

MULDADE MÕJU MILITAARSÕIDUKITE MAASTIKULÄBITAVUSELE JA ROOBASTE KUJUNEMISELE EESTI TINGIMUSTES

Kersti Vennik, Peeter Kukk, Kaarel Piip



Ülevaade. Artiklil on kaks eesmärki. Esiteks anda sissejuhatav ülevaade sõidukite parameetritest ja mulla omadustest, mis koostoimes mõjutavad sõidukite liikumisedukust maastikul. Teine eesmärk on teha kokkuvõtte roobaste tekkimise uuringutulemustest¹. Uuringud keskendusid ratassõidukitele.

Ratassõidukite maastikuläbitavuse puhul on üks kriitilisemaid näitajaid roobaste sügavus. Seda saab reguleerida rehvirõhu muutmisega. Kõrge rehvirõhk põhjustab suurt survet maapinnale, millega kaasneb mulla deformatsioon, sh roopad. Sõidukite maastikuläbitavuse indikaatorina saab kasutada roopa sügavust. Seni-seid teadmisi põllumajandussõidukite mõju kohta ei saa kasutada militaarsõidukite puhul, sest kui traktorite ja kombainide rehvirõhk ulatub kuni 220 kPa-ni, siis militaarsõidukite rõhk võib sõltuvalt sõidukist küündida ka 650 kPa-ni.

Sõidukite maastikuläbitavust määravad mulla omadused on niiskusesisaldus, savi ja orgaanilise aine hulk ning lasuvustihedus. Need omadused on looduslikel rohumaadel ja haritavatel põllumaadel erinevad. Põllumaadele on iseloomulikud suurema lasuvustiheduse ja väiksema orgaanilise aine sisaldusega mullad, mistõttu tekivad looduslikele rohumaadele sügavamad roopad kui haritavale maale.

Penetromeeter on töövahend, mille abil on lihtne hinnata mulla läbitavust, kuid roopa sügavuse täpseks ennustamiseks on vaja täiendavaid katsemõõtmisi, mis arvestavad mulla omaduste erinevaid kombinatsioone.

Võtmesõnad: läbitavus, roopa sügavus, militaarsed ratassõidukid, korduvad üle-sõidud, mulla omadused, mulla deformatsioon

Keywords: trafficability, rut depth, military wheeled vehicles, multiple passes, soil properties, soil deformation

¹ Roobaste sügavuse uuringute osa põhineb Kersti Venniku 2019. aastal Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudis kaitstud doktoritööl „The effect of military vehicles on rut formation on Estonian soils and natural recovery of the ruts“, mille juhendajad olid dr Endla Reintam, dr Thomas Keller ja dr Peeter Kukk.

1. Sissejuhatus

Sõjaväelise planeerimisprotsessi üheks lahutamatuks osaks on maastiku-analüüs². Analüüsil hinnatakse maastiku takistavat mõju lahingutegevusele. Hinnang antakse kaartide põhjal. Relvajõudude jaoks on oluline, et maastikul saaksid liikuda mitmesuguste tehniliste võimetega sõidukid. Lahinguväljal liikuvad sõidukid peavad üksustele pakkuma nii mobiilsust³ kui ka tuletoetust, samuti logistilist teenindust⁴. Erinevate ülesannete tõttu tuleb sõita nii metsas kui ka põllumaadel, samuti soistel aladel. Liikumisel väljaspool teid tekivad läbitavusega sageli probleemid⁵. Läbitavus (ingl *trafficability*) on rahvusvahelise maastikusõiduki süsteemi uurimise ühenduse (*International Society of for Terrain-Vehicle Systems*, ISTVS) standardi järgi maastiku võime taluda sõidukite ülesõitu⁶. Maastikuanalüüs hõlmab mullastiku takistava mõju hindamist sõidukite maastikuläbitavusele.

Üks läbitavuse suurimaid probleeme on sügavate roobaste tekkimine⁷. Sügavad roopad takistavad liikumist, vähendavad sõiduki liikumiskiirust, suurendavad kulutatava kütuse hulka ja kinnijäämisohtu. Sõiduki ülesõitudel toimivate normaal- ja nihkepingete tõttu toimub mulla deformeerimine: tihendamine ja nihutamine. Teisisõnu, mullaosakesed liiguvad vertikaalselt ning (liikumise suhtes) piki- ja külgsuunas. Roobaste sügavuse määrab sõiduki tehniliste omaduste, liikumiskiiruse ja maastiku ning mulla omaduste koostoime. Terramehaanikas eristatakse mulda tekkivate radade puhul kahte mõistet: vajum (ingl *sinkage*) ja roopa sügavus (ingl *rut depth*). Esimene neist kujuneb olukorras, kus maastikul liikuv sõiduk vajub mulda ja vastav sügavus fikseeritakse otse sõiduki all. Kuna teatud mullad suudavad pärast surve lõppemist taastuda, st toimub elastne tagasikerge, võivad mulda jäävad

² **FM 5-33, Terrain Analysis** 1990. Headquarters. Department of the Army. Washington, D.C., July 11, p. 6-1. <https://www.globalsecurity.org/jhtml/jframe.html#https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-33/ch6.pdf> (15.05.2020).

³ **Margiotta, F. D.** 2000 (ed.). *Brassey's encyclopedia of land forces and warfare*. Brassey's Washington. Brassey's Inc., p. 58.

⁴ **Hohl, G. H.** 2007. Military terrain vehicles. – *Journal of Terramechanics*, 44, p. 24.

⁵ **Wong, J. Y.** 2008. *Theory of ground vehicles* (4th ed.). NJ: John Wiley and Sons, Inc., p. 88. [Wong 2008]

⁶ **ISTVS Standards** 1997. International Society for terrain-vehicle systems standards. – *Journal of Terramechanics*, 14, p. 169. [**ISTVS Standards** 1997] <https://static1.squarespace.com/static/4ff71ac2c4aaff0782fde3d6/t/54109573e4b01475ae258505/1410373002491/ISTVS+Standards+1977.pdf> (15.05.2020).

⁷ **Evans, I.** 1964. The sinkage of tracked vehicles on soft ground. – *Journal of Terramechanics*, 1 (2), p. 33.

roopad olla madalamad kui sõiduki all kujunenud vajum⁸. Roopa sügavuse mõõtmisel võetakse referentspinnaks häirimata seisundis maapind, mida sõiduk ei ole mõjutanud.

Maastikuanalüüsil on oluline ennustada roopa kujunemise sügavust õigesti. Selleks tuleb teada Eestis esinevate muldade deformatsiooni pärast nende survestatamist ja kasutada sobivaid roopa sügavusi modelleerivaid mudeleid. Läbitavusprobleeme seostatakse eelkõige märgade muldadega⁹. Eesti territooriumil on märgade muldade osakaal *ca* 60% kogu maa-ala mullastikust¹⁰.

Artiklis käsitletakse kõigepealt täpsemalt sõidukite ja mulla omadusi, mis on olulised läbitavuse ja eelkõige roobaste tekke seisukohalt. See on esimene eestikeelne käsitlus, mis sobib sõjaväelisele maastikuanalüüsijale. Artikli teises osas võetakse kokku militaarsõidukitega tehtud roopa sügavusuuringu peamised tulemused ja antakse soovitusel, millega tuleks üksustel arvestada Eesti teedeta maastiku läbimisel.

2. Sõiduki ja mulla vastasmõju ehk roopa kujunemist mõjutavad parameetrid

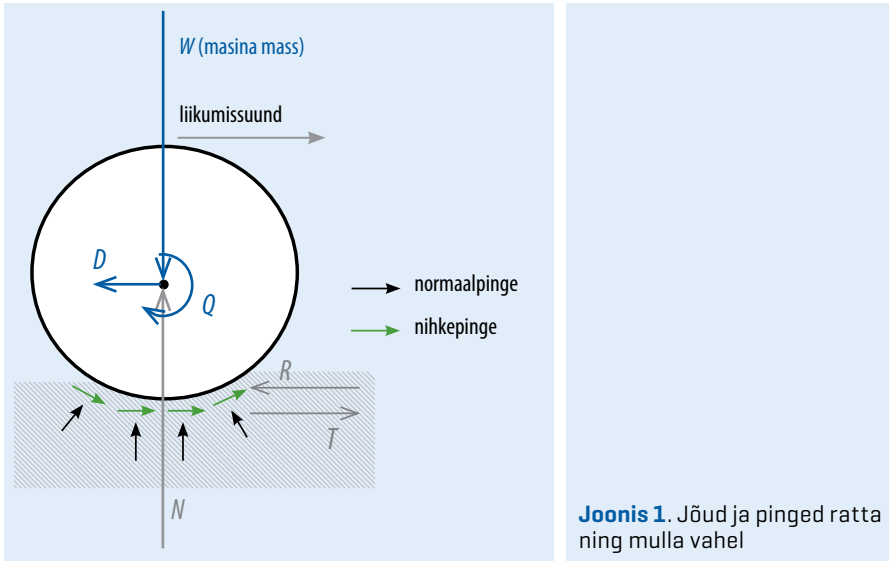
Horisontaalpinnal liikuv sõiduk avaldab mullale rõhku, mille puhul eristatakse kahte komponenti (joonis 1). Esimese, vertikaalsuunalise rõhu suurus on määratud masina kaalu ja maapinnaga kontaktis oleva ala (rataste või roomikute pindala) suhtega. Teine, sõiduki liikuvust tagav, horisontaalsuunaline rõhk on määratud ratta pöördemomendiga *Q* (ingl *torque from power train*) ning see arvutatakse ratta pöördemomendi jagatisena ratta raadiuse ja jälje pindalaga. Nende rõhkude tulemusena kujunevad mullas normaal- ja nihkepinged (ingl *normal stresses, shear stresses*), mis määravad sõiduki liikuvust põhjustavad jõud. Liikuvust takistavad jõud *R* (ingl *resistance force*)¹¹ kujunevad rataste elastse deformatsiooni ja mulla deformatsiooni, sh mulla kokkusurumise tõttu roobasteks.

⁸ ISTVS Standards 1997, p. 166.

⁹ Stevens, M. T.; Towne, B. W.; Mason, G. L.; Priddy, J. D.; Osorio, J. E.; Barela, C. A. 2013. Procedures for One-Pass Vehicle Cone Index (VCI) Determination for Acquisition Support. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. ERDC/GSL SR-13-2, p. 49.

¹⁰ Arold, I. 2005. Eesti maastikud. Tartu Ülikooli Kirjastus, lk 54.

¹¹ Priddy, J. D. 1995. Stochastic Vehicle Mobility Forecasts Using the NATO Reference Mobility Model. Report 3. Database Development for Statistical Analysis of the NRMM II



Joonis 1. Jõud ja pinged ratta ning mulla vahel

Kõval pinnal (nt asfaltteel) kirjeldatakse liikumisvõimet lihtsustatult haardeteguri abil. Deformeeruval pinnal (nt mullal) kasutatakse veojõu kirjeldamiseks teistsugust lähenemist. Inglise keeles nimetatakse mulla (nihke)tugevusest sõltuvat veojõudu mitmel viisil: *tractive effort*, *thrust*, *tractive force* või ka lihtsalt *traction*¹². Kuna osa mullalt saadavast veojõust kulutatakse ära liikumistakistuse¹³ (ingl *motion resistance*) ületamiseks, on läbitavusvõime kirjeldajana informatiivsem kasutada nende ühendtuletist: efektiivset veojõudu (ingl *net tractive force*, *tractive effort*, *drawbar pull*), mis on tõmbevõime (D) ning mida arvutatakse mulla veojõu ja takistusjõu vahena¹⁴.

Sõiduki liikumise mõjul toimuvat mullaosakeste vertikaalliikumist nimetatakse mulla tihenemiseks ehk mahuliseks deformatsiooniks (ingl *volumetric deformation*). Enamikul juhtudel tekivad roopad mulla vertikaal- ja

Cross-Country Traction Empirical Relationships. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Technical Report GL-95-9, June 1995, pp. 14–15. <https://pdfs.semanticscholar.org/cd93/f9016822deb8c1bcee13689b673cfc1f0d75.pdf> (15.05.2020).

¹² Bekker, M. G. 1960. Off the road locomotion. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, p. 26. [Bekker 1960]

¹³ Vastavalt ISTVS-i standardile (ISTVS Standards 1997, p. 163) jaguneb liikumistakistus sisemiseks ja väliseks. Sisemine takistus kujuneb sõiduki sees hõõrdumise, vibratsiooni ja hüsterese tõttu, välist takistust põhjustab mulla deformatsioon. Siinses artiklis keskendutakse ainult välisele takistusele.

¹⁴ Bekker 1960, p. 58.

külgsuunalise deformatsiooni tulemusena. Kui mullale avaldatav surve ületab mulla (nihke)tugevuse, liiguvad osakesed ka ilma tihenemiseta (külgsuunas) laiali ehk toimub mulla plastiline voolamine (ingl *plastic flow*)¹⁵. Mullas toimunud osakeste plastilisest voolamisest annavad märku mullakuhjatised ehk vallid radade ja roobaste servadel¹⁶. Kokkuvõttes tekivad erinevad liikumist toetavad ja takistavad jõud pinnase omaduste ning sõiduki kaalu ja veojõu pingete koosmõjul.

