

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

**Lähenemissuundade automaattuvastus
sõjaväelise maastikuanalüüsi kontekstis**

Mihkel Männa

Juhendaja: dotsent Jüri Roosaare

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2016

Lähenemissuundade automaattuvastus sõjaväelise maastikuanalüüsi kontekstis

Magistritöö
Mihkel Männa

Lühikokkuvõte. Käesolev magistritöö käsitleb sõjaväelist maastikuanalüüsi osaliselt automatiseerida võimaldava tööriista loomist. Tööriist aitab määratud alal vastavalt antud tingimustele hinnata maastiku läbitavust ja potentsiaalseid lähenemissuundi. Töös antakse ülevaade sõjaväelisest maastikuanalüüsist ja varasematest sarnastest uurimustest, kirjeldatakse maastiku läbitavuse modelleerimiseks ja lähenemissuundade automaattuvastuseks välja töötatud meetodikat ning hinnatakse selle sobivust püstitatud ülesannete lahendamiseks. Viimaks pakutakse esinenud kitsaskohtade kõrvaldamiseks välja lahendusi ja arutletakse meetodika täiendamise ning tööriista juurutamise ja edasiarendamise üle.

Võtmesõnad: lähenemissuunad, maastikuanalüüs, automatiseerimine, OCOKA, maastiku läbitavus, GIS modelleerimine, lahinguruumi luurealane ettevalmistus, LLE

CERCS teaduseriala: T330 Sõjandus ja militaartehnoloogia; P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Automated determination of possible avenues of approach in military terrain analysis

Master's thesis
Mihkel Männa

Abstract. The objective of this master's thesis is to develop a tool to automate military terrain analysis. The created tool assists the user in evaluating terrain trafficability and possible avenues of approach in a given situation on an user-specified area. First, this thesis provides an overview of military terrain analysis and similar previous studies. Secondly, the developed methodology for modeling terrain trafficability and automated determination of possible avenues of approach is introduced. Then, the methodology is evaluated by comparing the results of the tool with the avenues of approach selected by subject matter experts. Finally, solutions for the methodology's shortcomings are presented and some issues concerning the tool's deployment and further development are discussed.

Keywords: avenues of approach, terrain analysis, automation, OCOKA, terrain trafficability, GIS modeling, intelligence preparation of the battlefield, IPB

CERCS research specialisation: T330 Military science and technology; P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Sõjaväeline maastikuanalüüs kui osa lahinguruumi luurealasest ettevalmistusest	7
1.1. Sõjaväeline maastikuanalüüs.....	7
1.2. Operatsioone mõjutavad maastikuomadused	8
1.2.1. Vaadeldavus ja tulealad.....	8
1.2.2. Kate ja varje	8
1.2.3. Tõkked ja maastiku läbitavus	9
1.2.4. Võtmemaastikud.....	9
1.2.5. Liikumiskoridorid ja lähenemissuunad	10
1.3. Maastiku läbitavuse ja lähenemissuundade määramine	10
2. Sõjaväelise maastikuanalüüsi automatiseerimise võimalusi	13
2.1. Maastiku läbitavuse modelleerimine.....	13
2.2. Lähenemissuundade automaattuvastus.....	16
2.2.1. Optimaalsete koridoride tuvastamine.....	17
2.2.2. Suboptimaalsete koridoride leidmine.....	18
2.2.3. Kriteeriumite olulisuse hindamine lähenemissuundade tuvastamisel	19
2.2.4. Taimkatte mõju ümbritsevate alade nähtavusele.....	20
2.2.5. Varasemad lähenemissuundade tuvastamist käsitlevad uurimused	21
3. Kasutatud andmed ja tarkvaralised vahendid	23
3.1. Kasutatud andmed	23
3.2. Kasutatud tarkvaralised vahendid	23
3.3. Uuritava ala lühikirjeldus	23
4. Metoodika.....	25
4.1. Maastiku läbitavuse mudeli moodustamine	25
4.1.1. Maakatte mõju läbitavusele.....	26
4.1.2. Reljeefi mõju läbitavusele	27
4.1.3. Mullastiku mõju läbitavusele	30
4.1.4. Taimkatte mõju läbitavusele	31
4.1.5. Teedevõrgu mõju läbitavusele	32
4.1.6. Rajatiste mõju läbitavusele.....	32
4.1.7. Läbitavusrastri valideerimine	33
4.2. Lähenemissuundade kriteeriumite kaasamine analüüsi	36

4.2.1. Liikumise kanaliseeritus	36
4.2.2. Kate ja varje	37
4.2.3. Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus	37
4.2.4. Ühenduste kvaliteet	40
4.2.5. Ülejäänud lähenemissuundade tuvastamisel olulised kriteeriumid.....	40
4.3. Kriteeriumite olulisuse hindamine	40
4.4. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritm	41
4.4.1. Liikumiskoridoride võrgustikku kujutava graafi moodustamine	41
4.4.2. Ruumiliselt erinevate radade leidmine	43
4.4.3. Sobilike suboptimaalsete lähenemissuundade leidmine	44
5. Tulemused	46
5.1. Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimine.....	46
5.2. Lähenemissuundade automaattuvastusel esinenud probleemid	51
5.3. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi tööaeg	52
6. Arutelu.....	56
6.1. Maastiku läbitavuse mudel.....	56
6.2. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritm	57
6.3. Järeldused lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimisest.....	59
6.4. Tööriista juurutamist puudutavad märkused	59
6.5. Tööriista edasiarendamine.....	60
Kokkuvõte	61
Summary	62
Tänuavaldused.....	64
Kasutatud kirjandus.....	65
Lisad	72

Sissejuhatus

Maastikuanalüüsil on võtmeroll mistahes sõjalises operatsioonis (HQDA 1990a). See kujutab endast maastikuelemente ja muid asjakohaseid tegureid puudutava geograafilise informatsiooni kogumist, analüüsi ning interpreteerimist, et prognoosida maastiku mõju operatsioonidele (HQDA, HQMC 2009). Maastikuanalüüsi laiemaks eesmärgiks on aidata üksuse ülemat otsuste tegemisel nii operatsioonide ettevalmistamisel kui läbiviimisel (Grindle *et al.* 2004). Maastiku poolt operatsioonidele avaldatavat mõju hinnatakse maastikuanalüüsis kindlastest aspektidest lähtuvalt (HQDA 1994). Näiteks on vajalik analüüsida, millised alad pakuvad vastase tule eest kõige paremat katet. Üheks olulisemaks maastikuanalüüsi resultaadiks on potentsiaalsete lähenemissuundade tuvastamine, millega selgitatakse välja alad, mille laius võimaldab teatud suurusega üksusel vastavalt doktriinile sihtkohta liikuda (EKV 2016; Mõts 2010). Lähenemissuundade tuvastamine on vajalik, sest kõik tegevusvariandid, mis hõlmavad endas üksuste liikumist, sõltuvad võimalikest lähenemissuundadest (HQDA 1994). Lähenemissuundade tuvastamisel tuleb arvestada mitmete aspektidega, millest olulisimaks on maastiku läbitavus (HQDA 1990a). Maastiku läbitavus väljendab seda, kuivõrd maastik soosib sõidukite liikumist (ISTVS 1977) ning ka see on omakorda mõjutatud mitmetest teguritest.

Vaatamata viimaste aastakümnete tehnoloogistele arengutele teostatakse maastikuanalüüsi tänapäeval siiski põhiliselt käsitsi, kasutades trükikaarte ja kaardikilesid. See on mitmel põhjusel ebaefektiivne: trükikaardid ei pruugi olla sobiva detailsusastmega; tegemist on väga ajamahuka protsessiga; kaardid või kaardikiled võivad liigsete tähistuste tõttu muutuda loetamatuteks ning osa analüüsis vajalikust informatsioonist võib jääda tähelepanuta (Grindle *et al.* 2004). Lisaks puuduvad vajalikud kaardikihid sageli ka arvutis maastikuanalüüsi läbiviimiseks. Seetõttu on selge vajadus otsust toetavate süsteemide või tööriistade järele, mis aitaksid maastikuanalüüsi protsessi kasvõi osaliselt automatiseerida (Sivertun, Gumoś 2006), sest käsitsi võib selleks kuluda päevi (Slocum *et al.* 2003).

Käesoleva töö eesmärgiks on luua tööriist, mis võimaldaks sõjaväelist maastikuanalüüsi automatiseerida, aidates määratud alal vastavalt antud tingimustele hinnata maastiku läbitavust ja potentsiaalseid lähenemissuundi. Püstitati järgmised alameesmärgid:

1. Luua mudel maastiku läbitavuse hindamiseks, toetudes käsitsi läbiviidava maastikuanalüüsi metoodikale ja sarnastele akadeemilises kirjanduses avaldatud uurimustele ning arvestades ühtlasi Eesti maastikuliste omapäradega.
2. Töötada välja algoritm potentsiaalsete lähenemissuundade automaatseks tuvastamiseks, kasutades GIS modelleerimist.
3. Hinnata (2) algoritmi efektiivsust ja sobivust lähenemissuundade leidmise jaoks, võrreldes tööriistaga genereeritud lähenemissuundi ekspertide poolt joonistatud lähenemissuundadega.
4. Anda hinnang lähenemissuundade automaatseks tuvastamiseks välja töötatud metoodikale ja pakkuda lahendusi esinenud kitsaskohtade kõrvaldamiseks.

Töö on metoodilise iseloomuga, sest selle autor töötab Eesti Kaitseväes ja tööriista jaoks väljatöötatavad lahendused on mõeldud Kaitseväes rakendamiseks. Tööriista juures oli oluliseks tingimuseks, et see ei vajaks peale GIS tarkvara ArcGIS muu tarkvara olemasolu, sest

ArcGIS on Kaitseväes nii spetsialistide kui tavakasutajate poolt ülekaalukalt enim kasutatavamaks GIS tarkvaraks. Tööriista pidi saama kasutada ArcGIS-i „tööriistakomplektina“ või veebirakenduses tarkvara ArcGIS for Server veebiteenustena. Siinkohal on vajalik täpsustada, et terminit „tööriist“ kasutatakse siinses töös mõnevõrra abstraheritult – tegelikkuses kujutab see endast teatud ülesannete lahendamiseks vajalike ArcGIS-i tööriistade ja skriptide kogumit. Tööriista juurutamist puudutavaid tehnilisi nüansse käesolevas töös aga ei käsitleta.

Antud töös vaadeldakse lähenemissuundade leidmisel vaid liikumist maapinnal konventsionaalse sõja tingimustes, arvestamata õhus kulgevate lähenemissuundadega ning hübriidsõja põhimõtetega. Samuti ei käsitleta siin linnamaastike eripärasid.

Töö sisuline osa koosneb kuuest peatükist. Neist esimeses tutvustatakse lugejale sõjaväelise maastikuanalüüsi protsessi. Teises peatükis antakse ülevaade senistest maastiku läbitavuse modelleerimise ja lähenemissuundade automaattuvastusega seotud uurimustest. Kolmandas ja neljandas peatükis käsitletakseööriista loomiseks kasutatud andmeid, tarkvaralisi vahendeid ning meetodikat. Kahes viimases peatükis esitatakse töö tulemused, antakse hinnang välja töötatud meetodikale ning pakutakse välja võimalusiööriista täiustamiseks ja edasiarendamiseks.

1. Sõjaväeline maastikuanalüüs kui osa lahinguruumi luurealasest ettevalmistusest

Tegevuse planeerimiseks peab sõjaväelise üksuse ülemal olema hea ülevaade tingimustest lahinguväljal, nende mõjudest sõjategevusele ning võimalikest ohtudest (US Army 2006). Protsessi, mille käigus kogutakse ja töödeldakse informatsiooni lahinguvälja maastikust ja ilmast, neutraalsetest jõududest, tsiviilelanikkonnast ja vastasest (Graff 1996), nimetatakse lahinguruumi luurealaseks ettevalmistuseks (edaspidi LLE). Kogutud informatsiooni analüüsidest saab ülem prognoosida vastase võimalikke tegevusvariante ning üksuse luureseksioon planeerida puuduoleva informatsiooni kogumist ja alustada sihtmärgistamisega (EKV 2016). LLE on süstemaatiline ja pidev protsess konkreetsel geograafilisel alal ohtude ja keskkonna analüüsimiseks (USMC 1999), arvestades olukorra arenedes uue informatsiooni ja muutuva olustikuga (Sycara *et al.* 2009). Sellele toetuvad operatsioonide ettevalmistamisel ja teostamisel staabi hinnangud ning operatsioonikäsu väljatöötamise protsess (Mitchell, Williams 2001). LLE algab juba enne operatsioone (Grindle *et al.* 2004) ning sellega tegeleb kogu staap (HQDA, HQMC 2009). Kuna täismahus LLE on aeganõudev ja töömahukas protsess (EKV 2016), peab staap otsustama, millistele aspektidele tuleks analüüsil rohkem tähelepanu pöörata, et see ülemat otsuste vastuvõtmise juures maksimaalselt aitaks (HQDA 1994; HQDA, HQMC 2009).

LLE käigus on oluline esmalt tuvastada operatsiooniala piirid ja määrata huviala piirid (HQDA 1994). Operatsiooniala kujutab endast geograafilist ala, millel ülem vastutab sõjaliste operatsioonide läbiviimise eest. See ala on piiritletud kõrgema ülema poolt. Huviala on aga ala, millelt tahetakse saada luureinformatsiooni – see on vajalik oma üksuste tegevuse planeerimiseks (EKV 2016). Huviala tuleb ülemal ise määratleda ning see on üldiselt pindalaliselt suurem kui operatsiooniala (HQDA 1994). Nii operatsiooni- kui ka huviala mõõtmised sõltuvad konkreetsest olukorrast (EKV 2016).

1.1. Sõjaväeline maastikuanalüüs

LLE lahutamatuks osaks on maastikuanalüüs (Graff 1996; US Army 2006). Selle eesmärgiks on selgitada välja lahinguruumi mõju enda ja vastase võimalikele tegevusvariantidele (EKV 2016). Maastikuanalüüs algab militaarsetest aspektidest oluliste maastikuliste tegurite hindamisega. Nendeks on reljeef, veestik, taimestik, mullastik, hoonestatud alad ja transpordivõrk (HQDA 1990b). Hinnatakse kõigi tegurite võimalikku mõju sõjalistele operatsioonidele (HQDA 1994). Näiteks on koolmekohtadeta jõgi maastikul üksustele liikumistakistuseks (Grindle *et al.* 2004). Oluline on arvestada ka ilma mõjudega maastikule ning sellega, kuidas prognoositav ilm võib maastikku ja selle läbitavust muuta (HQDA, HQMC 2009). Samuti võib lahinguruum lahingu käigus muutuda ning vajada operatsioonidele suunatud mõju ümberhindamist. Näiteks võivad lahingus hävineda ühendusteed, misjärel tuleb operatsiooniala liikuvusomadused ümber hinnata (HQDA 1994).

Edasi analüüsitakse operatsioone mõjutavaid maastikuomadusi militaarsetest aspektidest lähtuvalt juba põhjalikumalt. Nendeks aspektideks on tüüpiliselt vaadeldavus ja tulealad, kate

ja varje, tõkked ja maastiku läbitavus, võtmemaastikud ning lähenemissuunad (*ibid.*). Alljärgnevas peatükis seletatakse nimetatud aspektid lähemalt lahti.

1.2. Operatsioonid mõjutavad maastikuomadused

1.2.1. Vaadeldavus ja tulealad

Vaadeldavus on võime näha sõbralikke ja vaenulikke jõude, süsteeme ja maastikulisi võtmeaspekte visuaalselt või jälgimisseadmete kasutamisega (HQDA 1994; HQDA, HQMC 2009). Siin tuleb muuhulgas silmas pidada elektroonilisi ja optilisi vaatlussüsteeme, infrapuna- ja öövaatlusseadmete, relvade ja relvasüsteemide vaatlusulatust ning laserkaugusmõõtjate, radarite, raadiote ja signaalide tõkestamise süsteeme (HQDA 1994; US Army 2006). Vaadeldavus on oluline vastase tugevuse hindamiseks, üllatuste vältimiseks ja võimalikele ohtudele vastamiseks (NPS 2009).

Tulealad on alad, mida relvasüsteemid on antud positsioonilt võimelised efektiivselt tulega katma (EKV 2016). Teatud relvasüsteemide tulealad ulatuvad inimsilma nägemisulatusest oluliselt kaugemale (US Army 2006).

Head vaadeldavust ja tulealad võimaldavad maastik sobib üldiselt hästi kaitsetegevuseks. Muuhulgas mõjutavad vaadeldavust ja tulealad taimkatte ja hoonete kõrgus ning tihedus, teatud pinnavormid ning sõbralike ja vastasjõudude tehniline võimekus. Vaadeldavuse ja tulealade hindamine lubab tuvastada sobivad positsioonid spetsiifiliste süsteemide ja tehnika jaoks; alad, kus üksused on liikumisel kõige haavatavamad (HQDA 1994) ning nn surnud alad, kuhu vaatlus ja tulealad ei ulatu (HQDA, HQMC 2009). Lisaks on võimalik määratleda võimalikud hävitusalad (HQDA 1994) ehk alad, kus vastase üksus plaanitakse karpida ja hävitada oma üksuse kõigi kasutatavate relvasüsteemide koonduvusega (Möts 2010).

1.2.2. Kate ja varje

Kate kujutab endast füüsilist kaitset vastase otse- ja kaudtule eest (EKV 2016), samuti plahvatuste ja leekide eest (HQDA, HQMC 2009). Näiteks pakuvad katet kraavid, künkad, järsumad nõlvad, hooned, jõekaldad, suuremad lohud, kraatrid, seinad ja tihe mets (EKV 2016; HQDA, HQMC 2009).

Varje on aga kaitse vastase otse- või õhuvaatluse eest (EKV 2016). Varjet võivad pakkuda muuhulgas maskeering, puud ja muu taimestik, hooned ning teatud ilmatingimused nagu lumi, udu ja vihm (EKV 2016; HQDA 1990b; HQDA, HQMC 2009). Varje ei paku tingimata katet (HQDA, HQMC 2009). Taimestiku poolt pakutav varje on talvel oluliselt kehvem kui suvel (HQDA 1990a).

Katte ja varje hindamine aitab määrata kaitseks sobivaid alasid, potentsiaalseid lahingupositsioone, võimalikke lähenemissuundi ning kogunemis- ja hargnemisalasid (HQDA 1994). Rünnakul tuleks valida lähenemissuunad, mis pakuvad katet ja varjet ning kaitsel tuleks

valida sellised positsioonid, mis tagavad vaadeldavuse ja tulealad nendele katte ja varjega liikumiskoridoridele, mida vastane kõige tõenäolisemalt kasutab (US Army 2006).

1.2.3. Tõkked ja maastiku läbitavus

Tõkked on looduslikud või inimese poolt loodud maastikuelemendid, mis häirivad, peatavad, pidurdavad või suunavad väeosade liikumist (EKV 2016). Näiteks on maastikul liikumisel olulisemateks tõketeks hooned, mäed, järsakud, vallid, tihedad metsad, jõed, järved, hoonestatud alad, sood, kiviseinad, improviseeritud lõhkekehad, miiniväljad, kaevikud, traat- ja raidtõkked (HQDA, HQMC 2009; NPS 2009). Lisaks sellele takistavad liikumist ka näiteks kõrge niiskussisaldusega mullad (Sivertun, Gumoś 2006), põõsad ja muud taimkate ning teatud ilmatingimused (Talhofer *et al.* 2011).

Loomulikult mõjutavad tõkked mehhaniseeritud, jalgsi ja õhusõidukitega liikumist erinevalt. Näiteks on miiniväljad ja okstraadist tõkked efektiivsemad jalastunud sõdurite tõkestamiseks kui lahingmasinate jaoks (HQDA, HQMC 2009). Samuti võib tõketel olla sama tüüpi liikumisele erinev takistav mõju: näiteks häirivad hooned tankide liikumist rohkem kui traattõkked. Lisaks on oluline hinnata tõkete koond- ja kumulatiivset mõju. Näiteks võivad mõõdukas nõlvakalle ja keskmise tihedusega mets eraldi vaadeldes liikumist mitte piirata, kuid nende koosmõju võib olla liikumist piirav (HQDA 1994).

Sellist tõkestavate tegurite koondmõju maastikul liikumisele iseloomustab maastiku läbitavus (ISTVS 1977), mida tavaliselt seostatakse mehhaniseeritud liikumisega (EKV 2016; HQDA 1990a). Maastiku läbitavuse analüüsi kirjeldatakse lähemalt peatükis 1.3.

1.2.4. Võtmemaastikud

Võtmemaastikuks on looduslik või tehisobjekt, mis annab seda kontrollivale osapoolle olulise eelise (EKV 2016). Näiteks on võtmemaastikuks sild üle sellise jõe, mida pole sõidukitega ilma abistava tehnikata võimalik ületada (HQDA 1994). Sageli pakub võtmemaastik kontrolli lahingupositsioonide ja -eesmärkide või oluliste ühenduste üle (HQDA 1994; NPS 2009). Võtmemaastik sõltub üksuse suurusest, ülesandest ja juhtimistasandist (EKV 2016).

Võtmemaastiku määramisel hinnatakse selle oma valdusesse võitmise mõju nii sõbralike jõudude kui vastase poolt. Tüüpiliselt asuvad võtmemaastikud rünnakul sõbralikest üksustest eespool ning on sageli määratud liikumissihtideks. Rünnakutelje kõrval asuvad maastikuelemendid võivad olla võtmemaastikeks juhul, kui kontroll nende üle on vajalik rünnaku jätkamiseks või ülesande täitmiseks. Kaitsel asub võtmemaastik üldiselt operatsioonialas või kaitsepositsioonide taga. Tihti on selliseks maastikuks alad, mis võimaldavad lähenemissuundade head vaadeldavust või tõkete katmist tulega. Samuti võivad kaitsel olla võtmemaastikeks ühenduste ristmikud või sidekeskused, mis mõjutavad reservjõudude ja lahinguvõime säilitamiseks vajalike materjalide liikumist. Sageli määratakse võtmemaastikud alles pärast vaadeldavuse ja tulealade, katte ja varjatuse, tõkete ja maastiku läbitavuse ning liikumiskoridoride ja lähenemissuundade analüüsi (HQDA 1994).

1.2.5. Liikumiskoridorid ja lähenemissuunad

Lähenemissuunad on alad, mis võimaldavad teatud suurusega üksusel liikuda ja tegutseda vastavalt doktriinile (EKV 2016). Lähenemissuunad võivad kulgeda maapinnal või õhus ning need juhivad üksuseid rünnatavale objektile või võtmemaastikule (HQDA, HQMC 2009), antud töös käsitletakse aga vaid maapinnal kulgevaid lähenemissuundi. Ründavate operatsioonide puhul leitakse lähenemissuunad, mis kõige paremini juhivad rünnatavale objektile ning võimalikud taganemisteed või reservjõudude liikumisteed. Kaitsvaid operatsioone ette kavandades leitakse lähenemissuunad, mis toetavad vastase ründavaid võimekusi ning ühenduste, mis võimaldavad sõbralike reservjõudude ülesannete täitmist ja liikumist (HQDA 1994).

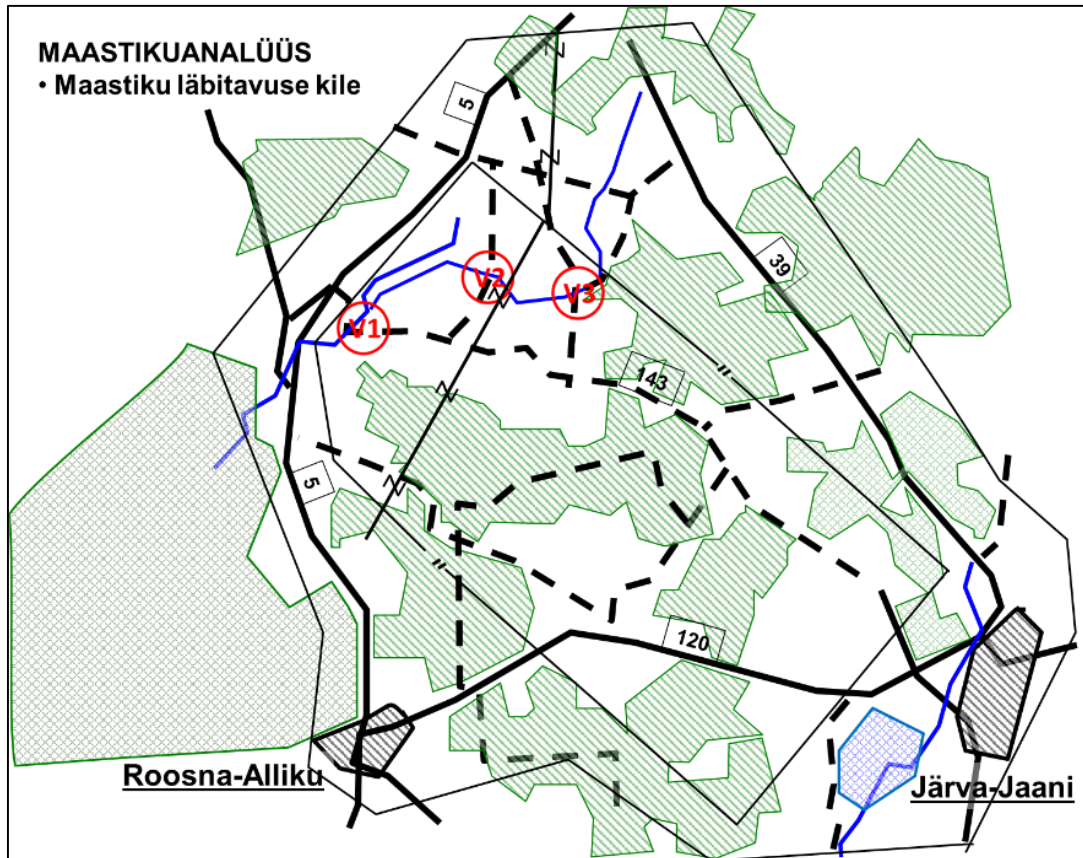
Lähenemissuundade leidmiseks on vaja esmalt määrata võimalikud liikumiskoridorid. Liikumiskoridorid on alad, kus üksuse liikumine on maastiku mõjude ja külgnevate liikumistakistuste tõttu kanaliseeritud, koridorides endis esineb tõkkeid aga suhteliselt vähe (*ibid.*). Kanaliseeritud liikumine on üksustele ohtlik, sest nõnda on nad vastasele paremaks sihtmärgiks. Liikumiskoridoride tuvastamiseks kasutatakse maastiku läbitavuse kaardikilet (peatükk 1.3), arvestades vastase eelistatud taktikatega ning hinnatava üksuse tüübi ja liikuvusega. Parimad koridorid kulgevad mööda kergesti läbitavat maastikku, mis pakub piisavalt ruumi, et liikuda vastavalt doktriinile, vältides seejuures suuremaid tõkkeid. Üldiselt on liikumiskoridorid teede ja teeradade suunalised (HQDA 1994), kuid võib esineda ka jõgede, järsakute, jalgteede, tunnelite ja suuremate kraavide suunalisi koridore (HQDA, HQMC 2009).

1.3. Maastiku läbitavuse ja lähenemissuundade määramine

Käesolevas alapeatükis kirjeldatakse käsitsi läbiviidava maastiku läbitavuse analüüsi ja lähenemissuundade tuvastamise protsessi. Analüüsiks kasutatakse väljatrükitud aluskaarti ja läbipaistvaid kaardikilesid, mida aluskaardile asetatakse. Igale kaardikilele kantakse ühte kindlat maastiku läbitavust mõjutavat tegurit esindavad nähtused, nagu näiteks metsad, teed või veekogud. Kaardikilede kasutamine võimaldab neid omavahel kombineerida ja lugeda informatsiooni aluskaardilt. Erinevate üksteise peale asetatud kaardikilede alusel võidakse koostada ka uusi kilesid.

Ühte peamist sellist kaardikilet, mis maastikuanalüüsis teiste kilede alusel moodustatakse (Pimpa *et al.* 2014), nimetatakse maastiku läbitavuse kileks (EKV 2016). See kaardikile on mitmete LLE käigus tehtavate otsuste aluseks (HQDA, HQMC 2009). Maastiku läbitavuse kilel (joonis 1) on erinevate tõkestavate tegurite hinnatav mõju liikumisele kokku koondatud ning kokkuvõttes kujutab see endast lahinguruumi mõju alade läbitavusele (HQDA 1994; HQDA, HQMC 2009). Kilel klassifitseeritakse alad maastikul kolmeks: kergesti läbitavad, piiratud läbitavusega ja raskesti läbitavad alad. Klasse eristatakse kilel sümboloogiaga. Kergesti läbitavad alad on alad, kus liikumist pärssivad tegurid puuduvad (EKV 2016), lubades üksustele suurt manööverdamisruumi (HQDA, HQMC 2009). Seal esinevad vaid harvad tõkked ja väikesed kallakud. Piiratud läbitavusega alad pärssivad mõningal määral liikumist ning nõuavad põiklemisi ja ümbersõite, seal on raskusi kiiruse hoidmise ja lahingrivi liikumisega (HQDA

1994). Raskesti läbitavad alad takistavad või aeglustavad oluliselt liikumist, see aga ei tähenda, et liikumine seal tingimata võimatu oleks (EKV 2016). Sellistel aladel liikumine võib nõuda pioneerivõimekuse abi (näiteks sildade konstrueerimist) ning üksused võivad olla sunnitud liikuma ebasoovitavas formatsioonis (HQDA, HQMC 2009).



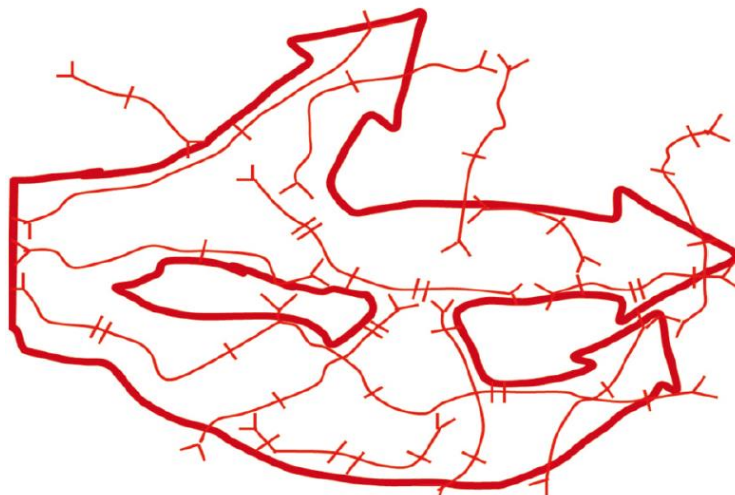
Joonis 1. Maastiku läbitavuse kaaardikile näidis ilma aluskaardita (EKV 2016). Kilel on kujutatud piiratud (viirutusega) ja raskesti läbitavaid (topeltviirutusega) alasid, veetökkeid (sinised jooned ja ala), ühendusteid (mustad jooned), asulaid (musta äärejoonega alad) ja võtmemaastikke (punase äärejoonega).

Maastiku läbitavuse klassifikatsioon ei ole absoluutne, vaid peegeldab maastiku suhtelist mõju vastase üksuste manöövrile läbiviimisele lahingformatsioonis või sõbralike üksuste ülesannete täitmisele. Tõkked on efektiivsemad juhul, kui need on vaadeldavad ja kaetavad tulealadega (HQDA, HQMC 2009), samuti siis, kui need paiknevad liikumise teljega risti (HQDA 1994). Lisaks tuleb hindamisel kindlasti arvestada ilma mõjuga ning üksuse tüübi ja suurusega. Tõkete ja läbitavuse hindamine võimaldab tuvastada maastikul liikumiskoridoreid, mis omakorda aitab leida lähenemissuunad ja kaitseks sobilikku maastiku (HQDA, HQMC 2009).

Lähenemissuundade analüüsimiseks moodustatakse üldiselt samuti eraldi kaaardikile (EKV 2016). Kokkuvõttes on lähenemissuundade tuvastamise protsess järgmine: määratletakse võimalikud liikumiskoridoreid, need kategoriseeritakse ja grupeeritakse lähenemissuundadeks ning lõpuks valitakse kujunenud lähenemissuundadest välja prioriteetseimad (HQDA 1994). Alljärgnevalt kirjeldatakse seda protsessi lähemalt.

Pärast liikumiskoridoride tuvastamist tuleb need kategoriseerida vastavalt üksuse suurusele ja tüübile, mis neisse liikuma mahub (HQDA 1994). Rühma, kompanii, pataljoni ja brigaadi liikumiskoridori laiuseks loetakse vastavalt ligikaudu 250 m, 500 m, 1,5 km ja 3-6 km laiust ala (EKV 2016). Samuti saavad parema läbitavusega koridorid kõrgema prioriteedi (HQDA 1994). Tavaliselt analüüsitakse liikumiskoridoride läbitavust ja prioriteetsust oma üksuse suuruselt kaks astet allapoole, raskesti läbitava maastiku korral võib-olla ka väiksematele üksustele (EKV 2016).

