

Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž

Keskkonnakaitse õppetool

**MATSALU MÄRGALA ÜLEUJUTUSMUDEL JA SELLE
VÕIMALIKE RAKENDUSTE ANALÜÜS**

Magistritöö

Siim Kilki

Juhendaja: MSc Mart Meriste

Kaasjuhendaja: PhD Mari Ivask

Tartu 2015

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

01.06.2015

Kuupäev

.....

Allkiri

Sisukord

Kasutatud mõistete ja lühendite seletus.....	5
Sissejuhatus	6
1 Kirjanduse ülevaade	8
1.1 Matsalu Rahvuspargi ja selle üleujutusala kirjeldus.....	8
1.2 Üleujutused ja jõgede hüdroloogia mujal	13
1.3 Üleujutuste modelleerimine	14
1.4 LIDAR tehnoloogia	16
1.5 Digitaalne kõrgusmudel	17
2 Materjal ja metoodika.....	20
2.1 Materjal	20
2.2 Üleujutuse mõõteseadmete kõrguse määramine	22
2.3 Kõrgusmudeli algandmete töötlemine	23
2.4 Digitaalse kõrgusmudeli loomine	23
2.5 Üleujutuse modelleerimine	25
2.6 Üleujutusmudeli võimalike rakenduste analüüsi metoodika	28
3 Tulemused	29
4 Arutelu.....	31
4.1 Üleujutusmudeli võimalike rakenduste analüüs	34
4.1.1 Teadustöö	34
4.1.2 Keskkonnakaitse	35
4.1.3 Põllumajandus	36
4.1.4 Energeetika	36
Kokkuvõte	37
Summary.....	39

Tänuõnad.....	41
Kirjandus	42
Käsikirjad	48
Lisa 1. LIDAR kõrgusandmetest vajalike punktide leidmise programm	
Lisa 2. Maa-ameti kõrgusandmete sorteerimine	
Lisa 3. Üleujutuse veetaseme kõrguse üle merepinna arvutamise programm	

Kasutatud mõistete ja lühendite seletus

Alluviaalne – jõesetetest tekkinud või pärinev (Eesti Keele Instituut, 2009).

Batümeetria – veekogude sügavusmõõtmine kajaloodiga, mis määrab veesamba sügavuse laeval tekitatud ja veekogu põhjalt tagasi peegeldunud ultraheli impulsside tagasipöördumise aja järgi (Luhaveer, 1996).

Möllirand – peeneteralistest setetest moodustunud väga lauge kuhjerand, mis kaldub kinni kasvama (Orviku, 1993).

pr k – prantsuse keeles.

Sissejuhatus

Käesolev töö on osa ETF Grandiprojekt 9145 „Mullaelustiku ruumiline jaotus ja koosluste üleujutusejärgne taastumine Matsalu Rahvuspargi lammi- ja rannaniitudel“ (2012-2015) suuremast uurimusest, mille käigus leitakse mullaelustiku ruumilise jaotuse ning üleujutuse dünaamika seos Matsalu Rahvuspargi kõrgusmodeliga, selgitatakse, kuidas toimub niitude koloniseerimine pärast üleujutuse lõppemist erinevate loomarühmade poolt, ja leitakse, millised maastikuelemendid niitudel ja naaberaladel toimivad refuugiumidena mullaelustikurühmade jaoks. Käesoleva töö osa sellest suuremast uurimusest on luua Matsalu märgala kõrgusmodel ja leida võimalus visualiseerida üleujutuse dünaamika seos selle kõrgusmodeliga. Haile ja Rientjes (2005) on oma uurimuses märkinud, et jõgede ja üleujutusala topograafia mängib väga olulist rolli üleujutuse hüdroloogilisel modelleerimisel, mistõttu on väga oluline luua väga täpne kõrgusmodel. Lisaks sellele mõjutavad märgaladel toimuvaid protsesse sademete hulk, pinnavee äravool ja üleujutuste dünaamika (Wamulume *et al.*, 2011). Mida rohkem aspekte üleujutusmodelis arvestatakse, seda täpsem tuleb model.

Käesoleva töö tulemusel valmiv mõõteandmetel põhinev üleujutusmodel on kohalikus skaalas tähtis hindamaks kõrgvee mõju Matsalu märgala mullaelustiku paiknemisele, elupaikade taastasustamisele. Töö laiema tähtsuse seisneb lihtsa mõõteandmete põhise üleujutusmodeli meetoodika väljatöötamises, et oleks võimalik kiirelt luua digitaalseid üleujutuse leviku kaarte.

Käesoleva töö esimeses peatükis („Kirjanduse ülevaade“) antakse ülevaade Matsalu üleujutusala hetkeseisust, üleujutustest ja nende mõjudest mujal maailmas, üleujutuste modelleerimisvõimalustest, LIDAR tehnoloogiast ja digitaalse kõrgusmodeli meetoodikatest. Teises peatükis („Materjal ja meetoodika“) kirjeldatakse käesoleva töö käigus kasutatud algmaterjale, algandmete töötlemise meetodeid, uuritava ala digitaalse kõrgusmodeli loomise meetoodikat, üleujutuse modelleerimise meetoodikat ja analüüsitakse töö käigus loodud üleujutusmodeli võimalike kasutusvaldkondi. Kolmandas peatükis („Tulemused“) kirjeldatakse käesoleva töö tulemust ehk üleujutusmodelit. Neljandas peatükis („Arutelu“) analüüsitakse loodud üleujutusmodelit, üleujutusmodeli loomise meetoodikat ja üleujutusmodeli kasutusvõimalusi.

Käesoleva töö eesmärgid on:

- luua Matsalu märgalast täpne digitaalne kõrgusmodel;
- töötada välja Matsalu märgala lihtsa ent täpse mõõteandmetel põhineva üleujutusmodeli meetoodika;

- analüüsida välja töötatud üleujutusmudeli sobivust erinevates valdkondades üleujutuse mõjude hindamiseks.

Töö autor püstitas kaks hüpoteesi:

- töö käigus loodud üleujutusmudel on lihtne ja täpne, kuid ei sobi kõigis valdkondades muutmata kujul kasutamiseks;
- välja töötatud üleujutusmudeli metoodikat on võimalik teistele üleujutusaladele üle kanda.

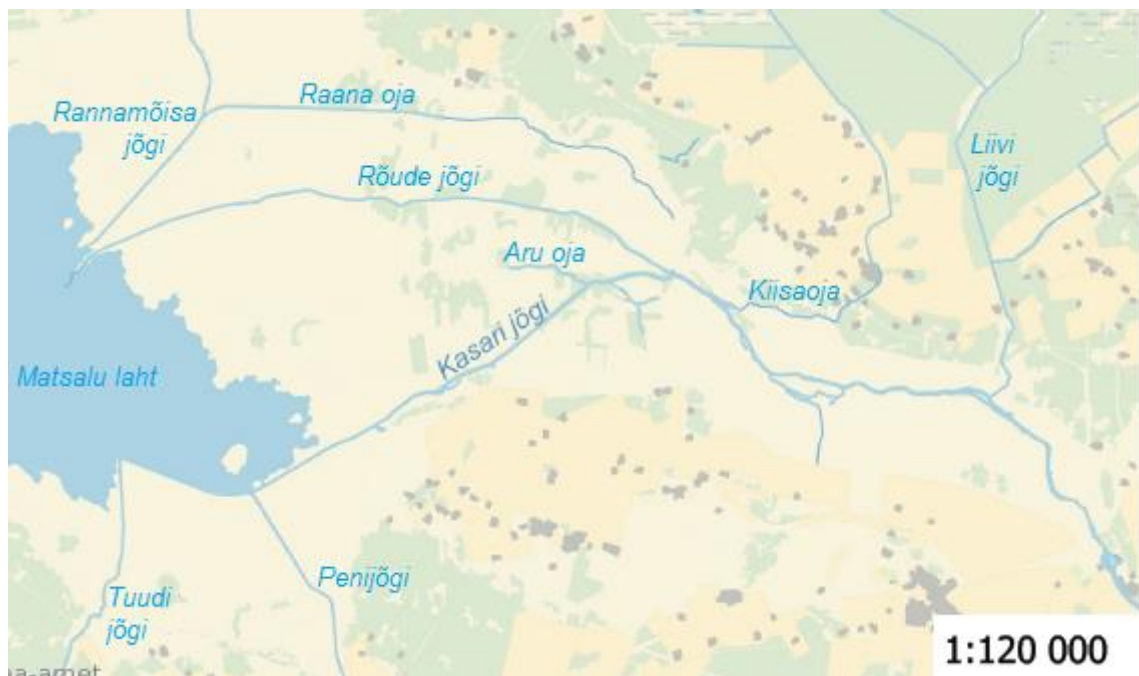
1 Kirjanduse ülevaade

1.1 Matsalu Rahvusparki ja selle üleujutusala kirjeldus

Matsalu Rahvuspark on 1957. aastal loodud (Keskkonnaamet, 2015) ja 1976. aastal Ramsari rahvusvahelise tähtsusega märgalade nimekirja kantud loodusala (Ramsar, 2015), mis 2004. aastast nimetati looduskaitsealast rahvusparkiks. Matsalu Rahvusparki pindala on 48 610 ha. Matsalu Rahvusparkis kaitstakse Lääne-Eestile iseloomulikke looduslikke ja poollooduslikke märgalasid, nendel elavaid looma- ja kasvavaid taimeliike ning Lääne-Eestile iseloomulikku pärandkultuuri. Matsalu Rahvuspark kuulub Euroopa tähtsaimate linnualade hulka, olles tähtis pesitsus-, puhke- ja toiteala paljudele veelindudele. Tähtsa linnu- ja niidukoosluste alana on Matsalu Rahvusparkis täheldatud ühtekokku 283 linnuliiki ja 780 taimeliiki, sealhulgas esimese kategooria kaitsealused liigid nagu must-toonekurg (*Ciconia nigra*), väike-laukhani (*Anser erythropus*), merikotkas (*Haliaëtus albicilla*), madukotkas (*Circaëtus gallicus*), kaljukotkas (*Aquila chrysaëtos*), suur-konnakotkas (*Aquila clanga*), väike-konnakotkas (*Aquila pomarina*), kalakotkas (*Pandion haliaëtus*), rabapistrik (*Falco peregrinus*), rabapüü (*Lagopus lagopus*), tutkas (*Philomachus pugnax*), habekakk (*Strix nebulosa*), siniraag (*Coracias garrulus*) (Keskkonnaamet, 2015).

Matsalu Rahvusparki üleujutusosalad on luhaniidud, rannaniidud, madalrannad (moreen- ja möllirand) ning roostikud (Kumari, 1985, 1997; Meriste, 2005). Rannaniidud on tekkinud neotektoonilise maakerke tulemusel merepinnast kõrgemale tõusnud merepõhjast (Palo, 1996; Paal *et al.*, 1999; Meriste, 2003). Mere alt vabanenud ala katavad esmajärjekorras pioneerkooslused ning hiljem kujunevad välja soolalembesed rannaniitudele omased taimekooslused, mis taluvad vähemalt tormilainete üleujutust. Rannaniidud võivad ulatuda ka merelisest mõjust kaugemale sisemaale, kus järk-järgult lähevad üle aru- või looniitudeks. Vahel loetakse ka viimased rannaniitude hulka, kuigi nad on klassifitseeritavad rannikuniitudena. Luhaniidud on aga tekkinud Kasari jõe laugesse orundisse (tõus keskmiselt 0,25 m/km (Meriste, 2003)) kuhjunud alluviaalsetest setetest või lammimetsade raadamise järel karjatamise ja niitmise tulemusel (Palo, 1996; Luhamaa *et al.*, 2001). Luhaniidud ujutatakse perioodiliselt suurveega üle, mis kannab luhale orgaanilisi ja mineraalseid setteid (Palo, 1996; Paal *et al.*, 1999). Matsalu luhaniidud ja ka käesolevas töös uuritav ala algavad Kasari maantee silla juurest, olles seal 1,3 km laiad ja ulatuvad mööda jõeorgu kuni roostikupiirini rannikul, olles seal 8 km laiad (Meriste, 2005).

Matsalu Rahvuspargi üleujutusalasid mõjutavad enim 67 km² suurune Matsalu laht ning paljude lisa- ja harujõgedega Kasari jõgi (Joonis 1). Matsalu lahe pikkus on 16 km ja laius 4 kuni 6 km. Matsalu lahe sügavus on keskmiselt 1,5 m, suurim sügavus lahe suudmes on 3,5 m, lahe idaosa sügavus on enamasti alla meetri (Kumari, 1985; Meriste, 2005). Matsalu lahele on iseloomulik veetaseme kõikumine aastaajati – veetaseme miinimum on kevadel (märts kuni mai) ja maksimum sügisel (september kuni november). Matsalu lahe veetase võib kõikuda kuni 2,5 meetri ulatuses. Kasari jõest voolab aastas läbi 865 miljonit m³ vett, mis ületab Matsalu lahe mahtu 8 korda, mistõttu on Matsalu lahe, eriti selle idaosa, vee soolsus väga madal (0,0 kuni 4 ‰). Matsalu lahe veetase sõltub väga tugevalt tuule suunast ja kiirusest, madalaim veetase on idakaarest puhuvate tuultega ning kõrgeim läänekaarest puhuvate tuultega (Kumari, 1985).



Joonis 1. Kasari ja Rannamõisa jõe deltaala ja nende lisajõed (Maa-amet, 2015c)

Kasari delta on tekkinud jõe poolt kohale kantud setetest, mis kombineerituna maakerkeprotsessiga nihutavad Matsalu looduskooslusi pidevalt lääne poole ja põhjustavad Matsalu lahe maismaastumist (tänapäeval küll üha aeglasema kiirusega) (Kumari, 1985; Meriste, 2003; Meriste *et al.*, 2005). Kasari jõgi saab alguse Raplamaalt ning selle pikkus on 112,5 km. Kasari jõgi on rikas nii lisajõgedega kui ka suudmeharude poolest – Kasari jõgi hargneb 10 km enne suubumist Matsalu lahte (Kumari, 1985). Setete ja muude takistuste kandmisega Kasari harujõgedega (Rõude jõgi ja Aruoja) ja Rannamõisa jõe suudmetesse on nende takistuste tõttu tekkinud uued harujõed jõgede suudmetesse (Meriste, 2003). Matsalu Rahvuspargi administratsioon puhastas Kasari jõe peaharu suuet igal kevadel kuni 2000.

aastate alguseni. Ummistuste kasvades sellest tegevusest loobuti ning see põhjustas Kasari jõe peaharu suudme roostumise. Kuna Kasari jõe peaharu kevadised vee vooluhulgad on väga suured (500-750 m³/s), siis ilmselt tekivad endise väljavoolukanali asemele looduslikud jõeharud, nagu on tekkinud Rõude ja Rannamõisa jõgede suudmealale (Jairus, 2014).

Kasari jõe alamjooksu keskmine vooluhulk on 23-28 m³/s, maksimaalne 500-750 m³/s ja minimaalne 0,8-1,0 m³/s (Meriste, 2005). Võrreldes teiste Eesti jõgedega on Kasari jõgi põuaperioodil veerikas, kuna Kasari jõgikonna pinnakate soodustab maapinnale avanevate karsti- ja tektooniliste riketega pinnavee laskumist põhjaveekihti, kus see liigub Kasari madalikku katvate savide alla, mis põhjustab suuri arteesiabasseine Kasari ja Vigala (üks Kasari lisajõgedest) ülemjooksudel (Kumari, 1985). Vooluhulgast oleneb, kevadel vähem, kuid suvel rohkem, kui palju vett satub üleujutatavatele luhtadele. Üleujutuse tekkimise kriitiliseks vooluhulgaks on kevadise suurvee ajal arvatud 18 m³/s ning suvisel üleujutusel 16-20 m³/s. Kevadise üleujutuse kriitilise vooluhulga arvutamisel on arvestatud sellega, et kanalid ei ole veel rohtunud ja vesi suudab kanalite suudmeist välja voolata. Suvisel üleujutusel puhul mängib rolli tuulte suund, mis kas tõstab merevee taset (sel juhul tekib üleujutus luhal, kui Kasari jõe vooluhulk on 16 m³/s) või langetab merevee taset (sel juhul tekib üleujutus luhal, kui Kasari jõe vooluhulk on 20 m³/s) (Meriste, 2005).