3. Sõiduki parameetrite mõju roobaste kujunemisele

Mitmed sõiduki veeremi tehnilised parameetrid mõjutavad roobaste kujunemist. Esiteks on oluline veeremilt mullale avaldatav kontaktsurve (ingl *contact pressure*), s.o rattale langev koormus (mass korda raskuskiirendus) jagatud kontaktjälje pindalaga. Teiseks on tähtis ratta koormus (ingl *wheel load*), samuti liikumisviis ja -kiirus ning sama raja ületamiste arv. Mullale avaldatav kontaktsurve nagu ka kontaktsurve jaotus kokkupuutealas sõltub rehvi mõõtmetest, koormusest, rehvirõhust ja mulla parameetritest¹⁷.

Üksikjuhtudel, kui maapind on vähe deformeeruv ja ühtlaselt kõva, jaotub surve kogu kokkupuutealas ühtlaselt. Märgades muldades on surve jaotus ebahütlane. Mulla ja sõiduki vastasmõju uuringutes eristatakse kogu kokkupuuteala peale jagunevat keskmist survet ja maksimaalset survet. Ratassõidukil on maksimaalne surve kuiva mulla puhul *ca* 1,1 korda suurem keskmisest survest ja surve on pigem ühtlaselt jaotunud kogu kokkupuuteala ulatuses¹⁸. Eriti suur erinevus keskmise ja maksimaalse surve vahel tekib märgades muldades, kus erinevus võib olla kahekordne ning suurem surve on koondunud ratassõidukite puhul rehvi ja mulla kokkupuuteala esimesse veerandisse¹⁹. Senised uuringud on näidanud, et omakorda väga

¹⁵ Way, T. R.; Erbach, D. C.; Bailey, A. C.; Burt, E. C.; Johnson, C. E. 2005. Soil displacement beneath an agricultural tractor drive tire. – *Journal of Terramechanics*, 42, p. 45.

¹⁶ Halvorson, J. J.; McCool, D. K.; King, L. G.; Gatto, L. W. 2001. Soil compaction and over-winter changes to tracked-vehicle ruts. Yakima Training Center, Washington. – *Journal of Terramechanics*, 38, p. 141.

¹⁷ Botta, G. F.; Tolon Becerra, A.; Bellora Tourn, F. 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. – *Soil and Tillage Research*, 103, pp. 381–382.

¹⁸ Wong 2008, p. 94.

¹⁹ *Ibid.*

madala rehvirõhu puhul koondub kõrgeim rõhk rehvi jäiga karkassi tõttu rehvi äärtele²⁰.

Mulla läbitavuse ja tihenemise uuringutes on kontaktsurve suurus ja surve jaotus pälvinud suurt tähelepanu. Üks levinud lähenemine on kontaktsurve võrdeline seostamine rehvirõhuga²¹. Põllumajanduses kasutatavate ratassõidukite puhul on leitud, et rehvi kokkupuutealas avaldatav maksimaalne rõhk on võrdeline 1,5-kordse rehvirõhuga²². Mullale mõjuv surve võib väheneda, kui vähendada rehvirõhku, kasutada suuremaid rehve või roomikuid – kõik need suurendavad kokkupuuteala. Kontaktsurve määramiseks on vaja mõõta koormatava sõidukiga kokkupuutes oleva ala suurus. Rehvi kokkupuuteala pindala määratakse kõige sagedamini kõval aluspinnal, nt asfaltteel või betoonplatsil, sest deformeeruv pinnasel on kokkupuuteala tunduvalt keerulisem mõõta.

Surve kokkupuuteala ehk ka rehvirõhu suurus mõjutab muldade tihenemist pealmises mullakihis²³, sügavamates mullakihtides sõltub surve ja selle mõju ratta või roomiku koormusest²⁴. Mulla pinnale avaldatud surve levib mulla sügavamatesse kihtidesse. Suurema rattakoormuse ja laiimate rehvide puhul on kokkupuuteala ning mõjutatud mulla maht ulatuslikum²⁵. Kuivemates muldades avaldab surve mõju maapinnale lähematele kihtidele, märgades muldades ulatub aga sügavamatesse kihtidesse ning surve ei haju mullas veeremi ümber laiali, vaid koondub rohkem rehvi keskosa ümber²⁶.

Sõiduki liikumiskiirus mõjutab roobaste kujunemist. Uurimuses, kus 4 t rattakoormusega sõiduk liikus kiirusega vahemikus 0,5–10 km/h, leiti,

²⁰ **Vanden Berg, G. E.; Gill, W. R.** 1962. Pressure distribution between a smooth tire and soil. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*, 5, pp. 10–107. Viidatud **Hillel, D.** 1998 järgi. Vt **Hillel, D.** 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, p. 370. [**Hillel** 1998]

²¹ **Burt, E. C.; Wood, R. K.; Bailey, A. C.** 1992. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressures. *Transactions of the ASAE*, 35 (2), p. 401.

²² **Keller, T.; Arvidsson, J.** 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. – *Soil and Tillage Research*, 79, pp. 191–205.

²³ **Smith, D. L. O.; Dickson, J. W.** 1990. Contributions of Vehicle Weight and Ground Pressure to Soil Compaction. – *Journal of Agricultural Engineering Research*, 46, pp. 13–29.

²⁴ **Håkansson, I.; Voorhees, W. B.; Riley, H.** 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. – *Soil and Tillage Research*, 11, p. 262.

²⁵ **Hillel** 1998, p. 373.

²⁶ **Wong** 2008, p. 95.

et suurem kiirus vähendas roopa sügavust 10%²⁷. Järgmine oluline roopa sügavuse mõjutaja on sõiduki liikumisviis. Valdavalt liiguvad sõidukid läbitavuskatsetes aeglaselt ja võimalikult ühtlaselt ehk ilma kiirendamata. Inglise keeles nimetatakse seda *steady-state movement*. Oluliselt erinevad roopad kujunevad otseliikumisel ja pööramisel, aga ka korduval sama raja ületamisel. Kuna pööramisel tekib ratta all lisaks külgsuunas mõjuv jõud, mille tulemusena surutakse mulda kurvi välisküljele, siis moodustuvad sinna ka suuremad roopad²⁸. Kõik senised uurimused on näidanud, et suurema ülesõitude arvu korral muutuvad roopad sügavamaks²⁹.

4. Roopa kujunemist mõjutavad mulla omadused

Mulla tugevuse seisundit kirjeldatakse sageli koondnimetusega *mulla kandevõime* (ingl *soil bearing capacity*). Sellel mõistel puudub ühene definitsioon, sest erinevates valdkondades on kandevõimel erinev tähendus³⁰. Põllumajandusteadustes on oluline kirjeldada mulla kandevõimet, silmas pidades taimekasvu tingimusi, ja kandevõimet seostatakse mulla (liigse) tihendamise vältimisega³¹. Inseneriteadustes ei ole pinnase tihenemine kuigi suur probleem. Seal on oluline mulla sisestruktuuride purunemine (ingl *shear failure*), mille järel mulla vastupanuvõime survele väheneb drastiliselt ning on võimalik, et muld voolab laiali. Selle kirjeldamiseks kasutatakse maksimaalse kandevõime (ingl *ultimate bearing capacity*) terminit³².

²⁷ **Horn, R.; Blackwell, P. S.; White, R.** 1989. The effect of speed of wheeling on soil stresses, rut depth and soil physical properties in an ameliorated transitional red-brown earth. – Soil and Tillage Research, 13, p. 363.

²⁸ **Liu, K.; Ayers, P.; Howard, H.; Anderson, A.** 2009. Influence of turning radius on wheeled military vehicle induced rut formation. – Journal of Terramechanic, 46, p. 52.

²⁹ **Liu, K.; Ayers, P.; Howard, H.; Anderson, A.; Kane, K.** 2011. Multi-pass rutting study for turning wheeled and tracked vehicles. – Transactions of the ASABE, 54, p. 11; **Braunack, M. V.; Williams, B. G.** 1993. The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. – Journal of Terramechanics, 30 (4), p. 309. [**Braunack, Williams** 1993]

³⁰ **Saarilahti, M.** 2002a. Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECO-WOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002), p. 18.

³¹ **Nugis, E.** 1998. Complex assessment of the agrotechnical bearing capability of soil, Proceedings of the International Conference on Field Technologies & Environment, September 24–25, LIAE, Raudondvaris, Lithuania, pp. 73–79.

³² **ISTVS Standards** 1997, p. 157.

Läbitavusuuringutes iseloomustatakse mulla seisundit mulla tugevuse või kõvaduse abil, mis vastab mulla nihketugevusele (ingl *shear strength*)³³. Mulla nihketugevust mõõdetakse sagedasti penetromeetriga.

Mulla tugevus (kandevõime või ka nihketugevus) sõltub eelkõige tema mehaanilisest koostisest, niiskusest, tihedusest ja orgaanilise aine sisaldusest³⁴. Mullas eristatakse aine kolme faasi: vedelat, tahket ja gaasilist. Vedelat faasi ehk vee hulka mullas väljendatakse gravimeetrilise niiskuse ja mahulise niiskuse sisaldusena (ingl *gravimetric soil moisture content* ja *volumetric soil moisture content*). Gravimeetrilise niiskuse sisaldus leitakse mullas esineva vee massi jagamisel mullaosakeste massiga³⁵. Mahulise niiskuse sisaldus on vee mahu jagatis kogu märja mulla mahuga³⁶. Mõlemaid niiskuväärtusi väljendatakse protsentides. Kuivas seisus moodustab enamik mullatüüpe tugeva ja stabiilse liikumise aluspinna. Niiskussisalduse suurenedes muutub aga teatud mullatüüpide vastupanu koormamisele oluliselt väiksemaks. Sügavamad roopad seostuvad eelkõige märgade mullaoludega³⁷. Mulda jõuab vesi eelkõige sademevee infiltratsiooni tulemusena, aga ka pinnavee juurdevooluga. Lisaks sellele võib vesi mulda jõuda põhjavee juurdevoolu ja kapillaarse veetõusuga³⁸. Vee liikumiskiirus sõltub jällegi sellest, millistest osakestest koosneb muld.

Mulla tahke faasi moodustavad mineraalosakesed ja orgaanilise aine osakesed. Orgaaniline aine moodustub erinevas lagunemistasmes olevatest taimejäänustest ja ka elusorganismidest. Mullas esinevad mineraalosakesed on väga erineva suurusega ja neid rühmitatakse osakeste diameetri alusel. Eesti mullakaardil³⁹ kasutatakse osakeste suuruse järgi rühmitamiseks Katšinski süsteemi. Kõige suuremad on kivid ja kiviplaadid, mille diameeter on suurem kui 1 cm. Osakesi, mille läbimõõt on vahemikus 1–0,1 cm, nimetatakse kruusaks; 1 mm väiksemad osakesed on liivaterad (1–0,05 mm);

³³ **Shoop, S. A.** 1993. Terrain Characterization for Trafficability. CRREL Report 93–6, p. 3. [Shoop 1993] https://www.researchgate.net/publication/235013633_Terrain_Characterization_for_Trafficability (15.05.2020).

³⁴ **Lal, R.; Shukla, M. K.** 2004. Principles of soils physics. NY: Marcel Dekker Inc., pp. 199–200 [Lal, Shukla 2004]; **Raper, R. L.** 2005. Agricultural traffic impacts on soil. Journal of Terra-mechanics, 42, pp. 259–280.

³⁵ **Lal, Shukla** 2004, p. 23.

³⁶ *Ibid.*, pp. 23–24.

³⁷ **Braunack, Williams** 1993, p. 309.

³⁸ **Astover, A.** 2012. Mullateadus. Õpik kõrgkoolidele, lk 183. [Astover 2012]

³⁹ **Mullastiku kaart.** <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Mullastiku-kaart-p33.html> (15.05.2020).

tolmuosakesed (0,05–0,001 mm) ja kõige väiksemad on savi- ehk ibeosakesed (alla 0,001 mm)⁴⁰. Edasi jagatakse liiv ja tolmu diameetri alusel veel täpsemalt jämedaks, keskmiseks ja peeneks liivaks või tolmuks. Katšinski süsteemi kõrval kasutatakse nii rahvusvaheliselt kui ka Eestis aina enam ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni (FAO) süsteemi, kus kruusa- ja liivaterade rühmitamise aluseks on terasuurus 2 mm, liiva- ja tolmuosakeste puhul 0,063 mm, tolmu ning savi eristab 0,002 mm⁴¹.

Enamik muldasid sisaldab erineva terasuurusega osakesi. Iga osakeste rühm panustab omal moel mulla tugevuse kujunemisse, samuti muutustesse, mida põhjustab veesisalduse muutumine. Kui muld sisaldab kuni 50% kivisid, kruusa, liiva, on muld jämedateraline (ingl *coarse grained soil*). Kui savi- ja tolmuosakesi on rohkem kui 50%, on muld peeneteraline (ingl *fine grained soil*). Läbitavuse seisukohalt on oluline just peeneteralise materjali hulk mullas, sest juba 10% peeneteralist mulda mullamassis muudab oluliselt mulla mehaanilist käitumist. Seetõttu eristatakse peeneteralist fraktsiooni sisaldavad mullad tihti omaette rühmana (ingl *coarse grained soils with fines*)⁴².

