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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

L. A. Mellini Liivimaa atlase Eestimaa kaardilehtede georefereerimine ja planimeetrilise täpsuse analüüs

Mihkel Paal

Juhendaja: Raivo Aunap, PhD

Tartu 2026

Annotatsioon

L. A. Mellini Liivimaa atlase Eestimaa kaardilehtede georefereerimine ja planimeetrilise täpsuse analüüs

Magistritöö eesmärk oli hinnata 19. sajandi alguse Mellini Liivimaa atlase planimeetrilist täpsust. Töö keskendus Eesti ala kaardilehtedele ja uuris nende moonutuste ruumilist mustrit ning selle mõju kaardilehtede mosaiikimisele. Analüüs põhines Mellini atlase ja tänapäevase referentsandmestiku mõisakeskuste leppemärkidel käsitsi märgitud homoloogsetel kontrollpunktipaaridel. Moonutuste hindamiseks kasutati diferentsiaalset moondeanalüüsi, mille abil koostati kümne kaardilehe moondeväljade kaardid. Tulemused näitavad, et atlase planimeetriline täpsus varieerub nii lehtede vahel kui ka lehtede sees ning kohati viitavad moondeväljade mustrid erinevate alusmaterjalide võimalikele liitekohtadele. Töö tulemusena valmis ka Mellini atlase Eesti alade kaardilehtede mosaiikimise teel loodud georefereeritud kaardikangas, mille loomise problemaatika kinnitas atlase geomeetrilist ebaühtlust.

Märksõnad: planimeetriline täpsus, ajaloolised kaardid, georefereerimine

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

Abstract

Georeferencing and analysis of the planimetric accuracy of the Estonian map sheets of L. A. Mellin's Atlas of Livonia

This master's thesis assessed the planimetric accuracy of L. A. Mellin's early nineteenth-century Atlas of Livonia. The study focused on the ten atlas sheets depicting present-day Estonia, analysed their distortion patterns, and examined the influence of these distortions on the creation of a georeferenced mosaic. Homologous control point pairs based on manor centres were used as input data, and distortion metrics were calculated using Differential Distortion Analysis. The results show that planimetric accuracy varies considerably both between and within the map sheets, while some distortion patterns point to seams between different source materials. The process of creating a georeferenced mosaic of the atlas sheets covering present-day Estonia further highlighted the geometric inconsistency of the atlas.

Keywords: planimetric accuracy, historical maps, georeferencing

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

Sisukord

1. Sissejuhatus....5
2. Mellini atlas....8
2.1 Atlase valmimislugu....8
2.2 Ülevaade Mellini atlasest....10
2.3 Mellini atlase tähtsus....11
2.4 Mellini atlase uurimine ja esitamine kaardirakendustes....13
3. Ajalooliste kaartide moonutuste uurimine....15
3.1 Ajalooline kaart kui infoallikas....15
3.2 Täpsuse mõisted ja moonutuste tekkepõhjused ajaloolistel kaartidel....15
3.3 Kontrollpunktid ja georefereerimine kui analüüsi alus....17
3.3.1 Homoloogsed kontrollpunktid....18
3.3.2 Kontrollpunktide vead ja määramatus....18
3.3.3 Kontrollpunktide valik....19
3.3.4 Teisenduse valik georefereerimisel....20
3.4 Planimeetrilise täpsuse näitajad ja graafiline kujutamine....24
3.4.1 Kontrollpunktide jäägid ja sobituse kvaliteet....24
3.4.2 Lokaalne moonutus ja selle graafiline kujutamine väljapõhiste näitajatega....26
3.4.3 Tänapäevased meetodid ja tööriistad....28
3.5 Diferentsiaalne moondeanalüüs....30
3.5.1 Moondevälja mustrite tõlgendamine DDA abil....33
4. Metoodika....35
5. Tulemused....38
5.1 Kaardilehtede summaarsed moondenäitajad....38
5.3 Kolme eristuvama kaardilehe moondenäitajad....40
6. Arutelu....45
6.1 Moondeväljade tõlgendus....45
6.2 Tulemuste tõlgendamise piirid....49
6.3 Mellini atlase kasutatavus ruumiandmete allikana....52

6.4 Mellini atlase kaardilehtede mosaiikimine ja selle problemaatika..... 53
6.5 Edasised uurimissuunad.....56
7. Kokkuvõte.....57
Summary.....59
Tänuavaldused..... 61
Kasutatud kirjandus..... 62
Lisad.....68
Lisa 1. Tallinna maakonna moondenäitajate kaardid.....68
Lisa 2. Haapsalu maakonna moondenäitajate kaardid.....69
Lisa 3. Paide maakonna moondenäitajate kaardid.....70
Lisa 4. Paldiski maakonna moondenäitajate kaardid.....71
Lisa 5. Pärnu maakonna moondenäitajate kaardid..... 72
Lisa 6. Kuressaare maakonna moondenäitajate kaardid.....73
Lisa 7. Tartu maakonna moondenäitajate kaardid..... 74
Lisa 8. Viljandi maakonna moondenäitajate kaardid.....75
Lisa 9. Rakvere maakonna moondenäitajate kaardid..... 76
Lisa 10. Võru maakonna moondenäitajate kaardid.....77
Lisa 11. DDA-analüüsis kasutatud kontrollpunktide paarid.....78

1. Sissejuhatus

Ajaloolised kaardid on oluline osa kultuuripärandist, kuid lisaks kunstilisele väärtusele peitub neis ka suur potentsiaal ajaloolise geograafilise info allikana ja uurimisobjektina (Jongepier jt, 2014; Lukas, 2014). Ajalooliste kaartide digiteerimine, GIS-tehnoloogiate areng ja erinevat eesmärki täitvate moondeanalüüsi meetodite väljatöötamine on teinud ajalooliste kaartide kasutamise ja analüüsimise senisest oluliselt kättesaadavamaks (Balletti, 2006; Reckziegel jt, 2021). See võimaldab laiendada ajalooliste kaartide kasutusvõimalusi ning siduda neid senisest paremini tänapäevaste ruumiandmete ja kaardirakendustega. Ajaloolise kaardimaterjali moonutuste analüüsimisel on kaks peamist tulemit: esiteks on võimalik hinnata kaardi kui ruumiandmete allika usaldusväärsust ja tuua välja selle kasutamise piirangud, teiseks võivad moonutuste mustrid anda olulist infot kaardi koostamise ja kasutatud alusmaterjalide kohta (Jenny ja Hurni, 2011; Tucci ja Giordano, 2011). Ajalooliste kaartide geomeetrilise usaldusväärsuse hindamine on eriti oluline siis, kui neid kasutatakse georefereerituna või kaasatakse GIS-analüüsi, sest sellisel juhul muutub kaart ajaloolisest objektist ruumiandmete allikaks (Jenny ja Hurni, 2011). Seda üldist probleemi ilmestab hästi Ludwig August Mellini Liivimaa atlas, mis on üks olulisemaid ja silmapaistvamaid teoseid Eesti kartograafia ajaloos (Varep, 1964).

Kui geodeetilisel alusel koostatud suuremõõtkavalisi topograafilisi kaardilehti on võimalik kergesti kokkuseadesse panna ja moodustada veebis avaldamise tarbeks ühtset georefereeritud kaardikangast ehk terviklikku mosaiikrastrit, siis Mellini atlase kaardilehed on üksteisest sõltumata kujutatud maakondade piirides ja nende kokkupanek põrkub mitmete geomeetriliste probleemidega. Mellini atlas koostati 18. sajandi lõpus ning koosneb üldkaardist ja 14 maakonnakaardist, millest 10 hõlmavad tänapäeva Eesti ala. Tegemist on oma aja kohta detailse ja suhteliselt suuremõõtkavalise teosega, mis pakub väärtuslikku infot ajaloolise asustuse, halduskorra, teedevõrgu ja loodusgeograafiliste nähtuste kohta (Varep, 1964). Samas puudub atlasel kindel geodeetiline alus ning see on valdavalt koostatud olemasolevate kaartide ja korrespondentidelt saadud teabe põhjal, mistõttu võib selle geomeetriline usaldusväärsus ruumis oluliselt varieeruda (Mellin, 1798; Varep, 1964). Vaatamata Mellini atlase olulisusele Eesti kartograafia ajaloos on selle valmimisprotsessi ja kasutatud alusmaterjalide kohta teada võrdlemisi vähe. Mellin ise viitab atlase eessõnas töö käigus ilmnenud takistustele ning sellele, et kõiki täpse atlase koostamiseks vajalikke eeldusi ei olnud võimalik täita (Mellin, 1798). Atlase koostamis- ja ilmumisprotsessi mõjutasid lisaks

ka praktilised ja ajaloolised asjaolud, sealhulgas 1797. aasta halduskorra muutus, mille tõttu jäi atlase lehtede jaotus seotuks juba osaliselt vananenud halduspiiridega (Varep, 1964).

Käesoleva magistritöö käigus loodi Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide rakenduse tarbeks terviklik Mellini atlase Eesti alasid kujutavate kaardilehtede kangas. Antud töös tähistab mosaiik georefereeritud kaardilehtede ühendamisel saadud koondrastrit ja kangas viitab mosaiigi sujuvale ja geomeetriliselt ühtlasele lõppkujule. Mosaiikimise käigus ilmnes, et üksikute lehtede georefereerimisest ja mosaiikimisest üksi ei piisa ühtse ja geomeetriliselt täpse kanga loomiseks. Kaardilehtede kokkusobitamisel ilmnesid tugevad geomeetrilised ebakõlad lehtede vahel ja nende sees ning lehtede servade ühitamise probleemid.

Selle töö käigus tekkis paratamatu vajadus välja selgitada moonutuste ruumiline paiknemine. Käesolev magistritöö kasvas välja praktilisest vajadusest võtta arvesse, et kaardilehed ei moodusta ühtset geomeetriliselt sidusat tervikut. Kuna Mellini atlase kaardilehed näivad olevat koostatud eri kvaliteedi ja päritoluga alusmaterjalide põhjal, võib oletada, et moonutused ei ole juhusliku jaotusega ja peegeldavad atlase koostamisloogikat, kasutatud alusmaterjale ja kohalikku andmekvaliteeti. Moonutuste uurimine on seega oluline atlasel leiduva ruumilise info usaldusväärsuse hindamiseks ning ka selleks, et mõista atlase kujunemislugu laiemalt.

Kuigi Mellini atlas on Eesti kartograafia ajaloos hästi tuntud ning seda on ajaloolisest ja kirjeldavast vaatepunktist põhjalikult käsitletud (Varep, 1964), ei ole selle geomeetrilist täpsust ega lokaalsete moonutuste mustreid tänapäevaste GIS-meetoditega seni süstemaatiliselt uuritud. Seetõttu ei ole piisavalt selge, millisel määral saab atlast kasutada usaldusväärse ruumiandmete allikana ja milliseid piiranguid selle geomeetriline kvaliteet kasutusele seab.

Edaspidi kasutatakse geomeetrilist täpsust üldisema mõistena. Käesoleva töö keskmes on selle üks osa ehk planimeetriline täpsus, mis kirjeldab seda, kuivõrd vastavad atlasel kujutatud nähtuste vahelised kaugused ja suunad nende tegelikele ruumilistele suhetele (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014).

Käesoleva magistritöö eesmärk on anda kvantitatiivne hinnang Mellini atlase kui ruumiandmete allika planimeetrilisele täpsusele ning analüüsida atlasel esinevate moonutuste ruumilist jaotust ja nende võimalikke seoseid atlase koostamisprotsessiga.

Käesoleva magistritöö uurimisküsimused on järgmised:

1. Millised on L. A. Mellini Liivimaa atlase kaardilehtede moonutused?
2. Kuidas need moonutused geograafiliselt jaotuvad ja millega võivad need seotud olla?
3. Milles seisneb L. A. Mellini Liivimaa atlase kanga loomisel erinevate kaardilehtede mosaiikimise problemaatika ning kuidas on see seotud moonutuste jaotumisega?

2. Mellini atlas

Krahv Ludwig August Mellini (edaspidi lihtsalt Mellin) elulugu ja atlase valmimist on detailselt kirjeldanud Endel Varep 1964. aastal Tartu Riikliku Ülikooli toimetiste all ilmunud artiklis “Count L. A. Mellin and his “Atlas of Livonia”” (Varep, 1964), 1955. aasta artiklis “L. A. Mellini Liivimaa atlas ning selle tähtsus Eesti NSV territooriumi geograafilise uurimise ajaloos” (Varep, 1955) ja Indrek Jürjo (2003). Krahv Ludwig August Mellin sündis 23. jaanuaril 1754 Tuhalas. Mõisa omaniku pojana omandas ta hea hariduse tänu koduõpetajale. Nooruspõlves reisis Mellin Holstein-Gottorpi printside kaaslasena Euroopas ringi ning õppis mõnda aega Bologna ülikoolis, oma rännakutel õppis ta Liivimaad järjest enam hindama. 1773–1783 teenis ta sõjaväes, kus õppis joonestuskontoris kaartide valmistamiseks vajalikke oskuseid, sealhulgas topograafiat ja kartograafiat. Mellin toetas talupoegadele suurema vabaduse andmist ja oli ühiskondlikult aktiivne, samuti oskas ta eesti keelt ja pidas lugu eesti rahvast, teda huvitasid rahvamuusika ja muistised. Mellini tegevus ja mõttelaad olid mõjutatud valgustusajastu humanistlikust maailmavaatest, ta uskus läbi teaduse arengu ühiskonna edendamisesse ja talurahva olukorra parandamisesse. See ilmneb nii tema atlase koostamise eesmärkides kui ka talurahva hariduse ja õiguste toetamises. Mellin suri Riias 1835. aastal. (Varep, 1955; Varep, 1964; Jürjo, 2003)

2.1 Atlase valmimislugu

Mellini atlase valmimisloo rekonstrueerimine tugineb võrdlemisi vähestele allikatele ning hilisematele kokkuvõtetele. Üheks varasemaks kirjeldavaks allikaks on 1803. aasta novembris Weimaris ilmunud *Allgemeine geographische Ephemeriden*-is avaldatud „*Höchstinteressante Anekdote*“ (“Höchstinteressante Anekdote”, 1803), mida kasutab alusmaterjalina ka Endel Varep oma 1964. aasta artiklis (Varep, 1964). Kõige olulisem ajend atlase valmimisel oli Mellini sügav isiklik teaduslik huvi Liivimaa vastu. Samal ajal tekitas nõudluse täpsete kaartide järele 18. sajandi lõpul aset leidnud kiire majanduslik areng ja kasvavad geopoliitilised pinged Läänemere regioonis. Veel ühe ajendi atlase koostamise alustamiseks andis kroonprints Pauli Liivimaa külastus 1782. aastal. Kroonprints vajas kaarti Liivimaa väeosade paiknemise kohta, kuid avastas, et riigi ühe arenenuma provintsi kohta ei leidu piisavalt täpset kaarti. Kuna kroonprints teadis Mellini tema kartograafiliste oskuste tõttu, siis esitas ta krahvile käsu atlas valmistada. Mellin võttis ülesande hea meelega vastu, kuid mainis, et piirkonna vähese uurituse tõttu võib atlas olla ebatäpne. Mellin viitab tiitellehel

takistustele kaardi valmimisel ning ka sellele, et graveerijad asusid kaugel Saksamaal, mistõttu joonised ja parandused pidid korduvalt edasi-tagasi rändama (Mellin, 1798). Paul I otsus 1797. aastal asehalduskord lõpetada ja naasta endise halduskorra juurde muutis atlases kujutatud maakonnapiirid juba atlase ilmumise hetkel vananenuks. Atlase lehtede jaotust ei olnud sellel hetkel enam võimalik muuta, sest suurem osa kaardilehti olid selleks ajaks juba valminud, Mellin viitab sellele ebatäpsusele ka atlase tiitellehel. Aastal 1798 kehtestas Paul I tsensuuri ja andis käsu lõpetada Baltimaade piirkonna kaartide levitamise, kuna neid peeti sõjalise tähtsusega materjalideks. Mellini atlase lehed konfiskeeriti ja eraisikutel kästi kaardid ära anda. Samuti andis Paul I välja käsu Mellin arreteerida, tuues põhjuseks, et Mellin lasi tundliku sisuga kaarte graveerida välismaal. Olukord lahenes ja Mellini ei arreteeritud, kuid tal kästi loovutada kõik atlasega seotud materjalid. Atlase ilmumine peatus mitmeks aastaks ning sai jätkuda alles mõni aeg pärast Paul I surma 1802. aastal. (“Höchstinteressante Anekdote”, 1803; Varep, 1964)

Sissejuhatuses viitab Mellin oma atlasele kui täiendavale materjalile August Willem Hupeli teatmeteose “Topographische Nachrichten von Lief- und Ehstland” kõrvale. Oma sõnul kulutas Mellin atlase valmimisele 14 aastat oma elust. Mellini sõnul võib tema atlast vaadata kui eeltööd, mida kasutada alusena tulevikus täpsemate kaartide koostamisel, sest atlases esineb vigu. (Mellin, 1798)

Atlase väljaandmise üldkäigu kõrval on võimalik Varepi (1964) põhjal rekonstrueerida ka üksikute kaardilehtede ilmumise ajajoon. Atlas ilmus üksikute kaardilehtedena pikema aja jooksul. Esimesena graveeriti Riia maakonna kaart 1791. aastal, sellele järgnesid Cēsise, Valmiera ja Valga kaardid ning seejärel Võru, Tartu, Viljandi ja Pärnu lehed. Viimased neist ilmusid trükis 1798. aasta alguses. Sama ajaks olid ka ülejäänud maakonnakaardid valdavalt joonistena olemas, kuid 1798. aastal jõuti graveerida veel Kuressaare, Haapsalu ja Tallinna lehed ning Paldiski, Rakvere ja Paide kaardilehtede valmimine lükkus edasi. Pärast Paul I kehtestatud keeldu katkes atlase väljaandmine mitmeks aastaks. 1802 ilmusid Kuressaare ja Haapsalu, 1803 Tallinn, Paldiski ja Paide ning viimasena, hiljemalt 1803. aasta lõpus Rakvere kaardileht. Sellega ei olnud siiski veel kogu atlas lõplikult ilmunud, sest üldkaart, tiitelleht ja eessõna, mis olid küll valmis juba 1798. aastal, avaldati alles hiljem. Varepi järgi olid need trükis olemas 1810. aasta lõpuks, mistõttu saab atlase koostamise ja väljaandmise lõppenuks lugeda alles 1810. aastaga. (Varep, 1964)

2.2 Ülevaade Mellini atlasest

Mellini atlas koosneb 14 kreisi- ehk maakonnakaardist ja ühest üldkaardist, 10 kaarti hõlmavad tänapäeva Eesti ala ja 4 tänapäeva Läti ala. Eesti ala kaardid on Kuressaare maakond, Pärnu maakond, Haapsalu maakond, Paldiski maakond, Tallinna maakond, Paide maakond, Rakvere maakond, Viljandi maakond, Tartu maakond ja Võru maakond. Tiitelleht, eessõna ja pealkirjad on saksa ja prantsuse keeles. Täielikud atlase eksemplarid on tänapäeval haruldased, kuna atlas ilmus lehtede kaupa.

Atlase mõõtkava on umbes 1:200 000, kaardivõrk on kujutatud 1° sammuga ning nullmeridiaanina on kasutatud Ferro meridiaani. Atlase kaardilehed on esitatud trapetsoidprojektsioonis. Paralleelid on sirged ja paralleelsed, meridiaanid sirged ja kergelt koonuses. Atlase maakonnakaardid on koostatud 1783. aasta asehalduskorra järgi. Oluline on mainida, et kaardilehtede geodeetiline ehk matemaatiline alus tugineb üksikutele astronoomiliselt määratud punktidele, atlasel puudub tänapäevane triangulatsioonivõrk. Seetõttu on atlase planimeetriline täpsus suhteliselt madal, mis oli Mellinile atlast koostades teada. Antud puudujääk osutas juba atlase ilmudes vajadusele viia läbi triangulatsioon Eesti aladel, et oleks võimalik toota täpsemaid kaarte. Friebe (1794) järgi on võimalik rohkem teada saada Mellini poolt kasutatud astronoomiliste määrangute kohta: Kindralmajor S. v. Laurenberg on määranud Dünamünde, Riia, Tartu, Viljandi, Pärnu ja Tallinna asukohad. Kuressaare, Tahkuna ja Haapsalu määrangud pärinevad Peterburi Keiserlikust Akadeemiast ning Friebe mainib ka, et mõne täpsustamata koha geograafilised koordinaadid on arvutanud Mellin isiklikult.

Atlase alusmaterjal on väga mitmekesine ning detailsed allikad alusmaterjalina kasutatud täpse kaardimaterjali kohta puuduvad. Varepi (1964) kaudu on teada, et Mellin kasutas ulatuslikult mõisakaarte ning vähemal määral Teaduste Akadeemia poolt avaldatud kaarte ja vene sõjaväetopograafide koostatud piirikaarte. Kuna olemasolevad andmed ja kaardid olid tihti puudulikud, vananenud või ebatäpsed ning ulatuslike mõõdistuste jaoks ressursse ei olnud, siis palus Mellin ajakohase info kogumisel posti teel kohalike abi, luues tänapäevases mõistes korrespondentide võrgustiku. Atlase eessõnas on nimekiri 202 nimega, kes Mellini atlase valmimisel aitasid, saates talle kohalikke kaarte ja kirjeldusi ning parandusi juba trükis olevatele kaartidele. Atlase valmimisele aitasid kaasa muuhulgas pastorid, mõisnikud ja rüütelkonna ametnikud (Mellin, 1798; Varep, 1955). Lisaks viis Mellin ka ise läbi mõned üksikud mõõtmised ja üritas võimalusel saadud andmed ise üle kontrollida (Varep, 1964).

Puudub detailne info selle kohta, mis määral ja mahus kaardi koostamisel erinevaid alusmaterjale kasutati.

Atlas on 18. sajandi lõpu kohta detailne ning selle sisuline rõhuasetus on asustusel, teedevõrgul ja haldusjaotusel. Asustus- ja taristuobjektidest on eristatud muu hulgas kirikud, mõisakeskused, kõrtsid ja veskid. Teed on liigitatud postimaanteedeks, peamaanteedeks ja kirikuteedeks. Samas on ka atlase loodusgeograafiline pool rikkalik ning hõlmab saari, jõgesid, madalikke, künkaid, metsi ja soid. Kaardilehtede servadesse on lisatud piirkonnaga seotud ehisjoonised (Varep, 1955). Atlase üldkaardi ja tiitellehe graveerijad on teadmata. Teadaolevad graveerijad on Varepi järgi järgmised: Carl Jäck graveeris Riia, Valmiera, Valga, Tartu ning tõenäoliselt ka Cēsise ja Võru kaardilehed. Carl Jätting graveeris Viljandi, Pärnu ja Haapsalu kaardilehed. J. N. Champion graveeris Paldiski ja Paide kaardilehed. F. G. Franz graveeris Kuressaare kaardilehe. Tallinna kaardilehe graveeris F. Guimpel ja Rakvere kaardilehe J. B. Hoesset (Varep, 1964).

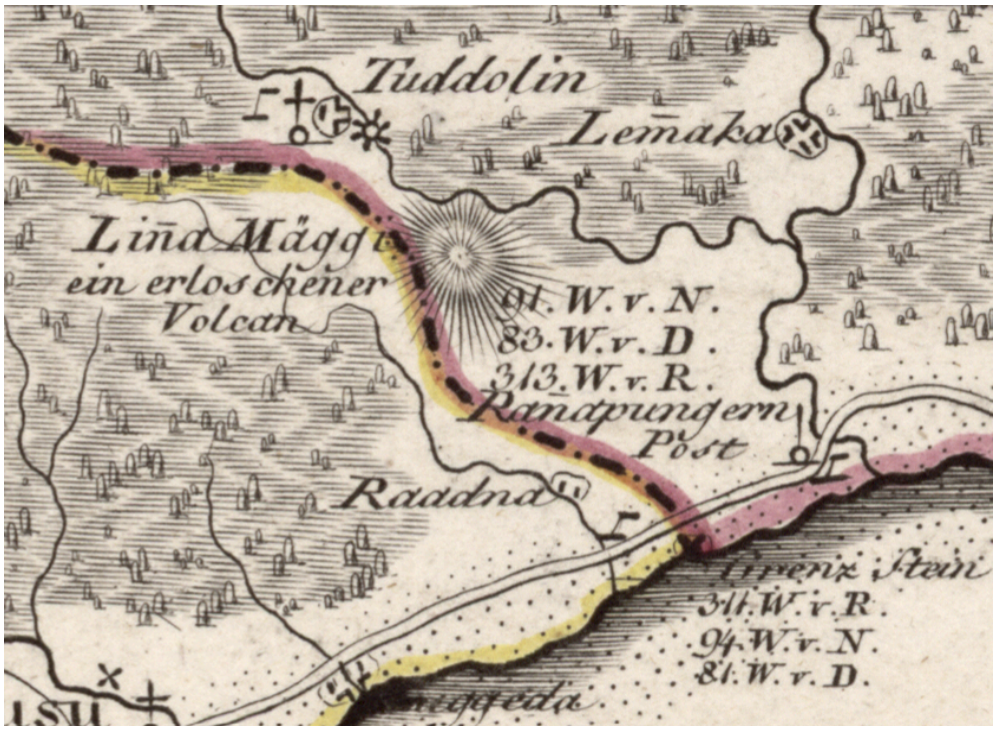
Atlase lehtede kohta ilmusid vahetult pärast nende ilmumist arvustused Weimaris avaldatud ajakirja "*Allgemeine geographische Ephemeriden*" rubriigis "*Charten-Recensionen*". Arvustused ilmusid kaardilehtede kaupa ning nendes kirjeldati ning arvustati kaardilehtede formaati, mõõtkava, trükitehnilist teostust, ehisjooniseid, kaardi loetavust ja üldist muljet ("*Atlas von Liefland*", 1805). Atlase sisu puhul hinnati peamiselt ja väga üksikasjalikult geograafiliste koordinaatide täpsust ("*Liefländische Karten*", 1798). Mellini atlases leiduvaid olulisemate punktide geograafilisi pikkuseid ja laiuseid võrreldi teistest atlastest pärit infoga ning nende võrdlemiseks koostati tabeleid. Suure kiituse pälvis Kuressaare maakonna kaart, mida peeti märkimisväärselt täpseks, sest Mellin sai selle koostamisel kasutada Liivimaa viitsekuberneri Campenhauseni alluvuses töötanud maamõõtjate kaardimaterjali ("*Der Hapsalsche Kreis*", 1802).

2.3 Mellini atlase tähtsus

Varepi (1964) järgi oli Mellini atlase ilmumine Eesti alade geograafilise uurimise ajaloos oluline ja tähelepanuväärne sündmus. Tegemist oli esimese tervikliku Baltimaid käsitleva atlasega, mis koondas kokku suurel hulgal Eesti ja Liivimaa kohta leiduvat topograafilist infot ja soodustas oluliselt edasist Eesti geograafilist uurimist. Võrreldes hilisemate topograafiliste kaartidega ei põhine Mellini atlas triangulatsioonil ja selle üldine planimeetriline täpsus on

madal, seetõttu kujunes atlase väljaandmine oluliseks vaheetapiks varasemate üldistavate kaartide ja hilisemate triangulatsioonil põhinevate täpsemate kaartide vahel.

Tänapäeval on Mellini atlas eriti väärtuslik ajaloolis-geograafilise allikana. Atlase põhjal on võimalik uurida 18. sajandi lõpu asustust, teedevõrku, haldusjaotust, muistiseid ja mitmeid loodusgeograafilisi nähtuseid. Varep toob välja, et atlase põhjal saab jälgida näiteks rannajoone arengut, saarte liitumist mandriga ja järvede soostumist. Tähelepanuväärne on ka atlasel kujutatud toponüümika, Eesti aladel leidub umbes 7000 kohanime, mis on paljudel juhtudel saksakeelsete nimede kõrval esitatud ka eesti keeles. Seetõttu on atlas oluline lisaks oma kartograafilisele väärtusele ka ajaloolise asustuse, kohanimede ja maastikumuutuste uurimisel. Siinkohal tuleb välja tuua ka atlase koostamisviisi piirangud. Mellin koondas andmeid väga erinevatest allikatest ning kogu temani jõudnud info ei olnud usaldusväärne, mistõttu leidub atlases ka eksimusi. Tuntuim selline on Tartu maakonna kaardilehele Tudulinna lähedale märgitud kustunud vulkaan (joonis 1), mida hiljem valminud Rakvere maakonna kaardilehel enam ei esine.



