

Tallinna Tehnikaülikool

Energeetikateaduskond

Mäeinstituut



Geotehnoloogia õppekava: AAGM09

Erki Vaguri, 13415AAGM

Magistritöö töö AKG70LT

ID nr: 2590

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Juhendaja: E. Lüütse, Ph.D

Tallinn 2015

Sisukord

| | |
|--|----|
| Abstract..... | 8 |
| 1 Sissejuhatus | 10 |
| 2 Metoodika..... | 12 |
| 1.1 Eesti turba-, lubjakivi-, dolokivimaardlate geoloogilised ja hüdrokeoloogilised tingimused | 12 |
| 1.1.1 Turbamaardlad..... | 12 |
| 1.1.2 Lubja- ja dolokivimaardlad | 16 |
| 1.1.3 Looduslikud veepidemed..... | 19 |
| 1.2 Hüdrotõkked | 20 |
| 1.2.1 Pinnase ning sideaine tüüpi hüdrotõkked | 23 |
| 1.2.2 Komposiitmaterjalist hüdrosolatsiooni tõkkesein | 42 |
| 1.2.3 Karjääri vertikaalnõlvale rajatav hüdrotõke | 44 |
| 1.3 Hüdrotõkke rajamiseks tehtavad tööd..... | 47 |
| 1.3.1 Ettevalmistustööd | 48 |
| 1.3.2 Teenindustee rajamine | 48 |
| 3 Tulemused | 49 |
| 3.1 Maksumuse arvutamise üldtingimused..... | 49 |
| 3.1.2 Objekti üldkulu..... | 51 |
| 3.2 Turbalasundi veerežiimi hüdrosoleerimine | 52 |
| 3.2.1 Tehnoloogiate võrdlus | 53 |
| 3.2.2 SMW tehnoloogia maksumus..... | 54 |
| 3.2.3 Pinnase ekskaveerimise tehnoloogia maksumus | 57 |
| 3.2.4 Geomembraantõkke rajamise maksumus | 59 |
| 3.2.5 Tehnoloogiate maksumuse võrdlemine | 61 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 3.3 | Lubja- ja dolokivikarjääride hüdroisoleerimine | 63 |
| 3.3.1 | Tehnoloogiate võrdlus | 63 |
| 3.3.2 | HC tehnoloogia maksumus..... | 64 |
| 3.3.3 | Karjääri vertikaalseinale rajatava hüdrotõkke seinä maksumus..... | 66 |
| 3.3.4 | Tehnoloogiate maksumuse võrdlemine | 67 |
| 4 | Tulemuste analüüs | 69 |
| 4.1 | Turbalasundi veerežiimi hüdroisoleerimise tehnoloogia valik..... | 69 |
| 4.2 | Lubja- ja dolokivikarjääride hüdroisoleerimine | 70 |
| 5 | Kokkuvõte | 72 |
| 6 | Kasutatud kirjandus | 73 |
| | | |
| Joonis 2.1 | Vertikaalse hüdrotõkke seinä rajamise põhimõtteline skeem [autori koostatud]..... | 22 |
| Joonis 2.2 | Mass-stabiliseerimise põhimõtteline skeem [24] | 30 |
| Joonis 2.3 | Küljelt mass-stabiliseerimise lihtsustatud tööde skeem [autori koostatud]..... | 31 |
| Joonis 2.4 | OSAMAT projekti raames kasutatud mass-stabiliseerimise seade [27] | 31 |
| Joonis 2.5 | Vai-stabiliseerimise lihtsustatud põhimõtteline skeem [34] | 33 |
| Joonis 2.6 | SMW tehnoloogiaga hüdrotõkkeseinä rajamise põhimõtteline skeem [34]..... | 34 |
| Joonis 2.7 | Pinnase ekskaveerimisega hüdrotõkke rajamise lihtsustatud põhimõtteline skeem [74] | 39 |
| Joonis 2.8 | Väikese erisurvega ekskavaator [47]..... | 40 |
| Joonis 2.9 | Soonimisega rajatava hüdrotõkkeseinä rajamise põhimõtteline skeem [autori koostatud] | 41 |
| Joonis 2.10 | Soonimise masina tööorgan [48]..... | 42 |
| Joonis 2.11 | Geosüntees hüdroisolatsioonitõkke paigaldamine soonimismasinaga lihtsustatud põhimõtteline skeem [autori koostatud] | 44 |
| Joonis 2.12 | Karjääri vertikaalnõlvale rajatava hüdrotõkke tehnoloogiline skeem [autori koostatud] | 45 |

| | |
|---|----|
| Joonis 2.13 Vertikaalsele karjääri nõlvale hüdrotõkke rajamise põhimõtteline skeem [autori koostatud] | 47 |
| Joonis 3.1 Teekatte jooksva meetri maksumus sõltuvalt materjali transpordikaugusest | 51 |
| Joonis 3.2 Sideaine maksumus sõltuvalt lendtuha osakaalust..... | 56 |
| Joonis 3.3 Geomembraantõkke jooksva meetri rajamise maksumus sõltuvalt selle paigaldamise sügavusest..... | 60 |
| Joonis 3.4 Tehnoloogia maksumuste võrdlus..... | 61 |
| Joonis 3.5 Tehnoloogiate maksumus sõltuvalt tee ehitamiseks vajaliku materjali transpordikaugusest | 62 |
| Joonis 3.6 Pinnase ekskaveerimise ning geomembraantõkke rajamise jooksva meetri maksumus sõltuvalt selle sügavusest..... | 62 |
| Joonis 3.7 Sideaine segude alternatiivide maksumuse võrdlus | 65 |
| Joonis 3.8 HC ja sõelmetest hüdrotõkke rajamise maksumuse võrdlus kuluallikate osakaalude järgi..... | 68 |
| | |
| Tabel 2.1 Valik Eesti turbamaardlate parameetreid [2;6]..... | 13 |
| Tabel 2.2 Eesti lubja- ja dolokivimaardlate keskmised parameetrid [3;6] | 17 |
| Tabel 2.3 Eesti veekomplekside veepidemete parameetrid..... | 19 |
| Tabel 2.4 Valik maailmas rajatud hüdrotõkkeseinu [15] | 21 |
| Tabel 2.5 Sideaine valik sõltuvalt pinnase tüübist [23;26;27]..... | 24 |
| Tabel 2.6 OSAMAT projekti raames tehtud turbapinnase stabiliseerimise katsetuste tulemused elektrifiltrituha ning tsemendiga [27] | 27 |
| Tabel 2.7 SMW tehnoloogia tootlikkust mõjutavad tegurid [34]..... | 35 |
| Tabel 2.8 Sõrgrulli tootlikkus nõlva tihendamisel..... | 46 |
| Tabel 3.1 Teenindustee ehitamise maksumuse algandmed | 50 |
| Tabel 3.2 Objekti päeva üldkulu eurodes | 52 |
| Tabel 3.3 Erinevate tehnoloogiate võrdlus | 53 |
| Tabel 3.4 Alternatiivi 1 korral ühe kuupmeetriselise pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus | 55 |
| Tabel 3.5 Alternatiiv 2 korral ühe kuupmeetriselise pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus | 55 |

| | |
|---|----|
| Tabel 3.6 Hüdrotõkke rajamise maksumus SMW tehnoloogiaga | 56 |
| Tabel 3.7 Alternatiiv 1 korral ühe vertikaal-ruutmeetri pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus | 57 |
| Tabel 3.8 Alternatiiv 2 korral ühe vertikaal-ruutmeetri pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus | 58 |
| Tabel 3.9 Hüdrotõkke rajamise maksumus pinnase ekskaveerimisega..... | 58 |
| Tabel 3.10 Geomembraantõkke rajamise tehnoloogiline kulu tunnis | 59 |
| Tabel 3.11 Erinevate tehnoloogiate võrdlus | 64 |
| Tabel 3.12 HC tehnoloogiaga ühe hüdrotõkke seina vertikaal-ruutmeetri rajamise maksumus | 65 |
| Tabel 3.13 Sõelmetest rajatava hüdrotõkke nõlva maksumus..... | 67 |

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et olen oma magistritöö koostanud iseseisvalt ja seda ei ole keegi teine varem kaitsmisele esitanud. Töös kasutatud teiste autorite töödele ning seisukohtadele, kirjandusallikatele ja mujalt pärinevatele allikatele olen lisanud allikaviite.

Erki Vaguri

29.05.2015. a.

ABSTRACT

Techno-economical analysis of groundwater cut-off walls construction possibilities in Estonian geological conditions and exploitation in quarries

The current master thesis studied ten different groundwater cut-off wall construction technologies. The aim of this study was to analyse the exploitation possibilities of these technologies in quarries under Estonian geological conditions. Two different geological conditions were analysed – cut-off wall construction in lime- and dolostone deposit, and in a peat layer located in the overburden of a mineable mineral resource. The latter is related to the southern area of Narva opencast where the direction of extraction is moving towards the Puhatu bog which, is under nature protection. The choice of groundwater cut-off wall construction technology for Estonian conditions was based on its exploitation possibility and cost. The analysis on different technologies was based on several case studies of already built and planned cut-off walls mainly located in USA, Canada and Australia.

Results show that the best cut-off wall construction technology in peat soil (average peat layer thickness 4,0 m, max 10,6 m) is geomembrane installed with vertical chain trencher. The cost of construction is 66,4 eur/m² (one meter deep cut-off wall) and 82,9 eur/m² (four meter deep wall). The cost calculation is based on the assumption that the transportation length for the needed aggregates to build a service road is 15 km. 45% of the total cut-off wall construction cost is the cost of service road construction. In addition, the results show that it is cheaper to construct one meter deep cut-off wall using slurry wall technology and trench digging excavator rather than geomembrane. The cost of slurry wall technology is 59,5 eur/m². The advantage of geomembrane cut-off wall technology is the fact that wall construction and trench excavation is simultaneous. The possibilities to decrease total mass and ground pressure of machinery for geomembrane cut-off wall construction in order to optimize construction cost should be studied for further development in the current subject.

Results show that in lime- and dolostone quarries it is efficient to construct groundwater cut-off walls using tailings from aggregate production. The cost of cut-off wall constructed on the quarry's vertical slope from tailings is 32,1 eur/m². The need for compaction after every 0,5 m thick layer should be studied in order to reduce the cost of construction

1 SISSEJUHATUS

Eestis on mitmes viimase 10 aasta lõikes mäendussektoris läbi viidud keskkonnamõju hinnangus antud soovitusi, mäetöödest tuleneva veerežiimi muutuste leevendamiseks ning ära hoidmiseks, rajada hüdrotkete seinasid mäeeraldise teenindusmaa piirile. Hüdrotkete seinaga on võimalik vähendada lubja- või dolokivikarjääri sissevoolava vee hulka ning vähendada veealandusest tekkivat depressioonilehtrit. Samuti on need kasutatavad turbalasundi korral, säilitamaks mäetöödega mõjutatavate aladega külgnevate alade veerežiimi. Viimane situatsioon on Narva põlevkivikarjääri lõunaosas, kus mäetööde lähenedes mäeeraldise piirile mõjutatakse looduskaitse all oleva Puhatu soostiku veerežiimi. Maailmas on hüdrotkete seinasid laialdaselt kasutatud reostunud põhjavee liikumise tõkestamisel, veehoidlate tammide rajamisel ning karjääride isoleerimisel ümbritsevast veerežiimist. Sealjuures on neid ehitatud erinevatesse pinnastesse, kaasa arvatud turbasse.

Magistritöö eesmärgiks on uurida Eesti geoloogilistes tingimustes rajatud karjäärides hüdrotkete rajamise tehnilisi võimalusi ning analüüsida nende rajamise majanduslikku otstarbekust. Sealjuures analüüsida erinevaid tehnilisi lahendeid kui kasulikku kihti katab turbalasund ning piirkonnas on vajalik tagada veetaseme säilivus. Lisaks hinnata võimalusi lubja- ja dolokivikarjääri isoleerimist ümbritsevast alast eesmärgiga vähendada vee juurdevoolu karjääri ning veealanduslehti ulatust.

Autorile teadaolevalt ei ole Eestis rajatud hüdrotkete seinasid, kasutades spetsiaaltehnoloogiaid, eesmärgiga vähendada mäetöödest tulenevat veerežiimi muutumist.

Käesoleva magistritööga seatud ülesande lahendamisel kasutatakse maailmas (sh USA, Kanada, Austraalia) rakendatud hüdrotkete seinade rajamise tehnoloogiaid, sealjuures baseerutakse nende kohta koostatud eel- ja teostusanalüüsile. Kasutatud tehnoloogiaid võrreldakse omavahel ning hinnatakse nende sobivust Eesti geoloogilistesse tingimustesse. Sobilik valik tehakse lähtuvalt tehnoloogia rakendatavusest ning selle maksumusest. Töös käsitletakse kokku 10 tehnoloogiat, millest 5 on rakendatavad pehmete ning 5 kaljuste pinnaste korral.

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Töö on jaotatud kolmeks peatükiks, kus esimeses käsitletakse Eesti geoloogilisi tingimusi hüdrotõkete rajamise seisukohalt, kirjeldatakse erinevaid tehnoloogiaid ja hinnatakse nende rakendatavust Eesti tingimustes. Teises peatükis võrreldakse erinevaid tehnoloogiaid ning arvutatakse nende maksumus. Kolmandas peatükis analüüsitakse saadud tulemusi ning esitatakse töö järeldused ja soovitused.

Käesolev magistritöö on teoreetiline, katseteid läbi ei viidud.

Töö on seotud TTÜ Mäeinstituudi uurimussuunaga: Turbauuringud-kaevandamine, keskkonnamõju, vesi.

2 METOODIKA

Käesolevas peatükis kirjeldatakse lühidalt Eestis asuvate lubjakivi- ning turbamaardlate geoloogilisi tingimusi. Vaadeldakse nendes erinevate hüdrootkete tehniliste lahenduste rajamise võimalusi. Analüüsitavad tehnoloogiad on valitud maailmas läbiviidud samalaadsete uuringute põhjal.

1.1 Eesti turba-, lubjakivi-, dolokivimaardlate geoloogilised ja hüdrogeoloogilised tingimused

1.1.1 Turbamaardlad

Eesti turbaaladeks loetakse kõiki mistahes paksu turbalasundiga kaetud maastiku osasid [1], sealjuures võib neid liigitada nende arengustaadiumi järgi. Eristatakse madal-, siide ja kõrgsoid [1]. Sõltuvalt turbaalade arengustaadiumist on nendel erinev vee toiterežiim. Madalsood toituvad põhjaveest ning kõrgsood ehk rabad sademete veest. Soode tekkimise eeldused on seotud kliimatiliste ja hüdrogeoloogiliste tingimustega. Lisaks on nende tekkel määrav pinnamood ning -kate. Eesti soodest ligikaudu 60% on tekkinud mineraalmaa soostumise tulemusena ning 40% on järvelise tekkega [2]. Mineraalmaa soostumise eelduseks on väikese filtratsioonikoefitsiendiga pinnakatte olemasolu (savi, liivsavi, saviliiv) ning tasane pinnavorm. Järvelise päritoluga turbaalad on tekkinud veekogude kinnikasvamise tulemusena.

Peamiselt eelmisel sajandil on Eestis ulatuslike geoloogiliste tööde käigus uuritud erinevaid soosid ning tehtud tööde tulemustest lähtuvalt moodustatud mitmeid turbamaardlaid. Turbamaardlatena on arvele võetud vähemalt 10 ha suurune soo, kus turbakihi paksus madalsoos on vähemalt 0,9m, siirdesoods 1,1m ning kõrgsoos 1,2m [2]. 2013. a lõpu seisuga on Eestis maavaravarude registris arvel 280 turbamaardlat, millest 63 kaevandati turvast [3].

Eestis paiknevad turbatootmisalad asuvad peamiselt kõrgsoo tüüpi turbamaardlates, mille veerežiimi moodustavad peamiselt sadeveed. Eesti Riikliku Ilmateenistuse andmetel oli Eesti

keskmise sademete hulk perioodil 1981.a-2013.a 672mm [4]. Arvestades, et ~50% sademetest aurustub, infiltreerub pinnasesse aastas keskmiselt 336 mm ehk 3360 m³/ha sademete vett. Turbalasundi filtratsioonimoodul on 0,3 - 1,0m/ööp [5].

Tabelis 2.1 (Tabel 2.1) on toodud valik Eesti turbamaardlate turbakihi paksuseid ning nende tekke tüüp. Valikusse on võetud need turbamaardlad, kus 2013.a lõpu seisuga oli kehtiv kaevandamise luba. Valiku kriteeriumi tingis asjaolu, et kaevandamise loa andjad on võtnud seisukoha mitte eelistatult anda maavara kaevandamise lubasid puutumatu loodusega turbamaardlatesse. Seega on võimalik maavara kaevandamise lubasid edukalt taotleda lähitulevikus vaid aladel, kus on varasemalt kaevandatud või millele on rajatud kuivendussüsteem. Seega valitud alade korral on tõenäolisem, et lähitulevikus tehakse täiendavaid investeeringuid loodushoiu ning tootmise optimeerimiseks.

Tabel 2.1 Valik Eesti turbamaardlate parameetreid [2;6]

| Turba- maardla | Turbakihi paksus, m | | Tekke tüüp | Lamami materjal |
|-------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | Kesk- mine | Maksi- maalne | | |
| Ellamaa | 5,6 | 7,6 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv |
| Peningi | 4,2 | 8,3 | Järve soostumine | Järvemuda, järvelubi, saviliiv |
| Sausti | 4,8 | 6,8 | Järve soostumine | Järvelubi, liiv, liivsavi |
| Ohtu | 7,7 | 10,0 | Järve soostumine | Järvelubi, savi, aleuriit |
| Rae | 6,0 | 8,3 | Jäänukjärv | Järvemuda, saviliivmoreen |
| Ääsmäe | 6,0 | 7,5 | Nõo soostumine | järvemuda, saviliivmoreen |
| Pihla | 3,7 | 5,2 | Jäänukjärv | Liiv, viirsavi |
| Hiiesoo | 3,5 | 4,4 | Järve soostumine | Saviliiv, moreen |
| Puhatu | 4,2 | 7,8 | Järve ja mineraalmaa soostumine | Liiv, liivsavi, liivsavimoreen |
| Endla | 4,8 | 7,6 | Järvenõgude soostumine | Järvelubi, liiv, liivsavi, savi |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Turba- maardla | Turbakihi paksus, m | | Tekke tüüp | Lamami materjal |
|--------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| | Kesk- mine | Maksi- maalne | | |
| Umbusi | 5,2 | 8,5 | Jõgede lammi ja järvede soostumine | Järvelubi, liivsavi, saviliiv |
| Epa-Vassaare | 4,9 | 7,0 | Nõo soostumine | Moreen |
| Epu-Kakerdi | 4,5 | 8,6 | Järvede kinnikasvamine | Järvelubi, saviliiv |
| Lokuta | 4,2 | 5,2 | Mineraalmaa soostumine | Liiv, saviliiv |
| Retla | 6,0 | 9,0 | Mineraalmaa soostumine | Liivsavi |
| Tondissaare | 4,3 | 7,5 | Järve ja mineraalmaa soostumine | Järvemuda, liivsavi |
| Kallissare- Lubjaahju | 4,5 | 6,0 | Järve ja mineraalmaa soostumine | Järvemuda, järvelubi, saviliiv |
| Kõverdama | 4,5 | 6,4 | Mineraalmaa soostumine | liiv, aleuriit |
| Niibi | 4,3 | 6,9 | Järve soostumine | Järvelubi, saviliiv, viirsavi |
| Laiküla | 1,7 | 3,9 | Jäänukjärve soostumine | Järvemuda, saviliiv, liivsavi |
| Peetla | 2,1 | 8,6 | Jõgede lammi ja järvede soostumine | Järvemuda, liivsavi |
| Armiku | 2,5 | 4,2 | Nõo soostumine | Savi, liiv |
| Ohepalu | 6,6 | 8,1 | Järve soostumine | Järvemuda, järvelubi, savi |
| Punasoo | 3,7 | 6,1 | Järve kinnikasvamine | Järvemuda, saviliiv, savi |
| Saara | 4,2 | 7,1 | Järve kinnikasvamine | Järvemuda, peenliiv |
| Uuemõisa | 2,3 | 2,9 | Järve kinnikasvamine | Liiv, saviliiv |
| Varudi | 2,7 | 4,1 | Järve kinnikasvamine | Liivsavi, saviliiv |
| Kurgsoo | 2,6 | 5,7 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv, liivsavi |
| Meelva | 2,4 | 6,4 | Jäänukjärve soostumine | Järvemuda, saviliiv |
| Meenikonno | 2,7 | 5,5 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv, liivsavi |

Hüdroökete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Turba- maardla | Turbakihi paksus, m | | Tekke tüüp | Lamami materjal |
|-------------------|------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Kesk- mine | Maksi- maalne | | |
| Lavassaare | 6,8 | 9,1 | Laguuni kinnikasvamine | Liiv, aleuriit, savi |
| Kavasoo | 3,6 | 5,2 | Mineraalmaa soostumine | Moreen, liiv |
| Kõrsa | 3,1 | 4,0 | Järve soostumine | Järvemuda, liiv, saviliiv |
| Möksi | 5,8 | 7,2 | Järve soostumine | Saviliiv, liivsavi |
| Rääma | 4,3 | 7,5 | Mineraalmaa soostumine | Saviliiv |
| Pööravere | 7,6 | 8,5 | Järve soostumine | Järvemuda, liivsavi |
| Hagudi | 3,9 | 7,9 | Järvede soostumine | Järvemuda, moreen, savi |
| Keava | 4,5 | 8,7 | Mineraalmaa soostumine | Savi, liiv |
| Orgita | 2,3 | 3,6 | Mineraalmaa soostumine | Savi, liiv |
| Tõnumaa | 3,3 | 6,0 | Järve soostumine | Liiv, viirsavi |
| Õmma | 4,6 | 6,5 | Järve soostumine | Saviliiv, liivsavi |
| Koigi | 1,5 | 2,5 | Mineraalmaa soostumine | Liiv, savi, aleuriit |
| Piila | 1,3 | 3,2 | Jäänukjärve soostumine | Peeneteraline liiv, savi, liivsavi |
| Pelisoo | 1,1 | 2,2 | Jäänukjärve soostumine | Järvemuda, peeneteraline liiv |
| Keressaare | 4,3 | 6,2 | Järve soostumine | Järvemuda, liiv |
| Laukasoo | 3,1 | 6,0 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv |
| Möllatsi | 3,5 | 5,0 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv, liivsavi |
| Sangla | 3,7 | 6,5 | Jõgede lammi ja järvede soostumine | Järvemuda, järvelubi, liivsavi |
| Kantsi | 2,5 | 4,9 | Jõe lammi soostumine | Saviliiv |
| Lagesoo | 3,8 | 6,2 | Nõo soostumine | Aleuriit, saviliiv |
| Tõrva | 3,2 | 4,5 | Järve soostumine | Järvemuda, savi |
| Napsi | 5,6 | 10,6 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv, |

Hüdroökete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Turba- maardla | Turbakihi paksus, m | | Tekke tüüp | Lamami materjal |
|--------------------|------------------------|------------------|-------------------------|--|
| | Kesk- mine | Maksi- maalne | | |
| | | | | liivsavi |
| Parika | 3,2 | 8,6 | Järve soostumine | Järvemuda, viirsavi, saviliiv, liivsavi |
| Õisu | 5,4 | 7,6 | Järve soostumine | Järvemuda, saviliiv, liivsavi |
| Ikepera | 2,1 | 4,0 | Järvenõo kinnikasvamine | Järvemuda, liivsavi, saviliiv |
| Pätsi | 3,7 | 4,6 | järve kinnikasvamine | Järvemuda, peeneteraline liiv |
| Soosaare | 4,5 | 6,8 | Järve soostumine | Saviliiv, liiv |
| Leinasoo | 3,5 | 5,5 | Järve soostumine | Järvemuda, |
| Roosa | 3,2 | 5,9 | Järve kinnikasvamine | Järvemuda, peeneteraline liiv |
| Maksimaalne | 7,7 | 10,6 | - | - |
| Keskmine | 4,0 | 6,4 | - | - |

[Analüüs\Turvas geoloogilised tingimused.xlsx](#)

Üleval olevast tabelist 2.1 (Tabel 2.1) selgub, et valitud turbamaardlate maksimaalne turbalasuundi paksus on 10,6m ning keskmine paksus on 4,0m.

