



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

FIIBERVÕRKKATTEGA KIVIKOTTIDE KASUTAMINE KALDAKINDLUSTUSENA

USE OF FIBER MESH ROCK BAGS AS COASTAL PROTECTION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rain Leenpalu

Üliõpilaskood 192671EAEI

Juhendaja: Aldur Parts

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

24. november 2024

Autor:

.....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

24. november 2024

Juhendaja:

.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....":20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Rain Leenpalu**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Fiibervõrkkattega kivikottide kasutamine kaldakindlustusena**, mille juhendaja on Aldur Parts
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

24.11.2024

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **RAIN LEENPALU**

Üliõpilaskood **192671EAEI**

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitusjuhtimine

Lõputöö teema:

FIIBERVÕRKKATTEGA KIVIKOTTIDE KASUTAMINE KALDAKINDLUSTUSENA

Use of fiber mesh rock bags as coastal protection

Juhendaja: **ALDUR PARTS**

aldur.parts@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja Perekonnanimi	Kontakt (e-post või telefon)	Allkiri ja kuupäev
EM Infra OÜ tegevjuht, Martin Kärner	martin@eminfra.com	15.11.2024

Lõputöö põhieesmärgid:

- Hinnata kivikottide ja sarnase funktsiooniga konstruktsioonide kasutusvõimalusi Eestis;
- Kaldakindlustuse lahenduse väljatöötamine;
 - Ehituse organiseerimine ja juhtimine
 - Konstruktsiooni projekt
 - Hinnata kivikottide kasutamise majanduslikku ja ökoloogilist aspekti

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Teemat puudutavate materjalide kogumine ja sissejuhatava osa kirjutamine	30.09.2024
2. Juhtimise osa – olemasoleva projekti andmete ja projekteerimistingimuste läbitöötamine	11.10.2024
3. Juhtimise osa – kivikoti lahenduse võrdlemine varasemalt projektis kasutatud lahendusega, analüüs	25.10.2024
4. Projekteerimisosa – konstruktsiooniarvutused	11.11.2024
5. Kokkuvõtte eesti keeles; kokkuvõtte inglise keeles	12.11.2024
6. Töö lõplik vormistamine	17.11.2024

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks 18.11.2024

Peale ülevaatus saab teha väiksemaid korrekture ja üles laadida töö Moodle keskkonda plagiaadikontrolliks ÜHE pdf failina.

Palun vormistada lõputöö käesolevale mallile. Nõuetele mittevastavaid lõputöid kaitsmisele ei lubata.

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1 Esitlusmaterjalid	18.11.2024

Lõputöö esitamise tähtaeg: 2. detsember 2024

Plagiaadikontrolli läbinud lõputöö digiallkirjastatakse autori, juhendaja(te), konsultandi(tide) ja kaitsmiskomisjoni esimehe poolt. Paberil pole vaja allkirju koguda.

Lõputöö ülesanne välja antud: 20.04.2024

Juhendaja: **Aldur Parts**

Ülesande vastu võtnud: **Rain Leenpalu**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS.....	3
SISUKORD	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	9
TABELITE LOETELU	10
JOONISTE LOETELU	11
ESITLUSJOONISTE LOETELU	12
SISSEJUHATUS.....	13
1. LAINE	14
2. KALDAKINDLUSTUSE OLEMUS	16
2.1 Kaldakindlustuse osad	16
2.1.1 Kaitsekiht	17
2.1.2 Filterkiht.....	17
2.1.3 Eralduskindel kiht.....	17
2.1.4 Tasanduskiht	17
2.1.5 Pehmendav kiht	18
2.2 Sadamate lainemurdjad.....	18
2.2.1 Raudbetoonist tetrapoodid	18
2.2.2 Terasvõrgust gabioonkorvid ja -madratsid	20
3. KYOWA FIIBERVÕRKKATTEGA KIVIKOTID	23
3.1 Materjal	23
3.2 Fiibervõrkkattega kivikottide suurused	23
3.3 Täitmine ja paigaldamine.....	25
3.3.1 Täitmine	25
3.3.2 Paigaldamine.....	25
3.4 Veealuste kommunikatsioonide kaitsmine.....	27
3.5 Teedeehitus	28
3.6 Filterkraan.....	28
4. KALDAKINDLUSTUSE PROJEKTEERIMINE	29
4.1 Asukoht.....	29
4.2 Tuul.....	30

4.3	Olulise lainekõrguse ligikaudne määramine	30
4.4	Kaldakindlustuse arvutamise põhimõtted	33
4.5	Arvutused.....	35
4.5.1	Stabiilsusarvutus tetrapoodidega	36
4.5.2	Nõlva stabiilsuse arvutus kasutades täitematerjalidega täidetud fiibervõrkkattega kivikotte.....	38
5.	EHITUSTEGEVUSE JUHTIMINE: VANASADAMA KALDAKINDLUSTUSE REKONSTRUEERIMINE .	40
5.1	Olemasoleva olukorra kirjeldus enne rekonstrueerimistoid	40
5.2	Projektlahendus.....	41
5.2.1	Projektlahendus kasutades tetrapoode.....	42
5.2.2	Projektlahendus kasutades täidetud kivikotte	43
5.3	Ettevalmistavad tööd.....	43
5.4	Tööde tehnoloogiline järjekord	45
5.4.1	Kaldakindlustus raudbetoonist tetrapoodidega	45
5.4.2	Alternatiivlahenduse ehitustehnoloogiline tööpõhimõte.....	49
6.	MATERJALIDE MAHUARVUTUSED NING MAKSUMUSED.....	52
6.1	Mahu- ja finantsarvutused tetrapoodide kasutamisel	52
6.1.1	Maakivid	52
6.1.2	Paekivid.....	53
6.1.3	Tetrapoodid	54
6.2	Mahu- ja finantsarvutused täidetud kivikottide kasutamisel	56
6.2.1	Kyowa kivikotid	56
6.2.2	Paekivikillustikuga täidetud kivikotid.....	58
6.2.3	Graniitkillustikuga täidetud kivikotid	60
6.2.4	Betoontükkidega täidetud kivikotid.....	61
6.2.5	Kivikottide täitematerjali võrdlus	64
6.3	Tööjõu ja masinate kasutus	65
6.3.1	Tetrapoodide paigaldamisel	65
6.3.2	Kivikottide täitmisel ja paigaldamisel	67
6.4	Finantstabelid	68
6.4.1	Kaldakindlustuse maksumus tetrapoodidega lahenduse korral	68
6.4.2	Kaldakindlustuse maksumus paekivikillustikuga täidetud kivikottide lahenduse korral.....	70
6.4.3	Kaldakindlustuse maksumus graniitkillustikuga täidetud kivikottide lahenduse korral.....	71

6.4.4 Kaldakindlustuse maksumus purustatud betoontükkidega täidetud kivikottide lahenduse korral	72
KOKKUVÕTE	73
SUMMARY	75
KASUTATUD KIRJANDUS	77
LISAD	79

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

F_{eff}	– efektiivne tuuleala
W	– kaitselemendi kaal
γ_r	– kaitselemendi tihedus
H	– rajatiseni ulatuv laine kõrgus
K_d	– kivide või elementide stabiilsustegur
S_r	– kaitselemendi ühiku ja vee massiühiku suhe
γ_w	– vee tihedus
θ	– konstruktsiooni kaldenurk
h	– vee sügavus
H_s	– oluline lainekõrgus
T_p	– piiripealne laineperiood
T_m	– keskmine laineperiood
N	– lainete arv
P	– läbilaskvuse parameeter
S	– kahjustamise alguse parameeter
D_n	– kivi keskmine nimiläbimõõt
Δ	– kivi suhteline tihedus vee suhtes
$H_{2\%}$	– lainekõrgus, mille väärtuse ületavad vaid 2% lainetest
g	– raskuskiirendus
s_{om}	– fiktiivne laine järskus
ξ_{cr}	– kriitiline laine järskusparameeter
ξ_{mc}	– kriitiline laine järskusparameeter keskmisel laineperioodil
N_{od}	– kahjustuse tase, eraldunud või ümber paigutatud tetrapoodide arv
S_{tetr}	– tetrapoodidega kaetava ala pindala
x_{tetr}	– tetrapoodide arv kogu ala katmiseks
m	– mass
V	– ruumala
γ	– erikaal
t	– aeg
r	– rahaline väärtus

TABELITE LOETELU

Tabel 3.1 Kivikoti võrgumaterjali omaduste võrdlus	24
Tabel 4.1 Tuuleala arvutusväärtused.....	32
Tabel 4.2 Lähteandmed projekteerimiseks	35
Tabel 6.1 Nõlvale kuluv maakivide maht	52
Tabel 6.2 Paekivide mahud platoo osale.	53
Tabel 6.3 Kivikoti täitematerjali mahud.....	64
Tabel 6.4 Tööde maksumus tetrapoodide paigaldamisel	69
Tabel 6.5 Tööde maksumus paekillustikuga täidetud kivikottide paigaldamisel	70
Tabel 6.6 Tööde maksumus graniitkillustikuga täidetud kivikottide paigaldamisel	71
Tabel 6.7 Tööde maksumus betoontükkidega täidetud kivikottide paigaldamisel	72

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1: Murduvate lainete tüübid.....	15
Joonis 2.1 Kaldakindlustuse konstruktsioon.....	16
Joonis 2.2 Gabioonmadrats	20
Joonis 2.3 Ühendusrõngas gabioonkorvide seinte sidumiseks.....	21
Joonis 3.1 Kivikoti võrgu materjal.....	24
Joonis 3.2 Täidetud kivikottide paigutamine veealuste kommunikatsioonide kaitseks	27
Joonis 4.1 Käesolevas töös käsitletava kaldakindlustuse asukoht.....	29
Joonis 4.2 Valdavate tuulte esinemissagedused erinevatest suundadest.....	30
Joonis 4.3 Tuuleala arvutamise abijoonis.	31
Joonis 4.4 Oluline lainekõrgus püsiva tuulekiiruse korral tuuleala funktsioonina sügava vee tingimustes	32
Joonis 5.1 Kaldakindlustuse lõik Tallinna Vanasadamas.....	40
Joonis 5.2 Kaldalõige kasutades tetrapoode	42
Joonis 5.3 Kaldalõige kasutades täitematerjaliga täidetud kivikotte.....	43
Joonis 5.4 Roomikkraana Hitachi 180-2 tõstegraafik.....	47
Joonis 5.5 Roomikkraana Hitachi 180-2 tõstegraafik.....	47
Joonis 5.6 Töömaa skeem tetrapoodide mahalaadimisel ja paigaldamisel.....	49
Joonis 5.7 Töömaa skeem tetrapoodide mahalaadimisel ja paigaldamisel.....	50
Joonis 6.1 Kivikottide arvutuse abijoonis.....	57

ESITLUSJONISTE LOETELU

Lõputöö koosseisu kuulub 2 esitusjoonist formaadis A3:

Lisa 1: Kaldakindlustuse lõige tetrapoodidega

Lisa 2: Kaldakindlustuse lõige täitematerjaliga täidetud kivikottidega

SISSEJUHATUS

Sadamate kaldaalade kaitsmine lainete purustava jõu ja erosiooni eest on väga oluline nii keskkonna kui ka majanduse seisukohalt. Lainetuse mõju võib viia kaldajoone järkjärgulise hävimiseni, tuues kaasa sadamate infrastruktuuri kahjustused. Erosioon võib ohustada looduslikke elupaiku ning suurendada setete liikumist, mis halvendab veekvaliteeti. Efektiiivsete kaldakaitselahenduste rakendamine aitab säilitada sadamate funktsionaalsust ning vähendada inimtegevuse negatiivset mõju keskkonnale. Erinevate kaldakindlustuse kaitsekihtide kasutamine loob pikema eluea kogu konstruktsioonile, kuid selleks on vaja eelnevalt projekteerida konstruktsioon vastavalt reaalsetele laineoludele ning see valmis ehitada, kasutades võimalikult keskkonnasõbralikke materjale ning seadmeid.

Käesoleva lõputöö ajendiks on autori varasem töökogemus ehitusjuhina vesiehitistega seotud ettevõttes, kus ehitusobjektid on seotud ka kaldakindlustustega. Näitena on toodud Tallinna Vanasadama loodeosa kaldakindlustuse rekonstrueerimise projekt, kus kalda nõlva kaitsti erosiooni eest raudbetoonist tetrapoodidega. Alternatiivlahendustena on võimalik kasutada ka gabioonmadratsid ning täitematerjalidega täidetud fiibervõrkkattega kivikotte. Viimase lahendus on väljatöötatud Jaapanis aastal 1987 ning on patenteeritud *Kyowa Filter Unit* nime all. Kivikotid täidetakse vajaliku suurusega täitematerjaliga, mis moodustab koos võrkkotiga ühtse süsteemi nõlvade, kallaste ja muude konstruktsioonide kaitseks. Kivikotte kasutatakse laialdaselt aasias ja euroopas ning neid saab kasutada erineval otstarbel vesiehituses ja teedehituses.

Lõputöös analüüsitakse fiibervõrkkattega kivikotti koos erinevate täitematerjalidega, selle kasutamise võimalusi Eestis ning võrreldakse selle majanduslikku, ehituslikku ning ökoloogilist poolt Vanasadama loodeosa kaldakindlustuse projekti raames. Projekt hõlmab AS Tallinna Sadam territooriumil olevat 115m pikkust lõiku Vanasadama kruisikaide kõrval, mis rekonstrueeriti 2022. aastal.

Töös tuuakse teoreetilises osas välja võimalikud kasutusel olevad kaldakindlustuse materjalid ning kõnealuse fiibervõrkkattega kivikoti kui toote kasutusvõimalused. Põhiosas analüüsitakse ehitusjuhtimise aspektist lahenduse võimalikku plusse ja miinuseid antud konkreetse projekti raames ning otsustatakse, kas lahendus toimiks alternatiivina hetkel kasutusel oleva raudbetoonist tetrapoodide asendajana. Tehakse finantsanalüüs kasutatud lahenduse ja alternatiivlahenduse kohta ning otsustatakse, kas kivikottide kasutamine on antud tingimustel võrdväärne lahendus.

Võtmesõnad: kaldakindlustus, kivikotid, vesiehitus, magistritöö

1. LAINE

Vee liikuvaid, üles-alla võnkuvaid laineid või lainetusi merepinna lähedal nimetatakse merelaineteks. Neid iseloomustavad tõusvad või langevad liikumised, mis tekivad sageli tuule hõõrdejõu mõjul. Laine alumist osa nimetatakse lainepõhjaks, samas kui laine ülemist osa nimetatakse laineharjaks. Kaugust kahe kõrvuti asetseva harja vahel nimetatakse lainepikkuseks ning vertikaalset kaugust harja ja põhja vahel laine kõrguseks. [1]

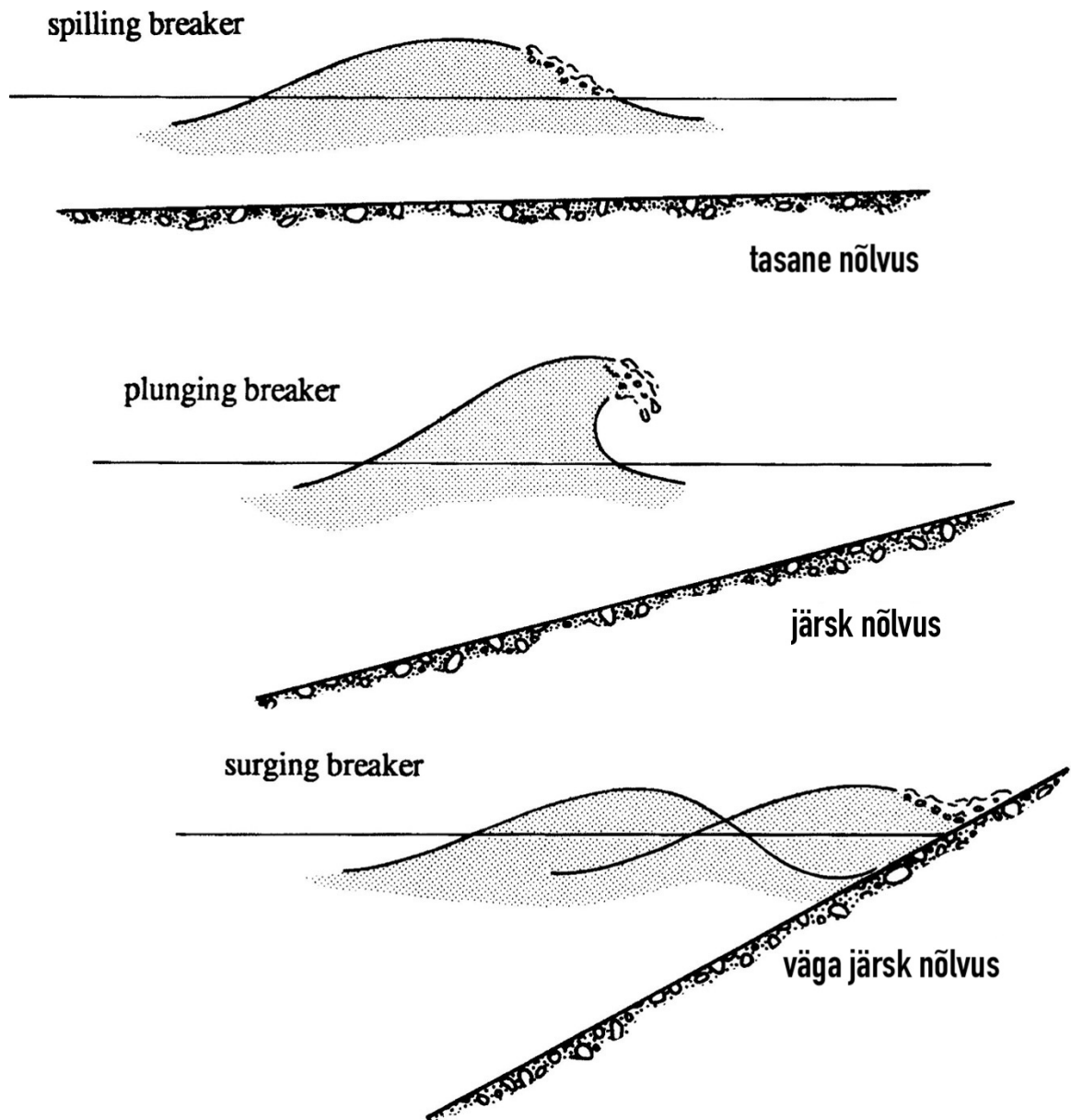
Lainetel avalduvad mitmed erinevad energiatüübid, kuid peamine, mis rannikut kulutab on kineetiline energia. Laine kineetiline energia on seotud osakeste liikumisega alla laine poole ning vertikaalselt ülesse. Kui laine murdub rannal, tekib suur kineetiline energia ning sellest tulenevalt avaldub kalda erosioon. Lainetel avaldub ka potentsiaalne energia, mis on seotud laine põhja ja harja vahelise kõrguste erinevusega – mida suurem on kõrguste vahe, seda suurem on laine potentsiaalne energia. Murdlaine murdumisel rannas muutub potentsiaalne energia kineetiliseks energiaks.[2]

Lainete mõju rannikurajatistele on väga muutlik ja sõltub nii lainetingimusest kui ka rajatise tüübist. Kolm tingimust, mida tuleb laine korral arvestada on: murdumata lained (*unbroken*), murduvad lained (*breaking*) ja murdunud lained (*broken*) [2].

Kuna antud töös keskendutakse kaldakindlustuste uurimisele, kus tekivad enamjaolt murduvad lained, jaotatakse murduvad lained järgmisteks gruppideks:

- 1) *spilling* tüüpi murdumine – sellise laine tüübi korral tekivad lained väikse kaldega rannajoontel ja madalatel veealustel nõlvadel, kus laineenergia järk-järgult hajub. Nad on vähem jõulisemad kui teised murduvate lainete tüübid ja seetõttu põhjustavad vähem erosiooni randadele ning kallastele.[2]
- 2) *plunging* tüüpi murdumine – järsk langus tekitab õhutasku ning suure jõuga pritsmeid, mis löövad vastu vee pinda. Sellisel lainel on suur energia, mis koondub lühikese aja jooksul. Lained tekivad tavaliselt järskudel rannikualadel või järsu kaldega merepõhjas, kus lained liiguvad kiiresti madalamale ja murduvad äkitselt. Sellistel lainetel enamasti surfatakse. Põhjustavad kaldale erosiooni, kuna energia vabaneb jõuliselt ja kiiresti. [2]
- 3) *surging* tüüpi laine – laine tipp tõuseb kaldale lähenedes ja liigub kiiresti kaldale, ilma et tipp kokku variseks. Lainetüüp esineb järskudel rannikutel või väga järsu veealuse kaldega kohtades, kus sügav vesi läheb kiiresti üle madalaks. Laine ei kaota piisavalt energiat, et murduda. Lained võivad tekitada äkilisi ja tugevaid üleujutusi rannikualadel.[2]

Alljärgnevalt kasutatakse lainete murdumise tüüpide nimetustena inglisekeelseid definitsioone, kuna eestikeelses erialasõnastikus puuduvad täpsed nimetused.