Joonis 1. Atlasele ekslikult märgitud kustunud vulkaan Tudulinna läheduses Tartu maakonna kaardilehel. Allikas: kuvatõmmis Library of Congress arhiivist (Library of Congress, i.a).

Kokkuvõttes seisneb Mellini atlase väärtus selles, et see sisaldab hulgaliselt teavet 18. sajandi lõpu Eesti- ja Liivimaa kohta, kuid on samal ajal ka ise uuritav ajalooline objekt. Selle kasutamisel tuleb siiski arvestada atlase koostamisviisi, võimalike alusmaterjalide erineva

kvaliteedi ja geomeetrilise ebatäpsusega. Seetõttu aitab planimeetrilise täpsuse analüüs täpsustada, millistel tingimustel saab atlast ajaloolis-geograafilise allikana kasutada.

2.4 Mellini atlase uurimine ja esitamine kaardirakendustes

Vaatamata atlase olulisusele Eesti kartograafia ajaloos on selle uurimine seni tuginenud peamiselt ajaloolistele ja kirjeldavatele käsitlustele. Mellini atlase kohta on kõige põhjalikumalt kirjutanud Endel Varep, kelle töödes käsitletakse nii atlase koostamislugu kui ka selle tähendust Eesti geograafilise uurimise ajaloos (Varep, 1955; Varep, 1960; Varep, 1964). Senistes käsitlustes on põhirõhk olnud atlase ajaloolisel taustal, sisul ja tähtsusel, mitte selle geomeetriliste omaduste süstemaatilisel analüüsil. Mellini atlase tänapäevaseks kasutamiseks on oluline selle kaardilehtede digiteerimine, georefereerimine ja mosaiikimine. Georefereeritud rastrina on võimalik ajaloolist kaarti kasutada GIS-keskkonnas ning võrrelda seda teiste ajalooliste kaartide ja tänapäevaste ruumiandmetega (Jenny ja Hurni, 2011). Üks sarnane lahendus on loodud Mellini atlase Läti alasid kujutavate kaardilehtede põhjal portaalis Dodies.lv. Portaalis on georefereeritud ajaloolised kaardid kuvatud tänapäevase aluskaardi peal. Mellini atlase kihina on kasutatud Library of Congressi materjali (dodies.lv, i.a.). Antud lahenduse puhul on siiski näha, et kõrvuti asetsevate kaardilehtede servades ei lange maakonnapiirid, teed ja hüdrograafiline võrk omavahel kokku, mistõttu jääb üldpilt geomeetriliselt ebaühtlaseks (joonis 2).



Joonis 2. Kuvatõmmis Mellini atlase Läti aladest ajalooliste kaartide portaalis Dodies.lv. Kõrvuti asetsevate kaardilehtede servades on näha piiride, hüdrograafilise võrgu ja teede omavahelisi nihkeid. Allikas: kuvatõmmis portaalist Dodies.lv (dodies.lv, i.a.).

Käesolev magistritöö sai alguse Mellini atlase Eesti alasid kujutavate kaardilehtede mosaiikimisest ja ühtse georefereeritud kaardikanga loomisest, mis on ka töö üks oluline väljund (vt peatükk 6.4). Töö tulemusena valmis kümnest Eesti ala kujutavast kaardilehest ühtne ja sujuv kaardikangas (joonis 3), mis anti üle Maa- ja Ruumiametile ajalooliste kaartide rakenduses avaldamiseks. Rakenduses avaldamise hetkel oli Liivimaa atlas kõige vanem Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide kaardirakenduses esitatud georefereeritud kaart.



Joonis 3. Mellini atlase georefereeritud kaardilehtedest mosaiikimise teel loodud kangas. Allikas: autori kuvatõmmis Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide rakendusest (Maa- ja Ruumiamet, i.a).

Kanga loomise käigus ilmnes, et probleemaatika ei seisne ainult kõrvuti paiknevate kaardilehtede servade omavahelises mittesobitumises. Atlasel tervikuna on madal ning ruumiliselt ebaühtlane planimeetriline täpsus, mis avaldub nii naaberlehtede vaheliste erinevuste kui ka üksikute lehtede sees esinevate moonutustena. See tõi esile vajaduse uurida atlase geomeetrilisi omadusi süstemaatilisemalt, et kirjeldada selle täpsuse üldist taset, ruumilist varieeruvust ja võimalikke mustreid ning anda hinnang, kuidas ja milliste piirangutega saab atlast tänapäeval ajalooliste ruumiandmete allikana kasutada. Just sellest vajadusest lähtub järgmine peatükk, kus käsitletakse ajalooliste kaartide moonutuste uurimise teoreetilisi lähtekohti ja meetodeid.

3. Ajalooliste kaartide moonutuste uurimine

3.1 Ajalooline kaart kui infoallikas

Ajaloolised kaardid on väärtuslikud infoallikad ja oluline osa kultuuripärandist (Pearson, 2006; Reckziegel jt, 2021). Varasemalt on ajaloolastel olnud põhiline roll ajalooliste kaartide kui arhiivmaterjali uurimises, kuid GIS-tehnoloogiate arengu tõttu on ajalooliste kaartide analüüsimine saanud geograafide ülesandeks (Balletti, 2006). Ajalooliste kaartide kasutus on viimastel kümnenditel märgatavalt laienenud, sest digiteeritud kaardikogud, georefereerimine ja kasutajasõbralikud GIS-lahendused on teinud ajalooliste kaartidega töötamise kättesaadavaks (Tsorlini jt, 2014). Georefereerimine on seejuures oluline analüüsi ja kasutamise eeltingimus, pärast kaardi sidumist tänapäevase koordinaatide süsteemiga saab sellel leiduvat infot süstemaatiliselt kasutada (Kersten jt, 2024). Ajaloolisi kaarte on GIS-meetoditega analüüsitud näiteks maakasutuse (Pearson, 2006), teedevõrgu (Ntassiou, 2024), demograafia (Ekamper, 2010), plagiariseerimise (Symington jt, 2002) ja hüdrograafilise võrgu muutumise (Frajer jt, 2021) teemadel.

Samas ei muuda digiteerimine ja georefereerimine ajaloolist kaarti koheselt usaldusväärseks ruumiandmete allikaks (Loran jt, 2018). Enne kaardilt saadava info kasutamist tuleb hinnata, kui täpselt ja milliste piirangutega see mineviku olukorda kujutab (Tucci ja Giordano, 2011; Schaffer jt, 2016). Seetõttu on ajalooliste kaartide uurimisel keskne küsimus kaardi täpsus ja sellest tulenev ruumilise info usaldusväärsus (Ostafin jt, 2021).

3.2 Täpsuse mõisted ja moonutuste tekkepõhjused ajaloolistel kaartidel

Ajaloolise kaardi täpsus ei ole ühetähenduslik omadus, vaid hõlmab nii kaardil kujutatud nähtuste sisulist kvaliteeti, kaardil esitatud informatsiooni ajalist kehtivust kui ka objektide ruumiliste suhete geomeetrilist korrektsust. Neid aspekte käsitletakse kirjanduses vastavalt topograafilise, kronomeetrilise ja geomeetrilise täpsusena (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014; Lukas, 2014; Vaienti jt, 2025c). Topograafiline täpsus on defineeritud kui objektide kujutamise täielikkus ja temaatiline korrektsus. Kaarti luues peab koostaja tegema valiku, milliseid nähtuseid ja objekte kaardil kujutada. Topograafilise täpsuse defineerib see, kui kõrge sisulise kvaliteediga on valitud esitatavad nähtused kujutatud. Ehk siis, kas nähtused on kaardil korrektselt eristatud, klassifitseeritud ja (kartograafiliselt) kujutatud (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014). Kronomeetriline täpsus hõlmab endas kaardi kui füüsilise objekti

valmistamise aega ja kaardil oleva info ajalist kehtivust. Kaardi valmistamine võib võtta aastaid, mistõttu võib kaardil olev info olla erineva dateeringuga (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014). Kolmas täpsuse element ehk geomeetriline täpsus koosneb geodeetilisest ja planimeetrilisest täpsusest. Geodeetiline täpsus tähistab kaardi matemaatilise aluse täpsust, hõlmates muuhulgas projektsiooni, ellipsoidi ja nullmeridiaani valikut. Planimeetriline täpsus väljendab seda, kui täpselt vastavad kaardil kujutatud nähtuste omavahelised kaugused ja suunad nende tegelikele ruumilistele suhetele (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014).

Kuna geodeetilise ja planimeetrilise täpsuse hindamiseks on vaja erinevaid lähteandmeid, tuleb Mellini atlase uurimisel esmalt otsustada, millist geomeetrilise täpsuse aspekti on võimalik ja mõistlik hinnata. Kuigi Liivimaa atlase kaardilehtedele on märgitud Ferro meridiaani järgi koordinaadivõrk ja Mellin mainib atlase sissejuhatuses üksikute punktide asukoha astronoomilist määramist, ei ole atlasel teadaolevalt ühtset ja nõuetekohaselt dokumenteeritud geodeetilist alust (Varep, 1964). Sellest lähtuvalt ei ole võimalik Liivimaa atlase geodeetilist täpsust usaldusväärselt hinnata. Seetõttu tuleb Liivimaa atlase geomeetrilise täpsuse hindamisel keskenduda eelkõige sellele, kuidas avalduvad planimeetrilised moonutused kaardilehe ruumilises struktuuris.

Forstner ja Oehrli (1998) jagavad ajaloolistel kaartidel esinevad vead kaheks: süstemaatilised ja juhuslikud vead. Süstemaatilised vead avalduvad globaalsete siirde-, orientatsiooni- ja mõõtkavavigadena, samas juhuslikud vead on tingitud mõõdistus- ja joonestusprotsessist ning mõjutavad üksikute nähtuste paiknemist lokaalselt. See jaotus on oluline antud magistritöö kontekstis, sest geomeetrilise täpsuse hindamisel tuleb arvestada nii kogu kaardilehte mõjutavate globaalsete vigadega kui ka lokaalsete moonetega.

Lisaks algsele mõõdistus- ja joonestusprotsessile võivad osa erinevustest olla seotud ka kaardimaterjalide hilisema muutumisega (Vaienti jt, 2025c). Jenny ja Hurni (2011) märgivad, et erinevad materjalid nagu paber või pärgament võivad aja möödudes venida või kokku tõmbuda, mis mõjutab kaardilehe mõõtmeid ja seeläbi geomeetriat. Samas ei pärine kõik ajaloolise kaardi ja tänapäevase referentsandmestiku vahelised erinevused algse kaardi koostamisest, vaid võivad tekkida ka hiljem ajaloolist kaarti uurides ja tõlgendades.

Plewe (2002) käsitleb ajalooliste kaartidega töötamisel tekkivat määramatust eeskätt kahe põhilise protsessi kaudu: nähtuse mõistelise määratlemise (*conceptualization*) ning mõõtmis- ja formaliseerimisprotsessi (*measurement process*) kaudu. Osa määramatusest tekib juba nähtuse mõistelisel määratlemisel, ehk sellest, kuidas reaalses maailmas esinev nähtus üldse

uurimisobjektina piiritletakse ja defineeritakse. Uue määramatuse tasandi lisab ajaloolise allika tõlgendamine (*interpretation*), kus uurija peab otsustama, millisele tänapäevasele objektile või nähtusele kaardil kujutatu vastab. Edasi võib määramatus suureneda info kodeerimisel (*encoding*) ehk selle viimisel formaalsesse andmekujusse, näiteks vektorobjektide või kontrollpunktide kujul GIS-tarkvaras. Selles etapis võib andmemudel või valitud esitusviis muuta algselt ebamäärase või mitmetähendusliku nähtuse liiga ühetähenduslikuks (Plewe, 2002).

Eeltoodust võib järeldada, et alati ei saa ajaloolise kaardi ja tänapäevase referentskaardi erinevusi tõlgendada puhtalt kaardi geomeetriliste vigadena ning tuleb arvestada ka uurimisprotsessis lisanduvat ebakindlust. Sellest hoolimata on käesoleva töö jaoks vajalik selline täpsuse mõiste, mida on võimalik empiiriliselt mõõta ja eri kaardilehtede vahel võrrelda. Käesolevas töös hinnatakse Mellini atlase planimeetrilist täpsust ehk atlasel leiduvate nähtuste vaheliste kauguste ja suundade vastavust tänapäevasele referentsandmestikule. Sellise määratluse abil on võimalik hinnata nii atlase üldist sobivust andmeallikana kui ka üksikutes piirkondades esinevaid lokaalseid moondeid.

3.3 Kontrollpunktid ja georefereerimine kui analüüsi alus

Selleks, et ajaloolist kaarti GIS-meetoditega analüüsida, tuleb see esmalt georefereerida ehk viia kindlasse koordinaatide viitesüsteemi, enamasti tänapäevase referentskaardi või referentsandmestiku kaudu (Narin ja Gullu, 2021). Koordinaatsüsteem määrab koordinaatide esitamise matemaatilise raamistiku, näiteks tasapinnalise ristkoordinaatsüsteemi teljed ja mõõtühikud. Koordinaatide viitesüsteem seob selle raamistiku Maa pindmikuga ja annab ühesed koordinaadiväärtused mingis geograafilises ruumis (Snyder, 1987). Georefereerimise käigus seotakse ajaloolise kaardi skaneering või raster koordinaatsüsteemiga, nii et seda saab edasi analüüsida ja teiste ruumiandmetega võrrelda (Korodi ja Hofmann, 2016; Reckziegel jt, 2021). Georefereerimise aluseks on kontrollpunktide paarid, mille arv sõltub kaardi omadustest, kasutatavast meetodist ja analüüsi eesmärgist ning võib ulatuda üksikutest punktidest sadade või tuhandete punktideni (Vervust jt, 2018, Zohar, 2019). Kontrollpunkti määramine tähendab ajaloolisel kaardil ja eeldatavalt täpsel referentskaardil kahe homoloogse ehk samale asukohale vastava punkti leidmist (Hu, 2010; Jenny ja Hurni, 2011).

Georefereerimine tõstab ajalooliste kaartide kartomeetrilist väärtust ja laiendab neil leiduva info kasutusvõimalusi teaduses. Affek (2013) eristab kasutatava georefereerimise seisukohalt

geodeetilise alusega ja geodeetilise aluseta kaarte. Tänapäevaste, geodeetilise alusega ja kõrge täpsusega kaartide georefereerimine on üldjuhul suhteliselt sirgjooneline (Zohar, 2019), kuid vanemate geodeetilise aluseta ajalooliste kaartide puhul on protsess keerukam ega ole täielikult standardiseeritud (Forstner ja Oehrli, 1998; Reckziegel jt, 2021). Seetõttu ei ole georefereerimine üksnes tehniline eeltöötluse etapp, vaid oluline osa kaardi analüüsimisest (Balletti, 2006; Bitelli jt, 2012).

3.3.1 Homoloogsed kontrollpunktid

Georefereerimine ja ajalooliste kaartide planimeetrilise täpsuse hindamine põhinevad homoloogsetel kontrollpunktidel ehk punktipaaridel, mis on tuvastatavad nii ajaloolisel kaardil kui ka tänapäevasel referentskaardil ning mida käsitletakse sama asukoha vastavusena kahes erinevas andmestikus (Jenny ja Hurni, 2011; Kersten, 2024). Nende punktide abil seotakse ajalooline kaart tänapäevase referentsruumiga ning luuakse alus nii georefereerimiseks kui ka järgnevaks täpsus- ja moondeanalüüsiks.

Homoloogse kontrollpunkti määramine ei tähenda siiski ainult visuaalselt sarnaste objektide leidmist kahel kaardil, vaid uurija põhjendatud otsust selle kohta, milline ajaloolisel kaardil kujutatud objekt vastab tänapäevases andmestikus samale reaalsele asukohale. Seetõttu sõltub kontrollpunktide kasutatavus lisaks objekti olemasolule ka selle ühesest tõlgendatavusest.

3.3.2 Kontrollpunktide vead ja määramatus

Kontrollpunktide määramisega kaasneb paratamatult tõlgenduslik määramatus. Hu (2010) toob välja, et osa ajaloolisel kaardil kujutatud nähtusi võib olla tänapäevaks kadunud, osa võib olla säilinud teise nime all ning mõnel juhul võib sama toponüüm tähistada ajaloolisel ja tänapäevasel kaardil erinevat objekti. Sellistes olukordades ei ole homoloogse punkti määramine täielikult üheselt lahendatav. Lisaks võivad kontrollpunktide täpsust mõjutada ajaloolise kaardi koostamisviis ja nähtuste kujutamine. Mõned objektid võivad olla kaardil kujutatud lokaliseeritud punkti asemel suurema sümbolina või näiteks suuremõõtmelised nähtused lihtsustatud kujutisena. Seetõttu ei ole kõik kontrollpunktid tänapäevases referentsandmestikus võrdselt tuvastatavad ning osa erinevustest võib tuleneda ka objektide identifitseerimise ebakindlusest, mitte üksnes ajaloolise kaardi geomeetrilisest ebatäpsusest (Hu, 2010; Jongepier jt, 2014). Üheks Mellini atlases esinevaks generaliseerimisvõtteks on nihutus, mida kasutatakse siis, kui objekti kujutav leppemärk ei mahu mõõtkava tõttu oma

tegelikku asukohta. Nähtavasti on sellist võtet kasutatud Surju läheduses Pärnumaal (joonis 4), kus tee ja Reiu jõgi kulgevad pikalt üksteise vahetus läheduses, kuid kaardil on neid üksteisest vähesel määral eraldatud, et säilitada loetavus.



Joonis 4. Üldistamisvõte Mellini atlases: tee ja Reiu jõe leppemärkide vahelist kaugust on muudetud, et vältida ülekatet ja säilitada nende omavaheline loogiline paiknemine. Allikas: kuvatõmmis Library of Congress arhiivist (Library of Congress, i.a).

3.3.3 Kontrollpunktide valik

Kontrollpunktid peaksid olema ruumiliselt võimalikult ühtlase tiheduse ja paiknemisega, kuid seda piirab kontrollpunktideks sobivate objektide olemasolu kaardilehe eri osades (Boutoura ja Livieratos, 2006; Bayer jt, 2010). Eelistada tuleks nähtusi, mis on ajas võimalikult stabiilsed ja üheselt tuvastatavad tänapäevasel referentskaardil, näiteks kirikuid, kloostreid, mäetippe, ristmikke, hüdrograafilise võrgu sõlmpunkte ja muid silmapaistvaid ning püsiva asukohaga objekte (Affek, 2013; Jongepier jt, 2014; Lampropoulos, 2023). Üldiselt aitab suurem kontrollpunktide arv vähendada kogu kaardilehe keskmist georefereerimise viga, kuid ainult juhul, kui lisatavad punktid on piisava kvaliteediga. Kui punktide arvu suurendamisega kaasneb ebatäpsete või väiksema kindlusega kontrollpunktide lisamine, ei pruugi tulemus paraneda ning georefereerimise kvaliteet võib hoopis halveneda (Lea ja Legleiter, 2016). Seetõttu on lisaks kontrollpunktide arvule oluline ka nende usaldusväärsus ja ruumiline

jaotus. Kirjeldatud põhimõtete alusel valitud kontrollpunktid moodustavad aluse teisenduste rakendamiseks, mille abil ajalooline kaart referentsandmestikuga sobitatakse.

3.3.4 Teisenduse valik georefereerimisel

Pärast kontrollpunktide määramist rakendatakse georefereerimise järgmise sammuna teisendus, mille eesmärk on sobitada analüüsitav ajalooline kaart võimalikult täpselt valitud referentskaardiga (Esri, i.a). Käesolevas töös tähistab teisendus matemaatilist mudelit, mille abil seotakse ajaloolisel kaardil määratud kontrollpunktide koordinaadid homoloogsete punktide koordinaatidega referentskaardil. Sobitus tähistab teisenduse tulemusena saavutatud vastavust ajaloolise kaardi ja referentskaardi vahel. Laias laastus võib eristada globaalseid ja lokaalseid teisendusi. Globaalsed teisendused rakendavad kogu kaardile ühtset matemaatilist mudelit, need võivad piirduda lihtsa siirde, pöörde ja mõõtkava muutusega, kuid hõlmata ka afiinset teisendust ning kõrgema astme polünoomseid teisendusi, mis võimaldavad üle kogu kaardi üldist kõverjoonelist deformatsiooni (Esri, i.a). Lokaalsed teisendused seevastu võimaldavad deformatsioonil ruumis paiguti varieeruda. Seetõttu mõjutab teisenduse valik otseselt seda, milliseid moondeid georefereerimise tulemus peegeldab ja kuidas tulemusi hiljem tõlgendada (Jenny ja Hurni, 2011).

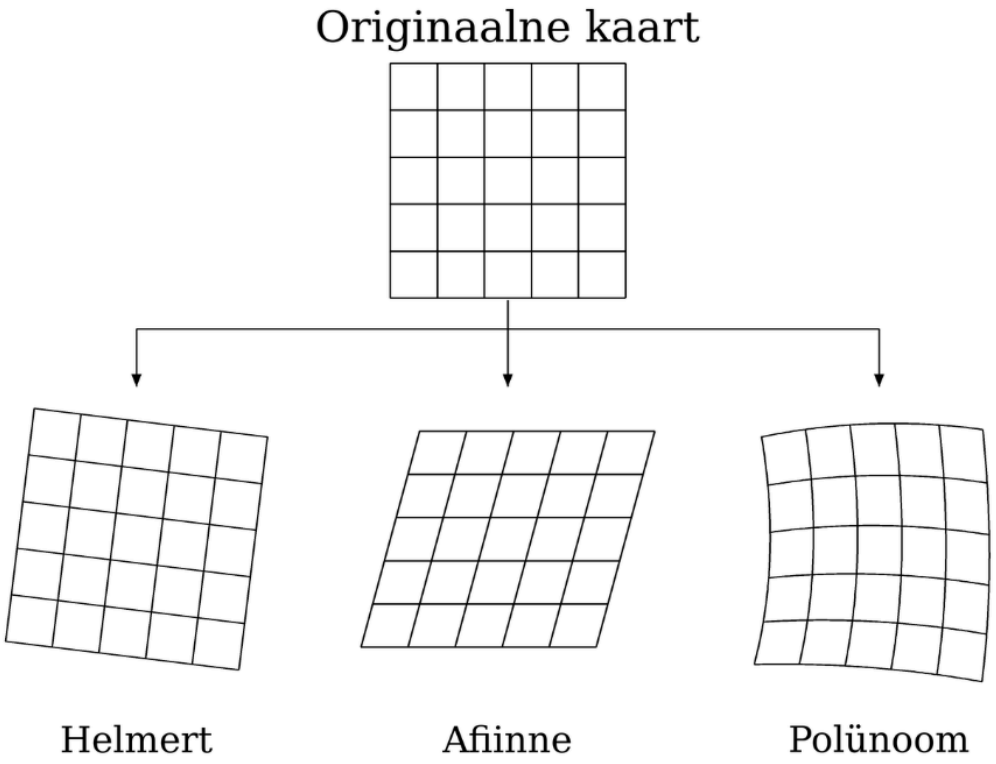
Tobler (1994) käsitleb georefereerimist bidimensionaalse regressioonina. Kahe kahetasandilise punktihulga vahel leitakse teisendus, mis annab vähimruutude meetodil parima lahendi. Teisenduse eesmärk on globaalselt minimeerida punktipaaride vahelist regressioonijääkide summat. Jääkide summat ehk teisenduse sobivust saab väljendada näiteks ruutkeskmise veana (RMSE), millele viidatakse praktikas tihti kui üldisele georefereerimise veanäitajale. RMSE kirjeldab koondnäitajana eeskätt sobitust valitud kontrollpunktide suhtes, mitte kogu kaardi lokaalset käitumist (Tobler, 1994). RMSE on sobiv esmase hinnangu jaoks, kuid selle esitamine lõpliku tulemusena on saanud omajagu kriitikat (Jenny ja Hurni, 2011; Jongepier jt, 2014). Levinumad globaalsed teisendused on Helmerti teisendus, mis kirjeldab kaardi siiret, pööret ja ühtlast mõõtkava muutust, ning afiinne teisendus, mis lisab sellele ka nihestumise (*shear*). Nii Helmerti kui ka afiinne teisendus on bidimensionaalse regressiooni lineaarsed erijuhud (Tobler, 1994). Afiinset teisendust saab kirjeldada kahe lineaarse funktsioonina, millest üks määrab teisendatud punkti x-koordinaadi ja teine y-koordinaadi (Tobler, 1994):

$$x(u,v) = \alpha_1 + \beta_{11}u + \beta_{12}v$$

$$y(u,v) = \alpha_2 + \beta_{21}u + \beta_{22}v$$

Siin tähistavad (u, v) teisenduse sisendkoordinaate ning $x(u, v)$ ja $y(u, v)$ selle teisendatud väljundkoordinaate. Parameetrid α_1 ja α_2 kirjeldavad siiret ning β-kordajad teisenduse lineaarset osa, milles väljenduvad pööre, mõõtkava muutus ning võimalik nihestus.

Kui afiinne teisendus ehk olemuselt 1. astme polünoom ei kirjelda kaardi moonutusi piisavalt, kasutatakse sageli k-astme polünoome, tavaliselt 2. või 3. astme polünoome (joonis 5). Kõrgema astme polünoomid lubavad globaalsel kaardi moonutamisel suuremat kumerust ja vähendavad seeläbi jääke kontrollpunktides, kuid põhinevad siiski vähimruutude meetodil ja ei pruugi kontrollpunkte täpselt läbida.

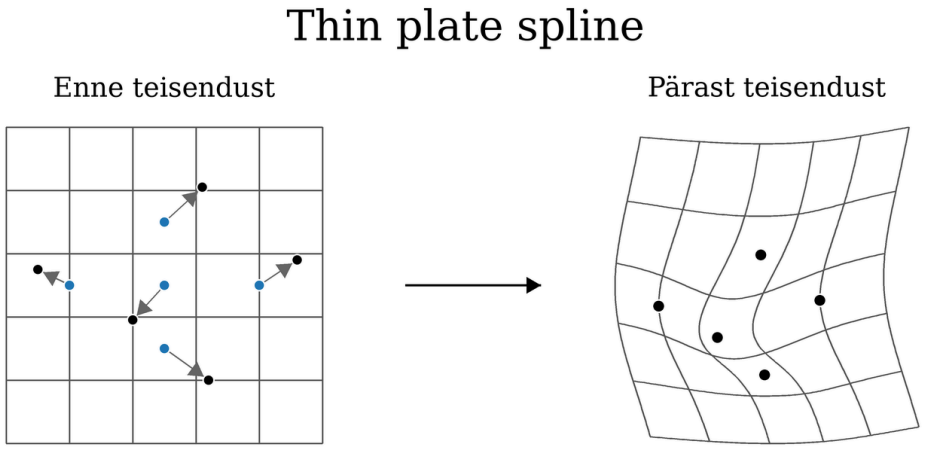


Joonis 5. Globaalsete teisenduste põhimõtteline võrdlus moondevõrkude abil. Helmerti teisendus säilitab ruudustiku täisnurgad ja kuju sarnasuse, afiinne teisendus lisab nihestumise ning võimaldab eri suundades erinevat mõõtkava, kõrgema astme polünoomne teisendus võimaldab aga kogu kaardi ulatuses kõverjoonelist deformatsiooni.

Brovelli ja Minghini (2012) katsetasid ajalooliste kaartide analüüsimisel erineva astme polünoome ja leidsid, et minimaalse RMSE-ga polünoomi aste ei ole erinevate kaartide lõikes

sama ning lisaks on oht, et kõrgema astme polünoom muutub kaardi servades või väheste kontrollpunktidega alades ebastabiilseks. Kõrgema astme polünoomide ebastabiilsuse foonil kasvavat RMSE-d tõdesid ka Hughes jt (2006).

