

TARTU ÜLIKOOL
BIOLOOGIA-GEOGRAAFIA TEADUSKOND
GEOGRAAFIA INSITUUT

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

Külmumata mulla liiklusvahenditega ületatavuse määramisest
Eestis (Waterways Experiment Station metoodikaga)

Kersti Vennik

Juhendaja: dots. Jüri Roosaare

TARTU 2007

Sisukord

Abstract.....	6
Kasutatud terminid ja tähised	7
1. SISSEJUHATUS	11
2. TERRAMEHAANIKA. MASINA JA MULLA VAHELINE VASTASMÕJU NING SELLE MÕÕTMINE.....	15
2.1. Masina mõju mullale. Mulli kõvadus.....	15
2.1.1. Masina vajumine mulda ja rõõpajälje kujunemine	16
2.1.2. Efektiivne veojõud masina liikumisel. Nühamus. Masina vibratsioon.....	18
2.1.3. Mulli kõvadus ja selle mõõtmine	20
2.2. Relvajõududes peamiselt kasutatavad mobiilsuse kirjeldamise ja ennustamise metoodikad.....	22
2.2.1. Mobiilsust kirjeldavad parameetrid	22
2.2.2. Mobiilsust piiravad parameetrid. Mobiilsuse ennustamise arvutimudelid	23
3. WES METOODIKA MASINATEGA ÜLETATAVUSE MÄÄRATLEMISEKS. UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM (USCS) MULDDE KLASSIFITSEERIMISEKS	26
3.1. Unified Soil Classification System	29
3.1.1. USCS klassifitseerimise protseduurid.....	30
3.1.2. Jämedateralised mullad	31
3.1.3. Peeneteralised ja suure orgaanilise aine sisaldusega mullad	32
3.2. WES metoodika tööetapid ja rakendatavad mõõtevahendid	33
3.2.1. USCS mullatüübi fikseerimine ja mulla kõvaduse mõõtmine, kõvaduse profiili määratlemine.....	34
3.2.2. Kriitilise kihi/kihtide määratlemine	35
3.2.3. Remolding test	36
3.2.4. Masina koonilise indeksi määratlemine.....	38
3.2.5. Mulli (kaalutud) koonilise indeksi arvutamine ja võrdlus masina koonilise indeksiga	39
3.3. WES metoodika üldine ületatavuse hinnang USCS muldadele.....	39
4. EESTI SUUREMÕÕTKAVALINE MULLASTIKU KAART. MULLAKAARDI TEISENDAMISE EESKIRI USCSi.....	44
4.1. Eesti mullakaardi peenese ja korese teisendused USCSi.....	45
4.2. Eesti muldade plastilisuse ja kokkusurutavuse andmed	47
4.3. Orgaanilise aine sisaldus mullas ja suure orgaanilise aine sisaldusega mullad	48
4.4. Eesti territooriumi mullad peenesegruppide ja korese osakaalude kaupa	50
4.5. Peamised mullakaardi puudused teisendusel USCSi.....	54
5. METOODIKA. KATSETE TINGIMUSED.....	55
5.1. Metoodika	55
5.2. Mõõtmiste kohad ja tingimused.....	57
5.2.1. Mõõtmised Maaritsas, Tõraveres, Haigel, Külitses	60
5.2.2. Mõõtmised Palal koos labormääramistega Sakus.....	60
5.2.3. Mõõtmised Eerikal.....	62
5.2.4. Mõõtmised Andul	62
6. TULEMUSED	64
6.1. USCS eeskirja järgi mullatüübi määramine.....	64
6.2. Koonilise indeksi teisenduse parameeter 60°-selt koonuselt 30°-le koonusele	65
6.3. Mulli kõvaduse profiil erinevate maakasutusliikide puhul	66
6.3.1. Kõvaduse profiil haritava põllumaal.....	67

6.3.2. Mulla kõvaduse ennustamine niiskuse põhjal Eerikal	70
6.3.3. Kõvaduse profiil niidetud heinamaal, jäätmaal ja looduslikul heinamaal ..	71
6.3.4. Kõvaduse profiil metsasel alal	73
6.4. Mulla kõvaduse muutused mõjutamise tulemusena	74
6.4.1. Remolding indeksi väärtused märja mulla tingimustes Eerikal.....	74
6.4.2. Remolding indeksi ja kokkusurutava mullakihi muutused väärtused kuiva mulla tingimustes Andul	77
6.4.3. Pala katsekohta remolding indeksi väärtused ja kriitiliste kihtide asukohad	79
6.4.4. Pala katsete jätk - mulla kokkusurutavus ja kõvaduse väärtused laboritingimustes	83
7. ARUTELU	85
7.1. WES meetodikaga ületatavuse hindamine Eesti oludes	85
7.2. Mulla kõvaduse keskmised väärtused ja nende varieerumine	87
7.3. <i>Remolding</i> indeksi väärtused	90
Kokkuvõte.....	91
Kasutatud kirjandus.....	92
LISA 1. RATAS- ja ROOMIKMASINATE MOBIILSUSE INDEKSI (MI) ARVUTUSVALEMID	96
LISA 2. EESTI TERRITOORIUMI MULDADE PEENESEGRUPPIDE KESKMISED MEHAANILISED KOOSSEISUD.....	98

Joonised

- Joonis 1.* USCS klassifitseerimise juhend (FM 5-33, 1990, joonise 1-1 järgi).
- Joonis 2.* COE penetromeeter (FM 5-430-00-1, 1994, joonise 7-3 põhjal).
- Joonis 3.* *Remolding* testi töövahendite komplekt (FM 5-430-00-1, 1994).
- Joonis 4.* Logaritmiline skaala USCS ja Katshinski süsteemi osakeste jaotuse piiridega (Reintam, 1962; MIL-T-89304, 1990).
- Joonis 5.* Eesti üldine mullakaart USCS järgi (Raukas, 1995, joonise 170 põhjal).
- Joonis 6.* Katsekohtade ja mõõtepunktide asukohad.
- Joonis 7.* Eerika katsekohas mulla plastilisuse ülempiir ja plastilisuse indeks USCS plastilisuse graafikul.
- Joonis 8.* Andul mullakihis 0-15 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduses.
- Joonis 9.* Andul mullakihis 15-30 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduses.
- Joonis 10.* Palal mullakihis 0-20 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduse keskmisena.
- Joonis 11.* Palal mullakihis 20-30 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduse keskmisena.

Tabelid

- TABEL 1.* Kriitiliste kihtide sügavused (FM 5-430-00-1, 1994, tabeli 7-1 põhjal).
- TABEL 2.* USCS mullad masinatega ületatavuse seisukohalt (FM 5-430-00-1, 1994).
- TABEL 3.* USCS muldade kooniliste indeksite, *remolding* indeksite ja kaalutud kooniliste indeksite väärtuste vahemikud (Daigle *et al.*, 2005).
- TABEL 4.* Erinevate masinate kategooriate kooniliste indeksite väärtuste vahemikud (FM 5-430-00-1, 1994, tabeli 7-3 põhjal).

TABEL 5. USCS osakeste rühmadele vastavad Katshinski jaotuse rühmad (Mullakaardi legend, 2003; MIL-T-89304, 1990).

TABEL 6. Muldade klassifikatsioon plastilisuse indeksi ehk plastilisuse arvu järgi (Vipper, 1989, tabel 9).

TABEL 7. Huumusesisaldus Eesti muldade huumushorisontides (Reintam, 1962).

TABEL 8. Peeneserühmade keskmised mehaanilised koosseisud.

TABEL 9. Mulla korese osakaalud ja astmed Eesti mullakaardil (Mullakaardi legend, 2003).

TABEL 10. Eesti mullakaardi lõimise vasted USCSis

TABEL 11. Katsekohad ja katsetingimused.

TABEL 12. Pala katsemasinate tehnilised andmed (BTR80, MAN, VW Iltise kasutusjuhendite ning mõõtmiste põhjal).

TABEL 13. Eerika katsekoha peenese mehaaniline koosseis.

TABEL 14. Eerika katsekoha mulla fraktsioonid USCS järgi.

TABEL 15. Eerika katsekoha mulla plastilisuse ülem- ja alampiirid, plastilisuse indeksid.

TABEL 16. Pala katsekohas mulla kooniliste indeksite väärtused MOBITECH ja ALEX penetromeetritega.

TABEL 17. Mulla koonilised indeksid haritavatel põllumaadel Maaritsas, Külitses, Haigel, Eerikal, Tõraveres.

TABEL 18. Mulla koonilised indeksid jäljes ja jälje kõrval Haigel.

TABEL 19. Mulla koonilised indeksid erineva kasutusega heinamaadel Tõraveres, Maaritsas ja Palal.

TABEL 20. Mulla koonilised indeksid metsas Andul ja Maaritsas.

TABEL 21. Mulla koonilised indeksid märjas mullaseisundis Eerikal.

TABEL 22. Eerika *remolding* indeksi väärtused 19.okt. 2005.

TABEL 23. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning *remolding* indeksi väärtused kihis 7,5-22,5 cm.

TABEL 24. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning *remolding* indeksi väärtused kihtides 15-30 cm ja 22,5-37,5 cm.

TABEL 25. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning *remolding* indeksi väärtused kihtides 30-45 cm ja 37,5-52,5 cm.

TABEL 26. *Remolding* indeksite keskmised väärtused erinevates kihtides Eerikal 19. okt. ja 27.okt.

TABEL 27. *Remolding* indeksi väärtused TM No 3-331 põhjal uurimiskohast nr 35.

TABEL 28. Palal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning *remolding* indeksi väärtused kihtides 0-15 cm ja 15-30 cm.

TABEL 29. Katsemasinate MI, VCI₁, VCI₅₀ väärtused.

TABEL 30. Mulla koonilised indeksid enne veoauto MAN ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

TABEL 31. Mulla koonilised indeksid enne BTR80 ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

TABEL 32. Mulla koonilised indeksid enne VW ILTISE ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

TABEL 33. Erinevates kihtides mõõdetud *remolding* indeksite väärtused.

TABEL 34. Palal 0-20 cm kihi kõvaduse muutused maastikul ja silindris.

TABEL 35. Palal 20-30 cm kihi kõvaduse muutused maastikul ja silindris.

TABEL 36. Mõõdetud keskmised koonilised indeksid vormitavatel liivadel haritavate põllumaade puhul sõltuvalt niiskusseisundist ning masina mõjutustest.

TABEL 37. Kooniliste indeksite amplituudid mõõtekohtade kaupa.

LISA 2 *TABEL 1*. Leetunud ja leetunud gleistunud liivmuldade mehaaniline koosseis (Eesti NSV ..., II, tabel 78).

LISA 2 *TABEL 2*. Moreenidel kujunenud saviliivmuldade mehaanilised koosseisud (Eesti NSV ... IV, tabelite 2.1.2, 2.2.3, 2.3.4, 2.3.3 põhjal).

LISA 2 *TABEL 3*. Kahkjate jääpaisjärvede tolmjate saviliivmuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV..., V, tabel 3.3.3).

LISA 2 *TABEL 4*. Kerge liivsavi mehaaniline koosseis punakaspruunil ja kollakashallis moreenil ja paepealsetel muldadel (Eesti NSV ..., IV, tabelite 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1 põhjal).

LISA 2 *TABEL 5*. Jääpaisjärve setetel (tolmjas liivsavi) leviv leostunud ja küllastunud glei-liivsavimuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV..., II, tabel 79).

LISA 2 *TABEL 6*. Leostunud ja leetjate glei-savimuldade mehaaniline koostis. (Eesti NSV ... II, tabel 80).

LISA 2 *TABEL 7*. Kagu-Eesti moreenste savimuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV... II, tabel 81).

Abstract

An Investigation of Estonian Soils trafficability (with WES methodology) in nonfreezing soil condition

Military (maneuver) planners, as well as other land managers like farmers and forest managers, are concerned with the question of cross-country trafficability with different kind of vehicles. Terramechanics is a field of study that deals with soil-vehicle interaction. Overview of sources used shows that the most important soil characteristics that define soil trafficability are soil shearing resistance and bearing capacity. The easiest and most widely implemented methodology for defining vehicle movement on cross-country condition is developed by the Waterways Experiment Station of the U.S. Army Corps of Engineers. This methodology is based on soil cone index measurement by cone penetrometer and remolding index measurement and vehicle cone index calculation. WES methodology uses Unified Soil Classification Systems (USCS) to classify soils. The aim of this study was to investigate the applicability of WES methodology on Estonian soils. As well as to provide some overview about cross-country trafficability based on soil type as one example. To achieve those purposes at first the instruction for transforming Estonian soils to USCS were developed based on Estonian large scale soil maps and literature. It appeared that the biggest problem was the lack of some Estonian soils plasticity and liquid limits as well as detailed soil particles gradation information. Tests with military vehicles on terrain showed that the WES methodology was giving correct answers about trafficability. However, it appeared that the methodology can not describe trafficability for all Estonian soil types and soil moisture conditions. For the first traffiability estimates, the most common soils for local territory – SC, SM, SM-SC soils, were selected and cone index measurements were carried out in 7 geographical locations all over Estonia, remolding index measurements in 3 locations. Received cone index data comparison with military vehicles cone indexes in test soils showed that for the most of the year soils is in good condition for vehicle movement. In general, in April-May as well in October-November there is trafficability problems for some types of vehicles. Remolding index tests showed that in case of 50 passes in the same rut on SM soil there were no significant drawbacks.

Keywords: *Soils Trafficability, Unified Soils Classification Systems (USCS), Cone index, Remolding index, Vehicle Cone index.*

Kasutatud terminid ja tähised

Atterbergi limiidid – *Atterberg limits*. Niiskuse hulga väärtused, mis eraldavad mulla voolavuse ja plastilisuse seisundeid;

Efektiivne veojõud (mulla vastupanu liikuvale masinale) – *gross tractive effort* või *soil thrust*. Horisontaalne edasiviiv jõud, mis tekib mulla nihketugevuse tõttu masina all;

COE penetromeeter – *Corps of Engineers penetrometer*. Võimaldab koonilisi indekseid määrata 2 erineva koonusega - 30° tipunurgaga ja 3,23 cm² alusega, 30° tipunurgaga ja 1,29 cm² alusega;

ISTVS – *International Society for Terrain-Vehicle Systems*. Rahvusvaheline masinamulla vastasmõju uurijaid ühendava organisatsioon, mille poolt korraldatakse rahvusvahelisi ja regionaalseid konverentse ning mis toetab vastavasisulise ajakirja *Journal of Terramechanics* välja andmist;

Jämedateralised mullad – *coarse-grained soils*. Mullad, mis sisaldavad kuni 50% osakesi, mille diameeter on 0,074 mm ja väiksemad;

Kaalutud kooniline indeks, RCI – *rating cone index*. Mõõdetud kooniline indeks korrutatud *remolding* indeksiga, mis väljendab liikluse tulemusena kujunevat mulla kõvadust;

Keskmine maksimaalne surve, MMP – *mean maximum pressure*. Masina ratta või roomiku all kujunev maksimaalsete survete keskmine väärtus;

Kooniline indeks, CI – *cone index*. Kooniline indeks peegeldab maapinda sissetungimise takistust koonuse aluse suuruse kohta, tuues koondatult välja maapinna kokkusurutavuse ja nihke omadused. Kasutatakse mulla kõvaduse iseloomustamiseks;

Kriitiline kiht – *critical layer*. Mulla kiht, mis peab toetama masina liikumist mullal. Selle sügavus sõltub masina kaalust ja tüübist ning mulla kõvaduse profiilist;

Liikumise takistus - *motion resistance* või *rolling resistance*. Pinnasest tulenev takistus masina liikumisele. (Eristatakse ka sisemist ja välimist liikumise takistust; käesolevas töös käsitletakse ainult välist liikumise takistust eelpool defineeritud kontekstis);

Maapinna ületatavus - *terrain trafficability* või *trafficability*. Maapinna võime toetada masinate ületusi;

Masina kooniline indeks, VCI – *vehicle cone index*. Minimaalne mulla kõvadus kriitilises kihis, peeneteralistes muldades kaalutud koonilise indeksi mõistes ja jämedateralistes muldades koonilise indeksi mõistes, mis on vajalik kindla arvu ületuste tegemiseks masinaga - enamasti siis 1 (VCI_1) või 50 ületuse tegemiseks (VCI_{50});

Mulla kandevõime - *bearing capacity*. Keskmise koormus pinnaühikule, mis on vajalik masinat toetava mulla rebenemiseks või katkemiseks;

Mulla masina vedamise võimekus - *traction capacities*. Vt. efektiivne veojõud;

Mulla nihketugevus – *soil shear strength*. Mulla maksimaalne vastupanu nihkepingetele;

Mulla kõvadus - *soil strength*. Mulla vastupanu avaldatud koormustele;

Mulla ületatavus – *soil trafficability*. Mulla võimekus taluda masinate ületusi;

Mobiilsus - *vehicle mobility* või *mobility*. Masina üldine võimekus, liikuda ühest maastiku punktist teise, säilitades seejuures oma liikumisvõime;

Mobiilsuse indeks, MI – *mobility index*. Masina tehniliste näitajate põhjal arvutatud numbriline näitaja;

Nominaalne pinnasurve, NGP – *nominal ground pressure*. Masina mass jagatud maapinnaga kontaktis oleva ala pindalaga;

NRMM – *NATO Reference Mobility Model*;

Nühamus – *slip* või *slippage* või *travel reduction*. Tähistab veojõu elementidele (rehv, roomik jne) mootorist tulenevat kiiruse erinevust masina tegelikkust liikumise kiirusest;

Peeneteralised mullad – *fine-grained soils*. Mullad, mis sisaldavad rohkem kui 50% osakesi, mille diameeter on 0,074 mm ja väiksemad;

Remolding – mulla töötlemine või manipuleerimine masinate ületustega või mõnel muul moel;

Remolding indeks, RI – *remolding index*. Töödeldud mulla kõvaduse suhe algse mulla kõvadusega;

Roomiku hammas või kida – *track gleeat* või *track grouser*. Roomiku projektsioon eesmärgiga parandada masina efektiivset veojõudu;

Seadeldiste kandvus – *flotation*. Rehvi või masina võime vastu seista vajumisele pehmesse maapinda;

SC muld. Savine liiv või liiva-savi segu, mis kuulub vormitavate liivade gruppi;

SM muld. Tolmused liivad või liiva-tolmu segu, mis kuulub vormitavate liivade gruppi;

SM-SC muld. Liiva-tolmu-savi segu, mis kuulub vormitavate liivade gruppi;

Tõmbevõimekus - *drawbar pull*. Masinate mootorite veojõu ja nende liikumise takistuste vahe, mis on kasutatav haagiste või teiste masinate vedamiseks, masina enda liikumise kiirendamiseks või nõlvadest ülesõiduks;

Unified Soil Classification System, USCS. Muldade klassifitseerimise süsteem, mis määratleb muldasid lähtuvalt nende tekstuurist ja plastilisuse omadustest ning gruppide neid sõltuvalt nende omadustele konstruktsiooni materjalidena;

Veojõud – *traction* või *tractive force*. Veeremitele antud suumaarne jõud veeremi ja maapinna kokkupuute alas, mis on suunatud liikumise suunas ja mõjub paralleelselt maapinnaga;

Vormitavad liivad – *remoldable sands*. Jämedateraline muld, mis sisaldab 7% või rohkem mulla osakesi, mis on väiksemad kui 0,074 mm. Märjas olekus regeerivad masinate ületusele nagu peeneteralised mullad, kuivas olekus nagu jämedateralised mullad;

WES metoodika – *US Army's Engineer Research and Development Center (ERDC)* uurimiskeskuse *Waterways Experiment Station (WES)* poolt 1940ndate lõpul välja arendatud metoodika masinatega mullal liikumis- ehk ületusvõimaluste hindamiseks.

1. SISSEJUHATUS

Ajalooliselt on inimene masinatega liikumiseks kasutanud igasugust maastikku. Järjest tihedama teedevõrgu kujunemisega on autoliiklus küll peamiselt koondunud teedele, kuid siiski on säilinud teatud spetsiifiline vajadus liikuda masinatega ka väljaspool teid ehk murdmaastikul¹. Selline vajadus on seotud eelkõige põllumaade harimise ja metsatööde korraldamisega, aga ka inimese puhkusematkade ja militaartegevusega. Võrreldes varasemaga on tänapäeva masinad valdavalt raskemad võimsamad ning nende mõju maastikule on intensiivsem. Seetõttu tuleb masina-mulla vastasmõju looduskeskkonna säästmise ning masinate kasutatavuse uurimise eesmärgil detailsemalt uurida.

Hinnanguliselt on maailmas ja ka Eestis kõige rohkem uuritud masinate liikluse mõju põllumajandusele ning eelkõige taimekasvatusele, sest masinate liiklus mõjutab otseselt põllumaade saagikust. Peamiseks uurimisobjektiks on see, kui palju võib põldu masinatega tallata, ilma et see muutuks kasutuks - sõiduteeks. Nii roomikute kui ka ratastega tehnika liikumise peamiseks negatiivseks järelmõjuks on tihendatud muld ja rööpajäljed. Mulla tihendamisel suureneb mulla kõvadus ja lasuvustihedus, lõhutakse mulla struktuur, väheneb agronoomiliselt kasulike agregaatide osatähtsus. Selle tulemusena ei suuda taim enam mullas juuri laiali ajada, halveneb mulla poorsus, pooridevaheline ühendus, taimele vajalik õhu läbilaskvus ja vee infiltratsioon. Tallamise mõjud võivad mullas säilida aastaid, hoolimata sellest, kahjulikku toimet vähendavad mullaharimine, külmumise ja sulamise vaheldumine, ning haritud künnikihi alla kujuneb iga-aastaste standardsete harimismustrite tulemusena tihenened mullakihtidest kõva aluspõhi (*hardpan*). Rööpajälgedes omakorda intensiivistub erosioon ja sademetevee pindmine äravool. Ehkki sellised negatiivsed järelmõjud on rohkem seotud haritavate maadega, mõjutavad metsatööstusmasinad väga tugevasti ka metsamaastikku (Godefroid *et al.*, 2004; Raper, 2005; Schäffer *et al.*, 2006).

Eestis on masinate liikumise mõju põllumajandusele uurinud E. Nugis, kes on välja töötatud mõiste *mulla agrotehniline kandvus*. Sellesse mõistesse on koondatud esiteks

¹ Murdmaastiku mõiste lähtub otseselt inglisekeelsest terminist *cross-country*. Tegemist on mitmetähendusliku terminiga eesti keeles. Käesolevas uurimistöös kasutatakse seda "väljapoole teid jääv ala" kontekstis.

muldade tallamistundlikkus ning teiselt poolt taimede kasvuvõime tallatud mullas. Vastava näitajaga on võimalik kirjeldada mullas tingimusi, millest alates ei ole taim võimeline enam kasvama ega saaki tootma. Sidudes masinate ülesõidud agrotehnilise kandvusega, on võimalik ennustada, kui palju kordi võib masinaga üle sõita ilma taimekasvatust oluliselt kahjustamata (Nugis, 1998; Nugis *et al.*, 2004).

Masinate liikumisvõimaluste hindamisel lähenetakse mullaomadustele teistmoodi kui taimekasvatustes. Liikumistingimuste seisukohalt on näiteks peaaegu surnuks tallatud muld ideaalne aluspind. Üks suuremaid maastikumasinate kasutajaid on relvajõud, sest mobiilsus on esmatähtis omadus kõikidele maavägedele ja seda täiesti sõltumata nende suurusest ja ülesandest. Kuigi mitte kõik militaarmasinad ei pea iga päev liikuma murdmaastikul, siis tänapäeval, kus kiirus on edu saavutamisel tihtipeale kõige olulisem aspekt, võib vastav vajadus selle järele iga hetk tekkida. Seetõttu on suur ka kaitsevägede huvi mobiilsuse määratlemise ja prognoosimise vastu. Mobiilsus kaardid on igasuguse lahingutegevuse planeerimise aluseks. Seda protseduuri, mille abil lahinguplaane koostatakse, nimetatakse *Intelligence Preparation of Battlefield* (IPB). Selle üheks osaks on mobiilsuskaartide põhjal vastase üksuse tulekusuundade ja üldisemalt ka tegevussuundade määratlemine, aga ka vahetult oma üksuste tegevusplaanide koostamine (FM 5-33, 1990; FM 34-130, 1994; FM 3-34.230, 2000; Biass *et al.*, 2003).

Relvajõudusid huvitab ka see, kuidas prognoosida uute masinate väljatöötamisel nende võimeid või kuidas arvestada masinahangete planeerimisel masinate maastikusobivusega. Üldjoontes võib relvajõududes kasutatavad masinad jaotada nelja suurde gruppi: ratastega soomustamata ja soomustatud, roomikutega soomustatud ja soomustamata masinad. Vastavad masinategrupid tähistavad liikureid tankidest veoautodeni. Selleks, et oleks võimalik ette ennustada ajavahemikku, mille jooksul masinad jõuavad liikuda ühest punktist teise, on militaarsete kasutajate jaoks oluline teada kõikide masinagruppide liikumiskiirusi murdmaastikul. Ja kuigi militaarsete masinate liikumist murdmaastikul mõjutavad ka muud mõjurid (veetakistused, nõlvakalded, taimkate ning talvel ka näiteks lumi), on otstarbekas käsitleda neid mullast eraldiseisva liikumistakistusena. Oluline on valida ka ülesande täitmiseks sobiv liikur - üheks igipõliseks uurimisteenaks on olnud just ratas- ja roomikmasinate omavaheline võrdlus. Pinnasteede säilimise ja maastiku

keskkonnakaitsealasest aspektist on oluline ette näha masinate liikumisega kaasnevaid rööpasügavusi (Bianchi, 2002; Biass *et al.*, 2003; Hohl, 2006).

Teadaolevalt ei ole Eesti maastikke sellest vaatepunktist, kuidas hinnata masinate liikumisvõimalusi külmumata mullapinnal, uuritud. Esmase hinnangu sellele, kuidas külmunud maastik mõjutab liikumist, andis oma magistritöös A. Sprivul (2004). Üldise ülevaate sellest, missugused on kaitseväe masinate liikumisvõimalused Eesti territooriumil, andis polkovnik Nikolai Reek 1920. aastate alguses kokkupandud mahukas loengukonspektis “Eestimaa sõjageograafia.” See õppematerjal koostati “kõrgemate sõjaliste kursuste tarbeks.” Üldises kirjelduses tuuakse muuhulgas välja ka see, kuidas maapinda saab liikumisvõimaluste põhjal jagada. Reegi järgi moodustavad esimese grupi märkejad alad ehk sood ja rabad ning teise grupi muud alad, mis sõltuvalt pinnakatte materjalist jagunevad omakorda suure liivasisaldusega aladeks, kus on soodne liikuda, ja suure savisisaldusega aladeks, kus liikumine on raskendatud pärast vihmasadusid (Vennik, 2003; Sprivul, 2004).

Sellise väga laiapiirilise jaotuse taustal on käesoleva uurimistöö eesmärgiks uurida detailsemalt mulla ja masina vahelist vastasmõju Eesti muldadel ning eelkõige masinate liikumis- ja kinnijäämise võimalusi Eesti territooriumi muldadel. Töös rakendatakse Ameerikas *Waterways Experiment Station* (WES) poolt välja töötatud nn muldade ületatavuse (*soil trafficability*) metoodikat (edaspidi WES metoodika). Metoodikast tulenevalt piirdatakse antud uurimistöös militaarmasinate liikumisvõimaluste käsitlemisega ning liikumistingimustega külmumata mulla seisundis. Uurimistöö eesmärgid on seega:

- selgitada masina ja mulla vahelise vastasmõju teoreetilisi lähtekohtasid ning analüüsida valitud WES metoodika olemust selle vastasmõju mõõtmisel;
- hinnata WES metoodika rakendatavust Eesti muldadel ületatavuse ennustamisel;
- rakendada WES metoodikat esmaste üldiste ületavuse hinnangute tegemiseks ühe näitemulla põhjal.

Kuna Eestis on sellise lähenemisega mulla ja masina vastasmõjule tegemist vähe käsitletud valdkonnaga, siis on eriline rõhk vastava terminoloogia käsitlemisel ning

tõlkimisel eesti keelde. Olulisemad terminid on välja toodud ka vastavas peatükis “Kasutatud terminid ja tähised.” Mõistete definitsioonide alusmaterjalidena on peamiselt kasutatud *International Society for Terrain-Vehicle System* (ISTVS)² standardeid, mis on esitatud selle organisatsiooni kodulehel (<http://www.istvs.org/>).

Uurimistööle seatud eesmärkidest tulenevalt käsitletakse 2. peatükis mulla-masina vastasmõju teoreetilisi aluseid, vaadeldakse selle vastasmõju uurimises kasutavaid meetodikaid ning rakendatavaid mõõteriistasid. 3. peatükis keskendutakse WES meetodikale ning ületatavuse määratlemise töövõtetele. Muuhulgas antakse siin ülevaade *Unified Soil Classification System*-ist (USCS) - muldade klassifikatsioonist, millel baseerub WES ületatavuse hinnangute tegemine. Kuna USCS klassifikatsioonist tulenevad otseselt eksperimentaalse osa ülesanded ning uurimisobjektid, siis 4. peatükis kirjeldatakse Eesti mullakaardi teisenduse eeskirja koostamist USCSi. Osaliselt on see kajastatud ka lisa 2. Järgmises, 5. peatükis, kirjeldatakse uurimuses rakendatud katsete meetodikat detailsemalt ning antakse ülevaade katsete tingimustest. 6. peatükis on kõigepealt selgitatud saadud tulemusi ning 7. peatükis on tulemustega seotud arutelu.

² ISTVS puhul on tegemist rahvusvahelise masina-mulla vastasmõju uurijaid ühendava organisatsiooniga, mille poolt korraldatakse rahvusvahelisi ja regionaalseid konverentse ning mis toetab vastavasisulise ajakirja *Journal of Terramechanics* välja andmist.

2. TERRAMEHAANIKA. MASINA JA MULLA VAHELINE VASTASMÕJU NING SELLE MÕÕTMINE

Terramehaanika (*terramechanics*) on valdkond, mis tegeleb maapinnal liikumise mehaanikaga ning vaatleb maastiku ja liikuvate seadmete vahelist vastasmõju. See on suhteliselt uus uurimisvaldkond – 1950. aastate lõpul algasid laiaulatuslikud kvantitatiivsed mulla omaduste mõõtmised, mille eesmärk oli määratleda masinate liikumist. Masina liikumisomaduste kirjeldamisel opereeritakse kahe põhilise mõistega – liikumisvõime ehk ületatavus (*trafficability*) ja mobiilsus (*mobility*). Kirjanduses esineb ka selline mõiste nagu maastiku “töödeldavus” (*terrain tractability*).

Ületatavuse (*trafficability*) puhul on vaatlusobjektiks maapind ja selle omadused masina liikumisel. Maastiku ületatavus (*terrain trafficability*) on maapinna võime toetada masinate ületusi. Maastiku kõige olulisemate omadustena võib välja tuua mulla, lume ja muude liikumispindade kõvaduse ja deformatsiooni. Mobiilsuse (*mobility*) puhul on uurimisobjektiks masina omadustest tulenev liikumisvõime. Seega vaadeldakse mobiilsuse puhul selliseid masina parameetreid nagu mootori võimsus, masina kaal, raskuskeskme ruumiline asukoht, veeremi (ratta või roomiku) mõõtmed jne. Põhimõtteliselt võib öelda, et ületatavus on maapinna omadus või suutlikkus toetada mobiilsust. Mobiilsus on defineeritav võimena, mis aitab masinal liikuda ühest maapinnalõigu punktist teise. *Terrain tractability* hõlmab mõlemaid mõisteid ja nende omavahelist vastasmõju (Bekker, 1960; Bekker, 1969; Shoop, 1993; Muro *et al.*, 2004; Suvinen, 2006).

2.1. Masina mõju mullale. Mulla kõvadus

Masina liikumist mullal võib võrrelda lennukiga, mis peab korraga õhus püsima ja ka edasi liikuma. Niisamuti peab ka masin mullapinnal püsima ja edasi liikuma. Murdmaastikul liikuvate masinate peamiseks liikumistakistuseks on nn pehmed mullad, kus tekib raskusi nii liikumise kui ka mullal püsimisega. Üldistavalt võib öelda, et masin saab liikuda üle mullapinna, kui tal jätkub selleks mootori võimsust ning kui mullal on piisavalt kõvadust (*soil strength*) toetada masina koormust ilma suurema liikumistakistusega (*motion resistance*) ning kui muld suudab pakkuda

vastupanu (*soil thrust*), mis on vajalik masinat edasilükkava jõu (*propulsion*) tekkimiseks (Bekker, 1960).

Masina poolt mullale avaldatavad koormused võib sõltuvalt nende avaldumise suundades jagada kaheks:

- vertikaalses suunas avaldatav koormus, mis tuleneb masina kaalust ning mida nimetatakse normaalseks koormuseks (*normal load*);
- horisontaalses suunas avaldatav koormus, mis tuleneb masina veeremi (ratta, roomiku) veojõu (*traction, tractive force*) koormusest.