Mulla lõimis (ingl *soil texture*) näitab erineva suurusega osakeste suhtelist osakaalu mullas. Eesti mullad jaotatakse lõimiserühmadesse lihtsustatud lähenemise põhjal, mille puhul on jaotuse aluseks füüsikalise savi (osakesed väiksema diameetriga kui 0,01 mm) hulk mullas⁴³. Kui füüsikalise savi hulk on kuni 10% alla 1 mm mullamaterjalist, on tegemist liivmullaga, kui aga 10–20%, on mulla lõimiseks saviliiv. Kerge liivsavi sisaldab füüsikalist savi 20–30% ja keskmine liivsavi 30–40%. Raskes liivsavis on füüsikalise savi sisaldus vastavalt 40–50% ja savides üle 50%.

Jämedateralisi muldasid nimetatakse tihti ka hõõrduvateks muldadeks (ingl *frictional soil*). Jämedateralistes muldades toimub nii sademe- kui ka pinnavee filtratsioon kiiresti ning ei toimu olulist kapillaarset veetõusu mulla põhjaveest⁴⁴. Selliste muldade kandevõime on üldiselt hea ega sõltu kuigi palju niiskuse muutumisest. Geotehniliselt kirjeldatakse liivmuldade

⁴⁰ Maa-amet, vabariigi digitaalse suuremõõtkavalise mullastiku kaardi seletuskiri, 2001. Tallinn. https://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf?t=20091211092214 (15.05.2020). [Maa-amet... seletuskiri 2001]

⁴¹ Astover 2012, lk 62.

⁴² FM 5-430-00-1, US Army. **Planning and design of roads, airfields, and heliports in the theater of operations – road design**. 1994. Vol. 1. Headquarters, Department of the Army. Department of the Air Force. Washington, D.C., August 26. [FM 5-430-00-1] <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-430-00-1/CH7.htm> (15.05.2020).

⁴³ Astover 2012, lk 64.

⁴⁴ Reintam, L. 1962. Mullateadus. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus, lk 122. [Reintam 1962]

tugevust liivaterade hõõrdumisest tuleneva takistusega (ingl *frictional resistance*), sest mulla survestamisel surutakse terad üksteise vastu ja mulla tugevus tekib hõõrdumise tõttu osakeste vahel. Hõõrdumise suurust kirjeldatakse sisehõõrdenurgaga (ingl *friction angle, angle of internal friction*).

Tolmuosakeserikaste muldade veeläbilaskvus on väiksem kui liivadel. Tolmuosakesed seovad oma pinnale vett ja kapillaarne veetõus põhjaveest võib ulatuda võrdlemisi kõrgele. Peenemate tolmuosakeste puhul avaldub ka juba ibeosadele iseloomulik nähtus sidusus⁴⁵. Samuti suurendab orgaanilise aine esinemine mullas tolmuosakeste sidusust. Läbitavuse seisukohalt on märjas olekus tolmuosakesed ebastabiilsed ja nõrgad aluspinnad. Kõige peenemad mullaosakesed, saviosakesed, on eriti väikse veeläbilaskvusega. Kapillaarne veetõus võib savimuldade puhul ulatuda teatud tingimustel kuni 4 m-ni⁴⁶. Savi puhul on tegemist sidusate muldadega (ingl *cohesive soils*). Lihtsustatult võib öelda, et sidusus on saviosakesi omavahel siduv jõud. Selliste jõudude tõttu muutuvad märjad savimullad plastiliseks ja vormitavaks, mis kleepuvad ka käte või roomiku ja ratta külge. Kuivas olekus savimuld on väga kõva, osakestevahelise suure sidususe tõttu on seda raske nihitada või rebestada. Roopad kujunevad jämedateralistes ja sidusates muldades erinevalt. Jämedateralistes muldades tiheneb muld selle esmase ületamise järel ja kujuneb roobas, mis edasise sama raja ületamise järel enam oluliselt ei süvene. Märjades savimuldades lõhutakse aga osakestevaheline sidusus korduva ületamisega, mis tähendab, et esmasel ületamisel tekkinud madal vagumus muutub järgmiste ülesõitudega järjest sügavamaks⁴⁷.

Kuigi orgaanilise aine sisaldus tüüpilise mineraalmulla pindmises kihis on kuni 5% mulla mahust, mõjutab see juba oluliselt mulla käitumist liikuva sõiduki all. Orgaanilise aine hulka mullas väljendatakse orgaanilise süsiniku (ingl *organic carbon content*) kaudu protsentides. Liivmuldades suurendab orgaaniline aine liivaterade vahel sidusust, mistõttu paranevad kuivade muldade läbitavusomadused. Savimuldades orgaanilise aine olemasolu

⁴⁵ Reintam 1962.

⁴⁶ Astover 2012, lk 145.

⁴⁷ Meek, P. 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. Forest Research Institute of Canada, FERIC. Technical Report TR-117. [Meek 1996] Viidatud Saarilahti, M. 2002b järgi. Vt Saarilahti, M. 2002b. Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), Contract No. QLK5-1999-00991 (1999-2002), Appendix Report No. 2, Evaluation of the WES-Method in Assessing the Trafficability of Terrain and the Mobility of Forest Tractors Part 1. WES mobility models, p. 21. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/1975/8016/ECO021.pdf;jsessionid=737EB36B9DB5878DA0D8EB5870906920?sequence=3> (15.05.2020).

vastupidi vähendab sidusust saviosakeste vahel⁴⁸. Soomuldades (Eesti 1 : 10 000 mullakaardil⁴⁹ on need tähistatud tähega M, S või R mulla nimetuses) ja turvastunud muldades (mullakaardil nimetuses tähis 1) moodustab pindmise kihi turbahorisont, mis tekib alaliselt liigniisketes tingimustes taimejäänuste mittetäielikul lagunemisel ning kus orgaanilise aine osakaal ületab 35%⁵⁰. Orgaanilise aine lagunemisastme järgi eristatakse halvasti, keskmiselt ja hästi lagunenud turvast. Võrreldes mineraalmuldadega on turvas hästi kokku surutav ja tema kandevõime on väike. Kuna poollagunenud taimne materjal võib siduda rohkem vett kui kuivaine enda mass, siis on turba veesisaldus suur ja tahke aine tihedus väga väike. Liikumisvõimalused turbamuldadel sõltuvad sageli pealmisest tiheda juurtevõrgustikuga kaetud kihi (kamara) tugevusest. Rohukamara lõhkumisele järgneb enamasti veeremi suurem läbivajumine⁵¹. Soomes on turbaaladel ratasmasinatega liikumine valdavalt keelatud⁵².

Niiskusrežiimi järgi rühmitatakse muldasid järgmiselt: põuakartlikud, parasniisked, ajutiselt liigniisked ja kestvalt liigniisked mullad⁵³. Mulla niiskusrežiim määrab üldiselt orgaanilise aine sisalduse mullas. Põuakartlike, parasniiskete ja ajutiselt liigniiskete muldade puhul on tüüpilisena mulla pindmisse kihti kujunenud huumushorisont, kus orgaanilise aine sisaldus on tavaliselt vahemikus 1–10%⁵⁴. Sellises kihis on taimejäänused lagunened ja muundunud huumusaineteks. Kestva liigniiskuse tingimustes, st maa-aladel, kus vesi ei pruugi küll otse maa- ehk mullapinnani ulatuda, kuid on suurema osa aastast kõrgemal kui 100 cm, on mulla pindmiseks kihiks kujunenud ca 30 cm tüsedune toorhuumushorisont. Sellises horisondis on orgaanilise aine sisaldus vahemikus 10–35% kuiva mulla massist. Selliseid muldasid nimetatakse gleimuldadeks (Eesti mullakaardil⁵⁵ on need tähistatud tähega G mulla nimetuses) ja gleimulla näide on esitatud pildil 1 (lk 182). Võrreldes kuivade muldadega on gleimuldades orgaaniline aine vähe lagunened ja humifitseerunud ehk tegemist on turvastumise algetapiga⁵⁶. Sõidukite maastikuläbitavuse seisukohalt on oluline, et pealmise

⁴⁸ Reintam 1962, lk 122–123.

⁴⁹ Maa-amet... seletuskiri 2001.

⁵⁰ Astover 2012, lk 228.

⁵¹ Shoop 1993, pp. 9–14.

⁵² Saarilahti 2002a, p. 22.

⁵³ Astover 2012, lk 182.

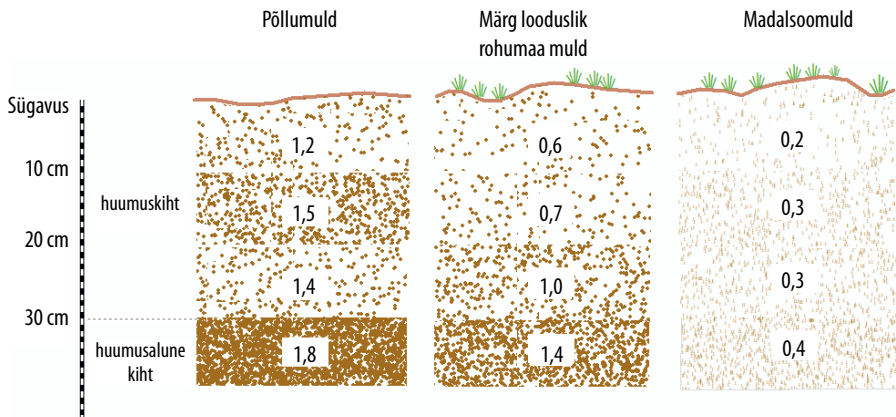
⁵⁴ *Ibid.*, lk 228.

⁵⁵ Maa-amet... seletuskiri 2001.

⁵⁶ Astover 2012, lk 182.

pehme ja kergesti kokku surutava kihi all on ca 30 cm sügavusel tugevam ning mineraalainerikkam kiht (pildil 1 (lk 182) on see nähtav roopa põhjas kollase materjalina), mis võiks roomikule või rattale suuremat tuge pakkuda. Tuleb siiski arvestada, et kui sügavamal lasuv kiht sisaldab rohkesti veega küllastunud peeneteralisi osakesi, ei pruugi ka selline kiht olla piisavalt tugev. Niiskusrežiimi puhul on veel oluline märkida, et ajutiselt ja kestvalt liigniiskeid põllumaade muldi kuivendatakse⁵⁷.

Mulla tihedust väljendatakse mullateaduses kahe parameetriga: tahke faasi tihedus (ingl *particle density*) ja lasuvustihedus (ingl *bulk density*). Neist esimene väljendab tahkete (nii mineraalsete kui ka orgaaniliste) osakeste massi ühes cm^3 -s. Mullaosakeste massi mõõdetakse absoluutkuivas seisus. Lasuvustihedus on mulla teatud kihi tihedus⁵⁸. Selle määramiseks võetakse proovid huvipakkuvatest kihtidest mullasilindriga ilma lasundi struktuuri rikkumata ja kuivatakse. Seejärel mõõdetakse kuiva mulla kaal ja lasuvustihedus arvutatakse massi jagamisel kasutatava silindri mahuga. Kui tahke faasi enda tihedus näitab, kui tihedaks võib osakestest koosnev muld kujuneda äärmisel juhul, siis tahke faasi lasuvustihedus näitab tema tihendatust hetkel. Mida suurem on orgaanilise aine hulk mullas ja vastavas kihis, seda väiksemad on mõlema tiheduse väärtused. Lasuvustihedus sõltub nii veesisaldusest kui ka maakasutusviisist. Joonisel 2 on näidatud iseloomulikud keskmised lasuvustiheduse väärtused erineva maakasutusega muldadel.



Joonis 2. Keskmine lasuvustihedus ja selle näitlikud väärtused [Mg/m^3] Eesti erineva maakasutusega muldadel [originaaljoonis]

⁵⁷ Astover 2012, lk 182.

⁵⁸ Kask, R. 1997. Orgaanilise aine mõjust mulla tihedusele. – APS toimetised, nr 4, lk 21–24.

Joonisel 2 esitatud põllumulla tiheduse profiilist on näha, et huumuskihi lasuvustihedus on suurem kui looduslikel rohumaadel või soomuldadel. Kohati on iseloomulik, et huumuskihis esineb tihedam kiht *ca* 10–20 cm sügavusel. Suurem tihedus on tekkinud muldade harimisel erinevate põllumajandusmasinatega. Traktorite ja teiste masinate ülesõitudest tingitud tihedamad kihid võivad ulatuda 40–80 cm sügavusele⁵⁹, mida nimetatakse tiheseks. Kui huumuskihis esinevat tihest on lihtsam erinevate töövõtetega, nagu kündmine, kõrvaldada, siis tihenened sügavamaid kihte on keerukam kobestada⁶⁰. Tihenened kiht (tihes) on suur probleem mulla tootlikkuse seisukohalt. Osakeste tiheda paigutuse tõttu on vähenened vee ja õhu hulk mullas, mistõttu on taimejuurtel raskusi huumuskihis mulda tungimise ning toitainete omastamisega⁶¹. Kui tihenened mullakihte ei töödelda kobedamaks, on lõpptulemuseks n-õ surnuks tallatud muld, mille saagikus on väga väike⁶².

