

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduse valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Mikroobselt indutseeritud settetekstuurid ja nende interpreteerimine
Paleoproterosoikumi Kondopoga kihistu (Karjala) mudakivimites
Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

Kati Gebruk

Juhendaja: Kalle Kirsimäe

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri

Tartu 2020

Mikroobselt indutseeritud settetekstuurid ja nende interpreteerimine Paleoproterosoikumi Kondopoga kihistu (Karjala) mudakivimites

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on anda ülevaade mikroobselt indutseeritud settetekstuuride (MIST) tekkimisest ja tunnusest ning geoloogilise tõlgenduse võimalustest. Töö praktilises osas analüüsiti arvatavaid MIST tüüpi settetekstuure Paleoproterosoikumi Kondopoga kihistus, Karjalas. Uurimistöös iseloomustakse MIST-ide makroskoopilist ja mikroskoopilist ehitust ning keemilise koostise varieerumist biomattides optilise ja analüütilise skaneerivelektronmikroskoopia meetodil.

Märksõnad: Kondopoga, MIST, Paleoproterosoikum
Geobioloogia

Microbially induced sediment structures and their interpretation in the mud rocks of the Paleoproterozoic Kondopoga Formation (Karelia)

The aim of this bachelor's thesis is to provide an overview of the formation and characterization of microbially induced sediment structures (MISS) and the possibilities of geological interpretation. In the practical part of the work, the supposed MISS type sedimentary structures of the Paleoproterozoic Kondopoga Formation in Karelia were analyzed. The research characterizes the macroscopic and microscopic construction of MISS'es and the variation of chemical composition in biomates by optical and analytical scanning electron microscopy.

Keywords: Kondopoga, MISS, Paleoproterozoic
Geobiology

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Mikroobselt indutseeritud settetekstuurid	6
2.1 MISTi tekkimine.....	6
2.2 MIST biogeensuse kriteeriumid	10
2.3 MIST levik.....	11
3. Kondopoga kihistu. Geoloogiline ehitus ja varasemad mikrofossiilide uuringud	15
4. Materjal ja meetodika.....	17
5. Tulemused ja arutelu	19
5.1 Makroskoopiline kirjeldus	19
5.2 Mikroskoopiline kirjeldus.....	24
Järeldused	28
Summury	29
Kirjandusloend	31

1. Sissejuhatus

Fossiliseerunud organismide jäänused on oluliseks infoallikas settekivimite arenguloo ning bioloogilise evolutsiooni kirjeldamisel. Peamiselt säilivad geoloogilistes formatsioonides mineraliseerunud välis- või siseskeletiga organismide jäänused. Pehmekehaliste organismide uurimine on palju keerulisem ja nende jäänused säilivad vaid erandlikes olukordades. Eriti haruldane on just primitiivsete mikrobiaalsete eluvormide geoloogiline säilimine ning seetõttu on raskendatud ka nende tekkimise ja arengu selgitamine. Sellised primitiivsed organismid on tavaliselt säilinud kivimites, kas nende tekitatud mineraliseerunud struktuuridena nagu näiteks stromatoliitide puhul, või jäljenditena kiiresti kivistunud ränikivimites või karbonaatkivimites, mis on tavaliselt selliste uuringute põhiobjektiks (Noffke, 2009).

Kuni viimase ajani olid mikrobiaalsete - eluvormide uuringutes jäänud tähelepanuta purdsettekivimid. Peamiselt seepärast, et neis on keeruline leida fossiliseerunud mikrobiaalseid vorme. Värskest settinud liiva struktuur on poorne ja hapnikurikas ning settes liikuv vesi soodustab orgaanilise materjali kiiret lagunemist. Selle tulemusena orgaanilised jäänused ei säili või lagunevad juba varajase diagenesi käigus. Ka läbivad purdsetted tavaliselt mitmekordselt erosiooni ja ümbersettimist, mistõttu ei säili nendes tavaliselt pehmekehalised organismid või nende kolooniad. Kuigi terviklike pehmekehaliste organismide fossiile liivakivist tavaliselt ei leita, siis on liivakivid väga olulised aluskivimid jälgfossiilidele. Jälgfossiilid ei tekki mitte ainult organismide kaevumisel settesse või sette läbisegamisel või liikumisel-elutegevusel settes, aga ka organismi ja settepinna vastasmõjul nagu peamiselt mikroobsete organismide ja nende moodustatud biomattide korral (Callow & Brasier, 2009; Noffke 2009, Noffke et al., 2013).

Vähemalt viimase kolme miljardi aasta jooksul on bentilised mikrobiaalsed organismid koloniseerinud liivast substraati madalamerelises keskkonnas tekitades seal biokilesid ja mikrobiaalseid matte. Nende setendite iseloomulikuks tunnuseks on korduv ümbersettimine pidevalt liikuvast veekeskkonnast. Seetõttu peavad kõik bentilised organismid tulema toime lainetest ja hoovustest tingitud settedünaamikaga. Vastuseks erosioonile, stabiliseerivad mikroorganismid oma substraati mitmesuguste orgaaniliste moodustistega, nagu näiteks filamentsete jätketega sidudes mineraaliterasid omavahel orgaanilise võrguna kokku (Noffke, 2009). Sellist mikrobiaalset sette fikseerimist nimetatakse biostabilisatsiooniks ning selle käigus moodustuvad setete pinnakihi vaibalaadsed mikrobiaalsest matist koosnevad orgaanilised võrgustikud, mis jätavad settesse ka selle

võrgustiku lagunemisel iseloomulikud settetekstuudid nn mikroobselt indutseeritud settetekstuudid (MIST; inglise keeles *microbially induced sedimentary structures* - MISS) (Noffke, 2010). MIST tüüpi tekstuudid, mis on tekkinud mikroobialsete mattide veealuse keskkonna koloniseerimisest nagu laguunid, šelfid, pagurannikud, järved, jõelammid, jmt ning nende uurimine on muutunud viimasel ajal eriti populaarseks (Noffke, 2009; Noffke & Chafetz, 2012; Homann et al., 2019).

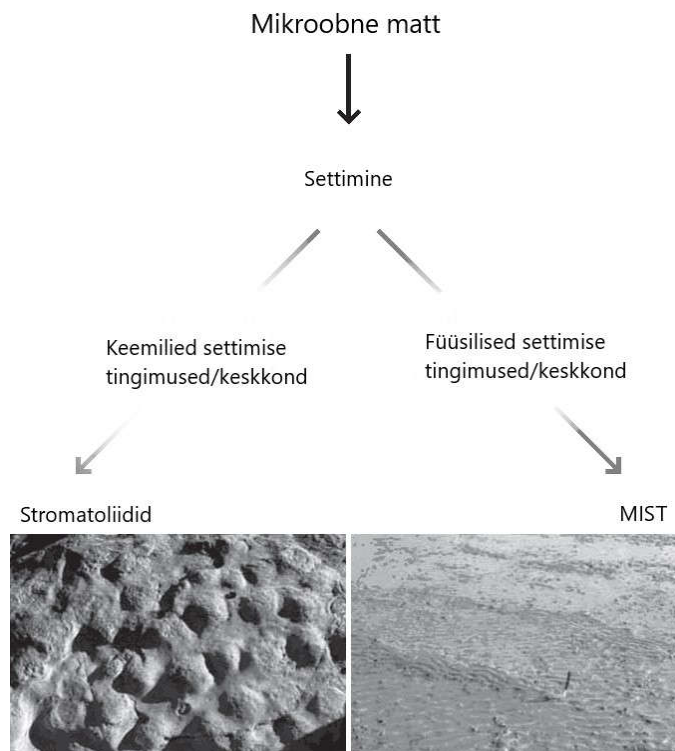
Käesoleva uurimistöo eesmärk on anda ülevaade mikroobselt indutseeritud settetekstuudid (MIST) tekkimisest ja tunnusest ning geoloogilise tõlgenduse võimalustest. Uurimistöo praktilises osas kirjeldati Paleoproterosoikumi vanuselise Kondopoga kihistu setetes leitud võimalikke MIST'e mille ehitust uuriti makroskoopiliselt ja mikroskoopiliselt nende olemuse selgitamiseks.

2. Mikroobselt indutseeritud settetekstuudid

2.1 MISTi tekkimine

Bentilised mikroorganismid moodustavad organiseeritud kooslusi, mis moodustavad pindasid katvaid biokilesid-matte. Biokile koosneb iseseisvate rakkudes ja rakuvälisest polümeersest ainesest (*extracellular polymer substance* - EPS). Merelistes ja magedaveelistes keskkondades võivad biokilede ja sette interaktsioonid tekitada erinevaid sedimentoloogilisi struktuure ja nähtusi nagu mikrobialiidid, biostabilatsioon, setteterade sidumine, kaasahaaramine ja väljasetitamine („*baffling*“), mille tulemusel moodustuvad mikrobiaalselt indutseeritud sedimentoloogilised tekstuudid (MIST) (Noffke et al., 2013). Biomatid, mis koosnevad samuti biokiledest on olemuselt organiseerunud bakteriaalsed kooslused, kuhu kuuluvad erinevad mikroorganismid nagu tsüanobakterid ja arhed, aga ka diatomeed ja seened (Noffke, 2009).

