

**Siim Veski, Atko Heinsalu ja Kalle Kirsimäe**

## **KAALI METEORIIDI VANUS JA MÕJU LOODUSKESKKONNALE SAAREMAA PIILA RABA TURBALÄBILÕIKE UURINGU PÕHJAL**

Käesoleva uurimuse eesmärk oli hinnata Kaali kraatrite vanust ning meteoriidi plahvusest johtunud muutusi Kaali ümbruse looduskeskkonnas. Arutlus põhineb Kaali kraatriväljast 6 km kaugusel asuva Piila raba turbaläbilõike õietolmu ja mineraalainese uuringul ning radiosüsiniku dateeringutel. Samast turbakihindist tehtud geokeemiliste analüüside tulemused võimaldavad siduda Kaali sündmuse iriidiumirikka turbakihiga. Iriidiumi markerkihiga samal tasandil on Piila raba läbilõikes sügavusel 172–178 cm jälgitav põlenud turba kiht. Selles kihis ulatub turbale ebaiseloomuliku, sissekantud mineraalse aine (kvarts, K-päevakivi, plagioklass) osakaal kuni 20%-ni, õietolmu sissekandes väheneb õietolmu koguhulk 3–6 korda ning kaob kultuurkõrreliste õietolm. Kõik see näitab, et Kaali meteoriidiplahvusega kaasnes lähiümbruse metsade hävimine. Iriidiumi ja väljastpoolt sood sissekantud mineraalne suurenenud sisaldusega ning õietolmu muutunud kooslusega seostunud turba kiht hõlmab ajavahemikku 800–400 a eKr.

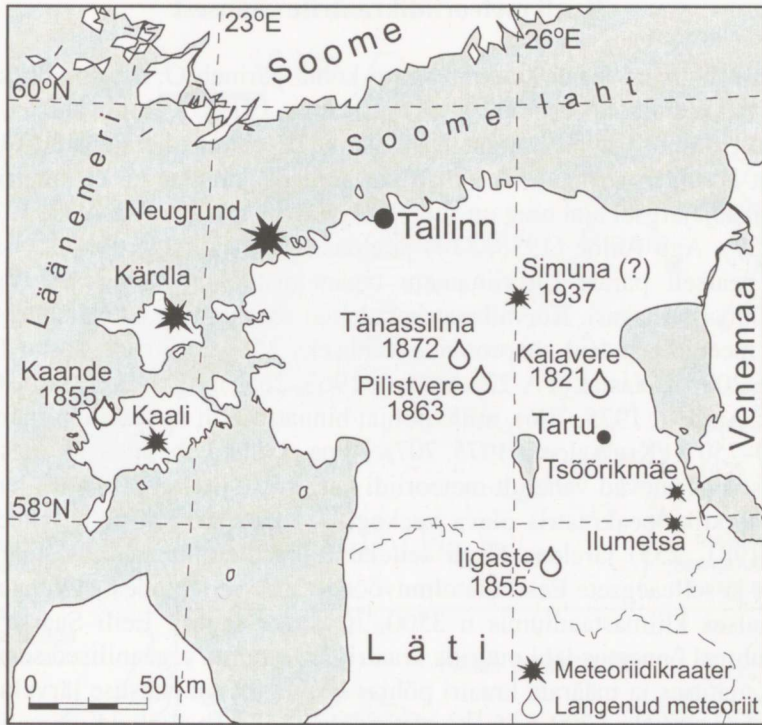
The aim of the present study was to estimate the age of the Kaali meteorite (Island of Saaremaa, Estonia) and to describe the effect of the impact on local environment. A sequence of peat enriched with impact ejecta (iridium content up to  $533.6 \text{ pg g}^{-1}$ ) from Piila bog, 6 km away from the Kaali impact crater was examined using pollen, radiocarbon, loss-on-ignition and X-ray diffraction analyses. Significant changes were recorded in the accumulation and composition of pollen in the depth interval of 172–178 cm containing iridium above background values. The impact swept the surroundings clean of forest, as shown by a marked decrease in the total pollen (especially tree pollen) influx, an increase in the influx and diversity of herb taxa and relative dominance of pine. Increased input of mineral matter (measured by loss-on-ignition) and allochthonous minerals, together with an extensive layer of charcoal and wood stumps in Piila bog in the same depth interval, points to an ecological catastrophe, with local impact-induced wildfires reaching at least 6 km NW of the epicentre. The disappearance of cereals in the pollen record suggests that farming, cultivation and possibly human habitation in the region ceased for a period. The age of the Kaali impact event is placed between 800 and 400 BC based on radiocarbon dating of the peat enriched with impact ejecta in Piila bog.

Siim Veski, Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut (Institute of Geology at Tallinn Technical University), Estonia pst 7, 10143 Tallinn, Eesti; veski@gi.ee  
Atko Heinsalu, Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut (Institute of Geology at Tallinn Technical University), Estonia pst 7, 10143 Tallinn, Eesti; heinsalu@gi.ee  
Kalle Kirsimäe, Tartu Ülikooli geoloogia instituut (Institute of Geology, University of Tartu), Vanemuise 46, 51014 Tartu, Eesti; arps@ut.ee

## Sissejuhatus

Vaieldamatult on iga Maale langenud meteoriid unikaalne nähtus meie planeedi ajaloos, on ju siiani maakeral avastatud vaid ligikaudu 170 meteoriidikraatrit. Alles viimastel aastakümnetel on selgunud, et kosmilise päritoluga taevakehade löögijäljed Maal pole mitte ainult erandlikud geoloogilised struktuurid, vaid neist suurimate kokkupõrked Maaga on põhjustanud olulisi muutusi planeedi elustiku evolutsioonis. Permi ja Triiase ajastu piiril – umbes 251 miljonit aastat tagasi – leidis aset Maa ajaloo suurim organismide väljasuremine. Planeedilt kadus u 90% mereorganismide liikidest, u 70% maismaa selgroogsetest ja enamik maismaa taimedest, sealhulgas sai läbi ka eostaimede valitsemisaeg. Uusimad uurimistulemused seovad selle katastroofi komeedi või asteroidi langemisega Maale (Becker jt 2001). Umbes 65 miljonit aastat tagasi, Kriidiajastu lõpul kukkus Yucatani poolsaarele Mehhikos hiiglaslik asteroid, mille põhjustatud globaalse kliimamuutuse tagajärgedega seostatakse ligi 40% elusorganismide perekondade ja 75% liikide, k.a dinosauruste väljasuremine. Esmaseks tõendiks sellest sündmusest oli nn iriidiumi anomaalia Kriidi ja Paleogeeni piiril (Alvarez jt 1980). Enamgi veel, on ülimalt tõenäoline, et hiiglaslik meteoriidiplahvatus 200 miljonit aastat tagasi Triiase ja Juura ajastu vahetusel jättis nende piirikihtidesse samuti suurema koguse iriidiumi ning aset leidnud ökoloogiline katastroof tõi Maa elustikus võimule needsamad dinosaurused (Olsen jt 2002).

Eesti on olnud geoloogilise ajaloo vältel korduvalt taevakivide märklauaks (Tiirmaa 2002). Praeguse seisuga on siit leitud kuus meteoriidikraatrit või kraatrivälja (joon 1). Eesti suurim, Neugrundi meteoriidikraater, asetseb Soome lahe suudmealal, u 8 km Osmussaarest kirdes ning see avastati 1996. aastal meregeoloogilisel kaardistamisel. Ringvallidelt mõõdetuna ligikaudu 8 km läbimõõduga kraater moodustus 535 miljonit aastat tagasi Vara-Kambriumi ajastikul (Suuroja & Suuroja trükis). Samasse suurusjärku langeb ka Hiiumaal paiknev 4-kilomeetrise läbimõõduga Kärddla astrobleem, mis tekkis 455 miljonit aastat tagasi meteoriiidi langemisel Hilis-Ordoviitsiumi aegsesse madalmerre (Puura & Suuroja 1992). Märksa väiksemad jäljed on maapõue jätnud viimase jääaja järel Eestisse langenud taevakehad. Kagu-Eestis Räpina lähedal asuv 40-meetrise läbimõõduga ja 6,5 meetri sügavune Tsõõrikmäe kraater tekkis kraatri süvikut täitvate põhjasetete alumiste kihtide radiosüsiniku dateeringu põhjal vähemalt 8600 a eKr ( $9320 \pm 100$   $^{14}\text{C}$  aastat; Tln-602; Pirrus & Tiirmaa 1984). Vaid u 20 km edelas paiknevad Ilumetsa kraatrid on nooremad. Neist suurima, Põrguhaua kraatri läbimõõt on 80 m ja sügavus 12,5 m. Põrguhauda ladestunud orgaanikaga liiva radiosüsiniku dateering andis tulemuseks  $6030 \pm 100$   $^{14}\text{C}$  aastat (Tln-310; Liiva jt 1979). Selle järgi toimus meteoriiidi kokkupõrge Maaga varem kui 4900 a eKr. Hiljuti leiti Ilumetsa kraatrite naabruses oleva Meenikunno soo turbalasalundist silikaatseid kerajaid mikroosakesi sisaldav kiht, mille teket seostati meteoriiidi plahvatusega (Raukas jt 2001). Vastav turbakiht kuhjus u 5600 a eKr ( $6700 \pm 50$   $^{14}\text{C}$  aastat; TA-725). Eestimaa noorim ja väikseim meteoriidikraater avastati hiljuti Simunast. Selle 8-meetrise läbimõõduga kraatriladse pinnavormi teket seostatakse



Joon 1. Eesti meteoriidikraatrid ja langenud meteoriidid.