Soomuldade puhul, mis jagunevad täpsemalt madalsoo-, raba- ja siirdesoomuldadeks, on lasuvustihedus palju väiksem kui põldudel või ka looduslikel rohumaadel. Lasuvustihedus märgade rohumaade (gleimuldade) huumusaluses kihis on võrreldav põllumuldade sama sügava kihiga. Huumuskihis on lasuvustihedus aga suure orgaanilise aine sisalduse ja ka niiskuse tõttu väiksem. Mulla tugevus looduslikel rohumaadel on palju ebaühtlasem kui haritavatel aladel. Nagu juba märgitud, on joonisel 2 esitatud keskmised lasuvustiheduse väärtused, sest tegelikud väärtused sõltuvad mulla lõimisest.

Mulla lasuvustiheduse ja tahke faasi tiheduse alusel on võimalik hinnata mulla poorsust. Poor on mullas tahkete osade vahel paiknev ava või õõnsus, mis on ebakorrapärase suuruse ja kujuga. Üldpoorsus on mullas esinevate pooride osakaal mulla mahust⁶³. Mulla pindmises kihis on poore rohkem, sügavamates kihtides vähened nende hulk oluliselt. Läbitavuse seisukohalt on

⁵⁹ Astover 2012, lk 162.

⁶⁰ Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J.; van der Linden, J. P.; Pires, S.; Sommer, C.; Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review part 1. Machine/soil interactions. – Soil and Tillage Research, 73, p. 146. [Alakukku *et al.* 2003]

⁶¹ Kuht, J.; Reintam, E.; Edesi, L.; Nugis, E. 2012. Influence of subsoil compaction on soil physical properties and on growing conditions of barley. – Agronomy Research, 10 (1–2), p. 329.

⁶² Riley, H. 1994. The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. – Soil and Tillage Research, 29, p. 212.

⁶³ Astover 2012, lk 133.

olulised pooride läbimõõt ja nende sidusus (ingl *connectivity of pores*). Pooride läbimõõt võib olla väga suur (üle 5 mm) või ka väga väike (alla 0,1 μm)⁶⁴. Mida suuremad on poorid ja parem nendevaheline ühendatus, seda kiiremini liigub vesi üldjuhul mullas. Sõiduki ülesõiduga pressitakse pooridest välja mullas olev õhk ja muld saab pooride arvelt tiheneda. Poorides olevat vett ei saa kokku suruda ja vee liikumine mullas on tunduvalt aeglasem. Osa mulla pinnale avaldatud survest kantakse üle poorides paiknevale veele ja mullas suureneb poori rõhk (ingl *pore pressure*), mis mõjutab omakorda mulla kandvust.

5. Roopa sügavuse ennustamise meetodid

Kõige vanem, lihtsam ja üldtuntud roopa sügavuse ennustamise meetod põhineb bevameetriga tehtud mõõtmistel. Bevameeter on töövahend, mida kasutatakse terramehaanikas mulla mehaaniliste omaduste mõõtmiseks⁶⁵. See koosneb kahest erineva diameetriga plaadist, mida koormatakse järjest suuremate raskustega ja samal ajal mõõdetakse plaatide vajumist. Kummagi plaadi puhul fikseeritakse survevajumi funktsioonid ja nende põhjal on võimalik leida parameetrid, mille alusel saab ennustada roopa sügavust⁶⁶. Bevameeter on väga spetsiifiline töövahend, mida konstrueerivad vastavad teadusasutused üksikeksemplaridena. Seniste bevameetrite suured mõõtmed muudavad nende transpordi maastikul keeruliseks.

Militaarvaldkonnas on kõige rohkem kasutatud penetromeetri mõõtmistel põhinevaid roopa sügavuse arvutusi. Penetromeeter kujutab varrast, mille otsas on koonus (kindla tipunurga ja ristlõikepindalaga) ja mille abil mõõdetakse jõu suurust, mida on vaja rakendada, et koonust läbi mulla suruda. Mõõdetav näitaja on kooniline indeks (ingl *cone index*, CI)⁶⁷. Penetromeetrid võivad olla erineva ülesehitusega, kuid läbitavuse määramiseks rakendatakse kõige sagedamini WES-i (*Waterways Experiment Station*) penetromeetrit, mille abil mõõdetakse enamasti mulla tugevust kuni 0,5 m sügavuseni.

⁶⁴ Astover 2012, lk 134.

⁶⁵ Wong, J. Y. 1989. *Terramechanics and Off-Road Vehicles*. Elsevier Science Publishers B.V., p. 9.

⁶⁶ Bekker 1960, pp. 31–35.

⁶⁷ FM 5-430-00-1.

Liikumisvõimaluste ja läbitavuse määratlemisel ei ole kogu 0,5 m tuseduse mullakihi tugevus oluline. Sõltuvalt sõiduki kaalust ja tüübist (ratas- või roomiksõiduk) eristatakse mullas erinevaid kihte, mille CI väärtus määrab läbitavuse. Lihtsuse mõttes käsitletakse neid tavaliselt 15 cm sammuga. ISTVS-i standardi järgi nimetatakse kriitiliseks kihiks (ingl *critical layer*) seda mulla sügavusvahemikku, mis on kõige olulisem sõiduki läbitavuse seisukohalt⁶⁸. Mulla tugevus võib sõiduki surve all väheneda või suurened. Eelkõige on oluline teada, kas muld muutub survestamise tulemusena nõrgemaks. Tugevuse muutuse määramiseks võetakse mullapuuriga mulla kriitilisest kihist 15 cm kõrguse ja 5 cm diameetriga mullaproov, mis sisestatakse mõõdusilindrisse, kus mõõdetakse mulla CI väärtused iga 2,5 cm järel. Seejärel lastakse 1,1 kg raskusel ca 30 cm kõrguselt vabalt mullale kukkuda 100 korda, mille järel mõõdetakse uuesti mullakihi CI väärtused iga 2,5 cm järel. Kooniliste indeksite summa pärast mõjutamist jagatakse enne mõjutamist mõõdetud kooniliste indeksite summaga⁶⁹ ehk leitakse töödeldud mulla tugevuse suhe töötlemata mulla tugevuse suhtes⁷⁰. Seda parameetrit nimetatakse deformeeritavusindeksiks (ingl *remoulding index*, RI)⁷¹. Juhul kui RI on väiksem kui 1, muutub muld survestamise tulemusena nõrgemaks. Mullakihi tugevust iseloomustav kaalutud kooniline indeks (ingl *rating cone index*, RCI) arvutatakse CI ja RI omavahelise korrutisena⁷². Kaalutud kooniline indeks iseloomustab mulla tugevust korduva ülesõidu tingimustes⁷³.

Roopa sügavuse ennustamise valemite rakendatakse nii CI kui ka RCI väärtusi. Kõige sagedamini kasutatakse Willoughby ja Turnage'i mudelit⁷⁴, Maclaurini mudelit⁷⁵ ning US Army Engineer Research and Development

⁶⁸ **ISTVS Standards** 1997, p. 158.

⁶⁹ **FM 5-430-00-1**.

⁷⁰ **ISTVS Standards** 1997, p. 164.

⁷¹ *Ibid.*

⁷² *Ibid.*

⁷³ *Ibid.*

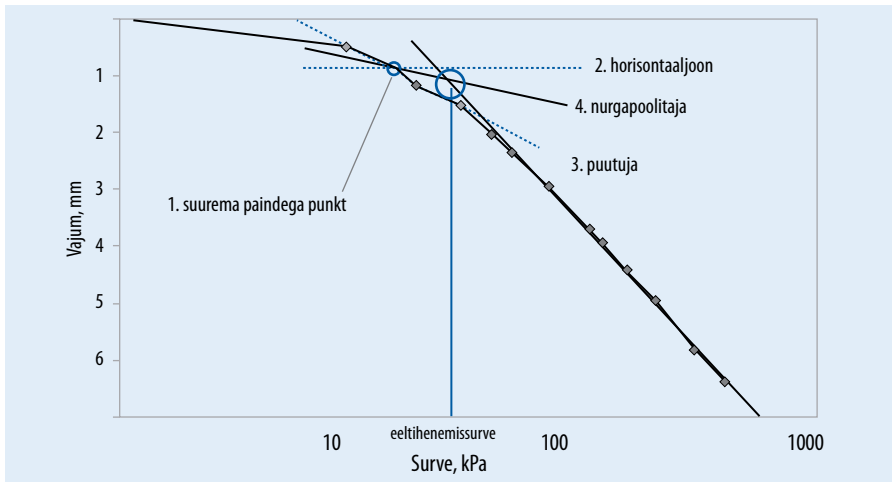
⁷⁴ **Willoughby, W. E.; Turnage, G. W.** 1990. Review of a procedure for predicting rut depth. Internal working document. Viidatud **Affleck, R. T.** 2005 järgi. Vt **Affleck, R. T.** 2005. Disturbance Measurements from Off-Road Vehicles on Seasonal Terrain. ERDC/CRREL TR-05-12. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center, p. 10. <https://pdfs.semanticscholar.org/2a9a/da743c9c3df643b26d7c7aa4ff6aff235825.pdf> (15.05.2020).

⁷⁵ **Maclaurin, E. B.** 1990. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. In Proceedings of 10th international conference of the ISTVS/Kobe. Japan, August 20–24, p. 184. [**Maclaurin** 1990]

Centre (ERDC) mudelit⁷⁶. Neist kaks viimast mudelit lubavad ennustada roopa sügavust ühe ratta ülesõidu järel. Mitmeteljeliste ratassõidukite puhul tuleb teha arvutusi veidi erineva valemi järgi⁷⁷.

Mulla kandevõimet kirjeldatakse põllumajanduses eeltihenemissurve kontseptsiooni (ingl *precompression stress, pre-consolidation stress*)⁷⁸ kaudu. Eeltihenemissurve on surve, mille avaldamisel muutub mulla elastne deformatsioon (väike ja mulla algseisundisse tagasipöörduv mahu muutus) plastiliseks ja pöördumatuks deformatsiooniks⁷⁹. Sellise surve määramiseks kogutakse loomulikus seisundis ja struktuuriga mullaproovid ning laboris mõõdetakse tihenemisreaktsioon ödomeetriga. Mõõtmistulemuste põhjal moodustatakse surve ja deformatsiooni graafik, mille järgi leitakse graafilise analüüsi abil eeltihenemissurve⁸⁰.

Joonisel 3 on esitatud eeltihenemissurve leidmise etapid.



Joonis 3. Mulla eeltihenemissurve määramine graafiliselt avaldatud surve ja mõõdetud vajumi põhjal

⁷⁶ Jones, R.; Horner, D.; Sullivan, P.; Ahlvin, R. 2005. A methodology for quantitatively assessing vehicular rutting on terrains. – Journal of Terramechanics, 42 (3–4), p. 249. [Jones *et al.* 2005]

⁷⁷ Abebe, A. T.; Tanaka, T.; Yamazaki, M. 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. – Journal of Terramechanics, 26 (2), pp. 139–148.

⁷⁸ Alakukku *et al.* 2003, p. 147.

⁷⁹ Lebert, M.; Horn, R. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. – Soil and Tillage Research, 19, p. 276.

⁸⁰ Casagrande, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Proceedings of the International Conference on Soil Mech. and Found. Eng. (ICSMFE), Cambridge, MA, June 22–26, Vol. 3. Harvard University, Cambridge, MA, USA, pp. 60–64. [Casagrande 1936]

Mullatihenemismudelid modelleerivad mullas sõidukite ülesõidu tulemusena toimuvaid deformatsioone⁸¹. Seni on tihenemismudeleid peamiselt kasutatud eeltihendatud põllumuldadel, looduslikele rohumaa muldadele selle põhjal prognoose pole tehtud. Goutal *et al.*⁸² kasutasid SoilFlexi siiski ka metsamuldade tihenemise modelleerimiseks ja nende töö põhjal võib väita, et mudelit rakendati lisaks haritavatele aladele ka teistsuguse struktuuriga muldadel. SoilFlex on üks sellistest tihenemismudelitest, mis lubab lisaks mulla tihenemisele modelleerida ka kujunevat roopa sügavust⁸³, kuid muldade võimalikku külgsuunalist liikumist selles mudelis ei arvestata. Mahuliste deformatsioonide arvutamiseks avaldatud surve mõjul on selles mudelis kolm võimalust. Üks alternatiivseid võimalusi on O'Sullivan ja Robertsoni meetod⁸⁴, mis kasutab sisendparameetritena eeltihenemissurve juures kirjeldatud ödomeetri mõõtmistulemuste põhjal saadud parameetreid.