Võrreldes stromatoliitidega, mis on samuti nn lamineeritud mikrobialiidid, tekib MIST eranditult mikroorganismide reaktsioonist füüsilisele sette dünaamikale (joonis 1) . Peamine erinevus MISTi ja stromatoliitide vahel on nende kasvamise ja säilumise mehhanismis. Stromatoliitides toimub süngeneetiline karbonaatsete mineraalide kasvamine mikrobiaalse mati orgaanilises maatriksis, mis on tekkinud rakuvälisest polümeersest ainesest (EPS) ja kordub rütmiliselt kihtidena (Noffke & Awramik, 2013).



Joonis 1. Mikroobimatid (ja biokiled) moodustavad tsünobakterid ja muud mikroorganismid. Karbonaatkivimite („keemilises“) settimiskeskkonnas põhjustavad mikroobimatid stromatoliitide teket. Kvartsiiva („füüsikalises“) keskkonnas, kus mineraalide sadestumine või tsementeerimine ei mängi olulist rolli, on mikroobsed matid moodustavad 'mikroobselt indutseeritud settestruktuure - MIST '. MIST ei ole sarnane stromatoliididega, aga MIST tekstuuridel on mitmekülgne morfoloogia. Vasakul olev foto näitab tüüpilised kuplikujulised stromatoliidid; (mõõt: 10 cm). Foto paremal näitab mitme suunaga pulsatsioonilisi MIST tüüpi märke; (mõõt: nuga 25 cm) Noffke (2010) järgi.

MISTi tekkimine jagatakse kahte etappi (Noffke, 2009):

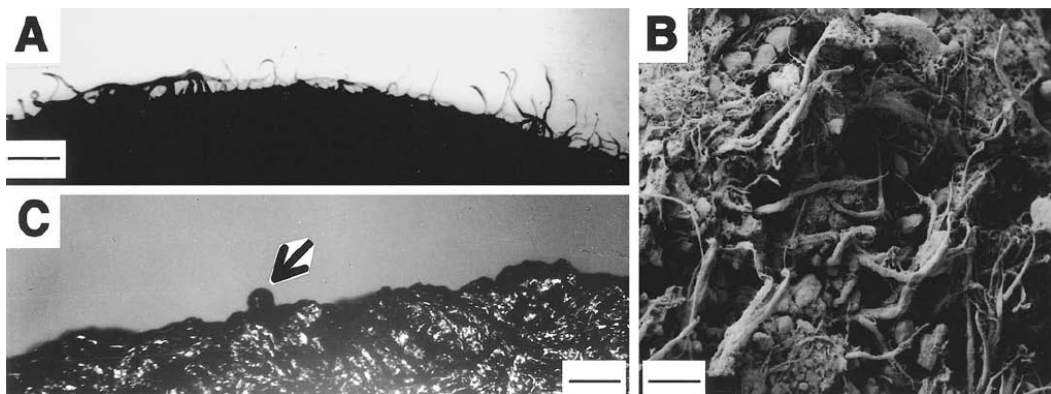
- 1) primaarne biostabiliseeritud setete kujunemine,
- 2) orgaanilise materjali diageneetiline mineralisatsioon.

MISTe moodustavad mikrobiaalsed matid reageerivad settetingimust muutusele nt. erosioonile, mattumisele ja muutuvatele settimistingimustele erinevatel viisidel (Noffke, 2009).

Hüdrodünaamiliselt aktiivses keskkonnas kus voolava vee erosiooniline surve biomati-biokile välispinnale settepinnale kasvab toimub sette välispinna biostabiliseerumine (Peterson et al., 1994). Sellise hüdrodünaamilise surve tingimustes paigutuvad mikroobide filamendid paralleelselt settepinnaga moodustades võrgustiku, mis ümbritseb setteterasid

takistades setteterade kaasahaaramist voolava veega. Biostabiliseerimine suurendab settepinna vastupanuvõimet, ehk erosioonivastupanuvõimet kuni 12 suurusjärku epibentilistes (sette pinda katvate) mikroobsete mattide katetes, ja 3–5 suurusjärku endobentiliste- (sette pindmises kihis kasvavate) mikroobide korral (Noffke & Krumbein, 1999).

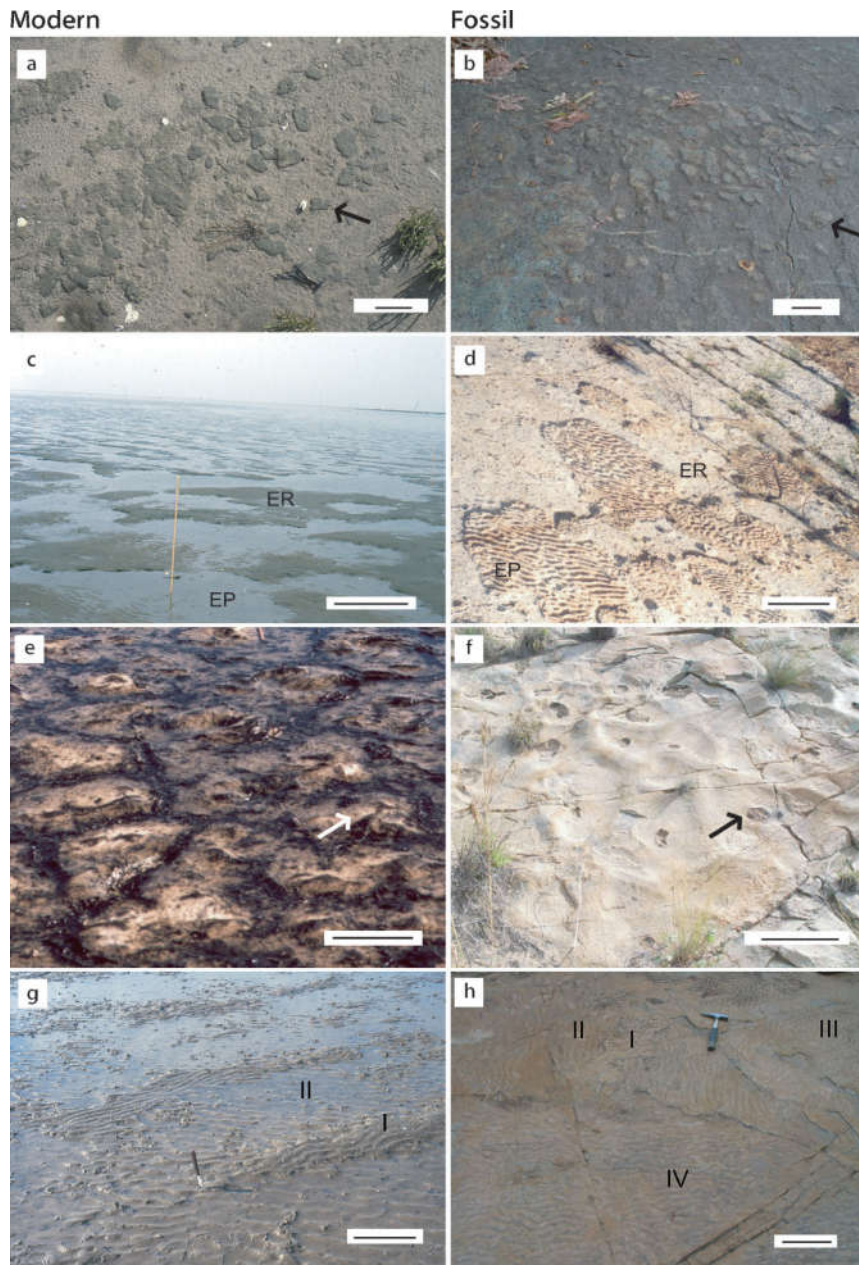
Kui mikroobne matt kasvab settetekuhjumise tingimustes (aga veel ei mattu setete alla) siis mikroobide filamendid paigutuvad ümber ja orienteeruvad risti settekihi pinnaga. põhjustades häireid üldjuhul turbulentses veevoolus mistõttu hakkavad settesakesed veesambas biomati kohal kiiremini välja settima (nn „baffling“). Mikroobsed matid ehitavad seejärel terade ümber filamentide võrgustiku nn rändavate filamentide-kiududega või terad seotakse biokillesse kleepuva EPS-ga, mis liimib terad kokku ja fikseerib. Sõltuvalt biomati tüübist toimub ka teatud suurusega terade sorteerumine ja isegi suurema tihedusega mineraaliterade eelistatum fikseerimine biokillesse-biomatti (joonis 2).



Joonis 2. Setteterade “baffling”, haaramine (*trapping*) ja sidumine (*binding*) kaasaegsetes mikrobiaalsetes tsüaanobakterite mattides. A – “baffling” filamendid ulatuvad mati pinnast välja ja põhjustavad veevoolu lokaalset aeglustumist, skaala 3 mm; b – tsüaanobakterite filamendid kasvavad liivaterade ümber (*binding*), skaala 200 mikromeetrit; B – biomati pinda haaratud liivatera (*trapping*, näidatud noolega), skaala 1 mm. Noffke et al. (2001) järgi.

Sidustumine on juhuslikult jaotatud mikroobirakkude ja -trikoomide organiseerimine kõrgelt struktureeritud biokileks-biomatiks. Mikroobid suhtlevad üksteisega ja liiguvad setete sees, mis võimaldab nii optimaalset juurdepääsu valgusele ja/või toitainetele kui ka koostöösidemeid naaber-mikroorganismidega läbi ainevahetuse. Biokilede-mattide organiseerumine toimub rahulikes hüdrodünaamilistes tingimustes ja aeglasel taustasedimentatsioonil. Biomattide-biokilede kasvu, mis ei ole seotud setete sidumisega, kontrollivad toitainete ja/või valguse kättesaadavus nii nagu ka näiteks stromatoliitidel.

