

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

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Vända tehismärgala setete muutuste topograafiline modelleerimine

Tanel Elmi

Juhendaja: PhD Raivo Aunap

Tartu 2021

Annotatsioon

Vända tehismärgala setete muutuste topograafiline modelleerimine

Vända tehismärgala on rajatud põllumajandusest tuleneva hajureostuse puhastamiseks. Üheks oluliseks viisiks, kuidas tehismärgalad vett puhastavad on läbi settimise. Eesmärgiks oli leida kuhu ja kui palju on tehismärgalal setteid juurde tekkinud. Uurimisalal teostati topograafilised mõõdistustööd ja loodi saadud andmetest digitaalne kõrgusmudel. Muutuste leidmiseks reljeefis võrreldi saadud mudelit vanade mõõdistusandmetega. Töö tulemusena selgus, et kõige rohkem on setteid tekkinud vee sissevoolu ja väljavoolu juures, kuid ka erinevate takistuste juures.

Märksõnad: tehismärgalad, setete muutused, topograafiline mõõdistamine, digitaalne kõrgusmudel, DEM

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

P515 – Geodeesia

Abstract

Topographic modeling of sediment changes in Vända constructed wetland

Vända constructed wetland was created for agricultural wastewater treatment. One key factor in how constructed wetlands purify water is through sedimentation. The goal of this research was to find out how much and where sediments have accumulated in the constructed wetland. Topographic surveying was done in the constructed wetland and the surveying data was used to create a digital elevation model. The model was compared to older surveying data to find the changes in topography. The results show that most of the sedimentation has occurred close to the inflow and outflow locations, but also near corners and other obstructions.

Keywords: constructed wetlands, sediment changes, topographic surveying, digital elevation model, DEM

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

P515 - Geodesy

Sisukord

1. Sissejuhatus.....	4
2. Reljeefi modelleerimine.....	6
2.1 Kõrgusandmete täpsus.....	6
2.1.1 Topograafilised mõõdistusmeetodid.....	7
2.1.2 Kaugseire meetodid	8
2.1.3 Kajalood.....	9
2.1.4 Topograafilised kaardid	9
2.2 Veekogu põhja ja setete mõõdistamine.....	10
2.3 Interpoleerimismeetodid.....	11
2.4 Ebakorrapärane kolmnurkne tesselatsioon ehk TIN	14
3. Andmed ja meetodika.....	16
3.1 Uurimisala	16
3.2 Välitööde meetodika	17
3.2.1 Mõõdistustööd.....	18
3.3 Andmetöötluse meetodika.....	20
3.3.1 Mõõdistusandmete põhjal modelleerimine	21
3.3.2 CAD joonise põhjal modelleerimine	23
3.3.3 Mudelite verifitseerimine ja võrdlemine.....	24
4. Tulemused ja arutelu.....	25
4.1 Kõrgusmodelite loomine	25
4.1.1 2020. aasta andmete põhjal loodud kõrgusmodel	25
4.1.2 2016. aasta andmete põhjal loodud kõrgusmodel	28
4.2 Kõrgusmodelite verifitseerimine.....	30
4.2.1 2020. aasta andmete võrdlus Maa-ameti kõrgusandmetega	32
4.2.2 2016. aasta andmete võrdlus Maa-ameti kõrgusandmetega	33
4.3 Setete muutused.....	35
5. Kokkuvõte.....	37
Summary	38
Tänuavaldused	40
Kasutatud kirjandus	41

1. Sissejuhatus

Tehismärgalad on kunstlikud märgalad või sood, mis imiteerivad looduslikke märgalaid ja mille peamine eesmärk on puhastada vett reostusest ning vähendada seeläbi reostuse mõju looduslikele veekogudele (Hsu et al., 2011). Põllumajandusliku tegevuse tõttu satub veekogudesse erinevaid kemikaale ja liigseid toitaineid, peamiselt lämmastiku- ja fosforiühendeid, mis põhjustavad nende veekogude eutrofeerumist ehk nende rikastumist toitainetega, mis omakorda põhjustab veekogude kinnikasvamist. Seetõttu ehitatakse tehismärgalad eelkõige põllumajandusmaade lähedale ja nendest allavoolu, et reostusained satuksid enne looduslikesse veekogudesse jõudmist kõigepealt tehismärgalale, kus toimuvad puhastusprotsessid. Tehismärgalad puhastavad vett mitmel viisil – esiteks tänu sellele, et märgalades liigub vesi väga aeglaselt settivad suuremad osakesed seal põhja, teiseks kasutavad seal kasvavad taimed vees lahustunud toitaineid ja kuna peale taime surma ladestub osa temast märgala põhja toimivad taimed ka toitainete settimise vahendajana ning peale selle on märgalad ka heaks elukeskkonnaks mikroobidele, mis teostavad denitrifikatsiooniprotsessi (Talpsep et al., 2012).

Vända peakraavi avaveeline tehismärgala on rajatud 2015. aastal ja see asub Tartu külje all Uhti külas. Tehismärgala on rajatud Kuno Kasaku ja Eestimaa Looduse Fondi (ELF) eestvedamisel ning märgala rajamist toetas ka Maailma Looduse Fond (WWF). Vända peakraavi tehismärgala puhul on tegemist esimese põllumajanduslikku hajureostust puhastava tehismärgalaga Eestis. Seetõttu annab see olulist informatsiooni sellise lahenduse efektiivsusest Eesti tingimustes (*Vända tehismärgala rajamine*, i.a). Kuna setete tekkimine on üks märgalas toimuv vee puhastusprotsess siis annab tekkinud setete kogus aimu, kui hästi antud tehismärgala vett puhastab. Samuti aitab teadmine millistes tehismärgala osades setteid rohkem tekib tulevikus tehismärgalaid paremini projekteerida ja nende efektiivsust veelgi tõsta.

Vända peakraavi tehismärgala asub Porijõe valgallas, mis on omakorda Emajõe lisajõgi, seega avaldab antud tehismärgala mõju eelkõige Porijõe ja Emajõe, kuid läbi nende vähemal määral ka Peipsi järvele ja ka Soome lahele ning Läänemerele. Eutrofeerumine on peamiseks probleemiks Eesti veekogudes. Kuigi Läänemeres on praeguseks eutrofeerumise kasv tagasi pööratud ja olukord on hakanud paranema, ollakse seatud eesmärkidest hetkel siiski veel kaugel (Murray et al., 2019). Seetõttu on oluline uurida tehismärgalade toimimist Eesti tingimustes, kuna need võivad olla abiks eutrofeerumise vähendamiseks meie veekogudes.

Maapinna reljeefi paremaks analüüsimiseks on kasutusele võetud digitaalsed kõrgusmudelid. Digitaalseks reljeefi- ehk kõrgusmudeliks nimetatakse maapinna kujutist, mis koosneb kõrgusandmetest. Siinkohal jagunevad kõrgusmudelid kaheks: mudelid, mis kujutavad maapinda ilma sellel olevate objektide ja taimkatteta, näiteks numbriline kõrgusmudel ehk DEM (ingl *digital elevation model*) ja numbriline maastikumudel ehk DTM (ingl *digital terrain model*), ning mudelid, mis kujutavad maapinna aluspinda, see tähendab maapinda koos sellel oleva maakattega, näiteks digitaalne aluspinna mudel ehk DSM (ingl *digital surface model*) (Roosaare et al., 2019). Reljeefimudelid leiavad kasutust mitmetes valdkondades ja erinevad mudelitüübid sobivad erinevate ülesannete täitmiseks. Näiteks vaatevälja analüüsis või lennunduses on vaja arvestada ka maapinnal olevate hoonete või taimkattega seega peab ka kasutatav mudel neid andmeid kajastama, samas kui reljeefianalüüsiks või hüdroloogiliseks modelleerimiseks sobib pigem ainult maapinda, ilma sellel oleva maakatteta, arvestav mudel.

Käesoleva uurimistöö eesmärk on:

- 1) Reljeefi modelleerimise abil teha kindlaks millised muutused on toimunud Vända peakraavi tehismärgala setetes.
- 2) Analüüsida mõõdistamise täpsust ja leida kas erinevatel aegadel tehtud mõõdistused on täpsuse mõttes võrreldavad.

Töö käigus viidi läbi topograafilised mõõdistustööd Vända peakraavi tehismärgalal ja saadud andmete põhjal koostati selle ala digitaalne kõrgusmudel. Samuti koostati kõrgusmudel vanade mõõdistusandmete põhjal ja saadud mudeleid võrreldi omavahel, et leida, millised muutused on tehismärgala settebasseinide reljeefis toimunud. Kõrgusmudelite loomiseks ja võrdlemiseks kasutati AutoDesk Civil 3D 2022 tarkvara. Osad joonised on loodud ArcGIS 10.6.1 tarkvaraga.

2. Reljeefi modelleerimine

2.1 Kõrgusandmete täpsus

Reljeefimudelite täpsust mõjutavad põhiliselt kaks olulist tegurit – esiteks sõltub mudeli täpsus eelkõige algandmete kvaliteedist ja täpsusest ning teiseks osade algandmete puhul mõjutab mudeli täpsust ka andmete interpoleerimine ja selleks kasutatud interpoleerimismeetod. Kõrgusandmete kogumise meetodid saab jaotada kolmeks – topograafilised mõõdistusmeetodid, kus iga mõõdistatud punkt mõõdetakse eraldi välja (näiteks tahhümeetri või GNSS-seadmega mõõdistamine), kaugseire meetodid (näiteks fotogramm-meetria ja LiDAR-mõõdistamine) ning olemasolevate topograafiliste kaartide digitaliseerimine (Li et al., 2004). Lisaks saab veel veealuse mõõdistamise jaoks kasutada sonarit ehk kajaloodi. Reljeefimudeli täpsus sõltubki eelkõige sellest milliseid lähteandmeid on kasutatud ning kui täpsed need on.

Igal kõrgusandmete kogumise viisil on omad tugevad ja nõrgad küljed ning kasutatav meetod tuleks valida vastavalt tööülesandele. Näiteks on topograafiliste mõõdistusmeetoditega võimalik saada kõige täpsemad andmed, kusjuures tahhümeetriaga mõõdistamine võimaldab saada üldiselt täpsemaid andmeid, kui GNSS-seadmega mõõdistamine, kuid tööde maht ja maksumus on suur ning üldiselt sobib antud meetod ainult väiksemate alade mõõdistamiseks. Kaugseire meetoditest on fotogramm-meetria puhul täpsus sõltuv kasutatud piltide lahutusvõimest ja võib olla kehvema lahutusvõimega satelliidipiltide puhul madal, kuid näiteks aerofotode või droonifotode puhul ka üsna kõrge, andmeid saab koguda väga kiiresti ja suurte alade kohta ning maksumus on üldiselt madal. Samas LiDAR-mõõdistamisel on nii täpsus, kui ka maksumus kõrge, andmeid saab koguda kiiresti ja antud meetod sobib keskmiste ja suurte alade jaoks. Topograafiliste kaartide digitaliseerimine annab madalama täpsusega andmed, kuid selle meetodiga saab andmeid ükskõik kui suure ala kohta, eeldusel, et antud ala kohta on topograafiline kaart olemas. (Li et al., 2004)

Iga mõõtmisega kaasneb paratamatult ka mõõtmisvigu - see tähendab, et mõõtmistulemus erineb mingil määral mõõdetavast objektist. Mõõtmisvead sõltuvad omakorda mõõtmistingimustest, mille võib jaotada viieks põhiliseks teguriks – mõõdetav objekt, mõõtja, mõõtmisvahend, mõõtmise meetodika ja keskkond (Randjärv, 2006b). Erinevate mõõtmismeetodite ja instrumentidega võib kaasneda ka erinevaid põhjuseid vigade tekkeks.

2.1.1 Topograafilised mõõdistusmeetodid

Topograafiliste mõõdistusmeetodite puhul on oluliseks täpsuse mõjutajaks see, millistes reljeefi punktides on mõõtmised tehtud ja kas neid punkte on võetud sobiva tihedusega. See on oluline, kuna mõõtmised saab teha vaid piiratud koguses punktides ja kõrgusmudeli loomiseks tuleb mõõdetud punktide andmed interpoleerida. Peale mõõtmispunktide valiku omab mõju veel ka see, millist mõõteinstrumenti on kasutatud ja selle instrumendi parameetrid. Näiteks elektrontahhümeetri ja GNSS-seadme täpsusklassid on erinevad, mis mõjutavad mõõtmisi.

Elektrontahhümeeter mõõdab korraga mõõdistatava punkti kauguse, horisontaalnurga ja vertikaalnurga, millest saab omakorda arvutada punkti polaarkoordinaadid ja kõrguskasvu (Roosaare et al., 2019). Mõõtmiseks kasutatakse üldiselt mõõdetavasse punkti paigutatud prisma, millelt tagasipeegeldunud valguskiire järgi leiab tahhümeeter kaldjoone pikkuse (Roosaare et al., 2019). Osad tahhümeetrid võimaldavad ka ilma prismata mõõtmist. Nurkade mõõtmisel võib esineda mitmeid süstemaatilisi vigu ja nende vältimiseks ning soovitud täpsusega tulemuste saamiseks tuleks veenduda, et mõõteinstrument on kontrollitud ja justeeritud ning samuti peab instrument enne mõõtmisi olema korrektselt tsentreeritud ja looditud (Randjärv, 2006a). Nii kauguse kui nurkade mõõtmise täpsus oleneb ka kasutatud instrumendist ja selle omadustest, aga ka kasutatud mõõdistusmeetoditest. Elektrontahhümeetriga kauguse mõõtmise täpsus jääb üldiselt vahemikku 1-10 mm, maksimaalne mõõdetav kaugus on 1-10 km ja nurkade mõõtmise täpsus jääb vahemikku 0,6-5" (Randjärv, 2006a).

