Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Aidu karjääri tekkinud järvistu veemahu modelleerimine

Karl Joann Jürimaa

Juhendajad: PhD Mait Sepp

PhD Raivo Aunap

Tartu 2022

Annotatsioon

Aidu karjääri tekkinud järvistu veemahu modelleerimine

Käesoleva töö eesmärgiks on leida Aidu põlevkivikarjääri tekkinud järvistu veemaht. See on oluline, kuna magevesi on vajalik ressurss kõige elava jaoks ning tähtis on teada kui palju selle varusid eksisteerib. Põhinedes teadmisel, et Eesti aluspõhja kivimid on lõuna suunas kaldu ja eeldusel, et karjääri põhi, esi ning veetase moodustavad täisnurkse kolmnurga, koostati veekogu batümeetriline mudel, mille põhjal leiti järvistu ruumala. Kõige paremini varasemalt mõõdetud sügavustega ühtinud mudeli järgi on Aidu järvistu ruumalaks 25,8 miljonit m^3.

Märksõnad: Modelleerimine, veemaht, tehislikud veekogud

CERCS: P470- Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Abstract

Modelling the volume of the lakes formed in Aidu quarry

The purpose of this bachelor's thesis is to find the volume of the lakes that have formed in the former Aidu oil shale quarry. It is relevant because fresh water is a neccessary resource for every living thing and knowing how big of a supply of it we have is important. Based on the fact that Estonian bedrock is tilted southwards and on the assumption that the bottom of the quarry, water level and the place where the mining stopped form a right-angled triangle, a bathymetric model was made to calculate the volume of the lakes. In the most accurate model where the model depths matched with the previous bathymetric measurements the best, the volume of Aidu quarry was estimated as 25,8 million m^3.

Keywords: Scientiffic modelling, water volume, artificial bodies of water

CERCS: P470- Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

1. Sissejuhatus 4
2. Teoreetiline ülevaade 5
   2.1 Uurimisala kirjeldus 5
   2.2 Avakaevandamine 7
   2.3 Hüdroloogilised ja geoloogilised tingimused Aidu karjääris 9
   2.4 Veekogude modelleerimine 11
3. Andmed ja Metoodika 14
   3.1 Andmed 14
   3.2 Metoodika 17
4. Tulemused 21
5. Arutelu 24
6. Kokkuvõte 27
Summary 28
Tänuavaldused 30
Kasutatud kirjandus 31
Lisad 39

1. Sissejuhatus

Magevesi on üliioluline ressurss kõigi elavate organismide jaoks (Wang 2020). Kuna see moodustab kogu maailma veest on ainult 3% (Schmitt 1995), siis on oluline teada, kui palju meil seda on. Magevett leidub liustikes, järvedes, jõgedes ning põhja- ja mullavees, neist kõige lihtsamalt kasutatav on järvevesi.

Järvede veemahtude täpseks teadmiseks on vaja teha ulatuslikke batümeetrilisi uuringuid. Eestis on viimastel aastatel suurenenud huvi järvedes oleva veeressursi suhtes ja selleks on tehtud mitmetes väikejärvedes batümeetrilisi mõõdistusi (Keskkonnaagentuur 2019). Kuna sellised uuringud on aga kallid, siis oleks vaja meetodeid, millega saaks leida veemahte piiratud andmete abil, ilma kulukaid mõõtmisi teostamata (Abo et al 2017; Chen et al, 2019).

Järve mahu leidmiseks kasutatakse traditsiooniliselt kahte meetodit. Esimese puhul määratakse see kihtide kaupa samasügavusjoonte (isobaatide) põhjal, lähtudes tüvikoonuse ruumalast. Teisel juhul kasutatakse batümeetrilist kõverat (Mäemets 1977, Ott et al. 2020). Kõige lihtsam viis veekogu mahu arvutamiseks on selle nõgu jagada lihtsateks geomeetrilisteks kujunditeks ja arvutada nende kujundite maht (Hollister ja Milstead 2010). Selle meetodiga saab häid tulemusi juhul, kui uuritava veekogu nõgu on lihtsa kujuga, näiteks veehoidlad ja ammendunud karjääridesse tekkinud tehisveekogud.

Karjäärijärvede puhul võib eeldada, et veekogu põhi on ühtlane tasapind, kuna kaevandatakse välja üks kindel maavarakiht, mis asetseb tavaliselt teiste kihtide peal. Eesti puhul saab siin välja tuua põlevkivikarjäärid, kus põlevkivi kiht asub rõhtsalt paekivikihtide vahel (Keskkonnaministeerium 2015). Karjääriviisilisel kaevandamisel jääb sinna kujuneva veekogu põhjaks vahetult põlevkivi tootsa kihi all olev tasapinnaline paekivi kiht.

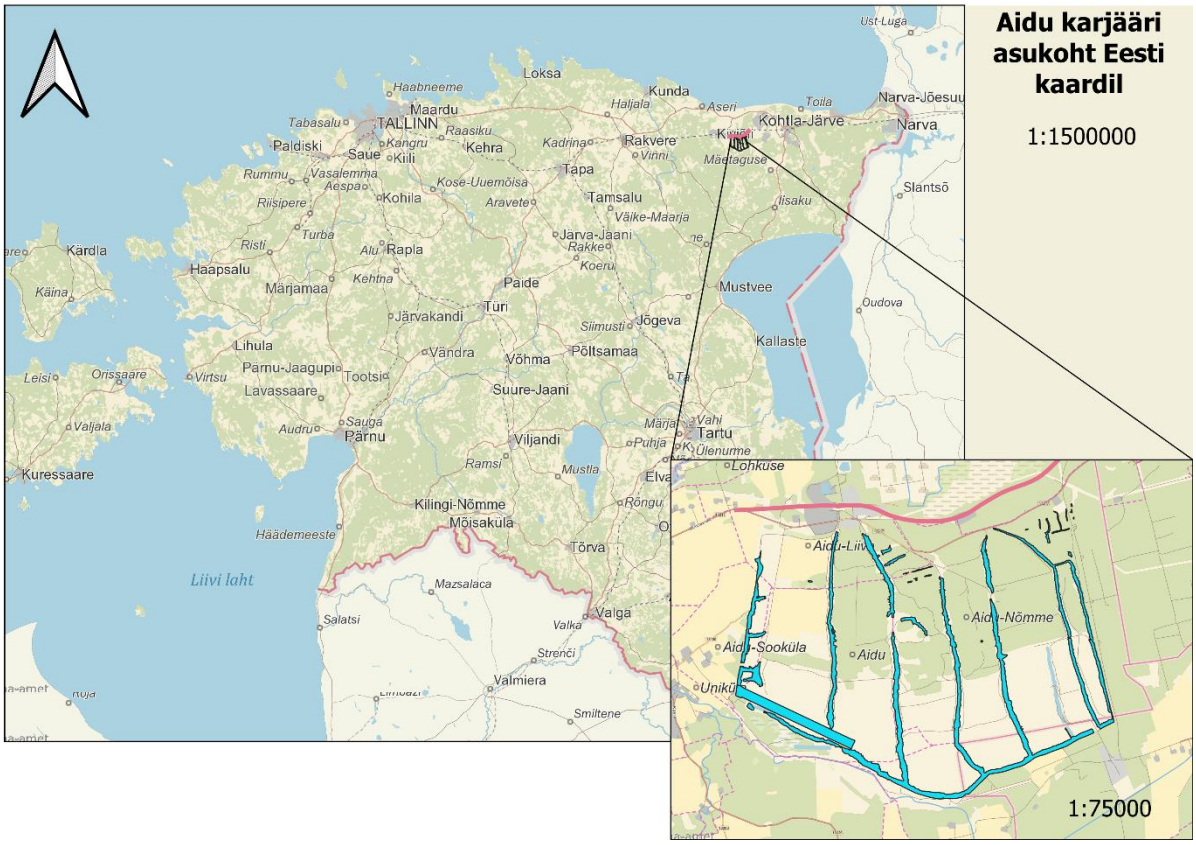
Praegusel hetkel on suurim põlevkivikarjääri tekkinud veekogu Aidus. See on omapärane kammikujuline veekogu, kus ca 34 km^2 suurusel alal on endistesse, fjorde meenutavatesse väljaveotranšeedesse, tekkinud järvistu. Kuigi see on väga suur veekogu, kus vee sügavus võib ulatuda 20 meetrini ja ühest järvistu otsast teise on mitu kilomeetrit (Keskkonnaministeerium 2020; Krause ja Palm 2021), pole seda veekogu ametlikult olemas - st, see puudub veekogude registris (Keskkonnaagentuur 2019). Siiski, praegu teadaolevate ligikaudsete mõõtmete järgi otsustades on tegemist Eesti kontekstis potentsiaalselt väga veerohke veekoguga.

Käesoleva töö eesmärgiks on mudelarvutuste teel hinnata Aidu karjääri tekkinud järvistu veemahtu.

2. Teoreetiline ülevaade

2.1 Uurimisala kirjeldus

Endine Aidu põlevkivikarjäär paikneb Ida-Viru maakonnas. Enamus karjäärist asub Lüganuse vallas, Aidu, Aidu-Nõmme, Aidu-Liiva ning Aidu-Sooküla külades, kuid kagupoolsem osa jääb Alutaguse valla Võnnu küla territooriumile (Joonis 1). Mainitud küladest kolm esimest on sisuliselt säilinud vaid toponüümina, kuna nende maad ja hooned on jäänud karjääri alla. Aidu karjääri pindala on umbes 34 km^2. Karjääri rajamisega alustati aastal 1965. Rajamise ajal oli see Eesti kõige suurem avakaevandus ja kandis nime Oktoober. Tootmismahuks pidi olema 5 miljonit tonni kaubapõlevkivi aastas. Kattekivimitekihi ehk settekihi ja põlevkivi vahel oleva kihi paksus varieerub karjääri põhja- ja lõunaosa vahel märgatavalt. Põhjaosas on see 6-9 meetrit, kuid lõunaosas võib selle maksimaalne paksus olla lausa 25 meetrit (Tulchinsky 2008; Sokman 2010).



Joonis 1. Aidu karjääri asukoht. (Muudetud Maaameti aluskaart.)

Reaalselt jõuti põlevkivi kaevandamiseni aastal 1974, kui alustas tööd esimene tootmisjaoskond, mille tootmismahuks planeeriti 297 000 tonni kaubanduspõlevkivi aastas. 1976. aastal alustas tööd 2. jaoskonna esimene järk, millega suurenes karjääri aastane kogutoodang 1,7 miljoni tonnini. 1979. aastaks, kui alustati jaoskonna 3a teise järgu ekspluatatsiooniga, kerkis karjääri kogutoodang 2 859 900 tonnini. Paralleelselt kaevandamisega hakati tegelema ka kaevandatud alade rekultiveerimisega. (Tulchinsky 2008)

Kui Nõukogude ajal tehtud kaevetöid loetakse esimeseks ekspluatatsiooni perioodiks, siis kaevetöid peale Eesti vabariigi taasiseseisvumist kirjeldatakse kui teist ekspluatatsiooni perioodi. Selle perioodi keskmine tootmismaht oli umbes kaks miljonit tonni aastas ja sõltus suuresti tarbimisest. Põlevkivi kaevandamine lõpetati karjääris aastal 2012. Selleks ajaks oli Aidust välja kaevatud 90 miljonit tonni põlevkivi (Tulchinsky 2008; Vennik 2012).