Matsalu üleujutusala suurust on ajaloo jooksul erinevate meetoditega arvatud. Kaljumäe (1990) kasutas selleks kahte topograafilist plaani mõõtkavades 1:10 000 ja 1:25 000. Kasari jõe luha piirideks võeti Haeska-Keemu joon Matsalu lahes ja kahe meetri samakõrgusjoon (kõrgus merepinnast) luhas, kuna kõrgeim veeseis luhal on olnud 192 cm. Viimase tõttu jäid uurimuse alt välja paljud Matsalu rannaniidud Matsalu lahe põhja- ja lõunakaldal. Olenevalt vee kõrgusest arvutas Kaljumäe (1990) üleujutusala suuruseks kuni 5948 ha, kusjuures suur osa rannaniitudest jäi uurimuse alt välja. Kumari (1997) andmeil oli Kasari delta uhtniitude (roostik ja luhaniidud) pindala kuni 4000 ha ja rannaniitude pindala ligikaudu 2900 ha, mis teeb üleujutusala ligikaudseks suuruseks 1990. aastate lõpus (Kumari, 1997) ja 2000. aastate alguses (Lotman, 2004; Meriste, 2005) kuni 6900 ha. Lotman (1997) ja Luhamaa *et al.* (2001) andmetel on aru-, loo-, ranna-, soo-, luha- ja puisniite Matsalu märgalal lausa 7500 ha, millest enamuse aru-, loo- ja puisniitudest ei ole tegelikult üle ujutatavad.

Aja jooksul kasvanud üleujutusala suurust võib seletada Kasari jõe setete ja põllumajandusliku reostuse kandumisega Matsalu lahte, mis soodustab roostike teket ja seetõttu Matsalu lahe maismaastumist (Kumari, 1985; Meriste, 2003; Meriste *et al.*, 2005). Matsalu lahe maismaastumist ja märgala pinna suurenemist põhjustavad ka neotektooniline

maakerge keskmiselt 2,3 mm/a ning deltasedimentatsioon, mis toimub enamuse Kasari jõe poolt Matsalu märgalale kantud 6300 tonni setetega (Meriste, 2005). Tänapäeval Matsalu roostikud enam ei laiene, vaid pigem on tendents roostike pindala vähenemise suunas (Meriste *et al.*, 2005), sest maakerge ja alluviaalsete setete settimine kõrgendavad roostike alust pinda, mis seeläbi muutub kuivemaks ja roostikukooslus asendub luhakooslusega. Kaudselt on Matsalu märgalal ja Kasari jõe valgalal toimunud kuivendustööd mõjutanud Matsalu lahe maismaastumist setete ja põllumajandusliku reostuse kontsentreeritud ja kiirema jõudmisega Matsalu lahte (Meriste, 2005).

Matsalu Rahvuspargi märgalad, kui oluline elupaik paljudele linnuliikidele, sealhulgas ohustatud liikidele, vajab kindlat hüdrooloogilist režiimi ja iga-aastast niitmist või karjatamist, et väljakujunenud poollooduslikud kooslused säiliks. Paljud luha- ja rannaniidud võsastusid ja/või roostusid kahekümnenda sajandi teisel poolel eelkõige karjatamise ja niitmise lakkamisel heina- ja karjamaade nõudluse vähenemisel (Lotman, 1997, 2005; Mägi, 2004) või niitude liigse kuivamise tagajärjel (Lotman, 1997, 2005). Igal aastal saab 4000 ha luhast niidetud 2400 kuni 2700 ha ja karjatatud 400 kuni 800 ha. Rannaniitude 2900 hektarist saab igal aastal niidetud ligikaudu 150 ha ja karjatatud ligikaudu 1200 ha (Kattai, 2015).

Kasari jõe veeseisul on aasta jooksul kaks kõrghetke, mil üleujutusala võivad kõrgest veeseisust olla üle ujutatud – kevadine lumesulamisest tingitud suurvesi ja hilissuvine sügisene sademetest tingitud tulvavesi. Suurvesi algab tavaliselt märtsi lõpus või aprilli alguses. Kevadise suurvee seis on Kasari silla hüdroloogiaposti andmetel olnud 45 (1944. aasta kevadel) kuni 249 cm (1932. aasta aprillis) üle nullseisu (Kumari, 1985). Kasari hüdroloogiaposti graafiku nullseis on defineeritud kui madalaim koht antud jõeprofiilis (Riigi Ilmateenistus, 2015a) ja Kasari hüdroloogiaposti puhul on vastavaks näitajaks 265 cm üle Kroonlinna nulli (keskmise meretase) (Riigi Ilmateenistus, 2015b). Kasari jõe deltas, Kloostri vaatlusposti andmeil, on üleujutuse maksimumkõrgus olnud aga 1930. aasta novembris 192 cm (Kaljumäe, 1990).

Kõrge vee korral ujutatakse Matsalu luhad üle, mis kuulub Eesti suurimate üleujutuste (Voormansik *et al.*, 2011) hulka (1931. aastal 110 km²) (Kumari, 1985). Matsalu Rahvuspargi üleujutusala del tekivad üleujutusi olenevalt asukohast ja meteoroloogilistest näitajatest kas kõrge merevee seis, Kasari jõe suured vooluhulgad või kõrge merevee ja jõevee seisu kombinatsioon (Kumari, 1985; Kaljumäe 1990). Üleujutused esinevad Kasari luhtadel enamasti perioodil märtsi lõpust kuni septembrini. Lumevaese talve ja kuiva suvega aastatel võib üleujutus ka tekkimata jääda. Üleujutuse põhjustab 10 korda suurema tõenäosusega

kõrge jõevee tase, kui kõrge merevee tase. Kauakestva kevadise kõrge veeseisu üks põhjuseid on Kasari jõe luhtade all olev ulatuslik vettpidav savikiht, mis takistab vee imbumist pinnasesse (Kumari, 1985).

Kasari jõe luhtade üleujutuse ajaline kestus, mis on 1927. kuni 1937. aastatel tehtud delta süvendustööde tõttu normaalsest ehk looduslikust olukorrast (enne süvendustöid 1924.-1929. aastatel keskmiselt 247 üleujutuspäeva aastas, pärast süvendustöid 1950.-1960.-ndatel keskmiselt 107 üleujutuspäeva aastas) märkimisväärselt lühem (Kumari, 1985; Truus ja Sassian, 1999; Lotman 2003; Meriste, 2005), mõjutab oluliselt luhtadel elutsevate liikide heaolu (Lotman, 2003). Süvendatud kanalite kaudu setete kiire kandumine jõesuudmetesse ummistab aegamööda liialt suurte kanalite suudmed ning taastub looduslik jõe delta areng. Jõesuudmete läbilaskevõime väheneb ja Matsalu luhad muutuvad taas niiskemateks ning üleujutuse kestus pikeneb ja pindala suureneb (Meriste, 2003). 1990. aastatel taastus süvenduseelsete aastate hüdroloogiline olukord, kus jõesängid on taas setteid täis ja vesi voolab merre hajutatult roostiku kaudu. Üleujutuse keskmine kestus aastas ja keskmine vee kõrgus on taastunud esimeste süvendustööde (1927.-1937. aastate) järgsele tasemele, olles vastavalt 170 üleujutuspäeva ja 56 cm (Truus ja Sassian, 1999). Üleujutuse kestuse pikendamiseks on Rõude ja Kloostri jõgedele endiste sildade asemele rajatud paisregulaatoritega sillad (Tõnisson, 2015), mis aitavad taastada luhakoosluste jaoks soodsa veerežiimi, kuid samas lubab kanaleid roostikust ja setetest puhastada, et luha niitmise ajaks niidud piisavalt kuivaks saaks kandmaks hooldustöid läbiviivaid masinaid (Lotman, 2005).

2001. aastal loodi Matsalu märgalast väga täpne kõrgusmudel nii samakõrgusjoonte kaardi, kõrguspunktide kaardi kui ka üleujutuskaartide näol. Viimane neist näitas üleujutuse ulatust vastavalt veeseisule (Lotman, 2003). Kuid Meriste (2003) järgi muutuvad Matsalu märgala hüdrodünaamikat mõjutavad looduslikud olud pidevalt põllumajanduslikust reostusest tingitud Matsalu lahe eutrofeerumise, alluviaalsete setete luhal ja jõgedes kuhjumise ning neotektoonilise maakerke tõttu. Seetõttu on oluline uue kõrgusmudeli väljatöötamine.

Meriste (2005) on Matsalu üleujutusala reljeefi kirjeldamiseks ja kõrgusmudeli loomiseks kasutanud 2001. aasta LIDAR (laseraltimeetriline mõõdistamine, ingl k *Light Detection and Ranging*) andmeid, Matsalu lahe lääneosa batümeetria andmeid aastast 1993 ja Matsalu lahe idaosa mõõtmistööde andmeid aastatest 2002-2005. Kõrgusmudeli koostamisel kasutati „lähima-naabri“ meetodit.

1.2 Üleujutused ja jõgede hüdroloogia mujal

Ükski jõgi ega jõgikond ei ole üks ühele võrreldavad, kuna igal neist on väga palju erinevaid aspekte, mis mõjutavad nende hüdroloogiat. Seetõttu saab teiste jõgede hüdroloogia järgi teha vaid üldistavaid järeldusi kindla jõe kohta, kuid täpsete tulemuste saamiseks peab läbi viima täiendavaid uurimusi (Ghimire ja Johnston, 2013). Üleujutuste hüdroloogiat mõjutavad nii jõevool, kui ka põhjavesi. Põhjavee tase on ajalises nihkes jõevee taseme muutustest. Kui jõevee tase tõuseb, hakkab tõusma ka põhjaveetase üleujutusosalal ning vastupidi, kui jõeveetase langeb, hakkab põhjaveetase alanema. Esimesel juhul liigub jõevesi pinnase kaudu põhjavette ja teisel juhul põhjavesi pinnase kaudu jõkke tagasi (Gautam *et al.*, 2004). Ajaline nihe on väga pikk – vee liikumine pinnasest jõkke (pinnase kuivamine) võib aega võtta olenevalt jõdest kuni kuus kuud, isegi siis, kui jõevee tase alaneb kiiresti (Bonnet *et al.*, 2008).

Kuna üleujutused mõjutavad enim inimeste loodud keskkonda, siis on ka enim üleujutuste uurimusi tehtud linnakeskkonna kohta (Abdullah, 2012; Merkuryeva *et al.*, 2014), kus rahvastiku tihedus on suurim. Linnades tekivad üleujutused enamasti tugevatest vihmasadudest (Rudari *et al.*, 2014) ja põhjapoolsemates linnades ka lume sulamisest tingitud jõevee taseme tõusust (Merkuryeva *et al.*, 2014).

Üleujutuste põhjuseid on mitmeid. Parasvöötme tasandikel, kus esineb külm talv, põhjustab jõgedes veetaseme tõusu ja kevadisi üleujutusi lumesulamisvesi ning jää kuhjumine jõgedel (Merkuryeva *et al.*, 2014). Jõesuuetes ja deltaalal tekivad üleujutused, kui tugevad tuuled puhuvad jõevoolule vastupidises suunas (Merkuryeva *et al.*, 2014). Kliimamuutuste tõttu väheneb põhjapoolsete jõgede vooluhulk, sest kõrgemate keskmiste õhutemperatuuride tõttu suureneb ka veekogude pinnalt aurustumine. Õhutemperatuuride tõus toob kaasa ka kevadiste suurvete esinemise tõenäosuse languse, kuna soojemate talvede korral üle nullkraadi tõusvad õhutemperatuurid sulatavad lumikatet ja sulavesi voolab talve ja kevade vältel jõgedesse ühtlaselt, tekitamata suurt üleujutust kevadel (Boyer *et al.*, 2010).

Paljudes piirkondades on kliimamuutuste või inimtegevuse tõttu veeringe ja jõgede hüdroloogia muutunud. Hiinas on Huang He jõe ülemjooksul viimastel aastakümnetel sademete hulga, aurumise ja sademevee äravoolu muutuste tõttu jõe vooluhulk vähenenud (Cuo *et al.*, 2013). Sama on juhtunud ka Quintangi jõe valgjalal, kuid hoolimata vähenenud vooluhulgast on seal suviste üleujutuste tõenäosus suurenenud (Xu *et al.*, 2013). Jaapanis, Teshio jõe valgjalal on kliimamuutustest tingitud sademete hulga suurenemisega tõusnud ka Teshio jõe vooluhulk (Fan ja Shibata, 2014). Ka Taanis ennustatakse selle sajandi lõpuks keskmiste õhutemperatuuride tõusu ning seetõttu sademete hulga suurenemist eelkõige talvel

ning vähenemist hilissuvel. Sademete hulga muutused mõjutavad otseselt jõgede vooluhulkasid ning seeläbi hüdroloogiat (Andersen *et al.*, 2006). Lõunapoolsetes piirkondades on jõgede hüdroloogiat mõjutavaks aspektiks ka sademevee kasutamine inimtegevuste (kastmine, olmevesi, põllumajandus) tarbeks. Albemarle-Palmito jõgikonnas (Georgia osariik, USA) tehtud uuringu järgi väheneks jõgede vooluhulk sademevee kasutamisel kuni 19% (Ghimire ja Johnston, 2013).

1.3 Üleujutuste modelleerimine

Üleujutuste modelleerimiseks on võimalik kasutada erinevaid mudeleid, kasutades sisenditeks kaugseire tehnoloogiaid, GIS rakendusi ja hüdrooloogilise modelleerimise tarkvarasid. Üleujutuste modelleerimiseks kasutatakse kas hüdrodünaamilisi või hüdrooloogilisi mudeleid (Merkuryeva *et al.*, 2014).

Hüdrodünaamilisi mudeleid kasutatakse vee voolu liikumise modelleerimiseks, kasutades Navier-Stokes'i võrrandeid, mis kirjeldavad vedelike füüsilist liikumist. Hüdrodünaamilised mudelid on matemaatilised mudelid, mis kasutavad üleujutuse projitseerimiseks diferentsiaalvõrrandeid (Néelz ja Pender, 2009; Merkuryeva *et al.*, 2014). Matemaatiline modelleerimine annab väga täpsed mudelid geomeetriselt lihtsamate (sirgjooneliste, kandiliste) inimtekkeliste süsteemide (kanalite) puhul (Néelz ja Pender, 2009; Abdullah, 2012), mistõttu käesolevas töös neid ei käsitleta.

Hüdrooloogilised mudelid on lihtsustatud, kontseptuaalsed veeringe osalised esitused, kuna veeringe tervikuna on väga keeruline protsess, mida on selle kompleksuse tõttu keeruline täielikult modelleerida. Hüdrooloogilisi mudeleid koostatakse üleujutuste kirjeldamiseks ja nendest aru saamiseks (Abdullah, 2012; Merkuryeva *et al.*, 2014). Hüdrooloogilised mudelid jagunevad kaheks – stohhastilised hüdrooloogilised musta kasti mudelid ja kontseptuaalsed ehk protsessipõhised mudelid (Merkuryeva *et al.*, 2014).

Stohhastilised mudelid on laialdaselt kasutatavad nende lihtsuse tõttu, kuna neis on matemaatiliste mudelite diferentsiaalvõrrandid asendatud algebraliste võrranditega (Néelz ja Pender, 2009; Abdullah, 2012; Merkuryeva *et al.*, 2014). Lihtsuse tõttu kasutatakse numbrilist modelleerimist tihti eriilmelise looduskeskkonna üleujutuste kujutamiseks (Néelz ja Pender, 2009; Abdullah, 2012).

Kontseptuaalsed mudelid kasutavad üleujutuse modelleerimiseks vooluveekogude hüdrooloogilist kontseptsiooni. Kontseptuaalsed mudelid koosnevad harilikult kahest

moodulist – sademete-äravoolu moodul, mis muudab sademed vee äravoolu hulgaks jõe hüdroloogilise tasakaalu alusel, ja suunamoodul, mis modelleerib vee voolu trajektoori (Merkuryeva *et al.*, 2014).

