

Tartu Ülikool

Looduse- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Magda Theresa Klaos

**Kalana *lagerstätte* dendroidsete graptoliitide uurimismetoodikast**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Oive Tinn, PhD

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2018

## **Kalana *lagerstätte* dendroidsete graptoliitide uurimismetoodikast**

Kalana *lagerstätte*'s leidub suure detailsusega, kohati kolmemõõtmelisena säilinud dendroidsete ja graptoloidsete graptoliitide fossiile. Hoolimata sellest, et need fossiilid on suurepäraselt säilinud, on nende morfoloogia ja siseanatomia uurimine osutunud keerukaks – tihti on raske eristada morfoloogilisi detaile ning samuti on osutunud keerukaks anotoomiliste sisestruktuuride kirjeldamine, mis on aga teatud graptoliidiliikide määramisel olulise tähtsusega.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on analüüsitakse erinevaid graptoliitide uurimise meetodeid, leidmaks sobivamad Kalana *lagerstätte*'st leiduva fossiilide uurimiseks. Dokumenteeritakse ja analüüsitakse Tartu Ülikooli geoloogia osakonna kollektsioonist pärinevat graptoliitide kivistismaterjali.

Märksõnad: Kalana, *lagerstätte*, graptoliit, stratigraafia, plaeoökoloogia

CERCS kood: P450 stratigraafia

## **Kalana *lagerstätte* dendroid graptolite research methodology**

Kalana *lagerstätte* has revealed complete, sometimes even three-dimensionally preserved, fossils of graptoloid and dendroid graptolites. Despite the excellent preservation of the fossils, it is often difficult to study the morphology and internal anatomy of the specimens. It especially difficult to see morphological details and internal anatomy, which is, however, crucially important for determination of certain species.

In this bachelor work, different research methods are analyzed to find the most suitable for the study of graptolite fossils found in the Kalana *lagerstätte*. The graptolite fossil material from the collection of the Department of Geology at the University of Tartu is documented and analyzed.

*Keywords: Kalana, lagerstätte, graptolites, stratigraphy, paleoecology*

CERCS kood: P450 stratigraphy

## Sisukord

Sissejuhatus.....	5
2. Ülevaade.....	6
2.1. Kalana <i>lagerstätte</i> .....	6
2.2. Paleogeograafia.....	7
2.3. Kalana karjäär.....	8
2.4 Stratigraafia.....	9
3. Graptoliidid.....	11
3.1. Graptoliidi üldine kirjeldus.....	11
3.2. Morfoloogia.....	11
3.4. Süstemaatika.....	13
3.4.1. Hõimkond: Hemichordata.....	13
3.4.2. Klass: <i>Pterobranchia</i> (sulgpeased).....	14
3.4.3. Alamklass: <i>Graptolithina</i> .....	14
3.5. Graptoliitide klassifikatsioon.....	16
4. Materjal ja meetodid.....	17
4.1. Materjal.....	17
4.2. Fluorestsentsmikroskoop.....	18
4.3. Leica dfc 495.....	18
4.4. <i>Camera lucida</i> .....	18
5. Tulemused.....	19
6. Arutelu.....	23
Kokkuvõte.....	24
Summary.....	25
Tänuavaldused.....	26

Kirjanduse loetelu.....	27
Internetiallikad:.....	30
Lisa 1. Graptoliitide klassifikatsioon.....	31

## Sissejuhatus

Kalana (Otisaare) karjäär asub Kesk-Eestis, kus igapäevaselt toimub aktiivne paekillustiku tootmine. Aktiivne kaevandamine toob geoloogidele järjest uusi kivimikihte esile. Paleontoloogide seas on Kalana karjäär eelkõige tuntud oma rohkete ja erakordselt hästi säilinud fossiilide poolest. Selliseid kohti, kus leidub erakordselt hea säilivusega fossiile nimetatakse *lagerstätte*'ks. Käesolevas töös kirjeldavad fossiilid on pärit Eesti ainukesest kontsentratsiooni-*lagersättes*'st, Kalana *lagerstätte*'st.

Graptoliitide fossiilid paiknevad lubjakivil ning morfoloogiliselt on nad pikad (pikliku-kujulised) ja kohati kokku surutud. Mikroskoobi all detailide nägemine on väga keeruline, sest mitmed fossiilid olid muljutud ja struktuurseid iseärasusi on raske märgata. Lisaks esineb neil läikiv rabdosoom, mis erineva valguse murdumise juures näeb teisiti välja.

Töös on keskendutud niinimetaud keskmisele skaalale (detailid mõnest millimeetrist kuni umbes 10 mikronini), kuna suures skaalas üldist välismorfoloogiat on võimalik lihtsalt hinnata, ning väga väikesed (alla 10 mikroni) detailid on enamasti hästi nähtavad skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) all.

Antud bakalaureusetöö keskendub dendroidsed graptoliitide uurimisele, mis on tuntud oma keeruka siseanatomia poolest. Rakendatakse erinevaid meetodeid, millega on võimalik uurida dendroidsete graptoliitide fossiilide keerukat sisestruktuuri.

## 2. Ülevaade

### 2.1. Kalana *lagerstätte*

Termin „*Fossil-Lagerstätte*“ pärineb Saksamaa kavandamis traditsioonidest (Briggs, Crowther, 1990). *Lagerstätte* tuleneb saksa keelsest sõnast „lager“ (säilimine) ja „stätte“ (kohta) ehk otsetõlkes „säilimise leiukoht“ (Seilacher, 2016). Antud termin on laenatud saksa keelest nii inglise kui ka eesti keelde ning sellega tähistatakse erakordselt hästi säilinud fossiilide leiukohta. *Lagerstätte*'ks võib pidada mis tahes settelise tekkega kivimit, mis sisaldab majanduslikku huvi pakkuvat komponenti. Fossiili-*lagerstätte* on mistahes kivim, mis sisaldab märkimisväärselt hästi säilinud fossiile ning mida saab kasutada teaduslikes uurimistöodes (Briggs, Crowther, 1990).

Fossiili-*lagerstätte*'d jagunevad kaheks: kontsentratsiooni-*lagerstätte*'d ja säilivus-*lagerstätte*'d. Kontsentratsiooni-*lagerstätte*'d on lasundid, kus on säilinud erakordselt rohkesti fossiile. Säilivus-*lagerstätte*'d on lasundid, mis on tuntud erakordselt hästi säilinud fossiliseerunud eluvormide poolest, eriti ainulaadseks teeb need kohad see, et sealt võib leida fossiile, millel on säilinud organismide pehmed koed (Bottjer, 2016).

Kõige rohkem huvi tuntakse säilivus-*lagerstätte*'d vastu, sest sealt saadav informatsioon on palentoloogidele kõige olulisem. Ühed kõige kuulsamad *lagerstätte*'d on Kambriumi-vanuselised Burgess Shale Kanadas ja Chengjiangi Maotianshani Shale Hiinas. Mõlemas *Lagerstätte*'s on leitud väga palju ainulaadse säilivusega selgrootute organismide fossiile (Bottjer, 2016).

Eesti oma *lagerstätte*'ks peetakse Kesk-Eestis paiknevat Kalana karjääri. Kalana karjääris, mida võib pidada kontsentratsiooni-*Lagerstätte*'ks, sisaldab rikkaliku ja erakordselt hästi säilinuid vetikate ning ka selgrootute ja selgroogsete fossiile.

Kalana kõige suuremaks aardeks on makroskoopiliste lubistumata vetikate fossiilid. Praegu on Kalana leiukoht kõige rikkalikum vetika-*lagerstätte* kogu maailmas, peites endas ligikaudu kümme morfoloogiliselt erinevat vetikataksonit. Kõige olulisemad on erakordselt hästi säilinud dasüklaadid (selts Dasycladales) – suured ning keeruka ehitusega üherakulised rohevetikad. Kalana *lagerstätte* erakordselt hästi säilinud

fossiilid on väliselt väga sarnased tänapäeval troopikas elava dasüklaadi *Cymopolia barbata*'ga (Mastik, Tinn, 2015). Kalana üks kõige levinumaid fossiile on aga punavetikate hulka kuulunud *Leveilleites hartnageli*. Tänu Kalana leiukohale teame, et vetikad olid Siluri meredes niisama tavalised ja levinud kui tänapäevalgi. Kalana-sarnaseid hästi säilinuid vetikafossiilide leiukohti on maailmast teada vaid üksikuid, neist tuntuimad on Eramosa ja Gasporti *lagerstätte*'d Põhja-Ameerikas (LoDuca, Brett, 1997).

Lisaks vetikate ning kalafossiilidele leidub Kalanas hea säilivusega meriliiliaid, käsnu, graptoliite, skolekodonte ehk hulkharjasusse, üksikuid sarv- ja kargkoralle, käsijalgseid, nautiloide, sammalloomasid, käsnu, tigused, karpvähilisi ja brahhiopode (Tinn et al., 2009). Faunafossiilid näitavad Siluri ajastu mitmekesisist biootat ehk elustikku. Kalana karbonaatsed kivimid sisaldab hulgaliselt mikrofossiile, mis enamasti on suuremate loomade säilinud osised või väga pisikesed loomad (näiteks skolekodondid, konodondid, karpvähid ning sammalloomade ja käsnade mikroskoopilised osised) (Tinn et al., 2009). Karjäär on geoloogidele huvi pakkunud juba pikka aega. Kalanast pärinevad Eesti kõige suuremad barüüdikristallid, sealsetest kivimikihtidest on leitud kaltsiiti, dolomiiti ja püriiti (Gaškov et al., 2017).

