madalam *goodness of fit* (TSD-seadme algoritmide hinnang arvutatud läbipainde sobivusele).



Joonis 57: Keskmine kandevõime ja kogutud standardhälve FWD ja TSD mõõtmistulemuste põhjal



Joonis 58: TSD ja FWD-seadme mõõtmistulemuste põhjal arvutatud kandevõime korrelatsioonikordaja

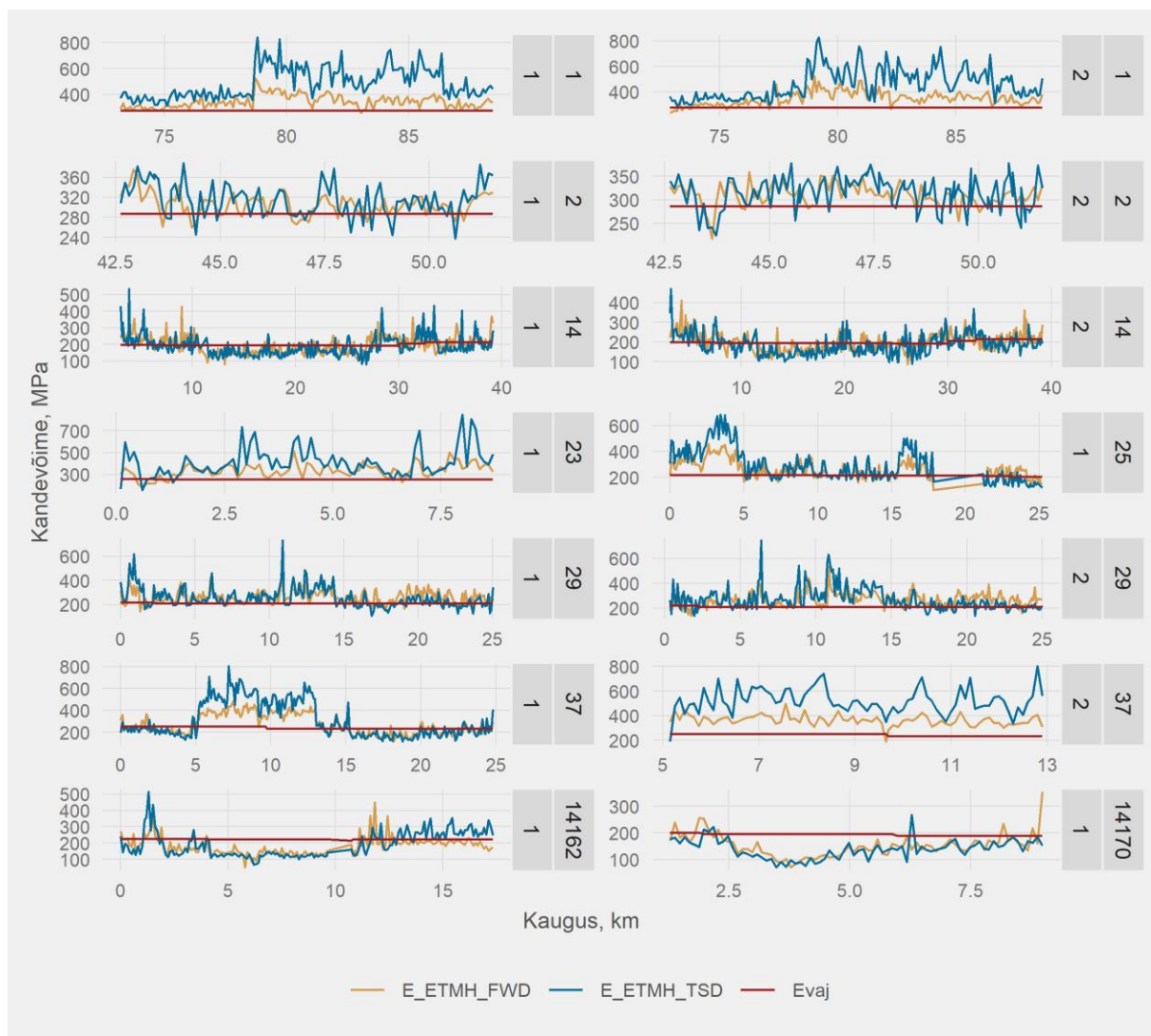
Võrreldes arvutatud kandevõimete omavahelist korrelatsiooni on näha, et sarnaselt läbipaindele on mõnedel lõikudel korrelatsioon väga hea ja teistel halb. On näha ka et madal korrelatsioon ja madal standardhälve ei käi tingimata koos. Näiteks maanteedel 14 ja 2 on üks madalamaid standardhälbeid, aga seal on näha ka madalat korrelatsiooni. Maanteel 1 ja 37_2 on suhteliselt kõrge standardhälve, aga ka suhteliselt kõrge korrelatsioon. Samas nagu ka peatükis 4 sai kirjeldatud, ei pruugi korrelatsioon olla siinkohal kõige parem meetod kokkulangevuse hindamiseks. Korrelatsioon on üldjuhul parem kui mõõtmistulemuste jaotus on laiem, võrreldavad tulemused on kitsamas vahemikus, siis on korrelatsioon kehvem (vt pt. 4.1.3).

5.3 Nõrkade kohtade tuvastamine

Üks kõige olulisemaid küsimusi TSD-seadme kasutuselevõtmisel on, kuidas kasutada TSD-seadet katendi nõrkade kohtade tuvastamiseks. Juba korratavuse võrdlemisel oli näha, et TSD tulemustes eristuvad selget suurema läbipaindega kohad - maantee 14 peal oli näha kaks ala, kus oli suur läbipaine ja kõrge BDI ja BCI väärtus. Nendes kohtades läks tee alt läbi truup ja tegu oli liigniiske alaga (vt joonis 15 ja 16).

Täpsemaks nõrkade kohtade tuvastamiseks arvutati läbi Aavik et al. (2007) töös toodud meetodika ja elastsete katendite projekteerimisjuhendi katendi vajalik elastsusmoodul.

Järgmisel joonisel olevatest TSD ja FWD tulemusi võrdlevatest joograafikutest (ETMH meetodiga) on näha, et madalama ja kõrgema kandevõimega kohad on näha mõlema seadmega. Näiteks erisuvad mõlema seadmega kõrgema kandevõimega alad teedel nr 1 (km 78), nr 23 (km 7.0), nr 25 (km 3-5), nr 25 (suund 2 km 6, 9, 11), uue kattega ala teel nr 37 ja madalama kandevõimega alad teedel nr 14162, nr 14170, nr 14, nr 23 (km 1) ja nr 2 (suund 2 km 43). Lisaks eristuvad mõlema seadmega suuremad hüpped näitajates BCI, BDI ja SCI (joonised lisas 4).



Joonis 59: TSD ja FWD-seadmega arvatud kandevõime võrreldes vajaliku kandevõimega

Nagu on näha alumises tabelis, siis suuremal osal juhtudest (701 punktis) suutsid mõlemad meetodid tuvastada ebapiisava kandevõimega kohad. Hinnangud kahe meetodi vahel erinesid kokku 585 punktis.

Tabel 1: Hinnang kandevõime piisavusele läbi E-vajaliku ja kummagi seadmega arvutatud kandevõime (ETMH meetodiga)

Emod TSD/Emod FWD	Alla vajaliku	Piisav
Alla vajaliku	701	349
Piisav	236	1296

5.4 Mõõtmistehniline võrdlus

Järgmises peatükis vastatakse küsimusele, millised on mõõtmistehnilised erinevused FWD ja TSDD-seadmete kasutamisel.