Mulla mehaanilised omadused, mis määratlevad mulla võime vastu seista nimetatud koormustest põhjustatud pingetele määratakse kindlaks mullale avaldatava koormuse ning selle tulemusena tekkiva deformatsiooni mõõtmise kaudu. Selleks mõõdetakse nii vertikaalsed kui horisontaalsed pinge-deformatsiooni (*stress-strain*) sõltuvused (Bekker, 1969; Bianchi, 2002).

Masina ja maapinna vastasmõju teoreetilisel käsitlusel vaadeldakse eraldi masina liikumist tasasel maastikul ja nõlvadel. See tähendab, et esmajärjekorras määratakse pinge ja deformatsioon tasasel maastikul. Selle põhjal leitakse n-õ ülejääv jõud, mida saab kasutada nõlvadest üles liikumisel. Omaette uurimisobjekt on maapinna geomeetria ehk mikroreljeefi mõju liikumisele.

Masina liikumise seisukohalt on olulisemaks koondnäitajaks mulla kõvadus (*soil strength*), mis iseloomustab mulla võimet seista vastu (masinast lähtuvale) tihendavale pingele (*compressional stress*) ja nihkepingele (*shear stress*). Ehk teisisõnu – kõvadusest sõltuvad sellised mulla omadused nagu kandevõime (*bearing capacity*) ja masina vedamise võime (*traction capacities*) (Bekker, 1960; Bekker 1969; Bianchi, 2002). Neid mõisteid käsitletakse lähemalt järgnevates peatükkides.

2.1.1. Masina vajumine mulda ja rööpajälje kujunemine

Oma massi tõttu avaldab masin mullale vertikaalsuunas normaalkoormust, mille tulemusena surutakse kokku ning deformeeritakse mulla pind. Sellest koormusest tingitud pingele vastuseismiseks peab mulla kandvus (*bearing capacity*) olema piisavalt suur, et hoida masin mullapinnal. *Flotation*, mida võib eesti keelde tõlkida

kui erinevate seadeldiste kandvus, on valdkond, kus uuritakse ohutuid koormusi, mille puhul masin aluspinda sisse ei vaju. Terzaghi määratles 1944. aastal elementaarse mullamehaanika kontseptsiooni, mis defineeris staatiliste objektide - hoonete ja rajatiste all toimuvaid väiksemõõtmelisi vajumisi. Võrreldes rajatiste vajumisega on masina liikumine kiirem ja maapinda vajumise sügavus suurem ning seda suhteliselt väiksel kontaktpinnal. Üldiselt saab Terzaghi kontseptsiooni rakendada ka masinate vajumise kirjeldamiseks ning selle kohaselt on nii staatiliste kui ka dünaamiliste koormuste mulda vajumise sügavus seotud mulla sidususe ja hõõrdumise omadustega (Bekker, 1960; Bekker, 1969; Muro *et al.*, 2004).

Kuigi ideaaljuhul peaks masin liikuma ilma mullapinda vajumata, esineb sellist olukorda murdmaastikul harva. Enamasti kaasneb maapinna ületamisega teatud vajumine, mille tulemusena kujuneb rööpajälg. Üldjuhul jäävad ka kõige suuremate ja raskemate masinate rööpasügavused 0,6–0,9 m piiridesse. Masina poolt mullale avaldatava rõhu ja jälje sügavuse vahelise suhte kirjeldamisel kasutatakse erinevaid valemeid. Neist ehk kõige levinum on Bekkeri valem:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n, \quad (\text{Bekker, 1960})$$

kus p on masina normaalkoormusest tulenev rõhk, b veeremi ja maapinna kontaktala väiksem mõõde, k_c mulla sidususe koefitsient, k_ϕ mulla sisemise hõõrdumise koefitsient, z vajumise sügavus ja n mulla deformatsiooni eksponent. Praktikasse määratletakse valemi koefitsiendid k_c , k_ϕ , n empiirilisel, kus kahele või enamale katses kasutatavale plaadile avaldatakse teadaoleva suurusega koormuseid ning mõõdetakse nende plaatide vajumise sügavus mulda. Saadud väärtuste põhjal arvutatakse koefitsientide väärtused (Bekker, 1960; Bekker, 1969).

Masina vajumisega mulda kaasneb negatiivne mõju liikumisele, sest seeläbi tekib liikumistakistus (*motion resistance*). Mida sügavam on rööpajälg, seda suurem on takistus ja seda suuremat jõudu on vaja, et hoida masinat liikumas. Kui rööpajälg on suurem kui masina põhja kõrgus, jääb masin oma põhja peale kinni ja liikumine lakkab.

2.1.2. Efektiivne veojõud masina liikumisel. Nühamus. Masina vibratsioon

Masinat edasitõukav horisontaalsuunaline jõud, mida nimetatakse mulla vastupanuks liikuvale masinale (*soil thrust*) või ka efektiivseks veojõuks (*gross tractive effort*), tekib masina veeremi all sellisel juhul, kui mullal on piisavalt nihketugevust (*shear strength*). Mulla (ja ka lume) nihketugevuse määratlemiseks erinevate normaalkoormuste korral kasutatakse Bekkeri valemit:

$$s = c + p \tan \varphi, \quad (\text{Bekker, 1960})$$

kus s on mulla/lume nihketugevus, p normaalkoormusest tulenev rõhk, c sidusus, φ mulla sisemise hõõrdumise nurk (Bekker, 1960).

Mulla koostise põhjal (savid või liivad) eristatakse kahte erinevat mulla vastupanu tekkimise vormi. Savides sõltub mulla vastupanuks vajalik nihketugevus sidususest ning oluline pole rõhu suurus, mida avaldab maapinnaga kontaktis olev veerem. Suure plastilisusega muldadel, näiteks kuivadel savidel, on suure sidususe tõttu suur nihketugevus – isegi kuni 150 kN/m². Sellest tekib ka vajadus varustada roomiku aluspinnad suure sidususega muldades liikumiseks teravate servade ehk nn roomiku hammastega (*grouser*), et need tungiksid mulda ja masina edasiliikumiseks vajalikud mullaosakesed nihkuksid. Märgades savides on sidusus vastupidi nullilähedane, mistõttu on ka mulla vastupanuks vajalik nihketugevus null ning masin ei saa edasi liikuda (Bekker, 1960; Terry *et al.*, 1991; Barton *et al.*, 2000).

Sellistes hõõrduvates muldades nagu liivad või nagu ka teraline lumi puudub terade vahel igasugune sidusus. Selleks, et tekiks nihketugevus osakeste vahel, tuleb need kõigepealt tihedasti üksteise vastu suruda. Masina enda koormus surub need osakesed kokku ning mida suurem on normaalkoormus suures kontaktalas, seda suurem on ka nihketugevus. Vastupidiselt sidusatele muldadele tuleb liivastel muldadel kasutada sileda pinnaga roomikuid. Muldades, mis sisaldavad mõlemat tüüpi mehaanilisi osakesi, tuleb tekkiva mulla vastupanu arvutamisel liita mõlema osa vastupanu. Uute masinate loojate eesmärk ongi suurendada mulla vastupanu tekkimist mõlemas mullatüübis (Terry *et al.*, 1991).

Maapinna horisontaalse deformatsiooniga on seotud selline nähtus nagu läbilibisemine ehk nühamus (*slip, slippage*). Nühamus tekib, kui nihketugevus ei ole piisavalt suur ja veeremi pind ei saa haakuda mulla pinnaga, see tähendab, et masina rattad käivad ringi ilma mulla vastupanuta. Nühamuse suurus esitatakse tavaliselt protsentides ning seda arvutatakse tegeliku kiiruse ja masina tehnilistest omadustest tuleneva kiiruse põhjal (Bekker, 1960).

Nagu eespool kirjeldatud, kujuneb maapinda jälje tekkimisega liikumistakistus, millest ülesaamiseks tuleb kulutada ka masinat edasiviivat tõukejõudu. Seega ei saa mitte kogu mulla vastupanu kasutada edasiliikumiseks, vaid osa sellest tuleb rakendada liikumistakistusest ülesaamiseks. Liikumistakistusest ülejäävat jõudu saab kasutada masina liikumise kiirendamiseks, nõlvadest ülesronimiseks, samuti koormate ning teiste masinate vedamiseks ja pukseerimiseks. Vastavat suurust nimetatakse tõmbevõimekuseks (*drawbar pull*) ning selle arvutamiseks lahutatakse mulla vastupanust liikumistakistus. Masinate iseloomustamiseks kasutatakse ka tõmbevõimekuse koefitsienti (*drawbar pull coefficient*), mille saamiseks jagatakse vastav suurus masina massiga (Bekker, 1960; Wong, 1994).

Seega on kõige olulisemad masinate liikumisega seonduvad mullaomadused sidusus ja hõõrdumine. Kuna need varieeruvad mulla erineva niiskuse juures tugevasti, on ka vastavad liikumistingimused sõltuvalt mulla niiskusest väga erinevad. Et muld koosneb erinevatest horisontidest, komplitseerib see nende suuruste mõõtmist veelgi. Väikese hõõrdumisega tugevamal kihil asuv plastilise mulla kiht on peamine põhjus, miks masinad kevaditi ja sügiseti maapinda kinni jäävad (Bekker, 1960).

Masinate liikumise käsitlemisel on oluline uurimisobjekt vibratsioon. Masinate suurt vibreerimist põhjustavad maapinna ebatasasused ehk mikroreljeef, mis mõjutab oluliselt masina liikumiskiirust ja võib äärmuslikel juhtudel masina isegi peatada. Masina vibratsiooni mõjutab ka tema enda vedrustussüsteem ja selle ehitus (Bekker, 1960; Bekker, 1969; Bianchi, 2002).

2.1.3. Mulla kõvadus ja selle mõõtmine

Nagu eelnevates peatükkides kirjeldatud, on mulla kõvadus kompleksne näitaja, mis annab ülevaate mulla seisundist. Vastavalt definitsioonile on mulla kõvadus (*soil strength*) mulla võime vastu seista mehaanilistele koormustele. Mulla kõvadus sõltub:

- mulla sisemistest teguritest:
 - erineva suurusega osakeste jaotusest,
 - savimineraalide tüübist, adsorbeeritud katioonide liigist ja hulgast,
 - orgaanilise aine hulgast ja liigist,
 - lasuvustihedusest, pooride suuruse jaotusest ja pooride katkematusest,
 - struktuurist ja kõvadusest, mis on põhjustatud paisuvusest ja kokkutõmbumisest,
 - huumusainete ja juurte tõttu tekkinud stabiliseerimisest,
 - veesisaldusest ja veeimavusest;
- välistest jõududest:
 - koormuse liigist,
 - koormuse intensiivsusest,
 - kestusest ja tihendavate sündmuste arvust.

Mulla sisemistest teguritest on veesisaldus kõige suurema ja kiirema ajalise muutlikkusega, mis põhjustab ka mulla kõvaduse suurt varieeruvust väikse ajavahemiku jooksul. Üks faktoritest, millele tihtipeale vajalikku tähelepanu ei pöörata mulla kõvaduse hindamisel, on orgaanilise aine esinemine mullas. Huumusainetel ja turbal on aga otsene mulla kõvadust vähendav mõju, sest orgaanilise aine osakesed ise on nõrgemad ning lisaks sellele põhjustavad need avatud struktuuri mullas suure poorsuse tõttu ja ka suure niiskusesisalduse pärast (Horn, 1992; Barton *et al.*, 2000; FM 5-430-00-1, 1994).

Kõige levinum mulla kõvaduse mõõtevahend on penetromeeter (vt joonis 2). Sellega mõõdetakse jõudu, mis on vajalik anduri (tavaliselt koonuse või nüri otsa) surumiseks läbi mulla. Penetromeetriga mõõdetavat suurust nimetatakse kooniliseks indeksiks (*cone index*). Kooniline indeks peegeldab maapinda sissetungimise takistust koonuse aluse suuruse kohta, tuues koondatult välja maapinna kokkusurutavuse ja nihke omadused. Lähemalt seletades peegeldab indeks kombineeritult maapinna lõike ja tihendamise/kokkusurutavuse omadusi, maastiku tõmbetugevust ja mulla-metalli

hõõrdumist. Nimetatud suurusi pole aga võimalik indeksi põhjal üksteisest eraldada. Seega esitab vastav indeks koondnumbrit, mis ei luba hinnata masinate liikumisega seonduvaid erinevaid aspekte – kandvusvõimet ja nihketugevusest maastikul (Wong, 1989).

Penetromeetriga mõõdetavad väärtused sõltuvad mulda surutava koonuse näitajatest – eelkõige selle tipunurgast. Tulemusi, mis on saadud erinevate koonustega, on raske omavahel võrrelda. Ka teisenduste tegemine ühelt koonuselt teisele võib põhjustada suuri vigu. Penetromeetreid liigitatakse nende kasutusvõimaluste järgi staatilisteks ja dünaamilisteks. Staatilised penetromeetrid surub kasutaja oma jõuga konstantse kiirusega läbi mulla. Peamiseks probleemiks on siin ühtlase kiiruse hoidmine: kui läbi mulla surumist kiirendada, on näit mulla tegelikust kõvadusest suurem, kui aga aeglustada, on näit mulla tegelikust kõvadusest väiksem. Dünaamiliste penetromeetrite koonus ei liigu läbi kogu mullaprofiili ühtlase kiirusega, vaid penetromeetrile antakse fikseeritud hulk kineetilist energiat, mille tulemusena liigub penetromeeter teatud vahemaa läbi mulla. Mida suurem on mulla kõvadus, seda väiksema vahemaa liigub mõõtevahend läbi mulla. Selliste mõõteriistadega välditakse kasutaja oskustest tulenevaid hälbeid tulemustes. Rakendatakse ka penetromeetrid, mida visatakse teatud kõrguselt või kus raskus libiseb penetromeetri vardal ning sellega taotakse mõõtekoonus maa sisse. Mõõtevahendi suuruse järgi eristatakse tavapenetromeetreid ja mikropenetromeetreid ehk taskupenetromeetreid (Herrick *et al.*, 2002).

Käsituslihtsuse tõttu rakendatakse penetromeetreid üle maailma põllumajanduses ja metsanduses ning nende abil uuritakse masinate liikumist murdmaastikul. Näiteks kasutatakse neid selleks, et kirjeldada ratasmasinate liiqlusega seonduvaid mõjusid, hinnata mobiilsust, iseloomustada mulla tihendamist, taimejuurte kasvuvõimalusi, maaharimise efekte ning künnialuse kihi vastupanu. Maapinna omaduste detailseks kirjeldamiseks masina seisukohalt ei peeta koonilist indeksit eespool nimetatud põhjustel siiski piisavaks. Penetromeetri tehnikat sobib kasutada empiirilisel defineeritud suhete kirjeldamiseks ning seda ei tohiks ekstrapoleerida kaugemale, näiteks täiesti uue disainiga masinate või uue opereeritava keskkonna jaoks (Smith *et al.*, 1997; Wong, 1989; Herrick *et al.*, 2002; Muro *et al.*, 2004).

Teine tuntum kõvaduse mõõtevahend on bevameeter. Sellise töövahendi töötas välja M. G. Bekker 1960. aastatel. Bevameeter võimaldab mõõta üksikasjalikult maastiku omadusi koormuste all. Sellega on võimalik teha otse maastikul erineva suurusega katseplaatidega mulda vajumise teste ning nihketesti. Nende tulemuste baasil saab ennustada masina sissevajumise sügavust ning liikumistakistust. Nihketesti abil mõõdetakse nihke pinge ja nihke ümberpaigutuse suhted nagu ka maapinna nihke kõvadus, mille põhjal saab ennustada mulla vastupanu ja nühamuse omadusi ja maksimaalset veojõud. See on mõõtnetelt suur seadeldis, mis on enamasti kinnitatud masina külge (Bekker, 1960; Wong, 1989; Barton *et al.*, 2000).

2.2. Relvajõududes peamiselt kasutatavad mobiilsuse kirjeldamise ja ennustamise meetodikad

Masinate mõju kirjeldamisel maapinnale võib eristada mobiilsust iseloomustavaid parameetreid, mis tulenevad masina omadustest, kuid mida ei käsitleta mulla omaduste kaudu, ning mobiilsust piiravaid parameetrid, mis on määratletud otseselt mulla näitajatega. Seejuures on relvajõudude jaoks alati oluline olnud asjaolu, et kasutatavad parameetrid iseloomustaksid ühtemoodi hästi ratastega ja roomikutega masinate liikumisvõimet murdmaal. See tähendab, et oleks võimalik nende omadusi omavahel võrrelda ning kindla ülesande ja maastiku jaoks parimate omadustega masin valida (Barton *et al.*, 2000).

2.2.1. Mobiilsust kirjeldavad parameetrid

Mobiilsust kirjeldavatest parameetritest kasutatakse kõige rohkem masina poolt maapinnale avaldatavat koormust ehk normaalkoormust, eeldades, et mida väiksem koormus, seda suurem on masina võime maapinnal liikuda. Maapinnale masina poolt avaldatava koormuse ehk sellest tuleneva surve arvutamiseks on palju erinevaid lähenemisi. Neist kõige lihtsamad ja tuntumad on nominaalne pinnasurve (*Nominal Ground Pressure* ehk NGP) ja keskmine maksimaalne surve (*Mean Maximum Pressure* ehk MMP), mis on ka relvajõududes kõige suuremat kasutust leidnud.

NGP leidmiseks jagatakse masina mass maapinnaga kontaktis oleva ala pindalaga. Katsed näitavad aga, et surve ei jaotu võrdselt ei roomiku ega rehvi kontaktala ulatuses ega ka vertikaalselt mulla sees. Näiteks vertikaalselt saab mullas mõõta teravaid rõhu tippväärtusi, mis ületavad tugevasti ka rehvi enda siserõhu väärtusi. Seega on NGP väärtus maapinnale avaldatavast survest ligi 5–6 korda väiksem (Terry *et al.*, 1991; Barton *et al.*, 2000; Saarilahti, 2002; Schjønning *et al.*, 2006).

Seetõttu pakkus Rowland 1970. aastatel välja keskmise maksimaalse surve (MMP) arvutuse valemi esmalt roomikmasinade jaoks. MMP näitab roomikurataste alla tekkivate maksimaalsete survete keskmist väärtust. Rowland määratles vastava valemi katsetega, kus rõhuandurid paigaldati 23 cm sügavusele ning saadud tulemused teisendati mulla pinnale. Hiljem laiendati seda käsitlust ka ratastega masinatele ning määratleti ka ratastele valemid MMP arvutamiseks. Saadud tulemused ei ole aga nii realistlikud kui roomikute puhul, kuna katsed maasiseste anduritega näitavad palju suuremaid rõhu väärtusi kui arvutatud tulemused. MMP-d kasutatakse Briti armee mobiilsuse mudelis (Terry *et al.*, 1991; Wong, 1994; Barton *et al.*, 2000; Hetherington, 2001; Hetherington *et al.*, 2002; Saarilahti, 2002).

Lisaks neile kahele on kasutusel ka teisi meetodikaid, kus võetakse täpsemalt arvesse kontaktpinna omadusi veeremi ja maapinna vahel nagu ka rehvisisese rõhu mõju, mida nimetatud valemides ei käsitleta. Tihtipeale kasutatakse praegustes uurimustes lihtsustatud lähenemist, kus maapinnale avaldatav surve võrdub 1,2–1,3-kordse rehvi siserõhuga. Üks võimalus käsitleda masina poolt avaldatavat survet on jaotada see staatiliseks ehk erisurveks ja dünaamiliseks surveks. Dünaamilise surve mõõtmiseks paigaldatakse andurid eeldatavasse rattajälge. Selle väärtus sõltub eelkõige masina massist ja liikumiskiirusest (Horn, 1992; Saarilahti, 2002; Nugis, 2004).

2.2.2. Mobiilsust piiravad parameetrid. Mobiilsuse ennustamise arvutimudelid

Masina liikumisvõimaluste hindamiseks mullal kasutatakse mobiilsust piiravaid parameetreid. Rowland korreleeris masina MMP-väärtustega, võrdluseks minimaalsed mulla koonilised indeksid (*Limiting Cone Index*), mis lubaks määratleda masina

liikumise sõltuvalt mullast. Vastav väärtus arvutatakse MMP põhjal (Wong, 1989; Barton *et al.*, 2000; Maclaurin, 2007).

Kõige laiemat kajastamist on leidnud *Waterways Experiment Station* (WES) poolt välja töötatud metoodika masina koonilise indeksi (*Vehicle Cone Index* ehk VCI) ja mulla koonilise indeksi abil ületatavuse määratlemiseks. Rohkearvuliste eksperimentide põhjal on määratletud masinatele VCI arvutamise valemid, mida saab võrrelda maastikul penetromeetriga mõõdetavate mulla kooniliste indeksitega. Seda metoodikat rakendatakse Ameerika Ühendriikide armees ning kasutatakse ka käesolevas uurimistöös masinatega ületatavuse hindamisel. Kuigi USA armees rakendatava VCI ja Suurbritannia relvajõududes kasutatava MMP kontseptsioonid on fundamentaalselt erinevad, on loodud valemeid, mis lubavad MMP põhjal arvutada VCI (Wong, 1989; Barton *et al.*, 2000; Priddy *et al.*, 2006).

Masinate mobiilsuse ennustamiseks on loodud nii empiirilisi kui ka teoreetilisi arvutimudeleid, samuti on selliseid, mis sisaldavad mõlema rakendusi. Neid mudelid on loodud selleks, et ennustada masinate suutlikkust liikuda erinevatel muldadel ja ennustada seda liikumistakistuse (*motion resistance*), mulla vastupanu (*soil thrust*) ja ka tõmbevõimekuse (*drawbar pull*) väärtuste arvutuste põhjal. Teoreetilistest mudelitest kõige detailsemaks peetakse Wongi mudelit NTVPM-86, mille abil saab ennustada roomikmasinate liikumist pehmetel muldadel (sidusatel savimuldadel). Selle mudeli peamiseks raskuseks on ligi 10 mullaparametri mõõtmise vajadus bevameetri abil. NTVPM-86 suudab ennustada normaalse pinge ja nihkepinge jaotust roomiku-maapinna kokkupuutel ning üldist veojõu suutlikkust (*tractive perormance*), arvestades liikumistakistust (*motion resistance*), mulla vastupanu (*soil thrust*), tõmbevõimekust (*drawbar pull*) ja veojõu efektiivsust (*tractive efficiency*) (Wong, 1994; Barton *et al.*, 2000; Maclaurin, 2007).

Suurimat rakendust mobiilsuse ennustamisel on ilmselt leidnud 1970. aastate algul välja töötatud ning NATO riikides kasutatav automatiseeritud *NATO Reference Mobility Model* (NRMM), mis on nüüdseks jõudnud pideva edasiarenduse tulemusena 2. versioonini – NRMM II. Selles mudelis on rakendatud VCI-metoodikat. Algselt kasutati mudelit NRMM II uute murdmaastiku masinate disainimisel, automatiseeritud sõjamängudes ja strateegilisel planeerimisel. Viimaste uuenduste

järel on see rakendust leidnud ka taktikalisel tasemel, masinate liikumise arvutamisel lahinguväljal. Seda on omakorda integreeritud teiste tarkvaradega. NRMM lubab modelleerida liikumiskiirust nii teedel kui ka murdmaastikul. Lisaks terramehaanilistele aspektidele võetakse siin liikumisvõimaluste arvutamisel arvesse nähtavust, taimkatte ja takistuste mõju, masina vedrustuse ning jõuülekande omadusi. NRMM koosneb erinevatest alammudelitest: jõuülekande suutlikkuse ennustamise mudelist, masina-maapinna vahelisest mudelist, nõlva efektide mudelist, maapinna mikrogeomeetriat arvestavast mudelist, masina-taimkatte mudelist, pidurdamismudelist, tee käänulisuse mudelist, veetakistuste ületamise mudelist (Lessem *et al.*, 1996; Jones *et al.*, 2005; Shoop *et al.*, 2005; Maclaurin, 2007).

3. WES METOODIKA MASINATEGA ÜLETATAVUSE MÄÄRATLEMISEKS. *UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM* (USCS) MULDADE KLASSIFITSEERIMISEKS

US Army's Engineer Research and Development Center (ERDC) uurimiskeskus *Waterways Experiment Station* (WES) arendas 1940ndate lõpul välja meetoodika masinatega mullal liikumis- ehk ületusvõimaluste (*soils trafficability*) hindamiseks. Peamiseks eesmärgiks oli vastava meetoodikaga pakkuda luureüksustele võimalust lihtsate töövahenditega määrata masinate liikumisvõimalusi maastikul “mine” (“go”) ja “ära mine” (“no go”) hinnangutena. Loodud mudel baseerub mulla kõvaduse mõõtmisel ehk koonilise indeksi (CI) määramisel, masinaga mullale avaldatava mõju modelleerimisel ning sellest tuleneva kõvaduse muutuse mõõtmisel ehk *remolding* indeksi³ (RI) määramisel ja masina koonilise indeksi (VCI) arvutamisel. Indeksite CI ja RI korrutamisel saadakse mulla kaalutud kooniline indeks (RCI). Kui RCI on suurem kui masina kooniline indeks VCI, siis saab vastav masin liikuda ilma kinni jäämata analüüsitud mullal.

Vastav meetoodika kasutab muldade klassifitseerimiseks *Unified Soil Classification System*’i (USCS). Seejuures pole kogu mulla kõvadus ühesuguse tähtsusega, vaid oluline on kõvaduse väärtus kriitilises kihis. Kriitiline kiht on mulla kiht, mis peab toetama masina kaalu ning selle tüsedus on 15 cm (6 in). Vastava kihi asukoht sõltub mulla tüübist, mulla kõvaduse profiilist, masina tüübist ja kaalust, ületuskordade arvust. WES uuringud näitasid, et sellise kihi sügavus on funktsioon masina kontaktsurvest ehk nagu Priddy (2006) tõi välja - see sõltub ratta koormusest või roomikutega masina kogumassist. Kõikide masina tüüpide jaoks on vastavad kriitiliste kihtide sügavused määratletud ning need on toodud tabelis 1. Enamus militaarsete liikumisvahendite jaoks on see 15–30 cm (6-12 in) sügavusel (FM 5-430-00-1, 1994; TM 3-331, 1971; Priddy *et al.*, 2006).

Mulla kõvaduse mõõtmiseks töötati WES poolt välja 30° koonusega penetromeeter, mida tuntakse ka COE (*Corps of Engineers*) penetromeetri nime all. Mõõdetava koonilise indeksi ühikuna kasutatakse psi ehk lb/in², kuigi mõõdetud väärtusi

³ Eestikeelset terminit on praegu *remolding* indeksi kohta raske määratleda. Seepärast kasutatakse seda antud uurimistöös inglisekeelse terminina.

esitatakse valdavalt ilma ühikuta (Wong, 1989; Maclaurin, 2007; FM 5-430-00-1, 1994; Muro *et al.*, 2004).

Remolding indeksi määramise põhjuseks on asjaolu, et enamasti ei liigu üle maapinna ainult üks masin - vastavalt kasutatavale liikumistehnikale ja manööver formatsioonile võib ühes jäljes liikuda väga mitmeid erinevaid masinaid. Seejuures võivad suure peeneteralise materjali: tolmu, savi ja orgaanilise aine sisaldusega muldades, mõjutamise või tallamise tulemusena kõvadus väheneda. Vastavalt Muro'le (2004) - liikudes samas jäljes sidusates muldades toimub muldade töötlemine ning väheneb nihketugevus (*shear strength*) ja seetõttu ületatavuse võimalused redutseeruvad. Sellistes jämedateralistes muldades nagu liivad ja kruusad, muutub muld mõjutamise tulemusena valdavalt veelgi tugevamaks. Seetõttu pole sellistes muldades vaja ka vastavat testi läbi viia. Seega jämedateralistes muldades võrreldakse ületusvõimaluste hindamiseks omavahel CI ja VCI (Herl *et al.*, 2005; Muro *et al.*, 2004).

Peeneteralistes muldades püütakse vastava testi abil kriitilises kihis või teatud juhtudel ka sügavamal (vt ptk 3.2.2) kindlaks teha kõvaduse muutuse suurus, mida on oodata pärast masina ületust. Masina liikumist imiteeritakse löökidega mullale. RI võrdub pärast löökide andmist ehk masinaga tallamist ja enne tallamist mulla kõvaduse suhtega – kui see on suurem kui 1, siis muutub muld ületustega tugevamaks; kui see on väiksem kui 1, siis nõrgemaks. Vastavat koefitsienti kasutatakse ilma mõõtühikuta. WES poolt välja töötatud RI test määratleb väärtused just 40-50 ülesõidu jaoks. See tähendab ühtlasi, et vastav väärtus ei ole otseselt rakendatav ühe või mõne masina ületuse tulemusel toimuva muutuste hindamiseks (TM 3-331, 1971; Barton *et al.*, 2000).

Masinate poolt liikumiseks vajalikud mulla kõvadused ehk masinate koonilised indeksid (VCI), määrati kindlaks empiiriliste katsetega maastikul – katsemasinad sõitsid samas jäljes edasi ja tagasi kuni kinnijäämiseni. Seejärel fikseeriti mullakõvadus jäljes ja jälje kõrval, ning ületuskordade arv. Iga masina jaoks arvutatakse eraldi kooniline indeks esmase ületuse jaoks, vastavalt VCI_1 , ja viiekümne kordseks ületuseks, vastavalt VCI_{50} . Eraldi arvutus eeskirjad on fikseeritud ratas- ja roomikmasinate jaoks ning need baseeruvad masina massi, masina põhja kõrguse väärtustel, mootori võimsusel ning ülekande faktori mõõtmetele ning veeremi

andmetel - roomiku puhul selle laius ning maapinnaga kontaktis oleva ala pindala ning roomiku hammaste olemasolul; rataste puhul laiuse ja diameetri mõõtmisel, rataste arvul. Saadud väärtused lubavad võrrelda mõlema masinatüübi võimekust omavahel hoolimata veeremi tüübist. Kuna vastavad väärtused on toodud 1 ja 50 kordse ületusvõimaluste määratlemiseks, siis 1 ja 50 vahele jäävate ületusarvude puhul leitakse VCI_{50} ja VCI_1 vahe ning seejärel jagatakse vastav vahe 50, et teada saada mitu korda iga masina ületus kord suurendab VCI_1 . Kui kasutatakse eri tüüpi ja erinevate kooniliste indeksi väärtustega masinaid samas jäljes, siis hinnangu andmisel kasutatakse suuremate VCI-ga masinat ületusvõimaluste määratlemiseks (Priddy *et al.*, 2006; Wong, 1989; Maclaurin, 2007; FM 5-430-00-1, 1994).

Lisaks VCI ja RCI võrdlusele leitakse mulla koonilisest indeksist masina koonilise indeksi lahutamise teel n-ö “ülejääva” mulla kõvadus. Seda “ülejäävat” kõvadust saab masin rakendada nõlvadest üles liikumiseks ning teiste masinate pukseerimiseks. Nii nõlvakalded kui maksimaalselt pukseeritava masina mass on leitav vastavatelt empiiriliselts välja töötatud graafikutelt. Lisaks mulla kõvaduse omadusele mõjutavad liikumisvõimalusi ka mulla kleepuvus (*stickiness*) ning libedus (*slipperiness*). Mulla kleepuvus veeremi külge ilmneb üldiselt madala kandevõimega muldade puhul ning mida plastilisema mullaga on tegu, seda suurem on kleepuvuse efekt. Libedus, mida võib esineda ka suure kandevõimega muldade puhul, põhjustab probleeme masina juhtimisega ning seda eelkõige kummiratastega masinate puhul. Nimetatud aspekte käsitletud metoodika puhul kvantitatiivselt ei fikseerita (FM 5-430-00-1, 1994).

Kirjeldatud metoodika protseduuride printsiibid on välja töötatud kasutamiseks mõõdukas ning humiidses kliimas muldadele, mis on külmumise-sulamise tsükli objektiks tingimusel, et need pole külmunud olekus metoodika rakendamise ajal. Kuna vastavad suhted masina ja mulla vahel on defineeritud empiiriliselts, siis ei saa neid ekstrapoleerida uude keskkonda ega kasutada hinnangute andmiseks liikumisel teist tüüpi aluspindadel, nagu näiteks lumega kaetud muldadel ja kogu mullaprofiili ulatuses tugevasti orgaanilistel muldadel (FM 5-430-00-1, 1994; Daigle *et al.*, 2005; Shoop, 1993).