1.1.2 Lubja- ja dolokivimaardlad

Lubja- ja dolokivimaardlad on tekkinud peamiselt biokeemiliste setendite merepõhja ladestumise teel [7]. Sealjuures lubjakivisetted on ladestunud valdavalt rannikumeres ning dolokivisetted laguunides ning korallides [8]. Tulenevalt Eesti geoloogia iseärasusest asetsevad kivimite kihid kaldu lõuna suunas. Kihtide kallakus on umbes 3 meetrit 1 kilomeetri kohta [9]. Lubjakivisetted

on peamiselt ladestunud ordoviitsiumi ning osaliselt siluri ajastul. Arvestades, et ordoviitsiumi kivimikompleksi avamusala asub Põhja-Eestis, siis selle tõttu asuvad ka valdavalt Eesti lubjakivimaardlad ja karjäärid Põhja- ja Ida-Eestis. Dolokivi leiukohad paiknevad peamiselt siluri kivimikompleksi avamusalal ehk lääne-idasuunalisel joonel Kesk-Eestis. Mõneti leidub dolomiiti ka Kagu-Eestis devoni ajastu avamusjoonel. Lubja- ja dolokivimite survetugevus jääb vahemikku 40-140MPa [10].

Lubja- ja dolokivimaardlates asuvatesse karjääridesse valgub valdavalt põhja- ning sademetevesi. Käsitletavate kivimikomplekside vertikaalne filtratsioonikoefitsient on 10 kuni 100 korda väiksem kui horisontaalne filtratsioonikoefitsient [5]. Seega liigub nendes kivimites vesi peamiselt mööda kivimite kihte horisontaalsuunas. Siluri-ordoviitsiumi veekompleksi vertikaalne filtratsioonimoodul jääb vahemikku 10^{-5} - 10^{-2} m/ööp ning horisontaalne jääb vahemikku 10-50m/ööp.

2013.a lõpu seisuga oli Eesti maavaravarude registris arvel 57 lubja- ja 34 dolokivimaardlat, millest kaevandatakse maavara vastavalt 20 ja 17 maardlas. Nendest 19 kaevandatakse maavara osaliselt põhjavee tasemest allpool.

Tabel 2.2 Eesti lubja- ja dolokivimaardlate keskmised parameetrid [3;6]

| Maardla | Kivim | Kasuliku kihi paksus, m | | Veetaseme parameetrid | | Veelandus mõju | |
|------------|-----------|-------------------------|----------|-----------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| | | Suurim | Keskmine | Looduslik tase, abs m | Veesügavus, m | Juurdevool, m ³ /d | Depressioon, km |
| Suurkõrtsi | Lubjakivi | 7,8 | 5,3 | 47,8 | 7,8 | 825 | Andmed puuduvad |
| Vasalemma | Lubjakivi | 15,8 | 8,4 | 24,3 | 7,3 | 1400 | Andmed puuduvad |
| Väo | Lubjakivi | 16,6 | 10,3 | 27,6 | 4,4 | 1800 | Andmed puuduvad |
| Pajusi | Lubja- | 22,1 | 20,7 | 70,9 | 16,9 | 1241 | 1,0 |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Maardla | Kivim | Kasuliku kihi paksus, m | | Veetaseme parameetrid | | Veealandus mõju | |
|----------------|------------|-------------------------|----------|-----------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| | | Suurim | Keskmine | Looduslik tase, abs m | Veesügavus, m | Juurdevool, m ³ /d | Depressioon, km |
| | kivi | | | | | | |
| Sopimetsa | Lubjakiivi | 19,4 | 14 | 69 | 12 | 2067 | 1,4 |
| Eivere | Lubjakiivi | 10,5 | 5,1 | 72,5 | 7 | 1143 | 0,6 |
| Karinu | Lubjakiivi | 10,4 | 6,3 | 94,5 | 3,5 | 2583 | Andmed puuduvad |
| Ungru-Sepaküla | Lubjakiivi | 8,0 | 5,8 | 4,3 | 5,5 | 280 | Andmed puuduvad |
| Kunda | Lubjakiivi | 26,5 | 19,4 | 36,9 | 6,1 | 3000 | Andmed puuduvad |
| Lubja | Lubjakiivi | 10,4 | 6,3 | 40,5 | 6,1 | 3300 | 0,3 |
| Kogula | Lubjakiivi | 9,2 | 6,7 | 3,3 | 3,1 | 1971 | 1,0 |
| Pudivere | Dolokivi | 14 | 12,2 | 60,21 | 11,6 | Andmed puuduvad | Andmed puuduvad |
| Rõstla | Dolokivi | 11,7 | 10,2 | 53,8 | 9,8 | 3840 | 1,5 |
| Kareda | Dolokivi | 17,3 | 9,2 | 64 | 4,6 | 25000 | 3,5 |
| Kurevere | Dolokivi | 16,8 | 8,4 | 6,1 | 2,4 | 1459 | 3,4 |
| Anelema | Dolokivi | 22,1 | 11,2 | 24 | 9,6 | 13929 | 3,7 |
| Tarva | Dolokivi | 9,7 | 7,4 | 17,3 | 5,2 | 28 | Andmed puuduvad |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Maardla | Kivim | Kasuliku kihi paksus, m | | Veetaseme parameetrid | | Veealandus mõju | |
|--------------------|----------|-------------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| | | Suurim | Keskmine | Looduslik tase, abs m | Veesügavus, m | Juurdevool, m ³ /d | Depressioon, km |
| Kaarma | Dolokivi | 4,5 | 3,1 | 13 | 2 | Andmed puuduvad | Andmed puuduvad |
| Marinova | Dolokivi | 10,7 | 9,4 | 134 | 4,7 | Andmed puuduvad | Andmed puuduvad |
| Maksimaalne | | 26,5 | 20,7 | - | 16,9 | 25000 | 3,7 |
| Keskmine | | 13,9 | 9,4 | - | 8,4 | 5317 | 2,0 |

[Analüüs\Lubja-dolokivi geoloogilised tingimused.xlsx](#)

Üleval olevast tabelist (Tabel 2.2) selgub, et valitud Eesti lubja- ja dolokivimaardlate suurim lasundi paksus on 26,5m ning keskmine paksus on 9m. Suurim veesügavus on Pajusi lubjakivimaardlas asuvas karjääris, kus see ulatub 16,9m. Suurima põhjavee taseme alandamisest tingitud veealanduslehtriiga karjäärid asuvad Anelema dolokivimaardlas, kus see ulatub kuni 3,7km kaugusele.

1.1.3 Looduslikud veepidemed

Looduslikeks hüdrotõketeks võib lugeda veepidemeid, mis eraldavad erinevaid veekomplekse. Sageli on veepidemeteks savi, aleuriit ja savikas mergel. Nimetatud kivimite filtratsioonikoefitsient on väga väike, jäädes vahemikku 10^{-7} - 10^{-4} m/ [11].

Tabel 2.3 Eesti veekomplekside veepidemete parameetrid

| Veepide | Kivim | Paksus, m | Filtratsioonimoodul, m/ööp |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------|----------------------------|
| Narva regionaalne veepide | savikas aleuriit, domeriit, mergel, | 40-100 m | 10^{-5} - 10^{-4} |

| | savi | | |
|---|----------------|-------|-----------------------|
| Siluri-Ordoviitsiumi regionaalne veepide | aleuriit, savi | 3-15 | 10^{-6} - 10^{-4} |
| Lükati-Lontova veepide | aleuriit, savi | 40-70 | 10^{-7} - 10^{-6} |
| Kotlini veepide | aleuriit, savi | 20-40 | 10^{-7} - 10^{-5} |

Üleval olevast tabelist (Tabel 2.3) selgub, et väiksema filtratsioonimooduliga on Lükati-Lontova veepide, mille paksus on 40-70m.

1.2 Hüdrootõkked

Hüdrootõke ehk -isolatsioon on mingit konstruktsiooni, ehitist või selle osa vee kahjustava toime ja läbijooksu eest kaitsev kiht või rajatis [12]. Hüdrootõkkeid võib ehitada nii väikese filtratsioonikoefitsiendiga pinnastest kui ka erinevatest hüdroisolatsiooni materjalidest. Samuti kasutatakse nende rajamisel kombineeritult täitepinnast ning isolatsioonimaterjale. Üldiselt rajatakse hüdrootõkkeid pinnase- ning põhjavee kogumiseks (veehoidlate tammid), ehitiste maa-aluste osade kaitsmiseks, põhjavee valgumise tõkestamiseks ja selle taseme hoidmiseks [13], reostunud pinnase ning pinnasevee isoleerimiseks veekompleksist ning tunnelitesse ja allmaakaevandustesse põhjavee tungimise vältimiseks. Käesolevas magistritöös käsitletakse juhtu, kus on vajalik pinnase- ning põhjavee voolamise tõkestamine pinnases ning seeläbi selle taseme hoidmine. Eelnevaga saavutatakse karjääri sissevoolava vee hulga vähendamine ning külgnevate alade pinnase ja põhjavee taseme säilimine.

Hüdrootõkke rajamise planeerimisel ning projekteerimisel on kõige olulisem teada selle funktsiooni. Lähtuvalt hüdrootõkke eesmärgist tuleb projekteerimise lähteülesandes määrata selle vajalikud filtratsiooniomadused. Vastavalt kohalikest geoloogilistest ning mäenduslikest tingimustest tuleb määrata planeeritud tõkke sügavus ning ulatus. Eelnevat ning lähteülesandes määratud arvestades on võimalik seejärel valida sobilik tehnoloogia. Sobilike tehnoloogiate selgitamise järel tuleb viimane valik teha lähtuvalt nende maksumusest.

Maailma praktika kohaselt kasutatakse pinnase- ja põhjavee voolamise tõkestamiseks peamiselt maa-aluseid vertikaalseid tõkkeseinu [14]. Nimetatud vertikaalseinu on võimalik ehitada väikese filtratsioonikoefitsiendiga ehitusegudest või komposiitmaterjalidest.

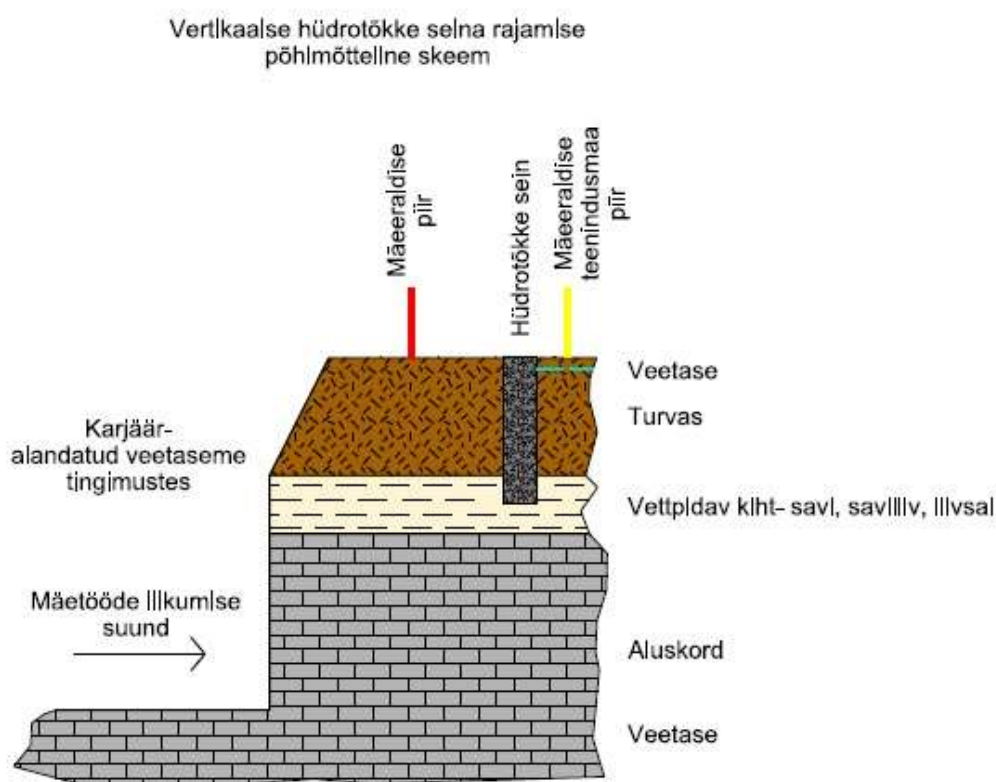
Viimase 25 aasta jooksul on maailmas oluliselt rohkem hakatud rajama hüdrotõkkeseinu karjääride isoleerimiseks ümbritsevast veerežiimist. Näiteks Austraalias on Carringtoni kivisöe aukkarjääris rajatud 1200m pikkune hüdrotõkkesein Hunteri jõe ning karjääri vahele, et takistada vete sissevoolu karjääri mööda kivisöe kihtide peal asuvaid vettpidavate kivimite kihte [15]. Kirjeldatud situatsioon on sarnane Eestis paikneva Narva karjääri lõunaosa olukorraga, kus looduskaitse alla kuuluva Puhatu soostiku veed valguvad mööda turbalasundi lamamit karjääri. Seejuures suurendades karjäärist välja pumbatava vee hulka ning alandades soostiku veetaset. Narva karjääri mäeeraldiste kaevandamise loa omanik on uurinud võimalusi tõkestada Puhatu looduskaitseala veetaseme alandamise vähendamiseks [16].

Tabel 2.4 Valik maailmas rajatud hüdrotõkkeseinu [15]

| Asukoht | Hüdrotõkke mõõtmed, m | | | Ehitamise aasta |
|------------|-----------------------|-------|--------|-----------------|
| | Sügavus | Laius | Pikkus | |
| Austraalia | 15 | - | 1200 | 2010 |
| Austraalia | 25 - 49 | 0,8 | 1500 | 2008 |
| Austraalia | 18 | - | 1360 | 2003 |
| Austraalia | 15-28 | 1,1 | 4000 | 1994 |
| Austraalia | 40 | - | 350 | 2004-2006 |
| Kanada | 36 | 0,9 | - | 2008 |
| Kanada | 27 | 0,8 | - | 2008 |
| USA | 15 | 0,9 | - | 1991 |
| Jaapan | 26 | 0,9 | - | 1984 |

Teine võimalus hüdrotõkete rajamiseks on kasutada komposiitmaterjale. Pinnase- ja põhjavee valgumise takistamiseks on võimalik kasutada erinevaid polümeermaterjalist geomembraane või savikangaid. Sarnaselt väikese filtratsiooniga ehitusegudele on võimalik komposiitmaterjale kasutada vertikaalsete hüdrotõkete rajamisel. Lisaks on laialdaselt kasutatud nõlvade katmist

hüdroisolatsiooni materjalidega. Viimast kasutatakse kraavide voolusängide isoleerimisel [17] ning mahajäetud karjääride isoleerimisel, et rajada nendesse prügilaid. Eestis on kasutatud geosünteesmaterjale endisele karjäärialale rajatud Jõelähtme prügila ladustamisplatside ehitamisel, tõkestamaks nõrgvete imbumist põhjavette [18]. Lisaks on projekteeritud komposiitmaterjalidest vertikaalse hüdrotõkkeseina rajamine Rääma turbatootmisala isoleerimiseks külgnevatest aladest [19].



Joonis 2.1 Vertikaalse hüdrotõkke seinu rajamise põhimõtteline skeem [autori koostatud]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

Üleval olevalt jooniselt (Joonis 2.1) selgub, et karjääris või turbatootmisalal veerežiimi muutmisel on võimalik hüdrotõkke seinaga säilitada külgnevate alade veetase. Selle tarbeks tuleb rajada väikese filtratsiooniga materjalidest hüdroisolatsioonitõke, sealjuures tuleb see rajada kuni vertikaallõikes asuva veepidemeni. Vastasel korral on võimalik pehmete pinnaste korral vete liikumine tõkke alt.

Kolmas võimalus karjääri sisse voolava veehulga vähendamiseks on rajada hüdrotõke karjääri vertikaalnõlvale. Käsitlevat juht on praktiseeritav lubja- ja dolokivikarjäärides, kus maavara kaevandatakse allpool veetasel ning karjääri valguv vesi pumbatakse välja. Karjääri vertikaalnõlvale hüdrotõkke rajamisega on võimalik vähendada vee välja pumpamisest tingitud alanduslehtri raadiust ning seeläbi optimeerida veeärastuseks tehtavaid kulutusi. Vertikaalseinale hüdrotõkke rajamisel on võimalik kasutada nii pritsbetooni kui ka killustiku tootmisest tekkivaid jääke ehk sõelmeid (fraktsioon 0-4mm), mille filtratsioonikoefitsient on veega küllastunud olekus väga väike [20]. Eestis on antud soovitus sarnase hüdrotõkke rajamiseks Koonga ja Koonga II dolokivikarjääri keskkonnamõju hindamise käigus [21].

1.2.1 Pinnase ning sideaine tüüpi hüdrotõkked

Käesolevas peatükis käsitletakse vertikaalsete hüdrotõkke seinade rajamist pinnase ning sideaine segust. Selliseid tehnoloogiaid võib liigitada kolmeks: pinnas stabiliseerimine, pinnase injekeerimine ning pinnase soonimine.

Pinnase ja sideaine tüüpi hüdrotõkked peavad olema väiksema filtratsioonikoefitsiendiga kui 10^{-4} m/s, kuna looduslike veepidemete filtratsioon jääb vahemikku 10^{-7} - 10^{-4} m/s. Seega ei ole vaja rajada oluliselt väiksema filtratsioonikoefitsiendiga tõkkeseina kui looduslik veepide. Maaailma praktikas on saavutatud sellise filtratsioonikoefitsiendiga tõkkesein, kui selle laius on 0,8-1,0m [15]. Sellest tulenevalt loetakse ka käesolevas töös vajalikuks tõkkeseina paksuseks vähemalt 0,9m.

1.2.1.1 Sideained

Sideaineks nimetatakse ainet, millega on võimalik liita teisi materjale [22]. Need jaotatakse lähtuvalt omadustest kahte rühma – orgaanilisteks ning mineraalseteks. Orgaanilised sideained ei kivistu, nendega on võimalik materjale liita, näiteks liimid, vaigud ning bituumen [22]. Käesolevas töös vaadeldakse mineraalseid sideaineid. Suurem osa mineraalsetest sideainetest on algkujul pulbrid ning need jaotatakse kivistumise iseloomu järgi omakorda kahte gruppi: õhk-

ning vesisideaineteks. Õhksideaineteks loetakse neid, mis säilitavad oma kõvaduse vaid õhus, näiteks lubi ja kips. Vesisideaineteks on tsement ja põlevkivituhk-sideaine [22].

Pinnase ja sideaine tüüpi hüdrotõkke rajamisel tuleb valida kasutatav sideaine ja selle kogus segus lähtuvalt objektist, kuna üldiselt võib isegi väga sarnaste omadustega pinnaste korral väiksemgi erinevus oluliselt muuta soovitud tulemust [23]. Objekti geoloogilistele tingimustele sobiva sideaine tüübi ning selle koguse väljaselgitamiseks tuleb teha mitmeid katseid, sealhulgas katsetada laboris töödeldud pinnase survetugevust, filtratsioonikoefitsienti ning kokkusurutavust [23]. On välja selgitatud, et orgaanikarikaste pinnaste korral peab seguaine kogus olema suurem kui mineraalsete pinnaste korral [23] tagamaks selle stabiilsusomaduste, eelkõige survetugevuse, suurendamine. Survetugevuse suurenedes vähendatakse ka materjalide filtratsiooniomadusi [24], mis on oluline hüdrotõkete seisukohalt. Stabiliseeritud turbapinnase vee filtratsiooni katsed on näidanud, et erinevate sideainete korral on pinnase filtratsioonikoefitsient vahemikus 10^{-9} - 10^{-8} m/s. Sealjuures ei ole määrav sideaine kivistumiseaeg [25].

Tabel 2.5 Sideaine valik sõltuvalt pinnase tüübist [23;26;27]

| Sideaine | Aleuriit | Savi | Muda | Turvas |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Orgaanikat sisaldus 0-2% | Orgaanikat sisaldus 0-2% | Orgaanikat sisaldus 2-30% | Orgaanikat sisaldus 50-100% |
| Tsement | ++ | + | + | ++ |
| Tsement+kips | + | + | ++ | ++ |
| Tsement+ahjuräbu | ++ | ++ | ++ | +++ |
| Lubi+tsement | ++ | ++ | + | - |
| Lubi+kips | ++ | ++ | ++ | - |
| Lubi+räbu | + | + | + | - |
| Lubi+kips+räbu | ++ | ++ | ++ | - |
| Lubi+kips+tsement | ++ | ++ | ++ | - |
| Lubi | - | ++ | - | - |

Hüdrotoekete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|-----|
| Tsement+elektrifiltrituhk | Ei ole teada | Ei ole teada | Ei ole teada | +++ |
| Elektrifiltrituhk | Ei ole teada | Ei ole teada | Ei ole teada | ++ |

+++ Sobib pinnase tüübile väga hästi; ++ Sobib pinnase tüübile hästi; + Sobib pinnase tüübile rahuldavalt, - Ei sobi pinnase tüübile

Üleval olevas tabelis 2.5 (Tabel 2.5) on näidatud, et turba pinnase korral on parimad sideained tsemendi ja ahjuräbu segu, samuti on sobilikud tsement ja tsement+kips. Tabel 2.5 toodud sideaine tsement+ahjuräbu on katsetatud Rootsi tingimustes, kus rauamaagi töötlemise jätk ahjuräbu on kättesaadav. Eesti tingimustes on tehtud turbapinnaste tarbeks hea sideaine koostise leidmiseks erinevaid katseid põlevkivitööstuse jääkidega. Üheks parimaks koostisosaks on katsetuste järgi keevkihi katla elektrifiltri tuhk.