Joonis 1.1 Murdivate lainete tüübid [2]

2. KALDAKINDLUSTUSE OLEMUS

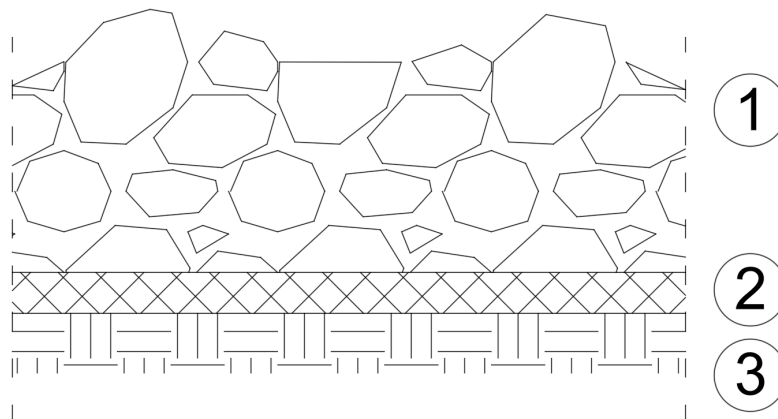
Rannikute kaitseks kasutatakse erinevaid materjale ning materjalisüsteeme eesmärgiga vältida rannajoone erosiooni ja tagada sisealade kaitse vee poolt põhjustavate üleujutuste eest. Sadamad on ranniku osad ning need on põhilised asukohad, kus tuleb tagada maa ja mere piiri kaitse lainete eest. Veelained kannavad vees oleva energia ühest kohast teise ning see energia jõuab lõpuks kaldale, mille peab vastu võtma kallast kaitsev konstruktsioon. Kuna tekivad jõud on suured, peab miski selle suure jõu ka vastu võtma. Selleks on vaja massi ehk vastukaalu, mis laineenergia vastu võtaks. [3]

Üldiselt jaotatakse ka ranniku kaitseks mõeldud rajatised peamiselt kolme tüüpi: vertikaalsed seinad (*vertical walls*), kivivallid (*rubble mound structures*), vaiadel üksikult seisvad lainemurdjad (*individual piles*). [2]

2.1 Kaldakindlustuse osad

Kaldakindlustuse süsteem koosneb tavaliselt järgmistest osadest: [4]

- 1) Soomuskiht ehk kaitsekiht (*armour layers*),
- 2) Filtri- või eralduskiht (*filter/separating layer*),
- 3) Eralduskindel aluspinna kiht (*impervious lining*),



Joonis 2.1 Kaldakindlustuse konstruktsioon

2.1.1 Kaitsekiht

Kaitsekiht on kaldakindlustuse kõige ülemine, erosioonikindel kiht mis võib olla vett läbilaskev või läbilaskmatu. Tema tööpõhimõte on vastu seista hüdrauliliste ja geotehnilistele aspektidele nagu hoovused, veevool ning lainete jõud. Kaitsekihina võib kasutada lahtiseid, suure tihedusega maakive või graniitkive. Suuremõõtmelised kivid peavad sellisel juhul olema paigutatud tihedalt üksteise vastu, et tekiks kivide omavaheline nn „lukustumine“, väiksema fraktsiooni korral on tähtis tagada kivide omavaheline tihendatavus tagamaks suure laineenergia korral kivide asukoha säilivus. [4]

2.1.2 Filterkiht

Iga kaldakaitse süsteem peab olema ehitatud nii, et see takistaks pinnasematerjalide väljauhtumist. Selleks tuleb vajadusel paigaldada filtrimiskihid pinnase ja kaitsekihi vahele ning need peavad olema üksteisega sobivate omadustega. Kõik kihid peavad moodustama stabiilse filtri külgneva kihi suhtes. [4]

Filter tuleks projekteerida vastavalt geohüdraulilistele aspektidele, vastavalt veevooludele ja nende koostoimele graanulite struktuuriga. Lisaks granuleeritud filtritele sobivad ka geotekstiilfiltrid. Nii vee läbilaskvus kui ka filtri stabiilsus on tüüpilised projekteerimisnõuded mõlemat tüüpi konstruktsioonide puhul. [4]

2.1.3 Eralduskindel kiht

Eralduskindel kiht on vajalik veemajanduse eesmärkidel stabiilsuse parandamiseks. Põhimõtteliselt tuleks eristada veekindlaid katteid, mis toimivad nii voodrina kui ka kaitsekihina, ja katteid, millel on eraldi vett mitteläbilaskev vooder, näiteks looduslik savi või geosünteesilised savivoodrid (bentoniitmatt). Lahendust kasutatakse enamasti tammide korral ning tavapärase jõe, mere või sadamate kaldakindlustuseks seda ei kasutata. [4]

2.1.4 Tasanduskiht

Tasanduskihte kasutatakse sileda aluspinna loomiseks, kui seda ei saa saavutada kaevetöödega. Tasanduskiht võib olla projekteeritud filtrikihina, kui all on väga ebahürtlane pinnas. Sel juhul kohandatakse tasanduskihi osakeste jaotus jämedama kohapealse pinnasega ja see toimib filtrina peenema materjali suhtes. Antud lahendus väldib vajaduse ehitada filtreid erinevates piirkondades teistsuguse meetodikaga.

Tasanduskiht on ka alternatiiv pinnase asendamisele, näiteks juhul, kui tammi ei saa korralikult kujundada, kuna kohapealne pinnas on ebastabiilne. [4]

2.1.5 Pehmendav kiht

Mõnel juhul kasutatakse pehmendavat kihti, et kaitsta aluspõhjakihte väga raskete koormuste eest, nt eriti suured kivid, kaasa arvatud tetrapoodid geotekstiilifiltri peal. Pehmenduskiht peab vastama külgnevate kihtide filtri kriteeriumitele. [4]

2.2 Sadamate lainemurdjad

Tööpõhimõttelt ei erine sadamates kasutatavad lainemurdjad ühegi teise lainemurdjaga, välja arvatud see, et nende funktsionaalsus eeldab tavaliselt juurdepääsu mööda harja või selle taga nii inimestele kui ka sõidukitele. Kaitsekonstruktsioon ulatub sügavamale vette ning konstruktsiooni kogumass on suurem tagamaks piisava kaitse tormide ning suurte lainete energia vastu võtmiseks. [2]

Murdevallide tüüpe on palju, kui arvestada kõiki komponente eraldi. Hans F. Burcharth, kes on Aalborg'i Ülikooli emeriitprofessor, on jaganud välimuse ja tööpõhimõtte järgi erinevad murdevallid kui ka lainemurdjad erinevateks tüüpideks: [2]

- Lainemurdjad (*rubble mound breakwaters*),
- Kessoon lainemurdjad (*caisson breakwaters*),
- Kombineeritud murdevallid (*composite breakwaters*).

2.2.1 Raudbetoonist tetrapoodid

Kui võtta aluseks Burchartheta lainemurdjate jaotus, liigituvad kuhjatud struktuuriga lainemurdjad, inglise keeles *rubble mound structures*, tetrapoodideks, maakividega kaetud nõlvadeks ja muudeks sarnasteks konstruktsioonideks, kus kaitsekiht moodustub kividest. Jaotusi on mitmete teiste teadlaste poolt tehtud erinevaid ning üldiselt käsitletakse tetrapoode kui erivormi, millele rakenduvad teistsugused arvutusvalemid, kuid tööpõhimõtte jääb samaks. Selliste konstruktsioonide puhul murduvad lained tavaliselt konstruktsiooni peal ning nende energia hajub osaliselt turbulentsi ja hõõrdumise tõttu, samas kui ülejäänud energia peegeldub tagasi ja kandub osaliselt edasi. [2]

Paljud laine- ja murdlainemurdjad ehitatakse, asetades suuri kive juhuslikult sobivate filterkihtide peale. Tänapäeval on kivi asendatud mõnedes kohtades massiivsete betoonplokkidega, millel on erinev kuju. Eestis on sadamates kasutusel tetrapoodid. Tetrapoodiks kutsutakse Prantsusmaal leiutatud vormi valatud raudbetoonblokki, mille kuju sarnaneb tetraeedrile. Tetrapoodid praeguse kujuna töötati välja aastal 1949 Prantsusmaal.

Tetrapoodide kasutamisega kaasneb aga oht kallast kaitsva konstruktsiooni muutmises. Tavaliselt paigaldatakse tetrapoodid mitmes kihis, kus elemendid asuvad üksteise peal ülekattes. Paigalduse ajal jälgitakse, et elemendid oleksid võimalikult tihedalt üksteisega kokkupuutes ning üksteise peale paigaldatud, et konstruktsioon oleks võimalikult tugev. Aluspinna erosiooni korral muutub alumise kihi tetrapoodi asetus vajumise tõttu, mis vallandab ahelreaktsiooni ülemistes kihtides. Elemendid muudavad vajumise korral oma asukohta ning tekivad uued ja suuremad tühimikud, mis võimaldab lainetel lõhkuda kindlat piirkonda kaldal ning kaldaerosioon kiireneb.

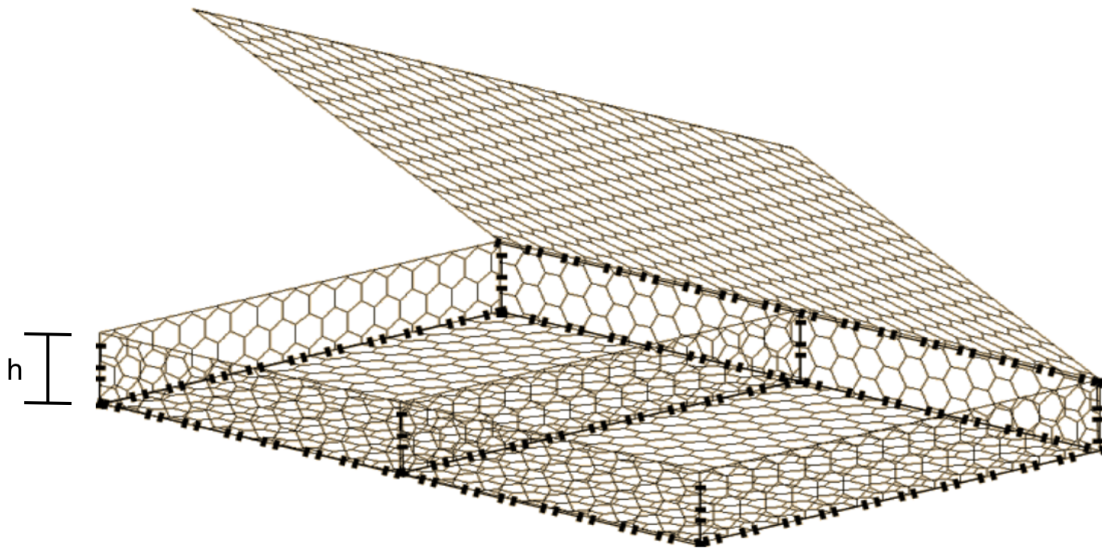


Foto 2.1 Raudbetoonist tetrapoodid, erakogu

2.2.2 Terasvõrgust gabioonkorvid ja -madratsid

Gabioonkorv ehk kivikorv on keevitatud traatpaneelidest, liigendatud, mitmesuguste mõõtmetega mahuti, mis täidetakse kivide või muude sobivate materjalidega kasutuskohas või juba tehases, moodustamaks painduva, läbilaskva, monoliitse konstruktsiooni. [5]

Gabioonmadrats on kivikorvi erivorm, mille paksus on võrreldes laiuse ja pikkusega suhteliselt väike ja mida kasutatakse tavaliselt jõekallaste ja nõlvade kaitsmiseks või kaitseks väljauhtumisest põhjustatud erosiooni eest. Gabioonmadratsid on kuni 300 mm kõrgusega, vt joonis 2.2. Korvide sees on nõ vaheseinad ehk diafragmad, mille vahekaugus on erinev sõltuvalt korvi või madratsi suurusest. [5], [6]



Joonis 2.2 Gabioonmadrats [6]

Gabioonkorve kasutatakse pinnase stabiliseerimiseks ning erosiooni vältimiseks nii maal, vees kui veepiiril. Maapinnal kasutatakse kivikorve nõlvade kindlustamiseks ja helibarjäärade rajamiseks. Võib kasutada ka maastiku kujundamiseks ja fassaadikatetena.

Erivormina kasutatakse ka silindrikujulisi gabioonkorve, milles pole sisemisi vaheseinu. Enamjaolt on kasutusel kuni nelja meetrise pikkuse ja ühe meetri laiusega silindrilisi korve. Antud lahendust kasutatakse näiteks: [6]

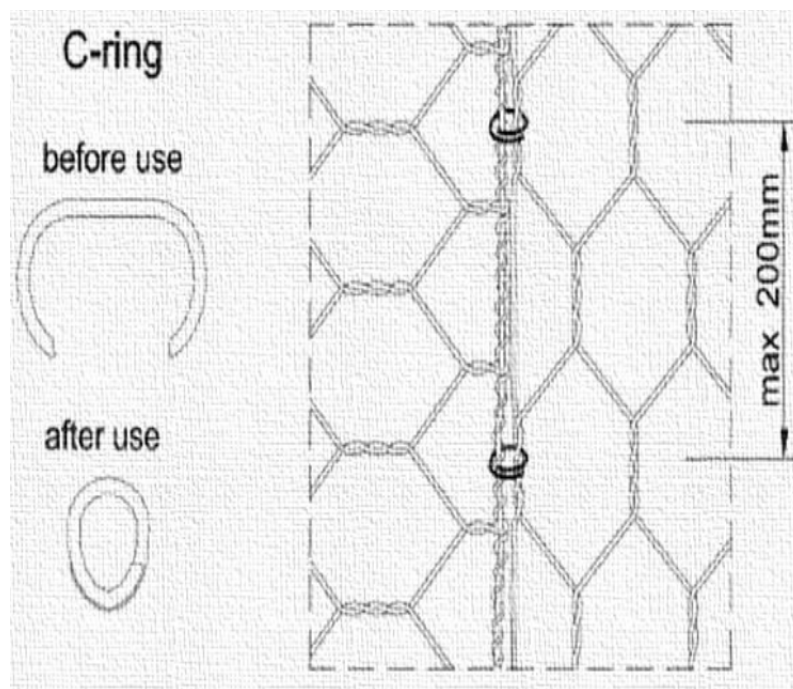
- ebaühtlaste kaldanõlvade korral;
- ajutiste ehitustööde jaoks kiireks paigalduseks;
- torustike ja kommunikatsioonide kaitseks;

- jõepõhja voolu reguleerimiseks
- dekoratiivsetel eesmärkidel.

Gabioonkorv toimib kahe erineva materjali koostöona: esiteks keevisvõrgust valmistatud gabioontootest ehk kivikorvist ning teiseks selle sisse paigaldatavast täitematerjalist. Gabioonkorvid kaetakse enamasti tsinkpinnakattega nt kuumsukeldusmeetodil või tsink-alumiiniumsulamiga. Eluea pikendamiseks kaetakse terasvõrk polüvinüülkloriidiga ehk PVC-ga, osadel juhtudel on korvid valmistatud roostevabast terasest. [6]

Korvide tugevdamiseks ja seinte omavaheliseks sidumiseks kasutatakse ühendusspiraale, rõngaid, sidumistraati ning tõmbevardaid. [5]

Rõngad paigaldatakse spetsiaalse masinaga, mis töötab suruõhuga.



Joonis 2.3 Ühendusrõngas gabioonkorvide seinte sidumiseks [6]

Testid näitavad, et tugevalt galvaniseeritud kivikorv, kus pinnakatte kulu on 260g/m² eluiga on keskmiselt 17-55 aastat. Vesises keskkonnas aga eluiga väheneb tunduvalt – 6...25 aastat. Pinnakatte paksuse korral 50g/m² on eluiga normaaltingimustel 4 aastat, veekeskkonnas 1-2 aastat – ehk sellise pinnakattega korvi pole otstarbekas kasutada veega kokkupuutuvates kohtades. Kui aga tsingitud võrk katta omakorda PVC kattega, võib ulatuda eluiga 120 aastani. Siinkohal peab aga märkima, et paigalduse ajal kahjustatakse peaaegu alati suuremal või väiksemal määral pinnakatet. [6]



Foto 2.2 Fraktsiooniga 90...300 mm aherainega täidetud gabioonkorvid, erakogu

3. KYOWA FIIBERVÖRKKATTEGA KIVIKOTID

Kyowa, asutatud aastal 1969, on Jaapani ettevõtte, mis tegeleb erinevate võrkude ning punutud materjalist kottide valmistamisega. Nende poolt välja töötatud "*The Filter Unit*" ehk antud töös vaadeldav materjal töötati välja juba aastal 1987, kui neid kasutati Akashi-Kaikyō rippilla vundamentide kaitsmiseks lainete kulutava mõju eest. Akashi-Kaikyō rippisild oli aastatel 1998-2002 pikim rippisild maailmas, ulatudes 3911 meetrini. Silla pikim sildeava on 1991 meetrit. Sellest sündmusest alates on antud toodet kasutatud veealuste kaablite, kommunikatsioonide ning vundamentide kaitseks, tuuleelektrijaamade vundamentide kaitseks meres, kallaste erosiooni kaitseks jõgedel ning mereäärsetel aladel. [7]

3.1 Materjal

Kyowa „*The Filter Unit*“ (edaspidi kivikott), on valmistatud taaskasutatud polüestrist ehk sünteetilisest naftamaterjalist. Tegu on põhiliselt vanade riietega ning muudest tööstuses järele jäävatest jäätmetest. Kuna tegemist on sünteetilise materjaliga, siis antud materjal ei korrodeeru, mädane ega roosteta ning on ilmastikukindel. Materjali eluiga on pikk – testitud minimaalne eluiga on 30 aastat. Soolases merevees on kivikottide minimaalne eluiga 50 aastat, kui ultraviolettkiirgus ei ulatu kivikotini. Materjal ei vaja hilisemat järeltöötlust ega hooldamist. Materjali venivad kiud muudavad kivikoti olemasolevat maapinda kopeerivaks struktuuriks ning seega ei ole vaja teha lisakulutusi aluspinna tasandamisele. Omavaheline seotus tagab kõrge koormustaluvuse löökidele ning kulumisele. [8], [9]

3.2 Fiibervõrkkattega kivikottide suurused

Kyowa kivikotte on saadaval 3 erinevat varianti – kandevõimega 2 tonni, 4 tonni ning 8 tonni, vastavalt konstruktsiooni kaitsmise vajadusest ning olemusest. Sõltuvalt kandevõimest on võrgu silma suurus erinev ning ka täitematerjalide suurusele erinevad nõuded. [8]

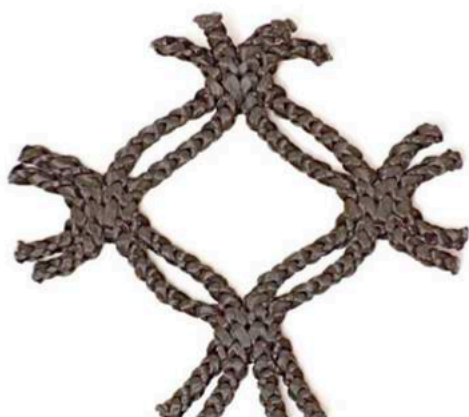
Allpool on välja toodud tabelis 3.1 erinevate kivikottide parameetrid.

Tabel 3.1 Kivikoti võrgumaterjali omaduste võrdlus [8]

Tüüp	Võrgu silma suurus	Täitematerjali suurus	Kivikoti kaal ilma täiteta	Koti mõõdud, täidetuna			Filtratsioonikiirus	
				Läbimõõt	Kõrgus	Maht	Üksik	Grupeeritud
2 tonni	25 mm	50x200 mm	6 kg	1,9m	0,4m	1,24m ³	3,1 m/s	4,6 m/s
4 tonni	25 mm	50x200 mm	13 kg	2,4m	0,6m	2,5m ³	3,4 m/s	5,2 m/s
8 tonni	50 mm	75x200 mm	48 kg	3,0m	0,7m	5,0m ³	3,9 m/s	5,8 m/s

2 ja 4 tonnised kotid liigitatakse "Ecogreen type" nime alla. Tegu on topeltmembraaniga, värvuselt rohelist tooni kotiga. Võrgu omaduste poolest on ta elastsem, tagamaks kergema aluspinna kopeerimise võimekuse. [8]

2 ja 4 tonniseid kivikotte täidetakse ka killustikuga fraktsiooniga 32...64 mm.



**S type
Double mesh**



**Ecogreen type
Double net**

Joonis 3.1 Kivikoti võrgu materjal [8]

"S type" on ekstreemsete ning raskete olude jaoks välja töötatud kivikott, mis on topelt sõlmede ja lisanööriaga. See aga aitab vähendada täitematerjali ja võrgu omavahelist hõõrdumist ning võrgu kulumist umbes 30%. [8]

3.3 Täitmine ja paigaldamine

Kivikotid täidetakse sobiliku täitematerjaliga vastavalt asukohale ning nõutud konstruktsiooni parameetritele. Täitmine saab toimuda igas asukohas, nii laoplatsil kui ka objekti vahetusläheduses.