Täpsemates mudelites võetakse arvesse ka vee viskoossust, Coriolise jõudu, tuule mõju veepinnale, võimalike takistuste hõõrdetegureid ja sissevoolu mahtu. Lihtsustatud mudelites neid parameetreid ei arvestata nende väikse mõju tõttu kogu üleujutusele. Täpsemates mudelites neid küll kasutatakse, kuid see pikendab mudeli arvutusaega (Néelz ja Pender, 2009).

Ebatäpsused tekivad mudelisse kõige sagedamini topograafia andmestiku vigadest. Topograafia andmed on kõige suurem sisend üleujutuse modelleerimisel. Mitmed uurimused on välja toonud, et ka väike erinevus topograafias annab märkimisväärse erinevuse üleujutusmudeli väljundis (Abdullah, 2012), seda eriti nii tasasel maastikul, nagu on Matsalu märgala (langusega mööda jõge 0,15 m/km) (Meriste, 2005).

Üleujutusmudeli ebatäpsus võib tuleneda ka sisendite ja väljundite ebatäpsusest. Mudeli sisend on tavaliselt jõe vooluhulka või veesamba kõrgust mõõtev hüdrograaf või mõne teise mudeli väljundina saadud näitajad (veesamba kõrgus, vooluhulk graafikul). Üleujutusmudelid annavad väljundiks samuti vee sügavuse (veesamba kõrgus) ja üleujutusala ulatuse, mida kontrollitakse mehhaanilise mõõtmise või kaugseire seadmete abil. Märkimisväärseid kõrvalekaldeid on seletatud taimestiku ja tuule mõjuga või uurimusliku veaga (Abdullah, 2012).

Mitmetes uurimustes on üleujutuste modelleerimiseks kasutatud (Bates ja De Roo, 2000; Hardy *et al.*, 2000; Merkuryeva *et al.*, 2014; Jung ja Merwade, 2015) vabavaralisi tarkvarasid – HEC-RAS, LISFLOOD-FP ja TELEMAC-2D. Poulsen *et al.* (2014) on Odense jõe taastatud luhtade üleujutuste modelleerimiseks kasutanud tasulist modelleerimistarkvara MIKE. Kõik nimetatud tarkvarad on detailselt välja arendatud ning võimaldavad luua täpseid üleujutusmudeleid.

QGIS on tasuta ja vaba-varaline geoinfosüsteemide tööriistade tarkvara, millega kohalduvad paljude tasuliste modelleerimistarkvarade erinevad failitüübid. QGIS sobib hästi erinevate kaartide ja geoinfosüsteemide vaatamiseks, redigeerimiseks, geoinfosüsteemide loomiseks, andmete töötlemiseks ja analüüsimiseks, geoinfosüsteemide avaldamiseks ning võimaldab kasutajal programmeerida vastavalt oma vajadustele pistikprogramme (ingl k *plug-in*), mis mitmekesistavad QGIS-i kasutusvõimalusi. QGIS tarkvaraga saab digitaalne kõrgusmudel

luua TIN-kõrgusmodelina ning üleujutusmodeli loomiseks saab kasutada IDW interpoleerimise meetodit (ingl k *Inverse Distance Weighting*), kus punktide üksteisest kaugenedes nende mõju väheneb. (QGIS, 2015). Käesoleva töö jaoks valiti QGIS selle kasutajasõbralikkuse ja mitmekesiste kasutusvõimaluste tõttu digitaalse kõrgusmodeli ja üleujutusmodeli loomise tarkvaraks.

1.4 LIDAR tehnoloogia

LIDAR tehnoloogiat kasutatakse digitaalsete kõrgusmodelite loomisel (Meriste 2005; Wen *et al.* 2013), märgalade ja ranniku mõõtmisel (Meriste, 2005; Ward *et al.*, 2013; USGS, 2014), ülitäpsete ja andmetihedate rakenduste väljatöötamisel, 3D-mudelite loomisel, looduskatastroofide kaardistamisel (üleujutused, maalihked, maavärinad, tornaadod), jää ja lumega kaetud alade mõõtmisel, veekogude kaardistamisel kuni 70 m sügavuselt (Wehr ja Lohr, 1999), taimestiku uurimisel (Wehr ja Lohr, 1999; Ward *et al.*, 2013).

Digitaalse kõrgusmodeli loomiseks vajaminevad kõrgusandmed saab viimastel aastatel kiirelt arenenud ja teadustöös aktsepteeritud LIDAR mõõtmise ehk laseraltimeetiline mõõdistamise (ingl k *Light Detection and Ranging*) abil. LIDAR tehnoloogia on senimaani parima täpsusehinna suhtega ja kiire maapinna kõrguse mõõtmise tehnoloogia, mistõttu on see levinud paljudes valdkondades (Wehr ja Lohr, 1999; Abdullah, 2012). Käesoleva töö käigus kasutati aerolaserskanneri Leica ALS50-II abil saadud kõrguspunkte (Maa-amet, 2015a).

Wehr ja Lohr (1999) ning Fernández-Lozano *et al.* (2015) on oma töödes kirjeldanud laseraltimeetrilise mõõdistamise põhimõtteid. Kõrguspunktide saamiseks kasutatakse õhusõidukisse paigaldatud laserskannerit, mis koosneb laserkaugusmõõtmise seadmest, optilis-mehaanilisest skannerist ja kontrolli- ja töötlusseadmest. Laserkaugusmõõtmise seadmes kasutatakse laserina lühilainelist valgust. Laserkaugusmõõtmise seadmes kasutatakse kahte erinevat meetodit – pulseeriva laseriga mõõtmine ja pideva laserkiirega mõõtmine. Tänapäevased LIDAR tehnoloogiad kasutavad enamasti pulseerivat laserit. Õhusõiduki asukoha laserskanneerimise ajal määrab maapealne GPS-baasjaam, mis peab pidevalt õhusõidukiga ühendust. Maapinna kõrguspunktid (nende x-, y- ja z-koordinaadid) määratakse õhusõidukilt välja lastud laserimpulsi peegelduse asukoha järgi, arvestades lennuki täpset asukohta, kõrgust, laserimpulsi lähetusnurka, atmosfääri andmeid ning impulsi ajalast kestust jõudmaks õhusõidukist maapinnale ja tagasi õhusõidukile.

Saadud maapinna kõrguspunktid sorteeritakse asukoha järgi ning eristatakse erinevad kõrguspunktide klassid (maapind, ehitised, taimestik jne). Maa-ameti (2015a) LIDAR

kõrguspunktid on klassifitseeritud viide kuni seitsmesse erinevasse klassi olenevalt õhusõiduki kõrgusest laseraltimeetrilise mõõdistamise ajal. Osad laserid on suutelised ühe maapinna punkti ehk ühe välja lastud laserimpulsi kohta vastu võtma mitut impulssi, mis annab olenevalt taimestikust ja maapinna omadustest ning laserskanneri tüübist ühe maapinna punkti kohta kuni neli erinevate klassidega maapinna kõrguspunkti (nt maapind, madalam taimestik ja kõrgem taimestik) (Wehr ja Lohr, 1999; Maa-amet, 2015a). Viimatimainitud laserite tüüpi kasutab ka Maa-amet. Maapinna kõrguspunktid salvestatakse suuremahulistesse failideks (Abdullah, 2012).

Üleujutusmodelite aluseks on digitaalsed kõrgusmodelid, mille täpsus mängib väga olulist rolli täpse üleujutuse modelleerimisel. Seega on oluline, et digitaalne kõrgusmodel on suhteliselt täpne, kuid peab arvestama ka kõrgusmodeli loomisel uuritava ala suurust ja sellest tulenevat arvutuskiirust. Mida suurem on ala, seda rohkem läheb aega digitaalse kõrgusmodeli loomiseks (arvuti arvutusaeg suureneb) (Haile ja Rientjes, 2005).

1.5 Digitaalne kõrgusmodel

Digitaalne kõrgusmodel (ingl k *digital terrain model* (DTM) või *digital elevation model* (DEM)) on maapinna topograafia kujutamine digitaalselt, enamasti rasterkaardina. Kõrgusmudeleid kasutatakse väga tihti GIS rakendustes. Digitaalse kõrgusmodeli koostamiseks vajalikud andmeid võib saada mitmeti, kuid levinuim viis on kaugseire, kus viimastel aastatel kasutatakse üha täpsemat LIDAR tehnoloogiat (Meriste, 2005; Abdullah, 2012).

Digitaalse kõrgusmodeli kvaliteeti mõõdetakse kõrguspunktide kõrguse täpsusega (absoluutne täpsus) ja kõrguspunktide tihedusega ühes pikslis (suhteline täpsus). Digitaalse kõrgusmodeli kvaliteedis mängivad olulist rolli paljud näitajad (Abdullah, 2012):

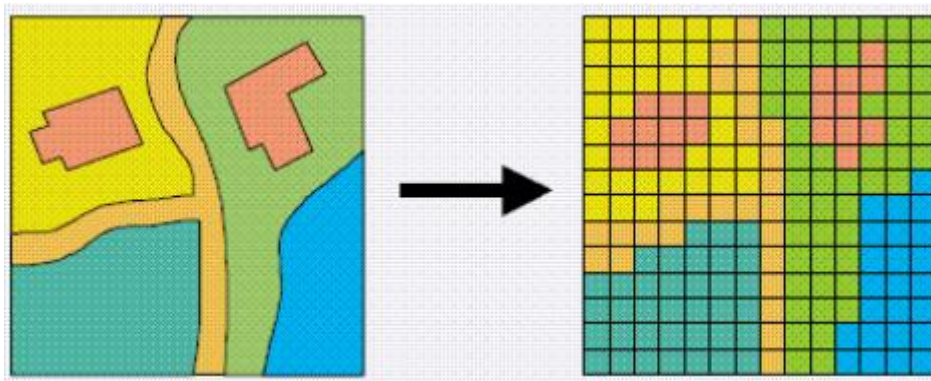
- maapinna karedus;
- kõrguspunktide tihedus;
- interpoleerimise meetod;
- vertikaalne täpsus;
- maapinna analüüsi algoritm.

Digitaalse kõrgusmodeli kaks vormi (DTM ja DEM) on väga sarnased. DTM on maapinna topograafiat esitav mudel, mis harilikult esitab Maa pinda, jättes välja taimestiku, hooned, sillad, maanteetammid jne. DEM on samuti maapinna topograafiat esitav mudel, kuid DTM-ist erineb see selle poolest, et jätab Maa pinna esitamisel välja taimestiku, kuid mitte inimese

loodud pinnavorme (maantee- ja raudteetammid jms) (Abdullah, 2012). Käesoleva töö puhul mõeldakse edaspidi digitaalse kõrgusmodeli terminit kasutades DEM kõrgusmodelit.

Digitaalse kõrgusmodeli kujutamiseks on levinud kaks erinevat kõrgusandmete interpoleerimise meetodit – võrdsete ruutude võrgustik ja TIN-kõrgusmodel (TIN ehk ebavõrdsete kolmnurkade võrgustik, ingl k *Triangulated Irregular Network*) (Abdullah, 2012). Praktikas sõltub interpoleerimise meetodi valimine kõrgusandmete paiknemisest, pinnamoest ja interpoleerimismeetodi kasutamisest tingitud vigadest.

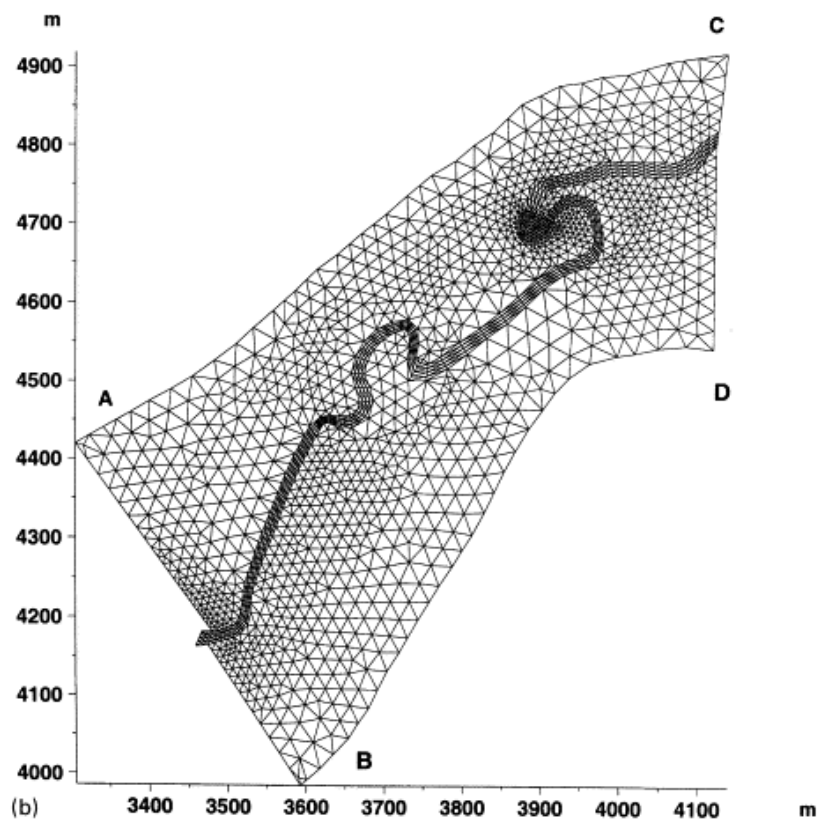
Võrdsete ruutude võrgustik koosneb ruutude maatriksist, kus igas ruudus on antud ruudu keskmine kõrgus (Joonis 2). Võrdsete ruutude võrgustikku kasutatakse palju, sest seda on lihtne kasutada ja selle arvutuskiirus on kõrge. Nii meetodi heaks omaduseks, kui ka puuduseks on ruudustiku ühetaolisus, kuna interpoleerides moodustatakse võrdse suurusega ruudud igas kohas interpoleeritaval pinnal. Ruudustikku ei saa lokaalselt tihendada, et saada arvutusaja kokkuhoidmise nimel täpsemat kõrgusmodelit mingis kindlas kohas ning mujal leppida ebatäpsema kõrgusmodeliga, sest siis pole enam tegemist võrdsete ruutude võrgustikuga. Mida tihedam on ruudustik, seda täpsem tuleb kõrgusmodel, kuid ruudustiku tihenedes arvutuskiirus väheneb. Optimaalse arvutuskiiruse saavutamiseks peab olema nõus vähendama kõrgusmodeli täpsust (Abdullah, 2012).



Joonis 2. Korrapärase ruutude võrgustik (Abdullah, 2012)

TIN-kõrgusmodel (TIN) on andmestruktuur, mida kasutatakse geoinfosüsteemides maapinna esitamiseks. TIN on vektoripõhine maapinna või merepõhja esitusmeetod. TIN-võrgustik koosneb punktidest, mis on ühendatud sirgetega kolmnurkadeks, mille küljed võivad olla erineva pikkusega ja tipud (kõrguspunktid) asuda erineval kõrgusel. Kolmnurkade moodustamiseks kasutatakse kolmemõõtmelisi koordinaate (x , y ja z). Kolmnurkadest, mille tipud on määratletud kolmemõõtmeliselt, moodustub mosaiikpind (Joonis 3). Kui maapind on tasane, siis piisab selle kujutamiseks vähematest kõrguspunktidest, kui aga maapind on

mägine või konarlik, siis peab usaldusväärse TIN-i koostamiseks olema kõrguspunktide tihedus suur. TIN kolmnurkade võrgustik koostatakse kõrguspunkte sirgjoontega ühendades nii, et ühegi kolmnurga sees ei oleks teiste kõrguspunktidega ühendamata kõrguspunkti (Abdullah, 2012).