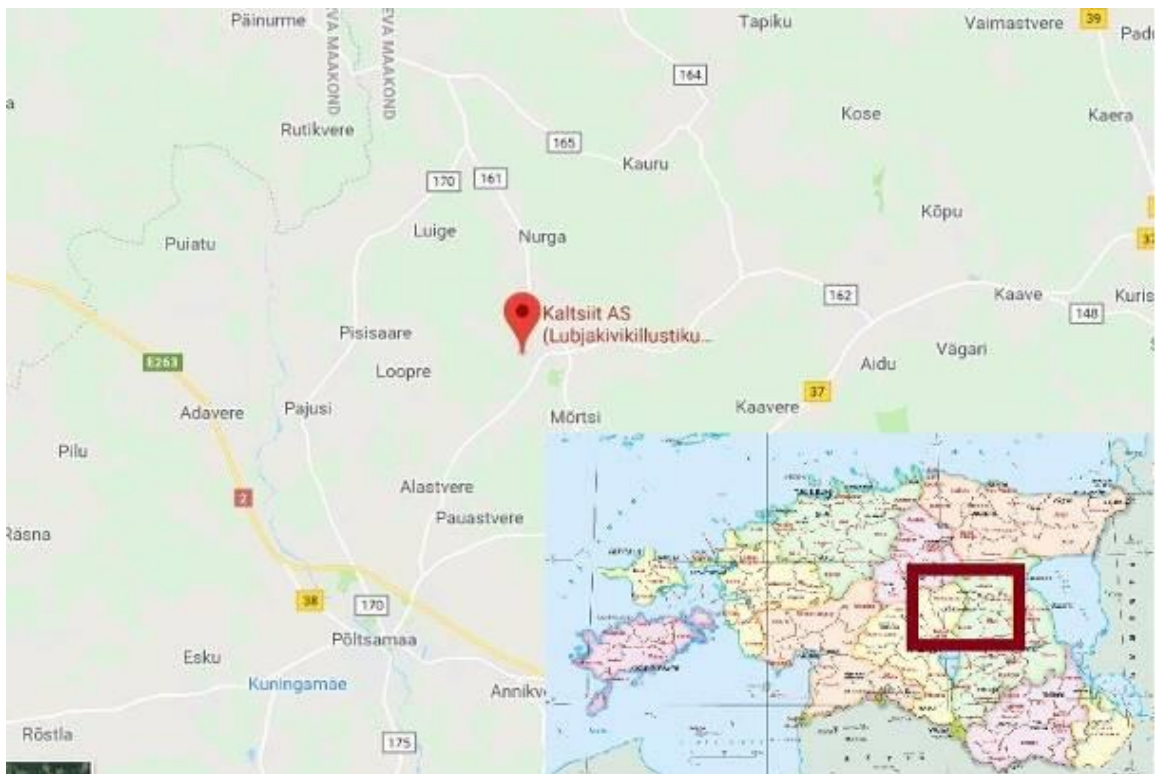
## **2.2. Paleogeograafia**

Siluri ajastu algul paiknes Balti paleobassein 10 - 20 kraadi ekvaatorist lõuna pool, olles troopilise või subtropilise kliimaga (Torsvik, Cocks, 2013). Balti paleobassein oli madal, epikontinentaalne settebassein Fennoskandia kilbi lõunaosas (Nestor, Einasto, 1997). Eesti aladel toimus settimine madalveelistes merelistest tingimustes. Siluri ajastul leidis aset regressioon, mille tulemusena taandus veekogu lääne ja edela suunas, vastavalt toimus fatsiaalsete vööndite järkjärguline nihkumine. Lisaks toimusid ka lühikesed regressiivsed episoodid, mille tulemusel asendus normaalne avamereline bassein laguunidega (Rõõmusoks, 1983). Karbonaatide settimiskiirus oli suur ning basseini madalamas osas kujunesid ariidsele ja troopilisele kliimale iseloomulikud varatekkelised dolomiidid ning korall-stromatoporoïdifik (Nestor, Einasto, 1997). Suure tõenäosusega oli Llandoverý ajastikul Eesti alal kliima troopiline või subtropiline.

Kalana *lagerstätten* materjal on settinud normaalsoolsusega merelistes tingimustes, kuid tõenäoliselt üsna madalas vees, mis oli kaitstud otsese lainetegevuse eest (Tinn et al., 2009).

### 2.3. Kalana karjäär

Kalana (Otisaare) paekarjäär asetseb Jõgeva maakonnas Pajusi vallas Kalana asula lääneservas, Otisaare linnamäest 0,5 - 1 km lõunasse (joonis 1). Tegemist on töötava karjääriga, mille üldpindala on 7. mai 2018 aasta seisuga 16,34 hektarit. AS Kaltsiit põhitegevusaladeks on lubjakivist ja dolomiidist paekivikillustiku tootmine tee ehituseks ja jaekaubandus kasutamiseks. Aktiivne kaevandamine toob nähtavale uusi kivimikihte, mis pakuvad teadlastele geoloogilist huvi.



Joonis 1. Kalana karjääri asukohta

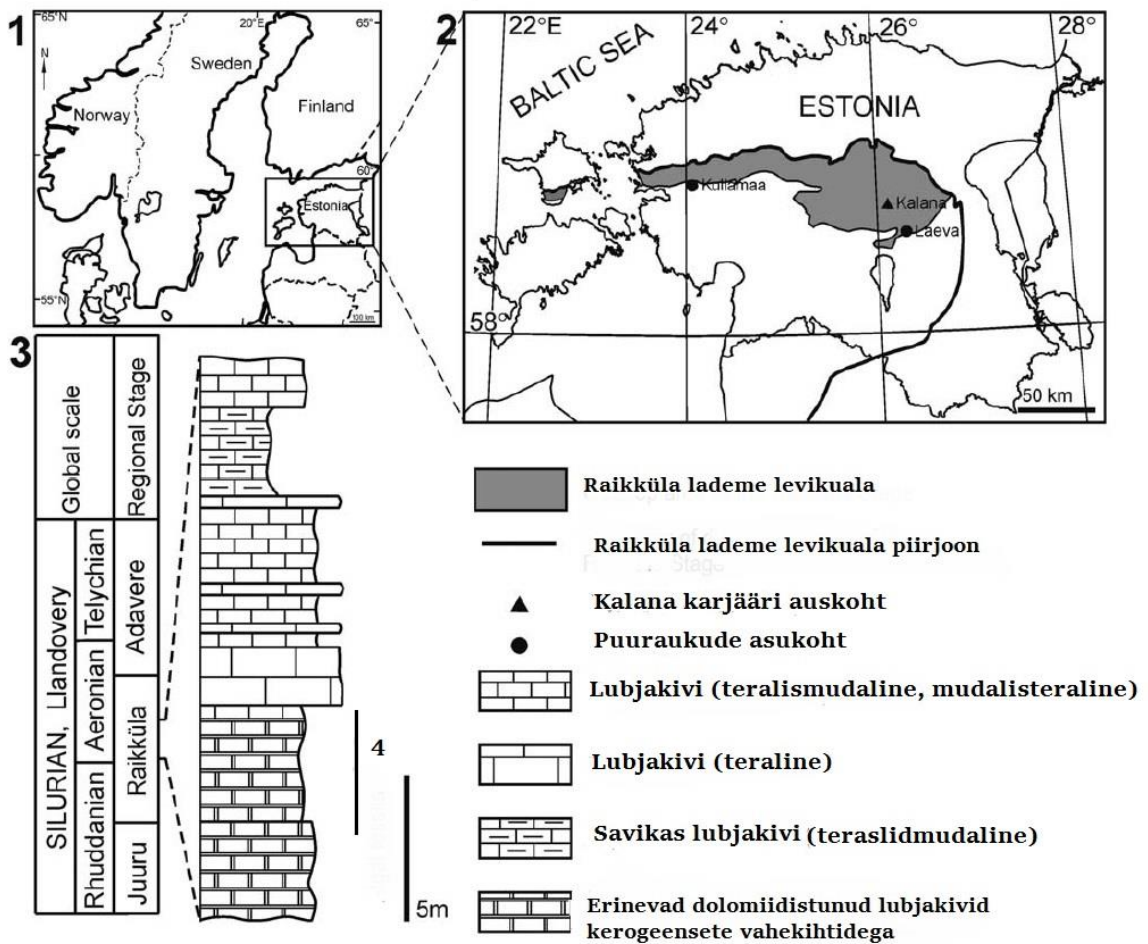
## 2.4 Stratigraafia

Kalana karjääris avanevad Raikküla lademe (Llandovery, Silur) kivimid (vanusega 441-436,70 miljonit aastat) Nurmekunna kihistu Imavere ja Jõgeva kihid (Männik et al., 2016). Raikküla lade koosneb mitmesugustest karbonaatkivimitest, millest kõige iseloomulikumad on mikriitsed (mikro- ja peitkristalsed) lubjakivid (Raukas, Teedumäe, 1997). Tihti on mikriitse lubjakivi kihipindadel orgaanika rikkad, 1 kuni 20 mm paksused savikad kihid (Tinn, Märss, 2018).