Kuna Aidu põlevkivivarude ammendumist ja karjääri sulgemist oli pikka aega ette näha, siis hakati varakult tegema plaane, kuidas tekkivat veekogu ja tehismaastikku tulevikus ära kasutada. Koostöös tolleaegse Maidla vallaga rajati karjääri edelaosasse Eesti esimene rahvusvahelistele nõuetele vastav sõudekanal. Selleks kaevati süvend puistangusse ja osaliselt täideti olemasolevat tranšeed (Sedman 2018). Veetaseme hoidmiseks renoveeriti endine settebassein veekõrvalduskanaliks Ojamaa jõkke. Sõudekanal ise on 2,3 km pikkune, 162 m laiune ning 3,5 meetrit sügav (Bachmann 2011).

Peale sulgemist oli plaan rajada Aidusse 99 MW võimsusega tuulepark, kus pidi olema kuni 33 elektrituulikut (Ramboll Eesti AS 2011). Osad tuulikute alused on ka valmis tehtud ning samuti on rajatud juurdepääsuteid. Nimetatud tööde käigus on mõningaid järvistu osasid ka täidetud. Kuna tuulepargi rajaja, firma Eleon Green OÜ, hakkas püstitama teemaplaneeringu ja kaitseväega kooskõlastatud 180 meetrist kõrgemaid tuulikuid (Tarbijakaitse ja Tehnilise järelevalve amet 2020), siis vähemalt käesoleva töö kirjutamise ajal tuulepargi rajamine seisab.

Aidu karjäärist lõunas avati 2008. aastal Ojamaa kaevandus, mis ladustab aherainet karjääriala kaguosasse. Selleks on rajatud juurdepääsutee, mis lõikab ühe karjääri kanali justkui kaheks. Tegelikult vee ühendus säilib, kuna kanalit ühendab juurdepääsu teel alt jooksev truup. Lüganuse vallavalitsuse soovil leidis ettevõte Kadarik Tüür Arhitektid 2011. aastal kasutuse Ojamaa kaevandusest välja kaevatud aherainele. Nimelt soovitati Aidu põhjapoolsetele aladele rajada püramiidide parki. Projekti nimi oli “Aidu 2030”. Suurim püramiid oleks umbes 152 meetrit kõrge ja olnuks seega maailma kõrgeim (Kriis 2011; Vasli 2013). Bakalaureusetöö kirjutamise ajal ei ole püramiidide ehitusega alustatud. 2017. aastal teatas ajaleht Põhjarannik,

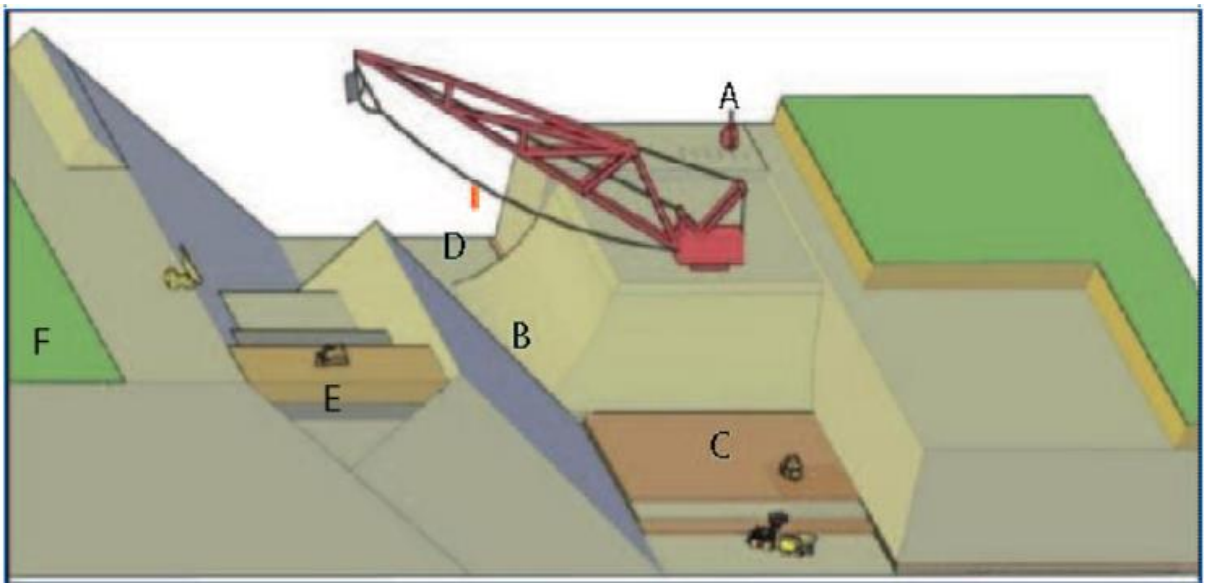
et ehitus seiskus riigikohtu otsuse tõttu aheraine killustikku käsitleda jäätme, mitte tootmise kõrvalproduktina. Viru keemia grupp (VKG) peab selle otsuse pärast tasuma rohkem saastemakse, mida nad püramiide ehitades vältida lootsid (Kriis 2017).

Peale selle ristuvad Aidus mitmete teiste huvigruppide soovid. Näiteks võib Aidu plaanidest leida suure laskevälja rajamise ideed, mis asendaks karjääri töötamise ajal tegutsenud, kuid vee alla jäänud kaitseväe lasketiiru (Virkus 2014). Praegu on karjääris aktiivselt tegutsemas seiklusmatku korraldav firma Adrenaator (Adrenaator 2022) ja ka Alutaguse Matkaklubi organiseerib regulaarselt käike Aidu "kuumaastikule," mille hulgas ületatakse ka üht kaevandusmaastikule jäävat järve (Matkaklubi 2022). Seega on Aidu karjääri kujunenud järvistu oluline nii mageda vee ressursina kui ka kohaliku turismiarenduse seisukohalt.

2.2 Avakaevandamine

Aidu järvistu morfomeetria on suuresti ära määratud kaevandamisviisist, millega siin põlevkivi toodeti. Aidus kasutati avakaevandamist. Seda rakendatakse juhul, kui katend ei ole väga paks ja selle eemaldamine ei ole liiga kulukas. Avakaevandused hakkasid Eestis tormiliselt arenema viiekümnendatel, kuna neid on odavam rajada ja ekspluateerida kui allmaakaevandusi ning neis on ka põlevkivi kaod väiksemad. Lisaks on avakaevanduses töötamine üldiselt kaevurite jaoks eelistatum kui allmaakaevanduses (Aarna 1989; Reinsalu 2019).

Nagu kõigis teistes Eesti praegustes põlevkiviavakaevandustes kasutati ka Aidus vaalkaevandamise meetodit. Nii kaevandatakse, kui katendi paksus ei ületa 30 meetrit. Kaevandustööde käigus avatakse maavara pikkade ribadena ehk tranšeedena (Joonis 2). Selle jaoks puuritakse aluspõhja lõhkamiseks augud (vt. A Joonis 2), kuhu paigutatakse lõhkeaine, millega katend siis õhatakse. Lõhatud katend kaevatakse välja (vt. B) ja paigutatakse tranšee kõrvale, puistangusse, ning põhja jäänud maavara eemaldatakse (vt. C). Edasi avatakse katend ammendunud tranšee kõrval ning sealt välja kaevandatavad jäägid ladustatakse ammendunud tranšeesse ja protsess kordub (vt E). Tööde lõpuks jäävad alles viimased tranšeed (vt. D), mida enam ei täideta kuna kõrvale ei jää piisavalt õhukese katendiga maavara (Aarna 1989; Karu et al. 2012; Reinsalu 2019).



Joonis 2. Vaalkaevandamise skeem (joonise alus: Eesti mäeinstituut 2012)

Vaalkaevandamisest tekkiv maastik on kaevandamise eelsest täiesti teistsugune. Järele jäävad suured künkad ja vähe-viljakas aheraine maastik. Seepärast on Eestis juba alates 1960ndatest sihipäraselt endisi kaevandusalasid korrastama ehk rekultiveerima hakatud. Rekultiveerimisel on kaks etappi: tehniline ja bioloogiline. Tehnilise etapi ajal puistangud tasandatakse ja taastatakse mullaviljakus (vt F Joonis 2). Korrastatud aladel peavad väljaveotranšeede nõlvade kalded üldiselt jääma 35 ja 38 kraadi vahele, et need korrastatuks lugeda (Eesti Energia 2017). Aidu rekultiveerimisel oli normiks 30 kraadi, kuna keeruliste mäetingimuste tõttu ei olnud laugemat nurka võimalik saavutada. Kohati jäid nõlvad 30 kraadist veel järsumaks (Joonis 3), kuna karjääri sulgemise järgseteks korrastustöödeks oli sinna juba tunginud vesi, mis tegi need tööd raskeks. Bioloogilise etapi käigus istutatakse rekultiveeritud alale sobivad taimed. Üldiselt korrastatakse Eestis endised karjäärialad metsamaaks (Viil 2010; Reinsalu 2019). Aidus istutati karjääri alale 4 miljonit puud (Paluoja 2014). Samuti üritati taastada kaevandamiseelseid põllumaid Aidu-Liiva küla territooriumil, see aga väga edukaks ei kujunenud (Kriis 2004; Viil 2010).

Joonis 3. Erineva nõlvakallakusega alad Aidu karjääris (Aidu karjääri kaevandamise lõpetamise ja maa korrastamise projekt 2017).

2.3 Hüdroloogilised ja geoloogilised tingimused Aidu karjääris

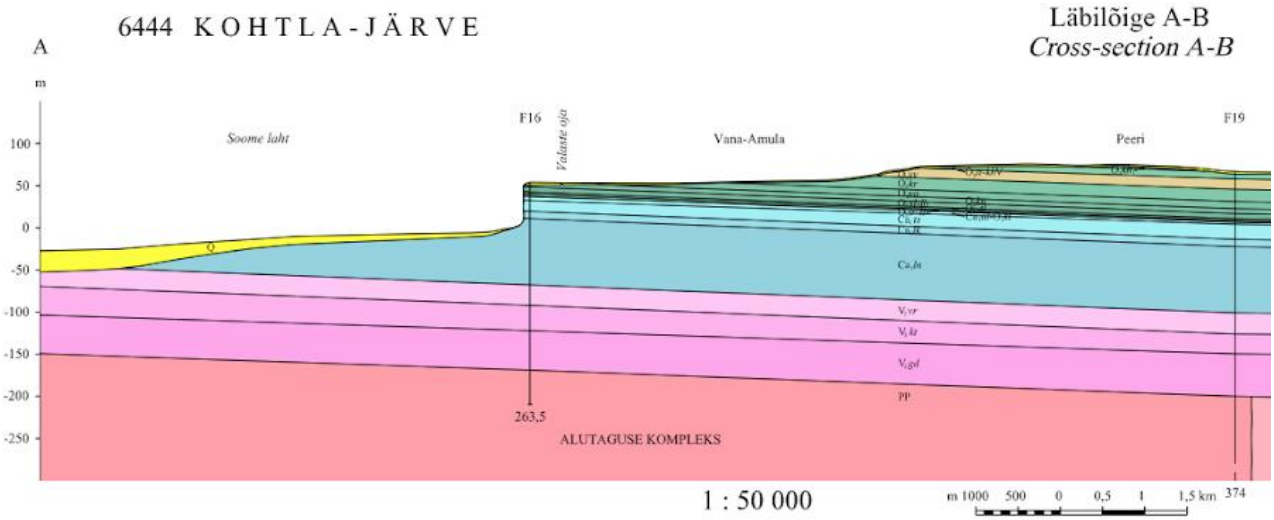
Peale aktiivse kaevandamise lõppu pandi 2012. aasta augustis veepumbad kinni ja karjäär hakkas veega täituma (Põhjarannik 2012). Sulgemisjärgseks veetaseme kõrguseks planeeriti absoluutkõrgust 42 meetrit, mille stabiilsuse tagamiseks nähti ette ülevoolude rajamine Ojamaa jõkke. Eeldati, et tranšeede veega täitumiseks läheb aega kaks ja pool aastat, kuid tegelikult täitusid need umbes kahe aasta jooksul (Eesti Energia 2017). Krause ja Palmi (2021) töös kirjeldati veega täitunud väljaveotanšeesid kui fjorde ning ka käesolevas bakalaureusetöös kasutatakse sama sünonüümi.