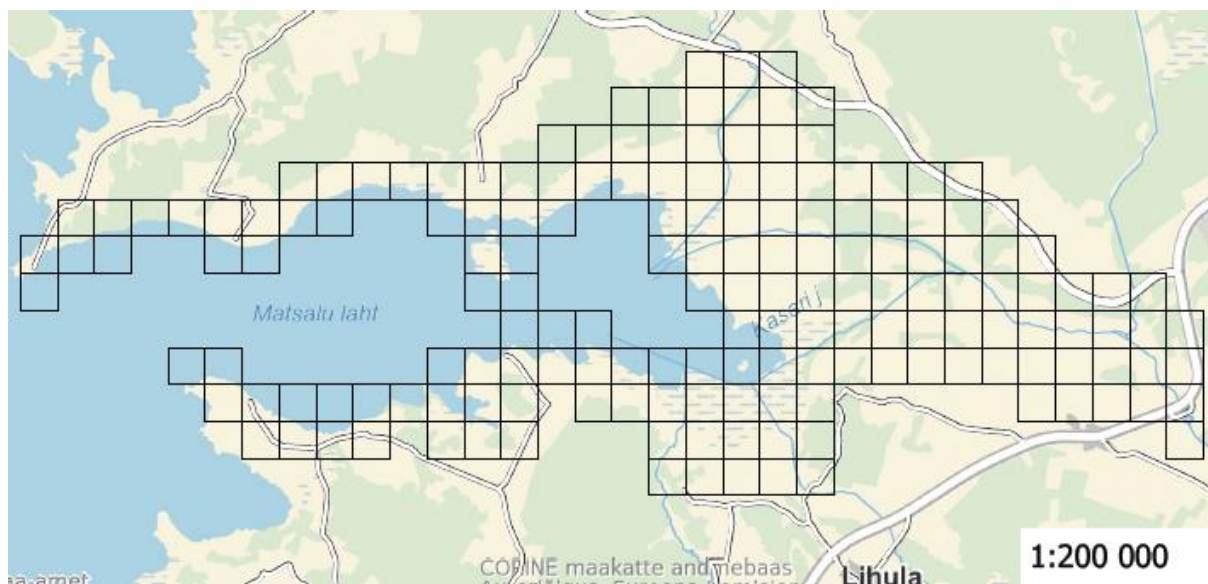
Joonis 3. TIN-kõrgusmudel (Hardy et al., 2000)

2 Materjal ja meetodika

2.1 Materjal

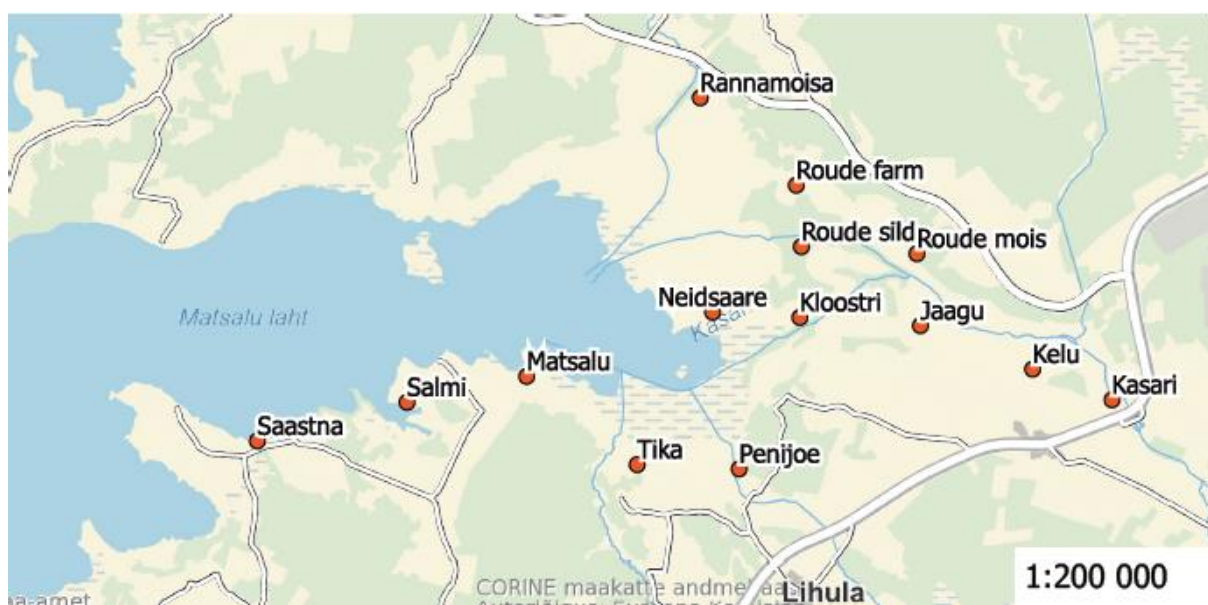
Käesolevas töö läbiviimiseks kasutatakse (1) LIDAR kõrgusandmeid Matsalu märgalade kohta, (2) üleujutuse sügavust, vee temperatuuri ja elektrijuhtivust mõõtvatelt mõõteseadetelt saadud andmeid ning (3) GPS seadmega mõõdetud eelmiste mõõteseadmete koordinaate.

Maa-ameti 2012. aasta LIDAR kõrgusandmete mõõtmisel on kasutatud kahte süsteemi – laserpunktide asukoha määramiseks koordinaatsüsteemi L-EST97 ja laserpunktide kõrguse määramiseks süsteemi BK77, kasutades mudelit EST-GEOID2003. LIDAR kõrguspunktide koordinaadid on avaldatud UTM (ingl k *Universal Transverse Mercator*) standardi kujul x-koordinaat, y-koordinaat ja z-koordinaat (näiteks 485000.16, 6508997.48 ja 1.84) (Maa-amet, 2015a). Käesolevas töös kasutatakse sada seitsekümmend (170) üleujutusala katvat ühe ruutkilomeetri suurust kõrgusandme faili ehk kaardilehte (Joonis 4). Uuritava ala kaardilehtede andmed on laseraltimeetriliselt mõõdistatud 25. aprillil 2012. Uuritaval alal on 51 664 248 maapinna kõrguspunkti, mis teeb keskmiseks maapinna kõrguspunktide tiheduseks 0,30 punkti/m². Maapinna kõrguspunktide mõõtmise arvutuslik x- ja y-koordinaatide täpsus on 0,32 meetrit ning kõrgusandmete täpsus on 0,12 (\pm 0,34) meetrit (Maa-amet, 2015a).



Joonis 4. Uuritav ala Matsalu lahe ümber ja Kasari jõe luhal Maa-Ameti kaardilehtede kaupa

Matsalu Rahvuspargi ranna- ja luhaniitudel määrati ETF Grandiprojekt 9145 (2012-2015) „Mullaelustiku ruumiline jaotus ja koosluste üleujutusejärgne taastumine Matsalu Rahvuspargi lammi- ja rannaniitudel“ proovialade ja mõõtesensorite asukohad geoloog Mats Meriste poolt läbiviidud kõrgusandmete analüüsi tulemuste alusel. Erinevatesse asukohtadesse (Joonis 5) paigaldati 14 automaatsensoriga mõõteseadet Solnist Levellogger Junior 3001 (tootja Solnist Canada Ltd.). Need on roostevabast terasest traadi abil paigaldatud maapinnast ühe meetri sügavusele kaanega kaetud PVC-torusse (välisläbimõõt 50mm, seinapaksus 2mm, sisläbimõõt 46mm) nii, et mõõtesensor on maapinnast 95 cm sügavusel, välja arvatud Saastna mõõteseadet, mille sensor asub geoloogiliste tingimuste tõttu (maapinna lähedal asuv Siluri lubjakivilasund) 45 cm sügavusel. Puuraugud mõõteseadmete paigaldamiseks puuriti bensiinimootoriga 1500-millimeetrit pika 80 mm läbimõõduga pinnasepuuriga, mille pikkus on 1500 mm. Mõõteseadmed mõõdavad veetaset, veetemperatuuri ja vee elektrijuhtivust, intervalliga 1 tund, välja arvatud Jaagu ja Penijoe mõõteseadet, mis mõõtsid nimetatud näitajaid 5-tunnise intervalliga ajavahemikus 24.11.2012 kuni 17.07.2013. Andmeid koguti kahes ajavahemikus – 24.11.2012 kuni 17.07.2013 ja 19.09.2013 kuni 20.08.2014. Ajavahemikus 24.11.2012 kuni 17.07.2013 koguti 69 975 rida andmeid ja ajavahemikus 19.09.2013 kuni 20.08.2014 koguti 112 728 rida andmeid. Üks andmerida koosneb viiest parameetrist – kuupäev, kellaaeg, veetase (meetrites), temperatuur (°C), elektrijuhtivus ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Mõõteseadmete täpsus on $\pm 0,1\%$ mõõtetulemusest (Solnist, 2012). Käesoleva töö käigus kasutati esimese mõõteperioodi andmeid.



Joonis 5. Mõõteseadmete asukohad (Maa-amet, 2015c)

Vee elektrijuhtivust on vaja seepärast, et märgala on üleujutatud ühelt poolt jõeveega ja teiselt poolt mereveega. Elektrijuhtivus, mida põhjustab soolsus, näitab, missuguse päritoluga vesi on konkreetses piirkonnas konkreetsel ajal. Elektrijuhtivuse täpseks hindamiseks kalibreeriti mõõteseadmed 07.12.2012 kolmes erinevas naatriumkloriidilahuses (elektrijuhtivusega 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja 12 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Destilleeritud vee puudumisel loputamiseks, kalibreeriti pärast esimest mõõteperioodi mõõteseadmed 18.09.2013 ainult lahuses, mille elektrijuhtivus oli 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Teise mõõteperioodi lõpus 20.08.2014 puhastati mõõteseadmed destilleeritud vees ja kalibreeriti kahes lahuses – esiteks lahusega, mille elektrijuhtivus oli 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ja teiseks lahusega, mille elektrijuhtivus oli 12 880 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Enne kalibreerimist laeti mõõteseadmete kogutud andmed arvutisse ja sünkroniseeriti mõõteseadmete kellaaeg arvuti kellaaajaga. Uue mõõteperioodi algusaeg määrati kõigil mõõteseadmetel ühesugune (sama kellaaeg ja kuupäev). Mõõteperioodi algusaeg määrati mõõteseadmete maha panemise päevale järgneval päeval, et mõõteseadmete sensorid ühtlustuksid keskkonnatingimustega.

Fileccia (2011) andmetel on õhurõhu muutumisel mõju õhukese veest küllastumata pinnakihi korral põhjavee tasemele ja põhjavee taseme mõõtekaevude veetasemele võrdne, mistõttu õhurõhu muutus ei muuda põhjavee taseme mõõteseadmete tulemust erinevaks reaalsest põhjavee tasemest. Seetõttu võib õhurõhu mõju antud uurimuse käigus mõõdetud põhja- ja pinnavee taseme kõrguse mõõtmisel määramata jätta, erinevalt paksu, veest küllastumata või veekindla pinnakihi korral.

Üleujutuse sügavuse mõõtmisel kasutatud mõõteseadmete koordinaadid on mõõdetud globaalse asukohamääramissüsteemi (GPS – ingl k *Global Positioning System*) kasutava seadmega GARMIN GPSmap 62s ning saadud koordinaadid on WGS84 standardi kujul pikkus- ja laiuskraad (näiteks 23.792567 ja 58.80778587). GPS-i toimimise analüüsi raporti (WAAS T&E Team, 2015) järgi on GPS-i globaalne horisontaalne täpsus kuni 3,247 m (95%).

2.2 Üleujutuse mõõteseadmete kõrguse määramine

Üleujutuse sügavuse mõõteseadmete WGS84 standardi kujul olevad koordinaadid teisendati Maa-ameti Geoportaali X-GIS kaardirakenduse (Maa-amet, 2015d) abil UTM standardi kujule, et määrata üleujutuse mõõteseadmete kõrgus merepinnast. Selleks sisestati koordinaadid WGS84 standardi kujul koordinaatide paneeli, mis andis sama koordinaadi vaste UTM standardi kujul. Kirjeldatud koordinaatide teisendamine viidi läbi selleks, et leida

asukohakoordinaatide võrdlemise teel mõõteseadmete kõrgusandmed LIDAR kõrgusandmestikust, mis on UTM standardi kujul.

Üleujutuse mõõteseadmete koordinaatide kõrguse määramiseks loodi programmeerimiskeeles Python programm (Lisa 1), millega skanniti iga mõõteseadme kohta kogu kasutatav LIDAR andmestik. Mõõteseadmete koordinaadid ja LIDAR kõrguspunktide koordinaadid (mõlemad WGS84 koordinaatsüsteemis UTM kujul) ümardati tuhandeni, mis tähendas, et võrreldi koordinaatide seda osa, mis määras koordinaadi 1000-meetrise täpsuse. Seejärel ümardatud koordinaate võrreldi ning võrdsuse korral leiti koordinaatpunktide vaheline kaugus täpsete koordinaatide alusel. Koordinaatide ümardamine oli vajalik eraldamaks lähemaid punkte kaugematest, vältimaks kõikide kõrguspunktide ja uuritava mõõteseadme koordinaatide vahelise kauguse arvutamist. Ümardamine vähendas märkimisväärselt programmi arvutusaega. Mõõteseadmete ja nende lähimate leitud maapinnapunktide vaheline kaugus oli keskmiselt 2,24 (\pm 2,45) meetrit. Mõõteseadmete ja nende lähimate leitud maapinnapunktide asukohti võrreldi visuaalselt digitaalse kõrgusmudeli abil ning veenduti, et iga mõõteseadme ja tema lähim punkt asuvad samal kõrgusel.

2.3 Kõrgusmudeli algandmete töötlemine

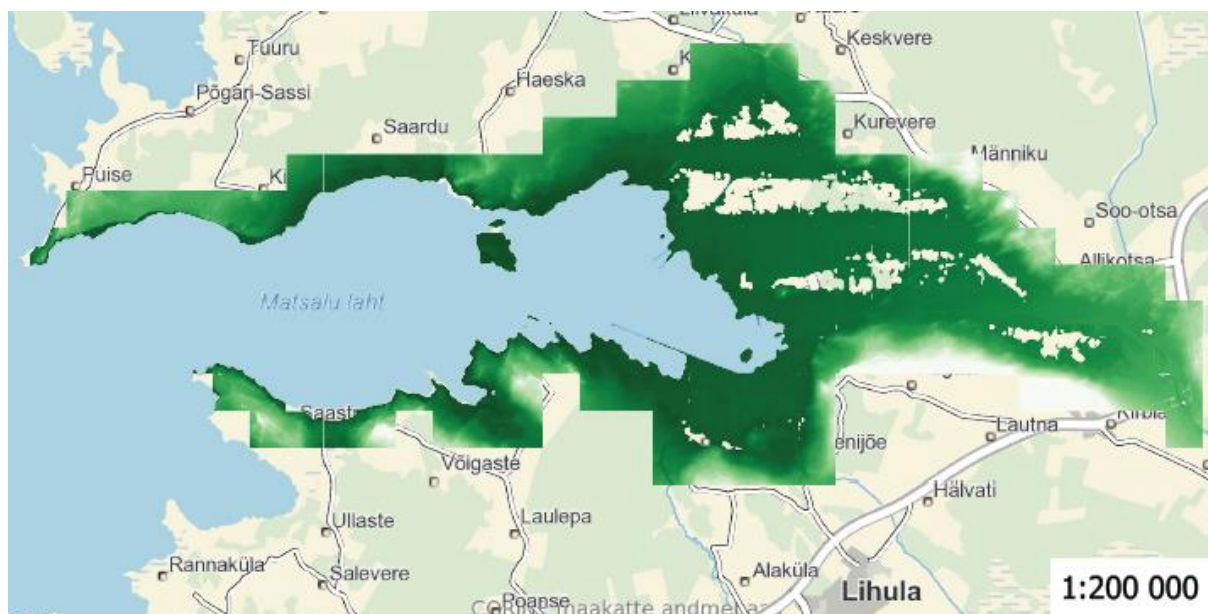
LIDAR kõrgusandmete filtreerimiseks on välja töötatud palju erinevaid meetodeid (Abdullah, 2012), kuid võrd Maa-amet on Eesti kõrgusandmed eelfiltreerinud ja jaganud klassidesse, siis käesoleva töö käigus sorteeritakse kõrgusandmeid klassi järgi.

Maa-ameti LIDAR kõrgusandmete sorteerimiseks loodi programmeerimiskeeles Python programm (Lisa 2), millega loodi uus kaust „sorteeritud“. Loodud kausta salvestati sorteeritud andmefailid, millesse trükiti ainult need kõrgusandmeid sisaldavad read, mida programmi kasutaja soovis. Käesoleva töö käigus trükiti sinna need read, mille klassiks oli määratud 2 või 8 ehk maapind või maapinna hõrendatud punktid (Maa-amet, 2015a).