Fig. 1. Map showing the meteorite craters and meteorite falls in Estonia.

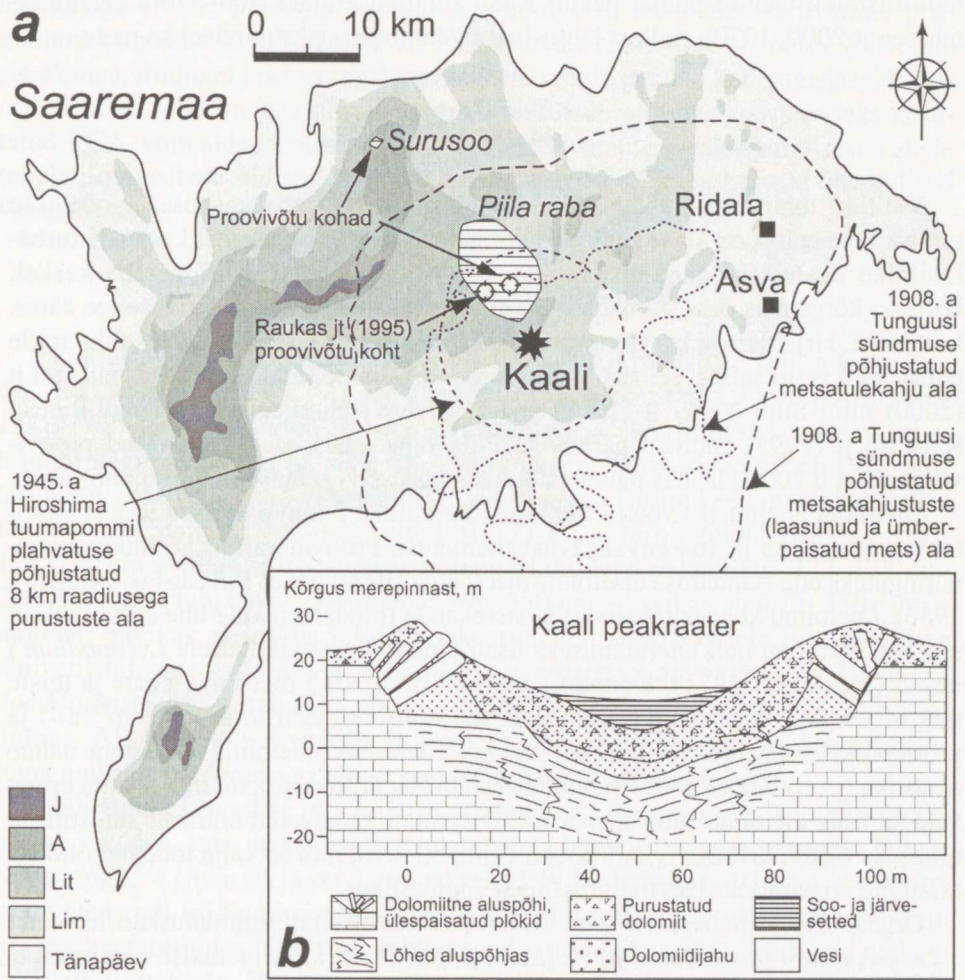
1937. aastal atmosfääri sisenenud boliidiga, mida märgati Pandivere kõrgustikul (Pirrus & Tiirmaa 1991). Meteoriitset materjali pole siimaani aga Simunast leitud.

Kahtlemata on Eestimaa kuulsaim ja unikaalseim loodusobjekt Kaali kraatriväli Saaremaal. Kaali kraatrite ehitusest on varem ilmunud piisavalt üksikasjalikud ülevaated (nt Tiirmaa 1994 ja viited selles) ning seetõttu käesolevas artiklis sellel ei peatuta. Küll on aga teadlased alates eelmise sajandi algusest, kui Julius Kalkun-Kaljuvee pakkus välja idee Kaali kraatri meteoriitse päritolu kohta (Kalkun 1922) ja Ivan Reinwaldt tõestas selle 1937. aastal meteoriidikildude leidmisega kõrvalkraatritest (Reinwaldt 1938), vaielnud meteoriidi langemise aja üle ja otsinud selle kohta tõestusmaterjali. Meie uurimus põhineb Saaremaa Piila raba turbaläbilõike uuringutel, milleks kasutasime õietolmu ja mineraloogilisi meetodeid ning radiosüsiniku dateeringuid. Samast turbakihindist tehtud geokeemiliste analüüside tulemused (Rasmussen jt 2000) võimaldavad siduda Kaali sündmuse sealt leitud iriidiumirikka turbakihiga. Meie eesmärk oli hinnata turbas salvestunud õietolmu ja mineraalainese koostise põhjal võimalikke Kaali meteoriidi plahvatuses johtunud muutusi Kaali ümbruse looduskeskkonnas.

### Kaali meteoriidikraatrite vanusest

Esimene hinnang Kaali kraatri vanuse kohta pärineb O. Linstowilt, kes pakus selle tekkeajaks 8000–4000 a eKr (Linstow 1919). I. Reinwaldt ei andnud konkreetset numbrilist määrangut Kaali kraatrite vanuse kohta, kuid tuginedes faktile, et kõrvalkraatrites leitud maismaa tigused, järeldas ta, et kraatrid moodustusid jääajajärgsel ajal ning on suhteliselt noored (Reinwaldt 1933, 193; Reinwaldt 1937). Agu Aaloe (1958, 114) järeldas maismaatigude põhjal, et kraatrid tekkisid peatselt pärast Litoriiinamere taganemist Kaali ümbrusest ligikaudu 4000–5000 aastat tagasi. Kõrvalkraatritest leitud söestunud puidu analüüsid radiosüsiniku meetodil andsid söeproovide vanuseks  $2530 \pm 130$   $^{14}\text{C}$  aastat (TA-19) ja  $2660 \pm 200$   $^{14}\text{C}$  aastat (TA-22; Aaloe jt 1963, 265) ning  $2920 \pm 240$   $^{14}\text{C}$  aastat (TA-769; Aaloe jt 1975, 706), mille põhjal hinnati Kaali meteoriidikraatri tekkeajaks 950–750 a eKr (Aaloe jt 1975, 707). Kuna ei olnud üheselt selge, kas uuritud sõejäänused pärinevad vahetult meteoriidi langemise perioodist, võeti järgnevalt uurimisobjektiks peakraatris oleva veekogu – Kaali järve – põhjasetted. Helgi Kessel (1981, 235) järeldas Kaali setteläbilõike õietolmuanalüüsi tulemustele tuginedes ja selleaegsete Eesti õietolmuvööde vanusest lähtudes, et kraater tekkis subboreaalses kliimastaadiumis u 3500  $^{14}\text{C}$  aastat tagasi. Leili Saarse juhitud uurimisrühmal õnnestus läbi puurida kraatris ladestunud orgaanilised setted kogu läbilõike ulatuses ja määrata kraatri põhjas lasuva 30 cm paksuse järvelubja kihi ülemise osa vanuseks  $3390 \pm 35$   $^{14}\text{C}$  aastat (Tln-1353). Et ei olnud võimalik dateerida järvelubja kõige alumist osa ning lamavat aleuriidikihti, siis pakuti Kaali meteoriidikraatri ligikaudseks vanuseks kuni 4000  $^{14}\text{C}$  aastat (Saarse jt 1991, 137).