Tabel 2: TSD ja FWD-seadme mõõtmistehniline võrdlus

Hinnatav muutuja	TSDD-seade	FWD-seade
Mõõtmistüüp	Pidevmõõtmine	Punktmõõtmine
Rakendusvaldkonnad	Võrgumõõtmised	Kohtmõõtmised (parklad, väikesed objektid) ja võrgumõõtmised
Mõõtmiskiirus	kuni 80km/h	Ligi 40 punkti tunnis võrgumõõtmistel
Mõõtmisperiood	kevadest sügiseni	kevadest sügiseni
Välis temperatuuri tingimused	Ei saa mõõta kuumalainega, mõjutab metalltala. Oluline on sisetemperatuuri ühtlasena hoidmine	Seadmest tulenevaid piire ei ole
Tee seisund	Kate peab olema kuiv	Kate võib olla märg
Liikluse segamine, liiklusoht	Madalam, suurema liiklusega teedel võib vajada saateautot	Kõrgem, suurema liiklusega teedel võib vajada raja sulgemist
Mõõtmine kruusateedel	Teoreetiliselt võimalik, aga tolmu võib oluliselt mõjutada mõõtmistulemuste kvaliteeti	Võimalik
Seadme kättesaadavus	Eestis seadet ei ole, mõõtmine tuleb tellida teistest riikidest (Poola, Rootsi, Taani, Holland)	Seade olemas Eestis ja lähiriikides
Ligipääsupiirangud	Ei saa mõõta väga kitsastel teedel ja tänavatel ning madalate sildadega ja muude gabariidipiirangutega teedel (madalad oksad, puudulik ümberpööramisvõimalus jne)	Põhimõtteliselt puuduvad
Koormusliik	Liikuv koormus, jaotatuna mitmele rattale, suur sumbumise mõju	Impulsskoormus, imiteerib reaalselt koormust ühes punktis
Eksperimendi korratavus	Halvemini korratav	Paremini korratav

Andurite tüüp	Laser- või dopplerlaserandurid	Geofonid (kiirendusandurid) või seismomeetrid
Andmete iseloom (üksikmõõtmiste kasutatavus)	Keskmistatud väärtus, kõrge müra üksikpunkti hindamisel	Väärtus kindlas punktis

6 TSDD-SEADME RAKENDAMINE EESTI TEEDEVÕRGUL

Järgnevas peatükis vastatakse uurimisküsimusele, kuidas rakendada TSDD-seadet Eesti teedevõrgul. Vaadeldakse mõõtmistehnilisi aspekte, andmeanalüüsi puudutavaid küsimusi ning andmete taaskasutamist ja salvestamist. Antakse soovitused TSDD-seadmete edasiseks kasutamiseks.

TSDD-seade sobib teoreetiliselt kõige paremini võrgumõõtmisteks, eriti just suurematele maanteedele, kus ohutuse tõttu on mõõtmised FWD seadmega raskendatud. TSDD-seadme rakendamisel võrgumõõtmistel tuleks siiski jätkata FWD-seadmega mõõtmiste läbiviimist. FWD-seadme kasutusvahemik on pikem, seda saab kasutada ka niiske katte korral, lühema etteteatamisega, kruusateedel ja väiksematel objektidel. Kuigi TSDD-seadet saab teoreetiliselt kasutada ka kruusateedel, on praktikas kaheldav selle kasutamine Eesti tingimustes, sest tolmu ja pori võivad segada laseri tööd ja mõjutada sealt saadava info kvaliteeti.

Arvestades TSDD-seadme tundlikkust katte peal olevale niiskusele, on soovitatav mõõtmised läbi viia kuivemal perioodil - varasügisel või varasuvel. Käte peab mõõtmiste ajal olema kindlasti kuiv - vastasel juhul ei anna laserid korrektset infot. Tuleks vältida mõõtmisi kesksuvel, sest need olud iseloomustavad meie kliimas katendit väga lühikeses ajaperioodis. S. Rasmussen (Ramboll) soovitus oli, et võrgumõõtmisi peaks läbi viima iga aasta samal ajal, sest siis on tulemused aastast-aastasse võrreldavad. Katte visko-elastsetest aspektist lähtudes tuleb sarnaselt FWD-le jälgida ka temperatuure - mõõtmisi ei saa läbi viia väga külmaga. Ka kuumal ajal tehtud mõõtmised võivad osutuda probleemseks, sest kõrged temperatuurid mõjutavad TSDD-seadme metalltala.

TSDD-seadmega saadud mõõtmisandmete üks suurimaid eeliseid FWD-ga tehtud mõõtmiste ees on andmete pidevus. Kuna teeregistrisse on andmeid võimalik sisestada vaid 100m sammuga, siis TSDD-seadme kasutuselevõtmisel on soovitatav välja arendada andmebaas, kuhu oleks võimalik kanda TSDD-ga mõõdetud andmed vähemalt 10m või isegi väiksema sammuga. See võimaldab nõrkade kohtade paremat tuvastamist.

Peale registrisse kantavate läbivajumite on vähemalt TSDD rakendamise perioodi alguses oluline säilitada ka muid seadme mõõtmisandmeid (andurite mõõdetud kiirused, seadme sõidukiirus). Hetkel ei ole ka mitmetes teistes riikides ühtset metoodikat kandevõime arvutamiseks TSDD-andmete põhjal, aga sel teemal on tehtud mitmeid uuringuid ja on ka arenduses olevaid mudeleid. Need andmed võivad olla olulised hiljem uue metoodika rakendamisel kandevõime arvutamiseks.

Üks olulisemaid küsimusi TSDD-süsteemi rakendamisel on kandevõime arvutamine nende andmete põhjal. TSDD ja FWD seadme tööpõhimõtted on väga erinevad - erinev on nii koormuse rakendamine (TSDD-seadme teiste rataste mõju kattele) kui ka koormamise meetod (seisev vs liikuv koormus). Seetõttu on ka nende tekitatud vajumikausid ja maksimaalsed läbivajumid erinevad. Seadmete tekitatud läbivajumite erinevused varieeruvad olenevalt katendi konstruktsioonist ja aluskihtidest ning seetõttu ei ole ka võimalik välja töötada usaldusväärset valemit mõõtmisandmete teisendamiseks ühelt süsteemilt teisele. Ka ekspertidest, kellega sai uuringu käigus suheldud, ei kasutanud keegi sellist teisendamist. Pigem liigutakse hetkel selle poole, et arendada välja TSD-mõõtmisandmete põhjal kandevõime arvutusmetoodika. TSD-seadme tootja Greenwood on hetkel

välja töötamas oma veebipõhist rakendust, millega kandevõimet arvutada. Oma arvutusmetoodika on ka Raptori RWD seadmel.

Uuring näitas, et Eesti praeguse kandevõime metoodika rakendamisel TSD-mõõtmistulemustele on võimalik enamustel lõikudel tuvastada nõrgad kohad (võrreldes vajaliku kandevõimega Evaj). Lisaks on metoodika rakendamine lihtne ja ei nõua eraldi arvutusprogramme. Samas on lõike, mille kandevõime hinnangud FWD ja TSD seadme vahel olid väga erinevad (tulenevalt erinevast läbivajumi hinnangust). TSDD jaoks eraldi kandevõime metoodika kasutamisel võib olla võimalik selliseid erinevusi vältida, sest see mudel suudaks võtta arvesse liikuva koormuse mõju ja kattes tekkivat sumbumist (*damping*). Samas nõuab TSDD-seadme põhiste meetodite rakendamine ka usaldusväärseid andmeid katendi kihtide paksuste kohta ning eraldiseisva arvutusprogrammi kasutamist.