Seejärel grupeeritakse samasuunalised liikumiskoridorid lähenemissuundadeks (joonis 2). Lähenemissuund peab pakkuma üksuse liikumiseks head läbitavust ja piisavalt ruumi, et jõude laiali hajutada (HQDA 1994). Lähenemissuuna alguspunktiks on üksuse hetkeasukoht ning lõpp-punktiks võtmemaastik või rünnatav objekt (EKV 2016). Vastupidiselt liikumiskoridoridele võivad lähenemissuunad sisaldada raskesti läbitavaid alasid. Kompanii lähenemissuuna laiuseks on üldjuhul 0,5-1 km ning pataljoni ja rügemendi lähenemissuuna laiuseks maksimaalselt vastavalt 2 ja 6 km (HQDA 1992; Mõts 2010). Tavaliselt tuvastatakse lähenemissuundi oma üksuse suuruselt üks aste allapoole. Maastikuanalüüsi käigus oma üksuste lähenemissuundade määramisel vastase võimalikku sekkumist ei arvestata – seda tehakse LLE hilisemates etappides (HQDA 1990a; HQDA 1994).



Joonis 2. Liikumiskoridorid ja lähenemissuunad lähenemissuundade kaardikilel (Mõts 2010).

Lõpuks hinnatakse kujunenud lähenemissuundi ja valitakse neist välja prioriteetseimad. Lähenemissuundi hinnatakse vastavalt järgmistele kriteeriumitele (HQDA 1994):

- maastiku läbitavus ja kanaliseeritus,
- ligipääs võtmemaastikele ja külgnevatele lähenemissuundadele,
- kate ja varje,
- vaadeldavus ja tulealade kasutatavus,
- lahinguvõime säilitamiseks vajalike ühenduste kvaliteet,
- suunatus otse sihtalale.

2. Sõjaväelise maastikuanalüüsi automatiseerimise võimalusi

Maastikuanalüüsi automatiseerida aitavate süsteemide arendamisel tuleb silmitsi seista paljude väljakutsetega. Näiteks peavad arendatavad algoritmid võimaldama ülesandeid kiiresti ja efektiivselt lahendada, sest LLE on pidev ja ajamahukas protsess. Samuti on sellistes süsteemides vajalik kombineerida erinevaid maastikku kirjeldavaid näitajaid informatsiooniga sõbralike ja vastasjõudude kohta (Grindle *et al.* 2004). Kuivõrd aga mitmed maastikuanalüüsis tehtavad otsused nõuavad eriteadmisi osapoolte doktriinide kohta (HQDA 1994), saab ka programm või tööriist lähenemissuundade tuvastamiseks olla vaid lõplikku otsust toetav.

Käesoleva peatüki eesmärgiks on anda akadeemilise kirjanduse põhjal ülevaade senistest maastiku läbitavuse ja lähenemissuundade analüüsi puudutavatest mudelitest ja süsteemidest ning võimalikest teoreetilistest lahendustest lähenemissuundade tuvastamiseks.

2.1. Maastiku läbitavuse modelleerimine

Esimesed katsed muldade ja mootorsõidukite rataste vastastikmõjude matemaatilistest formuleerimisest pärinevad 1950. aastatest (Bekker 1956). Muldade uurimise kõrval hakati üsna pea analüüsima ka muude tegurite mõju läbitavusele (Whitmore 1960; Wood, Snell 1960), kuid tollaste uurimuste tulemused olid mõeldud peamiselt USA sõjaväes kasutamiseks (Sivertun, Gumoś 2006). Tänapäeval on maastiku läbitavuse modelleerimine militaarvaldkonna kõrval üha enam kasutust leidnud ka tsiviilvallas. Maastiku läbitavuse hindamine leiab rakendust keskkonnakatastroofide, metsapõlengute ja päästeteenuste osutamise juures alade ligipääsetavuse hindamiseks ning kulude ja reageerimisaja vähendamiseks (Sivertun, Gumoś 2006). Samuti kasutatakse seda metsa- ja põllumajandusmasinatele ning mehitamata maismaasõidukitele optimaalsete marsruutide tuvastamiseks (Park *et al.* 2013; Suvinen 2006), aga ka orienteerumissportlastele võistlustel kiireimate teekondade leidmiseks (Kay 2012). Kindlasti pole aga läbitavuse tähtsus sõjaväes vahepeal kahanenud.

Maastiku läbitavuse hindamine nõuab oma keerukuse tõttu multidistsiplinaarset lähenemist (Hohmann *et al.* 2013) ning seetõttu esineb läbitavuse modelleerimises väga erinevaid käsitlusi. Oluliselt üldistatult võib aga kasutatavad lähenemised jagada kaheks: topoloogilistele suhetele põhinevad kvalitatiivsed lähenemised ning rastripõhised lähenemised. Viimasel juhul saadakse arvutuste tulemusena ühel või teisel moel sisuliselt rasterkaardikiht, mille elementide väärtused väljendavad selle rastrielemendi läbitavust ehk läbimisega seotud energia- või ajakulu, maksumuse või riskide pöördväärtuseid (Etherington 2012; Rybansky *et al.* 2015). See on ka sagedamini kasutatavaks lähenemiseks.

Mitmete maastiku läbitavuse mudelite puuduseks on suur sisendparameetrite arv, sest nende arvutused lõpliku läbitavuse leidmiseks põhinevad suurel hulgal sõiduki ja maastiku vastastikmõju kirjeldavatel matemaatilistel valemitel (Hohmann *et al.* 2013). Üheks selliseks mudeliks on näiteks *Nato Reference Mobility Model* (NRMM), mille arendamine algas 1970. aastate algul ning mida kasutatakse taktikaliste, analüütiliste ja sõjamängude mudelite ja simulatsioonide jaoks (Shoop *et al.* 2005). NRMM-i võib pidada praeguseks sõjaväe läbitavuse modelleerimise standardiks (Birkel 2003). See koosneb mitmetest alammudelitest ning leiab

vastavalt maastiku takistavatele tegurite ja sõiduki näitajate suhetele maksimaalse liikumiskiiruse, millest omakorda arvutatakse sõiduki sihtpunkti liikumise kiirus (Haley *et al.* 1979).

NRMM-i on oma uurimustes rakendanud mitmed teadlased. Charbonneau ja Stein (2003) kasutasid NRMM-i maastikul huvialade leidmiseks, Shoop *et al.* (2005) aga sõjaväe harjutusaladel sõidukite liikumise poolt maapinnale avaldatava mõju hindamiseks. Ciobotaru (2009) võrdles NRMM-i põhjal tanki M1 ja maasturi HMMWV läbitavust. Shoop *et al.* (2006) ja Affleck *et al.* (2009) arendasid välja uusi algoritme, et võimaldada NRMM-i kasutada ka talvistes tingimustes liikumise modelleerimiseks. Esineb ka uurimusi, kus NRMM-i deterministlikku olemust on üritatud muuta stohhastilisemaks (Lessem *et al.* 1993). Samas kõigi vajadustele ruumilise lahtuse, kohandatavuse, täpsuse või kiiruse osas NRMM ei vasta. Seetõttu esineb NRMM-i kõrval veel mitmeid sarnaseid simulatsioonides rakendamiseks mõeldud mudeleid, mis tõlgendavad läbitavust sõiduki, maakatte ning reljeefi omadustele vastavalt üsna erinevalt (Birkel 2003; Laib 1998). Samuti peetakse probleemiks asjaolu, et nendes mudelites kasutatav suur hulk matemaatilisi valemeid võimaldab läbitavust hinnata küll väikestel aladel, kuid nad ei ole kohased suuremate alade analüüsimiseks GIS platvormidel (Hohmann *et al.* 2013).

Alljärgnevalt käsitleme just GIS-is rakendatud mudeleid ja süsteeme.

Donlon ja Forbus (1999) lähenesid maastiku läbitavuse määramisele kvalitatiivselt GIS tarkvaras domeeniteooriaid rakendades. Nende domeeniteooriad kujutasid endast sisuliselt reeglistikke, mis väljendasid vastavalt topoloogilistele suhetele erinevate maastikuomaduste mõju läbitavusele. Autorid väitsid, et läbitavus on maastiku ja sõiduki binaarne suhe ning et seda saab kujutada kvalitatiivselt ja kvantitatiivselt: sõiduki suutlikkust teatud ala läbida võib väljendada kvalitatiivselt ja maastiku mõjusid sellele liikumisele kvantitatiivselt. Selliste domeeniteooriate kasutamine võimaldas defineeritud kvalitatiivseid reegleid ja muutujaid hiljem arvutusalgoritmides rakendada. Peale maastiku läbitavust käsitlevate domeeniteooriate kirjeldati ka teadmisi maastikust ning sõidukite omadustest ja võimekusest. Samuti loodi domeeniteooriad esindamiseks maastiku digitaalset kujutusviisi. Domeeniteooriate kasutamine võimaldas arvutusteks kuluvat aega oluliselt vähendada ning andis seniste arvutusmahukate meetoditega võrreldes sarnaseid tulemusi, kuid vajas edasiarendamist ja -uurimist.

Slocum *et al.* (2003) arendasid läbitavuse hindamiseks analüüsimootori, mis samuti võimaldas manuaalset maastiku läbitavuse kaardikile moodustamise protsessi märgatavalt kiiremaks muuta. Süsteem kujutas endast veebirakendust, mis teostas arvutusmahukamad ülesanded serveris ja lasi kasutajal sisendparameetreid muuta. Läbitavuse määramine toimus rasteranalüüsi põhimõttel. Iga geograafilise teguri mõju läbitavusele arvutati ja kaaluti eraldi, leides nii antud tegurit iseloomustava rasterkaardikihi elementide väärtused. Saadud kihtide põhjal moodustati kohakuti olevate elementide alusel lõplikku läbitavust kujutav rasterkiht. Süsteem oskas läbitavust määrata ka osaliselt puudevate maastikuandmete korral ning hinnata tulemi usaldusväärsust.

Eichrodt (2003) kirjeldas oma doktoritöös Šveitsi metsade läbitavuse hindamiseks loodud ekspertsüsteemi, mis kasutas hinnangu andmiseks maastikuanalüüsi mudeleid, mulla

niiskussisalduse ajalist käiku prognoosivat mudelit ning sõiduki mäkketõusuvõime analüüsi. Samuti sai kasutaja valida sisendparameetrid. Autori hinnangul oli süsteem läbitavuse määramise jaoks oluliste tegurite – mulla niiskussisalduse ja vastupidavuse – määramisel üsna täpne.

Suvinen (2006) töötas välja GIS-il põhineva mudeli metsaveomasinatele maastikul optimaalsete marsruutide leidmiseks, mida saaks kasutada ka militaarsõidukite jaoks. Sarnaselt Slocum *et al.* (2003) mudelile on ka siin tegemist objektorienteeritud programmiga, kus lõplik läbitavust kujutav rasterkiht saadakse erinevate tegurite mõju väljendavate kihtide kombineerimisel. Suvinen väitis, et maastiku läbitavus sõltub ennekõike muldade võimest vastu pidada sõiduki rataste poolt avaldatud jõududele. Tema mudel kasutas läbitavuse määramiseks sõiduki karakteristikuid, vastastikmõjusid sõiduki rataste ja maastiku vahel, maastiku reljeefi, teedevõrku ning andmeid metsade ja ilma kohta. Liikumistõketeks loeti mudelis metsi, suure niiskussisaldusega muldi, suuri kive, järsakuid, veekogusid ja elektriliine.

Sivertun ja Gumoś (2006) kasutasid läbitavuse modelleerimisel andmeid geomorfoloogia, veestiku, maakatte, mullastiku ning inimtekkeliste objektide kohta. Nende mudelis oli oluline koht hüdroloogilisel alammudelil ja kõrgusmudeli korrastamisel vastavalt kõrgusjoonte. Mullad klassifitseeriti niiskuse järgi kolmeks: märjad, niisked ja kuivad mullad. Lõpliku läbitavuse leidmiseks kaaluti eraldiseisvaid nähtuseid kujutavad rasterkihid vastavalt analüütiliste hierarhiate meetodiga leitud olulisusmääradele.

Pahernik *et al.* (2006) uurisid lähemalt reljeefiga seonduvaid läbitavust mõjutavaid näitajaid. Kasutades uuritava ala topograafiast tuletatud niiskuse indeksit, satelliitpiltidelt määratud taimkatet ning andmeid mullatüüpide kohta, hindasid nad maapinna niiskust. Saadud rasterkaardikiht andis erineva niiskustasemega tingimustes optimaalsete teekondade leidmisel veenvaid tulemusi, kuid autorid rõhutasid, et läbitavuse hindamiseks on kindlasti vaja arvesse võtta ka muid tegureid.

Hohmann *et al.* (2013) arendasid välja sõidukite läbitavust hindava süsteemi, mis võimaldas arvutada välja liikumiskiirused erinevatele sõidukitele nii teedel kui maastikul. Süsteem kasutas nii kõrgusmudelite, satelliitpiltide ja vektorandmebaaside kui ka kliima-, meteoroloogiliste, mullastiku- ja maakatteandmebaaside andmeid ning liikumiskiiruse määramine põhines ühteagu arvutusudelitel ja katsetulemustel. Autorite kinnitusele vastasid süsteemi poolt prognoositud liikumiskiirused valideerimisel läbiviidud testide tulemustele hästi.

Pimpa *et al.* (2014) koostasid maastiku läbitavuse kaardid neljale militaarsõidukile, kasutades reljeefi, taimkatte, mullastiku ja maakatte andmeid. Autorid jaotasid mõjud läbitavusele viie olulisima teguri alla, kusjuures üheks neist oli positiivsete ja negatiivsete nõlvakallete vahelduvus kilomeetri kohta. Läbitavusele lõpphinnangu andmiseks korrutati tegureid kujutavad rasterkihid omavahel.

Militaarsõidukite läbitavust maastikul on viimastel aastatel palju uurinud ka Tšehhi teadlased (Hofmann *et al.* 2013; Hofmann *et al.* 2015; Rybansky, Vala 2009; Rybansky 2015; Rybansky *et al.* 2015; Talhofer *et al.* 2011; Talhofer *et al.* 2015), kelle töödes on lähenemine läbitavuse mõõtmisele üsna sarnane. Nad jaotasid liikumiskiirust mõjutavad tegurid seitsmesse kategooriasse: reljeef, metsad, mullastik, ilm ja kliima, veestik, hoonestatud alad ning

teedevõrk (Talhofer *et al.* 2011). Iga kategooriat iseloomustasid mitu tegurit või koefitsienti, mida oli võimalik iseseisvalt määrata. Näiteks kuulusid metsi iseloomustavasse kategooriasse puude tüvede omavahelise kauguse, tüvede diameetri, puude kõrguse, tüübi ja juurestiku koefitsiendid. Kategooriaid iseloomustavate tegurite alusel leiti nn kaardialgebrat kasutades kategooriate kaupa läbitavust kujutavad kaardikihid ning nende alusel omakorda lõplikku läbitavust väljendav kiht (Talhofer *et al.* 2015). Oluliseks aspektiks peavad nad ruumiandmete ebamääraste piiride ja muude ebatäpsustega tegelemist (Hofmann *et al.* 2013; Hofmann *et al.* 2015; Talhofer *et al.* 2015), rakendades selleks hägusloogikat (*fuzzy logic*). Tulemuste valideerimisel järeldavad nad, et tulemi kvaliteet sõltub olulisel määral algandmete kvaliteedist (Hofmann *et al.* 2015; Talhofer *et al.* 2011) ja üksikute tegurite täpsusest (Rybansky *et al.* 2015), kuid arvutuste täiustamine ja kõrgema ruumilise lahutuse kasutamine pikendaks märkimisväärselt ka arvutusteks kuluvat aega (Hofmann *et al.* 2015; Rybansky *et al.* 2015). Vaatamata hägusloogika põhjendatud rakendamisele ebatäpsete ruumiandmete korral on kvaliteetsete andmete olemasolul läbitavuse modelleerimiseks kasulikum kasutada selgete piiridega ruumiandmeid (Hofmann *et al.* 2013).

2.2. Lähenemissuundade automaattuvastus

Maastiku läbitavuse kaardikilet nimetatakse mõnikord ka lähenemissuundade kileks, sest see aitab tuvastada marsruudid rünnatavale objektile või võtmemaastikule liikumiseks ka siis, kui ei ole võimalik kasutada teid. Samuti on maastiku läbitavuse kilelt näha alad, mida sõidukitel pole mõistlik ületada (HQDA 1990a). Seega viib läbitavuse analüüs üsna otseselt liikumiskoridoride ja lähenemissuundade leidmiseni (Möts 2010). Samuti saaks seda protsessi GIS süsteemides automatiseerides lahendada kohe tõenäolisemate lähenemissuundade tuvastamise probleemi, jättes vahele liikumiskoridoride identifitseerimise ja kategoriseerimise etapid manuaalselt läbiviidava maastikuanalüüsi kontekstis.

Lähenemissuundade tuvastamise probleemi võiks geoinformaatilise ülesandena sõnastada lihtsustatult järgmiselt: leida (antud üksuse) läbitavust kujutavat rasterkihti kasutades konkreetset alal etteantud laiusega koridorid, mis võimaldavad liikuda punktist A punkti B võimalikult hea läbitavusega aladel. Koridorid peavad olema üksteisest ruumiliselt selgelt erinevad ning samuti tuleb arvestada koridoride sobilikkusega vastavalt teatud kriteeriumitele (vaadeldavus ning tulealade kasutatavus, kate ja varje, ühenduste kvaliteet, kanaliseeritus ning ligipääs võtmemaastikule ja külgnevatele lähenemissuundadele).

Lähenemissuundade tuvastamist käsitlevat akadeemilist kirjandust leidub maastiku läbitavuse temaatikaga võrreldes märksa vähem. Sageli piirduakse üksikutele sõidukitele alg- ja lõpp-punkti ühendavate optimaalsete marsruutide leidmisega, mida lahendatakse kui vähima takistusega raja (*least-cost path*) ülesannet, kus minimeeritavaks väärtuseks on maastiku poolt liikumisele kehtestatav kogutakistus ning raja laiuseks rasterkihi elemendi küljepikkus (nt Pahernik *et al.* 2006; Rybansky *et al.* 2015; Sivertun, Gumoś 2006). Selline lähenemine ei sobi lähenemissuundade leidmiseks mitmel põhjusel: tulemuseks saadav marsruut ei ole piisavalt lai, esitatakse vaid üks parim marsruut ning ei arvestata ülalkirjeldatud kriteeriumitega.

Nimetatud probleemide lahendamiseks on välja pakutud vähima takistusega raja leidmise algoritmidest erinevaid laiendusi.

2.2.1. Optimaalsete koridoride tuvastamine

Vaatleme esmalt võimalusi kindla laiusega vähima takistusega radade leidmiseks rastril, nimetades selliseid teid vähima takistusega ehk optimaalseteks koridorideks ning pinda, mille elementide väärtuste alusel selliste koridoride leidmine toimub, läbitavusrastriks. Niiivõrd lahendused vähima takistusega koridoride tuvastamiseks ei sobi: vähima takistusega rajale puhvri rakendamisel võib moodustatavasse koridori sattuda väga suure takistusega rastrielemente, samuti ei kõlba rastrielementide küljepikkuse suurendamine koridori laiusele vastavaks (Shirabe 2015). Huber ja Church (1985) pakkusid välja kaks paremat alternatiivi.

Üheks võimaluseks on läbitavusrastrit siluda, määrates igale elemendile kõigi selliste elementide väärtuste summa või keskmise, mis jäävad antud elemendist poole koridori laiuse kaugusele, ning silutud läbitavusrastri põhjal leida vähima takistusega rada (*ibid.*). Selle lähenemise puuduseks on asjaolu, et osade elementide väärtuseid algsest rastrist kasutatakse uute elementide väärtuste arvutamiseks rohkem kui teisi (Shirabe 2015).

Teiseks võimaluseks on teisendada läbitavusraster graafiks, mille tipud esindavad rastrielemente ja servad lähedalasuvate elementide paare. Serva kaalu arvutamiseks asetatakse vastavate elementide keskkoha vahele riskülik, mille laius on võrdne otsitava koridori laiusega ning riskülikuga lõikuvate rastrielementide väärtused liidetakse vastavalt lõikunud pinna osakaalule elemendi pinnast. Servade kaalude alusel saabki leida vähima takistusega koridori (Huber, Church 1985), kuid peamiseks probleemiks selle meetodi kasutamiseks lähenemissuundade tuvastamisel on potentsiaalselt tohutu suur graafi tippude ja servade arv, mis oleneb konkreetse ala mõõtmetest, rastrielementide küljepikkusest ning graafi servade leidmiseks kasutatavast „otsinguraadiusest“ (Scaparra *et al.* 2014). Kui lähenemissuundade analüüsi teha suurel alal, võib graafi moodustamisel tekkida arvutustel mäluprobleeme.

Gonçalves (2010) pakkus vähima takistusega koridoride tuvastamiseks välja mudeli, milles ta kujutab koridori alana, mis on saavutatud teatud pikliku hulga külgnevate rastrielementide ehk koridori frondi nihutamisel. Selline käsitlus võimaldas koostada graafi, mille tipud esindasid võimalikke fronte ja servad lubatavaid üleminekuid ühest frondist teise ning lahendada saadud graafi kasutades lühima raja (*shortest path*) ülesanne. See mudel on efektiivne vaid juhul, kui fronidid on lühikesed, sest frondi pikkuse kasvades suureneb eksponentsiaalselt ka moodustatava graafi tippude arv (Shirabe 2015). Näiteks on aga pataljoni lähenemissuuna laiuseks kuni 2 km, mis tähendaks mõistliku ruumilise lahutusega läbitavusrastri korral väga pikka koridori fronti ning seetõttu ei saa seda lähenemist antud töös kasutada.

Shirabe (2015) kasutas vähima takistusega koridori leidmiseks samuti graafi. Tema meetod seisneb läbitavusrastri teisendamises graafiks selliselt, et graafi tipud esindavad teatud kuju ja mõõtmetega naabruseid ning servad lubatavaid üleminekuid ühest naabrusest teise. Seejärel saab graafiga lahendada lühima raja ülesande. Ka siin on probleemiks potentsiaalselt liiga suur graafi tippude ja servade arv, samuti võib genereeritav rada iseendaga lõikuda.

2.2.2. Suboptimaalsete koridoride leidmine

Maastikuanalüüsis üritatakse liikumiskoridoride ühendamisel lähenemissuundadeks leida lõppkokkuvõttes üldjuhul mitu marsruuti, mis oleksid liikumiseks kõige sobivamad. See võimaldab hiljem tegevusvariandi valikul neid otsuste tegemisse kaasata või kasutada lähenemissuundi erinevalt, näiteks kõrval- või petterünnakuks (HQDA 1994). Seega ei piisa vaid ühe parima algus- ja lõpp-punkti ühendava marsruudi leidmisest. Sama kehtib paljude transpordivõrke käsitlevate optimeerimisprobleemide puhul, sest parim marsruut ei pruugi olla kasutatav või soovitatav (Kuby *et al.* 1997). Piisavalt heade radade leidmiseks on välja pakutud mitmeid algoritme ja optimeerimismudeleid. Üheks selliseks on näiteks *k* lühima raja (*k-shortest path*) algoritm, mis võimaldab kahe punkti vahel leida teatud (*k*) arvu lühimaid marsruute. Antud algoritmiga genereeritavad marsruudid on aga üksteisega ruumiliselt väga sarnased – tüüpiliselt on need vaid tühiste hälvetega optimaalse marsruudi suhtes (Scaparra *et al.* 2014). Marsruutide ruumilise erinevuse suurendamiseks pakkusid Scott *et al.* (1997) välja *k* sarnase raja (*k-similar path*) leidmise meetodi, võimaldades leida marsruudid, millel on maksimaalselt *k* ühist lüli. Samas on selliste radade leidmine väga arvutusmahukas (Scaparra *et al.* 2014).

Arvutusmahu vähendamiseks alternatiivide genereerimisel tuleks optimeerimismudelile kitsenduste lisamise asemel muuta sihifunktsiooni (*ibid.*). Sellise käsituse heaks näiteks on iteratiivtrahvide meetod (*iterative penalty method* – IPM), mille töötasid teineteisest sõltumatult (Lombard, Church 1993; Scaparra *et al.* 2014) välja Ayad (1967) ja Turner (1968). Pärast iga lühima raja ülesande lahendamist lisab IPM lahendisse kuuluvate graafi servade ja tippude läbimisele trahvid, pärssimaks nende kasutamist järgmistes marsruutides. See aga tähendab, et meetodi tõhusus sõltub otseselt trahvide määramise strateegiast ning nende suurusest (Scaparra *et al.* 2014).

IPM-i ja *k* lühima raja algoritmide edasiarendustes kasutatakse ära nende efektiivsust ja rakendamise lihtsust suure hulga marsruutide genereerimisel, et seejärel tegelda saadud marsruutide erinevuse hindamisega. Sellele ideele põhineb Kuby *et al.* (1997) esitatud *minimax* meetod ja Akgün *et al.* (2000) välja töötatud *p*-dispersiooni mudel. *Minimax* meetodiga leiti esmalt genereeritud marsruutide seast lühim ning iga järgmise marsruudi valimiseks lahendati optimeerimisprobleem, milles on kaks muutujat: antud marsruudi pikkus ja selle erinevus juba valituks osutunud marsruutidest. Seejuures mõõdeti marsruutide erinevust nende lõikude pikkuste alusel, mis ei olnud marsruutidel ühised. Akgün *et al.* (2000) al leidsid oma mudelis genereeritud marsruutidest ruumiliselt erinevad marsruudid diskreetset *p*-dispersiooni mudelit lahendades. Kui tüüpiliselt on *p*-dispersiooni probleemide lahendamisel eesmärgiks *p* arvu punktide korral punktipaaride vahelise vähima vahemaa maksimeerimine, siis antud mudelis rakendati seda ülesandepüstitust valitud marsruutidel. Marsruutide sarnasust mõõdeti ühiste lõikude põhjal arvutatud indeksi kaudu.

Marsruutide ruumilise erinevuse mõõtmine ühiste lõikude põhjal ei ole aga alati põhjendatud või ei pruugi anda soovitud tulemusi (Scaparra *et al.* 2014). Lombard ja Church (1993) kasutasid marsruutide erinevuse hindamiseks teistsugust lähenemist. Nende „väravat läbiva lühima raja“ (*gateway shortest path* – GSP) mudelis leitakse esmalt lühim marsruut ning kõiki

graafi tippe, mis sellesse marsruuti ei kuulu, loetakse nn väravatippudeks. Seejärel arvutatakse kaks lühimate radade puud, millest üks lähtub otsitava marsruudi alguspunktist ja teine lõpppunktist. Saadud puud võimaldavad leida kõiki väravatippe läbivad lühimad rajad, mille ruumilist erinevust võrreldes alguses leitud lühima rajaga mõõdetakse nendele marsruutidele vastavate ruumikujude vahelise ala pindala kaudu (peatükk 4.4.2). Lombard ja Church (1993) esitasid selliste marsruutide genereerimiseks ja ruumilise erinevuse arvutamiseks efektiivse meetodi.

GSP tugevuseks on asjaolu, et arvutusmahukat lühima raja algoritmi tuleb rakendada vaid kahel korral ning meetodi tulemusena genereeritakse vaid $n - 2$ marsruuti, kus n tähistab graafi tippude arvu (Scaparra *et al.* 2014). GSP-d võib lugeda arvutusefektiivsuselt ja saavutatavate marsruutide kvaliteedilt paremaks kui IPM-i (Lombard, Church 1993), kuid ka sellel esineb puudusi: teatud tingimustes võib marsruutides esineda tsükleid, osi häid alternatiive ei pruugita tuvastada ning marsruutide ruumilise erinevuse määramisel võrreldakse neid vaid optimaalse marsruudiga (Akgün *et al.* 2000). Neist kaht esimest probleemi aitab lahendada Scaparra *et al.* (2014) välja pakutud „mitut väravat läbiva lühima raja“ (*multi-gateway shortest path – MGSP*) mudel, mis, nagu nimigi ütleb, kasutab marsruutide leidmiseks mitut väravatippu. Tulemuseks on GSP-st laiem valik hea kvaliteediga alternatiivseid marsruute, kus tsüklite esinemine on ebatõenäolisem. Samas aga toob see endaga kaasa olulise arvutusmahukuse tõusu, sest marsruutide tuvastamiseks tuleb leida lühimad rajad graafi kõikide tipupaaride vahel ning teostada suur hulk muid kontrole ja arvutusi, mis GSP puhul vajalikud ei olnud.

2.2.3. Kriteeriumite olulisuse hindamine lähenemissuundade tuvastamisel

Lähenemissuundade praktilisel tuvastamisel tuleb peale maastiku läbitavuse arvestada veel mitmete peatükis 1.3 mainitud kriteeriumitega. Näiteks on head katet pakkuv lähenemissuund eelistatum kui lähenemissuund, mis pakub kehvemat katet või asub head katet pakkuvatest aladest kaugemal. Seega võib sarnaselt läbitavusrastrile koostada ka rasterkihid, mille iga element kujutab sobivust vastavalt konkreetsele kriteeriumile, ning kasutada neid kihte lähenemissuundade tuvastamisel. Kriteeriumite olulisuse alusel saab määrata saadud kihtidele kaalud ning neid seejärel arvutustes kasutada. Kaalude rakendamiseks on mitu võimalust. Näiteks võib koostada nimekirja võimalikest n -ö stsenaariumitest: tankipataljoni liikumine mehhaniseeritud jalaväepataljoni vastu rünnakule, motolaskurkompanii rünnak pioneerirühma vastu vms. Samas sõltuvad kaalud mõningal määral ka konkreetse situatsiooni spetsiifikast: üksuse ülesandest, saadavalolevast toetusest ja ajaraamidest (HQDA, HQMC 2009). Seega ei saa moodustada unikaalset rasterkihti, mis igas situatsioonis lähenemissuundade tuvastamise ülesande lahendamiseks sobiks. Selle asemel peaks lähenemissuundade määramist toetavas süsteemis olema kasutajal endal võimalik kriteeriumitele kaale määrata või vaikimisi kehtestatavaid kaale muuta.

Selleks, et lõplikku otsust mõjutavate kriteeriumite kaale võimalikult objektiivselt määrata, on erinevaid võimalusi (Touran *et al.* 2009). Üheks kasutatavamaks meetodiks kaalude määramiseks (Malczewski 2006) on GIS analüüside puhul kriteeriumite paariviisiline võrdlemine, mida kasutatakse analüütiliste hierarhiate meetodis (*analytic hierarchy process –*

AHP). Meetodi töötab välja USA matemaatik T. L. Saaty. Paariviisilisel võrdlemisel hinnatakse huvialuse eesmärgi suhtes ühe kriteeriumi suhtelist olulisust võrreldes teise kriteeriumiga (Saaty 1987). Tüüpiliselt kasutatakse AHP-s kriteeriumite võrdlemisel 9-punkti skaalat (Ishizaka, Labib 2011), kus 1 – võrdne olulisus, 3 – mõõdukas olulisus, 5 – tugev olulisus, 7 – väga tugev olulisus ja 9 – äärmine, suurim võimalik olulisus. Numbrid 2, 4, 6 ja 8 tähistavad vahepealseid hinnanguid. Pärast paariviisilist võrdlemist paigutatakse kriteeriumite olulisuse hinnangud maatriksisse ning arvutatakse iga kriteeriumi kaal. Hinnangute kooskõlalise kontrollimiseks arvutatakse välja kooskõlaindeks, mis võimaldab tuvastada, kas antud hinnangutes esineb liigseid vasturääkivusi. Ebastabiilsete hinnangute korral tuleb üksikotsustused uuesti üle käia (Saaty 1987).

Mitmed autorid on mitmekriteeriumilise analüüsi käigus kasutanud AHP-d ka just vähima takistusega radade leidmisel. Selliselt on uuritud näiteks aastaringselt kasutatava tee (Atkinson *et al.* 2005), torujuhtme (Nonis *et al.* 2007) ja loomade liikumiskoridoride (LaRue, Nielsen 2008) optimaalset paigutamist ning hinnatud karjääris liikuvatele veokitele sobivaid marsruute (Choi *et al.* 2009).

2.2.4. Taimkatte mõju ümbrisevate alade nähtavusele

Üheks lähenemissuundade hindamise kriteeriumiks on vaadeldavus ja tulealade kasutatavus. Nii vaadeldavuse kui tulealade hindamine taandub nähtavusanalüüsile: tavaliselt kasutatakse selleks kahe punkti vahelise nähtavuse (*line-of-sight* – LOS) või punktist lähtuva vaatevälja (*viewshed*) analüüsi (Caldwell *et al.* 2003; HQDA, HQMC 2009). Sageli põhinevad nähtavusanalüüsid vaid digitaalsel maastikumudelil – DTM-il (nt Caldwell *et al.* 2003; Lu *et al.* 2008; Sevenant, Antrop 2007; Wright *et al.* 2014), arvestamata muuhulgas näiteks taimkatte mõjuga. Sellised analüüsid ei pruugi aga paljudes olukordades anda soovitavaid tulemusi, mistõttu on välja pakutud mitmeid lahendusi taimkatte poolt vaateväljale avaldatava mõju kvantitatiivseks väljendamiseks.