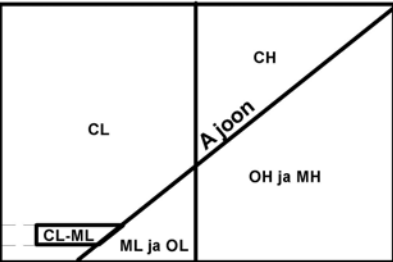
3.1. Unified Soil Classification System

WES metoodika baseerub masinate ületatavuse ennustuste tegemisel USCS muldade klassifikatsioonile. Sõltuvalt mulla tüübist on masina ületatavuse määratlemise metoodika erinev. *Unified Soil Classification System* (USCS) puhul on tegemist muldade klassifikatsiooniga, mis on laiemat kasutust leidnud inseneriteadustes ja geoloogias, kuna see toob välja mulla mehaanilised omadused. Muldade klassifitseerimine baseerub erineva terasuurusega osakeste osakaaludel, mulla kokkusurutavuse ja plastilisuse omadustel. USCS eelkäijaks oli *Airfield Classification System*, mis arendati välja II maailmasõja ajal Harvardi Ülikoolis professor A. Casagrande poolt. Selle modifitseeritud versioon võeti kasutusele Ameerika Ühendriikide pioneeeriüksuste poolt (*US Army Corps of Engineers*) 1952. aastal ning seda kasutatakse tänapäevani nii muldade ületamise võimaluste määratlemisel masinatega kui ka lennuväljade ning rajatiste, teede loomise alussüsteemina. Antud klassifikatsiooni kaudu on võimalik lihtsalt läbiviidavate labori- ja põldkatsete abil anda ülevaade inseneridele olulistest mulla omadustest (FM 5-410, 1992; Wikipeda1).

USCS järgi jaotatakse mullad 3 suurde kategooriasse:

- jämedateralised mullad (*coarse-grained soils*),
- peeneteralised mullad (*fine grained soils*),
- suure orgaanilise aine sisaldusega mullad (*highly organic*).

Klassifitseerimise aluseks on kruusa, liiva ja peenemate osakeste osakaalud ning peeneteralise materjali plastilisuse ja kokkusurutavuse omadused ning orgaanilise aine esinemine mullas. Mulla erineva terasuurusega osakeste osakaalude määramiseks kasutatakse sõelasid, plastilisuse ülem- ja alampiir tehakse kindlaks Atterbergi meetodil, orgaanilise aine hulk visuaalselt. Muldade märgistamiseks kasutatakse kahetähelisi shifreid või nende shifrite kombinatsioonid. USCS klassifitseerimise eeskiri on toodud joonisel 1 (FM 5-410, 1992; FM 5-530, 1987; Wikipeda1).

PÕHILISED JAOTUSED			Sümbolid		TÜÜPILISED NIMETUSED		LABORATOORSED KLASSIFIKATSIOONI KRITERIUMID		
JÄMEDATERALISED MULLAD rohkem kui 50% on suurem kui 0,074 mm	KRUUSAD rohkem kui 50% jämeda- teralistest materjalist on suurem 4,75 mm	Puhtad kruusad (peeneteral. margatava peeneteral. hulgaga)	GW	hea jaotusega kruusad, kruusa- liiva segud, peeneteralist vähe/ puudub	Klassifikatsioon baseerub peeneteral. materjali % (0,074 mm väiksem) GW, GP, SW, SP vähem kui 5% rohkem kui 12% 5% - 12% piiripealne, vajab kahte sümbolit	$C_u = D_{60}/D_{10}$ suurem kui 4 $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ 1 ja 3 vahel			
			GP	halva jaotusega kruusad, kruusa- liiva segud, peeneteralist vähe/puudub		ei vasta kõikidele GW jaotuse tingimustele			
			GM	tolmused kruusad, kruusa- liiva-tolmu segud		Atterbergi liimidid allpool "A" joont või PI väiksem 4	üalpool "A" joont, kus PI on 4 ja 7 vahel vajab kahte sümbolit		
			GC	savised kruusad, kruusa- liiva-savi segud		Atterbergi liimidid üalpool "A" joont või PI suurem 7			
	LIIVAD rohkem kui 50% jämeda- dateralistest materjalist on väiksem 4,75 mm	Puhtad liivad (peeneteral. margatava peeneteral. hulgaga)	SW	hea jaotusega liivad, kruusased liivad, peeneteralist vähe/puudub		$C_u = D_{60}/D_{10}$ suurem kui 6 $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ 1 ja 3 vahel			
			SP	halva jaotusega liivad, kruusased liivad, peeneteralist vähe/puudub		ei vasta kõikidele SW jaotuse tingimustele			
			SM	tolmused liivad, liiva-tolmu segud		Atterbergi liimidid allpool "A" joont või PI väiksem 4	üalpool "A" joont, kus PI on 4 ja 7 vahel vajab kahte sümbolit		
			SC	savised liivad, liiva-savi segud		Atterbergi liimidid üalpool "A" joont või PI suurem 7			
			PEENETERALISED MULLAD rohkem kui 50% on väiksem kui 0,074 mm	TOLMUD JA SAVID voolavuse limit väiksem kui 50		ML		anorgaaniline tolm ja väga peened liivad, kivimi pulber, tolmused või savised peened liivad või savised tolmud kerge plastilisusega	Plastilisuse graafik 
						CL		anorgaanilised savid madala või keskmise plastilisusega, kruusased-, liivased-, tolmused savid, "lahajad" savid	
OL	orgaanilised tolmud, orgaanilised tolmused savid madala plastilisusega								
MH	anorgaanilised tolmud, vilgurikkad või ränirikad peened liivad või tolmused mullad, elastised tolmud								
CH	anorgaanilised savid suure plastilisusega, bentoniidid								
OH	orgaanilised savid keskmise - kõrge plastilisusega, orgaanilised tolmud								
SUURE ORGAANILISE AINE SISALDUSEGA MULLAD		PT	turvas ja teised tugevasti orgaanilised mullad						

Joonis 1. USCS klassifitseerimise juhend (FM 5-33, 1990, joonise 1-1 järgi).

3.1.1. USCS klassifitseerimise protseduurid

Muldade jämedateralise materjali klassifitseerimiseks kasutatakse mitmesuguste avasuurusega sõelasid. Seejuures pole rangelt fikseeritud kasutatavate sõelade suurus. Minimaalselt on vajalikud sõelad avasuurusega 0,074 mm peeneteralise materjali eraldamiseks ja avasuurusega 4,76 mm jämedateraliste osakeste klassifitseerimiseks. Neile kahele lisandub veel 0,42 mm aukude läbimõõduga sõel, mille põhjal eraldatakse Atterbergi limiitide määratlemiseks vajalikud osakesed. *The American Society for Testing and Materials* poolt on soovituslikult nimetatud järgmiste avasuurusega sõelade komplekti kasutamine: 76 mm, 38 mm, 19 mm, 10 mm, 4,76 mm, 2,38 mm, 1,19 mm, 0,545 mm, 0,297 mm, 0,149 mm, 0,074 mm (FM 5-530, 1987).

Sõelumise tulemusena määratakse kindlaks igat sõela läbinud osakeste osakaal protsendina kogu mullast. Vastavate andmete põhjal koostatakse graafik, kus vertikaalteljele on kantud osakeste läbimõõdud ning horisontaalteljele osakaalud. Selliselt graafikult saab kindlaks määrata osakeste suurus, millest vastavalt 60%, 30%, ja 10% mullast on väiksemad. Need protsendid vastavad joonisel 1 toodud D_{60} ,

D_{30} , D_{10} koefitsientidele, mida kasutatakse erineva suurusega osakeste jaotuse kirjeldamiseks vajalike indeksite arvutamisel (FM 5-410, 1992; FM 5-530, 1987).

Mulla plastilisuse määramiseks Atterbergi meetodil viiakse läbi 0,42 mm väiksemate osakestega plastilisuse ülempiiri ehk voolavuse alampiiri (*Liquid Limit* ehk *LL*) ja plastilisuse alampiiri (*Plastic Limit* ehk *PL*) katsed ning nende põhjal arvutatakse plastilisuse indeks (*Placticity Index* ehk *PI*). Voolavuse alampiir on veehulk, mille juures muld läheb plastilisest seisust üle voolavasse seisusse. Voolavuse määramiseks paigutatakse katsemuld kausikesse ning lõigatakse standardse V-kujulise spaatliga kaheks võrdseks osaks nii, et moodustuks 1,5 mm laiune pragu. Järgnevate töövõtete osas esineb erinevaid käsitusi – H. Vipperi järgi tuleb mullaga kausikest langetada 3 korda 6 cm kõrguselt ning kui mullapoolmed liituvad vähemalt 1 mm kõrguselt ja 1,5-2 mm pikkuselt, siis on muld plastilisuse ülempiiril ning määrata tuleb vastav niiskuse hulk. Kui liitumist ei ole märgata, tuleb lisada vett ja katse uuesti läbi viia. FM 5-530 järgi tuleb kausikest langetada 1 cm kõrguselt 25 korda kiirusega 2 kukkumist sekundis ning määrata kukkumiste arv kui mullapoolmed liituvad vähemalt 1,3 cm ulatuses. Järgnevalt tuleb proovid kuivatada ja siis uuesti sama protseduur läbi teha. Kokku tuleks läbida 4 katset, kus ideaaljuhul 2 katset jääks vahemikku 15-25 kukkumisega ja 2 testi 25-35 kukkumisega. Seejärel kantakse kukkumiste arvud ja vastavad niiskusesisalduse graafikule. Voolavuse limiidi määrab 25 kukkumisele vastav niiskusesisaldus (Vipper, 1989; FM 5-530, 1987).

Plastilisuse limiit on mullas olev veehulk, mille juures muld hakkab murenema, kui see on rullitud 3 mm kepikeseks. Mullaproovist veeretatakse algselt pallikene ja seejärel 3 mm kepikene. Kui see kepikene ei lagune, tehakse uuesti pallikene ja seejärel veeretatakse jällegi kepikene. Veeretamine toimub nii kaua kuni kepikene laguneb 8-10 mm pikkusteks kepikeseks. Siis määratakse vastavas mullas niiskuse hulk (FM 5-530, 1987; Vipper, 1989).

3.1.2. Jämedateralised mullad

Vastavalt joonisele 1 on jämedateralise materjali alampiiriks 0,074 mm ning kõik mullad, kus selliseid osakesi on rohkem kui pool klassifitseeritakse jämedateralisteks muldadeks. Edasi jaotatakse vastav kategooria kahte suurde gruppi - tegemist on

kruusadega (*gravels*) kui kuni pool jämedateralisest materjalist on suurem kui 4,75 mm ning vastavat mulda tähistatakse G-ga. Tegemist on liivadega (*sands*) kui rohkem kui pool jämedateralisest materjalist läbib 4,75 mm avadega sõela ja vastav tähistus on S.

Kui liivad või kruusad sisaldavad vähem kui 5% terasuurusega 0,074 mm ja väiksemat materjali, siis on tegemist puhaste liivade või kruusadega. Edasi klassifitseeritakse sellised mullad parameetrite C_u ja C_c kaudu, mis arvutatakse koefitsientide D_{60} , D_{30} , D_{10} põhjal. Joonisel 1 toodud tingimused tähendavad seda, et kui erineva terasuurusega osakesed on võrdselt esindatud, on tegemist hea jaotusega kruusade, liivadega (GW või SW) ja kui kõik terasuurused pole võrdselt esindatud on tegemist halvasti jaotunud kruusade, liivadega (GP või SP). Kui peeneteralist materjali (terasuurusega 0,074 mm ja väiksemad) on rohkem kui 12%, siis määratakse väiksemate kui 0,42 mm osakeste põhjal Atterbergi limiidid. Joonisel 1 esitatud plastilisuse graafiku abil tehakse nende limiitide põhjal kindlaks, kas tegemist on tolmu- või savise liivade või kruusadega. Tolmude korral lisatakse M täht G või S tähe juurde, savide puhul C, näiteks GM või SC (FM 5-410, 1992; FM 5-530, 1987).

Kui peeneteralist materjali on vahemikus 5-12%, siis on tegemist piiripealse koosseisuga, kus mulla tähistamiseks tuleb kasutada kahe shifri kombinatsiooni, näiteks GW-GM. Orgaanilise aine olemasolu jämedateralises mullas ei vaadelda (FM 5-410, 1992; FM 5-530, 1987).

3.1.3. Peeneteralist ja suure orgaanilise aine sisaldusega mullad

Peeneteralist mullad on sellised mullad, kus vähemalt pool mullaproovist on väiksem kui 0,074 mm. Edasi klassifitseeritakse neid muldasid plastilisuse ja kokkusurutavuse omaduste baasil ning orgaanilise aine olemasolu põhjal. Plastilisuse graafiku põhjal määratletakse, kas tegemist on tolmu- või savise peene materjaliga – vastavad tähised M või C. Orgaanilise aine olemasolu mullas tehakse kindlaks visuaalselt. Kui orgaaniline aine on mullas olemas, siis tähistatakse seda O tähega.

Peale selle jagunevad peeneteralist mullad kahte gruppi sõltuvalt nende kokkusurutavuse omadustest:

- L gruppi kuuluvad tolmut, savid, orgaanilise aine kombinatsioonid, mille voolavuse alampiir on väiksem kui 50%, sellised mullad on väikse kokkusurutavusega ja neid tähistatakse CL, ML, OL;
- H gruppi kuuluvad tolmut, savid, orgaanilise aine kombinatsioonid, mille voolavuse alampiir on suurem kui 50%, sellised mullad on suure kokkusurutavusega ja neid tähistatakse CH, MH, OH.

ML grupi moodustavad väga peened liivad, kivipulber, väikse plastilisusega tolmutud või savised peened liivad. MH gruppi kuuluvad väga üldiselt vilgurikkad (*micaceous*) ja ränirikkad (*diatomaceous*) mullad. CL on kruusased savid, liivased savid, tolmutud savid ja “lahjad” savid. CH grupis on nn “paksud” savid, gumbo savid, vulkaanilised savid ja bentoniidid. Omaette grupi kuuluvad nii madala plastilisuse kui ka kokkusurutavusega tolmutud ja savide segud, neid tähistatakse CL-ML (FM 5-410, 1992; FM 5-530, 1987).

Orgaanilise aine olemasolul peeneteralises mullas tähistatakse vastavat mulda OL või OH. Seejuures pole määratletud kui suur peab orgaanilise aine hulk olema - selle olemasolu tehakse kindlaks visuaalselt tumedama värvi järgi. Orgaanilise ainega tolmutud ja ka orgaanilise aine–tolmutud–savide segud madala plastilisusega on OL grupis, orgaanilise aine ning savi segud kuuluvad OH gruppi.

Omaette muldade grupi moodustavad sellised suure orgaanilise aine sisaldusega mullad nagu turbamullad, mida tähistatakse Pt. Laboratoorsed kriteeriumid nende muldade määratlemiseks puuduvad. Maastikul identifitseeritakse neid värvi ja lõhna järgi, urbe ülesehituse ning kiulise tekstuuri järgi (FM 5-410, 1992).

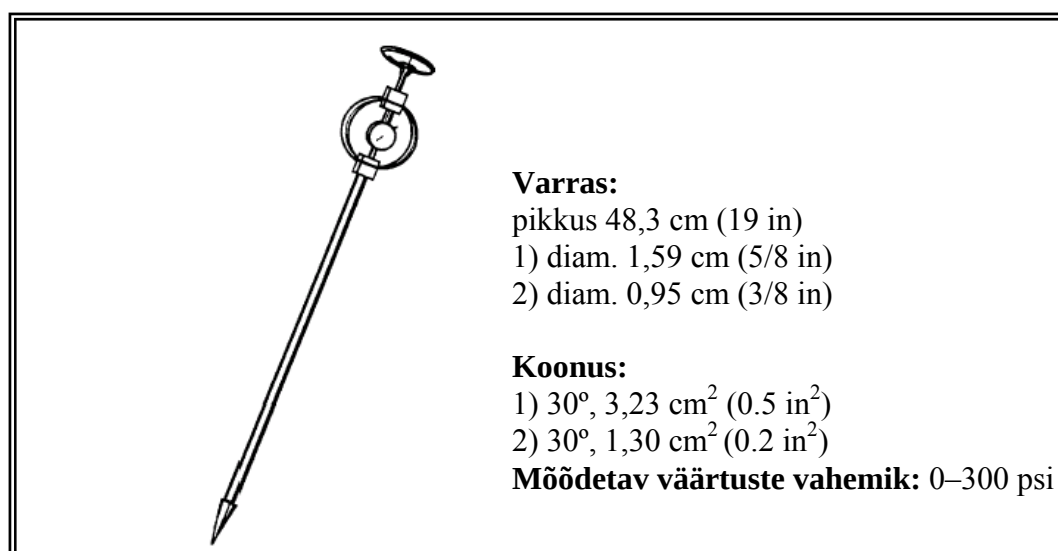
3.2. WES metoodika tööetapid ja rakendatavad mõõtevahendid

Alljärgnevalt käsitletakse lähemalt muldade ületatavuse määratlemiseks vajalikke tööetappe ning seejuures rakendatavaid töövahendeid.

3.2.1. USCS mullatüübi fikseerimine ja mulla kõvaduse mõõtmine, kõvaduse profiili määratlemine

Esimese sammuna tuleb kindlaks määrata üldine mulla kategooria USCS järgi. Seejuures eristatakse metoodika puhul peale USCS peamiste mulla gruppide – jämedateralised või peeneteralised mullad, veel ühte omaette mulla gruppi – vormitavad liivad (*remoldable sands*). Tegemist on siis selliste liivadega, mis sisaldavad piisavalt peeneteralist materjali – üle 7%. Otseselt vormitavateks liivadeks peetakse SM, SC, SM-SC muldasid. GP-GM, GP-GC, GW-GM, GW-GC, SP-SM, SP-SC, SW-SM, SW-SC mullad on jämedateralise ja vormitavate liivade grupi piirile jäävad mullad. Vormitavaid liivasid iseloomustatakse kui muldi, mis kuivas mullaseisundis käituvad ületatavuse määramisel kui jämedateralised mullad ning märjas seisundis kui peeneteralised mullad. Seega sõltuvalt nende kuuluvusest ühte või teise niiskuse seisundisse, määratakse ka nende muldade puhul ületatavust erineva metoodikaga (FM 5-430-00-1, 1994).

Peenteralises või jämedateralises mullas mõõdetakse mulla kõvadused mulla profiili kõvaduse iseloomustamiseks erinevatel sügavustel. Koonilise indeksi mõõtmisteks loodud COE penetromeeter on toodud joonisel 2. See on kasutatav erinevate varraste ja koonustega.



Joonis 2. COE penetromeeter (FM 5-430-00-1, 1994, joonise 7-3 põhjal).

Kooniliste indeksite fikseerimise sügavused varieeruvad kirjanduses. Vastavalt Wong'ile (1989) tehakse mõõtmised alates maapinnast (kui koonuse alus on mulla

pinnaga tasa) ja iga järgneva 7,5 cm (3 in) tagant kuni 30 cm (12 in) ning sealt edasi juba 15 cm (6 in) tagant kuni 76 cm (30 in) sügavuseni. Vastavalt FM 5-430-00-1 tuleb peeneteralistes muldades määrata väärtused maapinnal ning siis iga 15 cm (6 in) tagant kuni 61 cm (24 in) sügavuseni, jämedateralistes muldades maapinnal ning iga 7,5 cm (3 in) tagant kuni 61 cm (24 in) sügavuseni või kuni kõvaduse väärtused on 300. Mõõtmiste tegemiseks kasutatakse pehmetes muldades ja liivades suuremat koonust ($3,23 \text{ cm}^2$) koos jämedama vardaga, mille diameeter on 1,59 cm. Tugevamate muldades aga väiksemat koonust ($1,3 \text{ cm}^2$) peenema vardaga – diameeter 0,95 cm (FM 5-430-00-1, 1994; Shoop, 1993; Wong, 1989).

Mõõdetud kõvaduse väärtuste põhjal määratletakse mulla kõvaduse profiil. Tegemist on normaalse kõvaduse profiiliga kui CI väärtused sügavuse kasvades suurenevad või jäävad konstantseks. Tegemist on ebaloomuliku kõvaduse profiiliga kui kas või üks CI väärtus on väiksem otseselt tema peal mõõdetud CI väärtusest. Statistilise keskmise saamiseks on vajalik vähemalt 5 kuni 7 katse läbi viimine (FM 5-430-00-1, 1994; Shoop, 1993).

3.2.2. Kriitilise kihi/kihtide määratlemine

Järgmise sammuna tuleb kindlaks määrata masinale vastava kriitilise kihi asukoht, kus viiakse läbi *remolding* test. Kihi määramiseks peab teadma roomikmasinate puhul massi või kontaktsurvet maapinnale, ratsmasinatel ühele rattale avaldatavat koormust. Normaalse kõvaduse profiili korral saab seda määrata tabelis 1 toodud väärtuste põhjal. Kui on tegemist ebaloomuliku kõvaduse profiiliga tuleb *remolding* indeks määratleda aga ka tavalisest kriitilisest kihist 15 cm (6 in) allapoole jääva kihi jaoks.

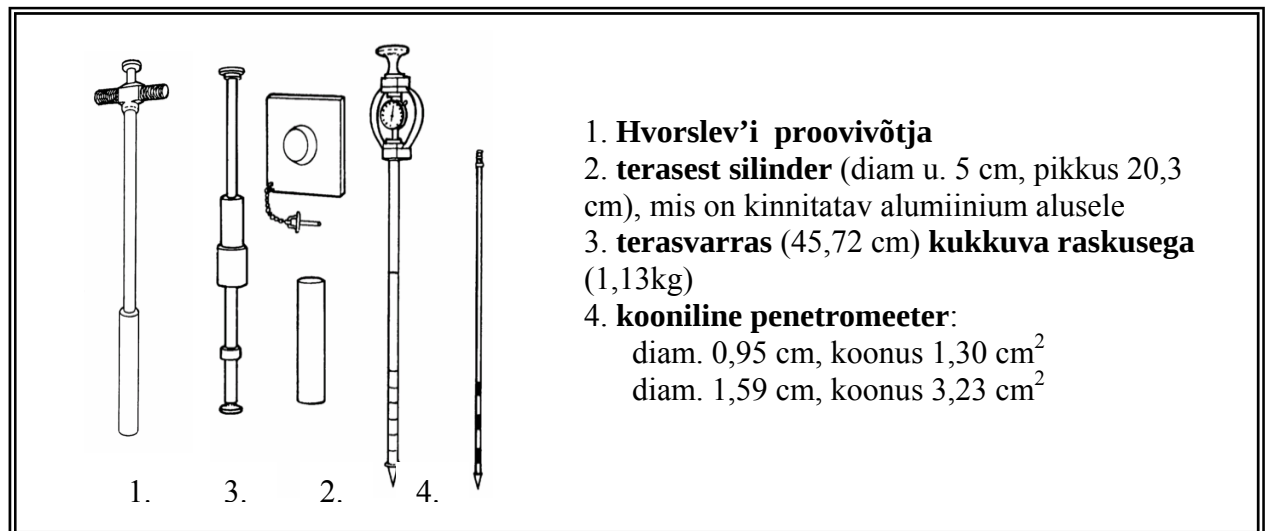
TABEL 1. Kriitiliste kihtide sügavused (FM 5-430-00-1, 1994, tabeli 7-1 põhjal).

Masina tüüp	Normaalse kriitilise kihi sügavus			
	1 kordne ületus		50 kordne ületus	
	Peeneteralised mullad	Jämedateralised mullad	Peeneteralised mullad	Jämedateralised mullad
Roomikutega masinad kontaktsurve<4psi*	7,5 – 22,5 cm	0 – 15 cm	7,5 – 22,5 cm	0 – 15 cm
Ratta koormus kuni 907,2 kg	7,5 – 22,5 cm	0 – 15 cm	7,5 – 22,5 cm	0 – 15 cm
Ratta koormus 907,2 - 4536 kg	15-30 cm	0 – 15 cm	15-30 cm	0 – 15 cm
Ratta koormus üle 4536 kg	22,5 – 37,5 cm	0 – 15 cm	22,5 – 37,5 cm	0 – 15 cm
Roomikutega masin kuni 45360 kg	15 - 30 cm	0 – 15 cm	15-30 cm	0 – 15 cm
Roomikutega masin üle 45360 kg	22,5 – 37,5 cm	0 – 15 cm	22,5 – 37,5 cm	0 – 15 cm

* kuna kontaktsurvet pole eraldi lahti seletatud võib eeldada, et tegemist on staatilise survega ehk NGP.

3.2.3. Remolding test

Remolding test viiakse läbi peeneteraliste muldade ning vormitavate liivade puhul vastavalt kriitilises kihis või ka ebanormaalse kõvadusprofiili korral 15 cm sügavamale jäävas kihis. Erandiks on vaid madala kontaktsurvega roomikmasinad, kus on alati 7,5–22,5 cm (3-9 in) kriitiliseks kihiks. Testi tegemiseks vajalik töövahendite komplekt on toodud joonisel 3 (FM 5-430-00-1, 1994; Priddy *et al*, 2006).



Joonis 3. Remolding testi töövahendite komplekt (FM 5-430-00-1, 1994).

Kriitilisest kihist võetakse proovivõtjaga mullaproov ning surutakse see kukkuva raskuse põhjaga otse terasest silindrisse. Edasine tegevus sõltub sellest, kas tegemist on peeneteralise mullaga või vormitava liivaga. Esimese tüübi korral mõõdetakse penetromeetriga (terasest vardaga 1,59 cm diam ning 3,23 cm² koonusega) CI väärtused koonuse baasala sisenemisel mulda ja edasi iga 2,54 cm (1 in) tagant kuni 10,2 cm (4 in) sügavuseni. Siis antakse mullale 100 lööki kukkuva raskusega 30,5 cm (12 in) kõrguselt ja mõõdetakse uuesti iga 2,54 cm tagant kõvadused. RI leidmiseks tuleb summeerida kõvadused pärast “tampimist” ja enne “tampimist” ning jagada need omavahel. (FM 5-430-00-1, 1994; Wong, 1989)

Vormitavates liivades kasutatakse peenema vardaga ja koonusega penetromeetrit (diam. 0,95 cm ja 1,3 cm²). Kriitilise kihis surumise järel silindrisse asetatakse mullaproovile kummist kork ning lastakse kukkuda 15 cm kõrguselt 25 korda tugevale aluspinnale. Mõned vormitavad liivad, mis sisaldavad suurt hulka peenest (rohkem kui 12% ja vähem kui 50%) käituvad nagu peeneteralised mullad. Seega kui testida vormitavaid liivasid koos suure hulga peeneteralise materjaliga, tuleks läbi viia nii peeneteraliste kui ka voolitavate liivade katsed ning edasiseks analüüsiks kasutada madalamat RI väärtust (FM 5-430-00-1, 1994).

3.2.4. Masina koonilise indeksi määratlemine

Masina kooniliste indeksite VCI_1 ja VCI_{50} määratlemiseks arvutatakse kõigepealt mobiilsuse indeks MI (*Mobility Index*). Lisas 1 on toodud valemid MI arvutamiseks roomikutega ja ratastega masinate jaoks. Järgmise sammuna leitakse MI põhjal VCI_1 ja VCI_{50} . Roomikutega masina puhul leitakse need järgmiste valemitega:

$$VCI_1 = 7.0 + 0.2MI - \left(\frac{39.2}{MI + 5.6} \right), (\text{lb/in}^2)$$

$$VCI_{50} = 19.27 + 0.43MI - \left(\frac{125.79}{MI + 7.08} \right), (\text{lb/in}^2)$$

(Wong, 1989; Barton *et al*, 2000)

Ratastega masinate puhul arvutatakse VCI_1 ja VCI_{50} arvutatakse järgmiste valemite põhjal:

$$VCI_1 = 11.48 + 0.2MI - \left(\frac{39.2}{MI + 3.74} \right), (\text{lb/in}^2)$$

$$VCI_{50} = 28.23 + 0.43MI - \left(\frac{92.67}{MI + 3.67} \right), (\text{lb/in}^2)$$

(Wong, 1989)

Eelpool kirjeldatud meetodil arvutatavaid väärtusi kasutati aastakümneid masinate mobiilsuse määratlemisel. Ratastega masinate puhul esitas Priddy (2006) lisaks parandavad arvutused MI leidmiseks. Nimelt MI määratlemise ajal, so 1940ndatel, kasutati katsetes masinaid, mille rehvi deformatsioon oli 15% rehvi kõrgusest. Pärast radiaalsete rehvide laiemat kasutuselevõttu muutusid ka need deformatsioonid suuremaks ning see omakorda mõjutab MI põhjal arvutatavat VCI. Seetõttu arendas ERDC välja parandi - *Deflection Corrector Factor* 'I' (DCF).

$$DCF = \left(\frac{0.15}{\delta / h} \right)^{0.25},$$

kus δ – keskmine rehvi deformatsioon kõval pinnal (in)
 h – keskmine rehvi kõrgus (täispuhutud, koormamata) (in)

Ja VCI_1 arvutamisel tuleb seda parandit arvestada järgmiselt:

$$MI \leq 115, \text{ siis } VCI_1 = (11.48 + 0.2MI - \frac{39.2}{MI + 3.74})DCF$$

$$MI > 115, \text{ siis } VCI_1 = (4.1MI^{0.446})DCF$$

(Priddy *et al.*, 2006)

Teadaolevalt ei ole aga vastavas kirjanduses lähemalt kirjeldatud toodud parandi mõju masinatega murdmaastiku ületatavuse hindamisel. Lähtudes WES metoodika pikaajalisest rakendamisest ilma vastava paranduseta, on ilmselt ka need tulemused aktsepteeritavad.

3.2.5. Mulla (kaalutud) koonilise indeksi arvutamine ja võrdlus masina koonilise indeksiga

Jämedateralistes muldades kasutatakse masina koonilise indeksiga võrdluseks koonilist indeksit kriitilisest kihist. Peeneteralises mullas kasutatakse koonilise indeksi ja *remolding indeksi* korrutamise saadud kaalutud koonilist indeksit. Seejuures kui tegemist on olnud ebatavalise kõvaduse profiiliga, siis leitakse RCI ka 15 cm (6 in) madalama mullakihi jaoks ning võrdluseks masina koonilise indeksiga kasutatakse väiksemat RCI väärtust. Va siis roomikud kontaktsurvega vähem kui 4 psi, mille puhul arvutust aluseks on alati 7,5-22,5 cm.

3.3. WES metoodika üldine ületatavuse hinnang USCS muldadele

Koondatult on muldade ületamise võimaluste erinevaid aspekte hinnatud tabelis 2.

TABEL 2. USCS mullad masinatega ületatavuse seisukohalt (FM 5-430-00-1, 1994).

Mulla tüüp	Üldine hinnang masinatega ületatavusele
Jämedateralised mullad GW, GP, GW-GM*, GW-GC*, GP-GC*, GP-GM*, GM, GC SP, SW, SP-SM*, SP-SC*, SW-SM*, SW-SC*	- kõikidele masinatüüpidele on esimene ülesõit maapinnast kõige kriitilisem; - roomikutega ja kõikide rataste veoga masinatel pole probleeme liikumisel; - märjas olekus on need paremini läbitavad; - ratastega masinad peavad kasutama väikseimat rehvirõhku liikumiseks; - puhastel liivadel - SP, SW, vähese mullaniiskuse juures võivad ratastega masinad kiiresti mulda kinni jääda;
Peeneteralised mullad ja vormitavad liivad SM, SC, SM-SC, ML, MH, CL, CM, OH, OL	- liikumisvõimalused on otseselt ilmast ja mullaniiskusest sõltuvad; - mulla kõvadus võib suureneda või väheneda segamise ehk liikluse käigus; - kuivas mulla seisundis on need parema ületatavusega kui jämedateralised mullad.

* - kuuluvad ka osaliselt vormitavate liivade gruppi.

Lisaks nendele üldistele liikumisvõimaluste hinnangutele, on WES poolt välja toodud mulla tüüpide kaupa keskmised koonilise indeksi, *remolding* indeksi ning kaalutud koonilise indeksi väärtused. Need on esitatud tabelis 3.

Vastavad keskmised väärtused on grupeeritud mulla nn topograafilise asukoha kaupa. Topograafilise asukoha esitamisel ei ole määravaks absoluutne maapinna kõrgus, pigem iseloomustab see mulla üldist niiskusseisundit. Kõrge topograafiaga alad on valdavalt hea äravooluga, kus veetase ei ulatu aasta jooksul kõrgemal kui 1,2 meetrit maapinnast. Madalda topograafiaga ning märja aastaaja tingimustele vastavatel aladel on mingil osal aastast veetase vahemikus 0,6-1,2 m. Madala topograafiaga suure niiskusega aladel on veetase 0-0,6 m vahemikus ning on üleujutatud pikkadeks perioodideks.

TABEL 3. USCS muldade kooniliste indeksite, *remolding* indeksite ja kaalutud kooniliste indeksite väärtuste vahemikud (Daigle *et al.*, 2005).