Tänapäeval kasutatakse asukohamääramiseks aina enam globaalseid satelliitnavigatsioonisüsteeme ehk GNSS-i (ingl *Global Navigation Satellite System*). GNSS-süsteemi abil asukohamääramine põhineb punkti kauguse leidmisel vähemalt kolmest-neljast satteliidist, sealjuures leitakse kaugus aja järgi, mis kulub raadiosignaalil satelliidist mõõdistuspunktis oleva vastuvõtjani jõudmiseks (Roosaare et al., 2019). Kasutades leitud kauguseid on võimalik läbi trilateratsiooni välja arvutada mõõdistuspunkti koordinaadid (Roosaare et al., 2019). Topograafiliste mõõdistustööde jaoks on levinud mõõtmismeetoditeks RTK (ingl *Real Time Kinematic*) ja RTN (ingl *Real Time Network*) ehk võrgu RTK (NRTK), kus RTK puhul kasutatakse täpsemate mõõtmistulemuste saamiseks liikuvat vastuvõtjat ja teadaolevate koordinaatidega baasjaama, mille vahel peab olema reaalajaline andmeside ja RTN mõõtmistel kasutatakse baasjaama asemel parandite saamiseks olemasolevate püsijaamade võrku

(Rüdja & Sander, 2013). GNSS mõõtmistega võib kaasneda mitmeid juhuslikke ja süstemaatilisi vigu, näiteks võib mõõtmisvigade allikaks olla mitmeteelisus, troposfäärist ja ionosfäärist tulenevad keskkonnamõjud, satelliitide nähtavus ja nende paiknemine, satelliitide orbiitide vead ja samuti ka kasutatud mõõtmismetoodika ja muud kasutajast tingitud vead nagu näiteks antenni kõrguse mõõtmine või valed seadistused (Rüdja & Sander, 2013). Mitmeteelisus tähendab, et vastuvõtjani jõuab peale otse satelliidilt tulnud signaalide ka peegeldunud raadiosignaale.

2.1.2 Kaugseire meetodid

Kaugseire meetoditest on kõrgusandmete kogumiseks kõige tavalisemaks laserskaneerimisseadmega ehk lidariga (ingl *lidar* ehk *Light Detection and Ranging*) tehtud mõõdistamised. Lidariga saab mõõtmisi teostada nii maa pealt, kui ka lennukilt – sel juhul on tegu aerolaserskaneerimisega. Lidar mõõdab aega, mis väljasaadetud valgusimpulsil kulub, et liikuda maapinnani ja sealt peegeldudes laserini tagasi jõudmiseks ning selle põhjal võimaldab määrata maapinna kaugust seadmest ja peegelduse heledus annab veel lisaks teavet maapinna omaduste kohta (Roosaare et al., 2019). Selle meetodiga võib kaasneda mitmeid erinevat tüüpi vigu, mida ka proovitakse erinevate meetmetega võimalikult palju vähendada. Aerolaserskaneerimise täpsus on eelkõige otseses seoses lennukõrgusega - mida kõrgemal lennata seda suuremad on vead. Peale selle võivad vead tekkida näiteks alustaimestiku tõttu, kus tiheda alustaimestiku korral võidakse taimkate arvata maapinna hulka, kõrguslikud vead tekivad üldiselt GNSS asukoha määrangust ja mõõdetava punkti asukohast lennuki suhtes – kõige täpsema tulemuse saab lennuki nadiiris, mida suurema nurga all punkt on lennuki suhtes seda suuremaks muutuvad ka lennuki asendist ja kauguse mõõtmisest tingitud vead, ning viimaks võib esineda ka klassifitseerimise vigu, mis tulevad sellest, et klassifitseerimisalgoritmide sisendparameetrid on valitud kogu mõõdetava ala üldiste omaduste järgi, kuid selle ala sees võib leiduda kohti mille jaoks antud parameetrid ei tööta sobivalt (*Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid*, i.a.). Maa-ameti kõrgusandmeid on kogutud alates 2008. aastast just aerolaserskaneerimise teel.

Fotogramm-meetriaks nimetatakse objektide asendi, kuju ja mõõtmete määramist aerofotode, sattelliidifotode ja muude fotode järgi. Fotodelt kõrgusandmete leidmiseks tehakse objektist kaks pilti erinevate nurkade alt, seejärel võttes arvesse parallaksi ehk objekti asukohamuutust erineva vaatlusnurga tõttu saab geomeetria ja triangulatsiooni abil arvutada erinevate fotodel olevate

objektide vahelisi kaugusi ja objektide kõrgust (Roosaare et al., 2019). Aerofotodega kaasnevad nii kaldenurgast, kui ka reljeefist tingitud erinevad moonutused, mida saab küll fotode transformeerimisega kas kõrvaldada või vähemalt vähendada lubatavate suurusteni (Liba, 2005). Samuti võib tulemust mõjutada või ka süstemaatilisi vigu tekitada kasutatud kaamera ja objektiivi omadused ning aeropildistamise planeerimine ja selle läbiviimine.

2.1.3 Kajalood

Kajalood on teatud tüüpi sonar (ingl *sound navigation and ranging*), mis mõõdab aega, mis kulub väljasaadetud helisignaali veekogu põhja jõudmiseks ja sealt peegeldunud signaali tagasisaabumiseks. Mõõdetud aja põhjal on võimalik välja arvutada mere või muu veekogu sügavus. Kajaloodiga mõõdistamisel võib esineda nii süstemaatilisi, kui juhuslikke hälbeid. Süstemaatiliste hälvete põhjuseks võib olla näiteks helikiiruse muutumine vees (helikiirus merevees sõltub peamiselt vee temperatuurist, soolsusest ja hüdrostaatilisest rõhust), refraktsioon ehk helikiire kõverdumine akustiliselt ebahühtlases keskkonnas, merepõhja kalle ja laeva kõikumine. Süstemaatilisi hälbeid on võimalik paranditega oluliselt vähendada. (Kala, 2018)

Olenevalt seadmest on kajaloodidel erinev minimaalne mõõtmis sügavus ja seetõttu väga madalates veekogudes mõõdistamise jaoks need üldiselt ei sobi. Samuti võib mõõtmiste täpsust mõjutada ka vee sogasus.

2.1.4 Topograafilised kaardid

Topograafiliste kaartide kasutamine kõrgusandmete saamiseks on eelkõige kaartide kättesaadavusest ja nendel olevate kõrgusandmete kvaliteedist - osades riikides võivad need andmed olla kehva kvaliteediga, kuid enamikes arenenud riikides ning ka paljudes arengumaades on siiski enamus pindalast kaetud kvaliteetsete topograafiliste kaartidega ja neid kaarte saab kasutada reljeefi modelleerimise lähteandmetena (Li et al., 2004). Samuti on ka tänapäeval topograafilised kaardid tihti ka digitaalsel kujul olemas, seega pole kaartide digitaliseerimine üldiselt vajalik. Kõige tavalisem viis kõrgusandmete kujutamiseks topograafilistel kaartidel on samakõrgusjooned, kuid nende andmete interpoleerimisel on probleemiks, et mööda kõrgusjooni

on kõrgusandmeid palju aga kõrgusjoonte vahel jällegi liiga vähe (*How Topo to Raster works*, i.a.). Selleks, et saada kvaliteetsemat kõrgusmodelit võimaldab näiteks ArcGIS-i *Topo to Raster* tööriist lisaks samakõrgusjoontele kasutada kõrgusmodeli loomiseks ka veel kõrguspunkte, veekogude kaldajooni, järsakujooni ja voolujooni (*How Topo to Raster works*, i.a.).

Topograafiliste kaartide kasutamisel lähteandmetena tuleb meeles pidada, et kaartidel olevate kõrgusandmete puhul on tegemist tegelikkuse kujutisega ja need andmed on mingil määral juba üldistatud ning seega mõjutab see ka kõrgusmodeli täpsust. Kaartidel olevate kõrgusandmete kvaliteet sõltub peamiselt kaardi mõõtkavast, väiksema mõõtkavaga kaartidel on ka kõrgusandmed rohkem üldistatud ja seega vähem täpsed (Li et al., 2004).

Kasutades topograafilisel kaardil olevaid kõrguspunkte või samakõrgusjooni kõrgusmodeli loomiseks tuleb need andmed ka interpoleerida. See, kuidas andmed on interpoleeritud ja millist interpoleerimismeetodit on kasutatud mõjutab omakorda ka lõpptulemuse kvaliteeti. Seega kasutades topograafilisi kaarte kõrgusmodeli loomiseks mõjutab mudeli täpsus peamiselt neli tegurit – kaardi mõõtkava, kaardil olevate kõrgusandmete kujutusviis (kõrguspunktid või samakõrgusjooned), kaardil olevate kõrgusandmete täpsus ja nende andmete interpoleerimine.

2.2 Veekogu põhja ja setete mõõdistamine

Setted tekivad vees leiduvatest erinevatest osakestest, mida veevool endaga kaasa kannab. Veekogudesse satuvad need osakesed tihti näiteks vihmavee kaudu, kuid neid osakesi võivad edasi kanda ka tuul ja liustikud. Aeglasema vooluga kohtades need osakesed vajuvad veekogu põhja. Sealjuures mida väiksem ja kergem on osake, seda aeglasemat veevoolu on vaja, et see põhja settiks. Seega settimise kiirus oleneb eelkõige vee voolukiirusest ja osakeste suurusest.

Settimine puhastab vett selles leiduvatest toitainetest ja muudest reostusainetest eemaldades need ained ringlusest. Vee puhastuse seisukohalt on olulised just aeglase vooluga veekogud, kuna nendes tekib setteid rohkem. Samuti saavad aeglase voolu korral settida ka väiksemad osakesed. Suuremat settimist põhjustavad ka näiteks jõelooked ja muud vees olevad takistused.

Veekogu põhja mõõdistamiseks on kasutatud mitmeid meetodeid. Levinumaks meetodiks on kajaloodiga mõõdistamine, kuid madalamates veekogudes ja rannikualadel on kasutatud ka näiteks topograafilisi meetodeid, satelliit kaugseiret ja fotogramm-meetriat.

Gasparini (2005) on uurinud veekogu põhja ja setteid Valle Fattibello laguunis. Tegu on väga madala veekoguga, kus maksimaalne sügavus on 2,5 meetrit ja 80% veekogust jääb sügavus alla 1 meetri. Töös kasutati laguunipõhja mõõdistamiseks kajaloodi. Selleks, et mõõdistada kohti kuhu paadiga ligi ei pääse asetati kajalood katamaraanile, mida veeti paadiga. Kajaloodi modifitseeriti, et sellega saaks mõõdistada ka madalamaid alasid. Töö autor leidis, et sai kasutatud meetodikaga täpsed sügavusandmed.

Brasington et al. (2000) kasutasid jõepõhja mõõdistamiseks GNSS-seadet. Autorid mõõdistasid jõepõhja kahel järjestikusel aastal, et uurida aasta jooksul toimunud muutusi. Andmete analüüsimiseks ja võrdlemiseks kasutasid töö autorid kogutud andmete põhjal loodud digitaalseid kõrgusmudeleid.

2.3 Interpoleerimismeetodid

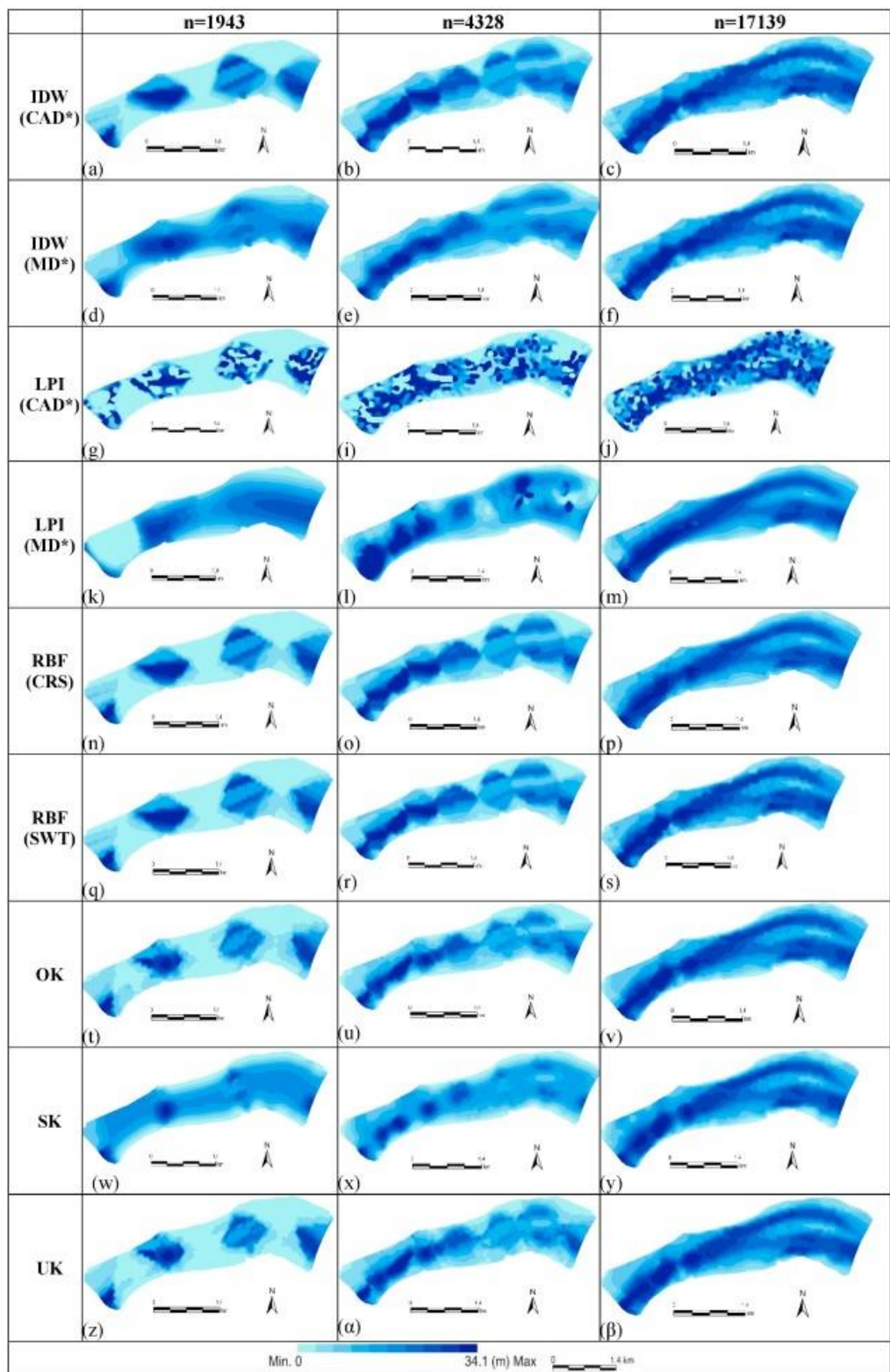
Kui algandmed on saadud topograafiliste mõõdistusmeetoditega või ka topograafilistelt kaartidelt tuleb kõrgusmudeli saamiseks need andmed interpoleerida. Sel juhul mõjutab peale algandmete täpsuse veel mudelite täpsust see, millist interpoleerimismeetodit on kasutatud. Andmete interpoleerimiseks nimetatakse seda, kui olemasolevate punktide väärtuste põhjal arvutatakse välja ka nende punktide vahele jäävate alade väärtused, mille kohta muidu andmed puudusid. Interpoleerimine on vajalik, kuna tihti ei ole võimalik maapeal koguda andmeid piisava tihedusega, samuti on mitmete ülesannete ja arvutuste jaoks tarvis kasutada kõrgusmudelit ehk kogu pind peab sisaldama igas punktis kõrgusandmeid (Kartau, 2015). Näiteks saab interpoleerimist kasutada kõrgusandmete, temperatuuride, lumekatte ja rahvastiku andmete leidmiseks.