Üheks esimestest (Bartie *et al.* 2011; Llobera 2007; Miller 2011), kes modelleeris nähtavust läbi taimkatte, oli Dean (1997). Ta arvutas alade nähtavuse tõenäosust sõltuvalt vahemaast, mille LOS läbib puuvõrdes ja alustaimestikust. Llobera (2007) aga märkis, et sellel lähenemisel esineb teatud puudujääke: tõenäosuse leidmisel ei võeta arvesse taimkatte tihedust ja LOS-i asendit taimkatte suhtes. Samuti väitis Llobera, et alade nähtavuse tõenäosus sõltub LOS-i taimkattes läbitud vahemaast eksponentsiaalselt, mitte lineaarselt, nagu eeldati Dean'i (1997) mudelis. Llobera (2007) esitas nähtavuse määramiseks uue mudeli, mis põhines Beer-Lamberti valguse neeldumise seadusel: footonite arvu vähenemine valguskiires on taimkattes läbitud vahemaaga seotud eksponentsiaalselt. Nähtavuse tõenäosus leiti valemist

$$p(x) = e^{-k(x) \cdot x}, \quad \text{kui } k \geq 0 \text{ ja } x > 0,$$

kus x tähistas punkti kaugust vaatlejast mööda LOS-i ja $k(x)$ funktsiooni taimkatte tihedusest LOS-il. Llobera mudeli põhimõtteid on kasutatud näiteks linnamaastikes läbi taimkatte nähtavuse määramiseks (Bartie *et al.* 2011).

Esineb ka oluliselt detailsemaid lähenemisi, kus nähtavuse modelleerimiseks kasutatakse näiteks LIDAR punktipilvi (nt Guth 2012) või käsitletakse iga puu mõju eraldi (nt Bartie *et al.* 2011; Liu *et al.* 2008).

2.2.5. Varasemad lähenemissuundade tuvastamist käsitlevad uurimused

Senised lähenemissuundade leidmist käsitlevad uurimused on kasutatava meetodika poolest üksteisest üsna erinevad. Nagu maastiku läbitavuse modelleerimise puhul, on ka siin mitmed esimesed uurimustööd tehtud USA sõjaväe heaks (nt Campbell *et al.* 1997).

Benton *et al.* (1995) töötasid välja ekspertsüsteemi, mis võimaldas vastavalt maastiku läbitavusele ja teadaolevatele ohtlikele aladele leida üksuste liikumiseks sobivaimad marsruudid. Kõigepealt ühendasid nad läbitavust kujutaval rasterkihil sarnase läbitavusega alad, moodustades uue rasterkihi, mille elemendid kujutasid kas kergesti läbitavust või raskesti läbitavust. Raskesti läbitavaid alasid võis sellel kihil vaadelda kui läbimatuid tõkkeid, mis sunnivad üksust liikuma vasakule või paremale. Kergesti läbitavaid alasid kujutavate rastrielementide alusel moodustati õhendamisalgoritmi kasutades ühe elemendi laiused rajad, mis seejärel vektoriseeriti. Saadud radade võrgustik kujutas liikumiskoridoride „skeletti“, millest omakorda moodustati graaf. Pärast graafi lihtsustamist sai vastavalt algse läbitavusrastri elementide väärtustele ja sisestatud ohualadele leida graafi servade kaalud. Süsteem võimaldas arvutada kasutaja poolt sisestatud arvu iseseisvaid marsruute, millel pole ühiseid graafi servasid ega tippe. Pärast iga marsruudi leidmist eemaldati selle marsruudi moodustanud servad graafist, seega kulgesid kõik marsruudid ruumiliselt väga erinevalt.

Jung *et al.* (1996) lähtusid võimalike lähenemissuundade analüüsimisel kuuest kriteeriumist: vaadeldavus ja tulealade kasutatavus, kate ja varje, liikumistõkked, võtmemaastike osakaal kogumaastikust, liikumiskoridoride laius ning maastiku läbitavus. Kriteeriumite kaalud määrati eksperthinnangute alusel Delfi meetodit rakendades ning kaalude korrutamisel kriteeriumi hinnanguga leiti kasutaja poolt sisestatud lähenemissuundadest sobivaimad.

Forbus *et al.* (2002) uurisid, kuidas leida sõjateemalises arvutimängus arvuti poolt juhitavatele üksustele tõketeta liikumiskoridore. Nad konstrueerisid liikumistõkkeid kujutavate alade polügoonide käänupunktide alusel Voronoi diagrammi. Liikumiseks sobilikud rajad leidsid nad diagrammi selliste rakkude piiride ühendamisel, mis polügoonide piiridega ei lõikunud (peatükk 4.4.1).

Sama lähenemist on üksuste liikumiskoridoride identifitseerimisel kasutanud ka grupp USA teadlasi (Glinton *et al.* 2004; Glinton *et al.* 2005; Grindle *et al.* 2004; Sycara *et al.* 2009). Üksuste liikumise kujutamiseks toovad nad sisse analoogia elektriahelate teooriaga (*circuit theory*), modelleerides taktikalisi manöövreid rasterkihil, mille iga element on ümbritsevate elementidega seotud kaheksa takistiga. Neid takistusi võib võrrelda taktikaliste liikumistakistustega, mis esinevad üksuse liikumisel rastrielemendist selle naabritesse. Iga elemendi takisteid läbiv vool on takistites väljendatud vektoriga, mille suuna ja pikkuse määravad takistit läbiva voolu suund ja tugevus. Elemendi vektor saadakse ümbritsevate takistite vektorite ja välja summeerimisel. Parim lähenemissuund vastab vähima takistusega

ehk maksimaalse vooluga rajale. Sarnast vektorvälja mudelit rakendavad lähenemissuundade leidmiseks ka Witkowski *et al.* (2008). Kirjeldatud uurimused näivad andvat häid tulemusi, paraku aga puuduvad enamkasutatavates GIS programmides võimalused elektriahelate teooria või vektorvälja põhimõtete mugavaks rakendamiseks.

Svenson ja Sidenbladh (2003) pakkusid lähenemissuundade tuvastamiseks välja agendipõhise modelleerimise (Heppenstall *et al.* 2012) lähenemise, rakendades nn sipelgakoloonia algoritmi. Maastiku läbitavust ja võtmemaastikke kujutaval rasterkihil sisestati „sipelgad“ algselt vastase üksuse asukohta. Kui sipelgas leidis sõbralike jõudude üksuse, liikus ta tulnud teed tagasi pessa, jättes maha teekonnamärgistuse (feromooniraja) ning tõstes ühtlasi selle raja rastrielementide läbitavust. Nii joonistusid välja alad, mida vastane võib potentsiaalselt ründamiseks kasutada. Samas pole antud lähenemisega garanteeritud üksuse liikumiseks piisava laiusega koridoride tuvastamine, samuti ei toeta see mitme ruumiliselt erineva marsruudi leidmist.

Käesolevas peatükis esitatud kirjanduse ülevaate põhjal võib teha kokkuvõtte, et kuigi maastiku läbitavus on küllaltki palju uuritud temaatika ning lähenemissuundade automaattuvastamisel näib olevat saavutatud samuti märkimisväärselt häid tulemusi (Sycara *et al.* 2009), on GIS tarkvaras lähenemissuundade analüüsi automatiseerimisega tegeletud väga vähe. Samuti takistab suur arvutusmahukus mitmete kirjeldatud mudelite ja algoritmide rakendamist, mistõttu tuleb loodavas lähenemissuundade automaattuvastamise meetodikas kasutada võimalikult arvutusefektiivseid tööriistu ja algoritme.

3. Kasutatud andmed ja tarkvaralised vahendid

3.1. Kasutatud andmed

Käesoleva töö koostamiseks kasutatud ruumiandmed on toodud tabelis 1. Andmetöötlusteks viidi kõik ruumiandmed koordinaatsüsteemi *WGS 1984 UTM Zone 35N*, mis on Eesti Kaitseväes enimkasutatavaks koordinaatsüsteemiks.

Tabel 1. Töös kasutatud andmestikud.

Andmestik	Formaat	Mõõtkava / resolutsioon	Päritolu	Märkused
Eesti topograafia andmekogu (ETAK) tuumandmebaas	Vektor	1:10 000	Maa-amet	2015. aasta seisuga
Eesti Kaitseväe digitaalne maastikumudel (DTM)	Raster	5 m	Eesti Kaitsevägi	2013. aasta seisuga, aluseks Maa-ameti LIDAR andmed 2010.-2013. aasta seisuga
Eesti Kaitseväe digitaalne pinnamudel (DSM)	Raster	5 m	Eesti Kaitsevägi	2013. aasta seisuga, aluseks Maa-ameti LIDAR andmed 2010.-2013. aasta seisuga
Mullastiku läbitavuse andmekiht	Vektor	1:10 000	Kaitseväe Ühendatud Õppeasutused	2016. aasta seisuga, aluseks välitööd, Eesti mullastiku kaart 2015. aasta seisuga, ETAK 2015. aasta seisuga ja maaparandussüsteemide andmebaas 2016. aasta seisuga

3.2. Kasutatud tarkvaralised vahendid

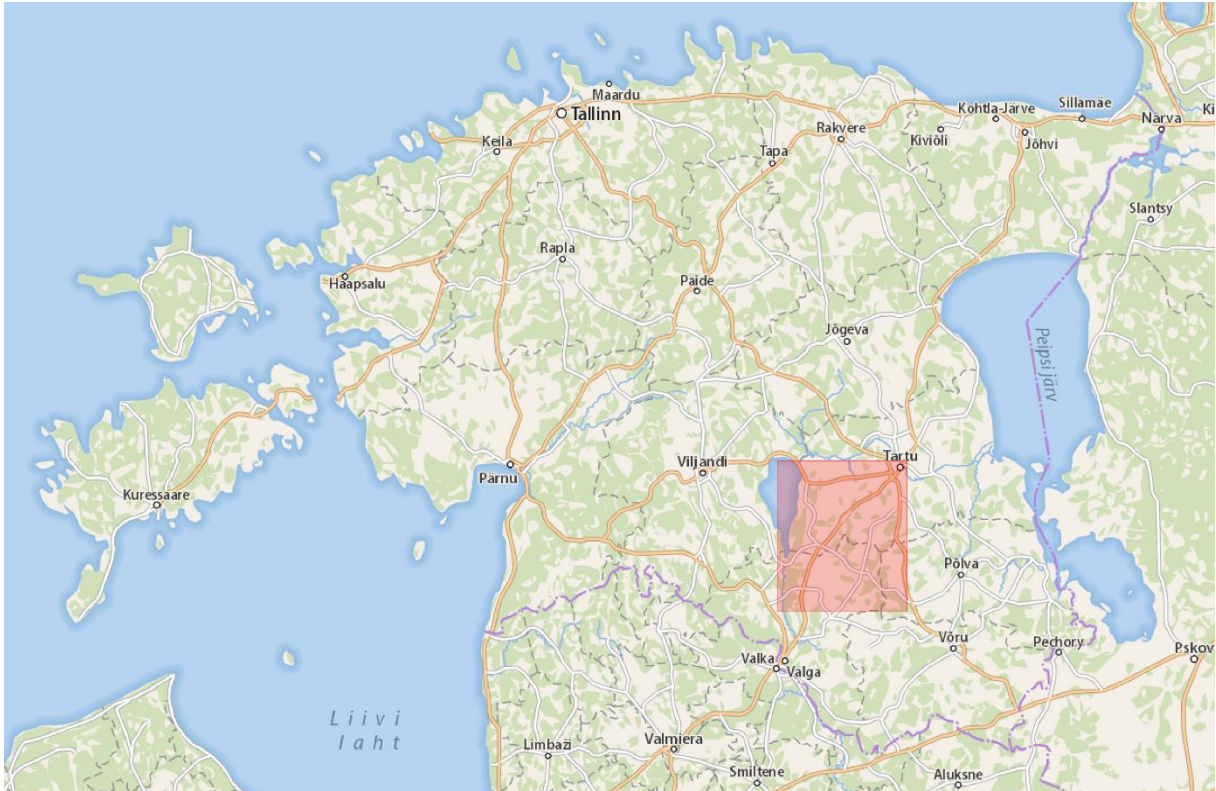
Ruumiandmete töötlemiseks kasutati käesolevas töös tarkvara ArcGIS. Andmetöötluste automatiseerimiseks ja algoritmide implementeerimiseks ArcGIS-is kasutas autor antud töös programmeerimiskeelt Python ning selle paketti *ArcPy*.

Graafiarvutusteks kasutati Pythoni paketti *NetworkX*, mis on selleks otstarbeks üks rakendatumatest pakettidest (Xu *et al.* 2010). Testiti ka paketti *igraph*, mille efektiivsus ning võimekus suurte graafide moodustamiseks ja lahendamiseks oli eelmisega sarnane, kuid *NetworkX* pakkus käesolevas töös püstitatud ülesannete lahendamiseks ja algoritmide implementeerimiseks mugavamaid võimalusi.

3.3. Uuritava ala lühikirjeldus

Enamik töös kasutatud ruumiandmeid sisaldas informatsiooni terve Eesti kohta, kuid saadavalolevad mullastikuandmed katsid vaid teatud ala Võrtsjärvest kagus (joonis 3). Sellest

tulenevalt valiti käesolevas töös vaadeldavaks piirkonnaks vaid see ala. Samas aga lähtuti tingimusest, et töö käigus koostatav mudel sobiks maastiku läbitavuse määramiseks terves Eestis ning välja töötatav lähenemissuundade algoritm võimaldaks leida lähenemissuundi kogu Eesti alal. Uuritava ala asukohta kujutab joonis 3.



Joonis 3. Uuritava ala asukoht. Aluskaardina on kasutatud Eesti Kaitseväge veebikaarti.

Uuritav ala piirneb läänes Võrtsjärve ja Väike-Emajõega, kirdes Tartu linnaga ning lõunaosas asub Otepää looduspark. Vastupidiselt ala lõunaossa jäävale üsna künklikule Otepää kõrgustikule, kus maapind ulatub ümbritsevatest aladest enam kui 100 meetrit kõrgemale, on ala põhjaosas reljeef suhteliselt tasane. Piirkonnas tervikuna domineerivad kahkjad leetunud ning erosiooniohtlikud ja erodeeritud mullad. Suur osa ala põhjaosast on kaetud põllumaaga, mis teeb maastiku üsna avatuks. Lisaks esineb Suur-Emajõe ääres ka märgalasid. Fragmenteeritumas lõunaosas vahelduvad metsa- ja põllumaad ning veekogud maastikul rohkem. Sealne poolkinnine ja kinnine maastik sobib kaitsetegevuseks paremini. Tähtsamateks liikumisteedeks on uuritavas alas Tartu-Valga, Tartu-Viljandi ja Tartu-Võru põhimaanteed ning Tatra-Otepää-Sangaste, Sangla-Rõngu ja Rõngu-Otepää-Kanepi tugimaanteed.

4. Metoodika

4.1. Maastiku läbitavuse mudeli moodustamine

Maastiku läbitavuse modelleerimiseks otsustas autor kasutada rastripõhist lähenemist, milles leitakse kõigepealt rasterkihid, mis kirjeldavad erinevate tegurite mõju läbitavusele ning seejärel kombineeritakse need kokkuvõtlikuks rasterkihiks. Sama lähenemist on varem kasutanud mitmed muud autorid (nt Hofmann *et al.* 2015; Pimpa *et al.* 2014; Sivertun, Gumoś 2006; Slocum *et al.* 2003). Rastripõhine lähenemine võimaldab vektoripõhisega võrreldes pidevat ruumimudelit paremini uurida, vajamata punkthaaval nähtustevaheliste vastastikmõjude defineerimist. Lisaks on rasteranalüüsid reeglina andmete lihtsa struktuuri tõttu hõlpsasti teostatavad, võimaldades rakendada laiaulatuslikumaid analüüsvahendeid (Price 2010).

Modelleerimises kasutatavate rasterkihtide elementide mõõtmeteks valiti 5x5 m, sest sama ruumilise lahutusvõimega olid ka töös kasutatud DTM ja DSM. Samuti, kui võtta arvesse, et kaasaegsete militaarsõidukite laius jääb üldiselt vahemikku 2,5-3,8 m (RSMS 1999; Shoop *et al.* 2005) ja arvestada sellele juurde sõiduki manööverdamisruum, võib ühe sõiduki liikumiskoridori vaadelda kui ligikaudu 5 m laiust ala.

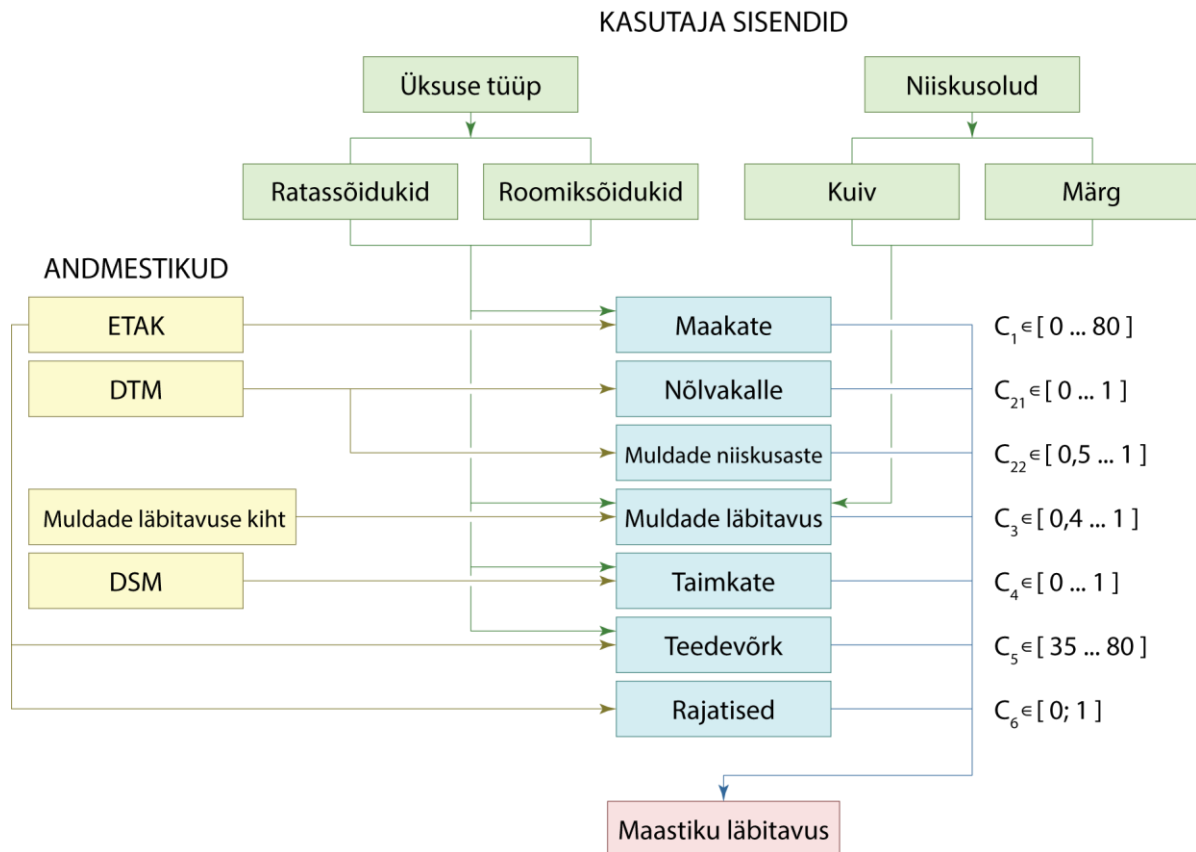
Sõidukite maastiku läbitavust mõjutavad nii maastiku kui sõiduki omadused, kusjuures viimaste puhul on olulisteks teguriteks muuhulgas sõiduki mõõtmed, võimsus, kliirens (kõrgus maapinnast), maksimaalne otsekalle, maksimaalne külgekalle, ujuvus, mass, pöörderaadius, maksimaalne vertikaalsete tõkete kõrgus ning see, kas sõiduk liigub roomikutel või ratastel (HQDA 1990a; Sivertun, Gumoś 2006). Kõigi selliste tegurite kaasamine analüüsi on põhjendatud, kui hinnatakse teatud konkreetse sõiduki läbitavust. Lähenemissuundade tuvastamisel tuleb aga vaadelda üksuste läbitavust tervikuna ning kuna üksused kasutavad üldiselt erinevat tüüpi sõidukeid, pole mõistlik kõigi sõidukite omadusi eraldi analüüsida. Seetõttu jagatakse käsitletavat üksused käesolevas töös kaheks: roomik- ja ratassõidukitel liiguvad üksused. Selle põhjuseks on suurel määral ka töös kasutatud muldade läbitavuse andmestik, milles kategoriseeriti sõidukid läbitavuse hindamiseks samamoodi kahte gruppi (peatükk 4.1.3).

Maastiku läbitavust mõjutavad tegurid võib jagada suhteliselt stabiilseteks ja muutlikeks. Suhteliselt stabiilseteks teguriteks võib pidada näiteks mullastikku, reljeefi ja veekogusid, muutlikeks aga näiteks ilmatingimustest tulenevaid ja inimeste loodud liikumistõkkeid (Sivertun, Gumoś 2006). Antud töös läbitavuse modelleerimisel rakendatud peamised mõjutegurid ja nende tähistused on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Maastiku läbitavuse modelleerimisel rakendatud mõjutegurid koos tähistustega.

Tähis	Tegur	Tähis	Tegur	Tähis	Tegur
C ₁	Maakate	C ₃	Mullastik	C ₅	Teedevõrk
C ₂	Reljeef	C ₄	Taimkate	C ₆	Rajatised
C ₂₁	Nõlvakalle				
C ₂₂	Muldade niiskusaste				

Maastiku läbitavuse kihi moodustamise üldine loogika oli järgmine: esmalt koostati maakatete alusel rasterkiht, mille elementide väärtused kujutasid alade läbimise keskmist kiirust konkreetse üksuse tüübi ja ideaalsete tingimuste korral. Maakatete kiht korrutati läbi liikumistakistuste koefitsientide väljendavate kihtidega (koefitsientidele C_{21} , C_{22} , C_3 ja C_4 vastavad kihid). Seejärel asendati aladel, kus esines teid või teealaid, rasterkihi elementide väärtused teedevõrgu kihi elementide väärtustega. Viimaks korrutati saadud kiht läbi hoonete ja muude rajatiste rasterkihiga, milles rajatised kujutasid endast täielikke liikumistakistusi. Kogu mudel on lihtsustatult kujutatud joonisel 4.



Joonis 4. Maastiku läbitavuse kihi moodustamise kokkuvõtlik skeem.

Järgnevalt kirjeldatakse maastiku läbitavuse modelleerimise protsessi tegurite kaupa lähemalt.

4.1.1. Maakatte mõju läbitavusele

Termini „maakate“ all mõistetakse käesolevas töös igasugust nähtavat biofüüsilist katet maapinnal (Di Gregorio, Jansen 2000), näiteks rohumaid, metsi, märgalaid ja veekogusid. Maastiku läbitavuse paremaks hindamiseks täpsustatakse teatud maakatete puhul nende kasutusotstarvet: näiteks käsitletakse eraldi põllumaade, haljasalade ja turbaväljade läbitavust.

Maakatte koefitsienti C_1 kujutav rasterkiht moodustati selliselt, et selle elementide väärtused kujutaksid vastavate alade läbimise keskmist kiirust ideaalsete tingimuste korral. Selliste „ideaalsete tingimustega“ alaks loeti antud töös ala, kus on väga väike nõlvakalle, puudub taimkate ning esinevad kuivad ja hea läbitavusega mullad. Ratas- ja roomiksõidukitel

liikuvatele üksustele määrati läbitavuse väärtused eraldi. Liikumiskiiruste väärtuste määramisel toetuti varasematele uurimustele ja olemasolevatele spetsifikatsioonidele (Hohmann *et al.* 2013; NGA 1994), teatud olemitele määras aga autor kiirusväärtused oma hinnangute alusel ise.

Rasterkihi moodustamiseks kasutati ETAK-i tuumandmebaasi andmekihte. Rasterkihi koostamiseks valiti sellised pindobjektidega nähtuseklasside kihid, mis moodustavad Eesti territooriumil lausalise katte, jättes välja teealade nähtuseklassi, mis lisati mudeli hilisemas faasis. Teealad antud kihi koostamiseks ei kasutatud, sest reljeef, mullastik või taimkate autori hinnangul nende läbitavust ei mõjuta. Küll aga lisati rasterkihile veel joonobjektidest pinnasteed ning teed, mille katet ei olnud märgitud ja mis ei lõikunud teealade polügoonidega. Kõik nähtuseklassid rasteriseeriti ning pindobjektidest moodustatud rasterkihiga „liideti“ joonobjektide alusel loodud rasterkihid. Maakatetele ja nimetatud teedele määratud kiirusväärtused on tabelina toodud lisa 1.

Käesolevas töös määratud veekogude läbimise kiirusväärtused olid äärmiselt madalad, sest üldiselt soovivad üksused suuremate veetakistuste läbimist kindlasti vältida, kuigi mitmetel kasutatavatel sõidukitel on vastav võimekus olemas. Kui aga mudeli kasutaja teab, et vaadeldav üksus võib valida liikumiseks marsruute, mis nõuavad veetakistuste ületamist ning neil on selleks hea võimekus, võib ta veekogudele määrata kõrgemad kiirusväärtused.

4.1.2. Reljeefi mõju läbitavusele

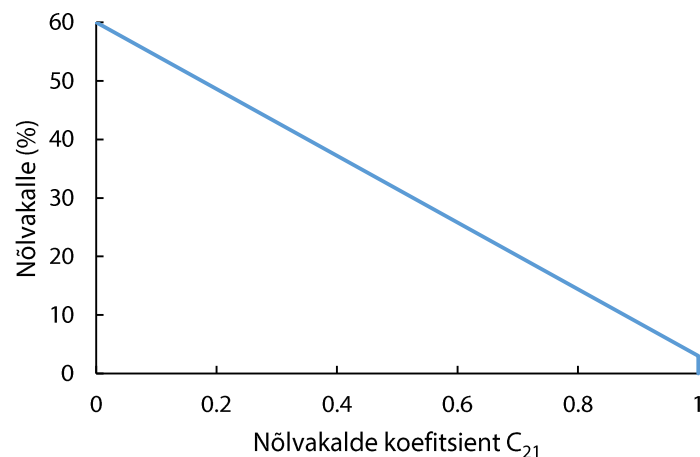
Tegurid, mis kirjeldavad reljeefi mõju maastiku läbitavusele, võib jagada esma- ja teisejärgulisteks. Esmased mõjutegurid on otseselt seotud reljeefi poolt avaldatava mõjuga maastikul liikumisele (Pahernik *et al.* 2006). Tüüpiliselt on selliseks teguriks nõlvakalle (Pahernik *et al.* 2006; Pimpa *et al.* 2014; Rybansky 2003), kuid kasutatakse ka tegureid, mis iseloomustavad suuremate pinnavormide (Pahernik *et al.* 2006) või vahelduvate positiivsete ja negatiivsete nõlvakallete mõju läbitavusele (HQDA 1990a; Pimpa *et al.* 2014). Teisejärguliste tegurite väärtused leitakse aga erinevate reljeefinäitajate kombineerimisel – näiteks arvutatakse muldade niiskusastet kirjeldav indeks välja nõlvakallete ja valgalade mõõtmete alusel (Hohmann *et al.* 2013; Wilson, Gallant 2000). Käesolevas töös kasutati reljeefi mõju väljendamiseks vaid nõlvakalde (C_{21}) ja muldade niiskusastme (C_{22}) koefitsiente, sest ülejäänud nimetatud tegurite väärtused kajastuvad sisuliselt modelleerimise edasistes faasides, samuti ei mängi need tegurid autori hinnangul suhteliselt tasase reljeefiga Eestis läbitavuse määramisel olulist rolli. Nõlvakalde väärtuste ja muldade niiskusastme leidmiseks kasutati Eesti digitaalset maastikumudelit (DTM).

DTM-i põhjal nõlvakalde arvutamine seisneb konkreetse rastrolemendi ja selle naabrite vahelise suurima kõrgusvahe leidmises (Burrough 1986; *ESRI 2016a*). Kuigi nõlvakalde määramiseks on erinevaid algoritme, baseerub enamik neist arvutustel, milles liikuva 3x3 akna rastroelementide kõrgusväärtuste alusel leitakse keskmise rastrolemendi nõlvakalle (Pahernik *et al.* 2006). Sama lähenemist kasutab ArcGIS-i vastav tööriist *Slope* (*ESRI 2016a*). Nagu ka eelpool mainitud, mõjutab nõlvakalle eri tüüpi sõidukite maastiku läbitavust mõnevõrra erinevalt. Lisaks sellele on sõidukite liikumisel maksimaalne otsekalle suurem kui maksimaalne

külgkalle: üldiselt loetakse maksimaalseks otsekaldeks ligi 60% kallet ning maksimaalseks külgkaldeks olenevalt sõidukist umbes 30-45% kallet (Affleck *et al.* 2009; Pahernik *et al.* 2006; RSMS 1999; Shoop *et al.* 2005). Nõlvakaldeid võidakse väljendada ka kraadides. Kuna maksimaalne otsekalle on erinevate sõidukite puhul ligikaudu sama, on mitmetes mudelites määratud sõidukitele ühtne maksimaalne nõlvakalle, mille korral muutub maastikul liikumine väga piiratuks ja ohtlikuks või peaaegu võimatuks (nt Gumoś 2005; HQDA 1990a; Rybansky 2003; Rybansky *et al.* 2015; Suvinen 2006). Üldiselt on selleks kaldeks 30-35° (Gumoś 2005; Rybansky *et al.* 2015) või 45-50% (HQDA 1990a; Rybansky 2003).

Nõlvakalde koefitsiendile C_{21} väärtuse leidmiseks võib nõlvakalded jagada maastiku läbitavuse alusel kategooriatesse (Gumoś 2005; Rybansky 2003) või kasutada neid pideval skaalal (Hohmann *et al.* 2013; Rybansky *et al.* 2015). Antud töös määrati sõidukite liikumist takistavateks nõlvakalleteks kalded alates 3% (HQDA 1990a; Rybansky *et al.* 2015) ning kaldeks, mille korral liikumine enam võimalik ei ole, 60%. Detailsemates mudelites, kus iga sõiduki läbitavust hinnatakse eraldi, kasutatakse nõlvakalde poolt sõiduki liikumisele avaldatava mõju arvutamiseks sageli sõiduki veojõu diagramme (nt Hohmann *et al.* 2013; Rybansky *et al.* 2015). Kuna käesoleva töö autoril puudusid vastavad andmed ning neid oluks kõigi sõidukite läbitavuse hindamiseks keeruline üldistada, kasutati lähendust, milles koefitsiendi C_{21} väärtus oli nõlvakaldega seotud lineaarselt (joonis 5). Sarnast lihtsustust on kasutanud ka Gumoś (2005) ja Shoop *et al.* (2005). C_{21} väärtused võis nõlvakalde N järgi leida valemist

$$C_{21} = 1 - (N - 3) / (60 - 3), \quad \text{kui } 3 \leq N \leq 60.$$



Joonis 5. Nõlvakalde koefitsiendi C_{21} sõltuvus nõlvakaldest.

Muldade niiskusastme teguri (*Topographic Wetness Index* – TWI või *Compound Topographic Index* – CTI) väärtused kujutavad endast reljeefist tulenevat muldades niiskuse kogunemise määra (Pahernik *et al.* 2006; Sivertun, Gumoś 2006). Nimelt on nõlva tipus tüüpiliselt hästi kuivendatud ja arenenud mullad, nõlva ülemises osas erodeeritud ja mõõdukalt arenenud mullad, nõlva alumises osas kõrgematest kihtidest settinud mullad ning jalamil niisked mullad (Sivertun, Gumoś 2006). TWI väärtused on ajas muutumatud ning need leitakse järgmisest valemist (Hohmann *et al.* 2013; Pahernik *et al.* 2006; Sivertun, Gumoś 2006):

$$TWI = \ln (A_s / \tan\beta),$$

kus A_s tähistab konkreetse punkti valgala pindala (m^2) ja voolusuunaga risti oleva voolu laiuse (m) suhet ning $\tan\beta$ nõlvakallet kraadides (Sivertun, Gumoš 2006). Kõrged TWI väärtused esinevad aladel, kus vesi rohkem muldadesse koondub, näiteks lavamaadel ja orgudes. TWI väärtused on madalad veelahkmealadel ning suure kaldega nõlvadel, kust vesi vabalt läbi liigub (Pahernik *et al.* 2006). Seetõttu võivad samast lähtekivimist pärinevad mullad olla väga erinevate omadustega (Gumoš 2005). Samuti on reljeefist tulenevad niiskusomadused tihti olulisemad kui muutused muldade kohalikus veejuhtivuses, seega viimast TWI arvutamisel sageli ei arvestatagi (Wilson, Gallant 2000).