6. Roopa sügavuse uurimise eesmärk ja meetodika

Kersti Venniku doktoritöö⁸⁵ eesmärk oli uurida roobaste kujunemist maastikul ja selle ennustamise võimalusi erinevatel Eesti muldadel. Doktoritöö koondas nelja avaldatud teadusartikli tulemused⁸⁶. Nii Eestis kui ka maailmas on mulla deformatsiooni haritavatel aladel palju uuritud, looduslike

⁸¹ **Défossez, P.; Richard, G.** 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. – Soil and Tillage Research, 67, p. 43.

⁸² **Goutal, N.; Keller, T.; Défossez, P.; Ranger, J.** 2013. Soil compaction due to heavy forest traffic: measurements and simulations using an analytical soil compaction model. – Annals of Forest Science, 70 (5), p. 555.

⁸³ **Keller, T.; Défossez, P.; Weisskopf, P.; Arvidsson, J., Richard, G.** 2007. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. – Soil and Tillage Research, 93, p. 399. [**Keller et al.** 2007]

⁸⁴ **O'Sullivan, M. F.; Robertson, E. A. G.** 1996. Critical state parameters from intact samples of two agricultural soils. – Soil and Tillage Research, 39, pp. 161–173.

⁸⁵ **Vennik, K.** 2019. The effect of military vehicles on rut formation on Estonian soils and natural recovery of the ruts. PhD Thesis. Estonian University of Life Sciences, p. 130.

⁸⁶ **Vennik, K.; Kukkk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.** 2016. The relationship between precompression stress and rut depth of different soil types in Estonia. – Agronomy Research, 14 (2), pp. 624–634 [**Vennik et al.** 2016]; **Vennik, K.; Keller, T.; Kukkk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.** 2017. Soil rut depth prediction based on soil strength measurements on typical Estonian soils. – Biosystems Engineering, 163, pp. 78–86 [**Vennik et al.** 2017]; **Vennik, K.; Kukkk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.; Keller, T.** 2019. Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. – Soil and Tillage Research, 186, pp. 120–127. [**Vennik et al.** 2019]

rohumaade puhul on mulla ja sõiduki koostoime kohta teadmisi oluliselt vähem. Sellepärast võeti töös vaatluse alla nii looduslikud alad kui ka haritavad alad ning erineva lõimise (saviliivast raske liivsavini) ja orgaanilise aine sisaldusega mullad. Doktoritöö katseosas uuriti nii parasniiskeid kui ka suurema orgaanilise aine sisaldusega muldasid.

Erineva mullatüübiga alade valiku aluseks oli Eesti mullakaart 1 : 10 000⁸⁷ (vahendatud Maa-ameti X-GIS-i teenusena⁸⁸). Uurimuses hõlmatud katsealad valiti Eesti põhikaardi 1 : 10 000 põhjal⁸⁹, kus on eristatud looduslikud rohumaad ja haritavad maad. Katsed tehti 2013. ja 2014. aastal kokku kaheksas asukohas. Mõõtmisteks valiti periood, kui mulla üldine niiskussisaldus oli suur. Selleks toimusid välikatsed septembrist maini, mil maapind oli külmumata. Katsekohtade kirjeldused ja füüsikalised omadused on esitatud tabelis 1.

Katsetel kasutatud sõidukiteks olid logistiline veoauto MB1017 ja ratasoomuk Patria XA-188. Kuna jalaväekompaniide isikkoosseisu ja varustuse transpordiks kasutatakse sageli 2–5 t koormusi kandvaid veoautosid⁹⁰, keskenduti uurimuses just sellele sõidukile. Logistilise veoauto MB1017 kogumass on 7 t ja see on taktikalise veoautoga võrreldes halvema mobiilsusega. Taktikalised veoautod peavad olema suutelised järgnema väga hea läbitavusvõimega roomikmasinatele. Kui taktikalistel sõidukitel on rehvirõhu korrigeerimise süsteem, siis logistilistel veoautodel see puudub ja tüüpiliselt on neil tagumisel teljel topeltrehvid⁹¹. Kuna ratassõidukite kõrge rehvirõhk põhjustab suuremat survet maapinnale, rakendati eksperimentides mõlema katsesõiduki puhul maksimaalselt lubatud rehvirõhku: 650 kPa. Ratasoomuki XA-188 kogumass on 23 t ja seda sõidukit kasutati ühes mõõdukohas roobaste tekitamiseks.

⁸⁷ Maa-amet... seletuskiri 2001.

⁸⁸ Maa-amet, mullastiku kaardi kaardirakendus. https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=MA29&user_id=at&LANG=1&WIDTH=1620&HEIGHT=1008&zlevel=0,552500,6505000 (18.06.2020).

⁸⁹ *Ibid.*

⁹⁰ Jalaväekompanii lahingutegevus 2012. Kaitseväe Ühendatud Õppeasutused. Taktika õppetooli õppematerjal, lisa 1.

⁹¹ Bianchi, F. 2002. Off-Road Mobility: Problems & Solutions. – Military Technology, 6, p. 147.

Tabel 1. Katsealade kirjeldus

Koht, mulla nimetus	Kiht	Niiskusežiim	Lõimis FAO järgi	Lasuvustihedus, Mg/m ³	Savi, %	Tolm, %	Gravi-meetriline niiskus, %	Orgaanilise aine sisaldus, %
Haritavad maad								
Kesa, LP	Huumuskiht	Parasniiske	Kerge liivsavi	1,48	7,8	30,7	23,7	0,5
Kaimi I, Kog	Huumusalune kiht		Saviliiv	1,75	3,6	21,4	16,9	0,1
	Huumuskiht	Ajutselt liigniiske	Keskmine liivsavi	1,26	18,0	43,3	26,9	1,3
Kaimi II, Go	Huumusalune kiht		Tolmjas liivsavi	1,46	18,1	63,5	17,8	0,4
	Huumuskiht	Kestvalt liigniiske	Tolmjas liivsavi	0,70	0,4	67,8	72,2	11,6
	Huumusalune kiht		Tolmjas liivsavi	1,65	19,9	53,0	18,8	0,3
Looduslikud rohumaad								
Sirvaku, LPg	Huumuskiht	Kestvalt liigniiske	Kerge liivsavi	0,74	1,4	32,3	40,5	2,33
Saverna, GI	Huumusalune kiht		Kerge liivsavi	1,80	7,3	35,7	14,0	0,09
	Huumuskiht	Kestvalt liigniiske	Kerge liivsavi	1,37	11,1	20,2	27,7	1,0
Laeva I, Go	Huumusalune kiht		Kerge liivsavi	1,46	10,8	28,9	22,8	1,5
	Huumuskiht	Kestvalt liigniiske	Raske liivsavi	1,29	30,4	37,5	40,9	1,7
Laeva II, Go	Huumusalune kiht		Keskmine liivsavi	1,61	26,3	39,0	21,3	0,3
	Huumuskiht	Kestvalt liigniiske	Keskmine liivsavi	1,15	20,9	48,8	38,6	2,4
Ilmatsalu, m ^m	Huumusalune kiht		Keskmine liivsavi	1,40	20,0	46,4	28,5	2,0
	Huumuskiht		Turvas	0,35	-	-	106,2	21,9
	Huumusalune kiht		Turvas	0,24	-	-	245,2	33,2

Tolm (0,063–0,002 mm), savi (<0,002 mm).

Maastikukatsete meetoodika oli järgmine. Veoauto puhul tehti üldjuhul eraldi ühekordse ülesõiduga rada ja selle kõrvale kümme korda üle sõidetud roopad. Erandiks oli vaid Sirvaku ala, kus sõiduk tegi ühe ülesõidu. XA-188 puhul piirduiti ühe ülesõiduga. Põhjuseks oli asjaolu, et juba esmase ülesõidu järel kujunes sügav roobas, mille suurimad väärtused küündisid sõiduki põhjakõrguse lähedale. Mõlemad sõidukid liikusid ühtlase kiirusega 5 km/h ja vähemalt 50 m lõigul. Ülesõidu järel fikseeriti roobaste sügavused iga 1 kuni 5 m tagant ja vallide olemasolul mõõdeti nende kõrgus (pilt 1).



Pilt 1. Roopa sügavuse mõõtmine maastikul

Mullarooka sügavuse ennustamiseks valiti kolm erinevat lähenemist. Kõigepealt katsetati penetromeetri mõõtmistel põhinevat Willoughby ja Turnage'i mudelit⁹² ning Maclairini⁹³ ja ERDC mudeleid⁹⁴ koos korduvate ülesõitude modelleerimisega. Teiseks otsiti seoseid muldade eeltihenemissurve ja roopa sügavuse vahel. Kolmandaks katsetati roobaste ennustamisel tihenemismudelit SoilFlex⁹⁵. Penetromeetri mõõtmisi tehti kuni 1 m kaugusel

⁹² Willoughby, Turnage 1990.

⁹³ Maclairin 1990, p. 184.

⁹⁴ Jones *et al.* 2005, p. 249.

⁹⁵ Keller *et al.* 2007, p. 399.

roobastest 20 korda. Silindritesse (diameeter 10 cm ja kõrgus 3 cm) koguti rikkumata struktuuriga mullaproovid roobaste kõrvalt kihtidest vahemikus 0–3 cm, 15–18 cm või 20–23 cm ning huumusalusest kihist kas 35–38 cm või 40–43 cm sügavuselt. Laboris mõõdeti kogutud proovide deformatsioon erineva surve all ödomeetriga ja leiti eeltihenemissurve Casagrande meetodil⁹⁶, samuti mulla mehaanilised omadused SoilFlexi mudeli tarbeks. Fikseeriti ka mulla gravimeetrilise niiskuse sisaldus. Väiksemate proovisilindritega (diameeter 5,3 cm; kõrgus 4 cm) koguti mullaproovid mulla lasuvustiheduse määramiseks nii roopa kõrvalt kui ka roopa põhjast järgmistest kihtidest: 0–4 cm, 5–9 cm, 10–14 cm, 15–19 cm, 20–24 cm, 30–34 cm, 40–44 cm (referentspinnaks oli seejuures kas tallamata maapind või roopa põhi). Igal uurimisalal koguti häirimata kohtadest mulda nii huumuskihist kui ka huumusalusest kihist mulla lõimise, orgaanilise aine sisalduse, tahke faasi tiheduse ja lisaks teiste füüsikaliste omaduste määramiseks.

Statistiliseks analüüsiks rakendati vabavaralist tarkvarakeskkonda R⁹⁷. Mullatüübi ja maakasutusmõju erinevuste hindamiseks roopa sügavusele kasutati dispersioonianalüüsi. Penetromeetri mõõtmistel põhinevate mudelite sobivuse hindamiseks kasutati ruutkeskmise erinevuste (ingl *root mean square difference*, RMSD) arvutamist⁹⁸. Eeltihenemissurve statistilise erinevuse võrdluseks erinevate mullatüüpide, maakasutuse ja kihtide vahel rakendati t-testi. Korrelatsiooni- ja regressioonianalüüsiga määrati seos eeltihenemissurve ja roopasügavuse vahel. Detailsem metoodika ja tulemused mulla lasuvustiheduse muutuse kohta roobastes, samuti võrdlus SoilFlexi modelleerimise tulemuste ja roopa sügavuse ennustamisega on esitatud Venniku *et al.* 2019. aastal ilmunud artiklis.⁹⁹

6.1. Roopa sügavuse mõõtmise ja modelleerimise tulemused

Joonisel 4 on esitatud mõõdetud keskmine roopa sügavus peale ühte ja kümnet ülesõitu. Ühe ülesõidu järel olid roopad sügavamad looduslikel rohumaadel (keskmiselt 4,3–7,3 cm). Haritavatel maadel oli keskmine sügavus vahemikus 2,5–3,3 cm. Kõige sügavamad roopad kujunesid raskema katsesõiduki (XA-188) ülesõidu tulemusena Savernas, kus keskmine roopa

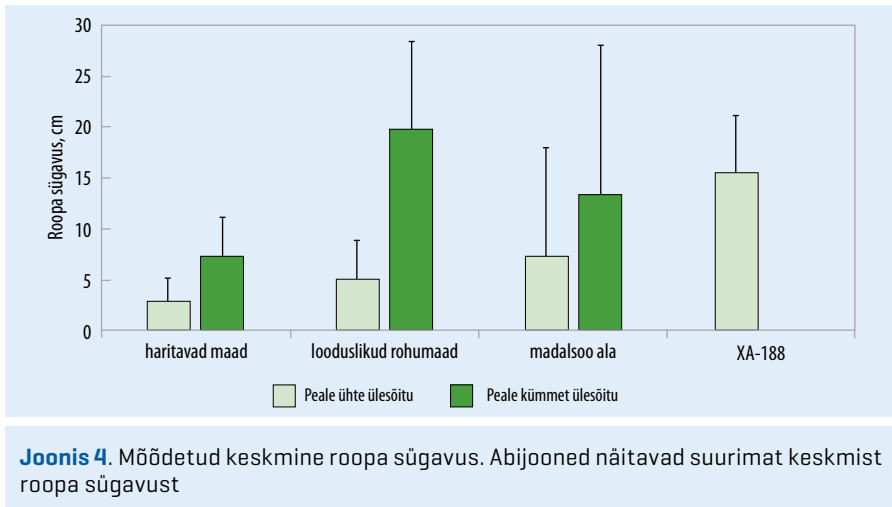
⁹⁶ Casagrande 1936.