Karjääri stabiilseks veetaseme absoluutkõrguseks on jäänud umbes 42 meetrit. 2018. aastal kõikus veetase sõudekanalis 42,01 ja 42,17 meetri vahel (Sedman 2018). Aastatel 2002-2008 tuli karjääri vesi peamiselt kolmest allikast: sademed (26%), Kohtla kaevanduse sissevool (33%) ja pinnasevee dreenimine (41%). Juurdevoolu kogumaht oli keskmiselt 134 976

m³/ööpäevas (Eesti Energia 2017). Kuna karjääri veekogude toiteallikad on samad, siis on alust arvata, et veetase on sarnane igas järvistu osas.

Savitski ja Savva (2009) koostatud mudeli järgi pidi veetaseme stabiliseerumise järgseks väljavooluks saama 74 000 m³/ööpäevas, mis saavutati Ojamaa jõe ülevoolu rajamisega. Veetaseme tõustes hakkas juurdevool vähenema idapoolsetest kaevandustest nagu Kohtla ja Sompa. Kohtla kaevanduses tõusis vesi 44,4 meetrisele absoluutkõrgusele (Eesti Energia 2017). Peale Aidu pumpade sulgemist imbub suur osa vett, mis Ojamaa jõe ülevoolu ei lähe, kivimikihidesse ja liigub Ojamaa kaevanduse poole (OÜ Steiger 2007). Ojamaa kaevanduses pumbatakse see vesi välja ja suunatakse samanimelisse jõkke.

Üks tähtsamaid tegureid, mis määrab ära Aidu järvistu morfoloogia, on üldtuntud fakt, et Eesti aluspõhja kivimid, sealhulgas ka põlevkivi ja seda katvad settkivimikihid on lõunapoole kaldu (Keskkonnaministeerium 2015). See tähendab, et mida lõuna poole minna, seda sügavamale tuleb maavara kättesaamiseks kaevata (Joonis 4). Vastavalt sellele muutub ka Aidu karjääri kujunenud järvistu lõuna poole liikudes aina sügavamaks. Kui sügavaks täpsemalt, sõltub aga konkreetse piirkonna geoloogilistest eripäradest. Kuna Eesti geoloogiline ehitus on küllaltki mitmekesine, siis tavaliselt esitatakse kivimikihtide kaldenurka vahemikuna, milleks on üldiselt 8 kuni 15 minutit (Meidla 2014; Porman ja Valner 2016; Floden ja Tuuling 2016). Vaid mõnel üksikul juhul on välja toodud konkreetseid suurusi. Tulchinsky (2008) väidab, et kaldenurk on 11 minutit. Estonia 2 kaevandusloa KMH (2021) ja Kiviõli üldplaneering (2004) pakuvad kaldenurgaks 3 meetrit 1000 kohta, mis on umbes 10 minutit. Aarna (1989) kirjutab, et põlvekivikihindi langemisnurgaks on 3,5 meetrit 1000 kohta ehk siis umbes 12 minutit



Joonis 4. Eesti aluspõhja läbilõige Kohtla-Järve läbilõikejoonel (Maaamet geoloogiline andmebaas 2022).

2.4 Veekogude modelleerimine

Modelleerimine on tänapäeva teaduses üks olulisemaid töövõtteid. Mudelite abil saab visualiseerida nähtusi ja protsesse, kasutades eksperimentaalseid andmeid. Samuti kasutatakse mudeleid hüpoteetiliste situatsioonide hindamiseks ja prognoosimiseks (Rogers 2012). Hüdroloogilist modelleerimist on tehtud juba inimkonna algusest, kui oli vaja planeerida kuhu oma elukoht ehitada ja kuidas vesi seda mõjutada võib. Selline modelleerimine oli väga primitiivne ja teaduskauge (Ogden 2021).

Tänapäeval kasutatakse modelleerimist hüdroloogias väga laialdaselt. Enam ei nimetada modelleerimiseks otsust oma maja hooajaliselt täituvale jõesängile mitte ehitada. Küll aga võetakse veekogu äärde ehitamise otsuseid tänapäeval vastu mudelarvutustele tuginedes. Üheks põhiliseks teemaks, milleks tänapäeval hüdroloogilist modelleerimist rakendatakse on vee voolusuund ja -kogused (Awasthi et al. 2018; Abraham et al. 2019; Dhara ja Vekariya 2020). Neid mudeleid kasutatakse näiteks irrigatsioonikanalite planeerimisel või hüdroelektrijaamade rajamisel. Veel uuritakse veebilanssi ehk tehakse arvutusskeem, kus arvestatakse vaadeldava veekogu valgalale saabuvaid ja sealt lahkuvaid veekoguseid (Alavipanah et al 2018; Engel et al. 2021; Abdelaziz ja Kheimi 2022). Need on olulised põudade ja üleujutuste prognoosimisel ning erinevate veemajanduslike otsuste tegemisel.

Veemahte modelleeritakse samuti üsna ulatuslikult, kuid pigem keskendutakse selle muutustele ajas ja nende muutuste prognoosimisele (Ahopelto et al. 2019; Merchant ja

Woolway 2019). Nii on võimalik väga kindlate ja arusaadavate arvväärtustega näidata kliimamuutuste mõjusid.

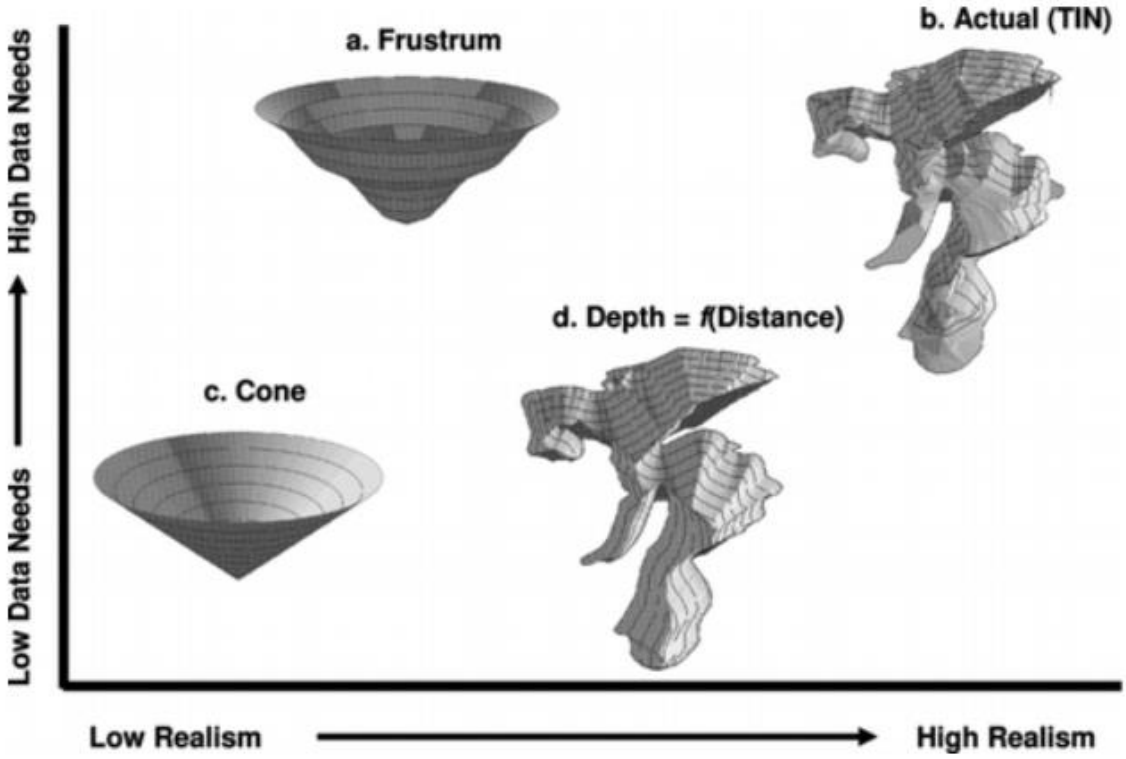
Veemahu batümeetrilisi modelleerimisi väga palju ei tehta. Selle põhjus võib olla see, et mudelid ei ole kunagi perfektselt täpsed ning veemahu leidmisel saab täpsemaid tulemusi batümeetriliste uuringutega. Samas on ulatuslikud uuringud kallid. Veekogude batümeetrilisi mudeleid koostatakse tavaliselt sellisel juhul, kui andmeid antud objekti kohta on vähe ja välitööde korraldamiseks pole ressursse. Sageli võimaldab arvutis loodud ligikaudne mudel planeerida tulevasi väliuuringuid ja seega jällegi kokku hoida nii aega kui raha.

Veemahtude arvutamisest kirjutatakse põhjalikult töös Hollister ja Milstead (2010). Enne personaalarvutite ajastut arvutati siseveekogude mahtude leidmiseks tavaliselt planimeetriga samasügavuskontuuride pindalad ning individuaalselt leiti igale ühele neist vastav ruumala. Nende ruumalade liitmise tulemus ongi veekogu maht. Kuigi see meetod on sajandeid hästi töötanud, eeldati selles, et veekogu oleks kui erinvate koonuste läbilõigetest kokku pandud. Nüüdsel ajal olemasolevate GIS lahendustega saab luua palju detailsemaid järvede põhja kaarte. Selleks on küll vaja suuremahulisi batümeetrilisi uuringuid, kuid tulemus on varasemast meetodist palju usaldusväärsem. Kuna batümeetriliste andmete kogumine on kulukas, siis arendatakse aktiivselt GIS-i ja kaugseire meetodeid, mille abil saab veemahte arvutada ka piiratud andmestiku põhjal. (Hollister, Milstead 2010)

Veemahtude modelleerimiseks on üks võimalus kasutada kõrgusmudelit. Kui järv on looduslikus orus, siis saab eeldada, et seda ümbritsev reljeef kajastab veekogu põhjareljeefi (Chen et al, 2019). Eelnevalt viidatud Chen et al. (2019) artiklis leiti, et mudeli põhjal arvutatud veemahud on rahuldava täpsusega, kuid neid ei saa kasutada edasistes arvutustes, mis vajavad täpseid tulemusi. Samas öeldi, et selle metoodikaga on mõistlik uurida raskesti ligipääsetavaid järvi, kus batümeetriliste uuringute maksumus oleks veel suurem kui tavaliselt. Kõrgusmudeli põhjal on ka modelleeritud Iraagis Mosuli paisjärve ja pärast mudelit eelnevalt tehtud batümeetriliste töödega võrreldes leiti, et mudel oli olnud väga täpne, r=0,98 (Abo et al 2017). Tehtud on ka töid, kus vee sügavusi (mille abil saaks leida ka veemahtu) arvutatakse multispektraalsetelt satelliitpiltidelt (Liu et al. 2015; Chipman 2019).