3.3.1 Täitmine

Kivikotid täidetakse järgmiste tööetappide alusel:

- 1) Lahtiseotud kivikott asetatakse tootmiskorvi – või tootmiskasti;
- 2) Kast koos kivikotiga täidetakse soovitud täitematerjaliga;
- 3) Kivikoti servad seotakse kokku kasutades O-rõngast;
- 4) Paigalduskast tõstetakse kivikoti ümbert lahti või tõstetakse kott paigaldusraami seest;
- 5) Kivikott on valmis paigalduseks; [8]



Foto 3.1 Kivikottide täitmiskorv, erakogu

3.3.2 Paigaldamine

Kivikotte on võimalik paigaldada nii maalt kui merelt kasutades sobivat tõstetehnikat. Kuna täidetud kotid kaaluvad olenevalt suurusest mitmeid tonne, on kõige tavapärasem lahendus kasutada materjali tõstmiseks kraanaautot või hüdrotõstukit. Raske ligipääsuga kohtades kasutatakse paigalduseks ka helikopterit.

Tööjõu kulu poolest on paigaldus vähe ressursi nõudev, kuna puudub vajadus mitmeid tõsteaasasid avada nagu näiteks gabioonmadratsite paigalduse korral. Kivikott tropitakse paika kasutades ühte tõsteliini ning lahti haakimiseks on võimalik kasutada

kaugelt lahti haagitavat konksu. Seega pole vaja kasutada tuukrite abi. Täpseks paigutamiseks on võimalus konksu otsa paigaldada GPS vastuvõtja, mis ujukraanaga paigaldusel tagab merel kivikottide õige asukoha, lisaks saab kohe kätte andmed teostusdokumentatsiooni jaoks.

Sõltuvalt nõlva kaldest ja rajatava kaitsekonstruktsiooni parameetritest on võimalik kivikotte paigaldada kahel viisil:

- Paigaldus ühe kihina üksteise kõrvale



Foto 3.2 Kivikottide paigaldamine ühe kihina [10]

Antud lahendus on sobilik olukordades, kus nõlva kalle on väiksem kui 1:2-le ning jõe voolu kiirus ning lainete jõud pole märkimisväärselt suur.

- Paigaldamine astmeliselt



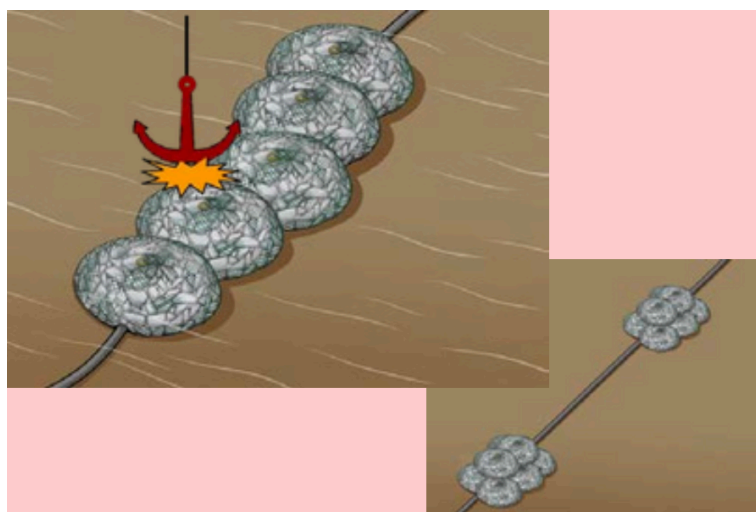
Foto 3.3 Kivikottide paigaldamine astmeliselt [10]

Kivikottide astmeline paigutamine on soovitatav olukordades, kus kalda nõlvus on suurem kui 1:2-le ning lainete ja veevoolu kulutav mõju kaldale on suurem. Erosiooni eest on nõlv antud olukorras paremini kaitstud.

3.4 Veealuste kommunikatsioonide kaitsmine

Kivikoti lahenduse näol ei ole tegu pelgalt nõlvade ja sadamate kaitsmiseks mõeldud paigaldisega. Toode saab kasutada mitmetel eesmärkidel ka veealuste kommunikatsioonide kaitsmiseks, tuulegeneraatorite vundamentide kaitseks veealuse erosiooni eest ning ka merepõhja ettevalmistamiseks veealuste kaablite paigalduseks.

Siinkohal tasub välja tuua hiljuti aktuaalne olnud BalticConnectoriga sarnaste kommunikatsioonide kaitsmine. Kyowa kivikotid on kasutusel Jaapanis samuti just veealuste elektriühenduste ning gaasiliinide kaitsmiseks, kus kivikotid asetatakse kommunikatsioonide peale vajadusel mitmes kihis olenevalt koti suurusest ning seotakse omavahel ühtseks süsteemiks. [10]



Joonis 3.2 Täidetud kivikottide paigutamine veealuste kommunikatsioonide kaitseks [9]

Selline lahendus pakub esmalt kaitset aga otsese löögi eest, kui midagi peaks langema liinile otse ülevalt. Kui aga peaks tekkima olukord, kus ankur lohiseb mööda merepõhja, siis ei ole sellist kaitset olemasoleva info põhjal läbi viidud. Küll aga saab järelda vaadates toote parameetreid, et ankur võib purustada koti enda ja vedada laiali täitematerjali ning kaitstava kaabli purunemine on endiselt võimalik.

3.5 Teedehitus

Enamasti kasutatakse teedehituses materjali ajutiste teede ehitusel, kus mängib rolli teede valmimise kiirus ning lihtsus. Kott täidetakse suure fraktsiooniga täitematerjaliga, millest tekib pärast paigaldust teekonstruktsiooni kandev osa. Kotti peale paigaldatakse liiklemise mugavuse parandamiseks väiksema fraktsiooniga täitematerjal ning tee on kasutamiseks valmis. Lahendus on seda tõhusam, mida vesisem ja niiskem on asukoht. Lisaks on peale ajutise tee kasutamist võimalik kividest uuesti konstruktsioonikihist välja võtta ning kasutada järgmisel lõigul või uues projektis.

3.6 Filterkraan

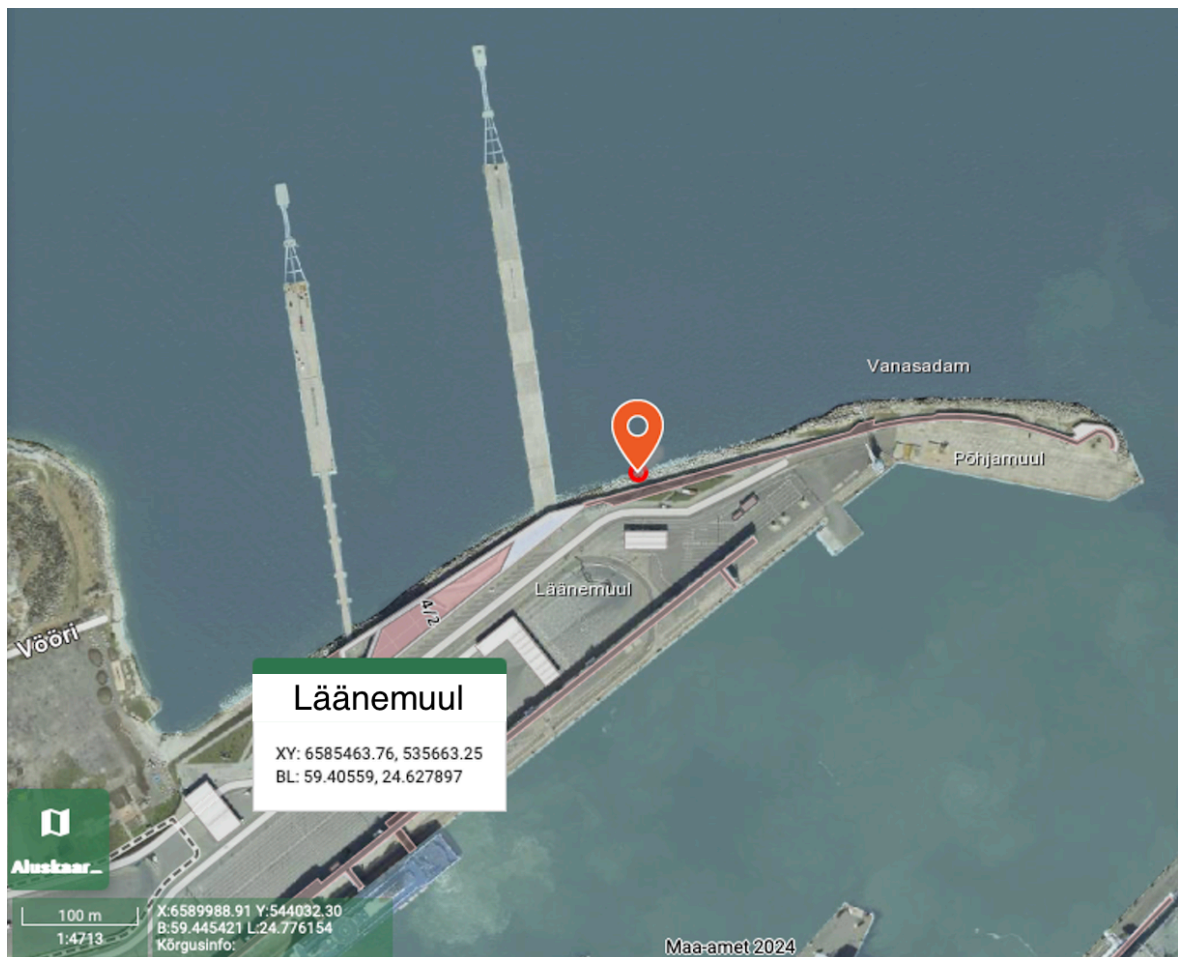
Kuna kividest täidetuna jämetäitematerjaliga moodustab võimekuse veeläbilaskvuseks, kasutatakse seda ka filterkraanina ehk teisisõnu pöördfiltrina. Pöördfiltriks nimetatakse sellist katet, mille materjal on küllalt jämedateraline, et tema veejuhtivus oleks piisavalt suurem ümbritseva pinnase omast ja küllalt peeneteraline, et vältida kaitstava pinnase osakeste tungimist filtrisse [11]. Vesi suudab filtratsiooni teel liikuda läbi konstruktsiooni selliselt, et konstruktsiooni kandevõime ei ammendu ning aeglasem veevool ei kanna pinnast vooluga kaasa. Lahendust saab kasutada näiteks väiksema liikluskoormusega tammide korral, kus sõidukid saavad liikuda üle konstruktsiooni, samal ajal kui konstruktsioon töötab tammina – ülesvoolu tekib paisjärv.

4. KALDAKINDLUSTUSE PROJEKTEERIMINE

Lõputöö raames projekteeritakse valitud asukohta põhiselt kaldakindlustuse lahendused, millest üks on olemasolev lahendus tetrapoodidega, teine lahendus projekteeritakse kasutades fiibervõrkkattega kivikotte, mis on täidetud kolme erineva täitematerjaliga. Lahendusi võrreldakse peatükkides 5 ja 6 arvestades ehitusprotsesse, tööde tehnoloogilist järjekorda ning koostatakse finantsanalüüs.

4.1 Asukoht

Käesolevas töös käsitletav ala asub Tallinna reidi, mis on Tallinna lahe kagusopp, lõuna-edela suunas, Paljassaare poolsaare ja Viimsi poolsaare vahelisel alal. Piiritletav ala asub täpsemalt Tallinna Vanasadama loodeosas, kruisilaevade kai nr 2 idaosas (Joonis 4.1).

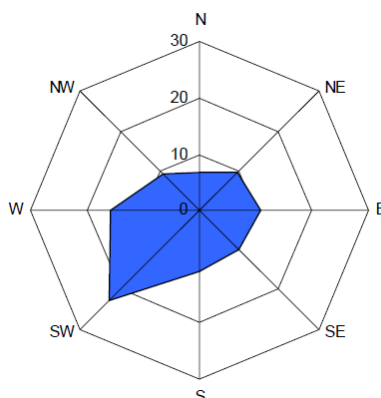


Joonis 4.1 Käesolevas töös käsitletava kaldakindlustuse asukoht. Allikas: Maa-ameti geoportaal [12]

Kruisikai nr 2 ehitati 2014. aastal. Loodemuul, mille küljes kruisikaid paiknevad, on ligemale 1 km pikkune konstruktsioon, mida kasutatakse laevaliikluse tagamiseks peamiselt kruisilaevadele ja Viking Line Abp liinilaevadele.

4.2 Tuul

Naissaare hüdroelektrijaamas 40 aasta jooksul mõõdetud tuulte kohta koostatud tuulte roos on esitatud joonisel 4.2. Tuuleandmete analüüsi põhjal esineb mõõdukaid tuuli lõuna, edela ja lääne suunast. Tugevaid tuuli esineb rohkem edela, lõuna ja loode suunast. [13]



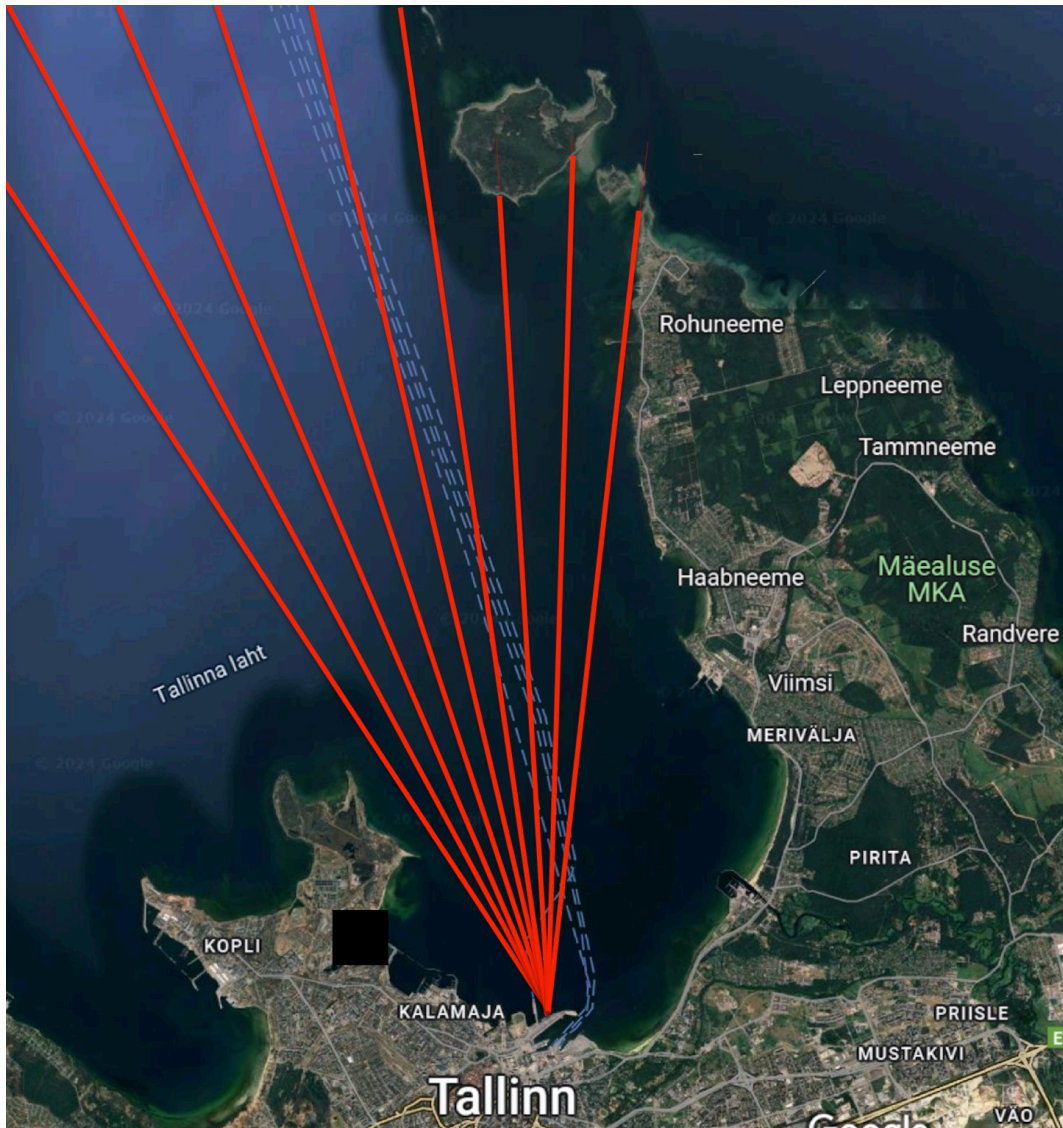
Joonis 4.2 Valdavate tuulte esinemissagedused erinevatest suundadest

Projekteerimisel kasutatav tuulekiiruse baasväärtus avatud mere tingimustes 10 m kõrgusel on 26,5 m/s [14]. Tuulekiiruse baasväärtuseks on 10 minuti kõige tuulisema ilma tuulekiiruse keskmine, mida mõõdetakse 10 m kõrgusel maapinnast. 1 tunni keskmine on oluliselt väiksem. Käesolevas arvutuses olen kasutanud 1 tunni jooksul mõjuva tuulekiiruse keskmist väärtust 21 m/s. Sellele kiirusele vastavalt hinnatakse kirjandusele tuginedes olulist lainekõrgust vt *ptk* 4.3. Tuuleandmete analüüsile tuginedes on tugevate põhja-suunaliste tuulte esinemise tõenäosus väike.

4.3 Olulise lainekõrguse ligikaudne määramine

Kuna kaldakindlustus projekteeritakse vastavalt asukohale, tuleb määrata võimalikult täpsed parameetrid olulisele lainekõrgusele. Oluline laine kõrgus on teatud perioodil vaadeldud lainete aegrea 1/3 kõrgemate lainete keskmine kõrgus. Ligikaudseks arvutuseks kasutatakse efektiivse avavee kauguse leidmist ebakorrapärase rannajoone korral, mille põhimõte on välja toodud vastavalt allikale *Port Designer's Handbook* [1].

Ligikaudse laine kõrguse arvutamiseks tuuleala, ingl keeles *fetch*, lõpus on vaja üksikasjalikku teavet nii tuuleala kui ka tuulevälja kohta. Joonisel 4.3 on näha efektiivse tuuleala kauguse määramist. Arvutus hõlmab üheksa radiaali konstrueerimist kaldakindlustuse asukohast, igaüks 6° intervallidega, piiratuna 24-kraadise nurgaga mõlemal pool tuulesuunda. Need radiaalid ulatuvad kai asukohast kuni esmakordse kokkupuuteni rannajoontega.



Joonis 4.3 Tuuleala arvutamise abijoonis

Iga radiaali pikkuskomponent mõõdetakse tuulesuunaga paralleelses suunas ja korrutatakse nurga koosinusega. Saadud väärtused igale radiaalile liidetakse kokku ning jagatakse kõigi üksikute nurkade koosinuste summaga (Tabel 4.1). Kuna enamik radiaale ulatub avamerele ning pole kaldajoonega piiritletud, võetakse nende pikkuskomponendiks 35 meetrit.

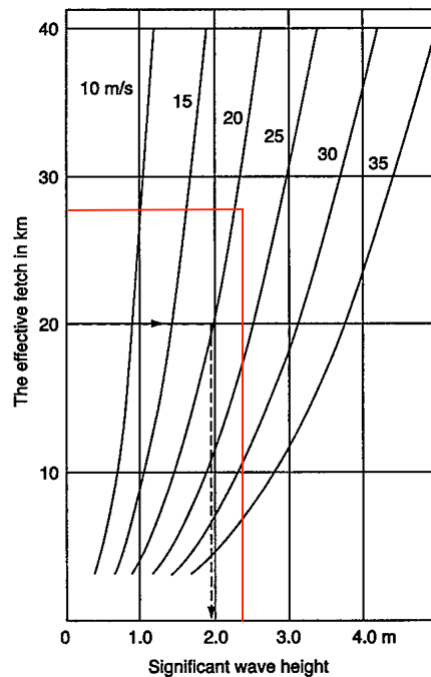
Tabel 4.1 Tuuleala arvutusväärtused

α (°)	$\cos \alpha$	X (km)	$X \cos \alpha$
24	0.914	35	32.0
18	0.951	35	33.3
12	0.978	35	34.2
6	0.995	35	34.8
0	1	35	35.0
6	0.995	35	34.8
12	0.978	13.8	13.5
18	0.951	13.9	13.2
24	0.914	11.3	10.3
Total	8.676	241.2	

Väärtustest leitakse efektiivse tuuleala aritmeetiline keskmine:

$$F_{eff} = \frac{\sum X \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} = \frac{241.2}{8.676} = 27.8 \text{ km}$$

Kasutades graafikut efektiivse tuuleala ja tuule kiiruse abil olulise lainekõrguse leidmiseks saame:



Joonis 4.4 Oluline lainekõrgus püsiva tuulekiiruse korral tuuleala funktsioonina sügava vee tingimustes [1]

Kasutades F_{eff} väärtust 27,8 km ning tuule kiirust 21 m/s, saame oluliseks lainekõrguseks lähtuvalt joonisele 4.4 vastavalt 2,27 m.