Tuleb arvestada, et ka erinevate TSDD-seadmete mõõtmistulemused võivad olla omavahel erinevad. TSD-seadmel ja RWD-seadmel on mõnevõrra erinevad tööpõhimõtted läbivajumite mõõtmisel. Sellega tuleb arvestada mõõtmiste kriteeriumite väljatöötamisel ja mõõtmistulemuste hindamisel.

TSDD-seadme kasutamist Eesti teedel teekonstruktsiooni kandevõime hindamiseks tuleks edasi uurida järgmistest aspektidest lähtuvalt:

- Uurida kandevõime mõõtmiste läbiviimiseks parimat ajaperioodi. Mõõtmiste aeg on oluline läbivajumite kaudu kandevõime hindamisel - läbivajumeid mõjutavad nii katendi sulamine, vee hulk katendis kui ka bituumen sideainega seotud kihtide temperatuur. Need näitajad võivad ka erinevatel aastatel samal ajaperioodil olla erinevad. Ka piirkonniti võivad olla suured erinevused. Selleks, et TSDD mõõtmisandmed oleks hiljem kõige paremini kasutatavad, tuleks leida aeg mil muutujad oleksid võimalikult stabiilsed, ent siiski iseloomustaks katendit selle nõrgemas seisukorras. Vaid TSDD-mõõtmisandmete põhjal ei saa seda analüüsi teha, kuna saame info väga piiratud ajaperioodi kohta. Olemasolevate FWD kontrolljaamade mõõtmisandmete ja Perco jaamade põhjal oleks võimalik uurida, millal erinevates kohtades katend sulab ja hinnata, millal on mõistlik katetel kandevõimet TSD-ga mõõta. Olemasolevatele kontrolljaamadele lisaks võib olla vajalik lisada mõõtmispunkte.
- Uurida TSDD mõõtmisandmete põhjal kandevõime arvutusmudeleid, mis arvestavad ka liikuva koormuse mõju ja kattes tekkivat sumbumist. Praegune FWD-I põhinev arvutusmetoodika neid tegureid ei arvesta. Eesmärk on leida TSDD-mõõtmisandmetele kandevõime arvutusmetoodika, mida saaks kasutada, et hinnata katendite kandevõimet ka projekteerimisel kasutatava KAP programmi ja E-vajaliku kontekstis. Tuleks testida erinevate tootjate kandevõime arvutuse mudeleid ja hinnata nende sobivust vajaliku kandevõimega Evaj võrdlemisel. Hinnata, millised mudelid võimaldavad erinevat tüüpi katenditel kõige paremini kandevõimet ja nõrku kohti hinnata. Võrrelda praeguse Eesti kandevõime arvutusmetoodika ja TSDD-le loodud kandevõime arvutusmetoodika erinevusi. Vajadusel tuleks kaasata FWD andmeid kontrollpunktides. Testida nende metoodikate põhjal edasi- ja tagasiarvutust nii FWD kui ka TSD andmetega.

- Uurida TSDD mõõtmisandmete laiemat kasutamist PMS-süsteemis. Selle eesmärgiks oleks paremini tuvastada anomaaliaid teekatendis (nõrga kandevõimega kohad, ülemineku kohad, lokaalsed defektid) ja täpsemalt planeerida teetöid ning mõõtmisi. TSDD-mõõtmistel tekib palju rohkem ja tihedamalt andmeid kui tavapäraste FWD mõõtmistega. Esiteks saab neid andmeid kasutada, et vaadelda teelõike suurema täpsusega, kui seda on varasemalt tehtud. See võimaldab tuvastada anomaaliaid, nagu näiteks nõrga kandevõimega piirkonnad, üleminekukohad katendi konstruktsioonis, lokaalsed defektid või leida niiskemaid piirkondi/teelõike. Samuti on andmetest võimalik näha sillaplaate ja truupe. Greenwoodis uuritakse hetkel TSD-andmete kasutamist betoonteede vuukide kaardistamiseks. TSDD üheks kasutusvaldkonnaks on homogeensete teelõikude määratlemine, et paremini planeerida teetöid ja vajadusel lokaliseerida täpsemad mõõtmised. Kasutades 1m sammuga andmeid, võib osutuda võimalikuks uurida seoseid TSDD andmete ja teekatte defektide ja kandevõime ning niiskete piirkondade vahel. Lisaks tuleks leida meetodika andmete süstematiseerimiseks, et andmete kasutajale joonistuksid välja probleemid võrgutasandil.
- Soovitame viia läbi TSDD-seadmega kandevõime võrgumõõtmised minimaalselt kõigil põhimaanteedel, moodustades nendest ülevaatliku ja võrreldava tervikliku. Mõõtmised tuleks eelistatult läbi viia perioodil, mil teekonstruktsioon on keskmisest nõrgem kuid stabiilne tagamaks mõõtmiste omavahelise võrreldavuse. Sama põhimõtet tuleks tulevikus jälgida kordusmõõtmistel. Mõõtmisandmed võiksid olla nii 10m kui ka 1m keskmisena. Iga-aastased mõõtmised põhimaanteedel annaksid nii hea aluse seadme rakendamise edasiseks uurimiseks kui ka põhimaanteede seisukorra hindamiseks. Nende andmete lähemal uurimisel on võimalik jälgida pidevmeetodil muutusi katendi konstruktsioonis kui ka leida andmetele uusi rakendusvõimalusi.

7 KOKKUVÕTE

TSDD-seade on pidevmõõteseade, mis võimaldab mõõta läbipainet ja hinnata tee kandevõimet sõidukiirusel. Käesoleva uuringu eesmärk oli hinnata TSDD-seadme kasutatavust Eesti teedevõrgu kandevõime hindamisel. TSDD-seadme kasutuse hindamiseks vastati uurimistöös järgnevatele uurimisküsimustele.

1. Millised tee- ja keskkonna tingimused mõjutavad TSD-mõõtmistulemusi?
2. Milline on TSD mõõtmistulemuste korratavus?
3. Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste vahel?
4. Millised on seosed FWD ja TSD mõõtmistulemuste läbi arvutatud kandevõimetele?
5. Kas TSD suudab tuvastada nõrku kohti katendis?
6. Millised on mõõtmistehnilised erinevused FWD ja TSD seadmete kasutamisel?
7. Kuidas rakendada TSD-seadet Eesti teedevõrgul?

Analüüsis vaadeldi mõõtmistulemuste korratavust graafiliselt ja arvutati kogutud standardhälve ja Pearsoni korrelatsioonikordaja. Läbiviidud mõõtmistulemused näitavad, et TSD-seadmega läbiviidud kordusmõõtmised langevad omavahel kokku. Mõlemal maanteel, millel kordusmõõtmised läbi viidi, oli standardhälve suurusjärg sarnane, jäädes 8 ja 14% vahele. Head korratavust on näidanud ka varasemad uuringud. Uuringus vaadeldi ka tee- ja keskkonnatingumusi, mis mõjutavad TSD-seadme mõõtmistulemusi. Kõige suuremat mõju avaldasid mõõtmistulemusele tee temperatuur, katte materjalid, stabiliseerimine ja katte paksus. Eraldi vaadeldi ka tee kurvilisust, kuid sellel ei tuvastatud mõju läbipainde mõõtmistulemusele.