Alternatiivne võimalus meteoriidiplahvatuse dateerimiseks on uurida selle jälgi eeldatavalt samaaegsetes setetes väljaspool kraatrit. Nimetatud hüpoteesist lähtudes võeti 1993. aastal koostöös Bent Aabyga Kopenhaageni Ülikoolist turbamoonoliidid Kaali lähiümbruse rabadest, Piila rabast ja Surusoost. Need transporditi geokeemiliste uuringute tegemiseks Taani. Kahjuks katkes koostööprojekt ja seiskus ka meiepoolne uurimistöö. Samasugusest tööhüpoteesist (meteoriidiplahvatuse mõjul laialipaisatud meteoriitse ja märklaudsetendite ainese jälgi võib leida Kaalit ümbritsevates soodes) lähtus ka uurimisrühm eesotsas Anto Raukasega (Raukas jt 1995), kes leidsid Kaalist 6 km põhja pool paiknevast Piila rabast (joon 2) 3 meetri sügavuselt siirdesooturba kihist silikaatseid kerajaid mikroosakesi, mille teket seostati meteoriidiplahvatusega. Vastava turbakihi dateeringuks saadi  $7585 \pm 65$   $^{14}\text{C}$  aastat (Tln-1972). Kaali meteoriidi langemise ajaks esitati 7500–7600  $^{14}\text{C}$  aastat tagasi (u 6400 a eKr), mis on tunduvalt vanem, kui varem arvati. Hilisemates uuringutes on samalaadseid silikaatseid mikroosakesi leitud ka Saaremaal Pelisoost (Kaalist 18 km loodes) ja Pitkasoost (Kaalist 28 km edelas) ning Hiiumaal Kõivasoost (Kaalist 70 km põhjas) (Raukas 2000). Nimetatud turbakihtide kohta ei ole radiosüsiniku vanusemääranguid ning setete ligikaudne vanus saadi varasemate setteuuringute õietolmuspektrite (Saarse & Königsson 1992; Sarv jt 1982) korrelatsioonil. Piila rabast on 1,75 m sügavuselt avastatud suure iriidiumisisaldusega turbakiht, mille teket seostatakse Kaali



**Joon 2.** (a) Kaali kraatri ja Piila rabas ning Surusooos uuritud setteläbilõike asukoht. Saaremaa kaardile on kantud Läänemere eri staadiumite rannajoon (Poska & Saarse 2002 järgi) (J – Joldia-meri, A – Antsülusjärv, Lit – Litorinameri, Lim – Limneameri). Saaremaa kaardile on projitseeritud Hiroshima tuumapommi plahvatuse (The Manhattan...) ja Tunguusi sündmuse (Vasilyev 1998) tekitatud purustuste mõju. (b) Kaali peakraatri geoloogiline läbilõige.

**Fig. 2.** (a) Map showing the location of the investigated sites – Kaali meteorite crater and Piila and Surusoo bogs on the Island of Saaremaa, Estonia. Areas of impact at the Tunguska event site (Vasilyev 1998) and of the Hiroshima atomic bomb (The Manhattan...) are superimposed. Shore-lines of the different stages of the Baltic Sea (after Poska & Saarse 2002) are shown as shaded areas (J – Yoldia Sea, A – Ancylus Lake, Lit – Litorina Sea, Lim – Limnea Sea). (b) Geological cross-section of the main crater at Kaali.

meteoriidi langemisega (Rasmussen jt 2000). Iriidiumiga rikastunud turbakihi radiosüsiniku vanuse põhjal pakuti Kaali sündmuse ajaks 400–370 a eKr (Rasmussen jt 2000, 1070), millest lähtusime tööhüpoteesi püstitamisel ka meie.

### Metoodika

Välitoid tehti Piila rabas 1993. ja 2000. aastal. Raba keskosas toodetakse turvast ja veetaset on alandatud. See võimaldas puurimise asemel kasutada turbaläbilõike avamiseks šurfimistehnikat. Proovivõtukoht asub Piila raba keskel, kõrgsoo kõrgeimas osas, turbatootmisvälja keskse, loode–kagusuunalise tee ääres. Läbilõike kirjeldamiseks ja proovimiseks kaevati 3,5 m sügavune auk, mille puhastatud vertikaalsest seinast võeti suured turbamonoliidid. Kaare Rasmusseni jt (2000) ning Siim Veski jt (2001) analüüsid tehti paralleelsetest monoliitidest. Raukase jt (1995) andmed pärinevad Piila raba edelaosast, kirjeldatud proovivõtukohest u 700 m läänes paikneva kuivenduskraavi seinast võetud monoliidist.

Õietolmu analüüsiks võeti Piila raba monoliidist 5 mm paksused järjestikused turbaproovid 185 ja 164 cm sügavusvahemikust. Proovid valmistati mikroskoopuuringuteks ette standardse atsetolüüsmetodiga (Berglund & Ralska-Jasiewiczowa 1986). Õietolmu kontsentratsiooni ja sissekande (pindalaühikule ühe aasta jooksul settinud õietolmu hulka) arvutamiseks lisati kindlale proovikogusele *Lycopodium*'i eosed (Stockmarr 1971). Koonddiagrammil on toodud õietolmu, eoste ja teiste mikrofossiilide sissekanne (mikroosakesed ruutsentimeetrile aastas;  $\text{cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) ja protsentuaalne sisaldus viie proovi jooksva keskmisena. Õietolmu sissekanne näitab maastiku (ja eri taimeliikide) õietolmu absoluutset produktsiooni, mis ei sõltu erinevate taimede õietolmu suhtvahekorra. Diagramm on jagatud kolmeks statistiliselt oluliseks õietolmuvööks eritarkvaraga Psimpoll 3.10, mis on välja töötatud oluliste tasandite eristamiseks biostratigraafilises andmestikus.

Orgaanilise ja mineraalse aine sisaldus turbas määrati kuumutuskaotusmeetodil 1 cm paksustest proovidest 550 °C juures (Heiri jt 2001). Mineraalse aine suurem sisaldus siirdesoo- ja rabaturbas näitab selle sissekannet väljastpoolt siirdesood ja raba.

Mineraalse ainese koostis määrati 3 tunni jooksul 450 °C juures kuumutatud turbaproovide tuhandest röntgendifraktomeetrilise analüüsi meetodil. Homogeniseeritud tuhandest valmistatud orienteerimata preparaadid skaneeriti DRON-3M difraktoomeetril Ni-filtreeritud  $\text{CuK}\alpha$  kiirgusega 2–50 °2 $\theta$  vahemikus sammuga 0,02 °2 $\theta$  ja loendusajaga 10 s iga sammu kohta. Difraktogrammid dekonvuleeriti 20–40 °2 $\theta$  regioonis AXES-koodiga (Mändar jt 1996), lähendades difraktsioonireflekse sümmeetriliste pseudo-Voigt funktsiooni  $\text{K}\alpha_{1,2}$  dublettidega. Mineraalide suhtelist sisaldust hinnati valitud tüüpreflekside integraalsete intensiivsuste suhete põhjal.

Radiosüsiniku analüüsid tehti Piila raba turba 1,5–2 cm paksustest proovidest konventsionaalse vedelik-stsintsilatsiooniloenduriga Tallinna ja Kopenhaageni laborites (Rasmussen jt 2000).  $^{14}\text{C}$  vanused kalibreeriti kalendriaastateks 1  $\sigma$  täpsusega (68,2% tõenäosus) tarkvara programmi OxCal 3.5 abil.

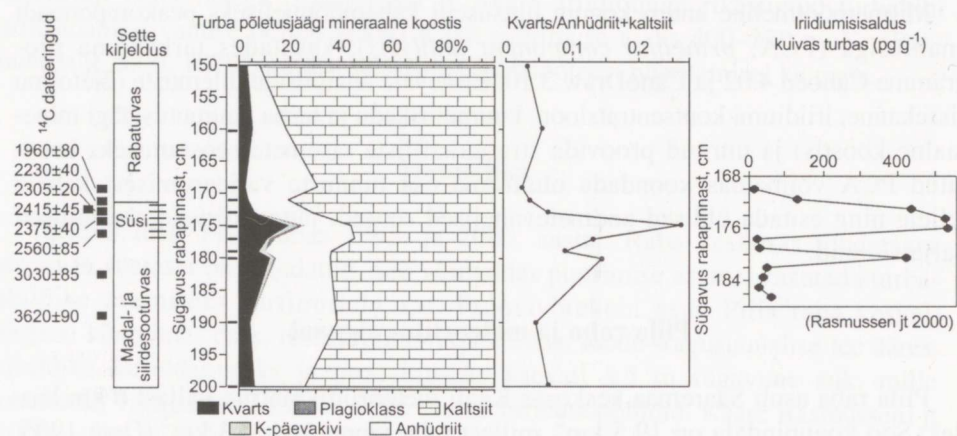
Mitmemõõtmeline andmekogum lihtsustati kahemõõtmeliseks peakomponendi analüüsiga (PCA; *principal component analysis*), kasutades tarkvarana programme Canoco 4.02 ja CanoDraw 3.10. Erinevate analüüsitude tulemuste (õietolmu sissekanne, iriidiumi kontsentratsioon, kuumutuskadu ja turba kuumutusjäägi mineraalne koostis) ja uuritud proovide stratigraafiliste tasemete seostamiseks kasutatud PCA võimaldas koondada olulisema osa tunnuste varieerumisest kahele teljele ning esitada üldised andmetevahelised seosed, jättes kõrvale ebaolulised variatsioonid.