Mulla tüüp USCS järgi	Kõrge topograafiaga, märja aastaaja tingimused			Madal topograafia, märja aastaaja tingimused			Madal topograafia, suure niiskuse tingimused		
	CI	RI	RCI	CI	RI	RCI	CI	RI	RCI
GW, GP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SW, SP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP-SM	0,86-1,66 (125-241)	1,19-2,17	1,35-2,18 (196-316)	2,07 (300)	0,94	1,94 (282)	-	-	-
SM	0,9-1,54 (130-224)	0,77-1,83	0,94-1,98 (137-287)	0,75-1,5 (109-217)	0,29-1,03	0,23-1,3 (34-188)	0,56-1,26 (81-183)	0,15-0,87	0,08-0,87 (12-126)
SC	0,88-1,59 (127-231)	0,72-0,98	0,72-1,43 (104-208)	0,67-1,77 (97-257)	0,59-1,21	0,42-1,76 (61-255)	-	-	-
SM-SC	1-1,28 (147-185)	0,47-1,13	0,45-1,45 (65-211)	1,1-1,49 (160-216)	0,45-1,31	0,5-1,43 (72-208)	1,03-1,25 (150-182)	0,45-0,63	0,46-0,68 (66-98)
ML	0,81-1,54 (118-224)	0,46-1,02	0,46-1,3 (67-189)	0,7-1,38 (102-200)	0,27-0,81	0,23-0,92 (34-134)	0,56-1,18 (81-171)	0,26-0,60	0,15-0,61 (22-88)
CL	0,85-1,45 (123-211)	0,59-0,95	0,57-1,24 (82-180)	0,62-1,3 (90-188)	0,46-0,88	0,32-1 (46-146)	0,49-1,14 (71-165)	0,42-0,80	0,27-0,81 (39-117)
CL-ML	0,77-1,44 (111-209)	0,44-0,72	0,37-0,94 (54-136)	0,59-1,14 (85-165)	0,31-0,69	0,23-0,66 (34-96)	0,49-1,07 (71-155)	0,27-0,53	0,18-0,46 (26-66)
OL	-	-	-	0,66-0,93 (95-135)	0,38-0,74	0,28-0,61 (41-89)	0,6 (87)	0,56	0,34 (49)
MH	1,04-1,45 (151-211)	0,32-1,00	0,44-1,1 (64-160)	0,65-1,17 (94-170)	0,51-0,99	0,33-1,12 (48-162)	0,57-1,04 (83-151)	0,46-0,92	0,3-0,85 (43-123)
CH	1,15-1,5 (167-217)	0,84-1,10	1,1-1,45 (158-210)	0,68-1,34 (98-194)	0,74-1,14	0,56-1,33 (81-193)	0,48-1,15 (69-167)	0,64-1,02	0,33-1 (48-146)
OH	-	-	-	0,44-1,13 (64-164)	0,32-0,78	0,1-0,76 (14-110)	0,29-0,91 (42-132)	0,26-0,66	0,14-0,34 (21-49)
Pt	-	-	-	0,52-0,62 (76-90)	0,45-0,67	0,28-0,35 (41-51)	0,52-0,62 (76-90)	0,45-0,61	0,28-0,35 (41-51)

Tabelis 3 ei ole toodud kõrge topograafiaga kuiva aastaaja tingimusi, kuna kõvaduse väärtused ületavad kõikide muldade puhul 300 psi ning on ilma takistuseta sobivad ületusteks kõikidele masinatele. Samadel põhjustel on vähe näiteandmeid jämedateraliste muldade kohta kõrge topograafiaga märja aastaaja tingimustes. Kuivas seisundis muldasid loetakse üldse sobivaks liikumisaluseks igasugustele muldadele, seetõttu pole nende kohta ka keskmisi väärtusi eraldi esitatud. Liivad koos peeneteralise materjaliga on segamata olekus erineva niiskusseisundi juures suhteliselt

sarnase kõvadusega. Niiskuse suurenedes muutuvad sellised mullad segamise tulemusena üha nõrgemaks. Peeneteraliste muldade keskmised kõvadused on väiksema niiskuse juures algselt sama tugevad kui jämedateralised mullad. Niiskuse sisalduse suurenedes nende keskmine kõvadus aga väheneb. Kõige nõrgemad mullad on orgaanilise aine sisaldusega mullad. Kõikide tabelis esitatud mullatüüpide puhul on näha, et mida niiskema seisnudiga on tegemist, seda nõrgem on muld segamise tulemusena.

Esmaseks masinate muldade ületamise võimaluste hinnangu saab kui võrrelda selliseid keskmisi masina kooniliste indeksite väärtustega, mis on esitatud tabelis 4.

TABEL 4. Erinevate masinate kategooriate kooniliste indeksite väärtuste vahemikud (FM 5-430-00-1, 1994, tabeli 7-3 põhjal).

Kategooria	VCI ₁ , psi	VCI ₅₀ , psi	Näite masinad
1	kuni 12	kuni 29	kergekaalulised masinad väiksema kontaktsurvega kui 2 psi
2	12-21	30-49	madala kontaktsurvega ja suhteliselt laiade roomikutega traktorid
3	21-26	50-59	suhteliselt madala kontaktsurvega tangid
4	26-30	60-69	enamus keskmisi tanke ja kõikide rataste veoga veoautosid
5	31-35	70-79	enamus kõikide rataste veoga veoautosid, rasked tangid
6	35-44	80-99	suur hulk kõikide rataste veoga ja tagumiste rataste veoga veoautosid
7	üle 45	üle 100	tagarataste veoga masinad jt mis pole üldiselt ettenähtud liikumiseks murdmaastikul

Vastavate tabelite kõrvutamisest selgub, et kõrge topograafiaga alal on märja aastaaja tingimustes liikumisvõimalused kõikidele masinatele sobivad. Viiekümnekordsel ületusel võivad aga tekkida probleemid näiteks kergematel ja keskmistel tankidel peeneteralistel muldadel. Madala topograafiaga aladel on märjal aastaajal tingimused samuti sobivad kõikide masinate liikumise jaoks, 50 ületuse tegemine võib osutuda problemaatiliseks kõikidele masina kategooriatele praktiliselt kõikidel muldadel. Suure niiskuses seisundi juures tekivad 7 kategooriasse kuuluvatel masinatel probleemid orgaanilistel muldadel ja 50 ületuseks peeneteralistel muldadele kõikide kategooria masinate jaoks piisavalt kõvadust pole.

Et lähemalt selgitada mulla kõvaduse seost teiste mulla omadustega ning eelkõige mulla niiskuse sisaldusega, viidi WES poolt aastatel 1951-1957 läbi uurimus, kus mõõdeti kontinentaalses kliimatsoonis kokku 95 mõõtekohas kriitilises kihis 15-30 cm kõvadused, *remolding* indeksid, niiskused jne. 1971. aastal avaldatud uurimuses TM No. 3-331 "*Forecasting Trafficability of Soils. Report 10. Relations of Strength to other Properties of Fine-grained Soils and Sands with Fines,*" toodi ühe olulisema järeldusena välja, et niiskuse hulga (*Moisture content* ehk MC) suurenemisega vähenevad nii CI kui RCI väärtused. Eraldi koonilise indeksi (CI) puhul toodi välja, et eksisteerib väga suur side niiskuse sisaldusega (MC), nii et iga mõõtekoha kohta on võimalik niiskuse sisalduse põhjal arvutada koonilise indeksi väärtust CI järgmise valemiga:

$$\ln CI = a + b (\ln MC),$$

kus a ja b on vastava mõõtekohaga (mullaga) seotavad koefitsendid. (TM 3-331, 1971).

4. EESTI SUUREMÕÕTKAVALINE MULLASTIKU KAART. MULLAKAARDI TEISENDAMISE EESKIRI USCSi

Selleks, et määratleda uurimuse eksperimentaalse osa uurimisobjektid ning valida mõõtmisteks sobivad näitemullad, tuli Eesti territooriumi muldasid käsitleda USCS süsteemis. Teadaolevalt Eesti muldasid vastava klassifikatsiooni järgi eelnevalt vaadeldud ei ole. Seega pandi kokku esmane eeskiri teisenduste tegemiseks.

Kõige detailsem kaart Eesti territooriumi muldade kohta, mida on võimalik kasutada masinatega murdmaastiku ületatavuse hindamiseks, on 1:10 000 mõõtkavas mullakaart. Vastavat digitaalset ruumiandmebaasi ning selle põhjal trükitavaid paberkaarte haldab Eestis Maa-amet. Mullastiku kaardistamisega alustati Eesti territooriumil juba 1954. aastal. Aastakümnete jooksul fikseeriti mulla andmeid põllumaadel, siis lisandusid looduslikud maad ning lõpuks riigimetsamaad, mille kohta andmete kogumine lõpetati 1989. aastal. 1997. aastast alates viidi Maa-ameti eestvedamisel mullakaart üle digitaalsele kujule. Digitaalne mullastiku kaart koos andmebaasiga kogu territooriumi kohta valmis 2001.a. jaanuariks (Maa-amet, 2001).

Kõige laiemaulatuslikum Eesti muldade kirjeldamine ning mitmesuguste andmete fikseerimine toimus eelmise sajandi 70ndatest alates ligi paarikümne aasta jooksul. Selle käigus kogutud andmed esitati 1974-1989.a. sariväljaandena “Eesti NSV mullastik arvudes” - kokku kaheksas osas. Vastavates kogumites on toodud andmeid muldade mehaaniliste koosseisude, huumusesisalduse, keemiliste näitajate ja palju muu kohta. Toodud keskmised näitajad on määratletud märkimisväärselt suure arvu mullaproovide põhjal (Eesti NSV ..., I-VI; Kõlli *et al.*, 1999).

Nii digitaalset ruumilist mullaandmebaasi kui ka nimetatud sariväljaandeid võib pidada kõige detailsemateks ja ulatuslikemateks allikateks Eesti muldasid kajastavate lähteandmetena. Vähesel määral on erinevaid andmeid esitatud ka väljaannetes “Mullateadus” ja “Eesti NSV mullastik.” Samuti on lühike kirjeldus muldadest Maa-ameti kodulehel esitatud materjalis “Mullakaardi seletuskiri.” Kõiki nimetatud allikaid on käesolevas uurimistöös kasutatud Eesti muldade teisendamisel USCSi. Alljärgneva muldade käsitle – eelkõige korese ja peenese analüüsimise eraldiseisvate nähtustena, tingis digitaalse mullakaardi kasutamine teisenduse alusena.

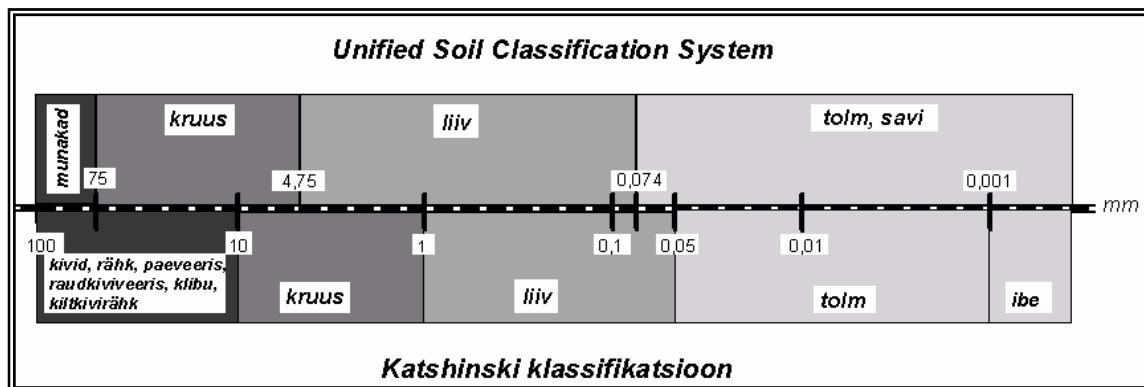
Lähtudes “Mullakaardi legendist” ning eelpool kirjeldatud parameetritest, mis on vajalikud muldade teisendamiseks USCSi, saab digitaalselt mullakaardilt kasutada järgmisi atribuutandmeid:

- mulla shiffer,
- mulla peenese ja korese sisaldus lõimisevalemis (lähtudes Katshinski klassifikatsioonist kogu mullaprofiili ulatuses),
- huumuse, metsakõdu, toorhuumuse esinemine koos tusedusega.

Kirjanduslikest allikatest saab neid andmeid täpsustada mehaaniliste koosseisudega, huumuse- ja metsakõdu horisontide keskmiste sügavustega jne (Maaamet, 2001; Lillema, 1958; Reintam, 1962).

4.1. Eesti mullakaardi peenese ja korese teisendused USCSi

USCS poolt kasutatav ja Eesti muldade puhul rakendatud Katshinski klassifikatsioon käsitlevad erinevalt mullaosakeste piiriseid. Joonisel 4 on toodud mõlema süsteemi lõimisegruppide võrdlus.



Joonis 4. Logaritmiline skaala USCS ja Katshinski süsteemi osakeste jaotuse piiridega (Reintam, 1962; MIL-T-89304, 1990).

Kõige olulisemateks USCS puhul võib lugeda liiva ning peenema materjali piir ehk siis 0,074 mm ning kruusa ja liiva piirina toodud 4,75 mm. Katshinski jaotuse järgi on liiva piir kaugemal ehk siis Eesti muldade puhul teatud osa peenliivast (osakesed suurusega 0,25-0,05 mm) kuulub ka USCS mõistes tolmude ja savide hulka. Jämedateralise materjali klassifitseerimisel pole võimalik Eesti mullakaardil täpselt vahet teha liiva ja kruusa vahel USCS järgi. Eesti mullakaardil esitatud kruusa võib

USCS järgi osaliselt liivaks lugeda. USCS kruusa mõistes on jällegi käsitletavat Eesti mullakaardil eristatud kivid, rähk, paeveeris jne. USCS fraktsioonide kaupa vastavused Eesti muldade puhul on toodud tabelis 5.

TABEL 5. USCS osakeste rühmadele vastavad Katshinski jaotuse rühmad (Mullakaardi legend, 2003; MIL-T-89304, 1990).

USCS nimetus	Eesti mullakaardil nimetus
tolm, savi	tolm, ibe, osa peenliivast
liiv	osa kruusast, jäme ja keskmine liiv, enamus peenliivast
kruus	valdav osa kividest, rähast, paeveerisest, raudkiviveerisest, klibust, kiltkivirähast; osa kruusast

USCS üleminekuks on Eesti mullakaardi põhjal võimalik esitada väga üldiselt mehaanilised koosseisud, näiteks võrdsustades ligikaudu mõlema süsteemi liivade grupid ning käsitledes kruusa ja kivisid, rähka, pae- ja raudkiviveerist, klibu, kiltkivirähka USCS mõistes kruusadena. Selliseid indekseid nagu C_u ja C_c esitatud andmete põhjal arvutada pole võimalik. Nii puudub ka võimalus vahet teha jämedateraliste muldade puhul hästi või halvasti jaotunud erimite vahel.

Üheks peamiseks klassifitseerimisel ilmnevaks raskuseks on peeneteralise materjali piiritlemise erinevus kahe süsteemi vahel. Katshinski järgi on mulla peenese piiritlemise aluseks füüsikalise savi sisaldus, milleks on osakesed väiksemad kui 0,01 mm ning sisaldavad keskmisi tolmusid, peeneid tolmusid ja savisid. USCS on vastavaks suuruse piiriks 0,074 mm, mis kõrvutades Katshinski jaotusega tähendab jämedate tolmu arvamist peeneteralise materjali hulka. Esiteks pole selle lõimisegrupi andmed mullakaardil välja toodud ning teiseks ka kirjanduses esitatakse kõige rohkem andmeid muldade füüsikalise savi ja ibe sisalduse kohta, tunduvalt vähem aga jämeda tolmu osakaalude kohta (Reintam, 1962; FM 5-410, 1992).

Digitaalsel mullakaardil on esitatud iga mullaareali kohta atribuutidena selle lõimis – mulla peenese ja korese andmed. Muldade kaardistamisel käsitletakse neid eraldi, st et korese puhul tuuakse välja selle osakaal kogu mullas ning mullapeenest käsitletakse kui 100% mullast. Mulla mehaanilisest koosseisust ülevaate saamiseks tuleb need erinevad osakaalud kokku viia ning peenese osakaalud ümber arvutada.

4.2. Eesti muldade plastilisuse ja kokkusurutavuse andmed

Mulla plastilisus on selline näitaja, mis sõltub mulla mehaanilisest ja keemilisest koostisest, huumuse- ning niiskusesisaldusest. Seda hinnatakse plastilisuse arvuga, mis on mulla ülemise ja alumise plastilisuse piiri niiskusesisalduste vahe kaaluprotsentides.

Plastilisuse ülempiiri (seda nimetatakse ka voolavuse alampiiriks) andmeid Eesti territooriumi muldade kohta teadaolevalt esitatud pole. Ühe sellise orientiirina saab kasutada vaid leet-gleimuldade puhul välja toodud voolavuse alampiiri 38,65%. USCS puhul eristatakse suure voolavuse ja väikse voolavuse gruppi, kus vastavaks niiskuse sisalduse piiriks on 50%. Vastavalt joonisel 1 toodud tüüpiliste nimetuste lahtreile on suure voolavusega (MH) grupis elastsed tolmut, vilgurikkad (*micaceous*) mullad või ränirikkad (*diatomaceous*) mullad. Selliseid muldasid Eesti territooriumi muldade seas ei esine.

CH grupis on nn “paksud” savid - gumbo savid, vulkaanilised savid ja bentoniidid. Vastavalt Wikepidale koosneb bentoniit valdavalt savimineraalidest, mis kuuluvad montmorilloniitide rühma (Wikepida2). Tegemist on suurima sidususe ja kleepuvusega savimineraalidega ning need on valdavalt tekkinud merepõhja settinud vulkaanilise tuha lagunemisel. Eesti muldade ibefraktisoonis on valdavad savimineraalid hüdrovilgud. Üldises savimineraalide klassifikatsioonis on kõige väiksema sidususega kaoliniidid ning neile järgnevad hüdrovilgud. Seega võib toodud kirjelduste põhjal üldiselt järeldada, et Eestis kogu peeneteraline materjal kuulub vähese voolavusega gruppi, kus siis voolavuse alampiir jääb alla 50%, ning peeneteraliste materjalide puhul lisandub L täht voolavuse kirjeldamiseks (Kitse *et al.*, 1974; Reintam, 1962).

Atterbergi järgi jaotatakse mullad plastilisuse indeksi ehk arvu järgi 4 rühma ning nende väärtused on toodud tabelis 6.

TABEL 6. Muldade klassifikatsioon plastilisuse indeksi ehk plastilisuse arvu järgi (Vipper, 1989, tabel 9).

Plastilisuse indeks ehk plastilisuse arv	Muldade plastilisus	Muldade mehaaniline koostis
0	mitteplastilised	liiv
0 - 6	väheplastilised	saviliiv
7 - 16	plastilised	liivsavi
üle 16	väga plastilised	savi

Viies vastavad plastilisuse indeksid kokku joonisel 1 toodud plastilisuse graafikul eristatud mulla tüüpidega, vastavad Eesti mullad plastilisuse näitajate põhjal (pööramata siin tähelepanu mehaanilisele koosseisule) järgmistele USCS muldade tähistele: saviliivad M või C, liivsavid C ning savid C. Esitatud tabeli põhjal pole võimalik otsuseid teha tolmjate saviliivade ja tolmjate liivsavide plastilisuse indeksite väärtuste kohta. Nende muldade plastilisust saab seega hinnata vaid mehaanilise koosseisu põhjal eeldusega, et ibeosakeste osakaal määrab peamiselt plastilisuse omaduste ilmemise.

Vastavalt USCS eeskirjale orgaanilise aine olemasolu jämedateralistes muldades ei vaadelda, kuid teadaolevalt suurendab huumusesisaldus liivades ja saviliivades plastilisust. Seega huumushorizontides võib selle mõjul olla ka erinev plastilisuse arv võrreldes ülejäänud horisontidest. Ehk siis suurema orgaanilise aine sisaldusega jämedateralised mullad võivad kuuluda vastava eeskirja järgi näiteks GC või SC hulka (Reintam, 1962).

4.3. Orgaanilise aine sisaldus mullas ja suure orgaanilise aine sisaldusega mullad

Vastavalt USCS muldade klassifikatsioonile, muldades või horisontides, kus peeneteralist materjali on rohkem kui 50% ning esindatud on orgaaniline aine, tähistatakse neid OL. Praktiliselt ainult orgaanilisest ainest koosnevaid horisontisid ja muldasid Pt. OL muldade puhul pole määratletud kindlat orgaanilise aine osakaalu, mille puhul peeneteralist mulda sellesse gruppi kuuluvaks loetakse. Võrdluseks Eesti muldade huumushorizontides huumuse sisalduste piirid on esitatud tabelis 7.

TABEL 7. Huumusesisaldus Eesti muldade huumushorizontides (Reintam, 1962).

Huumusesisaldus huumushorisondis, %	Hinnang	Mullad
kuni 1,5	väga madal	peamiselt erodeeritud mullas
1,5 – 2,5	madal	enamik kamar-leetmuldasid
2,5 – 3,5	keskmine	enamik leostunud ja leetjaid muldi osaliselt kamar-leetmullad
3,5 – 5	kõrge	Põhja-Eesti rähkmullad
üle 5	väga kõrge	paepealsed mullad

Kuna puuduvad ette antud piirid orgaanilise aine sisalduse suhtes, siis võib kõiki Eesti territooriumi mullad, mis klassifitseeritakse peeneteraliste hulka oma mehaanilise koosseisu poolest, huumushorisondi ulatuses orgaaniliseks peeneteraliseks mullaks pidada – vastavalt siis OL tähistada.

Teine, orgaanilise aine sisaldusega muld või horisont on Pt, mis tähistab suurt orgaanilise aine sisaldust. Sarnaselt OL gruppidele, ei ole ka Pt puhul klassifitseerimise juhendis määratletud täpset orgaanilise aine osakaalu, mis määratleks mulla kuuluvuse sellisesse gruppi. Kui lähtuda Barton'ist (2000) on selliseks piirväärtuseks 20%. Seega kogu profiili ulatuses Pt muldade gruppi kuuluvad Eestis soomullad, mille pealmisteks horisontideks on vähemalt 30 cm ulatuses turbakiht. Pt horisondiks on aga metsakõdu horisont (Barton *et al.*, 2000).

Turvastunud muldade ülemiseks horisondiks on 10-30 cm tüsedune turbahorisont või turvastunud metsakõdu. Turvastunud muldadele tõlgendamisel USCSi järgi tuleb lähtuda kriteeriumist, mis on määratletud samblasoode ja rabade piiritlemisel - niiskes seisundis peab vastavates muldades turbakiht olema vähemalt 30 cm paks ja kuivas seisus 45. Seega turvastunud muldade puhul tuleb Pt gruppi klassifitseerida vaid pealmise turbaga horisonti. Mullakaardi ümber klassifitseerimisel, juhul kui turbahorisoni tüsedus puudub atribuutandmetes, võib selle tüseduseks lugedagi 30 cm (Shoop, 1993; Maaamet, 2001, Kõlli *et al.*, 1999).

4.4. Eesti territooriumi mullad peenesegruppide ja korese osakaalude kaupa

Lisas 2 on esitatud detailsem mulla peeneserühmade mehaanilise koosseisu käsitus ning tabelis 8 on toodud kokkuvõtlikult peeneserühmade keskmised mehaanilised koosseisud. Eesmärgiks polnud käsitleda detailselt iga mullaliigi erinevaid horisonte, vaid määratleda keskmised peeneserühmade mehaanilised koosseisud ning USCS järgi peeneteralistes muldades fikseerida huumushorisoni tusedus. Suure orgaanilise aine sisaldusega horisontide – turvastunud muldades turbahorisoni tusedust ja metsakõdu tusedust seejuures täpsemalt ei käsitletud, eeldusega on esitatud mullakaardil atribuutandmetes. Juhul kui vastavad näitajad puuduvad või turvastunud muldades Pt kihi tuseduseks lugeda 30 cm ja metsakõdu puhul võib sellise keskmisena kasutada 5 cm (Eesti NSV ..., III, IV, V).

TABEL 8. Peeneserühmade keskmised mehaanilised koosseisud.

Peenes	Mehaaniline koosseis
liiv (LI, LII, LIII, L(k)I, L(k)II, L(k)III, Ls,Lo; Lsg, LIg, LIIg, LIIIg, L(k)Ig, L(k)IIg, LG L(k)IIIg, LG1)	liiva 95%, tolmu ja ibe 5%
liiv (kõik ülejäänud)	liiva 81-92%, tolmu 6,4-16%, ibe 3,9-5,8%
sl	liiva 59-71%, tolmu 33-37%, ibe 6-7%
tsl	liiva 55%, tolmu 38%, ibe 7%
ls ₁	liiva 45-63%, tolmu 27-47%, ibe 6-16%
tls ₁	liiva 33%, tolmu 56%, ibe 11%.
ls ₂	liiva 44-53%, tolmu 33-43%, ibe 11-23%
tls ₂	liiva 21-25%, tolmu 61-65%, ibe 15%
ls ₃	liiva 37-38%, tolmu 42-43%, ibe 20%
tls ₃	liiva 15%, tolmu 60%, ibe 20%
savi	liiva 8-21%, tolmu 43-57%, ibe 35 – 51%

Tabelis 8 toodud keskmisi koosseisusid kasutati koos korese astmetega, mille väärtustele vastavad korese oskaalud mulla mahust on esitatud tabelis 9. Kogu lõimise – nii peenese kui korese rühmade kaupa teisenduse eeskiri on toodud tabelis 10.

Vastavalt “Mullakaardi seletuskirjale” üle 200 mm läbimõõduga korese, milleks on paeplaadid (pk), paas (p), liivakivi (d), lubisetted (lu), kohta astmeid ei esitata. USCS järgi on tegemist munakatega, mida ilmselt klassifitseerimisel loetakse kruusade hulka kuuluvateks. Seetõttu käsitletakse neid käesolevas töös kui jämedateralisi

halvastijaotunud muldasid ehk GP. Ning kuna tegemist on massiive kivimiga, siis ka kõikide peeneserühmadega koos võib massiivse kivimi esinemist pidada jämedateralise kruusase mulla tähiseks – GP.

TABEL 9. Mulla korese osakaalud ja astmed Eesti mullakaardil (Mullakaardi legend, 2003).

Korese astmed	Osakaal mulla mahust
kr (kruus), p (paas), d (liivakivi), lu (lubisetted), pk (paeplaadid)	-
$r_1, v_1, v^{\circ}_1, kb_1, ck_1, k_1, k^{\circ}_1$	2 – 10% mulla mahust
$r_2, v_2, v^{\circ}_2, kb_2, ck_2, k_2, k^{\circ}_2$	10 – 20% mulla mahust
$r_3, v_3, v^{\circ}_3, kb_3, ck_3, k_3, k^{\circ}_3$	20 – 30% mulla mahust
$r_4, v_4, v^{\circ}_4, kb_4, ck_4, k_4, k^{\circ}_4$	30 – 50% mulla mahust
$r_5, v_5, v^{\circ}_5, kb_5, ck_5, k_5, k^{\circ}_5$	50 – 70% mulla mahust
$r, v, v^{\circ}, kb, ck, k, k^{\circ}$	üle 70% mulla mahust
kr	üle 50% mulla mahust
kr + peenes	10-30% mulla mahust

Astmetena on välja toodud räha (r), paeveerise (v), raudkiviveerise (v°), klibu (kb), kiltkiviräha (ck), paekivide (k) ja raudkivide (k°) osakaal mullast. Kaks viimast nimetust – paekivid ja raudkivid on 100 – 200 mm läbimõõduga, ülejäänud 10 – 100 mm läbimõõduga. Kuigi esimene neist gruppidest klassifitseeritakse munakate alla ja teised jäävad kruusa alla USCS järgi, siis vaadeldakse neid käesolevas töös kruusa grupina. Juhul kui mullaareaali kohta on esitatud vaid korese hulk (ilma peeneseta) – näiteks r, siis saab seda käsitleda kui jämedateralist kruusa mulda ning täpsema osakeste jaotuse teadmatus tõttu halvasti jaotunud ehk siis GP. Korese gruppidest kõige problemaatilisem on korese hulk 30-50%. Tänu sellistele laiadele piiridele võib antud muld klassifitseeruda nii jämedateraliseks kui ka peeneteraliseks.

Omaette koresegrupiks on mullakaardil kruusad (kr), mille puhul samuti ei kehti eelpool toodud korese astmed. Vastavalt “Mullakaardi legendile” näidetest tähistatakse kr-ga muldasid, kus kruusa sisaldus on üle 50%, kuid teadmata on ülejäänud mulla mehaaniliste osakeste jaotus, seega saab selliselt tähistatud mulda vaid GPna määratleda. Koos peenesega esinemise näitena on toodud kruus koos saviliivaga, kus siis vastavalt kruusa sisaldus on 10-30%. Selliste koosseisu kasutati ka teiste peenesegruppide puhul.

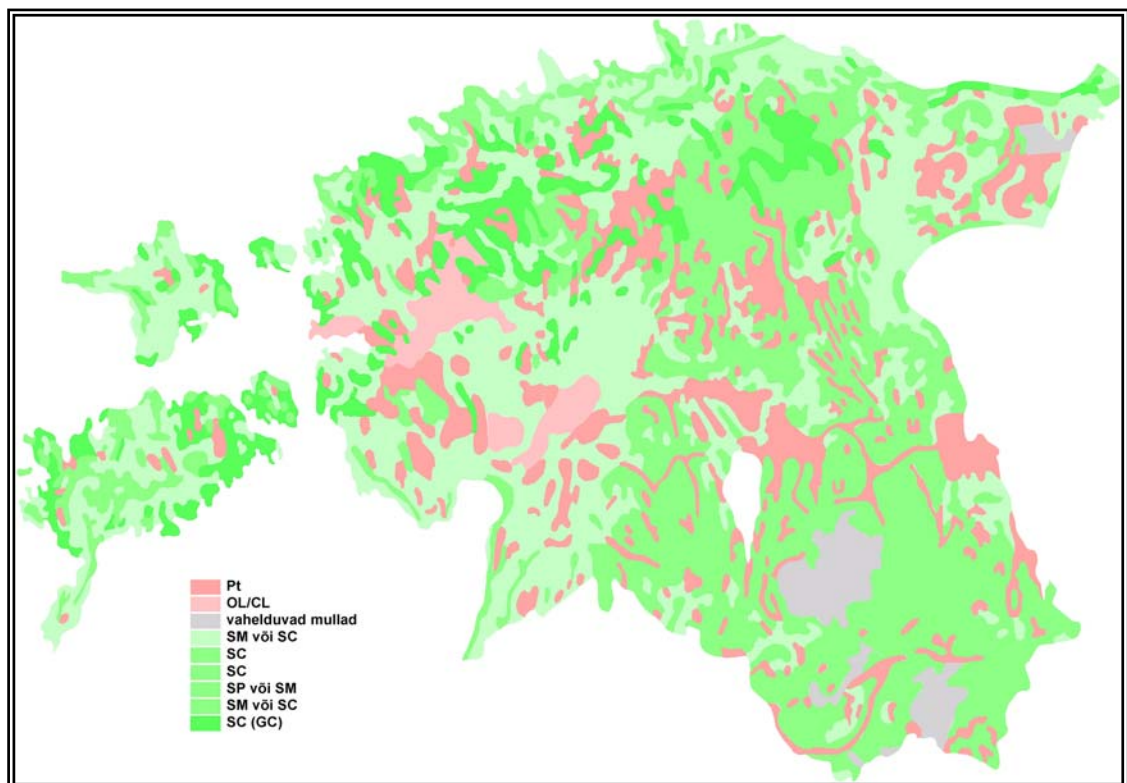
TABEL 10. Eesti mullakaardi lõimise vasted USCSis.