Globaalsed teisendused kirjeldavad kontrollpunktide üldtrendi, rakendades kogu kaardile teisenduse samade parameetrite alusel. Seetõttu võivad lokaalsed moonutused jääda globaalse teisenduse keskmistamise varju, eriti kui moonutused on ruumis varieeruvad (Claeys Boùùaert jt, 2016). Kui eesmärk on kirjeldada moonutusi pideva väljana, kasutatakse lokaalseid teisendusi. Üheks levinumaks selliseks meetodiks on *thin plate spline* (TPS) ehk kummikile tüüpi (*rubber-sheeting*) teisendus (joonis 6), mille korral läbib teisendus kontrollpunkte täpselt ning deformatsioon muutub ruumis sujuvalt (Vervust jt, 2018; Chalkias jt, 2023).



Joonis 6. *Thin plate spline* teisenduse skeem moondevõrguga. Vasakul on georefereerimata kaart, paremal on sama kaart pärast teisenduse rakendamist. Kontrollpunktides on teisendus täpne, mistõttu on teisenduse jääk nendes punktides null.

TPS-teisendust võib ette kujutada kui elastse kummikile venitamist kontrollpunktide vahel nii, et teadaolevad kontrollpunktid sobitatakse täpselt paika, samal ajal kui ülejäänud ruumis jaotub deformatsioon sujuvalt. Matemaatiliselt tähendab see, et kõigi kontrollpunkte täpselt läbivate teisendusfunktsioonide hulgast valitakse lahend, mille paindeenergia on minimaalne. Sellise teisenduse tulemusena saadakse pidevalt muutuv moondeväli, mis võimaldab kirjeldada lokaalseid moonutusi kogu kaardilehe ulatuses. Matemaatiliselt kirjeldatakse TPS-teisendust kahe funktsioonina, millest üks annab ajaloolise kaardi x-koordinaadi ja teine y-koordinaadi (Claeys Boùùaert jt, 2016):

$$x(u,v) = \sum_{i=1}^{n} a_i G(d_i(u,v)) + (\alpha_1 + \beta_{11}u + \beta_{12}v)$$

$$y(u,v) = \sum_{i=1}^{n} b_i G(d_i(u,v)) + (\alpha_2 + \beta_{21}u + \beta_{22}v)$$

Siin tähistavad (u, v) referentskaardi koordinaate ning $x(u, v)$ ja $y(u, v)$ vastavaid koordinaate ajaloolisel kaardil. n tähistab kontrollpunktide arvu ning $d_i(u, v)$ vaadeldava punkti kaugust i-ndast kontrollpunktist. G on kaugusest sõltuv funktsioon, mille abil kirjeldatakse iga kontrollpunkti mõju teisenduspinnale. Koefitsiendid a_i, b_i ning α- ja β-kordajad määratakse kontrollpunktide põhjal. Võrrandite esimene osa kirjeldab TPS-teisenduse lokaalset komponenti ja teine osa globaalset afiinset komponenti. Seega võib TPS-teisendust käsitleda globaalse afiinse ja lokaalse mitteafiinse komponendi kombinatsioonina.

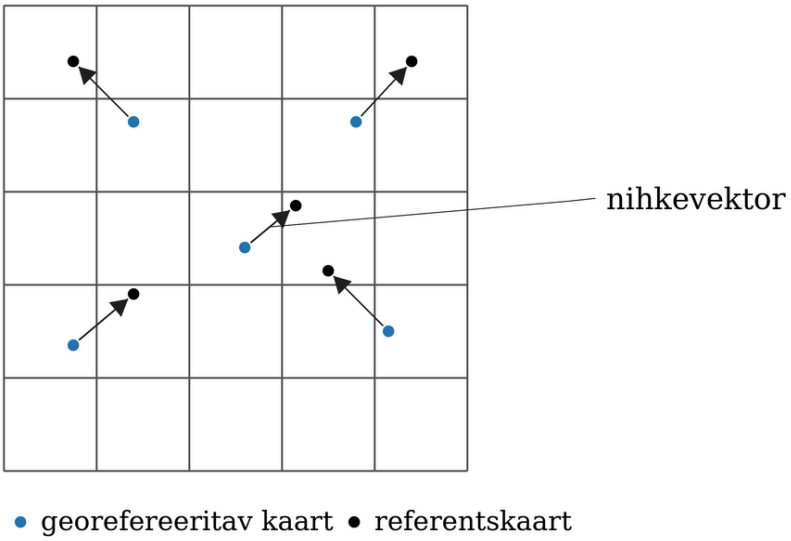
Kuna TPS-teisendus läbib kontrollpunkte täpselt ja jäägid on nendes punktides null, hinnatakse moonutusi teisenduse lokaalse käitumise kaudu, arvutades selle osatuletised analüüsivõrgu punktides (Claeys Boùùaert jt, 2016). Kuigi TPS sobib hästi pideva moondevälja kirjeldamiseks, ei tähenda sujuv interpolatsioon alati geomeetriliselt probleemivaba tulemust. Väga tugevate lokaalsete moonutuste, ebatäpsete kontrollpunktide või kontrollpunktipaaride topoloogiliste vastuolude korral võib teisendus muutuda ebastabiilseks ning äärmuslikul juhul tekkida *foldover* ehk ülevoltimine. Ülevoltimine tähendab olukorda, kus teisenduse lokaalne orientatsioon pöördub ümber ning teisendus ei ole selles piirkonnas enam üheselt määratav ehk füüsikaline. Matemaatiliselt väljendub see Jakobiaani determinandi märgi vahetumises, positiivne determinant viitab orientatsiooni säilimisele, negatiivne determinant aga lokaalsele ümberpöördumisele ehk ülevoltimisele. Seetõttu võib ülevoltimist käsitleda tugeva lokaalse moonutuse või TPS-teisenduse ebastabiilsuse indikaatorina. Ülevoltimisega piirkondades tuleb pindala- ja nurgamoonde väärtusi tõlgendada ettevaatlikult, sest tavapärased moondenäitajad eeldavad lokaalselt üheselt määratavat teisendust. Samas võivad ülevoltimisega piirkonad olla analüütiliselt tähenduslikud, kuna need osutavad kohtadele, kus ajaloolise kaardi ja referentsandmestiku ruumiline vastavus ei ole enam füüsikaline (Reckziegel jt, 2021).

3.4 Planimeetrilise täpsuse näitajad ja graafiline kujutamine

Pärast kontrollpunktide paaride leidmist ja valitud teisenduse rakendamist on erinevaid meetodeid kasutades võimalik hinnata nii sobituse kvaliteeti kontrollpunktides kui ka lokaalse moonde ruumilist jaotust kogu kaardilehe ulatuses. Selleks kasutatakse kahte tüüpi näitajaid. Esiteks saab analüüsida kontrollpunktide sobitamise jääke, mis kirjeldavad sobituse kvaliteeti nendes punktides, mille alusel teisendus on määratud (Bayer jt, 2010; Ergun jt, 2025). Teiseks saab kirjeldada lokaalseid moonutusi pideva ruumilise välja või selle visualiseerimiste kaudu, et hinnata, kus ja milline moonutus kaardil esineb (Claeys Boùùaert jt, 2016). Ajalooliste kaartide geomeetrilise täpsuse uurimisel on oluline kasutada mitut teineteist täiendavat näitajat ja visualiseerimismeetodit, sest need toovad esile erinevaid moondeaspekte ning aitavad eristada üldisi mustreid üksikutest kõrvalekalletest (Forstner ja Oehrli, 1998; Jenny ja Hurni, 2011).

3.4.1 Kontrollpunktide jäägid ja sobituse kvaliteet

Kontrollpunktide jääkidel põhinevad näitajad kirjeldavad, kui hästi langevad pärast teisenduse rakendamist kokku ajaloolisel kaardil ja referentskaardil valitud homoloogsed kontrollpunktide paarid. Punktipõhised näitajad vastavad seega küsimusele, kui hästi sobitub ajalooline kaart referentskaardiga just valitud kontrollpunktides (Boutoura ja Livieratos, 2006; Jenny ja Hurni, 2011). Nende näitajate sisendiks on tavaliselt koordinaatide erinevused x- ja y-suunas ning nende põhjal arvutatud jääkvektori ehk nihkevektori pikkus. Punktipõhiste näitajate peamine graafiline kujutis on nihkevektor. Nihkevektori otspunktideks on sama kontrollpunkti asukoht ajaloolisel kaardil ja referentskaardil. Vektori suund sõltub sellest, kumba asukohta käsitletakse algus- ja kumba lõpp-punktina ning jäägi suurust see ei mõjuta. (joonis 7).



Joonis 7. Kontrollpunktide paaride asukohaerinevused pärast globaalset Helmerti teisendust kujutatud nihkevektoritena. Vektori suund on kujutuslik ega mõjuta jäägi suurust.

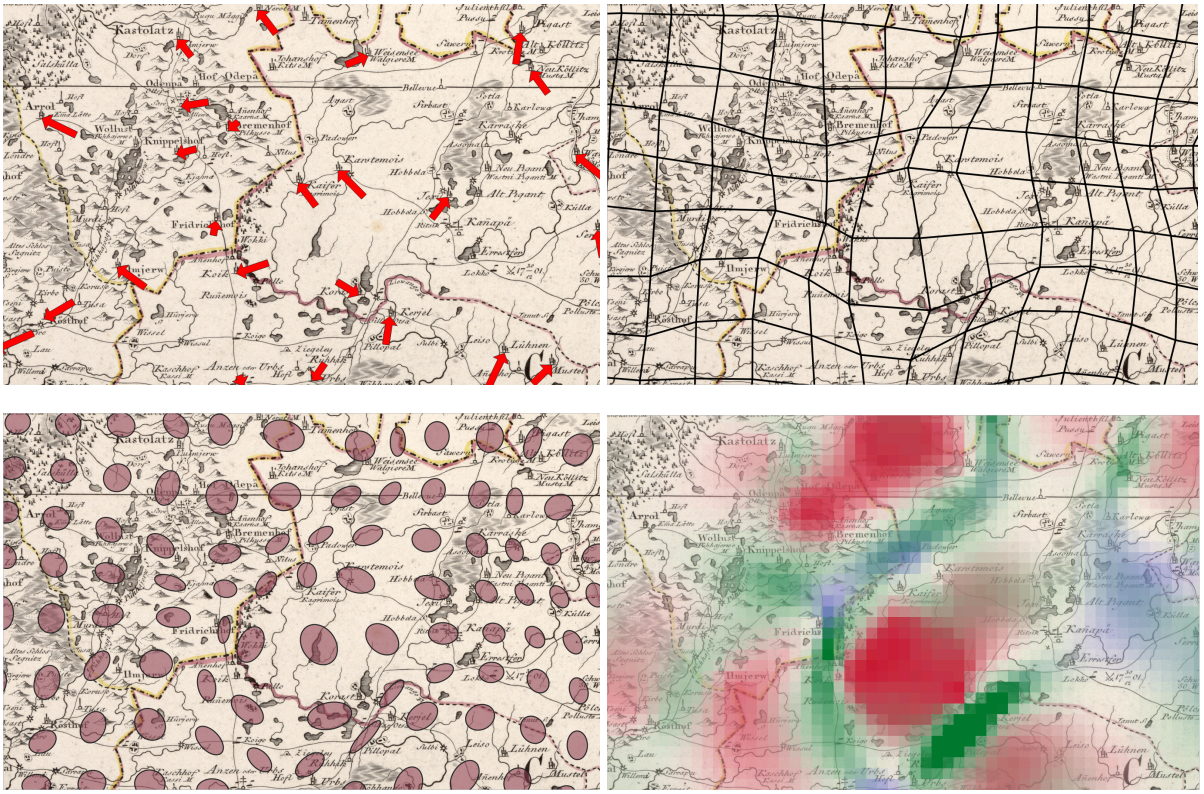
Jenny ja Hurni (2011) märgivad, et nihkevektorid on arvutuslikult kõige lihtsam viis moonutuste visualiseerimiseks. Sarnase suuna ja pikkusega vektorite piirkonnad võivad viidata ruumiliselt süsteemsetele vigadele ning hästi esile tuua ka võimalikud erindid (Forstner ja Oehrli, 1998; Jenny ja Hurni, 2011). Nende tõlgendamisel tuleb siiski olla ettevaatlik. Claeys Boùùaert jt (2016) rõhutavad, et vektorid visualiseerivad jääke ainult kontrollpunktides ega võimalda kirjeldada pidevat moonutust kogu kaardilehe ulatuses. Pikad vektorid võivad jätta mulje suurtest moonutustest, kuigi moonutuse olemus avaldub pigem naabervektorite suuna ja pikkuse muutustes. Lisaks sõltub vektorite kuju eelnevalt kontrollpunktidele rakendatud teisendusest (Vervust jt, 2018). Seetõttu sobivad punktipõhised näitajad eelkõige sobituse kvaliteedi hindamiseks ja erindite tuvastamiseks, kuid pideva lokaalse moondevälja analüüsimiseks on vaja väljapõhiseid meetodeid. Jääkide alusel saab leida erinevaid kokkuvõtlikke arvulisi näitajaid, näiteks ruutkeskmise vea või mediaani, mis annavad üldise hinnangu sobituse tasemele (Jenny ja Hurni, 2011). Tasub ka välja tuua, et punktipõhiseid näitajaid on võimalik arvutada ainult selliste teisenduste alusel, mis pole kontrollpunktides täpsed. TPS-teisenduse ehk täpse teisenduse puhul jäägid kontrollpunktides puuduvad.

Selliste koondnäitajate eelis on lihtne võrreldavus, kuid need ei kirjelda moonutuste tüüpi ega ruumilist varieerumist ning sobivad seetõttu eeskätt esmase ja üldistava hinnangu andmiseks (Tucci ja Giordano, 2011; Lea ja Legleiter, 2016). Kirjanduses on kasutatud ka lähenemist, kus teisendust parandatakse erindite iteratiivse eemaldamise teel, kuid statistiliselt parem

sobitus ei pruugi alati anda sisuliselt adekvaatsemat ülevaadet kaardi tegelikest moonutustest (Manzano-Agugliaro jt, 2013).

3.4.2 Lokaalne moonutus ja selle graafiline kujutamine väljapõhiste näitajatega

Ajalooliste kaartide geomeetria uurimisel on oluline lisaks jääkidele kontrollpunktides vaadelda ka seda, kuidas moonutused ruumis jaotuvad ning millise mustriga need kaardil esinevad (Forstner ja Oehrli, 1998; Yabe, 2024). Võrreldes punktipõhiste jääkidega kirjeldavad väljapõhised näitajad moonutuste ruumilist mustrit kogu kaardilehe ulatuses. Väljapõhiste näitajate eesmärk on vastata küsimusele, kus kaardil moonutused paiknevad, kui suured need on ning eristada võimalusel lisaks pindalamoondet ja nurgamoonet (Mulcahy ja Clarke, 2001; Jenny ja Hurni, 2011). Joonis 8 esitab näite käesolevas töös kasutatavatest lokaalse moonutuse visualiseerimise viisidest ühe Mellini atlase piirkonna näitel. Kujutiste koostamise täpne töövoog ja parameetrid on kirjeldatud metoodika ja tulemuste peatükkides.



Joonis 8. Näide lokaalse moonde visualiseerimisviisidest ühe Mellini atlase piirkonna näitel: nihkevektorid (üleval vasakul), moondevõrk (üleval paremal), moondeellipsid (all vasakul) ning pindalamoonde ja nurgamoonde moondeväljade koondkujutis (all paremal), kus pindalamoone on esitatud sinise–punase värviskaalaga ja nurgamoone rohelise värvitooniga.

Lokaalse moonde teoreetiline raamistik pärineb Tissot' indikatrissi ehk moondeellipsi käsitlusest (Tissot, 1878, Snyder, 1987; Laskowski, 1989). Tissot' teooria järgi kujutatakse kera või ellipsoidi pinnal olev lõpmata väike ring kaardil lõpmata väikese ellipsina, mida nimetatakse indikatrissiks (Laskowski, 1989). See ellips kirjeldab kaardi lokaalseid omadusi antud punktis ning selle telgede suunad määravad peamised moonutussuunad. Tissot' indikatriss kirjeldab lokaalseid pikkus-, nurga- ja pindalamoondeid ning just seetõttu on see keskne mõiste ka lokaalse moonde üldisel kirjeldamisel (Laskowski, 1989). Tissot' indikatrissi klassikalises käsitluses tähistavad ellipsi poolteljed a ja b vastavalt suurimat ja vähimat lokaalset erimõõtkava antud punktis ning nende suunad on teineteise suhtes risti. Sellest vaatepunktist saab lokaalse moonutuse põhinäitajad esitada järgmiselt (Snyder, 1987; Laskowski, 1989):

(1) Peamõõtkavad ehk lokaalsed erimõõtkavad a ja b näitavad vastavalt suurimat ja vähimat lokaalset mõõtkava vaadeldavas punktis.

(2) Pindalategur σ kirjeldab pindala lokaalset muutust ning väljendub peamõõtkavade korrutisena:

$$\sigma = ab$$

(3) Suurim nurgamoonutus 2Ω väljendab suurimat võimalikku nurga muutust vaadeldavas punktis ning on esitatav valemina:

$$2\Omega = 2arcsin\left(\frac{a-b}{a+b}\right)$$

(4) Ellipsi orientatsioon näitab, millises suunas paiknevad suurima ja vähima erimõõtkava teljed ehk moonde peasuunad.

(5) Ellipsi kuju ehk pooltelgede omavaheline suhe võtab kokku lokaalse kujumoonde: kui $a = b$, on indikatriss ring ja moonutus selles punktis konformne. Kui $ab = 1$, siis pindala säilib, kuid kuju võib muutuda.

Nii võimaldab Tissot' indikatriss siduda ühte ja samasse geomeetrilisse kujutisse lokaalse moonutuse suuna, pindala- ja nurgamoonde (Laskowski, 1989; Tobler, 1994). Tissot' indikatrissi tõlgendamisel tuleb siiski arvestada selle lokaalse iseloomuga. Oma definitsiooni järgi on indikatrissil lõpmatult väikesed mõõtmed, kuid kaardil on moondeellipsid kujutatud alati lõplike mõõtmetega. Seega on tegemist lokaalse analüütilise hinnanguga, mitte suurema ala otsese moonutuse kujutisega (Laskowski, 1989; Krisztián, 2018). Seetõttu ei asenda Tissot' indikatrissid muid graafilisi moonutuste kujutamise meetodeid, vaid täiendavad neid (Kerkovits, 2020).

Moondevõrgud on lisaks Tissot' indikatrissidele üks vanemaid ja levinumaid viise lokaalsete moonutuste ruumilise mustri kujutamiseks (Forstner ja Oehrli, 1998). Moondevõrgu kokkusurutud, väljavenitatud või pöördunud piirkonnad peegeldavad lokaalse moonde ruumilist mustrit eri kaardi osades. Moondevõrkude eelis on pidev ülevaade moonutustest. Hiljutises kirjanduses on pakutud ka lahendusi ajalooliste kaartide moondevõrkude otseseks võrdlemiseks ja seeläbi kaartide põlvnemise tuvastamiseks (Vaienti jt, 2025a).

Kohaliku erimõõtkava ehk pindalamoonde ja nurgamoonde isojooned ühendavad sama väärtusega punkte ning võimaldavad esitada vastavate näitajate ruumilisi trende selgemini kui ainult üksikute kontrollpunktide kuvamine (Jenny jt, 2007; Bayer jt, 2010). Jenny ja Hurni (2011) kasutasid MapAnalysti käsitluses samamoonde isojooni, kuid Claeys Boùùaert jt (2016) ja Vervust jt (2018) tõid välja, et isojoonte tulemus sõltub tugevalt kasutatud arvutuse meetodist ja parameetritest, samuti ei sobi isojooned keerukamate moondeväljade visualiseerimiseks. Isojoontega võrreldes on oluliselt lihtsam tõlgendada interpoleeritud nurga- ja pindalamoonde välju, sest need kujutavad moonet pideva ruumilise pinnana ning toovad selgemini esile nii üldised trendid kui ka lokaalsed moondevööndid. Keerukamate moondeväljade korral kipuvad isojooned muutuma müraseks ja muudavad mustrite tajumise raskemaks (Claeys Boùùaert jt, 2016; Vervust jt, 2018).

Ajaloolise kaardi planimeetrilise täpsuse analüüsimisel on kõige informatiivsem kasutada paralleelselt mitut üksteist täiendavat visualiseerimise meetodit (Forstner ja Oehrli, 1998). Punktipõhised näitajad kirjeldavad sobituse kvaliteeti kontrollpunktides, samas kui moondevõrgud, isojooned ja moondeellipsid aitavad mõista lokaalse moonutuse ruumilist mustrit ja iseloomu. Sellest lähtepunktist on arenenud ka kaasaegsed meetodid, mis püüavad lokaalseid moondeid arvutada üha täpsemalt ja pidevama väljana (Claeys Boùùaert jt, 2016; Vaienti jt, 2025a).

3.4.3 Tänapäevased meetodid ja tööriistad

Üks esimesi laiemalt kasutusele võetud tarkvaralahendusi ajalooliste kaartide planimeetrilise täpsuse uurimisel on MapAnalyst (Jenny jt, 2007; Jenny ja Hurni, 2011). Tarkvaras saab siduda ajaloolise kaardi tänapäevase referentskaardiga kontrollpunktide abil ning visualiseerida erinevusi nihkevektorite, moondevõrgu ning nurga- ja pindalamoonde isojoonte abil. MapAnalyst oli oluline edasiminek globaalsetelt sobitusnäitajatelt (RMSE) lokaalsemate moondenäitajate poole. Samas kasutab tarkvara isojoonte arvutamisel kohalikku afiinset

teisendust, kus igas võrgupunktis kasutatakse ainult etteantud raadiuses paiknevaid kauguse põhjal kaalutud kontrollpunkte. Seetõttu hõlmavad MapAnalysti väljundid endas paratamatult ruumilist keskmistamist (Claeys Boùùaert jt, 2016; Vervust jt, 2018). Väiksema raadiusega tulevad lokaalsed detailid esile, kuid suureneb ebastabiilsuse oht, samuti on vaja rohkem kontrollpunkte. Suurema raadiusega on väljund sujuv, kuid lokaalsed moonutused lähevad osaliselt kaduma. Lisaks ei ole isojooned kõige praktilisem lahendus komplekssete moondeväljade visualiseerimisel, sest sellisel juhul on väljund katkendlik. Kuigi MapAnalysti väljastatud nihkevektoreid on planimeetrilise täpsuse uurimisel kasutatud (Perthus ja Faehndrich, 2013), on nihkevektorite põhjal moonutuste tõlgendamine siiski keerukas, sest üksnes vektorite pikkus ei tähista moonutuste tugevust, moonutused tulenevad peamiselt naabervektorite omavahelistest erinevustest (Claeys Boùùaert jt, 2016).

MapAnalysti kõrval on välja töötatud ka teistsuguse eesmärgiga lahendusi. MapMorphy (Roulier, 2023) ühendab bidimensionaalse regressiooni ja geomeetrilise morfomeetria, et võrrelda mitme kaardi kuju ning tuua esile nendevahelisi morfoloogilisi erinevusi. Selle peamine tugevus seisneb kaartide omavahelise kuju võrdlemises, mitte üksiku kaardi lokaalse planimeetrilise täpsuse hindamises. Seetõttu sobib MapMorphy eeskätt kaardikomplektide struktuursete sarnasuste ja erinevuste uurimiseks, kuid vähem selliseks ülesandeks, kus on vaja hinnata ühe kaardi lokaalseid moondeid ühtse ja pideva väljana.

Veel teistsugust probleemi käsitleb MapFolder, mis on loodud tugevate moonutustega või topoloogiliselt tänapäevasest ruumist oluliselt erinevate ajalooliste kaartide uurimiseks (Reckziegel jt, 2021). Autorid kasutavad TPS-teisendust, et visualiseerida georefereeritud kaardi ülevoltimist. Selline lähenemine on põhjendatud keskaegsete maailmakaartide ja muude äärmuslike moonutustega kaartide uurimiseks, kuid selle eesmärk ei ole anda planimeetrilise täpsuse hindamiseks vajalikke näitajaid nagu lokaalne pindala- või nurgamoone. Autorid rõhutavad ka ise, et MapFolder on eelkõige prototüüp ja hüpoteeside püstitamisel kasulik tööriist, mitte statistiline meetod täpsete moondenäitajate arvutamiseks (Reckziegel jt, 2021).

Hiljutises kirjanduses on täiendatud ka lokaalse regressiooni lähenemist. Yabe (2024) rakendas geograafiliste kaaludega bidimensionaalset regressiooni (GWBR), mis võimaldab läbi automaatse ribalaiuse määramise vähendada subjektiivse parameetrite valiku mõju tulemustele. Meetodi piirang käesoleva töö vaatepunktist seisneb selles, et Yabe uurimuses arvutati ja visualiseeriti moondetegurid ainult kontrollpunktides. Kuigi GWBR võimaldab

teoreetiliselt seada regressioonipunkte ka ruudustikule, sõltub autorite sõnul selline interpoleerimine tugevalt kontrollpunktide ruumilisest jaotusest ning madalama kontrollpunktide tihedusega piirkondades ei pruugi GWBR tulemus olla usaldusväärne.

Seega katavad olemasolevad lahendused erinevaid vajadusi: MapAnalyst sobib esmaseks planimeetrilise täpsuse hindamiseks, MapMorphy kaartide morfomeetria võrdlemiseks ning MapFolder topoloogiliste vastuolude visualiseerimiseks äärmuslike moonutuste korral. Käesoleva töö eesmärk on aga kirjeldada Mellini atlasel esinevaid planimeetrilisi moondeid ja nende ruumilist paiknemist võimalikult täpselt ning võrrelda atlase lehti omavahel. Seetõttu kasutatakse töös Claeys Boùùaert jt (2016) poolt välja töötatud diferentsiaalset moondeanalüüsi, mis võimaldab arvutada moondetegurid otse TPS-teisenduse lokaalsetest omadustest ja visualiseerida neid suure ruumilise täpsusega.

3.5 Diferentsiaalne moondeanalüüs

Käesolevas töös kasutatakse Mellini atlase planimeetrilise täpsuse ja sellega kaasnevate moonutuste hindamiseks diferentsiaalset moondeanalüüsi ehk *Differential Distortion Analysis* (DDA), mille töötasid välja Claeys Boùùaert jt (2016). Meetod põhineb kaardiprojektsioonide teoorial, kus moondeid hinnatakse teisenduse lokaalse käitumise ehk osatuletiste kaudu. Claeys Boùùaert jt meetodi puhul tehakse seda TPS-teisenduse abil. Diferentsiaalses moondeanalüüsis täidab kontrollpunktide põhjal leitud interpoleerimisfunktsioon analüütiliselt sama rolli, mida kaardiprojektsioonide teoorias täidab projektsioonifunktsioon.

TPS-teisenduse matemaatilist tausta kirjeldati lähemalt peatükis 3.3.4. See tähendab, et uuritava kaardi ja referentskaardi vaheline seos modelleeritakse kahes osas ehk globaalse afiinse komponendi ja lokaalse miteafiinse komponendi koosmõjuna. Käesolevas töös rakendati DDA-d globaalse teisenduse (käesolevas töös Helmert) järgselt, mis võimaldas keskenduda vaid TPS-teisenduse abil kirjeldatavatele lokaalsetele moonutustele.