⁹⁷ R Core Team 2015. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/> (08.06.2020).

⁹⁸ Vennik *et al.* 2017, p. 84.

⁹⁹ Vennik *et al.* 2019, pp. 123–125.

sügavus oli 15,6 cm. MB1017 kümnekordse ülesõidu tagajärjel muutusid roopad sügavamaks kõikidel katsealadel. Roobaste sügavus suurenes vähem haritavatel maadel (keskmiselt vahemikus 3,8–5,4 cm) ja rohkem looduslikel rohumaadel (keskmiselt 13,3–15,2 cm). Madalloomullal suurenes roopa sügavus 6,1 cm. Mulla lõimis ja maakasutus mõjutasid statistiliselt oluliselt roopa sügavust pärast nii ühte kui ka kümnet ülesõitu (mõlemal juhul $p < 0,01$). Looduslikel rohumaadel oli võrreldes haritavate aladega suurem mulla vee- ja savisisaldus, samuti orgaanilise aine sisaldus, aga väiksem lasuvustihedus (tabel 1).

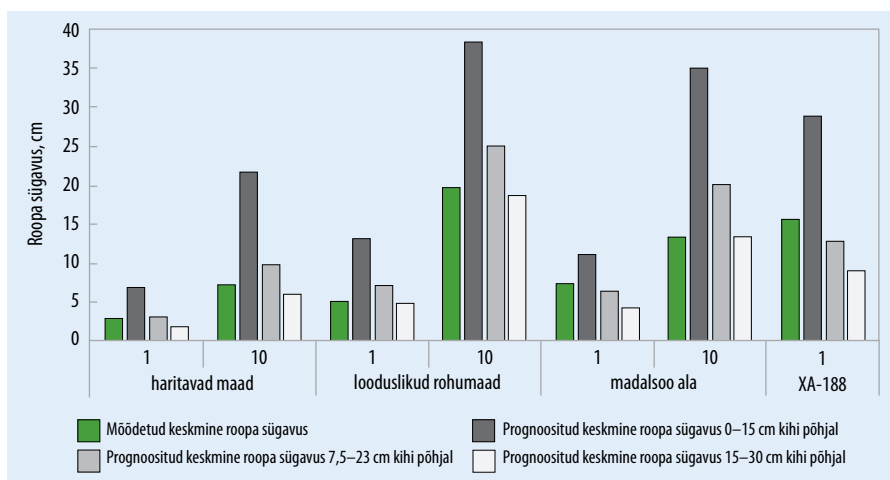


Joonis 4. Mõõdetud keskmine roopa sügavus. Abijooned näitavad suurimat keskmist roopa sügavust

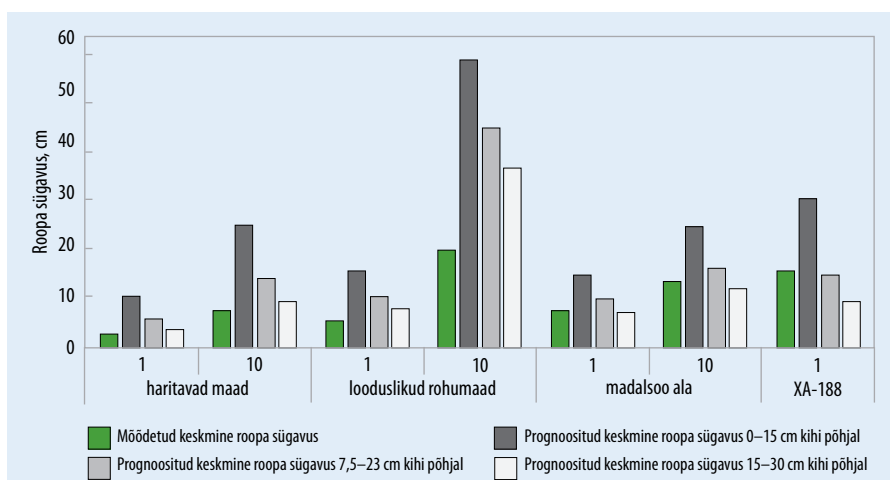
Roopa sügavuse ennustamise aluseks olid penetromeetri mõõtmised 0–15 cm; 7,5–23 cm ja 15–30 cm kihist. Kolme mudeliga (Willoughby ja Turnage'i, Maclaurini ja ERDC mudeliga) modelleeritud roopa sügavuse väärtused võrdluses mõõdetud roopa sügavusega on esitatud joonistel 5–7. Modelleerimisel ennustatud roobaste sügavus on valdavalt üle hinnatud ja seda nii ühe kui ka kümne ülesõidu puhul. Eriti palju oli roopaid üle hinnatud juhul, kus rakendati CI ja RCI väärtusi 0–15 cm kihist. Kui ennustamiseks kasutati CI ja RCI väärtusi 15–30 cm kihist, esines siiski ka roopa sügavuse alahindamist. Modelleeritud ja mõõdetud roopasügavuste RMSD väärtused on esitatud Venniku *et al.* artiklis¹⁰⁰. Arvestades RMSD keskmisi väärtusi ja standardhälbeid, võib väita, et roopasügavus on esmase ülesõidu järel modelleeritud kõige täpsemalt Willoughby ja Turnage'i mudeli alusel ja seda juhul, kui rakendati RCI väärtusi 7,5–23 cm kihist. Keskmine RMSD

¹⁰⁰ Vennik *et al.* 2017, p. 84.

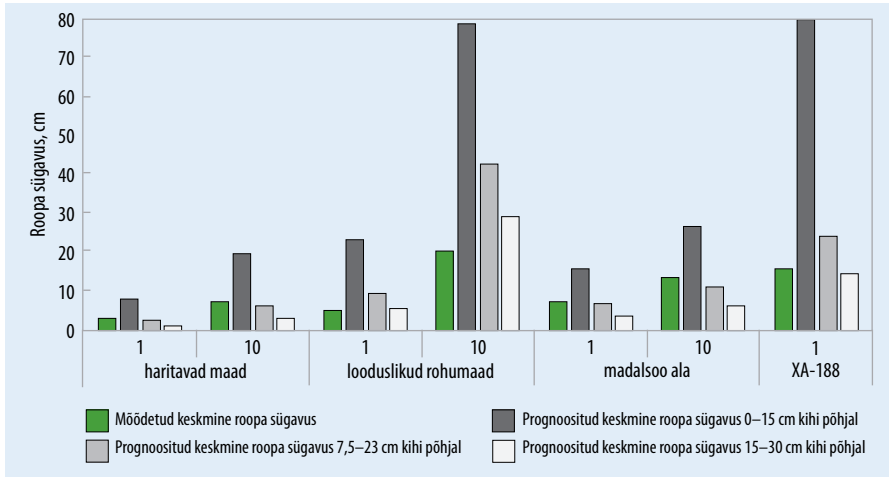
oli 2,0 cm ja RMSD standardhälve 0,7 cm. Kümne ülesõidu puhul osutus täpsemaks ennustus, kui arvutustes rakendati RCI väärtusi 15–30 cm kihist, st keskmine RMSD oli 2,2 cm ja RMSD standardhälve 1,9 cm. Willoughby ja Turnage'i mudel sobis ühtemoodi hästi erineva maakasutuse, lasuvustiheduse ja lõimiseiga muldadele ennustamiseks MB1017 ülesõitude järel. Raskema sõiduki, XA-188 ühekordse ülesõidu järel sobis roopa sügavuse ennustamiseks kõige paremini Maclaurini mudel ja seda juhul, kui rakendati CI väärtusi 15–30 cm kihist.



Joonis 5. Mõõdetud ja modelleeritud roopa sügavus Willoughby ja Turnage'i valemi järgi



Joonis 6. Mõõdetud ja modelleeritud roopa sügavus Maclaurini mudeli järgi



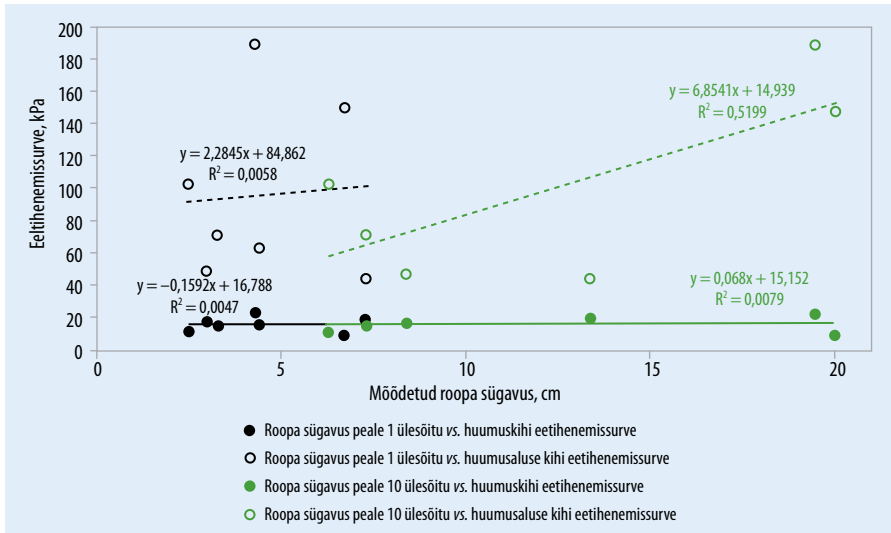
Joonis 7. Mõõdetud ja modelleeritud roopa sügavus ERDC mudeli järgi

Muldade eeltihenemissurve väärtused katsekohtade huumuskihtides olid vahemikus 9–25 kPa ja huumusalustes kihtides vahemikus 32–199 kPa. Täpsemalt on need väärtused esitatud katsekohtade kaupa Venniku *et al.* 2016. aastal ilmunud artiklis¹⁰¹. Kui huumusaluses kihis oli selgelt kõige väiksem turbamulla eeltihenemissurve (32 kPa), siis huumuskihis oli vastav väärtus üks suurematest (20 kPa). Puudus statistiliselt oluline erinevus eeltihenemissurve ning mulla- ja maakasutustüüpide vahel ($p < 0,01$). Joonisel 8 on esitatud MB1017 ühe ja kümne ülesõidu järel mõõdetud keskmise roopa sügavuse ning huumuskihi ja huumusaluse kihi eeltihenemissurve vaheline korrelatsioon. Madalad determinatsioonikoefitsiendid viitavad sellele, et eeltihenemissurve ja roopa sügavuse vahel puudub seos. Korrelatsioonianalüüs haritavate alade roopa sügavuse ja eeltihenemissurve vahel näitas, et determinatsioonikoefitsiendid ühe ülesõidu järel olid vastavalt 0,52 pealmise kihi ja 0,47 alumise kihi puhul ning 10 ülesõidu järel vastavalt 0,92 ja 0,99.

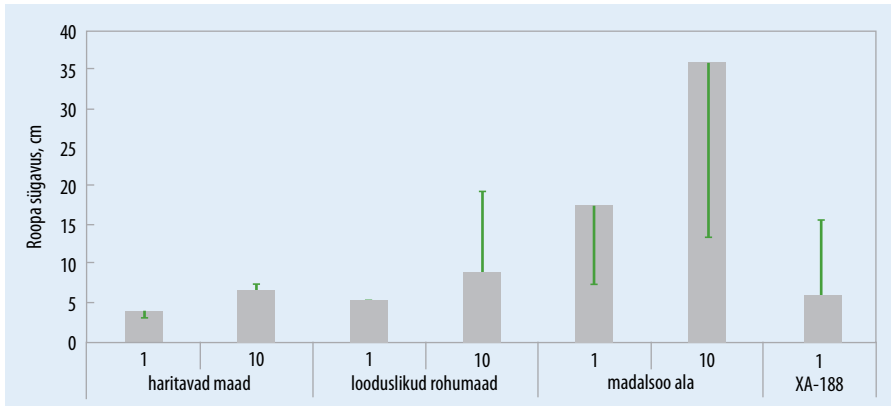
Tihenemismudeli SoilFlex abil modelleeritud keskmine kontaktsurve oli vaatamata sõidukite kogumassi ligi kolmekordsele erinevusele sarnane: MB1017 puhul 634 kPa ja XA-188 puhul 656 kPa. 15 cm sügavusel kujunes MB1017 puhul modelleeritud surveks esimese ratta all 400 kPa ja XA-188 puhul 600 kPa, 30 cm sügavusel oli surve vastavalt *ca* 150 kPa ja 250 kPa. Modelleerimise aluseks oli eeldus, et maksimaalne kontaktsurve võrdub 1,5-kordse rehvirõhuga. Seega küündis maksimaalne kontaktsurve mõlema

¹⁰¹ Vennik *et al.* 2016, p. 629.

sõiduki puhul 975 kPa-ni. Ödomeetri mõõtmiste põhjal määratud muldade tihenemist kirjeldavad parameetrid on esitatud Venniku *et al.* 2019. aastal ilmunud artiklis¹⁰². Nende alusel modelleeritud roopa sügavus on esitatud joonisel 9. Lisaks on seal näidatud ära erinevused võrreldes mõõdetud roopa sügavusega.