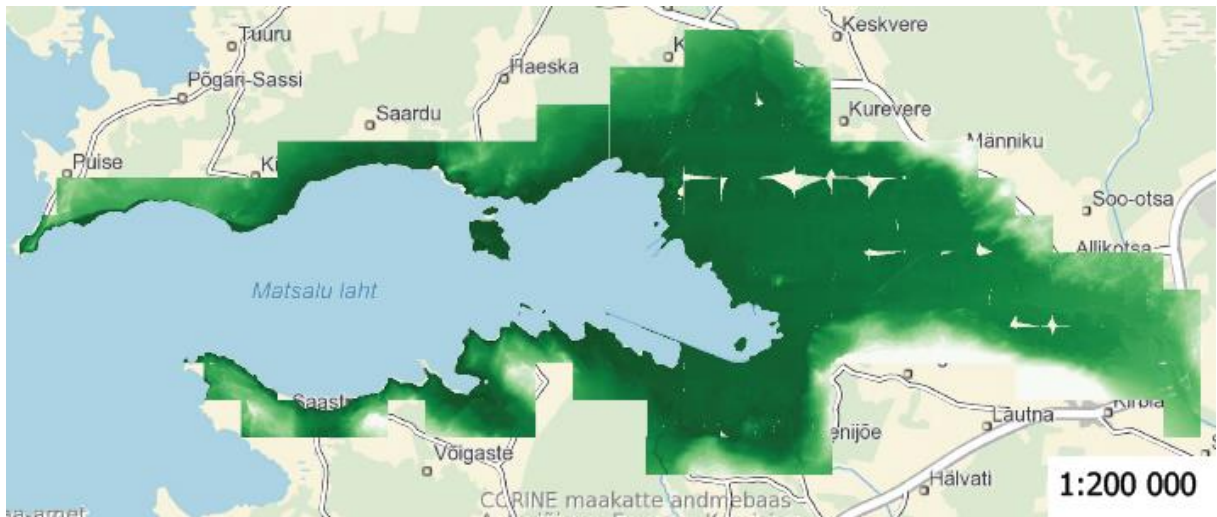
2.4 Digitaalse kõrgusmudeli loomine

Digitaalse kõrgusmudeli loomiseks QGIS tarkvaraga kasutati LAStools tööriistapaketti (Rapidlasso, 2015). Eelpool kirjeldatud töödeldud LIDAR kõrgusandmed konverteeriti esmalt txt2las tööriista kasutades *.txt failivormist *.las failivormiks. Seejärel loodi las2dem tööriista kasutades *.las failivormis olevatest kõrgusandmetest digitaalne kõrgusmodell. Nii toimiti iga failiga saja seitsmekümnest kõrgusandmetega failist.

Esialgse digitaalse kõrgusmudeli valmimisel selgus, et osa maismaast katavad määramata kohad, kus puuduvad kõrgusandmed. Need kohad on Joonis 6 rohelise ala sees olevad alad, kust paistab aluskaart läbi. Kõrgusandmete puudumist saab seletada sellega, et uuritava ala kõrgusandmed on mõõdetud 25. aprillil 2015. aastal, mil suure tõenäosusega võis kõrgusandmeteta alasid katta kevadise üleujutuse vesi, kuid laseraltimeetrilise mõõdistamise seadmetes kasutatavad raadiolained ei tungi vette (Krusberg, 2003), mistõttu jäid antud alad ilma kõrgusparameetrist. Selliseid määramata aladega kaardilehti oli kokku 48, millest igauhega tehti läbi järgnev protseduur. Nende kaardilehtede töödeldud LIDAR kõrgusandmefailid (*.xyz) lisati QGIS tarkvarasse kasutades käsku „Add Delimited Text Layer“, mis lisas need failid punktipilvedena QGIS tarkvarasse. Punktipilved interpoleeriti TIN-kõrgusmudeli meetodit kasutades rasterkihtideks. TIN meetod tasandas enamuse määramata kõrguskoordinaatidega alast, kuid antud juhul on tegu matemaatilise lahendusega, mis on hinnang reaalsele kõrgusmodelile. Saadud 48 rasterkihti ja eelnevalt saadud 122 lisatöötlust mittevajavat kaardilehte ühendati ühtseks digitaalseks kõrgusmodeliks (Joonis 7).



Joonis 6. Esialgne Matsalu märgala kõrgusmodel



Joonis 7. Korrigeeritud Matsalu märgala kõrgusmudel

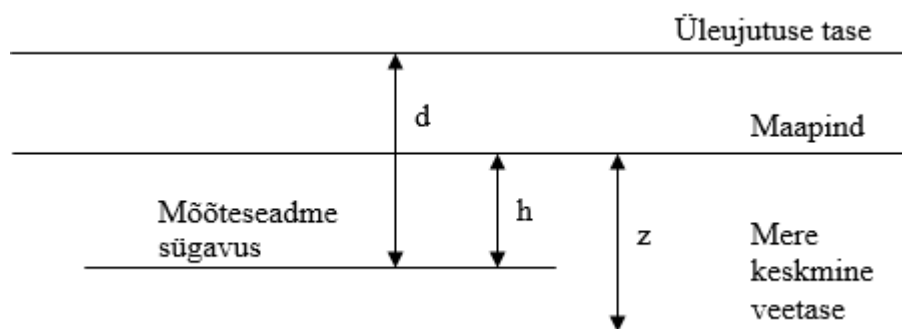
Digitaalse kõrgusmudeli kõrguste erinevuse visualiseerimiseks kasutati roheliste toonide gammat, kus kõige tumerohelisem toon märgib madalaimat kõrgust merepinnast ja valge toon märgib kõrgust üle 10 meetri merepinnast. Kaardil kujutatavate kõrguste vahemikuks võeti -0,08984 meetrit kuni 10 meetrit, sest vähim mõõdetud kõrguspunkti kõrgus merepinnast oli LIDAR kõrgusandmefailides 0,08984 meetrit alla mere keskmist veetaset. Toonigamma ülemiseks piiriks võeti 10 meetrit üle mere keskmise veetaseme (kuigi kõrgusandmete maksimum on üle 30 meetri), sest kogu üleujutusala jääb sellest kõrgusest madalamale ja antud juhul tekib kaardile ka üleujutusosalal erineva tooniga alasid ehk kõrgused tulevad visuaalselt esile. Negatiivne madalaim kõrgus on seletatav keskmisest madalama merevee tasemega piirkonna laseraltimeetriliste mõõtmiste ajal.

2.5 Üleujutuse modelleerimine

Üleujutuse modelleerimiseks kasutati üleujutuse sügavuse mõõteandmeid 14 mõõtepunkti üle Matsalu märgala, üleujutuse sügavuse mõõteseadmete asukoha kõrgust merepinnast ja mõõteseadme sügavust maapinnast. Iga mõõtepunkti veetaseme arvutamiseks kasutati valemit:

$$x = z + d + h, \quad (1)$$

kus z on mõõteseadme asukoha maapinnapunkti kõrgus merepinnast, d on üleujutatava vee kõrgus mõõteseadme sensorist ja h on mõõteseadme sensori sügavus maapinnast (Joonis 8). Mõõteseadme asukoha maapinnapunkti kõrguse leidmist merepinnast on kirjeldatud peatükis 2.2. Mõõteseadme sensori sügavus maapinnast (h) on kõigis punktides -0,95 meetrit, välja arvatud Saastna mõõtepunkt, kus mõõteseadme sensori sügavus maapinnast on -0,45 meetrit.



Joonis 8. Üleujutuse veetaseme arutamise põhimõtteskeem

Üleujutuse tase üle merepinna andmete arutamiseks jaoks loodi programm programmeerimiskeeles Python (Lisa 3). Programmiga filtreeriti kõigist sügavusandmetest välja need andmed, mille kuupäev ja kellaeg olid võrdsed kasutaja sisestatud kuupäevade ja kellaajaga. Filtreerimiseks vaatas programm läbi kõigi mõõteseadmete üleujutuse taseme andmete failid ja mõõteseadmete asukoha maapinnapunkti kõrgusandmefaili ning iga mõõteseadme kohta viis läbi arvutuse ülal toodud valemi (1) põhjal. Mõõteseadme sügavus oli programmile antud konstandina (-0,95 kõigi mõõteseadmete kohta, va Saastna, mille korral oli konstandiks määratud -0,45). Filtreerimise tulemusel koostas programm iga kasutaja sisestatud kuupäeva ja kellaaja kohta faili, mis sisaldas iga mõõteseadme nime, x-koordinaati, y-koordinaati ja üleujutuse taset merepinnast.

Järgnevalt sisestati loodud failid QGIS tarkvarasse kasutades käsku „Add Delimited Text Layer“, mis lisas need failid punktipilvedena QGIS tarkvarasse. Punktipilved interpoleeriti IDW (ingl k *Inverse Distance Weighting*) meetodit kasutades rasterkihtideks. IDW meetodi põhimõte on see, et punktide kaugenedes üksteisest nende mõju teineteisele väheneb. Konkreetse punkti mõju ulatus määratakse kauguskoeffitsiendiga P (kirjanduses ka α). Koeffitsiendi määramine oleneb uuritavast nähtusest (de Mesnard, 2013). Käesoleva töö üleujutuse puhul valiti kauguskoeffitsiendiks $P = 3$, mis andis üleujutusest kõige ühtlasema tulemusega rasterkihi (Joonis 9). Rasterkihtide äärmisteks koordinaatideks määrati uuritava ala äärmised koordinaadid, mistõttu loodud rasterkihid on ristkülikukujulised, erinevalt uuritavat ala katvast digitaalsest kõrgusmudelilt.



Joonis 9. Üleujutuse veetaseme interpoleeritud rasterkaardikiht 22.03.2013

Üleujutuse visualiseerimiseks kasutati QGIS tarkvara pistikprogrammi QGIS2Threejs, mis on pistikprogramm kolmemõõtmeliste andmete visualiseerimiseks. Üleujutuse visualiseerimise aluseks võeti Matsalu märgala digitaalne kõrgusmudel, millele kanti Maa-ameti WMS teenuse kaudu saadud Corine maakatte kaardikiht, et üleujutuse projitseerimisel oleks üleujutatud alade asukohad identifitseeritavad. Täiendava kihina lisati üleujutuse veetaseme rasterkiht, millele määrati ühtlane sinine värvitoon ja rasterkiht muudeti läbipaistvaks (läbipaistvus 50%), et näha ka üleujutuse alla jäävat ala. QGIS kuvab QGIS2Treejs pistikprogrammiga loodud visualiseeringu veebilehitsejas (Joonis 10). Salvestatuna andmekandjale saab visualiseeringut vaadata korduvalt. Visualiseeringut on võimalik vaadata erinevate nurkade alt ning kuvatavat ala saab suurendada ja vähendada, et saada kas ülevaatlilik pilt üleujutusosalast või vaadata üleujutuse levikut ja piire lähemalt.



Joonis 10. Ekraanitõmmis veebilehitsejas kuvatud üleujutusmudeli visualiseeringust Kasari jõe Rõude ja Kloostri haru vahel 22.03.2013

2.6 Üleujutusmudeli võimalike rakenduste analüüsi meetoodika

Üleujutusmudeli võimalike rakenduste analüüsimiseks vastati püstitatud küsimustele, mis hindavad üleujutusmudeli sobivust erinevate potentsiaalsete tegevuste planeerimiseks ja täideviimiseks. Püstitatud küsimused on järgmised:

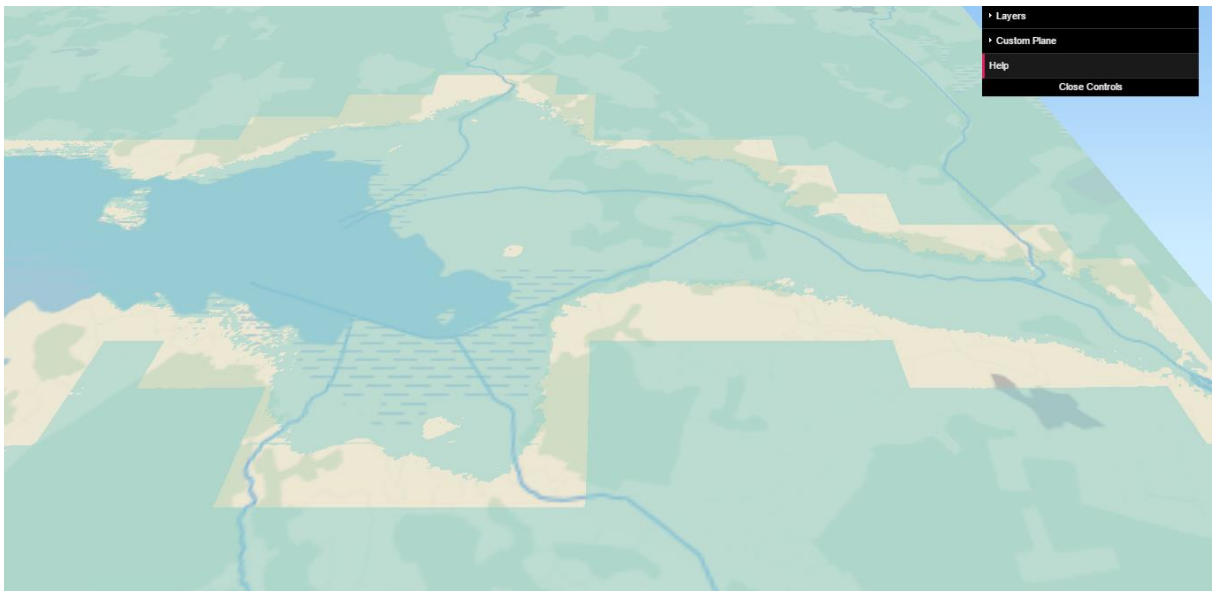
1. Milliseid tegevusi saab Matsalu märgalaga seoses teha? Iga tegevuse kohta peab leidma:
 - a. Milline on vastava tegevuse sihtgrupp?
 - b. Kuivõrd mõjutab üleujutus vastavat tegevust?
 - c. Milliseid tegevuse aspekte üleujutusmudel arvestab?
 - d. Kas üleujutusmudel rahuldab sihtgrupi vajadusi? Kui ei, siis milliseid sihtgrupi vajadusi/tegevuse aspekte peaks veel üleujutusmudel arvestama?

3 Tulemused

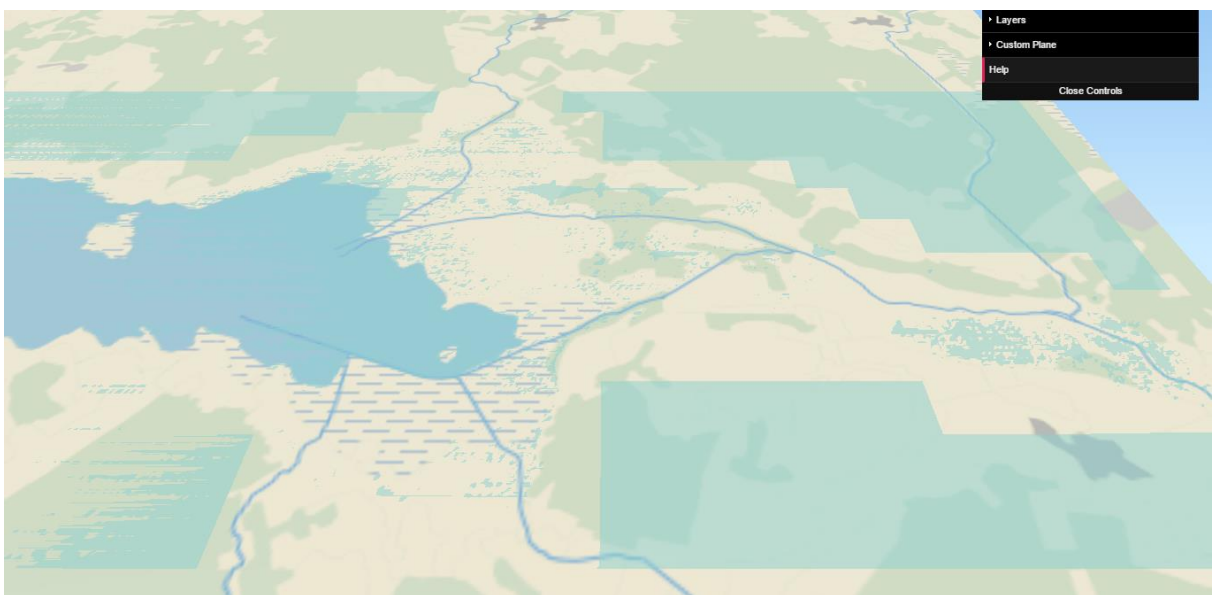
Üleujutusmudeli abil loodi kolm kolmemõõtmelist visualiseeringut Matsalu üleujutusala. Esimene neist paigutub ajaliselt kuu aega enne 2013. aasta kevadise üleujutuse kõrghetke (22.03.2013) (Joonis 11), teine on üleujutuse kõrghetk (21.04.2013) (Joonis 12) ja kolmas on kuu aega pärast üleujutuse kõrghetke (21.05.2013) (Joonis 13). Kogutud andmete suurim veetaseme kaugus mõõteseadmete sensorist oli -4,324 meetrit Saastna mõõtepunktis, kuid tegelikult polnud veetaseme nii kaugel, sest kasutatud mõõtesensorid ei saa mõõta veepinna kaugust läbi õhu ja nimetatud suurim kaugus oli nii suur õhurõhust tingitud. Suurim kaugus mõõtesensorist ülespoole (ehk vee kõrgus sensorist üleujutuse maksimumi ajal) oli 1,958 meetrit Kelu mõõtepunktis, mis teeb mõõteseadmete täpsuseks kuni 0,002 meetrit ($\pm 0,1\%$). Kuna LIDAR kõrgusandmete vertikaalne täpsus on 0,07 kuni 0,12 meetrit ja mõõteseadmete täpsus on kuni 0,039, siis üleujutusmudeli vertikaalne täpsus on kuni 0,122 meetrit kõige sügavamate üleujutuste puhul.



