

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
ÖKOLOOGIA- JA MAATEADUSTE INSTITUUT  
GEOLOOGIA OSAKOND

Mare Laan

**SILURI TORMISETTED RAIKKÜLA EA RANNAMERES**

**KALANAS**

Magistritöö

Juhendaja: Leho Ainsaar

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

allkiri, kuupäev

Tartu 2013

## Sisukord

|  |    |
|--|----|
| Annotatsioon.....                                    | 3  |
| 1. Sissejuhatus .....                                | 4  |
| 2. Tempestiidid .....                                | 5  |
| 3. Geoloogiline ehitus.....                          | 9  |
| 3. Materjal ja meetodika.....                        | 13 |
| 4. Tulemused .....                                   | 14 |
| 4.1 Jõgeva kihtide liigestus Kalanas .....           | 14 |
| 4.2 Kanalid.....                                     | 16 |
| 4.3 Tempestiitide levik ja iseloom Kalanas .....     | 18 |
| 4.4 Tempestiitide makrolitoloogiline kirjeldus.....  | 21 |
| 4.5 Tempestiitide mikrolitoloogiline kirjeldus ..... | 27 |
| Arutelu .....  | 33 |
| Kokkuvõte .....                                      | 36 |
| Tänuavaldused .....                                  | 37 |
| Kasutatud kirjandus .....                            | 38 |
| Resume .....   | 40 |
| LISAD .....  | 41 |

## Annotatsioon

Antud töö eesmärgiks on kirjeldada tempestiitide esinemist Raikküla lademe karbonaatkivimites Kalana karjääris ning tormisetete paiknemise ja iseloomu järgi püüda analüüsida Siluri karbonaatsete meresetete tekketingimusi Kesk-Eestis Raikküla eal.

Käesoleva töö uurimisobjektiks on karbonaatsed tempestiidid Kalana karjääri Raikküla lademes. Välitööde käigus kirjeldati tempestiitide koostist, paiknemist karjääri seinas ja mõõdeti piki seina nende paksus ja pikkus. Käsipaladest tehti fotod ja õhikud, mida uuriti optilisel binokulaarmikroskoopilisel vaatlusel.

Raikküla kihid saab Kalana karjääris jagada neljaks kompleksiks, milleks on dolomiidistunud teralis-mudalise lubjakivi kompleks, savika afaniitse lubjakivi kompleks, savikate vahekihtidega afaniitse ilmega lubjakivi kompleks ja peeneteralise lubjakivi kompleks, mis on kohati põimjaskihiline. Raikküla ea rannasetetest võib tempestiite leida dolomiitsest lubjakivist või siis kanaleid täitvast afaniitsest lubjakivist. Koostiselt on tempestiitide puhul tegu teraliste lubjakividega, karbikuhjeliste lubjakividega või litoklaste sisaldavate lubjakividega. Esinemise ja iseloomu järgi võib oletada, et tempestiitide settimise ajal on Kalanas Raikküla eal toimunud üldjoontes Paleobalti basseini regresseerumine, mis vaheldus aeg-ajalt veetaseme tõusuga. Settinud tormisetteid ja vetikate kihte kaitsesid otsese lainetustegevuse eest arvukad rannavallid.

Märksõnad: sedimentoloogia, tempestiidid, Silur, Kalana.

# 1. Sissejuhatus

Tempestiit ehk tormikiht on madalamerelistes tingimustes väga tugeva tormiga ümbersetitatud settekiht, mis koosneb erineva suurusega osakestest (Sami & Desrochers, 1992). Tempestiit võib koosneda bioklastsest, litoklastsest või mikriitsest materjalist, mille sorteerituse ja ümardatuse aste varieerub läbilõike eri osades üpriski tugevalt. Makrolitoloogiliselt võivad tempestiidid esineda seega näiteks bretša- või konglomeraadikihtidena meresetetes.

Faktorid, mis mõjutavad tormisetete settimist on tormi kestvus, tormi intensiivsus, tormi olemus, lasundi sügavus ja lasundi kaugus setete päritolu kohast või rannast (Sami & Desrochers, 1992). Seda, kui tugeva tormiga tegu oli, võib otsustada merepõhjast või rannikult lahti rebitud osakeste suuruse ja sisalduse või fossiilse materjali purunemisastme järgi. Karbonaatsetel kaldlavadel (rampidel) moodustuvate lubimaterjalist tempestiitide tekkimiseks on reeglina vaja väga tugevaid torme (Einsele, 1992).

Tempestiidid võivad anda tunnistust kunagistest paleokliimaatilistest tingimustest, sealhulgas tormidest, mille esinemiste vahel võib-olla mitusada kuni tuhat aastat. Samuti on tormikihid suurepäraseks vahendiks, et analüüsida basseini evolutsioneerumise stsenaariume, kas tegu võis olla transgressiivse sügavneva basseiniga, tasakaalus oleva basseinga või siis regressiivse madalduva basseiniga (Einsele, 1992).

Antud töö eesmärgiks on kirjeldada tempestiitide esinemist Siluris Raikküla lademe karbonaatkivimites Kalana karjääris ning tempestiitide esinemise ja iseloomu järgi püüda analüüsida Siluri karbonaatsete meresetete tekketingimusi Kesk-Eestis Raikküla eal. Kalana karjääris paljanduvate kihtide settetingimuste uurimine on oluline ka seal leitud vetikate lagerstätte (Tinn et al. 2009) kujunemis- ja säilimistingimuste kindlakstegemisel.



aluspõhja kivimist või on kaasa haaratud kusagilt kaugemalt ja antud kohta veevooludega transporditud. Peale jämpurdset kihti esineb läbilõikes ränipurdsetele tempestitidele ainuomane kühmjas põimjaskihilisus, seejärel horisontaalkihilisus ja bioturbeeritud mikriitne kiht. Seega on proksimaalsete ränipurdsete tempestitide läbilõigete puhul tegu nii-öelda täielike läbilõigetega. Tavaliselt on proksimaalsed tormikihid 5-100 cm (Sami & Desrochers, 1992) paksused ning ümbritsetud väheste mudaste vahekihtidega. Mida kaugemale mere suunas minna, seda suuremaks muutub üksikute tempestitide arv teatud ajavahemiku kohta, kuna kihtide kokkusulandumine muutub haruldasemaks. Samas veel kaugemal rannast hakkab nende arvukus jällegi vähenema, sest tormiga kaasa haaratud materjali edasikandumise võimekus on pärsitud (Einsele, 1992). Basseini sügavamas osas muutub valdavaks pigem muda, mille sees õhukesed peeneteralised tempestitid. Distaalsed tormikihid on 4-10 cm (Sami & Desrochers, 1992) paksused, vähesel määral erodeeritud basaalse osaga, sisemise ülespoole gradueeruva horisontaalse- või põimjaskihilisusega.

Tempestitide abil on võimalik koostada paleogeograafilisi rekonstruktsioone. Tormikihtide leviku ja koostise järgi saab ennustada, kas tegu on transgressiivse või regressiivse basseiniga (Einsele, 1992). Kui settimine ja vajumine basseinis on tasakaalus, siis moodustub küllaltki paks tempestitide lasund, mis vaheldub mudadega. Seega paleo-vee sügavus kindlas basseini kohas jääb konstantseks. Sügavnevast basseinist, mil keskmine settimise hulk on väiksem kui vajumine, võib leida pakse, väheste fossiilidega küllaltki jämedateralisi proksimaalseid tempestite, õhukesi peeneteralisi distaalseid tempestite ja kõige lõpuks ebaselgeid mudaseid tempestite. Seega tempestitide lasundid muutuvad ülespoole peeneteralisemaks ja õhemaks. Järkjärgulisel veetaseme alanemisel, mil setete kuhjumine on suurem kui vajumine, muutub tempestitide lasund ülespoole jämedateralisemaks ja paksemaks ning fossiilse materjali hulk kasvab. Selline regressiivne trend soodustab tormikihtide liitumist.

Basseini sügavust saab ennustada tempestitides sisalduva savi ja lubimuda suhte järgi (Sami & Desrochers, 1992). Laiaulatuslik, üsna paks tempestiti lasund viitab pidevale silikaatse või karbonaatse materjali allikale, nagu jõe deltid, kiiresti erodeeruvad liivapangad või karbonaatse materjali tootmine. Niikaua, kui karbonaatse tootmise tsoon on optimaalsel sügavusel, on karbonaatse muda sissevool küllaldane, et lahjendada silikaatse materjali sissetoomist ja toota lubimuda lasundit. Kui transgressioon on piisavalt kiire ja setete

produksioon ei jõua sellega sammu pidada, siis karbonaatse muda juurdevool langeb drastiliselt ja hakkab domineerima savikas muda. Kui karbonaatse materjali produktsioon lõpuks transgressioonile järgi jõuab, taastub karbonaatse muda settimine.

Settimine on väga oluline, kuna nii säiluvad tormide poolt tekitatud tempestitide kihid. Tempestitidega esindatud tormid on geoloogilises ajas vähem sagedased kui haruldaset võimsad tänapäevased tormid. Geoloogilises ajas esinevad tempestitid üle mitme tuhande aastase intervalliga, samas kui tänapäevaste tormide kihid esinevad kümnete või sadade aastate järelt (Einsele, 1992). Peamiseks põhjuseks, miks tugevate tormide jälgi rannalähedastelt aladelt ei leia, on tavapärane lainetus, mis on need hävitanud (Sami & Desrochers, 1992). Keskmise sügavusega basseini aladel võib näha mõningaid tormi poolt põhjustatud tekstuure, nagu horisontaalkihilisus või siis väikese nurga all kaldkihilisus. Basseini osas, kus veesügavus ulatub 5-20 meetrini (Sami & Desrochers, 1992), haarab tormide poolt põhjustatud veevool kaasa muda ja liiva ning setitab selle ümber enam-vähem samasse asukohta.

Kuna tormihoovused on episoodilised ja lühiealised, siis ei saa neid pidada ainult purustajateks. Omamoodi võivad tormid settinud materjali ka kaitsta. Näiteks on tempestitides sisalduv karbimaterjal hästi esindatud tänu kiirele setete alla mattumisele ja biogeense degradeerumise puudumisele (Sami & Desrochers, 1992).

Võrreldes tempestite turbitiitide või tsunamiitidega, siis tempestite eristab turbitiitidest madalamere fauna esinemine, kiired muutused vertikaalses läbilõikes, sarnasus madalamere faatsiesele ja kindlad sette tekstuudid, nagu seda on kümnes põimjaskihilisus ja lainevired (Koleva-Rekalova, 2000). Tsunamiitidega on natuke keerulisem olukord, kuna neid peetakse tempestitide erijuhuks. Tsunamiite saab tempestitidest ja turbitiitidest eristada põhiliselt vaid ajalooliste andmete põhjal, kus on teada, et kindel tsunaami põhjustas kindla lasundi (Shanmugam, 2006). Kümnes põimjaskihilisus esineb nii tempestitidel kui ka tsunamiitidel ja seega on nende erinevus pigem tähenduslik kui sedimentoloogiline.