Portlandtsement on enim kasutatav ehitussideaine. Selle tootmisel kasutatakse enamikel juhtudel kahte toorainet – 75% lubjakivi ning 25% savi [22]. Toorainetest toodetakse klinkrit, mis omakorda purustatakse pulbriks [28]. Tsement on sobilik sideaine pinnaste stabiliseerimisel, kuna see on vesisideaine, mille tõttu säilitab see oma omadused ka niisketes ning veega küllastunud tingimustes. Lisaks suurendab tsemendi kui sideaine väärtust asjaolu, et tsementeerumine ei sõltu pinnases leiduvatest mineraalidest vaid ainult vee olemasolust. Selle tõttu on tsement sideainena kasutatav mitmete pinnaste korral [25]. Turba pinnaste korral tuleb kasutada sulfaadikindlat tsementi, kuna see on vastupidavam keemilisele korrosioonile, mida tekitavad turbas leiduvad keemilised ühendid [27]. Tsemendi kasutamisel pinnaste püsivusomaduste parendamisel on oluline, et sideaine segatakse pinnasega ühtlaselt, kuna tsement ei valgu ise ümbritsevasse materjali [24]. Seda kasutatakse enim teraliste ning mittensidusate pinnaste korral [29]. Lisaks vähendab tsement sideainena pinnase plastilisust ning kokkusurutavust ja suurendab survetugevust [24].

Bentoniit on vulkaanilisest tuhast pärinev savi [30]. Bentoniiti kasutatakse sideaine segudes, kuna sellel on suur plastilisus ning vee imavusvõime. Seega veega segades saadaval segul on väga madal filtratsioonikoefitsient [31]. Seda kasutatakse sideaine segudes, et saavutada nendele väike filtratsioon [32] ning võimaldada peamiselt tsemendi sideaine segudel veega küllastunud tingimustes taheneda.

Kustutatud ja kustutamata lupja kasutatakse peamiselt suure savisisaldusega pinnaste korral [28]. Pinnaste korral, kus veesisaldus on suurem, on võimalik kasutada kustutamata lupja – sellisel juhul viiakse sideaine pinnasesse, kus see reageerib olemasoleva veega ning muutub kustutatud lubjaks. Kustutamata lubja mass suureneb ~32% vee arvelt selle kustutamise käigus [25]. Nimetatud protsessi käigus vabaneb soojus, mille tulemusena väheneb täiendavalt ka pinnase veesisaldus [24]. Erinevalt tsemendist, mis saavutab suurema osa oma tugevusest 28 päeva jooksul, kulub lubi-sideainetel lõpliku tugevuse saavutamiseks aastaid [24]. Lubi sideainena ei ole kasutatav suure orgaanikasisaldusega pinnaste korral.

Elektrifiltri- ehk lendtuhk on põlemisprotsessi peeneteraline jääk. Lendtuha koostis sõltub põletatud kütusest [24]. Enamasti pärineb lendtuhk kivisöe, põlevkivi ning turba põletamisest. Nimetatud kaks viimast tuha sorti on kättesaadavad ka Eestis. Valdavalt kasutatakse lendtuhka koos mõne teise sideainega, näiteks tsemendiga. Sellisel juhul on lendtuha eesmärk täita pinnase tühimikud ning suurenda selle tihedust. Tsemendi eesmärk segus on suurendada selle tugevust. Tavaliselt moodustab tsement 20-30% lendtuha mahust [33]. Samas on uuringud näidanud, et tsemendi võib asendada lendtuhaga ka 100% ulatuses [27]. Elektrifiltrituhka on võimalik osta Narva Elektriijaamast, keskmine hinnamäär on ~10% tsemendi hinnast [26]. Eesti tingimustes on mitmel korral katsetatud turbapinnase tugevuse suurendamist tsement-tuhk komposiitsideainega. 2007.a viis Ramboll Eesti AS Maanteeameti tellimusel läbi pinnase stabiliseerimise töid planeeritud Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa maanteel Kose-Mäo lõigul. Tööde raames katetati erinevaid sideainete segusid pinnase tugevusomaduste parendamiseks. Lähtuvalt katsetulemustest osutus survetugevuse seisukohalt parimaks portlandtsement+lendtuhk, sealjuures nimetatud segu omadused olid 3,5 korda paremad kui ainult portlandtsementi kasutades [26]. Lisaks uurisid Ramboll Eesti AS ja AS Eesti Energia 2011.a OSAMAT projekti raames elektrifiltrituhha kasutamise võimalusi teedeehituses pehmete pinnaste stabiliseerimisel. Töö tulemustest selgus, et parim pinnase survetugevus saavutati sideainega, mis koosnes elektrifiltrituhast ning tsemendist [27].

Hüdrootkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Tabel 2.6 OSAMAT projekti raames tehtud turbapinnase stabiliseerimise katsetuste tulemused elektrifiltrituha ning tsemendiga [27]

| I koostisosa | Kogus segus, kg/m ³ | II koostisosa | Kogus segus, kg/m ³ | Survetugevus, kPa | |
|--------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|-------|
| | | | | 28 p | 90 p |
| EF PL3 TP | 200 | Tsement | 150 | 335 | 403,8 |
| EF PL8 KK | 200 | Tsement | 100 | 213 | |
| EF PL8 KK | 200 | Tsement | 150 | 301 | 331,7 |

EF PL 3 TP – Elektrifiltrituhk plokk 3 tolmpõletuskatel

EF PL 8 KK – Elektrifiltrituhk plokk 8 keevkihtkatel

Üleval olevast tabelist (Tabel 2.6) selgub, et tolmpõletuskatla elektrifiltrituhaga tehtud sideaine on turbapinnase stabilisaatorina parem kui on keevkihtkatla tuhk samade segukoguste juures. 28 päeva pikkuse tardumisaja jooksul on tolmpõletuskatla elektrifiltrituhaga stabiliseeritud pinnase survetugevus 34kPa võrra suurem kui seda on keevkihtkatla tuha korral. Tolmpõletuskatlas tekib keskmiselt 12t/h elektrifiltrituhka [26].

Sideaine valikul tuleb lisaks kohalikele geoloogilistele tingimustele lähtuda ka selle kättesaadavusest regioonis. Selle tõttu on otstarbekas kasutada Eesti tingimustes pinnaste stabiliseerimisel tsemendi ja lendtuha segu, millele on lisatud bentoniiti. Lendtuha ja tsemendi osakaal sideaine segus tuleb määrata objekti põhiselt katsetöödega.

Sideaine kogus

Lisaks pinnase tüübist lähtuvalt õigele sideaine valikule on äärmiselt oluline määrata ka õige sideaine kogus selle stabiliseerimisel. OSAMAT projekti raames tehtud katsetöodes andis parimaid tulemusi 1m³ turba stabiliseerimiseks 350kg sideainet, millest 200kg moodustas lendtuhk ning 150kg tsement [27]. Ramboll Eesti AS poolt läbi viidud Kose-Mäo lõigul läbi viidud katsetööde tulemustest selgus, et parimaid tulemusi annab sideainesegu tsemendist ja elektrifiltrituhast vastavalt vahekorrale 70-100kg ning 150-200kg [26]. Üldiselt peab paika seaduspära, mida rohkem sideainet, seda stabiilsem on pinnas [24]. Sealjuures turbapinnaste korral on oluline ületada tasakaalupunkt [23]. Saksamaa ettevõtte BAUER on saavutanud

hüdrotõkke seinade rajamisel selle filtratsioonikoefitsiendiks 10^{-8} m/s juhul kui tsemendi osakaal pinnases on olnud 100-200kg/m³ [34]. Bentoniiti kasutatakse sideaine segudes vähemalt 5% ulatuses kasutatud vee massist.

Purustatud kaljuste pinnaste ning sideaine segude korral tuleb kasutada mõneti erinevat sideaine ning täitematerjali osakaalu. Üldjuhul loetakse segus tsemendi osakaaluks 15-20% [35]. Samas on erinevad katsed näidanud, et üldiselt peaks 1m³ täitepinnase ja sideaine segus olema 200-230kg tsemendi ning 45-50kg bentoniiti [36]. Sellise segu korral on saavutatud hüdrotõkke filtratsioonikoefitsiendiks 10^{-8} m/s [36], mis täidab käesoleva tööga seotud eesmärgi.

Sideaine viimisel pinnasesse kasutatakse kahte viisi. Esimene variant on seadmete abil viia sideaine pinnasesse kuivalt ning teine variant on seda teha märjalt. Esimesel juhul reageerib sideaine pinnases oleva veega ning teisel juhul segatakse sideaine veega maapinnal ning seejärel pumbatakse see pinnasesse.

Vee kogus

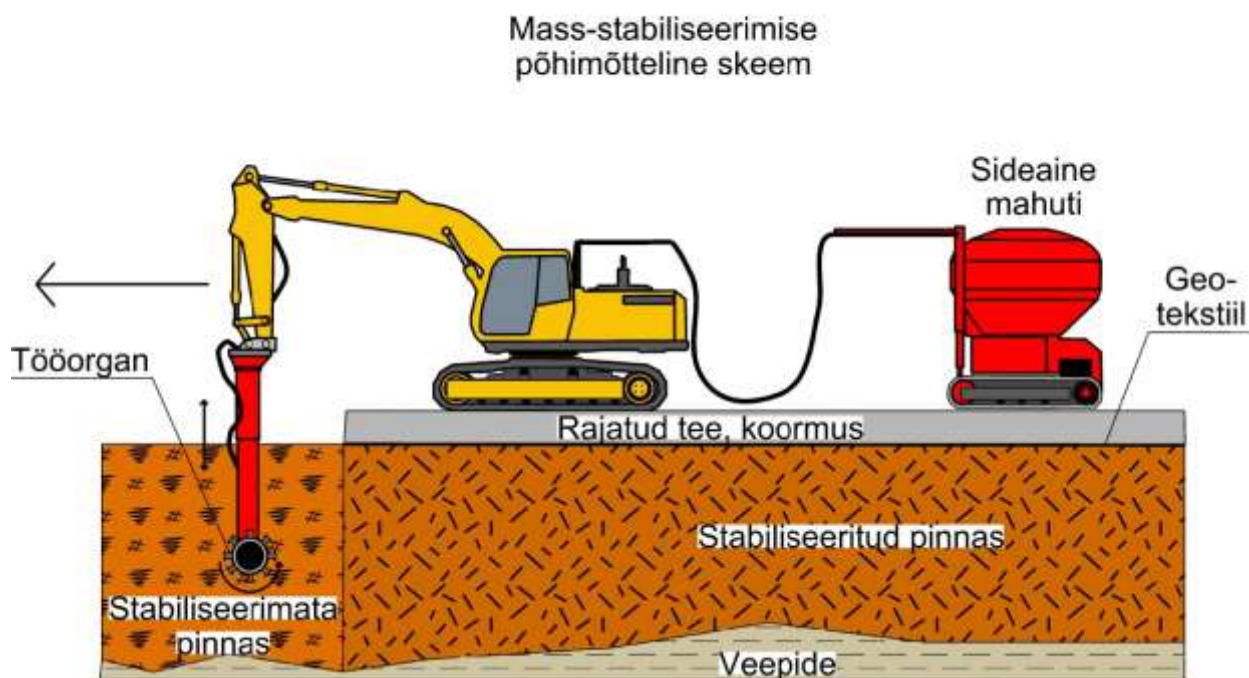
Lisaks eelnevale on märja sideaine kasutamisel oluline õige sideaine ja vee massi osakaalu suhe. Katsetööd on näidanud, et sideaine filtratsioonikoefitsient suureneb oluliselt kui sideaine ja vee suhe on suurem kui 0,5 ehk pool segu massist on vesi ning pool sideaine. Hüdrotõkke seinade rajamisel kasutatakse sageli suhet 0,3-0,45 [37].

1.2.1.2 Pinnase stabiliseerimine

Pinnase stabiliseerimist kasutatakse pehmete pinnaste püsivusomaduste parendamiseks. Pehmeteks pinnasteks loetakse savi, turvast ja muda [25]. Valdavalt kasutatakse sideainetega töötlemist pinnase stabiilsuse ning survetugevuse suurendamiseks teedehituses. Sideaine viimisel pinnasse suurendatakse selle stabiilsust ning vähendatakse filtratsiooniomadusi. Maailma praktikas on kasutatud pinnase stabiliseerimise tehnilisi lahendusi ka põhjavee liikumise tõkestamiseks [14]. Pinnase stabiliseerimise tehnoloogiad on mass-stabiliseerimine ja vai-stabiliseerimine.

Mass-stabiliseerimine

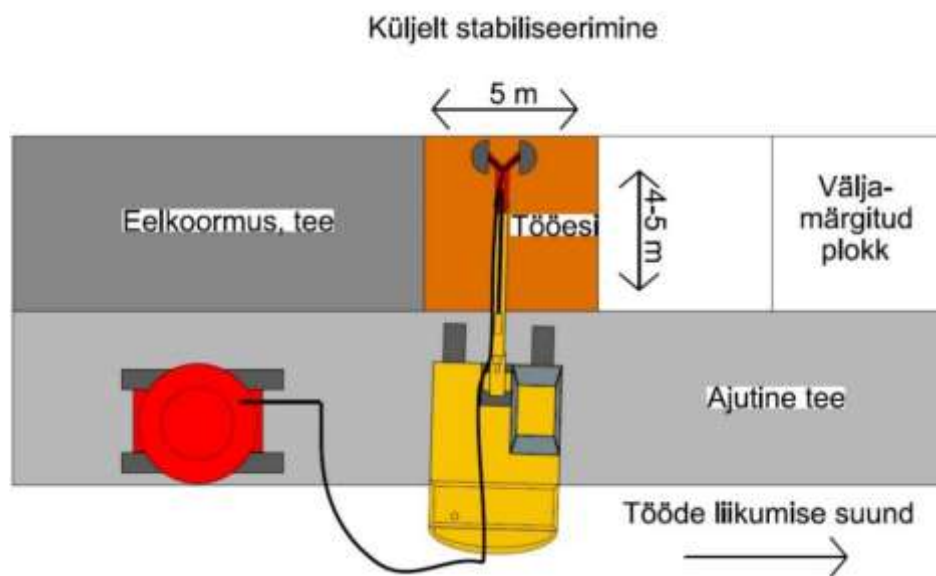
Mass-stabiliseerimine on nõrkade pinnaste tugevusomaduste parendamise võimalus. Selle käigus segatakse pinnasesse kuiva sideainet, mille tulemusena moodustub ühtlane pinnase ja seguaine mass, mis kivistub. Mass-stabiliseerimine on põhjendatud juhtudel, kus pehme pinnase kihi paksus ületab 2m ning ulatub kuni 5m [24]. Sideaine pinnasesse viimiseks kasutatakse tavalist ekskavaatorit, millele on monteeritud spetsiaalne mass-stabiliseerimise tööorgan ehk segamistrummel. Ekskavaatori külge on monteeritud või paikneb selle vahetus läheduses eraldi roomikvankril sideaine punker (Joonis 2.2). Seadmed on omavahel ühendatud pehme torustikuga, et suruõhuga sideainet transportida. Tulenevalt vajadusest kontrollida pinnasesse viidava sideaine kogust paigaldatakse torustikule ka regulaator [24;27]. Segamistrumlit, mis on ühendatud ekskavaatori noole külge, saab liigutada nii horisontaal- kui ka verikaalsuunas. Arvestades, et lisaks pöörab ekskavaator ka roomikvankril, on võimalik ühest seisust stabiliseerida pinnast kuni 20-25m² (plokk 4-5 x 5 m) ning 5m sügavuselt [24]. Suhteliselt väikest tööde tegemise sügavust loetakse mass-stabiliseerimise tehnoloogia suureks miinuseks. Mass-stabiliseerimise tegelik tootlikkus, mis on määratud katsetööde käigus, on ~100m³/h [25]. Käsitletava tehnoloogia eeliseks loetakse suhteliselt väikest seadmete massi, mis jääb suurusjärku 55-60 tonni. Kirjanduse järgne tehnoloogia kasutamise maksumus on 9 eur/m³ [26], mis ei sisalda sideainete, transpordi ega täiendavate tööde maksumust.



Joonis 2.2 Mass-stabiliseerimise põhimõtteline skeem [24]

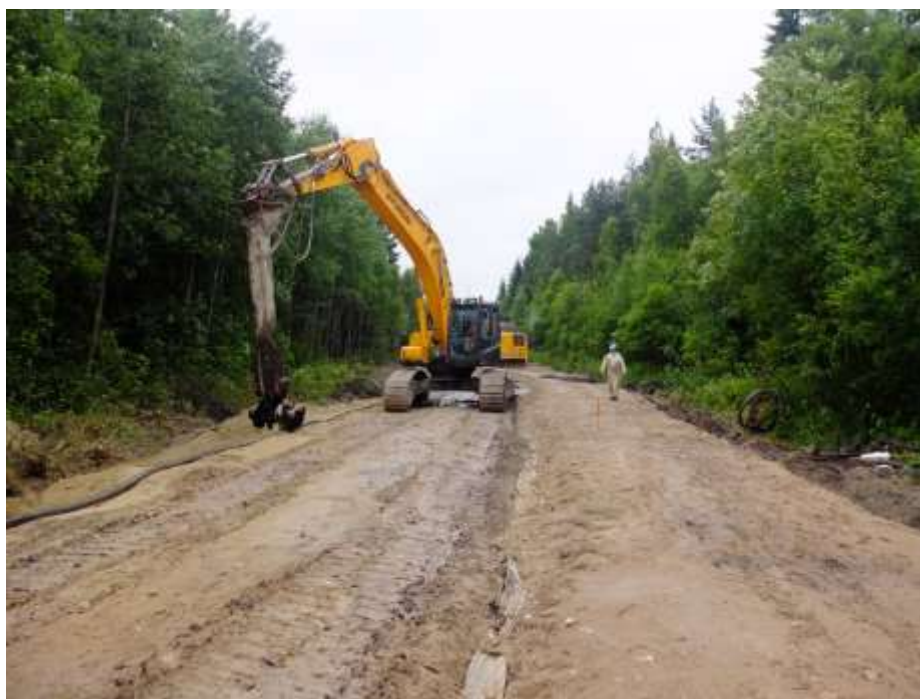
[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

Alloleval joonisel (Joonis 2.3) on näidatud mass-stabiliseerimise tööd küljelt. Sellisel juhul tuleb paralleelselt stabiliseeritavate plokkidega rajada ajutine tee, millel paiknevad tööde läbiviimisel masinad. Kirjeldatud tehnoloogiat kasutatakse juhtudel kui stabiliseeritakse väga pehmeid pinnaseid. Stabiliseeritud pinnasele rajatakse teemulle, eesmärgiga töödeldud pinnast eelkoormata. Eelkoormamise tulemusena saavutatakse suuremad pinnase tugevusomadused [25] ning selle soovituslik kõrgus on 0,5-1,0 m [24].



Joonis 2.3 Küljelt mass-stabiliseerimise lihtsustatud tööde skeem [autori koostatud]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)



Joonis 2.4 OSAMAT projekti raames kasutatud mass-stabiliseerimise seade [27]

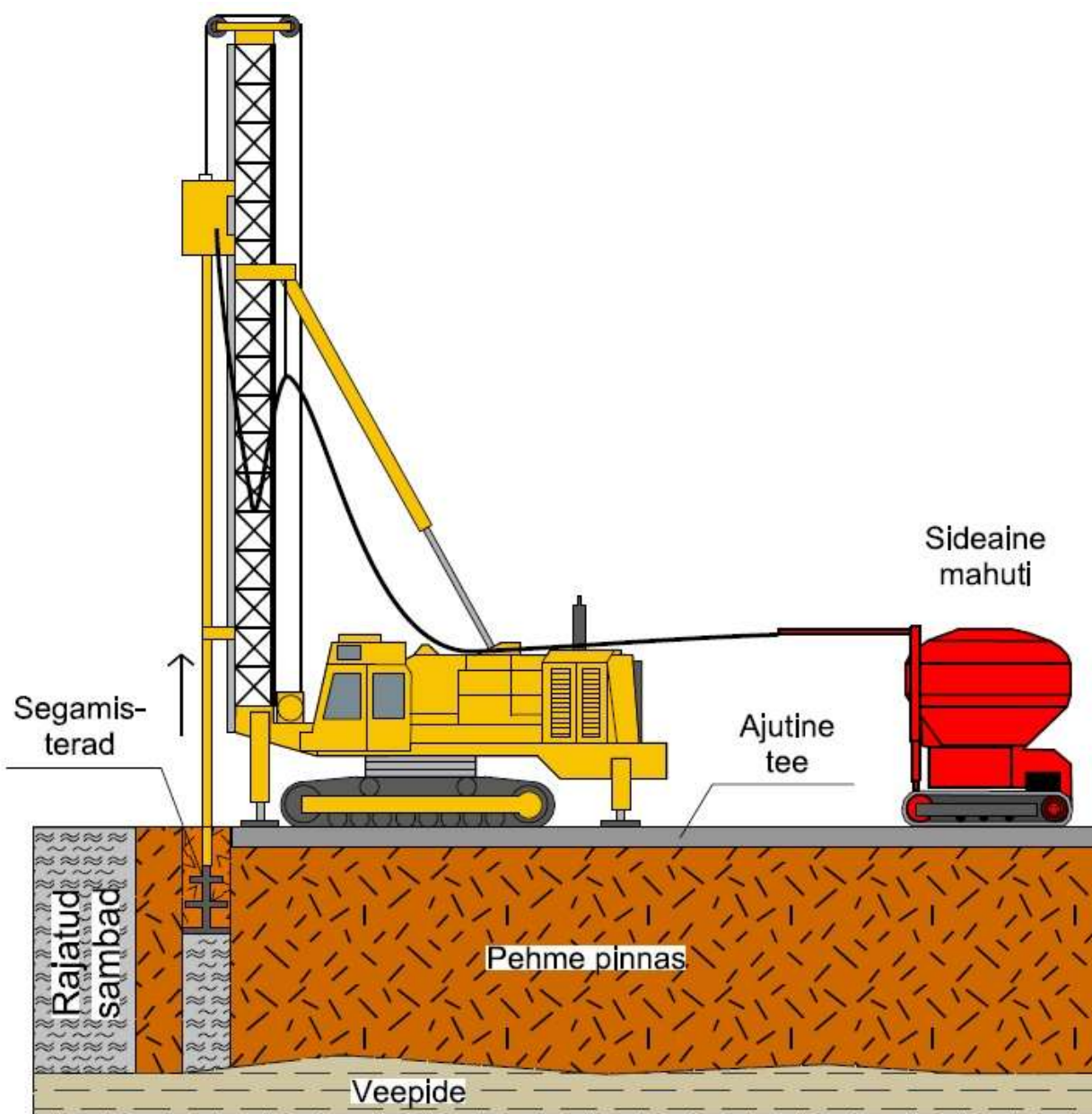
[Pildid\Mass-stab Simuna.jpg](#)

Joonisel (Joonis 2.4) on näha mass-stabiliseerimise seade ning eelkoormatud stabiliseeritud pinnas (vasakul).