### Piila raba ja meteoriitne signaal

Piila raba asub Saaremaa keskosas Kaali meteoriidikraatrite väljast 6 km loodes. Soo kogupindala on 19,5 km<sup>2</sup>, millest raba moodustab 5,3 km<sup>2</sup> (Orru 1995, 124). Proovivõtu kohas on turbast, järvemudast ja aleuriitidest koosneva sette-lasundi kogupaksus 3,5 m, selle all lasub moreen. Turbatootmisel on Piila raba lasundi ülaosast kooritud vähemalt 2 m rabaturvast. Uuritud setteprofiilis lasusid tootmisvälja pinnal järgmised setted: 0–171 cm – turbasambla-villpea turvas; 171–290 cm – puu-pilliroo turvas põlenud kihtidega vahemikus 172–178 cm; 290–303 cm – lubjarikas järvemuda; 309–350 cm – savikas aleuriit; 350+ cm – moreen. Savikas aleuriidis leidub rohkearvuliselt suurjärvedele iseloomulikke ränivetikaid, nagu *Aulacoseira islandica*, *Gyrosigma attenuatum* ja *Diploneis domblittensis*, mis viitab Piila nõo eraldumisele Läänemere Antsulusjärve staadiumis. Ala turvastus Boreaalne (Rätsep jt 1956) ja rabaturvas hakkas moodustuma umbes ajaarvamise vahetuse paiku (Rasmussen jt 2000, 1070).

Olulisimaks kosmilise mõju indikaatoriks Piila raba turbas on iriidiumi suurenenud sisaldus, mis maksimaalselt ulatub 533,6 pikogrammini grammis kuivas turbas (pg g<sup>-1</sup>) (joon 3) ja on 8 cm paksuse kihi keskmisena 301 pg g<sup>-1</sup>. Plaatina grupi elemendi iriidiumi sisaldus maakoos on mitmeid suurusjärgusid väiksem kui raudmeteoriitides ning selle rohkenenud sisaldus setendites võib viidata kosmilistele lisanditele. Maakoore keskmine iriidiumisisaldus on 20 pg g<sup>-1</sup> (Taylor & McLennan 1985) kuni 50 pg g<sup>-1</sup> (Wedepohl 1995, 1220). Seevastu Kaali raudmeteoriit sisaldab iriidiumi 2,8 µg g<sup>-1</sup> ning kraatri süvikut täitvate setete alumist osa moodustavates aleuriitides on seda 800 pg g<sup>-1</sup> (Veski jt 2001, 1373). Piila rabas ületab iriidiumisisaldus loodusliku fooni 10–25 korda. Kuigi iriidium võib setendites põhimõtteliselt eelistatult kontsentreeruda Fe/Mn-oksühüdraatides, sulfiidides ja tugevatel redoksbarjääridel, ei ole Piila rabas leitud anomaalne iriidiumisisaldus seotud ühegagi nendest põhjustest. Samas ei ole iriidium ka biofiilne element, millega võiks samuti seletada selle suurenenud kontsentratsiooni turbas.

Seega on üsna tõenäoline, et rohke iriidiumisisaldus Piila raba turbas on seotud Kaali meteoorkeha pidurdumisel atmosfääri alumistes kihtides hajunud ainese ja/või meteoriidiplahvatusel laiali paiskunud iriidiumirikka meteoriitse materjaliga, mis sadenes ka Piila soo pinnale ja säilis seal u 10 cm paksuse hajusa kihina.



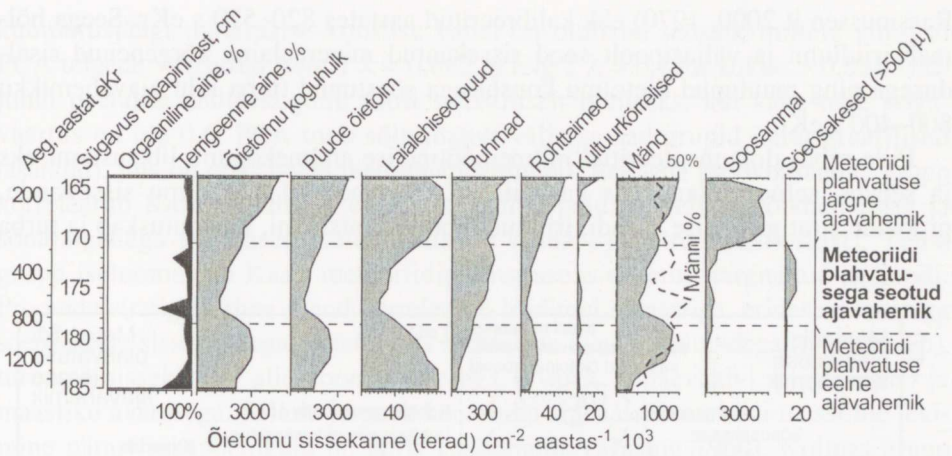
**Joon 3.** Piila raba uuritud setteläbilõike radiosüsiniku dateeringud, settekirjeldus, turba põletusjäägi mineraalne koostis ja iriidiumisisaldus (Rasmussen jt 2000 järgi).

**Fig. 3.** Summary diagram showing the lithology of the investigated section at Piila bog,  $^{14}\text{C}$  dates, mineral composition of peat ash and the iridium concentration in peat ash (by Rasmussen et al. 2000).

Iriidiumi markerkihiga samal tasandil on Piila raba läbilõikes jälgitav põlenud turba kiht ning puukändude ja okste jäänused. Põlenud kiht on puursüdamikese näha kogu raba ulatuses ja see osutab suurele põlengule. Lisaks eeltoodule sisaldas vaadeldav kiht silmaga eristatavaid liivateri (põhiliselt kvartsi ja päevakivi). Ohtrale mineraalne sisaldusele viitab ka märgatavalt väiksem turba kuumutuskadu samas sügavusvahemikus (joon 4). Turba kuumutusjäägi mineraalses koostises domineerivad valdavalt turba orgaanilises aines sisalduva süsiniku, kaltsiumi ja väävli arvelt põlemisel moodustunud autigeensed mineraalid kaltsiit ja anhüdiit. Kvarts, plagioklass ja K-päevakivi on aga allohtoonid ehk turbasse sissekantud mineraalid. Söestunud ja rohkenenud iriidiumisisaldusega turbakihi sügavusel 172–178 cm on turbale ebaiseloomuliku, sissekantud mineraalse aine osakaal kuni 20%, samal ajal kui lamavas siirdesoo turbaosas ja lasuvas rabaturbas on nende mineraalide hulk tuhandatuid turbas 3–5% vahel. Eriti hästi iseloomustab turbasse sissekantud võõrast materjali kvartsi ja anhüdiidi + kaltsiidi suhe (joon 3), mis näib kopeerivat iriidiumisisalduse käitumist samas läbilõikes.

Piila raba on üsna suure pindalaga ja tema setetest võetud õietolmu analüüsid kajastavad taimestiku muutusi ulatuslikul alal. Õietolmu sissekande põhitulemused on esitatud kokkuvõtlikult joonisel 4. Turba läbilõikes eristatavad kolm statistiliselt olulist õietolmuvoöd näitavad õietolmu sissekannet Piila rabasse enne meteoriidiplahvatust (alumine), plahvatusel järgnenud ajal (keskmine) ja olukorras, kus taimestik Kaali ümbruses on juba täielikult taastunud (ülemine). Õietolmu sissekanne enne Kaali sündmust on keskmiselt  $3 \times 10^6$  õietolmutera  $\text{cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ . Protsentuaalselt domineerivad õietolmuspektris kask ja lepp ning rohttaimede osa on väike. Vahetult





**Joon 4.** Üldistatud õietolmudiagramm ja kuumutuskadu Piila raba turbast. Õietolmuspektrid on ümber arvatud terade sissekandele  $\text{cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ . Mäni õietolmu puhul on lisatud katkendliku joonega ka protsendikõver.