MULLA LÕIMIS								
kores		(ilma peeneseta)						
paelaadid(pk), paas(p), liivakivi(d),lubisetted (lu)		GP						
rähk(r),paeveeris(v), raudkiviveeris (v ^o), klibu(kb), kiltkivirähk(ck), paekivid (k), raudkivid (k ^o), kruus (kr)		GP						
liivad								
Muld/ peenes	koreseta	koresega						
		kr	r...k ^o	r ₅ ...k ₅ ^o	r ₄ ...k ₄ ^o	r ₃ ...k ₃ ^o	r ₂ ...k ₂ ^o	r ₁ ...k ₁ ^o
LI, LII, LIII, L(k)I, L(k)II, L(k)III, Ls,Lo; Lsg, LIg, LIIg, LIIIg, L(k)Ig, L(k)IIg, LG L(k)IIIg, LG1	SP	SP	GP	GP	SP (GP)	SP	SP	SP
kõik ülejäanud	SM	SP-SM	GP	GP	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SM
saviliivad								
Peenes	koreseta	koresega						
		kr	r...k ^o	r ₅ ...k ₅ ^o	r ₄ ...k ₄ ^o	r ₃ ...k ₃ ^o	r ₂ ...k ₂ ^o	r ₁ ...k ₁ ^o
sl	SM (SM-SC)	SM (SM-SC)	GP-GM	GM	GM (SM, SM-SC)	SM (SM-SC)	SM (SM-SC)	SM (SM-SC)
tsl	SM (ML)	SM	GM	GM	GM (SM)	SM	SM	SM
liivsavid								
Peenes	koreseta	koresega						
		kr	r...k ^o	r ₅ ...k ₅ ^o	r ₄ ...k ₄ ^o	r ₃ ...k ₃ ^o	r ₂ ...k ₂ ^o	r ₁ ...k ₁ ^o
ls ₁	SC	SC	GC	GC	GC (SC)	SC	SC	SC
ls ₂	0-25cm OL 25-... CL	SC	GC	GC	GC (SC)	SC	SC	SC
ls ₃	0-25cm OL 25-... CL	OL/ CL (GC)	GC	GC	GC	SC (GC)	OL/ CL	OL/ CL
tls ₁	0-25cm OL 25-... ML	OL/ ML	GM	GM	GM	GM (OL/ML)	OL/ ML	OL/ ML
tls ₂	0-25cm OL 25-... ML	OL/ ML	GM	GM	GM (OL/ML)	OL/ ML	OL/ ML	OL/ ML
tls ₃	0-25cm OL 25-... CL	OL/ CL	GC	GC	GC (OL/CL)	OL/ CL	OL/ CL	OL/ CL
savid								
	koreseta	koresega						
		kr	r...k ^o	r ₅ ...k ₅ ^o	r ₄ ...k ₄ ^o	r ₃ ...k ₃ ^o	r ₂ ...k ₂ ^o	r ₁ ...k ₁ ^o
s	0-25cm OL 25- ... CL	OL/ CL	GC	GC	GC (OL/CL)	OL/ CL	OL/ CL	OL/ CL

Suure orgaanilise aine sisaldusega mullad	
Soomullad	Pt
Turvastunud mullad	0-30cmPt 30-... cm (vastavalt mulla lõimisele)

Nagu näha tabelist 10, Eesti mullakaardil toodud lõimise kohta ei olnud sageli võimalik välja tuua ühte mulla tüübi vastet USCS järgi. Seetõttu esitati esimesena kõige suurema tõenäosusega USCS'i vaste ning sulgudes väiksema tõenäosusega mulla tüüp. Erinevate horisontide piiritlemisel, nt koreseta ls_3 , mille vasteks on 0-25 cm OL ja 25 cm alates CL, viitab keskmistele horisontide piiridele – kui huumushorisondi tusedus on toodud mullakaardi atribuutides, siis tuleks teisenduseks rakendada neid andmeid. Koos koresega juhtumitel vastavaid tuseduse piiriseid tabelis enam eraldi välja ei toodud, st et näiteks r_2ls_3 vastena esitatud OL/CL tuleks samuti kasutada nagu koreseta näite puhul - 0-25 cm OL ja 25 cm alates CL.

Lähtudes esitatud teisenduse eeskirjast koostati Eesti muldade ülevaatekaart, mis on toodud joonisel 5.



Joonis 5. Eesti üldine mullakaart USCS järgi (Raukas, 1995, joonise 170 põhjal).

Joonisel 5 toodud mullakaardi värvid on valitud põhimõttel, et tumedam punane iseloomustab ületamatuid muldasid, heledam hinnanguliselt raskemini ületatavaid muldasid. Tumeroheline jällegi toob välja keskmiselt parimate ületusvõimalustega mullad. Hinnangute andmisel on lähtutud WES metoodika üldisest hinnangust muldadele (tabel 3).

4.5. Peamised mullakaardi puudused teisendusel USCSi

Praktiline mullakaardi rakendamine näitab mitmeid probleeme, mis on seotud ebastandardsete andmete esitamisega ning info puudujääkidega vastavas digitaalses ruumiandmebaasis. Ilmselt esineb ka olulisi puudusi mullaareaalide ruumilisel esitusel ja täpsuses, kuid neid antud juhul ei analüüsita. Atribuutandmete puhul võib välja tuua järgmised peamised puudused, mis oluliselt raskendavad mullakaardi teisendamist USCSi:

- mulla lõimise esitamisel puuduvad andmed kahekihilise lähtekivimi puhul erinevate kihtide tuseduse kohta;
- liivsavide esitamisel puuduvad andmed nende raskuseastme kohta;
- huumushorisoni ning metsakõdu horisoni esinemise ja sügavuse kohta on väga vähe andmeid esitatud.

5. METOODIKA. KATSETE TINGIMUSED

5.1. Metoodika

Vastavalt “Sissejuhatuses” kirjeldatud töö eesmärkidele on käesoleva töö eksperimentaalse osa ülesandeks hinnata eelpool kirjeldatud metoodikaga liikumisvõimaluste prognoosimist Eesti oludes. Nagu ka anda esmane ületatavuse hinnang ühe välja valitud näitemulla põhjal. Vastavalt Eesti muldade teisenduse eeskirjale USCSi ja koostatud üldisele ülevaate kaardile joonisel 5, on Eestis valdavateks mulla tüüpideks USCS järgi nn vormitavate liivade gruppi kuuluvad SM, SC ja ka SM-SC mullad ehk siis tolmu- ja savised liivad. Seetõttu võeti järgnevalt täpsemalt vaatluse alla vormitavad liivade grupp üldiselt. Esiteks pole Eesti 1:10 000 mullakaardi põhjal võimalik täpset vahet teha nendel kolmel mulla tüübil, teiseks nagu näha tabelist 3, pole nende kolme puhul nii kõvaduse kui *remolding* indekseeritud väärtuste osas suuri erinevusi võimalik välja tuua. Kolmandaks - kõiki neid muldi ühendab teistest muldadest erinev metoodiline lähenemine ületatavuse hindamisel.

Vormitavad liivad on kahe suure mullagrupi piirile jääv grupp, mis sõltuvalt niiskusest käituvad kuivas mullas ületatavuse määramisel kui jämedateraline muld ning märja mulla seisundis kui peeneteraline muld. Vastav käsitlus mõjutab eelkõige kriitilise kihi määratlemist – jämedateralises mullas on see alati igasuguste masinate jaoks 0–15 cm, peeneteralistes muldades aga sõltuvalt masina ratta koormusest või roomikute puhul kontaktpinna survest 7,5-22,5 cm, 15-30 cm, 22,5-27,5 cm ning juhtumitel kui muld on ebaloomuliku kõvaduse profiiliga 30-45 cm või 37,5-52,2 cm. Seega on sellistel muldadel ületatavuse prognoosimisel olulise tähtsusega kriitiliste kihtide õigel valimisel.

Vastavalt uurimusele TM 3-331, kus on välja toodud, et *remolding* indeks ei ole otseselt rakendatav mõne üksiku masina ületuse tulemusel toimuva mulla kõvaduse muutuse ennustamiseks, otsustati käesoleva uurimuse käigus täiendada RI mõõtmisi kokkupressitava mullakihi paksuse mõõtmistega. Selle peamiseks eesmärgiks oli üldiselt hinnata mullas toimuvaid muutusi erineva hulga löökide andmise järel ehk simuleeritud tallamise järel, analüüsides väiksema arvu löökide järel toimunud muudatusi kogu muutuse taustal.

Töö eesmärkidest ning määratletud katsealuste muldade grupi omadustest tulenevalt on töö eksperimentaalse osa metoodika järgmine:

- koostatud mullakaardi teisenduse eeskirja testimine, viies läbi USCS eeskirja põhjal mulla klassifitseerimise maastikul – vastavalt mulla mehaanilise koosseisu määramise ning plastilisuse limiitide mõõtmised, mõõtes seejuures eraldi plastilisust huumushorisondis ning selle all;
- WES metoodikaga ületatavuse prognoosimise eksperimentaalne tõestamine katsemasinatega maastikul kahel viisil:
 - o WES metoodikaga ületatavuse ennustamise ning katsemasinatega reaalsete ülesõitude läbiviimise teel;
 - o WES metoodikaga määratletud kriitiliste kihtide paikapidavuse hindamisega – mõõtes selleks mullas katsemasinate 50 ületuse tulemusena toimunud kõvaduse muutused kogu mullaprofiilis ning võrreldes kihtide sügavusi, kus leidsid ületuste tulemusena aset suurimad muutused, metoodikas välja pakutud kriitilistes kihtidega;
- esmaste liikumisvõimaluste hinnangute andmiseks Eesti oludes WES metoodika järgi kõvaduse väärtuste mõõtmine ning selliste väärtuste võimaliku kõikumise fikseerimine sõltuvalt mulla niiskusest ja erinevast maakasutusest;
- esmaste ületatavuse hinnangute andmiseks 50 kordsete masinate ületuste puhul samas jäljes WES metoodika töövõtetega *remolding* indeksite määramine:
 - o kuivas mullaseisundis kriitilises kihis 0-15 cm ning sellest allapoole jäävas kihis, et selgitada üldiselt sügavamal toimuvat kõvaduse muutuste iseloomu;
 - o märja mulla seisundis kihtides 7,5-22,5 cm, 15-30 cm, 22,5-37,5 cm ning vajadusel ka kihtides 30-45 cm, 37,5-52,5 cm;
- lisaks standardsele WES metoodika *remolding* testile muutuste uurimise laiendamine vähema mõjutuste hulga puhul toimunud muutuste osas järgmiste katsete abil:
 - o katsemasinatega 50 ülesõidu järel toimunud kõvaduse muutuse ning silindris 50 löögi andmise tagajärjel toimunud *remoldingu* vahelise seose iseloomustamisega;

- o *remolding* testi läbiviimisel kokkupressitava mullakihi paksuse mõõtmisega erineva arvu löökide järel.

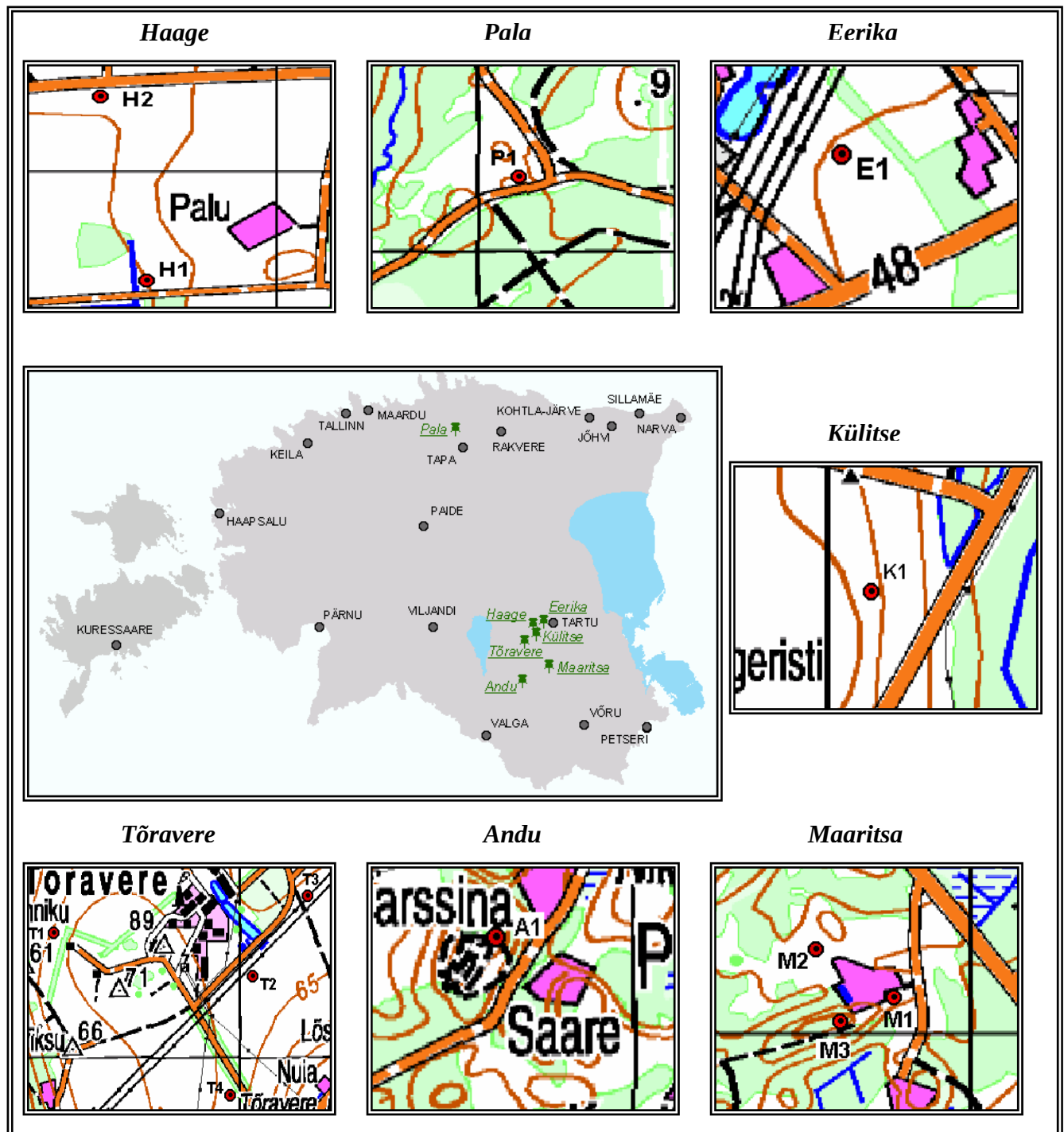
Kuna mulla kõvaduse väärtuste fikseerimisel oli käesoleva uurimistöös võimalik rakendada Alex'i penetromeetrit⁴, mille koonuse tipunurk (60°) erineb COE penetromeetri 30°-sest tipunurgast, siis tuli ligikaudsete kõvaduse teisenduse parameetrite leidmiseks läbi viia paralleelsed mõõtmised mõlema koonuse tüübiga. Lisaks Alex penetromeetri tehnilistest võimalustest tulenevalt ei olnud võimalik mõõta mulla kõvadusi 0 cm peal ehk koonuse sisenemisel mulda, samas oli võimalik koonilisi indekseid fikseerida meetodikas kirjeldatuga võrreldes suurema vertikaalse tihedusega – 5 cm sammuga. *Remolding* indeksi määramisel otsustati käeolevas uurimuses piirduda n-ö peeneteralistes muldades kasutatavat testi meetodikaga, kuna ka vastavas kirjanduses ei ole erinevatest töövõtetest tulenevaid RI väärtuste erinevusi välja toodud. Eksperimendiks rakendatavate katsemasinate valimisel lähtuti sellest, et oleks esindatud võimalikult erineva tüüpi murdmaastikul opereerivad liikumisvahendid.

5.2. Mõõtmiste kohad ja tingimused

Mõõtmised viidi läbi aastatel 2004–2007, kokku 7 geograafilises asukohas ning neid katsekohtasid võib lihtsustuse eesmärgil nimetada lähimate asulate nimede järgi – Tõravere, Maaritsa, Külitse, Eerika, Haage, Pala, Andu. Igas mõõtekohas omakorda valiti välja 1 kuni 4 erinevat füüsilist punkti mõõtmiste jaoks. Katsekohtade asukohad ning konkreetsete mõõtepunktide asukohad on esitatud (Eesti 1:50 000 kaitsevääkaardi taustal) joonisel 6. Mõõtekohtade üldised andmed mõõtmiste aja, maakasutuse, mulla ning niiskuse väärtuste kohta on toodud tabelis 11. Kuna osades mõõtmiskohtades puudusid võimalused niiskuse fikseerimiseks ning ka edaspidi võib kiire hinnangu andmiseks maastikul tekkida vajadus n-ö tunnetusliku niiskusseisundi määramiseks, siis anti selliste muldade niiskuselude kohta visuaalne või tunnetuslik hinnang – “kuiv,” “märg,” lähtudes seejuures aastaajast, mullal esinevatest veelompidest, sademetest ning üldistest ilmaoludest viimase paari päeva jooksul.

⁴ Koonuse tipunurk 60°, varda pikkus 71 cm, mõõdetavate väärtuste vahemik 0,2-10MPa.

Mõõtmised Palal, Andul, Haigel viidi läbi koos E. Nugisega (Eesti Maaviljeluse Instituut) ning suvisel ajal Eerikal koos J. Kuhtiga (Eesti Maaülikool).



Joonis 6 . Katsekohtade ja mõõtepunktide asukohad.

TABEL 11 . Katsekohad ja katsetingimused.

Katsekoht, aeg	Muld			Mahuline niiskus (%) erinevates mullakihtides, cm		Hinnan- guline niiskus- seisund
	Tüüp	Lõimis	Huumus- kiht (h) või metsa- kõdu (mk), cm			
Maaritsa						
M1 põld 18.03 '07	LPe	sl35/ls	h. 20	-		märg
M2 niidetav heinamaa 31.07 '04	E2o	ls	-	-		kuiv
M3 mets 31.07 '04	LkI	l	-	-		kuiv
Tõravere						
T1 põld 12.08 '04	LP	v ^o ₁ sl40-60 /v ^o ₁ ls ₁	h. 25-27	-		kuiv
T2 põld 9.11 '04	LP;KI (70;30)	v ^o ₁ sl- v ^o ₁ ls30-50 /v ^o ₁ ls ₁ ; v ^o ₁ ls ₁ +80	h. 20-24; h. 23-27	-		märg
T3 niidetav heinamaa 9.11 '04	LP	sl/ls; v ^o ₁ sl30-70 /v ^o ₁ ls ₁	h. 20-24; h. 23-27	-		märg
T4 jäätmaa 9.11 '04	LP; KI (70;30)	v ^o ₁ sl- v ^o ₁ ls30- 50/v ^o ₁ ls ₁ ; v ^o ₁ ls ₁ +80	h. 25-27	-		märg
Pala						
P1 looduslik heinamaa 24.08. '04 30.08. '04	LkIg	l	h.10-25	24 aug 37,8- 51,2%, keskm. 42,8%	30 aug 0-5 cm 38,9% 5-10cm 15,7% 15-20cm 13,7% 20-25cm 13,6% 25-30cm 12,1%	kuiv
Külitse						
K1 põld 9.11. '04	KIg	ls ₁	h.28-60	-		märg

Eerika						
E1 põld 23.08 '05	LP	v ^o ₁ sl40-80 /v ^o ₁ ls ₁	h. 25-27	0-15 cm	15,6%	kuiv
E1 põld 19.10 '05				15-30cm	11,4%	
				30-45cm	16,9%	
				45-60cm	9,8%	
E1 põld 19.10 '05				0-15 cm	14,8%	märg
				15-30cm	15,4%	
				30-45cm	14,2%	
				45-60cm	17,5%	
E1 põld 27.10 '05				0-15 cm	20,2%	märg
				15-30 cm	19,2%	
				30-45 cm	15,4%	
				45-60 cm	14,3%	
Haage						
H1 põld 25.06 '06	KIg	v ^o ₁ sl45/v ^o ₁ ls ₁ 40/v ₁ ls ₁	h.23-25	0-10cm	13,8%	kuiv
				15-25cm	14%	
H2 põld 25.06 '06	KI	v ^o ₁ sl30-60 /v ^o ₁ ls ₁ 20-50 /v ₁ ls ₁ (80-100	h.35	0-10cm	15,7%	kuiv
Andu						
A1 mets 13-14.10 '06	LkIe	sl	-	13 okt 5cm 13,7 15cm 7 30cm 4,2 35cm 2,9 45cm 3,2	14 okt 0cm 14,8%Vol 16cm 7,5%Vol	kuiv

5.2.1. Mõõtmised Maaritsas, Tõraveres, Haagel, Külitses

Nimetatud mõõtmiskohtades mõõdeti koonilised indeksid erinevate sügavustel penetromeetriga Alex kokku 2-6 korduses, ligikaudu 20x20 meetri suurusel muutumatute tingimustega alal. Haagel fikseeriti topside abil mahulised niiskuse väärtused.

5.2.2. Mõõtmised Palal koos labormääramistega Sakus

24. aug. 2004 a. viidi Pala mõõtmiskohas läbi katsed 3 erineva masinaga. Eksperimendis rakendatud masinate andmed on esitatud tabelis 12. Esmalt mõõdeti koonilised indeksid ALEX penetromeetriga iga 5 cm tagant tallamata maapinnal 10 korduses. Seejärel sõitsid samal alal masinad igaüks omas jäljes 50 korda edasi-tagasi

ning seejärel mõõdeti uuesti koonilised indeksid mõlemal pool jälge ja jälje sees. Kogu uuritavas mullaprofiilis määrati mahulised niiskused silindrite abil 3 korduses.

TABEL 12. Pala katsemasinate tehnilised andmed (BTR80, MAN, VW Iltise kasutusjuhendite ning mõõtmiste põhjal).

Tehnilised andmed	Masinad		
	BTR80 8x8	MAN 6X6	VW ILTIS
kasutuse tüüp	jalaväe transpordivahend lahinguväljal	veoauto	väikeste üksuste luuremasin
tühimass, Mg	13,6	11,7	1,435
teljekoormused	(teadmata)	3900 kg võrdselt	suurim 730 kg tagateljel
siserõhk, bar	8 x 2,2	1.telg - 4 2.telg - 4,5 3.telg - 5	4 x 3,2
staatiline surve, kPa	8 x 275	500 563 625	4 x 400
telgede arv	4	3	2
ratta diameeter, cm	113,2	122	73
ratta laius, cm	35	33	16,5
põhja kõrgus, cm	50	41,5	22
mootori võimsus, hp/t	19,12	27,35	35
transmissioon	mehaaniline	mehaaniline	mehaaniline

30. aug. 2004 viidi Eesti Maaviljeluse Instituudi laboris Sakus läbi modifitseeritud kujul *remolding* indeksi määramine. Võrreldes *remolding* testi n-ö standardse metoodikaga kasutati mulla mõjutamist 100 löögi asemel 50 löögiga. Katseteks kasutati 24. aug. mõõtekohast masinate jälje kõrvalt kogutud mulda kihtidest 0–20 cm ja 20–30 cm. Löökide andmine ning kõvaduse mõõtmine enne tallamist ning pärast tallamist viidi läbi 2 korduses. Vastavate kihtide mullaproovid paigutati silindrisse (pikkus 8,4 cm, diam. 6,2 cm) ning standardse tihendaja Proctori abil anti kukkuva raskusega ~ 30 cm kõrguselt mullale 50 lööki. Algselt iga löögi järel, seejärel juba iga 5 ja 10 löögi tagant mõõdeti joonlauaga mullakihi paksuse muutused. Lõpuks mõõdeti silindris tambitud mulla kõvadus penetromeetriga Alex.

5.2.3. Mõõtmised Eerikal

23. aug. 2005 viidi Eerikal läbi mulla klassifitseerimiseks USCS-i testkatsed, kooniliste indeksite ning *remolding* indeksi määramised. Mulla peenese määramised viidi E. Reintame poolt läbi kahes korduses 27.mai 2002. Lõimise määramisel eraldati üle 0,25 mm läbimõõduga fraktsioonid sõelte abil ning alla 0,05 mm fraktsioonid pipetimeetodil (Kitse *et al.*, 1976).

Plastilisuse ülem- ja alampiir mõõdeti ning plastilisuse indeks määrati autori enda poolt 2005. aastal. 7.okt. kihis tusedusega 0-26 cm ning 1 nov. kihis 26 cm ja sügavamalt neljas korduses. 15. nov. korraldati katseid kihtides 0–26 cm ja 26 cm-st sügavamal 3 korduses. Plastilisuste määramiseks kasutati Vassiljevi-Fjodorovi meetodi (Vipper, 1989).

Kooniliste indeksite määramised viidi läbi 23. aug., 19. okt. ja 27. okt. 2005 ja *remolding* test 19.okt. ja 27.okt. 2005. 23. aug. 2005 mõõdeti koonilised indeksid Alex penetromeetriga Jaan Kuht'i juhendataval Eesti Teadusfondi(ETF) granditeemaga nr 5418 seotud raske traktoriga mulla tallamisvariante sisaldavail põldkatsedel, kokku 16 korduses. Käesolevas uurimuses kasutati nende mõõtmiste keskmisi tulemusi. 19. okt. ja 27. okt. mõõdeti mulla kõvadused autori poolt penetromeetriga Alex vastavalt 2 ja 4 korduses ning tehti kindlaks *remolding* indeksi väärtused vastavalt WES meetodikaga määratletud kihtides. Seejuures 19. okt. mõõtmistel transporditi katemuld looduslikus olekus laborisse, kus viidi läbi ka tampimine. Indeksite leidmisel rakendati mikropenetromeetrit MB-2, mille koonuse tipunurk on 30°.

5.2.4. Mõõtmised Andul

13-14 okt. 2006 Andule korraldatud ekspeditsioonil mõõdeti koonilised indeksid 4 korduses ning fikseeriti *remolding* indeksid 2 korduses WES meetodikaga kihtides – 0-15 cm ja 15-30 cm. Tampimiseks kasutati silindrit (pikkus 8,35 cm, diam. 6,3 cm) ja standardset tihendajat Proctorit, mille puhul raskust lasti kukkuda ~30 cm kõrguselt. Määrati mahulised niiskused erinevates kihtides vastavate silindrite ja Moisture Meter HH2 Theta Probe type ML2x abil. Eraldi kõvaduse mõõtmised

korraldati üleminekuparameetrite leidmiseks 60° koonilt 30° koonusele ning selleks mõõdeti kõvaduse väärtused paralleelselt Alex ja ja MOBITECH penetromeetritega üksteise kõrval.

6. TULEMUSED

6.1. USCS eeskirja järgi mullatüübi määramine

Eerika katsekohas on Eesti mullakaardi järgi tegemist kahkja leetunud (LP) mullaga, mille lõimis on $v_{1sl40-80}^0/v_{1sl1}^0$ ja huumuse kihi tusedus 25-27 cm, mis vastab tabelis 10 toodud teisenduseeskirja põhjal SM või SM-SC mullale USCS-is. Vastava mulla määratud peenese mehaaniline koosseis on esitatud tabelis 13. Lisaks sellele - korese osakaal oli hinnanguliselt 7 %.

TABEL 13. Eerika katsekoha peenese mehaaniline koosseis.

Läbimõõt, mm	Fraktsioonid, %		
	1 kordus	2 kordus	Keskmine
1-2	1,4	1	1,2
0,5 – 1	5,1	6,7	5,9
0,25 – 0,5	13	17,9	15,45
0,1 – 0,25	30	26,2	28,1
0,05 – 0,1	12,5	12,2	12,35
0,02 – 0,05	13,6	11,6	12,6
0,005 – 0,02	15	14,3	14,65
0,002 – 0,005	4,45	6,45	5,45
< 0,002	4,95	3,75	4,35

Mõõdetud korese ja peenese osakaalud on esitatud USCS klassifikatsiooni järgi tabelis 14.

TABEL 14. Eerika katsekoha mulla fraktsioonid USCS järgi.

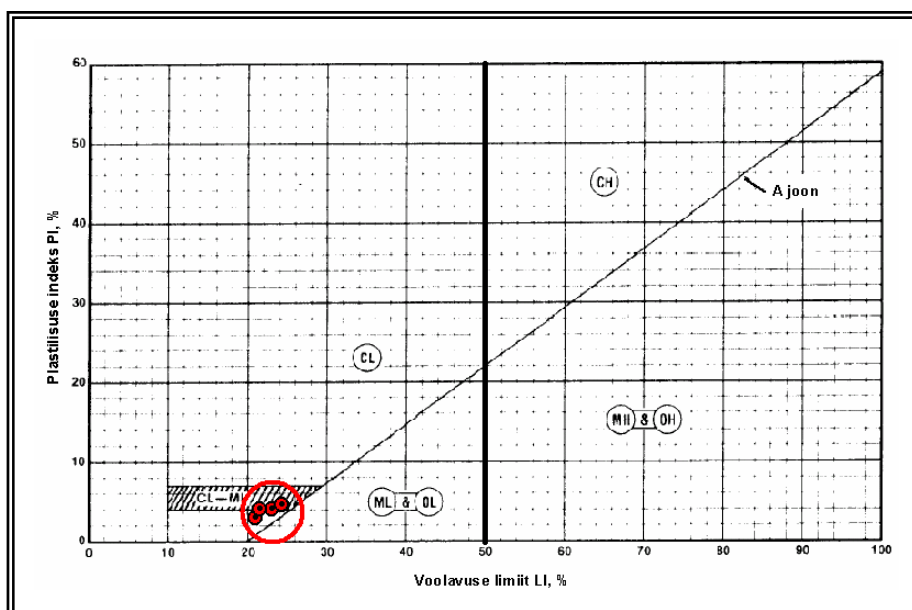
Fraktsioon	Osakaal
kruus	7%
liiv	58,6%
tolm, savi	34,4%

Lähtudes USCS klassifikatsioonist joonisel 1 - jämedateralist materjali oli üle 50% ehk kruusa ja liiva kokku 65,6%, milles liiva osakaal on suurem kui kruusa oma. Peeneteralist materjali on üle 12%. Seega mulla edasiseks klassifitseerimiseks tuli läbi viia plastilisus ülem- ja alampiiri katsed. Saadud tulemused on tabelis 15.

TABEL 15. Eerika katsekoha mulla plastilisuse ülem- ja alampiirid, plastilisuse indeksid.

Kiht, cm	7.okt. ja 1.nov. 2005 a. proovid			15. nov. 2005 a. proovid		
	Plastilisuse ülempiir, %	Plastilisuse alampiir, %	Plastilisuse indeks, %	Plastilisuse ülempiir, %	Plastilisuse alampiir, %	Plastilisuse indeks, %
0-26	24,24	19,73	4,51	21,78	18,62	3,16
26- ...	24,60	19,90	4,70	20,87	16,36	4,51

Joonisel 7 on esitatud saadud plastilisuse tulemsued USCS plastilisuse graafikul.



Joonis 7. Eerika katsekohas mulla plastilisuse ülempiir ja plastilisuse indeks USCS plastilisuse graafikul.

Jooniselt 7 on näha, et plastilisuse limiitide järgi paigutuvad katsetulemused CL-ML ja ML piirile ehk siis tegemist on SM või SM-SC mullaga USCS järgi. Seega antud mõõtmiste tulemused vastasid määratud eeskirja järgi klassifitseeritud mullale. Pealmises katsekihis huumuse tõttu suuremat plastilisuse väärtust võrreldes alumise kihiga antud mõõtmised ei näidanud.

6.2. Koonilise indeksi teisenduse parameeter 60°-selt koonuselt 30°-le koonusele

Andul läbiviidud paralleelsed kooniliste indeksite mõõtmiste tulemused penetromeetriga Alex ja MOBITECH on toodud tabelis 16. Saadud keskmist

teisenduse parameetrit 1,5 kasutati kõikide järgnevate Alex penetromeetriga mõõdetud kooniliste indeksite väärtuste korrutamiseks, et teisendada väärtused 30° koonile.

TABEL 16. Pala katsekohas mulla kooniliste indeksite väärtused MOBITECH ja ALEX penetromeetritega.

Mulla kiht, cm	I kordus			II kordus		
	Penetromeeter		Erinevus	Penetromeeter		Erinevus
	MOBITECH, MPa	Alex, MPa		MOBITECH, MPa	Alex, MPa	
0 - 10	0,81	0,90	0,9	1,36	0,90	1,51
10 - 20	5,56	3,33	1,67	4,33	3,07	1,41
20 - 30	9,69	6,63	1,46	8,74	6,50	1,34
30 - 40	10,00	7,03	1,42	10,00	7,07	1,41
40 - 50	9,30	6,00	1,55	9,92	6,40	1,55
50 - 60	7,64	4,23	1,81	8,14	4,87	1,67
60 - 70	5,36	3,40	1,58	6,76	4,20	1,61
			Keskmine 1,48			Keskmine 1,5

6.3. Mulla kõvaduse profiil erinevate maakasutusliikide puhul

Mulla kooniliste indeksite detailsemaks uurimiseks jaotati Eesti territooriumi mullad erinevatesse gruppidesse sõltuvalt maakasutusest. Gruppide eristamisel lähtuti eelkõige inim mõjutusest tulenevatest kõvaduse muutustest. Selle põhjal on jaotus järgmine:

- haritavad põllumaad;

Neid iseloomustab regulaarne tallamine masinate poolt, mille tulemusena on kõige rohkem tihendatud künnikihi alune mullakiht vahemikus 25–50 cm, nagu ka alalise taimkatte puudumine. Oluliselt mulla pealmiste kihtide kõvaduse vähendajana võib välja tuua esiteks kevadise mullaharimise, mis toimub valdavalt aprillis-mais ning mille optimaalne sügavus on 5-7 cm, vaatluste järgi aga 10-15 cm. Teiseks sügisene künd septembris-oktoobris, tavaliselt sügavuseni 22-25 cm, sügavkünni puhul 33-35 cm. Kündide vahepealsed kõvaduse mõjutused neil aladel on olenevalt kultuuride agrotehnikast ebaregulaarsed ja mõjutavad põhiliselt huumuskihi ülaosa (Lepajõe, 1992; Viil, 2003);

- Niidetavad heinamaad;
Võrreldes põllumaadega on need harvemini tallatavad alad, kus ülemised mullahorisonid on seotud pideva tiheda rohttaimede juurestikuga. Suurem kõvaduse muutus leiab aset juunis-juulis seoses heinateoga;
- Jäätmaad ja looduslikud heinamaad;
Viimastel aastatel või täielikult tallamata alad, mis on kaetud tiheda kõrge rohttaimestikuga;
- Metsad;
Regulaarselt tallamata maastik, ilma rohttaimestikuta, kuid maapinda tugevdavate puude juurtega.

