

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia osakond

Reelika Helde

**Ilumetsa kraatriväljal asuva Põrguhaua soo turbaaluse reljeefi
uuringud georadariga**
Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: PhD Argo Jõelet

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

19.05.2017

TARTU 2017

Sisukord

1 Sissejuhatus	3
2 Valdkonna ülevaade	4
2.1 Ilumetsa meteoriidikraatrite uurimisest	4
2.2 Ilumetsa kraatrivälja piirkonna geoloogia ja kraatrite ehitus.....	5
2.3 Meteoride, meteoriitide ja meteoriidikraatrite liigitamisest	8
2.4 Ilumetsa meteoriidikraatrite koostis ja langemise suund	9
2.5 Soode kujunemine ja veerežiim.....	10
2.6 Georadar	13
3 Materjal ja meetodika	15
3.1 Välitööd	15
3.2 Andmetöötlus	15
3.3 Lihtkraater ja kraatri otsimise profiili sammu valimine.....	16
4 Tulemused ja arutelu	18
4.1 Põrguhaua soo.....	18
4.2 Turba alla mattunud meteoriidikraatri otsimisest.....	23
5 Kokkuvõte ja järeldused	25
6 Tänuavaldused	26
Studies of Põrguhaua Bog using ground-penetrating radar (GPR) and determining profile density	27
7 Kasutatud kirjandus.....	28
LISA 1	31
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemisel	33

1 Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureusetöö käigus uuriti Põrguhaua sood, mis jääb Ilumetsa meteoriidikraatrite väljale. Ilumetsa meteoriidikraatrite rühm asub Kagu-Eestis, Põlva maakonnas. Meteoriidikraatriteks arvatakse olevat Põrguhaud ja Sügavhaud.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on turba paksuste määramine ja sooluse reljeefi kirjeldamine, et kontrollida, kas Põrguhaua soos võib olla mattunud meteoriidikraatreid. Saadud tulemused võimaldavad iseloomustada Põrguhaua soo tekkeagea ja arengulugu.

Välitöödel kasutati Radar Systems Inc poolt toodetud georadarit Zond 12e ja 300 MHz sagedusega antenni. Täiendavalt sai viis puurauku valitud profiilidele.

2 Valdkonna ülevaade

2.1 Ilumetsa meteoriidikraatrite uurimisest

Eestis on teadaolevalt kolm tõestatud meteoriidikraatrit: Kaali, Neugrundi ja Kärkla, lisaks on Eestis veel kraatreid, mida arvatakse olevat meteoriitse päritoluga (Plado 2012). Ilumetsa meteoriidikraatrite rühm asub Kagu-Eestis, Põlva maakonnas, Tartu–Koidula raudtee lähedal. Meteoriidikraatriteks arvatakse (Aaloe 1979 *cit* Krinov 1962, Barringer 1967, Classen 1977) olevat Põrguhaud ja Sügavhaud.

Samas piirkonnas asuvaid Inglihauda, Tondihauda ja Kuradihauda meteoriitse päritoluga kraatriteks tänapäeval ei loeta, küll aga neist viimast – Kuradihauda, arvati esialgu kuuluvat Ilumetsa kraatrivälja. (Aaloe 1971)

Ilumetsa kraatrid avastas Rudolf Hallik, kes oli tollane Tartu Ülikooli geoloogia tudeng. Juba samal aastal uuris Ilumetsa kraatreid geoloog Artur Luha, kes jõudis järeldusele, et tegemist võib olla meteoriidikraatritega ja keda ühtlasi peetakse ka Ilumetsa meteoriidikraatrite avastajaks (Isakar 2012). Koostati Põrguhaua- ja Sügavhaua topograafiline plaan (Aaloe 1979) ja Sügavhaua kraatri põhja kaevati paari meetri sügavune šurf. Pärast sõda jätkati Ilumetsa kraatrite edasise uurimisega 1956. aastal (Tiirmaa *et al* 2007).

Möödunud sajandil keskenduti kraatrite vanuse määramisele, selleks uuriti Põrguhaua tekkejärgse turba radiosüsiniku- ja õietolmuanalüüse. Sapropeli kihi alumisest osast võetud proovi vanuseks saadi radiosüsiniku meetodil 6030 ± 100 aastat (kalibreeritult vanus 6740 – 7010 aastat). (Losiak *et al* 2017, *cit* Liiva *et al* 1972). Võib arvata, et orgaanika ei hakanud kogunema kraatrisse kohe plahvatuse järgselt, mis võib tõsta kraatri tegelikku vanust. 1996. aastal jätkati Raukase juhtimisel Meenikunno raba Keskmise Suurjärve põhjakalda turba uurimisega, kust avastati 5,7 m sügavuselt mikroskoopilised klaasjad sfäärulid. Selle kihi vanuseks saadi kahe radiosüsiniku meetodil analüüsitud proovi alusel 6542 ± 50 ja 6697 ± 50 aastat (kalibreeritult 7420 – 7500 ja 7560 – 7610 aastat) (Losiak *et al* 2017). Küll aga ei ole tõestust leidnud sfäärulite seotus Ilumetsa meteoriidikraatritega (Plado, Henkel 2000).

Viimaste uuringute järgi Ilumetsa kraatrite vanuse määramiseks dateeriti orgaanilist materjali kraatrist välja paisatud materjalist. Otsiti meteoriidiplahvatuse käigus tekkinud sütt, mida leiti

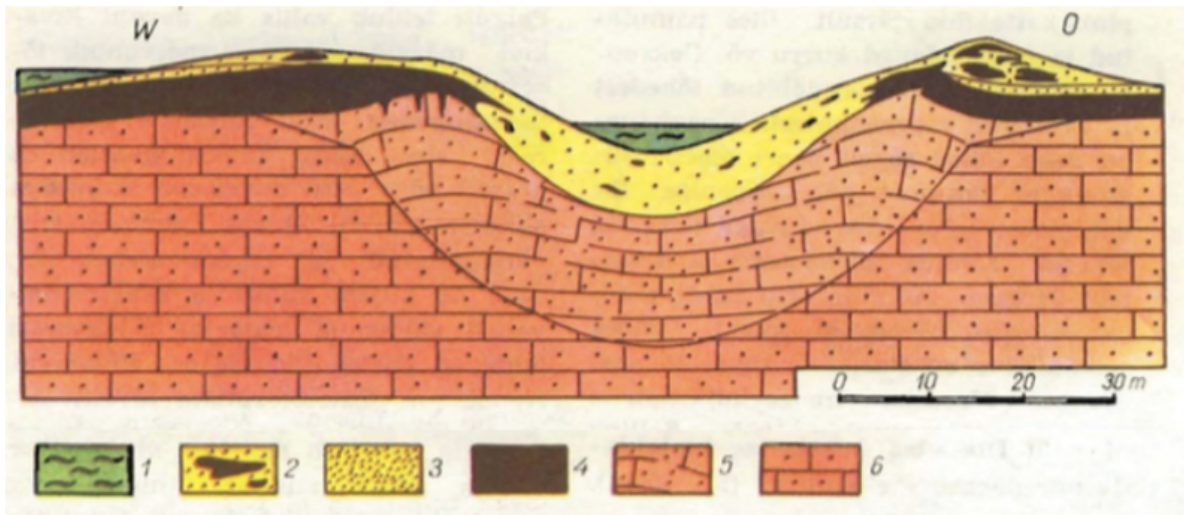
kraatri vallist ja mis toetab kraatrite meteoriitset päritolu. Nende esialgsete uuringute järgi on kraatrite vanuseks 7000 cal BP. (Losiak *et al* 2017)

Erinevate geofüüsikaliste uuringute tulemusel on koostatud magnetiline kaart, georadariga on uuritud kraatrite siseehitust ning need uuringud toetavad kraatrite meteoriitset päritolu, kuid mis ei ole lõplikult tõestatud (Losiak *et al* 2017).

Samas ollakse veendumusel, et tegemist on impaktkraatritega ning Põrguhaud ja Sügavhaud loetakse meteoriidikraatrite alla kuuluvat (Raukas, Tiirmaa 2001) ja on ühtlasi lisatud Maa Meteoriitide Andmebaasi (*Earth Impact Database*). Küll aga meteoriitset materjali ei ole leitud, puuduvad löögikoonused ja planaarsed deformatsioonid kvartsiterades. Ühtlasi ei ole leitud plaatina rühma keemiliste elementide jälgi plahvatuse poolt mõjutatud kivimites ega iseloomulikke osmiumi isotoopide suhteid. (Isakar 2012)

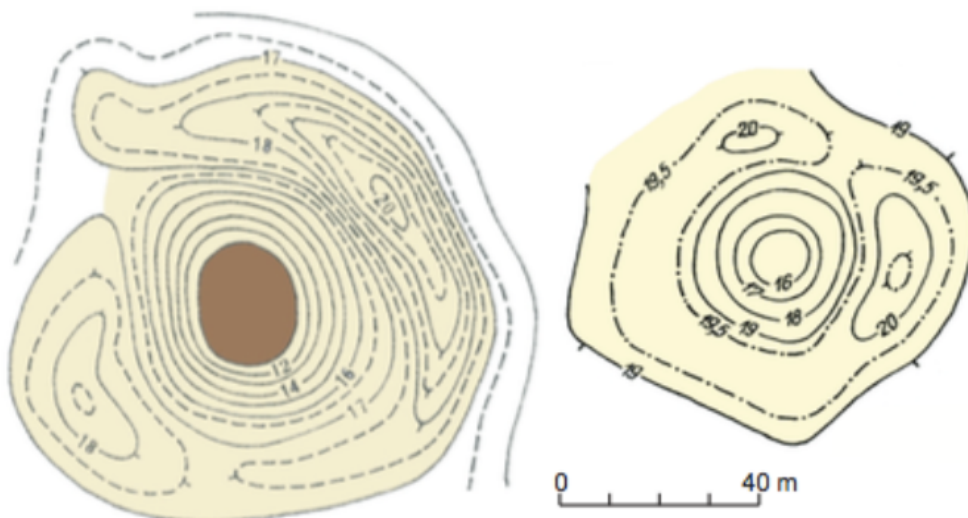
2.2 Ilumetsa kraatrivälja piirkonna geoloogia ja kraatrite ehitus

Aluspõhjaks on Kesk-Devoni Burtnieki lademe punakad või valkjas-kollased nõrgalt tsementeerunud liivakivid. Neid katab üldjuhul 1–2 m paksune pruun liiv-savi põhimoreeni kiht, millel omakorda lasub kas turvas, mis on paiguti kuni mõne meetri paksune, või sanduriline liiv. Kohati võib moreenil vahetult lasuda õhuke mullakiht. Reljeef on veidi lainjas, kus mõne kilomeetri raadiuses kraatriväljast leidub mõhnastikke. Kraatritest lõuna poole jääb järsult maapinda lõikuv Rebasmäe oja org. Joonisel 1 on näha, et Põrguhaua kraater ulatub läbi pinnakatte aluspõhja. Sellele sarnaneb ka Sügavhaua kraater, mis on mõõtmelt väiksem. (Aaloe 1979)



Joonis 1. Põrguhaua geoloogiline läbilõige (Aaloe 1979) 1 – turvas, 2 – põhimoreeniga segunenud liivad, 3 – sandurliiv, 4 – põhimoreen, 5 – dislotseeritud Devoni liivakivi, 6 – Devoni liivakivi.