Vai-stabiliseerimine

Vai-stabiliseerimine on üks pinnase stabiliseerimise meetodeid, mida kasutatakse peamiselt ehitiste aluste pinnaste tugevuse suurendamisel. Samas on võimalik selle tehnoloogiaga rajada ka hüdroisolatsiooni tõkkeid. Tehnoloogia tööpõhimõte on segada sideainet pinnasesse mehaaniliselt. Vai-stabiliseerimise tehnoloogia korral kasutatakse nii märga kui ka kuiva sideainet [25]. Kuiva sideaine korral kasutatakse selle pinnasesse viimisel suruõhku. Märg sideaine pumbatakse pinnasesse pinnaspumbaga. Maapinnal segatud sideaine viimiseks pinnasesse on vaja kasutada rohkem seadmeid kui kuiva sideaine kasutamisel.

Vai-stabiliseerimise tööorgan on sarnane purustuspuurimise puurseadmetega. Oluline vahe on selles, et tööorgan koosneb mitmest eripikkusega segamisterast, millele on paigaldatud sideaine juhtimise düüsid. Segamisterad on ühendatud puurtorudega sarnaste ülekandega torudega, mille sees transporditakse sideaine segamisteradeni. Pinnase stabiliseerimine tehakse tööorgani vertikaalsel liikumisel ning selle pöörlemisel ümber vertikaaltelje. Enne sideaine pinnasesse segamist surutakse tööorgan pehme pinnase lamamini või vettpidava kihini. Seejärel hakatakse sideainet pinnasesse suruma ning seda sellega segama. Samaaegselt tõstetakse tööorganit maapinna suunas. Stabiliseerimistöde tulemusena moodustatakse silindrikujuline sammast ja järgnev sammast kattub osaliselt eelneva sambaga. Ühe samba läbimõõt jääb vahemikku 0,5-2,1m ja sügavus 10-30m [23]. Tööde tulemusena rajatakse suhteliselt ühtlaste parameetritega hüdroisolatsiooni tõkkesein, mille paksus sõltub valitud tööorgani läbimõõdust ning sammaste kattuvuse ulatusest. Käsitleva tehnoloogia tegelik tootlikkus on 12-20 m/h [25]. Vai-stabiliseerimise tehnoloogia on sobilik kasutamiseks pehmete ning nõrkade pinnaste korral [23].



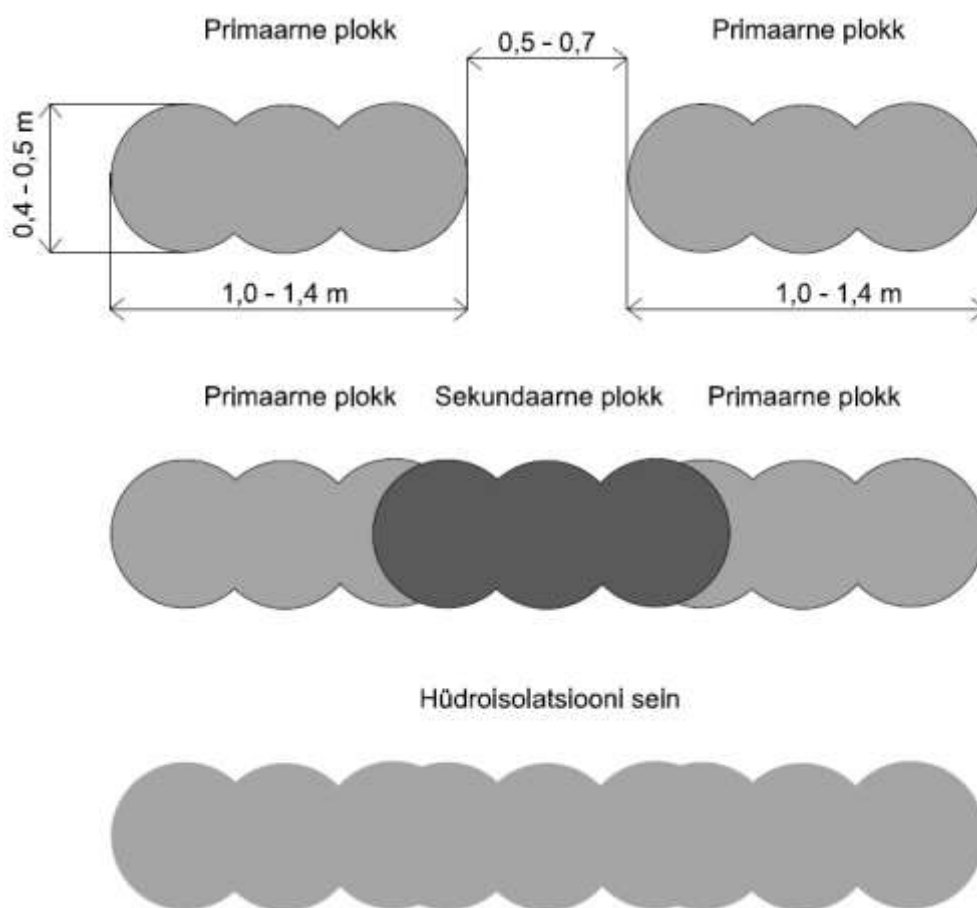
Joonis 2.5 Vai-stabiliseerimise lihtsustatud põhimõtteline skeem [34]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

SMW tehnoloogia

Kui vai-stabiliseerimist kasutatakse valdavalt ehitiste aluste pinnaste osaliseks tugevdamiseks, siis selle tehnoloogia edasiarendus SMW (ing.k *Soil Mixing Wall*) on mõeldud vahetult põhjavee liikumise tõkestamiseks rajatavate hüdroisolatsiooni tõkkeseinade ehitamiseks. Võrreldes vai-

stabiliseerimisega on SMW tehnoloogia puhul korraga kasutusel kolm kuni viis segamisterade tüüpi puurpead. Selle tehnoloogia korral kasutatakse märga sideainet ehk sideaine segatakse veega maapinnal ning seejärel pumbatakse see pinnasesse ja segatakse [34].



Joonis 2.6 SMW tehnoloogiaga hüdrotõkkeseina rajamise põhimõtteline skeem [34]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

Üleval oleval joonisel (Joonis 2.6) on näidatud SMW tehnoloogiaga rajatavad primaarsed ja sekundaarsed tõkkeseina moodulid ehk plokid. Ühe mooduli saab rajada ühest seisust. Primaarsed moodulid rajatakse ühele sihile vahekaugusega 0,5-0,7m. Sekundaarne moodul rajatakse primaarsete vahele. Lähtuvalt seadme tööorgani läbimõõdust saab rajada seinasid paksusega kuni 0,5m ning optimaalse sügavusega 6-15m [34]. Tulenevalt vajadusest saavutada Eesti tingimustes tõkkeseina filtratsiooniks vähemalt 10^{-4} m/s peab selle laius olema 0,9m. Seega SMW tehnoloogia korral tuleb rajada kaherealine sein. Teise rea moodulid rajatakse esimese rea

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

moodulite suhtes sellises ulatuses nihkes, et tekiks üks monoliitne tõkkesein. 0,55m suuruse diameetriga tööorgani korral on sellise seina minimaalne laius 0,95m.

Käsitleva tehnoloogia tootlikkus sõltub mitmest tegurist. Alloleval tabelis (Tabel 2.7) on toodud tehnoloogia kasutamise olulised parameetrid.

Tabel 2.7 SMW tehnoloogia tootlikkust mõjutavad tegurid [34]

| Parameeter | Eelistatud tingimused | Mitte eelistatud tingimused |
|----------------------------|---|---|
| Pinnase tüüp | Kuni keskmise tihedusega kruusakas liiv | Orgaanikarikas pinnas, tihe ning veeristerohke pinnas |
| Tõkkesina tüüp | Sirge ning muutumatute parameetritega | Muutlike parameetritega tõkkesein |
| Pinnase struktuur | Ühtlane | Kihiline |
| Tõkkesina rajamise sügavus | Sügavus > 6-10m | Sügavus < 5m |

SMW tehnoloogia tootlikkus eelistatud tingimuste korral on 20-24 m²/h ning mitte-eelistatud tingimuste korral 12-15m²/h. Arvestades, et SMW tehnoloogiaga on võimalik Eesti geoloogilistes tingimustes rajada tõkkeseinu ainult turba ning liiva pinnastel korral ning käesolevas töös käsitletakse pehmetest pinnastest ainult turvast, on selle tootlikkus Eestis 6-7,5 ruutmeetrit tunnis.

Käsitleva tehnoloogia puuduseks on vajalike seadme suur kombineeritud mass, mis ulatub ~80 tonnini, sealjuures roomikvankri mass, mille töösügavus on 11m on ~60 tonni [34]. Lisaks puurseadmele on vajalik frontaallaadur sideaine mahuti täitmiseks ja muudeks abitöödeks. Laadurit on võimalik kasutada ka laoplatsilt vajalike materjalide transportimiseks. SMW tehnoloogiaga tõkkeseina rajamisel on sideainet kasutatud järgmises vahekorras: 250-450 kg/m³ tsementi ning 30-50 kg/m³ bentoniiti [34].

1.2.1.3 Pinnaste injekeerimine

Pinnaste injekeerimine on stabiliseerimise meetod, kus maapõue segatakse surve all märga sideainet, mille tulemusena parenevad pinnase tugevusomadused. Sarnaselt vai-stabiliseerimise tehnoloogiale on võimalik injekeerimise meetodiga hüdrotõkkesein moodustada läbi puuraukude pinnasesse surutud sideainega. Injekeerimise puuraugud tuleb rajada planeeritud tõkkeseinaga samas sihis lähtuvalt piirkonna geoloogilistest tingimustest sõltuva vahekaugusega reas. Enne sideaine injekeerimist pinnasesse puuritakse puurauk diameetriga 100-200 mm valitud sügavuseni [38]. Sideaine injekeerimine tehakse alt-üles meetodil. Pinnaste injekeerimist tehakse peamiselt kolme tehnoloogiaga.

Surveinjekeerimine on meetod, mille korral pumbatakse sideainepulp eelnevalt puuritud puurauku, kus see madalal surveel pressitakse kivimilasundi lõhedesse. Käsitletav tehnoloogia on teoreetiliselt sobilik kaljuste kivimite (lubjakivi) lõhede täitmiseks sideainega, et seeläbi vähendada lasundi horisontaalset filtratsioonikoefitsienti [39]. Sealjuures on sideaine kulu väga väikene. Teisalt on katsed näidanud, et hüdroisolatsioonitõkke seisukohalt vajalikku filtratsioonikoefitsienti ei saavutata. Viimane tuleneb asjaolust, et kivimite lõhed lasundis on väga väikesed (0-2 mm) [40], selle tõttu ei ole võimalik nendes vajalik koguses sideainet suruda. Katsetulemused on näidanud, et surveinjekeerimise tulemusena on saavutatud lõhelise kivimi filtratsioonimooduliks 10^{-3} m/s, mis ei ole veepidemeks sobilik [40]. Tehnoloogia on kasutatav kuni ~70m sügavusel [39].

Tihendusinjekeerimine on pinnase stabiliseerimise meetod, kus selle omadusi parendatakse seguaine pinnasesse surumisega. Seguainet surutakse pinnasesse sellisel hulgal, et see suruks puuraugu ümbruses oleva pinnase struktuuri kokku ehk tihendaks pinnast. Käsitletav tehnoloogia on eelkõige sobilik kasutamiseks väikese peenosisega liivade stabiliseerimiseks. Tihendusinjekeerimise meetodi puudus on asjaolu, et kasutatav sideainepulp ei liigu injekeerimise puuraugust kaugemale [41]. Käesoleva magistritöoga seatud eesmärgid ei ole võimalik antud tehnoloogiaga saavutada.

Jugainjekteerimine on pinnase stabiliseerimise meetod, kus injekteerimise puuraugu ümber paiknevad kivimid purustatakse veejoaga ning seeläbi lõhutakse ümbritseva pinnase struktuur [42]. Purustatud pinnasesse surutakse sideaine, mille tulemusena moodustub suuremate tugevusomadustega sammas. Rajades sambad ühes reas, on võimalik rajada hüdroisolatioontõke. Tehnoloogia on sobilik peaaesjalikult erinevatele liivatüüpide ja savi pinnastele [43]. Jugainjekteerimisel on võimalik omakorda kasutada kolme tehnoloogiat: ühe-, kahe- ja kolmetoimelist süsteemi. Esimesel juhul tehakse pinnase struktuuri muutmine vaid sideaineseguga kõrgel rõhul. Teisel juhul kasutatakse täiendavalt õhujuga, mis suurendab tööde efektiivsust ning kolmanda variandi korral rakendatakse koos õhujoaga ka vesi. Vee lisamine annab võimaluse käsitletavat tehnoloogiat kasutada sidusate pinnase püsivusomaduste suurendamisel [38]. Jugainjekteerimisega on võimalik rajada sambaid läbimõõduga 60-300cm [43].

Eelkirjeldatud pinnase injekteerimismeetodid ei ole käesoleva magistritöö raames käsitlevate pinnastüüpide korral efektiivselt rakendatavad. Selle tõttu edaspidi kirjeldatud tehnoloogiaid arutluse alla ei võeta.

1.2.1.4 Soonimine (ing.k *trenching*)

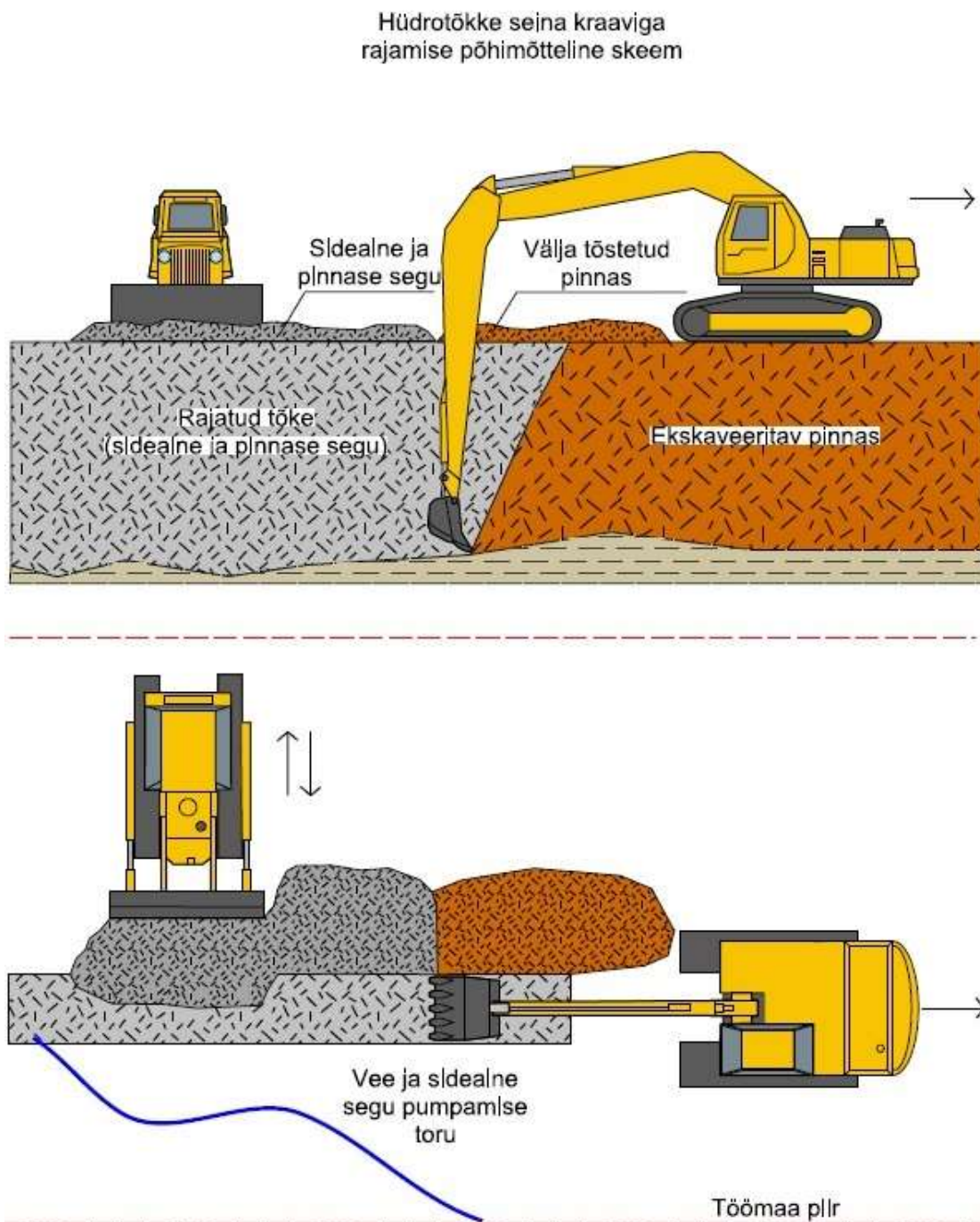
Soonimine on hüdrotõkke rajamise meetod, kus pinnasesse rajatakse soon või kraav, mis on võimalik täita vettpidava täitematerjaliga või väljatud loodusliku pinnase ning sideaine seguga. Soonimist on võimalik läbi viia mitme tehnoloogiaga. Enamlevinud on pinnase ekskaveerimine ning kaeviku täitmine sideaine ja täitematerjali seguga, millel on väikene filtratsioonikoefitsient. Vähemlevinud on spetsiaal-tehnoloogiad, kus samaaegselt soonimisega segatakse sideaine pinnasega ning seeläbi rajatakse hüdrotõkke sein. Soonimise tehnoloogiat on võimalik jagada kaheks erinevaks lahenduseks:

- Pinnase ekskaveerimine
- Pinnase väljamine ning hüdrotõkke rajamine (HC)

Pinnase ekskaveerimine

Hüdrotõkke rajamine pinnase ekskaveerimisega on enamlevinud ja odavam meetod [15]. Selle tehnoloogiaga on maailmas rajatud mitmeid hüdroisolatsiooni tõkkeseinu. Kanadas, Albertas rajati turba pinnasesse ekskaveerimisega ~800m ning 0,9m laiune tõkkesein, mille filtratsioonikoefitsient oli 10^{-7} m/s [44]. Käsitleva tehnoloogia teeb võrreldes teiste meetoditega odavaks ning lihtsaks küllaltki tavapärase ning väikse masinapargi vajadus. Tõkkeseina rajamiseks on vajalik pika-noolega ekskavaator, mis ulatub tõkkeseina rajamisel vettpidava kihini. Maailma praktikas on kasutatud ~120-tonniseid ekskavaatorid, mille töösügavus on kuni 25m [44]. 20-tonnise pika-noolega ekskavaatori kaevamissügavus on ~16m.

Jooniselt 2.7 (Joonis 2.7) nähtub, et pinnase ekskaveerimisega hüdrotõkke rajamiseks on vajalikud masinad pika-noolega ekskavaator, buldooser, veepump, torustik ning seguaine ja veesegamise mikser. Hüdrotõkke rajamiseks ekskaveeritakse pinnas selle planeeritud asukohast ning asetatakse kraavi servale. Kraavinõlvade sissevarisemise vältimiseks pumbatakse sellesse 5%-line vee ning bentoniidi segu [15]. Pumbatud veega avaldatakse kraavinõlvadele piisavalt survet, et vältida nõlvade varinguid. Kraavipervele asetatud pinnas segatakse kohapeal buldooseri abil sideaine ja vee seguga ning lükatakse seejärel kraavi [45]. Seega on rajatav kraav tööde kestvusel täidetud veega ning pinnasetööd toimuvad vee all. Vajalik tsemendi kogus sideaines on sarnane mass-stabiliseerimise tehnoloogiale. Käsitleva tehnoloogia eeliseks on see, et tõket ei rajata vettpidavasse kihti. Praktika on näidanud, et piisab korralikust kraavi põhja puhastamisest [45]. Masina tootlikkus sõltub rajatava kraavi sügavusest ning kasutatava kopa mahust. Eesti tingimustes (Puhatu lasundi sügavus 7,8m) on tehnoloogia tootlikkus $30\text{m}^3/\text{h}$. Tootlikkus on väike tulenevalt ekskavaatori pikast tsükli ajast ning vee alt materjali tõstmisest, mil kopa täitetegur on väike.



Joonis 2.7 Pinnase ekskaveerimisega hüdrotõkke rajamise lihtsustatud põhimõtteline skeem [75]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

Märgalade (soode ja rabade) tingimustes on kraavi kaevamiseks sobilik kasutada mitmete tootjate mudelivalikus olevat pika-noolega pontoonroomikutega ekskavaatorit. Nimetatud tüüpi

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

30-tonnise kogumassiga ekskavaatori erisurve pinnasele on 0,105 kg/cm² [46], mis on ~2 korda väiksem kui inimese avaldatav surve maapinnale. Sideaine transportimiseks objektile on võimalik kasutada väikese erisurvega rajatraktori vankrile ehitatud transpordimasinat, mis on varustatud vähemalt 1,5-tonnise tõstevõimega kraanaga.