Esimesed 2 maakasutuse gruppi on sellised, kus muldadel teatud tallamise ehk tihendamise foon on olemas. St et esmane *remolding* ühe või paari ülesõidu näol on juba toimunud. Ülejäänud alad on ilma regulaarse mõjutuseta.

6.3.1. Kõvaduse profiil haritavaal põllumaal

Tabelis 17 on esitatud mõõdetud andmed 5 erinevalt põllumaalt⁵. Esitatud kõvaduse väärtused on mõõdetud haritavatel maadel suvisel vähese mullaniiskusega ajaperioodil ja sügiskünni ning kevadise lumesula järel suurema niiskusseisundi juures. Maaritsa katsekoht iseloomustab kevadist väga märga seisu taimkatteta põllul; Külitse katsekoht suhteliselt värsket, pärast sügisküнди esinevat kõvaduseprofiili; Eerika 19.okt. mõõtmised varasemat ja 27.okt. hilisemat künnijärgset seisu; Tõravare 9.nov. aga talivilja külvamisjärgset situatsiooni.

⁵ Siin ja edaspidi on esitatud väärtused nii MPa-des kui psi-des. Esimest neist kasutatakse valdavalt nii Eestis kui mujal põlluharimisega seonduvas kirjanduses. Psi ühikud on kasutusel WES metoodikas ja sellega seonduvas kirjanduses. Tulemuste võrdluse eesmärgil esitatakse antud töös väärtusi mõlemates ühikutes. 1 MPa = 145,038 psi.

TABEL 17. Mulla koonilised indeksid haritavatel põllumaadel Maaritsas, Külitses, Haigel, Eerikal, Tõraveres.

Sügavus, cm	Mulla koonilised indeksid, MPa, (psi)								
	Maaritsa	Külitse	Haage		Eerika			Tõraveres	
	M1 märg, taimedeta 18.03	K1 märg, küntud 9.11	H1 kuiv, taimed 25.06	H2 kuiv, taimed 25.06	E1 kuiv, taimed 23.08	E1 märg, küntud 19.10	E1 märg, küntud 27.10	T1 kuiv, taimed 12.08	T2 märg, taimed 9.11
5	0 (0)	0 (0)	1 (145)	0,4 (55)	0,3 (42)	-	-	0,8 (116)	-
10	0 (0)	0 (0)	1,4 (203)	1,6 (232)	0,6 (83)	-	-	-	-
15	0 (0)	0 (0)	1,5 (218)	1,0 (145)	1 (145)	1,7 (247)	0,8 (109)	0,9 (130)	1,1 (160)
20	0 (0)	-	2,1 (305)	1,9 (276)	1,6 (227)	-	-	-	-
25	0 (0)	-	3 (435)	4,6 (667)	2,8 (408)	-	-	1,2 (174)	-
30	0,5 (72)	1,8 (261)	4,2 (609)	4,5 (653)	4,6 (663)	4,7 (682)	2,4 (348)	2,1 (305)	2,4 (348)
35	2,3 (333)	-	6 (870)	6,3 (914)	5,5 (802)	-	-	-	-
40	3,6 (522)	-	7,5 (1088)	5,6 (812)	6,4 (923)	-	-	3,6 (522)	-
45	4,2 (609)	3,3 (479)	8,4 (1218)	5,5 (798)	6,5 (941)	4,1 (595)	2,4 (348)	3,9 (565)	3,9 (566)
50	5,1 (740)	-	8,7 (1262)	5,6 (812)	6,7 (975)	-	-	-	-
55	-	-	-	-	-	-	-	4,1 (595)	-
60	4,4 (638)	3,9 (566)	-	-	-	4,2 (609)	3,2 (457)	-	3,8 (551)

Maaritsa põllul oli mõõtmiste hetkel tegemist hinnanguliselt väga märja niiskusseisundiga – paiguti esinesid põllul veelombid. Mulla kõvadused olid kuni 30 cm-ni 0 MPa ning sügavama suurenemisid järk-järgult 2-5 MPa. Teine mõõtekoht, kus vähemalt kuni 15 cm sügavuseni 0 MPa kõvaduseväärtused esinesid, olid Külitse põllul suhteliselt värskest pärast sügiskünni lõppu. Külitses kasutatud WES meetoodika väikese vertikaalse mõõtmistiheduse tõttu ei olnud võimalik kindlaks määrata 15 cm ja 30 cm vahele jääva vahemiku kõvadust. 30 cm juures olid kõvaduse väärtused juba 1,8 MPa ning sellest sügavamal - masinliikumise (künnitehnika jm.) toimest mõjutamata sügavuses, 3–4 MPa. Need väärtused on vastavuses ka “Eesti NSV mullastik arvudes” VI osa andmetele, kus paljude aastaste keskmistena on kobedas olekus (mulla niiskus seisundi juures 70–80% väliveemahutavusest) künnikihi

kõvadusena välja toodud 0,3 MPa. Künnikihi aluses kihis on mõõdetud suurused esitatud keskmistest mõnevõrra suuremad. Kogumiku järgi on keskmised rasketel muldadel alla 0,8 MPa ja kergetes muldades alla 1,2 MPa (Eesti NSV ..., VI).

Eerika 19. okt. ja 27. okt. mõõdetud kõvadused iseloomustavad sügist künnijärgset seisundi muutust ajaperioodil, kus toimub pidevalt mullaniiskus suurenemine – 0–15 cm kihis 14.8%-lt 20.2%-ni ja 15-30 cm kihis 15.4%-st 19.2%-ni. Sügavamal polnud niiskuse muutus märkimisväärne. Nende põhjal on märjas seisus mullal kõvadused 15 cm sügavuses alla 1 MPa, sügavamates kihtides 2-3,5 MPa. Kuivemas mullaseisundis on samadel sügavuselt väärtused ligi 2 MPa ja 4-5 MPa.

Juunis Haigel ning augustis Eerikal ja Tõraveres fikseeritud tulemused iseloomustavad suvist kuiva põllumaa kõvaduse profiili. Otse maapinna lähedases horisondis - 5 cm sügavusel tehtud mõõtmiste tulemused kõiguvad ilmselt tulenevalt masinaga mõjutamisest või looduslikust tihenemisest vahemikus 0,3-1 MPa. Sügavuse suurenedes kõvadused tõusevad kiiresti, olles 30 cm peal juba 4,5 MPa ja 45 cm peal 5-6 MPa. Tõraveres tehtud mõõtmised – hinnanguliselt kuivades oludes, näitavad aga, et väärtused võivad kuivas seisus ka tunduvalt väiksemad olla – vastavalt 2,4 MPa 30 cm juures ja 3,9 MPa 45 cm juures. Selliste väärtuste põhjenduseks võib aga olla ka vale hinnang niiskusseisundile. Haage esimese mõõtekohas silmapaistvalt suured kõvaduseväärtused võib ilmselt siduda umbes 40 cm-st sügavusel toimuva lähtekivimi omaduste muutustega – saviliiva all lasub kerge liivsavi.

Erinevustest põllul esinevate ratta rööpajälgede sees ja kõrval annab ülevaate tabel 18, kus on esitatud väärtused Haigel põllul, kus traktori ületused olid seotud ülekülvi läbi viimisega.

TABEL 18. Mulla koonilised indeksid jäljes ja jälje kõrval Haagel.

Sügavus, cm	Mulla koonilised indeksid MPa, (psi)	
	Jälje sees	Jälje kõrval
5	0,9 (130)	0,45 (65)
10	1,2 (174)	1,5 (217)
15	1,2 (174)	0,75 (283)
20	1,2 (174)	2,6 (377)
25	4,8 (696)	5 (725)
30	6 (870)	5,3 (769)
35	7,7 (1117)	7,1 (1030)
40	7,2 (1044)	6,5 (943)
45	8,1 (1175)	6 (870)
50	8,4 (1218)	6 (870)
55	8,4 (1218)	-
60	-	-

Haagel võib mulla seisundit, kus niiskuse väärtuseks mõõdeti kuni 16%, kuivadeks pidada. Nagu näha, ei mõjuta sellises kuivas seisus traktori 1 kui 2 kordsed ületused kuigi palju mulla kõvadust – erinevate kihtide lõikes pole võimalik välja tuua suuri erinevusi ning kõvadused on jälje sees isegi väiksemad kui jälje kõrval.

Eerikal mõõtmiskohas tekkinud kõvaduste muutust kirjeldab ka J.Kuhti ja E. Reintami poolt läbi viidud mõõtmised, kus 4,9 Mg ja 17,4 Mg traktorid sooritasid 2-6 kordseid sama jälge pidi ülesõite põllust. Suurimad kõvaduse muutused fikseeriti seal mulla sügavuse vahemikus 20-30 cm. Suurim muutus oli 17.4 Mg traktoriga, kus 6-kordsel ületusel muutus kõvadus 20 cm peal 1-st 7 MPa-ni. Seega olenevalt traktori massist võib kõvaduse muutus jälje sees põllul esineda või ka puududa (Kuht, 2004).

6.3.2. Mulla kõvaduse ennustamine niiskuse põhjal Eerikal

Võttes aluseks Eerika andmeid, kus ainukese mõõtekohana on fikseeritud koonilised indeksid ja mulla mahulised niiskused kokku kolmel erineval korral samas

mõõtmispunkti, saab rakendada uurimuses TM 3-331 määratletud kõvaduse ja niiskuse vahelise üldist seost (vt ptk 3.3), kus koonilise indeksi (CI) ja niiskuse (MC) vaheline suhe on kirjeldatud järgmiselt:

$$\ln CI = a + b (\ln MC)^6$$

Kasutades Eerika katsekohast kõige väiksema ja suurema niiskuses seisundi juures mõõdetud koonilisi indekseid kolmanda – keskmise niiskusesisalduse juures mõõdetud koonilise indeksi prognoosimiseks. 23. aug. mõõdeti niiskuse sisalduse 11,4% juures kihis 15-30 cm kõvaduseks 361 (psi) ning 27. okt. 19,2% juures 228 (psi). Nende väärtuste puhul arvutatud koefitsientide väärtused järgmised: $b = -0,88$ ja $a = 8$ ning valem esitatav kujul:

$$\ln CI = 8 - 0,88 (\ln MC)$$

Kolmanda mõõtmise andmeid - 19.okt. 2006 mõõdeti maastikul niiskuse väärtus 15,4% ja CI 3,2 MPa ehk 464 (psi). Kasutades toodud valemit, oleks ennustatavaks kõvaduseks 268 (psi) ehk 1,8 MPa, mis on märgatavalt väiksem kui maastikul mõõdetud kõvaduse väärtus. Vähesed arvud uurimistulemuste tõttu on hetkel siiski vastava valemi kasutatavusele raske ammendavat hinnangut anda ning edaspidi tuleks seda teha pikema-ajaliste mõõtmisriidade alusel.

6.3.3. Kõvaduse profiil niidetud heinamaal, jäätmaal ja looduslikul heinamaal

Tabelis 19 on toodud mõõdetud kõvaduste profiilid aktiivselt niidetavatelt heinamaadelt, sööti jäetud maalt ja looduslikult heinamaalt.

⁶ Vastav seos määratleti suure hulga mõõtmiste põhjal kihis 15-30 cm.

TABEL 19. Mulla koonilised indeksid erineva kasutusega heinamaadel Tõraveres, Maaritsas ja Palal.

Sügavus, cm	<i>Mulla koonilised indeksid MPa, (psi)</i>			
	Niidetav heinamaa		Jäätmaa	Looduslik heinamaa
	T3 Tõravere niidetud heinamaa, märg 9.11	M2 Maaritsa niidetud heinamaa, kuiv 31. 07	T4 Tõravere jäätmaa, märg 9.11	P1 Pala looduslik heinamaa, kuiv 30.08
5	-	0,9 (131)	-	1,5 (217)
10	-	-	-	3,5 (501)
15	0,9 (131)	2,1 (305)	0 (0)	4 (588)
20	-	-	-	4,2 (609)
25	-	3,2 (464)	-	5 (718)
30	3,9 (566)	3,9 (566)	1,2 (174)	5 (718)
35	-	-	-	5,1 (739)
40	-	4,7 (675)	-	5,1 (739)
45	4,5 (653)	4,6 (664)	2 (290)	5,3 (762)
50	-	5,6 (812)	-	5,4 (783)
55	-	-	-	5,2 (750)
60	4,5 (653)	-	2,3 (334)	

Niidetavatel ja looduslikel heinamaadel on muldade kõvadused maapinna lähedal valdavalt suuremad kui põlluna kasutatavatel maadel, kuna nende pealne kiht on suurema lasuvustihedusega ja väiksema poorsusega ning need mullad kuivavad suuremas ulatuses ning sügavamalt pikemaks perioodiks (Gregorich, 1992; Horn, 1992). Omaette osa on ilmselt ka taimejuurtel, mis tugeva kamara moodustavad mulla pealmises kihis. Ka tabelist 19 nähtub, et üldjoontes on haritavate heinamaade kõvaduse profiil suhteliselt sarnane põllumaadele, kuid pealmistes kihtides, 15 cm sügavusel on kõvadused suuremad. Silmapaistvalt suured on Pala looduslikul heinamaal mõõdetud kõvaduse väärtused, kus LkIg mullal oli 41% niiskuse juures juba 5 cm peal kõvadus väärtus 1,5 MPa ning 10 cm peal 3,5MPa, edasi stabiliseerus see juba 4-5 MPa peal.

Võrreldes muude rohumaadega olid väiksed kõvaduse väärtused Tõraveres jäätmaal, kus kuni 15 cm oli kõvadus 0 MPa ning ka sügavamates kihtides oli see märkimisväärselt väike. Vastavalt Gregorich'le (1992) ei muutu kolme aasta jooksul

harimata mullas kuni 5 cm sügavuseni oluliselt kõvaduse väärtused, 5-20 cm sügavuses on mõõdetud aga kõvaduse suurenemine ja pooride ruumi vähenemine. Antud katsemulla puhul polnud täpselt teada harimiseaja lõpetamine ning seega ei saa ka täpsemalt hinnata kõvaduse muutuse suurust (Gregorich *et al.*, 1992)

6.3.4. Kõvaduse profiil metsasel alal

Metsas läbi viidud mõõtmised – Maaritsas ja Andu metsas, jäid mõlemad hinnanguliselt kuiva mullseisundisse. Andu puhul on ka mõõdetud niiskuse väärtused 4,9%. Mõõtmiste tulemused on esitatud tabelis 20 .

TABEL 20. Mulla koonilised indeksid metsas Andul ja Maaritsas.

Sügavus, cm	Mulla koonilised indeksid MPa, (psi)	
	ANDU, A1	MAARITSA, M3
0-10	0,5 (77)	0 (0)
10-20	1,9 (273)	0 (0)
20-30	6,0 (867)	2 (290)
30-40	8,2 (1184)	2 (290)
40-50	9,3 (1355)	1,8 (254)
50-60	8,3 (1208)	1,2 (174)
60-70	6,2 (904)	-

Andu mõõtmiskoha puhul on sarnane kõvaduse profiil haritavate maade ning heinamaadega, Maaritsa metsas mõõdetud koonilised indeksid on nendest tunduvalt väiksemad. Ühe võimaliku põhjusena võib välja tuua metsatüüpide erinevuse ning sellest tingitud suure niiskuse seisundi erinevuse. Andu puhul oli tegemist hõreda männikuga kus esines vähesel määral alustaimestikku ning auramistingimused mulla pinnalt olid väga head. Maaritsa katsekohas kasvas tihe kuusik, kus osaliselt esines ka põõsarinnet ning ilmselt auramine mullalt oli tunduvalt väiksem kui hinnanguliselt eeldatud. Teiselt poolt, kuigi seda polnud märgitud mullakaardile, esines Maaritsas olulise tusedusega kõdukiht. Seega on metsade puhul kooniliste indeksite määramisel kriitilise tähtsusega nii niiskuse väärtuste mõõtmine kui ka kõdukihi tuseduse fikseerimine.

6.4. Mulla kõvaduse muutused mõjutamise tulemusena

6.4.1. Remolding indeksi väärtused märja mulla tingimustes Eerikal

Eerika põllul märgades tingimustes (19. okt. ja 27. okt. 2005.a.) mõõdeti esmalt mulla kõvaduse profiilid, et määratleda erinevate masinate jaoks kriitiliste kihtide asukohad. Kõvaduse profiilid on esitatud tabelis 21.

TABEL 21. Mulla koonilised indeksid märjas mullaseisundis Eerikal.

Sügavus	Kooniline indeks 19.okt., MPa, (psi)			Kooniline indeks 27.okt., MPa, (psi)				
	I kordus	II kordus	keskmine	I kordus	II kordus	III kordus	IV kordus	keskmine
15 cm	1,8 (261)	1,5 (217)	1,7 (247)	0,8 (116)	1,1 (159)	0,5 (73)	0,5 (73)	0,7 (102)
30 cm	4,2 (609)	5 (725)	4,7 (682)	2,3 (334)	2,7 (392)	1,8 (116)	2,7 (392)	2,4 (348)
45 cm	4,1 (595)	4,1 (595)	4,1 (595)	1,8 (261)	1,5 (217)	3,3 (479)	2,9 (421)	2,4 (348)
60 cm	5,3 (769)	3 (435)	4,2 (609)	2,4 (348)	3 (435)	5,7 (827)	1,8 (261)	3,2 (464)

Tabelist 21 nähtub, et nii keskmistes väärtustes kui üksikute korduste puhul esineb ebatavalist kõvaduse profiili - nii 45 cm ja 60 cm sügavusel on mõõdetud koonilised indeksid, mis on arvuliselt väiksemad kui nende kohal esinevad kooniliste indeksite väärtused. Seega otsustati *remolding* test läbi viia lisaks tavalistele kriitilistele kihtidele ka otseselt nende alla jäävates kihtides – 30-45 cm ja 37,5-52,5 cm. Tabelis 22 on toodud 19. okt. tulemused ning 27.okt tulemused on esitatud tabelites 23-25 täpsemalt – enne ja peale tampimist mõõdetud kõvaduse väärtustest, et anda täpsem ülevaade tampimise käigus toimunud muutuste ulatusest.

19. okt. pealmistes kihtides testi läbi viimine ebaõnnestus. Mulla transportimisel laborisse muutusid pealmised kihid liiga kobedateks, et saaks määrata mulla loomulikku tugevust enne tampimist.

TABEL 22 . Eerika remolding indeksi väärtused 19.okt. 2005.

Kiht	Remolding indeks	
	I kordus	II kordus
15-30 cm	1,13	-
22,5–37,5 cm	0,83	0,83
30–45 cm	0,91	1,13
37,5–52,5 cm	0,68	0,81

TABEL 23. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning remolding indeksi väärtused kihis 7,5-22,5 cm.

Sügavus, cm RI	Kooniline indeks kihis 7,5-22,5 cm, MPa					
	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale
0	0,54	0,78	0,29	0,72	0,38	0,70
2,5	1,13	0,43	0,44	0,72	0,50	0,66
5,1	1,60	0,43	0,35	0,62	0,46	0,70
7,6	1,11	0,76	0,67	1,05	0,52	0,70
10,2	0,60	0,99	0,68	1,31	0,41	0,54
RI	0,68		1,82		1,45	

TABEL 24. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning remolding indeksi väärtused kihtides 15-30 cm ja 22,5-37,5 cm.

Sügavus, cm	Kooniline indeks kihis 15–30 cm, MPa						Kooniline indeks kihis 22,5–37,5 cm, MPa					
	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale
0	0,31	1,25	0,5	1,36	0,36	1,01	0,42	0,84	0,48	-	0,52	0,54
2,5	0,46	0,53	0,5	0,68	0,92	0,76	0,74	0,76	2,14	2,55	0,44	0,54
5,1	0,5	0,7	0,43	1,23	0,54	0,52	0,84	0,75	2,43	1,23	0,95	1,42
7,6	0,43	0,62	1,16	1,9	0,5	1,01	1,17	0,68	1,05	1,36	0,95	1,81
10,2	1,23	0,54	1,11	1,11	1,28	1,36	1,11	0,44	1,31	0,88	1,36	1,11
RI	1,2		1,69		1,29		0,81		0,87		1,28	

TABEL 25. Eerikal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning *remolding* indeksi väärtused kihtides 30-45 cm ja 37,5-52,5 cm.

Sügavus, cm	Kooniline indeks kihis 30–45 cm, MPa				Kooniline indeks kihis 37,5–52,5 cm, MPa			
	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale
0	1,11	0,4	0,44	0,46	0,72	0,65	1,16	0,68
2,5	0,76	0,42	0,88	0,64	0,64	0,84	0,84	0,72
5,1	1,11	0,48	0,84	0,74	0,6	0,8	0,66	0,76
7,6	1,23	0,52	0,92	0,64	0,84	0,96	0,43	0,74
10,2	0,84	0,73	0,79	0,54	0,86	0,9	0,52	0,48
RI	0,5		0,78		1,13		0,94	

Esitatud tabelitest nähtub, et tampimise tulemusena muutus muld läbisegi erinevate kihtide sees nii nõrgemaks kui tugevamaks. Nii et ka keskmised RI väärtused toovad välja nii tugevnemist kui nõrgenemist samas kihis. Tabelis 26 väljatoodud keskmised väärtused kihtide kaupa illustreerivad mulla muutumist mõjutamise tulemusena maapinna lähedastes kihtides tugevamaks ning alates umbes 23 cm nõrgemaks, mis on iseloomulik just peeneteraliste muldade käitumisele mõjutamise tulemusena.

TABEL 26. *Remolding* indeksite keskmised väärtused erinevates kihtides Eerikal 19. okt. ja 27.okt.

Kiht, cm	<i>Remolding</i> indeks	
	19. okt	27.okt.
7,5-22,5	-	1,32
15-30	1,13	1,39
22,5-37,5	0,83	0,99
30-45	1,02	0,64
37,5-52,5	0,75	1

Võrdluse Eerikal fikseeritud RI väärtustega võib tuua uurimusest TM No 3-331, vt. tabel 27, kus kihis 15-30 cm mõõdeti RI väärtused erinevate niiskuse väärtuste puhul. Tegemist oli ligikaudu sarnase mehaanilise koostisega mullal – 60% liiva, 30% tolmu, 10% savi ehk USCS järgi peenest 49%.

TABEL 27. *Remolding* indeksi väärtused TM No 3-331 põhjal uurimiskohast nr 35.

Mahuline niiskus	Remolding indeks
18,4%	0,78
17,9%	0,31
17,5%	0,25
17,4%	1,01
17,3%	0,54

Tabelis esitatud väärtustest nähtub, et *remolding* indeksi väärtused ei ole jäigalt seotavad niiskuse väärtustega – suhteliselt sarnaste niiskusseisundite juures kõikus RI väärtus laiades piirides. Näiteks 17,4% juures on RI 1,01 ja 17,5% juures 0,25. Võrdluseks - Eerika mõõtmiste puhul oli samas kihis 19,6% niiskuse puhul *remolding* indeksi väärtus tunduvalt suurem - 1,39 (TM 3-331, 1971).

6.4.2. *Remolding* indeksi ja kokkusurutava mullakihi muutused väärtused kuiva mulla tingimustes Andul

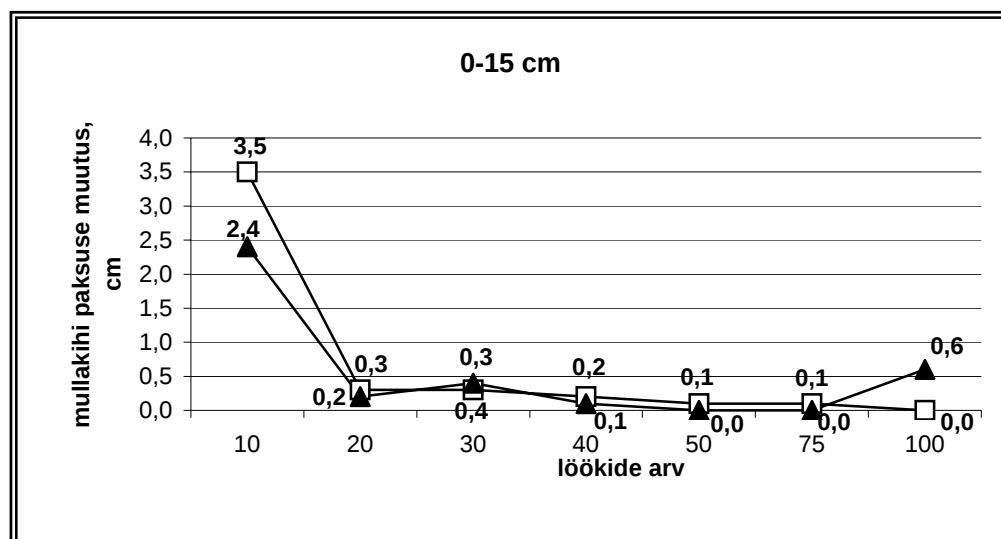
Andu metsas läbiviidud mõõtmiste puhul oli tegemist hinnanguliselt kuiva mulla seisundiga. Siiski pealmises kihis oli niiskuse väärtus suurem - 5 cm sügavusel ~14%, ning sügavamal juba tunduvalt väiksem, olles 7% ning vähem. Mõõdetud mulla koonilised indeksid näitasid olulist kõvaduse suurenemist sügavuse kasvuga, vt tabel 20. Seega viidi läbi *remolding* test kriitilises kihis 0-15 cm ning sellest ka 15 cm sügavamas kihis. Tabelis 28 on esitatud väärtused enne ja peale tampimist mõõdetud kõvaduste kohta.

TABEL 28 . Palal mõõdetud koonilised indeksid enne ja peale tampimist ning remolding indeksi väärtused kihtides 0-15 cm ja 15-30 cm.

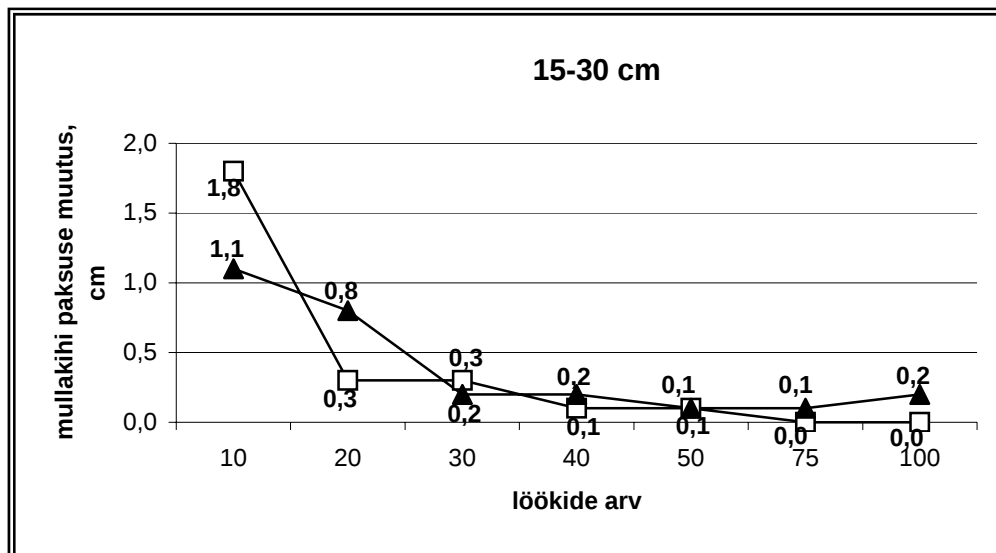
Sügavus, cm	Kooniline indeks kihis 0–15 cm, MPa				Kooniline indeks kihis 15–30 cm, MPa			
	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale	Enne	Peale
0	-	-	-	-	1,53	-	1,53	-
2,5	0,41	4,50	0,41	3,90	1,97	8,70	1,97	5,7
5,1	0,65	4,80	0,65	4,35	2,43	9,30	2,43	9
7,6	0,75	0,75	0,75	1,05	2,88	1,05	2,88	0,6
10,2	0,86	1,35	0,86	2,85	3,38	4,20	3,38	3,9
RI	4,3		4,6		2,2		1,8	

Võrreldes Eerika fikseeritud tulemustega, oli Palal pealmiste kihtide tugevnemine tampimise tulemusena tunduvalt suurem - Eerikal vastavalt pealmises kihis (7,5-22,5 cm) 1,32, siin aga 4,3-4,6. Ka 15 cm sügavamas kihis läbi viidud mõõtmised näitasid tugevnemise suurenemist tampimisel kuigi väiksemas mahu. Ilmselt võib pealmise kihi suuremaid muutusi tampimise tulemusena siduda huumusaine esinemisega, kuna see on suuremal määral kokkumpressitav kui ülejäänud mulla osakesed.

Lisaks kõvaduse muutuse fikseerimisele läbi viidud löökide andmise tulemusena kokkumpressitava kihi mõõtmised on toodud joonistel 8 ja 9.



Joonis 8. Andul mullakihis 0-15 cm löökidega kokkumpressitud mullakihi paksused 2 korduses.



Joonis 9. Andul mullakihis 15-30 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduses.

Võrreldes omavahel 2 erineva kihi muutusi löökidega mõjutamise käigus võib üldiselt välja tuua, et pealmine kiht on rohkem kokku pressitav kui alumine kiht – vastavalt keskmine kogumuutus 4,1 cm ja 2,6 cm. Seda asjaolu võib ilmselt siduda jällegi huumuse esinemisega pealmises kihis. Mõlema kihi puhul suruti esimese 10 löögiga kokku kõige suurem osa mullast (praktiliselt pool kogu muutusest) ja pealmises kihis oli muutus ligi 2 korda suurem kui alumises kihis. Seega praktiliselt mullale antud esimeste löökidega kirjeldatakse ära ligi pool kogu mullaga toimunud muutustest.

6.4.3. Pala katsekohta remolding indeksi väärtused ja kriitiliste kihtide asukohad

Pala katsekohas rakendati otseselt masina liiklusega kaasnevate muutuste määramiseks katsemasinaid BTR80, MAN, VW Iltis, mille tehnilised näitajad on esitatud tabelis 12, mille põhjal arvutati välja mobiilsuse indeksid ning masinate koonilised indeksid esimese ja viiekümne ületuse jaoks, need on esitatud tabelis 29.

TABEL 29. Katsemasinate MI, VCI₁, VCI₅₀ väärtused.

Masin	MI	VCI ₁	VCI ₅₀
BTR80	71,84	25,4	58
VW Iltis	81,9	27,4	62,4
MAN	86,5	28,4	64,2

Tabelis toodud andmetest nähtub, et katsemasinad on hoolimata oma erinevustest väga lähedaste väärtustega, mis puudutab mulla kõvaduse vajadusi. Suurima koonilise indeksi vajadusega on veoauto MAN, mille puhul võivad VCI vajadused kiiresti veelgi suuremaks osutuda näiteks koormuse laadimisel veoautole. Antud väärtused on määratud koormata masina juhtumil, nii nagu seda rakendati katsete käigus. Nimetatud katsemasinate 50 kordse ülesõitudega kaasnevatest muutustes mullas annavad ülevaated tabelid 30-32.

TABEL 30. Mulla koonilised indeksid enne veoauto MAN ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

Sügavus, cm	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)
	Jälje kõrval enne	Jälje kõrval peale		Jälje keskel enne	Jälje keskel peale		Jälje keskel enne	Jälje keskel peale	
5	1,2(174)	1,2(174)	0	2,3(333)	3,0(435)	0,7 (102)	1,2(174)	0,8(116)	-0,4(-58)
10	2,7(392)	2,9(421)	0,2(29)	4,4(638)	4,8(696)	0,4 (58)	2,3(333)	2,4(348)	0,1(15)
15	3,5(508)	4,7(682)	1,2(174)	4,4(638)	6,0(870)	1,6 (232)	3,2(464)	3,5(508)	0,3(44)
20	4,8(696)	5,3(769)	0,5(73)	5,1(740)	6,0(870)	0,9 (130)	3,6(522)	3,5(508)	-0,1(-14)
25	5,4(783)	4,5(653)	-0,9(-130)	5,0(725)	5,6(812)	0,6 (87)	3,8(551)	4,4(638)	0,6(87)
30	5,4(783)	3,8(551)	-1,6(-232)	5,1(740)*	5,7(827)	0,6 (87)	4,8(696)	5,3(769)	0,5(73)
35	5,4(783)	3,9(566)	-1,5(-217)	5,3(769)*	5,7(827)	0,4 (58)	5,1(740)	4,8(696)	-0,3(-44)
40	5,1(740)	4,8(696)	-0,3(-44)	5,3(769)*	6,0(870)	0,7 (101)	5,3(769)	3,5(508)	-1,8(-261)
45	5,0(725)	5,6(812)	0,4(87)	5,1(740)*	5,4(783)	0,3 (43)	5,3(769)	4,5(653)	-0,8(-116)
50	5,7(827)	5,7(827)	0(0)	5,0(725)*	6,0(870)	1 (145)	4,2(609)	5,7(827)	1,5(218)
55	5,3(769)	6(870)	0,7(101)	5,1(740)*	6,8(986)	1,7 (246)	5,1(740)		

* on toodud need väärtused, mida pole mõõdetud vaid välja arvatud naabermõõtmiste keskmisena

TABEL 31 . Mulla koonilised indeksid enne BTR80 ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

Sügavus, cm	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)
	Jälje kõrval enne*	Jälje kõrval peale		Jälje keskel enne*	Jälje keskel peale		Jälje keskel enne*	Jälje keskel peale	
5	1,2(174)	1,4(203)	0,2(29)	1,2(174)	4,4(638)	3,2(464)	1,2(174)	1,5(218)	0,3 (44)
10	2,7(392)	2,9(421)	0,2(29)	2,7(392)	5,9(856)	3,2(464)	2,7(392)	3,0(435)	0,3 (43)
15	3,5(508)	2,6(377)	-0,9(-131)	3,5(508)	6,0(870)	2,5(362)	3,5(508)	4,7(682)	1,2 (174)
20	4,8(696)	4,8(696)	0(0)	4,8(696)	6,0(870)	1,2(174)	4,8(696)	5,0(725)	0,2 (29)
25	5,4(783)	4,1(595)	-1,3(-188)	5,4(783)	5,3(769)	-0,1(-14)	5,4(783)	5,7(827)	0,3 (44)
30	5,4(783)	4,2(609)	-1,2(-174)	5,4(783)	5,4(783)	0(0)	5,4(783)	4,8(696)	-0,6(-87)
35	5,4(783)			5,4(783)	4,7(682)	-0,7(-101)	5,4(783)	5,0(725)	-0,4(-58)
40	5,1(740)			5,1(740)	4,5(653)	-0,6(-87)	5,1(740)		
45	5,0(725)			5,0(725)	3,8(551)	-1,2(-174)	5,0(725)		
50	5,7(827)			5,7(827)	4,7(682)	-1(-145)	5,7(827)		
55	5,3(769)			5,3(769)			5,3(769)		

* on toodud need väärtused, mida pole mõõdetud vaid välja arvatud naabermõõtmiste keskmisena

TABEL 32 . Mulla koonilised indeksid enne VW ILTISE ületusi ning 50 kordse ületuse järel jälje see ja jälje kõrval.