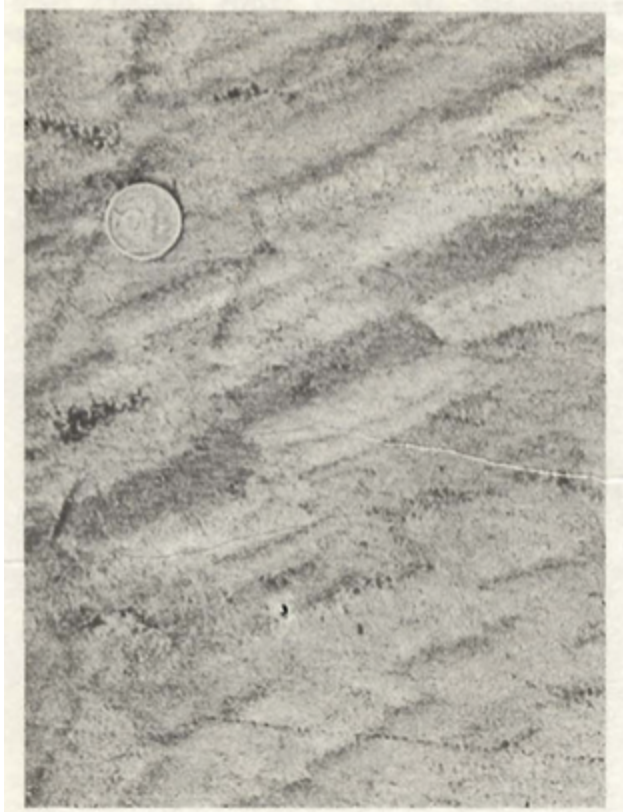
Põrguhaua meteoriidikraater asub Ilumetsa raudteepeatusest umbes 950 m lõunaedelas. Kraatri läbimõõt valli harjalt on kuni 80 m, sügavus 12,5 m. Valli kõrgus kraatri lääneserval on vaevalt meeter, ida serval kuni 4,5 meetrit. Kraatri põhja katab keskosas kuni 2,5 m paksune turbakiht. Sügavhaud asub Põrguhauast umbes 900 m lõuna pool, metsavahi kohale lähemal. Kraatri läbimõõt valli harjalt on keskmiselt 50 m, sügavus 4,5 m. Vall kraatri lääneserval on raskesti märgatav, ida serval valli kõrguseks kuni 1,5 m. Joonisel 2 on näha kraatrite plaan koos kõrgusjoontega. (Aaloe 1979)



Joonis 2. Vasakul Põrguhaua plaan- ja paremal Sügavhaua plaan kõrgusjoontega (Isakar 2012 Aaloe 1979 järgi).

Põrguhaua piires on plahvatuslaine purustanud Devoni liivakivid kuni 30 m sügavuseni, võib öelda, et need on plahvatuse tagajärjel pihustunud lahtiseks liivaks. Reliktina on kohati näha Devoni liivakividele omast peen- ja põimjaskihilisust. Põimjaskihilisus on aga tugevalt rikutud, painutatud ja läbistatud pisimurrangutest (joonis 3). Sügavhauas on liivakivid purustatud 20 m sügavuseni. Kraatri läheduses on aluspõhja- ja pinnakattekihid järsult üles painutatud ja moodustavad kurru või fleksuuri, mis võivad olla läbitud lõhedest ja väikestest murrangutest ja need omakorda võivad olla täitunud paari meetri sügavuseni põhimoreeniga. Aaloe sõnul on kraatri ääres osas kihid dislotseeritud sarnaselt Poolas Pozani lähedal asuvate Morasko meteoriidikraatrite ääres osale (Aaloe 1979 *cit* Karczewski 1976). Arvatavalt võis selline kihtide kurdumine tekkida külgsurve, mis viitab plahvatusle juba mõne meetri sügavusel maapinnas ja millega võis kaasneda ka meteoriidi aurustumine. (Aaloe 1979)

Põrguhaua kraatri vallis leidub lisaks ülespainutatud kihtidele ka meteoriitkraatritele omast kivimirusu – allotigeenset bretšat, mida Ilumetsas asendab plahvatuslaine poolt väljapaisatud liiva ja põhimoreeni segu. Kohati leidub vallis Devoni liivakivi tükke, mis on märgatavalt deformeerunud, lõhestunud ja muutunud pudedaks, mille omapärasest tekstuuri on näha joonisel



3. Kraatri põhi koosneb sarnasest liivast, mis on aga väiksema põhimoreeni sisaldusega, mis moodustab kuni 8 m paksuse lasundi. Selle all lamavad purustatud Devoni liivakivid, mille piir dislotseerimata liivakividega on üleminekuline ja ühtlasi löökpuurimisel väga raskesti märgatav. Joonisel 1 kujutatud selge piir on Aaloe poolt välja joonistatud peamiselt teoreetiliste kaalutluste järgi. Hinnanguliselt ulatub Sügavhauas dislotseeritud liivakivide vöönd umbes 20 m sügavuseni. (Aaloe 1979)

Joonis 3. Pisimurrangud deformeeritud liivakivides Põrguhaua kirdenõlval. Mõõduks on 3-kopikane münt. (Aaloe 1979)

2.3 Meteoride, meteoriitide ja meteoriidikraatrite liigitamisest

Meteor on universumis planeetide vahelises ruumis leiduv keha, mida kutsume meteoriidiks, kui ta on läbi atmosfääri maale jõudnud.

Keemilise ja mineraalse koostise alusel jaotatakse meteoriidid:

- Raudmeteoriidid – koosnevad rauast ja niklist, sarnanevad raud-nikkel tüüpi asteroididega.
- Kivi-raudmeteoriidid – koosnevad rauast ja kivimitest, sarnanevad kivi-raud asteroididega.
- Kondriidid – sarnanevad oma koostiselt Maa tüüpi planeetide koorega.
- Süsinik-kondriidid – sarnanevad koostiselt Päikese koostisele, kuid sisaldavad vähem gaase, ühtlasi sarnanevad jäätunud gaasilistele asteroididele.
- Akondriidid – sarnanevad Maa purskekivimitega, kondreid ei ole.

Kivimeteoriidid on tavaliselt tumedad ja kaetud hallika- kuni punakasmusta sulamiskoorikuga, värskel murdepind võib olla hele- või tumehall, harvem valkjane. Tavaliselt on meteoriidid ümarja kujuga ja tasandunud murdepindasid jälgivad tahud. Tahkudelt võib leida madalaid sulamislohkusi – regmaglüpte. Kivimeteoriitides võib olla tumedaid õhukesi omavahel lõikuvaid soonekesi ja peeneteralises põhimassis võib olla rohkearvuliselt tumedaid, hõbedaselt läikivaid, millimeetrist väiksema läbimõõduga kerakesi – kondreid, mis on primaarse kosmilise aine tombukesed. Kivimeteoriitide põhimassis võib leida metalliliste teradena veel nikkelraua sulamit. (Tiirmaa 2005)

Raudmeteoriitide keemilises koostises on valdavaks raud (76%-94%) ja nikkel (5-19%). Roostetamisel kaovad meteoriidi pinnalt talle omased tunnused, keha päritolu saab määrata laboratoorselt nikli sisalduse põhjal. Raudmeteoriitidele on iseloomulik omapärane kristalliline struktuur – Neumanni jooned või Widmanstätteni figuurid, mis ilmnevad lihvitud pinna söövitamisel lahjendatud happega. (Tiirmaa 2005)

Kivi-raudmeteoriitide ehk segameteoriitide sisalduses leidub ligikaudu võrdses osas nikkelraua ja silikaatsete mineraalide suletisi. Need meteoriidid on võrdlemisi haruldased ja jagunevad omakorda pallasiidideks ja mesosideriidideks. Pallasiidide raua-nikli osa moodustab karkassi, mille poorides asetsevad silikaatide kristallid. Mesosideriidides on silikaatse karkassi poorid täidetud metalliga. (Tiirmaa 2005)

Kraatreid liigitatakse löögi-, löögi-plahvatus- või plahvatuskraatriteks. Löögikraatrid tekivad suhteliselt aeglaselt langevate (0,5 – 3 km/s) meteoriitide löökidest. Sellise kiiruse juures puruneb meteoriit maapinnaga kokkupõrkel ja lööklaine tagajärjel tekib kraater, millest võib leida ka meteoriidi kilde. Plahvatuskraatrid tekivad aga suuremate kiiruste juures, kus keha kineetiline energia on nii suur, et kokkupõrkel meteoriit aurustub kas osaliselt või täielikult. Kolmas kraatri tekkejuht esineb juhul, kui meteoriidi kineetilisest energiast on tsentraalseks plahvatuses jäänud väheks ja meteoriit on aurustunud pinnases liikumise ajal, mille tulemusel on plahvatus olnud silindriline. Lisaks iseloomustavad löögi-plahvatuskraatreid veel peale morfoloogiliste tunnuste ka kraatri keerukas siseehitus ja omanäoline meteoriidiainese jaotumine. (Aaloe 1979)

Meteoriidikraatrid võib ka jaotada kaheks: lihtkraatrid ja komplekskraatrid. Lihtkraatrid on väikseimad suuritel kiirustel tekkivad struktuurid. Nad on kausikujulised ja teravate vallidega, kus on ümberpööratud stratigraafia. Kraatrite morfoloogia sõltub suuresti pinnase omadustest. Väikestel kraatritel on ühtlasi suurim sügavuse – diameetri suhe (d/D), kus $d \approx 0,2 - 0,33 D$. Komplekskraatritel on see suhe $d \approx 0,1 D$. (Melosh 1989)

2.4 Ilumetsa meteoriidikraatrite koostis ja langemise suund

Meteoori langedes maapinnale pidurdab tema teekonda kasvav atmosfääri tihedus. Hõõrdejõu mõjul võib meteoor puruneda tükkideks, kus suuremad tükid lendavad kaugemale, sest neile mõjuvad suurema massi-pindala suhte tõttu väiksemad hõõrdejõud – suuremad tükid pidurduvad vähem. Purunemist põhjustab termiline pingestatus, mis tekib külma keha sisemuse ja pealispinna sulamisel temperatuuride suurest erinevusest. Lõpuks langevad meteoriidi tükid ellipsi kujuliselt maapinnale, kus pikem telg märgib langemise sihi ja kraatrite jaotus näitab langemise suunda. (Tiirmaa 2005)