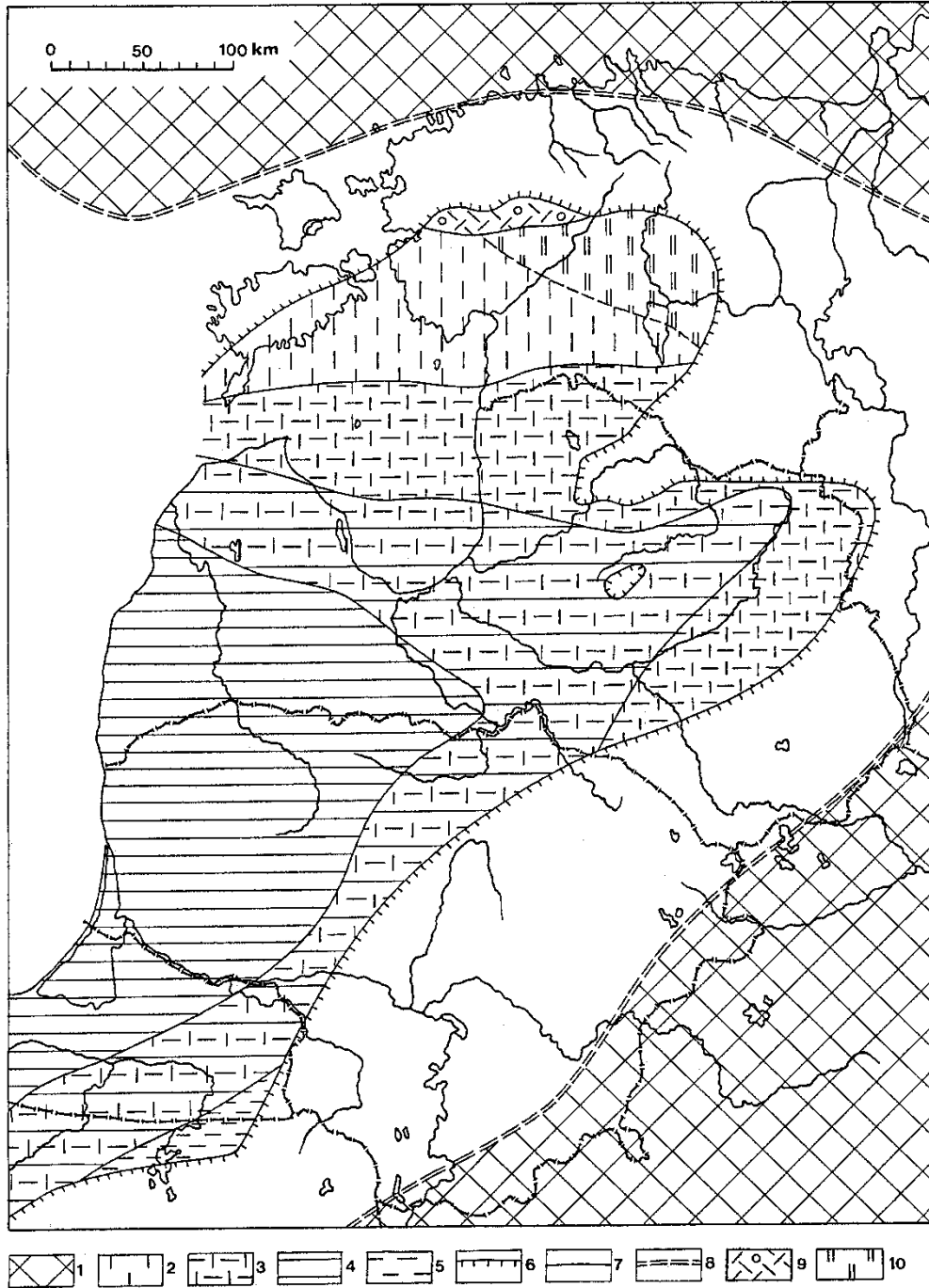
Eesti aluspõhja karbonaatsetest kivimitest on leitud samuti mõningaid tempestite. Ordoviitsiumi Volhovi lademes arvas K.Orviku (1960) leiduvat tormi aktiivsuse jälgi, mis oleks heaks põhjenduseks fosfaatsete veeriste esinemisele Põhja-Eesti Klindil. Siluri ealisi tormisetteid leidub Juuru lademes, Õhne (Nestor et al. 2003), Varbola (Nestor, 1997) ja Tamsalu kihistus (Nestor et al. 2003). Raikküla lademes esinevad nad Nurmekunna kihistu

Järva-Jaani ja Jõgeva kihis ning Saarde kihistus (Nestor et al. 2003). Adavere lademes on leitud tempestiidikihte Rumba kihistust (Nestor, 1997).

### 3. Geoloogiline ehitus

Käesoleva töö puhul on vaatluse all Siluri tormisetted Raikküla ea rannameres ja seega alljärgnevalt natuke lähemalt Eesti tollasest regionaalgeoloogilisest paiknemisest, valitsevatest settimistingimustest ja setetest.

Siluri ajastut võib pidada pöördeliseks ajastuks, kuna eelnevalt Proterosoikumi lõpul alanud Rodinia ülimandri lagunemise staadium asendus mandrikildude taasühinemise staadiumiga (Nestor ja Soesoo, 2006). Baltika kraaton triivis lõunapoolkera kõrgetelt laiuskraadidelt troopilistele aladele, mis omakorda põhjustas karbonaatsete setete kiiremat settimist ning selliste lasundite teket, mis on iseloomulikud kuivale troopilisele kliimale (Nestor & Einasto, 1997). Ordoviitsiumi ajastu lõpul algas Baltika ürgmandri liitumine Avalonia pisimandriga ning Siluri lõpuks liitus Baltika täielikult ka Laurentiaga (Nestor ja Soesoo, 2006). Liitekohal olnud Iapetuse ookean sulgus ning hakkas kerkima Kaledoonia mäestik. Samal ajal moodustus nüüdse Läänemere ja Baltimaade kohal kirde-edela suunaline nõgu, mis ulatus Kesk-Poolast umbes praeguse Eesti lõunapiirini. Mandrite liitumisest põhjustatud kerkeliikumine haaras järjest suuremaid alasid ja lahekujuliseks muutunud Paleobalti meri taandus järk-järgult edela suunas (Joonis 1). Mere taandumine ja madaldumine ei olnud pidev protsess, kuna toimus ka korduvaid mere pealetunge ja sügavnemisi, mis oli seotud maailmamere veetaseme muutustega. Kalanas, mis jäi sel ajal rannalähedasele alale, settisid laialdaselt lubisetendid ja sügavamas avameres graptoliitne muda.



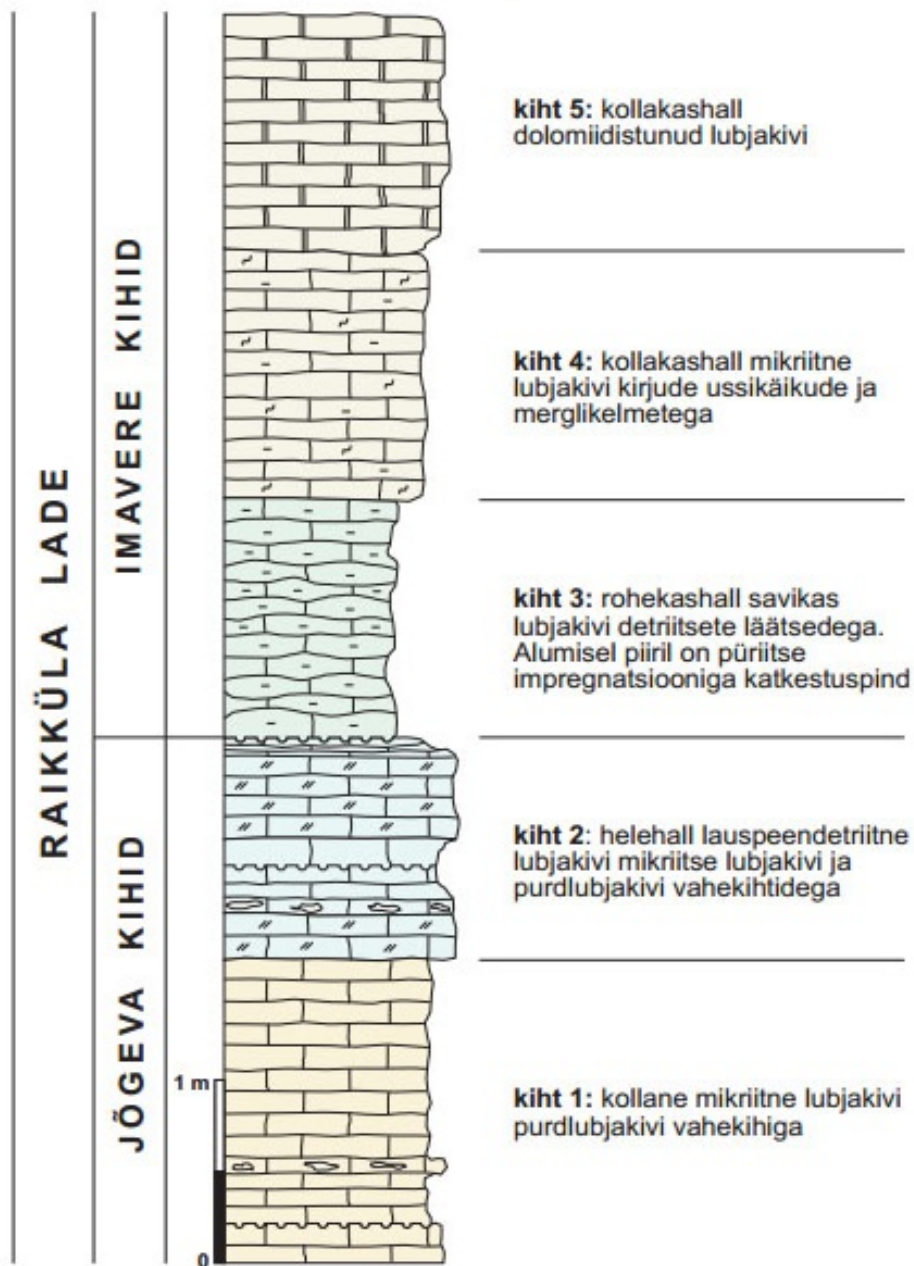
**Joonis 1.** Raikküla ea setendid. 1- maismaa, 2- lubimuda, 3- vahekihtides olev lubimuda ja tume kerogeenne muda graptoliitidega, 4- tume kerogeenne graptoliitne muda, 5- hall graptoliitne muda, 6- tänapäevane kivimite leviku piir, 7- faatsieste piir, 8- rannajoon, 9- lausteraline skeletiliiv ja aleuriit, 10- dolomiidistunud lubimuda (Nestor & Einasto 1997).

Kalana karjääri on geoloogia-alases kirjanduses kirjeldatud kui Llandovery ladestiku Raikküla lademe rannalähedaste karbonaatsetete suurepärasest paljandist (Einasto ja Perens, 1985; Perens, 1992; Ainsaar ja Einasto, 1995; Ainsaar ja Pani, 2003). Paleogeograafiliselt asus Eesti selle lademe moodustumise ajal lähistroopilises kliimavöötmes, ekvaatorist lõuna pool epikontinentaalses meres. Seega iseloomustab Kesk-Eestis Raikküla ladet mudaliste (mikriitsete) ja teraliste (detriitsete) lubjakivide tsükliline vaheldumine, mille seas on kokku kolme tüüpi kivimeid (Nestor, 1997; Nestor ja Soesoo, 2006). Settetsükli alumistes kihtides valdavad rohekashallid savikad lubjakivid, keskmistes esinevad põhiliselt lubimudast moodustunud kollakashallid mudalised ehk mikriitlubjakivid ning ülemised kihid on moodustunud organismide purdosadest (detriidist), koosnedes teralistest või mudalis-teralistest lubjakividest (Perens, 1992; Nestor, 1997). Mõned Raikküla lademe teralise lubjakivi läätsjad vahekihid on jäme purdsed ning suurte lapikute veeristega, mis on tekkinud erakordselt tugeva tormilainetuse tulemusena, mil lainetuse mõju ulatus merepõhjani.

Raikküla lademe puhul on tegemist nii lateraalselt kui ka vertikaalselt väga vahelduva ja rütmiliselt muutuva kivimikompleksiga. Selleks et kivimitüüpidest ja nende levikust paremat ülevaadet saada, on lade liigestatud väiksemateks alajaotusteks – kihtideks. Raikküla lade (Joonis 2) koosneb kokku viiest kihist: Järva-Jaani, Vändra, Jõgeva, Imavere ja Mõhküla (Perens, 1992). Kalana karjääris on neist näha Jõgeva kihtide keskmist ja ülemist osa ning Imavere kihtide alumist ja keskmist osa. Jõgeva kihtide keskmine osa koosneb kollasest mikriitsetest lubjakivist, milles on purdlubjakivi vahekihid. Jõgeva kihtide ülemise osa moodustab helehall lauspeendetriitne lubjakivi, mikriitse lubjakivi ja purdlubjakivi vahekihtidega. Viimast kihti tuntakse varasemast ajast ka „Kalana marmorina“ (Einasto ja Perens, 1985).

Seinte kõrgus Kalanas on ligikaudu 5-8 meetrit (Nestor ja Soesoo, 2006), kuna aga karjääri lõunaseinas on kihid fleksuuri tõttu lääne suunas allapoole paindunud, siis võib paljanduva seina kõrgus ulatuda isegi 15 meetrini (Ainsaar ja Pani, 2003).

## KALANA paekarjäär



Joonis 2. Kalana paekarjääri läbilõige (Ainsaar ja Einasto, 1995, cit. Nestor ja Soesoo, 2006)

### 3. Materjal ja metoodika

Käesoleva töö uurimisobjektiks on karbonaatsed tempestiidid Kalana karjääri Raikküla lademes. 2012. aasta kevadel ja sügisel viidi läbi välitööd Kalana (Otisaare) paekarjääris, mis asub Jõgeva maakonnas Kalana asula lääneservas.

