

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

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Märgalade tuvastamine ajaloolistelt kaartidelt Sipe oja ümbruse
näitel**

Anne-Liis Alev

Juhendajad: Prof. Evelyn Uuema
MSc Pamela Maricela Guaman Pintado

Tartu 2025

Annotatsioon

Märgalade tuvastamine ajaloolistelt kaartidelt Sipe oja ümbruse näitel

Viimase sajandi jooksul on märgaladele, kui olulistele keskkonnamõjude reguleerijatele pööratud aina rohkem tähelepanu. Antud töö eesmärk oli tuvastada märgalade kadu ulatust ajalooliselt kaardilt ning hinnata pool-automatiseeritud GIS-metoodika tõhusust. Ajaloolise baasina kasutati 1935–1939 koostatud Eesti Vabariigi taktikalist topograafilist kaarti. Võrdlus tänapäevase olukorraga näitas märgalade vähenemist 71,85 % võrra. 90 % ajaloolisest pindalast on muundunud peamiselt metsaks (51,4 %), lagealaks (22,3 %) ning haritavaks maaks (13,9 %). Töötlusmetoodika täpsuse kontrollimiseks kasutati käsitsi vektoriseeritud kihti, mille põhjal arvutati tootja täpsus 91,69 %, kasutaja täpsus 91,32 % ja kogutäpsus 99,44 %. Uurimus kinnitab, et pool-automatiseeritud metoodikaga saab märgalade piire adekvaatselt tuvastada, kuid töötlus nõuab manuaalset üle kontrollimist.

Märksõnad: GIS, maakate, ajaloolised kaardid, värvi segmenteerimine

CERCS kood: P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Wetland detection from historical maps; a case study of Sipe stream catchment

Over the past century, wetlands—as key regulators of environmental impacts—have received increasing attention. The aim of this study was to determine the extent of wetland loss from a historical map and to assess the effectiveness of a semi-automated GIS methodology. As the historical baseline, the tactical topographic map of the Republic of Estonia from 1935–1939 was used. A comparison with the present-day situation showed a 71,85% reduction in wetlands. Ninety percent of the historical area has been converted, primarily to forest (51,4%), open land (22,3%), and arable land (13,9%). To verify the accuracy of the processing methodology, a manually vectorized layer was used, yielding a producer's accuracy of 91,69%, user's accuracy of 91,32%, and overall accuracy of 99,44%. The study confirms that semi-automated methods can adequately delineate wetland boundaries but require manual review of the results.

Keywords: GIS, land cover, historical maps, color image segmentation

CERCS code: P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Teooria.....	6
1.1 Märgalade olemus	6
1.2 Kuivendamine ja taastamistööd Eestis.....	7
1.3 Ajalooliste kaartide uurimine	8
2. Andmed ja meetoodika.....	11
2.1 Uurimisala.....	11
2.2 Andmed	12
2.3 Meetoodika	13
2.4 Märgalade pindala tuvastamine	18
3. Tulemused ja arutelu.....	23
3.1 Sipe oja märgalade pindala muutus	23
3.2 Meetoodika ja andmete sobivus.....	23
3.3 Uurimuse täiustamise kohad	28
Kokkuvõte.....	29
Summary	31
Tänuavaldused	33
Kasutatud kirjandus	34

Sissejuhatus

Looduslikud märgalad on Eesti looduse lahutamatu osa, mille säilitamine on oluline nii ökoloogilistel, majanduslikel kui ka kultuurilistel põhjustel. Märgalad on olulised reguleerijad vee ökosüsteemis, kuna nad tasakaalustavad veetaset ja leevendavad üleujutuse mõjusid, toimivad loodusliku mageveefiltrina ning pehmedavad kohalikku kliimat. Ühtlasi on märgalad olulised süsiniku sidujad. Vaatamata sellest, et märgalad moodustavad vaid 5 – 8 % kogu Maa pindalast hoiustavad nad endas ligi neljandikku maailma süsinikust (Mitsch et al., 2012). Viimasel sajandil on märgalad olnud väärtuslikud põllu- ja metsamajanduse arengu kohad, kuna nende pinnas on orgaanikarikas ning sobib hästi vilja ja metsa kasvatuseks. Süsiniku hoiustamine märgalas toimub anaeroobses keskkonnas, kuid veetaseme langus (nt. kraavitamise ja kuivendamise tagajärjel) muudab pinnast aeroobseks ja soodustab süsiniku paiskumist õhku (Zhang et al., 2025). Samuti on märgalad mõjutanud ka looduslikud tegurid. Porijõe valgla on ajavahemikul 1950-1994 talvetemperatuurid muutunud soojemaks 2,1 °C võrra. Sellest tulenev sademete mustri varieerumine mõjutas vee äravoolu märgaladel (Mander et al., 1998).

Märgalade ulatust on oluline jälgida ning säilitada nende bioloogilist mitmekesisust eriti Eesti kontekstis, kus märgalad moodustavad 8 - 9% riigi pindalast ja on koduks mitmetele linnu- ja taimeliikidele. Lisaks ökoloogilisele tähtsusele pakuvad märgalad mitmekesiseid rekreatsioonivõimalusi, mis rikastavad inimeste elu ja panustavad turismimajandusse ning on läbi ajaloo olnud oluline osa Eesti kultuurist.

Märgalade seire ja maakasutusmuutuste jälgimine on oluline, et tagada nende tõhus kaitse tulevikus. Tänapäeval saab seda teha kaarditöötlustarkvarade abil, mis võimaldavad tuvastada pikaajalisi muutusi. Ajalooliste kaartide töötlus ei ole uudne asi, kuid iga aastaga kerkivad digikartograafia valdkonnas esile uued töötlusvõtted ja nende kombinatsioonid. Töö käigus katsetatakse kahe pool-automaatse töötlusvõtte kombineerimist: värvi segmenteerimine ja matemaatilise morfoloogia operaatorid.

Käesolevas töös võrreldakse Eesti märgalade pindala ulatust vabariigi 1935-1939 topograafilisel kaardil tänapäeva olukorraga. Võrdlus tehakse läbi GIS-tarkvara Sipe oja valgla näitel. Eesmärgiks on tuvastada kadu ulatust ning kui hästi on võimalik seda teha geoinformaatika meetoditega, seega olid püstitatud järgmised uurimisküsimused:

Kui hästi on võimalik automaatselt tuvastada märgalad ajaloolistelt kaartidelt?

Kui suures ulatuses on Sipe oja valgla märgalad muutunud viimase 100 aasta jooksul?

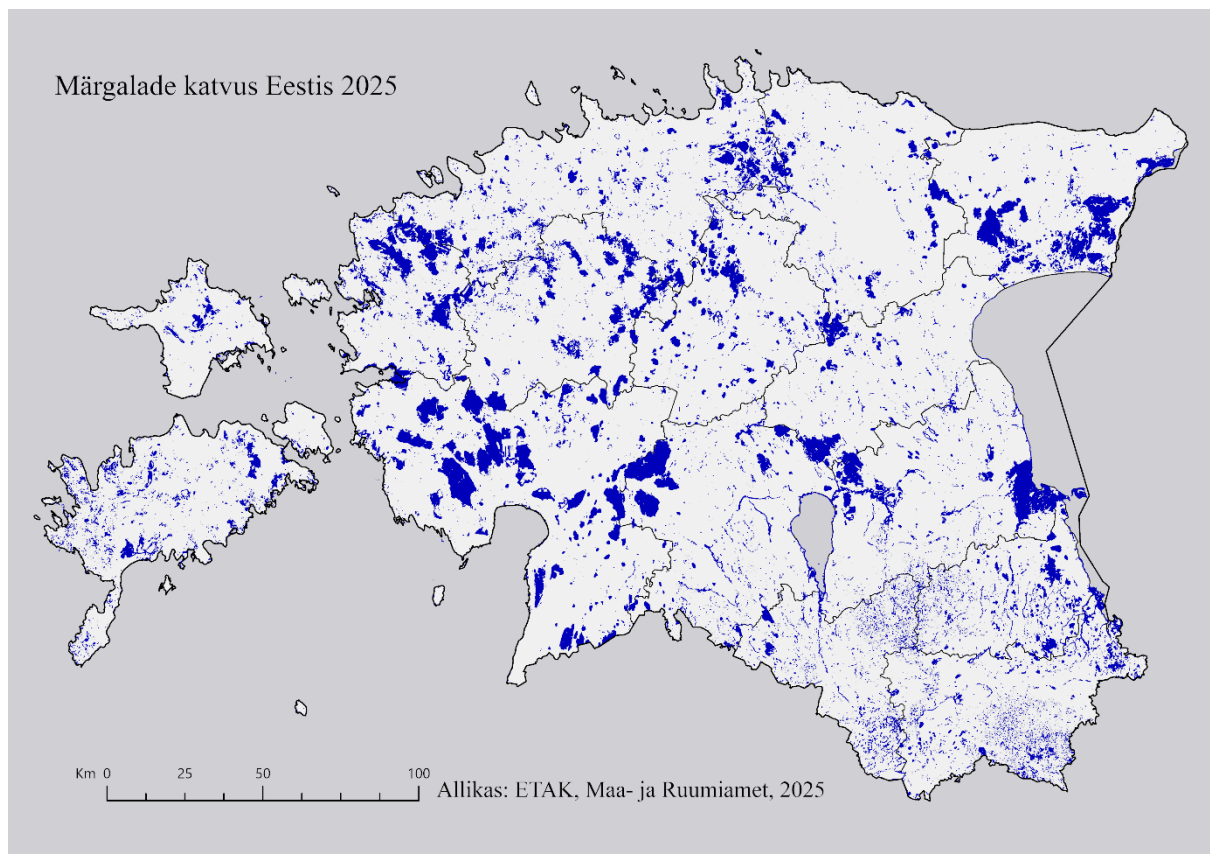
Antud bakalaureusetöö koosneb kolmest peatükist. Esimeses peatükis seletatakse lahti märgalade olulisus globaalsel ja lokaalsel skaalal. Antakse ülevaadet märgalade ajaloost, nende kuivendusest ja taastamisest Eestis ning keskkonna hakatustest, mis nendesse puutuvad. Samuti vaadetakse üle millised arengusammud on tehtud ajalooliste kaartide uurimises tänapäevani ning mida on ajaloolistelt kaartidelt tuvastatud nii maailmas kui ka kodu lähedal. Järgmisena on kirjeldatud töö metoodika, kus on sõnastatud kaarditöötlemise sammud ja seletatud nende tähendused. Kolmandas peatükis esitatakse töötamise tagajärjel saadud tulemused ning võrreldakse neid tänapäeva situatsiooniga, hinnatakse kasutatud metoodika tõhusust ja uuritakse problemaatilisi ja täiustamise kohti.

1. Teooria

1.1 Märgalade olemus

Märgala on veega küllastunud maa-ala, mis toimib iseseisva ökosüsteemina. Kuigi märgala mõiste on olnud eesti keeles olemas juba 1970-ndatest, on seda laiemalt kasutusele võetud alles peale Ramsari konventiooniga liitumist aastal 1994 (Kimmel et al., 2008). Märgala mõistega kirjeldatakse sügavavee ja maismaa vahepealseid elupaigatüüpe. Ramsari konventiooni lepingu põhjal kuuluvad märgalade definitsiooni alla riim-, soola- ja mageveelised, looduslikud ja tehislikud, alalised ja ajutised, seisva- ja vooluveega piirkonnad. Märgalaid saab liigitada kolme kategooriasse – merelised- ja rannikumärgalad (rannikujärved, rannaniidud ja roostikud), sisemaised märgalad (sood, märjad niidud ja metsad, siseveekogud) ning inimese loodud märgalad (poldrid, veehoidlad, jm) (Keskkonnaamet, 2017). Kuni 1990-ndeteni oli märgalade kogupindala vähenemistrendis, kuid tollest ajast on see olnud enamasti muutumatu ning aastal 2022 hõlmasid märgalad 9,5% Eesti territooriumist (Kliimaministerium, 2022). Tänapäeval katavad märgalad 368 755,8 ha Eesti pindalast (joonis 1).