Konkreetse geograafilise punkti valgala pindala leidmiseks eemaldati esmalt ArcGIS-i tööriistaga *Fill DTM*-is esinenud väikesed kõrgusvead (*ESRI 2016b*), misjärel leiti tööriista *Flow Direction* kasutades rasterkihi elementidest lähtuvad voolusuunad ning saadud kihi alusel tööriistaga *Flow Accumulation* veevoolu akumuleerumist kujutav rasterkiht. Viimase kihi elementide väärtused kujutavad selliste elementide arvu n , kust veevool antud elementi jõuab. Elementide väärtuste teisendamiseks muutujaks A_s kasutati valemit

$$A_s = (n + 1) \cdot d^2 / d = (n + 1) \cdot d,$$

kus d tähistab rastrielementide küljepikkust. Ühe liitmine n -ile oli vajalik selleks, et iga vaadeldavat elementi selle valgala hulka arvestataks. Seejärel leiti $\tan\beta$ ning hilisema nulliga jagamise vältimiseks asendati nullkaldega nõlvadel nõlvakalde väärtus 0,001-ga. Viimaks arvutati TWI väärtuste rasterkiht. Kindlasti tuleb aga märkida, et kirjeldatud viis muldade niiskusastme modelleerimiseks on väga lihtsustatud (Chirico *et al.* 2005) ning põhineb eeldustel, et veevool on vaadeldavas piirkonnas ajas muutumatu ning põhjavee kogunemise dünaamika on kogu alal ühesugune. Sellest hoolimata on TWI muldade kirjeldamisel laialdaselt kasutatavaks näitajaks, võimaldades prognoosida mitmeid muldade omadusi (Gumoš 2005).

Uuritaval alal jäid TWI väärtused vahemikku 1,4-31,2. Seejuures joonistusid kõrgete TWI väärtustega rastrielementidest selgepiirilised ühe elemendi laiuste „niitidega“ võrgustikud. Sedavõrd polaarne niiskuse kogunemine pole aga mõeldav, samuti võib tulemus olla ebatäpne tulenevalt DTM-i vigadest ning kõrgusmudeli rastri kui andmestruktuuri või niiskusastme modelleerimise lihtsustatud olemusest. Seetõttu siluti TWI väärtuste rasterkihti ringikujulise liikuva aknaga, mille raadiuseks oli 3 rastrielementi, andes elementidele keskmistatud väärtused. Sobilik akna suurus leiti katse- ja eksitusmeetodiga. Silutud kihil olid TWI väärtused vahemikus 2,4 ja 25 ning veekogud eristusid ümbritsevast paremini kui silumata kihil. Veekogude alade kohal jäid TWI väärtused peamiselt vahemikku 11-25, kuid samas vahemikus väärtuseid esines ka paljudel muudel aladel, näiteks märgaladel, turbaväljadel ja metsades.

Niiskusindeksi ja muldade läbitavuse vaheline seos on üsna ilmne: kõrge niiskussisaldusega mullad võivad kujutada endast läbitavusele märkimisväärseid takistusi (Pahernik *et al.* 2006). Samas ei saa TWI väärtuseid läbitavuse seisukohalt ka väga määravaks pidada. Seetõttu otsustas autor koefitsiendi C_{22} väärtuste leidmiseks normaliseerida TWI väärtused vahemikku 0,5-1, kus TWI väärtusele 25 vastas C_{22} väärtus 0,5 ning TWI väärtusele 2,4 C_{22} väärtus 1. Muldade niiskusastme koefitsiendi C_{22} väärtused võis leida valemist

$$C_{22} = 1 - ((1 - 0,5) \cdot (TWI - TWI_{min})) / (TWI_{max} - TWI_{min}),$$

kus TWI_{min} tähistab väikseimat TWI väärtust ja TWI_{max} suurimat TWI väärtust.

4.1.3. Mullastiku mõju läbitavusele

Mullad on üks peamisi läbitavust mõjutavaid tegureid, nende omadused sõltuvad omakorda aga reljeefist ja ilmatingimustest (Rybansky 2015). Muldade läbitavus sõltub paljudest faktoritest (Ciobotaru 2009; Gumoś 2005; Pimpa *et al.* 2014; Rybansky 2003; Rybansky 2015), mille hindamine on väga välitöö- ja ajamahukas. Seetõttu kasutatakse käesolevas töös läbitavuse modelleerimiseks ettevalmistatud andmestikku, milles esitatud muldade läbitavuse hinnangud põhinevad erinevatel ruumiandmetel ja välitöödel (tabel 1). Nimetatud andmestikus käsitleti eraldi ratas- ja roomiksõidukite läbitavust vastavalt Eesti mullakaardi polügoonidele. Ratassõidukite läbitavuse hindamiseks eristati andmestikus kuivi ja märgi olusid. Andmekihi polügoonidest olid välja lõigatud veekogud ja asustatud alad (ETAK-i pindobjektide kihid „tee“ ja „õu“). Läbitavuse hinnangud oli andmestikus esitatud tekstina. Kokku esines terves andmestikus kuut erinevat tüüpi hinnanguid, millele määrati vastavad liikumist takistava koefitsiendi C_3 väärtused (tabel 3). Andmekihist välja lõigatud aladele määrati C_3 väärtuseks 1. Koefitsientidele C_{22} ja C_3 vastavate rasterkihtide võrdlemisel kihtide vahel seoseid ei täheldatud, seetõttu kasutati nimetatud kihte maastiku läbitavuse modelleerimisel teineteisest sõltumatult.

Tabel 3. Muldade läbitavuse hinnangutele määratud vastavad koefitsiendi C_3 väärtused ja nende pindalaline osakaal vastavalt üksuse tüübile ja niiskuseludele.

Hinnang	C_3	Osakaal (%)		
		Roomikmasin	Ratasmasin	
			Märg	Kuiv
Hea	1	79,47	58,10	67,68
Hea – roomikmasinatele künklikus maastikus piiratud	1*	0,57	0	0
Hea – ratasmasinatel võib kuiva lahtise liiva tõttu raskusi esineda	0,9	0	0	1,97
Hea – ratasmasinatel võib olla märgades oludes piiratud	0,9	0	0,68	0
Piiratud	0,7	17,26	14,74	12,15
Väga piiratud	0,4	2,70	26,48	18,20

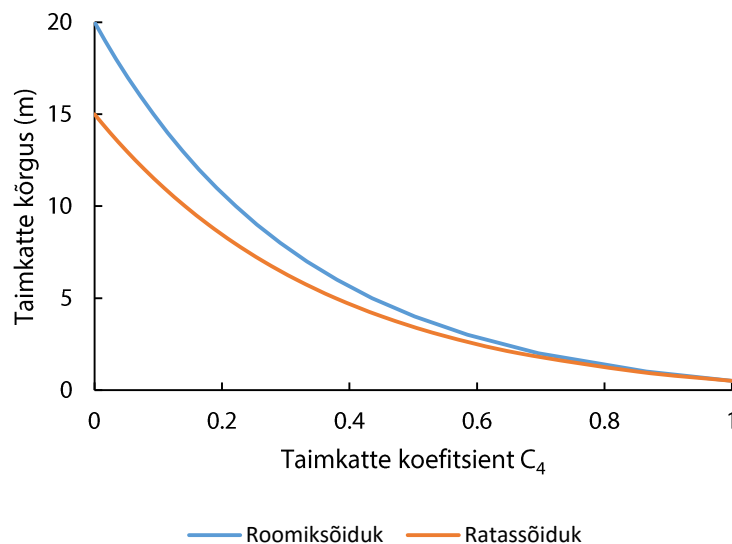
* kui nõlvakalle on 3° või enam, siis $C_3 = 0,85$

Olude niiskuse osas (kuiv või märg) pidi käesolevas töös moodustatava tööriistaga opereerimisel otsuse tegema kasutaja ise. Valik võib sõltuda aga näiteks ka sellest, kas soovitakse valida liikumiseks võimalikult riskivaba maastikku või mitte.

4.1.4. Taimkatte mõju läbitavusele

Maastiku läbitavuse analüüsis mängivad rolli mitmed taimkattenäitajad, nagu taimkatte tüüp, kõrgus, puudega kaetud ala osakaal, puuvõrade liitus ja -tüvede diameeter, tüvedevaheline kaugus, alumiste okste kõrgus ning juurestiku tüüp (Hofmann *et al.* 2015; HQDA 1990a; Hubacek *et al.* 2015; Rybansky 2003). Kahjuks puudusid aga autoril andmed enamiku nimetatud näitajate kohta. Taimkatte liikumist takistava mõju väljendamiseks otsustati modelleerimisel kasutada maakatte kõrgusmudelit, mis saadakse DTM-i elementide väärtuste lahutamisel DSM-i vastavate elementide väärtustest. Tulemuseks on rasterkiht, mis kujutab nii hoonete ja teiste rajatiste kui ka puude, põõsaste ja muu taimkatte kõrgust maapinnast. Kuna aga hiljem (peatükk 4.1.6) lisatakse mudelisse koefitsiendina kõik rajatised, võib antud kihti käsitleda ennekõike taimkatte kõrgust kujutava kihi või taimkatte kõrgusmudelina.

Taimkatet võib vaadelda kui liikumistakistust, mille mõju sõltub eelkõige sõiduki kliirensist ehk kõrgusest maapinnast ning võimsusest ja massist. Piisava võimsuse ja massi korral võib sõiduk tõkke suuremate probleemideta ületada, purustada, ümber paisata või eemale lükata. Nagu läbitavate nõlvakallete puhul (peatükk 4.1.2), on ka siin vaja vastavalt sõiduki tüübile teha üldistusi taimkatte ületamise suhtes. Tüüpiliselt on nii ratas- kui roomiksõidukite kliirensiks ligi 40-50 cm (Affleck *et al.* 2009; RSMS 1999; Shoop *et al.* 2005), kuid roomiksõidukite võimsus on ratassõidukite omast tihti oluliselt suurem. Näiteks on ratastel liikuva soomustransportööri BTR-80A mootori võimsus ligi 260 hp, roomikutel sõitva jalaväe lahingumasina BMD-3 mootori võimsus aga ligi 450 hp. Tankide mootorid on aga veelgi võimsamad: T-80B-1 ligi 1250 hp ja M1A2 Abrams'il ligi 1500 hp. Samuti on roomiksõidukid ratassõidukitest sageli suurema massiga (RSMS 1999). Seetõttu arvutatakse taimkatte mõju läbitavusele käesolevas töös sõltuvalt sõiduki tüübist erinevalt.



Joonis 6. Taimkatte koefitsiendi C_4 sõltuvus taimkatte kõrgusest.

Autor eeldas, et taimkatte kõrguse kasvades suureneb nende mõju läbitavusele logaritmiliselt: juba suhteliselt madalad takistused kujutavad endast märkimisväärseid liikumistõkkeid ning nende mõju kõrguse kasvades samas tempos ei suurene. Lisaks sellele määrati, et kuni 50 cm

kõrgune taimkate liikumist ei sega, sest sõidukite kliirens peaks lubama neil ületada sellised tõkked probleemideta. Samuti võivad madalad kõrgusväärtused esindada kõrgusmodelite moodustamisel tekkinud väikevigu. Taimkatte maksimaalseks kõrguseks, millest alates liikumine enam võimalik pole, määrati ratassõidukite puhul 15 m ja roomiksõidukite puhul 20 m (joonis 6). Koefitsiendi C_4 leidmise valemi võis taimkatte kõrguse H ja maksimaalse kõrguse H_{max} järgi kirjutada järgmiselt:

$$C_4 = 1 - \log_{H_{max}+0,5} \cdot (H + 0,5), \quad \text{kui } 0,5 \leq H \leq H_{max}.$$

Rastrielementides, mis esindasid maakatte koefitsiendi C_1 rasterkihis teid, määrati C_4 väärtuseks 1, sest taimkate teedel liikumisele mõju ei avalda. Ilma selle sammuta oleks osa metsateedest saanud teeäärsete kõrgete puude tõttu väga madalad läbitavusväärtused.

4.1.5. Teedevõrgu mõju läbitavusele

Teede mõju maastikul liikumisele on kahetine: ühelt poolt on nad loomulikult olulisteks liikumiskanaliteks, teisalt võivad nad aga liikumissuunaga risti paiknedes ja teetammidel kulgedes kujutada endast hoopiski liikumistõkkeid, mille mõju võib võrrelda vooluveekogudega (Rybansky 2003). Kuna käesolevas töös ei modelleerita maastiku läbitavust liikumissuunast sõltuvalt, käsitletakse teid siin siiski liikumiseks parimaid tingimusi pakkuvate aladena, mille läbitavust hinnatakse maastikuga võrreldes oluliselt paremaks. Teedevõrgu lisamine oli mudeli koostamise eelviimaseks etapiks, milles koefitsientide C_1 - C_4 alusel koostatud rasterkihi elementide väärtused asendati teeladel teedevõrku kujutavate rastrielementide väärtustega, sõltumata nende varasematest väärtustest.

Maakatte koefitsiendi C_1 rasterkihi koostamisel (peatükk 4.1.1) kasutati kahte tüüpi teid, mille läbitavus sõltub autori hinnangul reljeefist, mullastikust või taimkattest. Nimetatud teede joonobjekte teedevõrgu kiirusväärtuseid kujutava rasterkihi moodustamisel ei kasutatud. Selleks rakendati hoopiski teelade nähtuseklassi kihti, mis jäi maakatete modelleerimisel kihtide valikust välja. Esmalt kirjutati varasem rasterkiht üle joonobjektidest rasteriseeritud teede kihi elementide väärtustega ning rasteriseeriti ka pindobjektidest teelade kiht. Kuna teelade kiht kattis suurt osa nimetatud joonobjektidest – nii põhimaanteedel kui ka väikestel teeradadel, puhverdati joonobjektidest teid mõlemale poole 10 m, rasteriseeriti need puhvrid ning saadud rasterkihi alusel muudeti teelade rasterkihi elementide kiirusväärtused tee tüübile vastavaks. Teeala kiirusväärtust muudeti ainult juhul, kui mööda seda kulges joonobjektist maantee, mis oli kõrgema kiirusväärtusega (lisa 2). Seejärel asendati koefitsientide C_1 - C_4 alusel koostatud rasterkihis elementide väärtused moodustatud teelade kihi elementide väärtustega. Teedele ja teeladele määratud läbitavuse väärtused on toodud lisa 2.

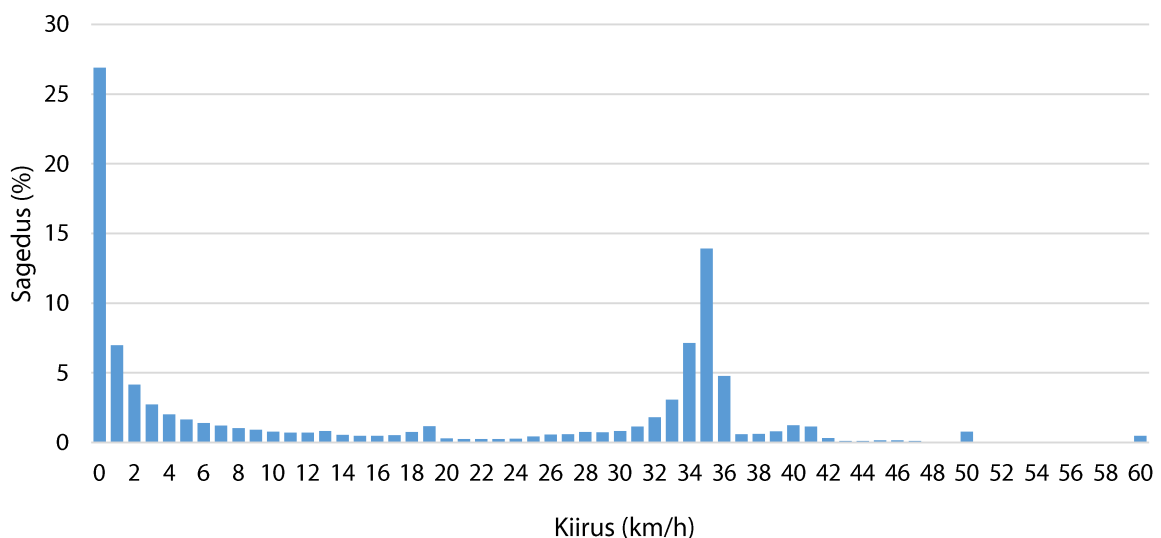
4.1.6. Rajatiste mõju läbitavusele

Käesolevas töös käsitletakse rajatiste all kõikvõimalikke hooneid, maste, torne ja korstnaid, mis häirivad maapinnal liikumist. ETAK-i andmebaasis on need objektid kujutatud hoonete pindobjektide ja kõrgrajatiste punktobjektide nähtuseklassides. Nimetatud objektid rasteriseeriti, moodustades rajatiste koefitsiendi C_6 rasterkihi. Iga kõrgrajatise punktobjekti

esindas selles kihis ühe rastrielementi suurune (5x5 m) ala. Kuna hooned ja kõrgrajatised kujutavad endast täielikke liikumistakistusi, määrati neid esindavate rastrielementide väärtuseks 0 ja kõigi muude elementide väärtuseks 1. Viimaks korrutati koefitsientide C_1 - C_5 alusel koostatud rasterkihi elementide väärtused koefitsiendi C_6 rasterkihi vastavate elementide väärtustega, moodustades lõpliku läbitavuse rasterkihi.

4.1.7. Läbitavusrastri valideerimine

Kui Võrtsjärve mitte arvesse võtta, kujutab läbitavuse rasterkihi kiirusväärtuste sagedusjaotust uuritava alal joonis 7. Rasterkihil esineb palju väga madala kiirusväärtusega elemente, mis esindavad peamiselt veekogusid, märgalasid ja metsi. Lisaks on läbitavuse kihil märkimisväärselt palju elemente väärtusega 33-36, mis tulenevad põhiliselt ulatuslikest põllualadest. Nende alade mullad on suures osas üsna kuivad ja hea läbitavusega, samuti on haritavatel maadel suhteliselt madal nõlvakalle ja taimkate.

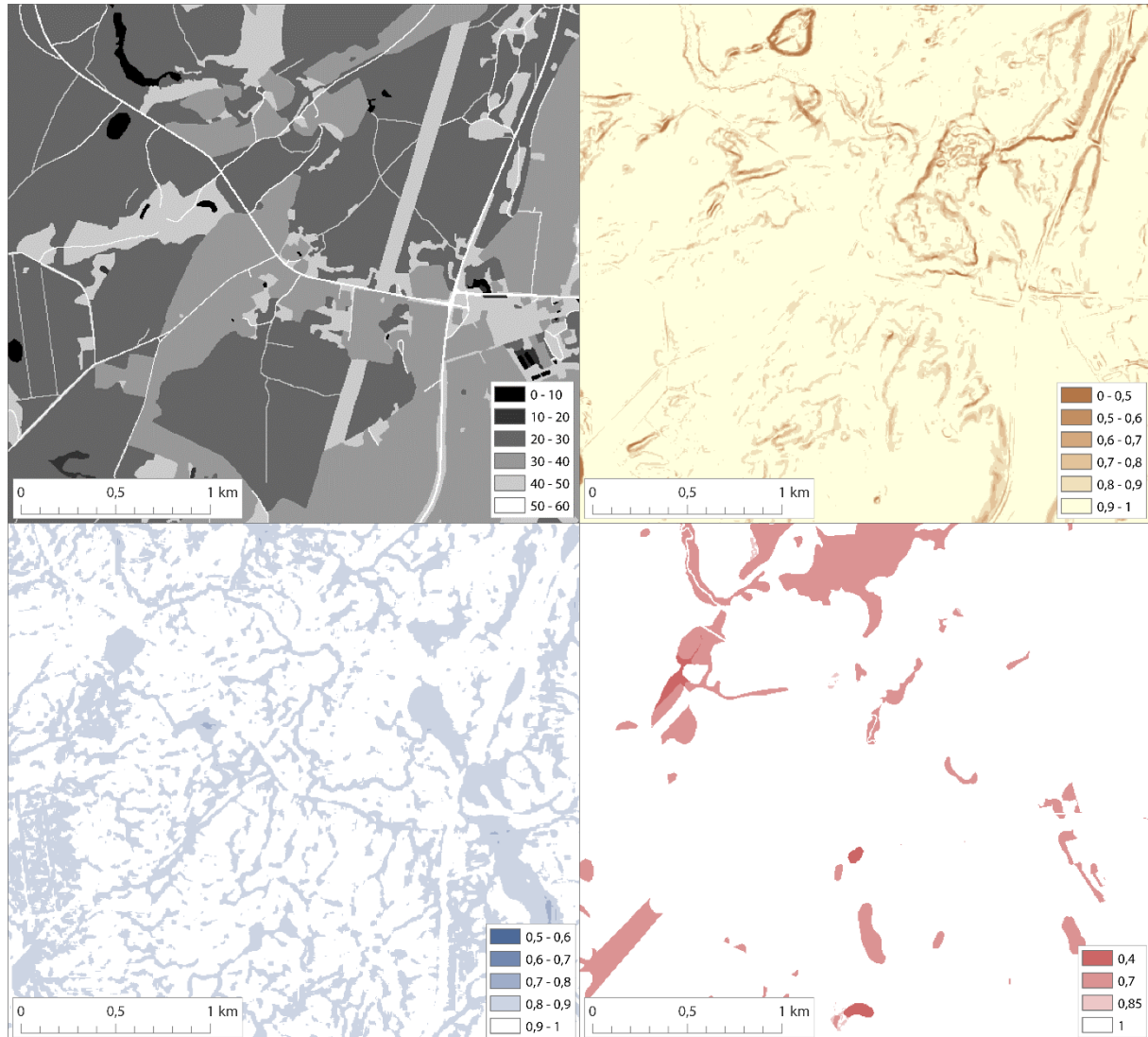


Joonis 7. Roomiksõidukite maastiku läbitavuse rasterkihi väärtuste histogramm.

Enne modelleerimise järgmiste etappide juurde liikumist analüüsiti moodustatud läbitavusrastrite sobivust läbitavuse hindamise jaoks. Autor valis siinkohal lähemaks analüüsiks roomiksõidukite maastiku läbitavust kujutava rasterkihi. Joonistel 8 ja 9 on kujutatud modelleerimise käigus moodustatud koefitsientide rasterkihtide väljalõikeid Tartu-Valga maantee äärselt alalt Puka aleviku lähistelt. Antud ala valiti analüüsiks seetõttu, et sellel esines erinevaid maastikuelemente.

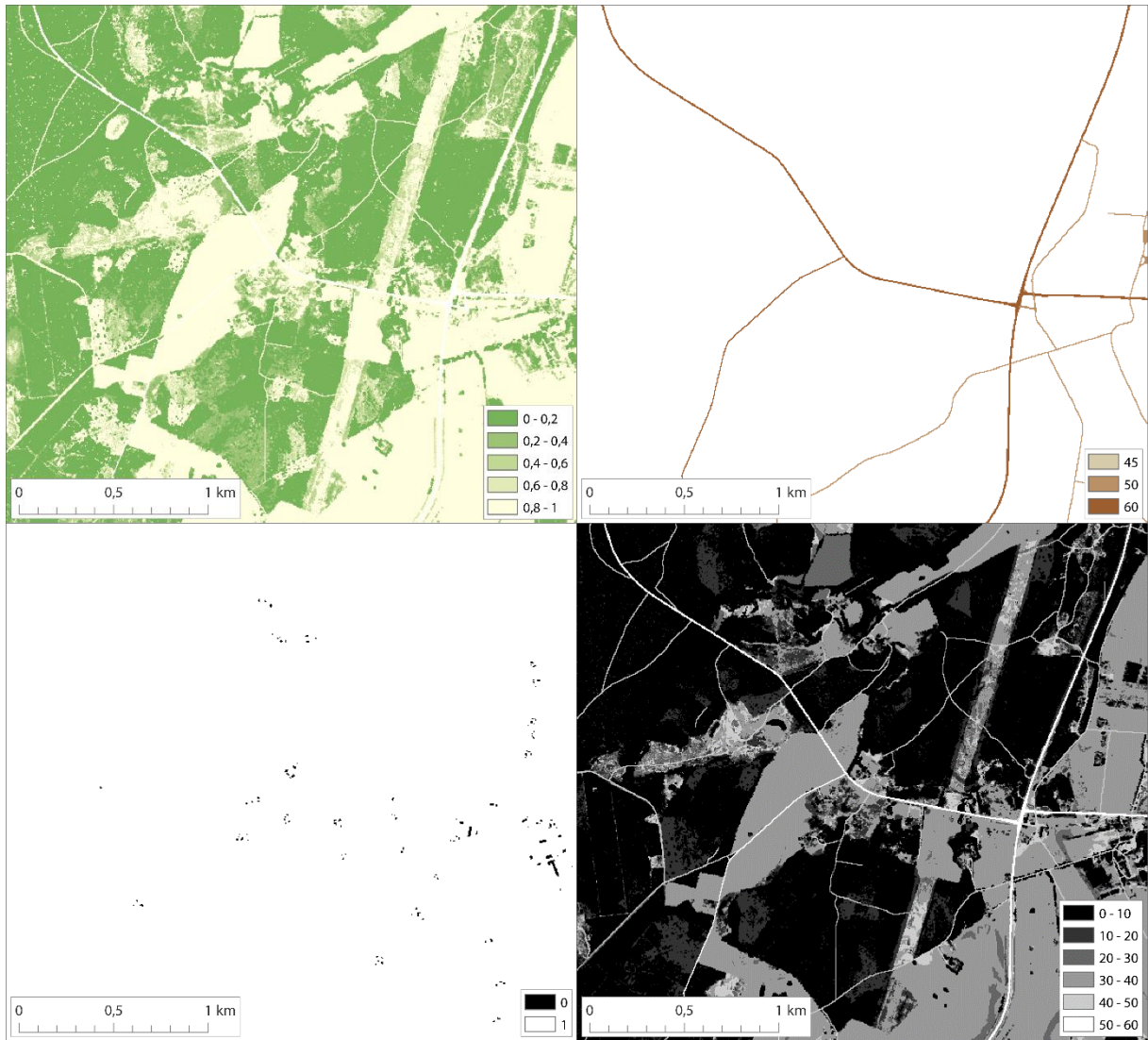
Rasterkihte võrreldes võib näha, et lõpliku läbitavuse (joonis 9) leidmisel on antud alal kõige määravamateks maakatet (C_1) ja taimkatet (C_4) kujutavad rasterkihid, täheldada võib ka nimetatud kihtide omavahelisi seoseid. Seega on maakatetele sobilike kiirusväärtuste määramisel ja taimkattekoefitsiendil modelleerimises oluline roll. Kriitiline on just neist esimene näitaja, sest on selge, et kõrgete puudega täiskasvanud mets militaarsõidukitele liikumiseks ei sobi. Suhteliselt hästi joonistub läbitavusrastril välja ka teedevõrk (C_5), kuid üsna kõrged kiirusväärtused on ka põllualadel (näiteks vaadeldava ala kagu- ja idaosas). Kuigi

roomiksõidukite läbitavus on võrdlemisi hea erineva maakattega aladel, on sõidukite liikumise modelleerimisel oluline hoida teede kiirusväärtuseid ülejäänud alade omadest kõrgematena. Nõlvakalle (C_{21}), muldade niiskusaste (C_{22}) ja läbitavus (C_3) mõjutavad antud alal lõpläbitavust vähem, sest ekstreemalsete koefitsientide väärtustega elemente esineb nendel rasterkihtidel vähem.

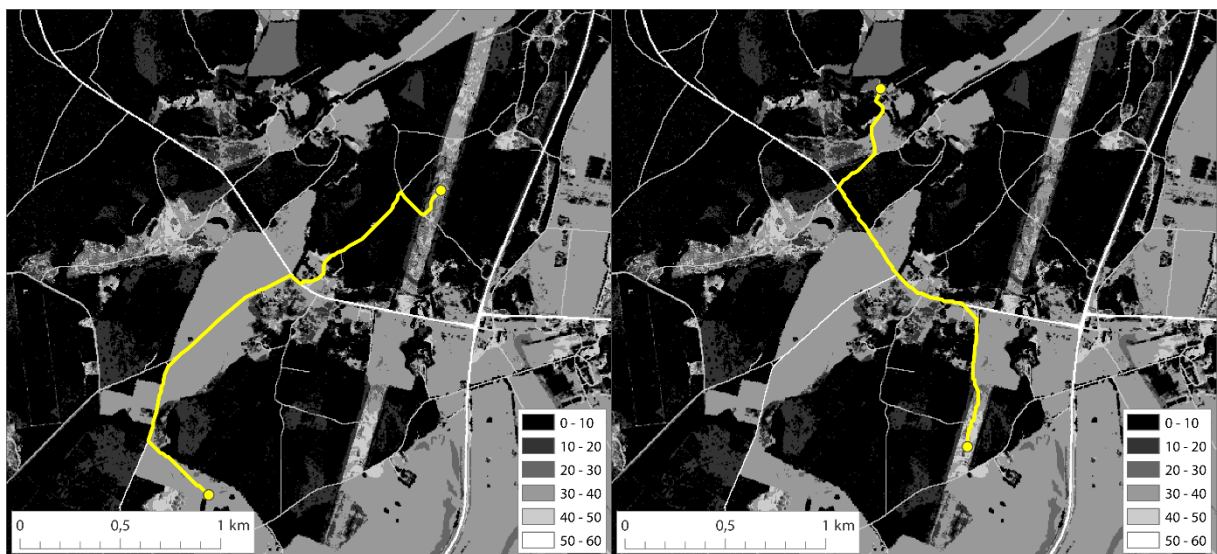


Joonis 8. Roomiksõidukite maastiku läbitavuse koefitsientide rasterkihtide väljalõiked. Vasakul ülemises nurgas C_1 , paremal ülemises nurgas C_{21} , vasakul alumises nurgas C_{22} ja paremal alumises nurgas C_3 rasterkiht.

Moodustatud läbitavusrastrit kasutades lahendati ka kaks harilikku vähima takistusega raja leidmise ülesannet, et testida rasterkihi sobivust ühele sõidukile sobilike teekondade leidmiseks. Ülesannete lahendusi kujutab joonis 10. Mõlemad genereeritud rajad kulgesid suures osas mööda teid ning osaliselt ka mööda kõrge kiirusväärtusega põlde või lagendikke. Autori hinnangul imiteerisid rajad üsna hästi seda, kuidas sõidukid maastikul tegelikkuses võiksid liikuda.



Joonis 9. Roomiksõidukite maastiku läbitavuse koefitsientide rasterkihtide väljalõiked. Vasakul üllemises nurgas C₄, paremal üllemises nurgas C₅, vasakul alumises nurgas C₆ ja paremal alumises nurgas lõplik läbitavuse rasterkiht.



Joonis 10. Näited läbitavusrastri alusel moodustatud vähima takistusega radadest.

4.2. Lähenemissuundade kriteeriumite kaasamine analüüsi

Nagu ka eelpool mitmel korral rõhutatud, ei piisa lähenemissuundade tuvastamisel vaid maastiku läbitavuse analüüsist. Ülejäänud oluliste kriteeriumite (vt peatükk 1.3) kaasamiseks arvutustesse lähenemissuundade leidmise algoritmis otsustas autor moodustada ka rasterkihid, mis kujutaksid alade sobilikkust vastavalt nendele kriteeriumitele. See võimaldas hiljem vastavalt olukorrale kriteeriumitele kaale määrata ning rasterkihte hõlpsalt omavahel kombineerida. Sarnaselt maastiku läbitavuse modelleerimisel kasutatud koefitsientide rasterkihtidele määrati ka siin rastrielementidele sobivuse alusel väärtused 0-1, kus 0 kujutas vastavalt konkreetsele kriteeriumile täiesti sobimatut ning 1 kõige sobivamat ala. Liikumise suund ja võimalikud marsruudid ei olnud rasterkihtide moodustamise ajal teada, seetõttu pidid rastrielementide väärtused loodavates kihtides peegeldama kriteeriumitele vastavat sobivust liikumissuunast sõltumata.

Siinkohal on vajalik selgitada ka loodavate kihtide edasise rakendamise põhimõtteid. ArcGIS keskkonnas paketti *NetworkX* testides leiti, et antud paketiga on võimalik analüüsida kuni ligi 200 000 tipuga kaalutud graafe – suuremate graafide korral tekkisid arvutil mäluprobleemid. Saadud tulemus tähendas sisuliselt seda, et sellised peatükis 2.2.1 kirjeldatud algoritmid, milles rasterkiht otse graafiks teisendatakse, käesolevas töös optimaalsete koridoride leidmiseks ei sobi. Seetõttu otsustas autor kasutada selleks n-ö silumistehnikat, millega määrati läbitavusrastri ja muude moodustatud sobivusrastrite elementide väärtuste alusel tulemrastrisse koridori laiuse ümmarguse liikuva aknaga keskmistatud väärtused.