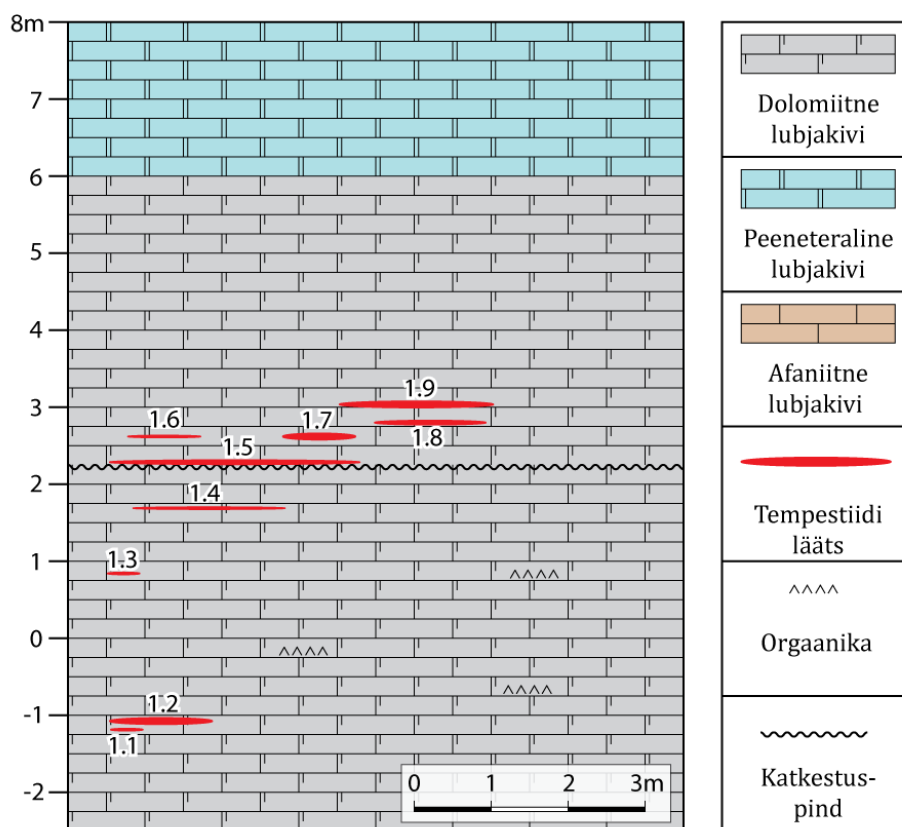
Välitööde käigus kirjeldasin tempestiitide koostist, paiknemist karjääri seinas ning üksteise suhtes. Mõõdulindiga mõõtsin piki seinu nende paksuse ja pikkuse. Erineva koostisega tempestiidi lüütsedest sai võetud ka käsipalad, mida hiljem laboris täpsemalt uurisin. Igast käsipalast tegin foto ja õhikud, et täpsemalt analüüsida, millised tekstuurid esile tulevad ja millest tempestiidid koosnevad. Käsipalad, mis pärinevad Kalana karjääri lõunaseinast tähistasin T1, T2 ja T3-ga. Nende õhikud vastavalt T11, T12, T13, T14; T21, T22, T23, T24; T3. Tempestiitide käsipalad, mis paiknesid arvatavates kanalisüsteemides tähistasin 2T1, 2T2 ja 2T7-ga ning neist valmistatud õhikud sama numeratsiooniga.

Lihvide pildistamiseks kasutasin digikaamerat Canon EOS 7D. Õhikuid pildistasin polarisatsioonimikroskoobi Leica DM2500P all digikaamera Leica DFC 495 abil tarkvaraga LAS versioon V3.6. Töös esitatud fotod on töödeldud arvutiprogrammi Adobe Photoshop 7.0 abil ning joonised on tehtud programmiga Adobe Illustrator CS3.

## 4. Tulemused

### 4.1 Jõgeva kihtide liigestus Kalanas

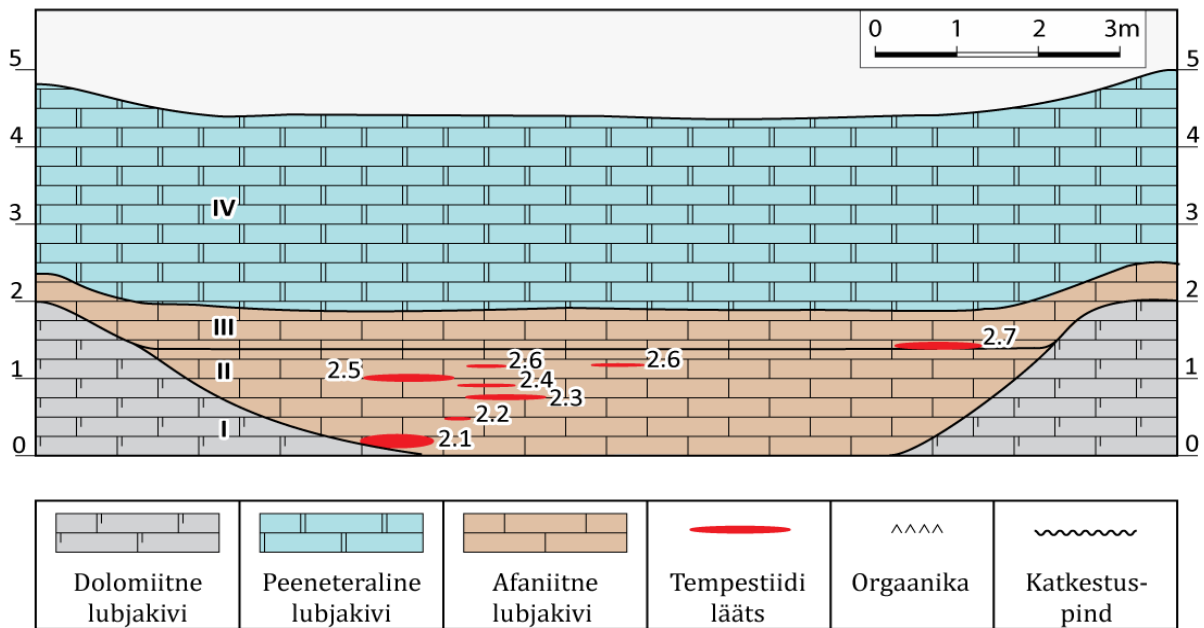
Valdavaks kivimiks Kalana lõunaseinas (Joonis 3) on hallikas dolomiitne lubjakivi, mida karjääri seinas võib näha 5-6 meetri ulatuses. Seina alumises osas on vähem savikas dolomiitne lubjakivi, milles jämepurdsed läätsjad ning orgaanilise aine vahekihid (sisaldavad vetikate ja taimede jäänuseid; Tinn et al. 2009). Umbes 2,3 meetri kõrgusel esineb püriitne katkestuspind, peale mida algab uus kompleks. Tume-halli värvusega, kergelt mugulja tekstuuriga savikam dolomiitne lubjakivi, milles võib märgata teatud tasemel (2,3-2,8 m) ka laminaarkihilisust. Esineb ränimugulaid ja läätsesid. 6 meetri pealt algab hele-hall peeneteraline lubjakivi. Massiivset teralise lubjakivi kompleksi on ülemised 2-3 meetrit paljanduvast läbilõikest.



Joonis 3. Karjääri lõunaseina geoloogiline ehitus ja tempestiitide levik paljandis.

Vaadeldud seina kõige idapoolsem serv on ülejäänust veidike teistmoodi. Tegemist ei ole, sarnaselt ülejäänule, massiivse teralise lubjakiviga. Tekstuurilt on tegu pigem põimjaskihilise lubjakiviga, milles savikaid vahekihte.

Kalana karjääri lõunaseinast läänepoole liikudes võib näha fleksuuri, kus heleda peeneteralise lubjakivi kompleksi peal algavad savikad kihid uuesti. Kalana karjääri nii-öelda põhjaseinas paljandub 4 erinevat kivimikompleksi (Joonis 4). Kõige alumise kompleksi



**Joonis 4.** Kalana karjääri kanalisüsteemi geoloogiline ehitus ja tempestiitide levik. Kanal nr 1 näitel.

moodustab dolomiidistunud ränimugulatega teralis-mudaline lubjakivi (I), mida võis näha ka karjääri lõunaseina alumise kompleksina (Joonis 3). Selle dolomiidistunud lubjakivi kivimites on kausitaolised kitsad vööndid, mis on täitunud afaniitse dolomiidistumata ja kohati savika lubjakiviga (II). Neid vööndeid kirjeldame järgnevalt mattunud kanalitena. II kompleks sisaldab bretšalisi ja karbikuhjelisi läätsjaid vahekihte. Kanaleid ja dolomiidistunud lubjakivi katab omakorda ühtlase õhukese kihina savikate vahekihtidega afaniitne lubjakivi (III), milles erinevalt II kompleksist läätsjaid vahekihte ei esine. Viimase kompleksi (IV) moodustab peeneteraline hele lubjakivi, mis on kohati põimjaskihiline ning milles läätsjad vahekihid puuduvad. IV kompleksi puhul on tegu sama kivimiga, mis karjääri lõunaseina kõige ülemises

osas, nn. Kalana marmoriga (Joonis 3). Kõik leitud kanalid on seega sisselõikunud I kompleksi, täidetud II kompleksi kivimiga ning kaetud III kompleksi kivimiga (Joonis 4).

Kihtide paksuste näiteks võib tuua esimese kanali (Joonis 4). Jälgides komplekside paksuseid kahel pool kanalit ning kanali sees võib märgata, et I kompleksi paksus on 200 cm, II kompleksi paksus ligikaudu 150 cm, III kompleksi paksus jääb vahemikku 30-50 cm ning IV kompleksi paksus on 250 cm. Kanali kohal on kihid veidike paindes. III ja IV kompleksi piir kanali keskel on võrreldes kanalist vasakule jääva alaga umbes 30 cm ning paremale jääva alaga 50 cm madalam. Seega III kompleksi paksus keset kanalit võrreldes äärealadega suureneb. Neli kompleksi on kokku 5 m paks. 4 ja 5 m vahel on mudalis-teralised tsüklid ja seda katavad nooremad mudased kihid (Raikküla lademe Imavere kihid; Ainsaar ja Einasto, 1995).

## **4.2 Kanalid**

Kalana karjääris vaadeldi lähemalt nelja dolomiidistunud lubjakivisse sisselõikunud kanalit (Joonis 5). Ümbritseva kivimi ja kanalitäite vahel on tihti sekundaarse kristallisatsioonihõhke tsoon, mis koosneb kaltsiidist. Vaadeldes kanali nõlvade lõikumist, siis võib oletada, et nad paiknevad kirde-edela suunaliselt (Lisa 2). Morfoloogialt on tegu üsna laugete kanalitega.

### **Kanal nr 1**

Kanali (Lisa 1/ Joonis 4) vasaku nõlva kallakusnurgaks on 30° ja parema nõlva kallakusnurgaks 36°. Laius piki seinu on 13 m. Kanali põhja näha ei ole ja seega ei saa kindlalt öelda, kui sügava kanaliga on tegu. Kahe kihi paksus, mida kanalis kirjeldada saab, on ligikaudu 1,3 m (ilma rusukaldeta).



**Joonis 5.** Kanalite 1, 2, 3, 4 paiknemine karjääris ja tempestiitide ala lõunaseinas (Maa-ameti ortofoto).

### **Kanal nr 2**

Kanali (Lisa 3) vasaku nõlva kallakusnurk on  $30^\circ$  ja parem  $45^\circ$ . Kanali ida-lääne suunaline ulatus seinast mõõdetuna on 15 m. Nõlvaga risti mõõtes on tegu 6-7 m laiuse kanaliga. Kanali põhja ei ole ka seekord näha ja seega pole teada, kui sügava kanaliga tegu on. Kompleksi paksus, mis täidab kanalit on 2 m.

### **Kanal nr 3**

Eelmise kanali juurest paarsada meetrit eemal on kõige väiksem leitud kanal, mille sügavus on vaid 60 cm ning laius 3 m (Lisa 4). Kanali nõlvade kallakusnurk on ligikaudu  $11^\circ$ .

### **Kanal nr 4**

Viimasena leitud kanal (Lisa 5) on võrreldes kanal nr 3-ga nähtavalt sügavam. Lateraalne ulatus on sellel umbes 8 m. Kanali täite moodustab, nagu ülejäänud kanalitelgi, II kompleksi kuuluv afaniitne lubjakivi, paksusega 2 m. Kanali servade kallakusnurgad on ligikaudu  $30^\circ$ .

### 4.3 Tempestiitide levik ja iseloom Kalanas

Valdavalt esinevad tempestiidid karjääri seintes väikeste läätsedena. Esimestena leitud tormikihid paiknesid Kalana karjääri lõunaseinas (Joonis 3), meie jaotuse järgi I kompleksi kuuluva dolomiitse lubjakivi sees. Nullpunktiks, mille suhtes tempestiitide paiknemist mõõdeti, oli rusukalde piir. Nullpunktist allapoole jäävad tempestiidid asusid karjääri lõunaseina suhtes teisel pool väikest kraavi, kus karjääri põhja sügavuseks sai mõõdetud 2,5 meetrit.

I dolomiitse kihikompleksi tempestiite analüüsides (Tabel 1) võib öelda, et nende paksus on 3-12 cm, jäädes reeglina alla kümne sentimeetri. Tempestiidikihtide nähtav lateraalne ulatus karjääri seinas varieerub veelgi suuremas vahemikus, olles 45-330 cm, kuid keskmiselt umbes 100 cm. Koostiselt on tegu teraliste lubjakividega (1.1; 1.2; 1.3; 1.5), karbikuhjeliste lubjakividega (1.4; 1.6; 1.7; 1.8) või litoklaste sisaldavate lubjakividega (1.9). Kui jälgida, millest tempestiidid on moodustunud, siis alumistes kihtides valdavad teralsed tempestiidid ja ülemistes kihtides asenduvad need litoklastsete ja karbikuhjeliste tempestiitidega. Eriti tihedalt leidub tempestiite nullpunktist 2-3 meetri kõrgusel, kuid peale 3 meetrit, mil dolomiitne lubjakivi muutub veidike savikamaks, kaovad nad ära. See ei tähenda, et tempestiite seal ei ole, kindlasti võib neid veelgi leiduda, kuid ilmselt oluliselt harvem. Nullpunktist alla poole jäi ainult kaks tempestiidi vahekihti.