Käesoleva töö eeskujuks olevas Hollisteri ja Milsteadi (2010) uuringus põhines järvede veemahu mudel lihtsate geomeetriliste kujundite ruumala arvutamisel. Veemahu hindamiseks kasutati koonust, kus tipuks võeti silma järgi hinnatud järve sügavaim punkt ja aluse servaks

sai järve kaldajoon. Koonuse külgede sügavused arvutati tipu ja kaldajoone kauguste vahede järgi (Joonis 5).



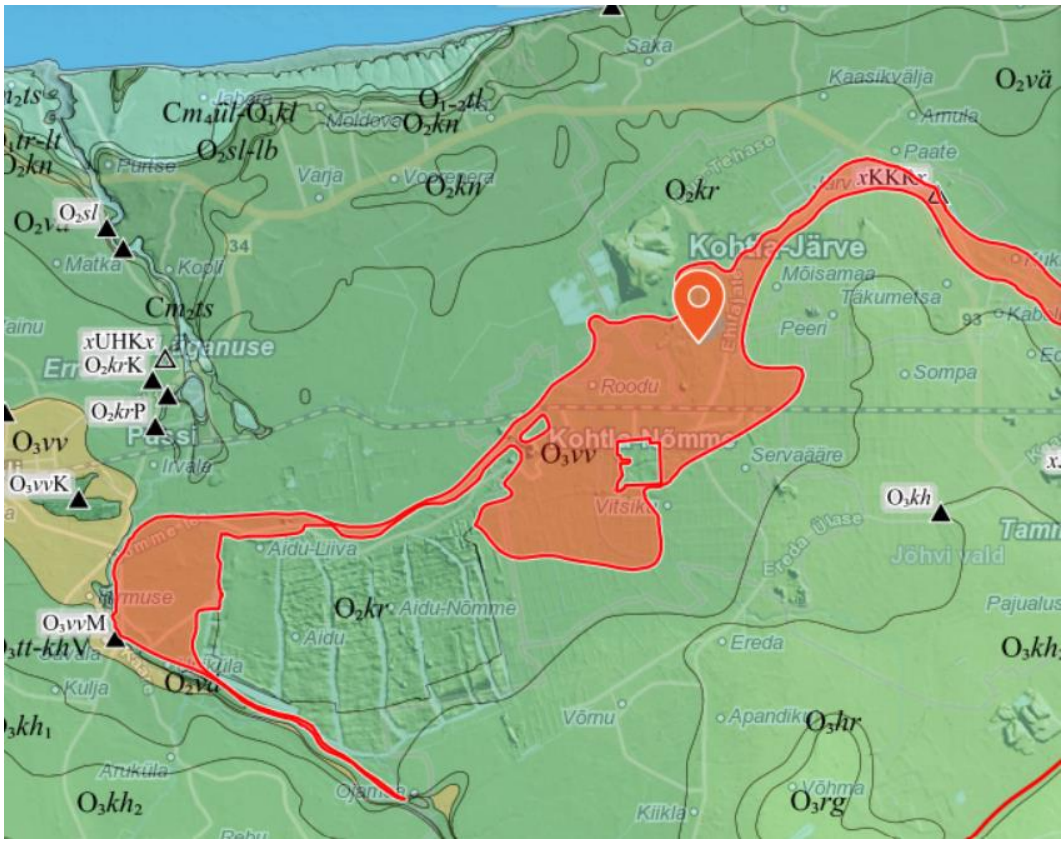
Joonis 5. Kujutised a ja c tähistavad Hollister ja Milstead (2010) töös kasutatud lihtsate kujundite abil modelleeritud järvi. Joonisel ülespoole jäävad kujundid vajavad rohkem andmeid ja paremale poole jäävad on realistlikumad.

Kuna Hollister ja Milstead (2010) kasutasid oma uuringus veemahu leidmiseks lihtsaid geomeetrilisi kujundeid ja said sealt rahuldavaid tulemusi, siis võib arvata, et veemahte on võimalik leida ka muude kujundite abil. Näiteks Eesti aluspõhja ehituse tõttu peaks Aidusse tekkinud järvistut saama uurida kolmnurga valemi järgi (vt Metoodika peatükk).

3. Andmed ja Metoodika

3.1 Andmed

Aidu järvistu veemahu mudeli üks tähtsamaid sisendeid on põlevkivi avamusjoon. See saadi Maaameti geoportaalist, geoloogiliselt baaskaardilt. Avamusjooneks võeti Viivikonna kihistu avamusala, stratigraafilise indeksiga O3vv, asukoht (Joonis 6). Samuti oli vaja teada veetaseme kõrgust merepinnast, milleks on 42 meetrit (vt. „1.3 Hüdroloogilised ja geoloogilised tingimused”). Aidu järvistu veekogude piirid võeti ETAK-i (Eesti topograafia andmekogu) siseveekogude kaardikihist. Põlevkivikihindi kaldenurga kohta on täpsemalt räägitud peatükis “2.3 Hüdroloogilised ja geoloogilised tingimused”. Andmeid põlevkivikihi kohta leiti ka VEKA puurkaevude andmebaasist. Kukersiidi kihi paksused ja sügavused olid seal kirjeldatud osade punktide lõimisevalemites.

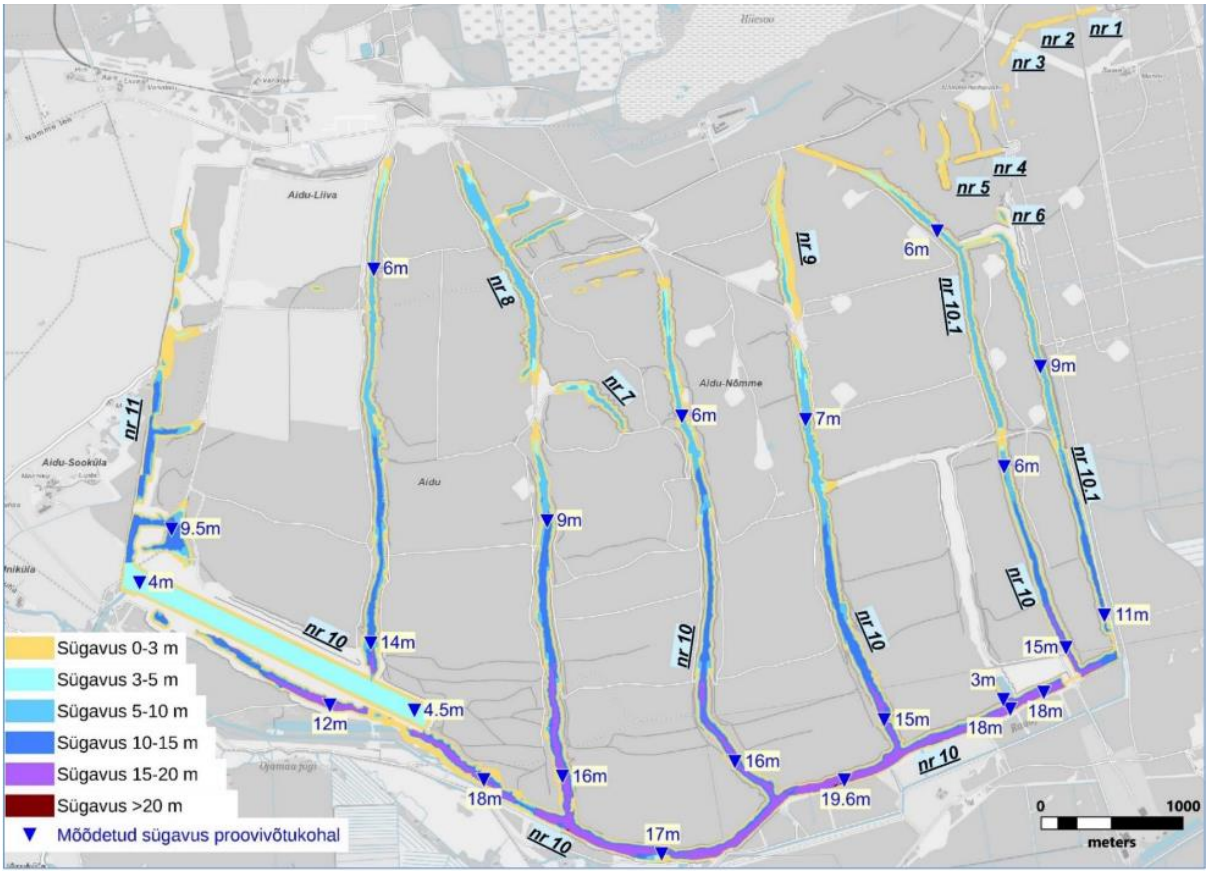


Joonis 6. Mudelis kasutatud aluspõhja O3vv kihi avamus, mudelis võeti avamusjooneks avamusala põhjapoolseim serv (Maaameti veebirakendus 2022)

Aidu sõudekanali kohta, mis on rajatud süvendatud puistangusse ja täidetud väljaveotranšeesse, tuli leida ülejäänud karjäärist erinevad andmed. Kuna sõudekanal on

rajatud vastavalt rahvusvahelise sõudeliidu nõuetele, siis sellest tulenevalt peab see olema vähemalt 3,5 meetrit sügav (Sedman 2018).

Aidus on vee sügavusi mõõdetud ka varasemalt. Krause ja Palm (2021) on lääne poolt teise fjordi põhjapoolse otsa sügavuseks märkinud 5,5 meetrit ja sama fjordi suudme sügavuseks kuni 15 meetrit. LIFE IP CleanEST-i (2020) ülevaates on Aidu karjäärist olemas sügavuskaart terve järvistu ulatuses (Joonis 7). Mõõtmise ega interpoleerimise metoodikat pole aga viidatud töös esitatud.