Arvutuslik laine kõrguse normatiivne väärtus on $1,25 * 2,27 = 2,8$ m lainemurdjale vastavalt allikale *Port Designer's Handbook* [1]. Tabelist 2.9 on võetud keskmine varutegur *rubble-mound breakwater* $(1,0+1,5)/2=1,25$.

Type of structure	H_{des}/H_s
Erosion protection	1.0–1.4
Rubble-mound breakwater	1.0–1.5
Concrete breakwater	1.6–1.8
Berth structures	1.8–2.0
Structure with high safety requirements	2.0

Peatükis 4.5 on kirjeldatud, mille alusel tehti valik lähteandmete valimisel.

4.4 Kaldakindlustuse arvutamise põhimõtted

Vajalik kaitsekihi läbimõõt, kihtide omavaheline sobivus sõltub mitmest omavahel seotud tegurist, sealhulgas laine kõrgusest, kaitselemendi tüübist ja tihedusest, rajatise kaldest ja läbilaskvusest. Selliste struktuuride arvutusel on kasutatud Hudsoni valemit. [2]

Hudsoni valem: [15]

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot(\theta)} \quad (4.1)$$

kus W – kaitselemendi mass, kg,

γ_r – kaitselemendi tihedus, kg/m³,

H – rajatiseni ulatuv laine kõrgus, m,

K_d – stabiilsustegur sõltuvalt materjalist,

S_r – kaitselemendi ühiku ja vee massiühiku suhe (γ_r/γ_w),

γ_w – vee tihedus, kg/m³

θ – konstruktsiooni kaldenurk, deg

Küll aga on Hudsoni valem oma olemuselt arvutamiseks regulaarsetel laineoludel, kus ei arvestata ekstreemseid tingimusi nagu aeg-ajalt esinevaid torme ja tavapärasest suuremaid laineid. [15]

Reaalseid tingimusi arvestab rohkem *Van der Meeri* valem, kuna see põhineb juhuslikel laineoludel. Van der Meer arvestab eraldi valemitega vajaliku kaldakaitse kaitsekihi paksust nii murd- kui ka tõusulainetele. [15]

Murdlainetele:

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta} = 8.7 P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{0.5} \quad (4.2)$$

Tõusulainetele:

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta} D_{n50} = 1.4 P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^P \quad (4.3)$$

Lained on tõusvad, kui rannakalle on järsk, lainete pikkus on suur võrreldes nende kõrgusega või kui lained ei murdu äkiliselt, vaid tõusevad sujuvalt mööda kaldapinda ülesse ja liiguvad tagasi ilma suurema energia vabanemiseta.

Arvutuslikult on lained tõusvad, kui

$$\xi_{mc} \geq 6.2 P^{31} \sqrt{\tan \theta^{P+0.5}} \quad (4.4)$$

Kus Δ - kivi suhteline tihedus vee suhtes,

D_n - kivi keskmine nimiläbimõõt, m,

S - struktuurikahjustuse tase, mis on määratud väärtuseks 2 kahjustuse korral 0-5%,

N - lainete arv tormis,

P - struktuuri läbilaskvus,

ξ_m - laineolude kombinatsiooni sarnasuse parameeter (*surf similarity parameter*)

$$\xi_m = \frac{\tan(\theta)}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{gT_p^2}}} \quad (4.5)$$

H_s - oluline lainekõrgus,

T_p – periood, mille jooksul esinevad kõige kõrgema energiatihedusega lained.

4.5 Arvutused

Et projekteeritud lahendusi oleks võimalik omavahel võrdsetel alustel võrrelda, tuleb määratleda ühene projekteerimise metodika, mille alusel hiljem koostada projekti maksumusele ning teostatavusele analüüs.

Peatükis 4.3 *Thoreseni* raamatu alusel arvutatud olulist lainekõrgust väärtusega 2,8 meetrit, tuleb enne edasisi arvutusi võrrelda ka teiste allikatega. Selleks kaasati lõputöösse lähteandmete parameetrite kontrollimiseks sadamaehitusinsener Rain Männikus, kellega koostöös vajalikud väärtused sõltuvalt Vanasadama asukohale määrati. Oluliseks lainekõrguseks määrati peale konsultatsioone 2,5 meetrit. See näitab, et ligikaudselt leitud oluline lainekõrgus on sellele tulemusele üsna lähedal.

Esitatud lähteandmeid mitte kasutada ehitiste ja rajatiste projekteerimisel. Lähteandmed on esitatud tabelis 4.5.

Tabel 4.2 Lähteandmed projekteerimiseks

$h = 10$	vee sügavus, m
$H_s = 2,5$	oluline lainekõrgus konstruktsiooni jalamil, m
$T_p = 6$	piiripealne laineperiood (<i>peak period</i>), s
$T_m = 4$	keskmine laineperiood (<i>mean period</i>), s
$N = 7500$	lainete arv ühe tormi jooksul, tk
Nõlva parameetrid	
$\cot \beta = 5.67$ (10 deg)	merepõhja kalle
$\cot \alpha = 1.32$ (37 deg)	nõlva kalle
$P = 0.4$	läbilaskvuse parameeter
$S = 2$	kahjustamise alguse parameeter

Leiame vajaliku kaitselemendi kihi paksuse Van der Meeri valemiga.

Arvutusmetodika valik tehakse lähtudes veesügavuse tasemest Van der Meeri järgi järgmistel tingimustel: [16]

- 1) $\frac{h}{H_s} \approx 1.5 - 2$ - Väga madal vesi
- 2) $\frac{h}{H_s} < 3$ - Madalvesi

$$3) \frac{h}{H_s} > 3 \quad - \text{ Sügav vesi}$$

Kasutades lähteandmeid tabelist 4.2 leiame sobiva arvutusmetoodika.

$$\frac{h}{H_s} = \frac{10}{2,5} = 4 > 3$$

Seega, kasutame Van der Meeri arvutusmetoodikat sügava vee jaoks.

4.5.1 Stabiilsusarvutus tetrapoodidega

Tetrapoodide arvutamisel kasutatakse võrreldes teiste kivikonstruktsioonidega erinevaid valemeid, kuna konstruktsioon ei kvalifitseeru otseselt kivide arvutuse alla. Tetrapoodide kaitsekihi arvutuseks kasutatakse arvutusmeetodit, mis on kirjeldatud raamatus *The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering*. [16]

Tetrapoodide arvutusel tuleb leida esmalt fiktiivne laine järskus s_{om} .

$$s_{om} = \frac{2\pi H_s}{g T_m^2} \quad (4.6)$$

kus H_s – oluline lainekõrgus konstruktsiooni jalamil, m,
 T_m – keskmine laineperiood, s,
 g – raskuskiirendus, 9,81 m/s.

$$s_{om} = \frac{2\pi * 2,5}{9,81 * 4^2} = 0.10$$

Järgmiseks kontrollitakse, kas tegemist on *surging* tüüpi või *plunging* tüüpi lainetega. Lained on *surging* tüüpi, kui:

$$\xi_{mc} \geq \xi_{cr} \quad (4.7)$$

kus, ξ_{cr} – kriitiline laine järskusparameeter (*critical surf similarity parameter*),

ξ_{mc} – kriitiline laine järskusparameeter keskmisel laineperioodil (*critical surf similarity parameter for the mean wave period*),

Kriitiline laine järskusparameeter ξ_{cr} keskmisel laineperioodil avaldub järgmisel kujul:

$$\xi_{cr} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{\frac{1}{P+0.5}} \quad (4.8)$$

kus P – läbilaskvuse parameeter,

$$\xi_{cr} = (6.2 * 0.4^{0.31} * \sqrt{\tan 37})^{\frac{1}{0.4+0.5}} = 4.73$$

Kriitiline laine järskusparameeter ξ_{mc} avaldub:

$$\xi_{mc} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_p^2}}} \quad (4.9)$$

kus T_p – piiripealne laineperiood (peak period), s

$$\xi_{mc} = \frac{\tan 37}{\sqrt{\frac{2\pi * 2,5}{9,81 * 6^2}}} = 3.57$$

$$\xi_{mc} < \xi_{cr}$$

Seega, on antud asukohas ja lähteandmeid kasutades tegemist *plunging* tüüpi lainetega.

Tetrapoodide kahekihilise süsteemi kihi stabiilsus avaldub seega järgmise valemiga:

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(8.6 \left(\frac{N_{od}}{\sqrt{N}} \right)^{0,5} + 3.94 \right) s_{om}^{0,2} \quad (4.10)$$

kus N_{od} – kahjustuse tase, eraldunud või ümber paigutatud tetrapoodide arv,

Δ - materjali ja vee tiheduste suhe,

Avaldame valemist 4.10 D_n väärtuse:

$$D_n = \frac{H_s}{\Delta \left(3,75 \left(\frac{N_{od}}{\sqrt{N}} \right)^{0,5} + 0,85 \right) s_{om}^{-0,2}}$$

$$D_n = \frac{2,5}{\frac{2,4 - 1,0}{1,0} \left(3,75 \left(\frac{0,2}{\sqrt{7500}} \right)^{0,5} + 0,85 \right) 0,10^{-0,2}} = 0,65 \text{ m}$$

Kontrollime nõlva stabiilsust. Van der Meeri sügava vee valemi korral peab stabiilsuse tagamiseks jääma stabiilsuse number vahemikku 1-4.

$$\frac{H_s}{\Delta * D_{n50}} = \frac{2,5}{1,4 * 0,65} = 2,7$$

Stabiilsus on tagatud!

Valitava tetrapoodi kaalu kontrollime Hudsoni valemiga 4.1:

$$W = \frac{2,4 * 2,5^3}{2,0(2,4-1)^3 \cot 37^\circ} = 5,0 \text{ t}$$

Seega valitakse kaldakindlustuseks 5 tonni kaaluvad tetrapoodid, mis paigaldatakse kahekihiliselt. Tetrapoodide jalgade vahekaugus on ligikaudu 2,3 meetrit.

Paigaldades elemendid kahes kihis, on vajalik stabiilsus tagatud.

4.5.2 Nõlva stabiilsuse arvutus kasutades täitematerjalidega täidetud fiibervõrkkattega kivikotte

Kasutades arvutustes täitematerjaliga täidetud fiibervõrkkattega kivikotte, leitakse vajalik kaitsekihi suurus kasutades kivikonstruktsioonil lainemurdjate (*rubble mound armor design*) valemeid.

Arvutusmetoodika algab sarnaselt, nagu peatükis 4.2.1 arvatult. Kontrollitakse, kas on tegemist *surging* või *plunging* tüüpi laine murdumisega, meie näites on endiselt tegemist *plunging* tüüpi murdumisega.

Plunging tüüpi murdumise korral kasutame järgmist valemit:

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = 6,2 * P^{0,18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (4.11)$$

Avaldame valemist 4.11 kivide nimiväärtuse D_n :

$$D_n = \frac{H_s}{\Delta * 6,2 * P^{0,18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5}}$$

Kivikotid täidetakse paekividega, graniitkiviga ning betoontükkidega. Kuna nende materjalide mahukaalud ei erine üksteisest oluliselt, teeme arvutusnäite paekivide baasil. Arvestame, et paekivi mahukaal on 2650 kg/m³.

$$\Delta = \frac{2.65 - 1.0}{1.0} = 1.65$$

$$D_n = \frac{2.5}{1.65 * 6.2 * 0.4^{0.18} \left(\frac{2}{\sqrt{7500}}\right)^{0.2} 3.57^{-0.5}} = 1.16 \text{ m}$$

Kontrollime nõlva stabiilsust. Van der Meeri sügava vee valemi korral peab stabiilsuse tagamiseks jääma stabiilsuse arv vahemikku 1-4.

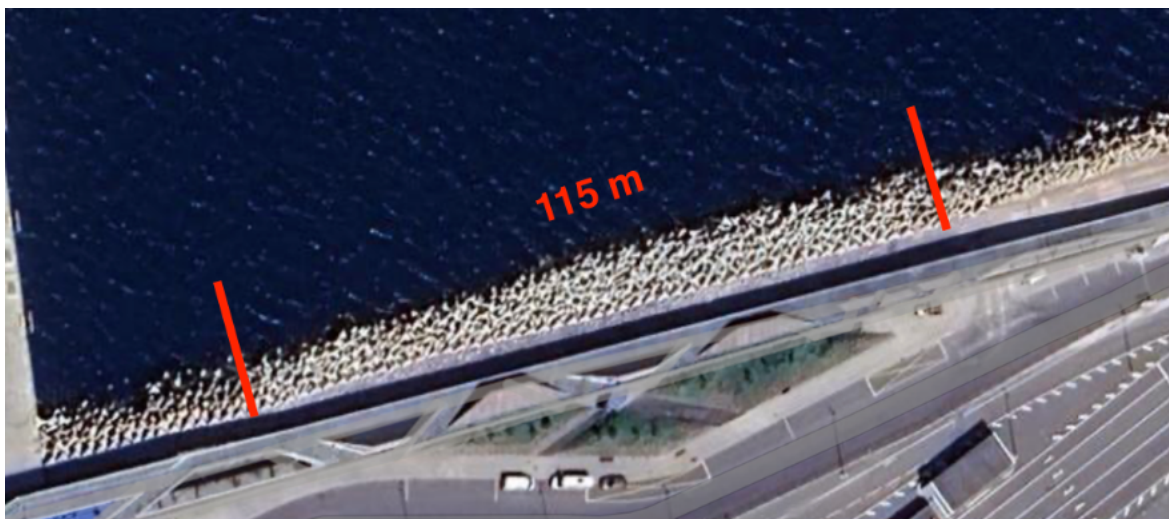
$$\frac{H_s}{\Delta * D_{n50}} = \frac{2.5}{1.65 * 1.16} = 1.3$$

Stabiilsus on tagatud!

Nõlva kaitsekiht tagatakse kahe kihina. Esimene kiht kivikotte paigaldatakse nõlvale üksteise kõrvale. Teine kiht paigaldatakse astmeliselt nõlva ette. Minimaalne kaitsekihi paksus 1,16 meetrit on igal juhul tagatud.

5. E HITUSTE GEVUSE JUHTIMINE: VANASADAMA KALDAKINDLUSTUSE REKONSTRUEERIMINE

Lõputöö jaoks valiti kaldakindlustuse projekteerimine ja ehitustegevuse analüüs Tallinna Vanasadama kruisikaide lähedusse põhjusel, kus töö autor puutus esmaselt kokku ehitusdokumentatsiooniga ning ehitusega üldiselt. Kuna rekonstrueerimise ajal ei puutunud töö autor igapäevaselt antud objektiga kokku, otsustati analüüsida erinevaid juhtimise aspekte ning võimalusi kalda kaitsmiseks nüüd, kus rekonstrueerimistööd on ammu lõpetatud. Tegemist on 115 m pikkuse lõiguga kruisikaid nr 2 vahetusläheduses kirde suunas. Käesolevas peatükis, mis on suunatud ehitusjuhtimise osale, on kirjeldatud töid alates vana konstruktsiooni eemaldamisest kuni uute, peatükis 4. välja arvutatud konstruktsiooni paigaldamiseni.



Joonis 5.1 Kaldakindlustuse lõik Tallinna Vanasadamal

5.1 Olemasoleva olukorra kirjeldus enne rekonstrueerimistöid

Vaatluse all oleval kaldakindlustuse lõigul oli kaldanõlv eelnevalt erosiooni tõttu tugevalt kahjustada saanud. Kaldajoonest ligikaudu viie meetri kaugusel asub 2021. aastal valminud jalakäijate Kruisipromenaad, mis asub sadamaala pinnast nelja meetri kõrgusel. Kui promenaadiäärset kallast ei oleks rekonstrueeritud, oleks praeguseks ajaks tõsine oht konstruktsiooni säilimisel. 2022. aasta kevadel tehtud fotol, vt foto 5.1, on näha, et kalda aluspind on merre varisenud ning kaitsekihina kasutatavad tetrapoodid on vajunud merre, mis on toonud kaasa konstruktsiooni ebakorrapärasuse ja lainete kulutavale jõule vastupanu vähenemise. Mõned suuremad tormid ning

kaldanõlv võinuks olla taandunud kruisikai promenaadi toetavate postideni ning tagajärjed katastroofilised.



Foto 5.1 Olemasolev olukord enne rekonstrueerimistööid, erakogu

5.2 Projektlahendus

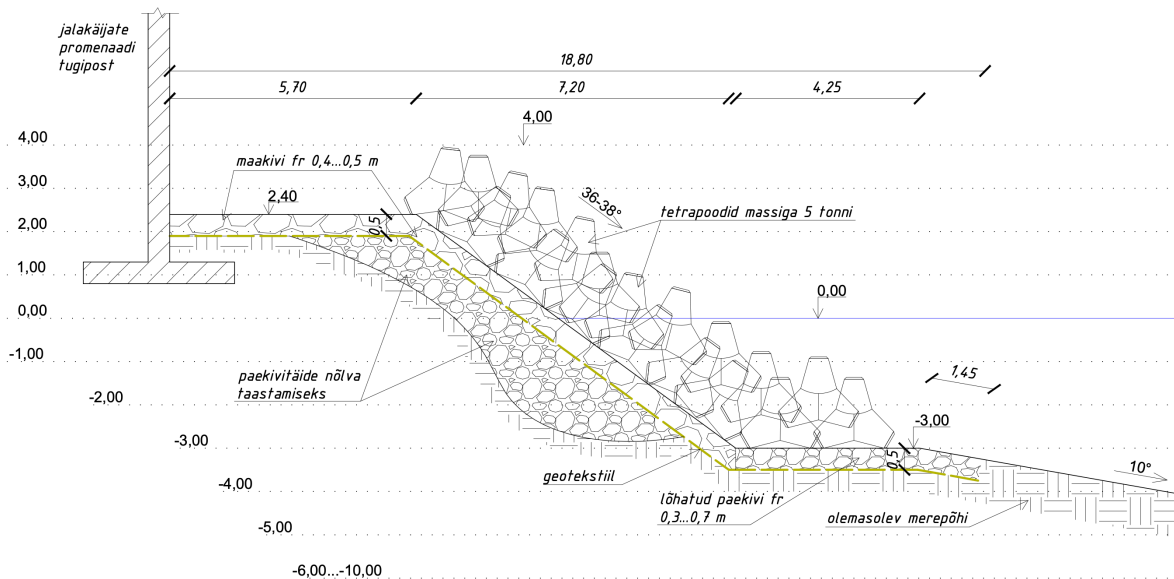
Käesolevas lõputöös lahendatakse kaldakindlustuse kõige ülemine, kaitsev kiht järgmiste materjalide ja materjalide kombinatsioonidega:

- 1) Tetrapoodid massiga 5t, betoon – C35/45, XC4+XS3+XF4/KK4, nõlval aluspinnaks graniitkivid läbimõõduga 400...500 mm, kihi paksus 400 mm, platool paekivid läbimõõduga 300...700 mm, kihi paksus 500 mm,
- 2) Fiibervõrkkattega kivikott täidetuna paekillustikuga fraktsiooniga 32...64 mm,
- 3) Fiibervõrkkattega kivikott täidetuna graniitkillustikuga fraktsiooniga 32...64 mm,
- 4) Kyowa fiibervõrkkattega kivikott täidetuna purustatud betoonist betoontükkidega fraktsiooniga 50...100 mm,

Kaitsekihi alla jäävate kihtide informatsioon ning paigalduse meetodika on välja toodud täpsemalt peatükis 5.3 Ettevalmistavad tööd.