Erinevate interatsioonide tulemusena on MIST korral erinevalt stromatoliitides võimalikud väga mitmekesise morfoloogiaga vormid (Noffke & Awramik, 2013). Seni on eristatud seitseteist peamist MISS tüüpi, millel lateraalsed mõõtmed ulatuvad sentimeetritest ruutkilomeetriteni (Noffke, 2010; vt ka Hagadorn et al., 1999; Schieber et al., 2007; Noffke ja Paterson, 2008; Noffke & Chafetz, 2012).



Joonis 3. Mikroobselt indutseeritud settestruktuurid (MIST) liivastes loodetetanapäevased näited vasakul ja fossiilsed analoogid paremal (Noffke, 2010 järgi):

a) mikroobide biomattide fragmenteerunud liistakud (Fishermansi saar, USA; mõõtkava: 5 cm).

b) fossiilsete biomattide fragmendid (2,9 miljardit aastat (Ga) Pongola supergrupp, Lõuna-Aafrika; mõõtkava: 5 cm);

c) erosioonilised biomattide jäänused- ja -taskud (Mellumi saar, Põhjameri; skaala 1 m);

d) fossiilsed erosioontaskud stabiliseeritud settes (Kriit, Dakota liivakivi, Colorado, USA; mõõtkava: 1 m).

e) Kuivamislõhed moodustavad mikroobimattide pinnal polügonalse mustri. Keskel mõlemal polügoonil on purunenud gaasikuppel, üks näide on noolega tähistatud (Tuneesia lõunaosa; skaala: umbes 30 cm);

f) samasugune hulknurkne struktuur kui joonisel e. Nool näitab gaasikuppli asukohta (2,9 Ga Pongola supergrupp, Lõuna-Aafrika; mõõtkava: 25 cm).

g) loodete ranniku virelisel pinnal biomattide jäänused (Mellumi saar; mõõtkava: 50 cm).

h) fossiilsed erisuunalised virelised biomattide jäänustega pinnad (I – IV) (2,9 Ga Pongola supergrupp, Lõuna-Aafrika; skaala 30 cm)

2.2 MIST biogeensuse kriteeriumid

MISTe on kergesti segamini ajada erinevate abiogeensete tekstuuridega, sest enamustel MIST vormidel ei esine väga spetsiifilised ega kergesti määratavad bioloogilised tunnused. Noffke toob välja kuus põhilist biogeensuse kriteeriumit (Noffke, 2009):

1. MIST esineb settelkivimites, mis ei ole läbinud sügavaid moondeprotsesse (kuni rohekilda faatsieseni, st temperatuurid $<500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

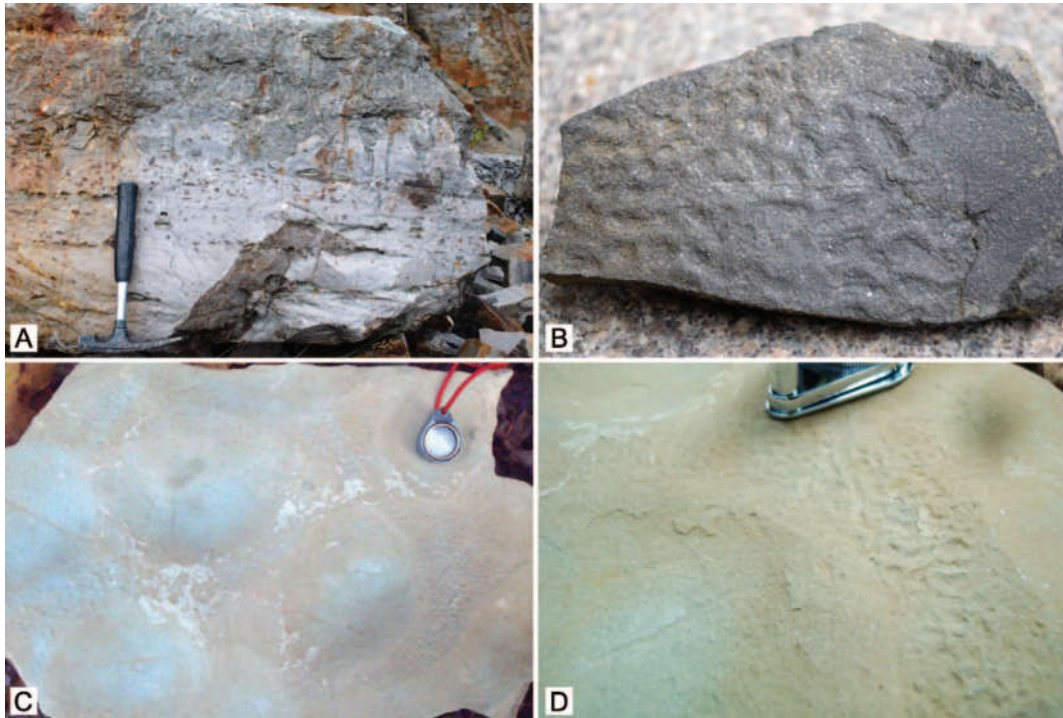
See tähendab, et mikrofosilide jäänuseid ja settetekstuure on võimalik identifitseerida ainult kivimites, milliseid ei oluliselt muutnud-deformeerinud tektooniline rõhk ja kõrge temperatuur.

2. MIST sisaldab endas mikrotekstuure, mis kas esindavad, on põhjustanud, või on seotud tüüpiliselt biokilede või mikrobiaalsete mattidega.
3. Stratigraafiliselt korreleerub MIST esinemine transgressiooni-regressiooni vahetumisega. Tüüpiliselt esinevad MIST'id veetaseme tsüklite transgressiivses osas.
4. Fossilsete MISTide dimensioonid ja geomeetria vastab tänapäevasele biomattidele.
5. MIST-tekitavad mikroorganismid vajavad kasvamiseks valgust.
6. MISTi esinemine settelabiilõigetel peegeldab ala hüdraulilisi tingimusi. Detailed uurimused näitavad, et MISTi fossilid on piiratud vaid madalaveelistele, laguuni või madalate šelfide paleokeskkondadega. Erinevat tüüpi MISTide levik viitab nende settealade pikaajalisele ühtlastele-püsivatele hüdraulilistele tingimustele.

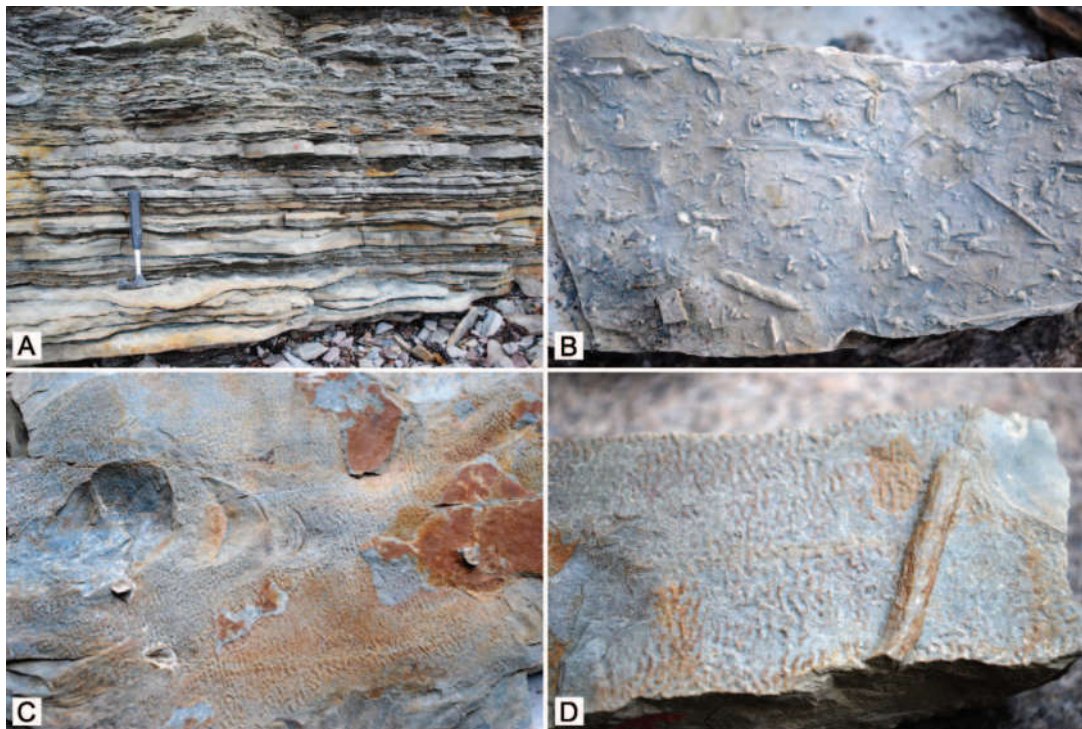
2.3 MIST levik

MISTid esinevad nii purdsetetes kui ka evaporiitsetes keskkondades, mis võivad asuda madalatest kuni kõrgete laiuskraadideni. Purdsetted ja evaporiitsed keskkonnad levivad maismaalistes ja merelises tingimustes. Tänapäeval MISTd tekivad laguunides, nt. Tuneesia laugrannikus; šelfi regioonides jne. MISTI on kirjeldatud ka maismaa aladel, kus mikrobiaalsed matid tekivad jõekallastel, järvedes ja nende ääres ja soodes (Noffke & Chafetz, 2012). MISTide levik on teada alates varasest Arhaikumist kuni tänapäevani (Noffke, 2009). Enamus MISTide biogeensuse tõestus tugineb võrdlesust teiste fossiilsete MIST analoogidega ja kaasaegsete eksemplaridega. MIST morfoloogia ajalisel pole muutunud, ja nende erosioonilised jäänused, taskud, hulknurksed plaadid, biomati killud (chips) ning paljud teised MISTid on identsed Arhaikumist tänapäevani. Viimase kümnendi aasta jooksul hilisemad uuringud näitasid, et MIST tekstuuride jäänused oli tekkinud maismaalistes ja merelises tingimustes, mis on Fanerozoikumi, Proterozoikumi ja Arhaikumi ajastutest. See süstemaatiline uurimine näitas, et tekstuuride morfoloogia on jäänud muutumata vähemalt 3,2 miljardit aasta (Noffke, 2000).