Järgmisena vaadeldi mõõdetud TSD mõõtmistulemusi koos samade lõikude FWD mõõtmistulemustega. FWD mõõtmised olid mõnedel lõikudest viidud läbi samaaegselt TSD mõõtmistega, teistel lõikudel olid need läbi viidud eelnevate aastate kevadel, suvel või sügisel. TSD ja FWD läbipainde d0 mõõtmistulemuste suhteline standardhälve jääb lõiguti vahemikku 20 kuni 40%. Korrelatsioon on keskmiselt 0.69, samas lõiguti jääb lõikudel vahemikku 0.26-0.83. Üks olulisi põhjuseid FWD ja TSD-ga mõõdetud läbipainde erinevuste vahel on mõõtmiste erinev ajastus. Samas ajaperioodis läbi viidud mõõtmised langesid omavahel paremini kokku kui erinevatel aegadel läbi viidud mõõtmised. Teekatte seisukord ja kattes kasutatud materjalid ei omanud väga selget mõju mõõtmisandmete vahele. Samas oli näha, et tsementstabiliseeritud teelõikudel olid vahed kahe seadme vahel suuremad ja *goodness of fit* näitaja andmetes tundus mõndade materjalide kombinatsioonide korral langevat.

Samas oluline järeldus nii kirjanduse kui ka vestluste põhjal ekspertidega on, et täielikku kokkulangevust mõõtmistulemuste vahel ei saagi olla. Selle põhjuseks on mõõteseadmete mõõtmistehnilised erinevused. Seadmed mõõdavad erinevaid piirkondi (selles analüüsis TSD 10m keskmisena ja FWD üksiku punktmõõtmisena). Seadmed mõõdavad erinevatel kiirustel (FWD on seadistatud imiteerima 60 km/h, TSD keskmine kiirus oli üle 70 km/h). Lisaks tekivad TSDD mõõtmistel liikuva koormuse mõjul katendis jõud, mida FWD mõõtmistel ei teki. Selgus ka, et TSD

mõõtmised ei pruugi sobida väga uutele katetele, mille tumeda asfaldi pealt ei suuda mõõteseadme laser mõõta korrektselt kiiruseid.

Erinevused TSD ja FWD vahelistes läbipainetes kanduvad edasi ka nende põhjal arvatud kandevõimesse. TSD ja FWD arvatud kandevõimete suhteline standardhälve jääb lõiguti vahemikku 10 kuni 30%, mis on väiksem kui suhteline standardhälve läbipainete vahel. Kandevõime arvutamisel kasutatud konstandid, mis võtavad arvesse mõõtmiste läbiviimise aega, tee temperatuuri ja rakendusala erinevust, vähendasid mõnevõrra nendest näitajatest tulenevaid erinevusi. Samas nendel lõikudel, kus erinevused olid väga suured (näiteks mnt 1 ja 37 uue katte osa), need ka säilisid. Kui võrrelda nii TSD kui FWD-ga arvatud kandevõimet tee vajaliku kandevõime Evaj-ga, siis on näha, et olenemata erinevustest on mõlema seadmega näha nii nõrgad kui tugevamad piirkonnad katendis. Lisaks eristuvad mõlema seadmega suuremad hüpped näitajates BCI, BDI ja SCI.

Eesti tingimustes sobivad TSDD-seadmed kõige paremini võrgumõõtmisteks, eriti just suurematele maanteedele. TSDD mõõtmiste planeerimisel tuleb arvestada, et mõõtmisteks on vajalik täiesti kuiv kate. Samuti ei saa mõõtmisi teostada kuimalainega, kuna see avaldab mõju seadme metalltalale ja seega andmete kvaliteedile. Ka kruusateedele ei ole mõtet Eestis TSDD mõõtmisi kavandada, kuna tolmu ja pori mõjutavad samuti andmete kvaliteeti.

TSDD andmete üheks suureks eeliseks FWD mõõtmiste ees on mõõtmisandmete pidevus. Selleks, et mõõdetud andmeid kõige paremini kasutada on tarvis andmebaasi, kuhu saab andmed sisestada mõõtmisammuga 10 m või isegi 1 m. Andmete edasiseks kasutuseks ja analüüsiks tuleks lisaks vajumikausi läbipainetele salvestada ka võimalikult paljud muud seadme mõõtmisandmeid (andurite mõõdetud kiirused, seadme sõidukiirus, koormus jms). Need andmed võivad olla olulised hiljem uue meetodika rakendamisel kandevõime arvutamiseks.

Soovitame alustada TSDD võrgumõõtmistega põhimaanteedel. Iga-aastased mõõtmised põhimaanteedel annaksid hea aluse seadme rakendamise edasiseks uurimiseks kui ka põhimaanteede seisukorra hindamiseks. Nende andmete lähemal uurimisel on võimalik jälgida pidevmeetodil muutusi katendi konstruktsioonis kui ka leida andmetele uusi rakendusvõimalusi.

TSDD-seadme rakendamise uurimist Eestis tuleks jätkata. Vaja oleks selgitada TSDD mõõtmiste läbiviimiseks sobivaim ajaperiood. Nii praegusest uuringust kui ka varasematest töödest on näha, et mõõtmisaeg on oluline kandevõime hindamisel. Selleks, et TSDD mõõtmisandmed oleks hiljem kõige paremini kasutatavad, tuleks leida mõõtmisaeg mil katendi ja mulde kandevõimet mõjutavad muutujad (temperatuur, niiskuserežiim) oleksid võimalikult stabiilsed, ent siiski iseloomustaks katendit selle nõrgemas seisukorras. Seda saaks uurida olemasolevate FWD kontrolljaamade ja Perco jaamade põhjal, lisades vajadusel FWD mõõtmispunkte.

Tuleks edasi uurida meetodikaid, mis võimaldavad TSDD mõõtmisandmete põhjal arvutada kandevõimet. Käesolev uuring ja varasemad uuringud on näidanud, et FWD ja TSDD mõõtmised ja mõõtmistulemused on piisavalt erinevad, et vajada kandevõime arvutusteks erinevaid meetodikaid. Praegu on välja töötatud või välja töötamisel mitmed TSDD-andmetel põhinevad kandevõime arvutuse meetodikad, mille rakendamist tuleks hinnata Eestis teede projekteerimisel kasutatava KAP programmi ja E-vajaliku arvutamise kontekstis.

Lisaks tuleks vaadelda TSDD-ga mõõdetud andmete kasutamist PMS-süsteemis laiemalt. Selle eesmärgiks oleks paremini tuvastada anomaaliaid teekatendis (nõrga kandevõimega kohad, ülemineku kohad, lokaalsed defektid) ning selgitada, mil viisil kasutades võimaldaksid need täpsemalt planeerida teetöid ja mõõtmisi, arvestades homogeenseid teelõike. Kasutades 1m sammuga andmeid, tuleks lokaliseerida madala kandevõimega alad ning kontrollida selle mõju katte omaduste muutumisele ajas. Lisaks tuleks leida metoodika andmete süstematiseerimiseks, et andmete kasutajale joonistuksid välja probleemid võrgutasandil.