Suurused E, F ja G on TPS-teisenduse lokaalsestest osatuletistest ∂ arvutatavad Gaussi fundamentaalsuurused. E ja G kirjeldavad lokaalseid muutusi kahes põhisuunas, F aga nende suundade omavahelist seotust ehk võimalikku nihestumist. Nende põhjal arvutatakse edasi pindalamoonutus, suurim nurgamoonutus ning Tissot' indikatrissi teljed. E, F ja G arvutuskäik on järgmine (Claeys Boùùaert jt, 2016):

$$E = \left(\frac{\partial x}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_0}\right)^2$$

$$F = \frac{\partial x}{\partial x_0}\frac{\partial x}{\partial y_0} + \frac{\partial y}{\partial x_0}\frac{\partial y}{\partial y_0}$$

$$G = \left(\frac{\partial x}{\partial y_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_0}\right)^2$$

Eeltoodud osatuletiste põhjal arvutatakse DDA-s lokaalsed moondetegurid. Moondeellipsi poolteljed saadakse järgmisest võrrandisüsteemist:

$$\begin{cases} a^2 + b^2 = E + G \\ ab = \sqrt{EG - F^2} \end{cases}$$

Edasi arvutatakse moondeellipsi pooltelgede põhjal lokaalne pindalamoonutus ja suurim nurgamoone:

$$ab = \sigma = \sqrt{EG - F^2}$$

$$2\Omega = 2arcsin\left(\frac{a-b}{a+b}\right)$$

Antud magistritöös kasutatakse DDA-analüüsi poolt pakutavatest väljunditest eeskätt pindalamoonutust, suurimat nurgamoonutust ja Tissot' indikatrisse. Pindalamoonutus σ ehk Tissot' indikatrissi pooltelgede korrutis väljendatakse DDA-s logaritmitud kujul $log_2\sigma$, mis võimaldab esitada sama väärtusega pindala suurendusi ja vähendusi sümmeetriliselt. $log_2\sigma$ väärtus 0 tähistab pindalamoonde puudumist, positiivsed väärtused lokaalse pindala suurenemist ja negatiivsed väärtused pindala vähenemist. Suurim nurgamoone väljendatakse suurusega 2Ω radiaanides, mis kirjeldab suurimat erinevust sama nurga suuruse vahel kaardil ja referentskaardil. Kirjanduses tähistatakse kohati pool sellest suurusest sümboliga Ω, käesolevas töös järgitakse DDA kirjanduses levinud konventsiooni 2Ω. DDA väljundiks on ka Tissot' indikatrissid, mis võimaldavad visualiseerida lokaalseid moonutusi. Meetodi täielik matemaatiline tuletus on esitatud Claeys Boùùaert jt (2016) töös, mistõttu siin piirdutakse selle töö seisukohalt oluliste põhimõtete ja näitajatega.

Diferentsiaalset moondeanalüüsi on edukalt rakendanud näiteks Vervust jt (2018) Ferrarise 18. sajandi topograafiliste kaartide uurimisel. Nende analüüs tugines kahe Belgia valitsusasutuse varasematele georefereerimise käigus määratud kontrollpunktidele, mis katsid kokku 226 kaardilehte 275-st ning sisaldasid ligikaudu 30 000 kontrollpunkti. Autorid

rõhutavad, et DDA-analüüs võimaldas kirjeldada moondeid täpselt, lokaalselt ja pidevalt ning siduda saadud mustrid kaardi koostamisprotsessi ajalooliste detailidega. Võrreldes Mellini atlasega on Ferrarise kaart koostatud ulatuslike välitööde põhjal ning protsess detailselt dokumenteeritud, mis võimaldas teha moonutuste tekkepõhjuste kohta kindlamaid järeldusi. Veel on DDA-d rakendanud Aguilar-Camacho jt (2022) 18. sajandi Sevilla linna plaanide moonutuste analüüsimisel ja hüpoteeside püstitamisel kaardi koostamisprotsessi kohta. Autorid käsitlesid neljast kaardilehest koosnevat linnaplaani lehtede kaupa, sest lehtede mosaiikimine oleks tekitanud uusi moonutusi. See on oluline ka Mellini atlase puhul, sest ka selle lehtede mosaiikimisel ilmnesid tugevad moonutused.

Samuti on DDA-d kombineerituna MapAnalystiga kasutanud Głażewski jt (2025) Lvivi linna plaanide uurimisel. Autorid kohandasid oma töö jaoks DisortionAnalysis skripti väljundeid, meetodi põhimõte jäi samaks. Kohanduste eesmärk oli muuta tulemuste tõlgendamine suuremõõtkavaliste linnaplaanide puhul intuitiivsemaks. See näitab, et DDA väljundeid saab kohandada konkreetse uurimisobjekti järgi, kuigi meetodi teoreetiline alus jääb samaks.

DDA oluline tugevus seisneb selles, et erinevalt MapAnalysti lokaalsest afiinsest lähenemisest ei põhine DDA ruumilisel keskmistamisel ega sõltu kasutaja määratud otsinguraadiusest. Claeys Boùùaert jt (2016) rõhutavad, et MapAnalysti lokaalne afiinne teisendus annab seetõttu paratamatult ligikaudseid väärtusi ja nõuab täiendavate parameetrite häälestamist, samas kui DDA-analüüsis arvutatakse lokaalsed moondenäitajad interpoleeriva funktsiooni osatuletiste põhjal ilma ruumilise silumiseta. Meetodi piirang on selle sõltuvus kontrollpunktide kvaliteedist, paiknemisest ja tihedusest. Vervust jt (2018) märgivad lisaks, et DDA-meetodiga saab tuvastada saab ainult selliseid moondeid, mille ruumiline ulatus on suurem kui analüüsis valitud ruumiline lahutus. Samuti võivad hõredama kontrollpunktide tihedusega aladel jääda moonutused alahinnatuks. Seetõttu tuleb DDA rakendamisel valida ruumiline lahutus, mis annab piisava ruumilise detailsuse, kuid on kooskõlas kontrollpunktide tiheduse ja töö eesmärgiga.

Antud magistritöö võtmes on DDA oluline seetõttu, et see võimaldab hinnata Mellini atlase kaardilehtede lokaalseid planimeetrilisi moonutusi ühtsel ja võrreldaval viisil kogu kaardilehe ulatuses. Meetod ei piirdu kontrollpunktide jääkide kirjeldamisega pärast globaalset teisendust, vaid võimaldab koostada pideva moondevälja, mille põhjal on võimalik võrrelda eri piirkondade ja kaardilehtede täpsust ning otsida seoseid atlase koostamisviisi ja võimalike allikate kasutamisega.

3.5.1 Moondevälja mustrite tõlgendamine DDA abil

DDA võimaldab käsitleda ajaloolise kaardi geomeetrilist täpsust pideva ruumilise moondeväljana. Selline lähenemine on oluline, sest moonutuste paiknemine, ulatus ja kuju võivad anda teavet kaardi koostamisprotsessi, kasutatud alusmaterjalide erinevuse ja nende omavahelise sobitamise kohta. Varasemates DDA rakendustes on moondeväljadelt tuvastatud korduvaid ja sarnase ülesehitusega mustreid, mida on seostatud erinevate alusmaterjalide kasutamise ning kaartide koostamise tööetappidega (Vervust jt, 2018).

Üheks sagedasemaks DDA-analüüsis tõstatuvaks mustriks on kitsad kõrge moonutusega vööndid, mis võivad viidata erinevate allikate liitekohtadele ehk õmblustele. Claeys Boùùaert jt (2016) tõid välja, et kõrgete pindalamoonde või nurgamoonde väärtustega ribad võivad tekkida erinevate allikate omavahelisest sobitamisest. Sellised mustrid avalduvad just võimalikes liitekohtades kitsaste ja selgelt eristatud aladena, mis on pindalaliselt vähenenud ning samal ajal kõrge nurgamoondega. Vervust jt (2018) sidusid Ferrarise kaardil selged moonutuste vööndid üksikute kaardilehtede piiridega ja tõlgendasid neid kui kaardi koostaja vajadust mõõdistusandmeid kohandada, et naaberlehtede servad omavahel kokku läheksid. Teine levinud muster on suurem laik või tsoon moondeväljal, kus moonutus on ümbrusest üldiselt kõrgem või ka madalam, kuid seesmiselt suhteliselt ühtlane. Claeys Boùùaert jt (2016) ning Vervust jt (2018) sõnul võib selline muster viidata, et kaardi üks osa tugineb teistsugusele alusmaterjalile või on kaardistatud erineval ajal või teise töövõttega. Kui lähteandmestik muutub ruumis, siis väljendub see moondeväljal eristatavate piirkondadena, mitte juhusliku mürana. Kolmas muster on lokaalne anomaalia või erind, mis väljendub suure lokaalse moonutusena, mille ümbruses on moonutus suhteliselt madal. Vervust jt (2018) tõid Ferrarise kaardil välja, et osa vigu on selgelt lokaalsed ning nad tõlgendasid neid juhtumitena, kus vea mõju suudeti ümbritseval alal piirata. DDA moondeväljad võivad näidata ka madalama moonutusega tuumikalasid, mis eristuvad ülejäänud lehe taustast. Vervust jt (2018) seostasid Ferrarise kaardil madala moonutusega piirkonda mõõdistustööde alguspunktiga ning tõid välja, et ajaline surve hilisematel mõõdistustöödel ja mõõdistuste järjekord võisid mõjutada täpsust ja seeläbi moondevälja. Aguilar-Camacho jt (2022) leidsid linnaplaane analüüsides, et teatud punktidel nagu näiteks linnaväravate ümbruses on moonutus madalam ning tõlgendasid seda kui märki, et need võisid olla mõõdistuse jaoks olulised toetuspunktid. Nad täheldasid ka, et vähima moonutusega alad kulgesid sageli läbi avatud kohtade nagu väljakud ja laiemad tänavad ning püstitasid selle põhjal hüpoteese mõõdistuskäikudest.

Moondeväljade lugemisel ja tõlgendamisel tuleb rõhutada meetodi piiranguid. Esiteks sõltub DDA-analüüsi tulemus paratamatult kontrollpunktide ruumilisest jaotumisest ja tihedusest, madala tihedusega piirkondades on usaldus madalam ning seal võib moonutus jääda alahinnatuks. Samuti langeb usaldus väljaspool kontrollpunktide kumerat katet, väljaspool seda on tegemist ekstrapoleerimisega (Głażewski jt, 2025).

Kokkuvõttes võimaldavad DDA-analüüsi moondeväljad kirjeldada moonutusi ruumilise struktuurina, näiteks pindala ja nurgamoonde ribade, tsoonide, ja järskude üleminekute kujul. Varasem kirjandus näitab, et selliseid mustreid on võimalik siduda kaardi aluseks olevate allikate võimalike liitekohtade, mõõdistustööde järjekorra või ka hilisema sobitamisega, kuid tõlgendus peab alati arvestama kontrollpunktide jaotuse ja ekstrapolatsiooni mõjuga. Järgnevas metoodika peatükis kirjeldatakse andmeid ja analüüsi samme, mille abil kirjeldatud mustritüüpe Mellini atlase kaardilehtedel otsiti, tuvastati ja võrreldi.

4. Metoodika

Käesolevas peatükis kirjeldatakse lähemalt DDA-meetodiga Mellini atlase kaardilehtede planimeetrilise täpsuse uurimise protsessi. Moondeanalüüs viidi läbi kümnel Eesti alasid kujutaval kaardilehel atlase 14-st kaardilehest. Atlase kaardilehed laeti alla kõrge kvaliteediga TIF-formaadis Library of Congress arhiivist (Library of Congress, i.a). Skaneeritud kaardilehtede keskosas on vertikaalsed murdejooned. Kaardilehti ei georefereeritud enne DDA-analüüsi, kontrollpunktid määrati skaneeritud lehe enda koordinaatruumis ehk leheruumis.

Mõisakeskuste asukohad pärinevad Rahvusarhiivi andmestikust ning on alla laetud Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide rakendusest. Need tähistavad punktobjektidena mõisakeskusi 1917. aasta seisuga Eesti ristkoordinaatides (Rahvusarhiiv ja Maa- ja Ruumiamet, 2025). Referentsandmestik ei kajasta täpselt Mellini atlase koostamise aega, mistõttu kasutati ainult neid mõisakeskusi, mille nime ja asukoha järjepidevus oli kontrollpunkti määramiseks piisavalt usaldusväärne.

Mõisakeskuste asukohad laaditi alla Esri Shapefile formaadis ning nende abil moodustati käsitsi kontrollpunktide paarid ArcGIS Pro programmi georefereerimise tööriistadega. Mellini atlasel paigutati kontrollpunktid mõisakeskust tähistava punktleppemärgi aluse keskmesse. Kontrollpunktide määramisel kasutati mõisakeskuste nimesid eesti ja saksa keeles. DDA-analüüsis kasutatud kontrollpunktide asukohad leheruumis ja referentskaardil on esitatud GitHubi repositooriumis (lisa 11).

Kõiki Mellini atlasel ja referentsandmestikus esitatud mõisakeskusi ei kasutatud kontrollpunktidena. Kontrollpunktideks märgiti ainult need mõisakeskused, mille puhul oli võimalik Mellini atlasel kujutatud objekti ja 1917. aasta seisu kirjeldavas andmestikus oleva mõisakeskuse vahel määrata piisavalt kindel homoloogne vastavus. Välja jäeti eelkõige väiksemad karjamõisad ning juhud, kus toponüümika ei võimaldanud objekti piisava kindlusega tuvastada. Selline lähenemine aitas vältida madala usaldusväärsusega kontrollpunktide lisamist, kuid võis mõnes piirkonnas vähendada kontrollpunktide tihedust ja seega lokaalse moondeanalüüsi detailsust. Määratud kontrollpunktide arv on välja toodud tulemuste peatükis. Kontrollpunktid eksporditi ArcGIS Pro programmist CSV formaadis, mis sisaldas kontrollpunktide asukohti Mellini atlasel leheruumi tollides ja referentskaardil Eesti ristkoordinaatides. DDA-analüüsi eeltöötlusena teisendati leheruumi tollid piksliteks, et

vältida väga väikeste koordinaatide väärtuste kasutamisest tulenevaid võimalikke ümardamisega seotud probleeme edasises interpoleerimises. Sarnast võtet kasutati ka DDA-analüüsi näidisandmestikus (Claeys Boùùaert, 2025). Järgmise sammuna rakendati DDA-analüüsi skripti MATLAB programmis, kasutades sisendina kontrollpunktide CSV-faili ja kasutaja määratud parameetreid (Claeys Boùùaert, 2025). Kooskõlas peatükis 3.5 kirjeldatud DDA-analüüsi loogikaga leiti ajaloolise kaardi ja referentskaardi vaheline teisendus DDA-analüüsi skriptis globaalse Helmerti teisenduse ja sellele järgneva TPS-põhise lokaalse moondeanalüüsiga. DDA-analüüsi skriptis määrati tänapäevase referentskaardi ristkoordinaadid teisenduse lähteruumiks (*domain*) ning Mellini atlase leheruumi pikslikoordinaadid sihtruumiks (*codomain*). Seetõttu esitati arvutatud moondenäitajad Mellini atlase leheruumis ning tulemused kirjeldavad seda, kuidas peaks tänapäevane referentsruum moonduma, et sobituda Mellini atlase kaardilehtede geomeetriaga. DDA-analüüsi tulemusi tõlgendati Helmerti teisendusel põhineva üldise sobituse suhtes. Helmerti teisendus kirjeldab kogu kaardilehele ühist siiret, pööret ja ühtlast globaalset mõõtkava, TPS-teisendus aga kontrollpunktide põhjal kujunevat lokaalset moonutust. Seega väljendavad DDA-analüüsi tulemused eelkõige lokaalset kõrvalekallet Helmerti teisendusega määratud globaalsest sobitusest.

DDA-analüüsi ruumiliseks lahutuseks ehk võrgusammuks määrati 3000 m. Arvutusvõrku laiendati kontrollpunktide kumera katte ulatusest väljapoole kahe võrgusammu võrra ehk 6000 m, et vältida kaardilehtede servaaladel moondevälja järsku katkemist. Puhvri vööndit ja kaardilehtede servaalasid käsitletakse siiski madalama toetusega alana, kuna seal tugineb interpolatsioon vähematele kontrollpunktidele ning väljaspool kontrollpunktide kumerat katet on tegemist ekstrapoleerimisega. DDA-analüüsi skripti rakendati kümnel Mellini atlase kaardilehel. DDA-analüüsi väljunditeks olid võrgupunktidel põhinev moondenäitajate tabel CSV-formaadis, moondeellipsid ja moondevõrgud WKT-formaadis.

DDA-analüüsi moondenäitajate tabelis on eristatud moondenäitajad kontrollpunktides ja regulaarsetes võrgupunktides. Käesolevas töös kasutati lehtede omavaheliseks võrdlemiseks ainult võrgupunktide valimit 3000 m sammuga, sest see annab ruumiliselt standardiseeritud ja võrreldava valimi. Kontrollpunktid paiknevad ruumis ebaühtlaselt ning nende arv ja jaotus varieerub lehtede vahel, mistõttu ei moodusta need tasakaalustatud valimit kogu lehe ulatuses. Siiski rahuldavad kontrollpunktid katvuse ja arvu poolest georefereerimiseks vajalikud nõuded. Lisaks on kontrollpunktid interpoleeriva teisenduse ankurpunktid, DDA-meetodi raames konstrueeritakse TPS kontrollpunktide põhjal ning moondenäitajad arvutatakse selle

teisenduse lokaalsest käitumisest regulaarsel võrgul (Vervust jt, 2018). Kui arvutada koondnäitajad kontrollpunktide põhjal või võrgupunktide ja kontrollpunktide põhjal kallutaks see tulemuse tihedamalt kontrollpunktidega kaetud piirkondade suunas ja vähendaks lehtede omavahelist võrreldavust. Seetõttu kasutati koondtabelite ja moondeväljade juures üksnes võrgupunkte. Skripti väljundite töötlemiseks ja visualiseerimiseks kasutati QGIS programmi, valik põhines autori eelistusel. Tulemused visualiseeriti Mellini atlase kaardilehtede leheruumis. Pindalamoone $log_2\sigma$ ja suurim nurgamoone 2Ω interpoleeriti TIN meetodiga 50 pikslise lahutusega, mis vastab Mellini atlase kaardilehtedel ligikaudu 635 meetrile. TIN interpoleerimise ruumiline lahutus valiti DDA-analüüsi võrgu lahutusest (3000 m) detailsem, et visualiseerimine ei lisaks omakorda ruumilist generaliseerimist. $log_2\sigma$ visualiseeriti vahemikus -1 kuni 1, kus -1 tähistab pindala vähenemist kaks korda ja 1 pindala suurenemist kaks korda, 0 tähistab pindalamoonde puudumist. Negatiivsete $log_2\sigma$ väärtustega alad on seega pindalaliselt vähenenud, positiivsete väärtustega alad pindalaliselt suurenenud. Suurim nurgamoone 2Ω visualiseeriti vahemikus 0 kuni 1, kus 0 tähistab nurgamoonde puudumist ja 1 nurgamoonet väärtusega 1 radiaan.

5. Tulemused

DDA-analüüsi tulemusena valmisid moondenäitajate tabelid ja moondeväljade kaardid kõigi kümne tänapäeva Eesti alasid kujutava Mellini atlase kaardilehe kohta. Kontrollpunktide arv kaardilehtedel sõltus mõisakeskuste leppemärkide arvust ja kaardilehel kujutatud maismaa osakaalust (tabel 1).

Tabel 1. Kontrollpunktide arv kaardilehtede kaupa.

Kaardileht	Kontrollpunktide arv
Tallinna maakond	201
Haapsalu maakond	324
Paide maakond	227
Paldiski maakond	262
Pärnu maakond	211
Kuressaare maakond	183
Tartu maakond	218
Viljandi maakond	207
Rakvere maakond	249
Võru maakond	192

5.1 Kaardilehtede summaarsed moondenäitajad

Käesolevas peatükis kirjeldatakse arvulisi moondeväljade koondnäitajaid kaardilehtede kaupa. Kõigi kaardilehtede arvuliseks võrdlemiseks loodi DDA-analüüsi skripti väljunditest koondtabel olulisemate moondetegurite väärtustega võrgupunktides (tabel 2). Tabelis on kaardilehtede kaupa välja toodud võrgupunktide arv, pindalamoonde absoluutväärtuste mediaan, nurgamoonde mediaan radiaanides ja 90. protsentiili pindala- ja nurgamoonde väärtused 3000 m sammuga võrgul. Võrgupunktide arv erineb lehtede vahel, kuna võrk katab kontrollpunktide kumera katte ja kahe võrgusammu pikkuse puhvri (6000 m). Mediaan kirjeldab tüüpilist moonutust, samas kui 90. protsentiil iseloomustab kaardilehtede suuremate moonutusega piirkondi. Lisaks on tabelis toodud ka nende võrgupunktide osakaal kaardilehe kohta, kus TPS-teisenduses esines ülevoltimine. Tabeli põhjal võib järeldada, et kaardilehtede vahel on suured erinevused ning leidub selgelt väiksemate ja suuremate moondenäitajatega

kaardilehti. Pindalamoonde $log_2\sigma$ absoluutväärtuse mediaan varieerub kaardilehtede vahel alates 0,108 (Kuressaare maakond) kuni 0,247 (Tartu maakond). Pindalamoonde $log_2\sigma$ absoluutväärtuse 90. protsentiil on kaardilehtedel vahemikus 0,3 (Kuressaare maakond) kuni 0,769 (Paide maakond). Suurima nurgamoonde 2Ω mediaan radiaanides varieerub vahemikus 0,115 (Kuressaare maakond) kuni 0,329 (Paide maakond). Suurima nurgamoonde 2Ω 90. protsentiil radiaanides varieerub vahemikus 0,323 (Kuressaare maakond) kuni 0,713 (Paide maakond). Neljal kaardilehel ei esine TPS-teisenduse ülevoltimist: Haapsalu, Pärnu, Kuressaare ja Viljandi maakond. Ülejäänud lehtedel oli ülevoltimine haruldane ning ülevoltinud võrgupunktide arv varieerus alates 0,053 % (Tartu maakond) kuni 0,480 % (Paide maakond). Kõige väiksemate moondenäitajatega on Kuressaare maakond. Lehel on võrreldes teiste kaardilehtedega kõige väiksemad nurgamoonde ja pindalamoonde absoluutväärtuse mediaanid ning 90. protsentiili väärtused. Samuti ei esine Kuressaare kaardilehel üheski võrgupunktis TPS-teisenduse ülevoltimist. Kõige suuremate moondenäitajatega kaardileht on Paide maakond. Pindalamoonde absoluutväärtuse mediaan on küll veidi väiksem kui Tartu maakonna lehel, kuid kõik teised moondenäitajad on oluliselt suuremad teistest kaardilehtedest. Samuti esineb Paide maakonna kaardilehel ülevoltimist koguni 0,48% võrgupunktidest, samas kui neljal kaardilehel puudub ülevoltimine võrgupunktides täielikult. Kõige väiksemate ja suuremate moondenäitajatega kaardilehtede (Kuressaare ja Paide maakond) võrdlemine näitab kaardilehtede omavahelise erinevuse suurusjärku. Pindalamoonde absoluutväärtuse mediaan on Paide maakonnal ligikaudu kaks korda Kuressaare maakonnast suurem (0,230 ja 0,108) ning nurgamoonde mediaan radiaanides ligi kolm korda suurem (0,329 ja 0,115). Ka 90. protsentiili põhjal on erinevus sarnases suurusjärgus: pindalamoonde absoluutväärtuse 90. protsentiil Paide maakonnas üle kahe korra Kuressaare maakonnast suurem (0,769 ja 0,300) ning nurgamoonde 90. protsentiil samuti üle kahe korra suurem (0,713 ja 0,323).

Tabel 2. Valitud summaarsed moondenäitajad Mellini atlase kaardilehtede kaupa.

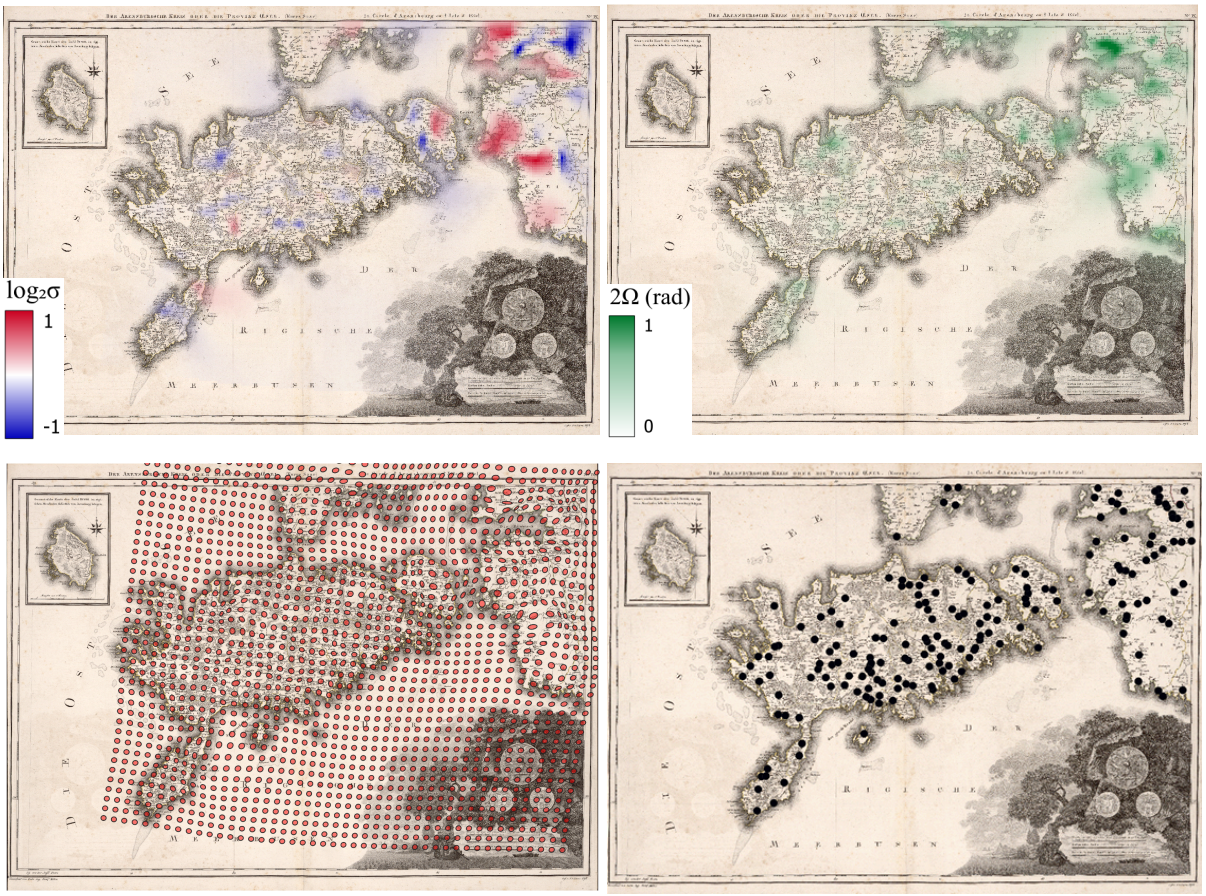
Kaardileht	Võrgupunktide arv	Mediaan $\lvert log_2\sigma \rvert$	P90 $\lvert log_2\sigma \rvert$	Mediaan 2Ω (rad)	P90 2Ω (rad)	Ülevoltimine (%)
Tallinna maakond	1242	0,205	0,659	0,252	0,663	0,242
Haapsalu maakond	2352	0,172	0,482	0,204	0,477	0
Paide maakond	1457	0,230	0,769	0,329	0,713	0,480
Paldiski maakond	1632	0,171	0,590	0,197	0,588	0,123
Pärnu maakond	2378	0,167	0,439	0,181	0,498	0
Kuressaare maakond	1755	0,108	0,300	0,115	0,323	0
Tartu maakond	1887	0,247	0,545	0,261	0,551	0,053
Viljandi maakond	1938	0,162	0,540	0,230	0,549	0
Rakvere maakond	1716	0,194	0,670	0,250	0,703	0,291
Võru maakond	1386	0,195	0,638	0,275	0,587	0,072

Koondnäitajad kirjeldavad moonutuse üldist taset kaardilehel, kuid ei näita, kus lehe ulatuses moonutus esineb ning kas moondeväljal esineb järske üleminekuid või struktuurseid mustreid. Seetõttu käsitletakse järgmises alapeatükis valitud kaardilehtede moondevälju kaardina, koos moondeellipsite ja kontrollpunktide jaotusega. Koondnäitajate tõlgendamisel tuleb arvestada, et rannikuga piirnevate lehtede puhul moodustavad osa lehe ulatusest tühjad alad ning kõigi kaardilehtede servaaladel puhvri vööndis põhineb tulemus suuremal määral ekstrapoleeritud seosel, mis mõjutab ka koondnäitajate väärtuseid.