Kui rääkida lähemalt konkreetsetest tempestiitidest, siis omapäraseks on 1.5-ga tähistatud tempestiit, kuna tegu on mitmeosalise läätsuga. Kõigepealt on massiivne teraline kiht, mille paksus on 6 cm. See omakorda jaguneb kaheks, millest 4 cm on massiivset teralist lubjakivi ja 2 cm peeneteralist lubjakivi. Teine osa mitmekihilisest tempestiidist on 3 cm paks ning koosneb teralisest lubjakivist. Seega on tegu kahetsüklilise tempestiidiga, mille all asub püriitne ussitanud katkestuspind. Käsipalad tempestiitide koostise lähemaks uurimiseks sai võetud 1.3-st (T1), 1.6-st (T2) ja 1.7-st (T3).

**Tabel 1.** Kalana karjääri lõuna seinas kompleksis I asuvate tempestiitide parameetrid.

| Jrk nr | Kõrgus 0-punktist (m) | Paksus (cm) | Pikkus karjääri seinas (cm) | Kirjeldus   | Käsi-pala |
|--------|-----------------------|-------------|-----------------------------|---|-----------|
| 1.1    | -1,2                  | 4           | 50                          | Teraline lubjakivi  | -         |
| 1.2    | -1,1                  | 10          | 120+                        | Teraline lubjakivi  | -         |
| 1.3    | 0,8                   | 5           | 45                          | Bioklastne teraline lubjakivi   | T1        |
| 1.4    | 1,7                   | 3-5         | 200                         | Tervete karbipoolmetega lubjakivi   | -         |
| 1.5    | 2,3                   | 6+3         | 330                         | Mitmeosaline tempestiit. Alumine osa 4 cm massiivne teraline lubjakivi ja 2 cm peeneteraline lubjakivi. Pealmine osa 3 cm teralist lubjakivi. Kahetsükliline. All püriitne katkestuspind. Terakiht praktiliselt kohe katkestuspinna peal. | -         |
| 1.6    | 2,6                   | 5           | 100                         | Bioklastne lubjakivi  | T2        |
| 1.7    | 2,6                   | 10          | 100                         | Bioklastne lubjakivi (eelmisest 1 m lääne pool)   | T3        |
| 1.8    | 2,8                   | 7           | 150                         | Tervete karbipoolmetega lubjakivi (eelmisest 0,2 m lääne pool)  | -         |
| 1.9    | 3                     | 12          | 200+                        | Litoklastiline lubjakivi  | -         |

Kanalitäidetes paiknevad tempestiidid meie jaotuse järgi II kompleksi kuuluvas afaniitses lubjakivis (Joonis 4). Kanal nr 1 näitel (Tabel 2) võib öelda, et valdavalt on tornikihid umbes 10 cm paksused ja karjääriseinas kuni 100 cm pikkused. Leidub muidugi ka erandlikke tempestiite, mis on paksemad ja pikemad. Rohkem esines tempestiite kanali kagunõlvale lähemal (Joonis 4), vaid üks lääts asus loodeservas (2.7). Nullpunktiks, mille suhtes nende paiknemist sai võrreldud, oli III ja IV kihi piir. Nullpunktist asetsevad tempestiidid selles kanalis -0,5...-1,5 meetri kaugusel. Koostiselt on tegu karbikuhjeliste lubjakividega (2.1, 2.3) ja bretšalistest afaniitsetest litoklastidest moodustunud lubjakividega (2.2; 2.4; 2.5; 2.6; 2.7).

**Tabel 2.** Kanali nr 1 sees olevate tempestiitide parameetrid.

| Jrk nr | Kõrgus 0-punktist (m) | Paksus (cm) | Pikkus karjääri seinas (cm) | Kirjeldus   | Käsi-pala |
|--------|-----------------------|-------------|-----------------------------|---|-----------|
| 2.1    | -1,3...-1,5           | 20          | 80-100                      | Teraline karbipoolmetega lubjakivi  | 2T1       |
| 2.2    | -1,3                  | 4           | 30                          | Bretšaline lääts, mis koosneb afaniitsetest litoklastidest.                     | 2T2       |
| 2.3    | -1,05                 | 7           | 100                         | Teraline karbipoolmetega lubjakivi  | -         |
| 2.4    | -0,95                 | 3-5         | 70                          | Litoklastidega lubjakivi  | -         |
| 2.5    | -0,8...-0,9           | kuni 10     | 110                         | Litoklastidega lubjakivi  | -         |
| 2.6    | -0,7                  | 3/3         | 50/70                       | Litoklastidega lubjakivi. Kahes osas. Lääts kaob ära ja 1 m pärast läheb edasi. | -         |
| 2.7    | -0,5                  | 7-8         | 110                         | Litoklastidega lubjakivi.   | 2T7       |

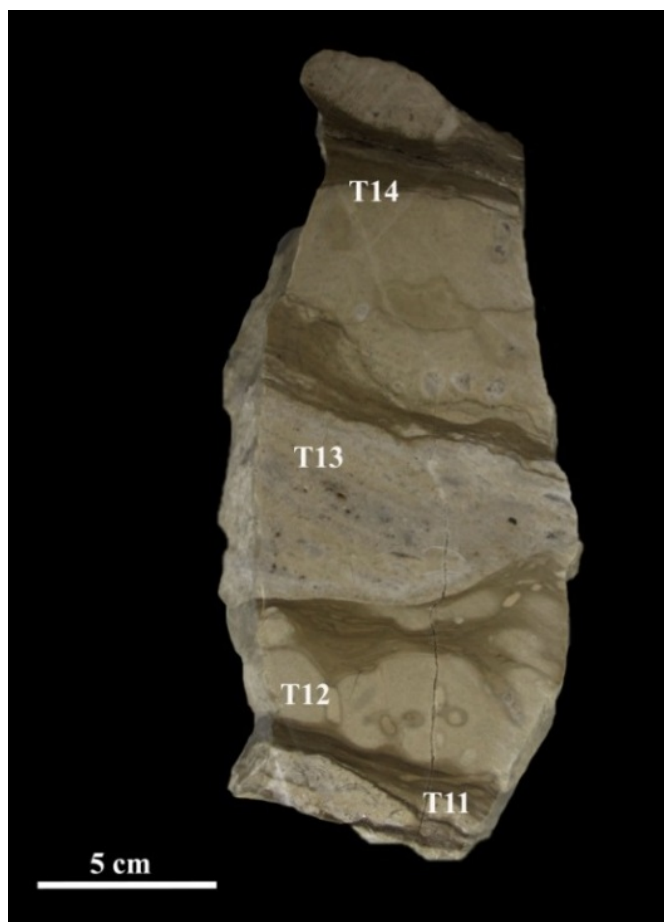
Omapäraseks on numbriga 2.6 tähistatud lääts, mis on kaheosaline. Litoklastidest lääts asub nullpunktist 0,7 m madalamal, on 3 cm paks ja 50 cm pikk. Seejärel ta kaob ning ilmub 1 meetri pärast uuesti, olles 3 cm paks ja 70 cm pikk. Teiseks tõuseb ülejäänutega võrreldes esile 2.7-ga tähistatud litoklastidega tempestiit, mis asub nullpunktist 0,5 m allpool, on 7-8 cm paks ja 110 cm pikk. See lääts kuulub erinevalt ülejäänud kanalis olevatest tempestiitidest juba kolmandasse, savikate vahekihtidega afaniitse lubjakivi kihti. Läätsede koostise lähemaks uurimiseks sai võetud käsipalad tempestiitidest, mis on joonisel 4 märgitud numbritega 2.1 (2T1), 2.2 (2T2) ja 2.7 (2T7).

Ülejäänud kolm leitud kanalit ei sisaldanud nii palju tempestiite kui kanal nr 1. Kanalis nr 2 esines ainult üks lääts, mis asus nullpunktist 1,5 m madalamal. Paksuseks sai mõõdetud 13 cm ja pikkuseks 70 cm. Koostiselt oli tegu afaniitsetest litoklastidest moodustunud tempestiidiga. Kanalist nr 3 ei leitud ühtegi läätsed ning kanalist nr 4 võis leida ühe litoklastidest moodustunud tormikihi. Nullpunktist, milleks oli III ja IV kompleksi piir, asus see lääts 1,6 m madalamal. Mõõtmetelt oli tegu 10 cm paksuse ja 100-120 cm pikkuse tempestiidiga.

## 4.4 Tempestiitide makrolitoloogiline kirjeldus

### Tempestiit 1.3

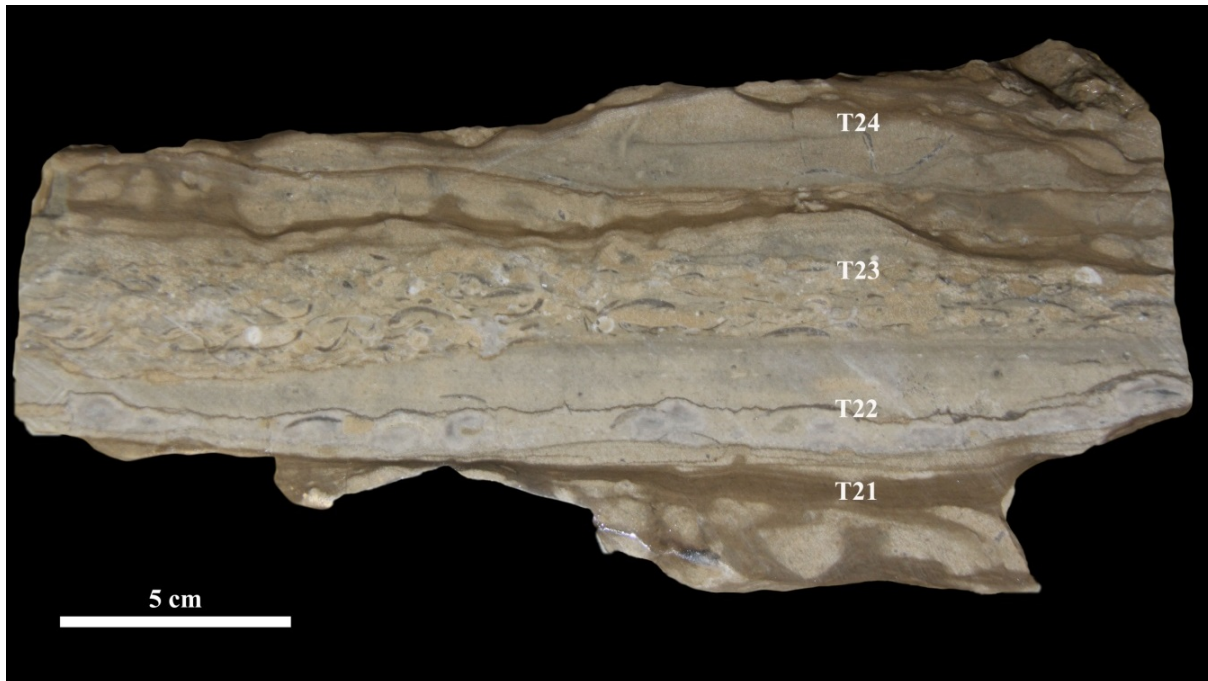
Käsipala makroskoopilist pilti vaadates võib märgata mitmekihilisust. Vahelduvad heledamat ja tumedamat värvi kihid. Heledama värvi moodustavad õrnalt märgatava kihilisusega peeneteraline kollakas-hall mikriitne lubjakivi või siis veidike jämedateralisem hele-hall bioklastne teraline lubjakivi. Tumedamat pruunikat tooni annab lubjakivile suurem savi sisaldus. Tekstuurilt on tegu peamiselt lainelis-kihilisusega. Lõunaseinast pärit tempestiit 1.3 (Fotol 1. märgitud T13-ga) esineb selles käsipalas kuni 5 cm paksuse bioklastse teralise lubjakivi läätsena mikriitse lubjakivi sees. Üldpildis tulevad hästi esile tempestiidi läätse ja ümbriskivimi piirid, seega on üleminek ühelt kihilt teisele üpriski järsk.



**Foto 1.** Bioklastne teralise lubjakivi lääts 1.3 savika mikriitse lubjakivi sees karjääri lõunaseinas (pala T1).

## Tempestit 1.6

Lõunaseinast pärit käsipalas vahelduvad omavahel savikamad ja vähem savikad kihid. Kivimiliselt koosneb antud pala mikriitse lubjakivi, teralis-mudalise lubjakivi, mudalis-teralise lubjakivi, bioklastse lubjakivi kihtidest. Tekstuurilt on tegu lainelis-kihilisusega. On näha teatavat gradatsioonilisust ning hästi tulevad esile erinevate kihtide piirid. Tempestit 1.6 (Fotol 2. märgitud T22 ja T23-ga) on sarnaselt tempestit 1.3-le ligikaudu 5 cm paks ja ümbritsetud mikriitse lubjakiviga. Erinevalt 1.3-st on 1.6 puhul tegu komplekse tempestitidiga, mille alumine osa koosneb teralis-mudalisest lubjakivist ja ülemine osa tervete karbipoolmetega bioklastsest lubjakivist. Värvuselt on selle tempestiti vahekihid kollakas-hallid või hele-hallid.