Joonis 2.8 Väikese erisurvega ekskavaator [47]

[Pildid\Soo.jpg](#)

Pinnase väljamine ning hüdrotõkke seina rajamine (HC, ing.k *Hydro cutter, hydromill*)

Hüdrotõkkeseina rajamist kahes etapis kasutatakse peamiselt sügavate ning väga kõrgete kvaliteedinõuetega seinade rajamisel. Tehnoloogiaga on võimalik rajada soon või kraav kõvadesse kivimitesse (survetugevus >120MPa) [48]. Kahe-etapilise meetodi korral väljatakse spetsiaalse soonimise masinaga pinnas, mis juhitakse tööalale rajatud materjali töötlemise kompleksi, kus kaevis sõelutakse. Sobilikud sõelutud fraktsioonid suunatakse mikserisse, kus need segatakse sideaine ning veega. Saadud segu pumbatakse rajatud kraavi. Kõik seadmed on omavahel ühenduses pehme torustikuga ning segude transportimiseks kasutatakse pulbi

tootlikkus $7\text{m}^2/\text{h}$ [36]. Kirjeldatud parameetritega tööorgani mass on 22,5- 34,0 tonni. Sellise tööorganiga opereeriva masina mass peab olema suurem kui 100t ning sellega on võimalik tõkkesein rajada kuni 150m sügavusele. Samas on ka väiksemaid masinad, mille töösügavus on 36-45m [48]. Soonimisega rajatakse hüdrotõkkesein mitme mooduli kaupa, sarnaselt SMW tehnoloogiaga (Joonis 2.6). Sealjuures kasutatakse tehnoloogiat, kus sekundaarse plokki ülepuure primaarsele plokile on kuni 0,4m ehk 0,2m mõlemas suunas [48].



Joonis 2.10 Soonimise masina tööorgan [48]

[Pildid\HC tööorgan.jpg](#)

1.2.2 Komposiitmaterjalist hüdroisolatsiooni tõkkesein

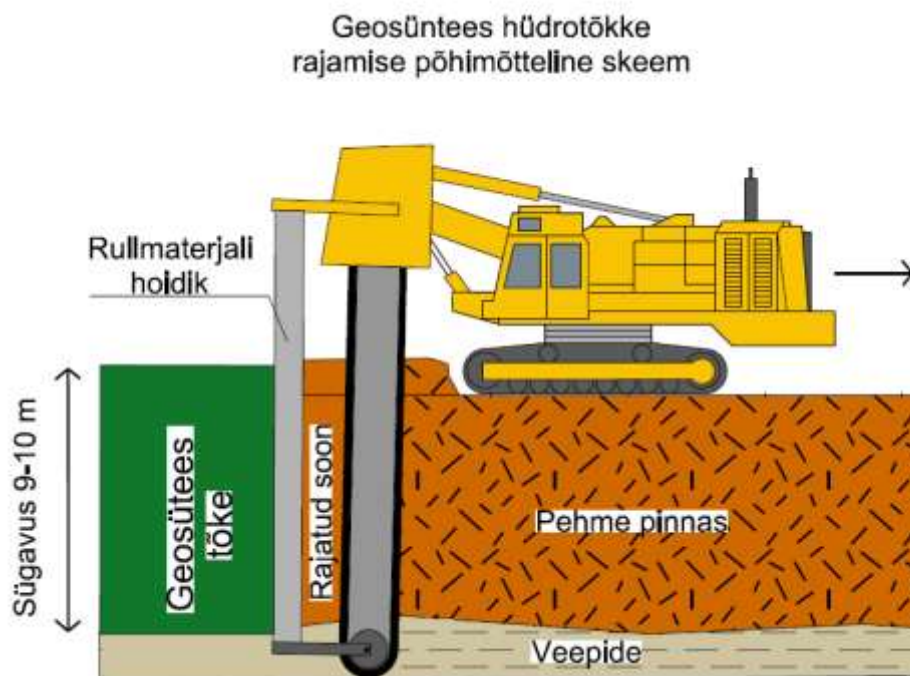
Komposiitmaterjalist, peamiselt polümeeridest, rajatavate hüdrotõkkeseinade tehnoloogia on võrdlemisi uus [49]. Komposiitmaterjalidest vertikaalseid hüdrotõkkeseinu hakati maailmas kasutama 1980ndatel aastatel. Vajadus tekkis tulenevalt pinnase ja sideaine segust valmistatud seinade mittevastupidavusest ning seatud eesmärkide mittesaavutamisest. Alguses kasutati komposiitmaterjale ning pinnase ja sideaine segust valmistatud seinu kombineeritult ehk

geosünteesmaterjal paigaldati pinnastõkkeseina sisse. 1990ndate teises pooles hakati neid kasutama ka eraldiseisvalt [39]. Komposiitmaterjalist isolatsioonitõkked võib jagada kaheks: geomembraanideks ja nn savikangasteks.

1.2.2.1 Geomembraan hüdroisolatsioonitõkked

Suure tihedusega geomembraanid on ühed enim kasutatavad hüdroisolatsioonitõkke materjalid. Materjalide eeliseks on suur veepidavus (kuni 10^{-14} m/s) ning suur vastupidavus kemikaalidele [39]. Materjali puuduseks on väike jäikus, mille tõttu ei ole võimalik seda lihtsalt pinnasesse suruda. Seetõttu tuleb enne isolatsioonimaterjali paigaldamist rajada soon või kraav. Samuti on keeruline tagada kõrget kvaliteeti materjali paigutamisel pinnasesse. Viimane on seotud vajadusest kohati jätkata erinevaid sektsioone. Geomembraan on tulenevalt väikesest jäikusest ladustatud rullmaterjalina. Tehnoloogiliselt on geomembraane võimalik paigaldada kahel viisil, kas suruda materjali sektsioonid pinnasesse vibratsiooniga või siis paralleelselt soonimistöödega laotada materjal otse rullilt kraavi (Joonis 2.11). Paralleelselt soonimisega juhitakse rullmaterjalina ladustatud geomembraan spetsiaalse seadmega rajatud soonde. Tulenevalt vajadusest mahutada materjali rull soonde, peavad selle parameetrid olema piisavad. Valdavalt on sellise tehnoloogia korral soone paksus 300-600mm [39]. Soonimise tehnoloogia eeliseks võrreldes vibratsiooni tehnoloogiaga on väiksem jätkude arv. Samas seab soonimise tehnoloogia sügavusele piirangu rullmaterjali laius. Valdavalt on geomembraani rullid laiusega kuni 4,5m [39], kuid leidub ka 7,5m laiuseid [50]. Paigaldamisel saab kasutada vertikaalkettsoonurit, mille maksimaalne töösügavus on 9-10m ning masina mass 45t [51]. Soonurite töö kiirus võib ulatuda kuni 3,6km/h [52]. Seni tehtud tööde tulemustest lähtuvalt on kuni 7,5 m sügavuse ja 0,3 m laiuse soone maksimaalseks rajamise kiiruseks saavutatud 1 m/min ehk 60m/h. Arvestades lisaks tööefektiivsuse tegurit võib olla masina tegelik tootlikkus 45m/h. Soone rajamisel on oluline, et see rajataks vähemalt 0,5m ulatuses isoleeritava pinnase lamamisse. Lisaks soonurile on vajalik tõsteseadmega varustatud transpordivahend, et tagada rullmaterjali vahetus ning transport. Pärast geomembraantõkke paigaldamist tuleb pinnas tagasi soonde asetada. Selle tarbeks on otstarbekas kasutada väikese erisurvega ekskavaatorit. Tagamaks paigaldatud geomembraani vertikaalne püsivus soones, tuleb seda paigaldada vähemalt 0,5m ulatuses üle kraavi serva. Ülejääv osa tuleb

koormata pinnasega, et materjalile ei tekiks vertikaalsuunalist lõtku. Arvestades masinate suurt massi, on pehmete pinnaste korral vajalik täiendavalt rajada teenindustee.



Joonis 2.11 Geosüntees hüdroisolatsioonitõkke paigaldamine soonimismasinaga lihtsustatud põhimõtteline skeem [autori koostatud]

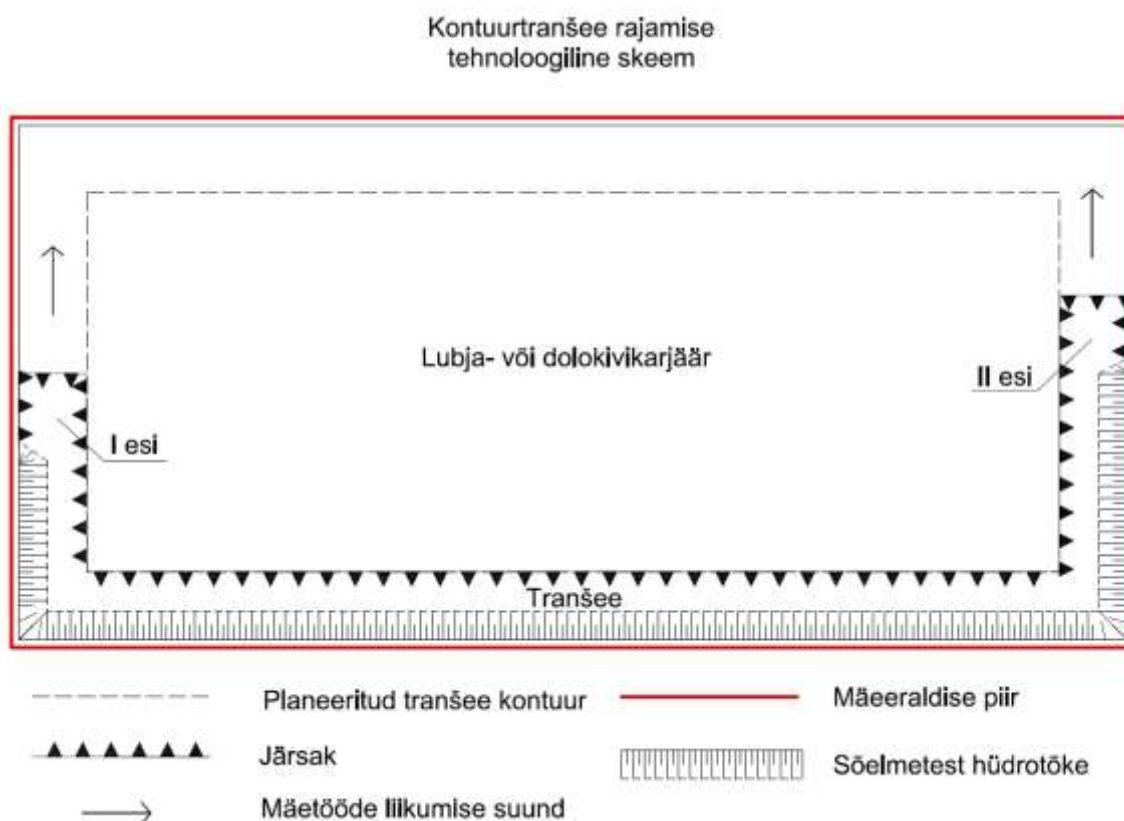
[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

1.2.3 Karjääri vertikaalnõlvale rajatav hüdrotõke

Püsiv karjääri vertikaalnõlv tekib mäetööde käigus kaljuste kivimite kaevandamisel. Karjääri vertikaalnõlvale on võimalik hüdrotõket rajada juhul, kui piirkonnast on varu väljatud. Üks võimalus on mäetööde algusfaasis ümber mäeeraldise piiri rajada kontuurtranšee. Karjääri vertikaalnõlvale on võimalik tõke rajada kasutades killustiku tootmisjääke, sõelmeid (fraktsioon 0-4mm). Antud tehnoloogia eelis seisneb asjaolus, et hüdrotõkke rajamisel on võimalik ära kasutada tootmisjäägid ning osaliselt on tõkke rajamine ammendatud ala korrastamise eest. Lisaks vähendatakse hüdrotõkke rajamisega karjääri sisse voolava vee hulka. Tehnoloogia miinus on vajadus vähemalt ajutiselt alandada piirkonna veetaset ja mäetööde algperioodil on vaja teha suur kapitaliinvesteering. Lisaks raskendab kontuurtranšee rajamine oluliselt mäetööde

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

läbiviimist nende rajamise algusperioodil. Tranšee rajamist on otstarbekas alustada kahes suunas ehk teha töid korraka kahes ees (Joonis 2.12). Sellisel juhul on võimalik ühes ees raimata maavara ning teisest toodangut müüa.



Joonis 2.12 Karjääri vertikaalnõlvale rajatava hüdrotõkke tehnoloogiline skeem [autori koostatud]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

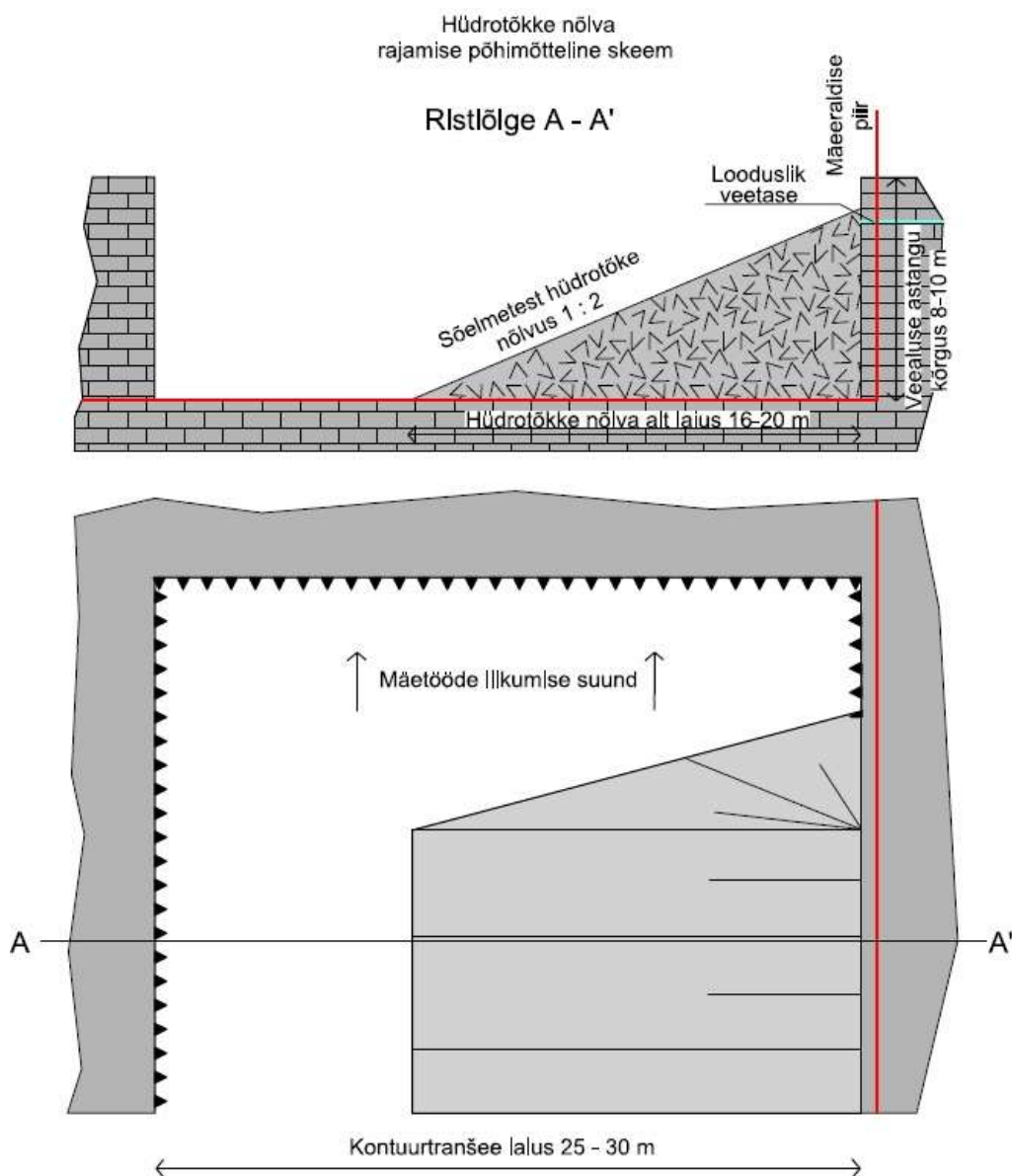
Sõelmetest hüdrotõkke ehitamiseks on vaja kasutada buldooseri, sõrgrulli ning frontaallaadurit. Buldooseri moodustatakse nõlv ning sõrgrulliga tihendatakse iga lisatud 0,5m paksune täitematerjali kiht [21]. Frontaallaadurit kasutatakse sõelmete transportimiseks. Osaliselt on võimalik tõkke rajamise tööd teha paralleelselt mäetöödega. Tõkke rajamisel on buldooseri tootlikkus 40m pikkuse transporditee korral 80m³/h ning frontaallaaduri tootlikkus 100m pikkuse transpordikauguse ning 3,5m³ kopa mahu korral 140m³/h [53]. Sõrgrulli (Tabel 2.8) tootlikkus nõlva tihendamisel on 550m³/h ehk 1100m²/h tihendatavat pinda.

Tabel 2.8 Sõrgrulli tootlikkus nõlva tihendamisel

| Protsess | Parameeter | Ühik |
|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Liikumise kiirus tihendamisel | 2 | km/h |
| Tööorgani laius | 2,2 | m |
| Ühes tunnis kaetav pindala | 4400 | m ² |
| Tihendava kihi paksu, m | 0,5 | m |
| Vajalik tihendamise kordade arv | 4 | korda |
| Tunnis tihendav materjal | 550 | m ³ |
| Tunnis tihendav pindala | 1100 | m ² |

[Analüüs\Lubja- ja dolokivi maksumus.xlsx](#)

Kontuurtranšee laius tuleb valida lähtuvalt hüdrotoeketenõlva parameetritest. Oluline on, et tranšee rajamise töödega tekiks piisaval hulgal sõelmeid. Teisalt on oluline, et lisaks nõlva ehitamiseks vajalikule ruumile jääks ka seda mäetööde läbiviimiseks, sh lõhkamiseks ja killustiku tootmiseks ning transportimiseks. Ohutuks mäetööde läbiviimiseks on vajalik vähemalt 40-50m laiune tranšee. Eesti geoloogilistes tingimustes paiknevate lubja- ja dolokivikarjäärade keskmine sügavus on 9,4m, sealjuures allpool veetaset on 8,4m (Tabel 2.2). 9,4m kõrguse astangu korral on vajalik tranšee laius, käsitletavate nõlva parameetrite korral ning 20% sõelmete väljatuleku juures, 45m. 30% sõelmete väljatuleku korral on minimaalne võimalik tranšee laius 30m. Teisalt ohutuks mäetööde tegemiseks on vajalik vähemalt 40m laiune esi, seega on otstarbekas rajada 45m laiune tranšee, et minimeerida võimalikku sõelmete puudujäägi ohtu.



Joonis 2.13 Vertikaalsele karjääri nõlvale hüdrotõkke rajamise põhimõtteline skeem [autori koostatud]

[Joonised\Tehnoloogilised skeemid.dgn](#)

1.3 Hüdrotõkke rajamiseks tehtavad tööd

Pärast kohalikesse geoloogilistesse tingimustesse sobiva tehnoloogia valimist on vaja tööobjekt hüdrotõkke rajamiseks ette valmistada. Ettevalmistustööde hulka kuulub vajadusel puittaimestiku likvideerimine, hüdrotõkketrassi mahamärkimine ja teenindavate teede rajamine.

Hüdrotočkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Lisaks peab tööde tegemise ajaks rajama materjalide ladustamise ning teenindamise platsi. Teenindusplatsile peab mahtuma ajutine kontor, olmeruumid, välilabor, masinate hooldusala ning kütuste ja materjalide ladustamise ala.

1.3.1 Ettevalmistustööd

Planeeritud hüdrotočketrass tuleb raadata kuni 20-30m ulatuses. Sellisel juhul on võimalik trassile ära mahutada vajadusel teenindustee ning masinatega on võimalik samaaegselt töötada. Puittaimestiku raadamise maksumus harvik-tüüpi metsa korral on ~2500 eur/ha [54]. Ettevalmistustööde käigus tuleb rajada ladustamise ja teenindusplats, mille suurus peab olema vahemikus 4000-5000m². Teenindusplatsi asukoht on otstarbekas valida selline, et ei tuleks teha täiendavaid pinnasetöid. Ettevalmistustööde käigus tuleb planeeritud hüdrotočkete asukoht maha märkida.

1.3.2 Teenindustee rajamine

Mitmed käsitletud hüdroisolatsioonitökkete ehitamise tehnoloogiad vajavad pehmete pinnaste korral teenindusteede rajamist. Kuigi kasutatavate masinate massid on suured (maksimaalne kuni 100t) on nende erisurve maapinnale tavalistest sõiduautost väiksem. 88-tonnise massiga roomikvankril masina erisurve pinnasele on 0,9kg/cm² [55], samas sõiduautol on 2,1kg/cm² [56]. Sellest võib eeldada, et ei ole tarvidust rajada tavapärastest teedest suurema kandevõimega teed. Arvestades, et teekonstruktsioon on vaja rajada pehmele pinnasele, tuleb kasutada teekatendi all III klassi geotekstiili [57]. Teekatend tuleb ehitada vähemalt 0,3m paksune, kas killustikust või kruusast. Arvestades kasutatavate masinate mõõtmeid, tuleb tee rajada pealt laiuselt vähemalt 5m. Pärast hüdrotočkete rajamist on võimalik rajatud teed kasutada karjääri või tootmisala teenindamiseks või tuleb see likvideerida. Rajatava tee ristlõike pindala on 1,68m². Teekatendi ehitamiseks on otstarbekas kasutada buldooseri ning materjali veoks autokallureid. Autokallureite arv materjali veoks peab olema piisav, et tagada buldooseri pidev töö.

3 TULEMUSED

Käesolevas peatükis keskendutakse erinevate hüdrotõkete rajamise tehnoloogiate võrdlemisele ning nende kasutamise võimaluste hindamisele Eesti geoloogilistes tingimustes. Eesmärk on välja selgitada sobiv tehnoloogia katendi pinnasest karjääri valguva vee tõkestamiseks (Narva põlevkivikarjääri tingimustes), turbatootmisalade isoleerimiseks ümbritsevast veerežiimist ning lubja- ja dolokivikarjäärade tingimustesse sobiva tõkke leidmiseks.

3.1 Maksumuse arvutamise üldtingimused

Hüdroisolatsioonitõkke rajamise tehnoloogiate maksumus on arvatud olukorras, kus vajaminevad masinad ja seadmed renditakse. Selle tõttu on kasutatud erinevate teenusepakkujate hinnakirjajärgseid hindu. Juhul, kui eriseadmete rentimise hindasid teenusepakkujad avalikustanud ei ole, on lähtutud hindade määramisel kirjandusest ning kasutatud hinna määramisel analoogia meetodit. Analoogia meetodi korral on arvutustesse kaasatud vajaliku seadmega sarnaste parameetritega ning otstarbega masina hinnatase. Masinate kütusekulu arvutamisel on kasutatud seost, et see kulutab kütust tunnis sama palju kui suur on selle mass tonnides [58]. Arvutustes on kasutatud diiselmootori kütuse hinda 1,05 eur/l [59]. Põlevkivist elektritootmise jäägi lendtuha maksumuseks on võetud 10% tsemendi maksumusest [26]. Vajadusel on arvutustes kasutatud ühe vahetuse pikkuseks 8 tundi. Vertikaalsete tõkkeseinade maksumused on arvatud ühe vertikaal-ruutmeetri kohta.