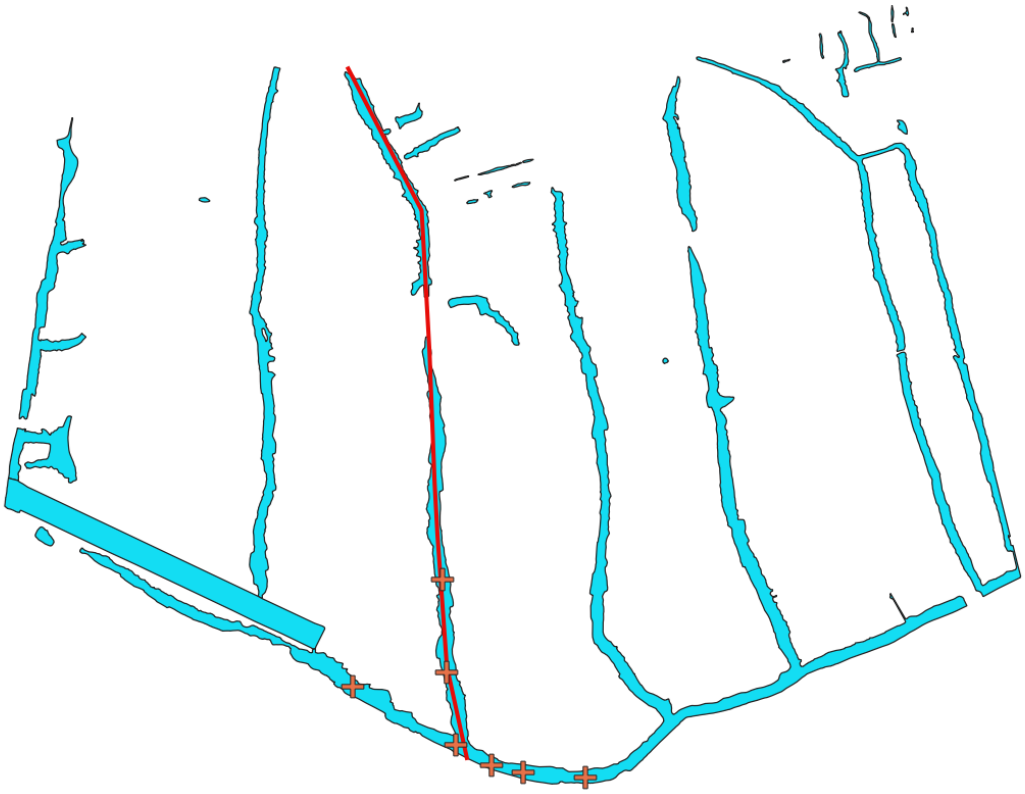
Joonis 7. Aidu karjääri sügavuskaart (LIFE IP CleanEST… 2020)

09.04.2022 käis käesoleva töö autor Aidus välitöödel, kus sai Kaari Uibomägi abiga käsitsi mõõdetud vee sügavusi. Selleks puuriti jää sisse auke, millest lasti vette märgitud köis, mille pealt sai sügavusi lugeda (Joonis 8). Köie otsa oli riputatud raskus (pomm), mis põhja vajudes köie sirgu tõmbas. Mõõtekohtade asukoha määramiseks kasutati käsi-GPS Garminit ja rakendust Google Maps.

Joonis 8. Välitöödel kasutatud märgistatud mõõteköis. (Foto: Kaari Uibomägi)

Mõõtmised toimusid karjääri lõunaosas (Joonis 9). Enamus mõõtepunkte asusid lääne-ida suunalises fjordis, kus eelduste kohaselt pidid olema kõige sügavamad kohad järvistus. Veel tehti mõõtmisi lääne poolt kolmandas põhja-lõunasuunalises fjordis. Algselt oli planeeritud kaks välitööde päeva 9. ja 16 aprillil. Jääolude järsu halvenemise tõttu jäid aga 16. aprilli välitööd ära. Seetõttu ei teostatud ka sellele päevale planeeritud mõõtmisi karjääri idaosas.

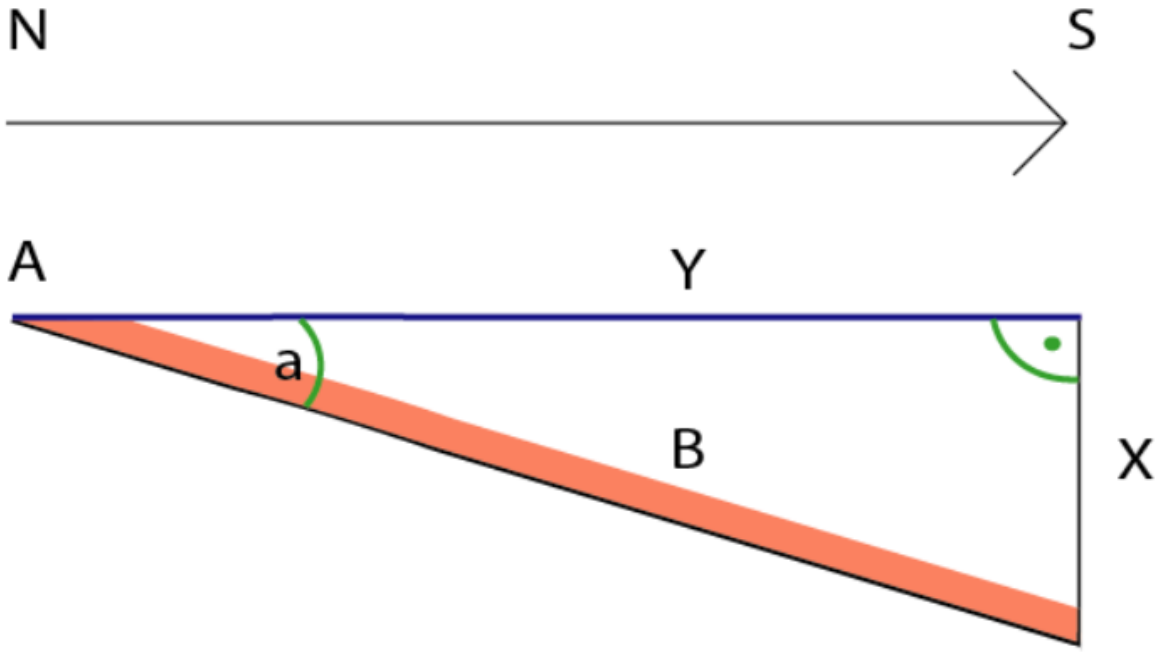
Välitööde käigus mõõdeti sügavused 10 punktis. Nendest üks sattus alale, mida oli täidetud ja kus vee sügavus jäi alla meetri. Kaks mõõtmist tehti kaldale liiga lähedal ja nende sügavusi ei saa töö mudeliga võrrelda, kuna käesolevas töös kallaste langenurki ei arvestata. Kokku jäi alles seitse usaldusväärset sügavuse mõõtmise tulemust. Need lisati varem kirjandusest (Keskkonna ministeerium 2020) leitud tulemustele, 21 mõõtmistulemuse juurde. Seejärel kasutati neid mudeli verifitseerimisel (Lisa 1; Lisa 2; Lisa 3).



Joonis 9. Välitöödel tehtud mõõtmiste asukohad ja Joonisel 12 oleva graafiku läbilõikejoon

3.2 Metoodika

Teades, et veekogude mahte ja sügavusi on võimalik modelleerida piiratud andmete ja lihtsate kujundite abil (Hollister Milstead 2010) kasutati käesolevas töös uuritava Aidu karjääri modelleerimiseks Eesti aluspõhja geoloogilisel ehitusel põhinevat täisnurkset kolmnurka (Joonis 10). Selle hüpotenuusiks on karjääri põhi põlevkivi avamusjoonest eeni (s.t. kohani, kus kaevandamine lõpetati), pikemaks kaatetiks on veetaseme kõrgus ja lühemaks ee kõrgus. Veekogu eeldatavaks sügavuseks on lühem kaatet, mis arvutatakse siinusteoreemi kaudu.



Joonis 10. Mudeli aluseks olev täisnurkne kolmnurk. A- Põlevkivikihi avamus, Y-Punki kaugus avamusjoonest, C-Põlevkivikiht, X-Sügavus, a-Põlevkivikihindi kaldenurk

Algses mudelis (Mudel 1) kasutatakse 11 minutilist kaldenurka. Mudeli hilisemaks parandamiseks, tehti mudelid ka 12 (Mudel 2) ja 13 (Mudel 3) minutilise kaldenurgaga. Nendest kaldenurkadest väiksemaga mudeli tegemist töö autor mõistlikuks ei pidanud, kuna mudel 1 koostamisel saadud kogemustest selgus, et nende puhul oleksid mudeli veesügavused olnud palju väiksemad kui tegelikkus.

Sügavuste arvutamiseks igas antud punktis kasutati siinusteoreemi järgmise valemi põhjal:

$$X = \frac{Y}{\sin(90 - a)} * \sin(a)$$

X = Eeldatav põlevkivikihi sügavus antud punktis

Y = Punkti kaugus põlevkivi avamusjoonelt

a = Põlevkivikihindi langemisnurk

Mudel tehti rakenduses QGIS 3.10. Andmete peatükis kirjeldatud avamusjoonelt tõmmati “advanced snapping tooliga” 15 sirgjoont lõunasuunas. Keskmised 13 neist olid 500 meetriste vahedega. Lääne poolt esimene ja viimane joon jäid veekogude äärtesse, et katta ära kogu järvistu. Vahendiga “points along geometry” tekitati tõmmatud joontele 500 meetriste vahedega 176 punktiga võrgustik. Nende kaugusega avamusjoonest arvutati igale punktile

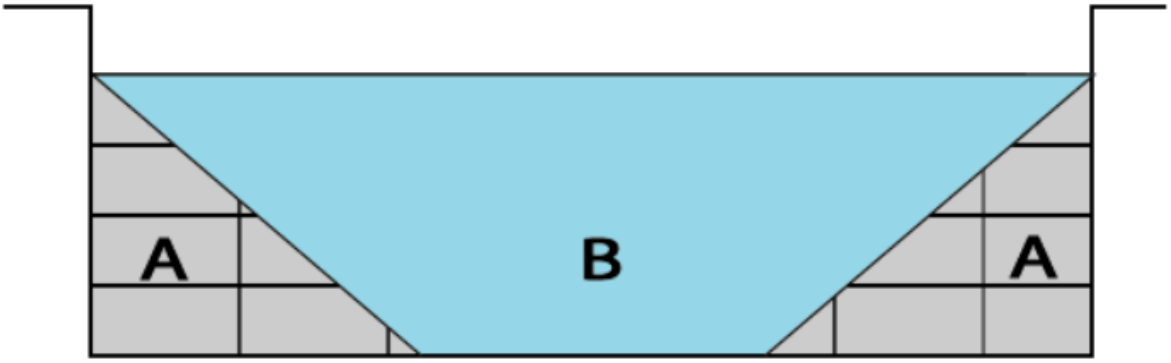
kolmnurga mudeli kaudu nende eeldatav sügavus. Nii loodi Aidu karjääri kohale sügavuspunktide võrk.

Saadud sügavustest koostati Triangulated Irregular Network (TIN) interpoleerimise tööriistaga sügavusi kujutav rasterkaart. Saadud sügavuskaardist tuli välja lõigata veekogud, milleks kasutati eelpool mainitud ETAK-ist saadud siseveekogude kaldajooni. Nendest tuli omakorda välja lõigata veest tühjad settebasseinid, mis leiti Maaameti ortofotolt ja sõudekanal, mille sügavusi mudeliga arvutada ei saanud. Kokku on kogu käesolevas töös käsitletava järvistu, koos sõudekanaliga, pindala 2,92 km^2.

Lõpuks arvutati tööriistaga “Raster Surface Volume” sõudekanali ja ülejäänud järvistu veemahud ning need liideti omavahel kogu järvistu veemahuks.

Mudeli verifitseerimiseks sai mudeli poolt arvutatud sügavusandmeid võrreldud välitöödel kogutud ja kirjandusest leitud sügavusandmetega. Mudel tunnistati "heaks" juhul, kui arvutatud ja mõõdetud punktide erinevus oli vähem kui kaks meetrit. Sedavõrd suur vea hinnang oli valitud kahel põhjusel. Esiteks moodustab see ca 10% järvistu eeldatavalt sügavaima koha väärtusest (20 m). Teiseks, kõige olulisemaks põhjuseks on aga see, et antud mudel eeldab, et veekogu põhi on täiesti ühetasane. Tegelikult ei ole see nii - tõenäoliselt on väljaveotranšeesid osaliselt täidetud, et põlevkivi vedavad veoautod paremini liikuda saaksid.