**Foto 2.** Kahekihiline bioklastsest lubjakivist tempestit 1.6 Kalana karjääri lõunaseinast savika mikriitse ümbriskivimiga (pala T2).

### Tempestit 1.7

Valdavalt koosneb lõunaseinast pärit tempestit 1.7 kokku kuhjatud bioklastidest ja karbikaantest, seega on 6-7 cm paksuse läätse puhul tegu kollakas-halli bioklastse lubjakiviga. All ja üleval on sarnaselt eelmistele käsipaladele pruunikas-hall mikriitne lubjakivi, mis moodustab tempestiidi läätse ümbriskivimi. Mikriitne lubjakivi on tekstuurilt lainelis-kihiline. Hästi tuleb esile mikriitse-lubjakivi ja bioklastse lubjakivi vaheline piir.



**Foto 3.** Bioklastidest ja karbikaantest koosnev tempestit 1.7 savika mikriitse ümbriskivimi vahel karjääri lõunaseinas (pala T3).

## Tempestit 2.1

Sarnaselt 1.7-le koosneb ka kanalitäitest pärit tempestit 2.1 (Foto 4) kokkukuhjatud tervetest või vähelagunenud skeleti osakestest. Organismidest võib ära tunda gastropoodid, brahhiopoodid ja ostrakoodid. Põhiosa 7-8 cm paksusest tempestitidist moodustab seega erinevate halli värvi varjunditega bioklastne lubjakivi. Tekstuurilt massiivne, milles võib eristada teatavat õhukesekihilisust, kus vahelduvad savikamad ja vähem savikad vahekihid.



**Foto 4.** Bioklastne tempestit 2.1 karjääri kanalitäitest (pala 2T1).

## Tempestit 2.2

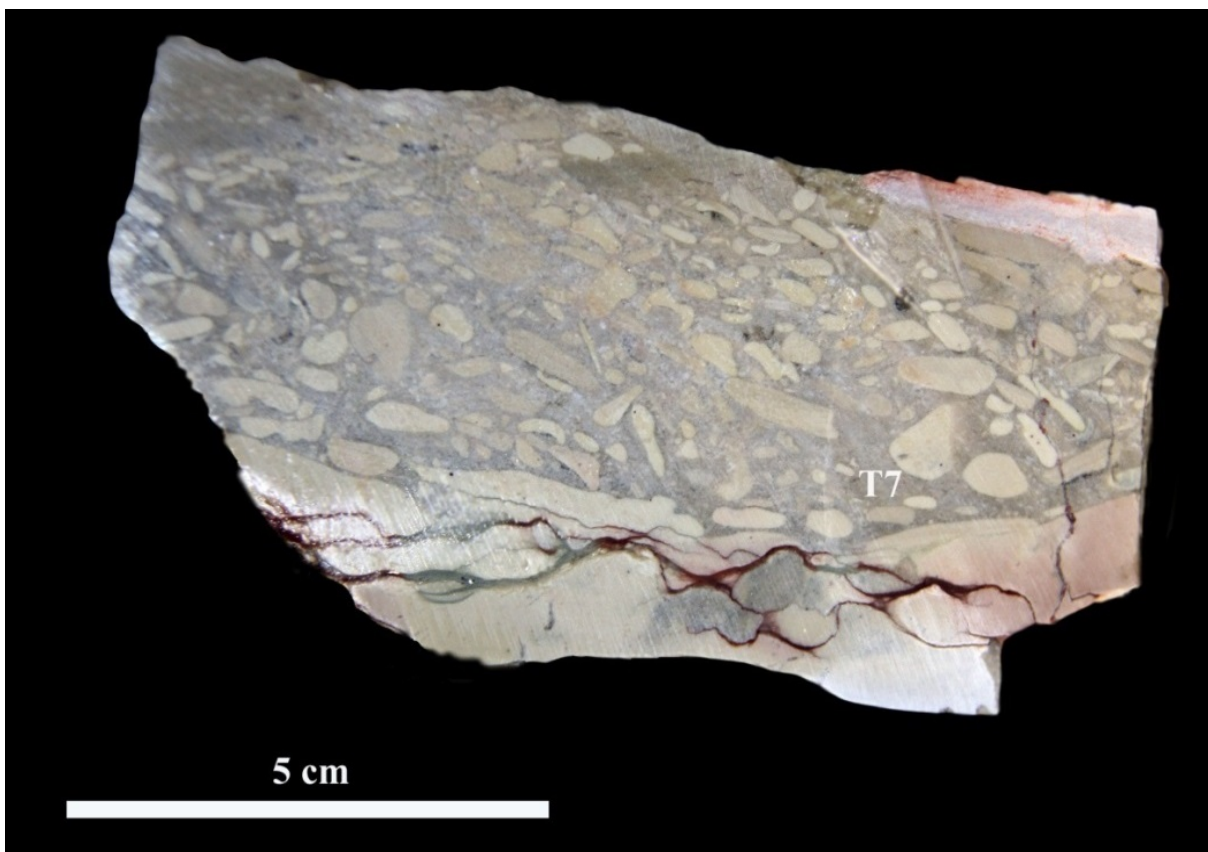
Makroskoopiliselt on Foto 5 kujutatud tempestiidi 2.2 puhul tegu bretšalise lubjakiviga, kus esinevad erineva ümardatuse astmega afaniitsed litoklastid ning tsementeeruvaks materjaliks on savikas lubjakivi. Klastid pärinevad suure tõenäosusega alumisest heleda värvusega mikriitsest lubjakivi kihist. Esineb ka erineva suuruse ja ümardatuse astmega detriitset materjali. Kanalitäitest pärit tempestit on 3-4 cm paksune. Tekstuurilt on tegu küllaltki massiivse lubjakiviga, milles võib eristada teataval määral lainelis-kihilisust. On näha gradatsioonilisust ning tuleb hästi esile alumise heleda(valkja) mikrokristallilise mikriitse-lubjakivi ja seda katva tempestiidi vaheline piir.



**Foto 5.** Bretšalisest lubjakivist koosnev tempestit 2.2, kus esinevad erineva ümardatuse astmega afaniitsed litoklastid ja detriitne materjal (käsipala 2T2 Kalana karjääri kanalitäitest).

## Tempestit 2.7

Kanalitäitest pärit käsipala alumise osa moodustab beežikas-halli värvusega mikrokristalliline mikriitne lubjakivi, mille peal lasub rohkete klastidega bretšaline lubjakivi. Nende kahe kihi vaheline piir on järsk. Tempestit 2.7 on umbes 5 cm paksune ja sarnaneb 2.2-ga selles suhtes, et põhiosa moodustab bretšaline lubjakivi, mis koosneb erineva ümardatuse astmega klastidest ja savikast lubjakivi põhimassist. Litoklastide erineva värvuse ja ümardatuse astme järgi võib oletada, et nad ei ole kõik samast materjalist, millest alumine mikriitne kiht. Ümardunud klastide kõrval esineb ka erineva suuruse ja ümardatuse astmega detriitset materjali. Mõningal määral võib täheldada gradatsioonilisust, kuna alumises osas on klastid suuremad ja ülemises osas muutuvad aina väiksemateks. Tekstuurilt on tegu massiivse lubjakiviga.



**Foto 6.** Litoklastidest tempestit 2.7 karjääri kanalitäitest (käsipala 2T7).

## 4.5 Tempestiitide mikrolitoloogiline kirjeldus

Veelgi täpsema ülevaate saamiseks tempestiitide erinevate kihtide koostisest, tasub lähemalt uurida ka nende mikrolitoloogilist pilti.

### Tempestit 1.3

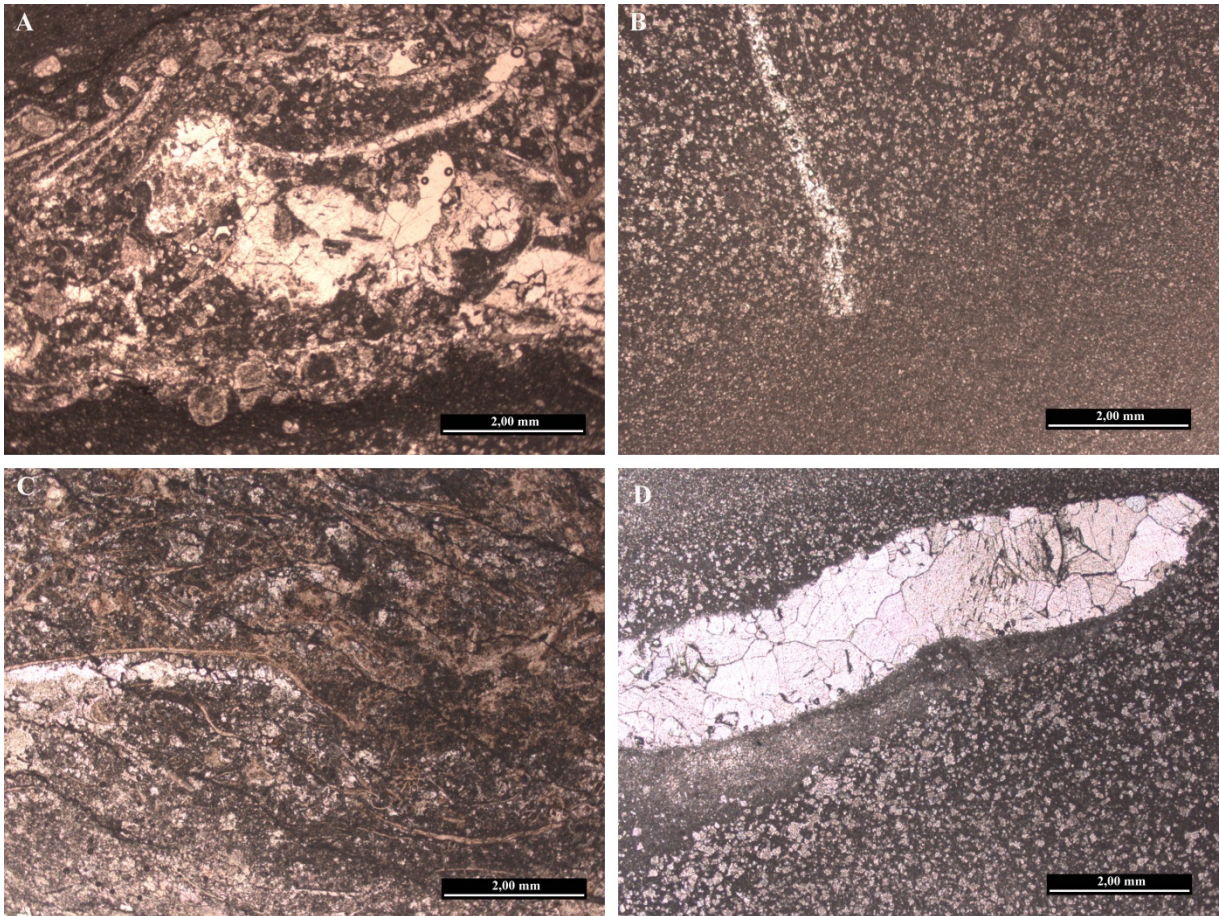
Kalana karjääri lõunaseinast pärit käsipalast (T1) sai tehtud 4 õhikut, millest T13 on tempestiitidist ja T11, T12, T14 on ümbriskivimist.

Õhik T11 (Foto 7 A) on mitmekihiline. Õhikus alt-üles liikudes on esiteks näha savikat kihti, millele järgneb kaltsiitsest mudast ja dolomiidi kristallidest moodustunud kiht. Dolomiidistunud lubjakivi vahekiht on kohati serpentiinistunud. Seejärel esineb detriit-muda lubjakivi, milles dolomiidi kristalle ja ohtralt ümberkristalliseerunud organismide jäänuseid. Organismidest esinevad seal korallid, ostrakoodid, trilobiidid ja sammalloomad. Kõige lõpuks on savikas kiht, mis koosneb peamiselt kaltsiidi purust. Kohati on näha raua oksüdeerumise jälgi. Üldiselt on T11 õhiku puhul tegu mikriitse lubjakiviga.

Õhik T12 (Foto 7 B) koosneb põhiosas väga peeneteralisest mikriitsest lubjakivist, milles hulganisti dolomiidi kristalle. Alumine osa on pisut savikam kui õhiku ülemine osa. Näha on ka paari kaltsiidistunud soont. Alt üles poole liikudes muutub terasuurus jämedamaks.

Õhikus T13 (Foto 7 C) ei ole üksikud terad hästi eristatavad. Seda õhikut klassifitseerides võib öelda, et tegu on bioklastse teralise lubjakiviga, kuna mudaline osa peaaegu puudub ning põhiosa moodustavad üksteisega kokkupuutuvad ümberkristalliseerunud organismide jäänused. Organismidest leidub brahhiopoodid, ostrakoode ja koralle. Kohati on näha serpentiinistumist.