Märgalaid on kuivendatud juba mitusada aastat, kuna nende orgaanikarikas pinnas aitab kaasa erinevatele majandustegevustele. Kuivendusprotsessi käigus võib kaudne mõju moodustada kuni 150%-ni kuivenduse alast. Selles piirkonnas käivitub bioloogilise mitmekesisuse muutus (taimestiku, loomastiku ja veerežiimi degradeerumine) (Paal, 2011). Kuivendamise ja turbakaevandamise tagajärjel paiskub õhku soos talletatud CO₂. Aastal 2022 oli märgalade poolt emiteerunud süsiniku hulk 1307 kilotonni, millest suurema osa põhjustas turbakaevandamine ja selle kasutamine väetisena (Kliimaministerium, 2022).



Joonis1. Märgalade katvus Eestis 2025. Allikas: ETAK

1.2 Kuivendamine ja taastamistööd Eestis

Aastast 1970 on maailm kaotanud 35% oma märgaladest. Peamiseks põhjuseks on maakasutuse muutus ning eriti muutus põllumajandusmaaks (Ramsari konventsiooni kodulehekülge). Eestis on viimase sajandi jooksul kuivenduse tõttu kadunud u. 15% soode pindalast (Eestimaa Looduse Fond). Kui soode kuivendamine sai alguse 17. saj oli selle peamiseks eesmärgiks põletusturba kaevandamine ning konverteerimine põllumajandusmaaks. 20. saj alguses hakati teisendama sooalaid ka metsamaaks. Peale tööstusrevolutsiooni hakkas soode kuivendamisprotsess kiiresti laienema tänu uutele masinatele ning 1980ndate lõpuks oli Eestis kuivendatud ligikaudu 500 000 – 1 000 000 ha soola (Paal, 2011)

Soode kaitsmine Eestis sai alguse juba aastal 1938, kui loodi Ratva raba reservaat. Aastal 1957 moodustati soode kaitseks esimesed riiklikud looduskaitsealad: Nigula raba ja Viidumäe allikasood ning botaanilis-zooloogilised keelualad: Nehatu soo, Nätsi- ja Muraka raba (Eesti Märgalade Ühing). Märgalade kaitsmine ja taastamine sai alguse 1970ndatel aastatel, kui huvi märgalakaitse vastu tõusis peale nn. soode sõda. Soode ja rabade kraavitamise ja hävitamise tagajärjel hakati rõhutama soode ja nende säilitamise tähtsust läbi ajakirja „Eesti Loodus“, kuhu

kirjutas artikleid loodusteadlane Viktor Masing (Marvet, 2018). Soode sõja tulemusena loobuti 200 000 ha soode kuivendusprogrammide ning loodi 30 sookaitseala (Eesti Märgalade Ühing)

Aastal 1971 allkirjastati Iraanis rahvusvahelise tähtsusega märgalade, eriti veelindude elupaikade konventsioon (Ramsari konventioon), mille eesmärgiks on peatada märgalade hävitamine ning säilitada nende ökosüsteemi (Ramsari konventsiooni kodulehekülg). Alates aastast 1994 on Eesti Ramsari konventsiooni liige. Esimesena oli Ramsari alaks kuulutatud Matsalu rahvuspark ning aastaks 2011 oli Eestis 17 rahvusvahelise tähtsusega ala (EELIS). Peale liitumist Euroopa Liiduga liitunist aastal 2004 võeti nii olemasolevad, kui ka uued kaitsealad Natura 2000 võrgustikku. Alates 2014 aastast on Eestis taastatud 23 000 ha kuivendatud soid, nendest 90% asuvad sihtkaitsevööndis (Eesti Märgalade Ühing)

1.3 Ajalooliste kaartide uurimine

Ajaloolised kaardid on olulised infokogumid kartograafias. Töeldes ja uurides vanu kaarte on võimalik tuvastada kronoloogilisi muutusi uuritava ala maakasutuses ning seostada minevikus toimunud sündmusi tänapäeva situatsiooniga. Kuna üks inimene on võimeline jälgida looduses toimuvaid muutusi oma silmaga ainult u. 80 aasta vältel on oluline integreerida ajaloolisi perspektiive, et saada avaram ülevaade juba olemasolevatest teadmistest.

Ajalooliste kaartide abil on võimalik uurida mitmeid ruumis toimunud muutusi nii kaugesse minevikku kui seda kaardistatud on. Maakasutusmuutuste jälgimise väljavaade laienes aerofoto ja satelliitpiltide tulekuga. Maastiku kaugseire võimalused avanesid inimestele esimese Landsat satelliidi algatusega aastal 1972 (Castilla, Hay, 2009).

Digitaalne kaarditöötlus sai alguse arvutite leiutamise. Kuigi varane töötlus toimus masinatel, mis võrreldes tänapäevaga ei olnud sugugi võimsad sai nendega siiski teha primitiivseid võtteid nagu pikslite klassifitseerimine ja töötlus, manuaalne verteksite/punktide liigutamine, kaardipiltide hoiustamine, jne. Enne GIS-i esiletulekut oli kaardipildi töötlus üheskoos muude infotöötlust vajavate dokumentidega ning tolle aja tarkvara võimalused kaartide töötlemiseks oli piiratud (Chiang et al., 2014).

Esimesed GIS tarkvarad avasid maailmale uusi lihtsamaid võimalusi kaarditöötlemises, mis tõstis huvi valdkonna vastu. Esile tulid uued perspektiivid nagu vanade kaartide kiirem ja lihtsam digitaliseerimine/automatiseerimine ning maakasutuse ja maastikuökoloogia muutuste jälgimine tänu töötlemisprotsessist saadud ruumiandmetele (Chiang et al., 2014).

Ajaloolised kaardid on väärtuslikud infoallikad, seega selleks, et neid saaks efektiivsemalt kasutada peab neid digitaliseerima. Esiteks tuleb kaart skaneerida, ehk luua pilt, mida saab avada arvutis. Et tagada sümbolite loetavust võiks skaneerimise eraldusvõime olla vähemalt 300 DPI (Chiang et al., 2014). Seejärel on tarvis skaneeritud pilt koordinaatida (*georeference*). Koordinaatsüsteemi olemasolu muudab pildi töötlemiskõlblikuks andmekoguks, mida saab kaardirakenduste abil kombineerida teiste kartograafiliste elementidega, sealhulgas ka teiste ajalooliste kaartidega (Piskinaite, Vetekis, 2023).

Kui kaart on digitaliseeritud valitakse sobiv töötlemise viis, mis sõltub kaardi omadustest ja töötlemise eesmärgist. Võrreldes algusaastatega on kaardirakendused teinud olulist hüpet oma arengus. Tänapäeval integreeritakse tehisintellekti ja masinõpet suurte ja infomahukate alade kontrollimiseks. Uued tehnoloogiad võimaldavad uurida automatiseerimise ja sügavõppe potentsiaali ajalooliste kaartide koordinaatimises ja vektoriseerimises (Piskinaite, Vetekis, 2023).

Peale märgalade on tänapäeval võimalik ajalooliste kaartide abil tuvastada näiteks üldist maakasutuse muutust (Liu et al., 2018), kohanimedid (Li et al., 2021), geomorfoloogilisi nähtusi (Bisson et al., 2021), maastikuelementide muutust, nt metsakatvus (Leyk et al., 2006) ja linnade kasvu ulatus (Kirsimäe, 2014). Eestis on ajaloolistelt kaartidelt uuritud lisaks Kirsimäe ja tööle ka asustuse ja kohanimede muutust (Sink, 2013), Tartu tänavanimestiku kujunemist (Anttila, 2017), talude kadumist ja tekkimist (Tomson, 2013; Eha, 2014; Hendre, 2023), maakasutuse dünaamikat (Koppa, 2006). Sinki ja Anttila tööde puhul oli tegu kvalitatiivsete uurimustega, kus töö käigus selgitati uuritava objekti omaduste muutused. Kirsimäe ja Koppa töödes teostati uuritava ala käsitsi vektoriseerimist ning tulemuseks mõlema töö puhul oli objektide pindala muutuste võrdlemine tolleaegsete tänapäevakaartidega. Tomsoni, Eha ja Hendre töödes võrreldi üksikute objektide (talude) arvu muutumist ajas. Talud võrreldi mitme kaardi vahel eri aastatest ning omistati igapäevale kood vastavalt esinemissagedusele. Hiljem teostati arvutusi koodi väärtustega.

Nähtuste tuvastamise ajaloolistelt kaartidelt on meetodika poolest liikunud samm-sammult manuaalsest olekust automatiseeritud keskkonda. Tavaline on ka erinevate meetodite kombineerimine omavahel selleks, et jõuda soovitud tulemuseni. Uuemad lähenemised nagu GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis) aitavad klassifitseerida maastiku maakasutuse järgi. Sarnased pikslid grupeeritakse omavahel ning luuakse lugejale arusaadavad kategooriad (Kucharczyk et al., 2020). Seda meetodikat kasutas oma magistritöös Murin

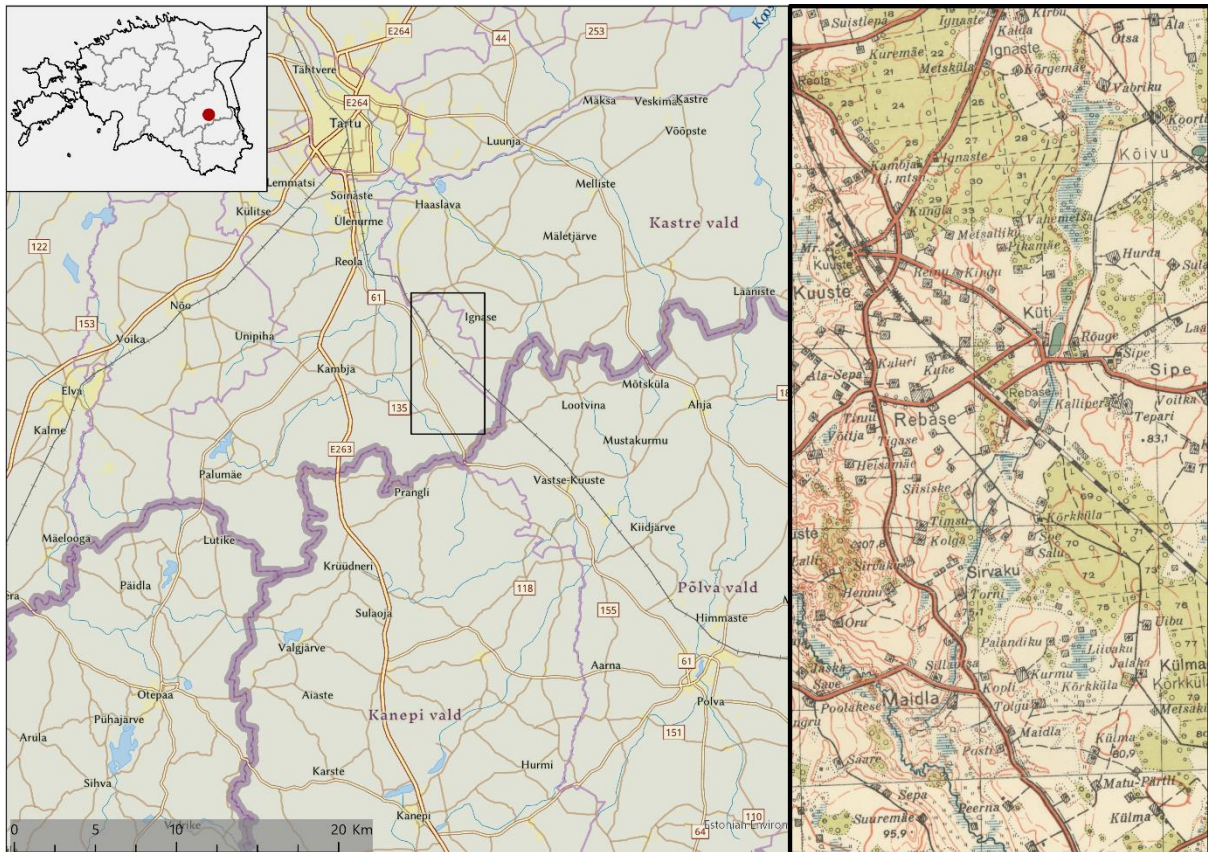
(2022). Maastiku uurimises ajaloolistel kaartidel kasutatakse GEOBIA lähenemist kombinatsioonis CNN ehk konvolutsioonilise tehisnärvivõrgu (Convolutional neural network) tehnoloogiaga, mis põhineb süvaõppel. CNN võimaldab automatiseerida kaardipiltide semantilist segmenteerimist ning eristada sümboolikat kaartidelt kiirelt ja täpselt (O'Hara et al., 2024). Vaatamata sellele, et uued tehnoloogiad esile kerkivad on nad siiski veel täiustamise protsessis ning manuaalne lähenemine on siiani laialdaselt kasutuses (Chen et al., 2024)