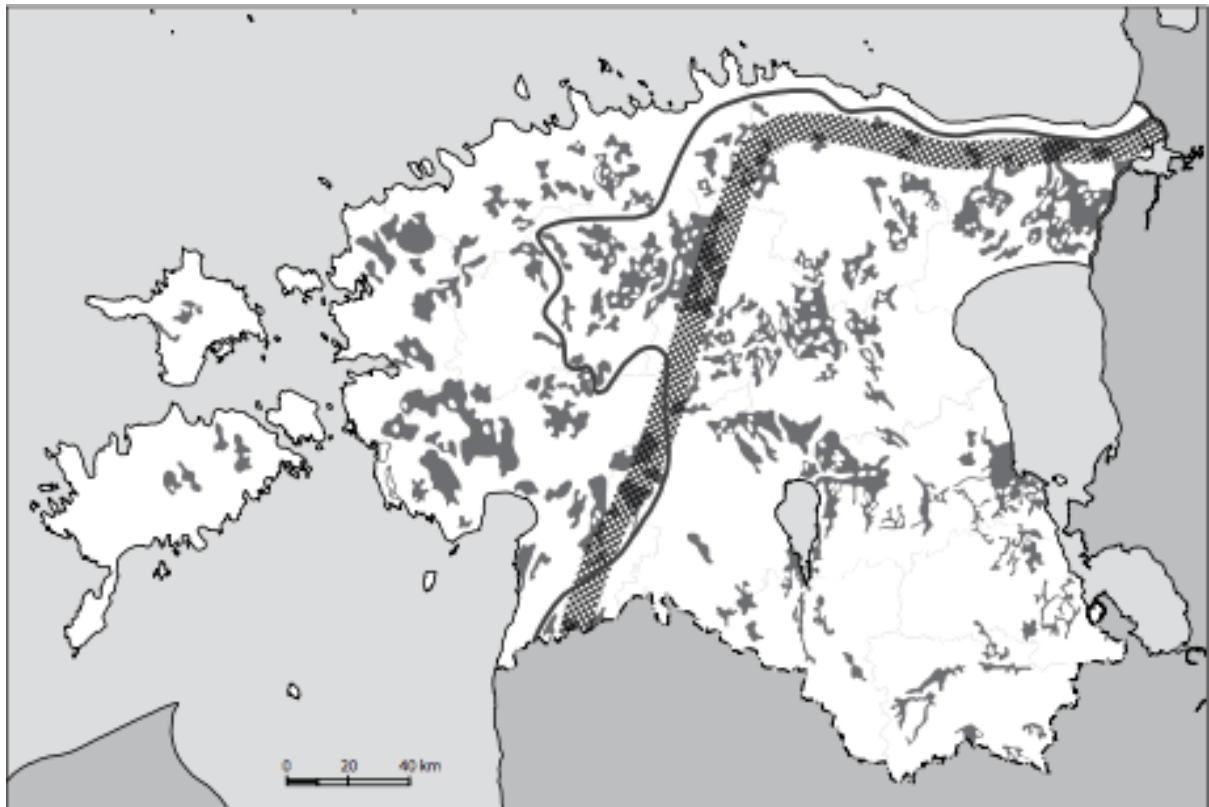
Ago Aaloe järeldestel (Aaloe 1979) langes meteoriit lääne suunast – toetudes kraatrite morfoloogiale. Põrgu- ja Sügavhaua valli kõrgem osa jääb põhiliselt kraatri idapervele ja väiksemad kõrgendikud on näha kraatri edela- ja loodepervel. Meteoriidi koostis on teadmata, sest ei ole leitud meteoriidikilde ega –tolmu. Aaloe oletab, et juhul kui meteoriit oli rauast, võisid hävida tema killud liivases pinnas kergesti liikuva huumushapperikka vee tõttu. Juhul kui tegemist oli kivimeteoriidiga, võis see plahvatuses pihustuda. Teise võimaliku variandina kaalus Aaloe ka hüpoteetilist jäämeteoriiti, mis löögil võib tekitada kraatri aga endast muid

jälgi ei jäta. Aaloe kaldub välistama raudmeteoriiti kuna plahvatus toimus suhteliselt madalal, mis viitab meteoriidi väiksemale tihedusele, kuid meteoriidi koostise osas konkreetset vastust ei anna. (Aaloe 1979)

Kiiresti langeva keha kokkupõrkel maapinnaga on vabanev kineetiline energia väga suur. Dufresne (2012) viis läbi praktilisi katseid sellise kokkupõrke imiteerimiseks ja uuris kiiresti liikuva keha kokkupõrget liivakiviga, et mõista paremini sellise protsessi dünaamikat – kraatrite teket. Ühe järeldusena on välja toodud, et suured kraatrid moodustuvad kokkupõrgetel, mis omavad suurt kineetilist energiat. Veel on välja toodud, et suurema veesisaldusega liivakivist pinnases tekkiv kraater on laiem ja sügavuselt madalam kui seda oleks väiksema veesisaldusega liivakivis moodustunud kraater (Dufresne 2012).

2.5 Soode kujunemine ja veerežiim

Holotseeni vältel on kliimatingimused mitmel korral muutunud olles enamasti soodsad turbaalade tekkeks ja arenguks Eestis. Kõrg-Eestis võib soode vanus ulatuda 10 000 aastani, Madal-Eestis umbes 8500 aastani, kus algas soostumine hiljem (joonis 4). Esimesed sood võisid tekkida boreaalse kliimaperioodi suhteliselt soojades ja niisketes tingimustes madalate veekogude kinnikasvamise tulemusena (Paal, Leibak 2013 *cit* Thomson 1936, Raukas 1988) või arumaa soostumise tagajärjel. Domineerisid sammalde ja tarnade madalsood, mille põõsarindes olid valdavad sookask ja pajud.

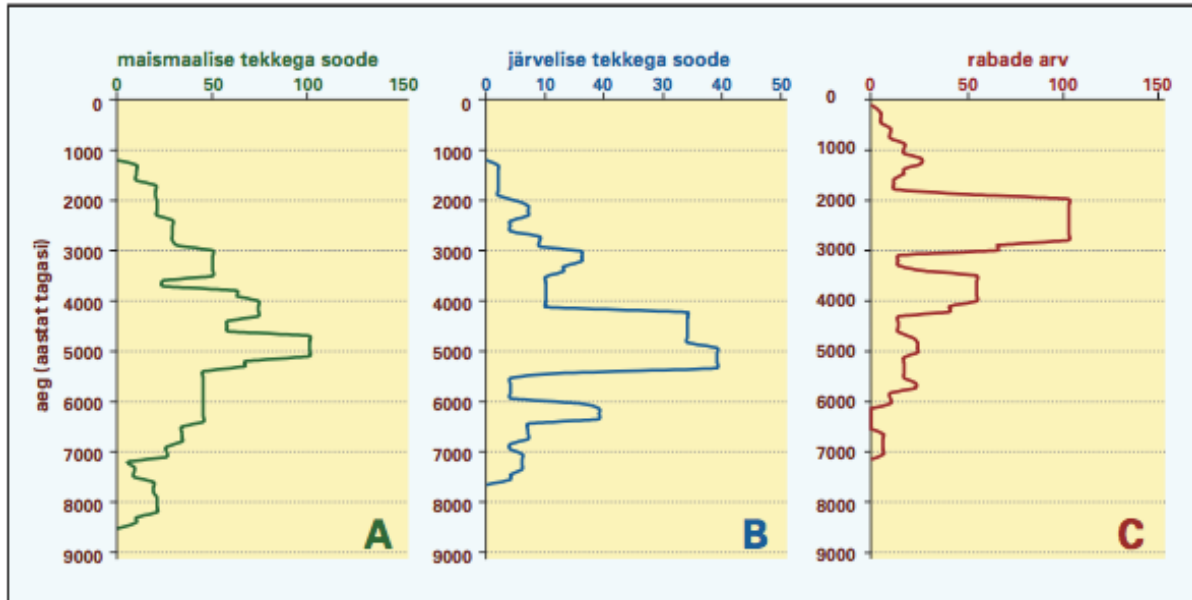


Joonis 4. Suuremate kui 1000 ha turbaalade levik Eestis (Paal, Leibak 2013 cit Allikvee, Ilomets 1995). Pideva joonega on märgitud Balti jääpaisjärve maksimaalne ulatus; ristjoontega viirutatud riba tähistab Ida- ja Lääne-Eesti geobotaanilise provintsi vahelist piiri (Paal, Leibak 2013 cit Laasimer 1965) ning ühtlasi piiri ida- ja läänetiipi rabade vahel.

Umbes 8000–5000 aastat tagasi atlantilisel kliimaperioodil algas suurte madalsoolade siirdesoostumine ja seejärel rabastumine (Paal, Leibak 2013 cit Raukas 1988). Veetaseme tõus soodustas madalsoode pindala suurenemist, kus intensiivsem järvede kinni kasvamine algas umbes 6500 aastat tagasi (Paal, Leibak 2013 cit Ilomets 1999). Võib oletada, et seda soodustasid sel ajal valitsenud märksa soojemad ja niiskemad tingimused. Rabastumise märgatav suurenemine algas Kõrg-Eestis ligikaudu 7000 aastat tagasi, Madal-Eestis kulus rabastumiseni jõudmiseks aega 2500–3000 aastat kauem. Eesti aladel valitsesid kõige soodsamad tingimused rabade moodustumiseks 4000–2000 aastat tagasi, mis oli subboreaalse kliimaperioodil ja subatlantilise kliimaperioodi algul (Paal, Leibak 2013).