Õhikus T14 moodustab põhiosa kaltsiitne muda, kus sees dolomiidi kristalle. Dolomiit on antud proovis (Foto 7 D) jaotunud ebahühtlaselt. Alt üles poole liikudes muutub terasuurus väiksemaks, seega on näha teatavat gradatsioonilisust. Õhiku ülemise osa moodustab põhiliselt kaltsiitne muda, mille sees suur kaltsiidistunud tasku. Suure tõenäosusega on tegu ümberkristalliseerunud molluskiga. Esineb ka mõningast raua oksüdeerumist. Organismidest esinevad alumistes kihtides üksikud brahhiopoodid. Klassifikatsiooni järgi on tegu mikriitse lubjakiviga, milles üksikud organismide jäänused.



**Foto 7.** Tempestit 1.3 mikroskoopiline pilt. **A)** detriitne tasku mikriitses lubjakivis, ümbriskivim (õhik T11), **B)** dolomiidi kristallide rohke mikriitne lubjakivi ümbriskivimis (õhik T12), **C)** bioklastne lubjakivi tempestiidis (õhik T13), **D)** kaltsiidistunud tsoon mikriitses lubjakivis, ümbriskivim (õhik T14). 10x suurendus. Ilma analüsaatorita. Mõõtkava 2 mm.

### Tempestit 1.6

Käsiipalast (T2) sai tehtud samuti 4 õhikut, millest T22, T23 on kahekihilisest kompleksest tempestiidist ja T21, T24 on ümbriskivimist. Pala pärineb samuti karjääri lõunaseinast.

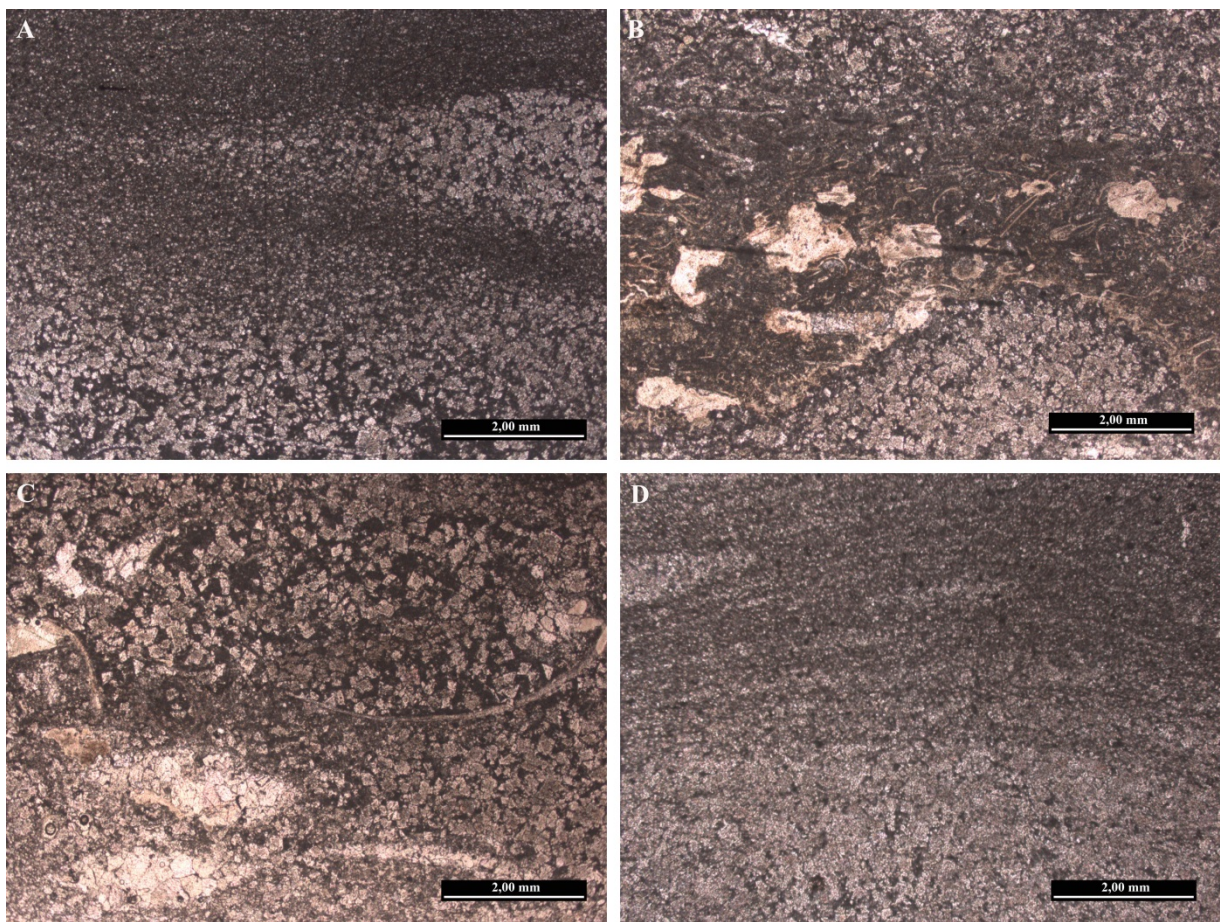
Õhikus T21 (Foto 8 A) vahelduvad omavahel kaltsiitse põhimassi ja suurte dolomiidi kristallidega kiht ning peeneteralisem savikas kiht. Üldjoontes on tegu mikriitse lubjakiviga.

Õhik T22 (Foto 8 B) on samuti mitmekihiline. Valdava osa moodustab peeneteraline kaltsiitne muda, milles üksikud suuremad dolomiidi kristallid. Alumises osas esineb bioklastne vahekiht, mis koosneb molluskite, korallide ja ostrakoodide fragmentidest ning on kohati

serpentiinistunud. Bioklastsest materjalist koosneva vahekihi ümber on näha ümbritsevast veidike suuremaid dolomiidi kristalle. Üldiselt on tegu detriiti sisaldava mikriitse lubjakiviga.

Õhik T23 puhul on tegu bioklastse lubjakiviga (Foto 8 C), mis koosneb põhiliselt kaltsiitsetest mudast, milles suured dolomiidi kristallid ning organismide jäänused. Fossiilseks materjaliks on ümarad brahhiopoodide poolmed. Leidub ka savikaid vahekihte.

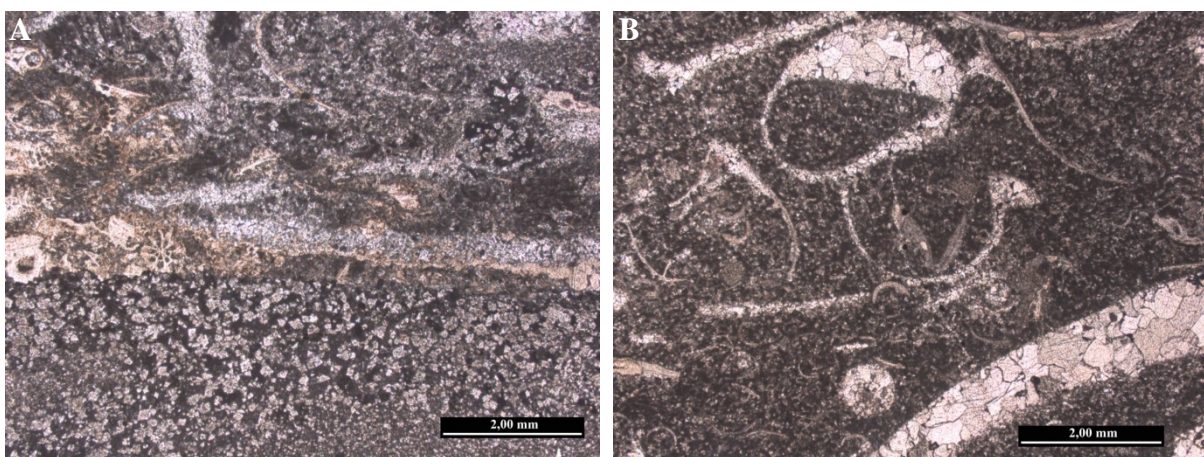
Õhik T24 alumine osa koosneb sarnaselt T21-le mikriitsetest lubjakivist, kus on kaltsiitset muda ja dolomiidi kristalle (Foto 8 D). Samuti esinevad üksikud kaltsiidi sooned. Ülemine osa on savikam. Esineb gradatsioonilisus.



**Foto 8.** Tempestiti 1.6 mikroskoopiline pilt. **A)** suurte dolomiidi kristallidega mikriitne lubjakivi ümbriskivimist (õhik T21), **B)** detriitset materjali sisaldav mikriitne lubjakivi tempestiidi kihist (õhik T22), **C)** brahhiopoodide sisaldav bioklastne lubjakivi tempestiidist (õhik T23), **D)** mikriitsetest lubjakivist ümbriskivim (õhik T24). Ilma analüsaatorita. 10x suurendus. Mõõtkava 2 mm.

## Tempestit 1.7

Mikroskoopiliselt on õhiku T3 (Foto 9 A) alumises osas näha, et lõunaseinast pärit tempestit 1.7 ümbriskivim koosneb kaltsiitsest mudast, milles hulganisti dolomiidi romboeedreid. Õhiku ülemise osa ehk tempestiidi osa moodustab seevastu detriit-mudaline lubjakivi. Organismidest esinevad detriidis ostrakoodide, molluskite ja korallide jäänused. Kohati on näha serpentiinistumist ja üksikuid dolomiidi kristalle. Makroskoopiliselt võib näha, et detriit-mudaline lubjakivi läheb mingi hetk üle pigem bioklastseks lubjakiviks, kus leidub terveid karbipoolmeid.



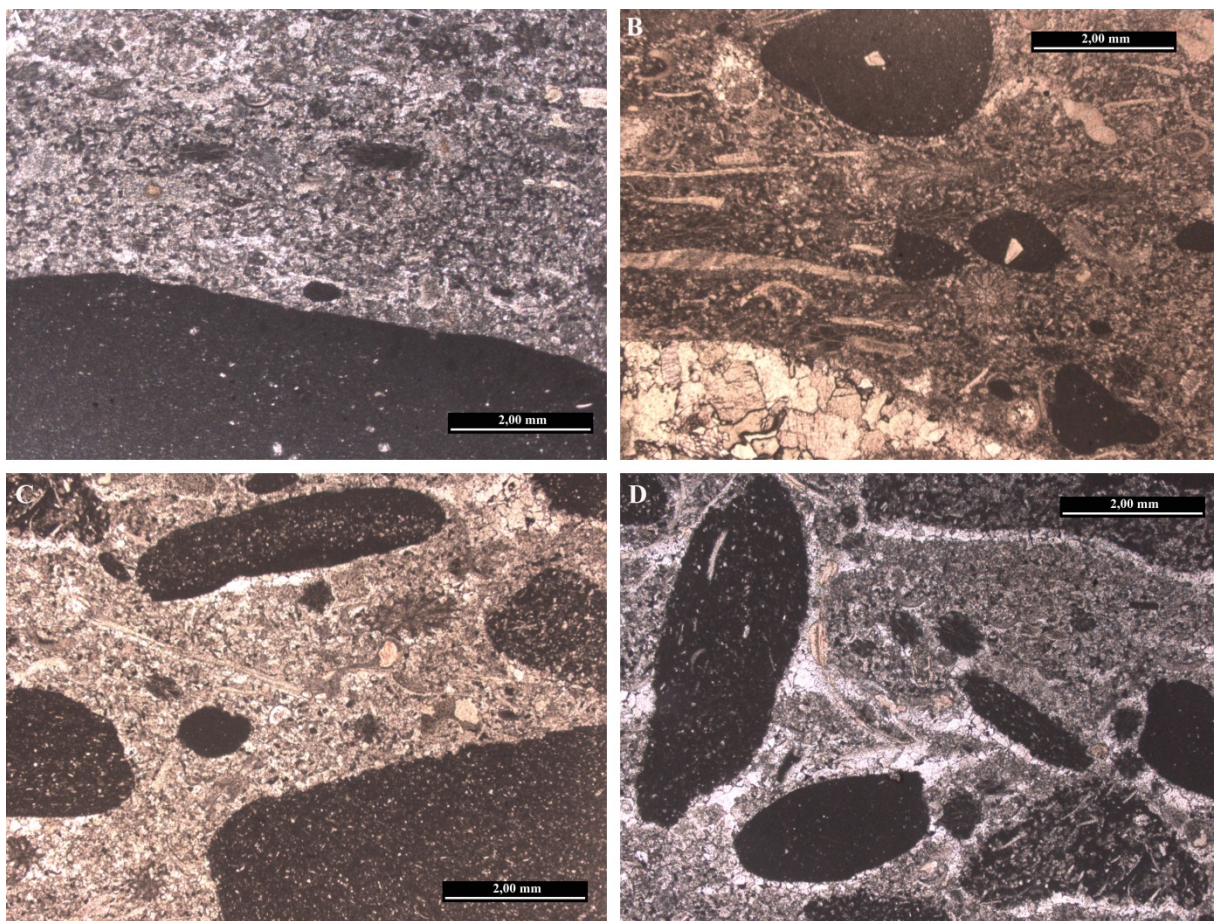
**Foto 9. A)** Bioklastne tempestit 1.7 kaltsiitsest mudast moodustunud lubjakivi vahel, karjääri lõunaseinast (õhikT3), **B)** Mudalis-teraline tempestit 2.1 kanalitäitest (õhik 2T1). 10 kordne suurendus. Mõõtkava 2mm.