8 KASUTATUD KIRJANDUS

- Aavik, Andrus. 2003. „Teekatendite tugevuse hindamise metoodilised alused Eesti teekatendite hoiu süsteemis (EPMS)“. Phdthesis, Tallinn University of Technology.
- Aavik, Andrus, Harri Rõuk, Priit Paabo, ja Ott Talvik. 2007. „FWD mõõtmistulemuste kasutamine teekatendi remondiprojektide koostamisel“. Tallinn Tehnikaülikool; Maanteeamet.
- Altman, D. G., ja J. M. Bland. 1983. „Measurement in Medicine: The Analysis of Method Comparison Studies“. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)* 32 (3): 307–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2987937>.
- Board, Transportation Research, National Academies of Sciences Engineering, ja Medicine. 2013. *Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies*. Toimetanud Gerardo Flintsch, Brian Ferne, Brian Diefenderfer, Samer Katicha, James Bryce, Simon Nell, ja Trenton Clark. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22766>.
- Chai, Gary, Sittamapalan Manoharan, Andrew Golding, Greg Kelly, ja Sanaul Chowdhury. 2016. „Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model“. *Transportation Research Procedia* 14: 3031–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.444>.
- Elseifi, Mostafa A., Zia U. A. Zihan, ja Patrick Icenogle. 2019. „A Mechanistic Approach to Utilize Traffic Speed Deflectometer (TSD) Measurements into Backcalculation Analysis“. Louisiana State University. Department of Civil; Environmental Engineering.
- Elseifi, Mostafa, ja Zia U. Zihan. 2018. „Assessment of the Traffic Speed Deflectometer in Louisiana for Pavement Structural Evaluation“.
- Giavarina, Davide. 2015. „Understanding Bland Altman analysis“. *Biochemia Medica* 25 (juuni): 141–51. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>.
- GREENWOOD TSD - project level assessment of the whole network. 2021. Greenwood Engineering A/S.
- Jansen, Dirk. 2015. „TSD Evaluation in Germany“. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015)*.
- Kaal, Tiit, Andrus Aavik, Sven Sillamäe, Jaan Viljas, ja Luule Kaal. 2020. „Teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmis- ja arvutusmetoodika täiendamise uuring“. Maanteeamet.
- Katicha, Samira W., Shivesh Shrestha, Gerardo W. Flintsch, ja Brian K. Diefenderfer. 2020. „Network Level Pavement Structural Testing With the Traffic Speed Deflectometer“. Virginia Transportation Research Council.
- Krarup, Jorgen, Søren Rasmussen, Lisbeth Aagaard, ja Poul G Hjorth. 2006. „Output from the greenwood traffic speed deflectometer“. *ARRB CONFERENCE, 22ND, 2006, CANBERRA, ACT, AUSTRALIA*.

Maanteeamet. 2017. „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend”.
https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/elastsete_teeakatete_projekteerimise_juhend_29_03_17.pdf; Maanteeamet.

Mansournia, Mohammad Ali, Rachel Waters, Maryam Nazemipour, Martin Bland, ja Douglas G. Altman. 2021. „Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms”. *Global Epidemiology* 3: 100045.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloepi.2020.100045>.

Maser, Ken, Pete Schmalzer, Aaron Gerber, ja Jim Poorbaugh. 2019. „Implementation of the Traffic Speed Deflectometer (TSD) for Network Level Pavement Management”.

Nam, Boo Hyun, Kenneth Stokoe, ja Heejung Youn. 2019. „Enhanced Sensing and Data Processing System for Continuous Profiling of Pavement Deflection”. *Materials* 12 (mai): 1653.
<https://doi.org/10.3390/ma12101653>.

Nasimifar, Mahdi, Senthilmurugan Thyagarajan, ja Nadarajah Sivaneswaran. 2017. „Backcalculation of Flexible Pavement Layer Moduli from Traffic Speed Deflectometer Data”. *Transportation Research Record* 2641 (1): 66–74. <https://doi.org/10.3141/2641-09>.

Nasimifar, S. 2015. „3D-Move Simulation of TSDDs for Pavement Characterizations.”. Phdthesis, University of Nevada.

Nayak, Richi, Rakesh Rawat, ja Justin Weligamage. 2012. „A data analytics application assessing pavement deflection factors for a road network”. *ACM International Conference Proceeding Series*, 247–55. <https://doi.org/10.1145/2428736.2428775>.

Nielsen, Christoffer P. 2019. „Visco-Elastic Back-Calculation of Traffic Speed Deflectometer Measurements”. *Transportation Research Record* 2673 (12): 439–48.
<https://doi.org/10.1177/0361198118823500>.

Nielsen, Christoffer, ja K. Jensen. 2021. „Traffic speed deflectometer measurements at Copenhagen airport”, 458–65. <https://doi.org/10.1201/9781003222880-42>.

Nielsen, Christoffer, Petri Varin, T. Saarenketo, ja Pauli Kolisoja. 2021. „Traffic speed deflectometer measurements at the Aurora instrumented road test site”, 399–408.
<https://doi.org/10.1201/9781003222880-36>.

Rabe, R. 2013. „Structural pavement monitoring with non-destructive measuring devices: experiences from a pilot project in Germany”.

Rada, Gonzalo R., Soheil Nazarian, Gerry Deliden, ja Tom Yu. 2011. „Moving Pavement Deflection Testing Devices: State-of-the-Technology and Best Uses”.

Rasmussen, Søren, Lisbeth Aagaard Larsen, Susanne Baltzer, ja Jørgen Krarup. 2008. „A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer”.
<https://doi.org/10.2777/21249>.

Saarenketo, T. and Pyhähuhta, M. and Munro, R. 2022. „ROADDEX e-learning - Survey and monitoring techniques”. roadex; <https://www.roadex.org/e-learning/lessons/permanent-deformation/survey-and-monitoring-techniques/>.

Seyfi, Majid, Rakesh Rawat, Justin Weligamage, ja Richi Nayak. 2013. „A data analytics case study assessing factors affecting pavement deflection values”. *International Journal of Business Intelligence and Data Mining* 8 (veebruar): 199–226. <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2013.059024>.

Shrestha, Shivesh. 2017. „Development of structural condition thresholds for TSD measurements”. Mathesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Zofka, Adam, ja Jacek Sudyka. 2015. „Traffic Speed Deflectometer (TSD) Measurements for Pavement Evaluation”. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015)*.

Transpordiamet. 2022. „Transpordiameti riigiteede andmed Teeregistris”. <https://teeregister.mnt.ee/reet/home>.

Viljas, Jaan. 2021. „Dünaamilise koormusseadme (fwd) mõõtmistulemuste alusel teekatendi kandevõime arvutusmetoodika täpsustamine”. Mathesis, Tallinna Tehnikaülikool.

LISA 1. MÕÕDETUD LÕIKUDE NIMEKIRI

Tabel 1: Mõõdetud lõikude nimekiri koos kaasatud FWD punktide arvuga

Tee number	Suund	FWD punktide arv	Algus, km	Lõpp, km	Lõigu pikkus, km
1	1	154	73.2	88.5	15.3
1	2	159	72.9	88.7	15.8
2	1	94	42.6	51.9	9.3
2	2	91	42.6	51.6	9.0
14	1	360	3.1	39.4	36.3
14	2	355	3.2	39.4	36.2
23	1	88	0.1	9.0	8.9
25	1	222	0.0	25.3	25.3
29	1	253	0.0	25.0	25.0
29	2	245	0.2	25.0	24.8
37	1	250	0.0	24.8	24.8
37	2	80	0.0	23.8	23.8
14162	1	166	0.0	17.4	17.4
14162	2	0	0.1	17.4	17.3
14170	1	78	1.3	9.0	7.7
14170	2	0	1.3	9.0	7.7

LISA 2. REGRESSIOONIMODELITE KOKKUVÕTTED

Lineaarse regressiooni mudel: TSD-ga mõõdetud d0 läbipainde suhe teekatte ja keskkonna näitajatesse.