2. Andmed ja metoodika

2.1 Uurimisala

Uurimisalaks oli valitud Sipe oja ümbrus Tartumaal (joonis 2), mis asub u. 15 km lõunapool Tartu linnast, Tartu- ja Põlva maakonnapiiri läheduses. Ala asub Kambja vallas ning hõlmab Vana-Kuuste, Sipe, Sirvaku, Kõrkküla ja Rebase külasid. Lisaks läbib ala Aardla-Koidula raudteelõik. Lisaks märgaladele on alal kraavid ja järved. Kaardi väljalõike katvus on umbkaudselt 4300 ha. Uuritav ala asub Ugandi lavamaal, Porijõe valgla idaosas, Peipsi alamvesikonnas, Ida-Eesti vesikonnas. Valgla põhja- ja keskosa paikneb lavamaa künklikul moreentasandikul, mille orud on täidetud glatsiofluviaalse liiva ja kruusaga (Mander et al., 2000). Aastatel 1987-1997 toimusid Sipe oja valglas olulised maakasutuse muutused: haritava maa osakaal langes 58,5-lt 19,1-le %, hüljatud põllumaa osakaal tõusis 1,2-lt 27,2-le % (Mander et al., 2000) ning kogu Porijõe valgla alal tõusis märgalade osakaal 3,4-lt 3,7-le % kuivendussüsteemide mandumise tõttu (Kull et al., 2005).

Kuigi täpsed andmed kuivenduse kohta uuritavas alas puuduvad, on näha, et Sipe oja kõrval on pärast teise maailmasõja lõppu rajatud rida tihedaid kraave. Muutust on näha, kui võrrelda antud töös kasutatav EV 1935-1939 topokaart ja Geoportaali maaparandussüsteemide registri andmeid.



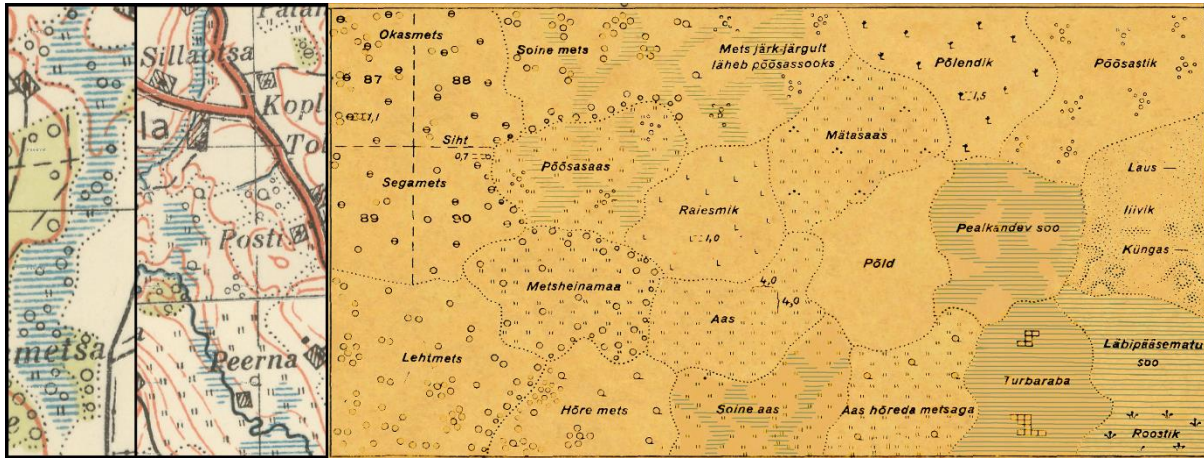
Joonis 2. Uuritav ala. Sipe oja ja selle ümbrus.

2.2 Andmed

Iseseisva Eesti geodeesia alguspunktiks võib pidada Vabadussõja aega, kui 1918. aastal loodi Kaitseväe staabis topograafi ametikoht. Vahemikus 1923-1938 staabi topo-hüdrograafia osakonnas trükiti Eesti topograafiline kaart kolmes mõõtkavas: 1 : 25 000 (põhikaart), 1 : 50 000 (taktikaline kaart) ja 1 : 200 000 (ülevaatekaart) (Potter, Treikelder, 2011). Antud töös kasutati Eesti Vabariigi taktikalise topograafilise kaardi 1:50 000 (1935-1939) Tartu lehte (nr. 813), mis valmis aastal 1937. Väljavõte tehti Maa-ameti geoportaalist rasterpildi kujutisena. Valik koondus antud kaardile, kuna saadavatest ajaloolistest kaartidest on see kõige vanem, kus uuritav ala on kaardistatud ning leppemärgid on kujutletud eri värvidega, mida oli tarvis meetodika kohaselt. Kaardi koostamisel kasutati Vene üheverstalist kaarti, põhikaarti ning kohati ka aerofotodel põhinevat fotogramm-meetrilist mõõdistust. (Potter, Treikelder, 2011).

Üldise legendi järgi on antud kaardile märgalad kujutletud pindobjektina horisontaalsete siniste joontega. Samat värvi on ka jõed ja kraavid. Kaardi legendi kõlvikute osa väljavõttes (joonis 3) on näha, et töös kirjeldatud ala märgalad on kaetud kas metsheinamaa või aasaga, kus kohati on ka hõre mets. Märgalad piirduvad talumaade, teede ja (ühes kohas ka kattuvad)

metsalõikudega. Küti järvest lõunapoole Porijõeni välja on kaardilt näha, et märgalaid läbib kraav.



Joonis 3. Märgaladel esinevad kõlvikute leppemärgid ja nende tähendus. (Legendi väljavõte: DIGAR)

Et võrrelda töötamise tulemusel saadud ala tänapäeva olukorraga, kasutati veebis saadavat Eesti topograafia andmekogu (ETAK) kõlvikute kihti ning Eesti põhikaarti 1 : 10 000.

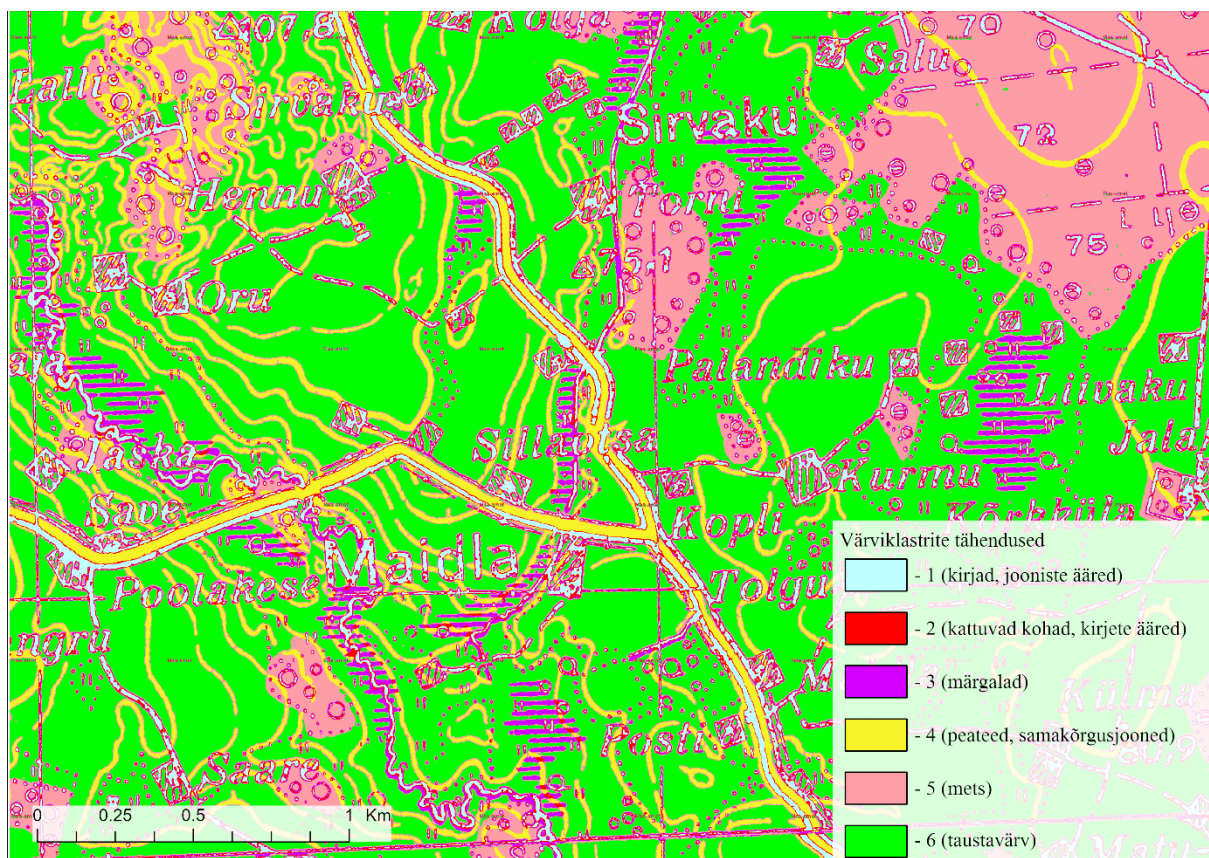
2.3 Metoodika

Töötlemine tehti tarkvaraga QGIS 3.28.5-Firenze. Töötlemisel kasutati pistikprogrammi (*plugin*) Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, 2021) tööriistu. Töötlemismetoodikas oli kombineeritud värvi segmenteerimise ja matemaatilise morfoloogia lähenemised.

Värvi segmenteerimine (*color image segmentation*) on pildi jagamine värvi-homogeenseteks piirkondadeks nii, et kahe kõrvuti asuva piirkonna liitmise puhul ei oleks piirkond enam homogeenne (Cheng et al., 2001). Selle peamine eesmärk pilditöötluses on tuvastada värvi-homogeensed piirkonnad ning vähendada värviväärtuste arvu määratud värviklasside arvuni (Chiang et al., 2014). Selle üks alametoodikatest on värvipõhine klasterdamine (*color space clustering*), millega saab pildil olevad värvid automaatselt jagada klassideks. Seejärel, kui õige värviklass on tuvastatud ja pilt on teisaldatud must-valgeks (binaarseks) saab pilti töödelda matemaatilise morfoloogia (*mathematical morphology*) operaatorite – erosiooni ja laiendamisega. Erosiooni operaator võimaldab huviala pindala kahandada, eemaldades soovitud värviklassi servadest etteantud arvu pikseleid ning tänu sellele on kasulik ka pisiprahi eemaldamiseks. Kui sodiala pikslite pindala on väiksem või võrdne erosiooni kahekordse väärtusega, siis see automaatselt kustutatakse. Laiendamise operaator võimaldab huviala

pindala servadest kasvatada ning kompenseerida eelnevalt erodeeritud vajalikku pindala (Chiang et al., 2014).