5.2.1 Projektlahendus kasutades tetrapoode

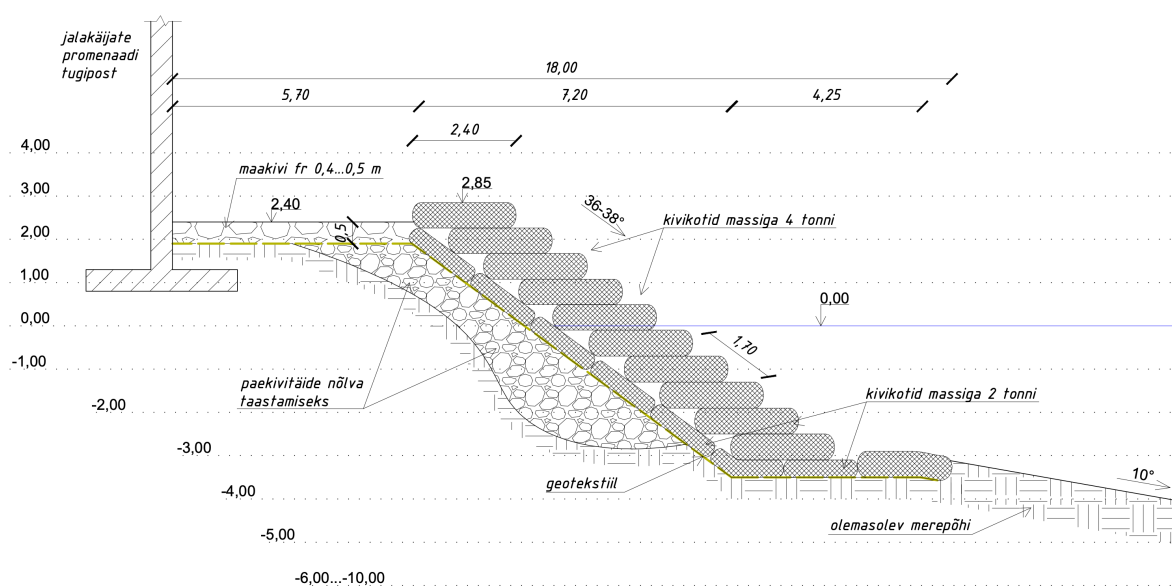
Kogu kaldakindlustuse ristlõige on välja toodud joonisel 5.2. Varisenud nõlv täidetakse ning antakse uus kuju paekividega fraktsiooniga 300...700 mm. Seejärel paigaldatakse geotekstiil ehk filterkiht, mille peale paigaldatakse nõlvale filterkihi ja tetrapoodide vahekihtiks maakivide kiht. Veepoolne osa täidetakse paekividega, mille peale paigaldatakse tetrapoodid. Vahekihti geotekstiili ja tetrapoodide vahel on vaja juba selle tõttu, et tetrapoodide jalad võivad suurema punktkoormuse juures geotekstiili kahjustada. Tetrapoodid paigaldatakse vastavalt arvutustele peatükis 4.4.1 kahes kihis.



Joonis 5.2 Kaldalõige kasutades tetrapoode, täisjoonis vt Lisa 1

5.2.2 Projektlahendus kasutades täidetud kivikotte

Kuna aluspinna konstruktsioon jääb samaks kuni geotekstiili- ehk filterkihini, siis muudatused toimuvad vaid konstruktsiooni pealmises osas. Nõlvale pole enam vaja paigaldada graniitkivi kihti ja ka vees oleva platoo osale puudub vajadus eraldi paekivi kihi paigaldamiseks. Täidetud kivikotid paigaldatakse selliselt, et 1. kiht kopeerib nõlva kallet ning paigaldatakse nõlvale, teine kiht aga paigaldatakse astmeliselt nõlva ette. Selliselt on tagatud nõlva stabiilsus. Täpsemalt on paigaldustehnika välja toodud peatükis 5.4.2.



Joonis 5.3 Kaldalõige kasutades täitematerjaliga täidetud kivikotte, täisjoonis vt Lisa 2

5.3 Ettevalmistavad tööd

Kuna töö põhiosa keskendub kaldakindlustuse ehitusele, siis arvutustes ei kajastata olemasoleva, lagunenud kaldakindlustuse osade demonteerimist ning lammutust. Siiski tuuakse antud peatükis välja tööde põhimõtteline järjekord demonteerimistööde iseloomust, et rekonstrueerimisest tekiks tervikpilt.

Fotol 5.1 on näide objekti seisukorrast enne tööde algust. Fotolt on näha, et vana konstruktsioon asub jalakäijate promenaadile väga ligidal, kohati on vaba ruum liikumiseks kõigest 2-3 meetrit. Seega, alustatakse liikumistee puhastamisega tetrapoodidest selliselt, et vaba liikumistee jääks vähemalt 5,8 meetrit. Selleks kasutatakse roomikekskavaatorit kaaluga 50 tonni, tetrapoodid tõstetakse tõsteaasadest kasutades konksu ekskavaatori noole küljes ning elemendid viiakse tööde tsoonist eemale ettenähtud laoplatsele.

Kui vajalik ligipääsutee laiusega 5,8m on saavutatud, uus täitematerjal nõlvale paigutatud, tuuakse objektile roomikkraana vt ptk 5.4.1, millega alustatakse kaldal, nõlval ning vees olevate tetrapoodide välja tõstmist. Roomikkraanaga tõstetakse tetrapoodid ligipääsuteele, kus ekskavaatori abiga teisaldatakse tetrapoodid kaugemale laoplatsile. Vette kukkunud tetrapoodide kätte saamiseks kasutatakse tuukrite abi: tuukrite abiga paigaldatakse tõstekonks tetrapoodide tõsteaasa ning element tõstetakse veest välja. Kuna eelnev konstruktsioon on kokkuvarisenud ja tetrapoodide tõsteaasad saanud kohati kannatada, kasutatakse sellises olukorras tõstmiseks lint-troppe, vt Foto 5.2. Tuukrid mässivad tetrapoodide jalgade ümber lint-tropi ning tetrapood tõstetakse ohutult veest välja.



Foto 5.2 Lint-tropp [17]

Pika, 22 meetrise noolega ekskavaatoriga Hitachi 350 kaevatakse veest välja vana täitepinnas, mis on nõlvalt merre varisenud, ning merepõhi puhastatakse pehmest pinnasest.

Kalda nõlv taastatakse täitematerjaliga, antud juhul paekividega fraktsiooniga 300...700 mm.

Nõlvale ja kaldaäärsele alale laotatakse geotekstiil. Geotekstiil paigaldatakse kasutades pika noolega ekskavaatorit – geotekstiili merepoolne serv seotakse armatuurvarda külge ning asetatakse ekskavaatori kulpi. Geotekstiil vajub aeglaselt raskuse tõttu merepõhja, vt foto 5.3. Geotekstiili paigaldamine kasutades ekskavaatori abi. Seejärel kaetakse geotekstiil õhukese kihiga täitematerjaliga, et lained geotekstiili koheselt kokku ei suruks. Geotekstiili paanid paigaldatakse vastavalt nõuetele teineteise suhtes ülekattega.



Foto 5.3 Geotekstiili paigaldamine kasutades ekskavaatori abi, erakogu.

Seejärel alustatakse kaldakindlustuse kõige ülemise kaitsekihi paigaldamisega, mille tööd on välja toodud peatükis 5.4.

5.4 Tööde tehnoloogiline järjekord

5.4.1 Kaldakindlustus raudbetoonist tetrapoodidega

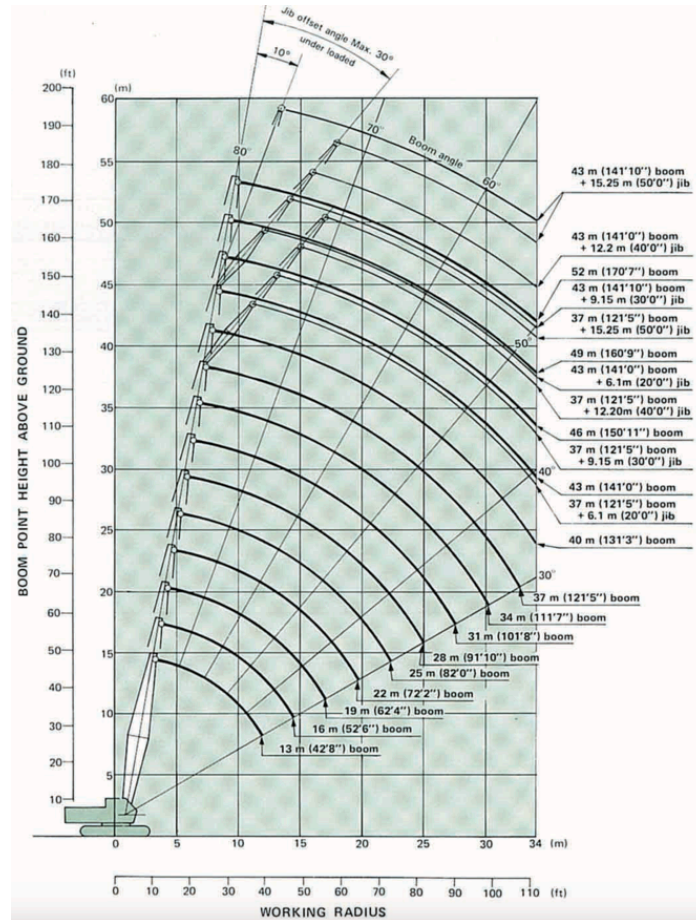
Järgnevalt tuuakse välja ehitustehnoloogiline järjekord tööde teostamiseks kasutades projektlahendust raudbetoonist tetrapoodidega.

Kuna kruisipromenaadi ja uue kaldanõlva vaheline ala on 6 meetrit lai, saab kasutada materjalide sh. tetrapoodide tõstmiseks roomikkraana. Seega puudub vajadus kasutada ujukraanat, mille töötund on keskmiselt 5 korda kallim kui tavaline roomikkraana, mida saab opereerida maismaalt.



Foto 5.4 Kasutatav roomikkraana Hitachi 180-2 50T, erakogu

Masina tõstegraafikutelt saab välja lugeda, kui pikka masti tõstetööde teostamiseks on vaja. Kuna ligipääsutee tsentrist kuni viimase kivikoti/tetrapoodini on arvestuslikult 17 meetrit, valitakse masti pikkuseks 25 meetrit. Tõsteraadiuse 18m korral 47 kraadise nurga all, on kraana tõstevõime 5,4 tonni. Sellest piisab 5 tonnise massiga tetrapoodide ja ka 4 tonnise massiga täidetud kivikottide tõstmiseks. Valitud kraana tõstegraafikud on välja toodud joonistel 5.4 ja 5.5.



Joonis 5.4 Roomikkraana Hitachi 180-2 tõstegraafik [18]

Boom length	Working radius		Boom angle	JIS rating
	m (ft in)	m ft in		degree
25.0 (82'0")	5.7	18' 8"	79.50	26 400
	6.0	19' 8"	78.80	24 100
	7.0	23' 0"	76.45	19 100
	8.0	26' 3"	74.07	15 700
	9.0	29' 6"	71.67	13 400
	10.0	32'10"	69.23	11 700
	12.0	39' 4"	64.21	9 150
	14.0	45'11"	58.97	7 500
	16.0	52' 6"	53.42	6 300
	18.0	59' 1"	47.42	5 400
	20.0	65' 7"	40.76	4 700
	22.0	72' 2"	33.01	4 100
22.7	74' 6"	30.00	3 900	

Joonis 5.5 Roomikkraana Hitachi 180-2 tõstegraafik [18]

Peale ettevalmistustöid, mis on kirjeldatud peatükis 5.3, alustatakse tetrapoodide paigaldamisega veealusele platoole, ehk kaldast kõige kaugemale, paigaldamissuunaga

kalda poole. Allpool veepiiri paigaldatud tetrapoodide lahtihaakimiseks kasutatakse distantsilt avatavat konksu, vt foto 5.5. Antud mehhanismi kasutamisel puudub vajadus kasutada tuukrite abi ning konksu saab kaldalt avada abitööline või ka kraanajuht. Konksu mehhanism on ühendatud köiega, mida hoiab kaldalt tööline. Kõit tõmmates avaneb lukustusmehhanism.



Foto 5.5 Kaugelt avatav konks [19]

Kuna tööde lõppedes jääb viimase tetrapoodi ja promenaadi postide vahemaa väiksemaks ligikaudu pool meetrit, kui roomikkraana saaks liikuda, tuleb tööd teostada liikudes ühes suunas – kõik tööd tuleb lõpetada nii vee all kui ka nõlval suunas Tsoon 1...Tsoon 6, vt joonis 5.6. Selleks aga tuleb pidada täpset arvestust paigaldatud tetrapoodide arvu suhtes, et ühte tsooni ei satuks liiga vähe ega liiga palju elemente. Vajalik tetrapoodide arv tuuakse välja peatükis 6.1.3.

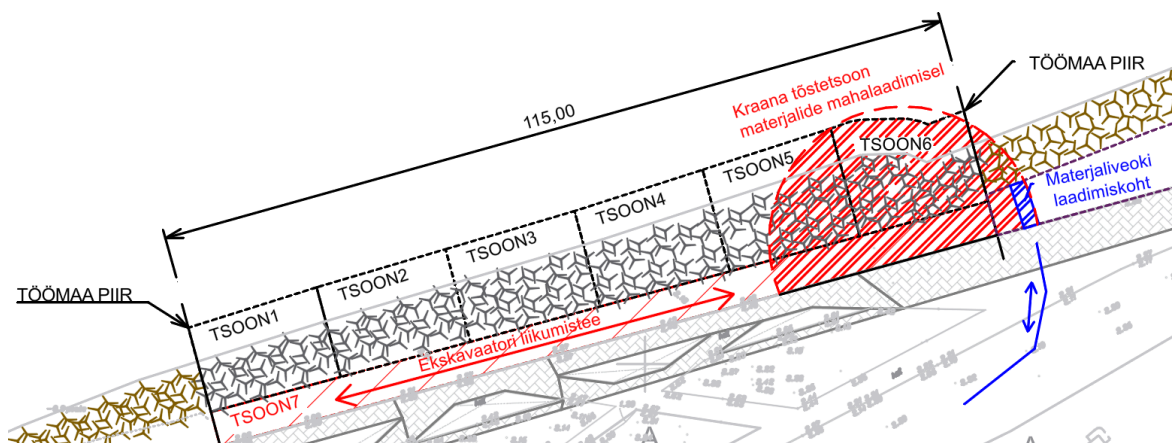
Käigutee viimistletakse viimasena maakividega fraktsiooniga kuni 500 mm. Maakivid laotatakse tihedalt üksteise vastu, tühimikud täideti väiksema fraktsiooniga kividega. See töö tehakse viimasena, kui tetrapoodide paigaldamine on lõppenud ning tõstetööd lõpetatud.

Töökorraldus ning asukoha plaaniline skeem on välja toodud joonisel 5.6. Kuna töömaale pääseb vaid ühest väravast kruisipromenaadi alt (joonisel Tsoon 6 läheduses

olev ligipääsutee), siis arvestades kohalikke olusid ja masinate pöörderaadiuseid on selge, et 12,5 meetrise haagisega poolhaagisega veokid ei pääse täies ulatuses töömaale. Kallurautodega aga probleeme pole. Seega on võimalik töömaale võimalikult lähedale paigalduskohale tuua kallurautoga kõik täitematerjalid, misjärel saab kogu materjali koheselt kasutada nõlva aluspinna tühimike täitmiseks.

Seega, tekib probleem tetrapoodide töömaale tarnimisega, kuna poolhaagisega veok ei pääse täielikult töömaale ning osa haagise platvormist jääb jalakäijate promenaadi alla, kus tõstetööde teostamine kraanaga on võimatu. Kuna teist mõistlikku varianti siiski pole, tuuakse ühe veokiga kohale 5 tetrapoodi 6 asemel ning haagise eesmise osa 2 meetrit pinda jääb iga sõiduga kasutamata. Arvestades tetrapoodide kogumahtu, tekib sellest arvestatav lisakulu, millega tuleb arvestada juba eelarve ning ajagraafiku koostamisel.

Roomikkraanaga tõstetakse raudbetoonist konstruktsioonid haagiselt maha, kraana taha kaldapealsele liikumisteele. Samal ajal, kasutades aega ja ressursi võimalikult efektiivselt, liigutab ekskavaator ette tõstetud tetrapoodid vajalikku asukohta, ehk tsooni, kuhu hiljem roomikkraana alustab elementide tõstmisega. Kõige kauem võtab aega tsooni nr 1 tetrapoodide paigaldamine ning kõige vähem tsooni nr 6, kuna vahemaad elementide liigutamisel on tsooni nr 1 kõige suuremad, vt joonis 5.6 Töömaa skeem tetrapoodide mahalaadimisel ja paigaldamisel.



Joonis 5.6 Töömaa skeem tetrapoodide mahalaadimisel ja paigaldamisel

5.4.2 Alternatiivlahenduse ehitustehnoloogiline tööpõhimõte

Rakendades Vanasadama loodeosa kaldakindlustuseks valitud asukohas ja lõigus Kyowa kivikottide lahendust, asendatakse esialgse projektlahenduse järgi

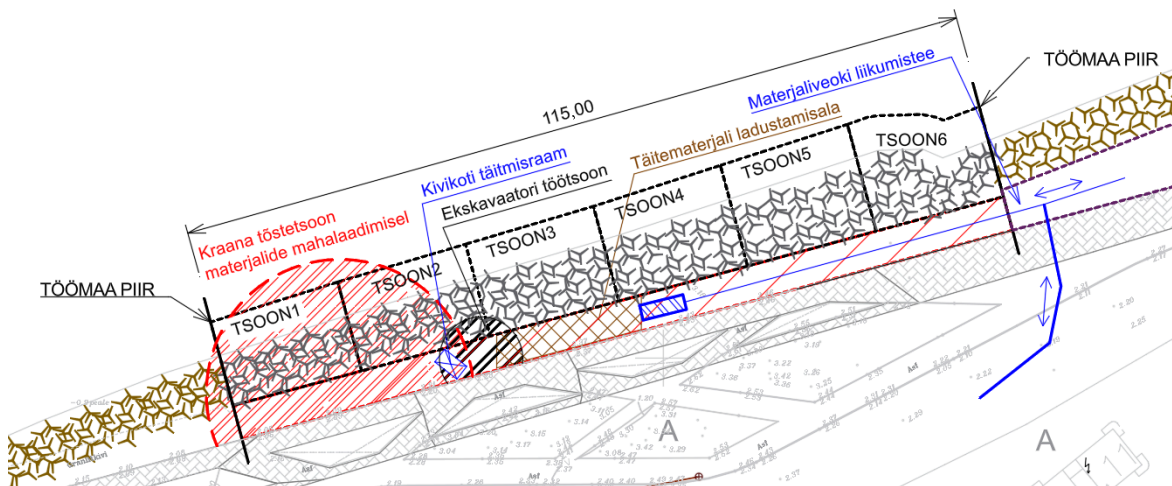
kaldakindlustuse ülemine kaitsev kiht täitematerjaliga täidetud fiibervõrkkattega kivikottidega.

Kui aluspinna ehitus jääb enamasti samaks, vt ptk 5.3 Ettevalmistatavad tööd, tuleb töömaa korraldust ning planeerimist muuta, et uus lahendus oleks võimalikult ökonoomne ressursside kasutamise poolest. Lisaks on suurem erinevus selles, et kivikoti valmistatakse ette objektil, kuna on vähetõenäoline, et mõnest karjäärist või mõnelt muult laoplatsil on võimalus teise töövõtja juures üles seada kohalik laadimispunkt.

Kuna arvutuslikult piisab asukohas kasutada maksimaalse massiga 4 tonniseid kivikotte, kasutatakse paigaldamiseks sama tehnikat, mis varasemalt kirjeldatud – kivikottide tõstmiseks ja paigaldamiseks kasutatakse roomikkraanat, kivikottide täitmiseks nüüd aga roomikekskavaatorit.

Töö iseloomu muutumisest sõltuvalt, jaotatakse töömaa osadeks, kus on järgmised töötsoonid:

- Täitematerjali ladustamisala ehk laoplats;
- Kivikottide täitmise ala;
- Kraana töötsoon – kivikoti paigaldamine;



Joonis 5.7 Töömaa skeem tetrapoodide mahalaadimisel ja paigaldamisel

Kirjeldatud lahendus on kõige efektiivsem järgmiste aspektide suhtes:

- 1) Töömaa on kasutatud maksimaalselt ning tehnika liikumine on minimaalne;
- 2) Puudub vajadus kasutada lisa laoplatši valminud kivikottidele;
- 3) Töötsoonid ei kattu ning iga tööloik saab toimida iseseisvalt.

Kuna 115m pikkune kaldakindlustuse lõik on konstruktiivselt tsooniti identse läbilõikega, liigutakse paigaldamisega alates Tsoonist 1 järjest kuni Tsooni 6 lõpuni, vt joonis 5.7. Täitematerjali, mille valik on kirjeldatud peatükis 6, transport toimub läbi kitsa värava, mille kaudu pääseb kaldaalale. Kivikoti täitematerjali transpordiks kasutatakse kallureid, ehk kallurveokeid, mis laadivad täitematerjali iseseisvalt laoplatšile ning puudub täiendav vajadus tehnika kasutamiseks kalluri kastide tühjendamiseks. Oluline on aga väga täpselt planeerida kasutatavate materjaliveokite koormaid, et laoplatšil ei tekiks üleliia materjali. Antud aspekt muutub seda tähtsamaks, mida lähemale jõuab ehitusprotsess tsoonini nr 6, kuna veokite sissepääsuvärv asub tsooni 6 vahetusläheduses. Arvutus vajaliku täitematerjali koguse kohta on välja toodud peatükis 6.

6. MATERJALIDE MAHUARVUTUSED NING MAKSUMUSED

Järgnevat alapeatükkides tuuakse välja kasutatavad kaldakindlustuse kaitsekihi mahuarvutused ning materjalide maksumused koos omavahelise võrdlusega.

6.1 Mahu- ja finantsarvutused tetrapoodide kasutamisel

Lähtuvalt kaldakindlustuse konstruktsioonist ning kasutades pealmise kihina raudbetoonist tetrapoodidega lahendust, tuleb arvestada asjaolu, et nõlvale tuleb enne tetrapoodide paigaldamist paigaldada ka 400...500 mm läbimõõduga maakivide kiht, ning nõlva jalamil, platoo osal paekividest kiht läbimõõduga 500 mm. Kõikide eeltoodud materjale arvestatakse ka tööde maksumuse ning ajakulu arvutusel.