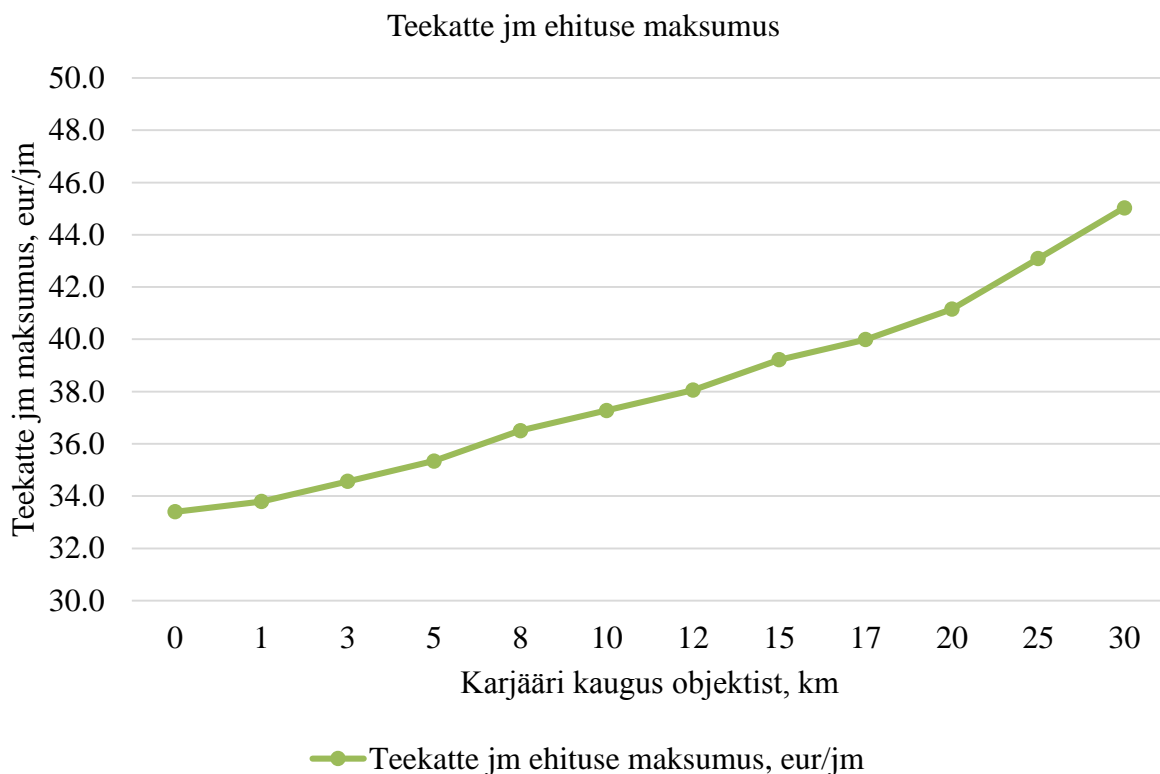
3.1.1.1 Tee maksumus

Osade töös käsitletavate tehnoloogiate rakendamiseks on vajalik rajada teenindustee, et tagada masinate juurdepääs objektile. Teenindustee pealt laius peab olema vähemalt 5m ning teekatendi paksus 0,3m. Teekatendi maksumust mõjutab oluliselt kasutatava materjali transpordikaugus. Maksumuse arvutamise sisendid on toodud allolevas tabelis (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Teenindustee ehitamise maksumuse algandmed

| Sisend | Parameeter | Allikas |
|---|------------|----------------------------|
| Tee katendi pealt laius, m | 5,0 | |
| Paksus, m | 0,3 | |
| Nõlvus | 1 : 2 | |
| Ristlõige, m ² | 1,7 | |
| Tihendamiskoeffitsient | 1,2 | |
| Tihendatud materjali vajadus, m ³ | 2,0 | |
| Geotekstiili paigaldamise laius, m | 7,0 | |
| III geotekstiili maksumus, eur/m ² | 0,65 | OÜ Kilekeskus [60] |
| Materjali maksumus eur/t | 6,72 | AS Kiirkandur [61] |
| Materjali tihedus, t/m ³ | 1,9 | |
| 24t kandevõimega veoauto km maksumus, eur/km | 1,2 | AS Raktoom [62] |
| Buldooseri tunni hind, eur/h | 55 | Harju Kaevetööd OÜ [69] |
| Buldooseri tootlikkus tee ehitamisel, m ³ /h | 40 | |
| Tee katendi jm maksumus/ eur/jm | 36,2 | |

Joonisel 3.1 (Joonis 3.1) on toodud teekatte ehitamise maksumuse sõltuvus kasutatava materjali transpordikaugusest. Tulemustest selgub, et 30km pikkuse transpordikauguse korral suureneb teekatte jooksva meetri rajamise maksumus 11,6 eurot.



Joonis 3.1 Teekatte jooksva meetri maksumus sõltuvalt materjali transpordikaugusest

[Analüüs\Turvas maksumus.xlsx](#)

3.1.2 Objekti üldkulu

Objekti üldkulu on kõikide tehnoloogiate rakendamisel sama. Üldkuludeks on arvestatud kõik vahetult projekti edukaks läbiviimiseks tehtavad kulutused. Nende alla kuuluvad objektijuhtimiseks vajaliku välikontori rajamine ning ülevalpidamine, tööliste väliolmeruumide rajamine, kütuse ladustamise masinad ning objektijuhtimise vahendid. Lisaks on arvestatud objekti üldkuludena hüdrotõkkmaterjali laboratoorsete katsetuste kulu välilaboris.

Allolevast tabelist 3.2 (Tabel 3.2) selgub, et objekti üldkulu päevas on 1226 eurot.

Tabel 3.2 Objekti päeva üldkulu eurodes

| Kuluartikkel | Päeva hind, eur | Märkus | Allikas |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Generaator 15-25 kw | 1216 | Kütuse kulu 10,1 l/h | AS Cramo Estonia [64] |
| Soojak 4 tk | 27 | 2 soojakut, 2 konteinerit | |
| Välikäimla, aiad | 5 | Piirdeaiad | |
| Lisavahendid | 10 | Kaablid, peakilp | |
| Kontorivahendid | 5 | Jooksvad kulud | |
| Objekti juhtimine, sh sõiduk | 240 | Objektijuht+töövahendid | |
| Töölibuss | 30 | 9-kohaline buss | OÜ Autorent [65] |
| Kütuse auto rent | 160 | kandevõime 11t, koos juhiga | AS Raktoom [62] |
| Välilabor | 600 | Välilabor, koos laborantidega | |
| Kokku | 1226 | - | |

[Analüüs\Turvas maksumus.xlsx](#)

3.2 Turbalasundi veerežiimi hüdroisoleerimine

Eestis geoloogilistes tingimustes on tekkinud vajadus hüdroisoleerida mäetöödega mõjutatav ala külgnervate alade veerežiimist Narva põlevkivikarjääri lõunaosas ning mitmel turbatootmisalal. Narva põlevkivikarjääri geoloogilised tingimused on selle lõunaosas keerulised. Lisaks suurele kaljukivimite osakaalule katendikivimites on kvaternaarisetetest esindatud kuni 7,8m paksuseni ulatuv turbalasund, mille lamamiks on liiv, liivsavi ning liivsavimoreen. Arvestades, et karjäärist vahetult lõunas asub Puhatu looduskaitseala, millega säilitatakse Puhatu soostikku ning mis on äärmiselt tundlik mäetöödest tulenevale veerežiimi muutusele, on kaevandajale seatud mitmeid keskkonnakaitsealaseid piiranguid piirkonnas mäetööde läbiviimiseks [16]. Mäetööde mõju leevendamiseks on üks variant isoleerida Puhatu soostiku veerežiim karjääri veealandusest tekkinud alanduslehrist hüdroisolatsioonitõkke seinaga. Tõkkeseina rajamise tingimused mäeeraldise teenindusmaa lõunapiirile on enam kui keerulised. Sobiliku tehnoloogia valikul

tuleb arvestada turbapinnase madala kandevõimega, turbalasundi suure paksusega ning vajadusega rajada tõke osaliselt selle lamami kivimitesse. Tagamaks ligipääsu objektile on võimalik kasutada väikese erisurvega masinaid või rajada täiendavaid teenindusteid. Narva põlevkivikarjääri lõunaosasse tuleb rajada keskmiselt 4,7m ning maksimaalselt 8,3m sügavune tõkkesein. Sügavuste määramisel on arvestatud asjaoluga, et tõke tuleb rajada vähemalt 0,5m ulatuses lamamikivimitesse. Vastasel korral on võimalik pinnavee infiltreerumine tõkke alt. Käsitletavad tingimused laienevad ka kõikidele Eestis paiknevatele turbatootmisaladele, kuna nende geoloogilised tingimused on mõne erinevusega sarnased Puhatu soostiku tingimustega. Eestis turbatootmiseks kasutusel olevate turbamaardlate keskmine turbalasundi paksus on 4,0m ning suurim paksus 10,6m.

3.2.1 Tehnoloogiate võrdlus

Tehnoloogia valiku kriteeriumid on tõkkeseina rajamise sügavus, tootlikkus, masinapargi kogumass, vajalikud abitööd, rakendamise võimalikkus ning kuluefektiivsus. Võrdlemiseks on võetud järgmised pinnase ja sideaine segu tüüpi tehnoloogiad: mass-stabiliseerimine, SMW, pinnase ekskaveerimine ekskavaatoriga. Lisaks on võrdlusesse võetud geomembraantõkked. Teisi varasemalt kirjeldatud tehnoloogiaid antud geoloogilistes tingimustes ei võrrelda, sest nende rakendamine ei ole võimalik. Erinevaid sideaine injekeerimise meetodid ning HC tehnoloogia on sobilikud mineraalpinnastele. Vai-stabiliseerimise tehnoloogiat ei ole kaasatud võrdlusesse tulenevalt asjaolust, et kaasatud SMW tehnoloogia on selle tootlikum edasiarendus.

Tabel 3.3 Erinevate tehnoloogiate võrdlus

| Tehnoloogia | Maksimaalne sügavus, m | Tootlikkus | Masinapargi kogumass, t | Vajalikud abitööd |
|-----------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|---|
| Mass-stabiliseerimine | 5,0 | 100m ³ /h | 55-60t | Teenindustee rajamine, eelkoormuse rajamine |
| SMW | 15,0 | 15m ² /h (8,25m ³ /h) | ~80t | Teenindustee rajamine, seadmete platsi rajamine |
| Pinnase | 16,0 | 50m ³ /h | 45-50t (koos | Vee ja sideaine pumpamine |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Tehnoloogia | Maksimaalne sügavus, m | Tootlikkus | Masinapargi kogumass, t | Vajalikud abitööd |
|--------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------|
| ekskaveerimine | | | buldooseriga) | |
| Geomembraan tõke | 8-9m | 45m/h | 40t | Teenindustee rajamine |

Üleval olevast tabelist (Tabel 3.3) selgub, et võrreldavatest tehnoloogiatest vaid pinnase mass-stabiliseerimisega ei ole võimalik saavutada vajalikku tõkke paigaldamise sügavust. Kõik teised tehnoloogiad on rakendatavad käsitletavates tingimustes. Sealjuures suurim tootlikkus on geomembraantõkke rajamisel. Kõik tehnoloogiad, välja arvatud pinnase ekskaveerimine, vajavad ajutiste teenindusteede rajamist, et oleks võimalik pehmel pinnasel masinatega liigelda. Tulenevalt asjaolust, et valitud tehnoloogiatest kolm vastavad seatud kriteeriumitele ning vaid tootlikkuse ja vajalike abitööde ulatuse tõttu ei ole võimalik sobivaimat tehnoloogiat leida, tuleb otsus langetada tehnoloogia maksumuse alusel. Selle tarbeks arvutatakse kõikide tehnoloogiate järgi tõkke rajamise ühiku maksumus, sh arvestades vajalike abitööde maksumust. Kõik hinnad on arvutatud objekti faasis, see tähendab, et ei ole arvestatud materjalide ega masinate transporti objektile.

Hindade arvutamisel on kasutatud MS Excel tabelarvutusprogrammi ning kõik käesolevas peatükis tehtud arvutused on leitavad järgnevalt otseviitelt: [Analüüs\Turvas maksumus.xlsx](#)

3.2.2 SMW tehnoloogia maksumus

SMW tehnoloogia maksumus moodustub vahetult hüdrotõkke rajamiseks vajaliku sideaine ning selle ehitamise kulust. Maksumuse arvutused on tehtud kahel alternatiivil. Alternatiiv 1 korral koosneb kasutatav sideaine sulfaadikindlast tsemendist ja bentoniidist ning alternatiiv 2 korral on tsement asendatud 70% ulatuses lendtuhaga. Sideaine maksumuse arvutamise korral on kasutatud varutegurit 1,2. Tehnoloogia maksumus on arvutatud vähemalt 0,9m laiuse tõkkeseina rajamiseks. Sealjuures seadme tööorgani diameeter on 0,55m ehk tuleb rajada kaherealine tõkkesein. Tööjõukulu on arvestatud 5 inimese kohta ettevõtte tunnitasauga 40 eur/h inimene.

Hüdrodõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Sideaine kulu on arvatud juhul kui ühte kuupmeetrisse pinnasesse segatakse 350kg tsementi ning 40kg bentoniiti [26;34]. Bentoniidi hinnana kasutati Melker Baltic OÜ hinnakirja ning sulfaadikindla tsementi hinnana AS Kunda Nordic hinnakirjajärgsete hinda.

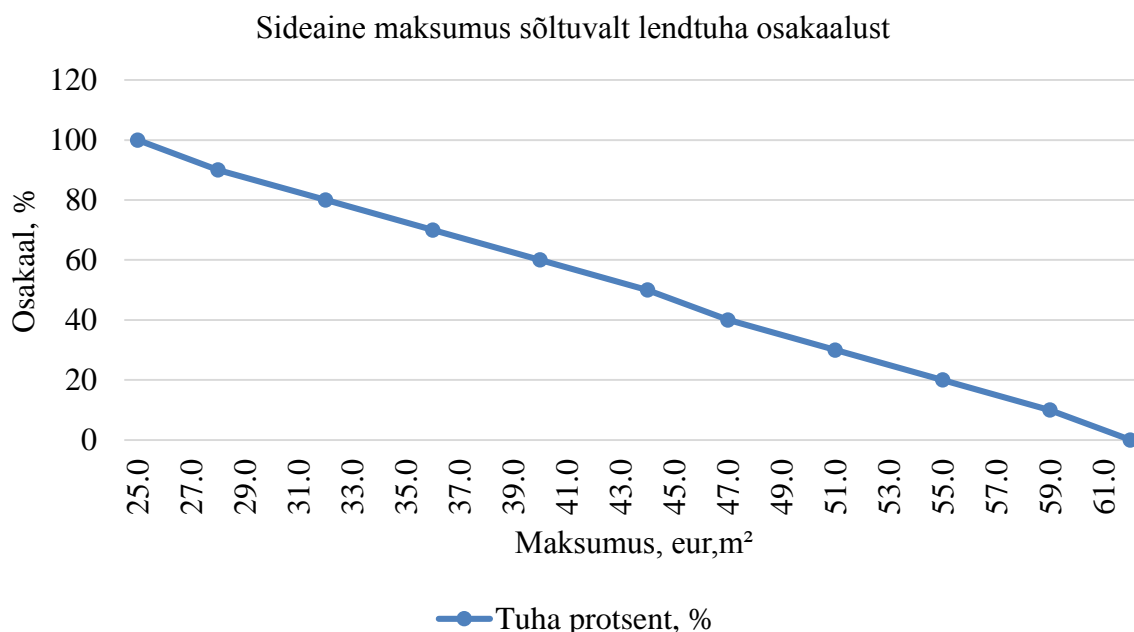
Tabel 3.4 Alternatiivi 1 korral ühe kuupmeetrisse pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus

| Sideaine | Kogus, kg/m ³ | Ühiku hind, eur/kg | Maksumus, eur/m ² |
|------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|
| Bentoniit | 40 | 0,55 | 21 |
| Sulfaadikindel tsement | 350 | 0,12 | 40 |
| Kokku | | | 61 |

Tabel 3.5 Alternatiiv 2 korral ühe kuupmeetrisse pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus

| Sideaine | Kogus, kg | Ühiku hind, eur/kg | Maksumus, eur/m ³ |
|------------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| Bentoniit | 40 | 0,550 | 21 |
| Sulfaadikindel tsement | 105 | 0,120 | 12 |
| Lendtuuk | 245 | 0,012 | 3 |
| Kokku | | | 36 |

Tabelitest 3.4 ja 3.5 (Tabel 3.4;Tabel 3.5) selgub, et asendades sideaine segus 70% ulatuses tsementi lendtuhaga on ühe ruutmeetri tõkkeseina rajamine 25 euro võrra odavam. Allolevalt jooniselt 3.2 (Joonis 3.2) selgub, et asendades sideaines tsementi tuhaga kuni 100%, on võimalik sideaine kulu ühe ruutmeetri tõkke rajamise maksumust vähendada kuni 38 euro võrra. Teades, et Narva Elektriijaama ja AS-i Kunda Nordic tsemenditehase kaugus mööda maanteed on ~110km, siis lendtuha tonni maksumus tsemenditehase väravas, arvestades transpordi hinnaks 1,2 eur/km, on 16,4 eurot. Saadud tulemus on sulfaadikindla tsementi maksumusest (120 eut/t) ~104 euro võrra väiksem.



Joonis 3.2 Sideaine maksumus sõltuvalt lendtuha osakaalust

Hüdrotõkke rajamise maksumus SMW tehnoloogiaga on arvatud ühikule eur/m². Sealjuures on arvestatud, et tõkkesina paksus on 0,95m ning masina tootlikkus tunnis on 8,25m³ ehk 8,7m²/h. Maksumuse arvutamisel on arvestatud vajalike abitööde ning seadmete kuluga. SMW seadme tunnihind on leitud kirjanduse põhjal ning täiendavalt on võrreldud seda sarnase massiga tõstekraana tunnihindadega [67]. Sealjuures on kasutatud hinnamäära koefitsienti 1,5. SMW seadme tunnihind sisaldab kahe operaatori tasu.

Tabel 3.6 Hüdrotõkke rajamise maksumus SMW tehnoloogiaga

| Kuluartikkel [allikas] | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h | Alternatiiv 1, eur/m² | Alternatiiv 2, eur/m² |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Sideaine | - | - | 73,0 | 42,8 |
| SMW seade [67] | 270 | 84,0 | 38,7 | |
| Frontaallaadur [63] | 38 | 14,7 | 5,8 | |
| Sideaine mikser [68] | 55 | 5,3 | 6,6 | |
| Veepump ja voolik | 7 | 2,1 | 1,0 | |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Kuluartikkel [allikas] | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h | Alternatiiv 1, eur/m² | Alternatiiv 2, eur/m² |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| [64] | | | | |
| Tööjõukulu | 200 | - | 21,8 | |
| Objekti üldkulu | 152 | - | 16,6 | |
| Kokku | 828,0 | | 163,4 | 133,2 |

Tabelist 3.6 (Tabel 3.6) selgub, et SMW tehnoloogiaga hüdrotõkke rajamine maksab ~830 eur/h. Koos materjalidega maksab hüdrotõkke seina rajamine alternatiiv 1 korral 163,4 eur/m² ning alternatiiv 2 korral 133,2eur/m².

3.2.3 Pinnase ekskaveerimise tehnoloogia maksumus

Sarnaselt SMW tehnoloogiale koosneb pinnase ekskaveerimise meetodiga hüdrotõkke rajamise maksumus kahest komponendist – sideaine ja tehnoloogia kulust. Lisaks on sarnaselt eelnevale arvatud sideaine maksumus kahe alternatiivi korral. Alternatiiv 1 korral on tsemendi ja lendtuha vahekord vastavalt 150 kg/m³ ja 70kg/m³ ning alternatiiv 2 korral vastavalt 200kg/m³ ja 100kg/m³. Kaks alternatiivi on võetud vaatluse alla lähtuvalt Eestis läbi viidud katsete tulemustest. Maksumuse arvutamisel on arvestatud järgmiste masinate kasutamisega: väikese erisurvega pika-noolega ekskavaator, laia lindiga buldooser ning väikese erisurvega transpordiseade. Bentoniidi ning veesegu pumpamiseks on ette nähtud 900 l/h tootlikkusega pump. Arvutustes on kasutatud tööjõuna 5 inimest ettevõtte tunnitasega 40 eur/h inimene.

Tabel 3.7 Alternatiiv 1 korral ühe vertikaal-ruutmeetri pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus

| Sideaine | Kogus, kg/m³ | Ühiku hind, eur/kg | Maksumus, eur/m² |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Bentoniit | 50 | 0,55 | 24,8 |
| Sulfaadikindel tsement | 150 | 0,12 | 16,2 |
| Lendtuhk | 70 | 0,012 | 0,8 |
| Kokku | | | 41,0 |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

Tabel 3.8 Alternatiiv 2 korral ühe vertikaal-ruutmeetri pinnase töötlemiseks vajaliku sideaine maksumus

| Sideaine | Kogus, kg | Ühiku hind, eur/kg | Maksumus, eur/m ² |
|------------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| Bentoniit | 50 | 0,550 | 24,8 |
| Sulfaadikindel tsement | 200 | 0,120 | 21,6 |
| Lendtuhk | 100 | 0,012 | 1,1 |
| Kokku | | | 47,4 |

Tabelitest 3.7 ja 3.8 (Tabel 3.7 ja Tabel 3.8) selgub, et kahe võrreldava alternatiivi ühe vertikaal-ruutmeetri rajamise maksumuse vahe on 6,4 eurot. Alternatiivi 1 rakendamine on odavam.