Uurimisalalt märgalade tuvastamiseks laeti alla Maa-ameti ajalooliste kaartide WMS-teenusest uurimisala kohta RGB kaardipilt geotiff-formaadis. Pildi värvipõhiseks klasterdamiseks kasutati SCP tööriista *Clustering*, milles k-keskmiste (*K-means*) algoritm jagab pikslid värviklassidesse sõltuvalt sellest, kui kaugel on piksel klastri keskpunktist. Tööriistale anti soovitud värviklasside arvuks ette 6 klassi, sest ajalooliselt kaardilt oli silmaga võimalik eristada 5 kuni 6 värvi (joonis 4). Lisaks soovitud värviklasside arvule anti tööriistale ette ka kauguslävend klastri keskpunktist (*distance threshold*) ja iteratsioonide piirarv (*max number of iterations*), mis kontrollib seda, kui mitu korda algoritm iga klastri puhul kauguslävendit kontrollib ja kohandab. Piirarvu määramine on vajalik, sest vastasel juhul on võimalus, et iga värviklastri puhul kauguslävendit ei saavutata ja programm jääb lõpmatuseni pikslid kohandama. Kauguslävendina kasutati klasterdamisel 0,0001 pikslit ning iteratsioonide piirarvuna 10 (joonis 5). Lisaks 10 iteratsioonile katsetati ka 5 ja 15 iteratsiooni, ent 10 iteratsiooni puhul oli märgala kontuur visuaalselt kõige paremini näha.



Joonis 4. Värvil alusel klasterdatud kaardipilt.

Input

Clustering of band set

Select input band set Method K-means ISODATA

Distance threshold Number of classes

Max number of iterations

ISODATA max standard deviation ISODATA minimum class size in pixels

Use value as NoData

Seed signatures

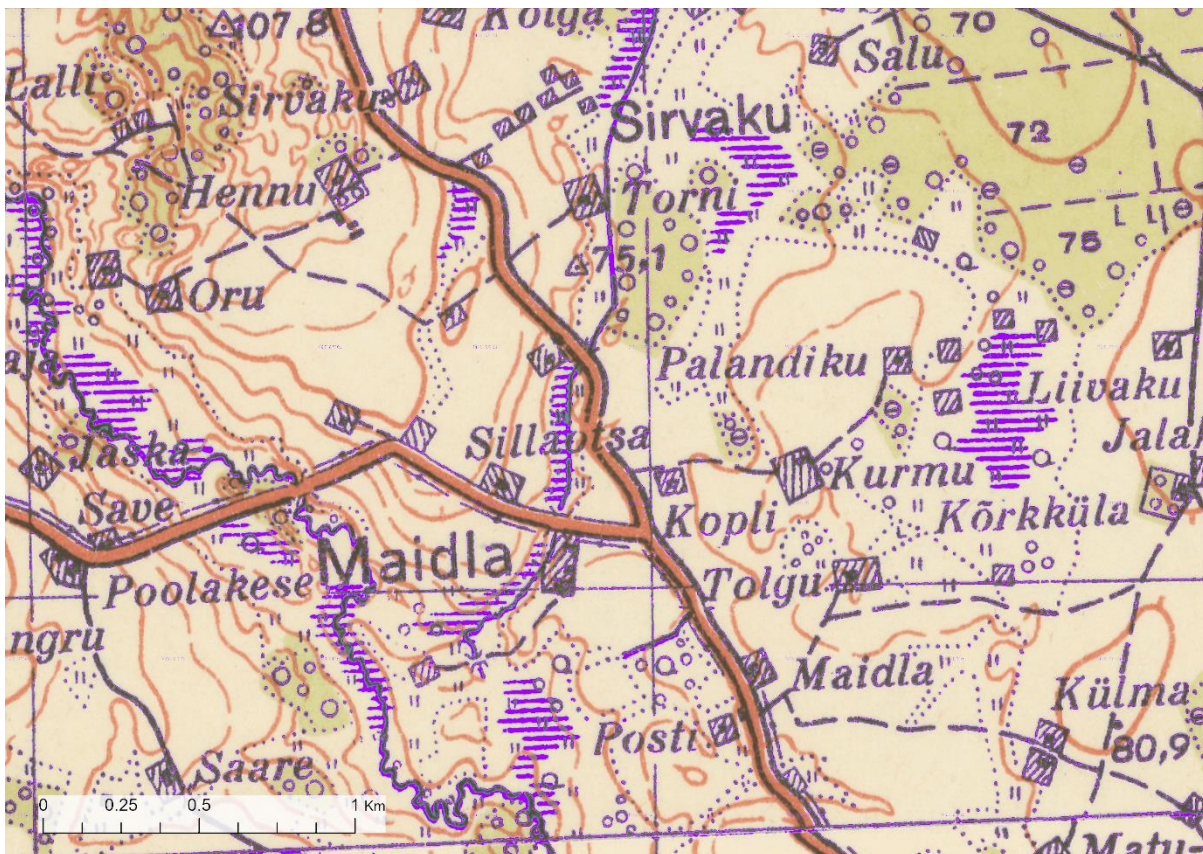
Seed signatures from band values Use Signature list as seed signatures Use random seed signatures

Distance algorithm Minimum Distance Spectral Angle Mapping

Save resulting signatures to Signature list

Joonis 5. Klasterdamise parameetrid

Joonisel 6. on näha, et märgalaid hõlmav klass on lillat värvi, ehk klass nr 3. Edaspidi tuli õige klass eraldada ja muuta eraldi kihiks, et teha töötlust ainult sellega.



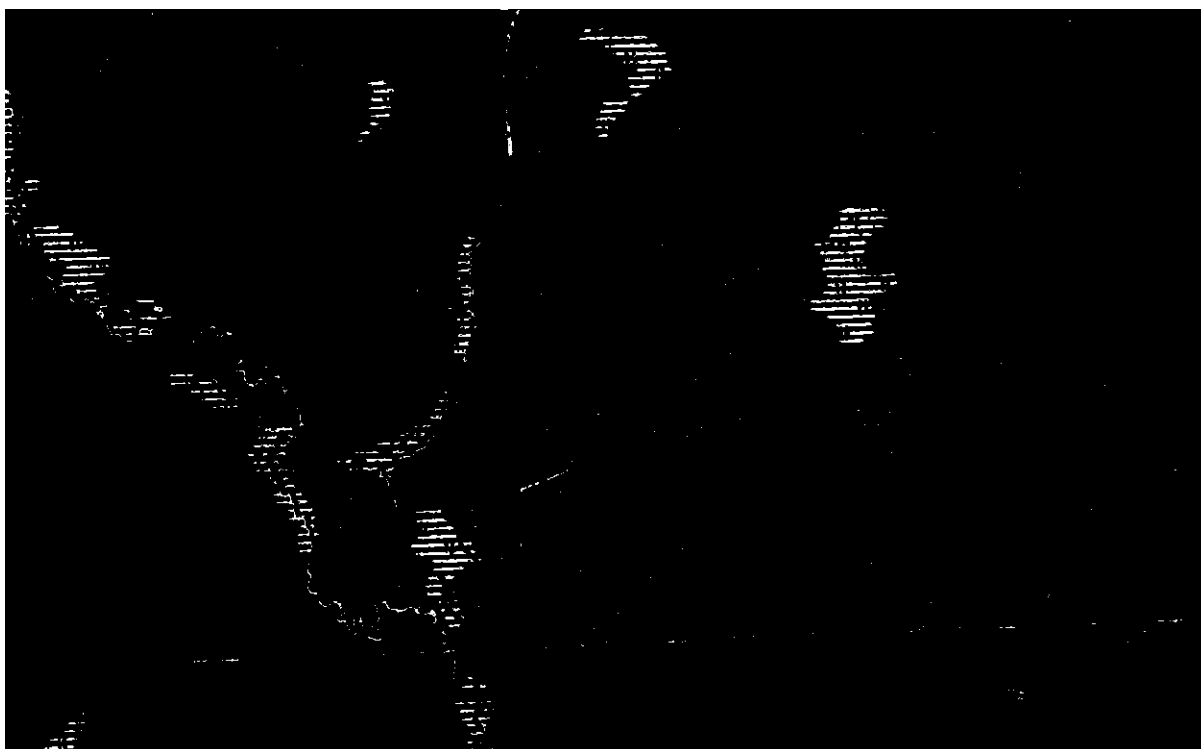
Joonis 6. Märgalade leppemärgiga kõige paremini kattuv klass: 3.

Selleks, et värvipõhiselt segmenteeritud raster klassifitseerida ümber binaarkujule ja eraldada märgalad tähistava värviklassi (klastrid) teistest klassidest nii, et märgalad on väärtusega "1" ning kõik ülejäänud alad väärtusega "0", kasutati QGIS-i tööriista *Raster Calculator*, mis võimaldab rasterkihtidega teostada mitmesuguseid kaardialgebra operatsioone. Binaarkujule viimiseks kasutati tingimuslauset kujul "if ("*kaardikiht, mis saime klasterdamise tulemuseks*" = *märgalade värviklassi number*, 1, 0)", ehk antud olukorras if ("clust_iter10@1" = 3,1,0). Tulemuseks oli mustvalge pilt märgalade klassiga (joonis 7).



Joonis 7. Rasterkalkulaatori tulemus.

Selleks, et binaarkujule ümber klassifitseeritud rastrilt tuua välja alad, mis ajaloolisel kaardil päriselt märgalana olid kujutatud, oli vaja eemaldada rastrilt müra, mis tekkis ebavajalike pikslite segmenteerimisel märgaladega samasse värviklassi. Selleks et liiga väikse pindalaga alad rastrilt eemaldada ning seejärel huvialade tegelik pindala taastada kasutati erosiooni ja laiendamise funktsioone SCP pistikprogrammis (tööriistad *Erosion* ja *Dilation*). Tööriistale *Erosion* anti ette huvialuse klassi väärtus (3) ning pikslite arv, mille võrra sooviti huvialuse värviklassi alasid sissepoole kahandada (2). Kahandamiseks katsetati vahemikku 2 kuni 5 pikslit; visuaalse hinnangu põhjal saavutati optimaalseim tulemus 2-pikslise kahandusega (joonis 8).



Joonis 8. Erosioonitöötlemise tulemus 2 piksli korral.

Pärast *Erosion* tööriista rakendamist kasutati tööriista *Dilation*, et allesjäänud alasid etteantud pikslite arvu võrra laiendada. Sarnaselt alade kitsendamisele anti tööriistale alade laiendamiseks ette huvialuse klassi väärtus ning pikslite arv, mille võrra huvialuse värviklassi alasid laiendada. Alasid laiendati 10 piksli võrra, sest see tagas tulemuse, millel polügonide servad kattusid kaardil olevate märgala leppemärkidega (joonis 9).