Joonis 8. Mõõdetud roopa sügavus ja eeltihenemissurve



Joonis 9. Tihenemismudeliga SoilFlex modelleeritud roopa sügavus peale ühte ja kümnet ülesõitu ning erinevused võrreldes mõõdetud roopa sügavusega [roheline joon]

¹⁰² Vennik *et al.* 2019, p. 122.

Roopa sügavus, modelleerituna tihenemismudeliga SoilFlex, vastab mõõdetud roopa sügavusele pärast MB1017 ühte ja kümnet ülesõitu haritava tel maadel. Keskmise sügavuse erinevus jäi 0–2 cm piiresse. Looduslikel rohumaadel erines mõõdetud ja ennustatud roopa sügavus oluliselt rohkem. Pärast ühte ülesõitu oli erinevus 3–10 cm ja pärast kümnet ülesõitu 7–21 cm.

Vennik *et al.* (2019)¹⁰³ on esitanud mõõdetud ja modelleeritud lasuvustiheduse roobastes ja nende kõrval tallamata aladel. Põldudel mõõdetud lasuvustihedus sarnanes modelleeritud väärtustega, looduslikel rohumaadel aga mitte. Savisel mullal Laeva I mõõdukohas oli mõõdetud ja modelleeritud roopa sügavus peale ühte ülesõitu enam-vähem võrdne. Pärast kümnet ülesõitu vastas modelleeritud lasuvustihedus mõõdetud väärtustele 20 cm sügavamates kihtides ning roopa sügavus oli 7 cm väiksem kui tihenemismudeliga ennustatud. Madalsoomullal mõõdetud lasuvustihedus lubab järeldada, et MB1017 ülesõitude järel ei tihenunud turbakihid oluliselt, st et ka kümme korda ületatud rajas esines vaid 20–30 cm sügavusel kergelt kokku pressitud kiht. SoilFlexi modelleerimistulemused näitasid olulist turba-kihtide kokkupressimist kõikides mullakihtides, millest tulenes ka roopa sügavuse ülehindamine *ca* 22 cm.

6.2. Arutelu

Mõõdetud roopasügavused MB1017 ühekordse ülesõidu järel erinevatel muldadel ja maakasutustüüpidel varieerusid 5 cm piires. Looduses, kus roopa sügavust on ebatasase mullapinna ning ülesõitudel lamandunud taimkatte tõttu raske täpselt mõõta (viga *ca* 2–3 cm), ei ole see erinevus suur. Sügav roobas, maksimaalselt 22 cm, tekkis XA-188 ühekordse ülesõidu järel. Mulla lasuvustiheduse analüüsi põhjal XA-188 ülesõidukohas võib väita, et suure tõenäosusega oli katsekohas lähiajal mulla struktuur muutunud ehk oli tehtud mingit laadi pinnasetoid, kuid taimkate oli juba taastunud. Huumusaluse kihi lasuvustihedus (tabel 1) ei suurenenud oluliselt, vaid püsis huumuskihi lasuvustihedusega samal tasemel (vahemikus 1,4–1,5 Mg/m³). Lisaks sellele oli huumusaluse kihi orgaanilise aine sisaldus (tabel 1) suurem kui huumuskihi orgaanilise aine sisaldus. Mulla töötlemine (ümberpaigutamine, puistamine, läbikaevamine jne) lõhub looduslike protsesside tulemusena aastate jooksul kujunenud loomuliku struktuuri. Kui visuaalselt

¹⁰³ Vennik *et al.* 2019, p. 124.

kaovad tehtud tööde jäljed mõne aastaga, siis mulla normaalse struktuuri ja tugevuse taastumiseks kulub aastaid¹⁰⁴.

MB1017 korduvate ülesõitudega ilmnesid roobaste sügavuses erinevate maakasutustüüpide puhul olulised erinevused. Looduslikel rohumaadel suurenes sügavus 6–15 cm ja põllumaadel 4–5 cm. Oluline on märkida, et esmase ülesõidu järel tekkinud roopa sügavuse põhjal ei saa ennustada roopa sügavust kümne ülesõidu järel. Saarilahti (2002) tõi oma kokkuvõtlikus projektiaruandes esile, et Soomes peetakse metsaveomasinate puhul 10 cm sügavamaid roopaid oluliseks liikumistakistuseks¹⁰⁵. Sügavad roopad tekitavad suurt kahju ka looduskeskkonnale. Keskkonna seisukohalt peetakse 6 cm roobast väikseks koormuseks loodusele, 15 cm roobast juba oluliseks looduskahjaks¹⁰⁶.

Tihenemismudeli SoilFlex abil modelleeritud katsesõidukite avaldatud vertikaalsurvet võib võrrelda tulemustega, milleni on jõudnud ka teised maastikuläbitavuse uurijad. Pytka *et al.*¹⁰⁷ kasutasid 8 t militaarveoautot (rehvirõhuga 390 kPa) tõmbevõime katsetustel. Tolmusel mullal mõõdeti sellise sõiduki avaldatavaks surveks 354 kPa 15 cm sügavusel. 30 cm sügavusel oli surve 180 kPa. Võrdluseks võib siinkohal tuua surve, mida on mõõdetud põllumajanduses kasutatud sõidukite puhul. 7 t ratta koormusega ja 230 kPa rehvirõhuga suhkrupeedi kombaini all mõõdeti 15 cm sügavusel vertikaalsurveks 120 kPa ja 35 cm sügavusel 50 kPa¹⁰⁸. Seega on kitsaste rehvide ja suurema rehvirõhu tõttu 15 cm sügavusel militaarsõiduki avaldatav surve neli kuni viis korda suurem. Foltz oma uuringus nimetas üle 600 kPa rehvirõhku maanteerõhuku.¹⁰⁹ Logistilised militaarsõidukid liiguvad maastikul sellise kõrge rõhuga juhul, kui tekib äkiline vajadus teelt välja pöörata. Samuti on suur rehvirõhk vajalik olukordades, kus maapind on

¹⁰⁴ Tobias, S.; Haberecht, M.; Stettler, M.; Meyer, M.; Ingensand, H. 2008. Assessing the reversibility of soil displacement after wheeling in situ on restored soils. – *Soil and Tillage Research*, 98, pp. 81–93.

¹⁰⁵ Saarilahti 2002a, p. 38, 68.

¹⁰⁶ Affleck 2005, p. 7.

¹⁰⁷ Pytka, J.; Dąbrowski, J.; Zając, M.; Tarkowski, P. 2006. Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. – *Journal of Terramechanics*, 43, pp. 469–485.

¹⁰⁸ Gysi, M.; Ott, A.; Flühler, H. 1999. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. – *Soil and Tillage Research*, 52, pp. 141–151.

¹⁰⁹ Foltz, R. B. 1994. Sediment Reduction from the Use of Lowered Tire Pressures. – *Central tire inflation systems: managing the vehicle to surface SP-1061*. SAE Technical Paper Series 942244, pp. 47–52. [Foltz 1994]

väga ebatasane ning ületada tuleb maha kukkunud tüvesid ja kivisid. Selgelt parem läbitavus ja eelis on maastikul sõidukitel, mis on varustatud keskse rehvirõhu jälgimise süsteemiga (ingl *central tyre inflation system*, CTIS), mis lubab rehvirõhku muuta käigult¹¹⁰.

Uurimusest selgus, et erinevate mullatüüpide eeltihenemissurve ja roopa sügavuse vahel puudub seos (joonis 8). Uuritud muldade huumuskihi eeltihenemissurve väärtused olid väga madalad (9–25 kPa)¹¹¹. Võrdluseks võib tuua, et märgadel Rootsi põllumuldadel jäi 0–10 cm kihi eeltihenemissurve vahemikku 39–152 kPa¹¹². Üks põhjusi võib olla muldade suur veesisaldus. Teiselt poolt on aga mainitud, et kohati puudub muldadel selge piir elastse ja plastse deformatsiooni vahel ja seda eriti muldade puhul, mille lasuvustihedus on väike¹¹³. Eeltihenemissurve oli suurem huumusaluses kihis ja kõige suurem muldadel, mille savisisaldus oli suur. Järgnevates uuringutes on põhjust uurida täpsemalt põllumuldade eeltihenemissurve ja roopa sügavuse vahelist seost.

Tihenemismudeli SoilFlex ennustatud tulemuste ja mõõdetud roopasügavuste võrdluse põhjal selgus, et mudel modelleerib lasuvustiheduse muutusi ning roopa sügavusi adekvaatselt vaid teatud muldadel. Esmase ülesõidu järel modelleeritud ja mõõdetud tulemus erines kõige rohkem (10 cm) madalsoomulla puhul. Kümne ülesõidu järel oli erinevus juba rohkem kui 22 cm. Roobaste ümber olid korduvate ülesõitudega kujunenud 15 cm vallid, mis viitavad mulla lateraalsele liikumisele. Seejuures SoilFlex modelleeris turbamaterjali märkimisväärset tihenemist. Laborimõõtmiste põhjal võib turbas määratud muutusi põhjustada turba sekundaarne tihenemine¹¹⁴. Selline tihenemine toimub pinnases pärast poorirõhu hajumist. Turvas vajab läbitavusuuringutes eraldi uurimist ja käsitlemist. Ödomeetriga tehtud mõõtmiste puhul erines ka surve kestus. Maastikul sõites avaldab rehvi survet mõne sekundi jooksul, laborimõõtmisel kulub sama surve saavutamiseks

¹¹⁰ Foltz 1994, p. 47.

¹¹¹ Horn, R.; Fleige, H. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. – Soil and Tillage Research, 73, p. 93.

¹¹² Arvidsson, J.; Keller, T. 2004. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. – Soil and Tillage Research, 77, p. 90.

¹¹³ Berli, M. 2001. Compaction of Agricultural Subsoils by Tracked Heavy Construction Machinery. Doctoral Thesis. ETH Diss., No. 14132, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, Switzerland, p. 30.

¹¹⁴ Mesri, G.; Stark, T. D.; Ajlouni, M. A.; Chen, C. S. 1997. Secondary compression of peat with or without surcharging. – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (5), pp. 411–421.

ligikaudu 3 minutit. Elastne deformatsioon on valdav lühiajaliste koormuste puhul, pikemal perioodil muutub olulisemaks viskoosne deformatsioon¹¹⁵.

Looduslikel rohumaaadel esines samuti märkimisväärseid erinevusi SoilFlexi modelleerimistulemuste ja mõõdetud väärtuse vahel pärast kümmet ülesõitu. Kuna mõõdetud lasuvustihedus vastas modelleeritud lasuvustihedusele sügavamates kihtides (alates 20 cm) ning roopa sügavus SoilFlexi mudeli puhul oli 7 cm alahinnatud, viitavad need tulemused mulla külgsuunalisele deformatsioonile. SoilFlexi mudel ei modelleerinud nihkepingetest tulenevaid mulladeformatsioone. Maastikul, kus savimulla sidusus oli suure veesisalduse tõttu väike, suurenes roopa sügavus iga järgneva ülesõiduga¹¹⁶. Mikro- ja mesopoorid, mis on tüüpilised savimuldadele, olid täidetud veega ning kuna vesi ei ole kokkusurutav, liikus muld aktiivselt külgedele. Seetõttu tuleks eelkõige märgadel savimuldadel piirduda samas roopas mõne üksiku ülesõiduga.

7. Kokkuvõte

Kokkuvõttes on militaarsõidukite jaoks sügavate roobaste tekkimine Eestis teatud muldade puhul ja teatud aastaagadel probleemiks. Olulised liikumistakistused ja ka keskkonnakahjustused tekivad korduvate ülesõitude tulemusena eelkõige looduslikel rohumaaadel kevadel ja sügisel.

Esmase ülesõiduga tekkinud roopaid ei saa kasutada indikaatorina järgmiste ülesõitude tulemuse ennustamiseks. See, kas liikumisel juba ette sõidetud rajas kujuneb madalam või sügavam roobas, sõltub mulla lõimisest ja orgaanilise aine sisaldusest. Kõige sügavamad roopad tekkisid kümne ülesõidu järjel suurima savisisaldusega mullal. Sügavad vagumused kujunesid mulla külgsuunalise liikumise tulemusena. Sarnane deformatsioon on iseloomulik ka suure orgaanilise aine sisaldusega muldadele.

Sõjaväeline maastikuanalüüsija, kes teeb oma otsused peamiselt kaardi põhjal, peaks rakendama oma tegevuses läbitavuselt keerukamate alade välis- tamiseks Eesti põhikaarti 1 : 10 000. Sellisel kaardil on eristatud pikka aega loodusliku rohumaaana kasutusel olevad alad haritavatest maadest. Samuti toetab otsuste tegemisel Eesti mullakaart 1 : 10 000, kust saab infot mulla tüübi ja struktuuri kohta. Siinse uurimuse tulemuste põhjal tuleks mullakaardil

¹¹⁵ Or, D.; Ghezzehei, T. A. 2002. Modeling post-tillage soil structure dynamics: a review. – Soil and Tillage Research, 64, pp. 41–59.