## Tempestit 2.1

Üldiselt on kanalitäitest pärit tempestiidi 2.1 õhiku 2T1 puhul tegu mudalis-teralise lubjakiviga (Foto 9 B), kus leidub sammalloomade, brahhiopoodide, gastropoodide, ostrakoodide, krinoidide ja korallide jäänuseid. Kivimis esineb ka keskmise- ja suurekristalliline diageenne kaltsiitne tsement, mis täidab tühimikke tervetes karpides või terade vahelisel alal. Samuti võib märgata niiniimetatud geopataalseid struktuure, milledes esineva täite alusel saab määrata kihi lamavat ja lasuvat pinda. Lamava karbi poolme alla tekkinud tühik on täitunud kaltsiidiga ning on tekkinud nn. “vihmavarju struktuur”. Kohati on näha serpentiinistumist. Kui võrrelda õhiku alumist ja ülemist osa, siis alumine on tunduvalt savikam kui ülemine.

## Tempestiit 2.2

Õhik 2T2 (Foto 11 A ja B) koosneb valdavalt bretšalisest lubjakivist. Kanalitäitest pärit tempestiidi 2.2 all olevas ümbriskivimis võib näha mikrokristalliinset mikriitset lubjakivi. Tempestiidi põhiosa moodustab kaltsiitne muda, mille sees leidub ohtralt erineva suuruse ja ümardatuse astmega detriitset materjali ja alumise kivimi küljest lahti rebitud klaste. Klastide arv ja detriitse materjali hulk muutub õhiku ülemises osas suuremaks. Organismidest esineb bretšalises lubjakivimis koralle, ostrakoode, brahhiopode, sammalloomi ja molluskeid. Kohati on näha serpentiinistumist. Võib märgata ka nn. psamiiti ehk lubiliiva, kus muda on kristalliseerunud tombukesteks ning transpordi käigus edasi kantud. Rohkem leidub neid alumise kihi läheduses ja vähem sellest kihist järjest eemaldudes.



**Foto 11.** Tempestiidi 2.2 mikroskoopiline pilt: **A)** mikriitne lubjakivi, mille peal näha psamiiti (õhiku 2T2 alumine osa), **B)** bretšaline afaniitsete litoklastide ja detriitse materjaliga tempestiit (õhiku 2T2 ülemine osa). Tempestiidi 2.7 mikroskoopiline pilt: **C)** alt ja **D)** ülevalt, kus on näha väga erineva koostisega litoklaste. Ilma analüsaatorita. 10x suurendus. Mõõtkava 2mm.

## Tempestiit 2.7

Õhiku 2T7 (Foto 11 C ja D) puhul on tegu jällegi kanalitäitest pärit bretšalise lubjakiviga, kus leidub koralle, ostrakoode, molluskeid, sammalloomi ja brahhiopode. Kohati on näha serpentiinistumist. Suure osa tempestiidist moodustavad mitmesuguse ümardatuse astmega klastid, millest osad tunduvad pärinevat alumisest mikrokristallisest mikriitsest lubjakivist, mis sisaldab üksikuid organismide sekeletifragmente. Osad klastid on pärit kusagilt mujalt, milles kas puudub absoluutselt fossiilne materjal või koosnevad veidike suurema teralisest mikriitsest lubjakivist. Samuti leidub klaste, mis on eelmainitute veelgi suuremate teradega ja sisaldavad ohtramalt fossiilset materjali. Viimaseid on võrreldes ülejäänud klastidega palju vähem. Ümardatuse aste klastidel väheneb enam-vähem koos neis sisalduva fossiilse materjali hulga kasvuga. Fossiilidest on võimalik klastide sees ära tunda vaid ostrakoode. Ülejäänud on suhteliselt äratundmatu puru. Huvitav on see, et klastide äärtes on kasvama hakanud kaltsiidi kristallid.

Kui võrrelda omavahel tempestiite ja ümbriskivimit, siis võib välja tuua, et ümbriskivim on savikam ja koosneb peeneteralisest või mikrokristallisest mikriitsest lubjakivist. Ümbriskivimi sees puuduvad tavaliselt litoklastid ja detriitne materjal. Tempestiitides on seevastu hulganisti detriitset materjali või isegi terveid karbipoolmeid. Tormide käigus ümberasetatud kihid sisaldavad seega palju jämedamat materjali kui neid ümbritsevad kihid. Sellest tulenevalt on ka piir ümbriskivimi ja tempestiidi vahel üpriski järsk, kuna on toimunud äkiline terasuuruse muutus. Sarnasuseks võib tuua selle, et nii tempestiidis kui ka ümbriskivimis esineb teataval määral gradatsioonilisust. Tempestiidi koostist omavahel võrreldes tuleb esile, et Kalana karjääri lõunaseinast leitud tempestiidid, mis asusid I kompleksi dolomiitses lubjakivimis, koosnevad teralisest lubjakivist või bioklastsest lubjakivist. Kanalitäidetest pärit tempestiidid seevastu koosnevad pigem litoklaste sisaldavast bretšalisest lubjakivist.

## Arutelu

Võttes arvesse eelnevaid uurimisandmeid, võib järeldada, et Siluris on Kalana karjääri ala asunud epikontinentaalse mere madalas rannalähedases vööndis. Üldjoontes madalduvas Paleobalti basseinis toimus suure hulga lubiainese settimine, mis vaheldus aeg-ajalt veetaseme tõusuga ning savikama materjali sissekandumisega. Karjääri seinas paljanduvate kihtide järgi saab Raikküla ea rannameres seega eristada 4 erinevat settimitsükli.

Kõigepealt settisid madalmerelistes tingimustes välja lubisetted, mis kohati olid tormide mõjusfääris. Hiljuti leitud Kalana tallofüütsete vetikate Lagerstätte (Tinn et al. 2009) viitab sellele, et Kalanas esinesid arvukad rannavallid, mille taha vetikaid kuhjati ning hiljem kaitsti otsese lainetustegevuse eest. Kui vaadelda tormide käigus settinud tempestitihihte, siis on näha, et läbilõike ülemises osas esinevad need tihedamalt kui alumises osas, mis omakorda on viinud kihtide kokkusulandumiseni. Koostiselt muutuvad tormikihid läbilõike ülemises osas jämedateralisemaks, sisaldades alumiste teraliste lubjakivide asemel terveid karbipoolmeid ja litoklaste, mis on iseloomulik proksimaalsetele tempestitidele. Võttes arvesse tempestitide parameetreid Kalana karjääri lõunaseina I kompleksis, siis tõenäoliselt on toimunud basseini madaldumine. Kuna esimene kompleks koosneb dolomiidistunud lubjakivist ning talle järgnevas kompleksis dolomiidid puuduvad, siis võib oletada, et vahetult enne lubisette täielikku litifitseerumist toimus varajane dolomiidistumine (Teedumäe et al. 2003).

Peale esimese kompleksi tekkimist esines suure tõenäosusega veetaseme suur langus ja maismaastumine. Dolomiitsesse lubjakivisse on sisselõikunud mitmed kanalid, millest osade kirde-edela suunalist orientatsiooni on võimalik nõlvade lõikumise järgi vaadelda. Karbonaatse täitega kanalite tekke põhjustena võib kirjanduse põhjal välja tuua kolm hüpoteesi (Rankey, 2003; Skompski et al. 2008). Esiteks sügavaveelised suurenenud sette juurdevoolu tõttu (näiteks turbitiidivoolud) tekkinud erodeeritud basaalse osaga kanalid. See tähendab seda, et materjal, mis oleks pidanud turbitiidivooluna alla voolama, peaks leiduma ka lähiümbruses. Samuti peaks antud alal esinema piisav nõlvakalle, et saaks tekkida suurtel kiirustel liikuvad voolud, mis uuristaks vanematesse kivimitesse kanali. Teiseks hüpoteesiks oleks tõusu ja mõõna poolt tekitatud kanalid, mille tõestuseks peaks kanalitäites leiduma

madalamerelisi, laguunseid või rannikusetteid. Lisaks peaks esinema laineliskihilisust, läätsekujulist lasumust, kuivalõhesid ning viide kahesuunalisest vee voolamisest. Kolmandaks hüpoteesiks oleks suhtelise meretaseme languse tõttu setetesse sisse lõikunud kanalid, mis on tekkinud kas siis järsust meretaseme alanemisest ning maismaastumisest või lainetusbaasi madaldumisest ilma maismaastumiseta. Maismaastumine soodustab eolsete liivade levikut ja seega peaks leiduma ka jälgi eolsest transpordist. Samuti peaks kanalite vahelisel alal leiduma jälgi karstistumisest. Kõigist kolmest hüpoteesist tundub Kalana kohta kõige paremini sobivat kolmas hüpotees, kuna kanalites ei ole jälgi loodete tegevusest ja rannalähedasel alal puudus suurenenud veega piisav nõlvakalle, et saaks tekkida suurenenud sette juurdevoolu tõttu tekkinud kanalid.

Pärast Paleobalti mere madaldumist algas uuesti sügavnemise periood, mil veetase hakkas tasapisi tõusma. Rahuliku lainetuse vööndis asuvad kanalid täitusid peeneteralise lubisetega, millesse vaid aeg-ajalt paisati tugevate tormivooludega jämedamat materjali. Seega pidid kanalisuud olema juba veetaseme tõusu ajal mingi barjääriga kaitstud (Brown et al. 1990). Rannalähedusest annavad tunnistust ka kanali täites sisalduvad tempestiidid, mis koosnevad küllaltki jämedateralisest lito- ja bioklastsest materjalist. Erinevad tormid tõid kanalitesse erisugust materjali. Nii võib oletada, et vaiksimate tormide käigus on settinud tervete karbipoolmetega tempestiidikihid ning tugevamate tormide käigus settisid tormikihid, kus on näha hulganisti kaugematelt aladelt pärit litoklastset ja detriitset materjali.

Kanaleid on Eesti Paleosoikumi karbonaatses läbilõikes leitud ka mujalt. H. Perens (1995) kirjeldab setetega täitunud kanaleid Porkuni lademes, Ordoviitsiumi-Siluri piirikihtides, kuid nende orientatsioon ei ole teada, kuna tegu on puuraukudest avastatud kanalitega (Perens, 1995). Erinevalt Kalana kanalitest on nimetatud Jõgeva ja Ruskavere puuraugust avastatud voolusängid täidetud terrigeense kvartslüiva rikka karbonaatse kivimiga, mis on küllaltki fossiilidevaene. Porkuni lademe kanalite tekkepõhjuseks on peetud Hirnantia mandrijäätmise aegset glatsioisostaatilist mereveetaseme langust (Perens, 1995).

Kolmas afaniitse ilmega lubjakivi on moodustunud juba veelgi kõrgema veetaseme ajal, mil ujutati üle nii I kompleksi kivimid, kui ka nendesse lõikunud kanalite täited. Settisid lubisetted. Tempestiidid puuduvad, mille põhjuseks võis olla barjääri puudumine, mis kaitseks settinud tormikihte hilisema lainetustegevuse eest.

Üleujutuse lõppedes hakkas meretase uuesti langema ning uue settetsükliina settisid välja kogu eelnevat settekompleksi katvad peeneteralised madaliku tekkelised lubiliivad. Sel ajal oli Kalana karjääri ala taas rannaala, kus lainetustegevuse tagajärjel on moodustunud põimjaskihilised tekstuudid. Kõige lõpuks toimus uus transgressioon, mil settisid setted, mis moodustavad juba Raikküla lademe Imavere kihid.

## Kokkuvõte

Raikküla kihid saab Kalana karjääris jagada neljaks kompleksiks. Kõige alumise kompleksi moodustab dolomiidistunud teralis-mudaline lubjakivi, millest leidsime neli kausitaolist lubjakivi vööndit. Uurides nende vööndite litoloogiat ja morfoloogiat jõudsime järeldusele, et tegu võib olla mattunud kanalitega, mis on täitunud teise kompleksi kuuluva savika afaniitse lubjakiviga. Vaadeldes karjäärist leitud kanalite nõlvade lõikumist, võib öelda, et nad on orienteeritud kirde-edela suunaliselt. Morfoloogialt on tegu üsna laugete kanalitega, mille lateraalne ulatus on 3-13 m. Kanaleid ja dolomiidistunud lubjakivi katab kolmandasse kompleksi kuuluv savikate vahekihtidega afaniitse ilmega lubjakivi. Kõiki eelnevaid kihte katva neljanda kompleksi moodustab hele peeneteraline lubjakivi, mis on kohati põimjaskihiline.

Raikküla ea rannasetetest võib leida tempestiite, mis paiknevad kas dolomiitses lubjakivis (I kompleks) või siis kanaleid täitvas afaniitses lubjakivis (II kompleks). Mõõtmelt on tegu 3-12 cm (keskmiselt alla 10 cm) paksuste ning 45-330 cm (keskmiselt 100 cm) pikkuste tempestitidega. Tormikihid koosnevad teralisest lubjakivist, karbikuhjelistest bioklastsest lubjakivist või litoklaste sisaldavast lubjakivist.