Järgnevalt kirjeldatakse kriteeriumitele vastavate sobivusväärtustega rasterkihtide moodustamist lähemalt.

4.2.1. Liikumise kanaliseeritus

Liikumise kanaliseeritust võib väljendada läbi maastiku läbitavuse: alad, mis on halva läbitavusega, sunnivad üksuseid liikuma sellistes parema läbitavusega koridorides, mis ei pruugi pakkuda jõuelementide hajutamiseks piisavat laiust. Mida enam on liikumiskoridor ümbritsetud halvasti läbitava maastikuga (näiteks läbi tiheda metsa kulgev teerada), seda kanaliseeritumaks antud koridori võib pidada. Muidugi eeldatakse siin, et üksuse liikumiskoridor kulgeb mööda suhteliselt hästi läbitavat maastikku. Üksuste suurusele vastavad liikumiskoridoride soovitatavad laiused on toodud peatükis 1.3.

Sellisteks „halva läbitavusega aladeks“, mis üksuste liikumist kanaliseerivad, loeti antud töös alad, mille läbimise kiirus vastavalt läbitavusrastrile on madalam kui 5 km/h ehk ligikaudu keskmine kõndimise kiirus. Halva läbitavusega aladel määrati rastrielementide väärtuseks 0 ja muudel aladel 1. Hilisemas silutud rastris kujutasid madalad sobivusväärtused seega kanaliseerivaid alasid.

4.2.2. Kate ja varje

Vaatamata katte ja varje olulistele põhimõttelistele erinevustele käsitletakse neid tüüpiliselt koos (nt HQDA 1994; Jung *et al.* 1996). Antud töös oli neid vajalik koos vaadelda ka selleks, et hoida lähenemissuundade tuvastamise järgmises etapis teostatavaks kriteeriumite olulisuse hindamiseks kriteeriumite arv võimalikult madalal. Katet ja varjet pakkuvaid nähtuseid on loetletud peatükis 1.2.2, nende mõju on aga erinev. Näiteks katavad ja varjavad hooned reeglina paremini kui kraavid. Rasterkihi loomiseks määrati katet ja varjet pakkuvatele nähtustele hinnatava mõju alusel sobivusväärtused (lisa 3). Kuna väärtuste määramiseks head teoreetilist alust ei leidunud, andis autor nähtuste katvale ja varjavale mõjule hinnangud ise. Seejärel vastavad vektorkihid rasteriseeriti. Metsapolügoonide põhjal moodustatud rasterkihi elementidele määrati väärtused vastavalt peatükis 4.1.4 kasutatud taimkatte kõrgusmudelile, sest polügoonide aladel esines ka väga madalate istikutega noori metsi. Seejuures määrati elementidele, kus taimkatte kõrguseks oli 0 m, sobivusväärtus 0,5 ning vähemalt 15 m kõrguse taimkattega elementidele sobivusväärtus 1. Seega eeldati, et kõrguse kasvades kasvab tüve diameetri eeldatava suurenemisega ka puude kattev ja varjav mõju. Vahepealsete kõrgusväärtustega elementide sobivusväärtused leiti lineaarse interpoleerimise tulemusena.

Seejärel moodustati ülalkirjeldatud nähtuste rasterkihtide alusel ühtne sobivusväärtuste rasterkiht, mille elementidele määrati väärtused vastavas punktis kõige kõrgema sobivusväärtuse järgi. Sellistes punktides, kus katet ja varjet pakkuvaid nähtuseid ei esinenud, määrati rastrielemendi väärtuseks 0.

4.2.3. Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus

Vaadeldavust ja tulealaid käsitletakse üldiselt samuti koos (HQDA 1994; HQDA, HQMC 2009; Jung *et al.* 1996). Nagu mainiti ka peatükis 2.2.4, kasutatakse nende mõlema hindamiseks nähtavusanalüüsi. Lähenemissuundade leidmise jaoks oleks vaja aga teada maastikul iga punkti eksponeeritust ümbritsevatele aladele. Seda võimaldab kujutada kumulatiivse nähtavuse (*cumulative visibility*) rasterkiht, mille iga elemendi väärtus väljendab seda, kui mitmelt ülejäänud elementidega määratud alalt on antud elemendi tsentriga määratud punkti näha (Caldwell *et al.* 2003). Kumulatiivse nähtavuse rasterkihi arvutamiseks leitakse iga elemendi tsentriga määratud punkti vaatevälja jäävad alad ning need summeeritakse (Wright *et al.* 2014). Mida kõrgem on summeeritud rasterkihil elemendi väärtus, seda nähtavam on vastav punkt ümbritsevatele aladele, ning ümberpöörduvalt: seda enam on alasid, mis on sellest punktist nähtavad.

Kuigi sageli põhinevad vaateväljade analüüsid vaid DTM-il (peatükk 2.2.4), annaksid sellised nähtavusanalüüsid Eesti suhteliselt tasase reljeefi ja suurte metsaalade tingimustes aga kahtlemata ebasoovitavaid tulemusi. Seetõttu peeti käesolevas töös vajalikuks kasutada vaateväljade modelleerimisel ka hoonetest ja metsadest tulenevaid takistusi. Loomulikult mängivad nähtavuse hindamisel rolli ka muud tegurid ja nähtused ning GIS tarkvarades rakendatud nähtavusanalüüsid kätkevad endas veelgi lihtsustusi (Miller 2011; Riggs, Dean 2007), millest olulisimaks on ehk alade binaarne klassifitseerimine „nähtavateks“ ja „nähtamatuteks“, kuid nendel teemadel antud töös pikemalt ei peatuta. Samuti tuleb rõhutada,

et käesolevas töös ei käsitleta vertikaalset (õhust maapinnale) nähtavust ning aastaegade vaheldumisest tulenevaid muutusi nähtavuses.

On ilmne, et hooned kujutavad endast vaateväljale täielikke takistusi. Taimkatte poolt vaateväljale avaldatava mõju kvantitatiivseks väljendamiseks kasutati aga Llobera (2007) nähtavuse tõenäosuse mudeli (peatükk 2.2.4) lähendust. Llobera (2007) lähenemise rakendamise kasuks otsustati selle eeliste tõttu Dean'i (1997) mudeli suhtes, lisaks oli antud lähenemise detailsusaste käesolevas töös kumulatiivse nähtavuse hindamiseks autori hinnangul igati piisav.

Kumulatiivse nähtavuse leidmine on aga ülimalt arvutusmahukas (Llobera *et al.* 2010) ja taimkatteteguriga arvestamine muudab vaateväljade määramise veelgi aeglasemaks. Lisaks on käesolevas töös analüüsitavad alad üsna suure ulatusega. Seetõttu ei arvutanud autor vaateväljasid järjest mitte iga elemendi jaoks DTM-il, vaid 50 m sammuga, nii põhja-lõuna kui lääne-idasuunaliselt. See võimaldas viiemeetrilise ruumilise lahutusega DTM-i alusel vaateväljade leidmise arvutusmahukust vähendada sajakordselt. Järgnevalt kirjeldame kumulatiivse nähtavuse arvutamise protsessi käiku.

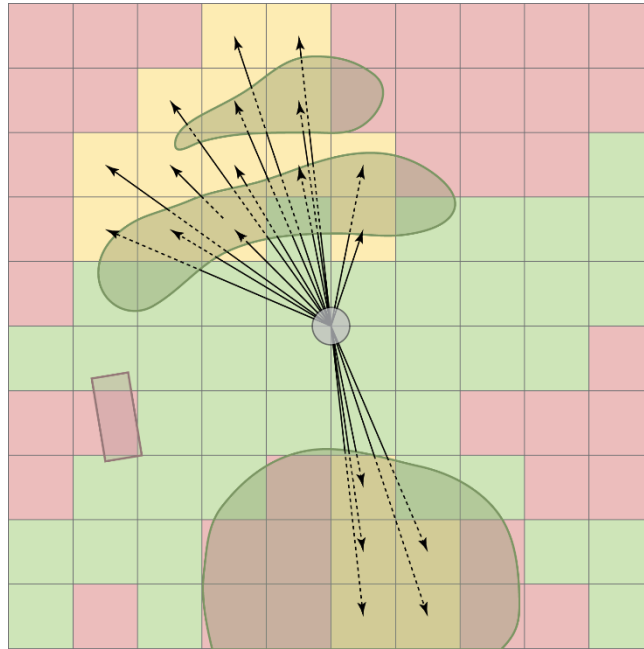
Esmalt lisati DTM-ile hooned: iga hoone kõrgus leiti hoone asukohale vastavate taimkatte kõrgusmudeli (vt peatükk 4.1.4) elementide väärtuste keskmisena ning saadud rasterkiht liideti DTM-ile. Osadele hoonetele leitud kõrgusväärtused olid väga madalad (alla 2,5 m) ning neile määrati kõrguseks 2,5 m. Selliste hoonete näol oli peamiselt tegemist kõrgusmudelite aluseks olnud LIDAR andmete kogumise ajal ehitusjärgus olnud hoonetega või kõrgusmudeli vigadega. Vaateväljade leidmiseks kasutati huvialusest piirkonnast suurema ulatusega kõrgusmudelit, sest vastasel juhul oleks huvialuse piirkonna äärealadel olnud kumulatiivse nähtavuse väärtused tegelikust oluliselt madalamad. Huvialuse ala piire laiendati kõrgusmudeli väljavõtte ulatuse määramiseks igas suunas 2 km.

Vaateväljade leidmiseks kasutati ArcGIS-i tööriista *Visibility*. Vaatleja kõrguse määramiseks liideti tema asukohas maapinna kõrgusele 1,7 m. Kui vaatleja asukohaks oli hoonet kujutav rastrielement, siis sellest punktist vaatevälja ei arvutatud. Vaatleja igast asukohast leiti üldjuhul kaks vaatevälja: esimene hoonetega DTM-i ja teine DSM-i alusel. Kui DSM-i kõrgusväärtus oli vaatleja asukohas suurem kui vaatleja kõrgus, siis DSM-i alusel sellest punktist vaatevälja ei arvutatud ning nähtavust analüüsiti vaid hoonetega DTM-i põhjal. Pärast igas vaatleja asukohas vaateväljade arvutamist leiti saadud rasterkihtide korrutamisel rastrielemendid, mille nähtavust taimkate ja muud maapinnal olevad takistused ei häiri ning elementid, mille nähtavus sõltub nendest takistustest. Edasi analüüsiti viimaste elementide nähtavust.

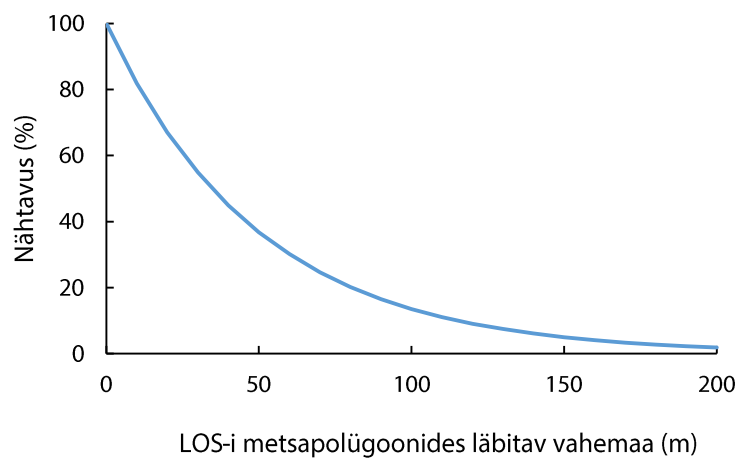
Iga sellise rastrielemendi tsentroid ja vaatleja asukohta kujutava rastrielemendi tsentroid ühendati sirglõiguga, mis kujutab LOS-i konkreetse punkti. Saadud sirglõike lõigati metsaalade polügoonidega ning iga lõigu jaoks arvutati polügoonide läbimiseks kuluv vahemaa (joonis 11). Leitud vahemaade alusel sai vaadeldavate rastrielementide jaoks arvutada tõenäosused, et vastavad punktid on vaatlejale nähtavad, ning need elementide väärtuseks määrata. Paraku puudusid autoril andmed taimkatte tiheduse kohta, mistõttu rakendati kõigi selliste arvutuste jaoks sama taimkatte tiheduskoefitsienti. Llobera (2007) mudelis kasutatud valem nähtavuse tõenäosuse leidmiseks lähendati kujule

$$p(x) = e^{-0,02 \cdot x},$$

kus x tähistas vahemaad, mille LOS läbib metsapolügoonides. Tiheduskoefitsiendi väärtuse 0,02 määras autor ise. Koefitsiendi madal väärtus tuleneb asjaolust, et metsades on puude ja muu taimestiku vahel sageli piisavalt vaba ruumi, et LOS võiks ulatuda üsna kaugemale (joonis 12). Muidugi on aga kõigile metsadele sama tiheduskoefitsiendi väärtuse määramise näol tegemist väga olulise lihtsustusega, mistõttu paljudes metsades ei pruugi leitavad nähtavusväärtused tegelikkusele vastata. Lisaks ei arvestata LOS-i lõikamisel metsapolügoonidega siin taimkatte kõrgust.



Joonis 11. Nähtavuse hindamine aladel, kus mets segab otsevaatlust (kollased ruudud). Nähtavuse arvutamiseks lõigati LOS-e metsapolügoonidega ning iga LOS-i jaoks leiti polügoonide läbimiseks kuluv vahemaa. Vaatleja asub joonise keskel, rohelised ja punased ruudud tähistavad vastavalt nähtavaid ja nähtamatuid alasid.



Joonis 12. Nähtavuse tõenäosuse sõltuvus metsapolügoonides läbitavast vahemaast.

Viimaks kõik leitud vaateväljade rasterkihid liideti – saadud rasterkihi elementide väärtused kujutasid vaadeldava ala kumulatiivset nähtavust. Paljud kõrged väärtused kujutasid hooneid (s.o hoonete katuseid), mistõttu hoonetele vastavate elementide väärtused kustutati. Sobivusväärtustega rasterkihi leidmiseks normaliseeriti väärtused vahemikku 0-1. Kuna üksused soovivad manööverdamiseks kasutada võimalikult varjatud liikumiskoridore (HQDA 1994), määrati kõige eksponeeritumatele aladele sobivusväärtuseks 0 ja kõige varjatumatele aladele 1.

4.2.4. Ühendusteede kvaliteet

Ühendusteede on kõik teed, mis ühendavad tegutsevaid relvajõude ühe või mitme tegevusbaasiga ja mida mööda liiguvad varustus ning tugevdusüksused (EKV 2016; HQDA 1990a; HQDA 1994). Tegevusbaasideks nimetatakse alasid või rajatisi, millest relvajõud ründavaid operatsioone alustavad ning millele nad tagasilööke ja varustuse juurdehankimisel toetuvad (*USDOD 2007*). Ühendusteede kvaliteet sõltub muuhulgas teede tüübist, laiusest, kattest, pinna seisukorrast ja esinevatest liikumistõketest (HQDA 1990a) – paljudest sellistest teguritest, mis mõjutavad ka maastiku läbitavust üldisemalt ning mida käesolevas töös läbitavuse modelleerimisel arvesse võeti. Seetõttu tehti ühendusteid kujutava rasterkihi moodustamiseks maastiku läbitavuse modelleerimisel kasutatud teede ja teealade kihtide alusel läbitavusrastrit väljavõte. Loodud rasterkihil olid elementide väärtused samad kui läbitavusrastril. Seejärel normaliseeriti sobivusväärtustega rasterkihi leidmiseks väärtused vahemikku 0-1.

4.2.5. Ülejäänud lähenemissuundade tuvastamisel olulised kriteeriumid

Lähenemissuundade hindamise kriteeriumitest (peatükk 1.3) pole me antud töös veel käsitletud suunatust otse sihtalale ning ligipääsu külgnevatele lähenemissuundadele ja võtmemaastikele. Neist kaks esimest kriteeriumi (suunatus otse sihtalale ning ligipääs külgnevatele lähenemissuundadele) kaetakse peatükis 4.4 kirjeldatava lähenemissuundade tuvastamise algoritmiga. Võtmemaastikud määratakse aga sageli alles pärast lähenemissuundade analüüsi (HQDA 1994) ning nende asukoht sõltub olulisel määral konkreetsest situatsioonist ja üksuste ülesandest. Sellest tulenevalt käesolevas töös lähenemissuundade tuvastamisel ligipääsu võtmemaastikele ei hinnatud.

4.3. Kriteeriumite olulisuse hindamine

Järgmiseks tuli lõpliku n-ö sobivusrastri arvutamiseks hinnata, kui olulist rolli mängivad kohaldatavad kriteeriumid lähenemissuundade valikul. Selleks kasutati AHP-s rakendatavat paariviisilist võrdlemist, mida kirjeldati lähemalt peatükis 2.2.3. Käesolevas töös olid hinnatavateks kriteeriumiteks maastiku läbitavus, liikumise kanaliseeritus, kate ja varje, vaadeldavus ja tulealade kasutatavus ning ühendusteede kvaliteet. Kriteeriumite olulisust pidi loodava tööriista kasutamisel paariviisilise võrdlemisega hindama iga kasutaja, tööriista

valideerimiseks rakendati selles etapis aga eksperte (peatükk 5.1). Selle protsessiga kriteeriumitele leitud kaale sai seejärel kasutada potentsiaalsete lähenemissuundade leidmisel.

4.4. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritm

Kuigi käesolevas töös loodavat tööriista võib kasutada ka sõbralike jõudude manöövrite analüüsiks, kirjeldatakse tööriista tööpõhimõtteid siin ja edaspidi peamiselt vastase üksuste lähenemissuundade tuvastamise kontekstis. Antud töös eeldatakse, et lähenemissuundade analüüsimiseks on teada vastase üksuse suurus, hetkeasukoht (edaspidi loetavuse huvides alguspunkt) ja sihtala, kuhu nad soovivad jõuda (lõpp-punkt). Arvestades vastase relvajõudude doktriini, eelistatud taktikate ning sõbralike ja vastasjõudude võimekusega, on võimalik hinnata, milliseid liikumiskoridore ja lähenemissuundi võib vastane sihtalale liikumiseks kasutada.

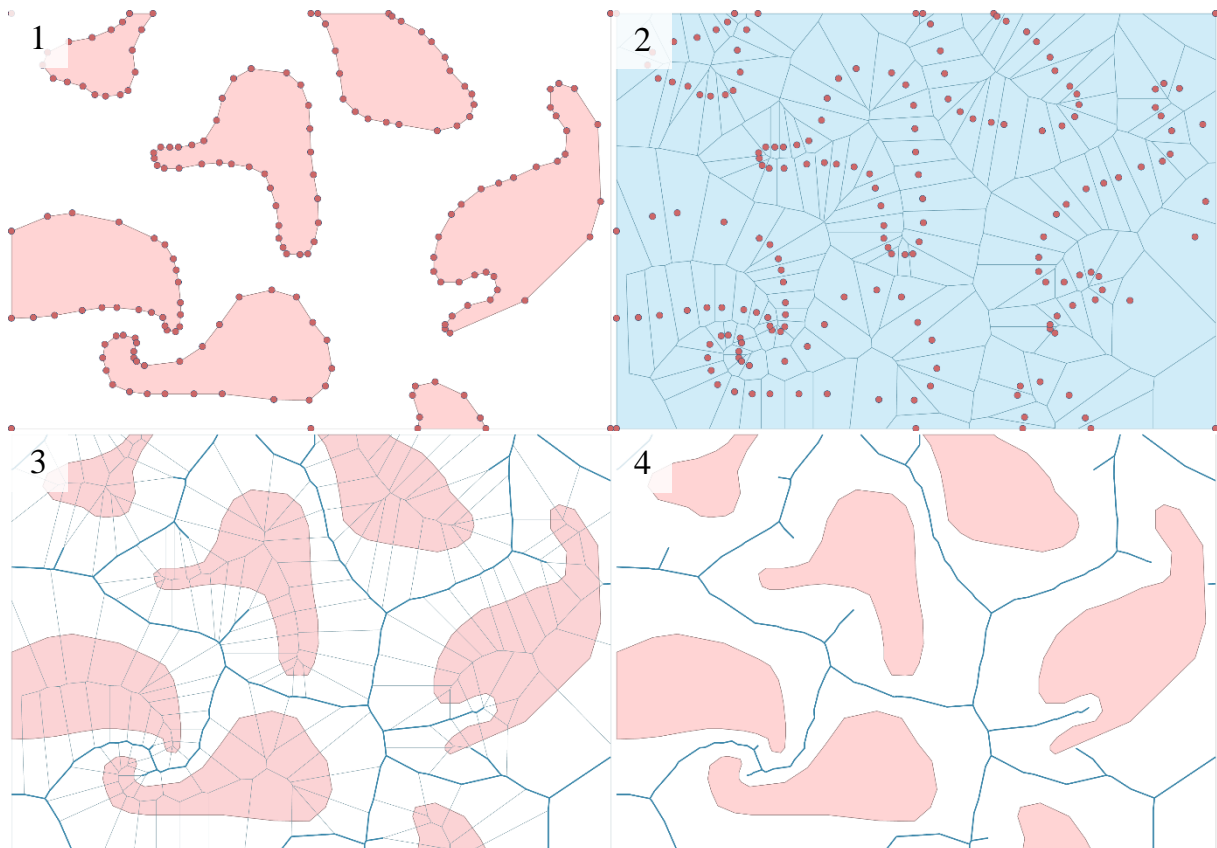
Vastavalt kasutaja sisestatud algus- ja lõpp-punktile genereeriti ala, mille ulatuses hakati potentsiaalseid lähenemissuundi leidma. See ala oli ruudukujuline ning ulatus sisestatud punktidest 2 km „väljapoole“. Genereeritud ala võis käsitleda üksuse huvialana (peatükk 1). Kui lõpp-punkt asub aga üksuse operatsioonialal, võib olla põhjendatud analüüsida lähenemissuundi just sellel alal, sest üksuse ülem vastutab ainult operatsioonialal toimuva eest ning toetub külgnevate alade kontrolli all hoidmisel teistele sõbralikele üksustele (Sycara *et al.* 2009). Sellisel juhul tuleks alguspunkt määrata operatsiooniala serva sellisesse asukohta (või järjest sellistesse asukohtadesse), kust võib oodata vastase üksuste läbiliikumist.

Läbitavusrastrist ja peatükis 4.2 moodustatud sobivusväärtustega rasterkihtidest tehti genereeritud ala ulatuses väljavõtted. Saadud kihte siluti ümmarguse liikuva aknaga, mille raadiuseks oli pool vastase üksuse suurusele vastava lähenemissuuna soovitavast laiusest (peatükk 1.3). Siinkohal eristati olukordi, kus üksused liiguvad peamiselt maastikul või teedel: kui maastikul manöövreid sooritades üritatakse jõuelemente võimalikult palju hajutada, siis teede olemasolul liigutakse peamiselt neid mööda. Sellest tulenevalt kirjutati silutud läbitavusrastril ning vaadeldavust ja tulealade kasutatavust kujutaval rasterkihil teid ja teealaid kujutavate elementide väärtused vastavate silumata kihtide väärtustega üle. Selle üle, kas vastane kasutab konkreetsel alal liikumiseks oodatavasti maastikku või teid, pidi otsustama tööriista kasutaja. Seejärel normaliseeriti saadud rasterkihtide elementide väärtused vahemikku 0-1 ning normaliseeritud väärtustega kihtidest arvutati vastavalt kriteeriumitele määratud kaaludele lõplik n-ö sobivusraster. Järgmise sammuna konstrueeriti sellest rasterkihist liikumiseks sobilike ja sobimatute alade alusel sarnaselt Benton *et al.* (1995), Forbus *et al.* (2002) ja Sycara *et al.* (2009) lähenemistele graaf, mis kujutas liikumiseks sobilike alade „koridoride“ võrgustikku.

4.4.1. Liikumiskoridoride võrgustikku kujutava graafi moodustamine

Sobimatute alade eraldamiseks sobilikest määrati rasterkihi väljalõike elementide väärtuste alusel piirväärtus, millest madalamate väärtustega elemendid kujutasid liikumiseks sobimatuid alasid. Katse- ja eksitusmeetodi tulemusena leiti, et selleks piirväärtuseks võib kasutada

elementide väärtuste 30-protsentiili – nii esindavad sobimatuteks määratud alad problemaatilisi piirkondi piisavalt hästi ning ka genereeritav võrgustik on piisavalt detailne. Sobimatuid alasid kujutavad rastrielemendid vektoriseeriti polügoonideks, nendes esinenud „augud“ täideti ning väikese (alla 2000 m²) pindalaga polügoonid kustutati, et vähendada saadavas võrgustikus tekkivat müra. Samuti ei kujuta väikese pindalaga liikumiseks sobimatud alad endast olulisi liikumistakistusi. Sobimatute alade ja rasterkihi väljalõike äärejoonel suurendati käänupunktide esinemistihedust kümne meetrini ning nende punktide alusel moodustati Voronoi diagramm. Esialgse liikumiseks sobilike koridoride võrgustiku loomiseks valiti välja sellised Voronoi rakkude servajooned, mis ei lõikunud liikumiseks sobimatuid alasid kujutavate polügoonidega (joonis 13). Kuna valdavalt liiguvad üksused siiski teedel ja radadel, ühendati võrgustikuga ka teid kujutavate joonobjektide kiht.



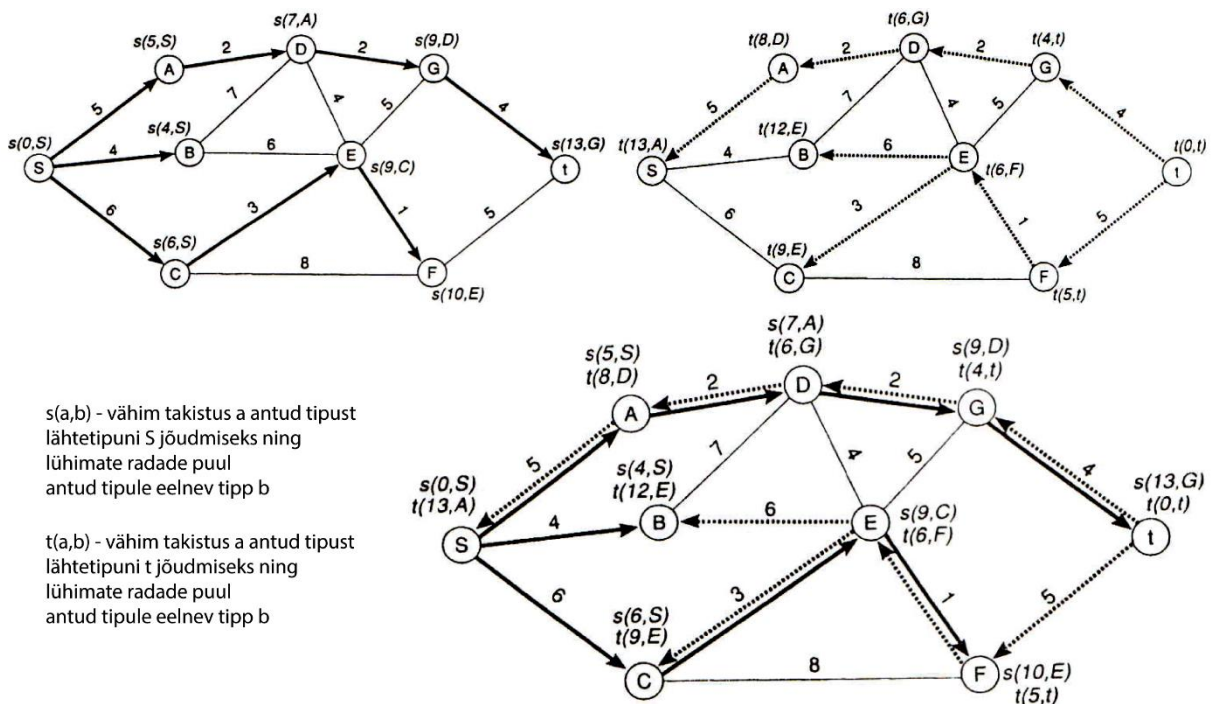
Joonis 13. Liikumiskoridoride võrgustiku (rasvane sinine joon) moodustamine liikumiseks sobimatute alade (punased polügoonid) alusel.

Saadud võrgustiku alusel moodustati esialgne graaf, mille servadeks olid liikumiskoridoride telgi kujutavad jooned ning tippudeks nende joonte ühenduspunktid. Graafis leiti suurima arvu tippudega siduskomponent (*connected component*) ning algus- ja lõpp-punkt ühendati sellele vastava võrgustikuosaga, ülejäänud võrgustikuosad eemaldati. Nimetatud punktid ühendati sirglõikudega võrgustikuosa selliste ühenduspunktidega, mis olid eukleidilise kauguse poolest neile lähimad. Seejärel arvutati võrgustikuosa joontele kaalud vastavalt sobivusrastri nende elementide väärtustele, millega nad lõikusid. Võrgustikuosa alusel moodustati lõplik liikumiskoridoride võrgustikku kujutav graaf. Graafi servade kaaludeks määrati vastavate joonte kaalud.

4.4.2. Ruumiliselt erinevate radade leidmine

Saadud graaf oli kõigi järgnevate tehete aluseks, millega leiti potentsiaalsed lähenemissuunad. Esmalt leiti algus- ja lõpp-punkti ühendav lühim rada, mis arvutuste alusel kujutas endast optimaalset lähenemissuunda. Suboptimaalsete lähenemissuundade leidmiseks kasutati „väravat läbiva lühima raja“ mudeli (GSP) põhimõtteid, mida kirjeldati põgusalt ka peatükis 2.2.2. GSP rakendamise kasuks otsustati seetõttu, et see oli teiste sarnaste mudelite ja algoritmidega (nt IPM ja *k-similar path*) võrreldes ruumiliselt erinevate radade leidmisel efektiivsem. Samuti leiti, et radade ruumilise erinevuse mõõtmine nendele vastavate ruumikujude vahelise ala pindala kaudu on lähenemissuundade tuvastamise probleemile omasem kui nende võrdlemine ühiste lõikude alusel. Ühtlasi ei peetud antud töös vajalikuks rakendada suboptimaalsete lähenemissuundade leidmiseks GSP edasiarendust MGSP-d, sest GSP-ga leitud rajad olid piisava kvaliteediga ning mitmed optimaalse rajaga lõikuvad rajad, mis MGSP-ga oleks genereeritud, poleks lähenemissuundade tuvastamise konteksti sobinud. Lisaks oleks MGSP rakendamine tähendanud arvutusmahukuse kasvu.

Kõiki graafi tippe, mis optimaalsesse rajasse ei kuulunud, loeti GSP mudelis nn väravatippudeks. Iga „väravat läbiv lühim rada“ (GSP) oli lühim algus- ja lõpp-punkti ühendav rada, mis läbis vaadeldavat väravatippu (Lombard, Church 1993). Selliste radade efektiivseks genereerimiseks arvutati kaks lühimate radade puud, millest üks lähtus alguspunktist ja teine lõpp-punktist. Nende puude alusel leiti iga tipu vähim „kaugus“ lähtetipust ning lühimate radade puul vaadeldavale tipule eelnev tipp (joonis 14). Tippudele arvutatud väärtuste põhjal sai leida väravatippe läbivad lühimad rajad (joonis 14).



Joonis 14. Algus- ja lõpp-punktist lähtuvate lühimate radade puude alusel graafi tippudele väärtuste leidmine (üleval) ning saadud väärtuste põhjal väravatippe läbivate lühimate radade moodustamine (all paremal) (Lombard, Church 1993).

Radade ruumilise erinevuse mõõtmiseks tuli iga raja jaoks leida selle raja ja optimaalse raja ruumikujude vaheline pindala. Lombard ja Church (1993) kasutasid selleks oma algoritmis „marsruutide aluste pindalade“ vahe arvutamist: igale tipule leiti lühimate radade puude arvutamisel veel üks väärtus, mis kujutab lähtetipust antud tippu liikumisel kumuleeruvat „marsruudi alust pindala“. Kuna käesolevas töös kasutati lühimate radade puude arvutamiseks *NetworkX* paketi vastavat funktsiooni, rakendas autor pindala leidmiseks lahendust, milles radade ruumikujude vahelise ala käänupunktid pandi (päripäeva) õigesse järjekorda ning leiti paketti *ArcPy* kasutades saadud ala pindala.

Osa genereeritud radadest sisaldas tsikleid. Sellised rajad ei olnud antud töös soovitatavad, mistõttu need rajad eemaldati, kuna GSP mudeli loogikast tulenevalt võis eeldada, et igal tsükliliga rajal saame tsüklite eemaldamisel raja, mis on GSP mudeliga mõne teise nn värvatipu alusel juba moodustatud.