Tabel 3.9 Hüdrotõkke rajamise maksumus pinnase ekskaveerimisega

| Kulu-artikkel [allikas] | Para- meeter | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h | Alternatiiv 1, eur/m ² | Alternatiiv 2, eur/m ² |
|----------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Sideaine | - | - | - | 44,2 | 51,2 |
| Ekskavaator [71] | Mass 30t | 80,0 | 31,5 | 2,5 | |
| Buldooser [69] | Mass 14t | 55,0 | 14,7 | 1,6 | |
| Transpordimasin | Mass 9t | 52,0 | 9,5 | 1,4 | |
| Sideaine mikser [68] | Mass 5t | 55,0 | 5,3 | 1,4 | |
| Veepump ja voolik [64] | Tootlikkus 900l/min | 15,0 | 10,5 | 0,6 | |
| Tööjõukulu | - | 200,0 | - | 4,5 | |
| Objekti üldkulu | - | 152,0 | - | 3,4 | |
| Kokku | - | 609,0 | 71,4 | 56,1 | 63,1 |

Tabelist 3.9 (Tabel 3.9) selgub, et pinnase ekskaveerimise meetodika alternatiiv 1 korral maksab hüdrotõkke seina üks ruutmeeter 56,1 eurot, sealjuures on suurim kuluallikas sideaine.

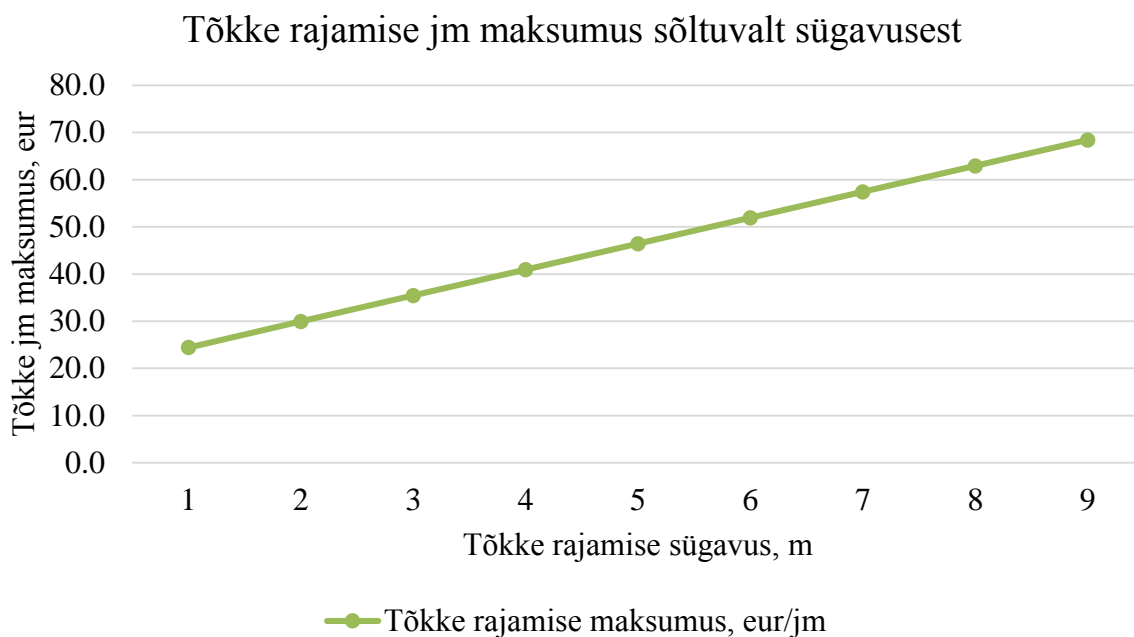
3.2.4 Geomembraantõkke rajamise maksumus

Geomembraantõkke rajamise maksumus hõlmab soone rajamise ja geomembraani hinda. Geomembraani paigaldamiseks ning kraavi rajamiseks kasutatakse soonurit. Ekskavaatorit kasutatakse kaeviku kinni ajamiseks ja geomembraani fikseerimiseks. Kallurautot kasutatakse erinevateks abitöödeks ning materjalide transportimiseks. Soonuri tunnihind on leitud lähtuvalt analoogse masina rendi tunnihinnast [67]. Sealjuures on kasutatud hinnamäära koefitsienti 1,5. Tunnihind sisaldab operaatori tasu. 2,0mm paksuse geomembraani ruutmeetri maksumus on 5,5 eurot [60]. Arvutustes on kasutatud 5 töölist ettevõtte tunnitasega 40 eur/h inimene.

Tabel 3.10 Geomembraantõkke rajamise tehnoloogiline kulu tunnis

| Kuluartikkel | Parameeter | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h |
|---|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| Soonur [67] | Mass 45t | 280,0 | 47,3 |
| Kallurauto [62] | Kandevõime 18t | 42,0 | 18,9 |
| Ekskavaator [71] | Mass 30t | 80,0 | 31,5 |
| Tööjõukulu (masinate operaatorid, abitööd) | - | 200,0 | - |
| Objekti üldkulu | - | 152,0 | - |
| Kokku | | 804,0 | 97,7 |
| Maksumus | | 851,6 | |

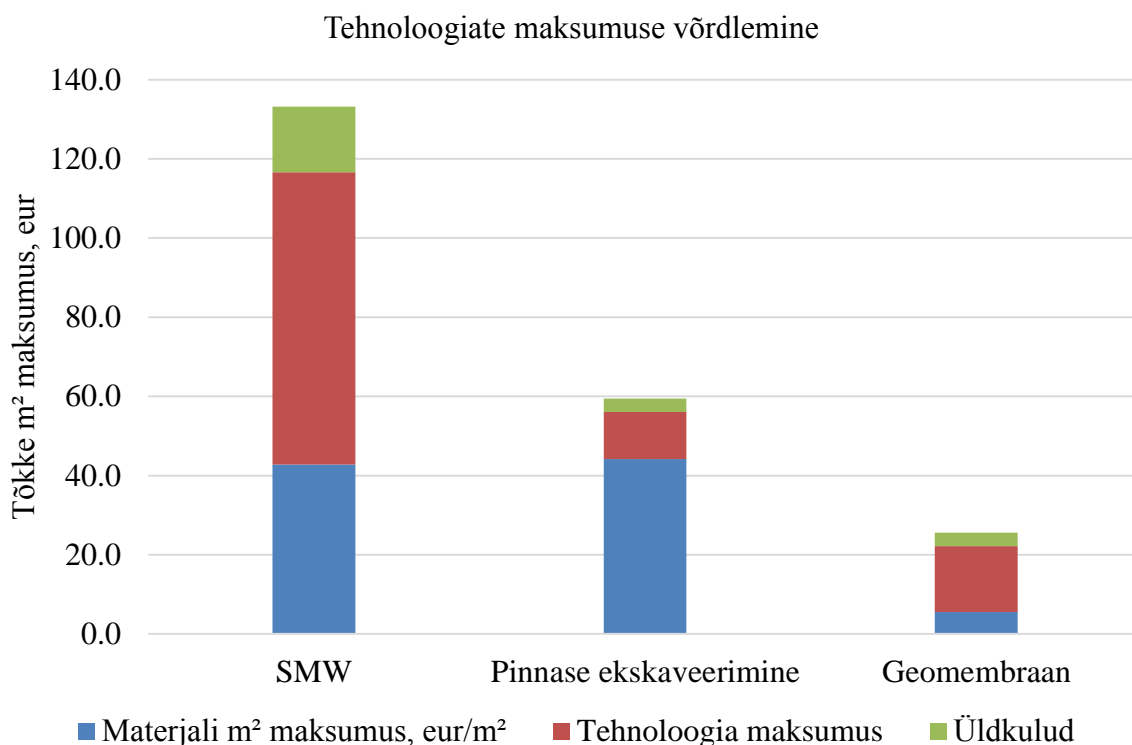
Tabelist 3.10 (Tabel 3.10) on toodud, et geomembraani paigaldamise tunni maksumus on ~850 euro. Suurimaks kuluallikaks on soonur, mille töötunni hind ulatub 280 euroni.



Joonis 3.3 Geomembraantõkke jooksva meetri rajamise maksumus sõltuvalt selle paigaldamise sügavusest

Üleval olevalt jooniselt (Joonis 3.3) selgub, et hüdrotõkke rajamise maksumus on lineaarses sõltuvus selle rajamise sügavusega. Maksumuse suurenemine sõltub geomembraan materjali suuremast vajadusest. Arvutustes ei ole arvestatud tõkke paigaldamise sügavuse vähenedes soonuri kütuse kulu vähenemise ega võimaliku tootlikkuse suurenemisega. 8m sügavuse geomembraantõkke rajamise maksumus on 63 eur/jm ilma teenindustee rajamise maksumuseta.

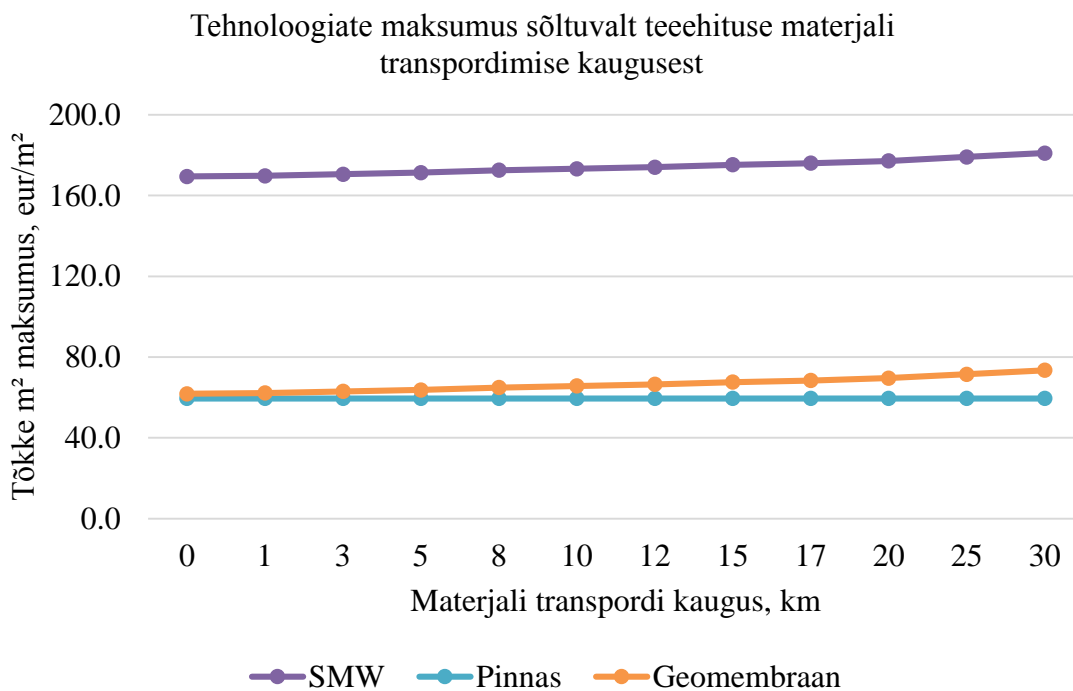
3.2.5 Tehnoloogiate maksumuse võrdlemine



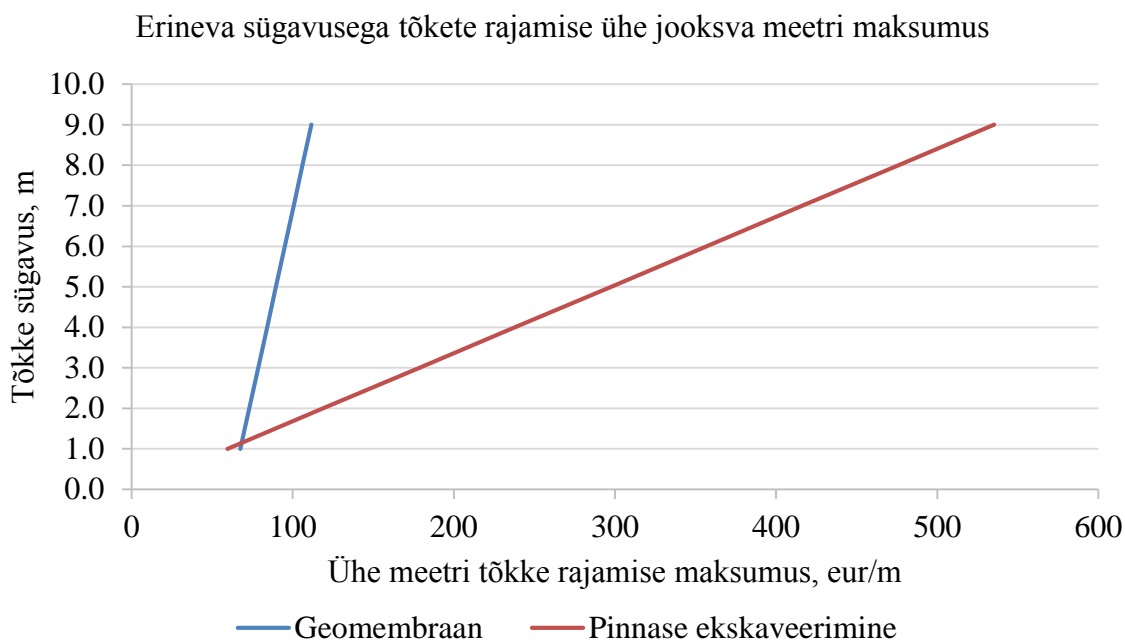
Joonis 3.4 Tehnoloogia maksumuste võrdlus

Jooniselt 3.4 (Joonis 3.4) selgub, et kõige odavam on pehmes pinnases hüdrotõkke rajamine geomembraantõkke ehitamise korral. SMW tehnoloogia on geomembraantõkke rajamise maksumust ~5 korda suurem. Pinnase ekskaveerimise meetodi maksumus on geomembraan tehnoloogiast 35,1 eurot ühe vertikaal-ruutmeetri kohta suurem.

Joonisel (Joonis 3.5) on võrreldud vajalike abitööde kulusid erinevate tehnoloogiatega korral. SMW ja geomembraan tehnoloogia rakendamiseks tuleb rajada teenindustee. Arvestades teenindustee jooksva meetri rajamise kulutusi, sh tee ehituse tarbeks vajaliku materjali tarnspordi kaugust, on geomembraan tehnoloogiaga hüdrotõkke ühe ruutmeetri maksumus suurem, kui pinnase ekskaveerimise meetodit rakendamisel.



Joonis 3.5 Tehnoloogiate maksumus sõltuvalt tee ehitamiseks vajaliku materjali transpordikaugusest



Joonis 3.6 Pinnase ekskaveerimise ning geomembraantõkke rajamise jooksva meetri maksumus sõltuvalt selle sügavusest

Üleval oleval jooniselt (Joonis 3.6) selgub, et kuigi 1m sügavuse hüdrotočke rajamine on pinnase ekskaveerimise meetodiga odavam kui geomembraantökke rajamine, siis sügavama tökke korral on geomembraantökke rajamine vähem kulukam. Vastavalt 4m sügavuse tökke rajamine maksab geomembraan tehnoloogia korral 82,9 eur/m² ja pinnase ekskaveerimise meetodi korral 238,0 eur/m². Viimane tuleneb asjaolust, et geomembraantöke paigaldatakse kogu tökke ulatuses korraga, pinnase ekskaveerimise meetodil rajatakse töke järguti.

3.3 Lubja- ja dolokivikarjääride hüdroisoleerimine

Eestis alandatakse sageli lubja- ja dolokivi kaevandamise eesmärgil nende leiukohtades põhjaveetasel, mille tulemusena mõjutatakse lisaks vahetule karjäärialala veerežiimile ka ümbritsevate alade oma. Sageli ulatub veelanduse depressioonilehter 2,0km (Tabel 2.2) kaugusele karjäärist. Veealanduslehtri ulatuse vähendamiseks on võimalik rajada lubja- või dolokivikarjääri mäeeraldise teenindusmaale või mäeeraldise piirile hüdroisolatsioonitöke. Sellisel juhul saab teha karjääris vee ärastust nõnda, et selle mõju ulatus ei välju mäeeraldise teenindusmaa piiridest. Käesolevas töös käsitletud hüdrotočke rajamise tehnoloogiast on sobilikud kaljuste kivimite karjäärade tingimustes rakendamiseks kolm: tökke rajamine karjääri vertikaalseinale, HC tehnoloogia ja sideaine injekeerimine.

3.3.1 Tehnoloogiate võrdlus

Lubja- ja dolokivikarjääri tingimustesse sobiva hüdrotočke rajamise tehnoloogia valiku kriteeriumiteks on selle kasutamise võimalik sügavus, sobivus tugevate kivimite purustamiseks, vajaliku tökke filtratsioonikoeffitsiendi saavutamise võimalikkus ning maksumus. Eestis paiknevate lubja- ja dolokivikarjäärade keskmine sügavus on 9,4m ning maksimaalne 26,5m (Tabel 2.2). Sealjuures nende keskmine sügavus allpool veetasel on 8,4m ning maksimaalne sügavus 16,9m (Tabel 2.2). Arvestades lubja- ja dolokivi survetugevust ning võimalikku vajadust kivimilasundit soonida või puurida, peab kasutatava tehnoloogiaga olema võimalik töödelda kivimit tugevusega kuni 140MPa. Tehnoloogia valikul peab arvestama asjaoluga, et saavutatakse tökkeseina filtratsioonikoeffitsiendiks 10^{-7} - 10^{-4} m/s.

Tabel 3.11 Erinevate tehnoloogiate võrdlus

| Tehnoloogia | Maksimaalne sügavus, m | Masinapargi kogumass, t | Purustusjõud, MPa |
|------------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|
| Surve-injekteerimine | 70 | ~30-45t | >100 |
| HC (ing.k <i>hydro cutter</i>) | 45 | Tõsteseade+tööorgan ~120t, abiseadmed ~50-60t | >120 |
| Tõke sõelmetest | - | 30-35t | - |

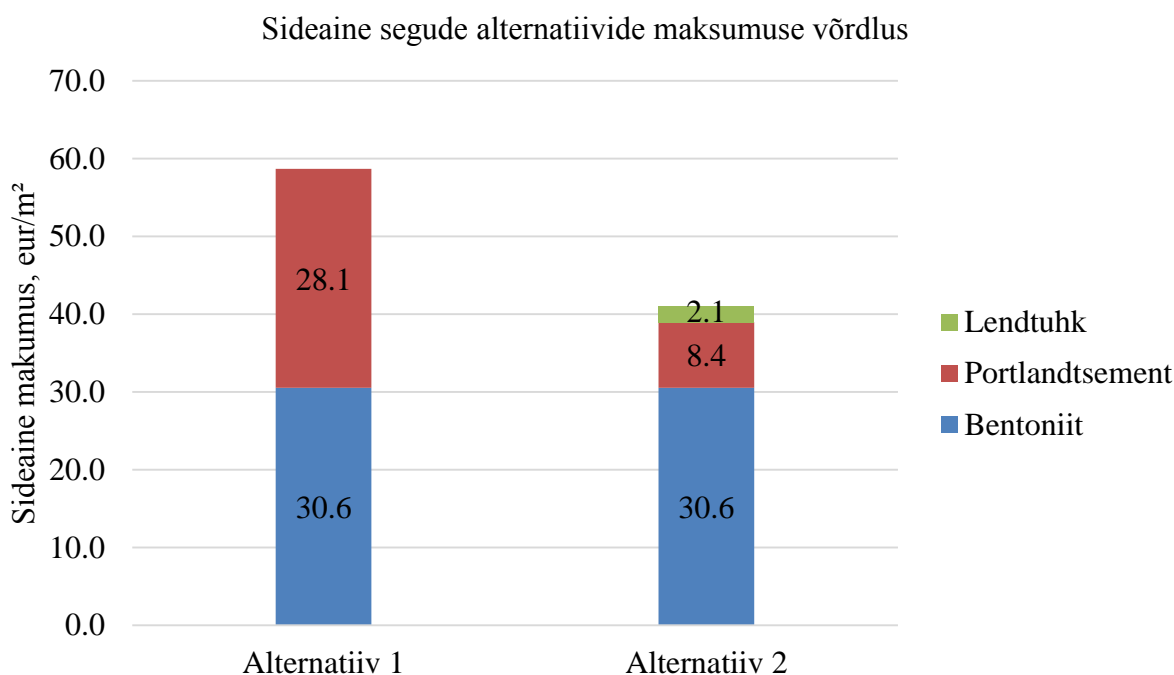
Tabel 3.11) selgub, et kõikide võrreldavate tehnoloogiatega on võimalik saavutada vajalik tõkke sügavus (keskmiselt 9,4m, maksimaalselt 26,5m). HC tehnoloogia korral on masinapargi suurus ning kogumass võrreldes teiste tehnoloogiatega kuni 4 korda suurem. Kuigi surveinjekteerimise meetod rahuldab nii lasundi purustustingimused kui ka tõkke võimaliku sügavuse kriteeriumi, ei sobi antud tehnoloogia kasutamiseks lubja- ja dolokivi karjäärides hüdrotõkke rajamiseks, sest maailma praktikas ei ole antud tehnoloogiaga saavutatud käesolevas töös määratud filtratsioonimadusi. Sellest tulenevalt jäetakse antud tehnoloogia edaspidisest käsitlest välja. HC meetodi miinuseks on selle suur masinapark. Sõelmetest tõkke rajamise miinus on vajadus ajutiselt alandada põhjaveetasel karjääris.

Hindade arvutamisel on kasutatud MS Excel tabelarvutusprogrammi ning kõik käesolevas peatükis tehtud arvutused on leitavad järgnevalt otseviitelt: [Analüüs\Lubja- ja dolokivi maksumus.xlsx](#)

3.3.2 HC tehnoloogia maksumus

Tehnoloogia maksumuse arvutamisel on käsitletud sarnaselt eelnevatele tehnoloogiate maksumuste arvutamistele kaht alternatiivi. Alternatiiv 1 on olukord, kus sideaines on kasutatud ainult tsementi ning alternatiiv 2 on olukord, kus tsement on 70% ulatuses asendatud lendtuhaga. Tehnoloogia tootlikkuseks on võetud 7 m²/h. Tõkkeseina laiuseks on võetud 0,9m. Kaljuste pinnaste korral võib sideainena kasutada portlandtsementi, mille hinnakirjajärgne maksumus on

0,11 eur/kg. Soonuri tunni hind on leitud analoogia meetodiga, kus on kasutatud 100t massiga roomikvankril kraana 1,5-kordset tunnihinna määra [67]. Arvutustes on kasutatud tööjõuna 10 inimest, ettevõtte tunnitasega 40 eur/h inimene.



Joonis 3.7 Sideaine segude alternatiivide maksumuse võrdlus

Jooniselt 3.7 (Joonis 3.7) nähtub, et asendades sideaine segus tsemendi 70% ulatuses lendtuhaga väheneb ühe ruutmeetri hüdrotõkke seina rajamise maksumus 17,6 eurot. Samuti ilmneb, et mõlema alternatiivi korral moodustab bentoniidi maksumus sideaines rohkem kui poole kogu sideaine segu maksumusest.