5.3 Kolme eristuvama kaardilehe moondenäitajad

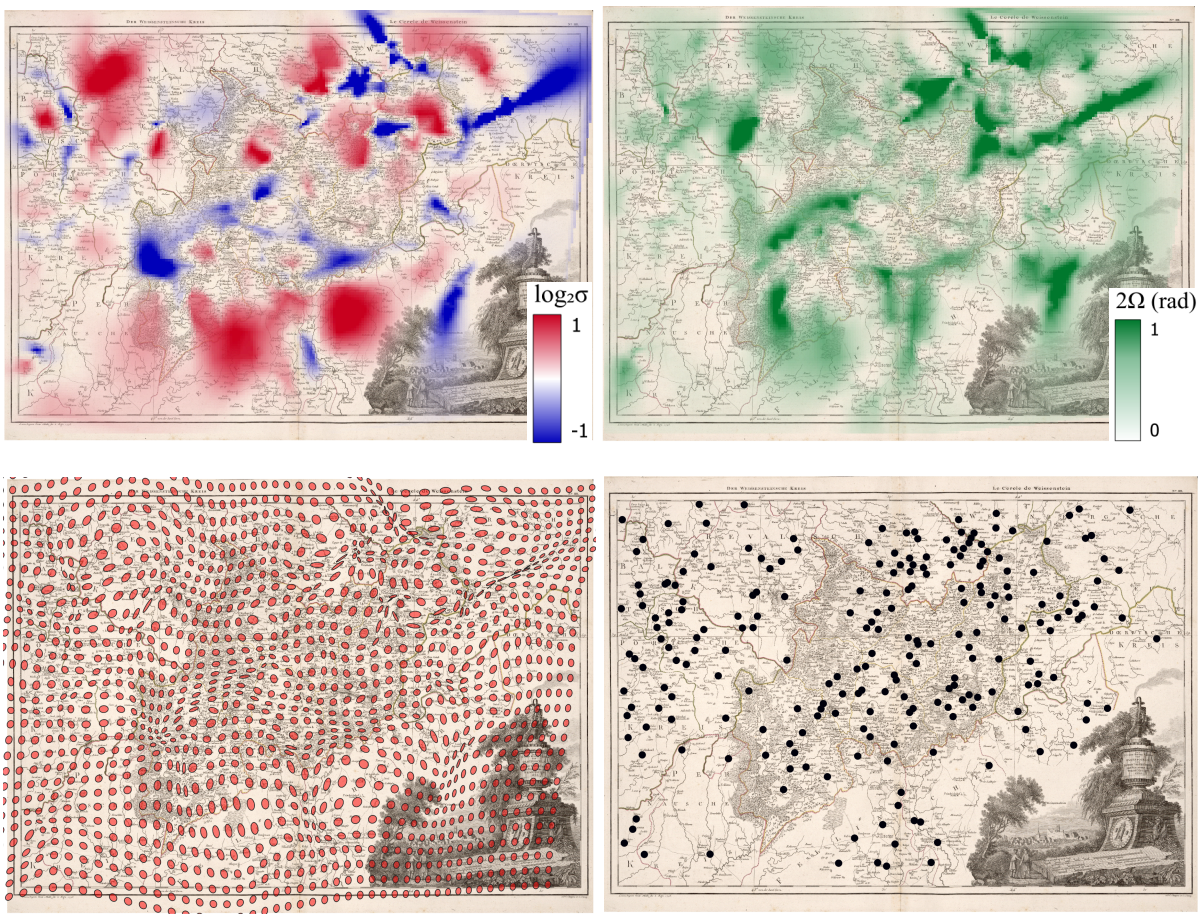
Kõigi Mellini atlase Eesti alasid kujutavate kaardilehtede moondenäitajate kaardid on esitatud töö lisades (lisad 1–10). Antud peatükis antakse ülevaade kolmest silmapaistvamast kaardilehest. Mellini atlase kõige madalamate moondenäitajatega leht on Kuressaare maakond (joonis 9). Kaardilehel on $log_2\sigma$ visuaalselt valdavalt neutraalne ehk esineb vähe pindalaliselt vähenenud või suurenenud alasid ning tugevama pindalamoondega piirkonnad on pigem väikesed ja lokaalsed. Suuremaid pindalamoondeid võib täheldada kaardilehe kirdeosas mandril. 2Ω kaart on samuti üldiselt madalate väärtustega ja ilma ulatuslike kõrge nurgamoonde tsoonideta, suurem nurgamoone esineb mandril. Moondeellipsid on suurel osal lehe ulatusest vähem väljavenitatud ja muutuvad ruumiliselt sujuvamalt kui suuremate

moondenäitajatega atlase lehtedel. Kontrollpunktid paiknevad Saaremaal ühtlaselt üle saare, samas kui mere- ja hõredama sisuga aladel on kontrollpunktide tihedus loomulikult väiksem.



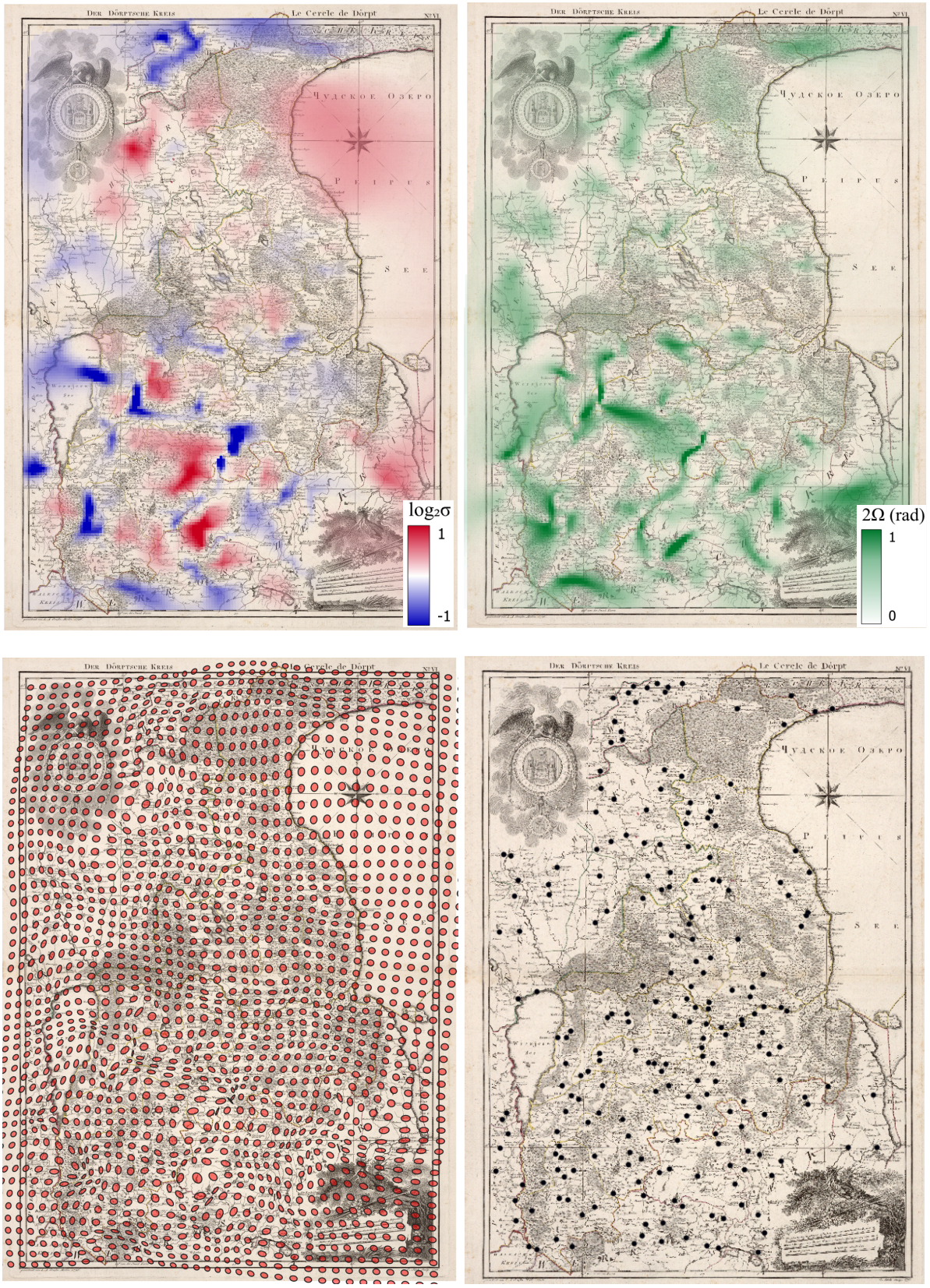
Joonis 9. Kuressaare maakonna pindalamoone, suurim nurgamoone, moondeellipsid ja kontrollpunktide asukohad.

Mellini atlase kõige suuremate summaarsete moondenäitajatega on Paide maakonna kaardileht. Lehe pindalamoonde muster on tugevalt laiguline, esineb mitu selgelt eristuvat punase ja sinise väärtusega tsooni ning nende vahel on lühikese vahemaa jooksul kiireid üleminekuid. Suurima nurgamoonde kaart näitab mitut ulatuslikumat suuremate väärtuste piirkonda, mis moodustavad kohati vöödilisi mustreid. Moondeellipsid on mitmel alal selgelt väljavenitatud ning ellipsite orientatsioon muutub ruumiliselt märgatavalt, mis viitab lokaalse moonde keerukusele, samuti on kaardilehe kirdeosas arvestatav ülevoltimisega piirkond. Ulatusliku ülevoltimise tõttu kaardilehe kirdeosas on sealse moondevälja usaldusväärsus madal. Kontrollpunktide jaotus on lehel ruumiliselt suhteliselt ühtlane (joonis 10).



Joonis 10. Paide maakonna pindalamoone, suurim nurgamoone, moondeellipsid ja kontrollpunktide asukohad.

Veel üks silmapaistev moondenäitajate muster joonistub välja Tartu maakonna kaardilehel (joonis 11). Kaardilehel võib märgata selgelt eristuvat piiri ligikaudu Emajõe põhja- ja lõunakaldal. Põhja pool on $log_2\sigma$ ja 2Ω suhteliselt väikesed, esineb väiksemaid tugevama moonutusega alasid. Samal ajal on Emajõe lõunakaldast alates lõuna poole liikudes moonutused oluliselt suuremad. Esineb mitmeid kitsaid kõrge pindala- ja nurgamoondega alasid. Pindalaliselt suurenenud punased alad on ruumiliselt suurema ulatusega ning nende vahel esinevad kitsad sinised pindalaliselt vähenenud alad. Samuti langevad pindalaliselt vähenenud alad valdavalt kokku kõrgema nurgamoondega aladega.



Joonis 11. Tartu maakonna pindalamoone, suurim nurgamoone, moondeellipsid ja kontrollpunktide asukohad.

Erinevate kaardilehtede moondenäitajate visuaalseid esitusi uurides selgub, et lisaks arvulistele koondnäitajate erinevustele on kaardilehtede vahel suured erinevused ka moonutuste ruumis varieeruvuses ja sellega kaasnevates mustrites. Arutelu peatükis analüüsitakse moonutuste mustreid lähemalt ja arutletakse erinevate mustrite tekkepõhjuste üle.

6. Arutelu

Käesolevas peatükis tõlgendatakse Mellini atlase kaardilehtedel DDA-analüüsi kaudu tuvastatud moondemustreid ning arutletakse atlase koostamisprotsessi, allikate heterogeensuse ja atlase ruumilise kasutatavuse teemadel. Fookuses on atlase planimeetriline täpsus kui üks ajaloolise kaardi geomeetrilise täpsuse aspekt, mitte atlase väärtuse ammendav hindamine tervikuna. Kuigi tulemused saadi kõigi kümne Eesti alasid kujutava kaardilehe kohta, ei käsitleta arutelus lehti eraldi ühesuguse detailsusega. Arutelus keskendutakse neile kaardilehtedele ja piirkondadele, mille moondemustrid on kas eriti iseloomulikud, kontrastsed või tõlgenduslikult informatiivsed kogu atlase koostamisloogika seisukohalt. Tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et tuvastatud moondeväljad ei kajasta üksnes kaardi algset geomeetriat. Need sisaldavad lisaks ka kontrollpunktide valikust, referentsandmestiku ajalisest nihkest ja kasutatud metoodikast tulenevat määramatust.

Peatükis 3.5.1 kirjeldatud DDA-analüüsi moondeväljade tõlgendusloogika põhjal ei käsitleta arutelus Mellini atlase kaardilehti üksnes täpsete või ebatäpsete üksustena. Analüüsi tulemused näitavad, et atlase planimeetriline täpsus avaldub eelkõige lokaalselt varieeruva moondeväljana. Seetõttu on arutelu keskmes moondeväljade mustritüübid, mis eristuvad kas oma ühtluse, järskude üleminekute, teisenduse mitteüheseks muutumise või sarnaste mustritüüpide naaberlehtedel kordumise tõttu. Selline lähenemine võimaldab hinnata, millistes piirkondades võib moondeväli viidata homogeensemale alusmaterjalile, erinevate allikate sobitamisele või alusmaterjali madalale kvaliteedile.

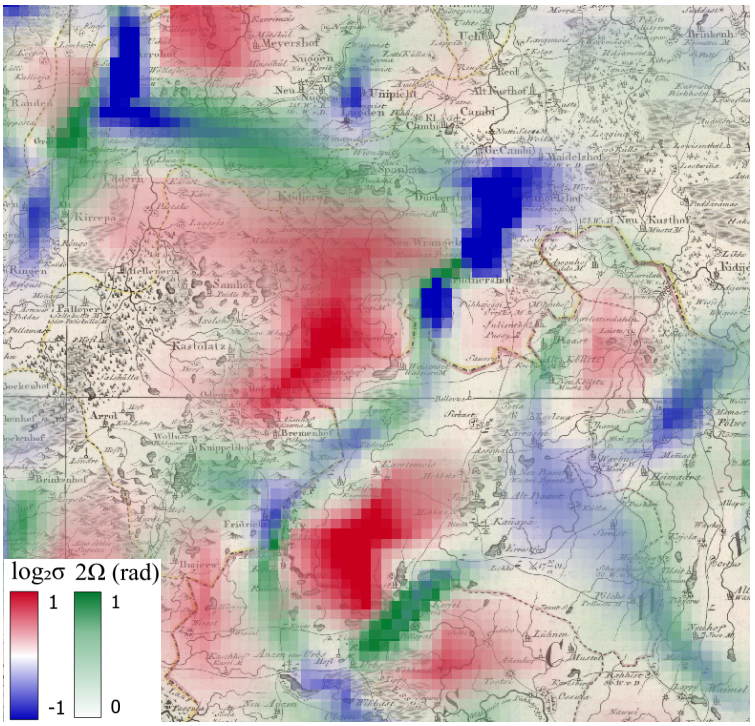
6.1 Moondeväljade tõlgendus

Mellini atlase kaardilehtede moondeväljad on üldiselt lokaalselt varieeruvad ning sageli laigulise iseloomuga. Selle varieeruvuse tõlgendamiseks keskendutakse järgnevalt kolmele kõige ilmekamale piirkondlikule näitele: Kuressaare kaardilehe suhteliselt ühtlasemale moondeväljale, Tartu maakonna põhja- ja lõunaosa kontrastile ning Tallinna, Paide ja Rakvere maakondade lehtede kokkupuutepiirkonna äärmuslikule moonutusele. Need näited toovad esile atlase planimeetrilise täpsuse erinevad avaldumisvormid ning annavad aluse arutleda võimalike seoste üle atlase koostamisprotsessi ja alusmaterjalide heterogeensusega.

Esimese näitena eristub Kuressaare maakonna kaardileht. Kuressaare maakonna kaardilehe suhteliselt ühtlane ja suuremate moonutusteta moondeväli on kooskõlas hüpoteesiga, et selle

koostamisel kasutatud alusmaterjal oli teistest lehtedest homogeensem. Kirjanduse põhjal oli Mellinil selle lehe koostamisel kasutada Campenhauseni alluvuses töötanud maamõõtjate materjalid. See võimaldab oletada, et Mellin tugines Kuressaare maakonna piires suhteliselt ulatuslikult ühtlasema päritolu ja kvaliteediga allikatele, mis võib seletada lehe kõrget planimeetrilist täpsust. Samuti on kontrollpunktide võrk Kuressaare maakonna kaardil suhteliselt tihe, mis tõstab moondevälja usaldusväärsust.

Tartu maakonna kaardilehe moondeväljal on näha selget eristumist kaardilehe põhja- ja lõunaosa vahel. Kui põhjaosa planimeetriline täpsus on suhteliselt kõrge ja sarnaneb Kuressaare maakonna kaardilehele, siis lõuna pool eristuvad pindalamoondes selged pindalaliselt suurenenud laigud, mis vahelduvad kitsamate pindalaliselt vähenenud triipudega, millel on samal ajal ka kõrge nurgamoone (joonis 12).

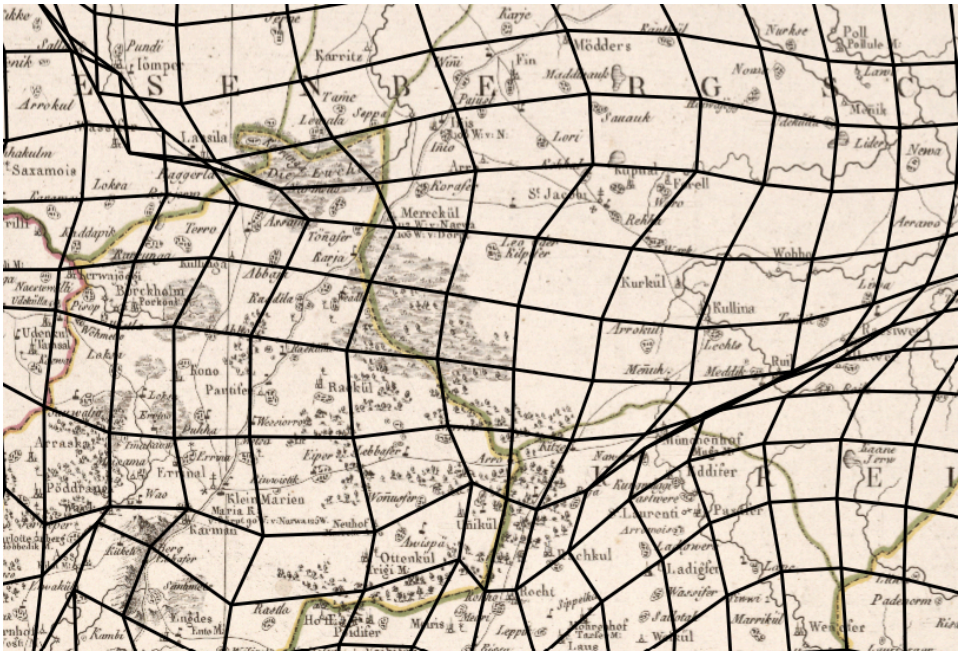


Joonis 12. Näide moondevälja mustritest Tartu maakonna lõunaosas, kitsad pindalaliselt vähenenud ja kõrge nurgamoondega alad viitavad erinevate alusmaterjalide sobitamise piiridele.

Selline muster võib viidata erineva päritolu ja geomeetrilise kvaliteediga alusmaterjalide kokkusobitamisele. Kui ühe kaardilehe koostamisel kasutati erineva mõõtkava, orientatsiooni või sisemise täpsusega kaarte, plaane ja korrespondentide andmeid, võisid nende kokkupuutekohtades tekkida geomeetrilised lahknevused. Nende lahknevuste silumine või sobitamine võis avalduda moondeväljas järskude pindala- ja nurgamoonde üleminekutena,

eriti alusmaterjalide võimalike liitekohtade läheduses. On võimalik, et Tartu maakonna põhjaosa koostati homogeensema või täpsema alusmaterjali põhjal ning lõunaosa pärines erinevatest allikatest. Kuigi võiks arvata, et tihedama asustusega Tartu piirkonna planimeetriline täpsus võis langeda kõrge detailsusega atlasel generaliseerimise tõttu, siis DDA-analüüsi tulemused seda ei toeta. Tartu piirkonnas äärmuslikke moonutusi ei leitud, kuigi kontrollpunktide tihedus on seal kõrge. On võimalik, et Tartu linnast ja ümbritsevast piirkonnast leidus täpsemaid plaane ja kaarte.

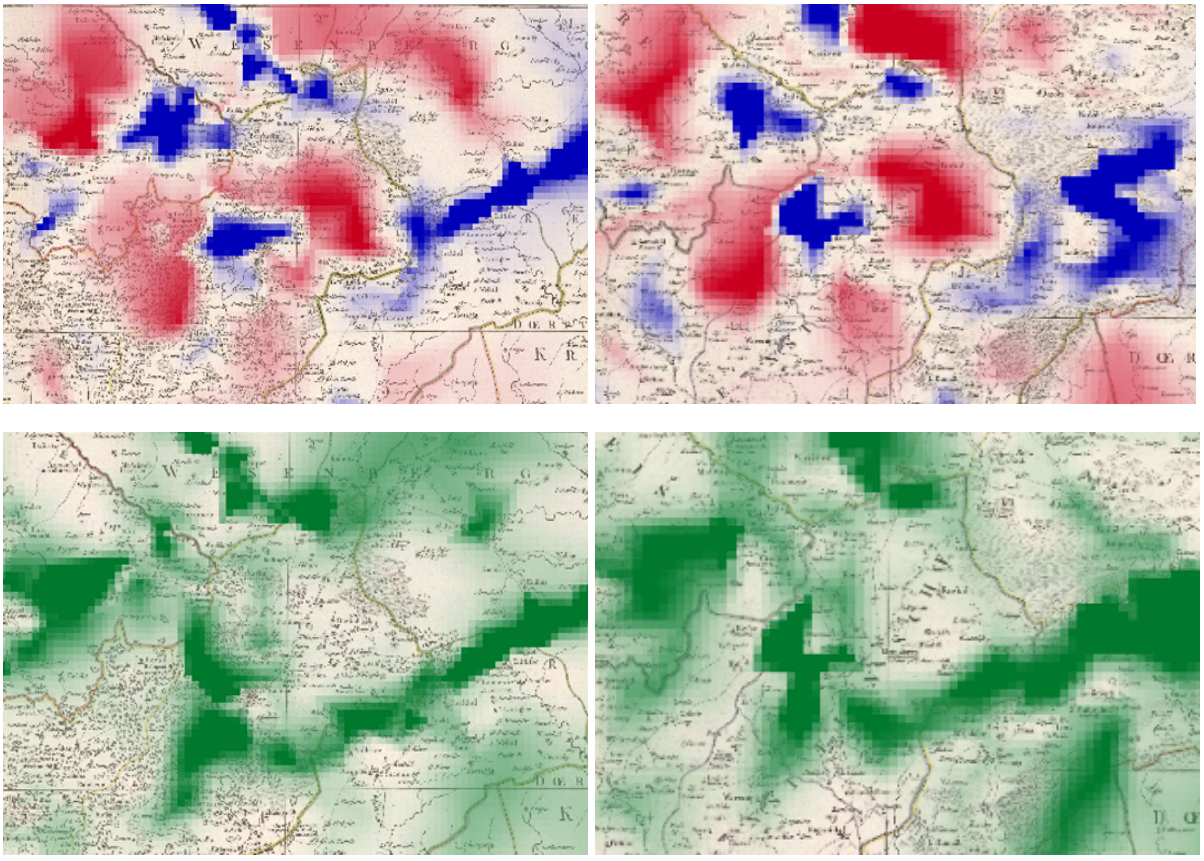
Tallinna, Rakvere ja Paide maakondade lehtede ühisosal ilmnev TPS-teisenduse ülevoltimine on äärmusliku lokaalse moonutuse erijuht. Erinevalt ülejäänud kaardilehtedel esinevatest pindala- ja nurgamoonde kõikumistest kaasneb selles piirkonnas teisenduse lokaalne orientatsiooni ümberpöördumine. Seetõttu ei ole pindala- ja nurgamoonde väärtused seal samal viisil tõlgendatavad kui ülejäänud moondeväljal ning piirkonda on selgem kirjeldada moondevõrgu abil (joonis 13).



Joonis 13. TPS-teisenduse lokaalselt mitteühene käitumine Paide maakonna kaardilehe kirdeosas kujutatud moondevõrguna.

Tegemist on atlase kõige silmapaistvama moondevälja mustriga, mis esineb samaaegselt Tallinna maakonna kaardilehe kaguosas, Paide maakonna kaardilehe kirdeosas ja Rakvere maakonna lääneosas. Valdav osa ehk ligikaudu 79% kõigist kogu atlasel tuvastatud TPS-teisenduse ülevoltimisega võrgupunktidest paikneb selles piirkonnas, mis viitab analüüsitud võrgupunktide põhjal atlase kõige äärmuslikumale lokaalsele moonutusele ja

piirkondlikult väga madalale planimeetrilisele täpsusele. Eriti oluline on see, et selle moondevälja üldine iseloom kordub naaberlehtedel (joonis 14), seetõttu ei saa äärmiselt madalat planimeetrilist täpsust seostada üksikul kaardilehel esineva veaga. Korduv suurt maa-ala hõlmav ja väga madala täpsusega piirkond võib viidata sellele, et Mellin kasutas antud piirkonnas sama probleemset allikat või allikakomplekti. Arvestades, et atlas koostati valdavalt olemasolevate kaartide ja korrespondentidelt kirja teel saadud andmete põhjal, on tõenäoline, et selles piirkonnas tuli omavahel sobitada erineva päritolu ja kvaliteediga alusmaterjale. See võis olla kombinatsioon mõisaplaanidest, kirja teel saadud infost ja vanematest kaartidest. Siiski ei võimalda DDA-analüüsi tulemus üksi kindlaks määrata konkreetset kasutatud allikat, vaid osutab piirkonnale, kus allikate heterogeensus, kvaliteet või nende omavaheline sobitamine avaldub eriti selgelt.



Joonis 14. Väga madala planimeetrilise täpsusega ja ülevoltimisega piirkond Paide maakonna kaardilehel (vasakul) ja Rakvere maakonna kaardilehel (paremal).

Need kolm näidet ei ammenda kõiki atlases esinevaid moonutuste mustreid, kuid toovad esile moondeväljade tõlgendamisel kõige olulisemad erinevused: ühtlasemad väiksema moonutusega alad, lehesisesed kontrastid, erinevate alusmaterjalide sobitamisele viitavad

järsud üleminekud moondeväljades ning lokaalselt mitteühese teisendusega äärmuslikud moonutuste piirkonnad.

Suurema osa kaardilehtede moondeväljadel ei ilmne üks selge ja kogu lehte hõlmav struktuur, kuid see ei vähenda nende tõlgenduslikku väärtust. Vastupidi, moonutuste tugevuse, ulatuse ja mustritüüpide lehesisene varieerumine näitab, et Mellini atlase planimeetrilist täpsust ei saa käsitleda ühe üldise koondnäitajana. DDA-analüüs võimaldab tuvastada moonutuste paiknemist, tugevust ja tüüpi, kuid üksnes moondeväljade põhjal ei saa lõplikult tõestada konkreetsete aluskaartide, plaanide või töövõtete kasutamist. Käesoleva töö panus seisneb seetõttu eelkõige selles, et varem üldisemalt käsitletud atlase heterogeenset koostamist saab nüüd kirjeldada moondeväljade ruumilise struktuuri kaudu. Moondeväljad näitavad, kus erineva iseloomuga geomeetrilised lahknevused atlase lehtedel kõige selgemalt avalduvad.

Sellest tulenevalt on töö oluline järeldus, et Mellini atlas ei ole planimeetrilise täpsuse mõttes ühtne kartograafiline tervik. Atlas sisaldab piirkondi, kus planimeetriline täpsus on suhteliselt kõrge ja ruumiliselt stabiilne, kuid ka piirkondi, kus tugevad lokaalsed moonutused, järsud üleminekud moondeväljas ja TPS-teisenduse ülevoltimine viitavad piirkondlikult väga madalale planimeetrilisele täpsusele.