4.4.3. Sobilike suboptimaalsete lähenemissuundade leidmine

Moodustatud suboptimaalsetest radadest tuli välja valida sobivaimad. Iga järgmise sobivaima raja leidmiseks lahendati radade „pikkuse“ ja pindala alusel kahe parameetriga optimeerimisülesanne. Esimese suboptimaalse raja leidmise ülesande võib kirjutada kujul

$$\max(x) = S / (l / l_o)^2,$$

kus S tähistab vaadeldavale ja optimaalsele rajale vastavate ruumikujude vahelist pindala, l vaadeldava raja „pikkust“ ning l_o optimaalse raja „pikkust“. Välja valitakse rada, mille korral x -i väärtus on maksimaalne.

Järgmiste suboptimaalsete radade leidmiseks võrreldi vaadeldavaid radu peale optimaalse raja ka välja valitud suboptimaalsete radadega:

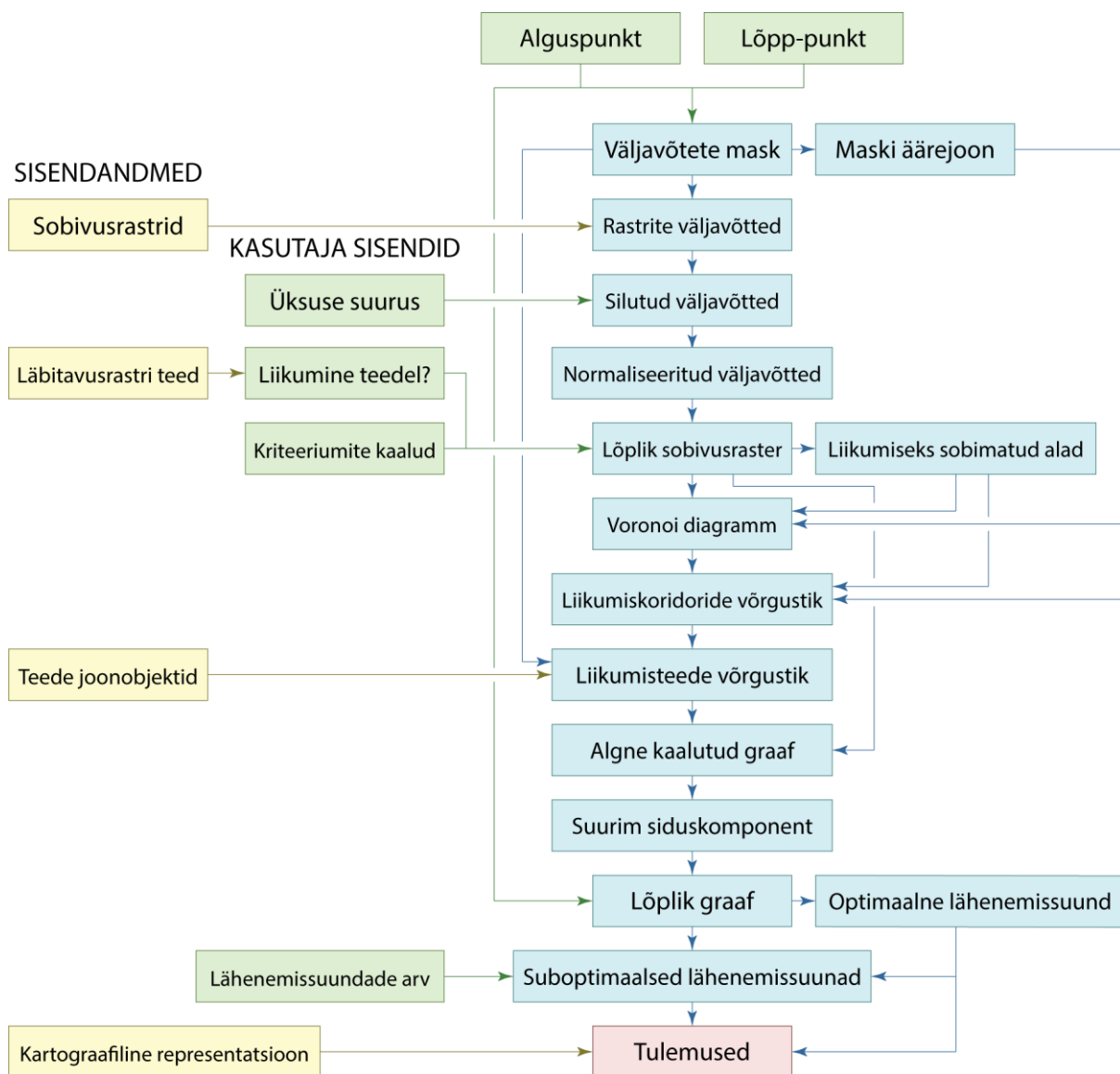
$$\max(x) = \bar{S} / (l / l_o)^2, \quad \text{kui } S_i \geq P_{40}(S_n).$$

Ülal tähistab \bar{S} vaadeldavale rajale ja kõikidele seni välja valitud radadele vastavate ruumikujude vaheliste pindalade aritmeetilist keskmist, S_i , $i=1,2,\dots,m$ vaadeldava raja ja m -nda välja valitud raja ruumikujude vahelist pindala ning $P_{40}(S_n)$ kõikide vaadeldavate radade ja optimaalse raja ruumikujude vaheliste pindalade (S_n) 40-protsentiili. See tähendab, et iga uus välja valitav rada pidi kõigist eelnevatest teatud määral erinema. Kui sellest tingimusest tulenevalt ei õnnestunud kasutaja soovitud arvu radu (s.o lähenemissuundi) leida, esitati kasutajale kõik need rajad, mis suudeti leida. Lähenemissuundade tuvastamiseks sobilikud optimeerimisülesannete püstitused leiti katse- ja eksitusmeetodiga.

Viimaks koondati kõik leitud lähenemissuunad ühte nähtuseklassi. Visualiseerimise eesmärgil nende ruumikujusid lihtsustati ja lisati representatsioonidega lähenemissuundade kujutamiseks sobilik sümboloogia.

Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi kujutab kokkuvõtlikult joonis 15. Esmalt tehti moodustatud sobivusrastritest kasutaja poolt sisestatud algus- ja lõpp-punkti alusel väljavõtted. Saadud rasterkihte siluti sobivate mõõtmetega liikuva aknaga ning arvutati kasutaja

poolt hinnatud kriteeriumite olulisuse ja valitud sätete põhjal lõplik rasterkiht, mis kujutas alade sobivust vaadeldava üksuse liikumiseks. Selle rasterkihi alusel genereeriti liikumiskoridoride võrgustik, mis ühendati teede telgjooni kujutava vektorkihiga. Võrgustikust moodustati graaf, mille servadele määrati kaalud lõpliku sobivusrastri elementide väärtuste põhjal. Graafis leiti suurim siduskomponent ning selle ühendamine algus- ja lõpp-punktiga võimaldas arvutada kasutaja poolt sisestatud arvu potentsiaalseid lähenemissuundi. Seejuures oli optimaalseks lähenemissuunaks graafis algus- ja lõpp-punkti vahelisele lühimale rajale vastav lähenemissuund, suboptimaalsete lähenemissuundade välja valimiseks lahendati aga kaheparameetriselised optimeerimisülesanded. Lähenemissuundade kujutamiseks kasutati kartograafilisi representatsioone.



Joonis 15. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi lihtsustatud kokkuvõtlik skeem. Sobivusrastrid kujutavad alade sobivust vastavalt maastiku läbitavuse, liikumise kanaliseerituse, katte ja varje, vaadeldavuse ja tulealade kasutatavuse ning ühendusteede kvaliteedi kriteeriumitele.

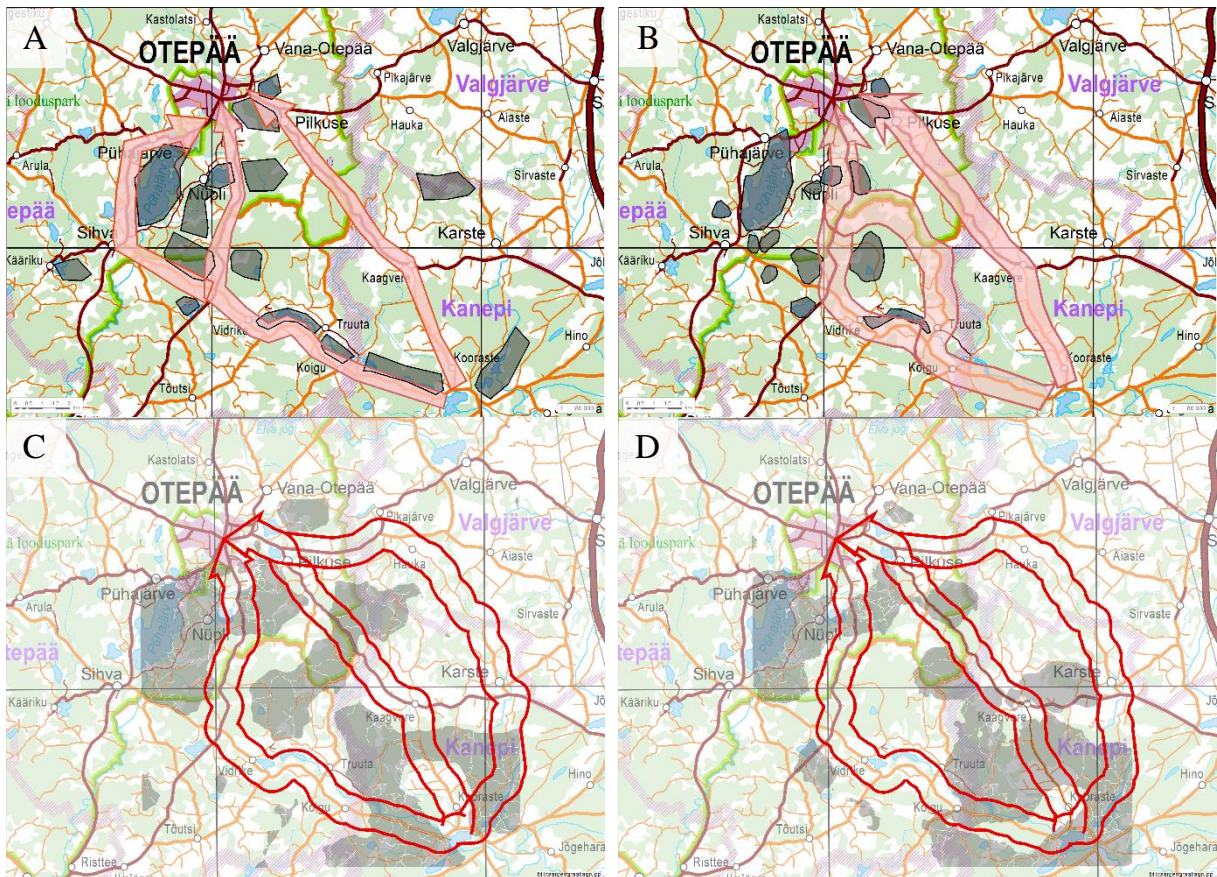
5. Tulemused

5.1. Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimine

Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimiseks võrreldi tööriista poolt genereeritavaid lähenemissuundi ekspertanalüüsidega. Sarnast metoodikat kasutasid oma maastikuanalüüsi tööriista valideerimiseks ka Grindle *et al.* (2004). Kahele maastikuanalüüsis kogenud Eesti Kaitseväge ohvitserile esitati sama hüpoteetiline stsenaarium, millest lähtuvalt pidid nad individuaalselt hindama vastase lähenemissuundade kriteeriumite olulisust ning märkima kaardile vastase jõududele liikumiseks sobimatu maastiku ja kolm tõenäolisemat lähenemissuunda. Eksperdid viisid kriteeriumite olulisuse hindamise ja kaalude arvutamise läbi veebipõhises AHP kalkulaatoris (*BPMMSG 2016*) ning kasutasid liikumiseks sobimatu maastiku ja lähenemissuundade kaardile joonistamiseks Eesti Kaitseväge veebipõhist kaardirakendust.

Stsenaarium oli järgmine: jalaväepataljoni staabi luureohvitseri (S2) rollis oli eksperdile luureinformatsiooni põhjal teada vastase MT-LB-del liikuva motolaskurpataljoni hetkeasukoht ja ründeobjekti asukoht, mille vastase üksus kavatseb hõivata (lisa 4). MT-LB-de näol on tegemist amfiibsete ja mitmeotstarbeliste roomikutel liikuvate soomustatud masinatega. Vastase hetkeasukohaks oli Kooraste küla Põlvamaal ja ründeobjektiks Otepää linn. Lisas 5 on toodud ekspertide tehtud hinnangud vastase lähenemissuundade kriteeriumite olulisusele ning arvutatud kaalud. Joonisel 16 on ekspertide joonistatud lähenemissuunad ja liikumiseks sobimatu maastik. Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriistaga genereeriti lähenemissuunad ekspertide poolt hinnatud kriteeriumite olulisuse kaalude põhjal. Kuna ekspertide hinnangud kriteeriumite olulisusele olid suhteliselt erinevad, genereeriti lähenemissuunad mõlema eksperdi poolt tehtud hinnangute alusel eraldi.

Otepää ja Kanepi valla piirkonna kinnine või poolkinnine maastik ja maapinna reljeef soosib kaitsvaid tegevusi ning nähtavasti mängis see asjaolu olulist rolli ka ekspertide hinnangutes kriteeriumite olulisusele, sest mõlemad eksperdid hindasid maastiku läbitavust selles situatsioonis antud kriteeriumitest olulisimaks. Muude kriteeriumite kaalukuse osas läksid aga ekspertide arvamused lahku. Ekspert A hindas olulisteks kriteeriumiteks veel liikumise kanaliseerituse (25,9%) ja ühendusteede kvaliteedi (20,2%), ekspert B jaoks oli väga oluline aga vaadeldavus ja tulealade kasutatavus (33,6%). Mõlemad eksperdid märkisid liikumiseks sobimatute aladena peamiselt seisuveekogusid ja märgalasid ning märkisid suuliselt, et ka kõiki metsaalasid võib antud olukorras liikumiseks sobimatute aladena käsitleda. Ekspertide joonistatud kolmest lähenemissuunast kattusid omavahel kaks: Kaagvere-Kooraste maanteed ja Rõngu-Otepää-Kanepi maanteed mööda kulgev lähenemissuund (joonistel 16A ja 16B idapoolne lähenemissuund) ning Sihva-Vidrike-Kärgula-Järvere maanteed ja Tatra-Otepää-Sangaste maanteed mööda kulgev lähenemissuund (joonisel 16A keskmine lähenemissuund). Lisaks joonistas ekspert A lähenemissuuna, mis kulges mööda Sihva-Vidrike-Kärgula-Järvere maanteed ning seejärel Otepää-Kääriku-Kurevere maanteed, Pühajärvest läänes (joonisel 16A läänepoolne lähenemissuund). Ekspert B kolmas lähenemissuund kulges kattunud lähenemissuundade vahelistel aladel (joonisel 16B keskmine lähenemissuund).



Joonis 16. Esimesele hüpoteetilisele stsenaariumile vastavad lähenemissuunad ja liikumiseks sobimatu maastik. A ja B kujutavad ekspertide jooniseid ning C ja D vastavate ekspertide poolt hinnatud vastase lähenemissuundade kriteeriumite kaalude alusel tööriistaga genereeritud lähenemissuundi. Aluskaardina on kasutatud Eesti Kaitseväge 1:150 000 kaarti.

Lähenemissuundade tööriistalis liikumiseks sobimatud alad välja kriteeriumite kaalude alusel moodustatud sobivusrastrilt. Teatud alad märgiti sobimatuteks mõlema sobivusrastri puhul, nagu Pühajärv ning sellega külgnevad märgalad ja reljeefsed alad ning mitmed muud reljeefsed metsaalad. Tulenevalt sellest, et ekspert A oli hinnanud kõrgelt ühenduste kvaliteedi olulisust ning madalalt katte ja varje olulisust, märgiti tema puhul sobimatuteks rohkem metsaalasid kui ekspert B puhul. Ekspert B hinnangud tingisid selle, et sobimatuteks märgiti rohkem alasid, mis pakkusid häid vaatlus- ja tulealasid.

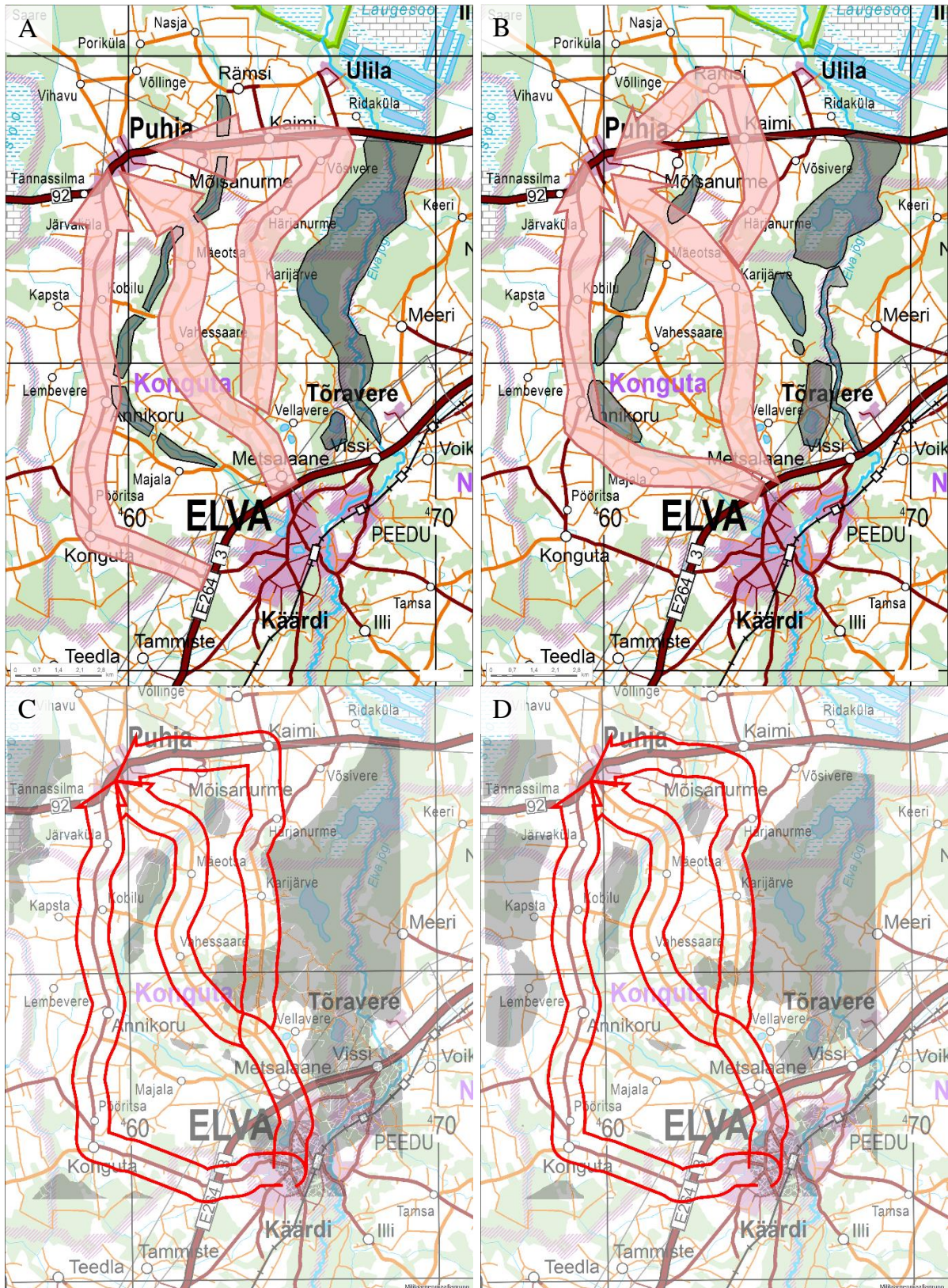
Tööriista genereeritud lähenemissuunad olid kahe sobivusrastri puhul vaatamata nende olulistele erinevustele peaaegu identsed. Selle põhjuseks oli suuresti asjaolu, et autor valis sätte, mille kohaselt oli oodata üksuste liikumist peamiselt mööda teid: silutud maastiku läbitavuse kihil asendati teid kujutavate elementide väärtused silumata kihi elementide väärtustega. Kuna mõlemad eksperdid hindasid maastiku läbitavuse kriteeriumi olulisust kõrgeks, peegeldusid teede kõrged sobivusväärtused ka resultaadis. Kaks genereeritud lähenemissuunda langesid täpselt kokku ekspertide joonistatud kattunud lähenemissuundadega. Kolmas lähenemissuund kulges mööda maanteid ja muid teid ülejäänud lähenemissuundadest idas, kus mõlemal sobivusrastril olid kõrged sobivusväärtused. Ekspert A joonistatud läänepoolset lähenemissuunda (joonis 16A) ei saanud tööriist valida, sest see jäi sobivusrastrist tehtud väljavõtte piiridest välja: tööriista moodustatud väljavõtte ulatus 2 km algus- ja lõpp-punktist

„väljapoole“. Selleks, et antud lähenemissuunda olnuks võimalik valida, oleks väljavõtte piire pidanud laiendama veel vähemalt 2 km võrra. Ekspert B joonistatud keskmist lähenemissuunda ei valinud tööriist seepärast, et selle lähenemissuuna aladel olid suhteliselt madalad sobivusväärtused.

Järgmiseks testiti, kuidas sobib tööriist avatunal maastikul lähenemissuundade genereerimiseks. Samadele ekspertidele esitati uus hüpoteetiline stsenaarium, milles neil oli mehhaniseeritud jalaväepataljoni staabi luureohvitserina luureinformatsiooni põhjal teada vastase tankipataljoni hetkeasukoht ja ründeobjekti asukoht, mille vastase üksus kavatses hõivata (lisa 6). Vastase asukohaks oli Elva linn ja ründeobjektiks Puhja alevik Tartumaal. Jällegi paluti ekspertidel hinnata vastase lähenemissuundade kriteeriumite olulisust antud situatsioonis ning märkida kaardile liikumiseks sobimatu maastik ja vastase tõenäolised lähenemissuunad. Ekspertide tehtud hinnangud vastase lähenemissuundade kriteeriumite olulisuse osas ning arvatud kaalud on toodud lisa 7. Joonisel 17 on ekspertide joonistatud lähenemissuunad ja liikumiseks sobimatu maastik. Ekspertide hinnangute erinevuse tõttu genereeriti lähenemissuunad tööriistaga taas mõlema eksperdi poolt tehtud hinnangute alusel eraldi.

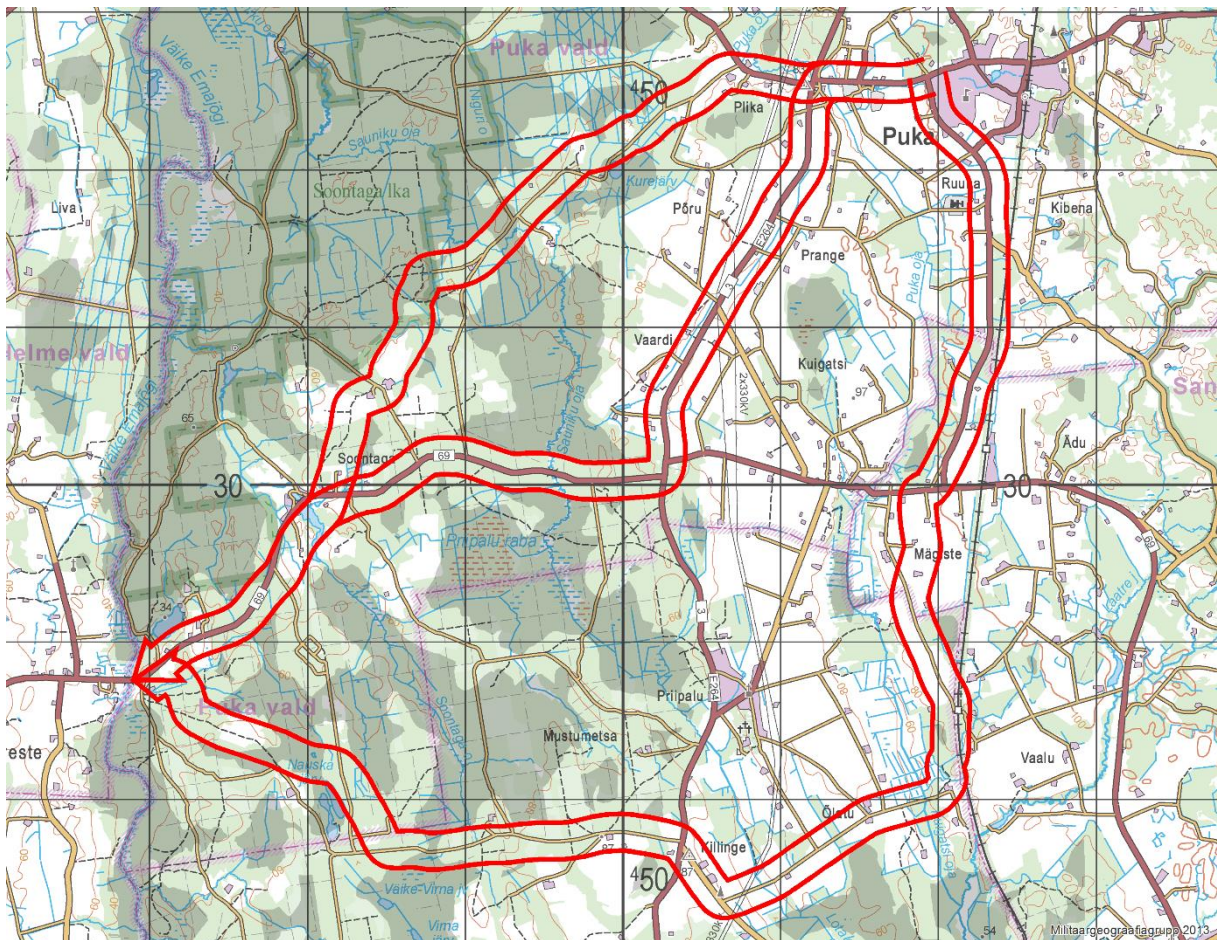
Nagu esimese stsenaariumi puhul, olid ka siin ekspertide hinnangud kriteeriumite olulisusele väga erinevad. Ekspert A hindas olulisimateks maastiku läbitavust (32,9%), ühendusteede kvaliteeti (29,0%) ja liikumise kanaliseeritust (23,1%). Ekspert B tõstis selgelt esile ühendusteede kvaliteedi kriteeriumi (55,4%) ning pidas oluliseks ka vaadeldavust ja tulealade kasutatavust (20,1%). Mõlemad eksperdid olid aga ühel meelel, et katte ja varje olemasolu vastase tankipataljoni lähenemissuundade valikut olulisel määral ei mõjuta: selle kriteeriumi kaal oli mõlema eksperdi hinnangute lõpptulemusena vaid ligi 4%. Samuti hindasid eksperdid jälle väga sarnaselt liikumiseks sobimatuid alasid: nendeks valiti peamiselt veekogud ja märgalad. Ekspertide joonistatud lähenemissuundadest ei kattunud seekord ükski. Tööriistaga genereeritud lähenemissuunad sarnanesid aga väga ekspert A joonistatud lähenemissuundadega. Elva-Puhja maanteel (joonistel 17A, 17C ja 17D keskmine lähenemissuund) ning Elva-Rannu ja Puhja-Konguta maanteel (joonistel 17A, 17C ja 17D läänepoolne lähenemissuund) kulgenud lähenemissuunad ühtisid täpselt ekspert A omadega ning idapoolsed lähenemissuunad (joonised 17A ja 17C) kulgesid samuti suhteliselt sarnaselt, seejuures oli genereeritud lähenemissuund suunatud otsemini ründeobjektile kui eksperdi joonistatud lähenemissuund, kuid ei kulgenud täielikult ainult maanteedel.

Tööriista poolt välja valitud liikumiseks sobimatud alad olid kahe sobivusrastri puhul üsna sarnased (joonised 17C ja 17D), vaatamata märkimisväärsetele erinevustele ekspertide hinnangutes. Selle põhjuseks oli asjaolu, et sobimatuteks määratud aladel olid mitme kriteeriumi rasterkihtides madalad sobivusväärtused, välja arvatud katet ja varjet kujutava kriteeriumi kihil, mille olulisuse mõlemad eksperdid väga madalaks hindasid. Peamiselt olid liikumiseks sobimatuteks aladeks valitud veekogud ning märg- ja metsaalad piirkondades, kus teedevõrk oli hõredam. Sobimatute alade ühtimisest tulenevalt olid ka genereeritud lähenemissuunad väga sarnased (joonised 17C ja 17D).



Joonis 17. Teisele hüpoteetilisele stsenaariumile vastavad lähenemissuunad ja liikumiseks sobimatu maastik. A ja B kujutavad ekspertide jooniseid ning C ja D vastavate ekspertide poolt hinnatud vastase lähenemissuundade kriteeriumite kaalude alusel tööriistaga genereeritud lähenemissuundi. Aluskaardina on kasutatud Eesti Kaitseväge 1:150 000 kaarti.

Põhjuseid, miks ei osutunud tööriista poolt valituks ükski ekspert B joonistatud lähenemissuundadest, on mitu. Ekspert B joonistatud keskmist lähenemissuunda (joonis 17B) ei valinud tööriist seetõttu, et mööda Elva-Puhja maanteed kulgenud lähenemissuund (joonistel 17A, 17C ja 17D keskmine lähenemissuund) oli sellest nii lühem kui ka väiksema „takistusega“. Läänepoolse lähenemissuuna valimata jätmine tulenes alguspunkti valikust: edasised testid näitasid, et tööriist oleks läänepoolseks lähenemissuunaks valinud just selle, kui alguspunkt oleks olnud paigutatud näiteks Jõhvi-Tartu-Valga ja Elva-Puhja maanteede ristmikku Metsalaane külast kagus. Ekspert B kirdepoolset lähenemissuunda poleks tööriist saanud valida, sest see jäi jällegi sobivusrastrist tehtud väljavõtte piiridest välja – selleks oleks väljavõtte piire pidanud laiendada veel vähemalt kilomeetri võrra.



Joonis 18. Kolmandale hüpoteetilisele stsenaariumile vastavad tööriistaga genereeritud lähenemissuundad ja liikumiseks sobimatu maastik. Aluskaardina on kasutatud Eesti Kaitseväge 1:100 000 kaarti.

Viimaks testiti lähenemissuundade genereerimist sellise stsenaariumi järgi, milles üksus liigub oodatavalt maastikul jõuelemente võimalikult palju hajutades, hindamata teid peamiste liikumiskoridoridena. Selle stsenaariumi testimiseks eksperthinnanguid ei kasutatud. Stsenaariumi kohaselt oli oodata vastase roomiksoomukitega kompanii liikumist Puka alevikust Valgamaal Jõgeveste sillani Väike-Emajõel. Antud piirkond valiti stsenaariumi jaoks välja sealse suhteliselt hõreda teedevõrgu tõttu. Taaskord tuleb aga rõhutada, et tegemist on täielikult hüpoteetilise stsenaariumiga. Lähenemissuundade tuvastamiseks määrati kõigile

kriteeriumitele võrdsed kaalud ning silutud läbitavusrastrit teede kihiga üle ei kirjutatud. Lähenedissuuna koridori laiuseks määrati 500 m.

Genereeritud lähenedissuunad on kujutatud joonisel 18. Keskmise lähenedissuund kulges mööda Jõhvi-Tartu-Valga maanteed ja Võru-Kuigatsi-Tõrva maanteed, ülejäänud lähenedissuunad kulgesid aga peamiselt väiksemaid teid pidi või maastikul, kasutades ära lagedamaid alasid. Ühe olulisema vastuoluna paistab silma kahe lähenedissuuna kulgemine üle Soontaga paisjärve (joonise 18 lääneosas), mis tuleneb selle marsruudi otsesusest ja kõrval kulgeva maanteega võrreldes sarnastes sobivusväärtustes. Nagu jooniselt võib näha, ei ole järve piirkonda märgitud liikumiseks sobimatuks alaks. Suhteliselt kõrged sobivusväärtused sai piirkond peamiselt ühendusteede kvaliteedi, maastiku läbitavuse ja liikumise kanaliseerituse rasterkihtide silumise tulemusena. Tegemist on aga kahtlemata sobimatu marsruudivalikuga. Küsitavad on ka mitmed muud marsruudivalikud, kus lähenedissuunad kulgevad samuti teede lähedal, kuid mitte päris neid mööda. Olulist rolli sellistes valikutes mängis ühendusteede kvaliteedi kriteeriumi sobivust kujutanud silutud rasterkiht – ka teedeäärsed alad said kõrged sobivusväärtused. Lisaks on vaieldav lähenedissuundade kulgemine üksteisest suhteliselt kaugel.