Kesk-Eestis, Paide-Pärnu vööndist ida pool on Raikküla lademe kivimid tugevalt dolomitiseerunud (Raukas, Teedumäe, 1997). Jõgeva kihtides (paksusega kuni 8 meetrit) domineerib paekivi, mis on ülemises osas tugevalt dolomiidistunud. Nendes kihtides esineb arvukalt 1 - 120 mm paksuseid läätsi ning korrapäratuid, hele- kuni tumepruuni värvusega, orgaanikarikkaid dolomiidistunud savika lubjakivi kihti (Männik et al., 2016).

Kalana karjääris avaneb Jõgeva ja Imavere kihtide piiri-intervall, mida iseloomustatakse lainjaskihiliste kuni muguljate hilistekkelise dolomiitidega, milles esinevad õhukesed domeriidi vahekihid. Domeriidi vahekihid on enamasti helepruunid, mikrolamineeritud ning sisaldavad kerogeenset materjali (Tinn et al., 2015). Raikküla lademe ida suunas laienev avamus ulatub mandri-Eesti läänerannikust Ida-Eestini. Puuraukudest saadud informatsiooni kohaselt varieerub lademe paksus 16,3 meetrist Loode-Eestis 176,3 meetrini Edela-Eestis. Üldjoontes jääb lademe paksus 20 ja 75 meetri vahele (Nestor, Einasto, 1997).

Raikküla lademe ida suunas laienev avamus ulatub Mandri-Eesti läänerannikust Ida-Eestini (joonis 2).



Joonis 2. Kalana karjääri geograafiline asend (1) ning geoloogiline kaart (2). Hallikas värv näitab Raikküla lademe levikuala. Stratigraafiline veerg (3) näitab Raikküla lademe litoloogia. Graptoliidifossiilide asukoht (4) (Mastik, Tinn, 2015).

## 3. Graptoliidid

### 3.1. Graptoliidi üldine kirjeldus

Graptoliidid on ühed kõige olulisemad Paleosoikumi (540 - 250 miljonit aastat tagasi) fossiilid (Maletz, 2014). Vanimad teadaolevad graptoliidid on pärit Kambriumist (üle 500 miljoni aasta tagasi). Nimetus „graptoliit“, pärineb kreekakeelsetest sõnadest „*graptos*“ (kirjutatud) ja „*lithos*“ (kivi), otsetõlkes „kirjutatud kivim“. Nime selgitatakse sellega, et paljud graptoliidid sarnanevad kivile kirjutatud hieroglüüfidele (Maletz, 2017).

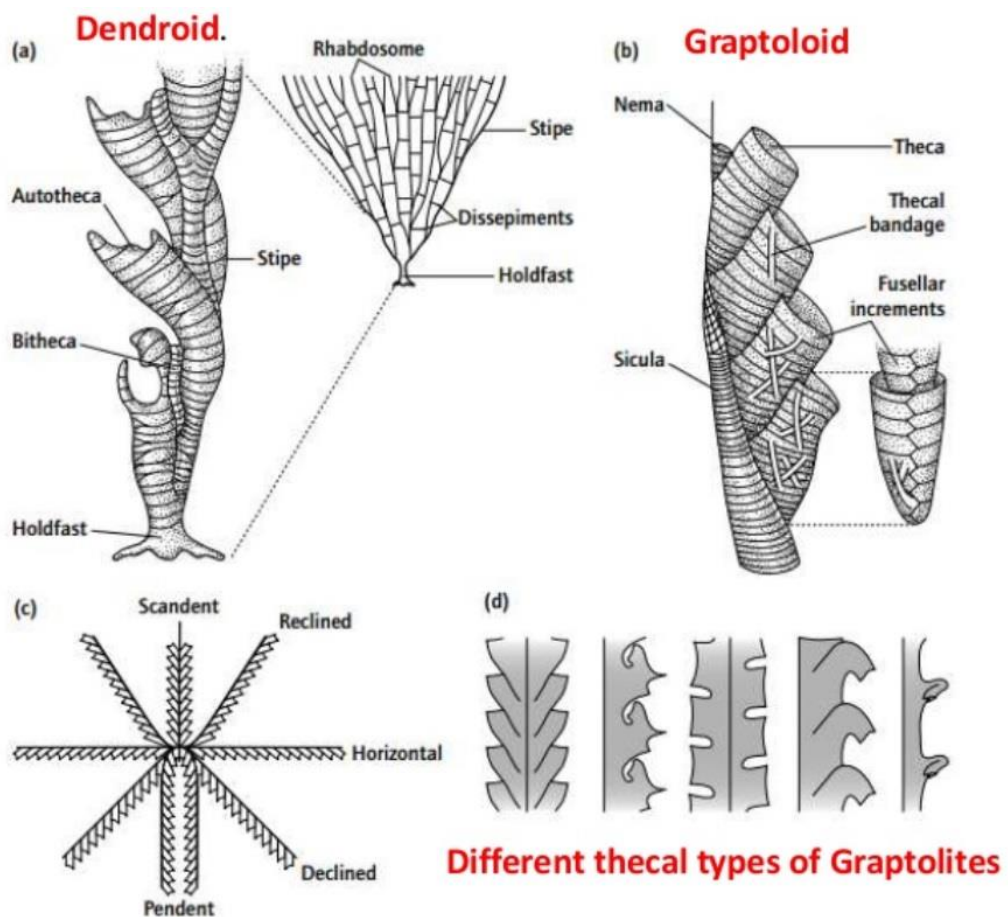
Graptoliidid on pikliku-kujulised fossiilid, mida leidub tihti Alam-Paleosoikumi tumedates kiltades (Benton, Harper, 2009). Graptoliidid olid koloonialised organismid, koosnedes üksteisega ühendatud üksikindiviididest. Koloonia suurus võis ulatuda mõnest millimeetrist kuni ühe meetrini. Graptoliitide kolooniad on mitmesuguse kujuga alates lihtsatest „raagudest“ (*stipe*) kuni keerukate põõsasjate vormideni. Üldine välimus viitab niinimetatud „saehamba“ struktuurile (Underwod, 1993).

Tänu laiale geograafilisele levikule ja heale säilivusele kasutatakse graptoliite palju biostratigraafias ja paleobiogeograafias. Graptoliite võib üldiselt jaotada kahte suuremasse rühma – *Dendroidesed graptoliidid* (bentilised graptoliidid) ja *Graptoloidea* (planktilised graptoliidid) (Maletz, 2014). Dendroidideks nimetatakse põõsasjalt või sulgjalt hargnevaid graptoliite ja koonusjaid „paljuraolisi“ kolooniaid. „Raagudel“ ehk *stipe*’del on rohkesti karikakujulisi teekasid, milles igapähe elas üksikloom (Maletz, 2014). Graptoliidid surid välja Siluri ajastu lõpul, kui Maa kliima jahenes. Gondwana mandrit kattis mandrijää ning ookeani veetase alanen niivõrd, et rikkaliku elustikuga asustatud suured rannikualad jäid kuivale (Brencheley, 1990).

### 3.2. Morfoloogia

Graptoliidi skelett koosneb arvatavasti kollageenist ning sarnaneb tänapäevalgi elavate sulgpeaste (Pterobranchia) konstruktsiooniga. Iga koloonia ehk rabdosoom saab alguse ühest väiksemast „koonusest“ ühe või mitme haruna (Benton, Harper, 2009).

Iga graptoliidi koloonia pärineb esialgselt isendist, mida nimetatakse siikulaks (*sicular zooid*). Sellest arenevad järgnevad zooidid, mis on omavahel seotud *stolonitega*. Arvatakse, et zooidil ehk lihtsa ehitusega loomikul oli lotofooriga sarnane toitumisorgan. Zooidid olid kaetud orgaanilise torukujulise struktuuriga, mida on nimetatud teekaks (*theca*), radosoomiks (*radosome*), tsöntsetsiumiks (*coencecium*) või tubaariumiks (*tubarium*). Graptoliidi skeleti koostist ei ole kindlalt teada, kuid erinevad autorid viitavad sellele, et see koosneb kollageenist või kitiinist (Maletz, 2017). Tubariumil on erinev arv „raagusid“ ehk *stipe*’sid ning erineva paigutusega teekad. Need tunnused on olulised selle tõttu, et nende alusel määratakse graptoliite. Mõnedel kolooniatel on kaks erinevat teekat, auto- ja biteeka. See erinevus on arvatavasti tingitud seksuaalse dimorfismist (Maletz, 2017). Graptoliitide kolooniad on mitmesuguse kujuga (joonis 3), alates lihtsatest „raagudest“ kuni keerukate põõsajate vormideni. Kõik koloonias olevad zooidid olid omavahel kudede kaudu seotud.



### Orientation of a Graptolite Stipe.

Joonis 3. Graptoliidi morfoloogia (Milsom, 2013).