6.1.1 Maakivid

Lähtudes punktis 6.1.1 kirjeldusele, tuleb geotekstiili ja tetrapoodi vahele paigaldada tugevast täitematerjalist tasanduskiht, põhjusel, et tetrapoodide jalad võivad ilma tasanduskihita lõhkuda geotekstiili ning konstruktsiooni stabiilsus väheneb. Lisaks hoiavad kivid geotekstiili omal kohal ja on lisakaitse eest.

Arvutuslikult nõlvale kuluv maakivide maht arvutatakse tavalise riskülikulise ala pindala valemiga, kus üks mõõde on nõlva pikkus mõõdetuna vastavalt reaalsele kaldenurgale ning teine nõlva laius, 115 meetrit. Järgnevalt, tabelis 6.1, on välja toodud nõlvale iseloomulikud parameetrid.

Tabel 6.1 Nõlvale kuluv maakivide maht

	Arvväärtus	Ühik
Nõlva pikkus	9,1	m
Nõlva laius	115	m
Kihi paksus	0.4	m
Pindala	1047	m ²
Ruumala	419	m ³
Puistematerjali mahumass	1,5...1,6	t/m ³
Maht	630	t

Maakivide mahumassiks võetakse 1,5 t/m³.

Arvestades turuhindasid viimase aasta jooksul, jääb maakivi tonni hind koos transpordiga Tallinna lähipiirkonnast (35km raadiuses) suurusjärku 25 eurot/tonn.

Seega saame arvestada maakividega ligikaudse maksumusega $630 * 25 = 15\,750,00$ eur.

Kogumaksumus materjalidele ning paigaldusele on välja toodud peatükis 6.4 Finantstabelid.

6.1.2 Paekivid

Paekivid paigaldatakse vaid veealusele platoo osale kasutades pika noolega ekskavaatorit. Kihi läbimõõtu ja paigaldatud kivide pinna ühtlust kontrollitakse ekskavaatori kulbiga. Ekskavaatori noolel on veekindla värviga eelnevalt märgitud mõõteskaala. Kui kopajuht asetab kulbi vastu merepõhja, saab tuletada juba paigaldatud materjali kihi paksust lähtuvalt veetasemest.

Platoole kuluvate kivide arvutus toimub tavalise ristkülikukujulise pindala valemitega, arvestades materjali erikaalu. Vajalikud parameetrid ja arvutatud mahud on välja toodud tabelis 6.2.

Tabel 6.2 Paekivide mahud platoo osale.

	Arvväärtus	Ühik
Platoo pikkus	5,7	m
Platoo laius	115	m
Kihi paksus	0.5	m
Pindala	655,5	m ²
Ruumala	328	m ³
Materjali erikaal	1,4...1,5*	t/m ³
Maht	460	t

*Paekivide mahumassiks võetakse 1,4 t/m³.

Näites võetakse aluseks Väo Paas OÜ hinnad fraktsiooniga 300...700 lõhatud paekividele. Sellise materjali ühe tonni maksumus on 7 eurot/tonn [20].

Arvestame paekivide maksumusega $460 * 7 = 3\,220,00$ €+km.

Arvestades materjalide veohinda 90€+km ühe veo kohta, saame reise koguarvuks 30 tonniste koormate korral $460/30 = 16$ koormat. Veo maksumus avaldub $16 * 90 = 1440,00$ eur.

Kokku maksumus: $3\,220,00 + 1\,440,00 = 4\,660,00$ eur.

6.1.3 Tetrapoodid

Tetrapoodide mahuarvutus saab erinevate allikate põhjal toimuda sõltuvalt tetrapoodi suuruselt ja kujust erinevalt. Rolli mängib ka disain, kuidas lahendada nõlva ülemine piir – kas viimane rida tetrapoode paigaldada kõik ühel joonel ja ühes suunas, või selliselt, et oleks tagatud maksimaalne tihendus elementide vahel.

Käesolevas töös on mahuarvutuse aluseks võetud reaalne paigalduskeem Tallinna Sadam AS territooriumil, käesoleva projekti vahetusläheduses.



Foto 6.1 Tetrapoodide paigutus AS Tallinna Sadam kruisikai nr 1 vahetusläheduses, erakogu

Mõõtes kohapeal tetrapoodide asetust kalda nõlval, on 16m² alale paigaldatud keskmiselt 10-13 tetrapoodi. Konstruktsioon on igas reas erinev, kuna tetrapoodid paigaldatakse juhuslikult. Antud näite alusel arvutame tetrapoodide arvu.

Tetrapoodid kaetakse nõlval kogupikkuse juures ning platoo osal arvestatakse tetrapoodide paigaldamine kahes reas, ehk kaetav ala platool on nõlva jalamilt mere poole 4 meetrit. Kogu ala suurus 115 m lõigu katmiseks tetrapoodidega avaldub:

$$S_{tetr} = (9,1 + 4) * 115 = 1507 \text{ m}^2$$

Arvestuslikult paigaldatakse 16 m² alale 12 tetrapoodi, arvutame kogu alale vajaliku tetrapoodide arvu:

$$x_{tetr} = \frac{1507}{16} * 12 = 1130 \text{ tk}$$

Ühe tetrapoodi ostuhind koos transpordiga töömaale samal projektil oli aastal 2022 ligemale 470 eurot, ilma käibemaksuta. Need hinnad pole aga tänasel päeval kehtivad ning antud lõputöös võetakse arvutusteks ühe 5 tonnise massiga tetrapoodi ühikhinnaks koos transpordiga töömaale 600 eurot. Antud hinna osas on konsulteeritud ka BauEst OÜ sadamaehituse osakonnaga, kes on käesoleva aasta jooksul koostanud sadamaehituse projektidele eelarveid Tallinna Reidi piirkonnas.

Tetrapoodide maksumus koos transpordiga töömaale kujuneb:

$$1\ 130 * 600 = 678\ 000 \text{ €}$$

6.2 Mahu- ja finantsarvutused täidetud kivikottide kasutamisel

Kasutades Kyowa kivikotte, tuuakse näited kolme erineva täitematerjaliga täidetud kivikottide kohta. Valitud täitematerjalideks on:

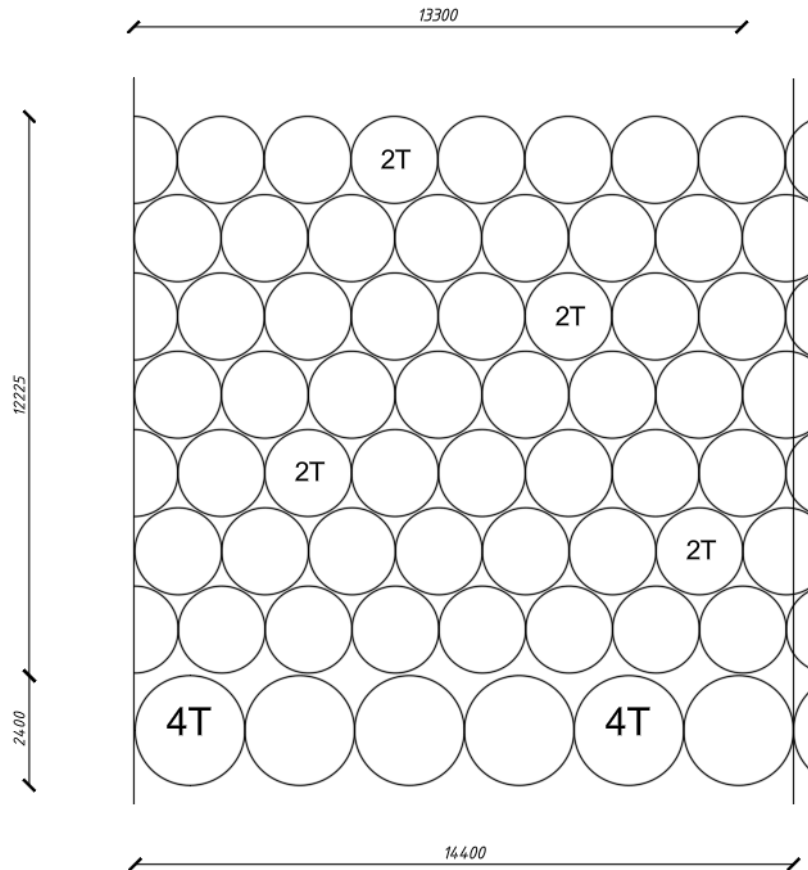
- Paekillustik, fraktsiooniga 32...64 mm,
- Graniitkillustik, fraktsiooniga 32...64 mm,
- Purustatud betoontükid, fraktsiooniga 50...100mm.

Materjalid on valitud selliselt, et neid oleks võimalik võrrelda lisaks finantsilest aspektist ka eluea, eksploatatsiooni ning keskkonna vaates. Täpsem info iga materjali omadustest on välja toodud peatükkides 6.2.2...6.2.4.

6.2.1 Kyowa kivikotid

Lähtuvalt peatükkides 4.4.2 arvatud vajalikule kaitsekihi paksusele ja 5.4.2 kirjeldatud ehitustehnoloogilisele tööde järjekorrale, arvutatakse esmalt vajaminev kivikottide arv ilma täidematerjalideta.

Nagu joonisel 5.3 kirjeldatud, kasutatakse konstruktsioonis kahe erineva suurusega kivikotti, massiga 2 tonni ja 4 tonni. Tabel 3.1 kirjeldab ühe kivikoti ruumala ning katvat pindala. Kasutades antud infot ning projekteerimise osas arvatud vajaliku kaitsekihi paksust, leitakse näidisjoonise abil, kui suure osa nõlvast ja platoost katavad täitematerjaliga fiibervõrkkattega kivikotid. Nõlvaosa pikkus muutub 0,5 m pikemaks, kuna filterkihi ning kivikottide vahele puudub vajadus tekitada lisaks tasandus- ja eralduskihti maakivide ja paekividega, nagu seda kasutatakse tetrapoodidega lahendusel.



Joonis 6.1 Kivikottide arvutuse abijoonis

Kasutades joonist 6.1 joonestatakse välja kogu kivikottidega kaetav ala. 2 tonnise massiga kivikottid paigaldatakse nõlvale kokku 7-s reas, igas reas on 115 meetrise lõigu korral 61 kivikotti. Kokku teeb see 427 tk 2T kivikotti. 4 tonnise massiga kivikott paigaldatakse platoole 2T kivikottide ette ning ka astmeliselt paigaldussuunaga ülesse. Platoole asub 1 rida, kus on 48 kotti, astmeliselt paigutatud 4T kivikotte on kokku 10 kihti. Seega on 4T kivikottide kogumaht 528 tk.

Kuna kivikoti kui toote kohta pole avalikult internetis adekvaadset infot nende maksumuse osas, pöördus lõputöö autor ühikhindade saamiseks Kyowa kivikottide Eesti edasimüüja, EM Infra OÜ poole. EM Infra tegevjuhi Martin Kärneri sõnul jääb 2T kivikoti maksumus vahemikku 150...180 €/kott ning 4T kivikott 250...280 € vahele.

Seega, arvestuslikult nõlvale ning platoole kuluvate kivikottide maksumus on vastavalt:

2T kivikottid – $427 * 180 = 76\,860$ eur,

4T kivikottid – $528 * 280 = 147\,840$ eur.

Nagu peatükis 3.3.1 kirjeldatud, tuleb kivikottide täitmiseks kasutada täitmisraami. Raami kasutamine tagab korrektse suuruse täitematerjali hulga kasutuse ning kivikott moodustab ühtlase ning ettenähtud vormi ning kuju. Kuna tegu on spetsiifilise tootega, mille kohta info internetis puudub, pöördui lõputööga seoses taaskord EM Infra OÜ poole, kelle sõnul on täitmisraami kui toote täpne maksumus mitmetest variantidest ja disainitüüpidest väga erinev. Analoogsete raamide, mis on ka näha fotol 3.1, hinnad jäävad vahemikku 1500...2500 eurot sõltuvalt raami suurusest. Iga kivikoti suuruse, ehk 2, 4 ja 8 tonnise kivikoti täitmisel tuleb kasutada õige suurusega raami. Antud töös võetakse 2 tonnise kandevõimega kivikottide täitmisraami maksumuseks 1500 eurot ning 4 tonnise kandevõimega kivikottide täitmisraami maksumuseks vastavalt 2000 eurot.

6.2.2 Paekivikillustikuga täidetud kivikotid

Esimese näitena võetakse kivikoti täitematerjaliks paekillustik fraktsiooniga 32...64 mm. Väiksem fraktsioon tagab suurema eluea kivikotile endale, kuna täitematerjal on ümaram ning esineb vähem teravaid servasid ja tippe kui näiteks lõhatud paekivil. Mida väiksem on täitematerjali fraktsioon, seda ühtlasemalt ja tihedamalt paigutub kivikott süsteemina nõlvale. Tihedam struktuur tagab ka väiksemad tühimikud, kuhu vesi saaks vahele tungida. Lisaks on antud konstruktsiooni korral eksploatatsiooni juures tähtis asjaolu, kus aluspinna vajumisel ei teki vajadust koheselt konstruktsiooni parandada. Kivikott imiteerib maapinna kuju ning kohandab oma vormi lähtuvalt aluspinnast. Seda ei saa aga öelda tetrapoodide kohta, vt ptk 2.2.1.

Miinuseks saab aga tuua siinkohal paekivi nõrgema külmakindluse, mis kujutab endast ohtu just konstruktsiooni veepiiril ja veepiirist kõrgemale jäävale osale. Jäätudes vee ruumala teadupärast suureneb ning killustiku poorides olev vesi purustab olemasolevaid sidemeid, mis toob endaga kaasa killustiku murenemise. Veepiirist allpool, kus jääd ei ole, ei teki paekivikillustiku osas selliseid probleeme.

Mahuarvutusteks kasutatakse puistematerjali erikaalu. Paekillustiku erikaal on 1,3...1,4 T/m³ [21]. Vastavalt tabelile 3.1 on 2T kivikoti mahutavus 1,24 m³ ning 4T kandevõimega kivikotil vastavalt 2,5 m³.

Leiame ühe kivikoti täitmiseks vajamineva paekivikillustiku koguse kasutades materjali erikaalu:

$$m = V * \gamma \quad (6.1.)$$

kus m – kogumass, t,

V – ruumala, m^3 ,

γ – materjali erikaal, t/m^3

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti paekillustiku mass:

$$m_{2T} = V * \gamma = 1,24 * 1,4 = 1,74 \approx 1,8 t$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti paekillustiku mass:

$$m_{4T} = V * \gamma = 2,5 * 1,4 = 3,5 t$$

Paekillustiku kogumaht kõikide kasutatavate kivikottide täitmiseks:

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti paekillustiku mass:

$$m_{2T,kogu} = 427 * 1,8 = 768,6 t \approx 770 t$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti paekillustiku mass:

$$m_{4T,kogu} = 528 * 3,5 = 1 848 t \approx 1850 t$$

$$m_{kogu} = 770 + 1 850 = 2 620 t$$

Seega, kogu projekti kivikottide täitmiseks on vaja paekivikillustikku mahus 2 620 tonni.

Finantsarvutustes võetakse fraktsiooniga 32-64 paekillustiku ühe ühiku ehk 1 tonni hinnaks 14,04 eurot, ilma käibemaksuta. Hinnad võetakse *isekallur.ee* veebilehelt. Materjalid tuuakse objektile kallur poolhaagisega, kuhu on võimalik peale laadida maksimaalselt 30 tonni materjali. Ühe koorma transpordihinnaks tuleb ligikaudu 89,7€+km.

Kokku on kivikottide täitmiseks vaja arvutuslikult 2 620 tonni paekillustikku, mis teeb materjali kogusummaks $14,04 * 2 620 = 36 784,80$ eurot, millele tuleb liita transpordi hind arvestusega, et iga kohale viidud koorem on mahuga 30 tonni. See teeb kokku 88 reisi, kogumaksumusega $88 * 89,7 = 7 893,60$ eurot.

Seega, paekillustikust kivikoti sisu koos materjali transpordiga töömaale moodustab kokku $36 784,80 + 7 893,60 = 44 678,40$ eurot, ilma käibemaksuta.

Kui materjal on töömaale saabunud, tuleb materjal kivikotti tõsta. Selleks kasutatakse peatükis 5.4.2 kirjeldatud tööskeemi, kus töötavad paralleelselt kaks masinat koos

juhtidega, lisaks üks abitööline, kes valmistab ette kivikotte ning asetab need täitmisraami.

Tööjõu- ning tehnikakulu arvutused koos tööde teostamise põhimõtetega on täpsemalt kirjeldatud peatükis 6.3.

6.2.3 Graniitkillustikuga täidetud kivikotid

Võrdluseks paekillustikule kasutatakse teise näitena graniitkillustikuga täidetud kivikotte. Graniitkivi on suurema tihedusega, kõrge kareduse ning suurema pinna kulumiskindlusega materjal kui paekivi. Lisaks on graniitkillustik väiksema veeimavusega, mis tagab materjali suurema külmakindluse. See tähendab aga projekti mõistes pikemat eluiga, ehk kivikotte ei tule teatud aja tagant välja tõsta ning uuesti täita. Lisaks annab graniitkivi erinev värvus atraktiivsema välimuse.

Graniitkivikillustiku keskmine mahukaal on $1,6 \text{ t/m}^3$. Mahuarvutus toimub sama põhimõtte alusel, nagu eelmises peatükis paekivikillustikuga:

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti graniitkillustiku mass:

$$m_{2T} = V * \gamma = 1,24 * 1,6 = 1,98 \approx 2 \text{ t}$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti graniitkillustiku mass:

$$m_{4T} = V * \gamma = 2,5 * 1,6 = 4 \text{ t}$$

Graniitkillustiku kogumaht kõikide kasutatavate kivikottide täitmiseks:

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti graniitkillustiku mass:

$$m_{2T,kogu} = 427 * 2 = 854 \text{ t} \approx 860 \text{ t}$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti graniitkillustiku mass:

$$m_{4T,kogu} = 528 * 4 = 2112 \text{ t} \approx 2120 \text{ t}$$

$$m_{kogu} = 860 + 2120 = 2980 \text{ t}$$

Seega, kogu projekti kivikottide täitmiseks on vaja graniitkillustikku mahus 2 980 tonni.

Arvutustes võetakse fraktsiooniga 32-64 mm graniitkillustiku ühe ühiku ehk 1 tonni hinnaks 39,60 eurot, ilma käibemaksuta. Hinnad on saadud betooni- ning täitematerjalide müüja Rudus AS veebilehelt [22]. Materjalid viiakse objektile kallur

poolhaagisega, kuhu on võimalik peale laadida maksimaalselt 30 tonni materjali. Ühe koorma transpordihinnaks tuleb ligikaudu 90€+km.

Kokku on kivikottide täitmiseks vaja arvutuslikult 2 980 tonni graniitkillustikku, mis teeb materjali kogusummaks:

$39,60 * 2\,980 = 118\,008,00$ eurot, millele tuleb liita transpordi hind arvestusega, et iga kohale viidud koorem on massiga 30 tonni. See teeb kokku 100 reisi, kogumaksumusega:

$100 * 90 = 9\,000,00$ eurot.

Seega, graniitkillustikust kivikoti sisu koos materjali transpordiga töömaale moodustab kokku $118\,008,00 + 9\,000,00 = 127\,008,00$ eurot, ilma käibemaksuta.

6.2.4 Betoontükkidega täidetud kivikotid

Viimase täitematerjalina vaadeldakse purustatud betooni, mida saab kasutada kivikottide täitmisel. Antud lahendust pole lõputöö autorile teadaolevalt veel kasutatud, lahendus vajaks edasisteks järeldesteks testimist ning lõputöö järeldestest ei saa lähtuda reaalseste kaldakonstruktsioonide projekteerimisel.

Kivikotte saab täita taaskasutatud betooniga, mis on algselt olnud mõne vana hoone, betoonplatsi vms osa. Eelmise konstruktsiooni raudbetoon purustatakse esmalt lähtekohas hüdrovasara või ekskavaatori lisaseadme – betoonipulbristajaga. Selliselt saadakse suuremad betoontükid, mis on võimalik edasi suunata lõugpurustile vajaliku fraktsiooniga betoontükkide tootmiseks. Kuna hüdrovasara või betoonipulbristaja kasutamine on teise objekti kulu nii ühel kui teisel moel, ei arvestada selle hinda projekti maksumusse. Maksumusse arvestatakse aga lõugpurusti kasutamine.

Näitena võetakse mobiilne kivipurusti Nordbeth LT116 millega on võimalik töödelda nii looduslikke kui ka tehiskivimaterjale, sh. paekivi, maakivi, tellisejätmed ja ka raudbetooni [23]. Kivipurusti magnetseparaator tagab, et materjalis leiduvad metallesemad, ehk selle töö raames betooni armatuurteras, eraldatakse toodetavast täitematerjalist. Antud purustiga on võimalik toota materjali kuni fraktsiooniga 150mm. Kivikoti sisu soovitakse teha betoontükkidega fraktsiooniga 50...100mm.