Liivastel aladel toimunud maismaa rabastumine oli kõige intensiivsem 3000–2500 aastat tagasi (Paal, Leibak 2013 cit Ilomets 1992, 1999), mis on näha ka joonisel 5 diagrammil c. Praegugi valdavad niisked ja suhteliselt jahedad kliimatingimused on soodsad turvast moodustavate taimede kasvuks ja turbalasundi kujunemiseks. Ilometsa (1994) andmetel on

Eesti madalsoodes turba aastane juurdekasv keskmiselt 0,5 mm/a ja rabades 1,5 mm/a. Kokku moodustub turvast Eesti soodes aastas 0,92–1,42 miljonit tonni (keskmine niiskusesisaldus 40%). (Paal, Leibak 2013)



Joonis 5. Terrigeensete (A) ja limnogeensete (B) soode teke ja rabafaasi alguse (C) ajalised muutused Eestis. (Ilomets et al 2007 Ilometsa järgi)

Soode kujunemise määravad kolm põhilist tegurit: kliima, pinnamood koos pinnakattega ja hüdrogeoloogilised tingimused. Kõige soodsamad on tingimused aladel, kus nende tegurite koosmõjul püsivad maapinnal piisavalt pikaajaliselt veega küllastunud tingimused. Määravaks kliimafaktoriks on efektiivne niiskus, mis iseloomustab seda, kui palju ületab aastane sademete hulk aurumise antud piirkonnas. Teine soostumise põhieeldus kliima kõrval on vee äravoolu takistav pinnamood. Tasase pinnamoega reljeefil on äravool aeglane ja vesi koguneb kergesti tõkete taha. Seisev vesi on hapnikuvaene, kus taimejäänuste lagunemisprotsessid pidurduvad ning selle tulemusena hakkab ladestuma muda ja hiljem turvas. Kolmandaks soostumise eelduseks on veepidavus, struktuur, mis takistab vee infiltreerumist sügavamale, millega kaasneb soostumiskollete kujunemine. (Paal, Leibak 2013)

Kaks põhilist soostumisviisi: (Paal, Leibak 2013)

1. Telmaatiline – maismaa liigniiskes osas tekivad soo taimedele sobilikud kasvutingimused, hakkab arenema soo.

- 1.1. Nõgudes kujuneb veega küllastunud mulla pikaajalise gleistumise tulemusena vettpidav gleihorizont ja soostumine kulgeb järgides skeemi: madal soo → siirdesoo → raba.
- 1.2. Tasasel või kergelt nõgusal (liivasel) alal, kus puudub äravool, tekib mulla leetumise tulemusena vettpidav nõrgkivi kiht (ortstein), mis Eestis on tihti seotud metsapõlengutega. Sellise soostumise korral madal soo järk puudub ja soostumine algab kohe siirdesoo- või rabafaasiga. (Paal, Leibak 2013 *cit* Valk 1988).
2. Limniline – kujuneb veekogu kinnikasvamisel, sellisele tekkele viitab järvesetete (järvemuda, järvelubi) esinemine turbalasundi all. Veekogu võib hakata kinni kasvama nii põhjast kui ka pealt õõtsikuga kattudes, viimane eeldab tuule eest varjatud väikest järve-, soodi-, või lauka kallast. Levinuim on nii veekogu põhjast kui kaldalt samaaegne kinnikasvamine. Kõrge produktiivsusega eutroofsetes järvedes settib osa orgaanilist ainet järvemudana veekogu põhja, millest tihenedes kujuneb rohekaspruuni värvusega sapropeel. Selle kihi kasvades väheneb vaba vee sügavus ja veekogu põhja hakkavad katma järjest enam taimekooslused, millele enamasti järgneb soo minerotroofne arengufaas, kus esinevad mitmesugused madalsookooslused. Järveline sooteke algab enamasti madal soo tarna-, rohu- või pillirooturba moodustumisega, harva ka siirdesoo tarnakoosluste arenemisega. (Paal, Leibak 2013)

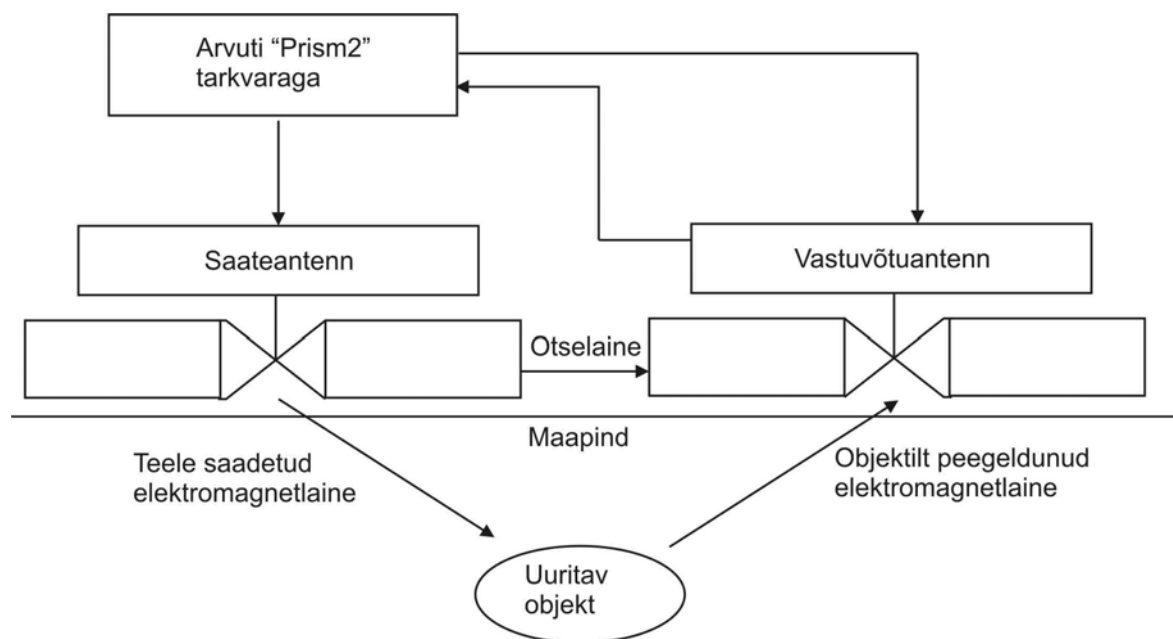
Ligikaudu 60% Eesti soodest on kujunenud telmaatilisel, ülejäänud 40% on järvelise või rannikulõukalise päritoluga. (Paal, Leibak 2013 *cit* Orru 1995)

Raba (kõrgsoo) on soo arengu lõppjärguks, milles turbalasund on kasvanud nii paksuks, et selle pind on ümbritsevast maastikust kõrgem. Selle tulemusel taimed ei saa enam toitaineid põhjaveest vaid peavad leppima peamiselt sademevee poolt tolmu näol toodavate toitainetega. (Paal, Leibak 2013)

2.6 Georadar

Esmakordselt hakati välitöödel kasutama georadarit (*Ground Penetrating Radar – GPR*) 1950ndatel, 1960ndatel nende kasutus laienes koos tehnoloogia arenguga (Takahashi, Igel *et al* 2012). Viimasel sajandil on geofüüsikalised meetodid ja georadari kasutamine laialt levinud tänu väiksematele kuludele võrreldes puurimisega.

GPR süsteem põhineb elektromagnetlainete kasutamisel ja koosneb peamiselt neljast komponendist: saatjast, vastuvõtjast, keskseadmest ja arvutist, mille lihtsustatud skeem on toodud joonisel 6. Välja saadetud signaal peegeldub keskkonnas heterogeensetelt pindadelt, saabuv signaal registreeritakse vastuvõtuantennis ja kuvatakse arvuti ekraanil reaalajas radarprofiilina. GPR-i töötamissagedus jääb reeglina vahemikku 1 MHz kuni mõni GHz ja mõõdetakse peegeldunud signaali tagasijõudmiseks kuluvat aega. Seade registreerib tagasipeegeldunud lainete intensiivsuse muutuseid ajas, mis on tingitud pinnase omaduste erinevustest. (Takahashi *et al* 2012)



Joonis 6. Georadari lihtsustatud skeem. (Mustassaar 2009)

Peamised elektromagnetlainete levikut mõjutavad füüsikalised omadused on: dielektriline läbitavus, magnetiline vastuvõtlikkus ja elektrijuhtivus. Elektromagnetlaine peegeldumisel keskkonnas osa energiast neeldub, osa peegeldub ja osa levib erinevates suundades. Osa peegeldunud signaalist jõuab tagasi maapinnale vastuvõtjasse. Signaali amplituud sõltub keskkonna dielektrilistest omadustest, lainepikkusest ja kihi või objekti paksusest. (Mustassaar 2009 *cit* Davis, Annan 1989).

3 Materjal ja metoodika

3.1 Välitööd

Välitööd Põrguhaua soos toimusid kahes osas, esmalt 1. – 2. august 2016. aastal mõõtmised georadariga ja pärast välitöödel saadud andmete töötlust jätkati 21. aprillil 2017. aastal täiendavate mõõtmistega kasutades georadarit ja lisaks puuraukude puurimisega. Radaritöödel kasutati Radar Systems Inc poolt toodetud georadarit Zond 12e ja 300 MHz sagedusega antenni. Peegeldunud signaal mõõdeti 500 ns vältel. Profiilide pikkused mõõdeti kasutades radari komplekti kuuluvat ratast, lisaks kasutati positsioneerimisel GPS-i. Turbakihi paksuse hindamisel ja lamami aluse reljeefi kirjeldamisel oli valitud dielektrilise läbitavuse väärtuseks 70.

Otsus 2017 aasta kevadel tagasi Põrguhaua soole radardama ja puurima minna, tulenes radarprofiilil (joonis 16) leitud anomaaliast, kus on näha turbaaluses reljeefis nõgu, mille sügavus ümbritsevast reljeefist erines silmnähtavalt. Kaalumisel oli võimalus, et tegemist võib olla äravoolukanaliga. Suuremat huvi äratas ka piirkond (joonised 14–15), kus oli näha, et soo alusel reljeefil peegeldunud signaal ei ole nii tugev. Arvestades, et tegemist on tõenäoliselt Põrguhaua soo sügavama osaga siis võis oletada, et selge peegelduspinna puudumine on tingitud järvelistest setetest, mille järgi sai valitud üks puurimiskohtades.

Teades, et Ilumetsa meteoriidikraatrite vanus on ligikaudu 6600 aastat (Raukas *et al* 2001) – 7000 aastat (Losiak *et al* 2017) ja turba paksus Põrguhaua soos jääb valdavalt 2,5 meetri alla, võib väita, et Ilumetsa meteoriidikraatrite väli tekkis varem kui algas soostumine antud alal, toetudes soo- ja rabaturba kasvu kiirusele, mis on keskmiselt 0,5 mm/a Eesti madalsoodes ja 1,5 mm/a rabades (Paal, Leibak 2013). Järvelised setted turba all pakusid eelkõige huvi, sest on võimalus, et neis võib leiduda meteoriitse päritoluga osakesi ja -tuhka.

3.2 Andmetöötlus

Radariandmete töötlemisel kasutati programmi Prism2. Selgema profiilipildi saamiseks kasutati sageduslikku filtreerimist (ribapääs trapetsfiltrit). Võimenduse reguleerimiseks kasutati funktsiooni “gain”, mis suurendas või vähendas kontrasti. Kohendamist vajab ka nullpind profiilidel, peale mida sai alustada peegeldunud pindade välja joonistamisega. Turba

lamamit iseloomustava pinna andmed salvestati (kokku tuli andmeid 1258 punkti). Turba paksuse ja -lamami kaardid koostati programmiga Q-GIS.