Sügavus, cm	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)	Koonilised indeksid, MPa, (psi)		Muutus, MPa, (psi)
	Jälje kõrval enne	Jälje kõrval peale		Jälje keskel enne	Jälje keskel peale		Jälje kõrval enne	Jälje kõrval peale	
5	0,8(116)	2,3(333)	1,5(217)	0,8(116)	3,6(522)	2,8(406)	1,2(174)	2,6(377)	1,4(203)
10	2,1(305)	3,0(435)	0,9(130)	2,1(305)	3,0(435)	0,9(130)	5,6(812)	4,2(609)	-1,4(-203)
15	3,5(508)	4,5(653)	1(145)	3,6(522)	4,8(696)	1,2(174)	5,1(740)	5,6(812)	0,5(72)
20	5,0(725)	5,9(856)	0,9(131)	3,8(551)	5,4(783)	1,6(232)	3,8(551)	5,9(856)	2,1(305)
25	5,0(725)	4,8(696)	-0,2(-29)	5,3(769)	6,0(870)	0,7(101)	5,6(812)	5,6(812)	0(0)
30	5,1(740)	5,9(856)	0,8(116)	5,6(812)	6,0(870)	0,4(58)	5,3(769)	5,7(827)	0,4(58)
35	5,3(769)	6,0(870)	0,7(101)	5,3(769)	5,9(856)	0,6(87)	5,6(812)	6,0(870)	0,4(58)
40	5,7(827)	5,6(812)	-0,1(-15)	5,3(769)	5,4(783)	0,1(14)	5,4(783)	6,2(899)	0,8(116)
45	6,0(870)	6,0(870)	0(0)	5,6(812)	5,1(740)	-0,5(-72)	5,3(769)	6,0(870)	0,7(101)
50	5,9(856)	6,0(870)	0,1(14)	5,9(856)	5,3(769)	-0,6(-87)	5,3(769)		
55					5,6(812)				

Tabelites 30-32 toodud väärtuste põhjal arvutati välja toimunud mulla kõvaduse muutus erineva metoodika käsitle juures. Juhul kui käsitleda antud mulda jämedateralise mullana, siis oleks kõikide katsemasinata jaoks kriitiliseks kihiks 0-15

cm, juhul kui peeneteralise mullana oleks kriitiline kiht VW Iltisele 7,5-22,5 cm ning BTR80 ja MAN 15-30 cm. Arvutatud mulla *remolding* indeksid masinate all erinevate käsitleste puhul on toodud tabelis 33.

TABEL 33 . Erinevates kihtides mõõdetud remolding indeksite väärtused.

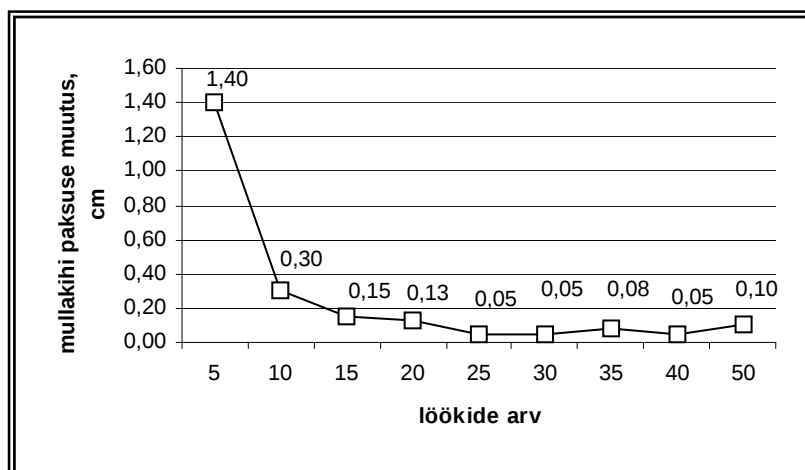
Masin	Ratta koormus, kg	Kriitilise kihi sügavus jämedateralises mullas, cm	RI jämedateralises mullas	Kriitilise kihi sügavus peeneteralises mullas, cm	RI peeneteralises mullas
BTR80	1700	0 – 15	2,2	15–30	1,19
MAN	1950	0 – 15	1,24	15–30	1,19
VW Iltis	365	0 – 15	1,75	7,5–22,5	1,21

MAN veoauto puhul nähtub tabelist 30, et kõige suuremad erinevused koonilise indeksi väärtustes on 15-20 cm sügavusel, kus muutuste väärtusteks on 1,6-0,9 MPa. Tabelis 33 esitatud *remolding* indeksite väärtustest selgub, et erinevused kahe erineva kriitilise kihi käsitle vahel on minimaalsed. BTR80 (vt. tabel 31) on põhjustanud liikumisega kõige suurema kõvaduse muutuse mulla pealmistes horisontides, kus kihtides 5-10 cm on kõvaduste vahe 3,2 MPa. Ka 15 cm peal on kõvaduse muutus suur - 2,5 MPa. Ka *remolding* indeksi puhul on antud masina puhul kõige suurem erinevus kahe erineva kriitilise kihi käsitle korral. VW Iltise jäljes (vt. tabel 32) on suuremad kõvaduse muutused 5 cm peal - 2,8 MPa ja 20 cm peal - 1,6 MPa, erinevused RI väärtustes erinevates kriitilistes kihtides on väikesed.

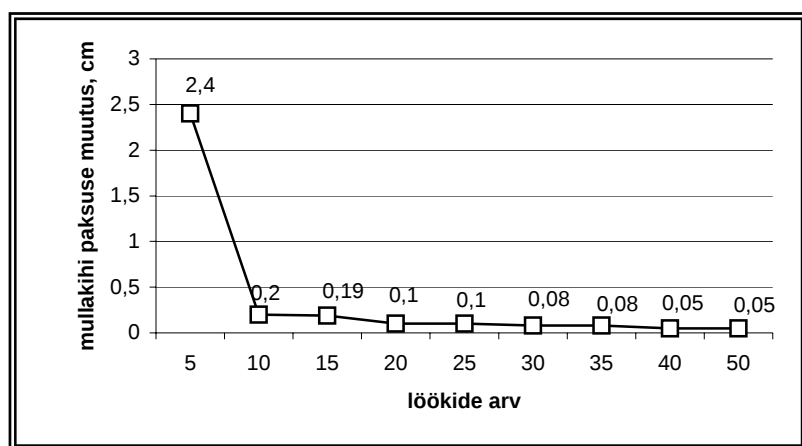
Seega tallamise tulemusena on kõikide masinate rööpajälgede sees mulla kõvadus suuremaks kujunenud ning esitatud andmetest selgub, et RI muutus summaarselt kõikide masinate kohta on suurim kihis 0 – 15 cm, mis on ka vastava meetodika põhjal katsemulla kriitiliseks kihiks. Kuigi väga suuri erinevusi ei saa välja tuua ka teise käsitle korral. Muutuste hindamiseks oleksid vajalikud ka väärtused otse mulla pinnal, mida Alex penetromeetriga mõõta ei saanud. Sügavamalt kui 30 cm antud tulemuste põhjal erinevusi pole mõtet otsida – katsemasinate mõju sügavamale ei ulatu. Rööbastest väljapoole jäävad alad on samuti masina liikumisest mõjutatud, kuid see tugevuse muutus ei ole ühesuuniline – muld on kihti nii tugevamaks kui nõrgemaks muutunud.

6.4.4. Pala katsete jätk - mulla kokkusurutavus ja kõvaduse väärtused laboritingimustes

Pala katsekohast kogutud mullaga 50 löögiga tampimise tulemusena, mis viidi läbi kahes korduses, fikseeritud mullakihi paksuse muutused, mis viidi läbi kahes kihis 0-20 cm ja 20-30 cm on toodud joonistel 10 ja 11.



Joonis 10 . Palal mullakihis 0-20 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduse keskmisena.



Joonis 11 . Palal mullakihis 20-30 cm löökidega kokkupressitud mullakihi paksused 2 korduse keskmisena.

Kahe korduse keskmisena suruti 0-20 cm kihis kokku 2,31 cm paksune ja 20-30 cm kihis 3,25 cm paksune mullakiht. Seega oli siin vastupidiselt Pala tulemustega

alumine mullakiht rohkem kokkusurutav kui pealmine. Mõlema kihi puhul suruti esimese 5 löögiga kokku enam kui pool kogu kokkupressitud kihist.

Võrdluseks kõvaduste muutused maastikul masinate liikumise tulemusena ja silindris pärast tampimist 50 löögi andmist on tabelites 34 ja 35.

TABEL 34 . Palal 0-20 cm kihi kõvaduse muutused maastikul ja silindris.

BTR80 jäljes pärast tallamist		Laboris pärast tallamist		MAN jäljes pärast tallamist		Laboris pärast tallamist	
Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa
5 cm	4,4	1 cm	1,5	5 cm	3	1 cm	3,9
10 cm	5,9	3 cm	5,4	10 cm	4,8	3 cm	5,7
		6 cm	5,9			6 cm	5,7

TABEL 35 . Palal 20-30 cm kihi kõvaduse muutused maastikul ja silindris.

BTR80 jäljes pärast tallamist		Laboris pärast tallamist		MAN jäljes pärast tallamist		Laboris pärast tallamist	
Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa	Sügavus	Kõvadus, MPa
20 cm	6	21 cm	4,5	20 cm	6	21 cm	3
25 cm	5,3	22,5 cm	6	25 cm	5,6	22,5 cm	6

Laboris tampimise tulemustest on näha, et pärast löökide andmist mõõdetud ning masinate liikumise järgsed kõvaduse väärtused on suhteliselt sarnased. Ehk siis antud katsemasinate liikumise tulemusena mullas aset leidnud kõvaduse muutused olid laboris modelleeritavad juba 50 löögiga. Seega võib eeldada nii kokkupressitava kihi paksuse muutusest 5 cm juures ja 50 löögiga toimunud tugevuse muutustest, et valdav osa liikluse tulemusena toimuvatest muutustest rööpajäljes leiab aset esimeste masinate ületuste jooksul.

7. ARUTELU

7.1. WES metoodikaga ületatavuse hindamine Eesti oludes

Masina ja mulla vastasmõju teoreetilise kirjeldamise ülevaade näitas, et *Waterways Experiment Station* metoodika käsitleb masinatega mulla ületusvõimalusi lihtsustatult. Ületatavuse määramiseks mõõdetakse mulla kõvadus koonilise indeksi näol, mis koondab mulla kandvuse ja nihketugevuse omadused ühte parameetrisse. Seetõttu ei ole metoodika rakendamisel võimalik järeldusi teha masina kinnijäämise põhjuste kohta – kas masina liikumise takistus on tingitud vähesest kandvusest või vähesest mulla nihke vastupanust. Samuti ei saa vastava metoodika abil mingeid järeldusi teha, masina liikumise seisukohalt murdmaasikul väga olulise aspekti kohta - mulda kujuneva rööpajale sügavuse ning sellest põhjustatud liikumise takistuse suuruse kohta.

WES metoodika ei käsitle masinate liikumisvõimalusi soomuldadel. Suure turbakihiga muldadel sõltub masinate liikumine eelkõige turvast katva taimkatte kihi kõvadusest ning selle kõvaduse määramiseks hinnatakse taimkatte liiki ja rakendatakse spetsiaalseid töövõtteid, mõõteriistasid (Shoop, 1993). WES metoodikas kirjeldatakse erinevaid lähenemisi ja töövõtteid sõltuvalt mulla üldisest kuuluvusest jämeda- või peeneteralise mulla gruppi või vormitavate liivade hulka, ning viimase puhul kahest äärmuslikust niiskusseisundist – märjast ja kuivast seisundist. Kuid käsitlust ei leia juhtumid, kus analüüsitava mulla profiili ulatuses on esindatud erinevate rühmade mullad või esinevad olulised erinevused mulla profiili niiskusseisundis. Näiteks, kui tegemist on turvastunud mullaga, mille pealmised horisondid koosnevad 10-20 cm ulatuses turbast ning mis lasuvad kruusa-liiva segul, siis metoodikas puudub käsitlus sellise mulla puhul kriitiliste kihtide valikuks. Sarnased raskused tekivad vormitavate liivade puhul juhtumitel kui pealmine mulla horisont on tunduvalt suurema niiskusega kui alumised horisondid – näiteks suviste suurte vihmasadude järel. Või ka vastupidisel situatsioonil – kui pealmised mulla horisondid on juba kuivanud ning alumised on tugevasti niisked ehk siis tüüpiline lumesula järgne situatsioon.

Valitud metoodika kasutamise seisukohalt on eriti oluline vahet teha jämedateraliste-, peeneteraliste ja voolitavate liivade gruppi kuuluvatel muldadel USCS

klassifikatsiooni järgi. Esmased mõõtmised maastikul kinnitasid väljatöötatud mulla teisenduse eeskirja paikapidavust üleminekuks Eesti mullakaardi jaotuselt USCSi. Siiski klassifitseerimise probleemid võivad tekkida esiteks liivade määratlemisel seoses jämeda tolmu osakaalu andmete puudusega, mistõttu need võivad kuuluda nii jämedateralise mulla kui vormitavate liivade hulka. Teiseks kerged ja keskmised liivsavid võivad kuuluda liiva osakaalu suure kõikumise tõttu nii vormitavate liivade kui peeneteraliste muldade hulka. Kolmandaks tolmuste saviliivade ning erineva raskusega tolmuste liivsavide plastilisuse limiitide kohta puuduvad andmed ei luba neid määratleda savisteks või tolmusteks peeneteralisteks muldadeks. Neljandaks, korese sisalduste puhul eristatud vahemik, kus korese sisaldus võib olla 30-50% luba sellise korses sisaldusega muldasid täpselt peeneteraliseks ega jämedateraliseks grupeerida.

WES meetoodika esmased rakendused Eesti territooriumil vormitavate liivade hulka kuuluval SM mullal ehk tolmusel liival kolme erinevat tüüpi katsemasinaga näitasid, et vastav meetoodika võimaldab prognoosida masinate liikumisvõimalusi siinsel murdmaastikul. Pala katsekohas, kus hinnanguliselt oli tegemist kuiva mulla seisundiga oli meetoodika põhjal kriitiliseks kihiks 0-15 cm kiht. Vastava kihi kõvaduseks mõõdeti 406 (psi). Ületusteks kasutatud masinate koonilised indeksid esimese ületuse jaoks jäid vahemikku 25,4-28,4 (psi). Seega oli mullal ennustuste kohaselt kriitilises kihis piisavalt kõvadust, et toetada kõikide masinate liikumist ning ka tegelikul liikumisel üle selliste muldade, ei tekkinud masinatel raskusi. 50 ületusvõimaluse määratlemiseks ei viidud täies mahus *remolding* testi läbi vastavas kriitilises kihis, vaid üldiselt 0-20 cm paksuses kihis, kus mulla tampimine 50 löögiga 100 asemel muutis mulla selgelt tugevamaks. Masinate koonilised indeksid vastava arvu ülesõitude jaoks olid vahemikus 58-64,2 (psi). Nii oli ennustuste kohaselt ka 50 ületuse jaoks mullas piisavalt kõvadust ning sellele vastasid ka reaalse ülesõitude tulemused.

WES meetoodika poolt määratletud kriitiliste kihtide vastavuse hindamist Pala katsekoha mulla tingimustele käsitleti eeldusega, et need peaksid olema masinate liikumise tulemusena mullas kõige rohkem mõjutatud kihid ehk nende kihtide kõvaduse muutus peab olema eristatav teistest kihtidest. Katsemasinate puhul Palal fikseeritud muutused enne masinate 50 kordset ületust ja pärast samas jäljes liikumist

näitasid suurima muutuse kihiks kõikide masinate puhul just meetoodikaga määratletud kriitilise kihi – vormitavate liivade hulka kuuluva SM mulla puhul kuivas seisundis 0-15 cm kihi.

Hindamaks üldiselt erineva arvu masinate ületuskordade mõju muutustele mullas, mõõdeti *remolding* testi puhul erineva arvu löökide andmise järel kokkupressitud mullakihi paksus. Andul ja Palal mõõdetud muutused kokkupressitava kihi paksusega tõid välja, et ligi pool kihi kokkusurumisest toimub esimeste löökide (5-10 löögi) järel ning järgnevatel löökidel on mulla tihendamisele väiksem mõju. Sellest võib üldjoontes järeldada, et juba esimestel masinate ületustel toimub praktiliselt suurem osa mulla muutustest. Samuti toetasid seda järeldust 50 löögiga mullas toimunud kõvaduse muutuse ja masinate all 50 ülesõidul toimunud kõvaduse muutused – vastavad väärtused olid praktiliselt võrdsed. Seega esmased mõõtmised näitavad, et *remolding* indeksi väärtusi võib rakendada ka esimeste masinate ületuste tulemusena aset leidvate muudatuste hindamisel.

7.2. Mulla kõvaduse keskmised väärtused ja nende varieerumine

Mõõtmised mulla kõvaduse väärtuste iseloomustamiseks valitud SM, SC, SM-SC näitemuldadel lubasid piiritleda järgmised keskmised väärtused erinevate kihtide lõikes: 0-15 cm vahemikus esinevad kõvaduse väärtused 0-4 MPa (0-588 psi), sügavuse suurenedes koonilise indeksi väärtused kasvavad olles 15-30 cm kihis 0-6 MPa (0-867 psi) ning sügavamal juba 1,2-8,33 MPa (174-1208 psi). Üldjoontes on tegemist normaalse kõvaduse profiiliga, kus sügavuse suurenedes kõvaduse väärtused kasvavad. Siiski märjas mullaseisundis mõõdeti 45 ja 60 cm sügavusel ka väiksemaid kõvaduse näitajaid, kui otseselt nende peal lasuvatel sügavustel. Seega märjas olekus võib olla tegemist ka ebatavalise kõvaduse profiiliga.

Võrreldes selliseid keskmisi mulla kõvaduse väärtusi tabelis 4 toodud militaarsete masinate kooniliste indeksite väärtusega, mis jäävad vahemikku 12-100 (psi) võib järeldada, et masinate liikumise takistuseks on vaid 0 (psi) lähedased kõvaduse väärtused. 0 (psi) kõvaduse väärtused esinesid põllumaadel, jäätmaadel ning metsas. Haritavatel põllumaadel olid vastavad 0 väärtused nii 15 cm kui 30 cm sügavusel

seotud suure mulla niiskuse või mulla harimise järgse seisundiga. Mõõdetud väärtuste põhjal võib modelleerida aastast keskmiste kõvaduse muutuse käiku nii nagu see on toodud tabelis 36.

TABEL 36. Mõõdetud keskmised koonilised indeksid vormitavatel liivadel haritavate põllumaade puhul sõltuvalt niiskusseisundist ning masina mõjutustest.

Sügavus, cm	Mulla koonilised indeksid MPa, (psi)			
	Lumesulajärgne märg mullaseisund	Suvine kuiv mullaseisund	Sügisene (kevadine) künnijärgne mullaseisund	Sügisene märg mullaseisund
5	0	0,3-1 (44-145)	0	
15	0	0,9-1,5 (131-218)	0 – 1,7 (0-986)	0,75 (109)
30	0,5 (72)	2,1-4,6 (305-667)	1,8-4,7 (261-682)	2,4 (348)
45	4,2 (609)	4-8,4 (580-1218)	3,3-4,1 (479-595)	2,4 (348)
60	4,4 (638)	4-8,4 (580-1218)	3,9-4,2 (565-609)	3,6 (522)

Sidudes mulla suure niiskuse seisundi agrokliimaatiliste teatmikes toodud keskmiste mullaniiskuse andmetega, võib öelda, et Eesti oludes on aprilli teisel dekaadil muld lumesulamise järel liigniiskes seisundis. Aprilli kolmandas dekaadis on aga tõenäosus üsna suur, et 30 cm on muld juba tahtenud. Tüüpiliste ja leostunud kamar-karbonaatmuldade valdkonnas ei esine mulla liigniiskust peaaegu üldse mai teisest dekaadist kuni septembri kolmanda dekaadini. Kamar-leetmuldade ja kamar-gleimuldadega põldudel esineb juba augustis liigniisket seisundit. Suvised ja sügisesed keskmised liigniisked päevad on juulikuus 4-7 päeva, august 5-8 päeva, september 5-12. Oktoobris muutub muld sageli jälle liigniiskeks (Eesti NSV agrokliimaatiline teatmik, 1962; Kivi, 1976).

Sööti jäetud maade puhul ei kujune esimese kolme aasta jooksul välja suuri erinevusi võrreldes haritavate maadega. Metsas võib samuti null väärtuste esinemise siduda mulla niiskuse väärtustega, kuid seal on ka oluline roll metsakõdu horisondil kui väga väikse kõvadusega kihil. Niidetavad ning looduslikud heinamaad on kogutud andmete põhjal piisava kõvadusega ületuste tegemiseks praktiliselt kogu aasta lõikes.

Mulla kõvaduse väärtustele on iseloomulik väga suur varieeruvus samal hetkel ja praktiliselt üksteise kõrval läbi viidud mõõtmiste puhul. Tabelis 37 on esitatud erinevates katsekohtades fikseeritud kooniliste indeksite väärtuste amplituudid.

TABEL 37. Kooniliste indeksite amplituudid mõõtekohtade kaupa.

Sügavus	Mulla kooniliste indeksite amplituud, MPa						Andu mets 13.10
	Pala mets 24.08	Külitse põld 09.11	Maaritsa		Eerika		
			heina- maa 31.07	mets 31.07	põld 19.10	põld 27.10	
5 cm	2,25	-	-	-	-	-	0,90
15 cm	1,95	0	1,20	0,30	0,30	0,60	1,86
30 cm	1,65	1,5	1,50	1,35	0,75	0,90	7,62
45 cm	1,20	1,2	2,10	0,90	-	1,80	4,14
55 cm	0,15	1,5	1,05	1,50	-	-	-
60 cm	-	-	-	-	2,25	3,90	-

Vastavad väärtuste kõikumised rõhutavad eriti vajadust määratleda ka sarnastes tingimustes keskmised kõvaduse väärtused võimalikult suure arvu mõõtmiste põhjal.

Üldjoontes võib öelda, et vormitavad liivad on tugevad mullad, kus on valdavalt piisavalt kõvadust igasuguste militaarmasinade ületuseks. See kõvadus võib aga sõltuvalt niiskuse seisundi kiirest muutustest, näiteks suuremate vihmasadude järel, tugevasti väheneda. Kuigi selleks, et oluliselt muutuks ületatavuse tingimused ka kõige kergematele masinatele, peab vähemalt kuni 23 cm mullakiht väga märjaks muutuma – vastavalt WES metoodikale kandub niiskuse suurenemisega masina liikumise toetamine edasi 0-15 cm kihist 7,5-22,5 cm kihti. Kogutud andmete põhjal võib öelda, et mida sügavamal asub masina jaoks kriitiline kiht, seda ühtlasemad on liikumisvõimalused kogu aasta lõikes. Näiteks masinate puhul, mille kriitiline kiht asub märjas seisundis mullas vahemikus 22,5-37,5 cm, saavad oma esimese ületuse teha igasuguse niiskuse seisundi puhul. Vastava kihi kõvadust võib olulisel määral nõrgendada vaid sügavküünd. Pealmistes horisontides on kõvaduse väärtused palju suurema kõikumisega.

Võrreldes mõõdetud mulla kõvaduse väärtusi WES poolt piiritletud keskmiste tulemustega tabelis 3, kus näiteks kõrge topograafiaga märgades tingimustes oli

kõvaduste vahemik 0,88-1,59 MPa, saadi Eestis samades tingimustes väärtuste vahemikuks 0-4,5 MPa. Et välistada erinevate penetromeetrite koonuse mõõtmist tulenevaid erinevusi, oleks soovituslik tulevikus WES metoodikaga ületuste tegemise hindamisel kasutada vastavat COE penetromeetrit. Mulla kõvaduse profiili paremaks iseloomustamiseks on parem kasutada tihedamat mõõtmiste sammu kui fikseeritud metoodikas – st kooniliste indeksite väärtusi fikseerida iga 5 cm tagant metoodikas pakutud 15 cm asemel.

7.3. Remolding indeksi väärtused

Läbi viidud üksikud *remolding* testid tõid välja, et vormitavad liivad muutuvad tallamise või mõjutamise tulemusena pigem tugevamaks kui nõrgemaks. Nõrgemaks võivad mõjutamisel kujuneda suures niiskusseisundis sügavamad kihid – alates 23 cm-st. Lähtudes aga uurimuses TM No 3-331 esitatud *remolding* indeksi väärtustest erineva niiskuse sisalduse juures, ei tohiks RI väärtuste kõikumist ainult niiskusega siduda. Seega laiemaulatuslike otsuste tegemiseks nendest üksikutest katsetest ei piisa. Kuna vastavates kihtides on eeltoodu põhjal piisavalt kõvadust, siis masinate ületuste tulemusena ei muutu algne kõvadus nii palju, et see järgnevate masinate liikumisele takistuseks osutuks.

Mulla tampimise katsed Palalt 100 löögi asemel 50 löögiga tõid välja, et selliste löökide arvuga on võimalik saavutatavad sama suuri kõvaduse väärtusi kui masinate 50 ületuskorra järel sama jälge pidi maastikul. Vähemalt antud raskusega ning tehniliste omadustega masinate jaoks piisas 50 löögist. Eraldi tuleks selgitada vastavaid seoseid ka raskemate masinatega, mille oodatav mõju mulla kõvadusele on ulatuslikum.

Kokkuvõte

Käesolevas uurimistöös käsitleti terramehaanika valdkonda kuuluvat WES muldade ületatavuse määramise metoodikat, mis lubab hinnata militaarsete masinate liikumisvõimalusi murdmaastikul. Teoreetiliste masina-mulla vastasmõju lähtealuste selgitamine tõi välja, et vastav metoodika käsitleb masinate ületusvõimalusi lihtsustatud kujul, toomata välja masina seisma jäämise põhjuseid ning ennustamata rööpajälgede kujunemist mulda. See asjaolu teeb ühelt poolt metoodika rakendamise lihtsaks ja kergesti mõistetavaks, teiselt poolt piiritleb selle rakendamise võimalusi empiirilisel määratletud masinate ja keskkonna jaoks.

Läbiviidud esmaste mõõtmiste põhjal võib öelda, et WES metoodika sobib masinatega mullal liikumisvõimaluste iseloomustamiseks Eesti oludes. Siiski ei ole metoodikas piisava detailsusega määratletud kõikide Eestis esinevate mulla tüüpide puhul ja erinevate niiskusseisundi juures ennustuste tegemine. Eestis valdavalt levinud mullad - tolmused ja savised liivad (USCS järgi vastavalt SM, SC ja SM-SC), kuuluvad nn vormitavate liivade gruppi, mis juba iseenesest komplitseerib ületatavuse prognoosimist. Sõltuvalt mulla niiskusseisundist muutuvad masinate ületusi toetavate kihtide asukohad. Kuivas seisundis on see otse maapinnal 15 cm ulatuses, märjas seisundis aga sügavamal, sõltudes konkreetse masina massist.

Esmased mõõtmised sellistel enamlevinud muldadel külmumata seisundis tõid välja, et üldjoontes on neil piisavalt kõvadust militaarse tehnika ületusteks. Suuremad liikumisprobleemid tekivad seoses kevadise ja sügisese suurema mullaniiskusega pärast lumesulamist ja enne lumetulekut ning otseselt põldudel mulla harimise järgsel perioodil. Ka suvel, kui muld on üldjoontes kuivas seisundis, võib sademetest tingitud suur niiskuse suurenemine aga otsustavalt muuta liikumistingimusi lühikese ajavahemiku jooksul, mõjutades sellega eelkõige kergemate masinate kinnijäämist murdmaastikul. Läbiviidud mõõtmised tõid välja, et ka mitme masina liikumine samas jäljes ei muuda oluliselt liikumistingimusi halvemaks.

Kasutatud kirjandus

Raamatud:

- Eesti NSV agrokliimaatiline teatmik, 1962. Hüdrometeoroloogia teenistuse peavalitsus NSV Liidu Ministrite Nõukogu juures, Tallinn. lk 39-43.
- Eesti NSV mullastik arvudes, 1974. (Koost. Kokk, R., Rooma, I) Eesti NSV Põllumajanduse Ministeeriumi Teaduslik-Tehnilise Informatsiooni Valitsus, Tallinn. lk 92.
- Eesti NSV mullastik arvudes, II, 1978. (Koost. Kokk, R., Rooma, I) Eesti NSV Põllumajanduse Ministeeriumi Informatsiooni ja Juurutamise Valitsus, Tallinn. lk 80.
- Eesti NSV mullastik arvudes, III, 1983. Põllumajanduse Ministeeriumi Informatsiooni ja Juurutamise Valitsus, Tallinn. lk 92.
- Eesti NSV mullastik arvudes, IV, 1985. Eesti NSV Agrotööstuskoondise Info- ja Juurutusvalitsus, Tallinn. lk 73.
- Eesti NSV mullastik arvudes, V, 1985. Eesti NSV Agrotööstuskoondise Info- ja Juurutusvalitsus, Tallinn. lk 89.
- Eesti NSV mullastik arvudes, VI, 1987. Eesti NSV Agrotööstuskoondise Info- ja Juurutusvalitsus, Tallinn. lk 52.
- Bekker, M.G., 1960. Off-the-road locomotion. Research and development in terramechanics. pp 220.
- Bekker, M.G., 1969. Introduction to terrain-vehicle systems. Part I: The Terrain. Pp 378.
- FM 34-130, 1994. Intelligence Preparation of the Battlefield. Headquarters, Department of the Army. Washington, DC, 8 July 1994.
- FM 5-410, 1992. Military Soil Engineering. Headquarters, Department of the Army. Washington, DC, 23 December 1992.
- FM 5-530, 1987. Materials Testing. Headquarters, Department of the Army. Department of the Navy. Department of the Air Force. Washington, DC, 17 August 1987.
- Kitse, E., Oja, A., 1974. Mineraloogia ja petrograafia praktikum. Eesti Põllumajanduse Akadeemia, Tartu. lk 126.
- Kivi, K. (Koost), 1976. Eesti NSV agrokliima ressursid. Eesti NSV Hüdrometeoroloogiateenistuse Valitsus, Tatu. lk 70-83.
- Kõlli, R., Lemetti, I., 1999. Eesti muldade lühiiseloostus. I. Normaalsed mineraalmullad. Eesti Põllumajandusülikool. Mullateaduse ja agrookeemia instituut, Tartu, lk 122.
- Lillema, A., 1958. Eesti NSV mullastik. Tallinn. lk 199.
- Muro, T., O'Brien, J., 2004. Terramechanics. Land Locomotion Mechanics. pp 277.
- Nugis, 2004. Teoreetilised lähtealused muldade tallamisel ja tallatavuse hindamisel. Rmt: Kuidas vältida tootlike masintehnoloogiate negatiivset tallamismõju mullale? lk 15-42.
- Raukas, A., (Koost.), 1995. Eesti loodus. Tallinn. lk 432-433.
- Reintam, L. (Koost.), 1962. Mullateadus. Tallinn. lk 407.
- Sprivil, A. 2004. An Investigation into Modelling the Effects of Frozen Surfaces Military Vehicle Trafficability. Cranfield University. pp 68.
- Terry, T.W., Jackson, S.R., Ryley, C.E.S., Jones, B.E., Wormell, P.J.H., 1991. Fighting Vehicles. Land Warfare: Brassey's New Battlefield Weapons Systems and Technology Series. Volume 7. pp 315.
- Vipper, H., 1989. Maaviljeluse praktikum. Tallinn. lk 359.