Interpoleerimismeetodeid on olemas mitmeid ja vastavalt algandmete iseloomule ja eesmärgile saab valida sobiva. Mõned levinumad meetodid on näiteks loomuliku naabri meetod (ingl *natural neighbour*), läheduskaalude meetod (ingl *inverse distance weighting* ehk IDW) ja kriging (ingl *kriging*). Samas kõige lihtsam interpoleerimismeetod on lähima naabri meetod (ingl *proximal*

method), mis leiab iga andmepunkti lähikonnad ja annab kõigile lähikonnas olevatele punktidele andmepunkti väärtuse. Antud meetodi puuduseks on, et see ei anna sujuvalt üleminevat pinda. Loomuliku naabri meetod on lähima naabri meetodi edasiarendus, mis võtab arvesse mitmed lähedalasuvad andmepunktid andes neile kaalud vastavalt sellele, kui suure osa moodustab andmepunkti lähikond interpoleeritava punkti lähikonnast. Loomuliku naabri meetodiga saab häid tulemusi üldiselt ühtlaselt jaotunud andmepunktide korral. Läheduskaalude meetod võtab arvesse andmepunktide kaugust interpoleeritavast punktist – mida lähemal on andmepunkt, seda suurema kaaluga. Kriginguks nimetatakse mitmeid erinevaid interpoleerimismeetodeid, mille puhul kasutatakse vajalike parameetrite leidmiseks variograafiat. (Roosaare et al., 2019)

Interpoleerimismeetodite mõju digitaalsetele kõrgusmodelitele on uurinud Kartau (2015) võrreldes IDW, EBK (ingl *Empirical Bayesian Kriging*) ja spline (ingl *regularized spline* või *spline with tension*) interpoleerimismeetoditega saadud tulemuste vastavust Maa-Ameti LiDAR kõrgusmodelile. Antud uurimuse autor leidis, et nendest kolmest meetodist oli EBK meetodiga interpoleeritud kõrgusmodel kõige väiksema erinevusega LiDAR kõrgusmodelist, samas kui spline meetod andis kehvema tulemuse just siis, kui proovipunkte oli hõredamalt.

Diaconu et al. (2019) on uurinud, kuidas mõjutavad batümeetriliste kaartide täpsust mõõtmispunktide tihedus, punktide asukoht üksteise suhtes ja kasutatud interpoleerimismeetod. Uurimistöö viidi läbi 5km pikkusel Doonau jõe lõigul ja võrreldi omavahel üheksat interpoleerimismeetodit, iga interpoleerimismeetodiga koostati kolm erinevat mudelit kasutades erinevat arvu mõõtmispunkte. Uurimuse autorid leidsid, et kuigi kasutatud interpoleerimismeetod mõjutab küll tulemuse täpsust, on siiski palju olulisem täpsuse mõjutaja see mitmel jõe lõigul mõõtmised tehti ja nende mõõtmiskohtade asukoht. Samuti leiti, et jõega ristuvate ja piki jõge liikuvate mõõtmislõikude kombineerimine andis täpsema kujutuse jõeoru morfoloogiast, eriti keeruka pinna ja järsemate muutustega kohtades jõeorus. Jõega ristuvate ja piki jõge liikuvate mõõtmislõikude kombineerimine parandas ka interpoleerimismeetodite täpsust. Autorid leidsid veel, et kasutades suurt hulka mõõtmispunkte andsid kõik interpoleerimismeetodid hea tulemuse ja erinevused nende vahel olid üsna väikesed. Samas vähese punktide arvu korral andsid manuaalselt määratletud kriteeriumitega IDW ja SK (ingl *Simple kriging*) teistest meetoditest parema tulemuse (Joonis 1).

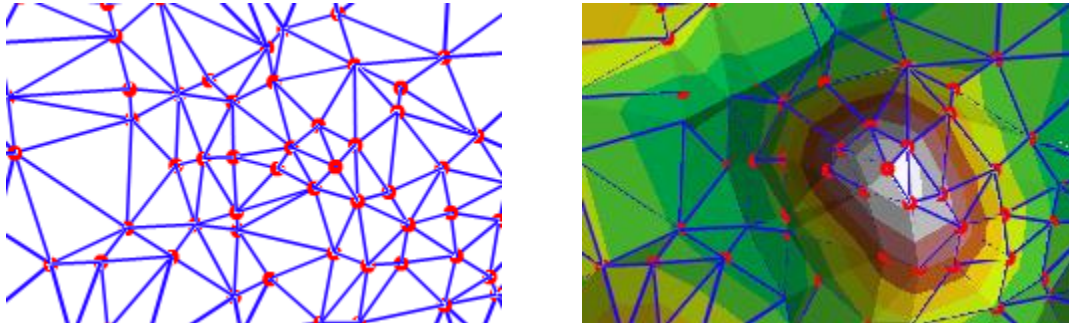


Joonis 1. Jõoru mudelid erinevate interpoleerimismeetodite ja punktide arvuga. (Diaconu et al., 2019)

2.4 Ebakorrapärase kolmnurkne tesselatsioon ehk TIN

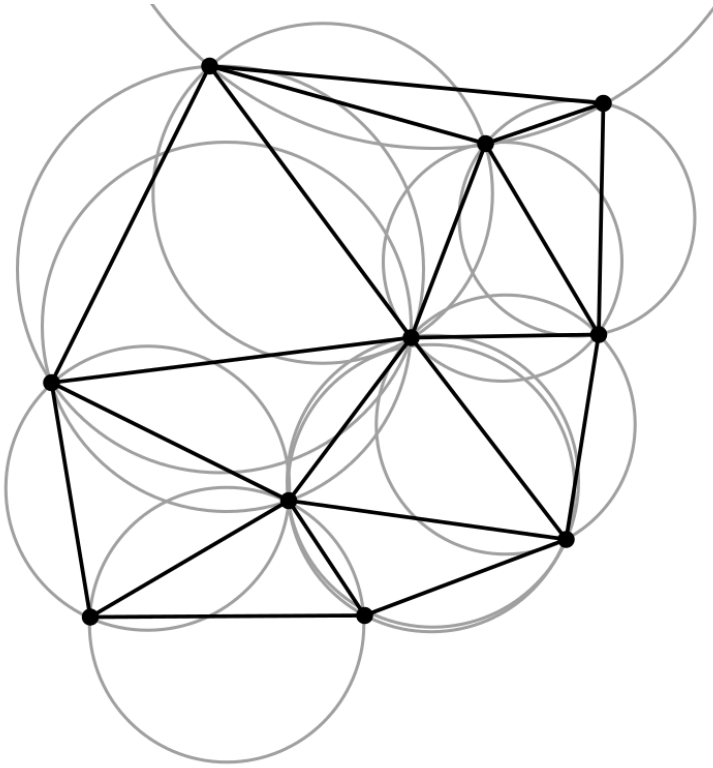
Tesselatsioon ehk mosaiikimine tähendab pinna jaotamist lõplikuks hulga polügoonideks ilma kattumusteta ega tühikuteta (Roosaare et al., 2019). Tesselatsioone on nii korrapäraseid, kui ka ebakorrapäraseid - korrapärase tesselatsiooni puhul on kõik pinna moodustavad polügoonid sama kuju ja suurusega, ebakorrapärasel tesselatsioonil ei ole see sümmeetria oluline. Eukleidilisel tasandil on korrapärase tesselatsioon võimalik kolmnurkade, nelinurkade ja kuusnurkadega (Roosaare et al., 2019). Reljeefi modelleerimise kontekstis huvitabki meid eelkõige kolmnurkadel põhinev tesselatsioon, täpsemalt ebakorrapärase kolmnurkne tesselatsioon ehk TIN (ingl *triangulated irregular network*).

TIN võimaldab meil keerukat pinda esitada erinevas suuruses kolmnurkade võrgustikuna (Joonis 2). Kusjuures selleks, et TIN kajastaks tegelikku maapinda võimalikult täpselt, peab keerulisema reljeefiga kohtades olema kolmnurkade tipupunkte tihedamalt, tasase pinnaga osades võib seevastu punkte olla hõredamalt (Roosaare et al., 2019).



Joonis 2. Vasakpoolsel pildil on näha punktidest moodustatud TIN võrgustik ja parempoolsel pildil selle TIN-i järgi visualiseeritud kõrgusmudel. (*What is a TIN surface?*, i.a).

Punktandmete TIN-iks interpoleerimiseks on mitmeid viise, üks levinum neist põhineb Delaunay triangulatsioonil. Delaunay triangulatsiooni eeliseks on, et see tagab, et mitte ükski punkt ei jääks ühegi moodustunud kolmnurga ümberringjoone sisse (Joonis 3) ja seetõttu väldib antud triangulatsioon võimalikult palju piklike ja peenikeste kolmnurkade tekkimist (*What is a TIN surface?*, i.a).



Joonis 3. Delaunay triangulatsiooniga moodustatud kolmnurkvõrgustik koos kolmnurkade ümberringjoontega. (*Delaunay triangulation*, 2021)

TIN-i eelisteks reljeefi kujutamisel on, et see võtab rastrist paremini arvesse olulisi punkte maapinna reljeefis, nagu tipud, orud, mäeharjad jmt. Samuti võimaldab see keerukat pinda esitada vähema arvu punktidega, kui rastermudel või samajooned. TIN sobib hästi struktuursete pindade nagu vooluvete erosioonilise reljeefi esitamiseks, kuid ei sobi ebakorrapäraste sujuvalt muutuvate pindade esitamiseks. (Roosaare et al., 2019)

3. Andmed ja metoodika

3.1 Uurimisala

Käesoleva töö uurimisalaks on Vända peakraavil (kohati on kasutatud ka nime Nõlva peakraav) asuv tehismärgala (Joonis 4). Vända peakraavi tehismärgala asub Tartumaal Ülenurme vallas Uhti külas. Uurimisala asub Tartu linnast lõuna pool ja jääb Tartu kesklinnast linnulennult umbes 10,5 kilomeetri kaugusele. Vända tehismärgala on rajatud Vända peakraavile, mis omakorda jääb Porijõe valgalsse. Antud tehismärgala koosneb kolmest osast – ühest suuremast, umbes 1800 m² pindalaga, settetiigist ja sellest allavoolu jäävast kahest üksteisele järgnevast umbes 2200 m² pindalaga avaveelisest taimestatud tehismärgalast (*Vända tehismärgala rajamine, i.a*). Käesoleva töö raames mõõdistati ja uuriti tehismärgala esimest märgala, mis asub joonisel 4 pildi keskel suure settetiigi ja pildil paremal pool oleva teise märgala vahel.



Joonis 4. Vända tehismärgala Maa-ameti ortofotol.

3.2 Välitööde metoodika

Töö raames on läbiviidud tehismärgalal topograafilised mõõdistustööd. Nimetatud välitööd said tehtud 2020. aasta sügisel, 7. oktoobril. Välitööde eesmärgiks oli mõõdistada Vända tehismärgala esimene märgala (Joonis 5), luua saadud andmetest kõrgusmudel ja võrrelda mõõdistuse andmeid varasema mõõdistuse ning Maa-ameti kõrgusandmetega.



Joonis 5. Ülevaade mõõdistatavale alale läänenõlvalt. (Foto autor: Raivo Aunap, 07.10.2020)

Mõõdistustööde jaoks kasutati Tartu Ülikooli geograafia osakonna Trimble S6 elektrontahhümeetrit ja Sokkia GSR2700 ISX GNSS-seadet. Kasutatud Trimble S6 elektrontahhümeetri standardhälve nurkade mõõtmisel on 2" (0,6 mgon) ja kauguse mõõtmise täpsus on $\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$, automaatjälgitamist kasutades $\pm(4\text{mm} + 2\text{ppm})$. Ppm ehk *points per*

million tähendab antud juhul 1mm suurust viga 1 km kohta. Koos suurepinnalise prismaga võimaldab antud tahhümeeter mõõta kuni 5500m kaugusele.

3.2.1 Mõõdistustööd

Kuupäev: 07.10.2020

Kellaaeg: 9:00-17:20

Ilmastikuolud: Taevas oli suhteliselt selge - pilvisus umbes 20%, õhutemperatuur oli vahemikus 16-18 kraadi, õhurõhk umbes 1008 hPa ja sademeid ei esinenud.