3.3 Lihtkraater ja kraatri otsimise profiili sammu valimine

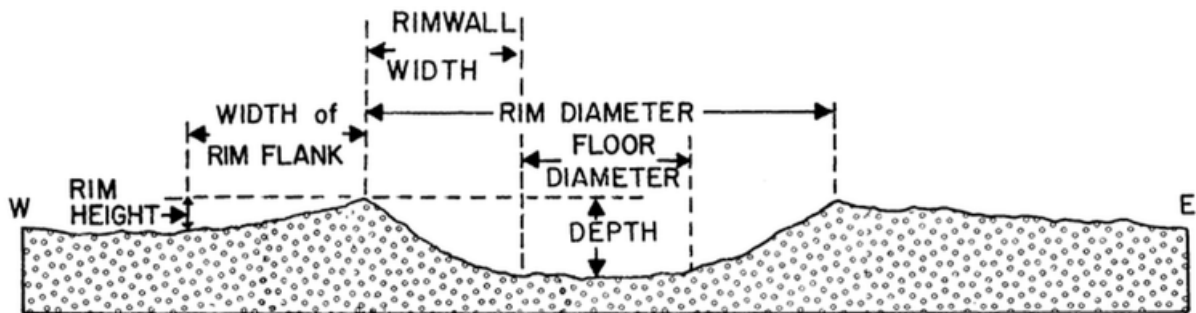
Pike (1977) kirjeldab alla 15 km läbimõõduga kraatri sügavuse (R_i) ja valli harjalt kraatri diameetri (D_r) vahelist suhet (joonis 7,) valemiga (1):

$$R_i = 0,196 D_r^{1,010} \text{ (Valem 1)}$$

Pike (1977) järgi on valli harjalt kraatri diameetri (D_r) ja kraatri valli kõrguse (R_e) vaheline suhe (joonis 7, joonis 8) toodud valemiga (2):

$$R_e = 0,036 D_r^{1,014} \text{ (Valem 2)}$$

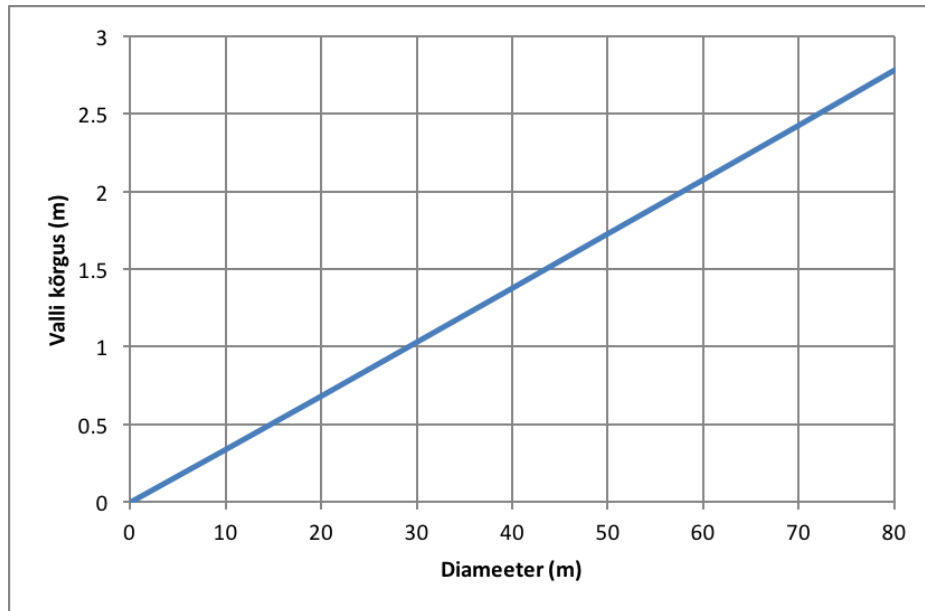
Valemis (1) ja (2) toodud ühikud on kilomeetrites ja antud valem kehtib kraatritele, mille diameeter on väiksem kui 15 km (Pike 1977). Valem kehtib kraatrite moodustumisel nii Kuul, Maal, laboratoorsete eksperimentide tulemustel kui ka plahvatuse tagajärjel (Melosh 1989 cit Pike 1977).



Joonis 7. Kraatri kuus dimensiooni. Valemities (1) ja (2) toodud vastes joonisel: R_e – rim height (valli kõrgus), R_i – depth (kraatri sügavus valli harjalt) ja D_r – rim diameter (kraatri diameeter vallilt). (Pike 1977)

Meteoril ja selle tükkidel on kalduvus atmosfääris purunedes jaguneda kaheks osaks (Artemieva, Shuvalov 2001). Ühe võimalusena võis Ilumetsa meteorit laguneda kaheks ebavõrdseks tükiks, millest suurema langemisel moodustus Põrguhaua meteoriidikraater, teisest tükist aga Sügavhaud. Teise võimalusena lagunes meteorit esmalt kaheks, millest üks pool tekitas Põrguhaua kraatri ja teine tükk lagunes omakorda kaheks, millest üks on

Sügavhaud ja teine on seni veel leidmata. Teise võimaluse eeldusel on leidmata meteoriidikraatri suurus lähedane Sügavhauale, mille diameeter valli harjalt on 50 m ja diameeter valli jalamilt võib olla umbes 60 meetrit. Lähtudes sellest mõttekäigust on käesolevas töös valitud esimeseks välitöö etapiks profiilid 50 m sammuga.



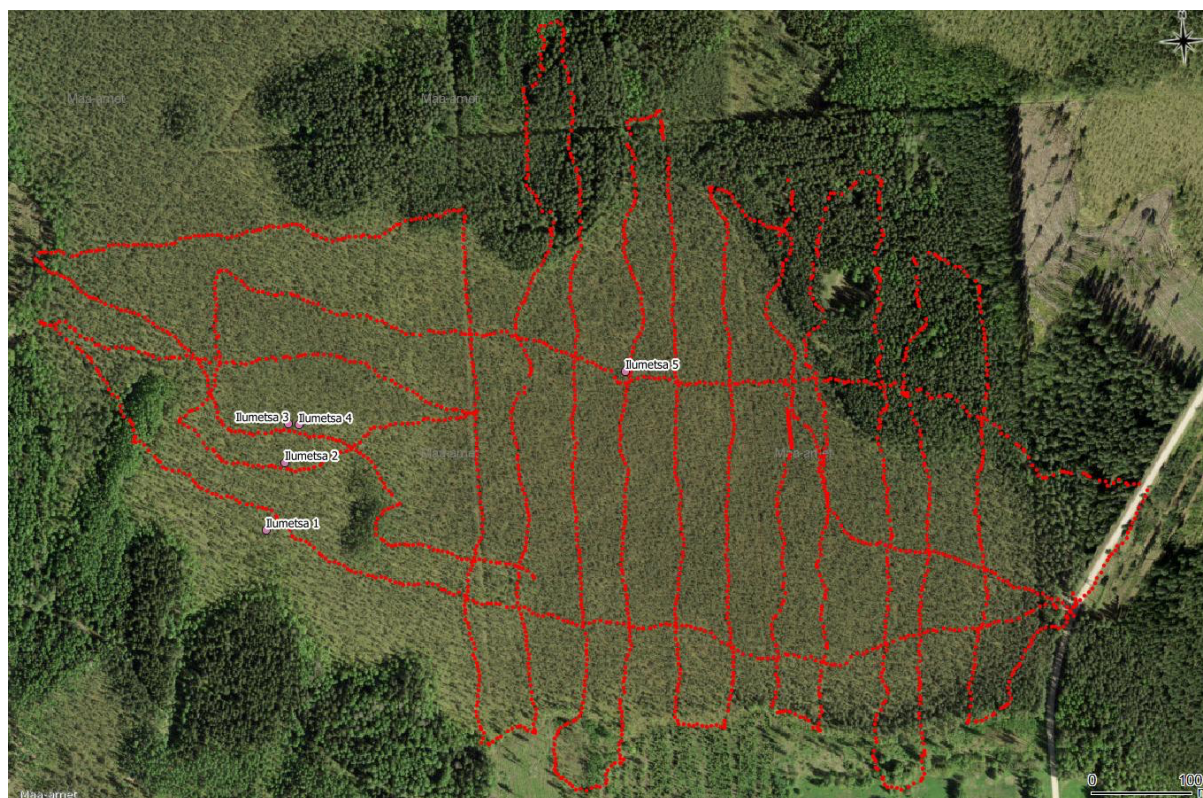
Joonis 8. Kraatri diameetri valli harjalt ja valli kõrguse vaheline suhe.

4 Tulemused ja arutelu

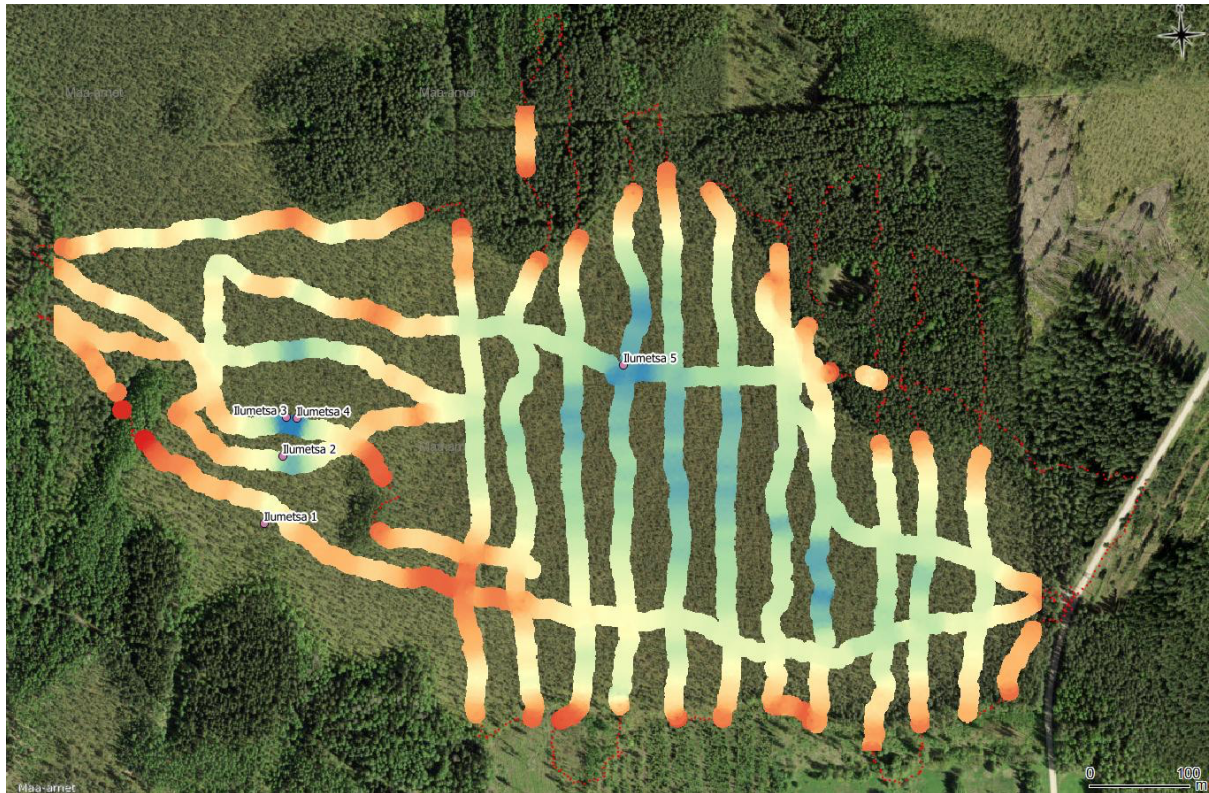
4.1 Põrguhaua soo

Radari profiilidel on selgelt eristatav turba ja mineraalpinnase piir, mis läbilõikes on valdavalt üheselt tõlgendatav. Profiili ülemises osas on rohkelt reflektoreid, mis sügavuse kasvades vähenevad. Peegelduste intensiivsust mõjutab turba lagunemisaste, mis sügavuse kasvades suureneb ja mille peegeldus väheneb. Turba ja madalsoo piir ei ole selgelt eristatav, sest et asub maapinnale nii lähedal. Rabaturba kiht on suhteliselt õhuke (Lisa 1).