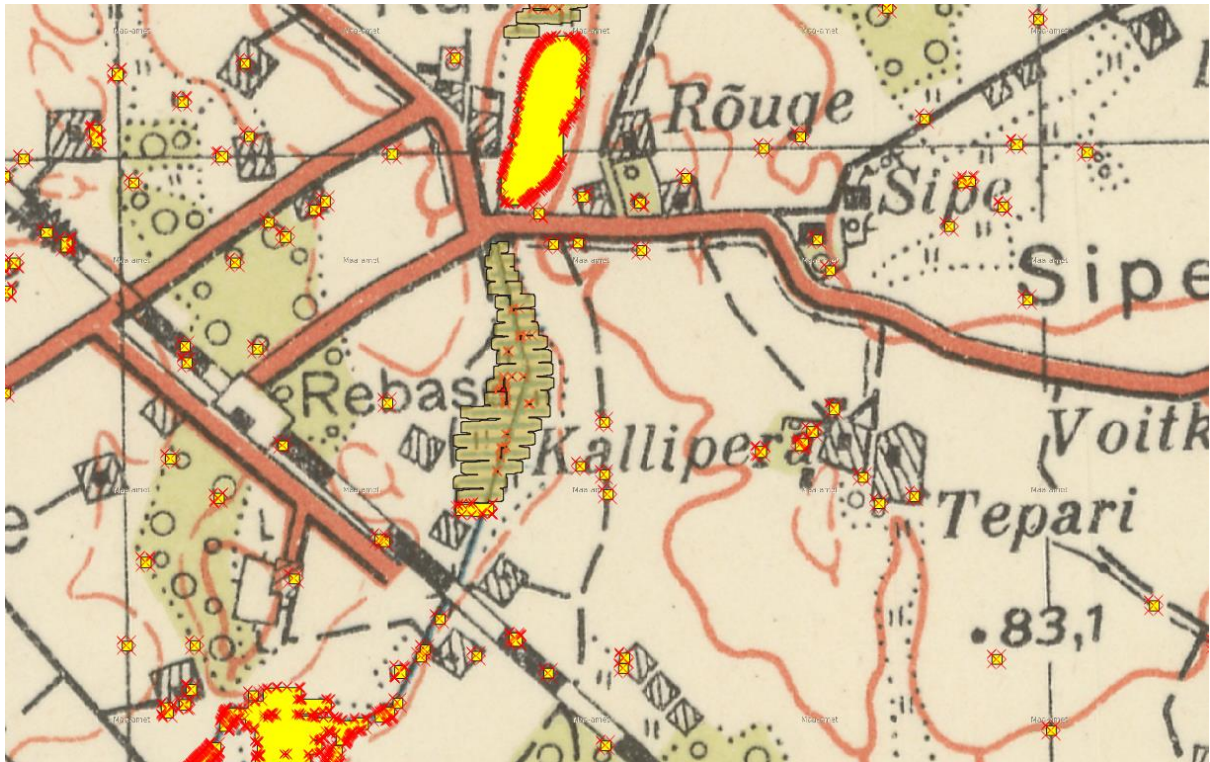


Joonis 9. Laiendamise tulemus

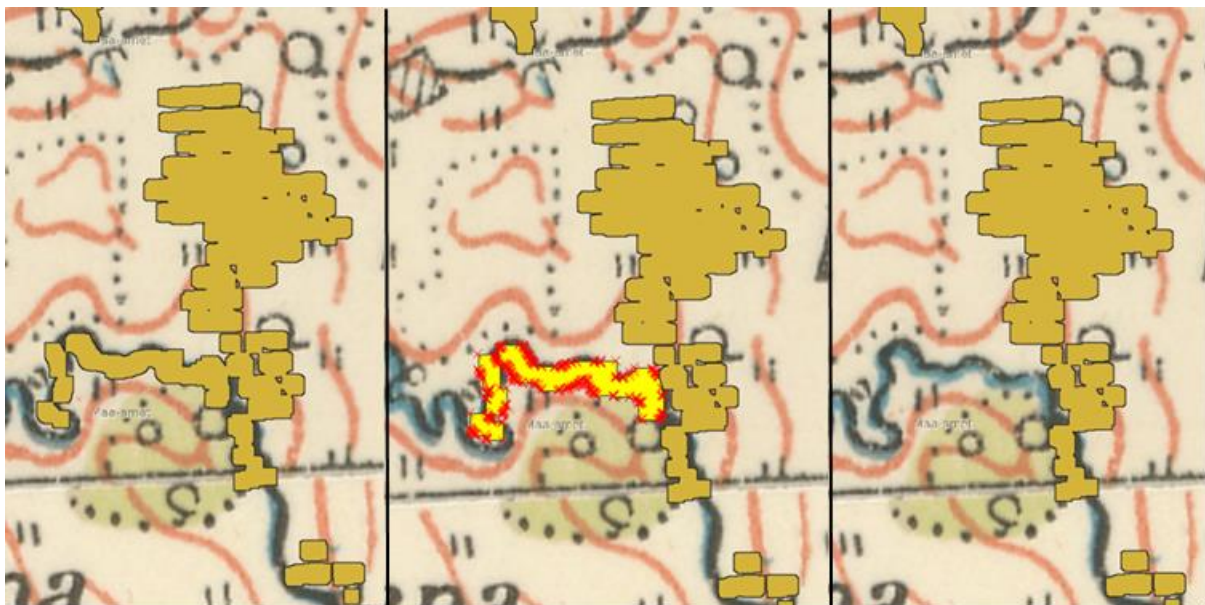
2.4 Märgalade pindala tuvastamine

Selleks, et tuvastada märgalade kogupindala tervel töötlusalal oli tarvis saada vektorkiht terviklike polügonidega, mis kattusid märgalade kontuuriga kaardil. Esimese sammuna teisendati laiendamise tulemusel saadud rasterkiht vektorkihiks *Polygonize* tööriistaga. Sellega teisendati kogu kiht (nii 1 kui ka 0 väärtusega alad) polügonideks. Seejärel valiti kõik polügonid jättes manuaalselt välja need, mis kattuvad märgaladega ning ülejäänud kustutati kui praht (joonis 10). Kuna jõgede ja märgalade leppemärkide värvid oli kaardil samad hõlmasid mõned polügonid endas jõe ala. Sellel juhul lõhestati polügon *Split features* tööriistaga jõe ja märgala kokkupuutekohas ning ebavajalik osa kustutati (joonis 11).

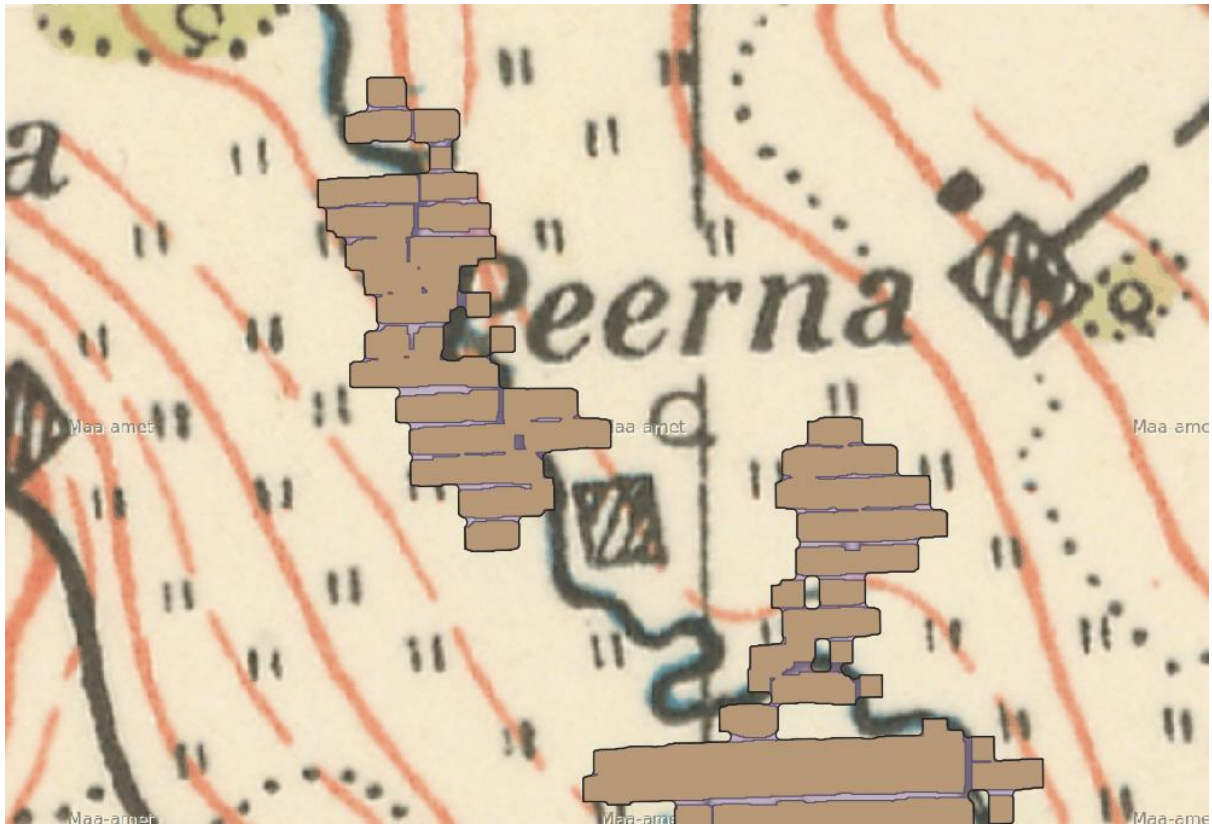
Seejärel, et tekitada märgalade kohale terviklikud polügonid, tuli täita leppemärgijoonte vahelist ala. Kasutati tööriista *Buffer*. Puhvri laiuseks määrati 5 meetrit, kuna kõige kaugem vahemik oli alla 5 meetri. Tekitatud uut puhvrikihti töödeldi sama tööriistaga, aga puhvri laiuseks määrati -5 meetrit, et polügonide välimine kuju kahaneks tagasi esialgsesse positsiooni. Joonisel 12 on näha, kuidas polügonide vahelised alad said täidetud, kuid kuju ei muutunud.



Joonis 10. Märgalade manuaalne deselekteerimine. Abiks oli kihi läbipaistvaks tegemine, et leppemärk kumaks läbi. Aktiivseks (kollaseks) tehtud pikslid kustutati.



Joonis 11. Polügoni osa, mis ei kuulu märgalale lõhestati ja kustutati.



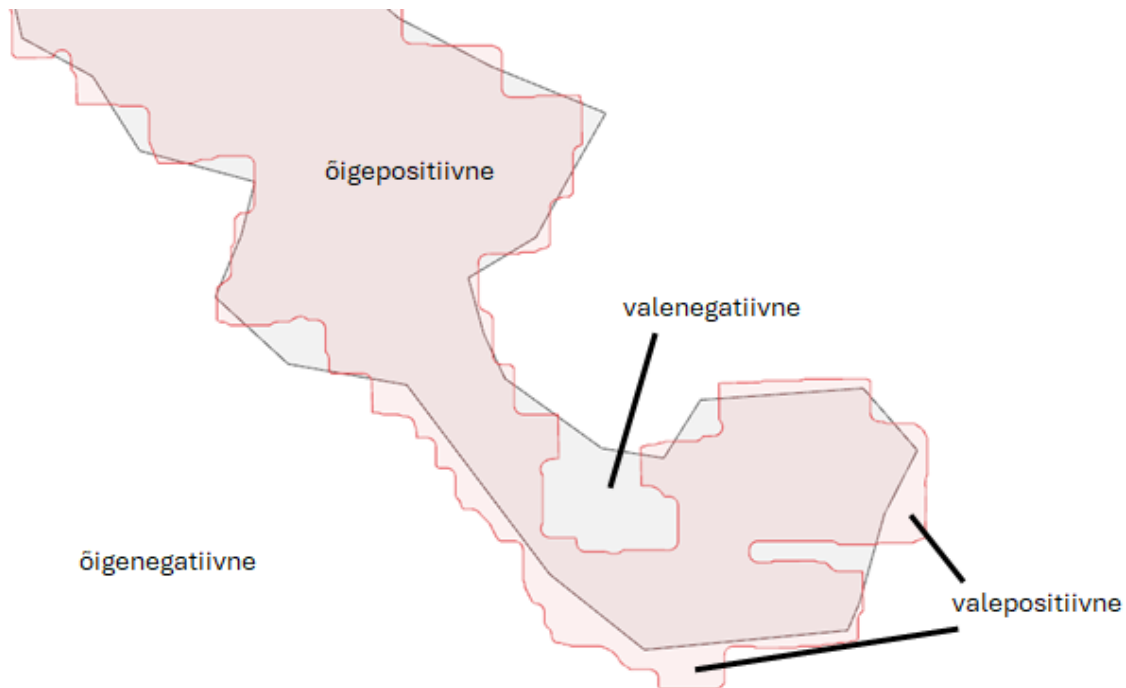
Joonis 12. Polügoni klastrite liitmine *Buffer* tööriista abil. Poolläbipaistev lilla puhvri kiht on lõhestatud polügonide kihi peal. On selgelt näha, kuidas lõhed on täidetud, kuid kuju on jäänud muutumata.

Polügonide sees olevaid auke eemaldati tööriistaga *Delete holes*. Kuna näiliselt suurima augu pindala oli u. 1700 m², siis lävendiks määrati augud pindalaga <2000m².