Joonis 11. Ekraanitõmmis veebilehitsejas kuvatud üleujutusmudeli visualiseeringust Kasari ja Rannamõisa jõgede luhtadell 22.03.2013



Joonis 12. Ekraanitõmmis veebilehitsejas kuvatud üleujutusmudeli visualiseeringust Kasari ja Rannamõisa jõgede luhtadell 21.04.2013



Joonis 13. Ekraanitõmmis veebilehitsejas kuvatud üleujutusmudeli visualiseeringust Kasari ja Rannamõisa jõgede luhtadell 21.05.2013

4 Arutelu

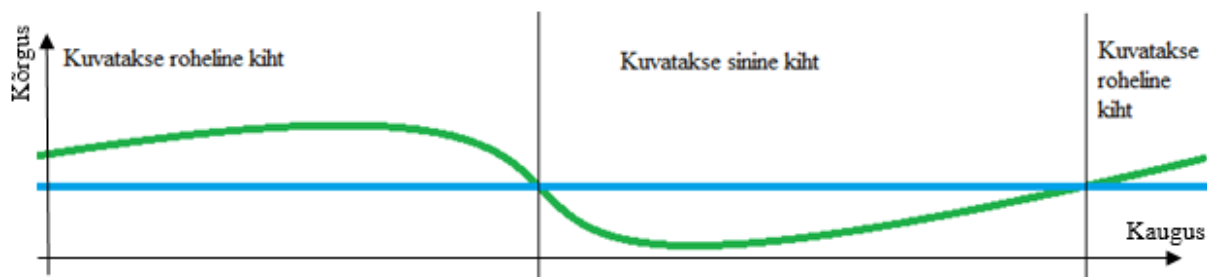
Kui valdavalt levib kirjanduses üleujutuse prognoosimise ja riski ennetamise mudeleid (Neussner *et al.*, 2012; Ghimire, 2013; Merkurjeva *et al.*, 2014), siis käesoleva töö käigus loodud üleujutusmudel on loodud kogutud andmete visualiseerimiseks. Olemasolevat üleujutusmudelit saab edasi arendada ka prognoosmudeliks, kui veetaseme mõõteseadmed oleksid kaugloetavad ja andmed seetõttu reaajas kättesaadavad ning kui kaasata üleujutusmudeli arvutusprotsessi reaajalised sademete andmed üleujutatava ala valgalalt. Tasulisi üleujutuste modelleerimise tarkvarasid kasutades on Wen *et al.* (2013) koostanud kogutud andmete põhise üleujutusmudeli, mis on käesoleva töö käigus valminud üleujutusmudelist detailsem, sest selles võetakse sisendandmeteks lisaks LIDAR kõrgusandmetele ja veetaseme mõõteandmetele ka mullakaart, satelliitkaardid üleujutusala, taimestikukaart, sademete ja aurustumise andmed ning andmed inimtekkeliste üleujutust mõjutavate rajatiste kohta.

Käesoleva töö käigus kasutati QGIS tarkvara, kuna see on väga multifunktsionaalne ja vabavaraline tarkvara, ja QGIS2Threejs pistikprogrammi, kuna see kuvab visualiseeringu väga kiiresti (visualiseeringu kuvamiseks kulub kuni üks minut) ja visualiseeringut on lihtne jagada. Kasutatud pistikprogrammi halvaks omaduseks on see, et seda ei saa kaardina salvestada, kuid selle kompenseerib võimalus visualiseeringut valitud kohas suurendada/vähendada, et kuvatut täpsemaks/üldisemaks muuta ja lähemalt või kaugemalt vaadata. QGIS tarkvara eelistati üleujutuste modelleerimistarkvaradele, sest see on modelleerimistarkvaradest lihtsamini kättesaadav ning sellega saab teha kõik toimingud ühes programmis (ei vaja algandmete sisestamiseks ja lõpptulemuse vaatamiseks eel- ega järeltöötlemise tarkvarasid).

QGIS tarkvara vaikumisi olevad tööriistad sobivad käesoleva töö käigus loodud üleujutusmudeli algandmete töötlemiseks ja kõrgusmudeli loomiseks osaliselt. Kui digitaalse kõrgusmudeli loomiseks vajaminevad LIDAR kõrgusandmed oleksid tihedad ja täidaksid ühtlaselt kogu maismaa, siis sobib QGIS detailse digitaalse kõrgusmudeli loomiseks väga hästi, kuid töös kasutatud LIDAR kõrgusandmetes olid ilmselt üleujutusest tingitud määramata alad, mida küll prooviti interpoleerides kaotada, kuid täielikult see ei õnnestunud. Kui õnnestuks ka kogu määramata ala interpoleerida määramata ala piirnevate kõrguspunktide abil, siis kõrgusmudelisse tekib küllaltki ühtlane ala määramata ala asemele, mis reaalselt olukorda ei peegelda, kuna kõnealusel alal võib olla ka ümbritsevast madalamaid või kõrgemaid punkte. Kõrgusmudelisse jäänud määramata alad interpoleerida ei

õnnestunud, kuna interpoleerimiseks kasutatavate vektorkihtide kõrguspunktid ei võimaldanud rohkem omavahelisi ühendusi luua ning vektorkihte ühendada ei olnud võimalik, misjärel oleks olnud võimalik määramata alad täielikult interpoleerida. Peale interpoleerimist moodustas QGIS tarkvara interpoleeritud vektorkihist rasterkihi (põhimõtteliselt kolmemõõtmeline pilt), mis ei kasuta nii palju mälu, kui vektorkihid. Rasterkihid ühendati, kuid neid enam interpoleerida ei saa, kuna need ei koosne kõrguspunktidest, mida saaks omavahel ühendada. Kuna Maa-amet uuendab LIDAR andmeid regulaarselt, siis võib loota, et järgmiste versioonide kõrgusandmete mõõtmisel ei ole Kasari luhtadel üleujutust.

Loodud üleujutusmudeli üleujutuse kuvamise põhimõte on see, et ühendatakse kaks kolmemõõtmelist pinda, mis omavahel lõikuvad (Joonis 14). Visuaalselt kuvatakse see pind, mis jääb pealepoole. Joonistelt 11-13 on näha, et alad, mille kohta LIDAR kõrgusandmed puuduvad (alad väljaspool Joonis 4 toodud uuritavat ala ja määramata alad Kasari luhtadel Rõude jõe ja Raana oja vahel ning Kasari jõe ümbruses, mis on valged alad rohelises massiivis Joonis 7), on kuvatud helesinisena, justkui oleks seal üleujutus, kuid tegelikul pole. Määramata alad kuvatakse alati üleujutatuna, sest määramata alade kõrgusparameetri äärtuseks määrab QGIS vaikimisi -9999, mis jääb igasuguse veetaseme korral veetasemest väiksemaks. Kui määramata kõrgusandmete väärtuseks panna aga 1000, siis jääb see alati veetasemest kõrgemaks ja nendes kohtades üleujutust ei kuvata. Määramata kõrguspunktide asendamiseks määratud kõrguspunktidega ja neotektoonilisest maakerkest (Kasari orundis keskmiselt 2,3 mm/a (Meriste, 2005)) põhjustatud kõrgusandmete muutusest tingitud ebatäpsuse vältimiseks peab läbi viima täiendavaid LIDAR mõõdistamisi. Veekõrguse algandmete kogumisel Jaagu ja Penijõe mõõtepunktides kasutatud 5-tunnine intervall on seadistusviga, mis sai peale esimest mõõteperioodi muudetud 1 tunni peale.



Joonis 14. Mitme kolmemõõtmelise kaardikihi lõikumisel tekkiva kuva põhimõte.

Loodud üleujutuskihid ei ole gravitatsioonijõu vektoriga risti, vaid ligikaudu paralleelselt maapinna kaldega, mis tähendab, et kui üleujutusmudelil tekib üleujutuse taandudes muust

üleujutusest eraldiasetsev lomp, siis selles lombis on üleujutusmodelis olev veepind kaldus, kuid reaalselt on veepind risti gravitatsioonijõu vektoriga. Kuna Kasari jõe lang on äärmiselt väike (0,15 m/km (Meriste, 2005)), siis ka tekkinud üleujutuse lang on äärmiselt väike, mistõttu üleujutusmodelis esitatavate lompide ulatuse ja reaalsete lompide ulatuse erinevus on minimaalne. Loodud üleujutusmodel ei sobi suure languga üleujutusaladele, kuna seal oleks tekkivate lompide veepind niivõrd kaldu, et reaalse veepinna ja üleujutusmodelis esitatava veepinna levik erineks märkimisväärselt.

Matsalu märgala suurust arvestades, võib üleujutusmodeli vertikaalset täpsust (kuni $\pm 0,122$ m) pidada rahuldavaks, kuid kui arvestada, et Kasari jõe luhtade langus mööda jõge on keskmiselt 0,15 m/km (Meriste, 2003), siis 0,122-meetrine eksimus mõõtetulemustes annab ligikaudu kaheksasajameetrise erinevuse üleujutuse ulatuses. Kuigi selline erinevuse esinemisvõimalus on minimaalne, muudab nii suur üleujutuse ulatuse varieeruvus Matsalu märgala tasasust arvestades üleujutusmodeli kohati ebatäpseks.

Kuigi QGIS2Threejs pistikprogrammiga loodud visualiseeringus on kõrgusmodeli kattekihiks Maa-ameti Corine maakatte kaardikiht, saab selle asendada üleujutusmodeli rakendusele sobivama kaardikihiga (näiteks ortofoto, hübriidkaart, mullakaart jne).

Käesoleva töö valmimise ajal avaldas Maa-amet (2015b) maakatte ja taimkatte kõrgusmodelid, mis sisaldavad lisaks maapinna kõrguspunktile ka erinevate maastikuobjektide (taimestik, hooned) kõrguspunkte, kusjuures alla 2 meetri kõrgused objektid kustutati. Käesolevas töös Maa-ameti maakatte ja taimkatte kõrgusmudeleid ajapuudusel ei käsitletud ning need jäävad tulevaste teadustööde uurida. Maa-ameti maakatte ja taimkatte kõrgusmodelite ning käesoleva töö digitaalse kõrgusmodeli lähteandmeteks on samad LIDAR kõrgusandmed.

Üleujutuse kaardikihtide loomiseks kasutatud IDW interpoleerimisel loodi kolmemõõtmelised üleujutuskihid, mis pandi lõikuma digitaalse kõrgusmodeliga ja saadi üleujutusmodel. Nimetatud üleujutuskihid ei sõltu seetõttu otseselt antud üleujutusmodeli puhul kõrgusmodelist, mistõttu käesoleva töö käigus loodud üleujutusmodelid on hinnangud üleujutuse levikule Matsalu märgalal, mitte täpsed hüdrodünaamikat jälgivad üleujutusmodelid. Täpse hüdrodünaamikat jälgiva Matsalu märgala üleujutusmodeli loomise meetoodika väljatöötamine jääb edasiste uurimustööde jaoks.

Loodud üleujutusmodeli meetoodika ei arvesta üleujutuse simuleerimisel tuule, sademete, aurustumise, õhurõhu (Wen *et al.*, 2013) ja taimkatte hõõrdeteguri otsesest mõju üleujutusele

(Néelz ja Pender, 2009), mis teeb loodud üleujutusmudelist lihtsustatud mudeli. Mudeli täpsustamine vajab edaspidiseid uuringuid ja täpseid andmeid Matsalu Rahvuspargi ilmastiku kohta. Riigi Ilmateenistuse lähimad mõõteseadmed on Virtsu rannikujaam ja Kasari hüdromeetriaajaam (Riigi Ilmateenistus, 2015c). Kuna Matsalu üleujutusala on väga suur, siis mängib tuule mõju suurt rolli üleujutuse sügavusele üleujutuse erinevais paigus. Väga täpsete veetaseme mõõteandmete saamiseks saab teha ka mõõteandmete kompensatsiooni õhurõhuga, kuid Matsalu märgala kontekstis jääb selle mõju minimaalseks (Fileccia, 2011). Loodud üleujutusmudel ei võta ka seda arvesse, et üleujutuse alanemisel voolavad jõgedega ühenduses olevad üleujutuse alad veest tühjaks ning alad, mis on suletud, jäävad üleujutatuks, mis tähendab, et üleujutus ei käitu nii, nagu käesoleva tööga loodud üleujutuskihis see käitub. Nimetatud asjaolu ei võetud arvesse, kuna see nõuab kasutatud meetodite puhul lisaprogrammeerimist. Nimetatud asjaolu saab arvesse võtta, kasutades topograafiat arvestava modelleerimise meetodeid.

Ka võimalike takistuste hõõrdetegur mängib olulist rolli Matsalu üleujutusala sügavuses, sest erineva hõõrdeteguriga pinnalaotused (roostik, luhaniit, võsa, puuderibad) mõjutavad vee liikumist erinevalt, seda eriti Matsalus, kus jõe lang on väike ja gravitatsiooni mõju seetõttu väiksem, kui suure languga jõgede puhul. Hõõrdeteguri väljaarvutamiseks üleujutusala erinevais paigus saab kasutada LIDAR mõõtmiste abil taimestiku määramise meetodiga (Lõhmus, 2013; Ward *et al.*, 2013), kuid taimestiku kõrgus muutub aasta jooksul niivõrd palju (taimkatteta maapind, kulustunud niidualad, erineva pikkusega kasvav rohttaimestik, niidetud niidualad), et LIDAR mõõtmiste abil hõõrdetegurit määrata läheb ebamõistlikult kulukaks, mistõttu peab selleks leidma mõne vähemkuluka meetodi, nagu näiteks taimestikukaardi kasutamine (Wen *et al.*, 2013).

4.1 Üleujutusmudeli võimalike rakenduste analüüs

Järgnevates alampeatükkides on analüüsitud Matsalu märgalaga seotud tegevusi ja käesoleva tööga loodud üleujutusmudeli rakendusvõimalusi nende tegevustega seoses.

4.1.1 Teadustöö

Matsalu märgalal saavad teadustööd teha eelkõige loodusteadlased, kes uurivad Matsalu märgala mullastikku, taimestikku, loomastikku (zooloogid, ihtüoloogid, ornitoloogid) ja seenestikku. Üleujutus mõjutab teadustööd läbi uuritavate objektide, mistõttu erinevatel erialadel on mõju erinev.