Radarprofiilide põhjal on koostatud 1) profiilide ja puuraukude kaart (joonis 9), 2) turbakihi paksuse kaart (joonis 10, joonis 12) ja 3) turba-aluse mineraalpinnase kõrguse kaart (joonis 11, joonis 13), mis saadi lahutades maapinna absoluutkõrgustest turba paksused. Puuraukude kirjeldused on esitatud Lisas 1.



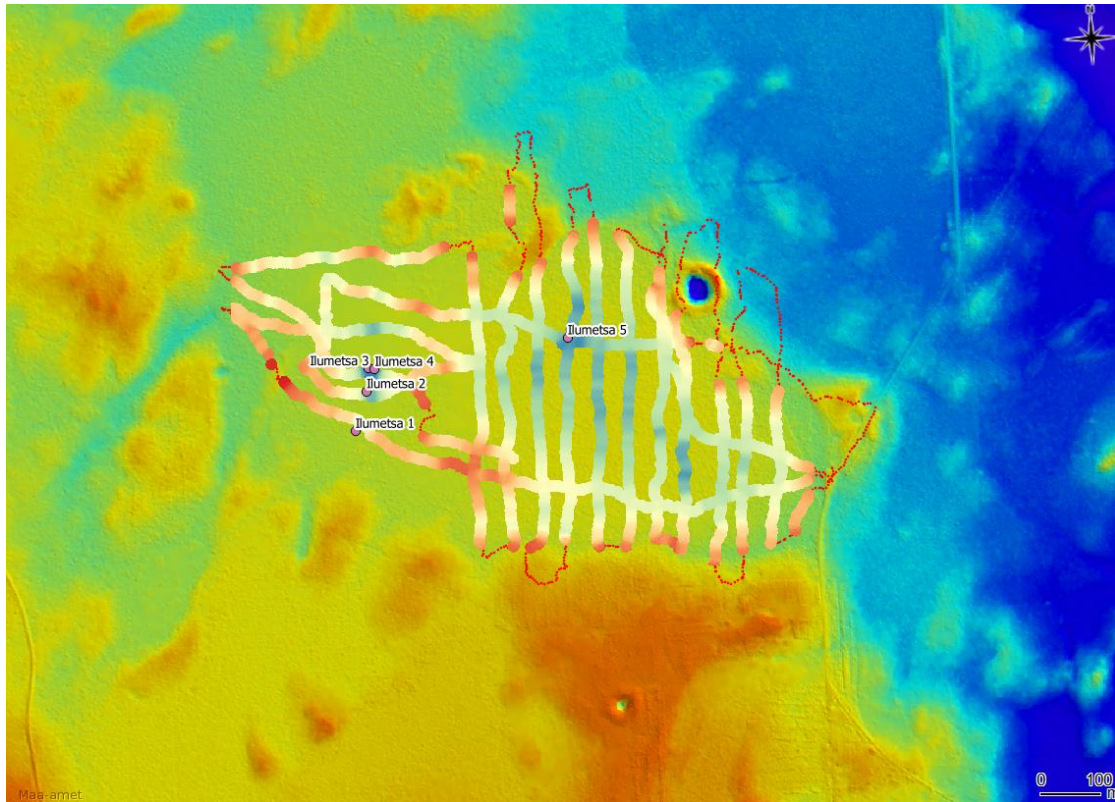
Joonis 9. Radari profiilide ja puuraukude asukoha skeem.



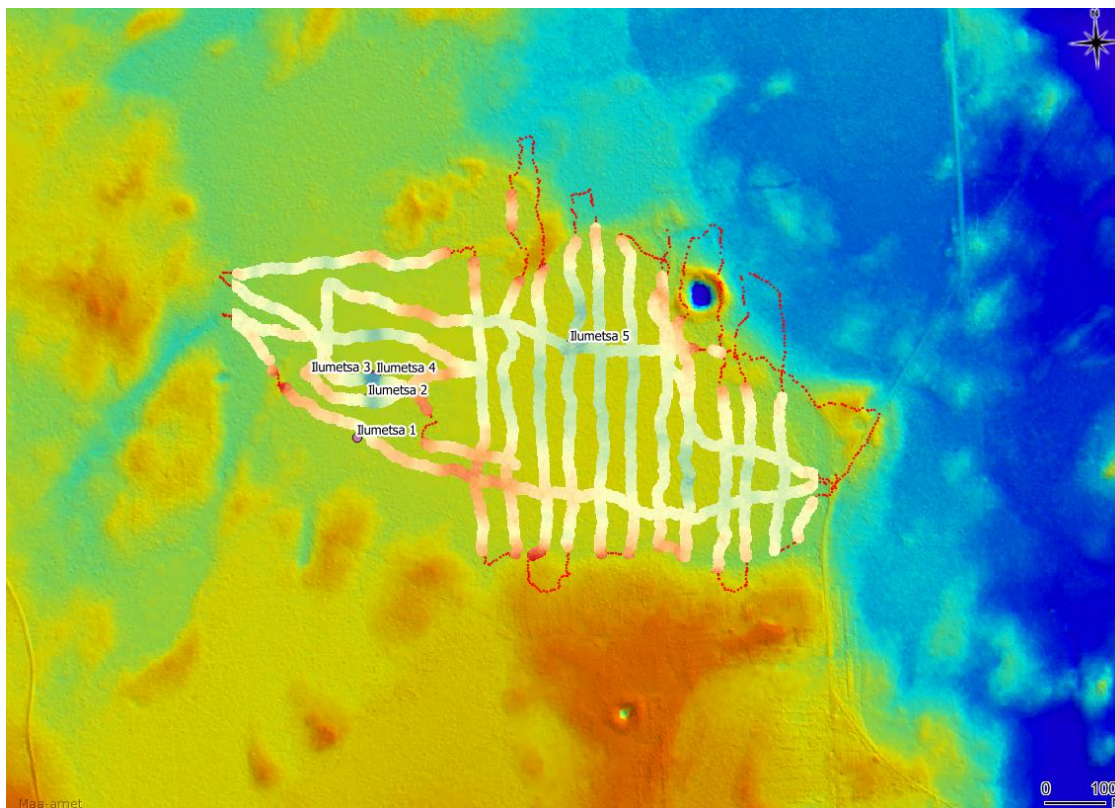
Joonis 10. Puuraukude asukohad ja turba paksused: 0 m – punane; 0,65 m – oranž; 1,25 m – kollane; 1,88 m – roheline; 2,5 m – sinine.



Joonis 11. Turba-aluse mineraalpinnase kõrguse kaart: 51 m – sinine, 51,75 m – roheline; 52,5 m – kollane; 53,25 m – oranž; 54 m – punane.

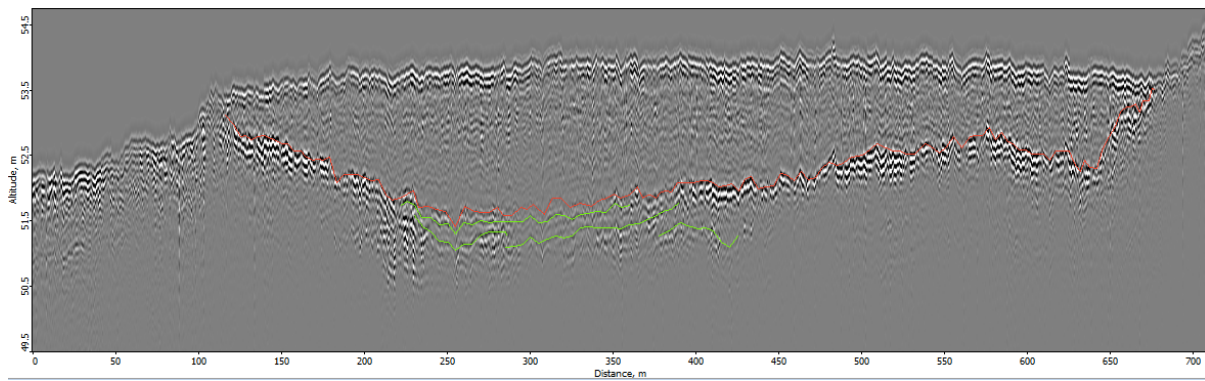


Joonis 12. Reljeefil puuraugud ja turba paksused: 0 m – punane; 0,65 m – oranž; 1,25 m – kollane; 1,88 m – roheline; 2,5 m – sinine.

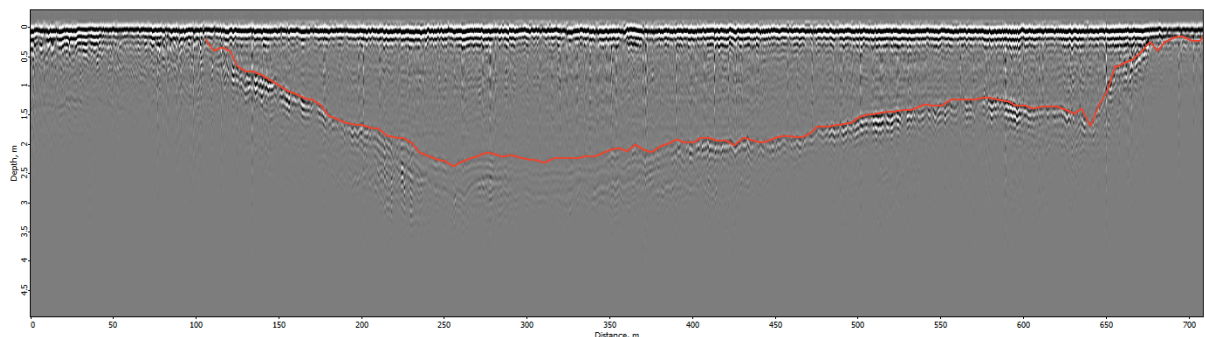


Joonis 13. Reljeefil puuraukude asukohad ja turba-aluse mineraalpinnase kõrguse kaart: 0 m – punane; 0,65 m – oranž; 1,25 m – kollane; 1,88 m – roheline; 2,5 m – sinine.