Selleks, et selgitada välja, millisteks maakattetüüpideks on ajalooliselt tuvastatud märgalad konverteeritud kasutati tööriista *Overlap analysis*, kuhu lähtekihiks määrati viimasena saadud kiht ning ülekatte kihtideks ETAKI-i kõlvikute kihi havitava maa, lage ala ja puittaimestiku polügonid. Kihil esitatud nähtused vaadati järgi ETAK-i kihtide nähtuste loetelust (Maa- ja ruumiamet). Tulemust sai vaadata saadud kihi atribuuditabelist, kus oli kattuvus antud nii pindala ühikutes, kui ka protsentides. Lisaks, et võrrelda ajaloolise ulatuse kattuvust tänapäevasega oli lõplik märgalade kiht imporditud ArcGIS Pro 3.1.2 tarkvarasse ning tööriistaga *Intersect* saadi ETAK-i märgaladega kattuvad alad.

Võrdluseks oli loodud ka manuaalselt digitud märgalade kiht. Programmis ArcGIS Pro loodi kaardi väljalõike kihi peale uus tühi kiht, kuhu peale loodi üksikshaaval käsitsi ümbertõmmatud polügonid. Märgalade leppemärkide ümbertõmbamisel lähtuti visuaalsest sobivusest. Polügoni verteksid paigutati leppemärgijoonte otsadele.

Töötlustulemuste hindamiseks arvatati veemaatriks. Veemaatriks on tabel, mis võrdleb mudeli tegelikke ja klassifikatsioonitöötluste käigus saadud väärtusi, jaotades neid nelja rühma: õigepositiivsed (ÕP) - ala, mis oli töötluste käigus õigesti tuvastatud ning kaasab mõlemat kihti; õigenegatiivsed (ÕN) - ala, mis oli töötluste käigus õigesti tuvastatud ning ei kaasata ühtki kihti; valepositiivsed (VP) - ala, mis oli töötluste käigus tuvastatud objektina, kuid tegelikult ei ole; valenegatiivsed (VN) - ala, mis oli töötluste käigus tuvastatud taustana/mitte objektina, kuid tegelikult on objekt (joonis 13).



Joonis 13. Väärtuste rühmitamine. Punane ala- töötlustulemus; must ala- käsitsi vektoriseerimise tulemus

Kuna antud töös on tegu pindala võrdlusega oli väärtuste ühikuks ha. Tarkvaras ArcGIS pro tuvastati nelja rühma pindalad *Erase* (-) ja *Merge* (+) tööriistade abil.

Õigepositiivsed: koguala - [(koguala - töötlusala) + (koguala - tegelik ala)]

Õigenegatiivsed: koguala - (töötlusala + tegelik ala)

Valepositiivsed: töötlusala - tegelik ala

Valenegatiivsed: tegelik ala - töötlusala

Seejärel tuvastati tootja-, kasutaja- ja kogutäpsuse järgnevate valemitega:

$$\text{Tootjatäpsus} = \tilde{O}P / \tilde{O}P + VN \ 0.8770825986$$

$$\text{kasutajatäpsus} = \tilde{O}P / \tilde{O}P + VP \ 0.6147518308$$

$$\text{kogutäpsus} = \tilde{O}P + \tilde{O}N / \tilde{O}P + VP + VN + \tilde{O}N \ 0.9779916683$$

3. Tulemused ja arutelu

3.1 Sipe oja märgalade pindala muutus

Antud töös töödeldud kaardilõigul oli märgalaid tuvastatud 142,47 ha ulatuses (joonis 14). Manuaalselt digitud märgalapolügonide pindala oli 141,93 ha. Kattuvate alade (alade, kus märgala oli mõlemal kaardil) pindala oli 13,99 ha. 128,47 ha vanadest märgaladest on kadunud ning 26,11 ha uusi märgalaid on tulnud juurde (joonis 15). 90% 1937 aasta märgaladest antud alal enam ei eksisteeri.

Kui lugeda käsitsi digitud pindala tõseks on töötlemistulemuse tootjatäpsus 91,69%, kasutaja täpsus 91,32% ja kogutäpsus 99,44%. Veemaatriksi tulemuste põhjal võib öelda, et antud juhul oli töötlemise tulemus väga täpne. Võrdluseks oli ka arvutatud veemaatriks alale, millel ei olnud ebavajalikud alad manuaalselt puhastatud. Tootjatäpsus oli 87,7%, kasutajatäpsus 61,5% ning kogutäpsus 97,8%. Võrreldes puhastatud alaga oli tootja- ja kasutajatäpsustel üpris suur vahe, kuid kogutäpsus jäi kõrgena.

Tänapäeva katvus antud alal on 40,10 ha, ehk 102,35 ha (71,85%) võrra väiksem, kui see oli 1937, kaardilehe valmimisaastal. Tänapäeva topograafiliselt kaardilt (Eesti põhikaart 1 : 10 000) on näha, et suurem osa märgalamaast on muutunud metsaks, põlluks või rohumaaüksikute harvikutega. Mõnedes kohtades on tekkinud järved või tiigid seal kus neid varem ei olnud (nt Ojasaare järv).

Overlap analysis tulemusel selgus, et üle poole (51,4%) ajalooliselt tuvastatud pindalast on muutunud puittaimestikuks, ehk metsaks või põõsastikuks. 22,3% alast on muutunud lagealaks (rohumaa, muu lage ala) ja 13,9% haritavaks maaks (põld, aianduslik maa).

3.2 Metoodika ja andmete sobivus

Antud töös kasutatud pool-automaatne töötlusviis sai märgalade tuvastusega ajalooliselt kaardilt kenasti hakkama. Lõpptulemuses on näha, et kontuur langeb suuremal määral kokku kaardil oleva alaga, kuid samas jätab sakilised servad. Sakiliste servade põhjuseks on leppemärgi joonte laiendamine, mida oli tarvis polügonide ühtsuse tagamiseks. Kontuuride võrdluskaardil (joonis 16) on näha, et sakid annavad juurde kuid ka võtavad ära polügoni kogupindalast, mis lõpuks tasakaalustab tulemust.

Kaardi omaduste tõttu olid märgalade leppemärgid mõnedes kohtades kaetud teksti või teiste leppemärkidega ning see põhjustas märgalade värviklastri ebaühtlust, auke või märgala serva

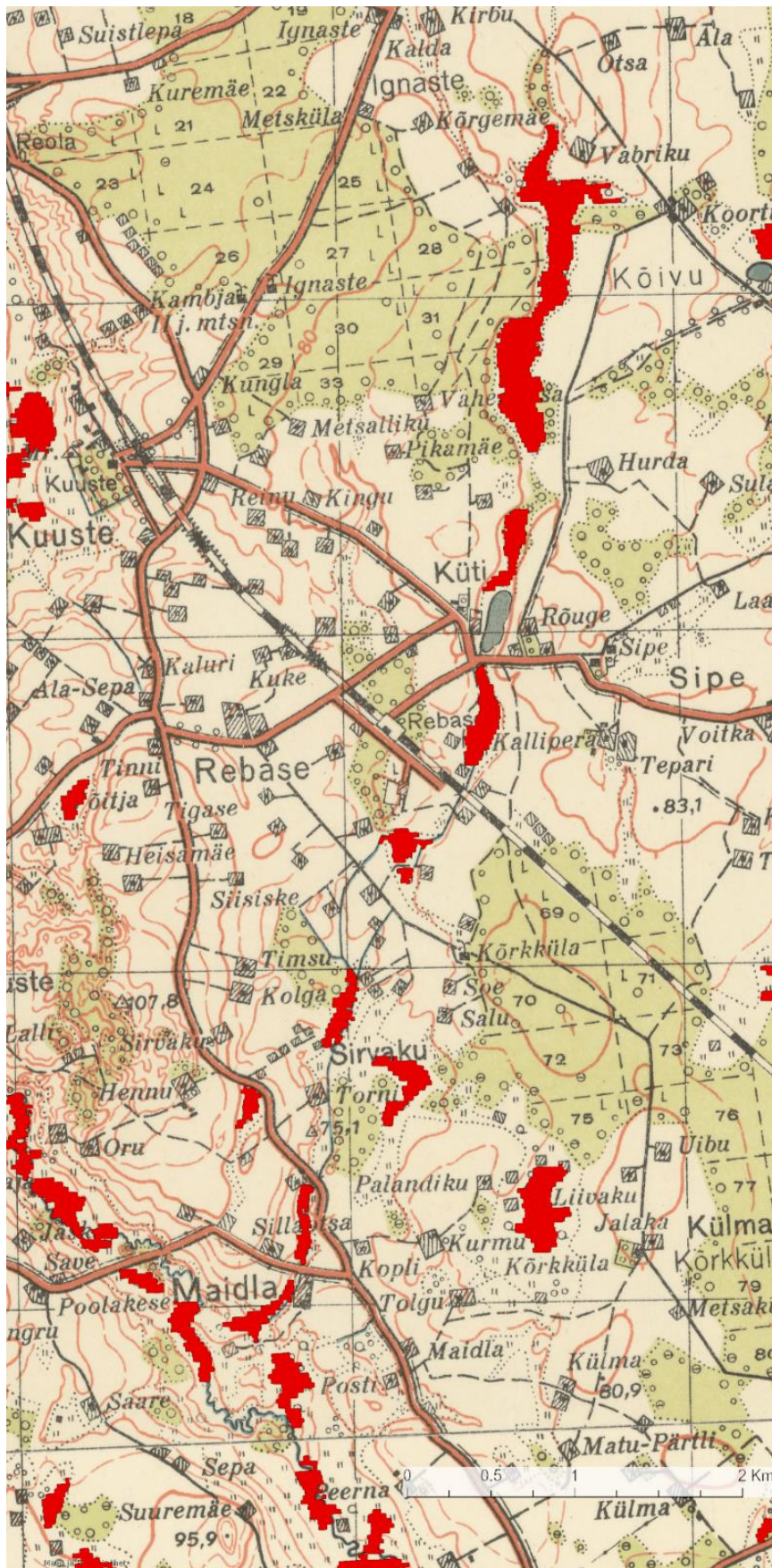
välja jätmist. Samuti oli kaardi leppemärgisüsteemis märgalad, jõed ja kraavid määratud sama värviga ning mõnedes kohtades tuli selletõttu neid käsitsi eraldada. Kohati oli raske näiliselt tuvastada, kus on märgala ja jõe/kraavi piir, seega määrati seda umbkaudselt.

Antud 4300 ha uurimisala peal oli märgalade pindala manuaalne tuvastamine kiirem, kui töötlusmeetodiga tuvastamine, arvestades iteratsioonide arvu, erosiooni ja laiendamise väärtuste kalibreerimist. Kui arvestada ainult värvi segmenteerimise aspekti tegi värviklasterdamise tööriist keskmise töö; kaasas kõik märgalade leppemärgid ühte klassi, kuid samas tekitas see suure hulga väikeseid alasid, mis ei kuulunud märgaladele. Järgnevalt teostatud “sodialade” manuaalse puhastamise käigus selgus, et silma järgi vajalike alade selekteerimine võib olla ebatäpne, nt, vajalikud alad kustutatakse ära ja ebavajalikud jäetakse alles. Sellise inimvea tõttu pidi polügonide kihti mitu korda korrigeerima, lisama tagantjärgi kahe silma vahele jäänud vajalikud alad ning kustutama ebavajalikud. Puhvrite lisamine ja aukude eemaldamine andis hea selgepiirilise tulemuse.