Mullastikku mõjutab üleujutus otseselt veetaseme kaudu. Veetaseme kõikumine mõjutab mullastiku struktuuri ja mullaelustikku, seetõttu on oluline teada vee taset mullas. Teades mulla veetaseme ja üleujutuse pealetungi/taganemise vahelist seost, saab käesoleva tööga loodud üleujutusmodeliga prognoosida mullastiku struktuuri ja mullaelustiku muutust ajas. Loodud üleujutusmodel mullateadlaste vajadusi otseselt ei rahulda, kuid vastavate seoste ja tuletiste abil saavad nad üleujutusmodelit oma töös kasutada.

Taimestikku mõjutab üleujutuse kestus ja ulatus. Mida vähem kestab üleujutus ja mida väiksemat ala see katab, seda rohkem hakkavad märgalal levima kuivalembesed taimeliigid. Mida väiksem on üleujutus, sega vähem jõuab märgalale ka jõeveega orgaanilisi aineid, mis tähendab, et märgalale jõuab ka vähem toitaineid (Truus ja Sassian, 1999). Käesoleva töö käigus loodud üleujutusmodelit kasutades saavad botaanikud hinnata üleujutuse mõju Matsalu märgala taimestikule.

Loomastikust mõjutab üleujutus eelkõige kalu ja linde. Kalade puhul mõjutab üleujutus nende paljunemistingimusi ja juveniilide toitumistingimusi. Lindude puhul mängib olulist rolli pinnase niiskustase toitumisel ning pesitsuskohtade olemasolu (Lotman, 2003). Käesoleva töö käigus loodud üleujutusmodeli abil saab vaadata konkreetsel ajahetkel üleujutuse ulatust, kuid täpse mullaniiskuse leidmiseks peab teadma mullaniiskuse ja üleujutuse taandumise vahelist seost. Seega üleujutuse leviku ja kestuse mõju saab antud üleujutusmodeli abil uurida, kuid lindude toitumistingimusi üleujutuse taandumiseks otseselt uurida ei saa.

Seenestiku uurimise seisukohalt on käesoleva tööga loodud üleujutusmodel oluline, sest suurseeded luha- ja rannaniitudel kasvukoha märguse tõttu peaaegu puuduvad, lodustuvates ja lodumetsades on seened rohkem levinud (Kumari, 1985). Üleujutusmodeli abil saab uurida üleujutuse kestuse ja seente leviku vahelist seost.

4.1.2 Keskkonnakaitse

Matsalu märgala on rahvusvahelise tähtsusega märgala (Ramsar, 2015), mille kaitset korraldavad Keskkonnaamet (2015) läbi Matsalu Rahvusparki administratsiooni ja Riigimetsa Majandamise Keskuse loodushoiuosakond (Tõnisson, 2015). Üleujutus on üks kaitstavaid protsesse Matsalu märgalal ning üleujutuse kestus ja ulatus mõjutavad otseselt keskkonnakaitse tegevusi nagu luha niitmine ja paisregulaatoritega luha üleujutamine. Kõrge põhjavee taseme ja üleujutuse korral on niitmine takistatud, küll aga on selline olukord soodus kaitstavatele taime- ja loomaliikidele. Kui jõe veetase on madal ja üleujutus jääb lühikeseks, siis kasutatakse paisregulaatoreid üleujutuse kestuse pikendamiseks.

Käesoleva töö käigus loodud üleujutusmudelit saaks otseselt kasutada paisregulaatorite kasutamise planeerimisel, kui vee kõrgusandmed oleks reaajas kaugloetavad. Praegu kogutakse vee kõrgusandmed mõõteseadme mällu ja peale mõõteperioodi laaditakse arvutisse kasutamiseks. Niitmise algusaja ennustamiseks oleks vaja teada üleujutuse taandumise ja mullaniiskuse vahelist seost, et arvutada välja pinnase kandevõime ja leida aeg, mil kandevõime on piisav hooldustehnika lubamiseks märgalale. Niitmise algusaja ennustamiseks on samuti vajalik vee kõrgusandmete kaugloetavus.

4.1.3 Põllumajandus

Üheks põllumajanduse sihtgrupiks on Matsalu märgalal kõik loomakasvatusega tegelevad talud ja farmid Matsalu Rahvuspargis ja sellega piirnevates valdades. Kariloomade karjatamisega tegeletakse valdavalt Matsalu rannaniitudel ja loomadele sööda varumisega enamasti luhaniitudel (Kattai, 2015). Karjatamisel pole üleujutuse ulatuse täpne kaardistamine reaajas oluline, sest üleujutus on ajutine nähtus, mis kariloomi ei mõjuta. Sööda varumisel mängib olulist rolli pinnase kandevõime luhal, mistõttu on sööda varumine üleujutuse ja üleujutusmudeli aspektide poolest samaväärne niitmisega (vaata peatükk 4.1.2 Keskkonnakaitse).

Seenekasvatusega Matsalu Rahvuspargis ei tegeleta, küll aga on Matsalu ranna- ja luhaniitudelt niitmise käigus niidetud hein potentsiaalne sisendmaterjal seenekasvatuseks (Coello-Castillo *et al.*, 2009). Kuna seenekasvatuse sisendmaterjaliks vajalik hein saadaks niitmise kaudu, siis seenekasvatuse puhul on üleujutuse ja üleujutusmudeli aspektid samad, mis niitmise puhul (vaata peatükk 4.1.2 Keskkonnakaitse).

4.1.4 Energeetika

Lihula linna katlamaja on 2006.-2008. aastal ehitatud ümber nii, et sooja vee tootmiseks saab seal kasutada rohtset biomassi (hein, põhk, pilliroog) ja puidujäätmeid (Lihula vallavalitsus, 2015). Ka energeetikas kasutatava luhahaena niidetakse samuti niitmise käigus, mistõttu üleujutuse ja üleujutusmudeli aspektid on samad, mis niitmise puhul. Energeetika puhul tuleb juurde heina kuivamise aspekt, kuna põletamiseks kasutatav rohtne biomass peab olema väga kuiv, et selle kasutusefektiivsus oleks kõrge. Seetõttu oleks vaja käesoleva töö käigus loodud üleujutusmudelit täiendada, et luua prognoosmudel, mis koostöös ilmaennustustega ennustab jõevee taseme tõusmist ja langust. See on vajalik luhal oleva kuivava heina suvisest üleujutusest tingitud märgumise ennetamiseks.

Kokkuvõte

Matsalu Rahvuspark on 1957. aastal loodud loodusala (Keskkonnaamet, 2015), mille olulise osa moodustavad luhaniidud, rannaniidud, madalrannad ning roostikud (Kumari, 1985, 1997; Meriste, 2005), mis kõik on ajuti või pidevalt üleujutatud. Käesoleva magistritöö käigus loodi Matsalu Rahvuspargi üleujutusosaladel toimuvate üleujutuste kuvamiseks üleujutusmodel, mille loomiseks kasutati käesoleva töö käigus loodud digitaalset kõrgusmodelit ja neljateistkümnes mõõtepunktis mõõdetud veetaseme tulemusi. Üleujutusmodel töötab järgmisel põhimõttel. Valitakse välja kindel kellaeg ja kuupäev, mille üleujutust kuvada soovitakse. Üleujutusandmetest luuakse QGIS tarkvaras kolmemõõtmeline üleujutuse kaardikiht, mis pannakse lõikuma Matsalu üleujutusala digitaalse kõrgusmodeliga kasutades QGIS pistikprogrammi QGIS2Threejs. Tulemus salvestatakse valitud failikaustas ja kuvatakse veebilehitseja aknas.

Töö alguses püstitatud eesmärkidest üks sai osaliselt ja kaks täielikult täidetud. Matsalu märgalast loodi enamasti täpne, kuid paiguti ebatäpne digitaalne kõrgusmodel algandmete puudulikkuse tõttu. Loodi lihtne üleujutusmodel üleujutuste kuvamiseks Matsalu märgalal. Analüüsiti loodud üleujutusmodeli kasutusvaldkondi.

Püstitatud hüpoteesidest üks pidas paika ja teine mitte. Võib väita, et töö käigus loodud üleujutusmodel on lihtne ja täpne, kuid ei sobi kõigis valdkondades muutmata kujul kasutamiseks. Seevastu välja töötatud üleujutusmodeli meetodikat ei ole võimalik kõigile üleujutusosaladele üle kanda, kuna üleujutusmodel sobib pigem madala tõusuga üleujutusosaladele, kuid mitte mägedes asuvatele suure kaldega üleujutusosaladele.

Peamised järeldused:

- käesoleva töö käigus loodud Matsalu märgala üleujutusmodel on lihtsustatud üleujutusmodel;
- QGIS tarkvara sobib detailse digitaalse kõrgusmodeli loomiseks;
- QGIS2Threejs pistikprogramm sobib Matsalu märgala üleujutusmodeli loomiseks;
- Maa-ameti LIDAR kõrgusandmed on ebapiisavad 48 (neljakümne kaheksal) Matsalu märgala katval kõrgusandmete kaardilehel, et luua detailne digitaalne kõrgusmodel nende kaardilehtede kohta;
- loodud üleujutusmodel sobib Matsalu märgalal mullaelustiku ja üleujutuse leviku vahelist ning taimestiku ja üleujutuse leviku vahelist seost käsitlevate teadusuuringute läbiviimiseks;

- loodud üleujutusmudel sobib Rõude ja Kloostri paisregulaatorite kasutamise planeerimiseks;
- loodud üleujutusmudeli kasutamiseks keskkonnakaitse (niitmine), loomakasvatuse, seenekasvatuse ja energeetika hüvanguks on vaja välja töötada valem üleujutuse taandumise ja mulla niiskusesisalduse/kandevõime vahelise seose kohta;
- loodud üleujutusmudeli loomise metoodika sobib väikese languga üleujutusaladel üleujutuse leviku kaardistamiseks;
- loodud üleujutusmudeli kasutamiseks reaalajas on vajalik kasutada kaugloetavaid mõõtesensoreid.

Summary

Matsalu National Park was founded in 1957 (Keskkonnaamet, 2015). Alluvial meadows, coastal meadows, shallow beaches and reed beds, which all are temporarily or constantly flooded, are considered to be important parts of Matsalu National Park (Kumari, 1985, 1997; Meriste, 2005). During the writing of this thesis, the flood inundation model was constructed. The flood inundation model consists of a digital elevation model made during this research, and water depth data collected from fourteen gauges from all over the study area. The flood inundation model works on the following terms. The exact date and time of the desired flood inundation map is chosen and according to the chosen date and time a 3D flood inundation layer is generated from the water depth data in QGIS, which is then intersected with the digital elevation model of Matsalu National Park by using the QGIS2Threejs plug-in. The generated flood inundation model is saved to a folder and opened in a browser window.

In the beginning of the thesis, there are three purposes and the two hypothesis. Purposes of the thesis are (1) to generate a digital elevation model of Matsalu wetlands, (2) to develop a simple and accurate flood inundation model of Matsalu wetland based on collected data, (3) to analyse potential applications of the generated flood inundation model. The author of the thesis made two hypotheses – (a) generated flood inundation model is simple and accurate, but it will not be suitable for use in every field of interest, (b) developed method for modelling flood inundation can be used in other flooding areas.

Both purposes (2) and (3) were fulfilled completely and purpose (1) partly. A digital elevation model was generated, but it was inaccurate in some places. One of the hypotheses (a) proved to be correct and another (b) proved to be incorrect. The developed method for modelling flood inundation cannot be used in every other flooding area, as the model suits best for flooding areas with gentle slope, but does not suit for flooding areas in mountainous regions with rapid slope.

Main conclusions:

- the flood inundation model of Matsalu wetlands made during writing this thesis is a simplified flood inundation model;
- QGIS software is suitable for generating detailed digital elevation models;
- QGIS2Threejs plug-in is suitable for flood inundation model of Matsalu wetlands;
- LIDAR elevation data from Maa-amet is insufficient for generating a detailed digital elevation model for 48 (forty eight) map sheets of Matsalu wetlands;

- the developed flood inundation model is suitable for researching the connection between soil biota of Matsalu wetlands and flood inundation area, and researching connection between vegetation and the flood inundation area;
- the developed flood inundation model is suitable for planning use of Rõude and Kloostri gate controls of the flooding;
- using developed flood inundation model for environmental protection, agricultural, fungicultural, and energetic sectors' good needs a formula to be developed of relation between retreating of flooding and soil moisture;
- the method of developed flood inundation model is suitable for mapping flood inundation in areas with gentle slope;
- the developed flood inundation model needs remote reading sensors for using data in real time applications.

Tänuõnad

Töö autor avaldab tänu:

- Eesti Teadusfondi Grant Nr. 9145 „Mullaelustiku ruumiline jaotus ja koosluste üleujutusejärgne taastumine Matsalu Rahvuspargi lammi- ja rannaniitudel“ (2012-2015);
- magistritöö juhendajatele Mart Meriste’le ja Mari Ivask’ile asjakohaste kommentaaride eest;
- õppejõud Merik Meriste’le asjakohaste kommentaaride eest;
- Eve Mägi’le, kes pakkus öömaja Matsalu Rahvuspargis välitööde ajal;
- Maa-ametile, kellelt saadi magistritööks vajaminevad kõrgusandmed Matsalu Rahvuspargi kohta;
- Kaie Kattai’le Keskkonnaametist, kes nägi vaeva Matsalu ranna- ja luhaniitude niitmis- ja karjatamisstatistika käsitsi väljaotsimisega vastavalt Keskkonnaametile esitatud teabenõudele;
- Priit Karu’le, kes andis IT-alast ja keelelist nõu inglisekeelse teksti osas;
- Maria Uuetoale, kes andis keelelist nõu inglisekeelse teksti osas.

Kirjandus

Abdullah, A.F.B. 2012. A Methodology for Processing Raw Lidar Data to Support Urban Flood Modelling Framework. Dissertation. Delft University of Technology. CRC Press/Balkema. 194 lk.

Andersen, H.E., Kronvang, B., Larsen, S.E., Hoffmann, C.C., Jensen, T.S., Rasmussen, E.K. 2006. Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. Science of The Total Environment. Elsevier. Vol. 365. Issues 1-3. p.223-237.

Bates, P.D., De Roo, A.P.J. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of Hydrology. Elsevier. Vol. 236. Issues 1-2. p. 54-77.

Bonnet, M.P., Barroux, G., Martinez, J.M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., Melack, J.M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J.G., Roux, E., Calmant, S., Kosuth, P., Guyot, J.L., Seyler, P. 2008. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). Journal of Hydrology. Elsevier. Vol. 349. Issues 1-2. p. 18-30.

Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., Roy, A.G. 2010. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. Journal of Hydrology. Elsevier. Vol. 384. Issues 1-2. p. 65-83.

Coello-Castillo, M.M., Sánchez, J.E., Royse, D.J. 2009. Production of *Agaricus bisporus* on substrates pre-colonized by *Scytalidium thermophilum* and supplemented at casing with protein-rich supplements. Bioresource Technology. Elsevier. Vol. 100. Issue 19. p. 4488-4492.

Cuo, L., Zhang, Y., Gao, Y., Hao, Z., Cairang, L. 2013. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology. Elsevier. Vol. 502. p. 37-52.

de Mesnard, L. 2013. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. Computers and Geosciences. Elsevier. Vol 52. p. 459-469.

Eesti Keele Instituut. 2009. Eesti keele seletav sõnaraamat. Veebilehekülg. Eesti Keele Sihtasutus. Tallinn. <http://www.eki.ee/dict/ekss/index.cgi> (30.03.2015)

Fan, M., Shibata, H. 2014. Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan. *Ecological Indicators*. Elsevier. Vol. 50. p, 79-89.

Fernández-Lozano, J., Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Morán, M.A. 2015. Using airborne LiDAR sensing technology and aerial orthoimages to unravel roman water supply systems and gold Works in NW Spain (Eria valley, León). *Journal of Archaeological Science*. Elsevier. Vol. 53. p. 356-373.

Fileccia, A. 2011. Correcting water level data for barometric pressure fluctuations. Theoretical approach and a case history for an unconfined karst aquifer (Otavi, Namibia). *Acque Sotterranee/Italian Journal of Groundwater*. Associazione Acque Sotterranee. n. 126. p. 23-44.

Gautam, M.R., Watanabe, K., Ohno, H. 2004. effect of bridge construction on floodplain hydrology – assessment by using monitored data and artificial neural network models. *Journal of Hydrology*. Elsevier. Vol. 292. Issues 1-4. p. 182-197.