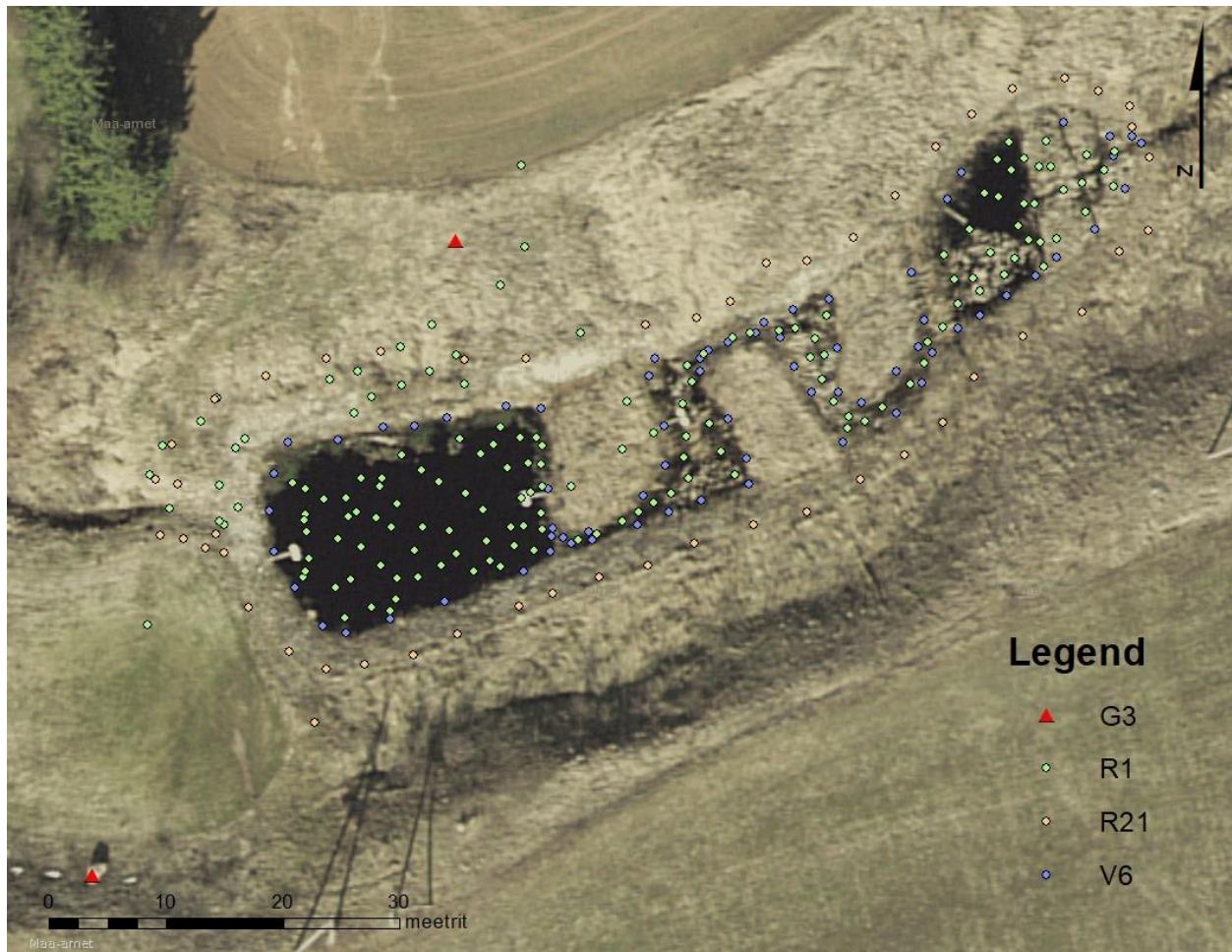
Muud olud: Tehismärgala ise oli üsnagi võssa kasvanud - mõõdistatav settebassein oli kohati, eriti kallaste lähedal, kaetud tiheda taimestikuga. Taimedest esines märgalal näiteks hundinuia ja pilliroogu. Tiigi põhi oli kaetud pehme settekihiga, kus tiigi servades vajus jalg sisse umbes kuni 5 cm. Tiigi keskosades oli mudast pinnast rohkem ja jalg võis sisse vajuda kuni 10 cm sügavusele ja kohati isegi üle selle.

Esimese sammuna sai loodud mõõdistuspõhis. Selle jaoks vaadati sealne olukord üle ja leiti sobivad asukohad kahe mõõdistuspõhise punkti jaoks. Esimene punkt valiti välja selle järgi, et sealt saaks võimalikult hästi elektrontahhümeetriaga mõõtmisi läbi viia. Selleks on vajalik, et sealt avaneks võimalikult hea vaade kogu ülejäänud mõõdetavale alale. Lisaks valiti teisel pool märgala välja veel teine mõõdistuspõhise punkt, mille järgi saab ära määrata põhjasuuna. Mõõtmispõhise punktid prooviti seada üles ka ümbritsevast keskkonnast välja paistvatele ja ajas püsivatele objektidele, mistõttu teine mõõdistuspõhise punkt seati rändrahnu peale. Selle jaoks tehti rändrahnu peale märke, mille kohale statiiv üles seada. Mõõdistuspõhise punktide koordinaadid mõõdeti GNSS-seadmega Sokkia GSR2700 ISX. Ühte nendest punktidest seati üles Trimble S6 elektrontahhümeeter ja sellest punktist mõõdeti polaarmeetodit kasutades välja vajalikud tehismärgala punktid. Veealuste mõõdistamiste jaoks kasutati prismaaual alla kinnitatavat korki. Kuna tehismärgalas oleva tiigi põhjas oli pehme setete kiht, mille täpset pinda oli tunde järgi raske määrata mõõdeti ühtlaste tulemuste saamiseks sealsed punktid nii, et prismaaual lasti oma raskuse all vajuda natuke settekihi sisse.



Joonis 6. Tiigi põhja reljeefi mõõdistamine. (Foto autor: Raivo Aunap, 07.10.2020)

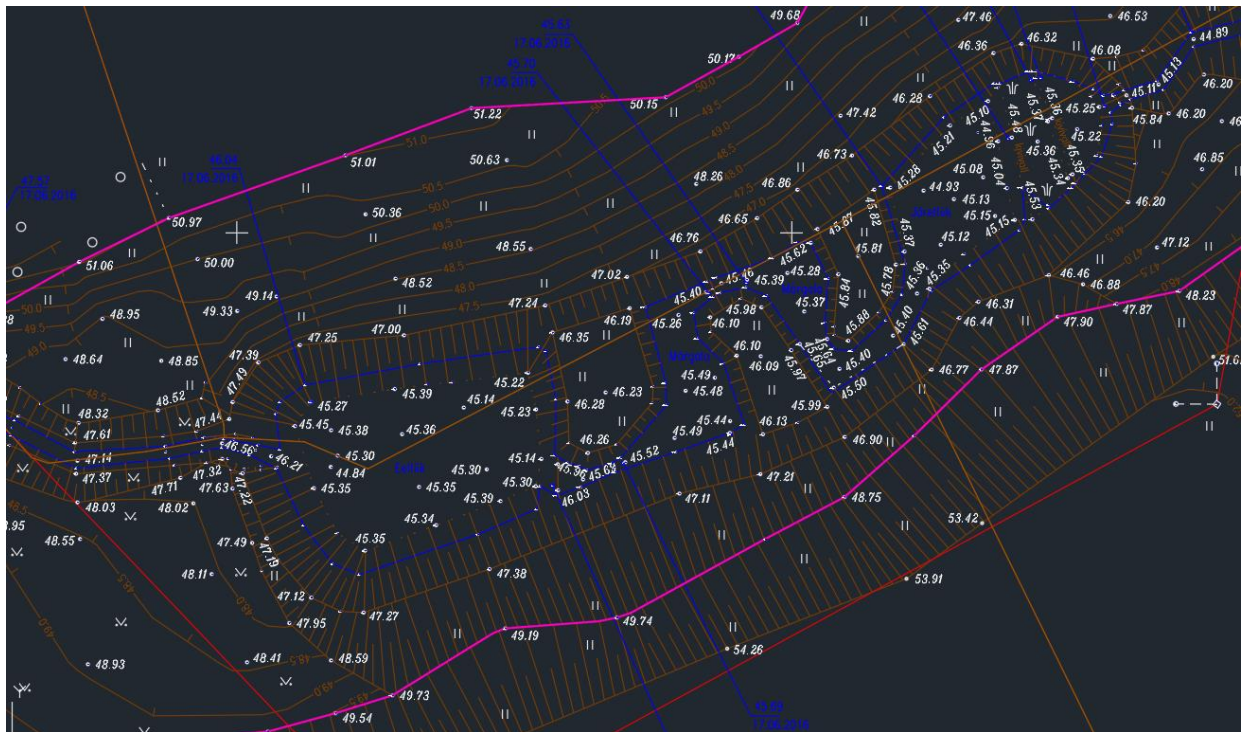
Kõigepealt tehti paar katsetusmõõtmist ja peale seda mõõdistati ära tehismärgala veepiiri kontuurid. Antud punktidele anti koodiks V6 ja neid punkte mõõdeti kokku 71 tükki. Seejärel mõõdistati ära reljeefi punktid, millest enamus olid veelused punktid (Joonis 6), kuid oli ka maapealseid punkte. Sealjuures mõõdeti veeluseid punkte ka kinnikasvanud kohtades ja tiheda taimestiku vahelt. Reljeefi punktidele anti kood R1 ja neid punkte mõõdeti 158 tükki. Viimasena mõõdeti ära veel veekogu ümber oleva kividest nõlva kontuur. Antud nõlva kõrguspunktide jaoks kasutati koodi R21 ja neid mõõdeti 51 tükki. Seega koos kahe mõõdistuspõhise punktiga, mille koodiks on G3, mõõdeti kokku 282 kõrguspunkti (Joonis 7).



Joonis 7. Välitööde käigus mõõdetud kõrguspunktid Maa-ameti ortofotol.

3.3 Andmetötluse metoodika

Kõrgusmodelite loomiseks ja võrdlemiseks kasutati AutoDesk Civil 3D 2022 tarkvara. Kõrgusandmete saamiseks viidi 2020. aasta oktoobris uurimisalal läbi topograafilised mõõdistustööd. Lisaks on töös kasutatud varasemalt, 2016. aasta juunis, teostatud topograafilise mõõdistamise andmeid ja Maa-ameti aerolaserskaneerimise kõrgusandmeid. 2016. aasta teostusmõõdistuse andmed on olemas CAD joonisenä (Joonis 8).



Joonis 8. Uurimisala 2016. aasta teostusmõõdistuse joonisel Civil 3D töökeskkonnas.

Töö käigus loodi kaks kõrgusmodelit – üks 2020. aasta topograafilise mõõdistamise andmete põhjal ja teine 2016. aasta CAD joonise põhjal. Lisaks kasutati ka Maa-ameti kodulehelt alla laetud 1-meetrise eraldusvõimega maapinna kõrgusmodelit. Neid kolme kõrgusmodelit võrreldi omavahel selleks, et tuvastada reljeefis toimunud muutusi ja hinnata andmete täpsust ja võrreldavust. Esiteks võrreldi mõlemat loodud modelit Maa-ameti kõrgusmodeliga, et hinnata kõrgusmodelite täpsust ja tuvastada ebakõlasid andmetes. Lõpetuseks võrreldi 2020. aasta modelit 2016. aasta kõrgusmodeliga, et leida millised muutused on toimunud tehismärgala reljeefis selles ajavahemikus.

3.3.1 Mõõdistusandmete põhjal modelleerimine

Esimese sammuna tuleb tahhümeetri väliarvutist andmed allalaadida ja need verifitseerida. Andmed saab kätte CSV failina, mille väljad on PNEZD kujul ehk punkti nimi, N-koordinaat, E-koordinaat, kõrgus ja kirjeldus/kood. Peale andmete allalaadimist need verifitseeritakse ehk

kontrollitakse üle, et andmetes ei leiduks näiteks duplikaate või muid vigu ja vajadusel viiakse sisse parandused.

Peale andmete väliarvutist allalaadimist ja üle kontrollimist imporditi need Civil3D-sse. Selle jaoks kasutati *Points from File* töörista. Tööriistaga imporditi kõrguspunktide andmeid sisaldav tekstifail. Sealjuures on oluline, et valitud failivorming kattuks sellega, kuidas failis andmed esitatud on ehk antud juhul PNEZD kujul.

Kõrguspunktidest loodi tarkvaras ka kolm punktirühma (ingl *Point Groups*). Üks punktirühm, mis sisaldab kõiki CSV failist imporditud kõrguspunkte. Teine sisaldab ainult punkte koodiga V6 ehk veepiiri punkte. Kolmas punktirühm sisaldab kõiki punkte ja selle sätetes *Point syle* ja *Point label style* valitakse *<none>* selleks, et punktid ei oleks antud rühmas nähtaval. Kõiki kõrguspunkte sisaldavat punktirühma kasutati kõrgusmodeli defineerimiseks ja veepiiri punkte sisaldavat punktirühma murrangujoone loomiseks. Kolmandat punktirühma kasutati, et kiirelt muuta millised punktid on töökeskkonnas nähtaval.

Kõrgusmodeli loomiseks tekitati esmal töökeskkonda uus pind, mida tehti *Prospector* veerus oleva valikuga *create surface*. Selleks, et saada trianguleeritud ehk TIN pinda valiti tööriistas pinna tüübiks *TIN surface*. Peale pinna loomist määrati ära millistest punktidest pind koosneb. Selle jaoks avati *Prospector* veerus loodud pind ja valiti *Definition* → *Point Groups* ja lisati pinna definitsiooni kõiki imporditud kõrguspunkte sisaldav punktirühm. TIN pinna kolmnurkvõrgustiku kontrollimiseks esitati antud pind tarkvaras olemasoleva kujutamisstiiliga *Contours and Triangles*. Seejärel kontrolliti kas kolmnurkvõrgustik on moodustunud korrektselt ja kolmnurkvõrgustiku parandamiseks lisati pinna definitsiooni murrangujooned ehk *Breaklines* ning piirid ehk *Boundaries*.

Kuna antud uurimisala on suhteliselt väike siis tarkvaras olemasolevad valikud pinna kujutamiseks ei olnud sobivad – kõige väiksem valitav horisontaalide lõikevahe oli 1 meeter. Seetõttu loodi kõrgusmodeli esitamiseks tarkvaras uus pinna kujutamisstiil, mis näitab pinda 20 cm lõikevahega horisontaalidega. Uue stiili loomiseks kopeeriti olemasolev 1- ja 5-meetrise lõikevahega horisontaale kujutav stiil ja loodi selle põhjal uus stiil, mille sätetes määrati horisontaalide lõikevaheks vastavalt 20 cm ja 1 m.

3.3.2 CAD joonise põhjal modelleerimine

Uurimisalal on 2016. aasta juunis teostatud topograafilised mõõdistustööd ja antud mõõdistustööde teostusjoonist (Joonis 8) kasutati töös kõrgusmodeli loomiseks. Teostusjoonis on CAD formaadis ja sellel on kõrgusandmed esitatud kõrguspunktidega ja samakõrgusjoontega. Kõrguspunktid on olemas ka erinevate objektide juures, siinkohal on kõige olulisemaks veepiiril olevad punktid. Kõrguspunktid ja horisontaalid sisaldavad ka ise kõrgusandmeid, seega saab neid kasutada kõrgusmodeli loomiseks. Kuna horisontaalid katavad uurimisala ainult osaliselt ja veealusel osal, mis käesoleva uurimistöö kontekstis on põhiliseks uurimisobjektiks, puuduvad nad täielikult, siis kasutati kõrgusmodeli loomiseks kõrguspunkte. Samuti võib oletada, et kõrguspunktide andmed on täpsemad, kuna horisontaalid on nende põhjal tuletatud.