Eesti geoloogilistes läbilõikest MIST tüüpi struktuure ei ole teadaolevalt varem spetsiaalselt kirjeldatud, aga meie lähimast naabrusest on kirjeldatud MIST erinevaid vorme Rootsi Paleozoikumi läbilõikest. Rootsi läbilõigetes on leitud Erikssoni ja Calneri (2012) poolt üsna laia levikuga MIST tekstuurid. Peamiselt on esindatud levinud Kambriumi ning ka Siluri settekivimites nn kortsulised tekstuurid (joonis 4, 5, 6).

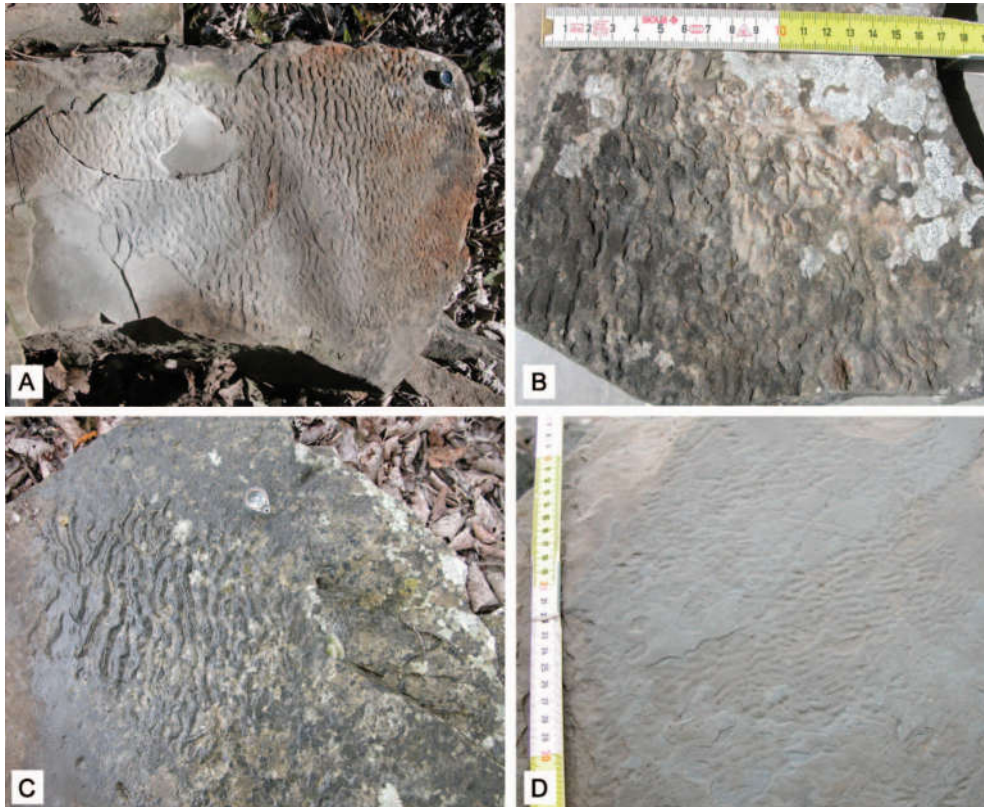


Joonis 4. Rootsi Kambriumi MIST'id. A) Alam-Kambriumi Hardeberga liivakivi Skrylle karjääris. B) Skretti karjääris Norretorpi basseinist (Laesa° kihistu) pärit kvarts-areniidis säilinud kortsulised tekstuudid. Kivimitüki kõrgus 5 cm. C) Kvartsi areniidi kihipinnal olevad ümmargused süvendid mida ümbritsevad kortsulised tekstuudid. Süvendeid ümbritsevad servad on tasased. Lugnas, Västergötland. Luubi läbimõõt 15 mm. D) lähivaade joonisel C näidatud teksuurides (Erikssoni & Calneri, 2012 järgi).



Joonis 5. Kambriumi MIST näited Rootsis. Aleklinta kihistik, Öland: A) musta kildaga

vahelduv peeneteraline liivakivi. Kortsulised tekstuudid esinevad paksemate liivakivikihtide ülemisel pinnal ja ulatuvad kuni kümnete meetriteni. (B) Aleuoliidikihi lamav pind erosiooniliste süvenditega. Plaadi laius umbes 20 cm. (C) Väiksemõõdulised kortsulised tekstuudid peeneteralises liivakivis. Plaat on ülalt alla ca 25 cm. (D) Peeneteralise liivakivi kihipinna lähivaade – biomattide pind on kaetud horisontaalsete ussikäikudega. Plaat on ülalt alla ca 5 cm (Erikssoni & Calneri, 2012 järgi).



Joonis 6. Siluri MIST tekstuudid Burgsviku kihistus Gotlandil. A) Jooneliste kortsuliste tekstuudid erinevad morfoloogiad samal kihipinnal. Käsiläätse läbimõõt on: 15 mm. B) Mõõduka vertikaalse reljeefiga kortsuline biomati tekstuud. C) Kõrge reljeefiga (mitu mm) kergelt kaheharulised kortsutekstuudid. Käsiläätse läbimõõt on: 15 mm. (D) Õhukesed biomatid künkliku põimjaskihilisusega kvarts-areniiidi kihipinnal (Erikssoni & Calneri, 2012 järgi).

Rootsi läbilõigetes Kambriumi lõpust või Ordoviitsiumist MISTe ei ole leitud. See võib olla seotud vastava MISTdele sobiva faatsiese puudumisega, sest Kambriumi ja Ordoviitsiumi perioode iseloomustavad just peamiselt süvaveelised orgaanikarikkad kildad ja jahedaveelised šelfi karbonaadid. Paleokeskkond kus vaadeldud kortsulised tekstuudid on Rootsi läbilõigetes säilinud on piiratud rannikukeskkondadega, mis vastab ülalkirjeldatud MIST

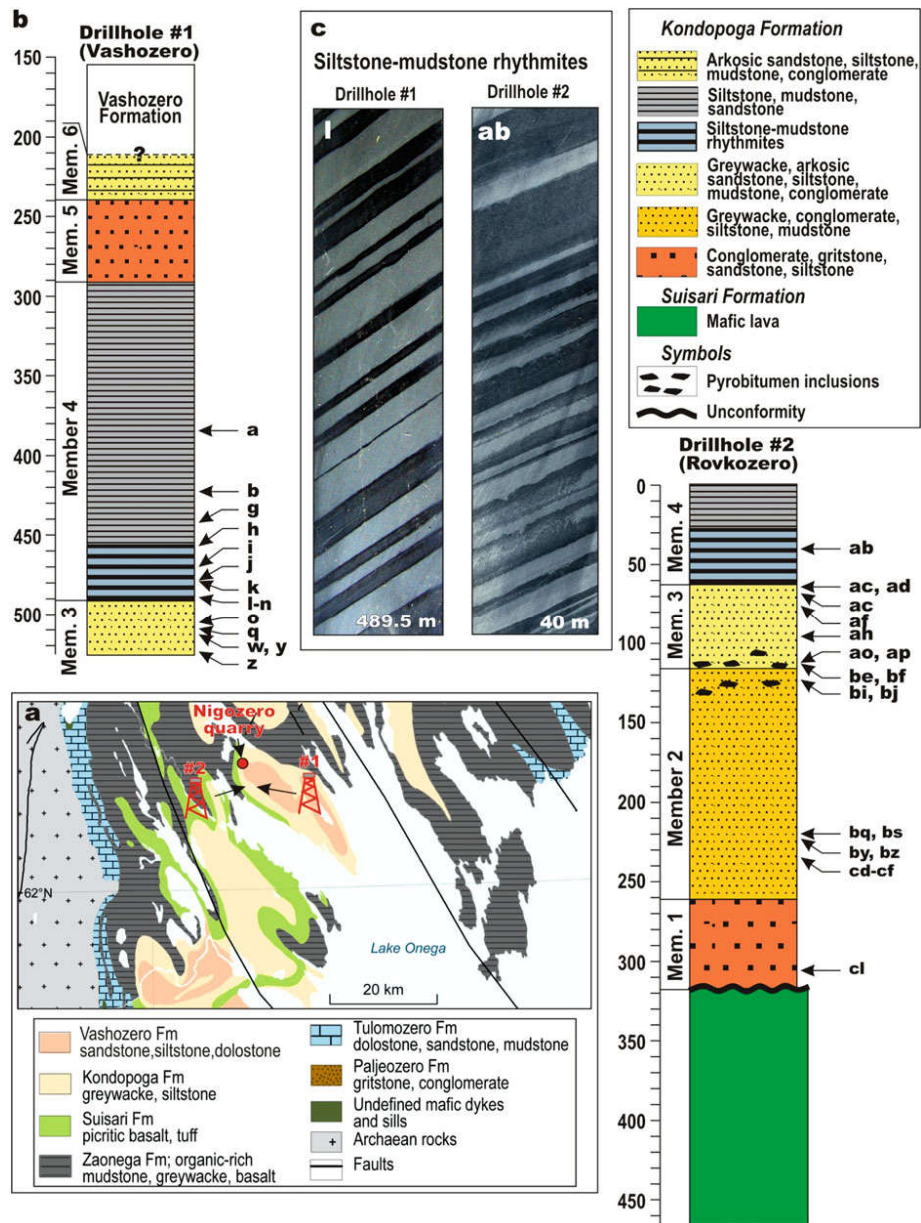
esinemise tingimustele. Rootsi Siluris on need tekstuurid seostatud peamiselt rannikulähedaste liivaste faatsiesega. Need tekstuurid avalduvad enamasti õhukesekihiliste liivakivide kihipindadel, kus ei ole jälgi aktiivsest bioturbatsioonist (Calner & Eriksson, 2012).