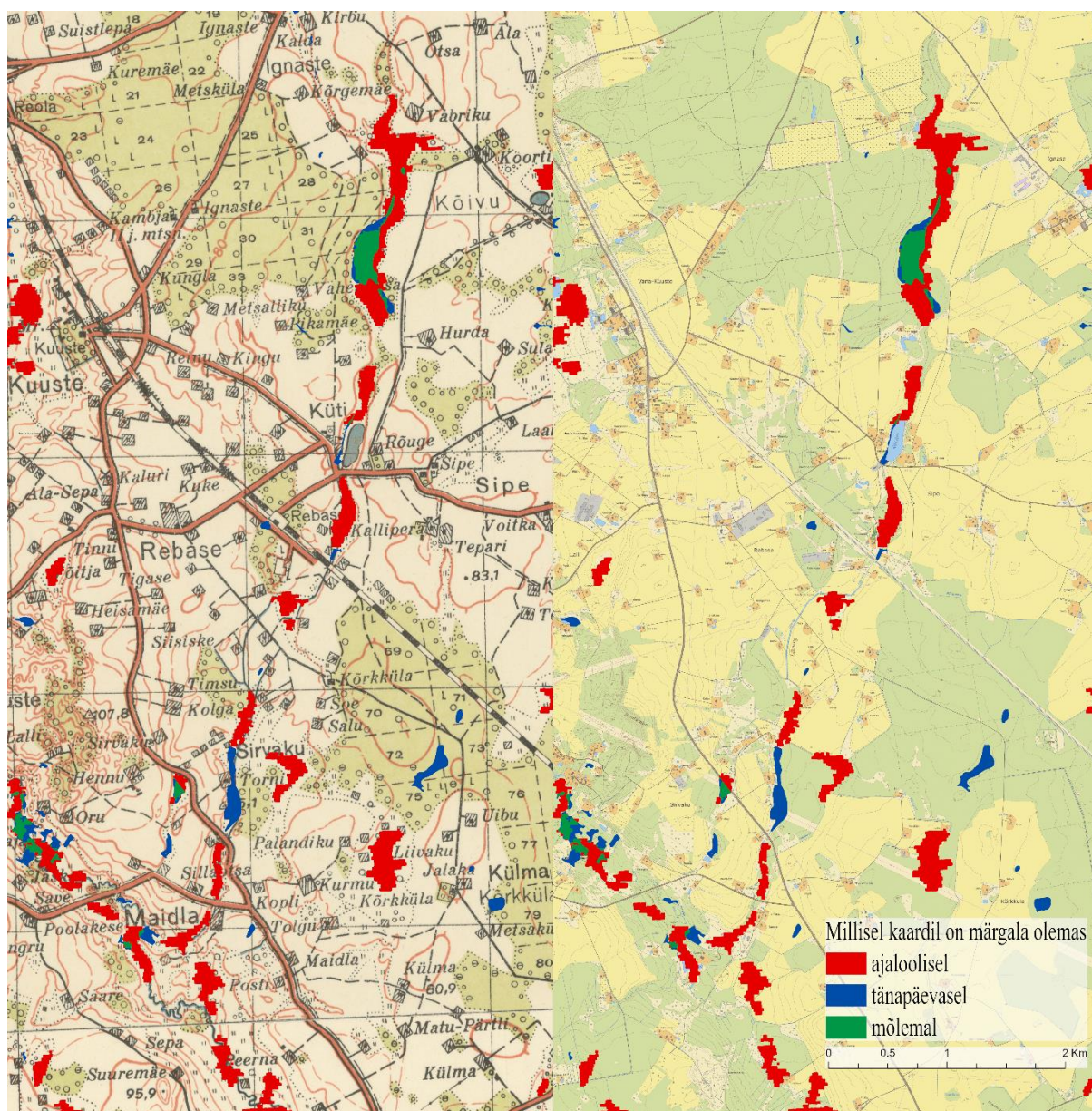
Tulemuse võrdluse käigus tänapäevaga oli märgatud, et tänapäeva topograafilisel kaardil ja ETAK-i kõlvikute kihil on erinevused märgalade katvuses. Topokaardil on märgalad, mida ETAK-i kihil ei ole (joonis 17), seega on võimalik, et sõltuvalt andmete allikast on katvuste erinevuse tulemused erinevad. Samuti, kui antud metoodikat peaks rakendama alal, mis hõlmab rohkem, kui ühte kaardilehte on võimalus, et leppemärgi värvitoonides esineb väike erinevus ning see võib mõjutada värvipõhise klasterdamise tulemust.

Kuna märgalade olemust hakati põhjalikumalt uurima ja defineerima alles 20. saj keskpäeval, siis kaardil võib esineda katvuse erinevusi ka tulenevalt sellest, mida parasjagu peeti märgalaks kaardi koostamise momendil. Antud juhul oli tegu 1937. aasta andmetega ning nagu teooria peatükis oli mainitud märgala mõiste tuli eesti keeles kasutusele alles 1970-ndatel. Nii eesti kui ka vene definitsiooni järgi oli kaartidele märgitud sood/soostunud alad.

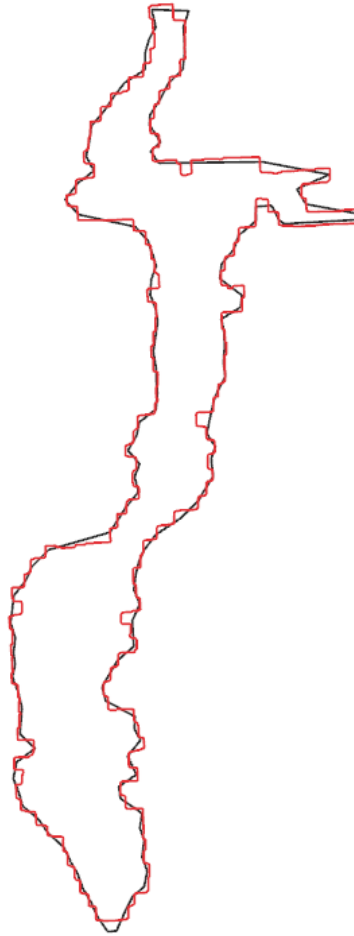
Antud metoodika eeldab et kaardil olev info on tõene, kuna ebakorrektsel info tuvastamine on märgalade puhul keeruline. Sageli on märgalad ja/või nende ümbrus kaetud puude või rohumaaga ning selle tõttu on kontuur ja täpne ulatus nt ortofotolt raskesti määratavad. Oma töötulemustes tõi Hendre (2023) välja, et ainuüksi kaardiandmetel põhinev töötlus võib sisse tuua vigu, kuna kaart ei pruugi korrektselt kajastada tänapäeva katvust. Tema töös tuvastati vead välitööde käigus. Antud töös toetuti üksnes Maa-ameti ajalooliste ja ETAK-i kaartide andmetele, kuna antud juhul oleks välitööde läbiviimine oluliselt keerukam. Seega kaardiinfo korrektsus ei olnud üle kontrollitud.



Joonis 14. Töötlemise tagajärjel saadud vektorkiht.



Joonis 15. Märgalade pindala muukuste kaart.



Joonis 16. Manuaalselt digitud ja töötuse tulemusel saadud ala kontuuride võrdlus. Punane - töötlus; must - käsitsi.



Joonis 17. Eesti põhikaardi ja ETAK-i kõlvikute kihi erinevused. Punase ringiga märgitud alad puuduvad ETAK-i andmetest.

3.3 Uurimuse täiustamise kohad

Võrreldes antud tööga olid varasemad tööd ajalooliste kaartide tuvastamises kasutanud mitut kaarti erinevatest ajaperioodidest. Suurema hulga ajalooliste kaartide integreerimisega on võimalik jälgida ajas juhtunud muutusi järk-järgult, tuvastada ajaperioodid, millal muutus oli drastilisem ja võimalusel seostada see nt füüsiliste, majanduslike jm teguritega ning potentsiaalselt ka uurida tuleviku muutuste trende. Samuti saaks märgala katvuse tuvastamises võrrelda ka teiste maastike katvuste muutlikkusega. Nt Eha (2014) tuvastas oma töös korrelatsiooni erinevate maastikunähtuste/tegurite vahel (füüsiliste tegurite mõju talude paiknemisele). Märgalade katvuse uurimustega võiks integreerida nt maaparandussüsteemide tuvastamine ja mõju märgalade pindalale või linna- ja tööstuspiirkondade laienemise või kahanemise mõjud.

Nagu veamaatriksite põhjal oli näha on puhastatud ja puhastamata aladega kihtidel märgatav vahe tootja- ja kasutaja täpsustes. Täpsuse langus oli 4,6% võrra tootjatäpsuse puhul ning 32,7% kasutajatäpsuse puhul. Sodialade puhastamine kindlasti panustas rohkelt täpsemate tulemuste saavutamisesse. Kuigi kogutäpsuste puhul ei olnud erinevus nii suur on selle olulisus antud töö puhul väiksem. Kuna uurimuse eesmärgid oli märgalade pindala muutuste tuvastamine ja tuvastuse täpsuse hindamine oli märgalade polügoonide kuju ja alade kontuuride vaheline kattuvus palju olulisem, kui täpsus kogu ala kohta, millest suur protsent moodustas ühtlast polügooni, kus kontuuride põimumist ei saanud juhtuda. Mosaiikse maastiku puhul oleks kogutäpsuse määr madalam, kuna suurem osa kogualast oleks jaotatud pindobjektideks, mille kontuuride täpsust oleks vaja hinnata.

Märgalade ulatuste muutust ajaloolise ja tänapäeva kaartide vahel on võimalik põhjendada lisaks sellele, et ala on kuivendatud põllu- ja metsamaa otstarbeks ka sellega, et kaartide leppemärkide vahel on semiootilised erinevused, kuna märgala mõiste on ajas muutunud. Muutunud on ka kaardistamise täpsus. Tänapäeval saab maakattetüüpe eristada palju täpsemalt, kui seda sai 100 aastat tagasi, ent ajalooliste kaartide korrektsust me tänapäeval üle kontrollida ei saa (vähemalt antud juhul). Tänapäeva korrektsust ja ulatuse muutusi saab üle kontrollida kaugseire meetoditega nagu SAR või LiDAR (Klema, 2011).

Kokkuvõte

Märgalade olulisus on viimase sajandi jooksul muutunud palju märgatavamaks. Tänu keskkonna- ja looduskaitse arengule on Eestis ja mujal maailmas toimunud suured muutused positiivses suunas. Eestis on taastatud viimase kümne aasta jooksul 23000 ha soid, liidetud märgalaid Natura 2000 võrgustikku, ratifitseeritud Ramsari konventsioon ja käivitatud pingutusi märgalade uurimiseks, säilitamiseks ja taastamiseks. Läbi ajaloo on märgalade ulatus rohkelt muutunud, seda teame ajalooliste kaartide põhjal, mida geoinfosüsteemide tarkvarade töödeldes saab kasutada tänapäeva võrdluseks. Maastikutüüpide katvuse ja pindalamuutuste uurimiseks GISis on tänapäeval olemas mitmeid meetodeid, mida võib liigitada kolme kategooriasse: manuaalsed, pool-automaaitsed ja automaaitsed. Käesolevas töös kasutati pool-automaaitsel meetoodikat.

Antud töö eesmärk oli tuvastada märgalade kadu ulatust kasutades GIS meetodeid ning hinnata kasutatud meetoodika tõhusust. Töötlusalaks valiti Tartu Ülikooli geograafia osakonnas tuntud uurimispiirkonna, milleks on Porijõe valgla. Täpsemalt oli fookuses 43km² ala Sipe oja ümbrus. Töötluse aluseks oli 1935-1939 aasta Eesti Vabariigi taktikaline topograafiline kaart. Töötlusmeetoodikaks oli värvipõhine klasterdamine ning töötlemine matemaatilise morfoloogia operaatoritega – erosiooni ja laiendamisega, mis olid saadaval QGIS-i pistikprogrammina. Seejärel teostati ka manuaalset info korrastamist. Kuna töötluse meetoodika tugineb värvide eristamisele, valiti Maa-ameti geoportaalil ajalooliste kaartide valikust kõige vanema kaardi, kus oleks peale kantud Sipe oja ümbrus ja mille leppemärgid oleksid värvidega eristatud.

Töötlemise käigus saadi digitaalne kaardikiht, mis peegeldab märgalade katvust aastal 1937. Tuvastatud alade pindalaks saadi 142,47 ha. Võrdlemiseks tänapäeva olukorraga samal alal kasutati Eesti topograafia andmekogu märgalade andmekihti. Kahe kihi võrdlusega selgus märgalade ulatus, mis on kadunud, mis on juurde tulnud ning mis jäi muutumatuks. Kadunud alade puhul (mis moodustas 90% kogu töötluse käigus tuvastatud alast) selgus, et sellest 51,4% on muutunud puittaimestikuks, 22,3% lagealaks ja 13,9% haritavaks maaks.