6.2 Tulemuste tõlgendamise piirid

Homoloogsete kontrollpunktide määramiseks valiti nähtused, mille asukohta on võimalik tuvastada nii Mellini atlasel kui ka referentsandmestikus võimalikult üheselt. Kontrollpunktidena kasutati mõisakeskuseid ning selline valik põhines kolmel kaalutlusel. Esiteks sobivad mõisakeskused punktipõhiseks planimeetriliseks analüüsiks paremini kui mitmed lineaarsed või ebamäärasema geomeetriaga nähtused, sest nende asukohta on punktobjektidena võimalik Mellini atlasel ja referentsandmestikus määrata suhteliselt üheselt, samas näiteks hüdrograafilise võrgu sõlmpunktide või teede ristmike täpne vastavus võib sõltuda generaliseerimisest ja uurija tehtud tõlgendusest. Kui suuremõõtkavaliste ajalooliste kaartide analüüsis sobivad hüdrograafilise võrgu punktid ja hargnemised kontrollpunktideks (Affek, 2013), siis suhteliselt väikese mõõtkavaga Mellini atlasel võisid need nähtused olla osaliselt generaliseeritud, eriti asustamata piirkondades.

Teiseks on mõisakeskus võrreldes paljude teiste nähtustega ajas püsivam asustus- ja haldusüksus. Kuigi aja jooksul võis mõisakompleksi hoonestus ümber kujuneda ja mõisakeskuse täpne sisemine paiknemine mõnevõrra nihkuda, on mõisakeskus kui asustus- ja

haldusüksus üldjuhul püsivam kui näiteks sillad, teeristid või hüdrograafilise võrgu väiksemad sõlmpunktid, mille asukoht võis muutuda nii taristu ümberkujundamise, looduslike protsesside kui ka kartograafilise üldistamise tõttu. Sellised nähtused ei ole kontrollpunktidena sobivad, sest nende ajalooline ja tänapäevane asukoht ei pruugi enam kattuda (Jongepier jt, 2014).

Kolmandaks võimaldab ühe nähtusklassi ehk mõisakeskuste kasutamine tagada parema võrreldavuse kaardilehtede vahel. Kui kontrollpunktid määrataks paralleelselt eri nähtustest, näiteks mõisatest, sildadest ja ristmikest, hakkaks tulemus sõltuma lisaks kaardi geomeetriale ka sellest, milliste nähtuste kaardistamine oli eri lehtedel täpsem ja milliste objektide osakaal konkreetsel lehel suurem oli. Ühtlasem metoodiline alus aitab vältida olukorda, kus kaardilehtede vahelised erinevused kajastavad nähtuste erinevat määratavust, mitte kaardi enda planimeetrilist täpsust. Kontrollpunktide piisav kogus ja võimalikult ühtlane ruumiline jaotus on georefereerimise seisukohalt samuti oluline (Boutoura ja Livieratos, 2006).

Georefereerimise käigus selgus, et kõik mõisakeskuste nimekujud ei olnud ajas muutumatuna püsinud. Mõned muutused olid väiksemad, näiteks Mellini atlasel “Suggaleppa” ja referentsandmestikus “Sugalepa”, kuid leidus ka suuremaid, näiteks vastavalt “Orreda” ja “Hõreda”. Kontrollpunkte määrates kõrvutati atlase toponüümikat 1917. aasta mõisakeskuste atribuutidega „Mõisa nimi” ja „Saksakeelne nimi”. Nimekujude muutumine tekitas vajaduse kohati teostada lisakontrolli ja koguda 1917. aasta mõisakeskuste atribuutide tabelist lisainfot, peamiselt kasutati atribuute “Teised nimed” ja “märkus”, mis sisaldasid endas infot alternatiivsete nimede, mõisa rajamisaasta või muust mõisast eraldamise aasta kohta. Referentsandmestikus kasutati mõisakeskuste punktobjekte nende esitatud kujul. Kontrollpunktide valikuga seotud määramatus tulenes seega lisaks üldisele mõisakeskuse kui nähtuse sobivusele ka sellest, kui üheselt oli võimalik konkreetseid mõisakeskuseid atlase ja referentsandmestiku vahel vastavusse viia.

Samuti mõjutab tulemusi vähesel määral mõisakeskus kui punktleppemärk. Nii Mellini atlasel kui ka referentsandmestikus ei ole üheselt määratud, millist mõisakompleksi elementi punktobjekt tähistab. Kuigi osadel objektidest oli referentsandmestikus atribuudi “Asukohatäpsus” all märgitud, kas punkt tähistab peahoonet, peahoone aset või mõisasüdant, oli selline info olemas vaid ligikaudu pooltel juhtudest. Seetõttu käsitleti nii Mellini atlase mõisate leppemärke kui ka referentsandmestiku punktobjekte mõisakeskuse üldise asukoha

esitusena. Mellini atlase suhteliselt väikese mõõtkava (1:200 000) tõttu võib eeldada, et see ei mõjutanud moondeanalüüsi tulemusi märkimisväärselt.

Mõisakeskuste kasutamise üks piirang on nende ebaühtlane jaotus ja koondumine asustatud piirkondadesse. Hõreda kontrollpunktide võrguga piirkondades ilmnevaid väikseid moonutusi ei saa seetõttu automaatselt tõlgendada kõrge planimeetrilise täpsusena, sest madal kontrollpunktide tihedus võib moondevälja siluda ja moonutusi alahinnata (Vervust jt, 2018). Sellest tulenevalt on DDA-analüüsi tulemuste usaldusväärsus madalam hõredamalt asustatud piirkondades, näiteks metsades või soodes. Kontrollpunktide valiku mõju tulemusele on varasemas kirjanduses samuti rõhutatud: kontrollpunktid tuleks jaotada võimalikult ühtlaselt, kuid kõikides kaardi piirkondades ei pruugi leiduda sobivaid nähtuseid usaldusväärsete punktide määramiseks (Jongepier jt, 2014; Lea ja Legleiter, 2016).

Eeltoodud põhjustel oli kontrollpunktide määramine käesolevas töös paratamatult tõlgenduslik protsess, mistõttu kerkib küsimus, kas osa sellest tööst oleks olnud võimalik automatiseerida. Kuigi hiljutises kirjanduses on katsetatud ka automatiseeritud lahendusi ajalooliste kaartide georefereerimiseks ja homoloogsete kontrollpunktide leidmiseks (Luft ja Schiewe, 2021; Vaienti jt, 2025b), määrati käesolevas töös kontrollpunktid käsitsi. Selline valik tulenes vajadusest kasutada punktipaare, mille vastavust oli võimalik iga paari puhul eraldi hinnata ja kontrollida, sest automaatsed toponüümipõhised meetodid sõltuvad OCR-i kvaliteedist, kohanimeandmestike täielikkusest ja nimekujude ajalisest stabiilsusest (Vaienti jt, 2025b).

Lisaks kontrollpunktide määramise ja ruumilise jaotumise probleemidele mõjutab tulemuste tõlgendamist ka ajaloolise kaardi ja referentsandmestiku ajaline nihe. Mellini atlas ilmus 19. sajandi alguses ja kasutatud referentsandmestik kirjeldab 1917. aasta mõisakeskuseid. Ajalise nihke tõttu ei esinda kasutatud referentsandmestik tingimata 19. sajandi alguse mõisakomplekside täiesti muutumatut ruumilist seisu. 19. sajandi jooksul võis toimuda mõisahoonestuse ümberkujundusi või mõisakeskuse täpse asukoha nihkumisi. Seetõttu kasutati kontrollpunktidena ainult neid mõisakeskusi, mille puhul ei olnud referentsandmestiku atribuutide põhjal põhjust eeldada, et ajaloolise kaardi ja referentsandmestiku vaheline vastavus oleks muutuste tõttu sisuliselt katkenud. Sellise käsitluse alusel on mõisakeskused käesoleva töö jaoks põhjendatud kompromiss referentsandmestiku kättesaadavuse, ajakohasuse ja ruumilise määratavuse vahel.

Kontrollpunktidest tulenev määramatus on oluline ka moondeväljade tõlgendamisel. DDA-analüüsi moondeväljad sõltuvad määratud ruumilisest lahutusest. Vervust jt (2018) rõhutavad, et DDA-analüüsis määrab valitud ruumiline lahutus tuvastatavate moonutuste suuruse. Nähtavad on üksnes need moonutused, mille ruumiline ulatus on suurem kui valitud analüüsi ruumiline lahutus. Nende suuremõõtkavalise (1:11 520) Ferrarise kaardi uurimises kasutatud DDA-analüüsi lahutus 500 m põhines tihedal kontrollpunktivõrgul kümnete tuhandete kontrollpunktidega. Käesolevas töös uuritava Mellini atlase kontrollpunktide võrk on oluliselt hõredam ning kaart ise väiksema mõõtkavaga, mistõttu sama peen lahutus annaks näilise detailsuse, mida sisendandmed ei toeta. Autor katsetas Mellini atlase DDA-analüüsi 1000 m lahutusega, kuid leidis, et sellise detailsusega lahutus tõi küll esile üksikute kontrollpunktide vahelised moonded, kuid lisanduv müra hakkas häirima suuremate mustrite tõlgendamist. Seetõttu valiti moondeanalüüsi ruumiliseks lahutuseks 3000 m, mis on paremini kooskõlas kontrollpunktide tiheduse, kaardi mõõtkava ja uurimuse eesmärgiga kirjeldada suuremaid moonutuste ruumilisi trende, mitte väikese ruumilise ulatusega lokaalseid moonutusi üksikute kontrollpunktide vahel. Lisaks laiendati moondevõrku kahe võrgusammu võrra ehk 6000 m kontrollpunktide kumerast kattest väljapoole. Puhvri eesmärk oli saada moondeväli kogu kaardilehe kohta, sest mitmete kaardilehtede servaaladel ei olnud kontrollpunkte. Seega põhineb teisenduse käitumine väljaspool kontrollpunktide kumerat katet ekstrapoleerimisel, mistõttu tuleb kaardilehtede servaalade moondevälju tõlgendada ettevaatlikumalt.

Eeltoodud metoodika piirangute ja määramatust lisavate tegurite tõttu tuleb antud töös esitatud moondevälju tõlgendada üldiste ruumiliste trendide ja suuremate mustrite indikaatoritena.

6.3 Mellini atlase kasutatavus ruumiandmete allikana

Nagu tulemustest nähtub, ei võimalda analüüs jagada Mellini atlase kaardilehti binaarselt kasutatavateks ja mittekasutatavateks. Erandina eristub Saaremaa leht, mille moondeväli on teiste lehtedega võrreldes ühtlasem ja väiksemate moonutustega. Kõige probleemsemana joonistub välja Paide, Rakvere ja Tallinna lehtede ühisosa, kus moonutused on suuremad ja moondeväli kohati mitteühene. Ülejäänud lehtedel esineb nii suhteliselt täpsemaid kui ka ebatäpsemaid piirkondi, mistõttu atlase kasutatavust tuleb hinnata pigem konkreetse piirkonna ja uurimisküsimuse, mitte ainult kaardilehtede kaupa.

Käesoleva töö tulemused näitavad, et Mellini atlas on ruumiandmete allikana kasutatav eelkõige üldiste piirkondlike mustrite uurimiseks, kuid mitte täpseks objektipõhiseks planimeetriliseks analüüsiks. Atlas sobib asustuse, loodusgeograafia, teedevõrgu ja toponüümika üldiseks uurimiseks, eriti juhul, kui tõlgendamisel arvestatakse kaardilehtede moondevälju. Täpsete kauguste, pindalade, piiride või üksikobjektide asukohtade määramisel tuleb aga olla ettevaatlik, sest moonutused ei jaotu lehtedel ühtlaselt.

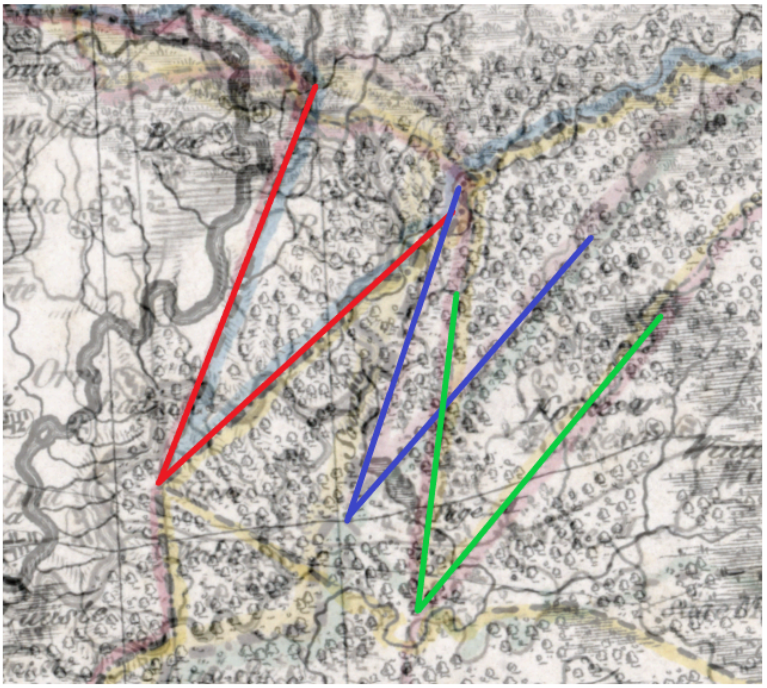
6.4 Mellini atlase kaardilehtede mosaiikimine ja selle problemaatika

Kuigi käesoleva magistritöö keskmes on Mellini atlase planimeetrilise täpsuse hindamine DDA-analüüsi abil, kujunes töö oluliseks praktiliseks väljundiks ka Eesti alasid kujutavate kaardilehtede mosaiikimine sujuvaks georefereeritud kangaks. Kanga loomise käigus ilmnesid praktilisel tasandil samad probleemid, millele osutas ka moondeanalüüs: kaardilehtede geomeetriline ebaühtlus, naaberlehtede servaalade halb kokkulangevus ning vajadus teha erinevate eesmärkide tõttu erinevaid georefereerimisotsuseid. Käesolevas peatükis käsitletakse kanga loomise kogemust DDA-analüüsi tulemusi täiendava praktilise vaatenurgana, mitte eraldiseisva uurimisobjektina. Valminud kaardikangas lisati Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide rakendusse (Tartu Ülikool, 2024), kus see oli ilmumise hetkel esitatud kaartidest vanim. Võrreldes dodies.lv kaardiportaali lehepõhise kuvamisviisiga võimaldab käesoleva töö käigus loodud lahendus atlast vaadelda tervikuna ning vähendab geomeetriliselt ebaühtlastest leheservadest tulenevaid katkestusi (dodies.lv, i.a).

DDA-analüüsi eesmärk oli uurida atlase planimeetrilist täpsust ja sellest tulenevaid moonutuste ruumilisi mustreid. Kanga loomise eesmärk oli seevastu luua visuaalselt ühtne, loetav ning praktiliseks kasutuseks piisava planimeetrilise täpsusega raster, mis sobituks võimalikult hästi tänapäevase referentskaardiga. Seetõttu tuli kontrollpunktide määramisel ja georefereerimisel kasutada teistsugust lähenemist.

Traditsiooniliste, geodeetilise alusega kaartide puhul piirdub georefereerimine sageli mõõduka hulga kontrollpunktide määramise ja mõne lihtsama ning vähem moonutava teisenduse rakendamisega. Üldjuhul piisab sellest soovitud geodeetilise ja planimeetrilise täpsuse saavutamiseks. Mellini atlase kui dokumenteeritud geodeetilise aluseta ajaloolise atlase puhul ilmnesid sellise lähenemise piirangud aga kiiresti. Atlase ruumis tugevalt varieeruv ja valdavalt madal planimeetriline täpsus tingis olukorra, kus sõltumata georefereerimise kvaliteedist ei lange naaberlehtede maakonnapiirid, rannajoon, teedevõrk

ega hüdrograafiline võrgustik omavahel kokku (joonis 15). Nähtavasti ei ole atlase koostamisloogika lähtunud hilisemast mosaiikimise võimaldamisest. Kanga loomisel kasutati TPS-teisendust, mida rakendati hiljem ka DDA-analüüsis, kuid kahe töö eesmärkide erinevuse tõttu erinesid kontrollpunktide valik ja tihedus märkimisväärselt.

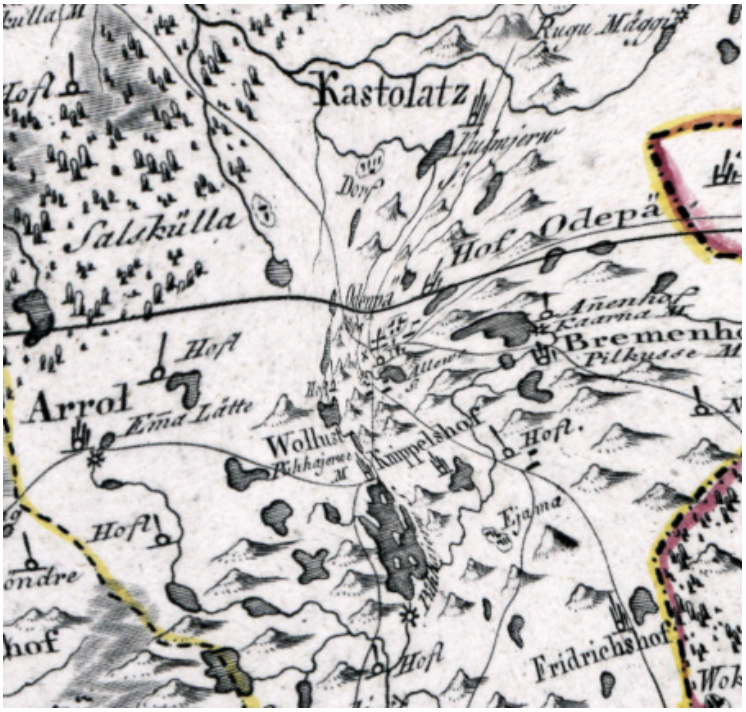


Joonis 15. Kanga loomise problemaatika: Paide maakonna väljaulatuva piiriosa erinev asend Pärnu (punasega), Paide (sinisega) ja Viljandi (rohelisega) maakondade kokkupuutekohas pärast afiinset teisendust.

Atlase mosaiikimisel TPS-teisendusega tuli teha mitmeid kompromisse. Võrreldes hiljem DDA-analüüsis rakendatud kontrollpunktivõrguga kasutati oluliselt vähem kontrollpunkte, ligikaudu 50 kontrollpunkti lehe kohta. Kontrollpunktide valik ja arv sõltusid tugevalt soovitud tulemusest. Oluline oli saavutada selline georefereeritud kangas, millel suuremad linnad, olulisemad teed, hüdrograafiline võrk ja maakonnapiirid langeksid võimalikult hästi kokku nii tänapäevase referentskaardiga võrreldes kui ka naaberlehtede servades. Kontrollpunktidena kasutati mõisakeskusi, millele lisandusid suuremate linnade keskused, mõned olulisemad sillad, ristmikud ja rannajoone punktid. Lisaks kasutati hulgaliselt valikulisi tehislikke lisakontrollpunkte rannajoone, mõningate asulate ja maakonnapiiride sobitamiseks.

Töö käigus selgus siiski, et liiga tihe kontrollpunktivõrk põhjustas kaardi rastris kohati liigset moondumist, mistõttu ei olnud raster enam kanga loomise eesmärgi seisukohalt kasutatav

(joonis 16). Hilisem võrdlus DDA-analüüsis kasutatud oluliselt tihedama kontrollpunktide võrguga kinnitas, et selline punktide hulk sobis analüütiliseks moonde hindamiseks, kuid ei olnud samal kujul rakendatav visuaalselt sidusa ja loetava kanga loomisel. Seetõttu tuli kontrollpunktide arvu piirata ning teha kompromiss geomeetrilise täpsuse ja kaardilehe loetavuse säilitamise vahel. Kanga rastrile tuli rakendada ka järeltöötlust ning teostada väljalõigatud kaardilehtede piiride silumist pilditöötlusprogrammis.



Joonis 16. Atlase madala ja ruumis varieeruva planimeetrilise täpsuse tõttu tuli TPS-teisendust kasutades kontrollpunktide võrku harvendada, et vältida äärmuslikke moonutusi ja säilitada kaardi loetavus. Harvendamise tõttu langes kanga geomeetriline täpsus.

Kanga loomine oli ajamahukas ning nõudis suurel hulgal käsitsi tehtud georefereerimise, sobitamise ja järeltöötlusega seotud otsuseid. See näitab, kui keeruline on dokumenteeritud geodeetilise aluseta ja heterogeense alusmaterjali põhjal koostatud ajaloolist kaarti kasutada tervikliku ruumiandmekihina. Seetõttu ei saa valminud kangast käsitleda geodeetiliselt range ega kogu ulatuses ühtlase täpsusega ruumiandmekihina, vaid eelkõige praktilise ja visuaalselt sidusa esitluslahendusena. Kanga loomisel ilmnenud raskused olid sisuliselt naaberlehtede servade ühildamise probleemid, mis tulenesid sellest, et atlase lehed ei lähtu ühtsest geodeetilisest alusraamistikust ja ei põhine täpsetel mõõdistustel. Selles aspektis kinnitas kanga loomise praktiline kogemus ka käesoleva töö peamist järeldust: Mellini atlas ei moodusta geomeetriliselt ühtlast tervikut ning selle planimeetriline täpsus varieerub nii

lehtede vahel kui ka lehtede sees. Valminud kangas on sellest hoolimata väärtuslik ja praktiline tulemus, mis muudab atlase paremini kättesaadavaks ning võimaldab seda kasutada ajaloolise asustuse, teedevõrgu ja maastikuelementide üldise paiknemise uurimisel, eeldusel, et täpsete lokaalsete ruumisuhete tõlgendamisel säilitatakse ettevaatlikkus.

6.5 Edasised uurimissuunad

Käesoleva töö käigus läbi viidud moondeanalüüs ja Mellini atlase Eesti ala kaardilehtedest mosaiikimise teel koostatud kaardikangas loovad aluse atlase edasiseks uurimiseks. Atlase edasine uurimine võiks liikuda neljas suunas. Esiteks tuleks laiendada diferentsiaalset moondeanalüüsi ka Läti alasid kujutavatele kaardilehtedele, et hinnata atlase planimeetrilist täpsust tervikuna. Teiseks võiks töös tuvastatud moondeväljade mustreid võrrelda Mellini atlase võimalike kartograafiliste lähtematerjalidega, sealhulgas mõisaplaanide ja teiste 18. sajandi lõpu kaartidega. Kolmandaks oleks ühel valitud kaardilehel võimalik teostada tihedama kontrollpunktivõrguga detailsem analüüs, et selgitada, kas suuremad moondemustrid jagunevad väiksemateks allikapiirkondadeks või liitekohtadeks. Neljandaks on vajalik läbi viia metoodiline tundlikkusanalüüs, mis hindaks kontrollpunktide valiku, nähtusklasside, kontrollpunktide ruumilise jaotuse ning DDA-analüüsi ruumilise lahutuse mõju tulemustele. Lisaks võiks moondevälju kasutada Mellini atlaselt pärinevate ajalooliste ruumiandmete määramatuse kirjeldamiseks, et atlaselt digitud nähtusi oleks võimalik GIS-analüüsides tõlgendada koos ruumilise usaldusväärsuse hinnanguga.

7. Kokkuvõte

Magistritöös analüüsiti 18. sajandi lõpus koostatud L. A. Mellini Liivimaa atlase planimeetrilist täpsust ehk seda, kuidas vastavad kaardil kujutatud nähtuste vahelised suunad ja kaugused tänapäeva referentskaardile. Mellini atlas on Eesti kartograafia ajaloos oluline ning detailne teos, kuid see ei põhine triangulatsioonil ning sellel puudub dokumenteeritud geodeetiline alus. Atlas koostati valdavalt olemasolevate kaartide ja korrespondentide saadetud info põhjal, mistõttu on selle täpsus üldiselt madal, lisaks sellele ei ole koostamise protsessi detailselt dokumenteeritud. Magistritöö kasvas välja Mellini atlase kaardilehtedest mosaiikimise teel ühtse ja sujuva georefereeritud kanga loomisest. Protsessi käigus selgus, et kaardilehed ei moodusta mosaiikimisel sujuvat tervikut, mis viitas vajadusele uurida atlase planimeetrilist täpsust lähemalt. Magistritöö eesmärgiks oli uurida, millised moonutused esinevad Mellini atlasel, kus need asuvad, millele võivad need viidata ning siduda see atlase kaardilehtede mosaiikimise problemaatikaga.

Moondeanalüüs põhines mõisakeskuste alusel moodustatud homoloogsetel kontrollpunktide paaridel. Mellini atlasel kasutati mõisakeskuste leppemärke, referentsandmestik mõisakeskuste asukohtadega 1917. aasta seisuga pärineb Rahvusarhiivist ja Maa- ja Ruumiametilt. Kümnele Eesti alasid kujutavale kaardilehele märgiti 183 kuni 324 kontrollpunkti. Analüüsiks kasutati diferentsiaalset moondeanalüüsi (DDA). DDA-analüüsi käigus rakendati esmalt kontrollpunktidele globaalne Helmerti teisendus, mille eesmärk oli minimeerida kontrollpunktide vaheline globaalne viga. Järgmisena rakendati kontrollpunktidele interpoleeriv *thin plate spline* (TPS) teisendus, mille osatuletiste põhjal arvutati moondeväljad kogu kaardilehe ulatuses. DDA-analüüsis kasutatav võrgusamm oli 3000 m. DDA-analüüsi tulemusena saadi kaardilehtede moondenäitajate koondtabelid ning iga kaardilehe kohta eraldi moondeellipsid ning interpoleeritud pindala- ja nurgamoondeväljade kaardid.

Selgus, et moonutuste suurus ja paiknemine erinevad kaardilehtede sees ja lehtede vahel märgatavalt. Teistest lehtedest oluliselt madalamate moondenäitajatega on Kuressaare maakonna leht, mille koostamisel kasutas Mellin teadaolevalt homogeenset alusmaterjali. Veel üks eristuv muster leiti Tartu maakonna lehelt. Lehe moondeväljal esinevad ulatuslikud pindalaliselt suurenenud piirkonnad, mille vahel on pindalaliselt vähenenud ja kõrge nurgamoondega kitsamad alad. Sellised mustrid viitavad erinevate allikate võimalikele liitekohtadele. Lisaks esineb kuuel kaardilehel kümnest üksikutes piirkondades

TPS-teisenduse ülevoltimist, kus äärmuslike moonutuste tõttu pöördub teisenduse lokaalne orientatsioon ümber. Kokkuvõttes näitas DDA-analüüs, et Mellini atlase moonutused ei jaotu juhuslikult ega ühtlaselt, vaid moodustavad piirkonniti eristuvaid mustreid. Seetõttu on atlase planimeetriline täpsus ruumis tugevalt varieeruv.

Kaardilehtedest mosaiikimise teel kanga loomise töövoog erines moondeanalüüsist – eesmärk oli luua sujuv ja rahuldava planimeetrilise täpsusega georefereeritud kangas. Praktikas tähendas see kompromissi kanga täpsuse ning loetavuse vahel. Protsess oli töömahukas ning georefereeritud kanga loomise problemaatika kinnitas DDA-analüüsis ilmnenud atlase geomeetrilist ebaühtlust.

Töö oluline tulemus on atlase lehtedest loodud georefereeritud kangas, mis on kättesaadav Maa- ja Ruumiameti ajalooliste kaartide rakenduses. See muudab seni kaardilehtedena käsitletud atlase digitaalselt kasutatavaks ja tänapäevaste ruumiandmetega võrreldavaks tervikuks, lihtsustades nii atlase uurimist kui ka selle kasutamist ajaloolise ruumiandmete allikana. Teine oluline töö väljund on moondeanalüüs, mille tulemused aitavad mõista atlase moonutuste iseloomu, nende ruumilist jaotust ja atlase kui ruumiandmete allika kasutamise piiranguid. Lisaks loovad moondeanalüüsi tulemused lähtekoha aruteluks atlase koostamisprotsessi ja võimalike alusmaterjalide teemadel.

Georeferencing and analysis of the planimetric accuracy of the Estonian map sheets of L. A. Mellin's Atlas of Livonia

Mihkel Paal

Summary

Historical maps are beautiful works of art, but in addition they also contain valuable geographic information. Thanks to digitising and advancements in GIS-technology in recent years it is possible to analyse historical maps. The analysis has two principal benefits: georeferenced historical maps can be used as a source of spatial data, secondly through analysing the distortions on historical maps it is possible to assess the quality of spatial data found on the maps and also gather information on the process of compiling said map.