Ghimire, S. 2013. Application of a 2D Hydrodynamic Model for Assessing Flood Risk for Extreme Storm Events. *Climate*. MDPI AG. Basel, Switzerland. 1. p. 148-162.

Ghimire, S.R., Johnston, J.M. 2013. Impacts of domestic and agricultural rainwater harvesting systems on watershed hydrology: A case study in the Albemarle-Palmico river basins (USA). *Ecohydrology & Hydrobiology*. Elsevier. Vol. 13. Issue 2. p. 159-171.

Haile, A.T., Rientjes, T.H.M. 2005. Effects of Lidar DEM Resolution in Flood Modelling: A Model Sensitivity Study for the City of Tegucigalpa, Honduras. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop „Laser scanning 2005“*. Enschede, the Netherlands. p. 168-173.

Hardy, R.J., Bates, P.D., Anderson, M.G. 2000. Modelling suspended sediment deposition on a fluvial floodplain using a two-dimensional dynamic finite element model. *Journal of Hydrology*. Elsevier. Vol. 229. Issues 3-4. p. 202-218.

Jairus, T. 2014. Muutused Kasari ja Rannamõisa-Rõude delta jõesuudmete arengus aastatel 2005-2013. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Loodus- ja tehnoloogiateaduskond, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Geoloogia osakond. Tartu. 68 lk.

Jung, Y., Merwade, V. 2015. Estimation of uncertainty propagation in flood inundation mapping using a 1-D hydraulic model. Hydrological Processes. John Wiley & Sons. Vol. 29. Issue 4. p. 624-640.

Kaljumäe, H. 1990. Kasari jõe luha ülejutusala suuruse määramine. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 1987 I. Kirjastus Valgus. Tallinn. 135 lk.

Keskkonnaamet. 2015. Matsalu Rahvuspark. Veebileht. <http://www.keskkonnaamet.ee/?lang=matsa> (25.03.2015)

Krusberg, P. 2003. Eesti rannikuala maastikumudelist. Esitlus. http://www.maaamet.ee/docs/avalik/peep_krusberg.ppt?t=20030512133243 (19.05.2015)

Kumari, E. 1985. Matsalu – rahvusvahelise tähtsusega märgala. Valgus. Tallinn. 309 lk.

Kumari, E. 1997. Matsalu märgala inimtekkeste ökosüsteemide kujunemisest ja kaitsest. Rmt: Mägi, E., Kaisel, K. (toim). Loodusevaatlusi 95/96. Matsalu Looduskaitseala. Tallinn. 201 lk.

Lihula vallavalitsus. 2015. Rohtse biomassi kasutuselevõtmine Lihula soojusvarustuses. http://www.lihula.ee/index.php?option=com_content&view=article&id=895:rohtse-biomassi-kasutuselevtmine-lihula-soojusvarustuses&catid=45:o-lihula-soojus&Itemid=246 (24.05.2015)

Lotman, A. 1997. Poollooduslike koosluste hooldusest Matsalu märgalal. Rmt: Mägi, E., Kaisel, K. (toim). Loodusevaatlusi 95/96. Matsalu Looduskaitseala. Tallinn. 201 lk.

Lotman, A. 2003. Kasari delta taastamise ja kaitse korraldamise projekti taustast ning peamistest tulemustest. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 2000-2002. Matsalu Looduskaitseala. Lihula. 136 lk.

Lotman, A. 2005. Poollooduslike märgalakoosluste taastamise probleemidest Kasari alamjooksu juha näitel. Rmt: Sammul, M., Lõhmus, A. (toim). Ökoloogiline taastamine. Eesti Loodusuurijate Seltsi 83. aastaraamat. Eesti Loodusuurijate Selts. Tartu. 280 lk.

Lotman, K. 2004. Niitude hooldamisest Matsalus: 1996. ja 2003. aasta võrdlus. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 2003. Matsalu Rahvuspark. Lihula. 140 lk.

Luhamaa, H., Ikonen, I., Kukk, T. 2001. Läänemaa pärandkooslused. Seminatural communities of Läänemaa County, Estonia. Pärandkoosluste Kaitse ühing. Tartu – Turku. 96 lk.

- Luhaveer, O.** 1996. Mereleksikon. Eesti Entsüklopeediakirjastus. Tallinn. 590 lk.
- Lõhmus, K.** 2013. Puiskoosluste vertikaalse struktuuri hindamine lasermõõdistuse abil. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal. Tartu Ülikool. 46 lk.
- Maa-amet.** 2015a. Kõrgusandmed. Maa-ameti Geoportaal. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed-p114.html> (11.03.2015)
- Maa-amet.** 2015b. Maaametil on valminud maakatte ja taimkatte kõrgusmodelid. Maa-ameti Geoportaal. http://geoportaal.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&news_id=35&page_id=36 (24.05.2015)
- Maa-amet.** 2015c. WMS teenus.
- Maa-amet.** 2015d. X-GIS kaardirakendus. Maa-ameti Geoportaal. <http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis> (12.04.2015)
- Meriste, M.** 2003. Loodusolude muutumise põhjused Matsalu märgalal. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 2000-2002. Matsalu Looduskaitseala. Lihula. 136 lk.
- Meriste, M.** 2005. Matsalu märgala maismaastumine. Magistritöö. Tartu Ülikooli Geoloogia Instituut. Tartu/Sarik-Siimani.
- Meriste, M., Üts, M., Kirsimäe, K.** 2005. Matsalu märgala roostike struktuuri ja leviku muutused aastatel 1980-2004. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 2004-2005. Matsalu Looduskaitseala. Penijõe. 124 lk.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Sokolov, B.V., Potryasaev, S., Zelentsov, V.A., Lektuers, A.** 2014. Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. Journal of Computational Science. Elsevier B.V. In Press, Corrected Proof. Available online 24 October 2014. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750314001240> (19.04.2015)
- Mägi, E.** 2004. Kas kasutada luhta heina- või karjamaana? Linnustik Kasari luha Kloostri-aluses osas 1986-2003. Rmt: Mägi, E. (toim). Loodusevaatlusi 2003. Matsalu Rahvuspark. Lihula. 140 lk.
- Néelz, S., Pender, G.** 2009. Desktop review of 2D hydraulic modelling packages. Environment Agency. Bristol. 55 lk.

Neussner, O., Obermaier, I., Sanchez, A. 2012. Application of a Digital Elevation Model for flood modelling for the Pagsangaan River in Leyte. In 1st Philippine Geomatics Symposium, 23-24 November 2012, Diliman, Quezon City, Philippines.

Orviku, K. 1993. Nüüdisrandla. Rmt: Lutt, J., Raukas, A. (toim). Eesti šelfi geoloogia. Eesti Geoloogia Selts. Tallinn. 178 lk.

Paal, J., Ilomets, M., Fremstad, E., Moen, A., Børset, E., Kuusemets, V., Truus, L., Leibak, E. 1999. Eesti märgalade inventeerimine 1997. a. Projekti „Eesti märgalade kaitse ja majandamise strateegia“ aruanne. Eesti Loodusfoto. Tartu. 166 + xxviii lk.

Palo, A. 1996. Eesti ranna- ja luhaniidud: geograafiline ja ajalooline ülevaade. Rmt: Leibak, E., Lutsar, L. (toim). Eesti ranna- ja luhaniidud. Eestimaa Looduse Fond. Tallinn. 247 lk.

Poulsen, J.B., Hansen, F., Ovesen, N.B., Larsen, S.E., Kronvang, B. 2014. Linking floodplain hydraulics and sedimentation patterns along a restored river channel: River Odense, Denmark. Ecological Engineering. Elsevier. Vol. 66. p. 120-128.

QGIS. 2015. QGIS User Guide. http://docs.qgis.org/2.2/en/docs/user_manual/index.html (24.05.2015)

Ramsar. 2015. Ramsar Sites in order of their addition to the Ramsar List of Wetlands of International Importance. http://ramsar.rgis.ch/pdf/sitelist_order.pdf (18.04.2015)

Rapidlasso. 2015. rapidlasso GmbH – fast tools to catch reality. Webpage. <http://rapidlasso.com/> (19.05.2015)

Riigi Ilmateenistus. 2015a. Hüdroloogilised mõõtmised. Veebileht. <http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/mootetehnika/hydroloogiliste-vaatluste-mootetehnika/> (03.05.2015)

Riigi Ilmateenistus. 2015b. Vaatlusandmed: Kasari jõgi – Kasari. Veebileht. <http://www.ilmateenistus.ee/siseveed/vaatlusandmed/graafikud/?filter%5BstationId%5D=70> (03.05.2015)

Riigi Ilmateenistus. 2015c. Vaatlusvõrk. Veebileht. <http://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/> (27.05.2015)

- Rudari, R., Gabellani, S., Delugo, F.** 2014. A simple model to map areas prone to surface water flooding. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Elsevier. Vol. 10. Part B. p. 428-441.
- Solnist.** 2012. Levelogger Series Software Version 4. User Guide. Solnist Canada Ltd. Georgetown, Canada. p. 82.
- Truus, L., Sassian, K.** 1999. Kasari jõe hüdroloogilise režiimi muutumine vooluteede reguleerimise ja luha kuivendamise tagajärjel ning selle mõju Kasari luha taimkattele. Rmt: Mägi, E., Kaisel, K. (toim). *Loodusevaatlusi 1997-1999*. Matsalu Looduskaitseala. Lihula. 177 lk.
- USGS.** 2014. Methodology for Processing and Publication of Lidar Data. <http://coastal.er.usgs.gov/lsrcm/data/lidar-data-methodology.html> (06.04.2015)
- Voormansik, K., Jagomägi, J., Järvet, A.** 2011. Kõnekad satelliidipildid: suurvesi kevadel 2010. Eesti Loodus. MTÜ Loodusajakiri. Nr 2011/03. http://www.eestiloodus.ee/artikkel3776_3748.html (03.05.2015)
- WAAS T&E Team.** 2015. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report. William J. Hughes Technical Center. Atlantic City International Airport, NJ 08405. 64 p.
- Wamulume, J., Landert, J., Zurbrügg, R., Nyambe, I., Wehrli, B., Senn, D.B.** 2011. Exploring the hydrology and biochemistry of dam-impacted Kafue River and Kafue Flats (Zambia). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. Elsevier. Vol. 36. Issues 14-15. p. 775-788.
- Ward, R.D., Burnside, N.G., Joyce, C.B., Sepp, K.** 2013. The use of medium point density LiDAR elevation data to determine plant community types in Baltic Coastal wetlands. *Ecological Indicators* 33(2013). Elsevier. p. 96-104.
- Wehr, A., Lohr, U.** 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier Science Publishers. 54 (1999). p. 68-82.

Wen, L., Macdonald, R., Morrison, T., Hameed, T., Saintilan, N., Ling, J. 2013. From hydrodynamic to hydrological modelling: Investigating long-term hydrological regimes of key wetlands in the Macquarie Marshes, a semi-arid lowland floodplain in Australia. *Journal of Hydrology*. Elsevier. 500 (2013). p. 45-61.

Xu, Y., Zhang, X., Ran, Q., Tian, Y. 2013. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Quintang River Basin, East China. *Journal of Hydrology*. Elsevier. Vol. 483. p. 51-60.

Käsikirjad

Kattai, K. 2015. Poollooduslike koosluste hooldamise toetust saanud poollooduslikud rohumaad Matsalu Rahvuspargis. Kirjavahetus. Keskkonnaameti Hiiu-Lääne-Saare regiooni maahoolduse spetsialist.

Tõnisson, K. 2015. Matsalu rahvuspargis asuvate sild-regulaatorite andmete edastamine. Teabenõue. RMK looduskaitseosakond.

LIDAR kõrgusandmetest vajalike punktide leidmise programm

```

import os
os.chdir('c:\\Users\\Siim\\SkyDrive\\Dokumendid\\kool\\magistritoo\\
lidarandmed\\sorteeritud')
maakorgus_fail = open('./Veemooduseadmed.csv', 'r')
maakorgus_fail_koos_z = open('./veemooduseadmed_l2him_z.csv', 'w')
maakorgus_fail_koos_z.seek(0)
maakorgus_fail_koos_z.truncate()
maakorgus_fail_koos_z.write('Nr;Nimi;Seadme algne nimi;kolm viimast
numbrit seerianumbrist;X;Y;x (UTM);y (UTM);x (lähim);y (lähim);z
(lähim);kaugus mõõtepunktist' + '\n')

for korgus_rida in maakorgus_fail:
    kaugus = 1000
    z_l2him = ''
    x_l2him = ''
    y_l2him = ''
    reajarjend = korgus_rida.split(';')
    if reajarjend[6] != 'x (qgis)':
        x_maakorgus = round(float(reajarjend[6]), -3)
    if reajarjend[7] != 'y (qgis)\n':
        y_maakorgus = round(float(reajarjend[7]), -3)
        for failinimi in os.listdir('.'):
            if failinimi.endswith('.xyz'):
                lidar_fail = open(failinimi)
                for lidar_rida in lidar_fail:
                    lidar_rida_jarjend = lidar_rida.split(' ')
                    if (len(lidar_rida_jarjend)>1):
                        x_lidar =
round(float(lidar_rida_jarjend[1]), -3)
                        if x_lidar == x_maakorgus:
                            y_lidar =
round(float(lidar_rida_jarjend[0]), -3)
                            if y_lidar == y_maakorgus:
                                a = float(reajarjend[6]) -
float(lidar_rida_jarjend[1])
                                b = float(reajarjend[7]) -
float(lidar_rida_jarjend[0])
                                c = (((a)**2) + ((b)**2))**0.5
                                if c < kaugus:
                                    kaugus = c
                                    z_l2him =
lidar_rida_jarjend[2].rstrip('\n')
                                    x_l2him = lidar_rida_jarjend[1]
                                    y_l2him = lidar_rida_jarjend[0]
                                if z_l2him and x_l2him and y_l2him:
                                    maakorgus_fail_koos_z.write(korgus_rida.rstrip('\n') + ';' +
x_l2him + ';' + y_l2him + ';' + z_l2him + ';' + str(kaugus) + '\n')

```

```
        print(reajarjend[0] + '. rida lisatud z-andmetega faili.')
lidar_fail.close()
maakorgus_fail.close()
maakorgus_fail_koos_z.close()
print('Kõik kõrgused leitud, lõpetan töö.')
```

Maa-ameti kõrgusandmete sorteerimine

```
import os
os.mkdir('sorteeritud')

print('Tere! See programm sorteerib Maa-ameti kõrgusandmete
tekstifaile (.xyz) jättes alles ainult kasutaja poolt sisestatud
kõrgusandmete klassid. Programm tuleb käivitada algandmetega samas
kaustas ja programm loob samasse kausta alamkausta sorteeritud
andmete jaoks. Olenevalt andmete mahust, võib programmi töö võtta
aega minuteid.')
klassid = input('Palun sisestage soovitud Maa-ameti kõrgusandmete
klassid (klasside arvude vahele jätke tühikud): ')
klassid = klassid.split()

def kirjutaValjundisse(algfail, valjundfail):
    for rida in algfail:
        if rida[0] in klassid:
            jarjend = rida.split()
            str = ' '
            seq = (jarjend[1], jarjend[2], jarjend[3])
            tulemus = str.join(seq)
            valjundfail.write(tulemus + '\n')

for failinimi in os.listdir('.'):
    if failinimi.endswith('.xyz'):
        algfail = open(failinimi, 'r')
        valjundfail = open('./sorteeritud/' + str(failinimi), 'w')
        kirjutaValjundisse(algfail, valjundfail)
        print(str(failinimi))
        algfail.close()
print('Andmed sorteeritud!')
```



```
        uusfail.close()
    else:
        veetase = str(round((float(korgus) +
float(z) - 0.95), 3))
        tyhik = ' '
        seq = (x, y, veetase)
        tulemus = tyhik.join(seq)
        failikas = p2ev + '-kell-' + aeg +
'.xyz'

        if failikas in os.listdir('.'):
            kirjuta = open(failikas, 'a')
            kirjuta.write(tulemus + '\n')
            kirjuta.close()
        else:
            uusfail = open(failikas, 'w')
            uusfail.seek(0)
            uusfail.truncate()
            uusfail.write(tulemus + '\n')
            uusfail.close()

    fail.close()
print('Vee sügavuse failid on valmis.')
```