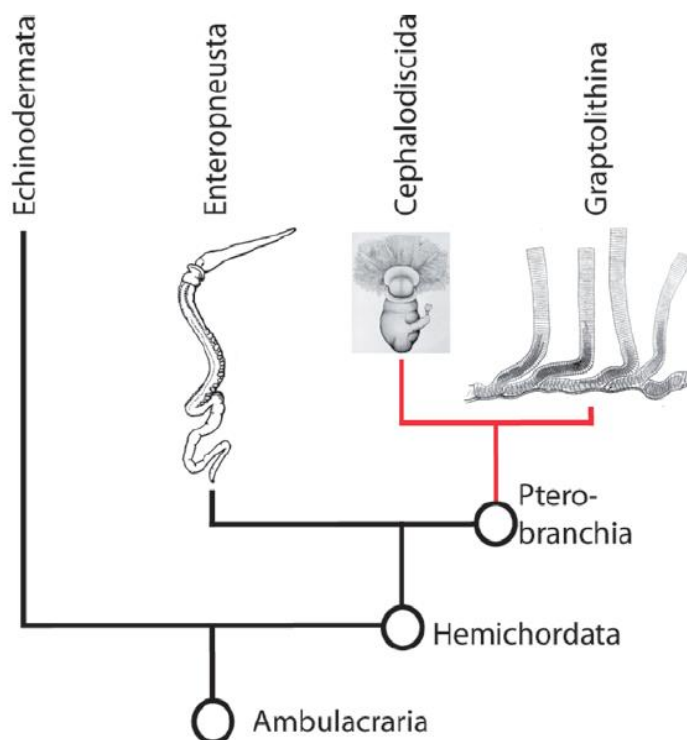
### 3.4. Süstemaatika

#### 3.4.1. Hõimkond: Hemichordata

Hemichordata ehk ürgkeelikloomad ehk poolkeelikloomad, kes on teissuuste hulka kuuluv mereussi-taoliste loomade hõimkonda. Üldiselt peetakse ürgkeelikloomi okasnahksete sõsarrühmaks. Ürgkeelikloomad ilmusid Kambriumi esimeses pooles (Sato et al., 2008).

Ürgkeelikloomad jagunevad kahte klassi: *Enteropneusta* (neelhingsed) (Cameron et al., 2000), ja *Pterobranchia* (sulgpeased) (joonis 4), mille hulka kuuluvad graptoliidid. Lisaks esineb ka kolmas klass, *Planctosphaeroidea*, mida on kirjeldatud vaid ühe liigi järgi ning millest on teada vaid vastsed (Zhang, 2011).

Ürgkeelikloomad olid valdavalt detriiditoidulised ehk organismid, kes toituvad surnud organismidest või teiste organismide orgaanilistest jääkidest. Tänapäevaks on ürgkeelikloomadest alles vaid väike rühm.



Joonis 4. Kladistiline diagramm, mis näitab Hemichordata üldisi evolutsioonilisi seoseid (Maletz, 2013).

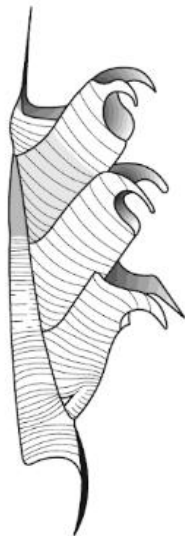
### 3.4.2. Klass: *Pterobranchia* (sulgpeased)

*Pterobranchia* on ürgkeelikloomade hulka kuuluv väikeste ussikujuliste loomade klaad (Barnes, 1982). Sulgpeaseid leidub enamikus merekeskkondades, alates madalast rannalähedasest merepõhjadest kuni süvamere piirkondadeni (Maletz, 2014). Nad toituvad ripsmete abil veest planktonit filtreerides (Barnes, 1982). Sulgpeased zooidid on väikesed ning kasvavad vaid mõne millimeetri pikkuseks. Üldjuhul on nad kinnitunud kõvadele korallidele või muudele sessiilsetele organismidele või peidavad ennast kivide taha ja tühjade merekarpide sisse (Maletz, 2014).

### 3.4.3. Alamklass: *Graptolithina*

*Graptolithina* on sulgpeaste klassi alamklass, mille liikmeid tuntakse graptoliitidena. Graptoliidi olid koloonialised loomad, kes elasid Kambriumist Karbonini. Graptoliidi on olulisel kohal biostratigraafias ja paleogeograafias (Maletz, 2014).

Graptoliidid jagunevad kahte suuremasse seltsi rühma – dendroidsed ja graptoloidsed graptoliidid (Maletz, 2014). Graptoloidea ehk planktilised graptoliidid on välja arenenud planktilisest dendroidsest esivanemast. Nende planktiline eluviis viitab sellele, et enamus graptoliitide liikidest levis Vara-Paleosoikumis Siluri ajastul (443,4 - 419,2 miljonit aastat tagasi). Planktilised graptoliidid (Graptoloidea) (joonis 5) elasid ookeanides, pinnase külge kinnitumata, hõljusid vabalt ookeani vees, filtreerides toituiseks veemassi. Planktiliste graptoliitidele on oluline roll Ordoviitsiumi ja Siluri stratigraafias (Maletz, 2014).

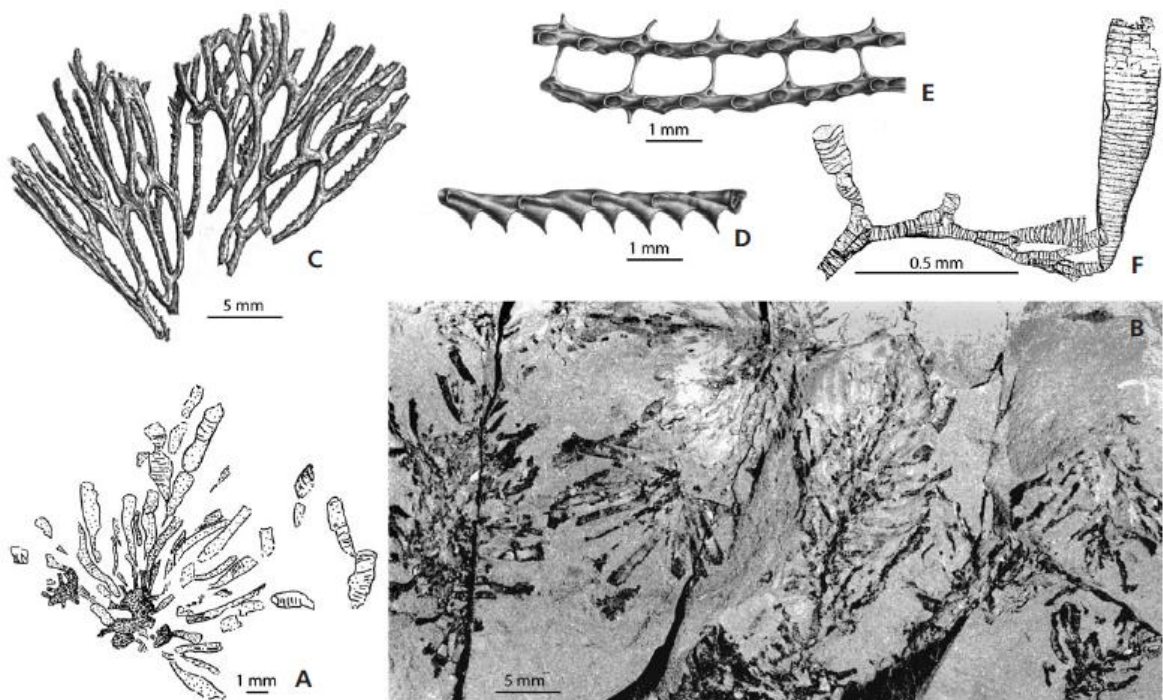


Joonis 5. Graptoloidne graptoliit (*Saetograptur chimaera*) (Allaby, 2013)

Dendroidsed graptoliidid on üks kahest suuremast graptoliidigrupist. Esimesed dendroidsed graptoliidid ilmusid Kambriumi keskel ning kadusid Hilis-Karbonis. Dendroidsed graptoliidid olid põõsa-kujuliselt või sulgjalt hargnevaid või koonusjaid (sealhulgas Pakerordi lademe argilliidile nime andnud *Dictyonema*, uue nimetusega *Rhabdinopora*) paljuraolisi kolooniaid. Raagudel ehk *stiped*'el oli rohkesti karikakujulisi teekasid, milles igas ühes elas üksikloom (Maletz, 2014).

Dendroidse graptoliidi väliskelett (rabsodoom) on mitmeharuline (nagu põõsas) koos mitme *stipe*'ga (joonis 6), mis on ühendatud külgsuunas tugiposti vahelülidega. Neil on kirjeldatud kaht erinevat tüüpi teekasid: autoteekad ja biteekad, mis kujunesid piki stipet. Enamik dendroidsed graptoliidid elasid merepõhjal kinnitunult lühikese „varre“ või basaalketta abil. Mõned Kambriumi ajastu perekonnad, nende seas *Rhabdinopora*, eraldusid ning olid planktilise eluviisiga (Maletz, 2014).

Dendroidsed graptoliidid on evolutsiooniliselt vanemad, kuid nende fossiilid on haruldasemad. Põhjus tuleneb sellest, et nad dendroidsed graptoliidid elasid madalmerelise rannikuvööndi piirkonnas, kus nende skelett sai lainetude poolt palju vigastada.



Joonis 6. Koorikjad ja dendroidsed graptoliidid (Maletz, 2014).