This master's thesis analysed the planimetric accuracy of L. A. Mellin's atlas of Livonia, i.e. how the distances and angles between objects on the atlas correspond to those on a modern reference map. The atlas was compiled in the late 18th century and is composed of 14 county sheets, 10 of which depict Estonia and are the focus of this study. Atlas of Livonia is one of the most important works in the history of Estonian cartography, the atlas is highly detailed for the time period and holds thousands of place names written in Estonian in addition to German. Though the atlas is detailed, it lacks accuracy. The atlas was made before precise triangulation surveys were carried out and does not have a documented geodetic system. The atlas was composed of existing maps and information received from correspondents by letter. Heterogenous source material of varying quality combined with the fact that the process of compiling the atlas is not well documented means that the accuracy of the atlas is not very high. This study started from mosaicking the sheets of the atlas into a single georeferenced raster to be displayed in a web map application. During the process it became clear that the map sheets don't form a seamless and accurate compiled raster. This indicated the need to investigate the geometric accuracy of the atlas more closely. The aim of this thesis was to investigate the spatial variability and possible causes of geometric distortions in Mellin's atlas and to relate these patterns to the practical difficulties of creating a geometrically coherent mosaic of the atlas sheets.

The distortion analysis was based on homologous control point pairs based on manor centres. The symbols indicating manor centres were used on Mellin's atlas. The reference dataset depicting manor centre locations in 1917 was obtained from the National Archives and the

Republic of Estonia Land and Spatial Development Board. 183 to 324 control point pairs were formed on 10 sheets of the atlas depicting modern day Estonia. Differential Distortion Analysis (DDA) with 3000 m spatial resolution was used to analyse the distortions. DDA analysis was composed of two parts. Firstly, a global Helmert transformation was applied to the control points. Then, a local thin plate spline transformation was applied and the distortion metrics are calculated from its local partial derivatives. The outputs of the DDA analysis were summary tables of distortion metrics and separate maps of distortion ellipses and interpolated area scale factor and maximum angular distortion fields for each map sheet.

The results indicate that the intensity and distribution of distortions vary considerably between the sheets of the atlas. The sheet of Kuressaare county has significantly lower distortion metrics than other sheets, mostly due to the fact that Mellin was able to use homogeneous source material for that area. Another interesting pattern emerges on the sheet of Tartu county: patches of stretched out areas that are bordered by thin strips of compressed areas with high angular distortion. This pattern indicates areas where different source materials were combined or stitched together. In addition, six of the ten analysed sheets contain areas where planimetric accuracy is extremely low. In these areas, the thin plate spline transformation locally flips orientation, producing a phenomenon known as foldover.

The process of creating a smooth and geometrically coherent mosaic of the atlas sheets differed from the distortion analysis: the aim was to create a mosaic with decent planimetric and geometric accuracy. In practice, this meant compromising between the accuracy and readability of the mosaic due to the distortions present on the atlas. The process was time consuming and further confirmed the results of the DDA analysis.

A major practical outcome of this thesis is the creation of a seamless georeferenced mosaic of the atlas sheets, which is published in the historical map web application of the Republic of Estonia Land and Spatial Development Board. The mosaic makes studying the atlas significantly more accessible. The second major contribution of this thesis is the distortion analysis, which revealed the spatial distribution of distortions in the atlas and helped to clarify the limitations of using it as a spatial data source. In addition, the results of the distortion analysis provide a basis for further discussion of the atlas's compilation process and the possible source materials used in its production.

Tänuavaldused

Soovin tänada enda juhendajat Raivo Aunapit, kes oli kogu protsessi vältel nõu ja jõuga abiks ning kelle kartograafia-alasele ekspertiisile sai alati loota. Samuti soovin tänada Taavi Paed, kes aitas mul paremini mõista atlase ajaloolist tausta ja leida ning mõista asjakohaseid ajalooliseid allikaid.

Kasutatud kirjandus

Affek, A. (2013). Georeferencing of historical maps using GIS, as exemplified by the Austrian Military Surveys of Galicia. *Geographia Polonica*, *86*(4), 375–390.

Aguilar-Camacho, J., Granado-Castro, G., & Cabrera-Revuelta, E. (2022). Visualization of the Local Distortions on the Oldest Known Urban Map of Seville *(1771)*. 443–452. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04632-2_46

Atlas Von Liefland. (1805). *Allgemeine geographische Ephemeriden*, *34*(1), 080–082.

Balletti, C. (2006). Georeference in the analysis of the geometric content of early maps. *e-Perimetron*, *1*(1), 32–42.

Bayer, T., Potůčková, M., & Čábelka, M. (2010). Cartometric Analysis of Old Maps on the Example of Vogt's Map. *Cartography in Central and Eastern Europe: CEE 2009* (lk 509–524). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03294-3_33

Bitelli, G., Cremonini, S., & Gatt, G. (2012). Analysis of Pre-Geodetic Maps in Search of Construction Steps Details. *Cartography—A Tool for Spatial Analysis*. InTech. https://doi.org/10.5772/46189

Boutoura, C., & Livieratos, E. (2006). Some fundamentals for the study of the geometry of early maps by comparative methods. *E-Perimetron*, *1*(1), 60–70.

Brovelli, M., & Minghini, M. (2012). Georeferencing old maps: A polynomial-based approach for Como historical cadastres. *e-Perimetron*, *7*(3), 97–110.

Chalkias, C., Papadias, E., Vradis, C., Polykretis, C., Kalogeropoulos, K., Psarogiannis, A., & Chalkias, G. (2023). Developing and Disseminating a New Historical Geospatial Database from Kitchener's 19th Century Map of Cyprus. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/ijgi12020074

Claeys Boùùaert, M. (2025). distortionAnalysis. https://github.com/mclaeysb/distortionAnalysis

Claeys Boùùaert, M, De Baets, B., Vervust, S., Neutens, T., De Maeyer, P., & Van De Weghe, N. (2016). Computation and visualisation of the accuracy of old maps using differential distortion analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, *30*(7), 1255–1280. https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1127377

Der Hapsalsche Kreis. (1802). *Allgemeine geographische Ephemeriden*, *9*(2), 177–179.

Dodies.lv. (i.a.). Kasutatud 15.04.2026. https://vesture.dodies.lv/help.html

Ekamper, P. (2010). Using cadastral maps in historical demographic research: Some examples from the Netherlands. *The History of the Family*, *15*(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/j.hisfam.2010.01.003

Ergun, B., Sahin, C., & Bilucan, F. (2025). An Analysis of the Historical Moltke Map of Istanbul using Georeferencing with Robust Estimation. *The Cartographic Journal*, *62*(2), 73–85. https://doi.org/10.1080/00087041.2025.2591460

ESRI. (i.a.). Overview of georeferencing—ArcGIS Pro | Documentation. Kasutatud 29.03.2026. https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm

Forstner, G., & Oehrli, M. (1998). Graphische Darstellungen der Untersuchungsergebnisse alter Karten und die Entwicklung der Verzerrungsgitter. *Cartographica Helvetica*, *17*, 35–43.

Frajer, J., Pavelková, R., Létal, A., & Kopp, J. (2021). Relics and transformation of former ponds in the urban environment of the historical region of Bohemia (Czech Republic). *Journal of Maps*, *17*(4), 151–161. https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1819900

Friebe, W. C. (1794). Physisch, oeconomisch und statistische Bemerkungen von Lief und Ehstland, oder von den beiden Statthalterschaften Riga und Reval. J.F. Hartknoch.

Głażewski, A., Holubinka, Y., Pędzich, P., & Yurkiv, M. (2025). Research on the Metric Properties of Plans of Lviv from 1766 to 1844. *The Cartographic Journal*, *62*(1), 3–20. https://doi.org/10.1080/00087041.2025.2477862

Hu, B. (2010). Application of Geographic Information Systems (GIS) in The History of Cartography. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *42*, 1548–1551.

Hughes, M., & Marcus, W. (2006). Accuracy Assessment of Georectified Aerial Photographs: Implications for Measuring Lateral Channel Movement in a GIS. *Geomorphology*, *74*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001

Höchstinteressante Anekdote, die Geographie von Lief- und Esthland betreffend. (1803). *Allgemeine geographische Ephemeriden*, *12*(5), 624–627.

Jenny, B., & Hurni, L. (2011). Studying cartographic heritage: Analysis and visualization of geometric distortions. *Computers & Graphics, Virtual Reality in Brazil*, *35*(2), 402–411. https://doi.org/10.1016/j.cag.2011.01.005

Jenny, B., Weber, A., & Hurni, L. (2007). Visualizing the Planimetric Accuracy of Historical Maps with MapAnalyst. *Cartographica*, *42*(1), 89–94. https://doi.org/10.3138/carto-v42-1-089

Jongepier, I., Soens, T., Temmerman, S., & Missiaen, T. (2014). Assessing the Planimetric Accuracy of Historical Maps (Sixteenth to Nineteenth Centuries): New Methods and Potential for Coastal Landscape Reconstruction. *The Cartographic Journal*, *53*, 1743277414Y.000. https://doi.org/10.1179/1743277414Y.0000000095

Jürjo, I. (2003). Ludwig August krahv Mellin kui talurahva sõber ja estofiil. *Tuna*, *4*, 50–66.

Kerkovits, K. (2020). A statistical reinterpretation and assessment of criteria used for measuring map projection distortion. *Cartography and Geographic Information Science*, *47*(6), 481–491. https://doi.org/10.1080/15230406.2020.1768439

Kersten, T., Stößel, L., & Lindstaedt, M. (2024). Digitisation and Georeferencing of an Oversized Historical Map of the Bailiwick of Neuland (Winsen/Luhe) using Structure-from-Motion (SFM) Photogrammetry. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, *74*(1), 53–69. https://doi.org/10.1007/s42489-023-00157-3

Korodi, E., & Hofmann, T. (2016). Historical cartographic overview and cartographic analysis of the geological map of TRANSYLVANIA by HAUER (1861). *Geographia Technica*, *11*, 44–53. https://doi.org/10.21163/GT_2016.111.06

Krisztián, K. (2018). Comparing finite and infinitesimal map distortion measures. *International Journal of Cartography*, *5*, 1–20. https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1500255

Lampropoulos, G., Panagiotopoulos, G., Giannakoula, C., & Kokkalas, A. (2023). Geovisualization of Historical Geospatial Data: A Web Mapping Application for the 19th-Century Kaupert's Maps of Attica. *Geographies*, *3*(2), 398–415. https://doi.org/10.3390/geographies3020021

Laskowski, P. H. (1989). The Traditional and Modern Look at Tissot's Indicatrix. *The American Cartographer*, *16*(2), 123–133. https://doi.org/10.1559/152304089783875497

Lea, D. M., & Legleiter, C. J. (2016). Refining measurements of lateral channel movement from image time series by quantifying spatial variations in registration error. *Geomorphology*, *258*, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.009

Library of Congress. (i.a.). *Atlas von Liefland*. Kasutatud 10.01.2026. https://www.loc.gov/item/75572471/

Liefländische Karten. (1798). *Allgemeine geographische Ephemeriden*, *12*(5), 451–454.

Loran, C., Haegi, S., & Ginzler, C. (2018). Comparing historical and contemporary maps—A methodological framework for a cartographic map comparison applied to Swiss maps. *International Journal of Geographical Information Science*, *32*(11), 2123–2139. https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1482553

Luft, J., & Schiewe, J. (2021). Automatic content‐based georeferencing of historical topographic maps. *Transactions in GIS*, *25*(6), 2888–2906. https://doi.org/10.1111/tgis.12794

Lukas, M. C. (2014). Cartographic Reconstruction of Historical Environmental Change. *Cartographic Perspectives*, (78), 5–24. https://doi.org/10.14714/CP78.1218

Maa- ja Ruumiamet. (i.a). Ajalooliste kaartide kaardirakendus. Kasutatud: 21.05.2026. https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/ajalooline

Manzano-Agugliaro, F., San-Antonio-Gómez, C., López, S., Montoya, F. G., & Gil, C. (2013). Pareto-based evolutionary algorithms for the calculation of transformation parameters and accuracy assessment of historical maps. *Computers & Geosciences*, *57*, 124–132. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.010

Mellin, L. A. (1798). *Atlas von Liefland*. https://www.loc.gov/item/75572471/

Tartu Ülikool. (2024). Mellini atlas jõudis Maa-ameti kaardiserverisse. Kasutatud 12.04.2026. https://ut.ee/et/sisu/mellini-atlas-joudis-maa-ameti-kaardiserverisse

Mulcahy, K. A., & Clarke, K. C. (2001). Symbolization of Map Projection Distortion: A Review. *Cartography and Geographic Information Science*, *28*(3), 167–182. https://doi.org/10.1559/152304001782153044

Narin, O. G., & Gullu, M. (2021). Evaluating the Planimetric Accuracy of a Historical Map (Europe and the Mediterranean Sea by Piri Reis): A New Method and Cartographic Analysis. *The Cartographic Journal*, *58*(4), 341–352. https://doi.org/10.1080/00087041.2021.1956064

Ntassiou, K. (2024). Reconstructing historical road landscapes along the corridors of early 20th-century road networks in Northern Greece. *Landscape Research*, *49*(6), 802–822. https://doi.org/10.1080/01426397.2024.2354362

Ostafin, K., Pietrzak, M., & Kaim, D. (2021). Impact of the Cartographer's Position and Topographic Accessibility on the Accuracy of Historical Land Use Information: Case of the Second Military Survey Maps of the Habsburg Empire. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/ijgi10120820

Pearson, A. W. (2006). Digitizing and analyzing historical maps to provide new perspectives on the development of the agricultural landscape of England and Wales. *E-Perimetron (ISSN 1790 - 3769)*, *1*(3), 178–193.

Perthus, S., & Faehndrich, J. (2013). Visualizing the map-making process: Studying 19th century Holy Land cartography with MapAnalyst. *e-Perimetron*, *8*, 60–84.

Plewe, B. (2002). The Nature of Uncertainty in Historical Geographic Information. *T. GIS*, *6*(4), 431–456. https://doi.org/10.1111/1467-9671.00121

Rahvusarhiiv ja Maa- ja Ruumiamet. (2025). Haldus- ja asustusjaotuse ajaloolised andmed. Kasutatud 12.01.2026. https://metadata.geoportaal.ee/geonetwork/srv/est/catalog.search#/metadata/36521a37-d885-4016-a4a8-55b475f6246b

Reckziegel, M., Wrisley, D. J., Hixson, T. W., & Jänicke, S. (2021). Visual exploration of historical maps. *Digital Scholarship in the Humanities*, *36*(Supplement_2), ii251–ii272. https://doi.org/10.1093/llc/fqaa059

Roulier, F. (2023). Geometric Morphometrics Applied to Cartography. *Revue internationale de géomatique*, *32*, 17–37. https://doi.org/10.32604/rig.2023.045458

Schaffer, G., Peer, M., & Levin, N. (2016). Quantifying the completeness of and correspondence between two historical maps: A case study from nineteenth-century Palestine. *Cartography and Geographic Information Science*, *43*(2), 154–175. https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1029519

Snyder, J. P. (1987). Map projections: A working manual. *Professional Paper* (No. 1395). U.S. Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp1395

Symington, A., Charlton, M. E., & Brunsdon, C. F. (2002). Using bidimensional regression to explore map lineage. *Computers, Environment and Urban Systems*, *26*(2), 201–218. https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00042-4

Zohar, M. (2019). Follow the road: Historical GIS for evaluating the development of routes in the Negev region during the twentieth century. *Cartography and Geographic Information Science*, *46*(6), 532–546. https://doi.org/10.1080/15230406.2019.1577176

Tissot, A. (1878). Mémoire sur la représentation des surfaces et les projections des cartes géographiques. *Nouvelles annales de mathématiques : journal des candidats aux écoles polytechnique et normale*, *17*, 49–55.

Tobler, W. R. (1994). Bidimensional Regression. *Geographical Analysis*, *26*(3), 187–212. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1994.tb00320.x

Tsorlini, A., Iosifescu, I., Iosifescu Enescu, C., & Hurni, L. (2014). A methodological framework for analyzing digitally historical maps using data from different sources through an online interactive platform. *e-Perimetron*, *9*(4), 153–165.

Tucci, M., & Giordano, A. (2011). Positional accuracy, positional uncertainty, and feature change detection in historical maps: Results of an experiment. *Computers, Environment and Urban Systems*, *35*(6), 452–463. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.05.004

Vaienti, B., di Lenardo, I., & Kaplan, F. (2025a). Exploring cartographic genealogies through deformation analysis: Case studies on ancient maps and synthetic data. *Cartography and Geographic Information Science*, *52*(5), 557–577. https://doi.org/10.1080/15230406.2024.2424891

Vaienti, B., di Lenardo, I., & Kaplan, F. (2025b). Georeferencing historical maps using local feature matching and Delaunay consistency. *Cartography and Geographic Information Science*, 1–23. https://doi.org/10.1080/15230406.2025.2566789

Vaienti, B., Lenardo, I. di, Kaplan, F. (2025c). Segmentation and Clustering of Local Planimetric Distortion Patterns in Historical Maps of Jerusalem. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/ijgi14030132

Varep, E. (1955). L. A. Mellini Liivimaa atlas ning selle tähtsus Eesti NSV territooriumi geograafilise uurimise ajaloos. *ENSV TA Toimetised* (lk 300–316).

Varep, E. (1960). *Jooni Eesti kartograafia ajaloost*. https://hdl.handle.net/10062/110625

Varep, E. (1964). Count L. A. Mellin and his „Atlas of Livonia“. *Geograafia-alaseid töid. IV, Pühendatud XX Rahvusvahelisele geograafia kongressile* (lk 106–131). Tartu Riiklik Ülikool. http://hdl.handle.net/10062/41628

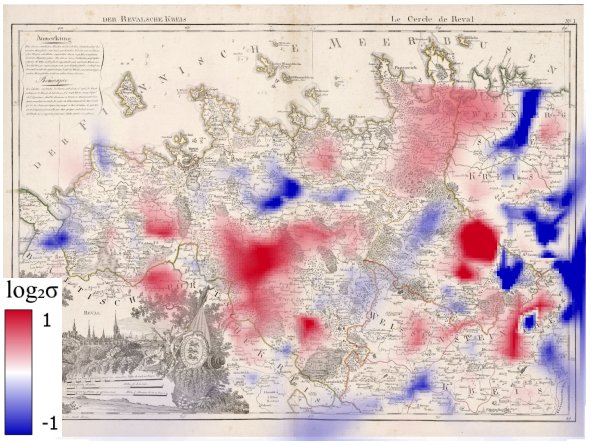
Vervust, S., Boùùaert, M. C., De Baets, B., Van de Weghe, N., & De Maeyer, P. (2018). A Study of the Local Geometric Accuracy of Count de Ferraris's Carte de cabinet (1770s) Using Differential Distortion Analysis. *The Cartographic Journal*, *55*(1), 16–35. https://doi.org/10.1080/00087041.2017.1323148

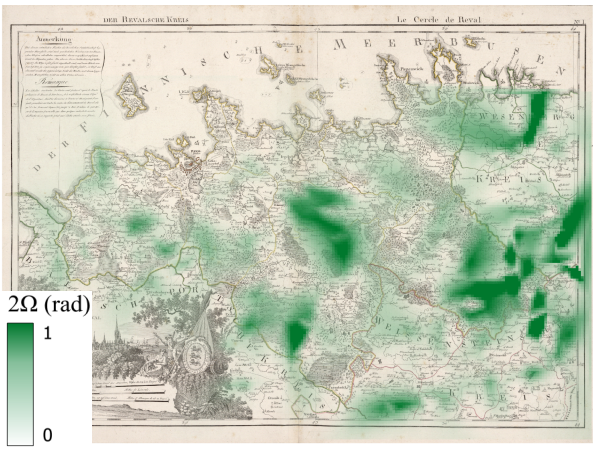
Yabe, N. (2024). Mapmaking Process Reading from Local Distortions in Historical Maps: A Geographically Weighted Bidimensional Regression Analysis of a Japanese Castle Map. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *13*(4), 124. https://doi.org/10.3390/ijgi13040124

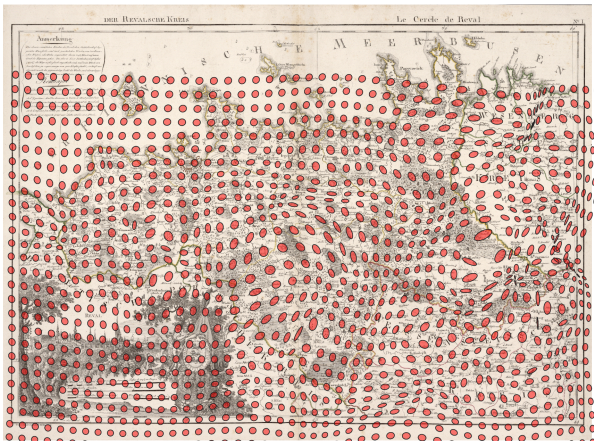
Lisad

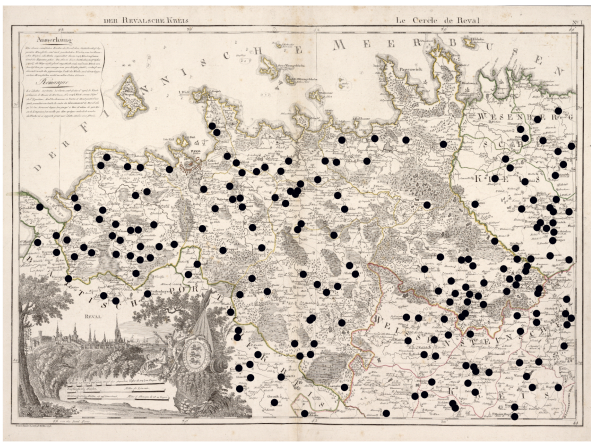
Lisa 1. Tallinna maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid:



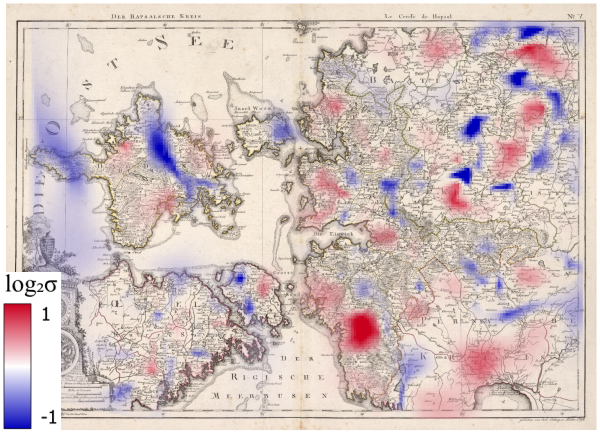


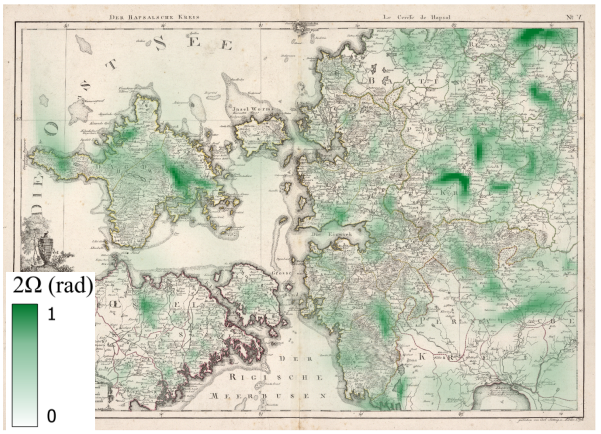


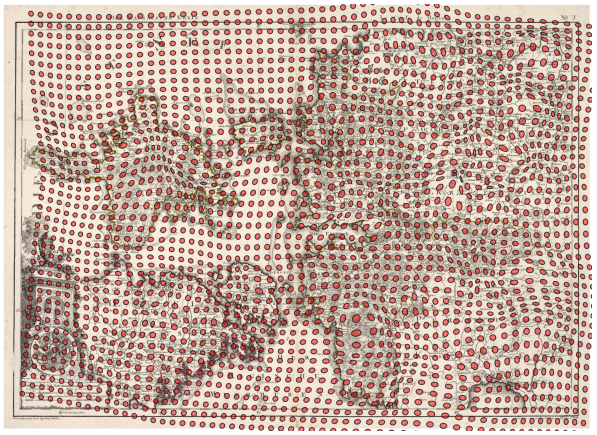


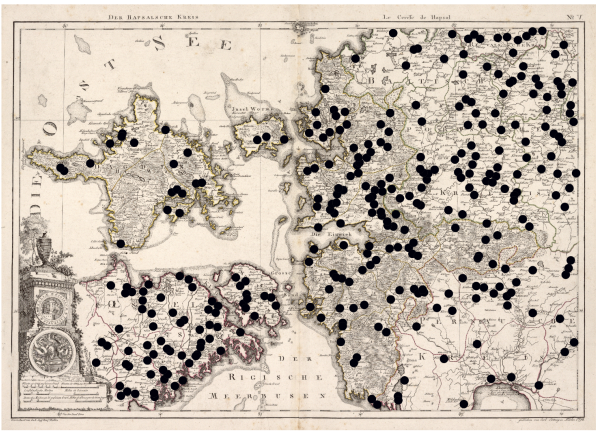
Lisa 2. Haapsalu maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



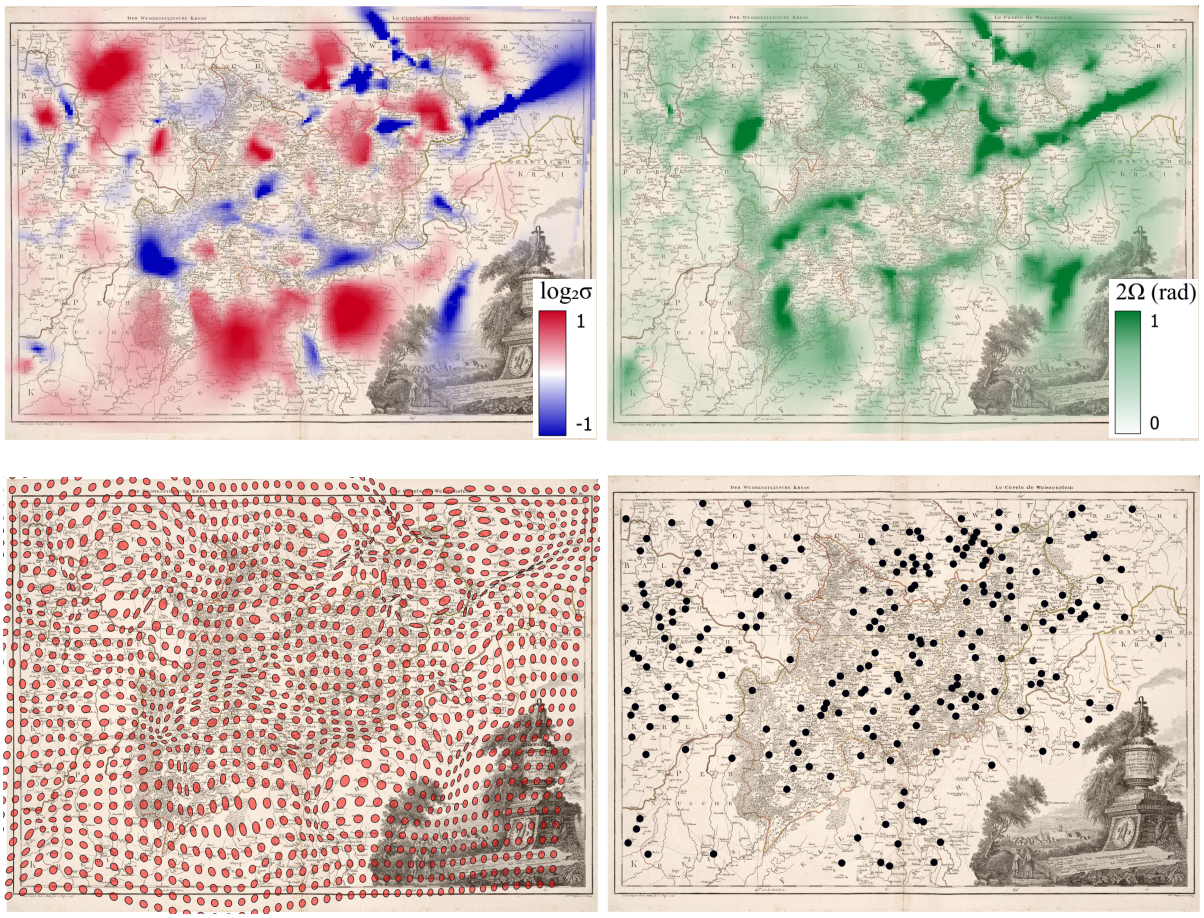






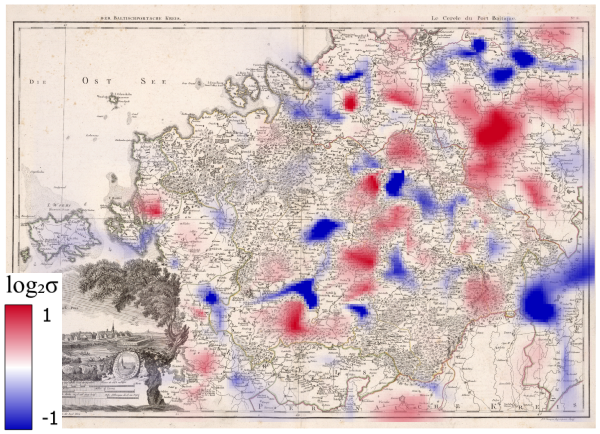
Lisa 3. Paide maakonna moondenäitajate kaardid

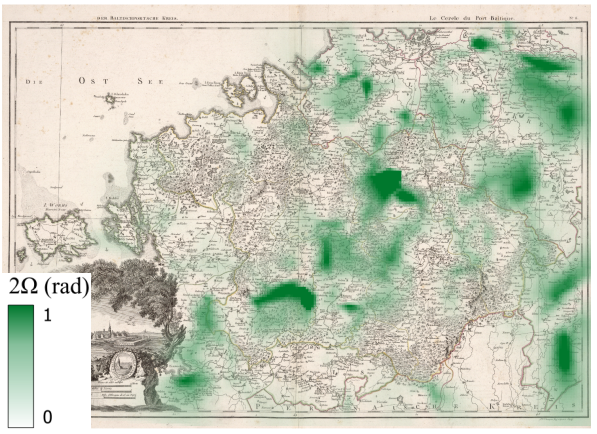
Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.