2016–2017 aasta välitööde käigus oli näha, et turbalasundi paksus jäi valdavalt alla 2,5 meetri ja ei ületanud kusagil kolme meetrit (joonised 10, 12, 14–17). Soo aluspinna reljeef on valdavalt tasane ja kuvatud profiili alusel võis oletada, et turba lamam asetseb mineraalsel pinnasel (joonised 14–16). Välitööde raames mõõdetud profiilide kogupikkus Põrguhaua soos on 12,2 km.

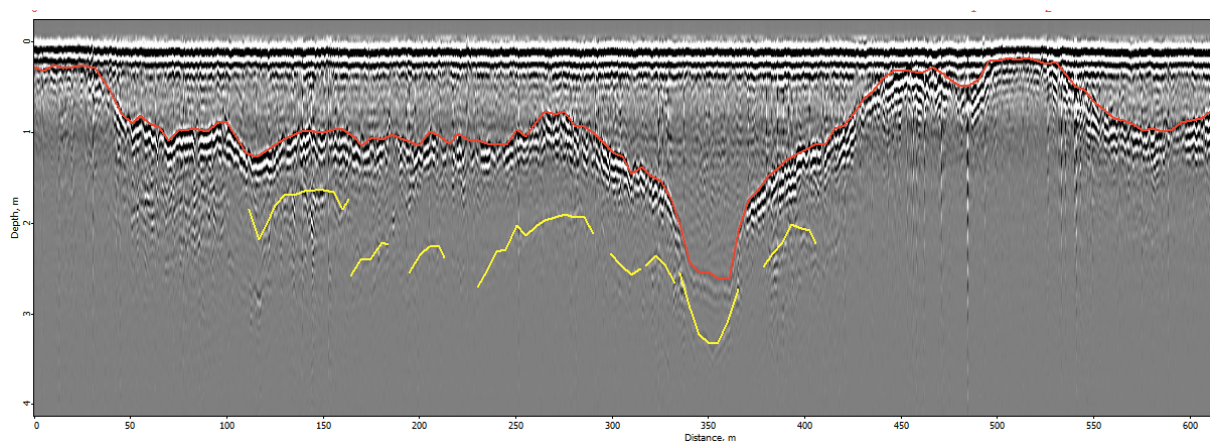


Joonis 14. Radargrammil Põrguhaua soo topograafiline läbilõige. Punase piirjoonega on joonistatud turba ja mineraalpinnase piir, rohelse joonega on esile toodud tugevamad peegelduspinnad.



Joonis 15. Radargrammil Põrguhaua soo läbilõige. Punase piirjoonega on joonistatud turba ja mineraalpinnase piir.

Kokku puuriti viis puurauku (kirjeldused toodud Lisas 1), neist esimene – Ilumetsa 1, sai puuritud Põrguhaua soo edela servale, kus võis oletada, et profiilil (joonis 16) nähtud vagu võib jätkuda antud punktis – see oletus kinnitust ei leidnud. Puuraukud Ilumetsa 2–4 said puuritud otse vaole (joonis 16) otsides profiilil nähtud objekti. Arvestada tuli ka käsi GPS-i asukoha veamääruga (puisrabas hinnanguliselt kuni 15 meetrit). Puurauk Ilumetsa 5 sai puuritud koordinaatidele, mida võis arvata soo kõige sügavamaks kohaks ja ühtlasi Põrguhaua soo soostumise koldeks. Puuraukud asetsevad radarprofiilidel (asukoha määramise vea piires).



Joonis 16. Radargrammil Põrguhaua soo lääne osasse jääv põhja-lõuna suunaline nõgu. Punase piirjoonega on joonistatud turba ja mineraalpinnase piir, kollase joonega on esile toodud tugevamad peegelduspinnad.

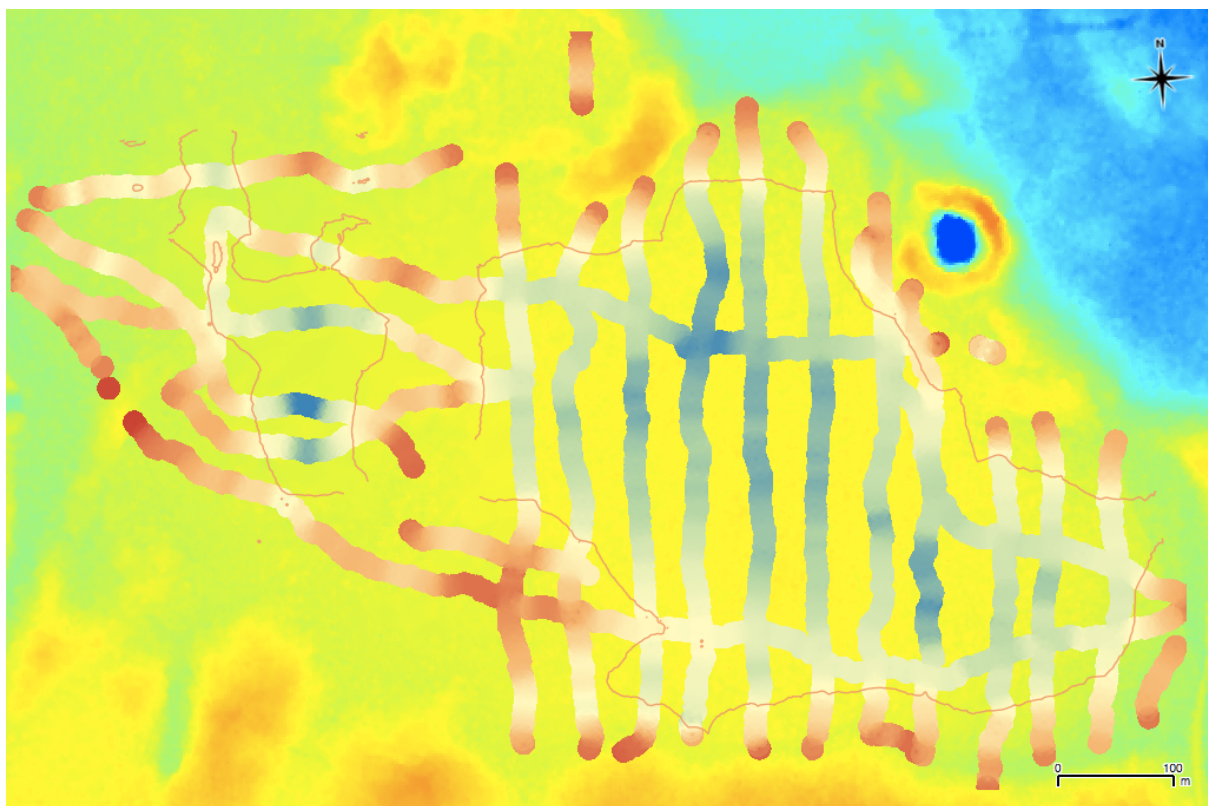
Põrguhaua soo pealisreljeef on võrdlemisi sile (joonis 14), soo-alune reljeef on kergelt kausi kujuline (joonis 14, joonis 15) ja sujuva mikroreljeefiga (jäab paarikümne cm piiresse), kui välja arvata raba lääne osasse jääv põhja-lõuna suunaline nõgu (joonis 16), kus radari profiili järgi asub turbalamam sügavusel 2,6 m. Puuraugu 4 puurimisel jõuti 2,6 m peal orgaanikarikka aleuriidini, mis langeb kokku radari profiiliga joonisel 16, mineraalse pinnaseni jõuti puurides sügavusel 2,9 m. Profiili (joonis 16) järgi esineb vao põhjas mitu tugevamat peegelduspinda. Esialgsel oletusel pärast 2016 aasta välitöid võis vagu jätkuda lõuna suunas ja olla soo äravoolu kanaliks. 2017 aasta kevadel tehtud välitööd aga lükkavad selle hüpoteesi ümber, kuna vagu ei jätku lõuna- ega põhjasuunas. Võib oletada, et tegemist on hilis-jääaegse pinnavormiga. Nüüdisreljeefis esineb sarnaseid pinnavorme Põrguhaua soost lõuna pool.

Põrguhaua soo sügavam osa jääb võrdlemisi soo keskele, kuhu tehti puurauk 5, mille radarprofiili (joonis 14, joonis 15) pealt on näha, et turbakihi all on mitu reflektorpinna ja sügavus ulatub umbes 2,4 meetrini. Puurides jõuti 2,3 m peal savika aleuriidini, mida läbistati antud puurimiskohas 5 cm. Võib oletada, et antud asukoht võis olla soostumise üheks põhiliseks koldeks, mida toetab soo alune reljeef. Küll aga ei saa väita, et tegemist oli väikese järvega, mis kinni kasvas, sest puurimisel ei leitud sapropeeli.

Võib oletada, et tegemist on telmaatilise soostumisviisiga, kus liigniiskes maismaa osas on hakanud arenema soo. Soo arenemist soodustas kliima ja aluspinna reljeef, mis langeb kirde suunas. Äravoolu takistab väike seljandik, kus asetseb ka Põrguhaua kraater.

4.2 Turba alla mattunud meteoriidikraatri otsimisest

Radarprofiilide võrgustik Põrguhaua soos, peamiselt 50 m vahemaad profiilide tegemisel (joonis 9), on olnud tõenäoliselt piisavalt tihe, et välistada Sügavhaua mõõdus olev mattunud meteoriidikraater. Joonisel 17 kujutatud isojoonega katkendlikult piiratud ala on piirkond, kus turba paksus on vähemalt 1,25 m ehk piisav, et katta Sügavhaua mõõdus kraater lähtudes valemist 2, Põrguhaua soo servaalad saame välistada.



Joonis 17. 1,25 m isojoon ja turba paksused: 0 m – punane; 0,65 m – oranž; 1,25 m – kollane; 1,88 m – roheline; 2,5 m – sinine.