### 3.5. Graptoliitide klassifikatsioon

All järgnev loetelu esitab graptoliitide klassifikatsiooni ( Benton, Harper, 2009) (Lisa 1).

Klass *Graptolithina*

- Selts Dendroidea - mitmeharulised kolooniad. Neil on auto-, bi- ja stoloteekad. Elased Kambriumi keskosast kuni Karbonini.
- Selts Tuboidea. Sarnane dendroidsetele graptoliitidele, kuid neile on iseloomulik ebakorrapärane hargnemine ja väiksemad stoloteekad. Auto- ja biteeka paikneb tavaliselt kobarana. Elased Ordoviitsiumist (Tremadoc) kuni Silurini (Wenlock)
- Selts Camaroidea. Koorikja eluviisiga grupp. Autoteeka on laienenud ning koti-laadse alusega. Biteeka on väike ning ebakorrapärase paigutusega. Elased Ordoviitsiumis (Tremadoc-Darriwili)
- Selts Crustoidea. Eluviisilt koorikjas. Autoteeka on keeruliste avadega. Elased Ordoviitsiumis (Tremadoc-Darriwili)
- Selts Dithecoidea. Dendroidsete ja graptoloidide sõsarrühm. Tsentraalsel teljel on kinnitusorgan. Elased Kambriumi keskpaigast kuni Siluri alguseni.
- Selts Graptoloidea. Kolooniaalsed koos mõne *stipe'*ga (üks kuni kaheksa), neema, siikula ning teeka, mis on ühe kujuga. Elased Ordoviitsiumist (Tremadoci) kuni Devonini (Praha).
- Alamselts Dichocratina. Algne graptoliit. Puudusid biteeka ja *virgella*. Elased Ordoviitsiumis (Tremadoci-Katiy).
- Alamselts Virgellina. *Virgella* alati olemas. Elased Ordoviitsiumis (Flo) kuni Devoini (Praha).

## 4. Materjal ja meetodid

### 4.1. Materjal

Uurimustöö põhineb Tartu Ülikooli geoloogia osakonna graptoliidifossiilide kollektsioonil, mille eksemplarid on pärit Kalana karjäärist. Lubjakivipalad, mille pinnal on graptoliidifossiilid kohati säilinud kolmemõõtmelisena, kuid nad on osaliselt lamendunud. Antud pala on suure mõõtmeline ning sisaldab väga palju graptoliitide fossiile. Üldine pilt materjalidest on keeruline (joonis 7). Kohati on fossiilid kuhjunud üksteise peale ja muljutud. Esineb piirkondi, kus leidub hea säilivusega fossiile. Visuaalsel uurimisel on raske leida konkreetset graptoliidile iseloomuliku struktuuri.



Joonis 7. Graptoliidi fossiilid lubjakivil.

## **4.2. Fluorestsentsmikroskoop**

Fluorestsentsmikroskoop on optiline mikroskoop, mida kasutatakse orgaaniliste ja anorgaaniliste ühendite omaduste uurimiseks. Palas olevate molekulide ergastamiseks kasutatakse valgusallika lainepikkust või lainepikkuste vahemikku, mille juures proovis olevad molekulid fluorestseeruvad. Proovi fluorestseerumisel kiirgub valgus, mis on enamasti pikemal lainepikkusel kui ergastuslainepikkus, detekteeritakse läbi mikroskoobi objektiivi. Sellise meetodi puhul kasutatakse tavaliselt kahte filtrit: esmalt ergastusfilter, mis tagab ergastuskiirguse kasutamise soovitud lainepikkusel ja selle monokromaatsuse, ning teiseks emissioonfilter, mis tagab selle, et ergastuskiirgus ei jõuaks detektorisse (Introduction of Fluorescence Microscopy).

Fluorestsents, luminesentsi alaliik, on valguse kiirgumine ainek, mis on eelnevalt ergastatud UV-kiirgusega või nähtava valgusega. Enamikul juhtudel omab emiteeruv (välja saadetav) kiirgus pikemat lainepikkust kui neelatav kiirgus ja seeläbi omab ka madalamat energiat. Kui aga neelatav elektromagnetiline kiirgus on väga intensiivne, võib üks elektron neelata kahte footonit. Selline nähtus võib esile kutsuda fluorestsentsi, millel on lühem lainepikkus kui neelatud kiirgusel (Introduction of Fluorescence Microscopy).

## **4.3. Leica dfc 495**

Leica DFC495 on multifunktsionaalne mikroskoop, mille on suur jõudlusega digitaalne värvikaamerate süsteem suure eraldusvõimega fotomikrograafia jaoks. Aparaadil on 8-megapiksline kaamera, millega saab teostada kõrge lahutusvõimega fotosid (Leica DFC495).

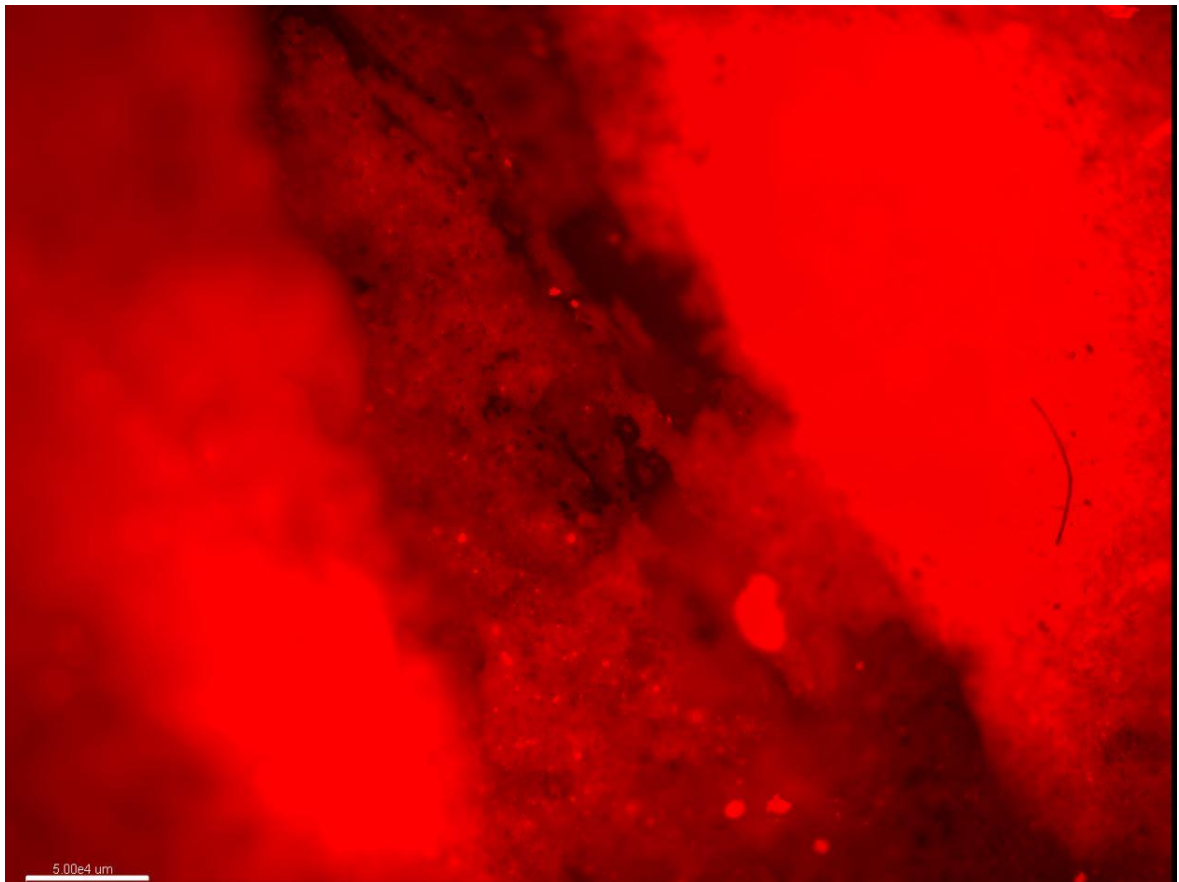
## **4.4. Camera lucida**

*Camera lucida* on optiline seade, mida saab kasutada joonistamiseks. Nimetus „*camera lucida*“ pärineb ladina keelest, ning tähendab otsetõlkest „valguse kambrit“. Seadme tööpõhimõte on see, et joonistaja näeb nii eset, kui ka joonistamise pinda sama aegselt (Hammond, Austin, 1987).