Teostusjoonis on loodud kogu tehismärgala kohta, kuid antud töös uuriti vaid ühte tehismärgala osa. Seetõttu valiti jooniselt välja ainult vajaminevad kõrguspunktid. Selle jaoks imporditi projekti 2020. aasta mõõdistamise kõrguspunktid ja jäeti projektis nähtavaks ainult mõlema mõõdistuse kõrguspunktid. Seejärel valiti välja 2020. aasta mõõdistuse kõrguspunktide lähedal olevad punktid. Kuna joonisel olevad kõrguspunktid on AutoCAD formaadis, tuleb nad enne kõrgusmodeli loomist muuta Civil 3D punktideks. Selleks kasutati *Convert AutoCAD Points* tööriista.

Mudeli koostamiseks valiti kõikidest joonise kõrguspunktidest välja 294 kõrguspunkti. Selleks, et neid teistest kõrguspunktidest eristada anti neile kirjelduse veergu väärtus J1. Valiti välja ka kõik joonise veepiiril olevad punktid ja nende kirjelduseks märgiti J2, et neid saaks teistest punktidest eristada. Veepiiri punkte oli 88 tükki. Loodi veel kaks punktirühma - üks mis sisaldab kõike punkte kirjeldusega J1 ja J2 ning teine, mis sisaldab ainult veepiiri punkte ehk punkte kirjeldusega J2.

Kuna andmed on pärit CAD jooniselt, puuduvad selles projektis Civil 3D pindade esitamistiilid. Seetõttu imporditi teise kõrgusmodeli projektist sealsed pinna kujutamise stiilid *Manage* veeru all oleva *Import Styles* tööriistaga.

Edasi sai kasutada sama meetodikat nagu eelmise kõrgusmodeli puhul. Esmalt loodi kõrgusmudel ehk pind pinnatüübiga *TIN surface*. Pinna definitsiooniks lisati kõiki J1 ja J2 kirjeldusega kõrguspunkte sisaldav punktirühm. Selleks, et kontrollida moodustunud kolmnurkvõrgustikku kujutati pinda esialgu *Contours and Triangles* stiiliga. Kolmnurkvõrgustiku parandamiseks lisati

ka selle kõrgusmodeli definitsiooni veepiir murrangujoonena ja välispiir. Ka selle mudeli kolmnurkvõrgustik vajab kergelt parandamist, mistõttu joonistati *3D polyline* tööriistaga veepiiri punkte ühendav joon ja tavalise *Polyline* tööriistaga mudeli välispiiri punkte ühendav joon. Veepiiri murrangujoon ja välispiiri joon lisati mõlemad pinna definitsiooni.

3.3.3 Mudelite verifitseerimine ja võrdlemine

Mudelite verifitseerimiseks võrreldi mõlemat loodud kõrgusmodelit Maa-ameti maapinna kõrgusmodeliga. Kasutati 1-meetrise eraldusvõimega maapinna kõrgusmodelit. Uurimisala jääb kaardilehele 54652. Andmed on Maa-ameti kodulehelt alla laetud 21.05.2021.

Maa-Ameti kõrgusmodelist loodi Civil 3D pind tööriistaga *Create Surface from DEM*. Kuna allalaaditud failis on andmed kogu kaardilehe kohta, siis selleks, et mudel hõlmaks ainult uurimisala lisati mudelile ka välispiir.

Mudelite verifitseerimiseks võrreldi mõlemat loodud mudelit Maa-ameti kõrgusmodeliga. Selleks, et teada saada mis kohtades ja kui palju kahe erineva pinna reljeef erineb tuleb ühest pinnast teine lahutada. Antud juhul lahutati 2016. ja 2020. aasta mõõdistusandmete põhjal loodud mudelitest Maa-ameti maapinna kõrgusmodel. Seda tehti *Create Surface* tööriistaga, milles pinna tüüpiks valiti *TIN volume surface*, *Base surface* valiti lahutatav pind ja *Comparison surface* valiti pind, millest lahutatakse.

Sama põhimõttega loodi ka pind, milles 2020. aasta andmete kõrgusmodelist lahutati 2016. andmete kõrgusmodel. Antud pind näitab millised muutused on selles ajavahemikus toimunud.

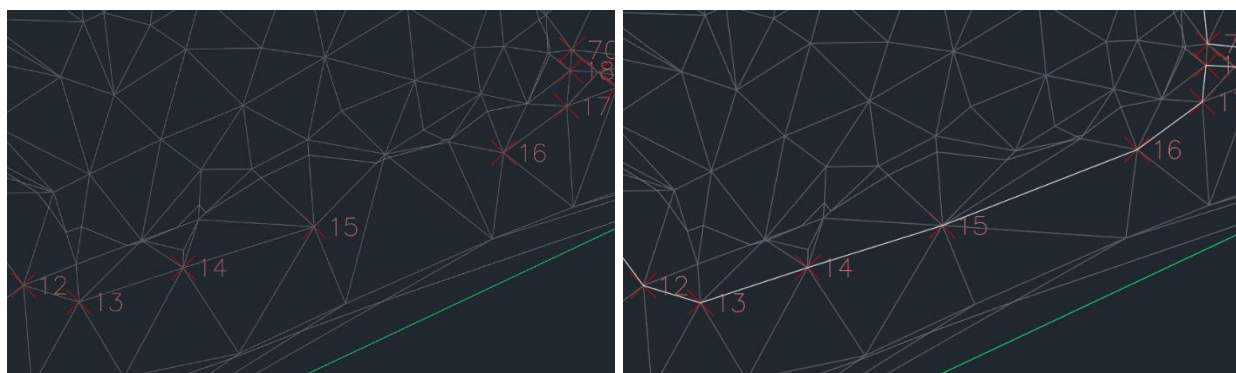
4. Tulemused ja arutelu

4.1 Kõrgusmodelite loomine

4.1.1 2020. aasta andmete põhjal loodud kõrgusmudel

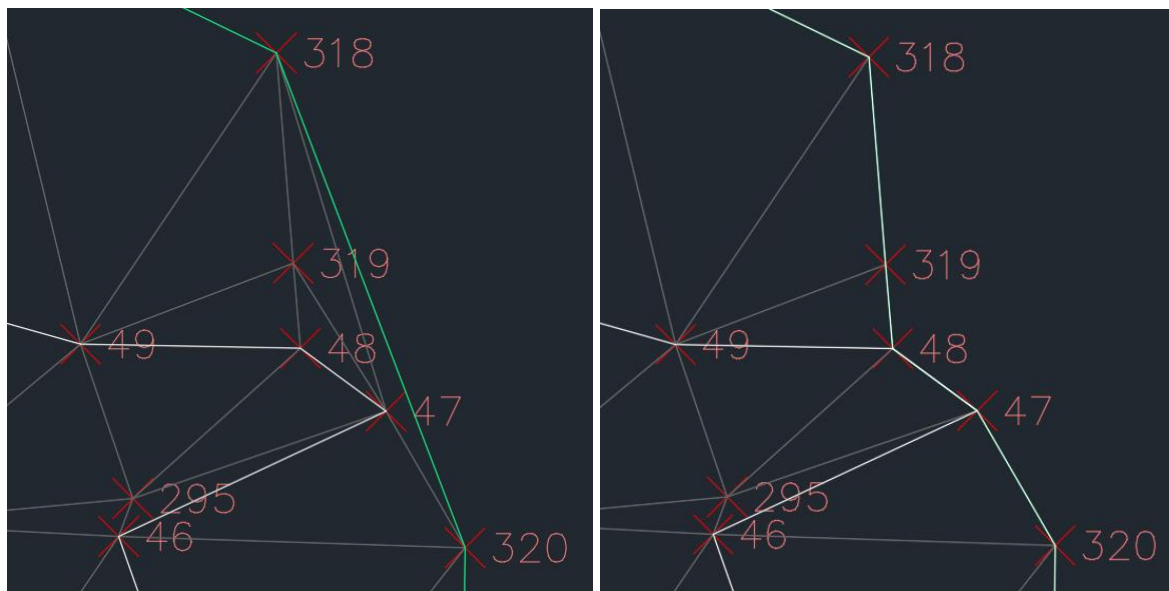
Kõrgusmudeli loomise käigus tuli andmeid mõnevõrra korrigeerida. Välitööde ajal sai üles märgitud, et paar punkti mõõdeti vale koodiga, täpsemalt mõõdeti need ekslikult veepiiri koodiga V6, kuigi tegelikult pidid need olema tavalised reljeefipunktid koodiga R1. Tahhümeestrist allalaetud kõrgusandmete kontrollimise käigus ilmnnes, et tegu oli punktidega 289-295 ja nende punktide kood parandati ära. Samuti oli mõõdistustööde käigus sooritatud põhja suuna leidmiseks kasutatud mõõdistuspõhise punktis kordusmõõtmine, seega oli see punkt andmetes kahekordselt ja andmetöötluks eemaldati kordusmõõtmise punkt andmetest. Rohkem duplikaate ega vigu andmete verifitseerimise käigus ei leitud.

Loodud kõrgusmudeli TIN-võrgustiku kontrollimisel leiti, et kolmnurkvõrgustikus leiduvad mõned probleemsed kohad. Üheks probleemiks oli, et triangulatsiooni käigus loodud kolmnurgad ületavad veepiiri (Joonis 9). Selleks, et kõik veepiiri punktid oleksid omavahel ühendatud ja katkestaksid ära ühenduse vee all mõõdetud punktide ja maapeal mõõdetud punktide vahel loodi veepiiri punktidest murrangujoon ehk *breakline*. Murrangujoone lisamiseks kasutati *3D Polyline* tööriista, millega ühendati kõik veepiiri punktid punkti numbrite järjekorras. Selleks, et joon sisaldaks ka kõrgusandmeid on oluline kasutada just *3D Polyline* tööriista tavalise *Polyline* tööriista asemel. Peale joone joonistamist lisati see pinna definitsiooni murrangujoone ehk *breakline*-na. Joonise 9 parempoolsel pildil on näha tulemuseks saadud TIN-võrgustik peale murrangujoone lisamist.



Joonis 9. TIN-võrgustiku kolmnurgad enne (vasakul) ja pärast (paremal) murrangujoone lisamist.

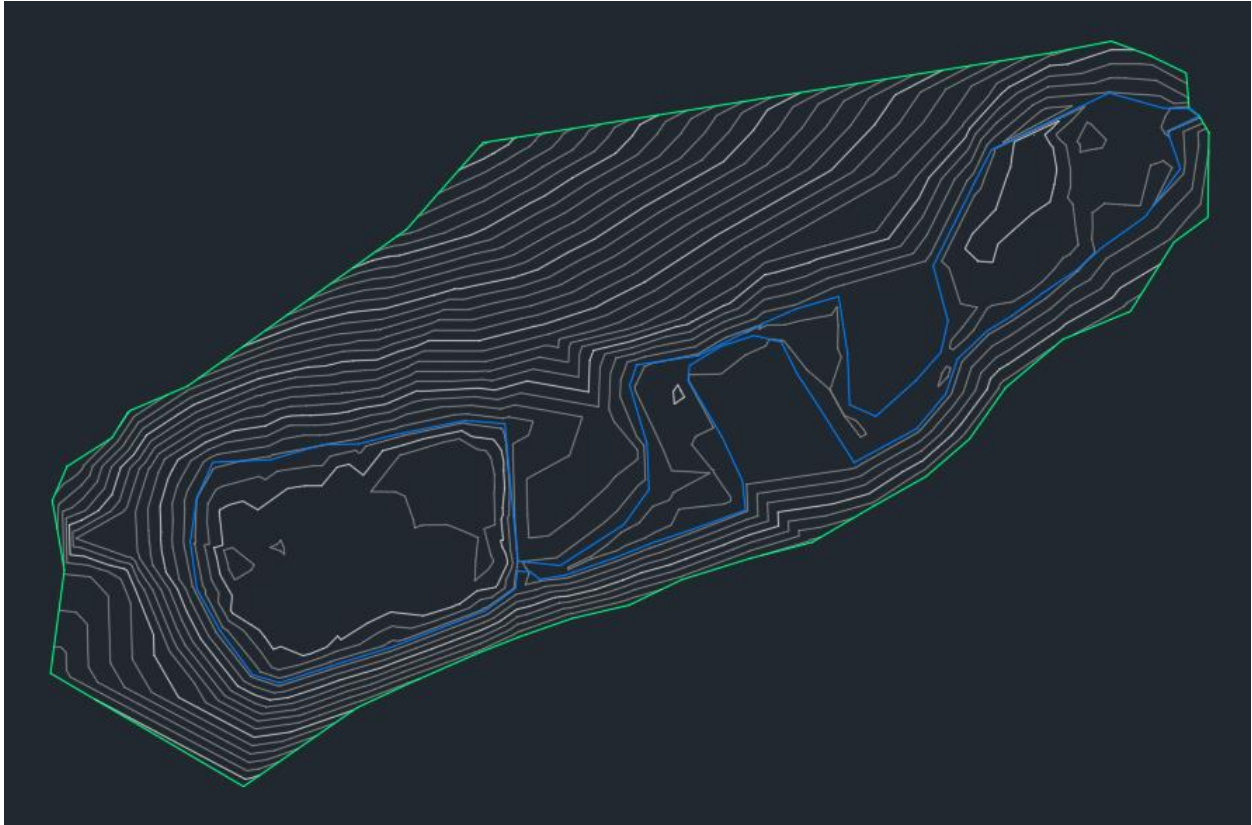
Teiseks probleemiks oli, et mõnes kohas mudeli välisservadel on TIN-võrgustik interpoleeritud moodsustatud alast väljapoole. See on juhtunud, kuna punktide paigutuse tõttu on omavahel ära ühendatud üksteisest kaugel olevad punktid. Joonise 10 vasakpoolisel pildil on näha, et veepiirist paremal pool on omavahel ühendatud kõrgemad reljeefi punktid. See tekitab mulje nagu oleks tegu seal suletud veekoguga, kuigi tegelikult on märgala suurem ja vesi liigub sealt veel edasi. Usaldusväärsema mudeli saamiseks lisati selliste kohtade parandamiseks kõrgusmodelile ka välispiir ehk *Boundary*. Selle jaoks joonistati *Polyline* tööriistaga suletud joon mööda välispiiri punkte ja lisati antud joon pinna definitsiooni (Joonis 10). Lisaks jäeti välispiiriga mudelist välja ka üks moodsustuspõhise punkt, sest see oli teistest punktidest väga isoleeritud. Samuti oli antud punkt moodsudetud rändrahnna peale, mistõttu selle kõrgusandmed ei kujutanud maapinna kõrgust.



Joonis 10. TIN-võrgustiku kolmnurgad enne (vasakul) ja pärast (paremal) välispiiri lisamist.