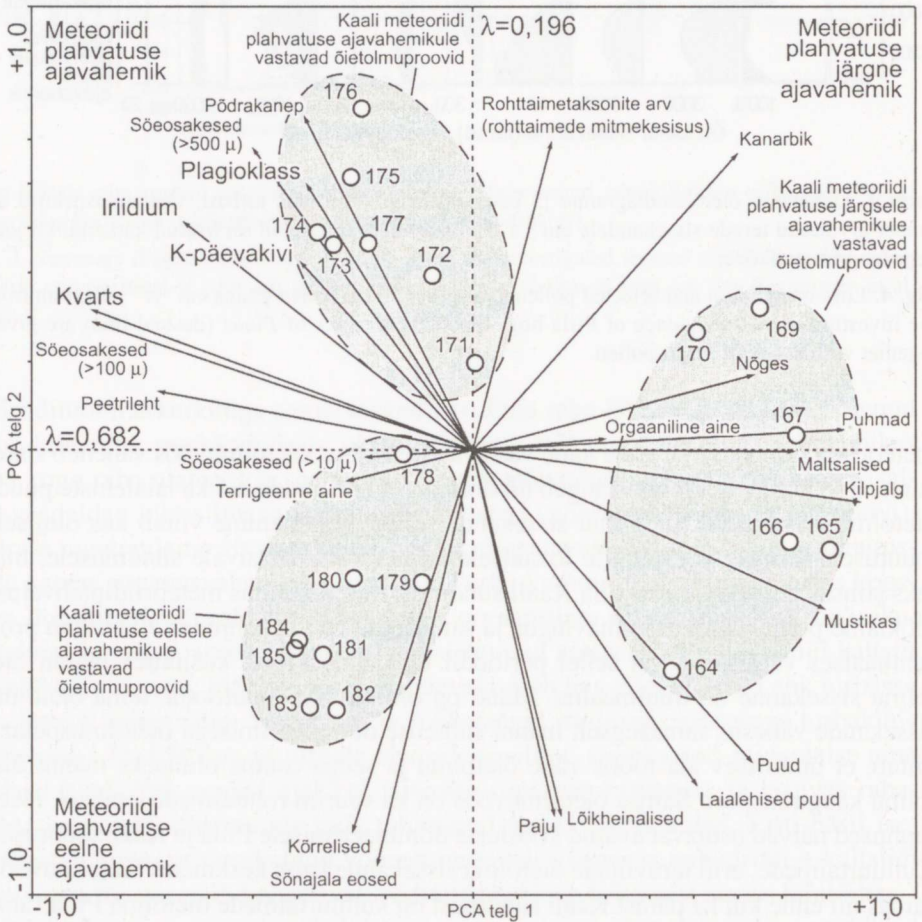
**Fig. 4.** Loss-on-ignition and selected pollen and spore influx (pollen grains  $\text{cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ) diagram from the investigated peat sequence of Piila bog. Percentage values of *Pinus* (dashed line) are given together with influx of *Pinus* pollen.

meteoriidiplahvatuse järgsele ajale vastavas keskmises õietolmuvöös väheneb sissekanne 3–6 korda. Seejuures langeb nii domineerivate puude kui ka laialehiste puude õietolmu sissekanne. Õietolmu sissekande selline vähenemine viitab kas olulisele muutusele kliimas või mingile lokaalsele taimestikku pärssivale sündmusele, milleks siinses kontekstis võis olla Kaali sündmus, mis väljendus meteoriidiplahvatuse lööklaine põhjustatud metsahävingus ja samaegsetes tulekahjudes. Õietolmu protsentuaalses vahekorras on sellel perioodil ülekaalus mänd, kusjuures mäni õietolmu sissekanne on minimaalne. Mänd on oluline õietolmutootja, tema õietolmu sissekande vähesus samaaegselt mäni suhtelise domineerimisega õietolmuspektris viitab, et ümbritsev ala tootis vähe õietolmu ja seega osutus oluliseks mäni õietolmu kaugtransport. Samas õietolmuvöös on ka suurim rohttaimede osakaal. Need tunnused näivad osutavat avatud koosluste domineerimisele Piila ja Kaali ümbruses. Kultuurtaimede, eriti teraviljade õietolmu sissekanne kaob keskmises õietolmuvöös, samas nii enne kui ka pärast Kaali sündmust on kultuurtaimede õietolmu Piila rabas püsivates hulkades. Kaali meteoriidiplahvatuse järgsele hilisemale ajavahemikule, kus taimestik oli plahvatuse, põlengu ja lööklaine mõjudest taastunud, viitab ülemine õietolmuvöö. Õietolmu sissekanne taastub plahvatuseelsele tasemele, see on  $u 4 \times 10^6$  tera  $\text{cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ . Õietolmu suhtvahekorras valdavad jälle kask ja lepp ning mäni ja rohttaimede osakaal on taandunud.

Põlenud turba kihi ülemise osa (172–174 cm) radiosüsiniku dateering oli  $2415 \pm 45$   $^{14}\text{C}$  aastat (Tln-2273) ehk 400–520 a eKr. Söestunud turba kihi alumisest osast võetud proovi (176–178 cm) dateering oli  $2560 \pm 85$   $^{14}\text{C}$  aastat (K-6290;

Rassmussen jt 2000, 1070) ehk kalibreeritud aastates 820–570 a eKr. Seega hõlmab iriidiumi ja väljastpoolt sood sissekantud mineraalne kõrgenenud sisaldusega ning muutunud õietolmu kooslusega söestunud turba kiht ajavahemikku 800–400 a eKr.

Piila rabas dokumenteeritud mitmemõõtmelise andmekogumi lihtsustamiseks ja seoste iseloomustamiseks kasutati PCA-d (joon 5). Õietolmu sissekande, proovide stratigraafilise asendi, iriidiumikontsentratsiooni, kuumutuskaot ja turba



**Joon 5.** Piila turbaläbilõike analüüside tulemuste peakomponendi analüüs. Nummerdatud tühjad ringid tähistavad turbaläbilõike proovivõtu tasandeid, nooled märgivad analüüside tulemusi.

**Fig. 5.** Principal component analysis (PCA) biplot of the joint data set from Piila bog showing pollen influx values, iridium concentration, loss-on-ignition values and mineral composition of peat ash, combined by investigated peat levels. The variable loadings (arrows) and the positions of samples (circles) are plotted as scores on the first two principal component axes. The sample levels in the investigated sequence are in stratigraphical order from bottom to top. The 1st PCA axis explains 68.2% and the 2nd PCA axis a further 19.6% of the variation in the data set.

kuumutusjäägi mineraalse koostise vahel on olulised seosed, millele viitavad PCA telgede väärtused (telg 1  $\lambda = 0,682$  ja telg 2  $\lambda = 0,196$ ; kokku  $> 0,88$ ). Üldjuhul peetakse andmekogumi seost statistiliselt oluliseks, kui kahe telje koguväärtus on üle 0,6. PCA toob sõltumatult välja samad grupid (stratigraafilised tasandid), mis on eristatavad õietolmudiagrammil. Esimene proovitasandite grupp korreleerub Kaali sündmuse eelse ajaga ning paju, kõrreliste, lõikheinaliste ja sõnajalgadega (viimased iseloomustavad madal- ja siirdesookooslust). Teine grupp iseloomustab Kaali meteoriidiplahvatusele vahetult järgnenud perioodi. Proovide stratigraafiline asend korreleerub iriidiumi signaaliga, erineva suurusega sөөosakeste sissekandega, põlemisega seostuvate õietolmutüüpidega (põdrakanep), turbasse sissekantud allohtoonse ainesega (kvarts, K-päevakivi, plagioklass) ja maastiku avatusega. Sellele järgneb kanarbiku signaal. Kanarbiku massiline levimine pärast rabapõlenguid on üpris iseloomulik (Masing 1960). Kolmas grupp näitab Kaali sündmusele järgnenud taimestiku taastumise perioodi. Kui nõges, maltsalised ja kilpjalg viitavad veel põlenud ja segipööratud maastikule, siis selle grupi viimased tasandid (näiteks 164 cm sügavusel) on heas korrelatsioonis puude õietolmu sissekandega ja negatiivses korrelatsioonis Kaali meteoriidiplahvatust iseloomustavate tasanditega ja indikaatoritega. Võib öelda, et alates sellest tasandist taastus taimestik Kaali ümbruses meteoriidiplahvatuse, lööklaine ja põlengu mõjust.

### Kaali meteoriidi mõju ümbritsevale keskkonnale

Kokkupõrge meteoriitide, asteroidide ja komeedituumadega võib olla katastroofiliste tagajärgedega kogu Maa biosfääri arengule. Kuid ka isegi suhteliselt väikesed kosmilised kehad, nagu Kaali meteoriit on võimelised rikkuma pikaks ajaks biosfääri lokaalset tasakaalu ning võivad põhjustada plahvatuspiirkonna elustiku täieliku hävingu (Chapman & Morrison 1994). Ligi 1000 tonni kaaluv Kaali IAB tüüpi raudmeteoriit langes Maale u 35° nurga all (Бронштэн 1962, 44; Aaloe 1968, 37; Явнель 1976, 123). Таevakeha purunes osaliselt juba atmosfääris ja eri suurusega tükid tabasid Saaremaa dolomiitset aluspõhja kogue energiaga 5–25 kilotoni TNT (ümberarvutatult Бронштэн & Станюкович 1963 järgi), moodustades praegu teadaolevalt üheksa kraatrit. Võrdlusena oli kilomeetrise läbimõõduga Arizona (Meteori) kraatri plahvatuse energia 20–40 megatoni TNT (Kring 1997, 519) ja Hiroshima tuumapommi energia 15–20 kilotoni TNT (The Manhattan...).

Meteoriidiplahvatuse mõju ümbritsevale keskkonnale on mitmekülgne: meteoriitse aine hajumine keha läbitungimisel atmosfäärist ja sadenemine maapinnale, plahvatus meteoriidi kokkupõrkel maapinnaga, lööklaine ja kraatrite teke, plahvatusenergia ja kuumuse mõjul süttiv ümbruskond jm.