Rootsi Kambriumis esineb MIST pikaajalise transgressiivse faasi alguses kus moodustusid penepleenistunud aluskivimitele kontinendilt ümberasetitatud kvarts-liivad. Kõik need tekstuurid on leitud peamiselt lainetustegevusega mõjutatud rannikusetetest, kus rahulikemates tingimustes esinevad mudakivimid ja kildad vaheldumisi tormi ning hoovuste poolt setitatud peeneteralise liivakiviga (Calner & Eriksson, 2012)

3. Kondopoga kihistu. Geoloogiline ehitus ja varasemad mikrofossiilide uuringud

Paleoproterosoikumi Kondopoga kihistu levib Onega basseinis, mis asub Fennoskandia kilbi Arhaikumi Karjala kraatoni kaguosas. Vene kirjanduses on see tuntud kui Onega struktuur koosneb see Põhja-Onega sünklinoriumist ja Lõuna-Onega depressioonist (Kulikov, 2011). Põhja-Onega sünklinooriumis rohekilda faatsise moonde läbinud vulkaaniliste kivimite ja sette kivimite kompleksi moodustavad Paleoproterozoikumi kivimid, mis moodustusid enne 1890-1790 Ma Svekofenni orogeneesi (Melezhik, Medvedev, Svetov, 2013). Kondopoga kihistu levib Onega basseini keskosas NW-SE suunalise sünekliisi teljel (joonis 7). Ligikaudu 1.9 miljardi aasta vanuse Kondopoga kihistu moodustavad madalaveelises, arvatavasti järvelises, settekeskonnas moodustunud liivakivid ja aleuoliidid, mis esinevad rütmiliste turbidiitsete seeriatena (Melezhik, Kump, Hanski, 2013).

Kondopoga kihistust on varem kirjeldatud ühtesid maailma vanimaid tsüanobakterite ja eukarüootide üheselt diagnoositud mikrofossiile, mis on säilinud kohati kolmemõõtmelisena (Javaux ja Benzerara 2009). Kondopoga kihistu mikrofossiilid on erinevat tüüpi ning nende hulgas esinevad haruldased suured (kuni > 300 µm) orgaanilise süsinikust kestaga organismid, mis sarnanevad akritarhidele. Selliseid moodustusi nimetas esmakordselt Timofeev (1982). Arvatavasti on tegemist varajaste protistide või suurte prokarüootidega nagu näiteks sinivetikatega (Javaux et al. 2003, 2004; Javaux & Marshall 2006).



Joonis 7. Onega basseini geoloogiline kaart Koistinen et al. (2001) järgi (muudetud Aivo Leplandi poolt) ja Kondopoga kihistu geoloogiline läbilõige (Melezhik et al., 2013 järgi).

4. Materjal ja metoodika

Kondopoga kihistus proovimaterjal pärineb Negozero karjäärist Karjalas (N 62° 13.162'; E 034°18.687'). Karjääris avanev Kondopoga kihistu ülemise osa läbilõike moodustavad tumehalli liivakivi-aleuroliidi vaheldumine (joonis 8) milles esinevad kildalise mudakivimi vahekihid ning autigeensed Fe-rikka dolomiidi ja sideriidi konkretsioonid. Liivakivi-aleuriidi kihipindadel esinevad arvukalt loodusliku nafta immitsemisel järve põhja lekkinud bituumeni laiike („tar-balls“) ning kihipindadel esinevad lainjad kihipinnatekstuurid (joonis 9).



Joonis 8. Kondopoga kihistu tumehalli liivakivi-aleuroliidi vaheldumine Negozero karjääris (K. Kirsimäe foto).

Kondopoga kihistu võimalike MIST-ide ehitust makroskoopilisel ja mikroskoopilisel skaalal ning keemilise koostise varieerumist oletatavates orgaanilistes kihtides uuriti optilise ja analüütilise skaneerivelektronmikroskoopia (SEM) meetodil. Keemilise koostise varieerumise kaardistamiseks kasutati energiadiispersiivse (EDS) spektroskoopia meetodit. Uuritud proovid saadi Kalle Kirsimäe käest.

Sisestruktuuri uurimiseks lõigati üks proovidest risti kihilisusega poolekjs ning selle pind lihviti mikroskoopilisteks uuringuteks. Pinda vaadeldi ja keemiliste elementide kaardistamine teostati skaneeriva elektronmikroskoobi ZEISS EVO 15MA ja Oxford Aztec MAX80 energiadiispersiivse detektoriga (EDS) kõrgvaakumirežiimis.

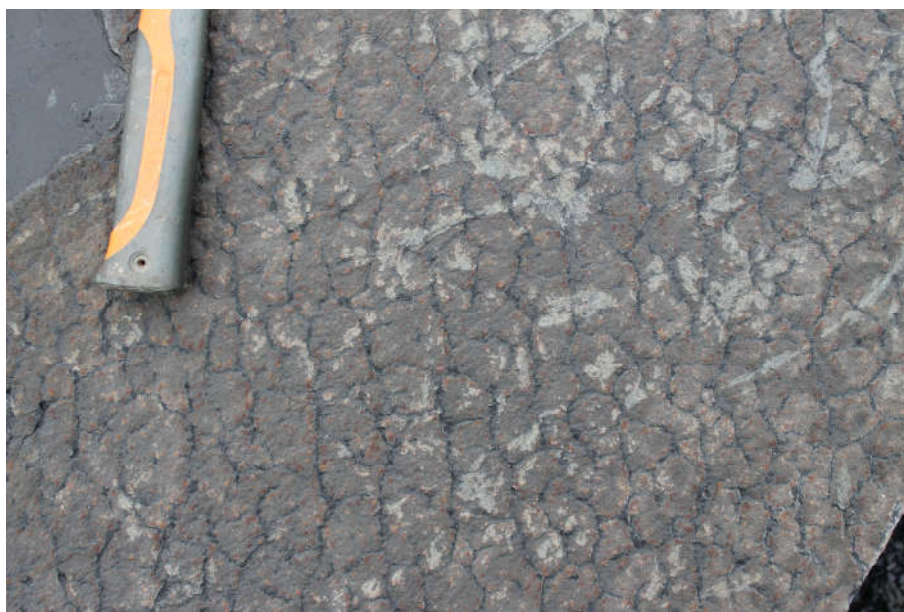


Joonis 9. Bituumeni „konkretsioon“ („tar-ball“) Kondopoga kihistu setendite kihipinnal. K. Kirsimäe foto.

5. Tulemused ja arutelu

5.1 Makroskoopiline kirjeldus

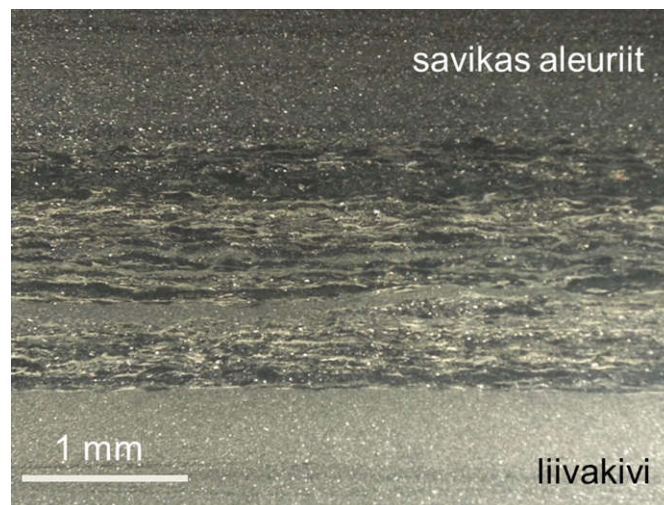
Kondpoga kihistu liivakivide-aleouroliidide liivakamate vahekihtide ülemistel kihipindadel esinevad arvukalt joonelised tekstuudid (joonis 10), mis moodustavad tüüpiliselt kuni mõne cm läbimõõduga nõrgalt väljavenitatud polügonaalset võrgustikke. Ahelike kõrgus on vahemikus 0,1–3 mm, ahelike vahekaugus on vahemikus 0,2–3 cm.



Joonis 10. Makrofotod Kondopoga kihistu kihipindade kortsulistest tekstuuridest (ülemine foto K. Kirsimäe).