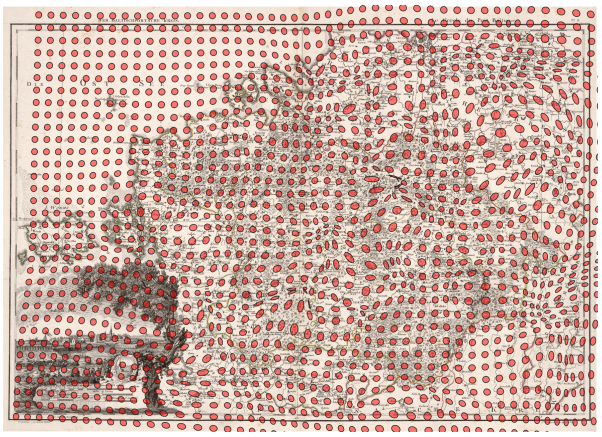


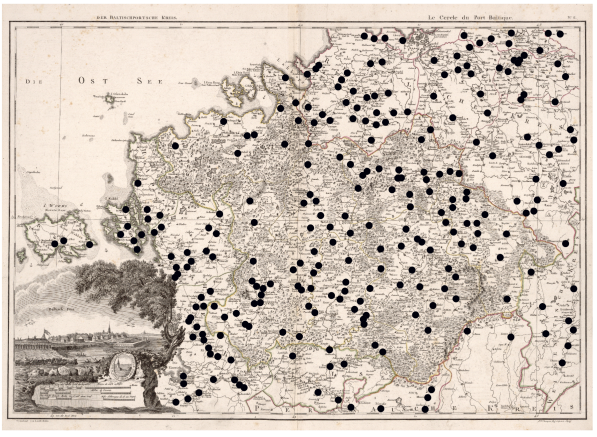
Lisa 4. Paldiski maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



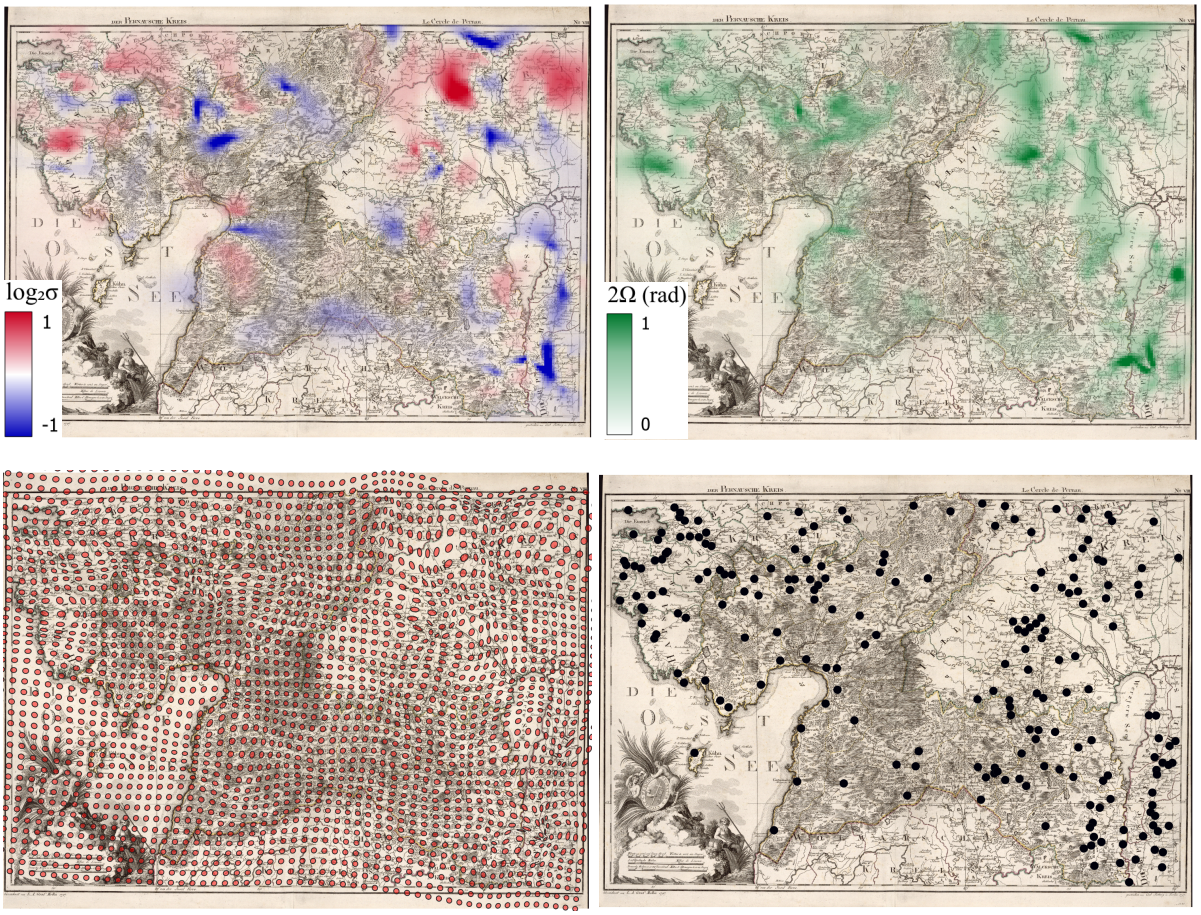






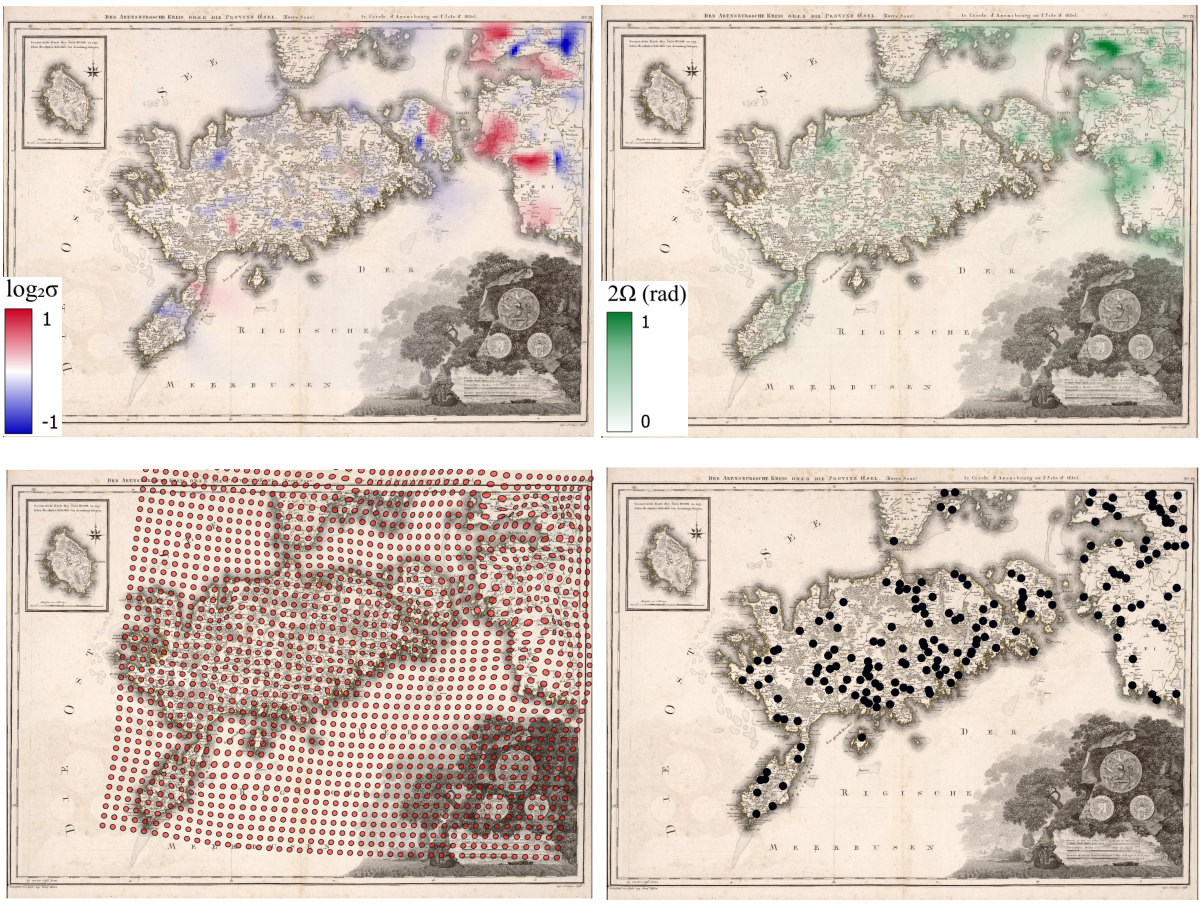
Lisa 5. Pärnu maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



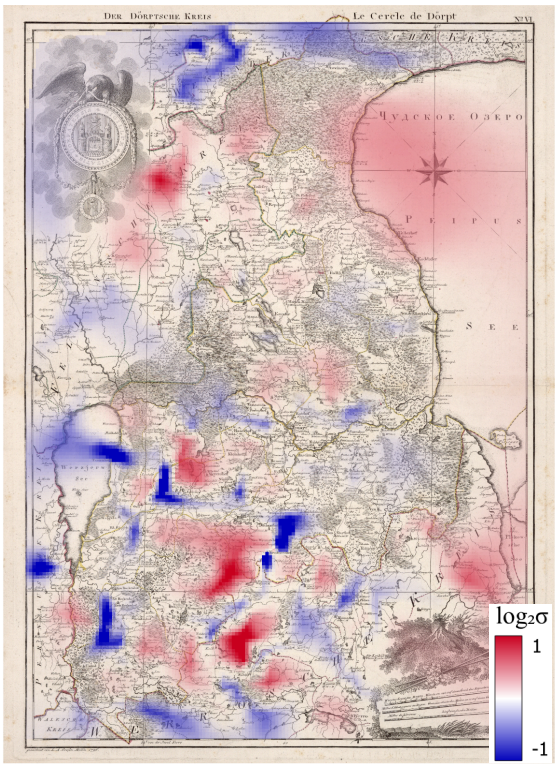
Lisa 6. Kuressaare maakonna moondenäitajate kaardid

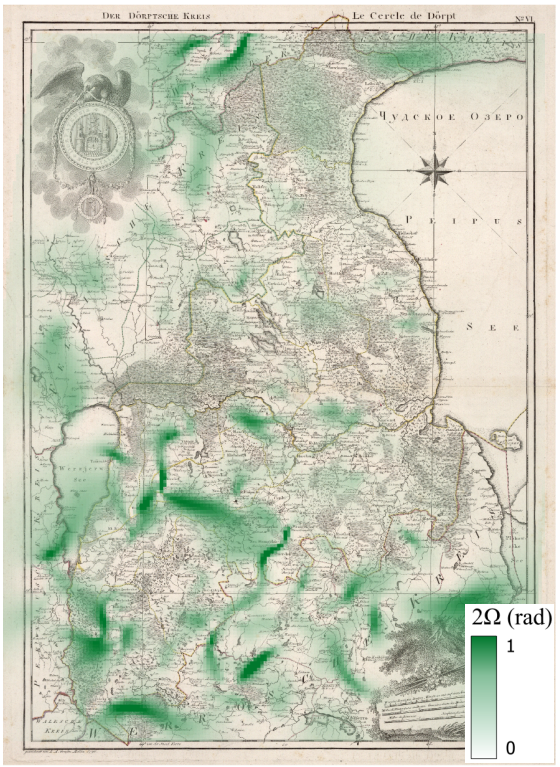
Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.

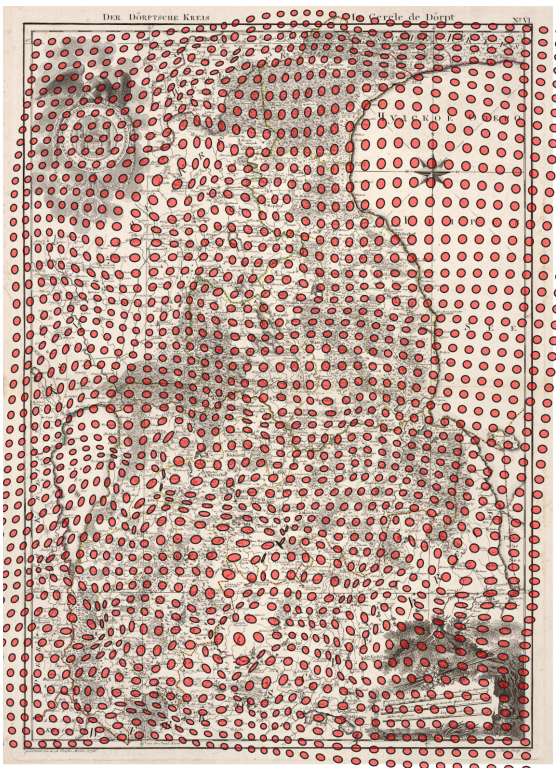


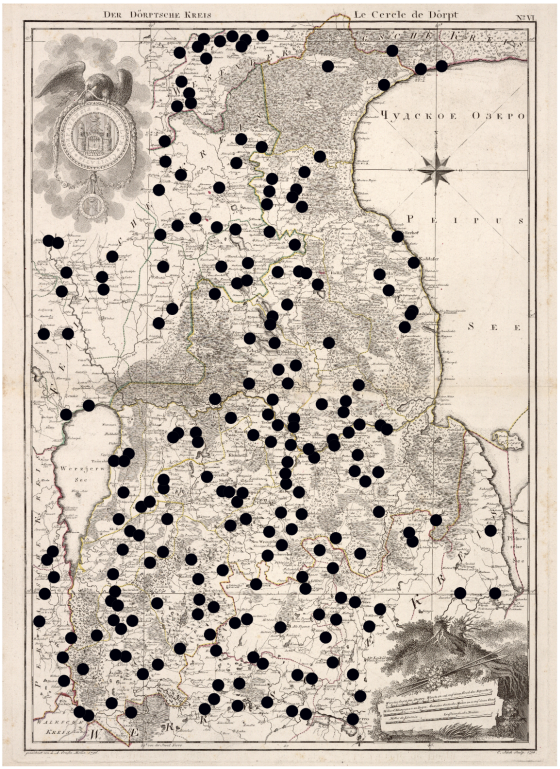
Lisa 7. Tartu maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



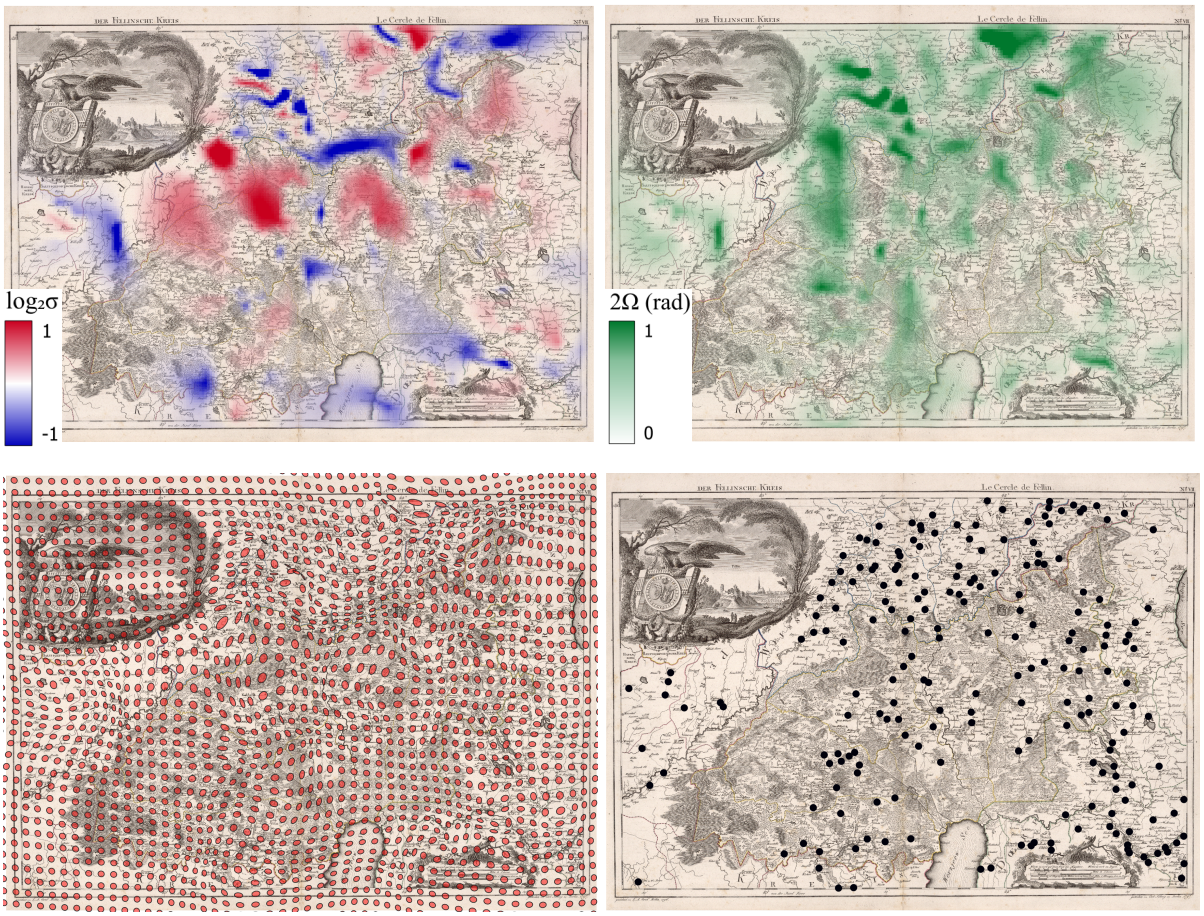






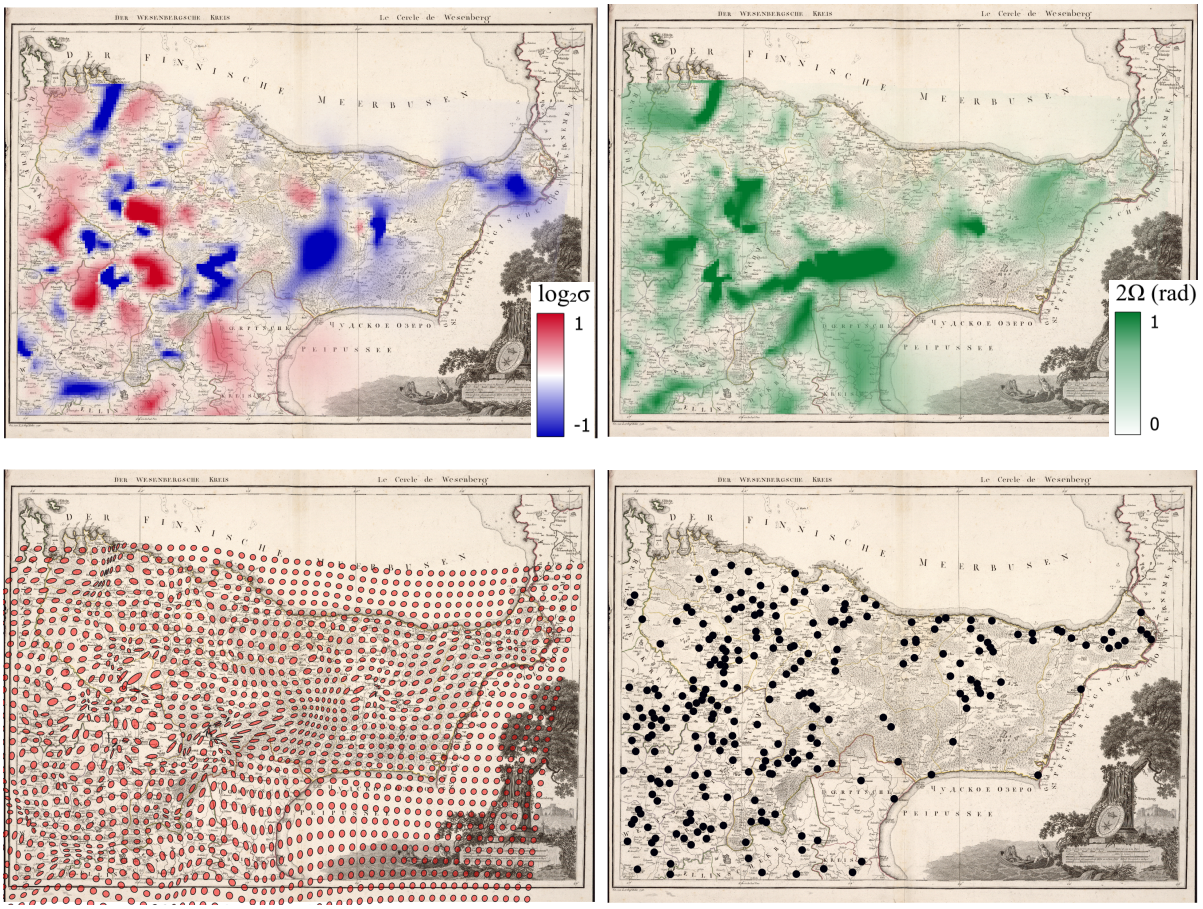
Lisa 8. Viljandi maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



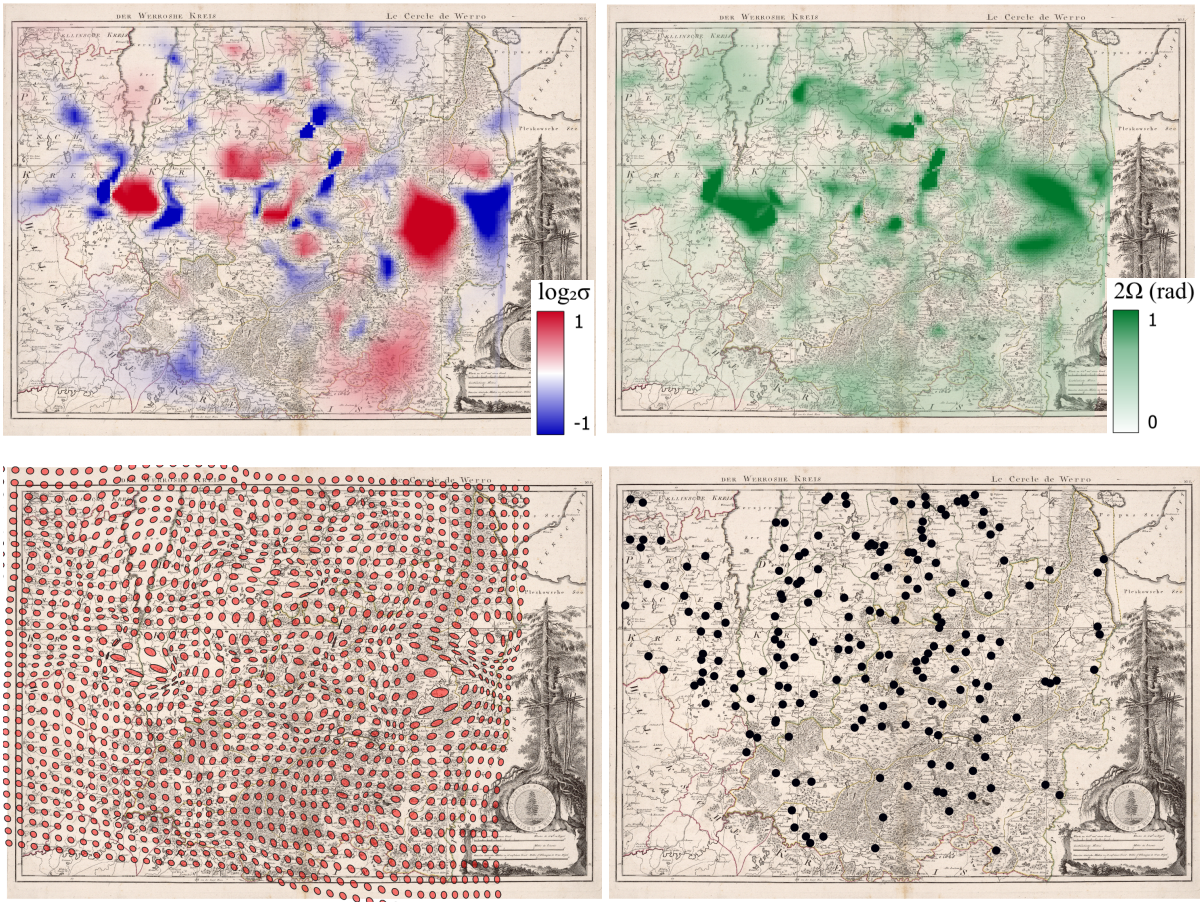
Lisa 9. Rakvere maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



Lisa 10. Võru maakonna moondenäitajate kaardid

Pindalamoone ($log_2\sigma$), suurim nurgamoone (2Ω), moondeellipsid ja kontrollpunktid.



Lisa 11. DDA-analüüsis kasutatud kontrollpunktide paarid

DDA-analüüsis kasutatud kontrollpunktide paarid on esitatud GitHubi repositooriumis: https://github.com/mq38/L.-A.-Mellini-Liivimaa-atlase-kontrollpunktid

Repositooriumis on esitatud failid gcps_sheet01.txt kuni gcps_sheet10.txt, mis vastavad L. A. Mellini Liivimaa atlase Eesti alasid kujutavatele kaardilehtedele. Failide struktuur ja kasutusloogika on dokumenteeritud repositooriumi README failis.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mihkel Paal,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „L. A. Mellini Liivimaa atlase Eestimaa kaardilehtede georefereerimine ja planimeetrilise täpsuse analüüs'', mille juhendaja on Raivo Aunap, 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 Commonsi 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.

Mihkel Paal
22.05.2026