5.2. Lähenedissuundade automaattuvastusel esinenud probleemid

Lähenedissuundade automaattuvastuse resultaatides oli mitmeid küsitavusi. Nagu eelmises alapeatükis kirjeldati, oli üheks probleemiks lähenedissuundade kulgemine teede kõrvalt ja raskesti läbitavatel aladel, nagu näiteks veekogudel ning märg- ja metsaaladel. Peamiselt esines seda siiski juhul, kui liikumist mööda teid ei tähtsustatud. Samuti kippusid lähenedissuunad kulgema teede kõrval rohkem siis, kui ühendusteede kvaliteedi kriteeriumi olulisust hinnati kõrgelt. Üheks võimalikuks lahenduseks, vältimaks lähenedissuundade kulgemist raskesti läbitavatel aladel, oleks nende aladega lõikuvad liikumiskoridoride võrgustiku servad kustutada või anda niisugustele servadele madalamad sobivusväärtused. Nii võib potentsiaalselt muuta kasutamatuks aga ka sellised vajalikud servad, mis lõikuvad nende aladega tühiselt väikesel alal. Samuti võiks liikumiskoridoride võrgustiku moodustada ainult läbitavusrastrit kasutades, arvestamata sellega, kuidas sobivad alad liikumiseks ülejäänud kriteeriumite järgi.

Oluliseks küsimuseks on ka see, milliste mõõtmetega peaks olema lõplikust sobivusrastrist tehtav väljavõte, mida lähenedissuundade leidmiseks kasutatakse. Nagu esimese ja teise hüpoteetilise stsenaariumi kohaselt genereeritud lähenedissuunad (joonised 16 ja 17) näitasid, ei pruugi piisata alast, mis ulatub algus- ja lõpp-punktist 2 km „väljapoole“. Genereeritava ala ulatust võib suurendada ka rohkem või määrata ulatuse suuruse vastavalt algus- ja lõpp-punkti vahelisele kaugusele, kuid nii kasvab märkimisväärselt ka arvutusmahukus ning samuti võivad genereeritavad lähenedissuunad kulgeda üksteisest liiga kaugel.

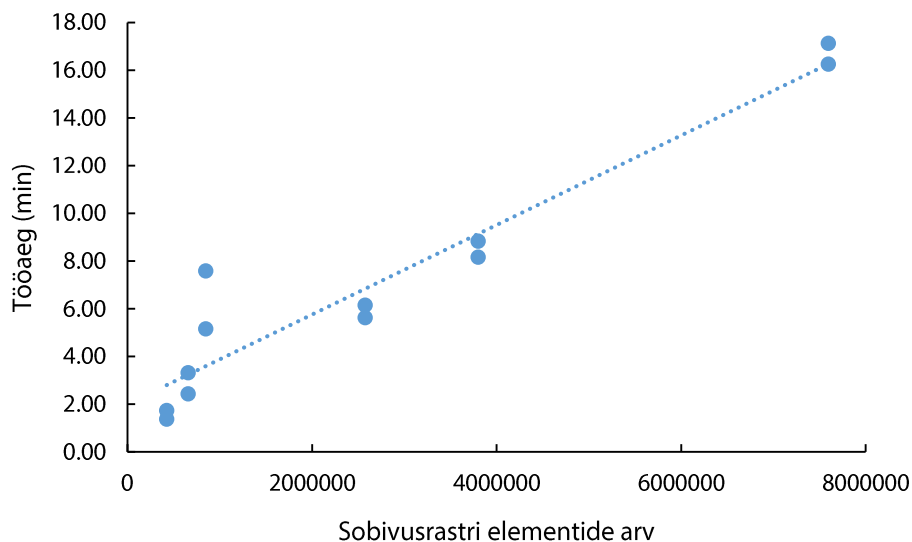
Lähenedissuundade võrdlemisi suur ruumiline erinevus oli aga küsitav juba eelmises peatükis presenteeritud tulemuste, eelkõige kolmandale hüpoteetilisele stsenaariumile vastavate lähenedissuundade puhul (joonis 18). Suboptimaalsete radade valikul võib optimeerimisülesannetesse kitsenduseks lisada optimaalse raja ja vaadeldava raja vahelise

maksimaalse pindala, kuid selle tulemusena võib tööriist potentsiaalselt välja valida ainult optimaalse raja lähedal asuvaid radu, jättes valimata hea kvaliteediga radu, mis kulgevad optimaalsest rajast kaugemal.

Ei GSP mudeli ega ka optimeerimisülesannetega ei hinnatud seda, kus võrreldavad rajad täpsemalt ruumiliselt erinevad: kas eraldipaiknemine leiab aset pigem algus- või lõpp-punkti lähedal. Tööriista kasutajat võivad aga potentsiaalselt huvitada pigem lähenemissuunad, mis on ruumiliselt erinevad lõpp-punkti lähedal, võimaldades selliselt hinnata võimalikke suundi ründeobjektile või võtmemaastikule lähenemiseks. Antud probleemi lahendamiseks võiks iga vaadeldava raja puhul hinnata selle raja ja optimaalse raja „lahknemistippude“ kaugust algus- ja lõpp-punktist ning kauguste põhjal arvatud indeksit suboptimaalsete radade leidmise optimeerimisülesannetes rakendada. Sellisteks „kaugusteks“ võivad olla nii tippudevahelise lühima raja „kogupikkus“ kui ka tippude arv. Kirjeldatud probleemi lahendamist ei pidanud töö autor aga käesolevas töös vajalikuks.

5.3. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi tööaeg

Järgnevalt mõõdeti lähenemissuundade tuvastamise algoritmi tööaega sõltuvalt sisendiks olnud sobivusrastri elementide arvust. Joonis 19 kujutab algoritmi kogutööaega sõltuvalt 12 erineva sobivusrastri elementide arvust. Testimiseks kasutatud rasterkihid olid paarikaupa võrdse elementide arvuga. Jooniselt 19 võib näha, et elementide arvu ja tööaja vahel on suhteliselt tugev lineaarne seos, seega võib algoritmi ajaliseks keerukuseks tervikuna pidada keerukust $O(n)$.



Joonis 19. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi kogutööaeg sõltuvalt sobivusrastri elementide arvust.

Algoritmis sooritatavatele tegevustele kuluva tööaja leidmiseks jaotati algoritm kaheksasse sisulisse ossa või n -õ protseduuri (tabel 4) ning mõõdeti nende protseduuride teostamiseks kuluvaid tööaegu. Algoritmi tööaja mõõtmise tulemusi protseduuride kaupa kaheksa erineva

sobivusrastri põhjal kujutavad tabel 5 ning joonised 20 ja 21. Testimiseks kasutatud arvuti olulisemad parameetrid on toodud tabelis 6.

Tabel 4. Algoritmis sooritatavate tegevuste jaotus kaheksaks sisuliseks protseduuriks.

Protseduur	Kirjeldus
1	Liikumiseks sobimatute alade valik
2	Rasterkihi äärejoone ja liikumiseks sobimatute alade alusel Voronoi diagrammi arvutamine, võrgustiku moodustamine ja selle lõikamine rasterkihi äärejoonega
3	Saadud võrgustiku integreerimine ETAK-i teede joonobjektidega, ühtse võrgustiku moodustamine ja võrgustiku sõlmpunktide leidmine
4	Võrgustiku servadele kaalude leidmine
5	Algse graafi moodustamine
6	Graafis suurima tippude arvuga siduskomponendi leidmine ning sellega algus- ja lõpp-punkti ühendamise
7	Lõpliku graafi moodustamine ja optimaalse raja leidmine
8	Suboptimaalsete radade leidmine ja tulemuse presenteerimine

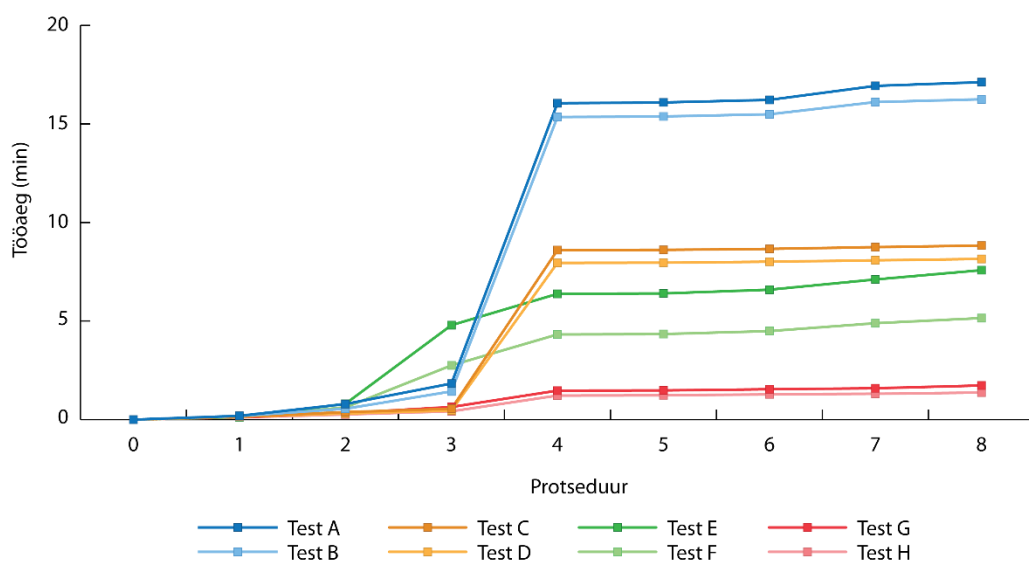
Tabel 5. Algoritmi tööaja mõõtmise tulemused kumuleeruvalt protseduuride kaupa kaheksa erineva sobivusrastri põhjal. Kasutatud rasterkihid olid elementide arvult nelja erineva suurusega.

Protseduur \ Test	A	B	C	D	E	F	G	H
	7 594 718 el		3 798 632 el		845 750 el		423 300 el	
1	0,19	0,18	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11
2	0,79	0,55	0,38	0,31	0,80	0,62	0,33	0,26
3	1,83	1,43	0,55	0,46	4,79	2,75	0,64	0,42
4	16,05	15,35	8,60	7,95	6,38	4,32	1,47	1,22
5	16,09	15,38	8,61	7,96	6,40	4,34	1,48	1,23
6	16,22	15,49	8,66	8,01	6,59	4,49	1,54	1,28
7	16,93	16,11	8,75	8,08	7,11	4,89	1,59	1,31
8	17,12	16,25	8,83	8,15	7,58	5,15	1,73	1,37

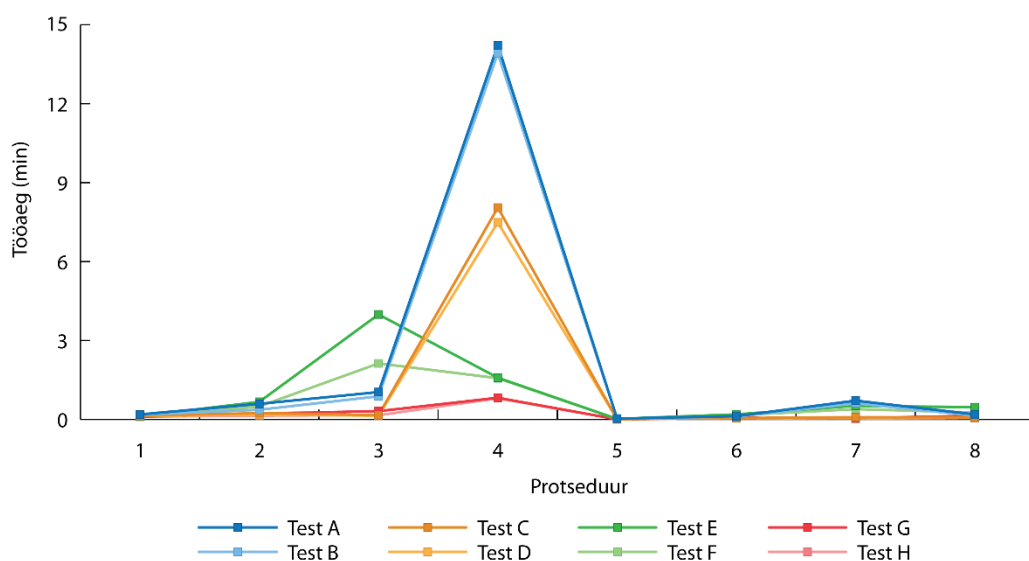
Mitmete lähenemissuundade automaattuvastuse jaoks vajalike sobivusrastrite moodustamine on väga arvutusmahukas, eelkõige puudutab see probleem aga vaadeldavust ja tulealade kasutatavust iseloomustava kumulatiivse nähtavuse rasterkihi genereerimist. Suur osa nendest rasterkihtidest on võimalik enne maastikuanalüüside läbiviimist välja arvutada ning kihte vajadusel teatud ajaintervalli järel värskete algandmete alusel uuendada. Näiteks võib eeldada, et maastiku läbitavus teatud üksuse tüübi ja niiskusolude korral ning kumulatiivne nähtavus ei muutu sedavõrd kiiresti, et oleks vajadus kihte arvutada uusimatest algandmetest alles maastikuanalüüsi läbiviimisel. Arvutusmahukuse tõttu moodustati käesolevas töös kumulatiivse nähtavuse rasterkihid vaid kasutatud testalade kohta ning seetõttu ei käsitleta

algoritmi tööaja mõõtmisel algoritmi esimesi samme: algus- ja lõpp-punkti alusel huviala genereerimist, sobivusrastritest väljavõtete tegemist, nende silumist ja lõpliku sobivusrastri arvutamist.

Tabelist 5 ja joonistelt 20 ja 21 võib näha, et kõige ajamahukamateks protseduurideks on algoritmis protseduurid 3 ja 4. Kõige ootamatum on just testide E ja F 3. protseduuri ajamahukus, mis tuleneb sealse Voronoi diagrammi põhjal arvatud võrgustiku kompleksisusest ja/või ühtse võrgustiku moodustamisel esinenud probleemidest. Seda kinnitab ka asjaolu, et nimetatud testides kulub protseduur 8 tegevustele pikem aeg kui muude testide korral. Kõige määravam on algoritmi kogutööaja juures protseduur 4, millele kuluv aeg on sobivusrastri elementide arvuga väga tugevalt korrelatsioonis. Protseuuridele 1, 5 ja 6 kulunud aeg oli aga kõigis testides üsna tühine.



Joonis 20. Algoritmi tööaja mõõtmise tulemused protseduuride kaupa kumuleeruvalt.



Joonis 21. Algoritmi tööaja mõõtmise tulemused protseduuride kaupa.

Tabel 6. Lähenemissuundade algoritmi testimiseks kasutatud arvuti olulisemad parameetrid.

Protsessor	Intel Core i7-4710HQ @ 2,50 GHz
RAM	8,00 GB
Operatsioonisüsteem	Windows 10 64-bit
Andmetalletus	1TB HDD 5400 rpm + 24GB SSD

Mõõtmistulemused näitavad, et graafiarvutused teostatakse algoritmis kiiresti, probleemiks on aga rakendatud ArcGIS-i tööriistade kiirus suuremate andmemassiividega sisendite korral. Samas ei näe autor põhjust ArcGIS-i tööriistade funktsionaalsuste ümber kirjutamiseks, et proovida saavutada kiiremaid algoritme või funktsioone. Selle asemel võiks suurte sobivusrastrite korral nende elementide arvu ruumilise lahutuse muutmise läbi vähendada. Sama lähenemist kasutati ka käesolevas töös suuremõõtmeliste sobivusrastrite alusel lähenemissuundade tuvastamisel, kuna algoritmi kogutööaega sooviti hoida alla kümne minuti. Rastrielementide agregeerimisel jäi nende kvaliteet lähenemissuundade leidmiseks piisavaks.

Tööaja mõõtmisest välja jäänud sammudest (algus- ja lõpp-punkti alusel huviala genereerimine, sobivusrastritest väljavõtete tegemine, nende silumine ja lõpliku sobivusrastri arvutamine) on arvutusmahukaim väljavõtterastrite silumine, millele kulub aeg sõltub rasterkihi elementide arvust ja silumiseks kasutatava liikuva akna raadiusest. Need sammud ei muuda aga algoritmi kokkuvõttes oluliselt aeglasemaks, mistõttu peegeldavad mõõtmistulemused algoritmi kogutööaega erinevate mõõtmemetega sobivusrastrite korral siiski üsna hästi.

6. Arutelu

6.1. Maastiku läbitavuse mudel

Autor kasutas maastiku läbitavuse modelleerimiseks mitmeid talle kättesaadavaid ruumiandmestikke (tabel 1), lisaks oli mudeli kasutajal endal võimalik teha maastiku läbitavuse hindamisel täpsustusi üksuse tüübi sisestamise ja niiskusolude määramise näol. Autori hinnangul on käesolevas töös loodud maastiku läbitavuse määramise mudel võrreldav mitmete peatükis 2.1 kirjeldatud maastiku läbitavuse mudelitega, kuigi mudelid, mis hindavad iga sõiduki läbitavust eraldi (nt Hohmann *et al.* 2013; Pimpa *et al.* 2014; Slocum *et al.* 2003), annavad nähtavasti täpsemaid resultate. Samas näitavad tulemused, et loodud mudel on käesolevas töös püstitatud ülesannete lahendamiseks piisav, kuigi täpsema hinnangu andmiseks tuleks tulemuste vastavust tegelikkusele mõõta empiiriliste katsetega.

Kindlasti aga esineb veel hulk tegureid, millel on läbitavuse määramisel kindel roll ning mida siinses mudelis arvesse ei võeta. Samuti on tegureid, mille mõju hinnatakse käesoleva töö mudelis üsna lihtsustatult. Vahest kõige enam võiksid maastiku läbitavuse mudeli tulemit usaldusväärsemaks muuta täpsemad andmed taimkatte kohta: muuhulgas puude tüvedevahelist kaugust, tüvede keskmist diameetrit, alumiste okste kõrgust ja taimkatte tihedust kirjeldavad andmed, sest taimkate on sõidukitele üheks olulisemaks takistuseks ning loodud mudelis rakendati taimkattenäitajatest läbitavuse hindamisel vaid taimkatte kõrgust. Samuti oleks tarvis kaardistada detailsemalt ka veekogude kallaste, sügavuse, põhja pinnase ning voolukiiruse näitajaid ja omadusi, seda eriti ratassõidukite läbitavuse määramise jaoks.

Väga oluline oleks uurida lähemalt ka ilmatingimuste ja maastiku läbitavuse vahelisi seoseid ning kasutada ilmanäitajaid läbitavuse hindamisel. Seejuures tuleks kasutada nii viimaseid vaatlusandmeid kui ka arhiivandmeid ja ilmaprognoose, sest näiteks muldade niiskusesisaldus võib nende veesiduvusest ja muudest teguritest tulenevalt muutuda väga aeglaselt. Autor soovis ka käesolevas töös sademehulkade andmeid Internetist HTTP päringutega automaatselt mudelisse lugeda, kuid kahjuks puudusid andmed muldade niiskusesisalduse dünaamikat puudutavate oluliste näitajate, näiteks veesiduvuse kohta. Samuti ei vastanud ükski testitud ilmateenus otseselt käesoleva töö vajadustele. Näiteks võimaldab Riigi Ilmateenistus Eesti jaamade viimaseid vaatlusandmeid, sealhulgas sademehulki, kasutada XML formaadis, aga ilmaprognooside töötlemise jaoks samasugused võimalused puuduvad. Laialdaselt levinud Weather Underground ilmateenuse API abil saab pärida erinevate asukohtade arhiiv- ja prognoosandmeid üle maailma, kuid kahjuks paljude Eesti linnade ja asulate puhul seal andmed sademete kohta puuduvad. Yr.no ilmateenus võimaldab jällegi kasutada vaid prognoosandmeid. Seega oleks tulnud teenustest loetavaid andmeid kombineerida: üheks võimaluseks oluks arhiveerida oma serveris Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmeid ja kasutada neid näiteks koos Yr.no prognoosandmetega. Maastiku läbitavust mõjutavad peale sademete aga ka muud ilmategurid ning samuti on ilmal oluline mõju operatsioonidele laiemalt, mistõttu on tulevikus tööriista edasiarendamisel ilmanäitajate maastikuanalüüsi mudelitesse kaasamine kahtlemata vajalik.

ETAK-i tuumandmebaasi nähtuseklasside vektorkihid olid üldjuhul maastiku läbitavuse modelleerimiseks sobivad, kuid lähenemissuundade tööriista valideerimisel märkas autor, et nendes kihtides puudub informatsioon osade metsasihtide ja -radade kohta, mille vektorkujud on Eesti Kaitseväe ruumiandmebaasides olemas. Kuna selline informatsioon on maastikul läbitavuse määramisel väga oluline, tuleks edaspidi kaaluda modelleerimisprotsessi ka Eesti Kaitseväe ruumiandmete kaasamist. Siinkohal on probleemiks aga Eesti Kaitseväe ruumiandmete madalam detailsusaste ja ETAK-ist erinev andmebaaside struktuur. Samuti näitasid tulemused, et modelleerimisel maakatetele määratud kiirusväärtused on lõpliku läbitavuse leidmisel väga olulised. Seega tuleb neid väärtuseid valida väga hoolikalt.

Kuigi mitmed autorid (nt Hohmann *et al.* 2013; Pimpa *et al.* 2014; Slocum *et al.* 2003) märgivad, et iga sõiduki läbitavust tuleks hinnata vastavalt selle omadustele, peab käesoleva töö autor olulisemaks edaspidi esmajärjekorras täiustada loodud mudelit uute ja täpsemate läbitavuse mõjutegurite arvutustega ning alles seejärel hakata analüüsima läbitavust sõidukipõhiselt, et olla kindel, et mudeli väljundid vastavad reaalsele tingimustele. Kindlasti on seejuures vajalik saadavaid väljundeid ka empiiriliselt testida.

6.2. Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritm

Peatükis 2.2.5 kirjeldatud varasematest lähenemissuundade tuvastamist käsitlevatest uurimustest sarnaneb käesolevas töös kasutatud meetodika ilmselt enim Benton *et al.* (1995) lähenemisega. Töodes rakendatav liikumiskoridoride võrgustiku moodustamise loogika on analoogne, kuid Benton *et al.* (1995) kasutatud algoritm marsruutide leidmiseks oli käesoleva töö autori hinnangul probleemi liigselt lihtsustav: ükski lõik välja valitud marsruutidest ei tohtinud kokku langeda järgmiste marsruutidega. Käesolevas töös välja töötatud meetodika sobib lähenemissuundade tuvastamiseks kahtlemata paremini. Samuti võib tulemuste põhjal väita, et rakendatud meetodika võimaldab lähenemissuundi tuvastada vähemalt samaväärse kvaliteediga, kui seda on teinud muud senised lähenemised (peatükk 2.2.5), kuid kahtlemata on seda meetodikat võimalik veelgi täiustada ja edasi arendada.

Lähenemissuundade automaattuvastuse algoritmi kogutööaja ajalisk keerukust $O(n)$ võib autori hinnangul pidada igati positiivseks ja töötamisele kuluvat aega rahuldavaks. Keerukamate võrgustike moodustamiseks kuluva aja (testid E ja F joonistel 20 ja 21) vähendamine on aga komplitseeritud, sest see sõltub sobivusrastri elementide väärtuste varieeruvusest ning välja valitavate liikumiseks sobimatute alade mõõtmetest ja paiknemisest. Liikumiseks sobivate alade minimaalset pindala (2000 m^2) pole autori hinnangul mõistlik oluliselt suurendada, sest sellisel juhul võidakse liikumiseks sobilikeks määrata ka suhteliselt tähtsad liikumistakistused.

Peale maastiku läbitavust kujutava rasterkihi kasutati lähenemissuundade tuvastamisel veel mitut sobivusrastrit. Autori hinnangul iseloomustasid moodustatud rasterkihid vastavaid kriteeriume hästi, probleemiks oli aga kihtide silumine suurte liikuvate akende korral, millega vähenes oluliselt ekstreemalsete väärtustega elementide hulk. Selle tulemusena võisid suhteliselt kõrge sobivusväärtuse saada ka liikumiseks sobimatud alad. Kihtide silumiseks testiti lähenemissuundade automaattuvastuse meetodika väljatöötamisel siluvas aknas ka muude filtrite kasutamist, milles kaalud vähenesid tsentrist äärte poole liikudes

eksponentsiaalselt, kuid see ei andnud soovitud tulemusi. Samas kujutavadki lähenemissuunad endast üldisemaid alasid, mitte täpseid liikumiskoridore, mistõttu võib nendes esineda väiksemaid liikumiseks sobimatuid alasid. Kui optimaalsete koridoride leidmiseks oleks rakendatud silumise asemel muid mudeleid või meetodeid (peatükk 2.2.1), sisaldanuks saadavad lähenemissuunad samuti sobimatuid alasid, lisaks poleks sel juhul saanud suboptimaalsete lähenemissuundade tuvastamiseks rakendada samu meetodeid kui käesolevas töös. Seega võib väita, et n-ö silumistehnika kasutamine oli antud töös püstitatud ülesannete lahendamiseks sobilik ja põhjendatud. Ühtlasi: kui lähenemissuundade kulgemist mööda liikumiseks sobimatuid alasid soovitakse tingimata vältida, võib liikumiskoridoride võrgustiku vastavalt arutelule peatükis 5.2 moodustada ka ainult läbitavusrastri põhjal, arvestamata sellega, kuidas sobivad alad liikumiseks ülejäänud kriteeriumite järgi.

Oodatud tulemusi andis ka kriteeriumitele kaalude määramine ning nende põhjal lõpliku sobivusrastri arvutamine, sest erinevate hinnangute põhjal moodustatud rasterkihid erinesid üksteisest märgatavalt. Erandiks olid juhud, kui hinnati kõrgelt kas maastiku läbitavuse, liikumise kanaliseerituse või ühenduste kvaliteedi kriteeriumit (või neist mitut), sest kõigi vastavate sobivusrastrate elementide väärtused pärinesid läbitavusrastrilt ja peegeldasid sarnaseid omadusi. Kui silutud läbitavusrastris asendati teid kujutavate elementide väärtused silumata väärtustega, võis põhjuseks, miks genereeritud lähenemissuunad olid erinevate kaalude korral väga sarnased, olla ka lähenemissuundade kulgemine mööda samu teid kujutavaid graafi servi, sest vastavate elementide sobivusväärtused olid ümbritsevate elementide väärtustest kõrgemad. Seetõttu võib probleemiks pidada teid esindavatele rastrielementidele sobivate väärtuste määramist, et nende sobivust liikumiseks ei hinnataks üle. Teisalt on teed ka avatud maastiku korral kõigest hoolimata peamisteks liikumiskanaliteks (joonis 17), mistõttu peab autor kasutatud metoodikat põhjendatuks.

Samuti sobis suboptimaalsete lähenemissuundade leidmiseks hästi GSP mudel, mille valiku üle diskuteeriti lähemalt peatükis 4.4.2. Tehtud täiendused aitasid lahendada ka GSP kaks peamist probleemi: esiteks eemaldati tsüklitega rajad ning teiseks võimaldas optimeerimisülesannete kasutamine suboptimaalse raja ruumilist erinevust võrrelda mitte ainult optimaalse raja, vaid ka muude juba valitud radadega. Sellegipoolest oli optimaalsel rajal järgmiste radade valikule üsna oluline mõju. Suboptimaalsed rajad ei tohtinud kulgeda optimaalse rajaga liiga sarnaselt, seega võis potentsiaalselt jääda leidmata hulk selliseid suboptimaalsete radade kogumeid, mille kvaliteet ja ruumiline erinevus oli välja valitud kogumitega sarnane või neist lausa parem. Samuti võis osa hea kvaliteediga suboptimaalseid radu jääda GSP ülesehituse tõttu hoopiski leidmata, kuid autori hinnangul olid leitud rajad lähenemissuundade tuvastamiseks kahtlemata piisava kvaliteediga. Lisaks oli GSP implementeerimine lihtne ning nii GSP kui ka lisatud tsüklilisuse kontroll ja optimeerimisülesanded suhteliselt väikese arvutusmahukusega.

Autori jaoks oli kõige keerulisem püstitada igas situatsioonis parimate suboptimaalsete lähenemissuundade leidmiseks sobilikke optimeerimisülesandeid. Peatükis 4.4.3 esitatud optimeerimisülesannete püstitused pandi paika kümnete erinevate sobivusrastrate põhjal tehtud testide tulemusena. Kuigi tulemused näitavad, et välja valitud suboptimaalsed rajad sobivad lähenemissuundadeks üsna hästi, võidakse teatud situatsioonides eelistada lähenemissuundi, mille ruumiline erinevus on üksteisest suurem, või vastupidi: lähenemissuundi, mis on

võimalikult otse suunatud lõpp-punkti ja kulgevad optimaalsele lähenemissuunale suhteliselt lähedal. Sellised eelistused võivad sõltuda konkreetsest situatsioonist, seetõttu ei saa neid lähenemissuundade tuvastamise algoritmis defineerida. Ainsaks võimaluseks oleks lasta valik teha tööriista kasutajal, määrates selle põhjal optimeeritavad funktsioonid. See vajaks aga kasutajate ootuste lähemat analüüsi.

Samas võib liigne sisendite arv muuta tööriista kasutamise ülemäära keeruliseks ja ajamahukaks: juba ainuüksi AHP läbiviimine enne lähenemissuundade automaattuvastust tähendab kümne üksikotsuse tegemist, mis peavad üksteisega kooskõlas olema. Seepärast võib osutada vajalikuks luua potentsiaalsetest situatsioonidest nimekiri ning määrata ekspertkogu hinnangute alusel nendele olukordadele vastavad kriteeriumite kaalud. Kasutaja ülesandeks oleks seega vaid eeldefineeritud situatsioonidest ühe välja valimine.

6.3. Järeldused lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimisest

Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimine näitas, et eksperdid võivad lähenemissuundade leidmise kriteeriumite olulisust hinnata samas situatsioonis üsnagi erinevalt. Autori hinnangul kinnitab see kogu protsessi subjektiivsust: ekspertide varasemad kogemused seoses maastikuanalüüsis tehtud otsustega võivad sõltumata nende vilumusest olla väga erinevad. Subjektiivsusest andsid tunnistust ka ekspertide joonistatud lähenemissuunad ja lisateetid, mille tulemusi käesolevas töös kokkuvõtlikkuse huvides ei esitatud. Samuti ei oleks autori hinnangul seda järeldust muutnud valideerimisel rohkemate ekspertide kasutamine. Ülaltoodust tulenevalt võivad erineda ka kasutajate poolt tööriistale seatavad ootused. Seega on tööriista tööpõhimõtteid vaja kasutajatele ilmselt lähemalt tutvustada, et nad võiksid saavutada võimalikult ootuspäraseid tulemusi. Kindlasti tuleb ka rõhutada, et loodud tööriist ei asenda kasutajat siiski otsuste tegemisel – sellel on pigem lõplikku otsust toetav roll.

6.4. Tööriista juurutamist puudutavad märkused

Kuna mitmete lähenemissuundade automaattuvastuse jaoks vajalike sobivusrastrate moodustamine on väga arvutusmahukas, on vajalik need kihid enne maastikuanalüüsi läbiviimist välja arvutada (peatükk 5.3). Pealegi on niisugune „ette“ arvutamine tarvilik selliste lõppkasutajate jaoks, kellel puudub ligipääs sobivusrastrate genereerimiseks vajalikele algandmetele: nende poolt kasutatavate tööriistade arvutused lähenemissuundade tuvastamiseks peavad baseeruma sobivusrastrate alusel loodud GIS teenustel. Lisaks võib neid rasterkihte, eelkõige aga maastiku läbitavuse, kumulatiivse nähtavuse ning katet ja varjet kujutavate nähtuste kihte, vaja minna muude analüüside tarvis.

Kui töövahend lähenemissuundade automaattuvastuseks on mõeldud Kaitsevæes nii GIS-i tavakasutajate kui spetsialistide jaoks, siis maastiku läbitavuse modelleerimise tööriista saavad suure hulga sisendandmete tõttu kasutada vaid GIS spetsialistid, kellel on nendele andmetikele juurdepääs. Ülejäänud lõppkasutajad saavad GIS teenuste või rasterkihtidena kasutada juba mudeli resultaate. Juhul, kui maastiku läbitavuse mudelit arendada edasi selliselt, et selles võetaks arvesse ka dünaamilisi tegureid (näiteks ilmanäitajaid), tuleks sellegipoolest

võimalikult palju rasterkihte „ette“ arvutada ning võimaldada tööriistaga staatiliste sobivusrastrate ja dünaamiliselt moodustatavate kihtide kombineerimist lõplikuks läbitavusrastriks. Sellisel juhul oleks vaja luua GIS teenused igast staatilisest sobivusrastrist, et kõigil lõppkasutajatel oleks võimalik läbitavusrastrit genereerida.

6.5. Tööriista edasiarendamine

Tööriista funktsionaalsusi on tulevikus võimalik märkimisväärselt laiendada. Moodustatud sobivusrastrate, genereeritavate lähenemissuundade ja muu ruumiinformatsiooni põhjal võiks leida ka näiteks potentsiaalsed võtmemaastikud, vaadeldavad huvialad, hävitusalad, kaitseks sobilikud alad, peamiste relvasüsteemide positsioonid, sisseimbumisrajad ning vaatluspostide asukohad. Samuti peaks tulevikus maastikuanalüüsi automatiseerimisel käsitlema ka linnamaastike eripärasid ning muutma tööriista kasutamist dünaamilisemaks, et sellega oleks võimalik maastikuanalüüsi läbi viia ka pidevalt muutuvah lahingolukorras.