Vea hindamiseks arvutati mudeli ja mõõtepunktide vahe keskmine ning see väärtus korrutati läbi järvistu pindalaga. Seeläbi leiti kiht, mida vastav mudeli verisoon kas üle- või alahindab. Lisaks üritati hinnata mudeli ja tegelikkuse erinevust selles osas, et mudelis on fjordide seinu arvestatud püstloodistena, kuigi tegelikult on need üldiselt umbes 30 kraadise nurga all (Joonis 11).



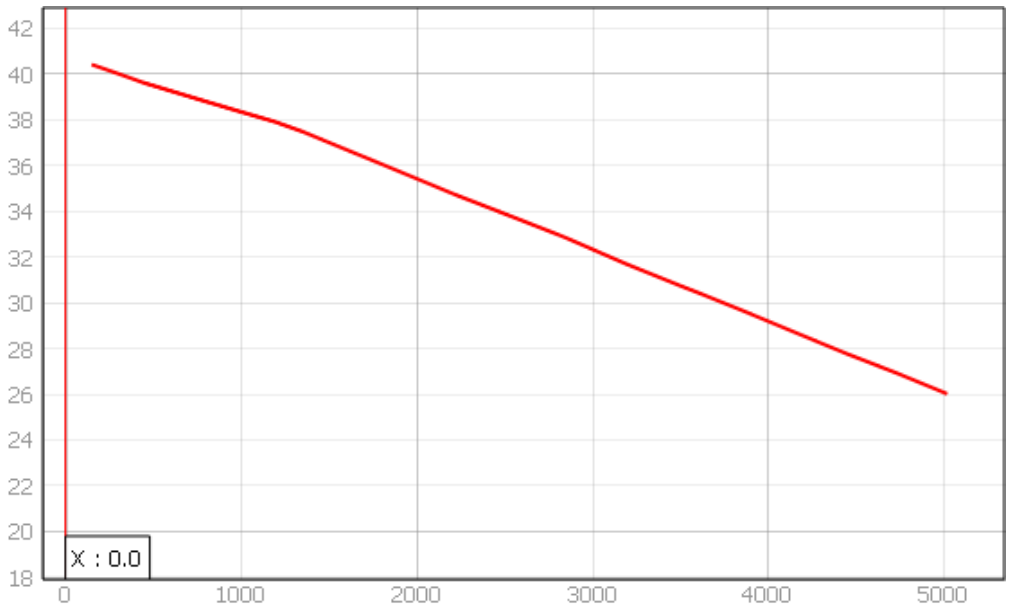
Joonis 11. Tegelik karjääri veekogude läbilõige (B) ja mudelis juurde arvestatud tegelikult täidetud kaldaääred (A).

Kaldaäärte mittearvestamise tõttu tekkinud vea leidmiseks uuriti ida poolt kolmanda fjordi suudmeala läbilõiget, kus võeti kogu ristlõike sügavuseks seal oleva mõõtepunkti sügavus (15 m) ja laiuseks mõlemapoolse kalda kaugus üksteisest (80 m). Antud ristlõike pindalaks on 1200 m^2. Omastades joonisel 11 kujutatud kolmnurkadele peatükis “2.3 Avakaevandamine” käsitletud nõlva kalde (30°), saab arvutada mõlema kolmnurga pindala, milleks 65 m^2. Kolmnurkade summa 130 m^2 moodustab kogu ristlõikest umbes 11%, ehk siis võib eeldada, et järvistu tegelik maht on u. 11% võrra väiksem kui mudeli hinnang.

4. Tulemused

Järgnevate tulemuste paremaks mõistmiseks tasub meeles hoida, et madalam mudel tähendab, et enamus sügavused on mudeli järgi väiksemad kui vastavatel kohtadel tehtud mõõtmiste järgi. Ning sügavam mudel tähendab vastupidist. Kontrollpunktis kus väärtus, mis tähistab selle vahe mudeliga, algab miinusmärgiga (-) on mudeli sügavus suurem, kui seal samas tehtud mõõtmise järgi. Positiivse väärtusega punktides on, aga mudeli sügavus väiksem, kui mõõtmise järgi.

Modelleerimise käigus saadud järvistu sügavused suurenesid oodatavalt põhja-lõunasuunas. Sügavused algses mudelis (Mudel 1)varieerusid 1,61 (abs. kõrgus 40,39 m) meetrist karjääri põhjapoolseimas veekogude otsas kuni 19 (abs. kõrgus 26 m) meetrini kagupoolseimas otsas. Oodatult muutusid sügavused suuremaks peaaegu lineaarselt. Jõnks graafiku algusest umbes 1000 meetri kaugusel (Joonis 12) on tingitud sellest, et joon läbib fjordis täidetud ala (vt Joonis 9).



Joonis 12. Aidu karjääri põhja absoluutkõrgused karjääri lääne poolt kolmandas fjordis. (Ühikud joonisel on meetrites ja läbilõikejoone asukoht on märgitud Joonisel 9)

Mõõdetud veesügavused mudel 1 omadega täpselt ei kattunud, kuid mudeli ja reaalsuse vahe jäi enamuses punktides alla vea piiriks võetud 2 meetri (Lisa 1). Sügavused langesid õigetesse vahemikesse sõudekanalist lõunas ja põhjas olevates soppides. Samuti langevad mudeli- ja mõõtmisandmed hästi kokku lääne poolt neljandas ja viiendas fjordis. Kõige suuremad erinevused tekkisid uuritava ala kaguosas, kus sügavused oleksid pidanud mudeli järgi olema umbes 19 meetrit, kuid tegelikult on seal mõõdetud sügavuseks 11 ja 15 meetrit. Lääne poolt

teises ja kolmandas fjordis on märgata umbes 2 meetrist nihet mudeli ja reaalsuse vahel. Lääne-idasuunalises fjordis on mudelijärgseks sügavusvahemikuks suures osas 13-17 meetrit, kuid mõõtmiste tulemused jäävad 18 ja 20 meetri vahele. (Lisa 1)

Kokku on 28 mõõtmispunktist 18 päriselt mõõdetud sügavus suurem, kui mudeli järgi. Enamus neist jäid uuritava ala lääneosasse. Karjääri lõunaosas, kus on ka kõige rohkem mõõtmisi tehtud, jäi mudel kohati kuni 4 meetrit madalamaks, kui reaalsus (Lisa 1).

Kui arvutada 28 mõõtmispunkti ja mudeli sügavusandmete erinevuse keskmine, siis selleks on 42 cm. Seda keskmist mõjutavad aga kolme eriti suure veaga punkti väärtused (mudel 1 puhul -7,18, -6,14 ja 4,1 m). Neid kolme punkti on võetud kui erindeid ja jäetud keskmise arvutamisel välja. Sellisel juhul on 25 allesjäänud mõõtepunkti keskmine viga 0,83 m.

Kaldenurga muutmisel 12 minuti (Mudel 2) peale on mudelis sügavused muutunud suuremaks ning selliseid punkte oli 14. Valdavalt on sellised kohad karjääri ida- ja lõunaosas (Lisa 2).

Üldkokkuvõttes paranes kaldenurga muutmisega ühe minuti võrra ka mudeli täpsus. Mudel 2 järgi on aktsepteeritava veaga punkte 21 (Lisa 2). Mudeli kõigi punktide keskmine viga oli -0,88 m, kuid kuna seda keskmist mõjutasid selgelt suured vead karjääri idaosas (-8,86, -7,28 ja -4,43 m, NB! mudeli suure veaga punktid ei kattu omavahel), siis arvutati ka viga ilma nende tulemusteta. Viga allesjäänud 25 punktiga oli -13 cm.

Katsetused 13 minutilise kaldenurgaga (Mudel 3) näitasid, et see nurk on liiga suur. Mudeli sügavused olid mõõtmistest suuremad 21 punktis. Alla 2 meetrise veaga punkte oli mudel 3 järgi vähem, kui eelmisena kirjeldatud mudelis 2 (17). Suuremad vead on nihkunud idast läände (Lisa 3). Kõigi mõõtepunktide keskmiseks veaks oli -2,19 m ning eemaldades kolm kõige suurema veaga punkti (-10,6, -8,42 ja -6,09 m) jäi veaks -1,37 m.

Mudeli 1 järgi arvutati kogu Aidu järvistu vee mahuks 28,1 miljonit m^3. Mudel 2 veemaht oli 29,2 miljonit m^3 ja mudel 3-s oli see 31,7 miljonit m^3. Seega kaldenurga muutmisega vaid 1 minuti võrra muutub järvistu veemaht üle miljoni kuupmeetri võrra. Arvestades mudeli ja 25 mõõtepunkti vahelist keskmist viga, võib eeldada, et tegelikult on Aidu järvistus 0,4 miljoni m^3 võrra vähem vett, kui parim mudel (Mudel 2) näitab. Arvestades nii kaldaäärte viga kui ka mudeli ja mõõtmiste vahelist viga(mudeli veemaht + keskmine viga +11% viga) on mudelite veemahud järgmised:

Mudel 1-27,4 miljonit m^3 (28,1+2,4-3,1)

Mudel 2- 25,8 miljonit m^3 (29,4-0,4-3,2)

Mudel 3- 24,2 miljonit m^3 (31,7-3,5-4)

5. Arutelu

Ükski mudel ei suuda tegelikkust täielikult kirjeldada ning alati jääb sisse mõõtemääramatus. Mudel 1 jäi enamjaolt madalamaks, kui tegelikkus ehk selle sügavused olid väiksemad kui varasemalt mõõdetud sügavused. Mudelit luues oli töö autoril eeldus, et mudeli järgsed sügavused on reaalsusest suuremad. Selle eelduse põhjuseks on kaevandusjärgne tranšeede täitmine, mida tehti veokitele sõitmise mugavamaks tegemise nimel. Samas oli keskmiseks mõõteveaks 0,83 cm ja 28-st kontrollpunktist hästi, ehk alla 2 meetrise vahega, kokku 17 punkti (Lisa 1). Seda võib lugeda rahuldavaks tulemuseks.

Kuna Mudel 1 osutus varasematest mõõtmistulemustest madalamaks, siis võrreldi sügavusi ka mudelite 2 ja 3-ga. Mudeli sügavuste suurendamiseks muudeti kaldenurgad 12 ja 13 minuti peale.

Muudetud langemisnurgaga mudelitest oli parim 12-minutilise kaldega mudel ehk mudel 2, mille keskmine viga oli kõigest -13 cm. Samas ei lahendanud see endiselt probleemi, et poolte mõõtmispunktide veesügavused on suuremad kui vastavatel kohtadel mudelis.

Mudelis 3 on rohkem suuri vigu, kuid enamus sügavused on mudelis suuremad kui mõõdetud. Antud mudelis torkab silma, et kõik suured vead, v.a üks lõunaosas ja kaks sõudekanali läheduses, asuvad karjääri idaosas. Vigane ala algab enam-vähem kohast, kust algab põlevkivi avamusjoone järsk tõus põhja poole.