Kaali meteoriidiplahvatuse otsest mõju keskkonnale võib hinnata samalaadsete sündmuste põhjal. Nendeks on meteoriitide langemised ja võimsad plahvatused lähimenevikus. Hiroshima ja Kaali plahvatuse energiad on võrreldavad,

Hiroshimas pühitati epitsentrist 1,5 km raadiuses lööklaine mõjul kõik, kuni 3 km raadiuses täheldati materjalide süttimist, hooned ja rajatised purunesid 8 km raadiuses (The Manhattan...), kusjuures suuremate purustuste saavutamiseks lõhati tuumapomm maapinna kohal. Tunguusi plahvatus 1908. aastal oli kolme suurusjärgu võrra tugevam (15 megatonni TNT), kuid plahvatus toimus 5–10 km kõrgusel õhus (Vasilyev 1998, 129). Tekkinud lööklaine kutsus maapinnal esile Richteri skaalas 4,5–5 magnituudilise maavärina, ümberarvutatult tabas maapinda 5–32 kilotonni TNT energiaga võrdeline plahvatus, mille tagajärjel lausus ja paiskus pikali taigamets ulatuslikul alal ning põles üle 100 km<sup>2</sup> metsa (joon 2). Väiksemad, nagu 1947. aastal Sihhote-Alini meteoriid (Krinov 1963), suuremaid purustusi ei tekitanud. Umbes 50 000 aasta vanuse Arizona kraatri tekitanud plahvatuse võimsust hinnatakse 20–40 megatonni TNT ning see põhjustas hinnanguliselt ainuüksi lööklaine purustustest tingituna taimestiku täieliku hävingu 800–1500 km<sup>2</sup> alal ja tappis või vigastas imetajate megafauna isendeid 16–24 km raadiuses plahvatuse tsentrist (Kring 1997, 529).

Kaali sündmuse energia jääb Tunguusi ja Hiroshima plahvatuse vahele. Kaudne viide plahvatuse mõju ulatusele on iriidiumi ja põlenud turba kihi levik 6 km kaugusel Piila rabas, kuid mõlema indikaatori puudumine Surusoo, 25 km Kaalist loodes. Meteoriiidi langemine tekitas kraatrid ning plahvatusega kaasnenud lööklaine juuris välja, murdis või paiskas ümber metsa. Ei ole välistatud, et juba plahvatusel vabanenud soojusenergia süütas põlema lähieümbruse taimestiku. Metsatulekahju(d) levis(id) ilmselt ka Piilasse, sellest annab tunnistust ulatuslik põlenud turba kiht. Hävinud taimestik tootis märgatavalt vähem õietolmu, seda näitab õietolmu sissekande mitmekordne vähenemine ja rohttaimede õietolmu osatähtsuse suurenemine teiste liikide arvel. Meteoriiidiplahvatus jättis Kaali lähieümbrusse maha laastatud metsa ja taimestikuta põlenud pinnase, s.t avatud maastiku, mis võimaldas tuulel erodeerida peeneteralisi liiva- ja tolmuosakesi, millest osa kandus ka Piila soosse ja moodustas anomaalse, mineraalainese rikka kihi. Avatud maastikule viitab ka männi õietolmu kaugtransport. Kuna Saaremaalt pole teisi nii detailselt uuritud õietolmudiagramme, siis ei ole teada, kui kaugele Kaali kraatritest seesugune mõju ulatus. Loomulikult ei saa välistada, et Piila soo põlengule viitav kiht ei ole ajaliselt meteoriiidiplahvatusega täpselt seostatav ja plahvatusega hävitatud ja ärakuivanud mets süttis hiljem, näiteks välgust, kuid kirjeldatud nähtuste ajalis-ruumiline kokkulangevus lubab oletada nende põhjuslikku seost.

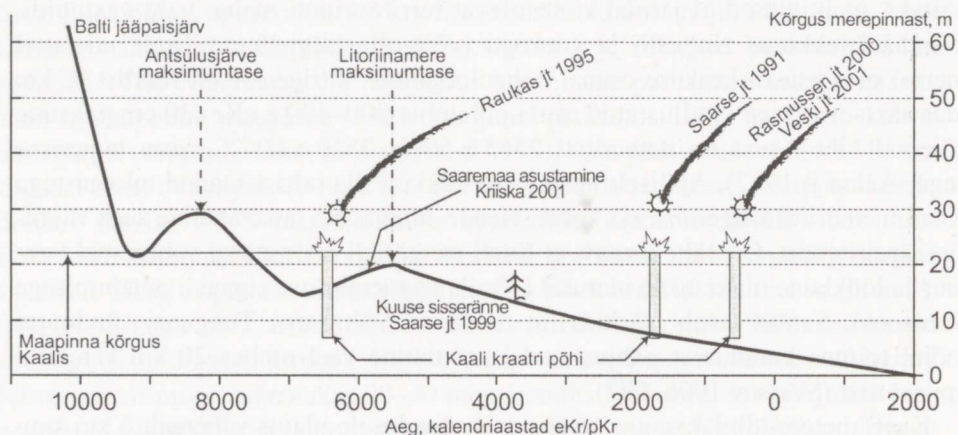
Eelajaloolise inimese mõju loodusele ja maaviljelusajalugu Saaremaal on hästi uuritud. Saaremaa asustati 5800 a eKr (Kriiska 2001, 7), püsiv maaviljelus tekkis umbes 2300 a eKr (Poska & Saarse 2002, 566) ja sellest ajast peale leidub teraviljade õietolmu Saaremaa õietolmudiagrammides järjekindlalt. Nii enne kui ka pärast Kaali sündmust on Piila rabas maaviljeluse signaal katkematu, viidates pidevale põllumajandusele ümbruskonnas. Meteoriiidiplahvatusega samaaegne teraviljade õietolmu sissekande kadumine osutab pausile maaviljeluses ja võib-olla ka asustuses. Selle vastu kõneleb hilispronksiaegne kuni eelrooma rauaaegne (500 a eKr; Lõugas 1980) arheoloogiline materjal Kaali kraatrivallil, mis nagu

näitaks, et inimesed ei jätnud kõnesolevat territooriumi maha, vaid vastupidi, kasutasid tekkinud ringvalli ja veekogu (võib-olla isegi “kosmiliselt” aletatud metsa) oma asustuskeskuse osana. Arheoloogiliselt intrigeeriv on Kaalist 20 km idas asetseva Asva kindlustatud asula põlemine 800–400 a eKr (30 cm paksune põlenud kiht Asvas on dateeritud  $2585 \pm 50$  ja  $2520 \pm 60$   $^{14}\text{C}$  aasta tagusesse aega; Aaloe jt 1977). Ajaliselt langeb see kokku Piila rabast saadud tulemustega Kaali meteoriidi langemise aja kohta. Nende sündmuste omavaheline seos vajaks aga täpsustamist. On vähe usutav, et Kaali meteoriidi plahvatusel vabanenud kuumus ja lööklaine nii kaugele ulatusid (võrdle ka meteoriitse signaali puudumisega Surosoos). Samas tasub märkida, et tunduvalt võimsama Tunguusi sündmuse mõjul toimus kuumusest põhjustatud isesüttimine veel umbes 20 km kaugusel epitsentrist (Svetsov 1996, 697).

Kaali meteoriidiplahvatuse otsene mõju loodusele ulatus vähemalt 6 km kaugusele kraatriväljast. Piila turbaläbilõikes on jälgitav ka looduskoosluse taastumine ökoloogilisest katastroofist. Viktor Masing (1960) uuris 1950. aastal põlengujärgset rabataimestiku taastumist sellesama Piila raba näitel ja sedastas kanarbiku vohamise põlengualadel kuni 50 aasta jooksul. Kanarbikule lisandusid teised puhmastaimed, nagu küüvits, sookail ja sinikas. Samasugune taimestiku arengukäik tuleb välja ka õietolmuandmetest (joon 5; proovitasemed 170–164 cm). Kõrvuti rabataimestikuga taastus ka ümbruskonna taimkate. Sellest annab tunnistust “normaalsetele” metsakooslustele viitava õietolmu osakaalu järkjärguline taastumine pärast sündmust.