Valmis kõrgusmodel kujutati 20 cm lõikevahega horisontaalidega (Joonis 11). Mudelit analüüsid on näha, et vasakult teine ja kolmas poolsaar eristuvad veepinnast ainult seetõttu, et joonisel on kaasatud ka veepiir. Antud olukorra põhjustab asjaolu, et nende kahe poolsaare pealt jäid kõrguspunktid võtmata. Seetõttu on mudeli loomisel moodustunud kolmnurgad poolsaare vastaskallaste vahel ja kogu poolsaar asub mudelil veepinna kõrgusel. Näha on ka ühes kohas

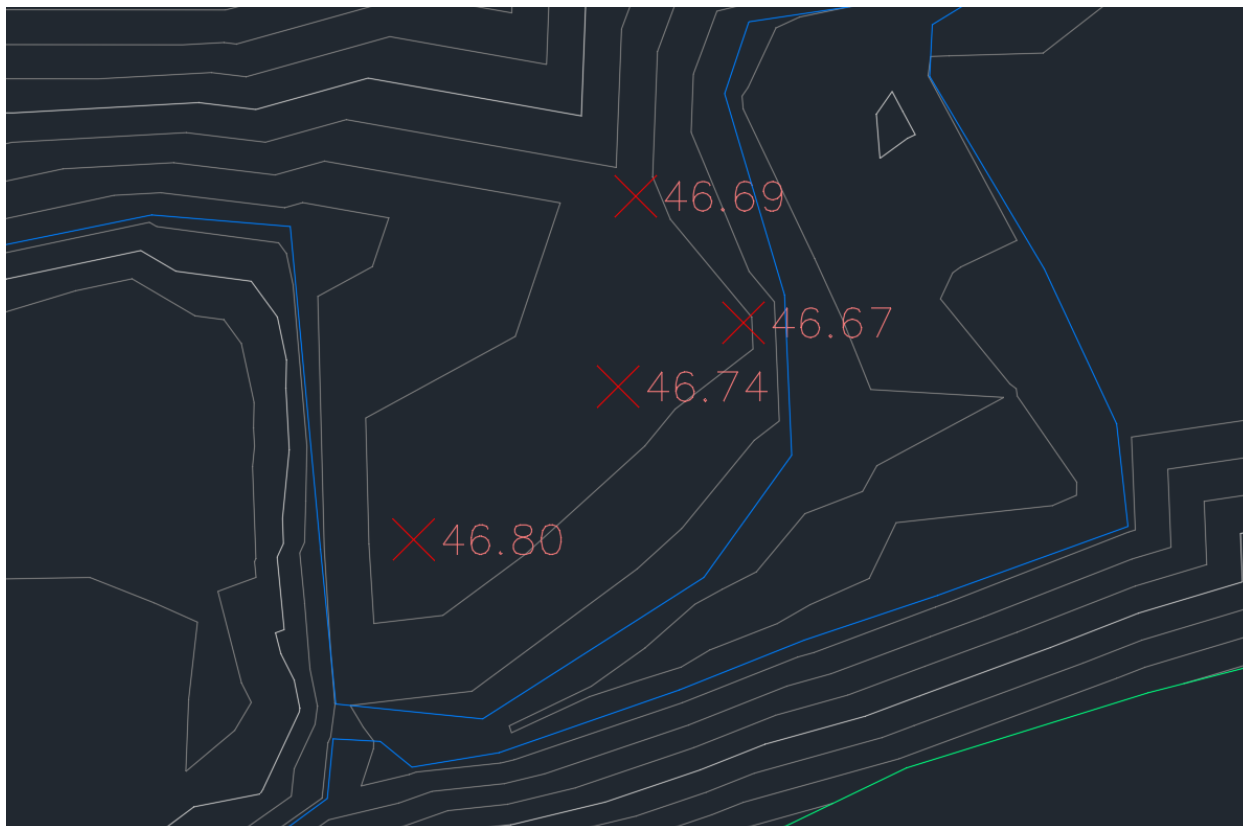
veepiiri ääres tekkinud teravat nurka horisontaalides, mida tõenäoliselt jällegi tegelikkuses ei ole vaid see on tekkinud maapinnal mõõdetud kõrguspunktide hõreduse tõttu.



Joonis 11. Mõõdistusandmete põhjal loodud kõrgusmudel koos veepiiriga, horisontaalide lõikevahe 20 cm.

Samuti on vasakult esimese poolsaare reljeefijooned tugevalt sõltuvad seal mõõdetud punktide asukohast, kuna seal olid kõrguspunktid üsna hõredalt. Järgmisel lehel oleval joonisel 12 on näha, et kõrgem reljeefijoon on joonistunud seal mõõdetud nelja kõrguspunkti ümber. Tegelikkuses on poolsaare reljeef tõenäoliselt ühtlasem. Samuti on punktide hõreduse tõttu tekkinud poolsaare juurde nõlvale terava nurgaga horisontaalid.

Veepiiri sees joonistuvad välja mõned sügavamad alad. Näiteks vasakpoolses suuremas tiigis on vee sissevoolu juures väike sügavam koht ja vastaskalda juures suurem sügavam ala. Parempoolses settebasseinis joonistub basseini keskel välja kõrgem horisontaal ühest kaldast teise. Selle põhjuseks on seal olev kividest vall, mille tagant algab settebasseini madalam osa.



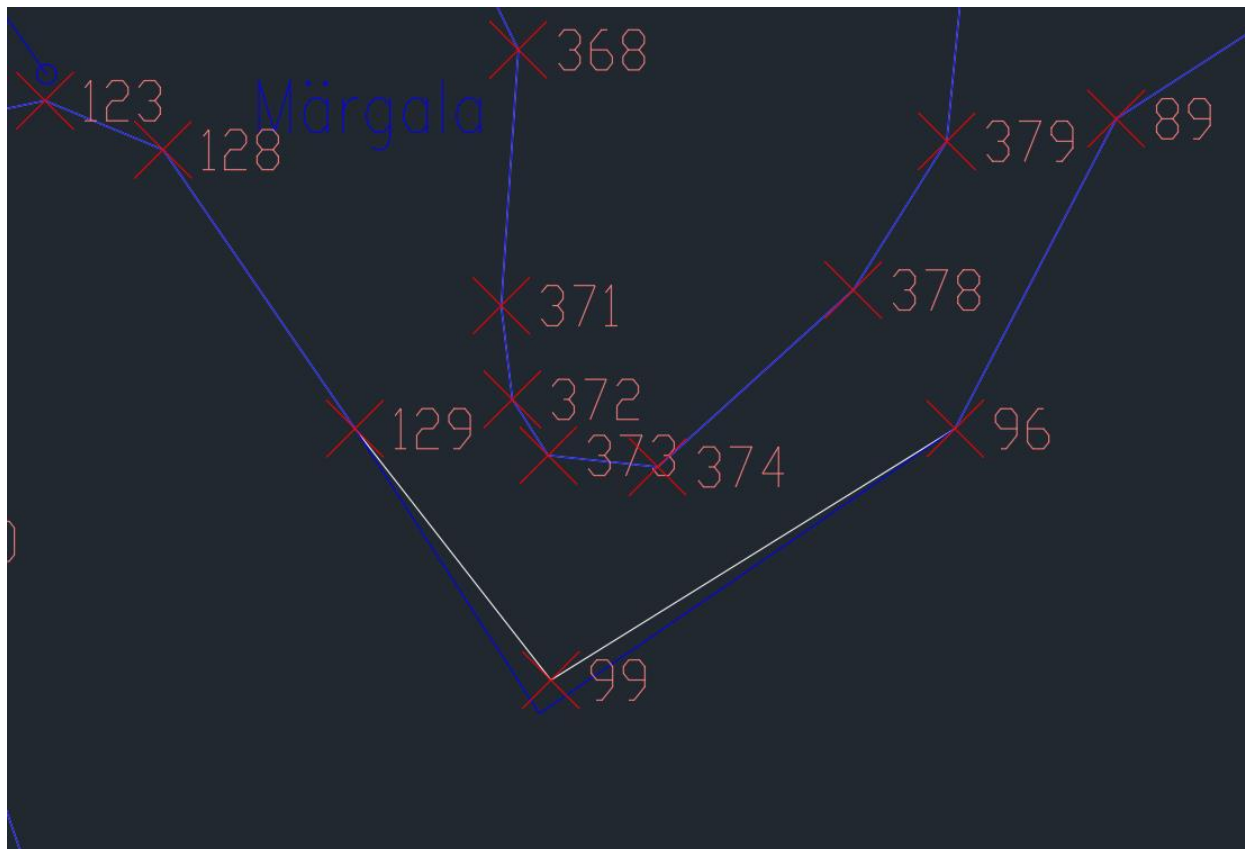
Joonis 12. Poolsaarel asuvad kõrguspunktid.

Peamised ebakõlad on tekkinud sellest, et mõõdistustöodel keskenduti peamiselt veealuse reljeefi mõõtmisele ja maapinnalt on kõrguspunkte võetud hõredamalt. Kuna ka andmetöötluses keskendutakse pigem veepiiri sisse jäävale alale, siis mainitud väikesed ebakõlad mudelis olulist mõju ei avalda.

4.1.2 2016. aasta andmete põhjal loodud kõrgusmudel

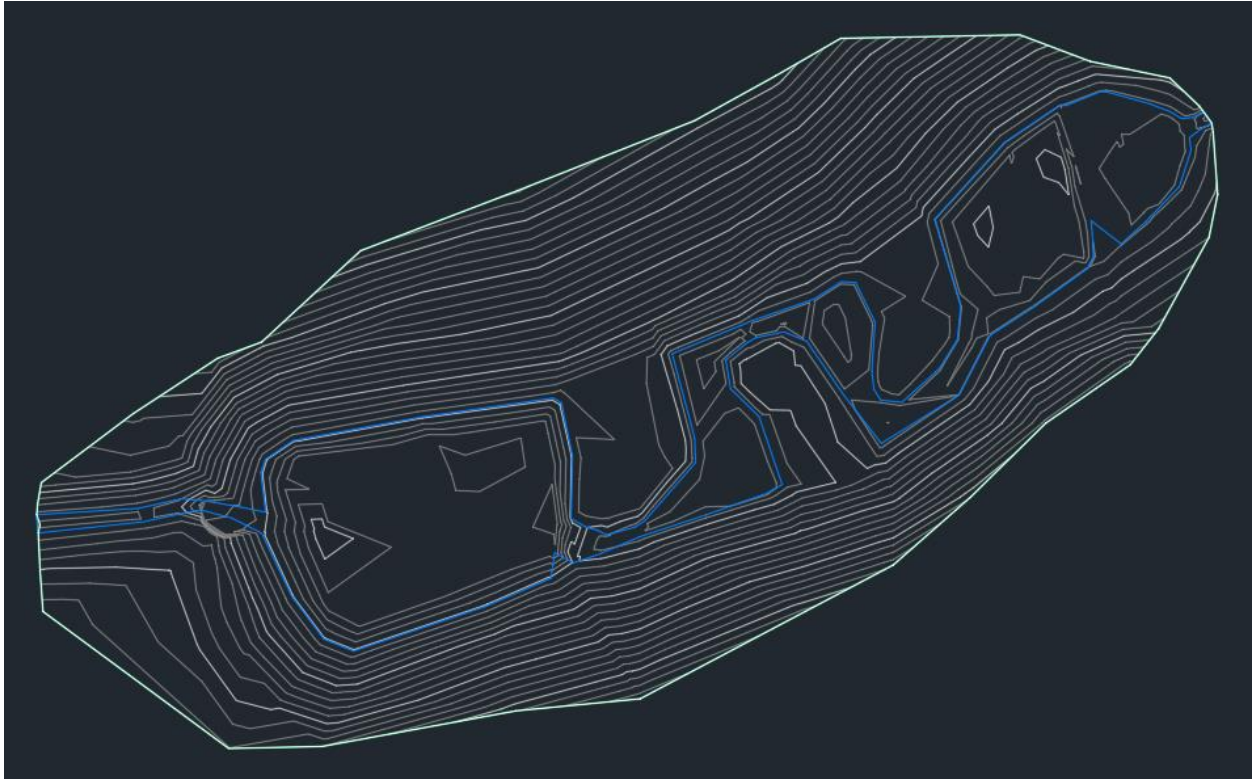
Teostusjoonise põhjal loodud kõrgusmudelis esines triangulatsioonis eelmise mudeliga sarnaseid probleeme, mis vajasid parandamist. Osades kohtades moodustusid kolmnurgad läbi veepiiri ja kohati olid kolmnurgad interpoleeritud kõrguspunktidest väljapoole. Ka sellele mudelile lisati sel põhjusel mudeli definitsiooni veepiiri murrangujoon ja välispiiri joon.

Esines ka omapärane ebakõla teostusjoonise andmetes. Nimelt oli ühes veepiiri nurgas puudu kõrguspunkt, mistõttu pidin veepiiri kõrguspunktina kasutama selle nurga vahetus läheduses olevat punkti (Joonis 13).



Joonis 13. Erinevus joonisel oleva ja kõrguspunktidest moodustatud veepiiri vahel.

Valmis kõrgusmudeli esitamiseks kasutati samu 20 cm löikevahega horisontaale (Joonis 14). Jooniselt on näha, et võrreldes 2020. aasta mudeliga on maapinna horisontaalid sujuvamad. Selle põhjuseks on, et antud mõõdistusel oli maapinnalt kõrguspunkte võetud tihedamalt. Sarnaselt teisele mudelile on ka siin vasakpoolses suures tiigis sügavamad alad sarnastel asukohtadel, kuid need on teistsuguse suurusega. Antud mudelil joonistud veel paremini välja parempoolse settebasseini keskel olev kividest vall.



Joonis 14. CAD joonise põhjal loodud kõrgusmodel horisontaalide löikevahega 20 cm.

4.2 Kõrgusmodelite verifitseerimine

Kõrgusmodelite ja kõrguspunktide võrdlemisel tuli välja asjaolu, et modelite kõrgused on omavahel nihkes. Nihe jääb enamjaolt kuskile vahemikku 30-60 cm. Kohati ka üle ja alla selle vahemiku. Täpset suurust on raske määratleda, kuna tõenäoliselt on see mitmest asjaolust ja erinevates reljeefi osades on nihe erineva suurusega. Üheks põhjuseks on, et vana mõõdistamine on tehtud Balti kõrgussüsteemis (BK77), mis võrreldes praegu kasutusel oleva Euroopa kõrgussüsteemiga annab uurimisala asukohas umbes 17 cm madalama tulemuse.