Wong, J.Y., 1989. Terramechanics and Off-Road Vehicles. pp 251.

Artiklid:

- Biass E.H., Richardson D., 2003. Time for Shifting Gears. In: Armada 6. pp 33-70.
- Bianchi, F., 2002. Off-Road Mobility: Problems & Solutions. In: Military Technology 6. pp 141-150.
- Gregorich, E.G., Reynolds, W.D., Curnoe, W.E., 1992. Hydraulic properties of a structurally degraded soil under no-tillage. In: International Conference Soil Compaction and Soil Management. 8-12 june 1992 Tallinn. Estonia. Proceedings. pp 45 – 49.
- Godefroid, S., Koedam, N., 2004. Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. In: Biological Conservation 119. pp 207-217.
- Herl, B.,K., Doe, W.,W., Jones, D.,S, 2005. Use of military training doctrine to predict patterns of maneuver disturbance on the landscape. I. Theory and methodology. In: Journal of Terramechanics 42. pp 353-371.
- Hetherington, J.G., 2001. The applicability of the MMP concept in specifying off-road mobility for wheeled and tracked vehicles. In: Journal of Terramechanics 38. pp 63-70.
- Hetherington, J.G., White, J.N., 2002. An investigation of pressure under wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 39. pp 85-93.
- Hohl, G.H., 2006. Military terrain vehicles. In: Journal of Terramechanics 44. pp 23-34.
- Horn, R., 1992. Structure effect on strength and stress distribution in arable soils. In: International Conference Soil Compaction and Soil Management. 8-12 june 1992 Tallinn. Estonia. Proceedings. pp 8–22.
- Jones, R., Horner, D., Sullivan, P., Ahlvin, R., 2005. A Methodology for quantitatively assessing vehicular rutting on terrains. In: Journal of Terramechanics 42. pp 245-257.
- Kuht, 2004. Mulla tallamise agrobioloogilised aspektid. Rmt: Kuidas vältida tootlike masintehnoloogiate negatiivset mõju mullale. Saku. lk 43-79.
- Lepajõe, 1992. Natural loosening of compact soil. In: International Conference Soil Compaction and Soil Management. 8-12 june 1992 Tallinn. Estonia. Proceedings. pp 182–183.
- Lessem, A., Mason, G., Ahlvin, R., 1996. Stochastic vehicle mobility forecasting using the NATO Reference Mobility Model. In: Journal of Terramechanics 33. pp 273-280.
- Maclaurin, B., 2007. Comparing the NRMM (VCI), MMP and VLICI traction models. In: Journal of Terramechanics 44. pp 43-51.
- Nugis, E., 1998. Complex assessment of the agrotechnical bearing capability of soil. In: Field Technologies & Environment. The International Conference Lithuanian Institute of Agricultural Engineering Raudondvaris, 24-25 September 1998 Proceedings. pp 73-79.
- Priddy, J.D., Willoughby, W.E., 2006. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. In: Journal of Terramechanics 43. pp 85-96.
- Raper, R.L., 2005. Agricultural traffic impacts on soil. In: Journal of Terramechanics 42. pp 259-280.
- Schäffer, B., Stauber, M., Müller, R., Schulin, R., 2006. Compaction-Induced

- Changes in Macro-Pore Structure of Restored Soil. In: Soil Management for Sustainability. Advances in Geoecology 38. pp 31-37.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Tøgersen, F.A., Arvidsson, J., Keller, T., 2006. Distribution of Vertical Stress at the Soil-Tyre Interface: Effects of Tyre Inflation Pressure and the Impact on Stress Propagation in the Soil Profile. In: Soil Management for Sustainability. Advances in Geoecology 38. pp 38-46.
- Shoop, S., Affleck, R., Collins, C., Larsen, G., Barna, L., Sullivan, P., 2005. Maneuver analysis methodology to predict vehicle impacts on training lands. In: Journal of Terramechanics 42. pp 281-303.
- Smith, C.W., Johnston, M.A., Lorentz, S., 1997. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. In: Geoderma 78. pp 93-111.
- Suvinen, A., 2006. A GIS-based simulation model for terrain tractability. Journal of Terramechanics 43. pp 427-449.
- Vennik, K., 2003. Sõjageograafia aine ja Eestimaa sõjageograafia 1920. aastatel. KVÜÕA toimetised 2/2003. lk 85-101.
- Wong, J.Y., 1994. On the role of mean maximum pressure as an indicator of cross-country mobility for tracked vehicles. In: Journal of Terramechanics 31. pp 197-213.

Interneti allikad:

- Barton, P.C., Bennet, M.D., Hall, L.C., Hetherington., 2000. Wheels and Tracks Study (10 – 25 Ton Armoured Fighting Vehicles). Report No. RMCS/ESD/PCB/266/00 March 2000. Engineering Systems Department Royal Military College of Science Shrivenham. pp 246.
<http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA383183&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> (15.05.2007)
- FM 5-33, 1990. Terrain Analysis. Headquarters, Department of the Army Washington, DC, 11 Juli 1990. <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-33/index.html> (12.05.2007)
- FM 5-430-00-1, 1994. US Army. Planning and design of roads, airfields, and heliports in the theater of operations – road design. VOL I. Headquarters, Department of the Army. Department of the Air Force. Washington, DC, 26 August 1994.
<http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-33/index.html> (12.05.2007)
- FM 3-34.230, 2000. Topographic Operations. Headquarters, Department of the Army Washington, DC, 3 august 2000. <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-34-230/index.html> (11.05.2007)
- Herrick, J., E, Jones, T., L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. In Soil Science Society of America 66. pp 1320-1324.
<http://soil.scijournals.org/cgi/content/full/66/4/1320?maxtoshow=&HITS=10&hits=10&RESULTFORMAT=&author1=Herrick&andorexacttitle=and&andorexactitleabs=and&andorexactfulltext=and&searchid=1&FIRSTINDEX=0&sortspec=relevance&resourcetype=HWCIT> (11.05.2007)
- Maa-amet, 2001. Vabariigi digitaalse suuremõtkavalise mullasiku kaardi seletuskiri. Tallinn 2001. http://www.maaamet.ee/docs/kaardid/mullakaardi_seletuskiri.pdf (11.05.2007)

- MIL-T-89304, 1990. Military specifications. Tactical terrain analysis data base (TTADB). Scale 1:50,000. http://earth-info.nga.mil/publications/specs/printed/89304/89304_TTADB.pdf (03.05.2007)
- Mullakaardi legend, 2003. <http://www.maaamet.ee/docs/kaardid/mullalegend.pdf> (17.05.2007)
- SaariLahti, 2002. Soil interaction model. Appendix report No 5. Modelling of the wheel and tyre. 1. Tyre and soil contact. <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/appendix5.pdf> (2.05.2007)
- Shoop, S., A., 1993. Terrain Characterization for Trafficability. http://www.crrel.usace.army.mil/techpub/CRREL_Reports/reports/CR93_06.pdf (18.05.2007)
- TM 3-331, 1971. US Army Engineer Waterways Experiment Station. Forecasting trafficability of soils. Report 10. Relations of strength to other properties of fine-grained soils and sands with fines. <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD728814&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> (12.05.2007)
- Wikepeida1. Unified Soil Classification System. http://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Soil_Classification_System (17.05.2007)
- Wikepeida2. Bentonit. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bentonite> (5.05.2007)
- Viil, P., 2003. Teraviljakasvatataja kevadtööstest põllul. 04.02.2003. <http://www.pikk.ee/274/z0zARTICLEy311.html> (01.05.2007)

LISA 1. RATAS- ja ROOMIKMASINATE MOBIILSUSE INDEKSI (MI) ARVUTUSVALEMID

1. Roomikutega masinate MI arvutamise valem

MI=

$$\left(\frac{\left(\begin{matrix} \text{kontakt} \\ \text{surve} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{kaalu} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right)}{\left(\begin{matrix} \text{roomiku} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{roomiku} \\ \text{hamba} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right)} + \left(\begin{matrix} \text{roomiku} \\ \text{ratatste} \\ \text{kogumi} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{põhja} \\ \text{kõrguse} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right) \right) \times \left(\begin{matrix} \text{mootori} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{trasmissiooni} \\ \text{faktor} \end{matrix} \right),$$

kus

$$\text{kontakt surve faktor} = \frac{\text{kogu kaal (lbs)}}{\text{maapinnaga kontaktis olevate roomikute pindala (in}^2\text{)}}$$

kaalu faktor:

vähem kui 22 680 kg	= 1
22 680–31 751 kg	= 2
31 752–45 359 kg	= 3
45 360 kg või suurem	= 4

$$\text{roomiku faktor} = \frac{\text{roomiku laius, in}}{100}$$

roomiku hamba faktor:

roomiku hambad väiksemad kui 3,8 cm	= 1,0
roomiku hambad suuremad kui 3,8 cm	= 1,1

roomiku rataste kogumi faktor =

$$\frac{\text{kogu kaal (lb)} / 10}{(\text{maapinnaga kontaktis olevate roomiku rataste kogumi arv}) \times (\text{roomiku plaadi pindala (in}^2\text{)})}$$

$$\text{põhja kõrguse faktor} = \frac{\text{põhja kõrgus (in)}}{10}$$

mootori faktor:

≥ 10 hj/t	= 1,0
< 10 hj/t	= 1,05

trasmissiooni faktor:

hüdrauliline	= 1,0
mehaaniline	= 1,05

2. Ratastega masinate MI arvutamise valem

MI

=

$$\left(\frac{\left(\frac{\text{kontakt}}{\text{surve}} \right) \times \left(\frac{\text{kaalu}}{\text{faktor}} \right)}{\left(\frac{\text{rehvi}}{\text{faktor}} \right) \times \left(\frac{\text{keti}}{\text{faktor}} \right)} + \left(\frac{\text{rehvi}}{\text{faktor}} \right) - \left(\frac{\text{põhja}}{\text{kõrguse}} \right) \times \left(\frac{\text{mootori}}{\text{faktor}} \right) - \left(\frac{\text{transmissiooni}}{\text{faktor}} \right) \right),$$

kus

$$\text{kontakt surve faktor} = \frac{\text{kogu kaal (lbs)}}{\text{rehvi laius (in)} \times \frac{\text{rehvi väline diameeter, in}}{2} \times \text{rehvide arv}}$$

kaalu faktor

Kaalu ulatus (masina kaal/telgede arv), kg	Kaalu faktori valem
< 907	Y = 0,553X
907–6 123	Y = 0,033X + 1,050
6 124–9 072	Y = 0,142X – 0,420
> 9 072	Y = 0,278X – 3,115

Y = kaalu faktor
 $X = \frac{\text{kogu masina mass (klps)}}{\text{telgede arv}}$

$$\text{rehvi faktor} = \frac{10 + \text{rehvi laius (in)}}{100}$$

keti faktor: koos ketiga = 1,05
 ilma ketita = 1,00

$$\text{rehvi koormuse faktor} = \frac{\text{kogu kaal (klps)}}{\text{rataste arv}},$$

(kus rattad võivad olla nii üksikud kui kahekordsed)

$$\text{põhja kõrguse faktor} = \frac{\text{põhja kõrgus (in)}}{10}$$

mootori faktor: ≥ 10 hj/t = 1,0
 < 10 hj/t = 1,05

transmissiooni faktor: hüdrauliline = 1,0
 mehaaniline = 1,05

LISA 2. EESTI TERRITOORIUMI MULDADE PEENESEGRUPPIDE KESKMISED MEHAANILISED KOOSSEISUD

1. Liivmullad

Liivmullad esinevad ligikaudu 1/3 Eesti territooriumil ning liiv võib eksisteerida omaette tüseda lähtekivimi tüübina või olla moreenide katjaks. Teoorias eristatakse vastavalt füüsikalise savi sisaldusele sõredaid ja sidusaid liivasid, kus vastavalt füüsikalise savi sisaldus on 0-5% ja 5-10%, kuid suuremõõtkavalisel mullakaardil selliseid gruppisid eristatud pole. Üldistavalt võib öelda, et USCS järgi on tegu jämedateraliste muldadega, kus peeneteraline materjal võib üldse puududa või seda võib olla rohkem kui 10% kui arvestada juurde jämeda tolmu osakaalu. Üldjoontes ei ole liivades füüsikalise savi sisaldus eriti varieeruv ning valitsevad on keskmise ja peene liiva fraktsioonid. Jäme liiv domineerib väikestel pindadel ning enamasti on sellisel puhul tegemist kruusaste liivadega. Peale tüsedate liivade eksisteerib ka liivade nimetuse all variante kus huumushorisonniks on saviliiv või 30–50 cm liivakihi järgneb liivsavi või savi (Eesti NSV..., II, IV; Reintam, 1962).

Mehaaniliste koosseisude põhjal võib liivmullad jagada kahte gruppi. Esiteks kõige puhtamateks liivmuldadeks võib pidada erineva kõvadusega leetunud leedemullad (LI, LII, LIII), gleistnud leetunud leedemullad (LIg, LIIg, LIIIg), glei-leedemullad (LG) ja nende huumuslikud erimid (L(k)I, L(k)II, L(k)III; L(k)Ig, L(k)IIg, L(k)IIIg). Tüüpilises leedemullas on füüsikalise savi hulk väiksem kui 5% ning raskema lõimisega leedemuldi esineb harva. Jämeda tolmu sisaldus jääb vastavalt kirjanduses esitatud mehaanilistele koosseisudel vahemikku 1–3,4%. See tähendab, et tolmu ja ibeosakeste koguhulk võib olla nii suurem kui ka väiksem 5%-st. Et täpsemad andmed selliste liivmuldade kohta puuduvad, võib praegu lähtuda väiksemast kui 5%-lisest peeneteralise materjali sisaldusest ning täpsemat jaotust teadmata võib öelda, et tegemist on halva jaotusega puhaste liivadega ehk SP muldadega. Lisaks eelpool nimetatutele võib sellesse gruppi kuuluvaks pidada ka sekundaarsed leedemullad (Ls), primitiivsed leedemullad (Lo) ja leede-turvastunud mullad (LG1). Keskmise mehaanilise koosseisu võib lahti kirjutada järgmiselt: liiva 95%, tolmu ja ibe kokku 5% (Eesti NSV ..., III; Maaamet, 2001; Reintam, 1962).

Teise gruppi kuuluvad kõik ülejäänud liivalõimisega mullad ning sellisele grupile vastava tüüpilise mulla mehaaniline koostis on toodud tabelis 1. Nagu näha tabelist,

on sellistes muldades suhteliselt suur jämeda tolmu osakaal - seda on ligikaudu sama palju kui füüsikalist savi. Kõikide analüüsitud andmete põhjal on nimetatud muldade mehaaniline koosseis järgmine: liiva 81-92%, tolmu 6,4-16%, ibe 3,9–5,8%. Seega peeneteralise materjali hulk on suurem kui 12% ning täpsemate plastilisuse andmete puudumise tõttu võib eeldada, et tegemist on tolmuste liivadega ehk SM mullaga (Eesti NSV..., II, III; Lillema, 1958).

TABEL 1. Leetunud ja leetunud gleistunud liivmuldade mehaaniline koosseis (Eesti NSV ..., II, tabel 78).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsikaline savi	Ibe	Liivad			Tolmud		
			jäme liiv	keskmine liiv	peen liiv	jäme tolmu	keskmine tolmu	peen tolmu
Lk								
A1	9,2	4,9	6,7	27,1	52,3	10,5	2,4	2,9
			86,1			15,8		
A2B	7,3	-	-	-	57,7	10,8	-	-
B	6,8	4,4	8	31,3	49	6,5	1,3	1,5
			88,3			9,3		
C	8,4	5,4	11,6	38,1	41,8	9	3,3	2,1
			91,5			14,4		
Lkg								
A1	8,6	5,3	6,3	17,5	57,5	10,4	2,8	2
			81,3			15,2		
A2Bg	6,4	5	4,6	21,2	58,1	10	1,6	1
			83,9			12,6		
Bg	6,6	4,7	4	27,2	57	3,6	1,8	1
			88,2			6,4		
Cg	7,3	3,9	5,8	18,6	67,3	4,4	2,1	1,8
			91,7			8,3		

2. Saviliivmullad

Saviliiva lõimisega muldadel on füüsikalise savi hulk vahemikus 10-20%. Saviliiva puhul eristatakse sõltuvalt esinemise asukohast ja päritolust valkjashalli moreeni saviliiva, paepealset saviliiva, punakaspruuni moreeni saviliiva, jääpaisjärvede saviliiva. Viimane nimetatutest on moreenidega võrreldes erineva koosseisuga. Paepealsete muldade puhul võib paemurendit katta õhuke moreenikihti ning selle mehaaniline koostis läheneb түsedamate moreenide omadele. Saviliiv lõimise puhul on mullad valdavalt түsedad, vaid üksikutel juhtudel võib sügavamal kui 50 cm esineda teisi lõimiseid. Siiski võivad need lasuda ka vaheldumisi liivsaviga. Kahekihilise lähtekivimi korral on saviliiva түseduseks tavaliselt 40-80 cm. Kirjanduses esitatud tavaliste saviliivade keskmised näitajad on toodud tabelis 2 (Eesti ..., II, IV; Reintam, 1962):

TABEL 2. Moreenidel kujunenud saviliivmuldade mehaanilised koosseisud (Eesti NSV ... IV, tabelite 2.1.2, 2.2.3, 2.3.4, 2.3.3 põhjal).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %		
	Füüsikaline savi	Jäme tolm	Liiv
Kollakashall karbonaatne moreen C horisont *	16	18,9	64,8
Paepealne moreen	14,9 – 18	13,8 – 15,6	66,5 – 71,3
Kollaskashalli karbonaatset liivsavi moreeni katva saviliiva koostis	16,8	18,9	64,6
Punakaspruuni liivsavi moreeni katva saviliiva koostis	16,2 – 18,3	16,3 – 21,6	60,3 – 64,7

* pealmistes horisontides on lõimiseks liivsavi

Tolmu osakaal saviliivades on suur - nagu tabelist 2 nähtub, on jämedal tolmul sama suur osakaal kui füüsikalisel savil. Erinevate moreenide saviliivade mehaanilised koostised võib olemasolevate andmete põhjal pidada sarnasteks ning erinevusi ei teki ka vaheldumisel liivsaviga. Seega üldiselt saviliiva mehaaniline koostis on järgmine:

liiva 59–71%, tolmu 33-37%, ibe 6-7%. Puhaste saviliivade puhul on tegemist jämedateralise mullaga, kus on peeneteralist materjali on üle 12% ning lähtudes plastilisuse indeksist, mis on esitatud töö põhiosas tabelis 6 võib järeldada, et tegemist on SM või SM-SC mullaga.

Jääpaisjärvedes settinud saviliivasid iseloomustab jämeda tolmu suur osatähtsus. Jämeda tolmu ja peene liiva summa on kokku keskmiselt 65-75% ning jämedat tolmu on sellest pool või veelgi rohkem (Eesti NSV..., II). Suure tolmu sisalduse tõttu võib eeldada, et vastava päritoluga saviliivad on kaardil tähistatud tolmla saviliivana (tsl). Sellise lõimisega muldade kohta on kirjanduse suhteliselt vähe andmeid esitatud. Tabelis 3 on toodud kahkjate tolmuste saviliivade iseloomustus Keava metsamuldadel. Tegemist on tolmla koresevadade saviliivadega Baf ja A21(g) horisontides, mis lasuvad karbonaatsel moreenil. Kohati on punakaspruun moreen kaetud 0,4–1 m tükelduselt tolmla saviliiva või peenliiva kihtidega (Eesti NSV..., V; Reintam, 1962).

TABEL 3. Kahkjate jääpaisjärvede tolmla saviliivmuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV..., V, tabel 3.3.3).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsikaline savi	Ibe	Tolmud			Liivad		
			jäme tol	kesk-mine tol	peen tol	jäme liiv	kesk-mine liiv	peen liiv
Baf	17,7	7	26,3	10,7		9,1		46,9
			37			56		
A21(g)	18,9	6,7	26,5	12,2		8,7		45,9
			38,7			54,6		

*tumedamalt on toodud kirjanduses esitatud andmed, tavalises kirjas on nende andmete põhjal arvutatud väärtused.

Nagu näha tabelist 3 on moreensete saviliivadega võrreldes jääpaisjärvede saviliivades tunduvalt suurem jämeda tolmu osakaal. Liivade puhul on valdav

peenliiva fraktsioonid. Seega saab keskmise mehaanilise koosseisu lahti kirjutada järgmiselt: liiva 55%, tolmu 38%, ibe 7%. Kuna täpsemad andmed selliste muldade plastilisuse kohta puuduvad, võib suure tolmusisalduse põhjal eeldada, et USCS järgi vastab sellele koosseisule SM muld, kuid sõltuvalt liiva ja eelkõige peenliiva sisaldusest, võib see ka ML mullaks osutuda.

3. Liivsavimullad

Liivasavideks loetakse sellise lõimisega muldasid, kus füüsikalise savi sisaldus on vahemikus 20-50% - vastavalt 20-30%lise sisaldusega on kerged liivsavid (ls_1), 30-40%lise sisaldusega keskmised liivsavid (ls_2), 40-50% rasked liivsavid (ls_3). Sõltuvalt asukohast või päritolust võib liivsavide puhul eristada kollakashallil või punakaspruunil moreenil kujunenud-, paepealseid- ning jääpaisjärvedes settinud liivsavisid. Liivsavimullad on tavaliselt түsedad, üksikutel juhtudel võib sügavamal kui 50 cm esineda teisi lõimiseid. Siiski loetakse selliste muldade hulka ka erimid, kus vahekihtidena esinevad saviliiva horisondid. Түsedate liivsavide kõrval on väga laia levikuga saviliiva ja liivsavi horisontide vahelduvusega mullad, mida Lõuna-Eestis nimetatakse kahekihiliseks, Põhja-Eestis sarnase struktuuriga muldade iseloomustamisel seda ei rõhutata. Mullakaardi atribuutandmete puhul on välja toodud kõik erineva lõimisega kihid (Eesti NSV..., II, IV; Maaamet, 2001; Reintam, 1962).

3.1 Kerged liivsavid

Võrreldes liivsavisid saviliivadega on siin suurem osa tolmuldel ja seda liivade arvelt. Tabelis 4 on toodud erinevate horisontide ja lähtekivimitel esinevad kergete liivsavide mehaanilised koosseisud.

TABEL 4. Kerge liivsavi mehaaniline koosseis punakaspruunil ja kollakashallis moreenil ja paepealsetel muldadel (Eesti NSV ..., IV, tabelite 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1 põhjal).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsi- kiline savi	Ibe	Tolmud			Liivad		
			jäme tolm	kesk- mine tolm	peen tolm	jäme liiv	kesk- mine liiv	peen liiv
Kollakashall liivsavi moreen metsas C horisondis	28,8	9,8	20,1	9	9,9	6,2	15,3	29,8
			39			51,3		
Paepealsed mullad	26,5	9	20	8,9	9,9	7,6	19,9	26,9
			38,8			54,4		
Kollakashalli moreeni BC ja C horisontide keskmised	28	9,8	21,3	9,4	9,6	7,4	14,7	30
			40,3			52,1		
Punakaspruunil moreeni BC ja C horisondi keskmised	30,2	15,9	13,6	5,6	7,7	4,8	14,6	38,6
			26,9			58		
Punakaspruunil kahekihilisel moreenil	27,9	16,6	13,9	4,9	8,3	7,4	17,3	38,3
			27,1			63		

Tabelist on näha, et peamised erinevused kollakashalli ja punakaspruuni moreeni puhul esinevad ibe ja tolmu osakaaludes - üldjoontes on kollakashall karbonaatne moreen tolmusem kui punakaspruun moreen. Lisaks analüüsiti õhukese paepealse mulla (Kh²), rähkmulla (K) ja gleistunud rähkmulla (Kg), leostunud mulla (Ko) ja gleistunud leostunud mulla (Kog), leetja (KI) ja gleistunud leetja mulla (KIg), leetunud muldade (Lk) ja kähkja leetunud mullad (LP) kerge liivsavi ning sl/l_{s1} muldade mehaaniliste koosseisude andmeid. Nende põhjal võib öelda, et kollakashallil moreenil on kerge liivsavi struktuur: liiva 45–55%, tolmu 37–47%, ibe 6–15%. Vaid üksikutes proovides on liiva hulk väiksem kui 50%. Palju vähem on uuritud ja andmeid esitatud punakaspruuni moreeni puhul. Nende väheste andmete

keskmisena võib esitada järgmise koosseisu: liiva 55–63%, tolmu 27-32 %, ibe 8–16%. Kuigi esitatud keskmistest koosseisudest ei ole see välja loetav, on punakaspruunis moreenis ibeosade osakaal mõne protsendi võrra suurem kui kollakashallis. Vastavalt nendele koosseisudele võib kerge liivsavi keskmise koosseisu lahti kirjutada järgmiselt - liiva 45–63%, tolmu 27-47%, ibe 6-16%. Vastavalt liivsavide plastilisuse indeksile on tegemist USCS eeskirja järgi SC muldade (Eesti NSV ... II, V, VI).

Jääpaisjärvede setetel kujunenud kergetel liivsavide puhul on tolmu koguhulk vähemalt üle 35% või nagu näha tabelist 5 toorhuumuslikus või huumushorisondis (At või A1 horisondis) isegi 56%. Sellest võib järeldada, et jääpaisjärvedes kujunenud liivsavid on tolmuks liivsavid – tl_{s1} , ning nende keskmine mehaaniline koosseis on: liivasid 33%, tolmusid 56%, ibeosakesi 11%. Suure tolmuosakeste osakaalu tõttu ning plastilisuse indeksi väärtuse puudumise tõttu, võib need USCS järgi klassifitseerida ML muldadeks. Vastavalt klassifitseerimise eeskirjale tuleb peenteraliste muldade puhul arvestada ka orgaanilise aine olemasoluga. Kuna keskmiseks huumusekihi sügavuseks võib sellistes muldades lugeda 25 cm, siis kuni 25 cm sügavuseni on tegemist OL ja sügavamal ML mullaga (Eesti NSV ..., II).

TABEL 5. Jääpaisjärve setetel (tolmjas liivsavi) leviv leostunud ja küllastunud glei-liivsavimuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV..., II, tabel 79).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsikaline savi	Ibe	Tolmud			Liivad		
			jäme tolmu	keskmine tolmu	peen tolmu	jäme liiv	keskmine liiv	peen liiv
At, A1	28,2	11	37,8	9,5	8,5	1,1	2,5	29,5
			55,8			33,1		
BG	32,5	15,1	42,6	9,7	8,4	0,6	1,2	23,3
			60,7			25,1		
CG	32,8	14,2	45,4	11,4	8,2	0,3	0,7	19,8
			65			20,8		

3.2. Keskmised liivsavid

Keskliste liivsavimuldade mehaanilise koostise kohta on andmeid tunduvalt vähem esitatud kui kergete liivsavide kohta. Mehaanilist koosseisu sai hinnata vaid üksikute horisontide puhul, mis paiknesid teiste, erineva raskusega, liivsavi horisontide vahel. Võimalik ei olnud välja tuua erinevusi moreenide vahel. Ko, Kog, KI, KIg, Lk muldade põhjal võib öelda, et liivasid on keskmiselt 44-53%, tolmusid 33-43%, ibeosakesi 11-23% (Eesti NSV ..., II; Lillema, 1958).

Üldine struktuur näitab, et tegemist on piiripealsete muldadega, kus ülekaalus võib olla nii jämedateralist kui ka peeneteralist materjali. Analüüsitud andmetes on peeneteralist materjali mõned protsendid üle 50 ning plastilisuse näitajate põhjal võib need CL muldade hulka lugeda. Seega on kuni 25 cm sügavuseni tegemist OL horisontidega, mis lasuvad CL horisontidel. Ka kahekihilise lähtekivimi korral kus pealmisteks horisontideks on saviliiv ning selle all on keskmine liivsavi on tegemist üldjoontes samasuguse mehaanilise koosseisuga.

Tabelis 5 on toodud andmed tolmuste keskmiste liivsavide kohta BG ja CG horisontides. Vastavalt nendele horisontidele on keskmistes tolmustes liivsavides liivasid 21-25%, tolmusid 61-65%, ibeosakesi 15%. Eeldades, et ibeosakeste osakaal on väike ning plastilised omadused ei avaldu sellises mullas, on USCS vasteks kuni 25 cm pinnalt OL ja sügavamal ML muld (Eesti NSV ..., II).

3.3 Rasked liivsavid

Raskete liivsavide kohta esineb kirjanduses samuti väga vähe andmeid. Vastavalt kahkjale leetunud gleimullale (LPG) kollakashallil liivsavi moreenil metsas ja leetjale gleimullale (GI) punakaspruunil liivsavi moreenil, on tolmade koguhulk 42-43%, ibesisaldus 20% ning liiva nende andmete põhjal 37-38%. USCS definitsiooni järgi on tegemist tolmu ja liiva seguga, kus peeneteralist materjali on üle 50% ning plastilisuse indeksi põhjal on see CL muld, mis on keskmiselt kuni 25 cm ulatuses kaetud OL horisondiga (Eesti NSV ..., V).

Andmed puuduvad täiesti jääpaisjärvede raskete liivsavide mehaanilise koostise kohta. Üldiselt on vaid välja toodud, et peene liiva ja jämeda tolmu summa on 65-75% ning jämedat tolmu on selles osakaalus võrdselt või rohkemgi. Keskmise mehaanilise koosseisu liiva 15%, tolmu 60%, ibe 20%. USCS klassifikatsiooni järgi on tegu kuni 25 cm sügavuseni OL mullaga, mis lasub CL mullal (Eesti NSV..., II).

4. Savimullad

Savi lähtekivimina on valdavalt kujunenud jääpaisjärvedes, kuid esineb ka moreenseid savisid. Neid iseloomustab laiades piirides varieeruv füüsikalise savi sisaldus, mis võib olla vahemikus 60-90% ning valdavad on ibe ja peene tolmu fraktsioonid. Kuigi kirjanduses tehakse vahet erineva raskusega savide vahel, pole neid eristatud suuremõõtkavalise mullakaardi puhul. Savimuldadeks loetakse ka selliseid kooslusi, kus huumushorisont on kujunenud kergema kattematerjali – liivsavi baasil (Eesti NSV...,II; Maaamet, 2001).

Andmeid savidel kujunenud muldade mehaanilise koostise kohta on kirjanduses väga piiratud. Täielikku mehaanilist koosseisu (kas või ühe horisondi piires) oli võimalik analüüsida leostunud (Go) ja leetjate glei-savimuldade (GI) kohta, mis on toodud tabelis 6. Üldiselt on esitatud andmed Kagu-Eesti moreensete savimuldade Bg või BCG horisontide kohta tabelis 7. Lisaks nendele oli võimalik kasutada andmeid gleistunud rähkmuld (Kg), gleistunud leostunud muld (Kog), leetunud gleimuld (LkG) füüsikalise savi ja ibesisalduse kohta (Eesti NSV ..., II, III).

TABEL 6. Leostunud ja leetjate glei-savimuldade mehaaniline koostis. (Eesti NSV ... II, tabel 80).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsikaline savi	Ibe	Tolmud			Liivad		
			jäme tolm	kesk-mine tolm	peen tolm	jäme liiv	kesk-mine liiv	peen liiv
At	47,7	20,9	18,2	9,4	17,4	2,7	8,9	21,9
			45			33,5		
BG	79,5	46,9	10,7	10,9	21,8	0,8	1,7	6,6
			43,4			9,1		
CG	83,4	48,9	9,6	9,7	25,4	0,3	0,7	19,8
			44,7			20,8		

TABEL 7. Kagu-Eesti moreenste savimuldade mehaaniline koostis (Eesti NSV... II, tabel 81).

Horisondid	Lõimisefraktsioonid %							
	Füüsikaline savi	Ibe	Tolmud			Liivad		
			jäme tolm	kesk-mine tolm	peen tolm	jäme liiv	kesk-mine liiv	peen liiv
Bg või BCG	75	35,2	16,8	13,6	25,2	0,6	1,8	5,7
			55,6			8,1		

Kõikides analüüsitud muldade puhul oli huumusehorisondi tüsedus keskmiselt 25 cm ning selle lõimiseks oli keskmine või raske liivsavi. Eraldi võib välja tuua sellise pealmise kihi keskmise mehaanilise koostise - liivasid 34%, tolmusid 45%, ibesisaldus 19 – 22%. USCS järgi on tegemist peenteralise mullaga, mida huumusesisalduse tõttu tuleb nimetada OL mullaks. Sellele järgnevad horisondid võib plastilisuse arvu järgi, mis savidel on üle 16, klassifitseerida savideks ehk CL mullaks. Savimuldade mehaanilise koosseis on: liivasid 8-21%, tolmusid 43-57%, ibeosakesi 35 – 51%.