¹¹⁶ Meek 1996. Viidatud Saarlahti 2002b p. 21 järgi.

piiratud läbitavusega aladeks märkida kuivendamata gleimullad (mulla-kaardil tähis G) ja turvasmullad (mullakaardil tähised M, S või R).

Kõige asjakohasemalt saab roobaste sügavust hinnata penetromeetriga mõõtes. Uurimuse põhjal võib väita, et kõrge rehvirõhuga 7 t logistilise veoauto puhul sobib roopa sügavuse hindamiseks kõige paremini Willoughby ja Turnage'i mudel, aga ka selle puhul võib esineda ülehindamist. Arvestada tuleb siiski, et esitatud järeldused lähtuvad väga piiratud arvust katsemõõtmistest ja raskema sõiduki, 23 t kogumassiga soomustransportööri jaoks oli sobivam Maclaurini mudel. Seega on sõidukile sobiva mudeli valimiseks vaja teha täiendavaid maastikueksperimente erineva kogumassi ja rehvirõhuga sõidukitega. Samuti ei saa võrrelda põllumajandusmasinate mõju militaarsõidukitega, sest militaarsõidukid on sunnitud maastikul liikuma väga kõrge rehvirõhuga ning nende avaldatav surve ja sellest tulenev deformatsioon on oluliselt suurem kui põllumajandusmasinate puhul.

Kirjandus

- Abebe, A. T.; Tanaka, T.; Yamazaki, M.** 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 26 (2), pp. 139–148.
- Affleck, R. T.** 2005. Disturbance Measurements from Off-Road Vehicles on Seasonal Terrain. ERDC/CRREL TR-05-12. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center, p. 83.
<https://pdfs.semanticscholar.org/2a9a/da743c9c3df643b26d7c7aa4ff6aff235825.pdf> (15.05.2020).
- Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J.; van der Linden, J. P.; Pires, S.; Sommer, C.; Spoor, G.** 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review part 1. Machine/soil interactions. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 73, pp. 145–160.
- Arold, I.** 2005. Eesti maastikud. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Arvidsson, J.; Keller, T.** 2004. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 77, pp. 85–95.
- Astover, A.** 2012. Mullateadus. Õpik kõrgkoolidele.
- Bekker, M. G.** 1960. Off the road locomotion. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press.
- Berli, M.** 2001. Compaction of Agricultural Subsoils by Tracked Heavy Construction Machinery. Doctoral Thesis. ETH Diss. No. 14132, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, Switzerland.
- Bianchi, F.** 2002. Off-Road Mobility: Problems & Solutions. – *Military Technology*, Vol. 6, pp. 141–150.
- Botta, G. F.; Tolon Becerra, A.; Bellora Tourn, F.** 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 103, pp. 381–386.

- Braunack, M. V.; Williams, B. G.** 1993. The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 30 (4), pp. 299–311.
- Burt, E. C.; Wood, R. K.; Bailey, A. C.** 1992. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressures. – *Transactions of the ASAE*, Vol. 35 (2), pp. 401–404.
- Casagrande, A.** 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mech. and Found. Eng. (ICSMFE)*, Cambridge, MA, June 22–26, Vol. 3. Harvard University, Cambridge, MA, USA, pp. 60–64.
- Défosse, P.; Richard, G.** 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 67, pp. 41–64.
- Evans, I.** 1964. The sinkage of tracked vehicles on soft ground. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 1 (2), pp. 33–43.
- FM 5-33, Terrain Analysis** 1990. Headquarters. Department of the Army. Washington, D.C., July 11, p. 6-1.
<https://www.globalsecurity.org/jhtml/jframe.html#https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-33/ch6.pdf> (15.05.2020).
- FM 5-430-00-1, US Army. Planning and design of roads, airfields, and heliports in the theater of operations – road design.** 1994. Vol. 1. Headquarters, Department of the Army. Department of the Air Force. Washington, D.C., August 26.
<http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-430-00-1/CH7.htm> (15.05.2020).
- Foltz, R. B.** 1994. Sediment Reduction from the Use of Lowered Tire Pressures. – Central tire inflation systems: managing the vehicle to surface SP-1061. SAE Technical Paper Series 942244.
<https://pdfs.semanticscholar.org/cb67/e3afd9d175ade490c34809328f6e5792bc00.pdf> (15.05.2020).
- Goutal, N.; Keller, T.; Défossez, P.; Ranger, J.** 2013. Soil compaction due to heavy forest traffic: measurements and simulations using an analytical soil compaction model. – *Annals of Forest Science*, Vol. 70 (5), pp. 545–556.
- Gysi, M.; Ott, A.; Flühler, H.** 1999. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 52, pp. 141–151.
- Håkansson, I.; Voorhees, W. B.; Riley, H.** 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 11, pp. 239–282.
- Halvorson, J. J.; McCool, D. K.; King, L. G.; Gatto, L. W.** 2001. Soil compaction and over-winter changes to tracked-vehicle ruts, Yakima Training Center, Washington. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 38, pp. 133–151.
- Hillel, D.** 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego.
- Hohl, G. H.** 2007. Military terrain vehicles. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 44, pp. 23–34.
- Horn, R.; Blackwell, P. S.; White, R.** 1989. The effect of speed of wheeling on soil stresses, rut depth and soil physical properties in an ameliorated transitional red-brown earth. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 13, pp. 353–364.

- Horn, R.; Fleige, H.** 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 73, pp. 89–99.
- ISTVS Standards** 1997. International Society for terrain-vehicle systems standards. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 14, pp. 153–182.
<https://static1.squarespace.com/static/4ff71ac2c4aaff0782fde3d6/t/54109573e4b01475ae258505/1410373002491/ISTVS+Standards+1977.pdf> (15.05.2020).
- Jalaväekompanii lahingutegevus** 2012. Kaitseväe Ühendatud Õppeasutused. Taktika õppetooli õppematerjal.
- Jones, R.; Horner, D.; Sullivan, P.; Ahlvin, R.** 2005. A methodology for quantitatively assessing vehicular rutting on terrains. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 42 (3–4), pp. 245–257.
- Kask, R.** 1997. Orgaanilise aine mõjust mulla tihedusele. – *APS toimetised*, nr 4, lk 21–24.
- Keller, T.; Arvidsson, J.** 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 79, pp. 191–205.
- Keller, T.; Défossez, P.; Weisskopf, P.; Arvidsson, J.; Richard, G.** 2007. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 93, pp. 391–411.
- Kuht, J.; Reintam, E.; Edesi, L.; Nugis, E.** 2012. Influence of subsoil compaction on soil physical properties and on growing conditions of barley. – *Agronomy Research*, Vol. 10 (1–2), pp. 329–334.
- Lal, R.; Shukla, M. K.** 2004. Principles of soils physics. NY: Marcel Dekker Inc.
- Lebert, M.; Horn, R.** 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 19, pp. 275–286.
- Liu, K.; Ayers, P.; Howard, H.; Anderson, A.** 2009. Influence of turning radius on wheeled military vehicle induced rut formation. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 46, pp. 49–55.
- Liu, K.; Ayers, P.; Howard, H.; Anderson, A.; Kane, K.** 2011. Multi-pass rutting study for turning wheeled and tracked vehicles. *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, pp. 5–11;
- Maa-amet, mullastiku kaardi kaardirakendus.**
https://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=MA29&user_id=at&LANG=1&WIDTH=1620&HEIGHT=1008&zlevel=0,552500,6505000 (18.06.2020).
- Maa-amet, vabariigi digitaalse suuremõõtkavalise mullastiku kaardi seletuskiri** 2001. Tallinn.
https://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf?t=20091211092214 (15.05.2020).
- Maclaurin, E. B.** 1990. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. In *Proceedings of 10th international conference of the ISTVS/Kobe*, Japan, August 20–24, pp. 177–186.
- Margiotta, F. D.** 2000 (ed.). *Brassey's encyclopedia of land forces and warfare*. Brassey's Washington. Brassey's Inc.
- Meek, P.** 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. *Forest Research Institute of Canada, FERIC. Technical Report TR-117*.

- Mesri, G.; Stark, T. D.; Ajlouni, M. A.; Chen, C. S.** 1997. Secondary compression of peat with or without surcharging. – *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, Vol. 123 (5), pp. 411–421.
- Mullastiku kaart.**
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Mullastiku-kaart-p33.html>
 (15.05.2020).
- Nugis, E.** 1998. Complex assessment of the agrotechnical bearing capability of soil. – *Proceedings of the International Conference on Field Technologies & Environment*, September 24–25, 1998, LIAE, Raudondvaris, Lithuania, pp. 73–79.
- Or, D.; Ghezzehei, T. A.** 2002. Modeling post-tillage soil structure dynamics: a review. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 64, pp. 41–59.
- O’Sullivan, M. F.; Robertson, E. A. G.** 1996. Critical state parameters from intact samples of two agricultural soils. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 39, pp. 161–173.
- Priddy, J. D.** 1995. Stochastic Vehicle Mobility Forecasts Using the NATO Reference Mobility Model. Report 3. Database Development for Statistical Analysis of the NRMM II Cross-Country Traction Empirical Relationships. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Technical Report GL-95-9, June 1995. <https://pdfs.semanticscholar.org/cd93/f9016822deb8c1bcee13689b673cfc1f0d75.pdf> (15.05.2020).
- Pytka, J.; Dąbrowski, J.; Zając, M.; Tarkowski, P.** 2006. Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 43, pp. 469–485.
- R Core Team** 2015. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/> (08.06.2020).
- Raper, R. L.** 2005. Agricultural traffic impacts on soil. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 42, pp. 259–280.
- Reintam, L.** 1962. *Mullateadus*. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus.
- Riley, H.** 1994. The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 29, pp. 211–241.
- Saarilahti, M.** 2002a. Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002).
- Saarilahti, M.** 2002b. Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002), Appendix Report No. 2, Evaluation of the WES-Method in Assessing the Trafficability of Terrain and the Mobility of Forest Tractors Part 1. WES mobility models, p. 21. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/1975/8016/ECO021.pdf;jsessionid=737EB36B9DB5878DA0D8EB5870906920?sequence=3> (15.05.2020).
- Shoop, S. A.** 1993. Terrain Characterization for Trafficability. CRREL Report 93–6. https://www.researchgate.net/publication/235013633_Terrain_Characterization_for_Trafficability (15.05.2020).

- Smith, D. L. O.; Dickson, J. W.** 1990. Contributions of Vehicle Weight and Ground Pressure to Soil Compaction. – *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 46, pp. 13–29.
- Stevens, M. T.; Towne, B. W.; Mason, G. L.; Priddy, J. D.; Osorio, J. E.; Barela, C. A.** 2013. Procedures for One-Pass Vehicle Cone Index (VCI1) Determination for Acquisition Support. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. ERDC/GSL SR-13-2.
- Tobias, S.; Haberecht, M.; Stettler, M.; Meyer, M.; Ingensand, H.** 2008. Assessing the reversibility of soil displacement after wheeling in situ on restored soils. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 98, pp. 81–93.
- Vanden Berg, G. E.; Gill, W. R.** 1962. Pressure distribution between a smooth tire and soil. – *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 5, pp. 10–107.
- Vennik, K.** 2019. The effect of military vehicles on rut formation on Estonian soils and natural recovery of the ruts. PhD Thesis. Estonian University of Life Sciences.
- Vennik, K.; Keller, T.; Kukk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.** 2017. Soil rut depth prediction based on soil strength measurements on typical Estonian soils. – *Biosystems Engineering*, Vol. 163, pp. 78–86.
- Vennik, K.; Kukk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.** 2016. The relationship between precompression stress and rut depth of different soil types in Estonia. – *Agronomy Research*, Vol. 14 (2), p. 629.
- Vennik, K.; Kukk, P.; Krebstein, K.; Reintam, E.; Keller, T.** 2019. Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. – *Soil and Tillage Research*, Vol. 186, pp. 120–127.
- Way, T. R.; Erbach, D. C.; Bailey, A. C.; Burt, E. C.; Johnson, C. E.** 2005. Soil displacement beneath an agricultural tractor drive tire. – *Journal of Terramechanics*, Vol. 42, pp. 35–46.
- Willoughby, W. E.; Turnage, G. W.** 1990. Review of a procedure for predicting rut depth. Internal working document.
- Wong, J. Y.** 1989. *Terramechanics and Off-Road Vehicles*. Elsevier Science Publishers B.V.
- Wong, J. Y.** 2008. *Theory of ground vehicles* (4th ed.). NJ: John Wiley and Sons, Inc.

Kpt dr **KERSTI VENNIK**

KVA strateegia ja innovatsiooni õppetooli geoinformaatika lektor

Dr **PEETER KUKK**

TÜ füüsika instituudi insenerigraafika õppejõud,

Kaitseväe Ühendatud Õppeasutuste dotsent aastatel 2005–2018

Dr **KAAREL PIIP**

KVA strateegia ja innovatsiooni õppetooli lektor