Kalana Raikküla ea rannamere settekeskkonda võib seega iseloomustada kui ohtrate rannavallidega ala, kus rahuliku lainetuse vööndis settis lubisete, millesse aeg-ajalt paisati tugevate tormivooludega jämedamat materjali. Arvatavasti rannavallide taha kuhjatud vetikate hea säilimine on samuti põhjustatud tänu lühiajalistele episoodilistele suure energialistele tormivooludele, mis matsid vetikad kiiresti setete alla ja kaitsesid neid edaspidise kahjustuse eest. Tempestitide esinemise ja iseloomu järgi võib oletada, et nende settimise ajal on Kesk-Eestis Raikküla eal toimunud Paleobalti mere madaldumine. Seda tõendab ka see, et tormisetete kihid on läbilõike ülemises osas tihedamalt kui alumises osas ning esineb kihtide kokkusulandumist. Koostiselt muutuvad tempestitidid läbilõike ülemises osas jämedateralisemaks, mis on iseloomulik proksimaalsetele tempestitidele ning viitab samuti regresseeruvale basseini.

## **Tänuavaldused**

Tahaksin tänada oma juhendajat Leho Ainsaart, kellega oli väga põnev välitöödel käia ning kelle abita ei oleks see töö valmis saanud. Samuti tänaksin Lauri Joosut, kes abistas mind õhikute tegemisel ning Sander Olot, kes õpetas mind Illustratorit kasutama. Suure tänu olen võlgu ka oma emale Regina Laanele, kes aitas tõlkida vene keelseid materjale.

## Kasutatud kirjandus

1. Ainsaar, L., Einasto, R. 1995. Kalana paemurd. Rmt.: Ainsaar, L. ja Kirsimäe, K. (toim.). Liivimaa Geoloogia. Ekskursioonijuht. Tartu Ülikool, Eesti Geoloogia Selts, Tartu, lk. 20-21.
2. Ainsaar, L., Pani, T. 2003. Kalana paemurd. Rmt.: Plado, J. ja Puura, I. (toim.). Eesti geoloogide neljas ülemaailmne kokkutulek. Eesti geoloogia uue sajadi künnisel. Konverentsi materjalid ja ekskursioonijuht. Eesti Geoloogia Selts, Tartu Ülikooli Geoloogia Instituut, Tartu, lk. 108-109.
3. Brown, M.A., Archer, A.W., Kvale, E.P., 1990. Neap-spring tidal cyclicity in laminated carbonate channel-fill deposits and its implications: Salem Limestone (Mississippian), south-central Indiana, U.S.A. *Journal of Sedimentary Petrology* 60, pp. 152-159.
4. Einasto, R., Perens, H. 1985. Kalana marmor. *Eesti Loodus*, 7, lk. 453-458.
5. Einsele, G. 1992. *Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget*. Springer Verlag, Berlin, pp. 99-108
6. Koleva-Rekalova, E. 2000 Sarmatian (Bessarabian) Carbonate tempestites from Cape Kaliakra, North-Eastern Bulgaria. *C. R. Acad. bulg. Sci.*, 53, 5, pp. 71-74.
7. Nestor, H. & Einasto, R. 1997. Ordovician and Silurian carbonate sedimentation basin. In: *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas, A. & Teedemäe, A., eds.), Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 192-204.
8. Nestor, H. 1997. Silurian. In: *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas, A. & Teedemäe, A., eds.), Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 89-106.
9. Nestor, H., Einasto, R., Männik, P., Nestor, V. 2003. Correlation of lower-middle Llandoverly sections in central and southern Estonia and sedimentation cycles of lime muds. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 52, 1, pp. 3-27.
10. Nestor, H., Soesoo, A. 2006. *Silur Eestis. MTÜ GEOGuide Baltoscandia*, Tallinn, lk. 1-32.
11. Orviku, K. 1960. Volhovi ja Kunda lademe litostratigraafia Eestis. *Eesti NSV Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituudi Uurimused*, 5, lk. 45-87 (vene k.).

12. Perens, H. 1992. Raikküla lademest ja tema liigestamisest avamuslal. Eesti Geoloogiakeskuse Toimetised, 2, 1, lk. 27-31.
13. Perens, H. 1995. Ülemordoviitsiumist Põltsamaa-Jõgeva-Ruskavere joonel. Rmt.: Meidla, T., Jõelet, A., Kalm, V., Kirs, J. (toim.). Liivimaa Geoloogia. Tartu Ülikooli Geoloogia Instituudi 175. aastapäev. Eesti geoloogide teine ülemaailmne kokkutulek. Tartu Ülikool, Eesti Geoloogia Selts, Tartu, lk. 45-50.
14. Rankey, E.C. 2003. Carbonate-filled channel complexes on carbonate ramps: an example from the Peerless Park Member [Keokuk Limestone, Visean, low Carboniferous (Mississippian)], St. Louis, MO, USA. *Sedimentary Geology* 155, pp. 45-61.
15. Sami, T., Desrochers, A. 1992. Episodic sedimentation on an early Silurian, storm-dominated carbonate ramp, Becscie and Merrimack formations, Anticosti Island, Canada. *Sedimentology* 39, pp. 355-381
16. Shanmugam, G. 2006. Deep-Water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs. Elsevier, Amsterdam, pp. 162-165.
17. Skompski, S., Łuczyński, P., Drygant, D., Kozłowski, W. 2008. High-energy sedimentary events in lagoonal successions of the Upper Silurian of Podolia, Ukraine. *Facies* 54, 2, pp. 277-296.
18. Teedumäe, A., Kallaste, T., Kiipli, T. 2003. Comparative study of dolomites of different genesis (Raikküla Formation, Silurian; Estonia). *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 52, 2, pp. 113–127.
19. Tinn, O., Meidla, T., Ainsaar, L., Pani, T. 2009. Thallophtic algal flora from a new Silurian Lagerstätte. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58, 1, pp 38-42.

## Resume

### Silurian storm deposits in Raikküla stage coastal waters, Kalana

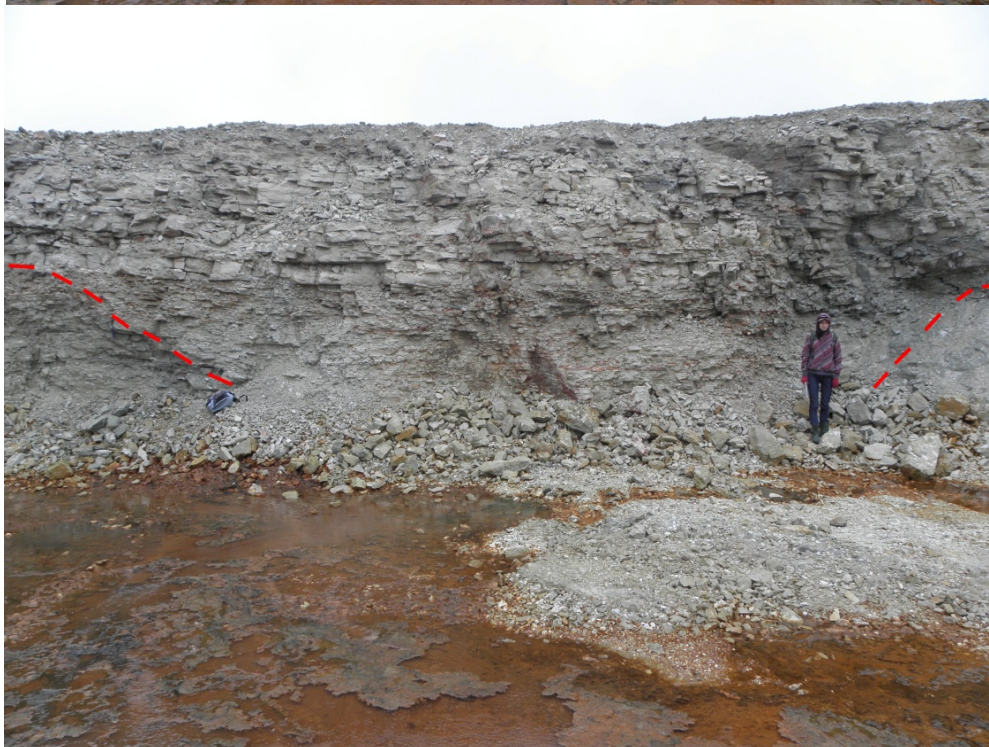
In the Kalana quarry Raikküla layers can be divided into four complexes. The first complex is dolomitic limestone, where we found four limestone zones. By studying the morphology and lithology of these zones, we concluded that they might be buried channels. These channels are filled with aphanitic argillaceous limestone. Looking at the incision of the channels into host rock, we can say that they have northeast-southwest direction. Channels lateral length is about 3-13 meters. Third complex, thin aphanitic limestone with argillaceous layers covers channels and dolomitic limestone. Final complex, which covers all the previous layers is fine-grained limestone, which is also cross-bedded.

Tempestites can be found from Raikküla stage coastal deposits. They are located either in dolomitic limestone (complex I) or in channel filling aphanitic limestone (complex II). The thickness of tempestites is 3-12 cm (average less than 10 cm) and the lateral length is 45-330 cm (average 1 meter). Their composition is a granular limestone, bioclastic limestone or lithoclastic limestone.

Kalana Raikküla stage coastal deposition environment can therefore be described as area of numerous beach ridges, where settled limemud which was occasionally floated by heavy storm flows. These flows brought coarser material to the ridge area. Probably the good preservation of algal flora is caused by short-term episodic high-energy storm flows, which buried the material rapidly under storm sediments. From the presence and character of the tempestites we can presume that during their deposition in Middle-Estonia Raikküla stage the basin was shallowing. This is proved by an increase in tempestite unit frequency in the upper part of the deposition and amalgamation of storm beds. The tempestite sequence coarsens upward what is characteristic to proximal storm beds and also suggest to a regressive trend.

**LISAD**

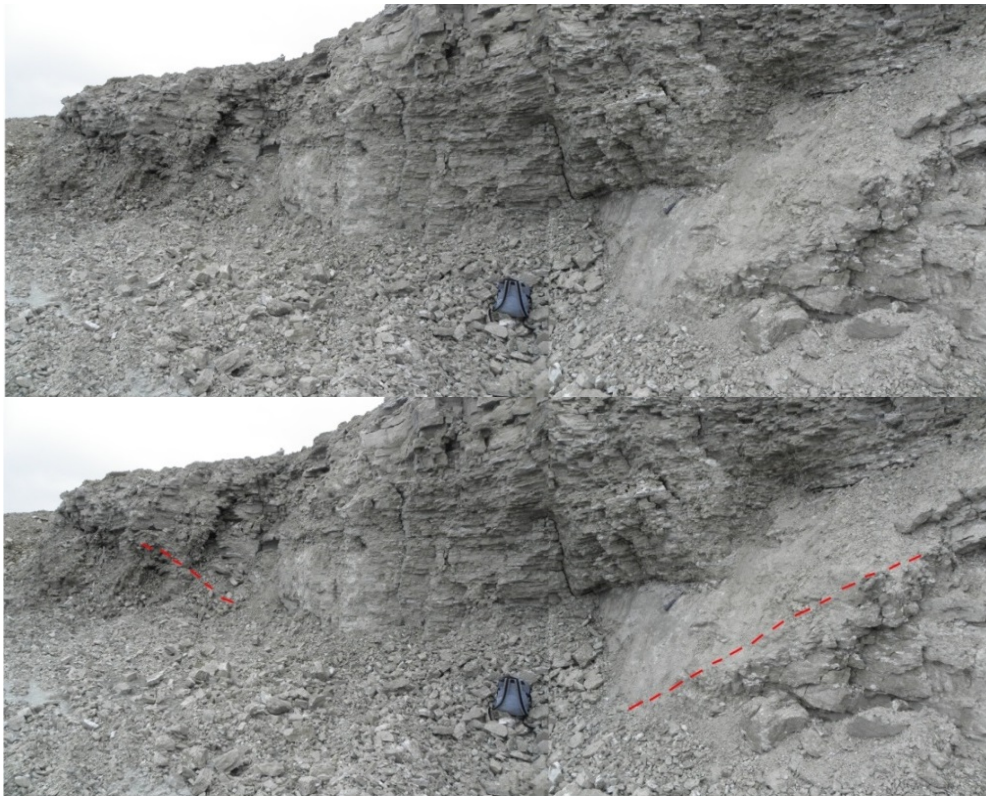
**Fotod:**



**Lisa 1.** Kanal nr 1. Punase katkendliku joonega on märgitud kanali kontuur.



**Lisa 2.** Kanal nr 1 suunas pilt. Punase katkendliku joonega on märgitud kanali kontuur.



**Lisa 3.** Kanal nr 2. Punase katkendliku joonega on märgitud kanali kontuur.



**Lisa 4.** Kanal nr 3. Punase katkendliku joonega on märgitud kanali kontuur.



**Lisa 5.** Kanal nr 4. Punase katkendliku joonega on märgitud kanali kontuur.

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

Mina

Mare Laan  
(*autori nimi*)

(sünnikuupäev: 22.01.1989)

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

Siluri tormisedet Raikküla ea rannameres Kalanas,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on

Leho Ainsaar,  
(*juhendaja nimi*)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace´i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 24.05.2013