Uurimistöö käigus läbi viidud mõõdistustel sai mõõdistuspõhise kõrgus mõõdetud GNSS-seadmega, kuid sellest põhjustatud nihe ei tohiks ületada 10 cm. Samuti võib kõrguserinevuse põhjustada mõõtmiste meetoodika. Kõrgematelt nõlvaosadelt punkte palju ei mõõdetud ja seega võib tekkida erinevusi mõõdistamise detailsuse või interpoleerimise tõttu. Veealustes üksikutes punktides võib erinevusi põhjustada kõrguspunktide asukoht. Kuna pinda mida mõõdetakse pole näha võib mõni punkt sattuda näiteks auku, kivide vahele või kivi peale. Viga võib tulla ka

tahhümeetri nulliasemest, mis puhul viga suureneks koos mõõtmiskauguse suurenemisega. Pole teada ka, mis meetodikat on kasutatud 2016. aasta mõõdistamisel. Kui seal võeti näiteks kõrguspunktid GNSS-seadmega võib ka see mingil määral nihkesse panustada.

Kõrgusmodelite verifitseerimiseks võrreldi mõlemat mudelit Maa-ameti kodulehelt alla laetud 1-meetrise eraldusvõimega maapinna kõrgusmodeliga. Selleks esmalt imporditi Maa-ameti kõrgusmodel Civil3D töökeskkonda ja esitati see sama suure löikevahega horisontaalidega, nagu teised mudelid (Joonis 15). Jooniselt on näha, et Maa-ameti mudelil on veealune reljeef väiksema detailsusega, kui teistel mudelitel. See tuleb asjaolust, et antud mudel on koostatud aerolaserskaneerimise andmetest, mistõttu on tõenäoliselt saadud kõrgusandmed veepinnalt või veepinna lähedalt.



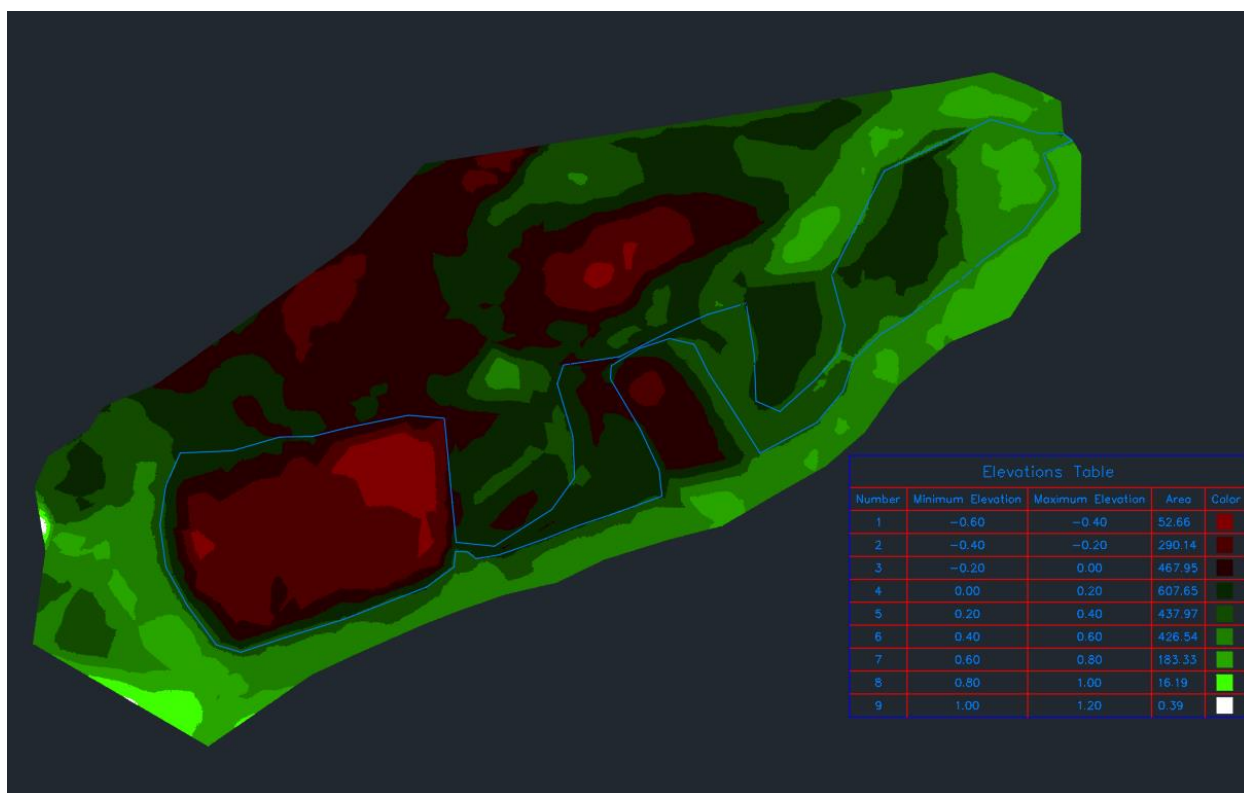
Joonis 15. Maa-ameti maapinna kõrgusmodel kujutatud 20 cm horisontaalidega.

Nii 2020. aasta kui ka 2016. aasta mudelist lahutati Maa-ameti maapinna kõrgusmodel. Saadud tulemuse kujutamiseks loodi kujutusviis, mis näitaks pinda 20 cm vahemikega. Pinnad, mis olid

Maa-ameti kõrgusmudeliga võrreldes kõrgemad kujutati rohelise värviga ja pinnad, mis olid madalamad kujutati punase värviga. Sealjuures mida heledam värv, seda suurem erinevus. Kui pindade erinevus on üle 1 meetri on see kujutatud valge värviga.

4.2.1 2020. aasta andmete võrdlus Maa-ameti kõrgusandmetega

Võrluses, kus 2020. aasta mudelist lahutati Maa-ameti kõrgusmudel (Joonis 16) ilmnes, et mõõdistusandmed on enamasti Maa-ameti andmetest kõrgemad. Vasakul olev suurem tiik on tugevalt punane (madalam), sest aerolaserskaneerimine ei võimalda mõõta selle põhja. Ülejäänud madalamad kohad on vaid üks poolsaar, millelt kõrguspunkte ei võetud, tahhümeetri ümber olev ala ja üks ala põhjapoolsel nõlval. Põhjusi miks mõõdistuse andmed on kõrgemad võib olla mitmeid.



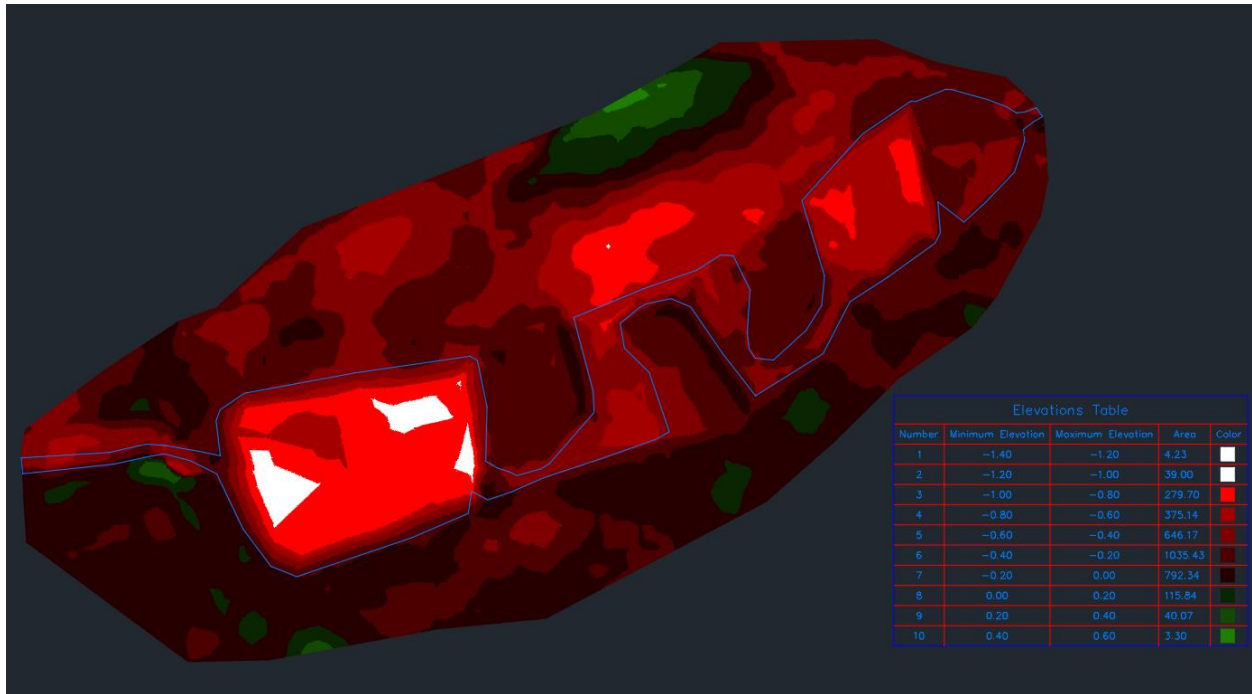
Joonis 16. 2020. aasta mudelist on lahutatud Maa-ameti kõrgusmudel.

Esiteks võib olla tegu nulliaseme veaga, mis tähendaks, et kaugemal mõõdetud punktides on kõrgusviga suurem. Jooniselt 16 on näha ka, et tahhümeetri asukohas on mõõdistuse pind hoopis madalam ja kaugemates servades on erinevus kõige suurem, kuid põhjused selleks võivad peituda ka mujal. See heleroheline riba, mis läheb joonise kirdeosast ümber märgala idaotsani välja on mõõdistatud kividest nõlva peal järjest punktide reana. Sealjuures kogu selle joone peale pole ühtegi täiendavat punkti nõlva kõrgemates või madalamates osades, seega on kõrgusandmed seal üsna hõredalt võetud. Kuna tegu on järjest võetud punktidega ja põhjapoolsel nõlval oli kohati kõrgemat võsa, mis vajas aeg-ajalt sauakõrguse muutmist võib põhimõtteliselt olla ka väliarvutisse sisse jäänud vale sauakõrgus, mistõttu on järjest mõõdetud näiliselt kõrgemad punktid.

Mingid vead võivad olla sisse tulnud ka Maa-ameti andmetest. Näiteks tihedama taimestikuga aladel võib aerolaserskaneerimise teel saada maapinna kõrguse asemel taimkatte kõrguse. Märgala põhjapoolsel nõlval, kus mõõdistusandmed on Maa-ameti andmetest kas madalamad või vaevu kõrgemad oligi kohati tiheda ja kõrgema taimestikuga kaetud. Samuti võivad erinevused olla tekkinud asukohanihkest. Suure kallakuga nõlvadel võib ka väike asukohanihe anda kõrguserinevuse. Aerolaserskaneerimise puhul võivad asukohanihked tekkida näiteks lennu suunast. Vigu võib põhjustada ka lennuki asukoht ala suhtes. Nadiiris on tulemus kõige täpsem, kuid mida suurema nurga all ala lennukist on, seda suurem on ka viga. Põhjanõlv on joonisel enamjaolt punane, samas lõunanõlv roheline – see võib näiteks viidata, et mudelid on nihkes põhja-lõuna suunas.

4.2.2 2016. aasta andmete võrdlus Maa-ameti kõrgusandmetega

Maa-ameti kõrgusandmed lahutati ka 2016. aasta kõrgusmudelist (Joonis 17). 2016. aasta mudel on peaaegu kogu ulatuses Maa-ameti kõrgusmudelist madalam. Üheks asjaoluks on kindlasti tollasel mõõdistamisel kasutatud vana kõrgussüsteem, mis põhjustab umbes 17 cm madalama pinna. Kõige suurem erinevus on tiigis, kus erinevus ulatub kohati üle meetri. Jällegi selle tõttu, et aerolaserskaneerimisega ei saada kätte tiigi põhja. Vastupidiselt 2020. aasta mudelile esineb suurem erinevus põhjanõlval ja väiksem lõunanõlval. Esineb ka anomaalia põhjanõlval, kus teostusjoonise põhjal tehtud mudel on kõrgem Maa-ameti DEM-ist. Selle koha all on ka ala, mis on ümbritsevast alast palju madalam võrdluses. Sarnased laigud esinevad ka joonisel 16, mis viitaks, et need on põhjustatud pigem aerolaserskaneerimise andmete täpsusest.



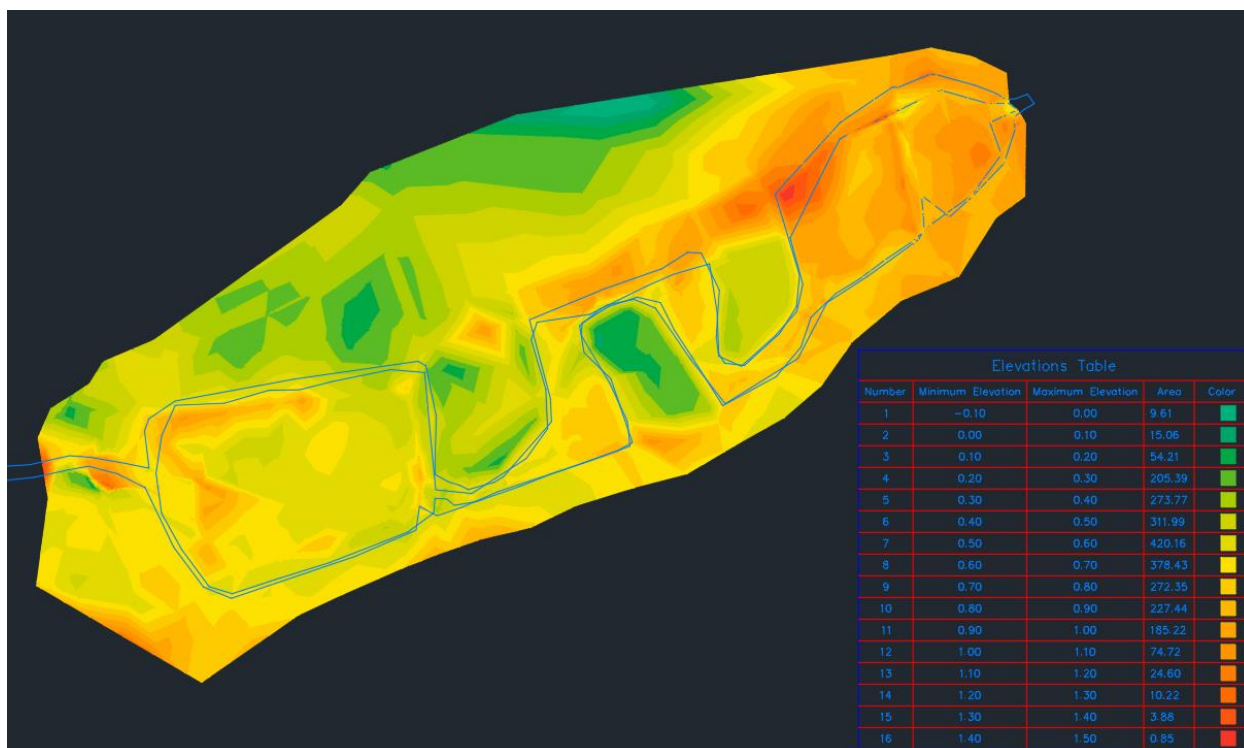
Joonis 17. 2016. aasta mudelist on lahutatud Maa-ameti kõrgusmudel.