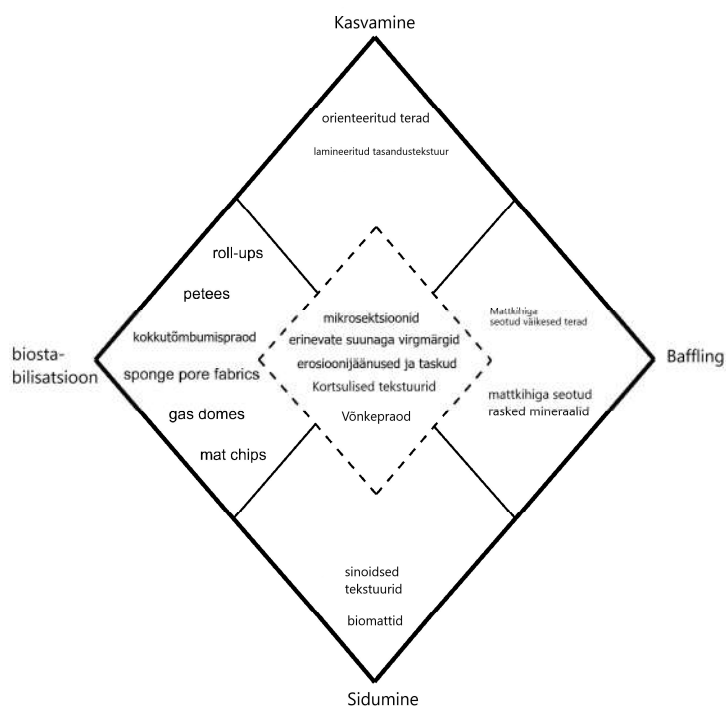
Tüüpiliselt moodustab üks suund võrgustikus domineeriva paralleelsete ahelike süsteemi, mis on omakorda seotud katkendlike ristuvate ahelikega (joonis 10).

Läbilõikes ei esine vaadeldud struktuurid konkreetse piirpinnana vaid moodustavad kuni mõne mm paksuseid tsoone liivakivivahekihtide ülemisel osas kus läätselised tumedamad lamellid vahelduvad liivkivi õhukeste kihtide ja läätseliste lamellidega moodustades korruselise struktuuri milles ülemine osa on tüüpiliselt pidevama kihina (joonis 11).



Joonis 11. Optilise mikroskoobi foto läbilõikest jooneliste struktuuridega pinnale Kondopoga kihistu liivakivide-aleuroliitide kontaktil.

Noffke (2009) toob välja oma klassifikatsioonis 17 tüüpi MIST tekstuuri, mis eristuvad oma morfoloogialt ja tekkelt ning paigutuvad selle alusel erinevatele väljadele Noffke klassifikatsiooniskeemis (joonis 12). Skeem sisaldab viit mikroobsete tekstuuri kategooriat. Iga grupp moodustab iseloomuliku MIST-i komplekti. Viis kategooriat on: I) tekstuudid, mis on tekkinud biomati kasvamise käigus, II) biostabiliseerimise tekstuudid, III) setete segunemise ja kaasahaaramisega seotud tekstuudid, IV) tekstuudid mis tulenevad osakeste sidustumisest ja (V) tekstuudid, mis tekivad kõigi mikroobide kompleksest tegevusest, mis paigutuvad skeemi keskosasse. Need kategooriad viitavad tekstuuride geneesile. Iga kategooria üksikutele tekstuuridele on antud kirjeldavad terminid, näiteks 'erinevate suunaga virgmärgid' (*multidirected ripple marks*), mis kirjeldavad tekstuuri morfoloogiat (Noffke, 2010).

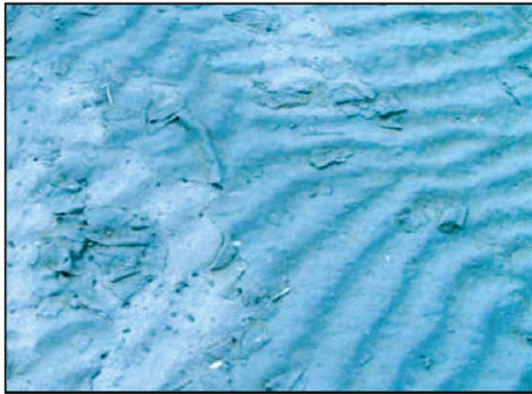


Joonis 12. Mikroobselt indutseeritud settetekstuuride klassifikatsioon. Diagramm näitab MIST-i kujunemissuhteid (Noffke, 2009 järgi).

Ülaltoodud klassifikatsiooniskeemi järgi ei saa Kondopoga MISTe liigitada ühe kindla geneesi alla ning tegemist on kompleksmoodustisega. Noffke (2009) makroskoopilise klassifikatsiooni järgi on Kondopoga kihistu liivakivikihtide piirpindadel vaadeldavad moodustised kõige lähedasemad kortsuliste tekstuuridega (*wrinkle structures*) mida vaadelda ka kui Noffke (2009) järgi esinevad kortsulised tekstuudid peeneteraliste liivakivikihtide ülemistel pindadel ja moodustavad korrapäraseid või ebakorrapäraseid väikeste ahelike süsteeme. Tüüpiliselt on ahelike kõrgused vahemikus 0,2–2 mm ning ahelike vahekaugused 0,2 mm kuni 2 cm (joonis 13). Noffke (2002, 2009) eristab kaks peamist tüüpi kortsulisi tekstuure nn „läbipaistvad“ ja „läbipaistmatud“ tekstuudid (joonis 13). Läbipaistvatel kortsusulistel tekstuudidel paistavad aluspinna settelised tekstuudid (nt virgmärgid) fossiliseerunud biokilest läbi ning läbipaistmatutel on kogu pind kaetud fossiliseerunud biomatiga ning domineerivad biomati lagunemisel või kuivamisel tekkinud mahumuutustest tingitud kortsulised ahelikud.

Täpsemalt võib ülaltoodud kirjelduse alusel Kondopoga MISTe pidada läbipaistmatuteks kortsulisteks tekstuurideks. Läbipaistmatuid kortsulisi tekstuure moodustavad sette pinnal moodustunud biomatid (nn epibentilised biomatid).

endobentilised biomatid



epibentilised biomatid



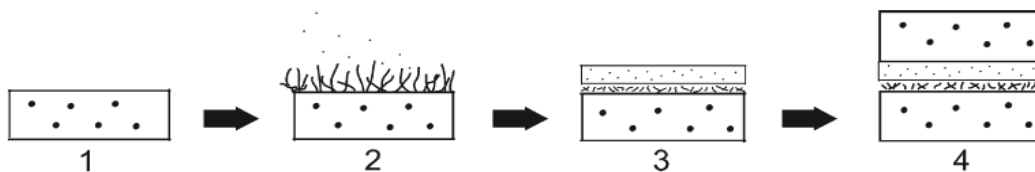
läbipaistvad kortsulised tekstuurid



läbipaistmatud kortsulised tekstuurid

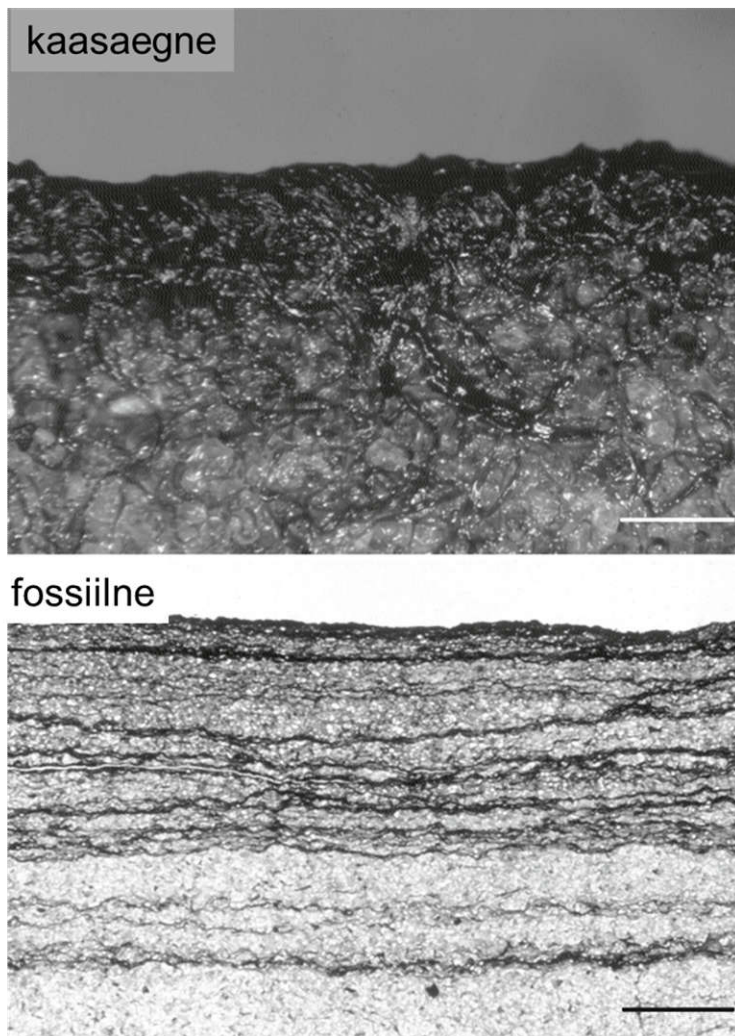
Joonis 13. Kortsuliste tekstuuride tüübid Noffke (2009) järgi

Kortsuliste tekstuuride tekkimine ja säilimine setteläbilõikes on seotud rütmilise sedimentatsiooniga (joonis 14; Noffke et al., 2002; Noffke, 2009). Esimeses etapis settib kvartsi liiva kiht, mis on optimaalne tsüanobakterite kasvamiseks ja kinnitumiseks kuna poolläbipaistvad kvartsi terad võimaldavad bakteritel koloniseerida ka selle ülemist osa. Filamentsete biomattide vahele hakkab kuhjuma peeneteralist materjali, mis muudab uhitusega minema ning moodustub osaliselt biomattiga seondunud peenematerjalise (savi-aluriit) kiht, mis blokeerib valguse juurdepääsu ning biomati aktiivse kasvu lakkamisel kaetakse see uuesti liivakivikihiga tagades biomati säilimise.