Kokkuvõte

Käesolevas töös loodi tööriist, mis võimaldab sõjaväelist maastikuanalüüsi automatiseerides aidata konkreetsel alal vastavalt antud tingimustele hinnata maastiku läbitavust ja potentsiaalseid lähenemissuundi. Selleks loodi mudel maastiku läbitavuse määramiseks ning töötati välja metodoloogiline alus ja algoritm potentsiaalsete lähenemissuundade automaatseks tuvastamiseks. Viimaks hinnati algoritmi sobivust lähenemissuundade leidmise jaoks.

Maastiku läbitavuse modelleerimiseks kasutati rastripõhist lähenemist, milles leiti kõigepealt rasterkihid, mis kirjeldasid erinevate tegurite mõju läbitavusele ning seejärel kombineeriti need kokkuvõtlikuks läbitavust kujutavaks rasterkihiks. Modelleerimisel rakendatud mõjuteguriteks olid maakate, nõlvakalle, muldade niiskuste ja läbitavus, taimkate, teedevõrk ja rajatised. Lisaks sai mudeli kasutaja valida, kas hinnatakse ratas- või roomiksõidukite läbitavust ning määrata modelleeritava piirkonna muldade niiskusolud. Autori hinnangul oli loodud mudel käesolevas töös püstitatud ülesannete lahendamiseks piisav, kuid seda oleks täiendavate andmete olemasolul võimalik veelgi edasi arendada.

Lähenemissuundade tuvastamiseks moodustati peale maastiku läbitavust kujutava rasterkihi veel mitu rasterkihti, mis väljendasid alade sobivust vastavalt lähenemissuundade määramiseks olulistele kriteeriumitele. Nendeks kriteeriumiteks olid liikumise kanaliseeritus, kate ja varje, vaadeldavus ja tulealade kasutatavus ning ühenduste kvaliteet. Vastavalt konkreetsele situatsioonile hinnati nimetatud kriteeriumite olulisust ning leiti GIS modelleerimise võtteid kasutades ja graafiarvutustele põhinevate optimeerimisülesannete lahendamise tulemusena potentsiaalsed lähenemissuunad. Lähenemissuundade tuvastamiseks sai tööriista kasutaja muuhulgas määrata vaadeldava üksuse suuruse, selle liikumise lähte- ja sihtpunkti ning genereeritavate lähenemissuundade arvu.

Tulemused näitavad, et välja töötatud meetodika võimaldab lähenemissuundi tuvastada vähemalt samaväärse kvaliteediga, kui seda on teinud muud senised lähenemised, kuid sellel esineb ka teatavaid kitsaskohti. Näiteks võivad genereeritavad lähenemissuunad kulgeda teatud olukordades ja konkreetsete sätete puhul üle raskesti läbitavate alade ning osi „kaarega“ kulgevaid lähenemissuundi ei pruugita välja valida. Samuti võivad lähenemissuunad kulgeda mõnel juhul üksteisest liiga kaugel ning teatud sätete korral võivad leitavad lähenemissuunad erinevatest kriteeriumite olulisuse hinnangutest hoolimata olla väga sarnased. Sellegipoolest peab autor kasutatud meetodikat sobivaks ja põhjendatuks, pakkudes välja lahendused esinenud puuduste kõrvaldamiseks.

Loodud tööriista juurutamisel on autori hinnangul peamisteks probleemideks vajalike rasterkihtide moodustamise arvutusmahukus ja suur sisendandmete hulk, seetõttu on enne maastikuanalüüsi läbiviimist mõistlik võimalikult palju ajas vähemuutuvaid rasterkihte välja arvutada. Kaalumist vajab ka kriteeriumite olulisuse hindamise protsessi lihtsustamine.

Loomulikult on tööriista võimalik tulevikus märkimisväärselt edasi arendada, laiendades selle funktsionaalsusi maastikuanalüüsi automatiseerimisel ja muutes selle kasutamist dünaamilisemaks. Kahtlemata aga ei saa selline tööriist asendada kasutajat otsuste tegemisel – sellel on pigem lõplikku otsust toetav roll.

Automated determination of possible avenues of approach in military terrain analysis

Mihkel Männa

Summary

Terrain analysis plays a key role in any military operation. In this process, geographic information on the features of the terrain, combined with other relevant factors, is collected, analyzed, evaluated and interpreted, to predict the effect of the terrain on operations. The analysis is essential in informing a commander's decision process during the preparation for, and execution of a mission. Two of the most important map overlays prepared in terrain analysis are the combined obstacle overlay that depicts the battlefield's effects on mobility, and the avenues of approach overlay which is heavily dependent on the former and indicates the best possible routes for a force of a given size leading to its objective. Currently, terrain analysis is performed mostly manually, using hardcopy maps and overlays. This process suffers from a number of inefficiencies, therefore decision support tools that automate part of the process are highly needed.

The objective of this thesis was to develop a tool to automate military terrain analysis, assisting the user in evaluating terrain trafficability and possible avenues of approach in a given situation on an user-specified area. First, an overview of military terrain analysis and similar previous studies was provided. Secondly, a raster-based model for estimating terrain trafficability was developed, taking into account the characteristics of terrain in Estonia. The model differentiated between wheeled and tracked vehicles, as well as dry and wet soil conditions that were specified by the user. Then, a methodology for automated determination of possible avenues of approach was introduced.

In addition to the terrain trafficability raster layer generated with the model, four more raster layers were created, all of them representing suitability of geographical areas in terms of a certain criteria for evaluating avenues of approach. Pairwise comparison method of analytic hierarchy process (AHP) was adopted to weight the criteria, enabling the algorithm to apply the weights for respective layers in subsequent map algebra calculations. By using GIS modeling techniques and solving optimization problems based on graph calculations, possible avenues of approach could be determined. When using the tool, the origin and destination of the unit, its size and the number of avenues of approach to be identified had to be entered by the user.

The developed algorithm for automated determination of possible avenues of approach was then evaluated by comparing the results of the tool with the avenues of approach selected by subject matter experts, given the same hypothetical scenarios. The results indicate a fair agreement between the avenues of approach, suggesting that the algorithm's suitability for automated determination of possible avenues of approach is comparable with previous approaches. However, it also has certain shortcomings. For example, given specific settings, the generated avenues of approach may run along areas unsuitable for movement and maneuver, such as smaller lakes and swamps. Also, in some cases avenues of approach may be placed too far from each other, or sets of avenues of approaches with different criteria weights may run too

similarly. Nonetheless, the author considers the developed methodology to be appropriate for automated determination of possible avenues of approach, proposing solutions for the shortcomings.

In the future, the tool's functionalities can be remarkably extended. Identification of possible key terrain, named areas of interest, engagement areas, defensible terrain, weapon system employment positions, infiltration routes and observation post positions could also be automated. Nevertheless, such tools cannot replace man in making final decisions.

Tänuavaldused

Kõigepealt soovin tänada oma juhendajat Jüri Roosaaret töö vormistamisel osutatud abi ja asjakohaste nõuannete eest. Väga tänulik olen ka töökaaslastele, kes on minu töö kirjutamist igati toetanud. Eriline tänu kuulub aga Enar Lehele ja Kristo Villakule, kes olid ekspertidena abiks loodud tööriista valideerimisel, Tiina Raukile valmis töö keeleliste ja sisuliste paranduste eest ning Jaanus Kundlale mitmete töös kasutatud tekstimaterjalide jagamise eest. Samuti tänan kapten Kersti Vennikut Kaitseväge Ühendatud Õppeasutustest, kellelt sain andmed muldade läbitavuse kohta. Viimaks sooviksin tänada oma sõpru, perekonda ja elukaaslast, kes olid toeks töö valmimisel.

Kasutatud kirjandus

Kirjandusallikad

- Affleck, R. T., Melloh, R. A., Shoop, S. A., 2009.** Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain. *Journal of Terramechanics*, 46:4, 203-210.
- Akgün, V., Erkut, E., Batta, R., 2000.** On finding dissimilar paths. *European Journal of Operational Research*, 121:2, 232-246.
- Atkinson, D. M., Deadman, P., Dudycha, D., Traynor, S., 2005.** Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road. *Applied Geography*, 24:4, 287-307.
- Ayad, H., 1967.** System Evaluation by the Simplified Proportional Assignment Technique. Doktoritöö, Purdue University.
- Bartie, P., Reitsma, F., Kingham, S., Mills, S., 2011.** Incorporating vegetation into visual exposure modelling in urban environments. *International Journal of Geographical Information Science*, 25:5, 851-868.
- Bekker, M. G., 1956.** Theory of Land Locomotion. The Mechanics of Vehicle Mobility. University of Michigan Press: Ann Arbor, Michigan.
- Benton, J., Iyengar, S. S., Deng, W., Brener, N., Subrahmanian, V. S., 1995.** Tactical Route Planning: New Algorithms for Decomposing the Map. *7th International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 268-277.
- Birkel, P. A., 2003.** Terrain Trafficability in Modeling and Simulation. Technical Paper SEDRIS 2003-1, The MITRE Corporation, pp. 40.
- Burrough, P. A., 1986.** Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press: Oxford.
- Caldwell, D. R., Mineter, M. J., Dowers, S., Gittings, B. M., 2003.** Analysis and Visualization of Visibility Surfaces. In: *Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation*, University of Southampton, pp. 11.
- Campbell, L., Lotwin, A., DeRico, M. M. G., Ray, C., 1997.** The Use of Artificial Intelligence in Military Simulations. *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, 2607-2612.
- Charbonneau, S., Stein, M. C., 2003.** Using a Shortest Path Algorithm for Identifying Areas of Interest in An Area Of Operations. *Modeling and Simulation Workgroup of the 8th International Command and Control Research and Technology Symposium*, pp. 15.
- Chirico, G. B., Western, A. W., Grayson, R. B., Blöschl, G., 2005.** On the definition of the flow width for calculating specific catchment area patterns from gridded elevation data. *Hydrological Processes*, 19:13, 2539-2556.

- Choi, Y., Park, H.-D., Sunwoo, C., Clarke, K. C., 2009.** Multi-criteria evaluation and least-cost path analysis for optimal haulage routing of dump trucks in large scale open-pit mines. *International Journal of Geographical Information Science*, 23:12, 1541-1567.
- Ciobotaru, T., 2009.** Semi-Empiric Algorithm for Assessment of the Vehicle Mobility. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 15, 19-30.
- Dean, D. J., 1997.** Improving the accuracy of forest viewsheds using triangulated networks and the visual permeability method. *Canadian Journal of Forest Research*, 27:7, 969-977.
- Di Gregorio, A., Jansen, L. J. M., 2000.** Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Roma.
- Donlon, J. J., Forbus, K. D., 1999.** Using a Geographic Information System for Qualitative Spatial Reasoning about Trafficability. In: *Proceedings of QR99*, pp. 11.
- Eichrodt, A. W., 2003.** Development of a Spatial Trafficability Evaluation System. Doktoritöö, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- EKV – Eesti Kaitsevägi, 2016.** Taktikalise taseme luure käsiraamat. Eesti Kaitsevägi: Tallinn.
- Etherington, T. R., 2012.** Mapping organism spread potential by integrating dispersal and transportation processes using graph theory and catchment areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 26:3, 541-556.
- Forbus, K. D., Mahoney, J. V., Dill, K., 2002.** How qualitative spatial reasoning can improve strategy game AIs. *IEEE Intelligent Systems*, 17:4, 25-30.
- Glinton, R., Owens, S., Giampapa, J., Sycara, K., Grindle, C., Lewis, M., 2004.** Terrain-Based Information Fusion and Inference. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion*, pp. 8.
- Glinton, R., Owens, S., Giampapa, J., Sycara, K., Lewis, M., Grindle, C., 2005.** Intent Inference Using a Potential Field Model of Environmental Influences. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion*, pp. 8.
- Gonçalves, A. B., 2010.** An extension of GIS-based least-cost path modelling to the location of wide paths. *International Journal of Geographical Information Science*, 24:7, 983-996.
- Graff, L. H., 1996.** State-of-the-Art Terrain Analysis Capabilities for Today's Army. *ACSM/ASPRS Annual Convention and Exposition*, 716-725.
- Grindle, C., Lewis, M., Glinton, R., Giampapa, J., Owens, S., Sycara, K., 2004.** Automating Terrain Analysis: Algorithms for Intelligence Preparation of the Battlefield. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*, 533-537.
- Gumoś, A. K., 2005.** Modelling the Cross-Country Trafficability with Geographical Information Systems. Magistritöö, Linköpings universitet.

- Guth, P. L., 2012.** Probabilistic line-of-sight with lidar point clouds. In: *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference 2012*, pp. 11.
- Haley, P. W., Jurkat, M. P., Brady, Jr, P. M., 1979.** NATO Reference Mobility Model, Edition I. Users Guide, Volume I. US Army Tank-Automotive Research and Development Command: Warren, Michigan.
- Heppenstall, A., Crooks, A. T., See, L. M., Batty, M., 2011.** Agent-Based Models of Geographical Systems. Springer.
- Hofmann, A., Hošková-Mayerová, Š., Talhofer, V., 2013.** Usage of Fuzzy Spatial Theory for Modelling of Terrain Passability. *Advances in Fuzzy Systems*, 2013:17, 1-7.
- Hofmann, A., Hošková-Mayerová, Š., Talhofer, V., Kovařík, V., 2015.** Creation of models for calculation of coefficients of terrain passability. *Quality & Quantity*, 49:4, 1679-1691.
- Hohmann, A., Grandjean, G., Mardhel, V., Schaefer, G., Desramaut, N., 2013.** A GIS-based Vehicle Mobility Estimator for Operational Contexts. *Transactions in GIS*, 17:1, 78-95.
- HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1990a.** FM 5-33. Terrain Analysis. Headquarters, Department of the Army: Washington, DC.
- HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1990b.** FM 34-3. Intelligence analysis. Headquarters, Department of the Army: Washington, DC.
- HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1992.** FM 71-123. Tactics and Techniques for Combined Arms Heavy Forces: Armored Brigade, Battalion/Task Force, and Company/Team. Headquarters, Department of the Army: Washington, DC.
- HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1994.** FM 34-130. Intelligence Preparation of the Battlefield. Headquarters, Department of the Army: Washington, DC.
- HQDA, HQMC – Headquarters, Department of the Army, Headquarters, United States Marine Corps, 2009.** FM 2-01.3. MCRP 2-3A. Intelligence Preparation of the Battlefield/Battlespace. Headquarters, Department of the Army: Washington, DC.
- Hubacek, M., Ceplova, L., Brenova, M., Mikita, T., Zerzan, P., 2015.** Analysis of Vehicle Movement Possibilities in Terrain Covered by Vegetation. In: *2015 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, pp. 5.
- Huber, D. L., Church, R. L., 1985.** Transmission Corridor Location Modeling. *Journal of Transportation Engineering*, 111:2, 114-130.
- Ishizaka, A., Labib, A., 2011.** Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38:11, 14336-14345.
- ISTVS – International Society for Terrain-Vehicle Systems, 1977.** International Society for Terrain-Vehicle Systems Standards. *Journal of Terramechanics*, 14:3, 153-182.

- Jung, I.- S., Yang, Y.- K., Choi, K.- H., Kim, K.- O., Lee, J.- H., 1996.** An analysis of optimum routes of approach (RA) through GIS modeling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 398-402.
- Kay, A., 2012.** Route choice in hilly terrain. *Geographical Analysis*, 44:2, 87-108.
- Kuby, M., Zhongyi, X., Xiaodong, X., 1997.** A Minimax Method for Finding the k Best „Differentiated“ Paths. *Geographical Analysis*, 29:4, 298-313.
- Laib, L., 1998.** On the mobility of cross-country vehicles, with emphasis on modeling their dynamic motion. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 28, 682-703.
- LaRue, M. A., Nielsen, C. K., 2008.** Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 212:3-4, 372-381.
- Lessem, A., Ahlvin, R., Mlakar, P., Stough, Jr, W., 1993.** Stochastic Vehicle Mobility Forecasts Using the NATO Reference Mobility Model. Report 2. Extension of Procedures and Application to Historic Studies. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station: Vicksburg, Mississippi.
- Liu, L., Zhang, L., Chen, C., Chen, H., 2008.** An Improved LOS Method for Implementing Visibility Analysis of 3D Complex Landscapes. In: *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 2, 874-877.
- Llobera, M., 2007.** Modeling visibility through vegetation. *International Journal of Geographical Information Science*, 21:7, 799-810.
- Llobera, M., Wheatley, D., Steele, J., Cox, S., Parchment, O., 2010.** Calculating the Inherent Visual Structure of a Landscape (‘Total Viewshed’) Using High-Throughput Computing. In: Niccolucci, F., Hermon, S. (eds.), *Beyond the Artifact: Digital Interpretation of the Past*. Archaeolingua: Budapest, pp. 146-151.
- Lombard, K., Church, R. L., 1993.** The gateway shortest path problem: Generating alternative routes for a corridor location problem. *Geographical Systems*, 1, 25-45.
- Lu, M., Zhang, J. F., Lv, P., Fan, Z. H., 2008.** Least visible path analysis in raster terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 22:6, 645-656.
- Malczewski, J., 2006.** GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20:7, 703-726.
- Miller, M. L., 2011.** Analysis of Viewshed Accuracy with Variable Resolution LIDAR Digital Surface Models and Photogrammetrically Derived Digital Elevation Models. Magistritöö, Virginia Polytechnic Institute.
- Mitchell, C. H., Williams, J. K., 2001.** Automated IPB in support of wargaming and COA analysis and comparison. *Proceedings of the SPIE*, 4367, 394-400.
- Mõts, E., 2010.** Eesti Kaitseväe maaväe lahingutegevuse alused. Maaväe ohvitseride ja staabitöö väljaõppejuhend. Greif: Tartu.

- Nonis, C. N., Varghese, K., Suresh, K. S., 2007.** Investigation of an AHP based Multi Criteria Weighting Scheme for GIS Routing of Cross Country Pipeline Projects. In: *The 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 397-403.
- NPS – National Park Service, 2009.** Vicksburg National Military Park. Cultural Landscape Report. National Park Service: Atlanta, Georgia.
- NGA – National Geospatial-Intelligence Agency, 1994.** MIL-P-89305A. Military specifications. Planning terrain analysis data base (PTADB). National Geospatial-Intelligence Agency: Fairfax, Virginia.
- Pahernik, M., Tuta, J., Kovačević, D., 2006.** Determination of Terrain Serviceability of Military Vehicles by GIS Relief Analysis. *PROMET – Traffic & Transportation*, 18:6, 387-394.
- Park, W.- I., Kim, D.- J., Lee, H.- J., 2013.** Terrain Trafficability Analysis for Autonomous Navigation: A GIS-based Approach. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 11:2, 354-361.
- Pimpa, W., Sarapirome, S., Dasananda, S., 2014.** GIS Application to Development of Military Cross-Country Movement Maps at Mae Sot District, Western Thailand. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 21:3, 215-232.
- Price, M., 2013.** Mastering ArcGIS. McGraw-Hill Education: New York.
- Riggs, P. D., Dean, D. J., 2007.** An Investigation into the Causes of Errors and Inconsistencies in Predicted Viewsheds. *Transactions in GIS*, 11:2, 75-196.
- RSMS – Royal School of Military Survey, 1999.** A Guide to Terrain Analysis. Royal School of Military Survey: Thatcham.
- Rybansky, M., 2003.** Effect of the Geographic Factors on the Cross Country Movement. In: *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC): 'Cartographic renaissance'*, 2449-2454.
- Rybansky, M., 2015.** Soil Trafficability Analysis. In: *2015 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 295-299.
- Rybansky, M., Hofmann, A., Hubacek, M., Kovařík, V., Talhofer, V., 2015.** Modelling of cross-country transport in raster format. *Environmental Earth Sciences*, 74:10, 7049-7058.
- Rybansky, M., Vala, M., 2009.** Analysis of relief impact on transport during crisis situations. *Moravian Geographical Reports*, 17:3, 19-26.
- Saaty, R. W., 1987.** The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9:3-5, 161-176.
- Scaparra, M. P., Church, R. L., Medrano, F. A., 2014.** Corridor location: the multi-gateway shortest path model. *Journal of Geographical Systems*, 16:3, 287-309.

- Scott, K., Pabón-Jiménez, G., Bernstein, D., 1997.** Finding Alternatives to the Best Path. *76th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Preprint 970682.
- Sevenant, M., Antrop, M., 2007.** Settlement models, land use and visibility in rural landscapes: Two case studies in Greece. *Landscape and Urban Planning*, 80:4, 362-374.
- Shirabe, T., 2015.** A method for finding a least-cost wide path in raster space. *International Journal of Geographical Information Science*, 1-17.
- Shoop, S. A., Affleck, R., Collins, C., Larsen, G., Barna, L., Sullivan, P., 2005.** Maneuver analysis methodology to predict vehicle impacts on training lands. *Journal of Terramechanics*, 42:3-4, 281-303.
- Shoop, S. A., Richmond, P. W., Lacombe, J., 2006.** Overview of cold regions mobility modeling at CRREL. *Journal of Terramechanics*, 43:1, 1-26.
- Sivertun, A., Gumoś, A. K., 2006.** Analysis of Cross Country Trafficability. In: Riedl, A., Kainz, W., Elmes, G., A. (eds.) *Progress in Spatial Data Handling: 12th International Symposium on Spatial Data Handling*. Springer-Verlag: Berlin, pp. 921-941.
- Slocum, K. R., Surdu, J. R., Sullivan, J., Rudak, M., Colvin, N., Gates, C., 2003.** Trafficability Analysis Engine. *The Journal of Defense Software Engineering*, 16:6, 28-30.
- Suvinen, A., 2006.** A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics*, 43:4, 427-449.
- Svenson, P., Sidenbladh, H., 2003.** Determining possible avenues of approach using ANTS. In: *Proceedings of the 6th International Conference of Information Fusion*, 1110-1117.
- Sycara, K., Grinton, R., Yu, B., Giampapa, J., Owens, S., Lewis, M., Grindle, C., 2009.** An integrated approach to high-level information fusion. *Information Fusion*, 10:1, 25-50.
- Talhofer, V., Hofmann, A., Hořková-Mayerová, Š., Kubiček, P., 2011.** Spatial analyses and spatial data quality. In: *Proceedings of the 14th Agile International Conference on Geographic Information Science*, pp. 8.
- Talhofer, V., Hofmann, A., Kratochvil, V., Hubacek, M., Zerzan, P., 2015.** Verification of Digital Analytical Models – Case Study of the Cross-Country Movement. In: *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 203-210.
- Touran, A., Gransberg, D. D., Molenaar, K. R., Ghavamifar, K., Mason, D. J., Fithian, L. A., 2009.** A Guidebook for the Evaluation of Project Delivery Methods. Transportation Research Board of the National Academies: Washington, District of Columbia.
- Turner, A. K. F., 1968.** Computer-assisted procedures to generate and evaluate regional highway alternatives, Part 1. Joint Highway Research Project, C-36-72A. Purdue University: Lafayette, Indiana.
- US Army, 2006.** Foundations of leadership. MSL II. Revised Edition. Pearson Custom Publishing: New York.

USMC – US Marine Corps, 1999. MCWP 2-12 Coordinating draft. MAGTF intelligence analysis and production. Headquarters, United States Marine Corps: Washington, District of Columbia.

Whitmore, F. C., Jr., 1960. Terrain intelligence and current military concepts. *American Journal of Science*, 258, 375-387.

Wilson, J. P., Gallant, J. C., 2000. Terrain Analysis. Principles and Applications. John Wiley & Sons.

Witkowski, M., White, G., Louvieris, P., Görbil, G., Gelenbe, E., Dodd, L., 2008. High-Level Information Fusion and Mission Planning in Highly Anisotropic Threat Spaces. In: *11th International Conference on Information Fusion*, pp. 8.

Wood, W. F., Snell, J. B., 1960. A Quantitative system for classifying landforms. Headquarters, Quartermaster Research and Engineering Command, US Army, Quartermaster Research & Engineering Center: Natick, Massachusetts.

Wright, D. K., MacEachern, S., Lee, J., 2014. Analysis of Feature Intervisibility and Cumulative Visibility Using GIS, Bayesian and Spatial Statistics: A Study from the Mandara Mountains, Northern Cameroon. *PLoS ONE*, 9:11, pp. 15.

Xu, K., Tang, C., Tang, R., Ali, G., Zhu, J., 2010. A Comparative Study of Six Software Packages for Complex Network Research. In: *The Second International Conference on Communication Software and Networks*, 350-354.

Internetiallikad

BPMSG – Business Performance Management Singapore, 2016. BPMSG AHP priority calculator. http://bpmsg.com/academic/ahp_calc.php, 16.05.2016.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, 2016a. How Slope works. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>, 16.05.2016.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, 2016b. Fill. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fill.htm>, 16.05.2016.

USDOD – United States Department of Defense, 2007. Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms. <https://wikileaks.org/w/images/a/a7/Jp1-02.pdf>, 16.05.2016.

Lisad

Lisa 1. Maastiku läbitavuse modelleerimisel maakatetele määratud kiiruskoefitsiendid ja kiirusväärtused. Koefitsiendid kujutavad maakatte läbitavust skaalal 0-1 (0 – läbimatu, 1 – läbitav maksimaalse kiirusega), kiirusväärtuste leidmisel on koefitsiendid korrutatud tingliku maksimaalse kiirusega (ratassõidukid – 80 km/h, roomiksõidukid – 60 km/h).

Nähtus	Kiiruskoefitsient		Kiirusväärtus (km/h)	
	Ratassõiduk	Roomiksõiduk	Ratassõiduk	Roomiksõiduk
Järv	0	0	0	0
Paisjärv	0	0	0	0
Tehisjärv	0	0	0	0
Laugas	0,01	0,01	0,8	0,6
Biotiik	0,02	0,02	1,6	1,2
Tiik	0,02	0,02	1,6	1,2
Muu seisuveekogu	0,01	0,01	0,8	0,6
Vooluveekogu	0	0	0	0
Haljasala	0,65	0,75	52	45
Jäätmaa	0,65	0,75	52	45
Eraõu	0,55	0,65	44	39
Tootmisõu	0,65	0,7	52	42
Põld	0,55	0,65	44	39
Aianduslik maa	0,45	0,55	36	33
Rohumaa	0,65	0,75	52	45
Liivane ala	0,45	0,55	36	33
Muu lage	0,65	0,75	52	45
Mets	0,25	0,35	20	21
Põõsastik	0,15	0,25	12	15
Madalsoon	0,01	0,01	0,8	0,6
Raba	0,01	0,02	0,8	1,2
Õõtsik	0,01	0,01	0,8	0,6
Soovik	0,01	0,02	0,8	1,2
Turbaväli	0,65	0,75	52	45
Mahajäetud turbaväli	0,65	0,75	52	45
Kõrvalmaantee*	1	1	80	60
Tänav*	0,75	0,85	60	51
Muu tee*	0,75	0,85	60	51
Rada*	0,7	0,8	56	48

* joonobjektidest pinnasteed või teed, mille katet polnud märgitud ning mis ei lõikunud teeladega

Lisa 2. Maastiku läbitavuse modelleerimisel teedele määratud kiirusväärtused.

Nähtus	Kiirusväärtus (km/h)	
	Ratassõiduk	Roomiksõiduk
Põhimaantee	80	60
Tugimaantee	80	60
Kõrvalmaantee	75	60
Ramp või ühendustee	50	50
Tänav	50	50
Muu tee	50	50
Rada	45	45
Teetala	50	50

Lisa 3. Valitud katet ja varjatust kujutavad nähtused ja neile määratud sobivusväärtused. Sobivusväärtused on väljendatud skaalal 0-1 (0 – sobimatu, 1 – sobivaim).

Nähtus	Väärtus
Hoone (pindobjektid)	1
Mets (pindobjektid)	0,5-1*
Nõlv (joonobjektid)	0,7
Vall (joonobjektid)	0,7
Tehisküngas (punktobjektid)	0,7
Põõsastik (pindobjektid)	0,1
Kraav (joonobjektid)	0,1
Peakraav (joonobjektid)	0,1

* väärtus sõltub taimkatte kõrgusest

Lisa 4. Lähemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimiseks ekspertidele esitatud esimene hüpoteetiline stsenaarium ja ülesanne.

Te olete jalaväepataljoni staabis luureohvitser. Teile on luureinformatsiooni põhjal teada vastase MT-LB-del liikuva motolaskurpataljoni hetkeasukoht (Kooraste) ning ründeobjekti asukoht (Otepää), mille vastase üksus kavatseb hõivata. Teie pataljoni ülesandeks on purustada vastane kaudtuletoetusüksuste abiga. Te alustate lahinguruumi luurealase ettevalmistuse protsessi maastikuanalüüsi teostades.

Palun (1) hinnake antud situatsioonist lähtuvalt vastase lähemissuundade kriteeriumite olulisust ning (2) vastavalt tehtud hinnangutele märkige kaardile vastase jõududele liikumiseks sobimatu maastik (arvestades nii maastiku läbitavuse kui ka liikumise kanaliseerituse, katte ja varje ning muude oluliste kriteeriumitega) ja (3) vastasüksuse kolm tõenäolisemat lähemissuunda.

Lisa 5. Ekspertide hinnangud lähenemissuundade kriteeriumite olulisusele, lähtuvalt esimesest stsenaariumist (lisa 4). CR (*consistency ratio*) tähistab hinnangute kooskõlaindeksit.

Ekspert A

Kriteerium	M.	L.	K.	V.	Ü.	Kaal (%)
Maastiku läbitavus	1	2	7	4	2	39,7
Liikumise kanaliseeritus	1/2	1	6	4	1	25,9
Kate ja varje	1/7	1/6	1	1/3	1/4	4,5
Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus	1/4	1/4	3	1	1/2	9,7
Ühendusteede kvaliteet	1/2	1	4	2	1	20,2
CR = 2,1%						100,0

Ekspert B

Kriteerium	M.	L.	K.	V.	Ü.	Kaal (%)
Maastiku läbitavus	1	5	3	1	7	39,5
Liikumise kanaliseeritus	1/5	1	1/2	1/3	1/2	7,0
Kate ja varje	1/3	2	1	1/4	1	10,7
Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus	1	3	4	1	4	33,6
Ühendusteede kvaliteet	1/7	2	1	1/4	1	9,2
CR = 4,0%						100,0

Lisa 6. Lähenemissuundade automaattuvastuse tööriista valideerimiseks ekspertidele esitatud esimene hüpoteetiline stsenaarium ja ülesanne.

Te olete mehhaniseeritud jalaväepataljoni staabis luureohvitser. Teile on luureinformatsiooni põhjal teada vastase tankipataljoni hetkeasukoht (Elva) ning ründeobjekti asukoht (Puhja), mille vastase üksus kavatseb hõivata. Teie pataljoni ülesandeks on viivitada vastase edasiliikumist. Te alustate lahinguruumi luurealase ettevalmistuse protsessi maastikuanalüüsi teostades.

Palun (1) hinnake antud situatsioonist lähtuvalt vastase lähenemissuundade kriteeriumite olulisust ning (2) vastavalt tehtud hinnangutele märkige kaardile vastase jõududele liikumiseks sobimatu maastik (arvestades nii maastiku läbitavuse kui ka liikumise kanaliseerituse, kate ja varje ning muude oluliste kriteeriumitega) ja (3) vastasüksuse kolm tõenäolisemat lähenemissuunda.

Lisa 7. Ekspertide hinnangud lähenemissuundade kriteeriumite olulisusele, lähtuvalt teisest stsenaariumist (lisa 6).

Ekspert A

Kriteerium	M.	L.	K.	V.	Ü.	Kaal (%)
Maastiku läbitavus	1	2	7	3	1	32,9
Liikumise kanaliseeritus	1/5	1	7	2	1	23,1
Kate ja varje	1/7	1/7	1	1/4	1/5	4,0
Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus	1/3	1/2	4	1	1/4	11,0
Ühendusteede kvaliteet	1	1	5	4	1	29,0
CR = 3,1%						100,0

Ekspert B

Kriteerium	M.	L.	K.	V.	Ü.	Kaal (%)
Maastiku läbitavus	1	4	5	1/2	1/7	14,3
Liikumise kanaliseeritus	1/4	1	2	1/3	1/5	6,6
Kate ja varje	1/5	1/2	1	1/7	1/8	3,6
Vaadeldavus ja tulealade kasutatavus	2	3	7	1	1/4	20,1
Ühendusteede kvaliteet	7	5	8	4	1	55,4
CR = 8,2%						100,0

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mihkel Männa,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose „Lähenemissuundade automaattuvastus sõjaväelise maastikuanalüüsi kontekstis“,

mille juhendaja on Jüri Roosaare,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **23.05.2016.**