Joonisel 17 on ka näha, et 2016. aasta mudeli ja aerolaserskaneerimise andmete võrdluses on lõunanõrv üsna sarnasel kõrgusel ja põhjanõlv oluliselt madalam 2016. aasta mudelis. Asjaolu, et joonisel 16 oli vastupidiselt põhjanõlv aerolaserskaneerimise andmetele lähemal ja lõunanõlv oluliselt kõrgemal viitaks sellele, et see nõlvade erinevus tuleb sisse aerolaserskaneerimise andmetest. Seda võib ette kujutada niimoodi, et meil on kaks pinda erinevatel kõrgustel ja nende vahel kolmas pind, mis on kergelt nihkes niimoodi, et põhjanõlv on mõõdetud natukene kõrgemana ja lõunanõlv natukene madalamana. See tekitab olukorra, kus võrreldes temast kõrgemal oleva pinnaga on keskmise pinna põhjanõlv sarnasel kõrgusel, kuid lõunanõlva erinevus on suur. Samal ajal võrreldes madalamal oleva pinnaga on vastupidiselt lõunanõlv sarnasel kõrgusel ja põhjanõlva erinevus suurem. Taolist olukorda näeme ka joonistel 16 ja 17. Selline viga võib tõenäoliselt olla tekkinud lidari nurgast mõõdetava ala suhtes või ka asukohanihkest, mis võib olla põhjustatud näiteks lennu suunast.

Samuti võib ka siin olla muid põhjuseid kõrguserinevuste jaoks. Näiteks on Maa-ameti mudel oluliselt kõrgem just põhjanõlval, kus esines tihedamat ja kõrgemat taimestikku. Kohati võib sealne kõrguserinevus olla tingitud sellest, et lidar on mõõtnud taimkatte kõrgust.

4.3 Setete muutused

Tehismärgalal toimunud setete muutuste uurimiseks lahutati uute kõrgusandmete põhjal loodud kõrgusmudelist vanadele andmetele põhinev kõrgusmudel. Saadud mudel esitati 10 cm suuruste kõrgusvahemikega (Joonis 18). Värviskaala liigub sinakasrohelist punaseni, sealjuures külmem toon viitab väiksemale kõrguserinevusele ja mida soojema värviga on pind kujutatud, seda suurem on erinevus mudelite kõrguses. Esines ka üks koht, kus uus pind oli mõõdetud madalam, see on kujutatud helesiniselt.



Joonis 18. 2020. ja 2016. aasta andmete võrdlus, 2020. mudelist on lahutatud 2016. aasta mudel. Kujutatud on ka mõlema mudeli veepiirid.

Joonisel on näha, et eelnevalt mainitud kõrgusnihke tõttu on peaaegu terve ala mõnevõrra kõrgem. Kõrguse nihke tõttu on raske hinnata, kui suured on toimunud muutused. Siiski joonistuvad selgelt välja mõned kohad, kus setteid on rohkem tekkinud. Sarnaselt joonisele 16 on uurimisala kirdeosas ümber veepiiri oranžikat ümbritsevast alast kõrgema muutusega pinda. Põhjuseks selleks võib olla mitmeid, näiteks eelnevalt mainitud nulli ase või sauakõrguse määramise viga mõõdistamisel.

Nulli aseme viga tundub ebatõenäoline kuna väga kõrge erinevusega pind algab põhjanõlva keskelt üsna tahhümeetri asukoha lähedalt. Kuna mudelites määrati ära veepiirid murrangujoontena, siis maapealsetes punktides olevad hälbed vee aluseid mõõdistusandmeid ei mõjuta.

Vasakul pool olevas tiigis on näha selgelt, et setted on peamiselt tekkinud vee sissevoolu koha juurde. Teisel pool tiiki vahetult enne väljavoolu on samuti väike ala, kus on rohkem settimist toimunud. Teine suurem settimise koht tundub olevat märgala viimane, kõige parempoolsem osa, kus vee äravool on piiratud. Seega võib järeldada, et oluline osa settimisest toimub vee sisse- ja väljavoolu juures.

Teiseks oluliseks settimise mõjutaks on käänakud vee liikumises ja muud sorti takistused. Näiteks liigub vesi märgalades looklevalt ja nurkades on näha suuremat pinnamuutust. Samuti on märgala viimases osas oleva kivivalli juures näha kitsast suuremate reljeefimuutustega ala. Tõenäoliselt on kivivall seal enda ette setteid kinni püüdnud.

Lisaks on näha paaris kohas suurema settimisega alasid kahe veepiiri vahel. Tundub, et setete akumulatsioon on mõnes kohas veepiiri natukene nihutanud. Kuigi üldiselt on veepiir ajas muutuv, on siiski antud tehismärgala lõpus niiõelda tamm, mis piirab vee väljavoolu. Seega peaks veetase olema üsna püsiv, välja arvatud kuivematel perioodidel. Seda tõestab ka erinevatel aastatel ja aastaegadel tehtud mõõdistamiste veepiiride sarnasus ülejäänud märgala osades, kus reljeef nii suuri muutusi ei näita. Kõige paremaks näiteks sellest on märgala viimase osa üleval vasakul nurgas olev punane ala, mis paistab selgelt ümbritseva ala seest välja. Väiksem veepiiri muutus on näha ka vee väljavoolu juures ja märgala keskmises osas. Keskmise osa puhul oli muidugi veevool nii kitsas, et sealt ei saanud palju kõrguspunkte võtta. Nii suur muutus veepiiris siiski viitaks sealsele settimisele. Veepiiri muutused on pigem toimunud just põhjapoolsel nõlval. Seda pühjustab tõenäoliselt tehismärgala kuju ja vee liikumise trajektoor.

5. Kokkuvõte

Uurimistöö eesmärk oli leida millised muutused on Vända tehismärgala reljeefis toimunud ja ka analüüsida, kas erinevatel aegadel tehtud mõõdistuste andmed on täpsuse mõttes võrreldavad. Töö osana teostati tehismärgalal topograafilised mõõdistustööd ja saadud andmeid võrreldi olemasolevate vanade andmetega. Andmete analüüsimiseks kasutati digitaalseid kõrgusmudeleid.

Andmetöötluse käigus tuli välja, et töö osana mõõdistatud andmete kõrgused olid vanade andmete suhtes nihkes. Tõenäoliselt on nihe tekkinud mitmete põhjuste kaasmõjul. Üheks põhjuseks on näiteks asjaolu, et varasemad andmed on mõõdetud vanas Balti kõrgussüsteemis ja uued Euroopa kõrgussüsteemis. Vaatamata nihkele õnnestus siiski tuvastada kohad tehismärgalal, kuhu on setteid rohkem tekkinud.

Leiti, et rohkem on setteid tekkinud vee sissevoolu juures ja ka vahetult enne väljavoolu. Samuti oli rohkem setteid tekkinud muude takistuste juurde – kohas kus suuremast tiigist voolab vesi kitsamalt edasi ja madalas vees oleva kividest valli ette. Lisaks on rohkem settimist märgata tehismärgala looklevas osas, peamiselt nurkades. Kuigi veetase on mõlema andmestiku puhul olnud sarnane leiti ka, et muutunud on mõnevõrra ka veepiir. Veepiiri muutumist settimise tõttu kinnitab ka asjaolu, et endise ja praeguse veepiiri vahel on näha ümbritsevast alast suuremaid kõrgusmuutusi.

Seatud eesmärgid täideti osaliselt. Tööga õnnestus leida, millistes tehismärgala osades on rohkem setteid tekkinud. 2016. ja 2020. aasta mõõdistusandmete vahelise nihke tõttu ei saanud aga hinnata, kui palju täpsemalt setteid tekkinud on. Samal põhjusel olid ka erinevatel aegadel tehtud mõõdistused osaliselt võrreldavad – andmed sobisid peamiste kohtade leidmiseks, kus setteid rohkem tekkinud on, kuid kõrguste erinevuse tõttu ei sobinud täpsete settehulkade leidmiseks.

Topographic modeling of sediment changes in Vända constructed wetland

Tanel Elmi

Summary

Vända wetland is the first constructed wetland in Estonia that is designed for agricultural wastewater treatment. A large amount of nitrogen and phosphorus, which cause eutrophication, reach natural waterbodies from agricultural lands. One important water purifying process in wetlands is the accumulation of sediments, which occurs due to the low velocity of the water there. Sedimentation is a process where different particles, including nitrogen, phosphorus and other contaminants, settle down into the bottom of a waterbody.

The goal of this bachelor's thesis was to find what kind of changes have occurred in the topography of Vända constructed wetland and to analyze if the surveys done on different years are comparable for this purpose. The theoretical part of the thesis gives an overview of different surveying methods and interpolation methods used for creating digital elevation models.

Topographic surveying was done in the wetland as part of the research and the gathered data was compared to previous survey data from 2016. Digital elevation models (DEM) were created from both datasets. Both created DEMs were compared to airborne lidar data from the Estonian Land Board in order to verify the data. Finally, the two DEMs were compared to each other in order to find what changes have happened in topography of the research area.

While processing the data it became apparent that the old and new survey datasets were measured on different elevations. The elevation difference was most likely caused by a combination of different factors. For example one component of the difference is that the old data was measured in the Baltic Height System, while the new data was surveyed according to the European Vertical Reference System. Other factors like small elevation deviations from GNSS surveying could have also attributed to the difference. Despite the differences in elevation it was possible to detect areas with more sediment accumulation within the wetlands.

It was found that more sedimentation has occurred near the inflow and outflow locations. Some other areas with more sediment accumulation were caused by different obstructions in the water.

For example where the pond turns into a narrow stream and near a ridge made of rocks in shallow water. There's also some accumulation of sediments noticeable in the meandering part of the wetland, primarily in the corners. Even though the water level of both surveys was similar, some changes in the shoreline were observed. That this was caused by sedimentation is confirmed by the occurrence of greater elevation change in the areas where the shoreline has changed.

The set goals were accomplished partially. It was determined which parts of the wetland accumulate more sediments. However due to the difference in elevation between the two datasets it was not possible to evaluate how much sediments have been deposited there. For the same reason the two datasets were only partially comparable. The data was usable to find where sediments have accumulated, but not usable to find the exact amounts due to the elevation differences.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Raivo Aunapit uurimisteema pakkumise, asjakohaste nõuannete ja abivalmiduse eest. Samuti tänan nii oma juhendajat, kui ka Kuno Kasakut mõõdistustöödel abiks olemise eest.

Kasutatud kirjandus

- Brasington, J., Rumsby, B. T., & McVey, R. A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973–990, doi: 10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y
- Diaconu, D. C., Bretcan, P., Peptenatu, D., Tanislav, D., & Mailat, E. (2019). The importance of the number of points, transect location and interpolation techniques in the analysis of bathymetric measurements. *Journal of Hydrology*, 570, 774–785, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.070
- Gasperini, L. (2005). Extremely Shallow-water morphobathymetric surveys: The Valle Fattibello (Comacchio, Italy) test case. *Marine Geophysical Researches*, 26, 97–107, doi: 10.1007/s11001-005-3710-0
- Hsu, C.-B., Hsieh, H.-L., Yang, L., Wu, S.-H., Chang, J.-S., Hsiao, S.-C., Su, H.-C., Yeh, C.-H., Ho, Y.-S., & Lin, H.-J. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 37(10), 1533–1545, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.06.002
- Kala, V. (2018). *Hüdrograafia alused*. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
- Kartau, R. (2015). *Interpoleerimismeetodite sobivuse hindamine kõrgusmudeli loomisel*. Magistritöö. Eesti Maaülikool, Põllumajandus- ja keskkonna instituut.
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press.
- Liba, N. (2005). *Fotogramm-meetria alused*. Tartu: Halo Kirjastus.
- Murray, C. J., Müller-Karulis, B., Carstensen, J., Carstensen, J., Conley, D. J., Gustafsson, B. G., Gustafsson, B. G., & Andersen, J. H. (2019). Past, Present and Future Eutrophication Status of the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6, doi: 10.3389/fmars.2019.00002
- Randjärv, J. (2006a). *Geodeesia. I osa 1. raamat, Topograafia*. Tartu: Halo Kirjastus.
- Randjärv, J. (2006b). *Geodeesia. I osa 2. raamat, Topograafia*. Tartu: Halo Kirjastus.

Roosaare, J., Möisja, K., & Aunap, R. (2019). *Geoinformaatika: Õpik kõrgkoolidele*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

Rüdja, A., & Sander, J. (2013). *Globaalne asukohamääramine: Satelliitmõõtmise näidisülesanded*. Tallinn: Innove.

Talpsep, I., Kasak, K., Piirimäe, K., & Tamm, I. (2012). *Tehismärgalad: Põllumees puhastab vett*. Tartu: Eestimaa Looduse Fond.

Internetiallikad

Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid (i.a.). Maa-amet. Vaadatud 27.01.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>

Delaunay triangulation (2021). *Wikipedia*. Vaadatud 06.02.2021, https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation

How Topo to Raster works (i.a.). ArcGIS. Vaadatud 02.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>

Vända tehismärgala rajamine (i.a.). Eestimaa Looduse Fond. Vaadatud 28.10.2020, <https://elfond.ee/tehtud/margalad/vanda-tehismargala-rajamine>

What is a TIN surface? (i.a.). ArcGIS. Vaadatud 06.02.2021, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tanel Elmi,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Vända tehismärgala setete muutuste topograafiline modelleerimine“, 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 Commons litsentsiga CC BY NC ND 3.0, 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.

Tanel Elmi

24.05.2021