Joonis 14. Kortsuliste tekstuuride moodustavate tsüanobakterite biomattide kasvamisel ja peeneteraliste setete kaasahaaramisel.

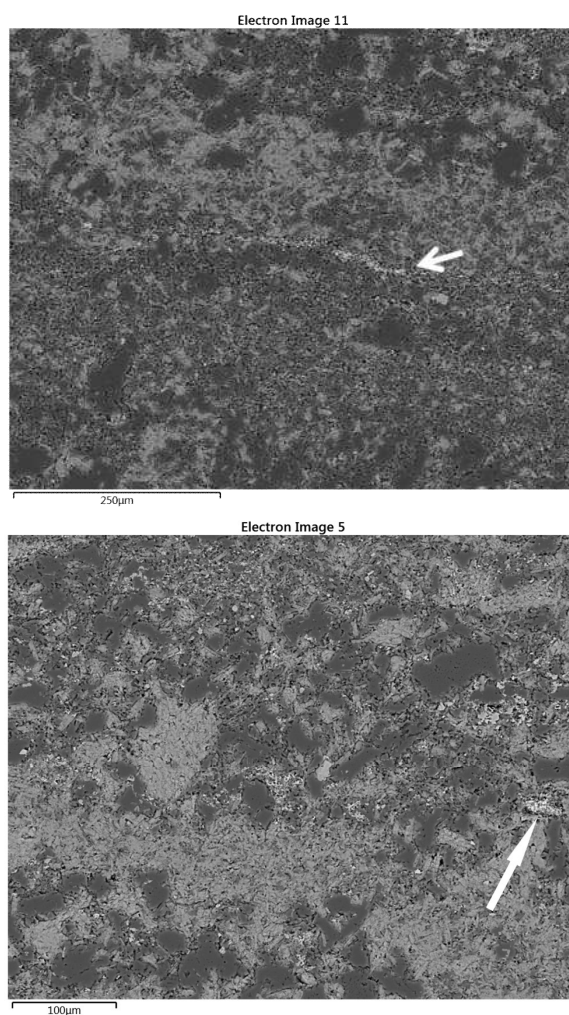
Kondopoga MIST biogeensust kinnitab ka tekstuuride mikroskoopiline läbilõige, milles eristub õhuke mõne mm paksune tsoon kus vahelduvad liivakivi-aleuriidi lamellid ja läätselised tumedamad lamellid, mis on väga sarnane Noffke (2009) kirjeldatud näidetele kaasaegsete ja fossiilsete läbilõigetest. Mikroskoopilises struktuuris on näha savika aleuriidi vaheldumist liivakiviga Kondopoga proovis mis on väga sarnane Noffke (2009) toodud näidetega fossiilsetest biomattidest (heledad liivakivi kihid ja tumedad savikad ning orgaanilise ainese rikkad kihid aleuriidi kihid ülemisel kontaktil).



Joonis 15. Kaasaegse ja fossiilse biomati läbilõige Noffke (2009) järgi. Skaala 0.5 cm.

5.2 Mikroskoopiline kirjeldus

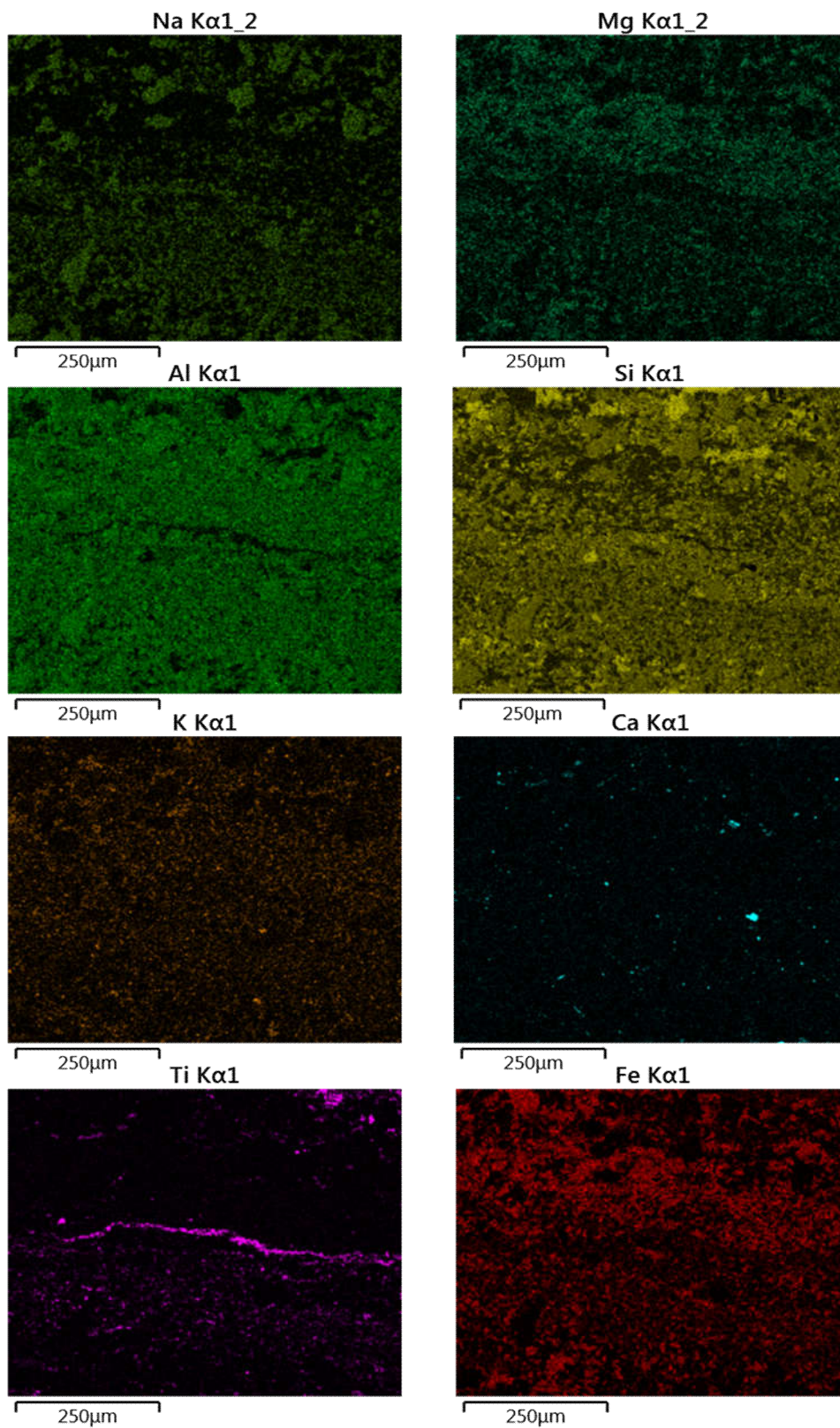
Vaadeldud tekstuuride läbilõigete lihve uuriti mikrotekstuuri ja ennekõike keemilise koostise varieeruvuse kirjeldamiseks skaneeriva elektronmikroskoobiga (SEM) kasutades tagasihajunud elektronide detektorit (*backscattered electron image – BSE*) millel heledus sõltub materjali keskmisest aatommassist ning mida raskem aatommass seda heledam on vastav ala. Elektronmikroskoobi kujutistel joonistuvad fossiliseerunud biomati kujutistel välja ebakorrapärased paralleelselt kihilisusega orienteeritud tumedamate ja heledamate tsoonide vaheldumine millel on harva õhukesed eredamad lamellid (joonis 16 ja 17)