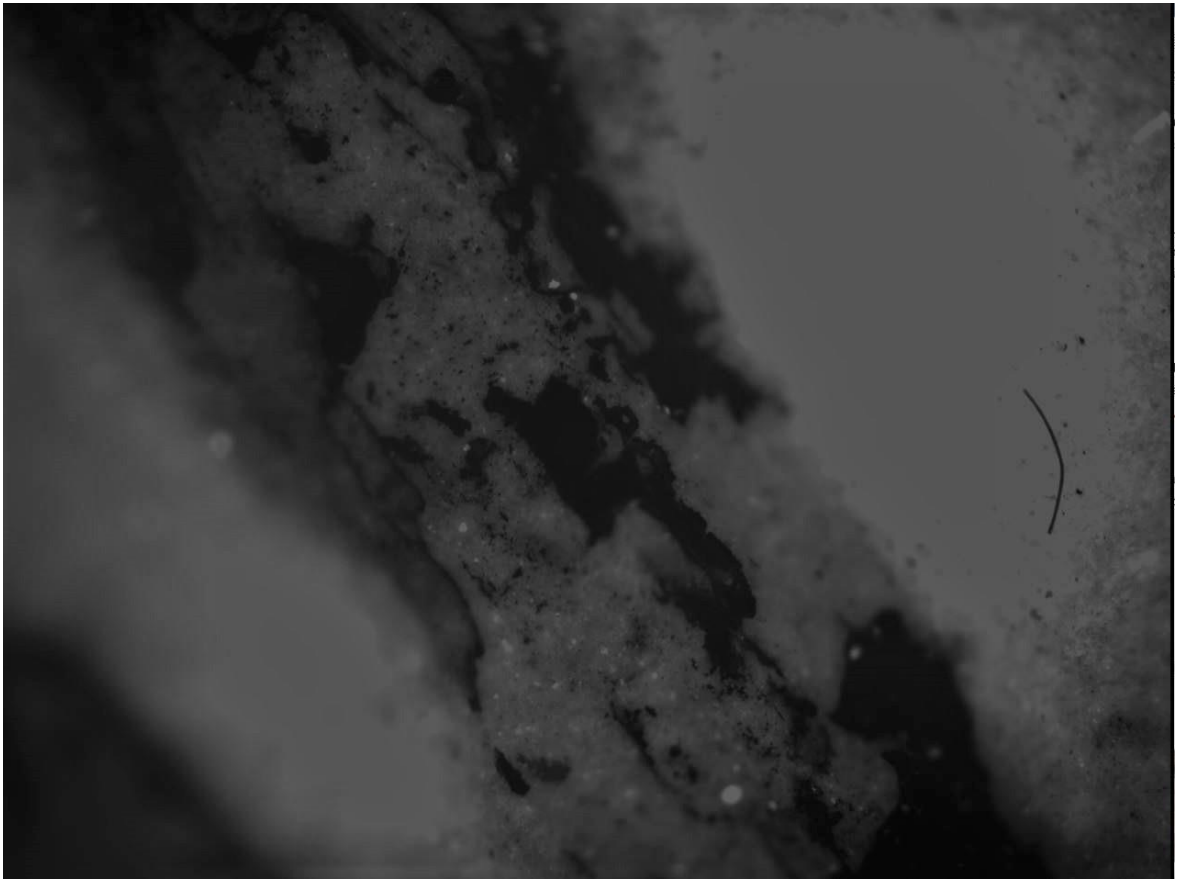
## 5. Tulemused

Antud töö jaoks kogutud eksemplarid on pärit Kalana karjäärist. Uuringu raames tuli esmalt välja sorteerida paremini säilinud palad. Graptoliitide fossiilid paiknevad lubjakividel, mille kivimi suurus on varieeruv.

Kokku uuriti üht suuremat ja viit väiksemat pala. Analüüsid viidi läbi nii vaatluse kui mikroskoobiga dokumenteerimise teel. Algselt uuriti fossiile fluorestsentsmikroskoobiga. Katsetati erinevaid valguspektreid, et leida sobiv valgus, mis ergastaks pala kõige paremini ning tooks graptoliidi struktuuri kõige paremini esile. Kõige tõhusamaks ostus infrapuna valgus, millega uuriti fossiile. Infrapuna valguse ergastamise käigus tuvastati graptoliidil sisestruktuurset tunnust. Joonisel number kaheksa võib märgata paralleelseid jooni, oletatavasti on sisestruktuuris peituv *stolon*. Võrreldes nüüd allpool joonise number üheksaga, siis antud struktuuri ei ole võimalik tuvastada.



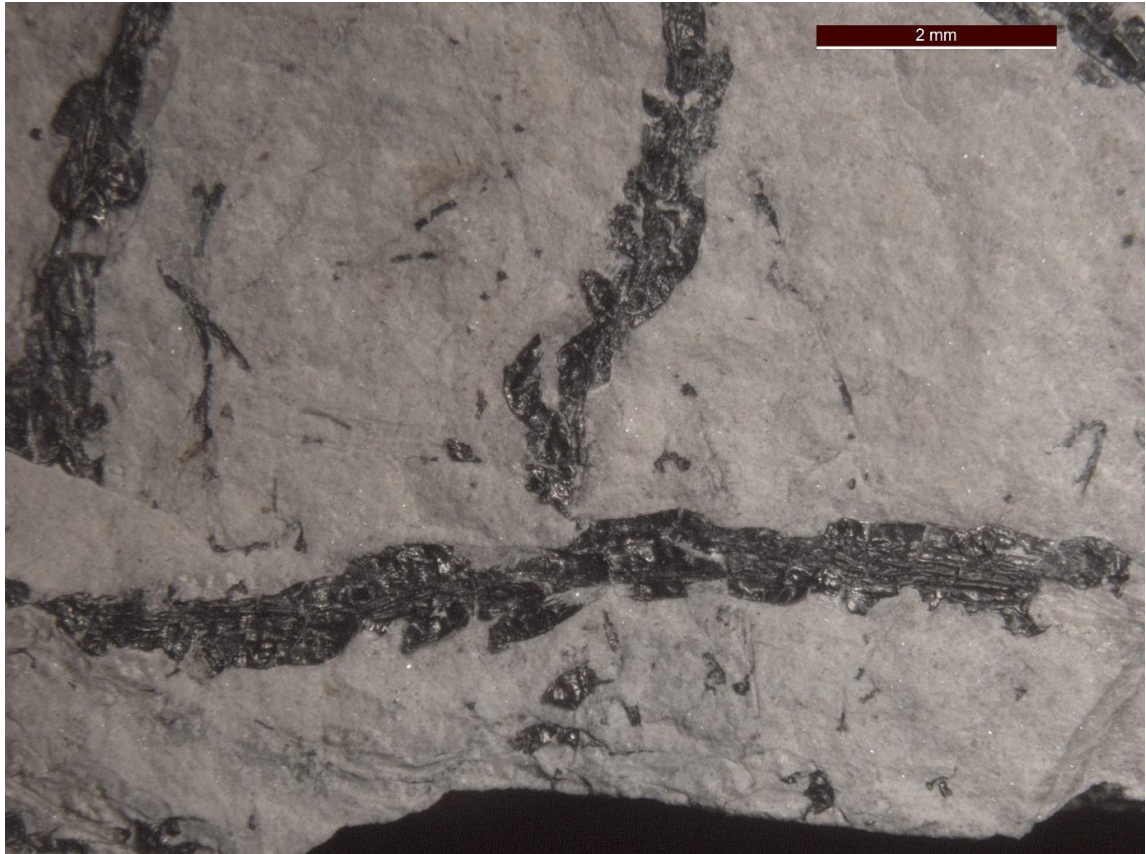
Joonis 8. Graptoliit fluorestsentsmikroskoobis.



Joonis 9. Graptoliit fluorestsentsmikroskoobis.

Järgnevalt dokumenteeriti multifunktsionaalse mikroskoobi Leica DFC 495-ga. Alguses 5 mm suurendusega siis liiguti järjest lähemale, kuni 2 mm suurenduseni. Dokumenteerimise käigus püüti mõista, kuidas tema erinevad osad paiknevad ning kas on võimalik näha graptoliidi sisestruktuuri.

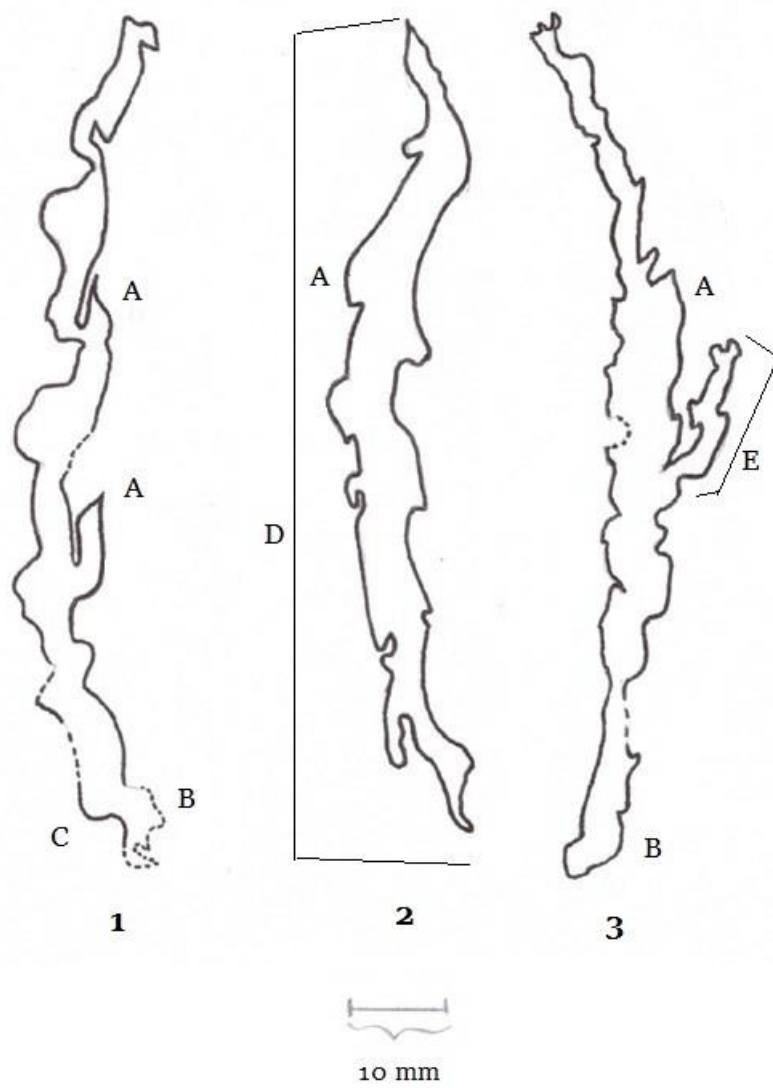
Uurimisel multifunktsionaalse mikroskoobiga oli võimalik näha teekasid, nende asetust ja kuju. Võrreldes visuaalse uurimisega, toob Leica mikroskoop esile mitmeid detaile, mida tava vaatluse puhul ei olnud märgata, näiteks teekade kuju ja stoloni paiknemist.