MODEL INFO:

Observations: 13189 (31973 missing obs. deleted)

Dependent Variable: d0

Type: OLS linear regression

MODEL FIT:

$F(13,13175) = 1599.96$, $p = 0.00$

$R^2 = 0.61$

Adj. $R^2 = 0.61$

Standard errors: OLS

	Est.	S.E.	t val.	p
(Intercept)	404.33	5.54	73.03	0.00
Stabi_kiht	-0.33	0.02	-16.68	0.00
MuldeKorgus	-0.34	0.02	-15.51	0.00
temp.road	2.55	0.60	4.25	0.00
temp.air	3.65	0.93	3.92	0.00
SeotudKihtAC surf_ACbase	-205.26	5.21	-39.37	0.00
SeotudKihtAC	-223.27	5.15	-43.34	0.00
surf_ACbase_KS/3xACsurf_KS				
SeotudKihtAC	-128.88	4.45	-28.95	0.00
surf_KS/Pindamine_KS				
SeotudKihtACsurf_KS_TS/ACsurf_TS	-76.98	4.90	-15.69	0.00
SeotudKihtACsurf_MUK	-147.01	6.05	-24.31	0.00
SeotudKihtKMA_ACbin_ACbase_MUK	-166.65	5.63	-29.61	0.00
KihiPaksus	-0.60	0.02	-26.09	0.00
iri	15.14	0.52	29.34	0.00
Defektide.summa	1.54	0.36	4.23	0.00

Lineaarse regressiooni mudel: TSD-ga mõõdetud d0 läbipainde suhe teekatte ja keskkonna näitajatesse grupeeritult.

MODEL INFO:

Observations: 19724 (25438 missing obs. deleted)

Dependent Variable: d0

Type: OLS linear regression

MODEL FIT:

$F(20,19703) = 1794.26$, $p = 0.00$

$R^2 = 0.65$

Adj. $R^2 = 0.65$

Standard errors: OLS

	Est.	S.E.	t val.	p
(Intercept)	405.35	5.44	74.58	0.00
Stabi_kiht	-0.29	0.02	-16.93	0.00
MuldeKorgus	-0.41	0.02	-21.39	0.00
temp.road	5.00	0.48	10.37	0.00
temp.air	-0.25	0.74	-0.34	0.73
SeotudKihtAC surf_ACbase	-191.63	3.96	-48.35	0.00
SeotudKihtAC	-209.35	4.29	-48.76	0.00


```

surf_ACbase_KS/3xACsurf_KS
SeotudKihtAC          -138.91  3.40  -40.82  0.00
surf_KS/Pindamine_KS
SeotudKihtACsurf_KS_TS/ACsurf_TS      -92.38  4.11  -22.48  0.00
SeotudKihtACsurf_MUK      -162.03  5.33  -30.38  0.00
SeotudKihtKMA_ACbin_ACbase_MUK      -152.72  4.75  -32.18  0.00
KihiPaksus          -0.57  0.02  -31.30  0.00
GR_iriGR2 0.651-1.29          9.44  1.38   6.86  0.00
GR_iriGR3 1.29-2.39         52.04  2.24  23.26  0.00
GR_iriGR4 2.39-3.64         75.36  2.54  29.67  0.00
GR_iriGR5 3.64-21.3         94.53  2.57  36.81  0.00
GR_Defektide.summaGR2 0-0          3.01  1.99   1.51  0.13
GR_Defektide.summaGR3          6.91  2.32   2.98  0.00
0-0.4
GR_Defektide.summaGR4          3.22  2.62   1.23  0.22
0.4-1.8
GR_Defektide.summaGR5         11.87  2.63   4.52  0.00
1.8-21.4
GR_Defektide.summaGRNA         39.30  2.47  15.89  0.00
NA-NA
-----

```

Lineaarse regressiooni mudel: TSD-ga mõõdetud d0 läbipainde suhe tee kurvilisusesse.

MODEL INFO:

Observations: 5488 (4132 missing obs. deleted)

Dependent Variable: d0

Type: OLS linear regression

MODEL FIT:

$F(1,5486) = 333.62$, $p = 0.00$

$R^2 = 0.06$

Adj. $R^2 = 0.06$

Standard errors: OLS

```

-----
              Est.  S.E.  t val.    p
-----
(Intercept)    281.57  1.94  145.08  0.00
Kurv           -3.23  0.18  -18.27  0.00
-----

```

LISA 3. KANDEVÕIME ÜLDISE ELASTUSMOODULI VALEMI TAANDAMINE

Üldine elastusmoodul arvutatakse kõigil kandevõime arvutuse meetoditel järgmise valemi järgi. Valem põhineb Bousinnesqi valemil ja on taandatud Aavik (2003) töös toodud kujult järgnevalt.

$$E_{eq}[MPa] = \frac{0.25\pi * P * S * (1 - \mu^2)}{d_0},$$

kus E_{eq} – katendi üldine E-moodul koormusplaadi keskel, MPa;

P – kontaktsurve koormusplaadi all, kPa;

S – koormusplaadi diameeter, mm;

μ – Poisson'i tegur;

d_0 - vajum koormusplaadi või kontaktpinna keskel, μm .

Arvestame, et

$$S[mm] = 2 * r * 10^3$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2},$$

kus F - koormusplaadile või rattale rakendatav jõud, kN;

r - koormusplaadi või ratta kontaktpinna raadius, m;

Seega:

$$E_{eq}[MPa] = \frac{0.25\pi * F * 2 * r * 10^3 * (1 - \mu^2)}{\pi r * d_0}$$

Taandades saame, et

$$E_{eq}[MPa] = \frac{10^3 * F * (1 - \mu^2)}{2 * r * d_0},$$

kus F - koormusplaadile või rattale rakendatav jõud, kN;