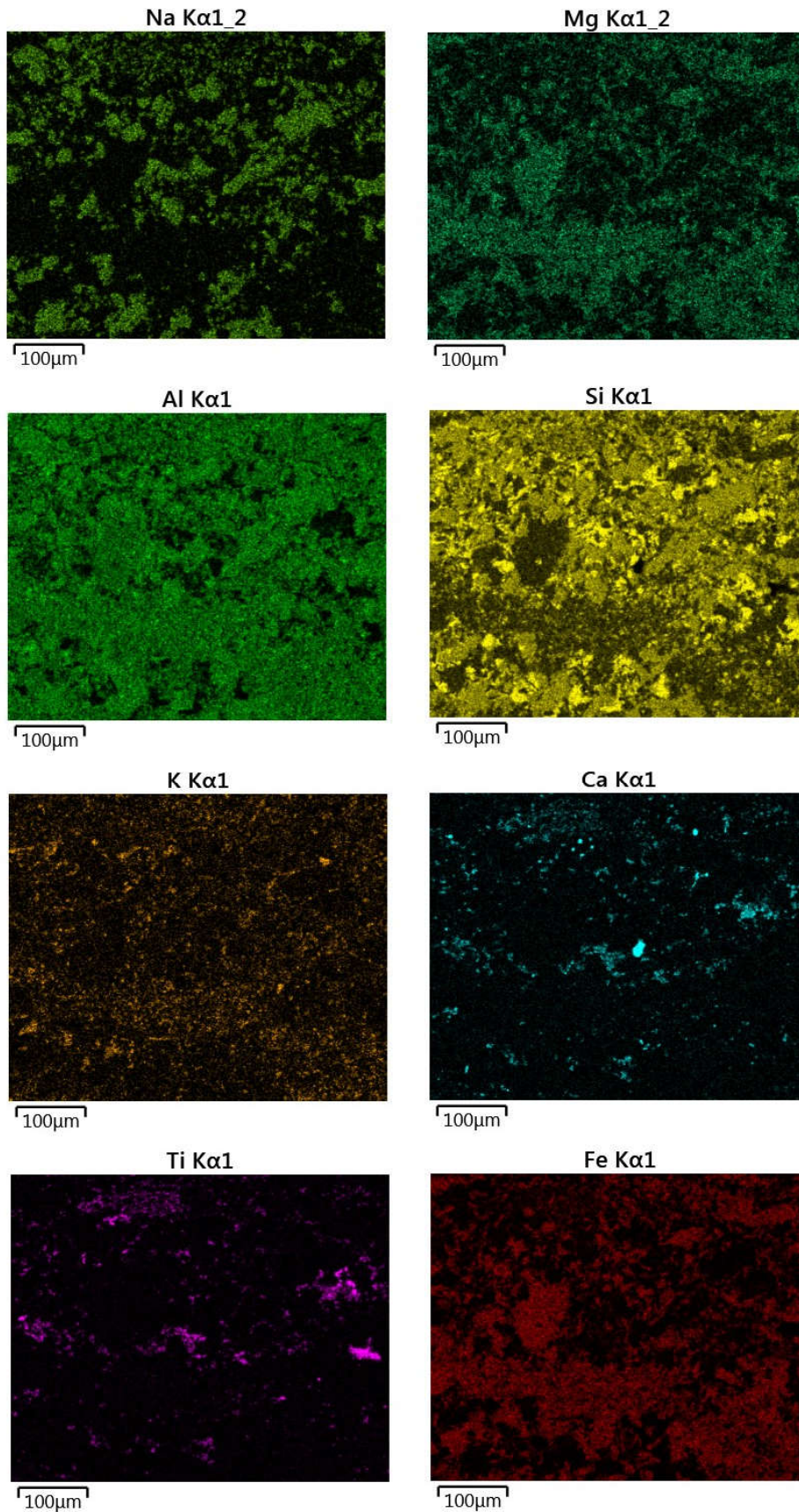
Joonis 16. Tagasihajunud elektronide kujutis fossiliseerunud biomatist ränirikka liivakivi (tumedamad alad) ja Fe- rikkama savikama aleuriidi lamellide vaheldumisest. Noolega on näidatud heledamad lamellid.

Keemilise koostise kaardistamine näitab, et Al ja Si jaotumine on ligikaudu ühtlane (Joonis 17). Heledamad lamellid on Mg ja Fe rikkamad ning tumedamad lamellides on domineeriv Si, Na ning K. Hästi joonistuvad välja Na rikkad albiidi terad ja hajusad Si rikkad kvartsi terad

ning heledamad kihilisusega lamellid koosnevad Ti-oksiididest (joonis 17).



Joonis 17A. Elementide kaardistamine alal Image 11 joonisel 16.



Joonis 17B. Elementide jaotumine joonisel 16 näidatud alal Image 5.

Mikroskoopilised uuringud ja elementide kaardistamine ei näita, et oleksid säilinud või fossiliseerunud biomati bioloogilised osad (näiteks filamendid) ning ka elementide jaotumine ei näita selget seost biomati moodustumisega, mis võiks väljenduda bioaktiivsete elementide spetsiifilises kontsentreerumises nendes kihtides. Samasugusele järeldusele jõudsid ka Aubineau et al. (2020), kes uurisid jälgelementide jaotumist 2.1 miljardi aasta vanustes fossiliseerunud biomattides Franceville basseinis Gabonis, mis moodustavad nn „elevandi naha“ tekstuure. Viimased on sarnased kortsulistele tekstuurile ning neid moodustavad paksu biomati milles tekkivad väljaulatuvad paksendid („tufts“). Siiski näitasid nende uuringud, et osades MISTes olid kõrgemad Ti- ja Zr-mineraalide sisaldused, mis viitab raske fratsiooni mineraalide kinnihaaramisele, mis on tüüpiline just mikroobsetele mattidele. Kõrgemad Ti-mineraalide sisaldused Kondopoga biomattide kihtides võivad tähendada samasuguse protsessi olemasolu ka nende tekstuurile moodustumisel, mis täiendavalt kinnitab Kondopoga kortsulise tekstuurile biogeensust.

Järeldused

Käesolevas töös uuriti võimalikke mikrobiaalselt indutseeritud settetekstuure Paleoproterozoikumi Kondopoga kihistus, Karjalas ja anti ülevaade mikroobselt indutseeritud settetekstuuride (MIST) tekkimisest ja tunnusest ning geoloogilise tõlgenduse võimalustest.

Makroskoopiliste tunnuste alusel võib Noffke (2009) klassifikatsiooni järgi pidada Kondopoga MISTe läbipaistmatuteks kortsulisteks tekstuurideks mida moodustavad sette pinnal elavad tsüanobakterite kolooniatest moodustunud biomatid. Sama ajal ei näidanud mikroskoopilised uuringud ja elementide kaardistamine, et oleksid säilinud või fossiliseerunud biomati bioloogilised osad. Samuti ei näita ka elementide jaotumine selget seost biomati moodustumisega, mis võiks väljenduda bioaktiivsete elementide spetsiifilises kontsentreerumises nendes kihtides. Siiski viitavad Ti-mineraalide lamellid võimalusele, et biomatti on haaratud raske fraktsiooni kuuluvate mineraalide terasid.

Summary

The aim of this thesis was to analyse potential microbial sediment structures in the Paleoproterozoic Kondopoga Formation, Karelia and to give an overview of the formation and characterization of microbially induced sediment structures (MISS) and their geological interpretation.

Based on macroscopic features, according to Noffke's (2009) classification, Kondopoga MISS can be considered as opaque wrinkled textures formed by biomats formed from cyanobacterial colonies living on the surface of sediment. At the same time, microscopic studies and element mapping did not indicate that the biological parts of the biomite were preserved or fossilized, nor did the distribution of the elements show a clear association with biomass formation, which could be reflected in the specific concentration of bioactive elements in these layers. Chemical composition mapping showed lamellae consisting of Ti oxides that could represent heavy mineral entrapped to the biomat structure further supporting its interpretation as microbially induced.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada oma juhendajat Kalle Kirsimäed igakülgse abi eest.

Kirjandusloend

Aubineau, J., Albania A. , Bekkerb A., Frud E. C., Somogyie A., Medjoubie K, Riboulleauf A., Meuniera A., Konhauser K. O. (2020). Trace element perspective into the ca. 2.1-billion-year-old shallow-marine microbial mats from the Francevillian Group, Gabon, 2-12

Callow, R. H. T., Brasier, M. D. (2009). Remarkable preservation of microbial mats in Neoproterozoic siliciclastic settings: Implications for Ediacaran taphonomic models. *Earth-Science Reviews* 96, X-Y

Calner, M., Eriksson, M. E. (2012). The record of microbially induced sedimentary structures (MISS) in the Swedish Paleozoic. Noffke, N; Chafetz, H (Eds) *Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time*. Society for Sedimentary Geology Special Publication Issue: 101, 29-35

Noffke, N.; Awramik, S. M. (2013). Stromatolites and MISS? Differences between relatives" *GSA Today* 23, 4-9.

Noffke, N. (2009). The criteria for the biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean and younger, sandy deposits. *Earth-Science Reviews*, 96, 173-1

Noffke, N. (2009) *Earth-Science Reviews* 96, 176-179

Noffke, N. (2010) *Geobiology. Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archean Era to Today*, 5, 12-19

Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, Th., Krumbein, W.E. (2001) Microbially induced sedimentary structures - a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71, 649–656.

Peterson D.M., Yallop M., and George C. (1994). Biostabilization. In *Biostabilization of Sediments*, edited by Krumbein W.E., editor; , Paterson D.M., editor; , and Stal L.J., editor., BIS, Oldenburg, 401–432

Prave A. R., Hanski E. J., Fallick A. E., Leland A., Kump L. R., Melezhik V. A. (2013) *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Volume 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project*, 387-390, 402-404

Prave A. R., Hanski E. J., Fallick A. E., Lepland A., Kump L. R., Melezhik V. A. (2013) Reading the Archive of Earth's Oxygenation Volume 2: The Core Archive of the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project, 947

Prave A. R., Melezhik V. A., Kump L.R., Fallick A. E., Strauss H., Hanski E. J., Lepland A. (2013). Reading the Archive of Earth's Oxygenation Volume 3: Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia - Drilling Early Earth Project, 1352-1353

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kati Gebruk,

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

**Mikroobselt indutseeritud settetekstuurid ja nende interpreteerimine
Paleoproterosoikumi Kondopoga kihistu (Karjala) mudakivimites,**

mille juhendaja on Kalle Kirsimäe,

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kati Gebruk
30.05.2020