### Kui vanad on siis Kaali meteoriidikraatrid

On väga raske nõustuda seisukohtadega (Raukas jt 1995; Raukas 2000), et Kaali meteoriit on mitu tuhat aastat vanem, kui seda näitab olemasolev faktimaterjal. Selgitamaks rohkem kui 4000 aastast erinevust teiste dateeringutega, mis kõik langevad ligikaudu ajavahemikku 1800–400 eKr, on Anto Raukas (suulised andmed 2002) oletanud, et algselt moodustus Kaali peakraatris karstilehter, mis välistas vanemate kui subboreaalsete setete moodustumise. Siiski, kui meteoriit langes tõepoolest u 6400 eKr (Raukas jt 1995, 181, dateeringud kalibreeritud), siis asus tollaegne Läänemere rannajoon tekkinud kraatritele tunduvalt lähemal (joon 2a). Kui projitseerida Kaali peakraatri põhja sügavus (u 7 m ü.m.p; Saarse jt 1991) Kaali ümbruse samakerkejoone alusel taastuletatud Läänemere rannajoon muutuste kõverale, siis selgub, et kraatri põhi asetseb vastaval etapil madalamal kui Litoriinamere tase (joon 6). Sellisel juhul pidi vabaveepinnalise põhjavee tase Kaalis olema igal juhul kõrgemal kui kraatri põhi ning kraatrinõkku tekkis kohe järv. See on ilmselges vastuolus senise geoloogilise andmestikuga, mis on olemas Kaali järve setete kohta (nt Kessel 1981, Saarse jt 1991) ning alusetu oleks ka põhjendus, et Kaali kraatrites ei toimunud karstilehtrite moodustumise tõttu settimist mitme tuhande aasta jooksul.



**Joon 6.** Kaali ümbruse samakerkejoonele vastav Läänemere rannajoone muutuste kõver (Saarse jt 2002 andmebaasi järgi) ja sellele projitseeritud maapinna kõrgus Kaali ümbruses (22 m ü.m.p).

**Fig. 6.** The altitude of the Kaali meteorite target area (22 m a.s.l.) projected to the shore displacement curve for the Kaali area (after the database of Saarse et al. 2002).

Teine oluline aspekt on Kaali sündmuse seostamine Saaremaa ja Hiiumaa rabadest leitud silikaatsete kerajate mikroosakestega (Raukas 2000). Kaali meteoriit on IAB tüüpi raudmeteoriit (koostises peale raua veel 7,25% niklit,  $2,8 \mu\text{g g}^{-1}$  iriidiumi,  $75 \mu\text{g g}^{-1}$  galliumi ja  $293 \mu\text{g g}^{-1}$  germaaniumi) ja selle põlemisel atmosfääris tekkivad osakesed ei saa olla silikaatse koostisega. Põhimõtteliselt võisid silikaatse koostisega osakesed tekkida ja laiali paiskuda meteorokeha kokkupõrkamisel märklaudsetenditega (praegusel juhul tõenäoliselt õhuke, < 5 m paksune Kvaternaari setete kiht Siluri dolomiitidel), kuid arvestades meteoriidikraatrite moodustumist kontrollivate seadustega (nt Melosh 1989) on äärmiselt ebatõenäoline nende osakeste hajumine kaugemale kui 5–10 km. Ometi ei ole välistatud, et kirjeldatud mikroosakesed märgivad siiski mõnda teist, seni veel tundmatut ja märksa vanemat meteoriidiplahvatust või suurt kondriitsete meteoroidide sadu.

Raukas (2002) väidab ka, et meteoriidi langemine Saaremaale 6400 eKr jättis kustumatu mulje tolaeagsetele inimestele ja talletus kestvalt rahva mällu. Praegu olemasoleva arheoloogilise materjali põhjal saabusid esimesed hooajalised hülgekütid Saaremaale mesoliitikumis u 5800 a eKr (Kriiska 2001, 7) ning sellisel juhul on ka küsitav meteoriidi kukkumise püsimine inimeste vaimses pärandis.

Kuigi ülejäänud Kaali sündmuse dateeringud on üksteisele lähemad, on ka nende hajuvus silmatorkavalt suur. Piila raba uurimistulemuste põhjal langes Kaali meteoriit Saaremaale ajavahemikus 800–400 eKr. Seega hiljem, kui eeldavad peakraatri põhjasetetest saadud dateeringud. Paraku on Kaali järve setetest tehtud õietolmudiagrammid (Kessel 1981; Saarse jt 1991) setete vanust silmas pidades vähe informatiivsed. Kuuse olemasolu järgi õietolmuspektris võib küll öelda, et setted on nooremad kui 3800 eKr, s.t ajast, kui kuusk immigreerus

Saaremaale (joon 6, Saarse jt. 1999), kuid muus osas on eristatavad õietolmu-kooslused sarnased mis tahes Hilis-Holotseeni ajavahemiku omadega. Kaali põhjasetete vanusemäärang u 1700 a eKr (Saarse jt 1991) on tehtud lubjasetetest ja võib tänu nn kareda vee mõjule osutada tunduvalt vanemaks tegelikkusest ning seetõttu on selle dateeringu usaldatavus kaheldav. Vaatamata eeltoodule on vastuolud Piila rabaandmete põhjal saadud Kaali meteoriidi vanuse (Rasmussen jt 2000; Veski jt 2001) ja Kaali peakraatri uurimistulemuste vahel siiski reaalsed ja nende lahendamisele aitaks kaasa uue interdistsiplinaarse uurimisprojekti käivitamine.

### Tänuavaldus

Töö valmis sihtfinantseeringute HM0331758s01 ja TBGGG1826 ning Eesti Teadusfondi (grant 4963) toetusel.

### Kasutatud kirjandus

- Aaloe, A.** 1958. Kaalijärve meteoriidikraatri nr. 5 uurimisest 1955. aastal. – ENSV TA Geoloogia Instituudi uurimused, 2, 105–117.
- Aaloe, A.** 1968. Kaali meteoriidikraatrid. Tallinn.
- Aaloe, A., Eelsalu, H., Liiva, A. & Lõugas, V.** 1975. Võimalusi Kaali kraatrite vanuse täpsustamiseks. – Eesti Loodus, 18: 5, 706–709.
- Aaloe, A., Liiva, A. & Ilves, E.** 1963. Kaali kraatrite vanusest. – Eesti Loodus, 6: 5, 262–265.
- Aaloe, A., Lõugas, V. & Saare, E.** 1977. Asva linnuse hukkumine. – Eesti Loodus, 20: 12, 759–762.
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. & Michel, H. V.** 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction: Experimental results and theoretical interpretation. – Science, 208, 1095–1108.
- Becker, L., Poreda, R. J., Hunt, A. G., Bunch, T. E. & Rampino, M.** 2001. Impact event at the Permian–Triassic boundary: Evidence from extraterrestrial noble gases in fullerenes. – Science, 291, 1530–1533.
- Berglund, B. E. & Ralska-Jasiewiczowa, M.** 1986. Pollenanalysis and pollendiagrams. – Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Chichester, 455–484.
- Chapman, C. R. & Morrison, D.** 1994. Impacts on the Earth by asteroids and comets: Assessing the hazard. – Nature, 367, 33–40.
- Heiri, O., Lotter, A. F. & Lemcke, G.** 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. – Journal of Paleolimnology, 25, 101–110.
- Kalkun, J.** 1922. Üldine geoloogia. Tallinn.
- Kessel, H.** 1981. Kui vanad on Kaali järvi põhjasetted. – Eesti Loodus, 24: 4, 231–235.
- Kriiska, A.** 2001. Stone Age Settlement and Economic Processes in the Estonian Coastal Area and Islands. Academic Dissertation, University of Helsinki, Institute for Cultural Research, Archaeology, Faculty of Arts. Helsinki.
- Kring, D. A.** 1997. Air blast produced by the Meteor Crater impact event and a reconstruction of the affected environment. – Meteoritics & Planetary Science, 32, 517–530.
- Krinov, E. L.** 1963. The Tunguska and Sikhote-Alin meteorites. – The Moon, Meteorites, and Comets. Chicago, 208–234.