Töötlemise käigus saadud ulatuse õigsust kontrolliti käsitsi vektoriseeritud kihiga, kuna kõige kindlam on leppemärke eristada inimsilmaga. Õigsuse määramiseks oli arvutatud veamaatriks, mis näitas, et antud meetodi tootjätäpsus oli 91,69%, kasutaja täpsus oli 91,32% ja kogutäpsus oli 99,44%, mis tähendab, et veamäär on väga väike.

Töö käigus leiti vastus püstitatud uurimusküsimustele:

Kui hästi on võimalik automaatselt tuvastada märgalaid ajaloolistelt kaartidelt?

Peale töötlemist on märgalade kontuur tõele lähedane, kuid värvipõhise klasterdamise käigus tekib töötlusväljale lisaks märgaladele ka hulk ebavajalikku sodi ning edaspidine töötlus võib olla töömahukas

Kui suures ulatuses on Sipe oja valgla märgalad muutunud viimase 100 aasta jooksul?

Kahanenud 71,85%. 90% ajaloolisest ulatusest on teisendatud muuks maakattetüübiks. 51,4% on muutunud puittaimestikuks (mets või põõsastik), 22,3% lagealaks (rohuma, muu lage ala) ja 13,9% haritavaks maaks (põld, aianduslik maa).

Metoodika sobis antud tööle hästi, kuna ala ei olnud väga suur ja töötuse käigus tekkinud ebataasused sai parandada manuaalselt. Kuid oluline oli ka pöörata tähelepanu kaardi füüsilistele (leppemärkide loetavus) ja semiootilistele (leppemärkide tähendus) omadustele ning arvestada kui suure tõenäosusega peab kujutletud info paika.

Summary

Anne-Liis Alev

Wetland detection from historical maps; a case study of Sipe stream catchment

Throughout history the extent of wetlands has changed greatly; we know this from historical maps, which—when processed with GIS software—can be used for comparison with the present day. Today there are many methods in GIS for studying land-cover and area changes, which can be classified into three categories: manual, semi-automated, and automated. This work was focused on semi-automated method.

The objective of this study was to determine the extent of wetland loss using GIS methods and to assess the effectiveness of the methodology used. The study area chosen was the Porijõgi catchment, a well-known research site in the Department of Geography at the University of Tartu. Specifically, the focus was on a 43 km² area around the Sipe stream. The baseline for processing was the tactical topographic map of the Republic of Estonia from 1935–1939. The processing methodology was color-based clustering and mathematical morphology operators—erosion and dilation—available as a QGIS Semi-automatic classification plugin. After that, manual data cleaning was also carried out. Because the method depends on distinguishing colors, the oldest historical map in the Estonian Land Board's geoportal that covered the Sipe stream area with color-differentiated symbols was selected.

During processing, a digital map layer was produced reflecting wetland coverage in 1937. The area identified was 142.47 ha. For comparison with the present-day situation in the same area, the wetlands layer from the Estonian topographic data repository was used. By comparing the two layers, we determined which wetlands have been lost, which have appeared, and which have remained unchanged. Of the lost areas (which accounted for 90% of the total area identified in processing), 51.4% have become wooded, 22.3% open land, and 13.9% arable land.

The accuracy of the processed extent was checked against a manually vectorized layer, since the most reliable way to distinguish symbols is by human eye. To determine accuracy, an error matrix was calculated, showing that the producer's accuracy was 91.69%, the user's accuracy was 91.32%, and the overall accuracy was 99.44%, indicating a very small error rate.

The study answered the research questions posed:

- How well can wetlands be automatically detected from historical maps?

After processing, the wetland outlines closely match reality, but color-based clustering also generates a lot of unwanted noise, and further processing can be labor-intensive.

- To what extent have wetlands in the Sipe stream catchment changed over the past 100 years?

They have decreased by 71.85%. Ninety percent of the historical extent has been converted to other land-cover types: 51.4% to woody vegetation (forest or shrubland), 22.3% to open land (grassland or other open areas), and 13.9% to arable land (field or horticultural land).

The methodology was well-suited for this study, since the area was not very large and irregularities arising during processing could be corrected manually. It was also important to pay attention to the map's physical properties (readability of the symbols) and semiotic properties (meaning of the symbols) and to assess how likely the depicted information is accurate.

Tänuavaldused

Sooviksin tänada oma juhendajat Evelyn Uuemaad abivalmi ja samas mõtlemapaneva juhendamise ja mõistliku suhtumise eest. Samuti tänan doktoranti Pamelat, kes aitas mind pistikprogrammi kasutamisega ja Heli Raagmat, kes aitas mul orienteeruda keerulises ülikoolisüsteemis. Tänan ka oma sõpru Liinat, Hannat ja Georgiit, kes toetasid mind vaimselt kogu õppe väitel.

Kasutatud kirjandus

3.4.5. Band processing—Semi-Automatic Classification Plugin 8.3.0.2 documentation. (s.a.). Salvestatud 22. mai 2025,

https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest/band_processing_tab.html

Anttila, M. (2017). *Tartu tänavanimestiku ajaline ja ruumiline kujunemine* [Tartu Ülikool].

<http://hdl.handle.net/10062/57575>

Bisson, M., Tadini, A., Gianardi, R., & Angioletti, A. (2021). The use of historical cartography and ALS technology to map the geomorphological changes of volcanic areas: A case study from Gran Cono of Somma-Vesuvius volcano. *Geomorphology*, 380, 107624.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107624>

Castilla, G., & Hay, G. J. (2008). Image objects and geographic objects. T. Blaschke, S. Lang, & G. J. Hay (Toim), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications* (lk 91–110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_5

Chen, Y., Chazalon, J., Carlinet, E., Ôn Vù Ngoc, M., Mallet, C., & Perret, J. (2024).

Automatic vectorization of historical maps: A benchmark. *PLOS ONE*, 19(2), e0298217.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298217>

Cheng, H. D., Jiang, X. H., Sun, Y., & Wang, J. (2001). Color image segmentation: Advances and prospects. *Pattern Recognition*, 34(12), 2259–2281. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(00\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00149-7)

Chiang, Y.-Y., Leyk, S., & Knoblock, C. A. (2014). A Survey of Digital Map Processing Techniques. *ACM Computing Surveys*, 47(1), 1–44. <https://doi.org/10.1145/2557423>

Congedo, Luca, (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

EELIS. (s.a.). Salvestatud 10. mai 2025, <https://infoleht.keskkonnainfo.ee/artikkel/382450555>

Eha, E. (2014). *Talude paiknemine Otepää looduspargis viimase 100 aasta jooksul* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/42910>

Global Wetland Outlook. (s.a.). Global Wetland Outlook. Salvestatud 1. aprill 2025,

<https://www.global-wetland-outlook.ramsar.org>

Hendre, J. (2023). *Talude kadumine ja tekkimine maastikul alates 1938. Aastast kuni tänapäevani* [Tartu Ülikool]. <https://hdl.handle.net/10062/90676>

Home page | The Convention on Wetlands, The Convention on Wetlands. (s.a.). Salvestatud 10. mai 2025, <https://www.ramsar.org/>

Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine | DIGAR. (s.a.). Salvestatud 19. aprill 2025,

<https://www.digar.ee/arhiiv/et/raamatud/15609>

- Kimmel, K., Kull, A., Salm, J.-O., & Mander, Ü. (2010). The status, conservation and sustainable use of Estonian wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 18(4), 375–395. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9129-z>
- Kirsimäe, P. (2015). *Eesti maakonnakeskuste kasvamise suunad ja põhjused ajalooliste kaartide põhjal* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/48457>
- Klemas, V. (2011). Remote Sensing of Wetlands: Case Studies Comparing Practical Techniques. *Journal of Coastal Research*, 27(3), 418. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00174.1>
- Koppa, H. (2006). *Ajaloolised kaardid maakasutuse dünaamika uurimisallikana Vana-Kuuste mõisa näitel*. <http://hdl.handle.net/10062/1174>
- Kucharczyk, M., Hay, G. J., Ghaffarian, S., & Hugenholtz, C. H. (2020). Geographic Object-Based Image Analysis: A Primer and Future Directions. *Remote Sensing*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/rs12122012>
- Kull, A., Kull, A., Uemaa, E., Kuusemets, V., & Mander, Ü. (2005). Modelling of excess nitrogen in small rural catchments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108(1), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.12.011>
- Leyk, S., Boesch, R., & Weibel, R. (2006). Saliency and semantic processing: Extracting forest cover from historical topographic maps. *Pattern Recognition*, 39(5), 953–968. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.10.018>
- Li, Z., Chiang, Y.-Y., Tavakkol, S., Shbita, B., Uhl, J. H., Leyk, S., & Knoblock, C. A. (2021). *An Automatic Approach for Generating Rich, Linked Geo-Metadata from Historical Map Images* (arXiv:2112.01671). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.01671>
- Liu, D., Toman, E., Fuller, Z., Chen, G., Londo, A., Zhang, X., & Zhao, K. (2018). Integration of historical map and aerial imagery to characterize long-term land-use change and landscape dynamics: An object-based analysis via Random Forests. *Ecological Indicators*, 95, 595–605. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.004>
- Mander, Ü., Kull, A., & Kuusemets, V. (2000). Nutrient flows and land use change in a rural catchment: A modelling approach. *Landscape Ecology*, 15(3), 187–199. <https://doi.org/10.1023/A:1008181811552>
- Mander, Ü., Kull, A., Tamm, V., Kuusemets, V., & Karjus, R. (1998). Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 41(3), 229–238. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(98\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(98)00061-9)
- Marvet, A. (s.a.). *Märgalade päeva konverents 2018 “Tüüpiline sookonverents – Eesti soode klassika” juturing „Soode sõda“*. UTTV. Salvestatud 22. mai 2025, <https://uttv.ee/naita?id=26700>

Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., Jørgensen, S. E., & Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28(4), 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>

Murin, N. (2022). *Maastikuelementide tuvastamine kaugseire abil* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/82856>

Märgalad. (s.a.). Elfond. Salvestatud 19. aprill 2025, <https://elfond.ee/tegevus/margalad>

O'Hara, R., Marwaha, R., Zimmermann, J., Saunders, M., & Green, S. (2024). Unleashing the power of old maps: Extracting symbology from nineteenth century maps using convolutional neural networks to quantify modern land use on historic wetlands. *Ecological Indicators*, 158, 111363. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111363>

Piškinaitė, E., & Veteikis, D. (2023). The Results of Digitizing Historical Maps: Comparison of Lithuanian Land-Use Structure in the 19th and 21st Centuries. *Land*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/land12050946>

Potter, H., & Treikelder, I. (2011). *Geodeesia ka kartograafia läbi aegade.*

Rahvusvahelise tähtsusega märgalade, eriti veelindude elupaikade konventsioon–Riigi Teataja. (s.a.). Salvestatud 27. märts 2025, <https://www.riigiteataja.ee/akt/13058000>

Sink, G. (2013). *Valjala kihelkonna asustus ja kohanimed ajalooliste kaartide põhjal* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/31331>

Zhang, Y., Zhang, X., Fang, W., Cai, Y., Zhang, G., Liang, J., Chang, J., Chen, L., Wang, H., Zhang, P., Wang, Q., & Zhang, Y. (2025). Carbon sequestration potential of wetlands and regulating strategies response to climate change. *Environmental Research*, 269, 120890. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120890>

Tomson, K. (2013). *Asustusstruktuuri muutused Kilti mõisa piirkonnas* [Tartu Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10062/31445>

Topograafilised lepped ja argid 2013–2020 kaardi jaoks 7C Digar viewer. (s.a.). Salvestatud 16. mai 2025, <http://www.digar.ee/id/et/nlib-digar:132183>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anne-Liis Alev

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Märgalade tuvastamine ajaloolistelt kaartidelt Sipe oja ümbruse näitel“, mille juhendajad on Prof. Evelyn Uuemaa ja Pamela Maricela Guaman Pintado reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Anne-Liis Alev

22.05.2025