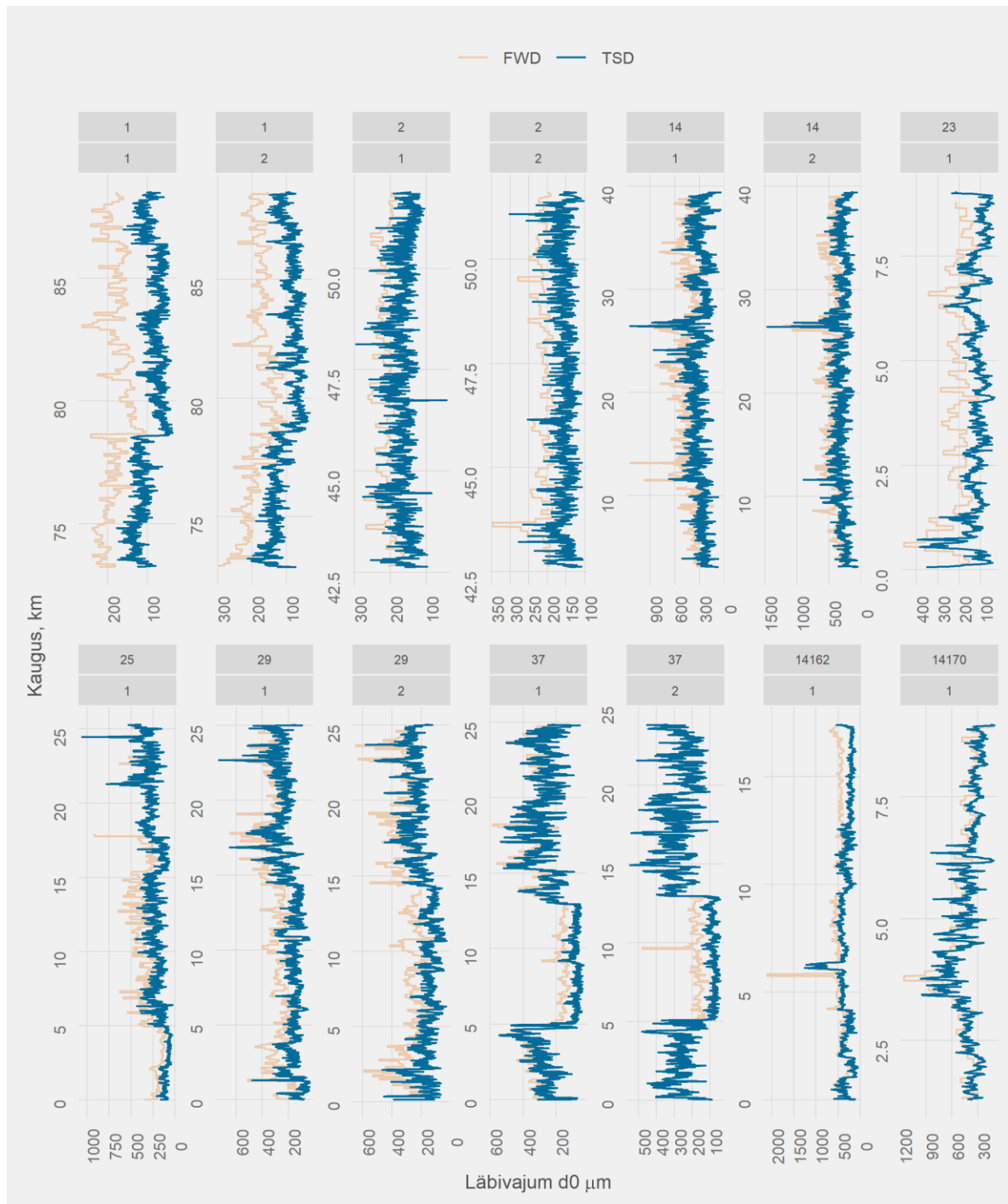
μ - Poisson'i tegur;

r - koormusplaadi või ratta kontaktpinna raadius, m;

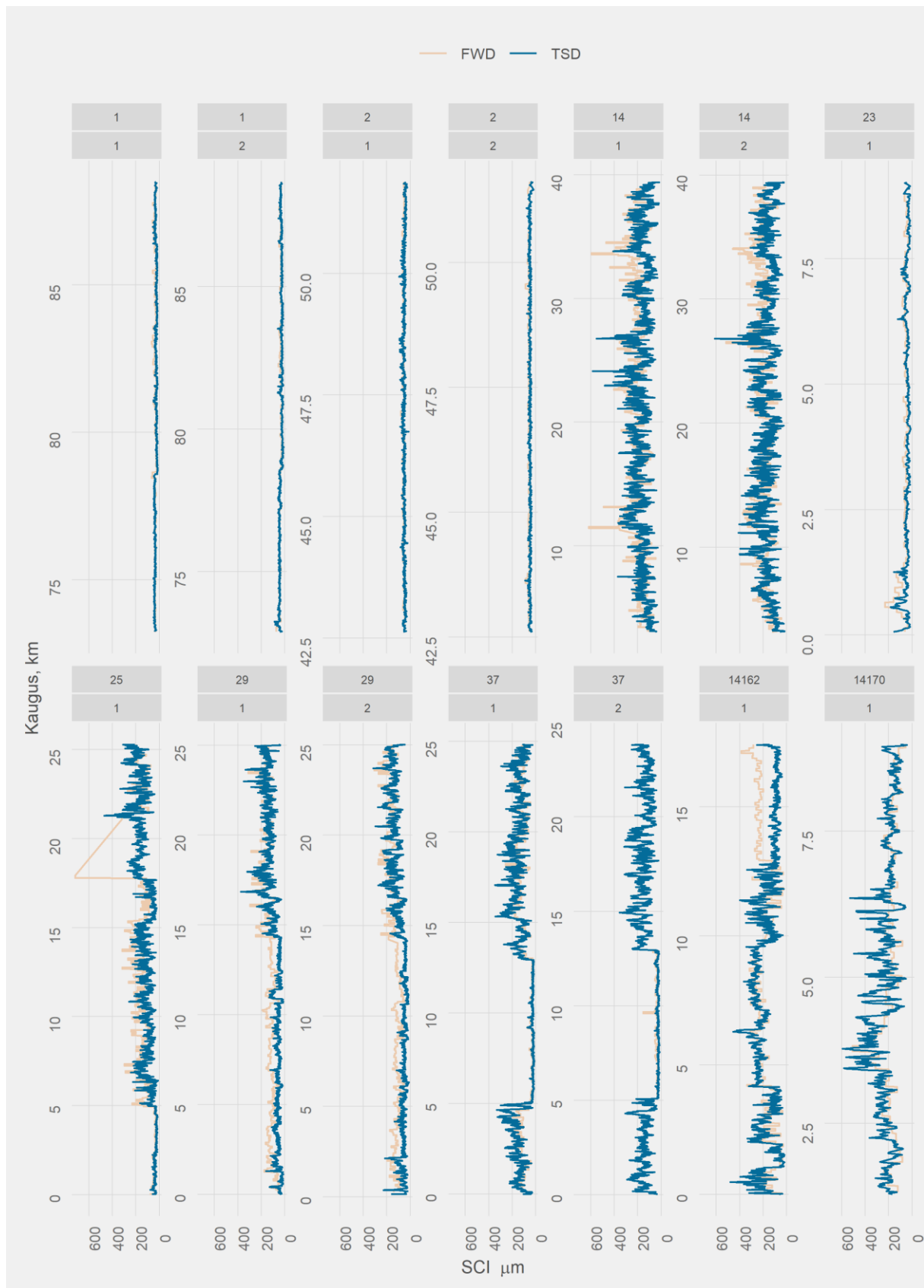
d_0 - vajum koormusplaadi või kontaktpinna keskel, μm .

Valemis on raadius taandatud meetri peale, et kasutada SI-ühikuid.