Joonis 10. Graptoliit lubjakivil.

Graptoliidi struktuurse joonise koostamisel kasutasin mikroskoobile kinitatud *camera lucida*'t (joonis 12). Joonise valmistamiseks oleval graptoliidid valisin välja selle põhjal, mille säilivus oli kõige parem ning millel esines kõige rohkem graptoliidile iseloomulike omadusi. Antud struktuurne joonis näitab uuritava fossiili üldpilti, osade paiknemist, suurust.

Fossiilidel olevad osad: A - teeka, B – virgella, C – siikula, D – radosoom, E- stipe.



Joonis 11. *Camera lucida* mikroskoobi abil joonistatud graptoliidi joonis.

## 6. Arutelu, järeldused

Hoolimata sellest, et dendroidsete graptoliitide fossiilid on suurepäraselt säilinud, on nende morfoloogia ja siseanatomia uurimine osutunud keerukaks – raske on eristada morfoloogilisi detaile. Lisaks on ostunud keerukaks anatomiliste sisestruktuuride kirjeldamine, mis aga on teatud graptoliidiliikide määramisel olulise tähtsusega.

Uurimisel fluorestsentsmikroskoobiga vaadeldi graptoliidifossiile infrapuna valgusega, mis tuvastas graptoliidil sisestruktuurset tunnust. Antud mikroskoobiga uurimise teel nähti graptoliidi sisemist struktuuri. Fossiilil tuvastati paralleelseid jooni, mis tõenäoliselt oli radosoomis peituv *stolon*. Teisi graptoliidile iseloomilike struktuure ei tuvastada. Põhjus võib seisneda selles, et fluorestsentsmikroskoobiga uurides pidid fossiilide palad olema võimalikud väiksed, et need preparaadile mahuksid. Sellest tulenevalt võib oletada, et antud uurimis meetodikaga ei saadud kasutada kõige parema säilivusega fossiile. Parema tulemuse saavutamiseks tuleks uurida rohkem fossiile ning vajadusel olemasolevad palade paksust vähendada nii võrd, et mahuksid mikroskoobi preparaadile.

Leian, et fluorestsentsmikroskoobiga uurimisel on tulevikus head potentsiaali. Antud mikroskoop on heaks meetodikaks selle tõttu, et sellega saab tuvastada graptoliitide keerukat sisestruktuuri. Sellega töötlemisel tuleks leida sobivad graptoliidifossiilid, mis oleksid piisava hea säilivuse ja paksusega, ning panustada ka piisavalt palju aega nende uurimiseks.

Mikroskoobiga vaadeldes selgus, et mitmed fossiilid olid tugevalt muljutud (nende struktuuri ei olnud võimalik tuvastada), kuid palal leidis ka paremaid fossiile. Leica-mikroskoobiga uurimise käigus olid näha iseäralikku kujuga teekad, mida varem ei oldud täheldatud. Selgus, et teekade asetsemine *stipe*'l ei olnud korrapärane. Leica-mikroskoobiga saadi antud meetodi juurde kõige parema ülevaate – tuvastati teekade asetust, saadi üldine ülevaade struktuurist ning graptoliitide osade paiknemisest, mida võib näha joonisel number 11.

## Kokkuvõte

Kalana *lagerstätte*'s avanevad Siluri ajastu Llandovery ajastiku kivimid, mis kuuluvad stratigraafiliselt Raikküla lademesse (Männik et al., 2016). Kalanas *lagerstätten* leiduvad märkimisväärse detailsusega säilinud graptoliitide fossiilid, mis on pärit Balti paleobasseinist Siluri madalmerelise keskkonnast (Nestor, Einasto, 1997).

Antud uurimustöö eesmärgiks oli analüüsida erinevaid meetodeid, millega oleks võimalik uurida dendroidsete graptoliitide fossiile. Kokku vaadeldi ühte suuremat ning viite väiksemat graptoliidi fossiilset pala. Fossiilipalad valiti välja põhimõttega, et paladel olev graptoliitide säilivus oleks hea.

Uurimustöö käigus vaadeldi fossiile erinevate mikroskoopidega ning dokumenteeriti saadud andmed. Fluorestsentsmikroskoobiga uurides graptoliidile iseloomulikku anatoomilist struktuuri ei tuvastatud, kuna arvatavasti ei vaadeldud piisavalt palju eksemplare. Ühel palal leiti vaid struktuur, mis tõenäoliselt on *stolon*. Multifunktsionaalse mikroskoobi Leica'ga vaadeldes, tuvastati hästi säilinud, ebasümmeetrilise asetusega teekad.

Kõige efektiivsemaks uurimismetoodikas võib tuua mikroskoobi Leica. Antud mikroskoobiga saadi graptoliidist parem ülevaade – tuvastati teekade asetust ning saadi üldine ülevaade struktuurist ning struktuursete osade paiknemisest.

Antud uurimustöös kasutati kolme meetodit: fluorestsents- ja multifunktsionaalset mikroskoopi Leica, ning lõpus struktuurseks joonistamiseks mikroskoobile kinnitatud *camera lucida*'t. Minu lõputöös käsitletud fossiilide uurimist tasub kindlasti jätkata ning detailse kirjelduse jaoks oleks tarvis kombineerida erinevaid meetodeid.

## Summary

Kalana *lagerstätte* opens the rocks of the Llandovery epoch of the Silurian period, which are stratigraphically located at the Raikküla stage (Männik et al., 2016). Kalana *lagerstätte* contains fossils of graptolites retained with considerable detail, originating from the Baltic Paleobasin Silurian shallow-water (Nestor, Einasto, 1997).

The purpose of this research was to analyze various methods for studying fossils of dendroid graptolites. One large and five smaller rocks with graptolite fossils were observed. The fossil material was selected by the principle that graptolite grains on the tracks should be well preserved.

During the research, the fossils were observed with different microscopes, and the data was documented. An anatomical structure characteristic of graptolite was not detected by fluorescence microscopy, as probably in this study, the number of observed specimens was not enough. Only a structure, which was likely to be a stolon, was found on one fossil. Looking at the multifunctional microscope with Leica, well-preserved, asymmetric thecas were detected.

The most effective research method is observing the fossils with the Leica microscope. A better overview of the graptolite was obtained with this microscope - the arrangement of the theca was identified, and a general overview of the structure and the location of the structural components were obtained.

Three methods were used in this study: a fluorescence and multifunctional microscope Leica and at the end *a camera lucida*, which was attached to the microscope for structural drawings. It is worthwhile to study the fossils discussed in this bachelor thesis, and it would be necessary to combine different methods for a detailed description.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajat Oive Tinne, kes oli mulle suureks abiks kogul protsessil, ning kelle kommentaarid ja juhised võimaldasid tööl valmida.

Lisaks tänan Dmitri Lubenetsi, kelle abiga sai uurida fossiile fluorestsentsmikroskoobiga ning tänan oma perekonda, kes olid mulle moraalseks toeks.

## **Kirjanduse loetelu**

- Allaby, M. 2013. A dictionary of Geology and Earth Sciences. *Oxford*.
- Barnes, R. D. 1982. Invertebrate zoology. *Philadelphia: Saunders*, pp. 1026 - 1027
- Benton, M. J., Harper, D. A. T. 2009. Introduction to Paleobiology and the Fossil Record. *Wiley-Blackwell*, pp. 412-425
- Bottjer, D. J. 2016. Paleocology: Past, Present and Future. *Wiley-Blackwell*, pp. 40.
- Brencheley, P. J., 1990. End-Ordovician. – Briggs, D. E. G.; Crowther, P. R. (ed.). Palaeobiology. A synthesis. Blackwell Science: 181–184.
- Briggs, E. E. G., Crowther, P. R. 1990. Paleobiology: a Synthesis. *Blackwell Science Ltd*, pp. 266-270
- Cameron, C. B., Garey, J. R., Swella, B. J. 2000. Evolution of the chordate body plan: new insights from phylogenetic analyses of deuterostome phyla. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. pp 74
- Clarkson, E.N. K. 1998. Invertebrate palaeontology and evolution. *Blackwell Science*. pp 318-346.
- Eensaar, J., Gaškov, M., Pani, T., Sepp, H., Somelar, P., Kirsimäe, K. 2017. Hydrothermal fracture mineralization in the stable cratonic northern part of the Baltic Paleobasin: sphalerite fluid inclusion evidence, *Taylor and Francis*.
- Eensaar, J., Pani, T., Gaškov, M., Sepp, H., Kirsimäe, K. 2015. Stable isotope composition of hypogenic speleothem calcite in Kalana (Estonia) as a record of microbial methanotrophy and fluid evolution, *Estonian Journal of Earth Sciences*.
- Gaškov, M., Sepp, H., Pani, T., Paiste, P., Kirsimäe, K. 2017. Barite mineralization in Kalana speleothems, Central Estonia: Sr, S and O isotope characterization, *Estonian Journal of Earth Sciences*, **66**, 3, 130-141.