- Liiva, A., Kessel, H. & Aaloe, A.** 1979. Ilumetsa kraatrite vanus. – Eesti Loodus, 22: 12, 762–764.
- Linstow, O.** 1919. Der Krater von Sall auf Oesel. – Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 21/22, 326–329.
- Lõugas, V.** 1980. Archaeological excavations in the Kaali crater area. – TATÜ, 29: 4, 357–360.
- Masing, V.** 1960. Rabade põlemine ja põlemisjärgsed taimkatte muutused. – Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised, Botaanikaalased tööd, 4, 96–122.
- Melosh, H. J.** 1989. Impact Cratering. A Geologic Process. New York.
- Mändar, H., Vajakas, T., Felsche, J. & Dinnebieer, R. E.** 1996. AXES 1.4 – a program for the preparation of parameter input files for FULLPROF. – Journal of Applied Crystallography, 29, 304.
- Olsen, P. E., Kent, D. V., Sues, H.-D., Koeberl, C., Huber, H., Montanari, A., Rainforth, E. C., Fowell, S. J., Szajna, M. J. & Hartline, B. W.** 2002. Ascent of dinosaurs linked to an iridium anomaly at the Triassic–Jurassic boundary. – Science, 296, 1305–1307.
- Orru, M.** 1995. Eesti turbasood. Tallinn.
- Pirrus, E. & Tiirmaa, R.** 1984. Tsõõrikmägi – ka meteoriidikraater? 2. – Eesti Loodus, 27: 10, 638–642.
- Pirrus, E. & Tiirmaa, R.** 1991. Kas Virumaa bolidid jõudis Maale? – Eesti Loodus, 34: 4, 210–214.
- Poska, A. & Saarse, L.** 2002. Vegetation development and introduction of agriculture to Saaremaa Island, Estonia: The human response to shore displacement. – The Holocene, 12, 555–568.
- Puura, V. & Suuroja, K.** 1992. Ordovician impact crater at Kärkla, Hiiumaa Island, Estonia. – Tectonophysics, 216, 143–156.
- Rasmussen, K. L., Aaby, B. & Gwozdz, R.** 2000. The age of the Kaalijärvi meteorite craters. – Meteoritics & Planetary Science, 35, 1067–1071.
- Raukas, A.** 2000. Investigation of impact spherules – a new promising method for the correlation of Quaternary deposits. – Quaternary International, 68–71, 241–252.
- Raukas, A.** 2002. Postglacial impact events in Estonia and their influence on people and the environment. – Geological Society of America, Special Paper 356, 563–569.
- Raukas, A., Pirrus, R., Rajamäe, R. & Tiirmaa, R.** 1995. On the age of meteorite craters at Kaali (Saaremaa Island, Estonia). – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, 44: 3, 177–183.
- 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.
- Reinwaldt, I.** 1933. Kaali järv – the meteorite craters on the Island of Ösel (Estonia). – Loodusuurijate Seltsi Aruanded, 39, 183–202.
- Reinwaldt, I.** 1937. Meteoorkraatrid Saaremaal. – Looduskaitse, 1, 118–131.
- Reinwaldt, I.** 1938. The finding of meteorite iron in Estonian craters. A long search richly rewarded. – The Sky Magazine of Cosmic News, 2, 6–7, 28–29.
- Rätsep, L., Truu, A. & Veber, K.** 1956. Saaremaa soodest ja nende kasutamise perspektiividest. – ENSV TA Toimetised. Bioloogia, 3, 211–225.
- Saarse, L. & Königsson, L.-K.** 1992. Holocene environmental changes on the Island of Saaremaa, Estonia. – PACT, 37, 97–131.
- Saarse, L., Poska, A. & Veski, S.** 1999. Spread of *Alnus* and *Picea* in Estonia. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, 48: 3, 170–186.
- Saarse, L., Rajamäe, R., Heinsalu, A. & Vassiljev, J.** 1991. The biostratigraphy of sediments deposited in the Lake Kaali meteorite impact structure, Saaremaa Island, Estonia. – Bulletin of the Geological Society of Finland, 63, 129–139.
- Saarse, L., Vassiljev, J. & Miidel, A.** 2002. Simulation of the Baltic Sea shorelines in Estonia and neighbouring areas. – Journal of Coastal Research, 18, 639–650.
- Sarv, A., Pork, M. & Ilves, E.** 1982. Stratigraphy and chronology of lake and bog deposits of the Kõivasoo bog. – Peatland ecosystems. Tallinn, 148–163.
- Stockmarr, J.** 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. – Pollen et Spores, 13, 615–621.



- Suuroja, S. & Suuroja, K.** Trükis. The Neugrund marine impact structure (Estonia, Gulf of Finland). – Impact Studies 2. Springer Verlag, Berlin; Heidelberg.
- Svetsov, V. V.** 1996. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion. – *Nature*, 383, 697–699.
- Taylor, S. R. & McLennan, S. M.** 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford.
- The Manhattan Engineer District**, June 29, 1946. Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki. [[http://nuketesting.enviroweb.org/hiroshim/hiro\\_med.htm](http://nuketesting.enviroweb.org/hiroshim/hiro_med.htm)].
- Tiirmaa, R.** 1994. Kaali meteoriit. Tallinn.
- Tiirmaa, R.** 2002. Meteoriidid ja meteoriidikraatrid. Tallinn.
- Vasilyev, N. V.** 1998. The Tunguska meteorite problem today. – *Planetary and Space Science*, 46, 129–150.
- Veski, S., Heinsalu, A., Kirsimäe, K., Poska, A. & Saarse, L.** 2001. Ecological catastrophe in connection with the impact of the Kaali meteorite about 800–400 BC on the island of Saaremaa, Estonia. – *Meteoritics & Planetary Science*, 36, 1367–1376.
- Wedepohl, K. H.** 1995. The composition of the continental crust. – *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59, 1217–1232.
- Бронштэн В. А.** 1962. Об обстоятельствах падения Каалиярвского метеорита. – *Метеоритика*, 22, 42–46.
- Бронштэн В. А. & Станюкович К. П.** 1963. О кратерообразующих метеоритах. – *ENSV TA Geologia Instituudi uurimused*, 11, 73–83.
- Явнель А. А.** 1976. К вопросу о составе метеорита Каалиярв. – *Астрономический вестник*, 10: 2, 122–123.

**Siim Veski, Atko Heinsalu and Kalle Kirsimäe**

**THE AGE OF THE KAALI METEORITE AND  
THE EFFECT OF THE IMPACT ON THE ENVIRONMENT:  
EVIDENCE FROM PIILA BOG, ISLAND OF SAAREMAA, ESTONIA**

*Summary*

A sequence of peat enriched with impact ejecta (iridium) from Piila bog, 6 km NW from the Kaali impact crater (Island of Saaremaa, Estonia) was examined using pollen, X-ray diffraction (XRD),  $^{14}\text{C}$  and loss-on-ignition (LOI) analyses to date and assess the environmental effect of the impact. Significant changes were observed in LOI, pollen accumulation, composition of pollen and mineral matter in the depth interval of 172–178 cm, which contains over-background values of iridium. At this point of research the age of the Kaali impact crater is dated at 800–400 BC. Rasmussen et al. (2000) showed a well-developed peak/plateau in the content of iridium (up to  $533.6 \text{ pg g}^{-1}$ ) in the peat of Piila bog at 172–178 cm below the bog surface. This iridium-rich layer is a marker horizon for the impact outside the crater and possibly formed as a result of iridium atmospheric dispersion during the entrance and breakup of the meteoroid. Associated with the iridium-enriched horizon are marked layers of charcoal, charred wood and wood stumps in the peat, found all over the  $19.5 \text{ km}^2$  Piila bog. Together with other

evidence, this points to ecological catastrophe, supporting the idea of local impact-induced wildfires, which reached at least 6 km NW of the epicentre. Loss-on-ignition analysis of peat shows two levels of increased input of inorganic allochthonous material which coincide with the iridium and XRD data and visual observations of charcoal and mineral particles.

X-ray diffraction analysis reveals that the main mineral phases in peat ash are calcite, anhydrite and quartz with traces of K-feldspar and plagioclase. Quartz and feldspars are allochthonous phases, interpreted as impact ejecta or post-impact aeolian dust. The content of quartz reaches 20% of the mineral composition of ash in the middle of the section, at a depth of 172–178 cm. In the same interval small amounts of K-feldspar and plagioclase were found. This abrupt change in the composition of peat ash is better expressed in the quartz/calcite + anhydrite relative abundance ratio curve, which shows clear increase in quartz in this interval.

The strength of the meteorite explosion at Kaali (~20 kt TNT) ranged between the effects of the atomic bombing of Hiroshima (15–20 kt TNT) and Tunguska event (5–32 kt TNT). An intriguing topic in connection with fire is the burning of Asva fortified settlement 800–400 BC. Although further detailed investigations are needed to prove this hypothesis, we can assure that, indeed, the perishing of Asva and the impact of Kaali overlap in time and maybe in space.

The three zones of pollen evidence roughly correspond to pre-impact conditions, the conditions directly after the impact and the recovery to the “normal” state. The impact explosion swept the surroundings clean of forest, which is shown by the threefold decrease in pollen influx and the relative dominance of *Pinus* on the percentage diagram. Over-representation of *Pinus* percentages is a common feature for barren landscapes. The broad-leaved trees on fertile soils outside the bog was most affected, which indicates that the disruptions in vegetation were not just local features around the sampling site in the bog.

Pollen evidence in zone 2 correlates with iridium, allochthonous minerals and pollen types indicating burning (*Chamaenerion*). Indicators of cultivated land, such as the cereals *Triticum*, *Hordeum* and *Secale*, which were present in pre-impact conditions, disappear in zone 2. Signs of continuous field cultivation on Saaremaa appear in 2300 BC. The disappearance of cereals suggests that farming, cultivation and possibly human habitation in the region ceased for some period. The transition from zone 2 to zone 3 is interpreted as a gradual recovery of vegetation from the impact of the meteorite. The effect of the Kaali impact on landscape is hidden by new generations of vegetation.

Currently two contradicting hypotheses exist about the age of the Kaali meteorite impact. Both rely on  $^{14}\text{C}$  dating of peat layers with extraterrestrial material and impact ejecta found in bogs nearby. The horizon with impact microspherules is dated back to about 6400 BC (Raukas 2000) and the one with elevated Ir to about 800–400 BC (Rasmussen et al. 2000; Veski et al. 2001).