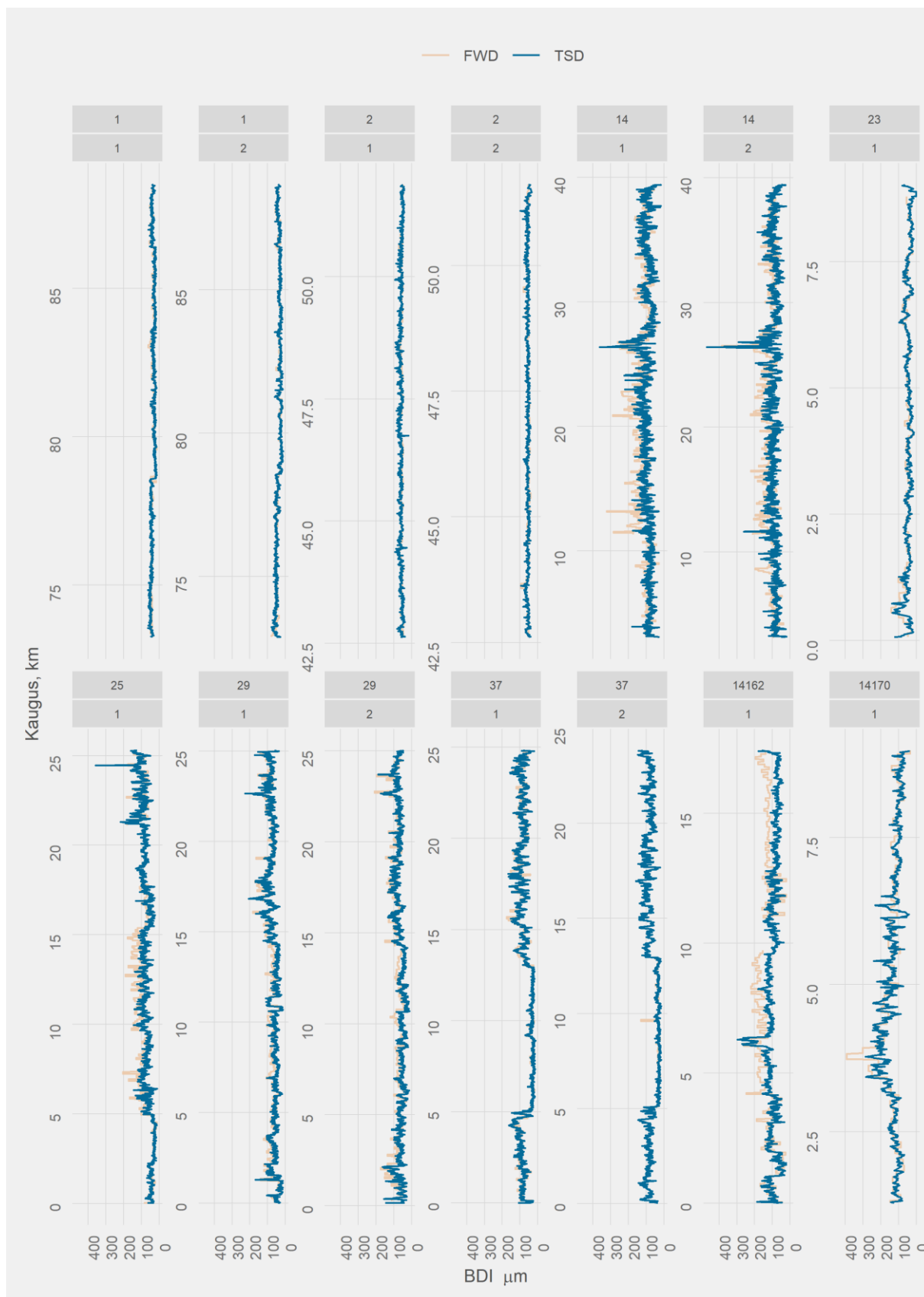
LISA 4. FWD JA TSD MÕÕTMISTE JOONGRAAFIKUD



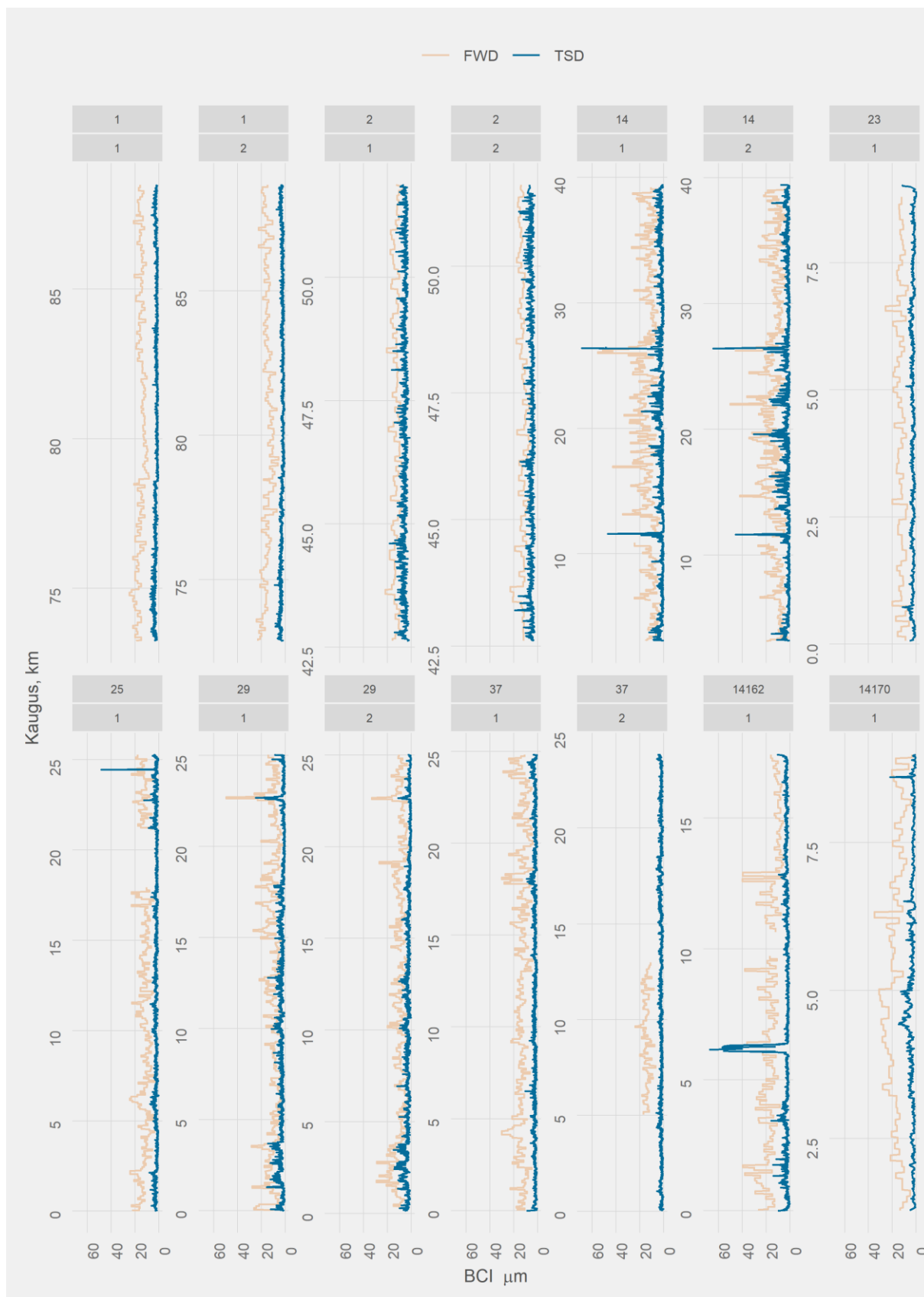
Joonis 60: TSD-ga mõõdetud läbipaine võrreldes FWD-seadmega mõõdetud läbipaindega



Joonis 61: TSD-ga mõõdetud SCI võrreldes FWD-seadmega mõõdetud SCI-ga



Joonis 62: TSD-ga mõõdetud BDI võrreldes FWD-seadmega mõõdetud BDI-ga



Joonis 63: TSD-ga mõõdetud BCI võrreldes FWD-seadmega mõõdetud BCI-ga