- Hammond, J., Austin, J. (1987). The camera lucida in art and science. *Taylor and Francis*. pp. 16.
- Holler, F. J., Skoog, D. A., Crouch, S. R. 2006. Principles Of Instrumental Analysis. *David Harris*.
- LoDuca, S.T. & Brett, C.E., 1997. The Medusaegraptus epibole and lower Ludlovian Konservat-Lagerstätten of eastern North America. Paleontological Events: Stratigraphic, Ecological, and Evolutionary Implications, *Columbia University Press, New York*. pp. 369–405.
- Maletz, J. 2014. Hemichordata (Pterobranchia, Entropneusta) and the fossil record. *Elsevier*.
- Maletz, J. 2014. Graptolite reconstructions and interpretations. *Springer*.
- Maletz, J. 2014. The classification of the Pterobranchia (Cephalodiscida and Graptolithina). *Bulletin of Geosciences*,
- Maletz, J. 2017. Graptolite paleobiology, *Wiley-Blackwell*.
- Mastik, V., Tinn, O. 2015. New dasycladalean algal species from the Kalana Lagerstätte (Silurian, Estonia), *Journal of Paleontology*.
- Milsom, C., Rigby, S. 2013. Fossils at a Glance, 2nd edition, *Wiley-Blackwell*.
- Männik, P., Tinn, O., Loydell, D. K., Ainsaar, L. 2016. Age of the Kalana Lagerstätte, early Silurian, Estonia, *Estonian Journal of Earth Sciences*, **65**, 2, 105-114
- Nestor, H., Einasto, R. 1997. Ordovician and silurian carbonate sedimentation basin. In A. Raukas & A. Teedumäe (eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*, Tallinn, pp. 193–204.
- Raukas, A., Teedumäe, A. 1997. Geology and Mineral Resource of Estonia. *Estonian Academy Publisher*.
- Rõõmuoks, A. 1983. Eesti aluspõhja geoloogia. *Valgus, Tallinn*, pp. 148-167.

- Sato, A., Rickards, B., Holland, P. W. H. 2008. The origins of graptolites and other pterobranchs: a journey from „Polycoa“. *Lethaia*. pp 303-316
- Saunders, K. M., Bates D. E. B., Kluessendorf J., Loydell D. K., Mikulic D. G. 2009. Desmograptus micronematodes, a Silurian dendroid graptolite, and its ultrastructure. *The Palaeontological Association*.
- Seilacher, A. 1970. Begriff und Bedeutung der Fossil-*Lagerstätten*: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. *Cambridge*. pp 34-35.
- Zhang, Z. Q., 2011. Animal biodiversity: an Introduction to higher-level classification and taxonomic richness. *Magnolia Press*. pp 7-12
- Tinn, O., Masik, V., Ainsaar, L., Meidla, T. 2015. *Kalania pusilla*, an exceptionally preserved non-calcified alga from the lower Silurian (Aeronian, Llandovery) of Estonia. *Paleowoeld*, **24**.
- Tinn, O., Meidla, T., Ainsaar, L., Pani, T. 2009. Tallophytic algal flora from a new Silurian *Lagerstätte*. *Estonian Journal of Earth Sciences*, **58**.
- Tinn, O., Märss, T. (2018). The earliest osteostracan *Kalanaspis delectabilis* gen. et sp. nov. from the mid-Aeronian (mid-Llandovery, lower silurian) of Estonia, *Vertebrate Paleontology*.
- Torsvik , T. H., Cocks, L. R. M. 2013. New global palaeogeographical reconstructions for the Early Palaeozoic and their generation. *Geological Society of London*. **38**, 5-24
- Underwod, C., J. 1993. The position of graptolites within lower Palaeozoic planktic ecosystems. *Wiley-Blackwell*. pp189-202

## **Internetiallikad**

Eesti ehitusturg <http://www.maan.ee/?leht=8&rn=10034187> [WWW ] (kasutatud 20.05.2018)

Introduction to Fluorescence Microscopy

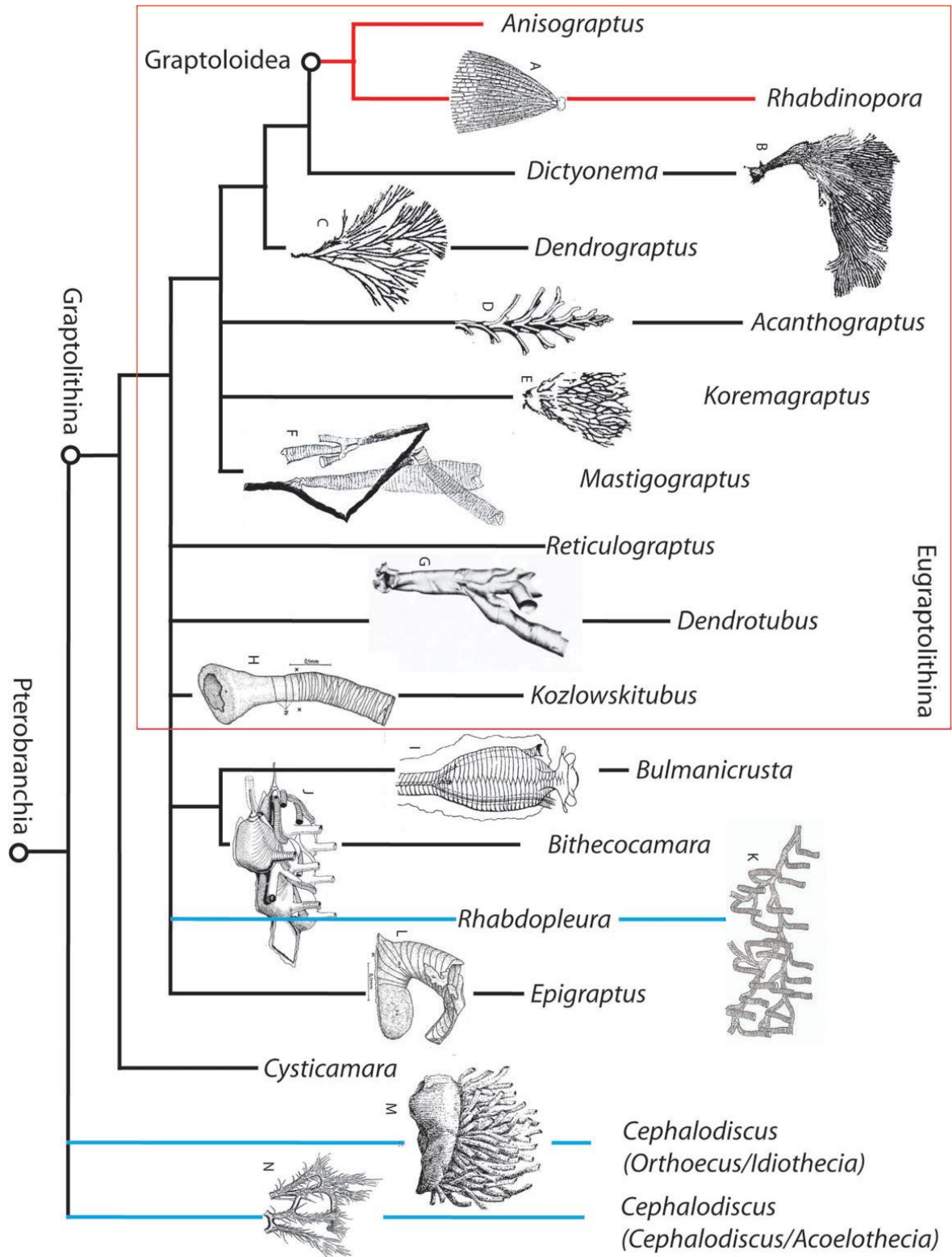
<https://www.microscopyu.com/techniques/fluorescence/introduction-to-fluorescence-microscopy> [WWW] (kasutatud 17.05.2018)

Leica DFC495 <https://www.leica->

[microsystems.com/fileadmin/downloads/Leica%20DFC495/Brochures/Leia\\_DFC495\\_Brochure\\_EN.pdf](https://www.leica-microsystems.com/fileadmin/downloads/Leica%20DFC495/Brochures/Leia_DFC495_Brochure_EN.pdf) [WWW] (kasutatud 15.05.2018)

# Lisa 1. Graptoliitide klassifikatsioon

(Mitchell et al., 2014)



## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Magda Theresa Klaos,

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

*Kalana lagerstätte* dendroidsete graptoliitide uurimismetoodikast

,mille juhendaja on Oive Tinn

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.

Tartu, 30.05.2018