Kuna idaosas on tehtud üsna vähe mõõtmisi, ei saa täpselt öelda, miks just seal on kõige suuremad vead. Üks võimalus on, et probleem ongi vähestes mõõtmiste arvus ja olemasolevad mõõtmised võivad olla sattunud anomaalsetele aladele. Kuna need punktid käituvad siiski sarnaselt ja mudeliga 1 on neil kokkulangevus parem, võib oletada, et karjääri idaosas on geoloogiline rike, mistõttu tuleks sellele alale omistada laugem kaldenurk, kui läänes. Samuti ei sukeldu põlevkivi kindlasti sirge joonena maa alla, vaid on looduslikult mitmekesisem kui eeldatud sai.

Üks võimalus mudelit täpsemaks muuta oleks käsitleda karjääri eripiirkondi eraldi alamudelitena. Näiteks anda karjääri idaosale laugem kaldenurk, kuna seal on avamusjoon palju rohkem põhja liikunud ja jätta ülejäänud järvistu jaoks langemisnurk samaks või muuta see suuremaks. Karjääri võiks ka rohkemateks osadeks ja alamudeliteks jagada, kuid see eeldab ka täpsemaid geoloogilisi sisendandmeid.

Kriitiliselt tuleb suhtuda ka mudelite verifitseerimiseks kasutatavatesse sügavusmõõtmistesse. Nagu autor ise välitöödel koges, ei pruugi mõõtmistulemused olla kõige täpsemad, kuna kasutati improviseeritud mõõtmisvahendeid (mõõtmiskohas oli vee sügavus suurem kui algne mõõteköis, siis tuli seda käepäraste vahenditega pikendada, Joonis 9). Samuti võisid mõõtepunktid sattuda kohtadesse, kus mõõtjad ei saanud täpselt aru, kus põhi kätte jõudis või oli kallas liiga lähedal ning seetõttu oli tulemus vale.

LIFE IP CleanEST (2020) aruandest võetud sügavuste täpset mõõtmisviisi kirjeldatud ei olnud. Küll, aga oli osade mõõtepunktide kohta (mitte kõigi) olemas kaart punktide täpsete asukohtade ja koordinaatidega (Joonis 13). Sealt selgub, et mõned mõõtmised on tehtud kalda lähedalt, kus on eelduste kohaselt madalam kui veekogu keskel. Kuna mudelis kaldaäärte langemisnurgaga ei arvestatud on seal kirjeldatud ainult fjordide ristlõigete sügavaimat kohta ning seetõttu peaks ka kontrolliks tehtud mõõtmised olema tehtud võimalikult fjordide keskelt.

Joonis 13. Veeparameetrite mõõtmiskohad Aidu karjääri alal moodustunud veekogudes. (LIFE IP CleanEST… 2020)

Asjaolu, et fjordides ulatuvad vee alla 30-kraadised nõlvad, on Aidu batümeetrilise mudeli üks suuremaid määramatuse allikaid, kuna mudelis on eeldatud, et kõik nõlvad on püstloodis. Seega on fjordides mõnevõrra vähem vett, kui seda mudeli järgi olema peaks.

Mudeli 2 järgi, mis osutus kõige täpsemaks, on Aidu järvistu veemaht 25,8 miljonit m^3 (arvestatud on mudeli ja mõõdetud sügavuste keskmist- ja kaldaäärtes tulenevat 11% viga). Aidu üsna väikse pindala kohta (2,92 km^2) on seda päris palju. Puhtalt pindala poolest on Aidu võrreldav Pühajärve 2,94 km^2-ga, kuid selle maht 14 miljonit m^3 jääb Aidule pea kahekordselt alla (Keskkonnaagentuur 2019). Umbes sama palju jääb Aidu veemahule alla pindalalt Eesti neljas, Ülemiste järv, mis on üks Tallinna linna olulisemaid joogivee allikaid (AS Tallinna Vesi 2019). Aidu maht on võrreldav temast endast palju suurema, Võrumaal asuva, Vagula järve 27,5 miljoni m^3-ga (Mäemets 1977).

Käesolevas töös rakendatud mudel annab suhteliselt hea ülevaate nendest veemahtude suurusjärkudest, mis Aidu karjääri tekkinud järvistusse on kogunenud. Nagu tulemustest ja arutelust selgus, oleks mudelit võimalik täpsustada kui koostada igale järvistu osale oma alammudel. Ent nende loomiseks oleks vaja Aidus teha palju laiaulatuslikumaid batümeetrilisi uuringuid.

6. Kokkuvõte

Magevesi on väärtuslik ressurss, mis vajab globaalse kliimamuutuste ja rahvastiku arvu kasvu tingimustes üha suuremat tähelepanu. Ka Eestis on viimastel aastatel hakatud suuremat tähelepanu pöörama järvede olukorrale, sealhulgas mõõdistama väikejärvede mahtusid. Üks suuri veekogusid, mis on juba haaratud nii turismi- kui spordi valdkonda, on Aidu karjääri tekkinud järvistu. Kuigi seal on tehtud mitmeid veekvaliteeti puudutavaid uuringuid, pole selle veekogu mahtusid arvutatud.

Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata, kui palju on Aidu järvistus vett. Selle jaoks loodi mudel, mille aluseks võeti täisnurkne kolmnurk. Kuna veekogusid on edukalt modelleeritud kasutades lihtsaid geomeetrilisi kujundeid ka varem, siis oli põhjust optimismiks, et see õnnestub ka Aidus. Mudeli loomisel eeldati, et veekogu põhi on ühtlane tasapind, mis ühtib karjäärist välja kaevatud põlevkivikihi alumise servaga ja on vastavalt ka lõuna poole kaldu.

Mudeli verifitseerimiseks kasutati 28 mõõtepunkti andmeid, millest 7 olid saadud töö autori poolt tehtud välitöödelt. Mõõdetud sügavusi võrreldi mudelist saadud tulemustega ning nende keskmise erisuse järgi määrati ka veemahu erinevus mudelist.

Kõige olulisemaks muutujaks mudelis oli põlevkivikihindi kaldenurk. Erinevate nurgasuurustega katsetades osutus kõige täpsemaks 12-minutiline langemisnurk. Selle nurgaga oli mudeli keskmine viga oli -13 cm ning 21 kontrollpunktis 28-st jäi mudeli ja reaalsuse vahe alla kahe meetri, mida siin töös heaks loeti.

Mudeli suurimaks probleemiks on see, et fjordide nõlvu peetakse püstloodisteks, kuid tegelikult on need kergelt kaldu. See tähendab, et mudeli maht on hinnanguliselt 11% tegelikkusest suurem. Aidu järvistu ruumalaks saadi mudeli järgi 29,2 miljonit m^3. Kui aga arvestada eelnevalt välja toodud vigu, siis on selleks hoopis 25,8 miljonit m^3, mida on Eesti mõistes päris palju ning hinnanguliselt kuuluks Aidu järvistu mahu järgi Eesti järvede esikümnesse.

Edaspidi tuleks mudeli täpsustamiseks jagada järvistu alammudeliteks ja teha palju batümeetrilisi mõõtmisi. Kogu järvistu põhjareljeef tuleks lausaliselt kaardistada, kuna eeldatust keerukama aluspõhja ehituse tõttu ei ole ilmselt tegemist ühtlase tasapinnaga, nagu seda mudelis eeldatud sai.

Modelling the volume of the lakes formed in Aidu quarry

Karl Joann Jürimaa

Summary

Frsehwater is a valuable resource that has a growing need for attention as the global climate change and population growth continue. In Estonia more attention has recently been given to the state of the smaller lakes and their surveyance. One of the bigger bodies of water is Aidu quarry where tourism and sports already flourish. Even though surveys concerning the water quality there have been conducted in the past, the volume of the quarry hasn't been calculated yet.

The purpose of this bachelor's thesis is to evaluate the volume of water in the lakes that have emerged in the former quarry of Aidu. For this a model was created based on a right-angled triangle. Since modelling lake volumes using simple geometrical shapes has been done successfully in the past, there was reason for optimism that the same could be done with Aidu. For the model it was assumed that the bottom of the lakes is even and matches with the lower edge of the oil shale layer that is tilted southwards accordingly.

For the verification of the model data from 28 measurements were used of which 7 were measured by the author of this paper during field works. The depths were compared with the results of the model and from their average error the volume was adjusted.

The most important variable of the model was the gradient of the oil shale layer. From different angles the most accurate one was the model with 12 minutes. The average error using this angle was -13 cm. The difference between the model and real measurements was smaller than 2 meters, a figure that was considered acceptable in this bachelor's thesis, in 21 points out of 28.

The main problem of the model was the fact that the the sides of the fjords were considered as on a 90° angle even though in reality the angle was much smaller and the sides are naturally tilted. This means that the volume calculated with the model is about 11% larger than it really is. According to the model the volume of the Aidu lakes is 29,2 million m^3. If the previously mentioned errors are accounted for then the real volume would be 25,8 million m^3. In the context of Estonia that is quite a lot and would presumably be one of the 10 largest lakes by volume.

For the future model improvements the research area should be divided into sub-models and a lot of bathymetric measurements must be done. The whole relief of the bottom of the lakes should be mapped because of the much more complex geological setting of the bedrock than it was estimated in the model.

Tänuavaldused

Soovin tänu avaldada oma juhendajatele Mait Seppale ja Raivo Aunapile, kes mind igal sammul aitasid. Samuti tänan Kaari Uibomägit, kes minuga jää peale mõõtma tulla julges ja muidu niisama moraalseks toeks oli.

Kasutatud kirjandus

Aarna, A. (1989). Põlevkivi. Levikust, kaevandamisest, kasutamisest. Valgus, Tallinn. (152 pp).

Abdelaziz, S, M., Kheimi, M. (2022). A Daily Water Balance Model Based on the Distribution Function Unifying Probability Distributed Model and the SCS Curve Number Method. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 14(2). https://doi.org/10.3390/w14020143

Abraham, J., Dadashi, S., Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Minael, O. (2019). 3-D Numerical simulation of water flow over a broad-crested weir with openings. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 27:sup1, 88-96, doi: 10.1080/09715010.2019.1581098

Abo, R, K., Al-Muqdadi S, W., Khattab, M, F, O., Merkel B, J., Al-Muqdadi S, W. (2017). Generate Reservoir Depths Mapping by Using Digital Elevation Model: A Case Study of Mosul Dam Lake, Northern Iraq. Advances in Remote Sensing, 6(3): 161-174. doi: 10.4236/ars.2017.63012.

Ahopelto, L., Belinskij, A., Britschgi, R., Jääskeläinen, J., Keskinen, M., Orvomaa, M., Veijalainen, N. (2019). Severe Drought in Finland: Modeling Effects on Water Resources and Assessing Climate Change Impacts. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(8), 2450. https://doi.org/10.3390/su11082450

Alavipanah, S, K., Hamzeh, S., Jeihouni, M., Pilesjö, P., Toomanian, A. (2018). Long term groundwater balance and water quality monitoring in the eastern plains of Urmia Lake, Iran: A novel GIS based low cost approach. Journal of African Earth Sciences, 147(2): 11-19. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.017

AS Tallinna Vesi (2019). Keskkonnaaruanne 2019. Tallinna Vesi, Tallinn.