Sellise lõugpurusti rendihind sõltub suuresti kasutatud päevade arvust, kuid teadaoleva info kohaselt jääb masina ühe töötunni rendi hind 180€+km juurde. Masina tootlikkus

on sõltuvalt materjalist 65-180 t/h. Kuna betooni purustamine ei ole nii aeganõudev kui näiteks graniitkivil, kasutame arvutustes tootlikkuse määra 120 t/h.

Betooni erikaal on 2,2...2,4 t/m³. Arvestades purustatud betoontükke fraktsiooniga 50...100mm, on raske täpset erikaalu antud materjalile anda, kuid tulemus on eeldatavalt paekivikillustikust väiksem, vahemikus 1,2...1,4 t/m³. Arvutustes kasutame betoontükkide erikaalu 1,3 t/m³. Arvutame sarnaselt paekillustikuga ja graniitkillustikuga täidetud kivikottidele mahud:

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti betoontükkide mass:

$$m_{2T} = V * \gamma = 1,24 * 1,3 = 1,6 t$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti betoontükkide mass:

$$m_{4T} = V * \gamma = 2,5 * 1,3 = 3,25 t$$

Betoontükkide kogumaht kõikide kasutatavate kivikottide täitmiseks:

- 2 tonnise kandevõimega kivikoti betoontükkide mass:

$$m_{2T,kogu} = 427 * 1,6 = 683,2 t \approx 690 t$$

- 4 tonnise kandevõimega kivikoti betoontükkide mass:

$$m_{4T,kogu} = 528 * 3,25 = 1 716 t \approx 1 720 t$$

$$m_{kogu} = 690 + 1 720 = 2 410 t$$

Seega, kogu projekti kivikottide täitmiseks on vaja betoontükke mahus 2 410 tonni.

Tulenevalt valitud lõugpurusti eelnevalt määratud tootlikkusele saame arvutada lõugpurusti töötundide arvu vajaliku koguse täitematerjali tootmiseks:

$$t_{purusti} = \frac{2410}{120} \approx 21 h$$

Lõugpurusti rendihind materjali purustamiseks, ilma transpordita kujuneb:

$$H_{purusti} = 21 * 180 = 3 780 €$$

Betoontüki veeimavus on aga suurem, kui tardkivikillustikul. Seega tekib sarnane olukord nagu paekillustikuga, kus veepiirile ja veepiirist ülespoole jääv materjal talviti mureneb – vesi tungib materjali pooridesse ja täitematerjali vahele ning vee jäätudes

purustab betooni olemasolevad, tugevad sidemed. Selleks, et betooni eluiga oleks pikem, peaks betoon olema keskkonnaklassiga XF4, mis võtab vastu kõige rohkem külmumis/sulamistsükleid. Kasutatakse mererajatiste ehitusel, mis asuvad pritsmete tsoonis külmale mõjule avatuna [24]. Betooni taaskasutades on aga antud keskkonnaklassi kriteeriumi täitmise nõue keeruline, kuna see eeldaks, et lammutatav rajatis on samuti keskkonnaklassiga XC4. Sellist konstruktsiooni üldiselt on raske leida ja sellega ei saa lõputööd koostades eeldada. Lammutatakse pigem nõukogudeaegseid hooneid ja rajatise, mille materjali omadusi on raske spetsifitseerida ning seetõttu vajab kasutatav betoon täiendavaid uuringuid sõltuvalt lammutusobjektist, mille alusel saab hinnata betooni kvaliteeti kivikoti materjali kasutamise võimaluseks.

Arvutusteks eeldatakse, et kõnealune lammutusobjekt, kust tarnitakse betoontükke, asub Tallinna linna piires. Veohind on poolhaakega kallurautol keskmiselt 90€+km koorma kohta. Betoontükkide transpordile lähtekohast töömaa platsile kulub arvestuslikult $2410/30 = 81$ reisi, mille maksumus on:

$$81 * 90 = 7\,290,00 \text{ €}$$

6.2.5 Kivikottide täitematerjali võrdlus

Tabelis 6.3 on välja toodud kolme erineva täitematerjaliga täidetud kivikottide materjali mahud.

Tabel 6.3 Kivikoti täitematerjali mahud

	Paekillustikuga täidetud kivikott	Graniitkillustikuga täidetud kivikott	Betoontükkidega täidetud kivikott
2T kivikoti kaal, täidetuna	1,8 t	2 t	1,6 t
4T kivikoti kaal, täidetuna	3,5 t	4 t	3,25 t
2T kivikottide täitematerjali kogus	770 t	860 t	690 t
4T kivikottide täitematerjali kogus	1 850 t	2 120 t	1 720 t
Täitematerjali kogukaal	2 620 t	2 980 t	2 410 t

Tabeli andmete põhjal saame järeldada, et kõige suurema kaaluga ja ka kõige tugevam kaldakindlustus saadakse graniitkillustikuga täidetud kivikoti korral. Graniitkivi on ka eksploatatsiooni mõistes kõige parem lahendus, kuna kivi ei muutu pudedaks teatud aja möödudes, nagu see toimub paekillustiku ja betoontükkidega veepiiril ning veepiirist üleval pool, kus toimub vee jäätumine.

Konstruksiooni kaitsekihi täpsema eluea prognoosimiseks tuleks valitud lahendusi testida ning käesolevas lõputöös esitatud prognoositavad kasutusperioodid ei ole mõeldud kasutamiseks edasisel projekteerimises. Küll aga eeldatakse, et paekivikillustiku ja betoontükkidega täidetud kivikoti eluiga on maksimaalselt 15...20 aastat, enne kui tuleb kivikotti hakata uuesti täitma. Kuna kivikottide testitud minimaalne eluiga on 30 aastat, saab neid kasutada kahe täitematerjali tsükli jagu. Kui täitematerjal on võrgu vahelt välja murenenud, saab kivikoti uuesti välja tõsta, täita ning uuesti tagasi tõsta. Kõigi eelduste kohaselt on graniitkillustik piisavalt tugev ning külmakindel, et vastu pidada 30 aastane kasutusperiood, eeldusel, et nõlva ja platoo aluskiht ei vaju ega moodusta suuri deformatsioone nõlva konstruktsioonile.

Betooni kasutamine tagaks väiksema keskkonna jalajälje, kuna tegu oleks taaskasutatud materjaliga. Küll aga eeldaks see lühemat eluiga võrreldes graniitkillustikuga ning materjali omadusi on raskem spetsifitseerida ning seega ei saa anda süsteemile kindlat garantiaega.

6.3 Tööjõu ja masinate kasutus

Antud töös võetakse ehitusteenuste ühikhindadeks järgmised väärtused:

- Abitöölise tunnihind – 25 €/h
- Ekskavaatori töötunnihind koos juhiga – 65 €/h
- Kraana töötunnihind koos juhiga – 80 €/h
- Pika noolega ekskavaatori töötunnihind koos juhiga – 80 €/h

Ühikhinnad on võetud hetkel ehitusturu keskmiste väärtustena konsulteerides erinevate ehitusettevõtetega.

Lähtudes peatükis 5.4 toodud tööde tehnoloogilisele kirjeldustele arvutatakse tööjõu ja masinate kulu antud projekti raames.

6.3.1 Tetrapoodide paigaldamisel

Lähtudes peatükis 5.4.1 tööde kirjeldusest ning peatükis 6.1 toodud materjalide mahtudest leitakse tööde teostamiseks kuluv aeg, mille kaudu tuletatakse tehnika kasutusaeg ning maksumus.

Kasutades tetrapoodidega kindlustamise lahendust, tekib võrreldes kivikottidega juurde üks tehnikaühik – pika noolega ekskavaator. Pika noolega ekskavaatoriga, (vähemalt 22m noolega), tuleb paigaldada paekivi platoo osale ja nõlva jalamile (vt joonis 5.2), kuhu tavalise, lühikese noolega kasutatav ekskavaator ei ulatu. Arvestades ptk 6.1.2. arvutatud paekivi mahtu 460 tonni, arvutatakse ekskavaatori töötundide arv paekivide paigaldamiseks. Maakivide paigalduseks arvestatakse pika noolega ekskavaatori kasutamiseks pool kivide kogusest, ehk nõlva alumine osa. Tavalise, lühikese noolega ekskavaatoriga on võimalik paigaldada ülemine pool osa nõlvast.

Pika noolega ekskavaatori kasutamine. Paekivi kuhjamine veealusele platoole on küllaltki kiire töö, arvestades 0,5m kihi paksust. Küll aga tuleb meeles pidada, et paekivid paigaldatakse geotekstiili peale ning seega tuleb kivid asetada platoole võimalikult pinna lähedalt, et mitte lõhkuda geotekstiili. Seetõttu võtab töö aga kauem aega, lisaks tuleb aeg-ajalt kontrollida kihi paksust. Antud töö teostamise ajaks määratakse kokku 4 tööpäeva ehk 32 töötundi.

Maksumus paekivide paigalduseks avaldub:

$$r_{\text{ekskavaator}} = 4 * 8 * 80 = 2\,560 \text{ eurot},$$

Nõlva alumine osa, mis ulatub alates platoost kuni poole nõlva kõrguseni, kaetakse maakividega kasutades samuti pika noolega ekskavaatorit. Kuna nõlvale kivide tihedalt asetamine on aeganõudvam ja täpsem töö, kui paekivide merepõhja kuhjamine, arvestatakse antud positsiooni paigalduskiiruseks 42 m³, kokku kulub tööde teostamiseks 5 päeva.

Kokku avaldub pika noolega ekskavaatori kulu järgmiselt:

$$r_{\text{pikk nool}} = 4 * 8 * 80 + 5 * 8 * 80 = 5760 \text{ eurot},$$

Lühikese noolega ekskavaatoriga paigaldatakse maakivi nõlva ülemisele osale, kuna manööverdamine on mugavam ning paigaldus kiirem. Arvestatakse maakivide paigalduse mahuks samuti 42 m³ päevas, kuna kive tuleb eelnevalt sorteerida paigaldada tihedalt. Selliselt arvestades, saame ülemise osa nõlva maakivide paigalduseks kuluva aja ning maksumuse:

$$t_{\text{maakivi,ülemine}} = \frac{\frac{419}{2}}{42} = 5 \text{ päeva},$$

$$r_{\text{ekskavaator}} = 5 * 8 * 65 = 2600 \text{ eurot},$$

Jõudes arvutustega tetrapoodide paigaldamiseni tuleb arvestada, et kraana peab tetrapoodid esmalt poolhaakega veoautolt värava juures maha laadima, vt joonis 5.6. Ekskavaator viib tetrapoodid kraana selja tagant edasisele tõstetsoonile lähemale ning alles seejärel saab alustada tetrapoodide paigaldusega nõlvale ning platoole. Seega koosneb tetrapoodide paigaldamine kahest osast – esiteks tetrapoodide maha laadimine kraanaga ning paigalduskohale lähemale toomine ekskavaatoriga ja teisena alles paigaldamine ettenähtud kohta. Kui tavaliselt on võimalik ühe kraanaga paigaldada päevas ligikaudu 50...70 tetrapoodi olenevalt tingimustest, siis arvestades tetrapoodide mahalaadimisest tekkivat lisakulu arvutatakse ajaline kulu järgmiselt: päeva esimeses pooles tuuakse töömaale 40 tetrapoodi, mis tõstetakse veokilt maha, ekskavaator viib

need ettenähtud paigalduskohta ning lõunaks saab antud tööloik läbi. Seejärel alustab kraana tetrapoodide paigaldamisega ning kõik kohale toodud 40 elementi saavad päeva lõpuks paika ning töömaa on edasi-tagasi liikumiseks vaba. Lisaks tuleb tetrapoodide paigaldusajaks meeskonda kaasata ka abitööline, kes abistab paigalduseks tõstekonksu haakimise ja lahtihaakimisega tetrapoodide tõsteaasast.

Ajaline ja rahaline kulu tetrapoodide paigaldusele avaldub:

$$t_{tetrapoodid} = \frac{1130}{40} = 29 \text{ päeva},$$

$$r_{ekskavaator} = 29 * 4 * 65 = 7\,540 \text{ eurot},$$

$$r_{roomikkraana} = 29 * 8 * 80 = 18\,560 \text{ eurot},$$

$$r_{abitööline} = 29 * 8 * 25 = 5\,800 \text{ eurot},$$

Tulemused kantakse finantstabelitese, vt tabel 6.4.1...6.4.4.

6.3.2 Kivikottide täitmisel ja paigaldamisel

Arvestades lõputöö autori varasemat kogemust ehitusplatsil ning tuues näite gabioonkorvide täitmisega, mida on töö autor ise ka teinud, eeldatakse, et kivikottide valmistamine ehitusplatsil toimub järgmise ajalise kuluga:

- 2T kivikoti täitmine ja paigaldamine – 10 minutit
- 4T kivikoti täitmine ja paigaldamine – 12 minutit

Täitmiseks kuluv aeg sisaldab kivikoti paigaldamist täitmisraami abitöölise poolt, ekskavaatoriga vajaliku koguse täitematerjali paigaldust kivikotti, kivikoti sidumist, kivikoti paigaldust nõlvale/platoole. Kogu protsess toimub eeldusel, et täitematerjal on alati valmis laoplatsil.

Arvestades olukorda, kus tehnikaga probleeme ei teki ning tööd liiguvad nagu planeeritud, on võimalik ühes 8 tunnises tööpäevas toota ja paigaldada kokku 48 tk 2T kivikotti ning 40 tk 4T kivikotti. Kokku on vastavalt ptk 6.2.1 arvutustele projektis määratud 427 tk 2T kivikotti ning 528 tk 4T kivikotti. Sellest tulenevalt leitakse tööde teostamiseks kuluv päevade arv:

$$t_{2T} = \frac{427}{48} = 9 \text{ päeva};$$

$$t_{4T} = \frac{528}{40} = 14 \text{ päeva};$$

Eelarvesse arvestatakse alati ka tehnika kasutamisel osaliselt remondipäevad. Koos remondipäevadega arvestatakse kivikottide täitmise ja paigaldamise ajaliseks mõjuks kokku 25 päeva.

Kuna kivikoti täitmisel kasutatakse igapäevaselt ekskavaatorit ning paigaldamisel roomikkraanat, arvutatakse 25 päeva alusel nende maksumused projektis. Lisaks kuulub meeskonda ka abitööline, kes samuti teostab töid igapäevaselt.

Olgu mainitud, et tegelikus ehituseelarves on kuluridasid oluliselt rohkem, kuhu kuulub ehitustöölise olmeruumide rent, kindlustused, transpordikulud jne. Käesolevas lõputöös neid aga sisse ei arvesta, kuna detailne kogu projekti maksumuse arvutamine ei ole antud töö eesmärk.

Tulemused ja kuluread kantakse üle finantstabelitesse, vt ptk 6.4.

6.4 Finantstabelid

6.4.1 Kaldakindlustuse maksumus tetrapoodidega lahenduse korral

Tabelist 6.4 järeldub, et tetrapoodide kui elementide maksumus 678 000,00 eurot moodustab kogu töö maksumusest tervelt 91,8%. Lahendus on küll ajas püsiv, kuid ka tootmine on kallis. Aluskonstruktsiooni vajumisel tekib ülemisse, tetrapoodide konstruktsiooni osasse tühimikud ning konstruktsioon on ebakorrapärane. Lisaks tuleb eelnevalt nõlv ja platoo katta täitematerjaliga, et mitte lõhkuda filterkihist geotekstiili. Selleks tuleb kasutada lisatehnika näol pika noolega ekskavaatorit, et paekivi ja maakivi ulatuks platoo- ja alumise nõlvaosani.

Tabel 6.4 Tööde maksumus tetrapoodide paigaldamisel

Jrk nr	Positsioon	Märkused	Kogus	Ühik	Ühiku hind, €	Maksumus, €
1.0	Platoo ehitus					
1.1	Paekivi, transpordituna töömaale	fr. 300...700 mm	460	t	10,13	4 660,00
1.2	Paekivide paigaldamine platoole kasutades pika noolega ekskavaatorit	Kihi paksus 500 mm	32	h	80,00	2 560,00
2.0	Nõlva ehitus					
2.1	Maakivi, transpordituna töömaale	fr. 400...500 mm	630	t	25,00	15 750,00
2.2	Maakivide paigaldamine nõlva alumisele osale kasutades pika noolega ekskavaatorit	Kihi paksus 400 mm	40	h	80,00	3 200,00
2.3	Maakivide paigaldamine nõlva ülemisele osale kasutades ekskavaatorit	Kihi paksus 400 mm	40	h	65,00	2 600,00
3.0	Tetrapoodide paigaldus					
3.1	Tetrapoodid, transpordituna töömaale	Massiga 5 tonni	1 130	tk	600,00	678 000,00
3.2	Tetrapoodide paigaldus roomikkraanaga		232	h	80,00	18 560,00
3.3	Ekskavaatoriga tetrapoodide tõstmistsooni toomine		116	h	65,00	7 540,00
3.4	Abitöölise kulu		232	h	25,00	5 800,00
Kokku						738 670,00
KM 22%						162 507,40
Kokku koos KM						901 177,40

6.4.2 Kaldakindlustuse maksumus paekillustikuga täidetud kivikottide lahenduse korral

Tabelis 6.5 on kajastatud kaitsekihi ehitushindasid paekillustikuga täidetud kivikottide korral. Paekillustiku ühiku (t) hind koos transpordiga töömaale on arvestatud 17,04 €, kogumaksumusega 44 651,38 €. Võrreldes eelmises alapeatükis kirjeldatud tetrapoodide ühikhinda ja kivikoti hinda koos täitematerjaliga, on hinnavahe märkimisväärne. Kõikide tetrapoodide ja kõikide paekillustikuga täidetud kivikottide hinnavahe toodete maksumusena on 2,4 korda, vastavalt 678 000, 00 € tetrapoodide maksumus (vt tabel 6.4) ning 282 351,38 € paekillustikuga täidetud kivikottide korral. Viimase hinna sisse on arvestatud ka ekskavaatori kulu kivikottide täitmisel.

Tabel 6.5 Tööde maksumus paekillustikuga täidetud kivikottide paigaldamisel

Jrk nr	Positsioon	Märkused	Kogus	Ühik	Ühiku hind, €	Maksumus, €
1.0	Paekillustikuga täidetud kivikottide paigaldamine					
1.1	Fiibervõrkkattega kivikott kandeõimega 2 tonni		427	tk	180,00	76 860,00
1.2	Fiibervõrkkattega kivikott kandeõimega 4 tonni		528	tk	280,00	147 840,00
1.3	Paekillustik, transpordituna töömaale	fr. 32...64 mm	2 620	t	17,04	44 651,38
1.4	Kivikottide täitmine täitematerjaliga kasutades ekskavaatorit		200	h	65,00	13 000,00
1.5	Kivikottide tõstmine ja paigaldamine kasutades roomikkraanat		200	h	80,00	16 000,00
1.6	Abitöölise kulu		200	h	25,00	5 000,00
1.7	2T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	1500,00	1500,00
1.8	4T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	2500,00	2500,00
					Kokku	307 351,38
					KM 22%	67 617, 30
					Kokku koos KM	374 968,68

6.4.3 Kaldakindlustuse maksumus graniitkillustikuga täidetud kivikottide lahenduse korral

Võrreldes tabeliga 6.5 on allolevas tabeli 6.6 erinevus täitematerjali koguses ning maksumuses. Graniitkillustik on paekillustikust 2,5 korda kallim ning sellest tulenevalt on kogu tööde maksumus, 389 680,87+km, paekillustikuga variandist kallim ligikaudu 1,27 korda. Võrreldes aga antud lahenduse kogumaksumust tetrapoodide paigaldamise kogumaksumusega, on see endiselt 1,89 korda odavam.

Tabel 6.6 Tööde maksumus graniitkillustikuga täidetud kivikottide paigaldamisel

Jrk nr	Positsioon	Märkused	Kogus	Ühik	Ühiku hind, €	Maksumus, €
1.0	Graniitkillustikuga täidetud kivikottide paigaldamine					
1.1	Fiibervörkkattega kivikott kandevõimega 2 tonni		427	tk	180,00	76 860,00
1.2	Fiibervörkkattega kivikott kandevõimega 4 tonni		528	tk	280,00	147 840,00
1.3	Graniitkillustik, transpordituna töömaale	fr. 32...64 mm	2 980	t	42,61	126 980,87
1.4	Kivikottide täitmine täitematerjaliga kasutades ekskavaatorit		200	h	65,00	13 000,00
1.5	Kivikottide tõstmine ja paigaldamine kasutades roomikkraanat		200	h	80,00	16 000,00
1.6	Abitöölise kulu		200	h	25,00	5 000,00
1.7	2T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	1500,00	1500,00
1.8	4T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	2500,00	2500,00
Kokku						389 680,87
KM 22%						85 729,79
Kokku koos KM						475 410,66

6.4.4 Kaldakindlustuse maksumus purustatud betoontükkidega täidetud kivikottide lahenduse korral

Betoontükkidega täidetud kivikoti lahenduse kogumaksumus on kirjeldatud tabelis 6.7. Nagu peatükis 6.2.4 kirjeldatud, sõltuvad betooni omadused suuresti lammutusobjektist ja täpseid parameetreid on raske ilma katseteta ennustada. Küll aga, kui arvutada läbi lõugpurustiga betooni purustamine, transport Tallinna piirest töömaale ning paigaldades täitematerjali võrkottidesse õigesse asukohta, saame, et selline lahendus oleks isegi odavam, kui paekillustikuga täitmine. Kogumaksumus jääb 275 875,00 euro juurde, kui paekillustikuga ja graniitkillustikuga toodete tööde maksumus on vastavalt 307 351,38 eurot ja 389 680, 87 eurot.