Kui lähtuda turba paksusest ja Pike (1977) kraatri proportsioonide vaatlustest, siis 2,5 m turbakiht lubab ka 80 m diameetriga kraatri mattumist arvestades, et vall võib olla kulunud ja seda peab katma piisavalt paks turbakiht, et peal kasvav taimestik ei reedaks kraatri valli – nii suure kraatri Põrguhaua soos välistab profiilide tihedus (joonis 9). Joonisel 8 näeme, et diameetriga 50 m (valli harjalt) on kraatri valli esialgne kõrgus umbes 1,7 m. Kui on valitud 50 m profiilide vahemaaks ja möödume kraatrist, siis ületame juba valli jalamit, mille

diameeter valli harjalt on 30-40 m. Profileerimise tulemusena kraatrit ei leitud, samas ei saa välistada, et profiilide vahele võis jääda väiksemas mõõdus meteoriidikraater.

5 Kokkuvõte ja järeldused

Põrguhaua soos georadariga läbi viidud mõõtmiste ja viie puuraugu puurimise tulemusena võib öelda, et turba paksus jääb valdavalt alla 2,5 meetri, sügavamates piirkondades võib turba paksus ulatuda 3 meetri lähedale. Turbalasund koosneb peamiselt madalsoo staadiumis tekkinud tarnaturbast, mida katab rabafaasis moodustunud sfagnumturvas (ülemised 70–80 cm).

Soo põhjareljeef on kergelt kausi kujuline ja sujuva mikroreljeefiga, võrdlemisi tasasel soosalusel profiilil esineb soo lääne osas põhja-lõuna suunaline vagumus, mis on tõenäoliselt hilis-jääaegse tekkega. Turbakihi all on mineraalne pinnakate – Kvaternaarisetted, turbakihi lamamiks on aleuriitne materjal, milleni jõuti puurimisel. Koos soodsa kliima ja – geohüdroloogiliste tingimustega, on piirkonna reljeefil olnud oluline osa Põrguhaua soo kujunemisel. Põrguhaua soost jääb kirdesse loode-kagu suunaline äravoolu takistav väike seljandik, millel paikneb Põrguhaua kraater.

Profileerimise käigus mattunud kraatreid ei leitud. Käesoleva uurimustöö tulemustest järeldub, et välitööde raames valitud profiilide vahemaa 50 m oli piisav, et välistada Sügavhaua mõõtmetele lähedane turba alla mattunud kraatri olemasolu. Profiilide vahele võib olla jäänud kraater, mille diameeter valli harjalt on vähem kui 30–40 m. Profiilide tiheduse valimisel saab arvesse võtta ka turbalasundi paksust, mis seab piirangud kraatri valli kõrgusele (joonis 8).

Välitööde raames mõõdetud profiilide kogupikkus Põrguhaua soos on 12,2 km ja puuriti viis puurauku. Antud töö käigus oli tähtsal kohal ka metoodika omandamine ja tööga seotud programmide õppimine.

6 Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Argo Jõehte, kes suunas kogu protsessi, õpetas tarkvara kasutamist ja aitas teostada välitööd Põrguhaua soos. Veel tänaksin ka Jüri Pladot, kes õpetas esimesed põhitõed geofüüsikalistest meetoditest ja välitöödest kasutades georadarit. Tänu kuulub ka paljudele geoloogia ja füüsika osakonna õppejõududele, kes on minu maailmapilti läbi aastate veelgi avardanud. Tänan Teid kõiki kogu südamest!

Studies of Põrguhaua Bog using ground-penetrating radar (GPR) and determining profile density

The Ilumetsa impact crater field is in Southeast of Estonia and consists of two well-preserved simple impact structures that are named Põrguhaud (*Hells Grave*) and Sügavhaud (*The Deep Grave*). Ilumetsa is listed as a proven meteorite impact in the Earth Impact Database, although neither remnants of the projectile have been found nor solid proof of other identification criteria.

The main purpose of the present bachelor thesis was to study Põrguhaua Bog that lies in the Ilumetsa crater field, using ground-penetrating radar (GPR) and drill holes to determine the depth of peat layer and the topography under it.

The second task was to look for impact craters under the peat layer and determine (GPR) profile density which based on the crater diameter. The third aim was to determine the rim height – diameter correlation to rule out craters that could not be buried under the peat layer based on its thickness.

GPR profiles and 5 boreholes showed that the thickness of peat layer is mainly less than 2.5 meters reaching occasionally nearly 3 meters. The underlying topography is mainly even and slightly bowl-shaped with exception to north-south directed trench in the western part of the Põrguhaua bog.

50 meter profile spacing was sufficient to exclude any buried craters of Sügavhaua-sized or larger. Chosen profile spacing would still allow existence of craters with 30-40 m rim-to-rim diameter or smaller. The thickness of peat is not a limiting factor as this would allow even hidden craters of 80 m in diameter.

7 Kasutatud kirjandus

Aaloe, A., 1961 Ilumetsa Kraatrid. Eesti Loodus, 5, 297-299

Aaloe, A., 1963 Новые данные о строении Илуметсаских кратеров. ENSV Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituudi uurimused XL

Aaloe, A., 1979 Meteoriidikraatrid Ilumetsas. Eesti Loodus, 12, 5, 26-31

Artemieva, N.A., Shuvalov, V.V., 2001 Motion of a fragmente meteoroid through the planetary atmosphere. Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. E2, 3297-3309

Dufresne, A., Poelchau, V., *et al*, 2012 Crater morphology in sandstone targets: the MEMIN impact parameter study. Meteoritics & Planetary Science

Ilomets, M. 1992 Some main trends in the development of Estonian mires. – In: Proc. 9th International Peat Congress, Vol. 1. Uppsala, pp 205-214

Ilomets, M. 1994 Turba juurdekasv Eestis. – Rmt-s: J. Roosaare (toim) Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat, 26. kd. Eesti Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn, 13-18

Ilomets, M. 1999 Eesti soode genees ja loodustingimuste muutumine. – Rmt-s: L. Merikalju (toim) Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat, 32. kd. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn, lk. 60-68

Ilomets, M., Kimmel K., *et al* 2007 Sood Eestis ja Lõuna-Soomes. Tallinna Ülikooli Ökoloogia Instituut, Tallinn

Isakar, M. 2012 Ilumetsa meteoriidikraatrid. TÜ geoloogiamuuseumi koduleht, Üldine geoloogia http://www.ut.ee/BGGM/ylidine_geoloogia/ilumetsa.pdf

Losiak A., Jõelett A., Plado, J., *et al*, 2017 Dating Ilumetsa Craters (Estonia) Based on Charcoal Emplaced within their Proximal Ejecta Blankets. Lunar and Planetary Science XLVIII

Melosh, H.J., 1989 Impact Cratering: A geological process, Oxford University Press, New York

Orru, M. (koost) 1992 Eesti turbavarud. RE Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn

Orru, M. 1995 Eesti turbasood. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn

Paal, J., Leibak, E., 2013 Eesti soode seisund ja kaitstus. Eestimaa looduse fond, Tartu

Plado, J., Henkel, H., Olofsson, B., 2000 Geophysical studies at the Ilumetsa impact site. 4th ESF Workshop, Lappajärvi, 86

Plado, J. 2012 Meteorite impact craters and possibly impact-related structures in Estonia. *Meteoritics & Planetary Science* 47, Nr 10, 1590–1605

Raukas, A. 1988. Eestimaa viimastel aastamiljonitel. Valgus, Tallinn

Raukas, A., Tiirmaa, R., Kaup, E., Kimmel, K., 2001 The age of the Ilumetsa meteorite craters in southeast Estonia. *Meteoritics & Planetary Science* 36, 1507-1514

Takahashi, K., Igel, J., Preetz, H., Kuroda, S., 2012 Basics and Application of Ground-Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process, Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management, Dr. Manish Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-51-0117-8, InTech <http://www.intechopen.com/books/problems-perspectives-and-challenges-of-agricultural-water-management/basics-and-application-of-ground-penetrating-radar-as-a-tool-for-monitoring-irrigation-process>

Thomson, P. 1936. Künnapuu ja jalakas Eesti metsaajaloos. – *Eesti Loodus*, No 4: 161

Tiirmaa R., Puura, V., *et al*, 2007 Estonian meteorite craters. Tallinn, 14-15

Tiirmaa, R., 2005 Kuidas leida meteoriite? *Eesti Loodus* 2005/11

Earth Impact Database

<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/>

LISA 1

Lisas on toodud Põrguhaua soos viie puuraugu (Ilumetsa 1–5) kirjeldused.

Ilumetsa 1 700782E 6429153N	
0 – 0,75 m	Sfagnumiga siirdesoo- ja rabaturvas: kohev, vähe jäi kannu.
0,75 – 0,95 m	Tarnaturvas, hästi lagunenu ja aleuriidirikas. Sügavusega vähenes orgaanika sisaldus. 0,85 m peal põlengukoht.

Ilumetsa 2 700801E 6429221N	
0 – 0,70 m	Vähe lagunenu sfagnumturvas, helepruun.
0,70 – 2,15 m	Tarnaturvas, hästi lagunenu; tumepruun, sügavuti muutub tumedamaks, intervallis 1,85 – 2,15 m mustjas-pruun. Sisaldab taimejäänuseid.
2,15 + m	Savikas aleuriit.

Ilumetsa 3 700805E 6429260N	
0 – 0,75 m	Pruun, keskmiselt lagunenu sfagnumturvas.
0,75 – 1,00 m	Tumeda pruun tarnaturvas.
1,55 – 2,55 m	Tumepruun hästi lagunenu tarnaturvas üksikute taimejäänustega, alates 2,25 m pealt on veidi heledam. 1,9–2,20 m peal on mitu tumeda põlengukihti. Lamamiseks aleuriitne materjal.

Ilumetsa 4 (Ilumetsa 3-st 10 m ida pool)	
700815E	
6429259N	
0,50 – 0,85 m	Helepruun sfagnumturvas, keskmiselt lagunenu.
0,85 – 1,50 m	Tumedam pruun, hästi lagunenu, tarnaturvas pilliroo jäänustega.
1,90 – 2,60 m	Tumepruun hästi lagunenu tarnaturvas väheste taimejäänustega, üleval pool ka pilliroo tükke.
2,60 – 2,70 m	Orgaanikarikas aleuriit.
2,70 – 2,90 m	Hele-beež aleuriit vähese orgaanikaga.

Ilumetsa 5	
701145E	
6429313N	
0 – 0,80 m	Vähe kuni keskmiselt lagunenu sfagnumturvas; ülemine 50 cm on kann tühi.
0,8 – 2,25 m	Hästi lagunenu pilliroo- ja tarnaturvas, tumepruun. Lagunemisaste suureneb sügavuse kasvades.
2,25 – 2,30 m	Hästi lagunenu must orgaanika, põlengu jälgedega.
2,30 – 2,35 m	Savikas aleuriit.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemisel

Mina, Reelika Helde

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Ilumetsa kraatriväljal asuva Põrguhaua soo turbaaluse reljeefi uuringud georadariga,

mille juhendaja on Argo Jõelett,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 19.05.2017