Awasthi, M, K., Hardaha, M, K., Nema, R, K., Pathak, R., Sharma, S, K. (2018). Ground Water Flow Modelling Using MODFLOW –A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 7(2): 83-88. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.011

Chen, X., Fang, W., Fang, Y., Hong, Y., Li, H., Lie, B., Tao, M., Wan, W., Zhang, G., Zhu, S. (2019). A New Digital Lake Bathymetry Model Using the Step-Wise Water Recession Method to Generate 3D Lake Bathymetric Maps Based on DEMs. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11, 1151; doi:10.3390/w11061151

Chipman, J, W. (2019). A Multisensor Approach to Satellite Monitoring of Trends in Lake Area, Water Level, and Volume. Remote Sensing, 11(2), 158; https://doi.org/10.3390/rs11020158

Dhara, T., Vekariya, P, B. (2020). Ground water flow modelling of Uben river basin using visual modflow. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 02(12): 620-628.

Eesti Energia (2017). ENEFIT Kaevandused AS Aidu karjääri kaevandamise lõpetamise ja kaevandatud maa korrastamise projekt. Eesti Energia, Jõhvi.

Engel, B, A., Feng, Q., Liu, W. (2021). Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model. Journal of Hydrology, 602(126786) https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126786.

Floden, T., Tuuling, T. (2016). The Baltic Klint beneath the central Baltic Sea and its comparison with the North Estonian Klint. Geomorphology, 263: 1-18. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.030

Hendrikson & Ko (2004). Kiviõli Linna üldplaneering. Kiviõli Linnavalitsus, Kiviõli.

Hollister, J., Milstead, W, B. (2010). Using GIS to estimate lake volume from limited data, Lake and Reservoir Management,26(3): 194-199.
https://doi.org/10.1080/07438141.2010.504321

Ott, I., Timm, H., Järvalt, A., Järvekülg, R., Kisand, A., Mäemets, H., Panksep, K., Pedusaar, T., Tammert, H., Tuvikene A., Tuvikene, L., Tõnno, I., Vilbaste, S. (2020). Siseveekogud: õpik kõrgkoolidele. Kalanduse teabekeskus, Tartu.

Karu V., Kolats, M,. Valgma, I., Väizene, V. (2012) Kaevandamine ja Keskkond. TTÜ Mäeinstituut, Tallinn. (265 pp)

Keskkonnaagentuur (2019). Eesti väikejärvede batümeetriline seire 2019. Tallinna Ülikooli Ökoloogia keskus, Tallinn.

Keskkonnaministeerium (2015). Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016-2060. Keskkonnaministeerium, Tallinn.

Keskkonnaministeerium (2020). LIFE IP CleanEST projekti tegevus C.8 Ü levaade Aidu karjääri ri ja Narva karjääri tranšee 13 ning piirkonna vanemate karjääriveekogude uuringutest. Eesti Loodushoiu Keskus lõpparuanne, Tartu.

Krause, T., Palm, A. (2021). Kalastiku ja püügivahendite efektiivsuse uuring Eesti väikejärvedes. Keskkonnaministeerium, Tartu.

Liu, H., Su, H., Wu, Q. (2015). Prediction of Water Depth From Multispectral Satellite Imagery—The Regression Kriging Alternative. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(12): 2511 - 2515. doi: 10.1109/LGRS.2015.2489678

MAVES OÜ (2021). Estonia II põlevkivi kaevandamisloa taotluse keskkonnamõju hindamise programm. Maves OÜ, Tallinn.

Meidla, T. (2014). Estonia- a Palaezoic country. Geoloogia Osakond, Tartu.

Merchant, J, C., Woolway, R, L. (2019). Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. Nature Geoscience, 12: 271-276. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x

Mäemets, A. (1977). Eesti NSV järve ja nende kaitse. Valgus, Tallinn. (264 pp)

Ogden, F, L. (2021). Geohydrology: Hydrological Modeling. Encyclopedia of Geology (Second Edition), 457-476.

OÜ Inseneribüroo STEIGER (2007). Ojamaa kaevanduse tehnokompleksi rajamise ja töötamisega kaasneva keskkonnamõju hindamise aruanne. OÜ Inseneribüroo STEIGER, Tallinn.

Ramboll Eesti AS (2011). Olulise ruumilise mõjuga Aidu tuulepargi, seda toetava infrastruktuuru ja rekreatsioonialade ning lasketiiru asukohavaliku teemaplaneering. Tallinn. Ramboll Eesti AS.

Reinsalu, E. (2019). Eesti mäendus III : Diplomeeritud mäeinseneri õpik. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn. (485 pp)

Savitski, L., Savva, V. (2010). Uus-Kiviõli kaevanduse mäeeraldisel asuvate vaatluskaevude ja veehaarete revisjoni tulemused. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn

Schmitt, R. W. (1995). The ocean component of the global water cycle. Reviews of Geophysics, 33(S2), 1395-1409.

Sedman, P. (2018). Aidu veespordikeskuse hüdrogeoloogiline analüüs. Tallinn. iPT projektijuhtimine.

Sokman, K. (2010). Maavarade kaevandamise mõju maakasutusele. Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine Eestis. Kaar, K., Kiviste, K. 56-69. Eesti maaülikool, Tartu.

Tulchinsky, A. (2008). Aidu karjäär. 90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis. Tambe, Ü., Varb N. 355-378. OÜ GeoTrail KS

Porman, A., Valner, L. (2016). Groundwater flow and transport model of the Estonian Artesian Basin and its hydrological developments. Hydrology Research, 47 (4): 814–834. https://doi.org/10.2166/nh.2016.104

Viil, A. (2010). Katendi eemaldamine ja tehniline rekultiveerimine põlevkivikarjäärides. Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine Eestis. Kaar, K., Kiviste, K. 70-104. Eesti maaülikool, Tartu.

Virkus, R. (2014). Võimalused Aidu karjääri taaskasutuseks ja Uus-Kiviõli põlevkivikaevanduse integreerimiseks keskkonda. Tartu. Eesti maaülikool.

Wang, Yedqiao. (2020). Fresh Water and Watersheds. Boca Raton: CRC Press, 15.

Internetallikad

Adrenaator koduleheküIg (2022). Kasutatud 16.05.2022, https://adrenaator.ee/

Alutaguse matkaklubi koduleheküIg (2022). Kasutatud 16.05.2022, https://www.matkaklubi.ee/teenused/matkad/

Bachmann, M. (2011). Eesti Energia ja Maidla vald sõlmisid koostööleppe. Kasutatud 29.04.2022,

https://www.energia.ee/uudised/avaleht/-/newsv2/pressrelease_20110303_maidla_vald

Keskkonnaagentuur (2002). Eesti järved. Kasutatud 21.05.2022, https://infoleht.keskkonnainfo.ee/default.aspx?id=626144199&state=4%3B1008482659%3Best%3Beelisand

Kriis, K. (2004). Aidu, Aidu-Nõmme, Aidu-Liiva – hävitatud külad. Kasutatud 10.05.2022, http://www.virumaa.ee/aidu-aidu-nomme-aidu-liiva-havitatud-kulad/

Kriis, K. (2011). VKG vormib aherainest Aidusse püramiidid. Kasutatud 06.05.2022, https://pohjarannik.postimees.ee/6590727/vkg-vormib-aherainest-aidusse-puramiidid

Kriis, K. (2017). Püramiidide tulek Ida-Virumaale on kahtlane. Kasutatud 06.05.2022, https://dea.digar.ee/?a=d&d=pohjarannik20171206.2.6.8&e=-------et-25--1--txt-txIN%7ctxTI%7ctxAU%7ctxTA----------

Maaameti kaardirakendus (2022). Kasutatud 19.05.2022, X-GIS 2.0 [geoloogia50k] (maaamet.ee)

Paluoja, S. (2014) Aidu endise põlevkivikarjääri vallutavad sõudjad. Kasutatud 28.05.2022, https://parnu.postimees.ee/2851797/aidu-endise-polevkivikarjaari-vallutavad-soudjad

Põhjarannik (2012). Vanaküla karjääris pandi pumbad lõplikult seisma. Kasutatud 07.05.2022, https://dea.digar.ee/cgi-bin/dea?a=d&d=pohjarannik20120804.1.2&e=-------et-25--1--txt-txIN%7ctxTI%7ctxAU%7ctxTA----------

Rogers, K. (2012). Scientific modeling. Kasutatud 11.05.2022, https://www.britannica.com/science/scientific-modeling

Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelvalve Amet (2020). TTJA tegi Aidu tuulepargi arendajale ettekirjutuse eemaldada tuulikult labad. Kasutatud 21.05.2022, https://ttja.ee/uudised/ttja-tegi-aidu-tuulepargi-arendajale-ettekirjutuse-eemaldada-tuulikult-labad

Vasli, K. (2013). Eesti kaubamärgiks saab maailma kõrgeim püramiid? Kasutatud 06.05.2022, https://www.ohtuleht.ee/557597/eesti-kaubamargiks-saab-maailma-korgeim-puramiid

Vennik, E. (2012). First water in the Aidu rowing canal. Kasutatud 21.05.2022, https://www.energia.ee/en/uudised/avaleht/-/newsv2/news_30082012_aidu

Lisad

Lisa 1

Legend
Vahe mudeliga <2m
Vahe mudeliga >2m
Põlevkivi avamusjoon
Mudeli sügavuspiirkonad
0-3m
3-6m
6-10m
10-13m
13-17m
17+m
9.5, -0.35
6, 1.85
12, -1.91
14, 1.43
15, 2.07
16.93, 1.8
18, 2.62
19.83, 4.1
9, -0.06
15.04, 2.91
17.13, 2.96
16, 1.21
18.18, 2.11
17.98, 1.77
17, 0.66
19.63, 3.21
6, -0.63
16, 1.08
7, -1.04
19.6, 3.13
6, 0.53
15, -0.61
6, -6.14
18, 0.47
15, -2.76
18, 0.03
9, -1.84
11, -7.18

Lisa 2

Legend
Vahe mudeliga <2m
Vahe mudeliga >2m
Põlevkivi avamusjoon
Mudeli sügavuspiirkonad
0-3m
3-6m
6-10m
10-13m
13-17m
17+m
9.5/-1.27
6/1.46
14/0.25
15/0.85
12/-3.21
16.93/0.39
18/1.18
19.83/2.62
9/-0.91
15.04/1.77
17.13/1.64
16/-0.18
18.18/0.6
17.98/0.25
17/-0.88
19.63/1.66
6/1.25
7/-0.32
7/1.79
16/1.58
15/-2.07
6/0.02
18/-1.17
6/-7.28
15/-4.43
9/-2.86
18/-1.65
11/-8.86

Lisa 3

Legend
Vahe mudeliga <2m
Vahe mudeliga >2m
Põlevkivi avamusjoon
Mudeli sügavuspiirkonad
0-3m
3-6m
6-10m
10-13m
13-17m
17+m
9.5/-2.2
12/-4.52
16.93/-1.03
18/-0.26
14/-0.93
15/-0.36
6/1.07
19.83/1.14
18.18/-0.9
17.98/-1.27
17/-2.41
19.63/0.12
16/-1.56
17.13/0.31
15.04/0.64
9/-1.76
6/-1.87
16/-1.72
19.6/0.04
7/-2.55
15/-3.54
18/-2.82
18/-3.34
15/-6.09
11/-10.6
6/-8.42
9/-3.87
6/-0.5

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Joann Jürimaa,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Aidu karjääri tekkinud järvistu modelleerimine**,

   mille juhendaja on Mait Sepp ja Raivo Aunap,

   reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl Joann Jürimaa

31.05.2022