Tabel 6.7 Tööde maksumus betoontükkidega täidetud kivikottide paigaldamisel

Jrk nr	Positsioon	Märkused	Kogus	Ühik	Ühiku hind, €	Maksumus, €
1.0	Graniitkillustikuga täidetud kivikottide paigaldamine					
1.1	Fiibervõrkkattega kivikott kandevõimega 2 tonni		427	tk	180,00	76 860,00
1.2	Fiibervõrkkattega kivikott kandevõimega 4 tonni		528	tk	280,00	147 840,00
1.3	Lõugpurusti transport objektile ja tagasi	Tallinna piires	1	kmpl	800,00	800,00
1.4	Betooni purustamine lõugpurustiga + ekskavaatori rent	Ekskavaator materjali laadimiseks	21	h	245,00	5 145,00
1.5	Purustatud betoon, transpordituna töömaale	fr. 50...100 mm	2 410	t	3,00	5 145,00
1.6	Kivikottide täitmine täitematerjaliga kasutades ekskavaatorit		200	h	65,00	13 000,00
1.7	Kivikottide tõstmine ja paigaldamine kasutades roomikkraanat		200	h	80,00	16 000,00
1.8	Abitöölise kulu		200	h	25,00	5 000,00
1.9	2T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	1500,00	1500,00
1.10	4T kivikoti täitmisraami kulu, väljaost		1	tk	2500,00	2500,00
Kokku						275 875,00
KM 22%						60 692,50
Kokku koos KM						336 567,50

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli hinnata fiibervõrkkattega kivikottide kasutust Eesti tingimustes ning analüüsida selle kasutamist ehituslikust aspektist võrreldes kasutusel olevate lahendustega. Et konstruktsioonimaterjale ja ehitustegevust oleks võimalik ühestel alustel võrrelda, projekteeriti näitena Tallinna Vanasadamasse kaldakindlustus kasutades raudbetoonist tetrapoode ning kolme erineva täitematerjaliga täidetud kivikotte.

Kaldakindlustuse kõige tähtsam osa on kaitsekihi läbimõõt ning mass, kuna see puutub otseselt kokku lainete purustava energiaga. Kaitsekiht projekteeritakse vastavalt lainetuse parameetritele lähtudes konkreetsest rajatise asukohast ning sellele mõjuvast tuule ja lainekõrguse väärtustest. Laine murdumise tüüp määrab suuresti arvutusmetoodika.

Raudbetoonist tetrapoodide kasutamisel on konstruktsiooni lõige ebakorrapärane, kuna tetrapoodid paigaldatakse juhuslikult. See aga võimaldab aluskonstruktsiooni vajumisel tekitada suuremaid tühimikke, kuhu lained intensiivsemalt aluspinnale ligi pääsevad. Kivikottidega kindlustatud nõlv tagab ühtlasema kaitsekihi ning aluskonstruktsiooni vajumisel kopeerib materjal olemasolevat aluspinda.

Fiibervõrkkattega kivikotid on valmistatud taaskasutatud polüestrist ehk sünteetilisest naftamaterjalist. Tegu on põhiliselt vanade riietega ning muudest tööstuses järele jäävatest jäätmetest. Toodete kasutamine kaldakindlustusena on põhjendatud ning arvutuste põhjal tuleks antud asukohta paigaldada kahe erineva suuruse ja massiga kivikotid. Esimene kiht koosneb 2 tonnise kandevõimega kivikottidest, mis kopeerivad nõlva kallet ja on paigaldatud üksteise kõrvale ühes kihis, teine kiht koosneb 4 tonnise kandevõimega kivikottidest, kus kihid on paigaldatud üksteise peale astmeliselt, toetades ühelt poolt vastu nõlval olevaid 2 tonnise kandevõimega kivikotte. Seega on konstruktsioon kahekihiline.

Tähtis on valida kivikoti sisuks õige täitematerjal, mis tagaks konstruktsioonile võimalikult pika eksploatatsiooni. Fiibervõrkkattega kivikoti eluiga, ilma täiteta, on UV-kiirte mõjupiirkonnas 30 aastat, seega on kõige mõistlikum kasutada täitematerjalina ka suure külmakindluse ja tugevusega täitematerjali – graniitkillustikku. Kivikotid on võimalik täita ka taaskasutatud purustatud betooniga, kus lahendus on keskkonnasõbralikum ja materjal on uuesti ringlusesse võetud. Sellise lahenduse korral tuleb aga eelnevalt teha betoonile uuringud, et betoon ei oleks liialt poorne ning pehme, mis võib tekitada betoontükkide purunemise vee jäätumisel betoontüki poorides.

Kasutada saab ka paekillustikku, mis on odavam variant graniitkillustikule, kuid materjali külmakindlus on oluliselt madalam kui graniitkillustikul ning veepiirist ülespoole jäävate kivikottide eluiga on kindlasti lühem.

Ehitustehnoloogiliselt on kaldakindlustuse kaitsekihi ehitamine kivikottide lahenduse näol kiirem ning vähem ressursi nõudvam kui tetrapoodidega kindlustamine. Puudub vajadus nõlva ning platoo vahekihi ehitamiseks filterkihi ja tetrapoodi vahele, lisaks kopeerib kivikott olemasolevat merepõhja ning puudub vajadus tasanduskihiks. Seetõttu on tehnika kasutamise aeg lühem ning objekt valmib kiiremini. Antud näite põhjal on ehitusperiood 42% lühem võrreldes tetrapoodide paigaldusega. Lisaks on ligipääsutee ja tööde teostamise ala koos võimaliku laoplatsiga väga väike, mis tähendab, et alale saabuv materjal tuleb koheselt ära kasutada ning paigaldada ettenähtud kohta ilma vaheladustamiseta. Tähtis on hinnata materjalide tarneid vastavalt reaalsele tööde teostamise kiirusele, et liigselt kohale toodud materjal ei takistaks ligipääsu tööde teostamise alale vastavalt töömaa tsoonidele.

Maksumuse aspektist on kivikottide lahendus tänasel päeval selgelt odavam kui tetrapoodidega kalda kindlustamine. Kui võrrelda tetrapoodidega kindlustatud nõlva ja graniitkillustikuga täidetud kivikotte, mis on vaadeldavatest täitematerjali variantidest kõige kallim lahendus, on hinnaerinevus koos materjalide ja paigaldusega pea kaks korda, vastavalt 389 680,87 eurot graniitkillustikuga täidetud kivikottide korral ning 738 670,00 eurot tetrapoodidega kalda kindlustamisel. Hinnad on toodud käibemaksuta. Paekillustikuga ja betoontükkidega täidetud kivikottide lahendused on graniitkillustikuga kivikottidest vastavalt suurusjärgus 20% ja 30% soodsamad. Viimaste korral tuleb aga arvestada nende lühema elueaga ning kivikotte tuleb teatud aja möödudes uuesti täitematerjaliga täita, mis toob kaasa lisakulud.

SUMMARY

The aim of this thesis was to evaluate the use of fiber mesh rock bags under Estonian conditions and to analyze their constructional aspects compared to existing solutions. To enable a standardized comparison of construction materials and methods, a coastal protection structure was designed for Tallinn's Old City Harbour as an example, utilizing reinforced concrete tetrapods and rock bags filled with three types of filler materials.

The most critical part of coastal reinforcement is the diameter and mass of the protective layer, as it directly encounters the destructive energy of waves. The protective layer is designed based on wave parameters, considering the specific location, prevailing wind, and wave height values. The calculation methodology largely depends on the type of wave breaking.

Reinforced concrete tetrapods create an irregular cross-section in the structure since they are placed randomly. This can lead to larger voids forming as the substructure settles, allowing waves to access the underlying surface more intensively. In contrast, slopes reinforced with rock bags provide a more uniform protective layer, and the material adapts to the existing surface during substructure settlement.

The fiber mesh rock bags are made from recycled polyester, a synthetic petroleum-based material, primarily sourced from old clothing and industrial waste. Their use in coastal reinforcement is justified, and calculations suggest that the specific location would require rock bags of two different sizes and masses. The first layer consists of 2-ton capacity rock bags placed side by side in a single layer to replicate the slope's gradient. The second layer consists of 4-ton capacity rock bags arranged in a stepped fashion atop the first layer, supported laterally by the 2-ton rock bags on the slope. This results in a two-layer structure.

Choosing the correct filler material is critical to ensure the longest possible lifespan of the structure. Without filler, the fiber mesh of the rock bag has a lifespan of 30 years in UV-exposed conditions. Therefore, it is most practical to use filler materials with high frost resistance and strength, such as granite gravel. Alternatively, the bags can be filled with recycled crushed concrete, offering a more environmentally friendly solution by reintroducing material into circulation. However, prior studies of the concrete are necessary to ensure it is not overly porous or soft, as freezing water in the pores could cause the concrete pieces to break apart. Limestone gravel can also be used as a cheaper alternative to granite gravel. However, the frost resistance of limestone gravel

is significantly lower compared to granite gravel, and the lifespan of rock bags located above the waterline is undoubtedly shorter.

From a construction technology perspective, building the protective layer with stone bags is faster and requires fewer resources than using tetrapods as protection layer. There is no need to construct an intermediate filter layer between the slope and plateau or between the filter layer and tetrapods. Additionally, rock bags conform to the existing seabed, eliminating the need for levelling layers. Consequently, the use of rock bags shortens construction time, with the example project showing a 42% reduction compared to tetrapod installation. Furthermore, the minimal required access and work area, including potential storage space, means that materials can be immediately installed without intermediate storage. It is essential to coordinate material deliveries with the actual work progress to avoid excess material obstructing access to work zones.

From a cost perspective, rock bag solutions are significantly cheaper than tetrapod-based coastal reinforcement. Comparing a slope reinforced with tetrapods to one using granite gravel-filled rock bags – the most expensive filler option – the cost difference, including materials and installation is nearly twofold: 389 680,87 euros for granite gravel-filled rock bags versus 738 670,00 euros for tetrapods, excluding VAT. Solutions using limestone gravel or crushed concrete as fillers are approximately 20% and 30% cheaper than granite gravel, respectively. However, these materials have a shorter lifespan, requiring the rock bags to be refilled with filler material over time, which incurs additional costs.

KASUTATUD KIRJANDUS

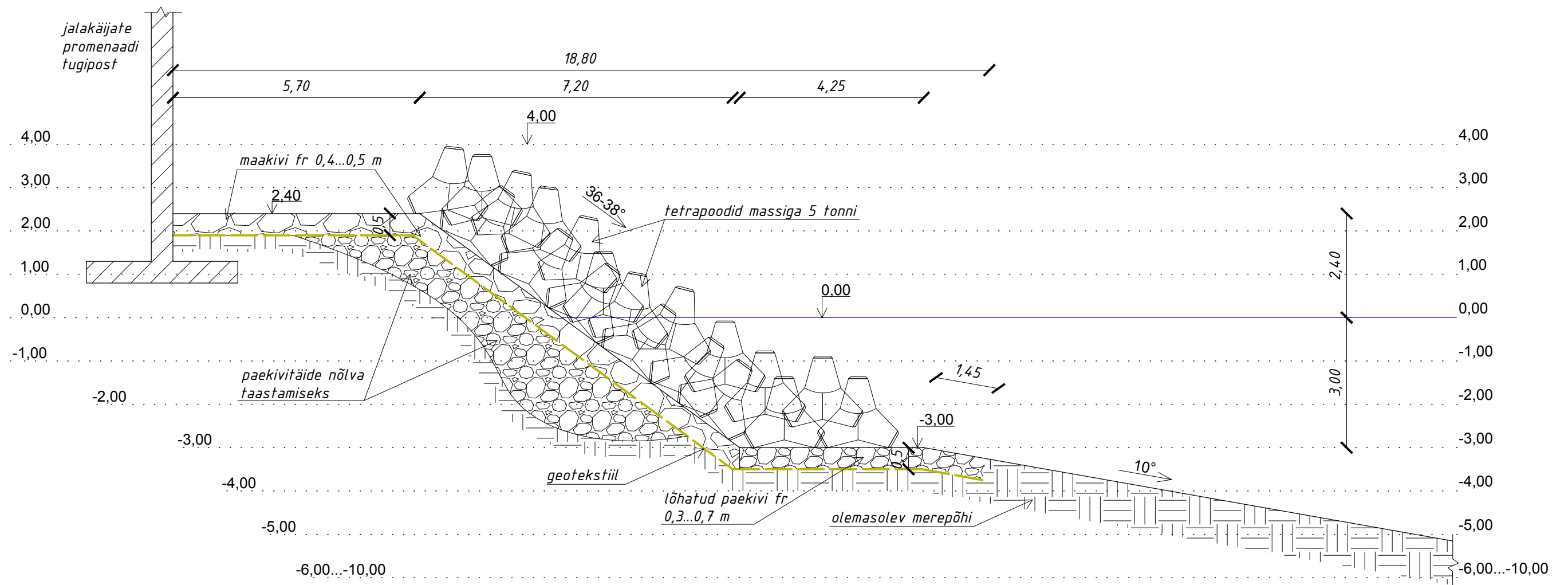
- [1] C. A. Thoresen, *Port Designer's Handbook*, Third Edition. ICE Publishing, 2014.
- [2] D. Reeve, A. Chadwick, and C. Fleming, *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*. Spon Press, 2004.
- [3] I. Hossain, "Experimental Study of Stability of Different Types of Armor Units Used in Shore Protection Structure", M.S. thesis, Bangladesh University of Engineering and Technology Dhaka, Dhaka, Bangladesh, 2013. Accessed: Oct. 11, 2024. [Online]. Available: <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/handle/123456789/695>
- [4] *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012*. Wiley, 2015. doi: 10.1002/9783433605172.
- [5] *Terastraat ja traattooted piirete ja punutiste valmistamiseks. Osa 8: Keevisvõrgust gabioontooted*, EVS-EN 10223-8:2013, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2013.
- [6] T. Korin, "Design of Gabion Walls: Practical Case," M.S. thesis, Polytechnic Institute of Braganca, Braganca, Portugal, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10198/26452>
- [7] CO., LTD. Kyowa, "About KYOWA CO.,LTD." Accessed: Sep. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.kyowa-inc.co.jp/en/about.html>
- [8] Ridgeway Marine, "Kyowa's Filter Unit: Natural protection for the environment". Accessed: Sep. 22, 2024. [Online]. Available: <https://rockbags.com/wp-content/uploads/2018/02/Filter-Unit-Civil-Engineering-pamphlet-Ridgeway.pdf>
- [9] Ridgeway Marine, "Kyowa's Filter Unit for Offshore Wind Farm, Oil&Gas market". Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: <https://rockbags.com/wp-content/uploads/2018/03/FU-Catalogue-Offshore-2017.pdf>
- [10] Ridgeway Marine, "Ridgeway Rockbags: How do they work". Accessed: Oct. 07, 2024. [Online]. Available: <https://rockbags.com/how-do-they-work/>
- [11] V. Jaaniso, *Pinnasemehaanika*. 2011.
- [12] Maa-amet, "Kaardirakendus". Accessed: Oct. 15, 2024. [Online]. Available: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/kaardirakendus-p2.html>
- [13] Keskkonnaagentuur. "Ilm". Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: ilmateenistus.ee
- [14] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Tuulekoormus*, EVS-EN 1991-1-4:2005, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2005.
- [15] J. B. Herbich, *Handbook of Coastal Engineering*. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000.
- [16] CIRIA, CUR, and CETMEF, *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering.*, Second edition. CIRIA, 2007.

- [17] Stokker, "Lint-troopp 6T/5m, 3Lift". Accessed: Oct. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.stokker.ee/lint-troopp-6t-5m-c-old_1593686225
- [18] Ltd. Hitachi Construction Machinery Co., "Hitachi KH180-3 Hydraulic Crawler Crane manual". Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.hsc-cranes.com/data-files/kh180-3_sp.pdf
- [19] L. L. C. Peck & Hale, "Quick Release Hook". Accessed: Nov. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.peckhale.com/products/h44-3>
- [20] Vão Paas, "Vão karjäär". Accessed: Nov. 02, 2024. [Online]. Available: <https://vaopaas.ee/tootedteenused/killustik/>
- [21] Isekallur, "KKK". Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://isekallur.ee/kkk>
- [22] Rudus, "Graniitkillustiku hinnakiri". Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://rudus.ee/media/GKhinnakiri-2024.pdf>
- [23] Purustaja, "Kivipurustamine". Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.purustaja.ee/teenused/lisateenused/>
- [24] Betooneimeister, "Betooni klassid". Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://betooneimeister.ee/betoon/betooni-klassid/>

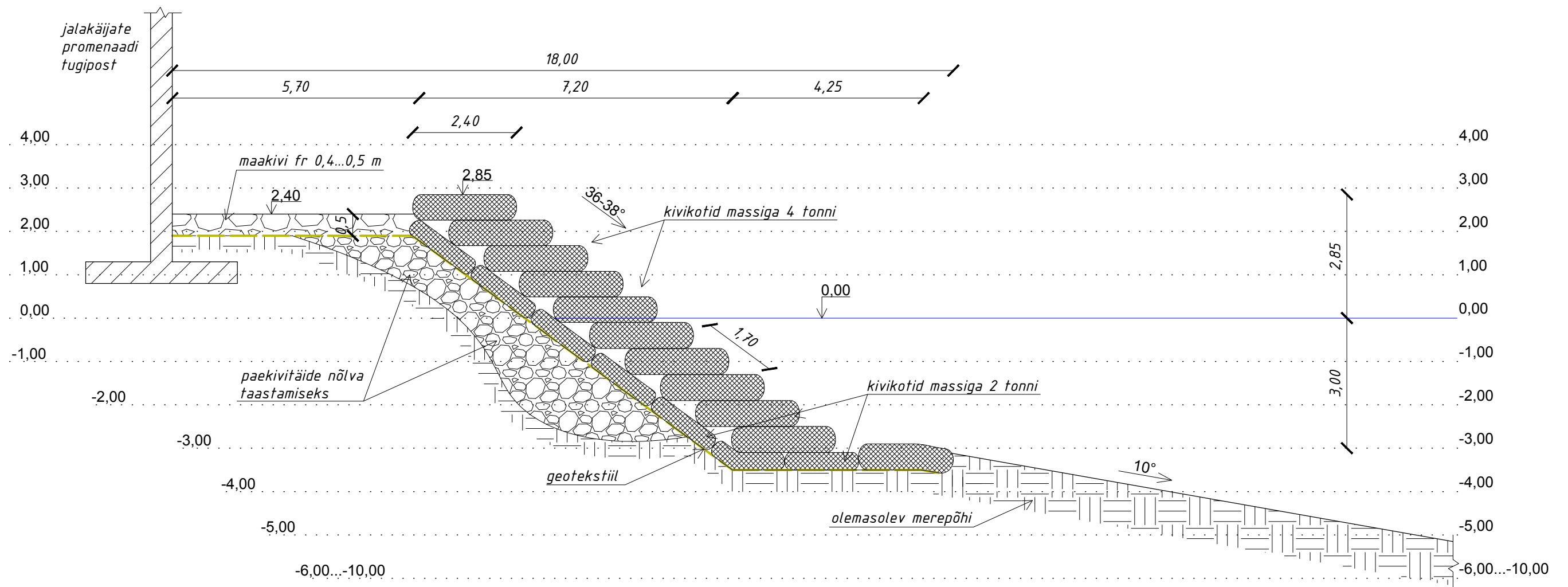
LISAD

Lisa 1. Kaldakindlustuse lõige tetrapoodidega

Lisa 2. Kaldakindlustuse lõige täitematerjaliga täidetud kivikottidega



	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht / Lehti: 1 / 2
	Koostaja: Rain Leenpalu Juhendaja: Aldur Parts	25.11.2024 Allkirjastatud digitaalselt 25.11.2024 Allkirjastatud digitaalselt	Kaldakindlustuse lõige tetrapoodidega
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Fiibervõrkkattega kivikottide kasutamine kaldakindlustusena	



	TTÜ INSENERITEADUSKOND	Magistritöö	Leht / Lehti: 2 / 2
	Koostaja: Rain Leenpalu Juhendaja: Aldur Parts	25.11.2024 Allkirjastatud digitaalselt 25.11.2024 Allkirjastatud digitaalselt	Kaldakindlustuse lõige täite- materjaliga täidetud kivikottidega
Ehituse ja arhitektuuri instituut		Fiibervõrkkattega kivikottide kasutamine kaldakindlustusena	