Tabel 3.12 HC tehnoloogiaga ühe hüdrotõkke seina vertikaal-ruutmeetri rajamise maksumus

| Kuluartikkel [allikas] | Para- meeter | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h | Alternatiiv 1 | Alternatiiv 2 |
|---------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Sideaine | - | - | - | 58,7 | 41,1 |
| Soonur [67] | 120t | 320,0 | 126,0 | 63,7 | |
| Frontaallaadur [63] | 14t | 38,0 | 14,7 | 7,5 | |

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

| Kuluartikkel [allikas] | Para- meeter | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu eur/h | Alternatiiv 1 | Alternatiiv 2 |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Sõelur [67] | 25t | 50,0 | 26,3 | 10,9 | |
| Sideaine mikseri [68] | 10t | 55,0 | 10,5 | 9,4 | |
| Pumbad [67] | 5500l/min 3tk | 82,0 | 132,3 | 30,6 | |
| Sideaine mahutid [67] | 3tk | 25,0 | - | 3,6 | |
| Tööjõukulu | 10 töölist | 400,0 | - | 57,1 | |
| Objekti üldkulu | - | 152,0 | - | 21,7 | |
| Maksumus, eur/m ² | | | | 263,2 | 245,7 |

Tabelis 3.12 (Tabel 3.12) on näidatud, et ühe ruutmeetri hüdrotõkke seina rajamine maksab HC tehnoloogiaga alternatiiv 2 korral 245,7 eurot. Suurema osa hinnast moodustab tehnoloogiline kulu, sealjuures masinate töötunni kulud.

3.3.3 Karjääri vertikaalseinale rajatava hüdrotõkke seina maksumus

Killustiku tootmise jääkidest, sõelmetest, hüdrotõkke nõlva rajamise maksumuse arvutamisel karjääri vertikaalnõlvale on arvestatud, et nõlva planeerimise tööd tehakse buldooseriga ning nõlv tihendatakse iga 0,5m materjali lisamise järel sõrgrulliga. Sõelmete transport tehakse frontaallaaduriga. Samuti on maksumuse arvestamisel kasutatud kahte alternatiivi. Alternatiiv 1 korral eeldatakse, et sõelmeid ei ole võimalik arendajal realiseerida, seega on need jäägid ning alternatiiv 2 korral eeldatakse, et arendaja suudab realiseerida 50% tekkivast sõelmete mahust ehk ülejäänud osas on arvestatud sõelmete kui tootega. Sõelmete hinnaks on arvestatud 1,9 eur/t ehk 2,7 eur/m³ [70]. Erinevalt teistest tehnoloogiatega ei arvestata hüdrotõkke nõlva rajamisel objektile üldkulusid, töid tehakse paralleelselt mäetöödega, mistõttu eraldi ei ole vajadust rajada välikontorit ega rentida teenindusseadmeid. Arvutustes on kasutatud tööjõuna 4 inimest ettevõtte tunnihinnaga 30 eur/h inimene. Tõkke maksumus on arvatud sarnaselt eelmiste meetoditega ühikule eur/m². Selle tõttu on kasutatud arvutustes Eesti keskmisi lubja- ja dolokivikarjääride

Hüdrotõkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

sügavust, sealjuures allapoole loodusliku põhjavee taset jäävat osa (keskmise 8,4m). Lisaks on tõkke rajamise eeldus, et see on vähemalt 0,5m kõrgem kui looduslik veetase (kokku 8,9m).

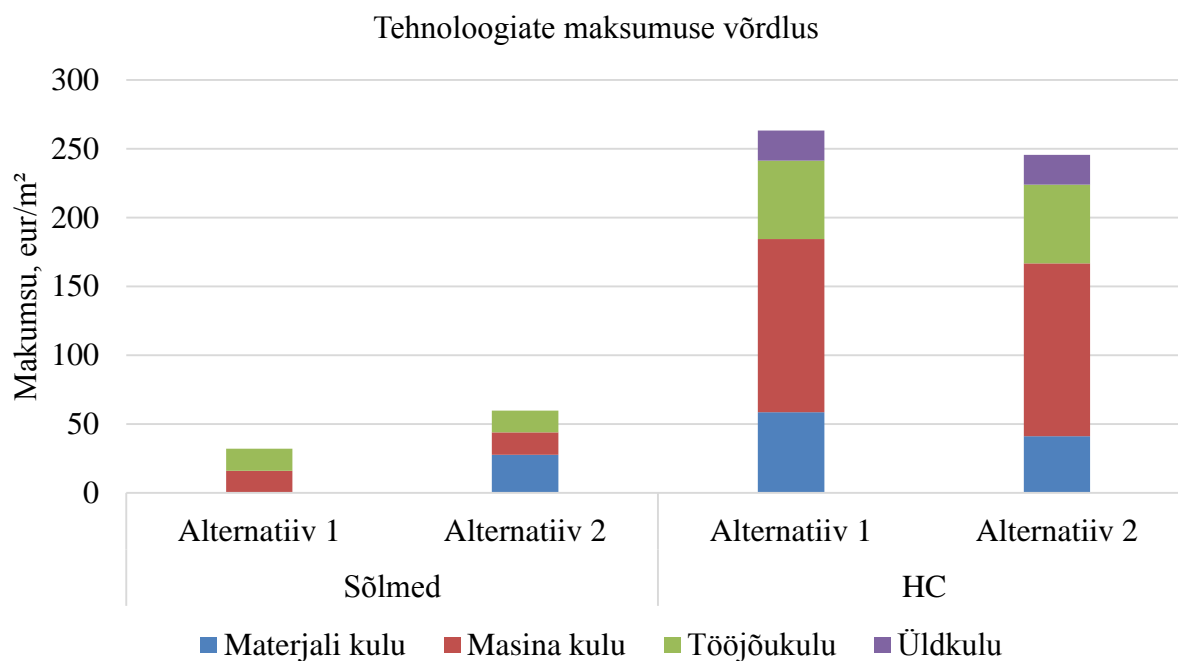
Tabel 3.13 Sõelmetest rajatava hüdrotõkke nõlva maksumus

| Kuluartikkel [allikas] | Para- meeter | Tunni hind, eur/h | Kütuse kulu, eur/h | Alternatiiv | Alternatiiv |
|---------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| | | | | 1 | 2 |
| | | | | eur/m ² | |
| Sõelmed | | | | 0 | 27,8 |
| Buldooser [69] | 14t | 55 | 14,7 | 9,3 | |
| Sõrgrull [63] | 12t | 28 | 12,6 | 0,6 | |
| Frontaallaadur [62] | 20t | 60 | 21 | 6,2 | |
| Tööjõukulu | 4 töolist | 120 | | 16,0 | |
| Kokku | - | 263 | 48,3 | 32,1 | 59,9 |

Tabel 3.13) selgub, et ühe ruutmeetri hüdrotõkke rajamise maksumus alternatiiv 1 korral on 32,1 eurot ning alternatiiv 2 korral 59,9 eurot. Suurima kulu moodustab alternatiiv 2 korral täitematerjali ning alternatiiv 1 korral tööjõu maksumus. Juhul, kui arendajal on võimalik sõelmeid kuni 50% ulatuses realiseerida, suureneb tõkke maksumus saamata jäänud tulu arvelt kuni 2 korda.

3.3.4 Tehnoloogiate maksumuse võrdlemine

Allolevalt jooniselt 3.8 (Joonis 3.8) selgub, et HC tehnoloogia maksumus on kuni 8 korda suurem kui sõelmetest rajatava hüdrotõkke rajamise maksumus. Sealjuures ei suurenda HC tehnoloogia korral tsemendi 70% ulatuses lendtuhaga asendamine (alternatiiv 2) konkurentsivõimet sõelmetest rajatava tõkke suhtes. HC tehnoloogia maksumus on kõikide kuluartiklite osas sõelmetest rajatava tõkke suhtes kallim. Lubja- ja dolokivikarjääri vertikaalnõlvale on otstarbekas rajada tõke sõelmetes.



Joonis 3.8 HC ja sõlmetest hüdrotõkke rajamise maksumuse võrdlus kuluallikate osakaalude järgi

4 TULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Turbalasundi veerežiimi hüdroisoleerimise tehnoloogia valik

Töös käsitleti nelja võimalikku tehnoloogiat turbalasundi veerežiimi hüdroisoleerimiseks. Sealjuures lähtuti tingimustest, et lasund võib olla nii karjääriviisiliselt kaevandatava maavara katend kui ka eraldiseisvalt kaevandatav maavara. Käsitletud tehnoloogiatest sobib Eesti geoloogilistesse tingimustesse (töösügavus vähemalt 8,4m, tõkkeseina laius 0,9m,) kolm: SMW, pinnase ekskaveerimine ning geomembraantõke. Algselt käsitletud mass-stabiliseerimise tehnoloogia välistati tulenevalt selle väiksemast töösügavusest (maks. 5m, Tabel 3.3 Erinevate tehnoloogiate võrdlus). Tulenevalt asjaolust, et sobiliku tehnoloogia valiku kriteeriumiks ei ole seatud piiranguid tõkke rajamise ajakulule, ei ole võimalik teha sobiliku tehnoloogia valikut lähtuvalt selle tootlikkusest. Seega taandub hüdroisolatsioonitõkke rajamise meetodi valik nende maksumusele.

SMW tehnoloogiaga hüdroisolatsioonitõkkeseina rajamise ruutmeetri maksumus alternatiiv 2 korra, kus sideaine segus on tsement asendatud 70% ulatuses lendtuhaga, on 133,2 eurot (Tabel 3.6). Arvestades vajadusega rajada teenindustee ning asjaoluga, et tee ehituseks vajaliku materjali transpordikaugus on 15km, maksab tõkkeseina rajamine SMW tehnoloogiaga 175,2eur/m² (Joonis 3.5). Geomembraantõkke rajamise ruutmeetri maksumus samade tingimuste korra on 66,4eur/m² (Joonis 3.5). Pinnase ekskaveerimise meetodi korral ei ole vajadust rajada teenindusteed, kuna selle rakendamiseks on võimalik masinapark koostada selliste parameetritega masinatest, millel on piisavalt väike erisurve pinnasele (1.2.1.4). Pinnase ekskaveerimise tehnoloogia maksumus on odavama alternatiivi korral 59,5eur/m² (Tabel 3.9). Kui SMW tehnoloogia ja pinnase ekskaveerimise meetodi korral rajatakse tõkkesein järguti pinnasesse alt-üles meetodil, siis geomembraantõkke rajatakse kogu kraavi ulatuses korraga. Sellest tulenevalt suureneb tõkkeseina sügavuse suurendes vaid hüdroisolatsioonitõkke materjali kulu. Seega sõltub geomembraantõkke tehnoloogia maksumus oluliselt rajatava tõkkeseina sügavusest. Eesti keskmise turbalasundi paksuse korral (4,0m, Joonis 3.6) maksab tõkkeseina jooksva meetri rajamine 82,9eur/m² samal ajal kui pinnase ekskaveerimise meetodiga 238,0eur/m³ (Joonis 3.4). Pinnase ekskaveerimise meetod on odavam geomembraantõkke

tehnoloogiast vaid kuni 1m sügavuste tõkete korral (Joonis 3.6). SMW tehnoloogia suurema maksumuse tingib peamiselt selle väiksem tootlikkus ning suurem tehnoloogiline kulu (Joonis 3.4). Kuigi geomembraantõkke rajamise tehnoloogiline kulu (eur/h) on võrreldes pinnase ekskaveerimise meetodiga suurem, on oluliselt väiksem selle materjali maksumus (eur/m²). Materjali maksumus ühe ruutmeetri tõkkeseina rajamisel on vastavalt 5,5 eurot ning 44,2 eurot (Tabel 3.11). Olulise osa geomembraantõkke rajamisest moodustab vajadus ehitada teenindustee, mille kulu ühe jooksva meetri tõkke rajamiseks 15km pikkuse transporditee korral on 42 eurot (Joonis 3.1).

Eesti geoloogilistes tingimustes pinnase ekskaveerimise meetodi rakendamise maksumus sõltub peamiselt selle väikesest tootlikkusest (30m³/h) ning sideaine maksumusest. Asendades sideaine segus tsemendi 100% ulatuses lendtuhaga, on võimalik vähendada tõkke ruutmeetri maksumust täiendavalt 10 eurot (Joonis 3.2) ehk 49,5 euronit. Viimase rakendamiseks peab enne sellise vahekorraga sideaine ja pinnase segu katsetama filtratsiooni seisukohalt. Lisaks on võimalik pinnase ekskaveerimise meetodi maksumust optimeerida vähendades rajatava tõkkeseina laiust. Tõkkeseina laiust on võimalik vähendada tingimusel, kui suurendatakse pinnase ja sideaine segus viimase osakaalu. Selle tarbeks tuleb laboratoorselt katsetada erinevate koostiste filtratsiooni, et teha järeldus võimaliku tõkkeseina laiuse vähendamiseks. Tõkkeseina laiuse vähendamine suurendab pinnase ekskaveerimise meetodi konkurentsi võrreldes geomembraantõkke tehnoloogiaga.

Käesoleva töö tulemuste kohaselt on otstarbekas kasutada turbalasundite veerežiimi hüdroisoleerimisel geomembraantõkke rajamise tehnoloogiat, tulenevalt selle väiksemast maksumusest. Arvestades asjaolu, et ~45% geomembraantõkke rajamise tehnoloogia maksumusest moodustab teenindustee rajamine, tuleb käesoleva töö edasiarendusena leida tehnoloogilisi lahendusi masinapargi kogumassi ja pinnasele avaldatava erisurve vähendamiseks.

4.2 Lubja- ja dolokivikarjääride hüdroisoleerimine

Käesolevas töös käsitleti lubja- ja dolokivikarjääri veerežiimi hüdroisoleerimiseks kolme tehnoloogiat: pinnase injekteerimine, HC tehnoloogia ning karjääri vertikaalseinale hüdroitõkke

Hüdrotočkete rajamise tehnilis-majanduslikud võimalused Eesti geoloogilistes tingimustes ning nende rakendamine karjäärides

rajamist. Tehnoloogia valiku kriteeriumiks oli tõkke rajamise sügavus vähemalt 9,4m, tõkkeseina filtratsioonikoefitsient $<10^{-4}$ m/s ning selle maksumus. Kolmest tehnoloogiast loeti Eesti tingimustesse sobivaks kaks: HC ning vertikaalseinale rajatav tõke. Pinnaste injektoerimise tehnoloogiaga ei ole võimalik saavutada töös seatud kriteeriume tõkkeseina filtratsioonikoefitsiendi osas.

HC tehnoloogiaga hüdrotočkeseina ühe ruutmeetri rajamine maksab 245,7 eurot (Tabel 3.12 ; Tabel 3.13), juhul kui sideaine segus on kasutatud 70% ulatuses tsemendi asemel lendtuhka. Sõelmetest hüdrotočkete nõlva ühe vertikaal-ruutmeetri rajamine karjääri piirile maksab 59,9 eurot, juhul kui arendaja suudab realiseerida kuni 50% killustiku tootmisjääkidest. Samas, kui tõkke rajamisel täitematerjali kulu puudub, on sõelmetest hüdrotočkete rajamise maksumus 32,1eur/m². HC tehnoloogia suurem maksumus tuleneb selle väikesest tootlikkusest kaljuste pinnaste purustamisel ning suure masinapargi vajadusest. HC tehnoloogiaga korral on hüdrotočkete seina rajamine 4 korda kallim kui sõelmetest tõkke ehitamisel. Sõelmetest hüdrotočkete seina rajamise puuduseks on vajadus alandada tööde tegemise ajaks karjääri veerežiimi. Teisalt on võimalik hüdrotočke rajada paralleelselt mäetöödega, mis optimeerib vahetuid kulutusi tõkke rajamiseks.

Eesti geoloogilistes tingimustes on käesoleva töö tulemuste kohaselt otstarbekas kasutada lubja- ja dolokivikarjäärade veerežiimi hüdroisoleerimisel sõelmetest rajatud tõkkeid, kuna nende rajamise maksumus võrreldes spetsiaaltehnoogiatega on väikesem. Spetsiaaltehnoogia kasutamise maksumus tuleneb vajadusest purustada suure tugevusega pinnast. Tugeva pinnase purustamine eeldab raskeid masinaid, mille käitamine on kapitalimahukas.

Käesoleva töö edasiarendusena tuleb uurida sõelmetest rajatava tõkke tihendamise vajadust 0,5m paksuse täitematerjali lisamisel korral. Lähtuvalt tulemustest on võimalik vähendada sõelmetest rajatava tõkke maksumust.

5 KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös käsitleti kümmet erinevat hüdrotõkke rajamise tehnoloogiat eesmärgiga hinnata nende rakendatavust Eesti geoloogilistes tingimustes paiknevates karjäärides. Sealjuures käsitleti kahte erinevat geoloogilist situatsiooni - hüdrotõkke rajamine lubja- ja dolokivimitesse ning tõkke rajamine turbalasundisse, kui see asub kaevandatava maavara katendis. Viimane situatsioon on omane Narva põlevkivikarjääri lõunaosale, kus mäetöödega liigutakse looduskaitse all oleva Puhatu soostiku suunas. Sobiliku tehnoloogia valik tehti lähtuvalt selle rakendamise võimalikkusest ning maksumusest. Tehnoloogiate rakendatavuse analüüsimisel lähtuti maailmas, peamiselt USA-s, Kanadas ning Austraalias, rajatud hüdrotõkete rajamise kogemusest ning nende kohta koostatud eel- ja teostusuuringutest.

Töö tulemustest selgus, et Eesti geoloogilistes tingimustes sobib turbalasundi (keskmine lasundi sügavus 4,0m, maksimaalne 10,6m) isoleerimiseks geomembraantõkke rajamine vertikaalkettsoonuriga. Nimetatud tehnoloogia korral maksab 1m sügavuse tõkkeseina jooksva meetri rajamine 66,4eur/m² ning 4m sügavuse tõkke jooksva meetri rajamine 82,9eur/m², tingimusel, et teenindustee rajamiseks vajalik materjal transpordikase 15km kauguselt. Sealjuures moodustab teenindustee rajamise maksumus ~45% tõkkeseina maksumusest. Samuti selgus analüüsist, et kuni 1m sügavuse tõkkeseina rajamine on odavam pinnase ekskaveerimise meetodil, sellisel juhul kujuneb tõkkeseina maksumuseks 59,5eur/m². Geomembraantõkke rajamise eelis seisneb asjaolus, et tõke rajatakse ühe korraga kogu sügavuse ulatuses.

Lubja- ja dolokivikarjäärade korral on otstarbekas, lähtuvalt töö tulemustest, kasutada killustiku tootmisjääkidest, s.o sõelmetest rajatud hüdrotõket. Sõelmetest karjääri vertikaalseinale rajatud tõkke maksumus on 32,1eur/m².

Töö edasiarendusena tuleb uurida võimalusi geomembraan hüdrotõkke rajamiseks kasutava masinapargi kogumassi ning selle pinnasele avaldatava erisurve vähendamiseks, et optimeerida geomembraan tõkkeseina maksumust. Sõelmetest tõkke rajamiseks tuleb täiendavalt uurida selle tihendamise vajadust iga 0,5m paksuse täitematerjali kihi lisamisel. Lähtuvalt tulemustest on võimalik vähendada tõkkeseina maksumust.

6 KASUTATUD KIRJANDUS

1. Paal, J. 2011. Jääksood , nende kasutamine ja korrastamine, Tartu
2. Orru, M. 1995. Eesti turbasood, Tallinn
3. Maa-amet, 2014. Eesti Vabariigi 2013. aasta maavaravarude koondbilansid (seisuga 31.12.2013. a), Tallinn
4. Riiklik Ilmateenistus, <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/sademed/> [16.04.2015.]
5. Raukas A., Teedumäe A., 1997 Geology and Mineral Resources of Estonia, Tallinn
6. Maa-amet Keskkonnaregistri maardlate nimistu turbamaardlate registrikaardid nr:0197;0202;0236;0240;0154;0280;0160;0120;0149;0198;0219;0244;0093;0146;0119;0076;0117;0112;0114;0101;0214;0238;0241;0425;0249;0269;0258;0253;0135;0136;0090;0092;0089;0230;0096;0111;0113;0216;0245;0188;0122;0121;0100;0257;0201;0233;0195;0234;0220;0223;0144;0246;0145;0281;0118;0116;0510;0157 ning lubja- ja dolokivimaardlate registrikaardid nr:0212;0808;0046;0786;0769;0017;0079;0018;0586;0080;0392;0029;0793;0082; 0047;0433;0042;0612 [17.04.2015]
7. Arold I., Raukas A., Viiding H., 1987, Geoloogia alused, Tallinn
8. Geoturism Eestis ja lõuna-Soomes, <http://www.geoeducation.info/geoturism/paekivi.php> [17.04.2015]
9. Tartu Ülikooli Geoloogia Muuseum, <http://www.ut.ee/BGGM/eestigeol/kambrium.html> [17.05.2015]
10. Mäeõpik, <http://maeopik.blogspot.com/2009/01/kivimi-tugevus.html> [06.05.2015]
11. Põhjaveekomisjon, 2008. Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse, Tallinn
12. Langemetsa M, Tiits M, 2009. Eesti keele seletav sõnaraamat, Tallinn
13. CPEO, <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/slurwal.htm> [19.04.2015]
14. Spaulding C. A., 2007. Soil Bentonite Cut-off Walls for Confinement of Existing Landfills: Tempe Tip- A Case Study. Austraalia
15. Timms W., Liu H., Laurence D., 2013. a Design of Low Permeability Barriers to Limit Subsurface Mine Water Seepage, Austraalia

16. AS Maves, OÜ Inseneribüroo STEIGER, 2014. AS Eesti Energia Kaevandused kaevandamislubade KMIN-073, KMIN-046, KMIN-074 ja KMIN-087 muutmisega kaasneva keskkonnamõju hindamise (KMH) programm, Tallinn
17. Irrigation Australia http://www.channelseepage.org.au/4_2_18_2_geo.html [19.04.2015]
18. Tallinna Jäätmete Taaskasutuskeskus
http://tjt.ee/ettevottest/prygila_skeem/prygila_pinnase_konstruktsioon [16.04.2015]
19. Piiber Projekt OÜ, 2014. Rääma II turbatootmisala ringpiiri hüdroisolatsiooni projekt, Tartu
20. Sillamäe S., Einasto R., Sarv A., 2014. Kaevandamise jääkmaterjalide kasutusvõimaluste uuring, Tallinn
21. OÜ Inseneribüroo STEIGER, 2008. Koonga dolokivimaardlasse kavandatavate kahe karjääri rajamisega ja töötamisega kaasneva keskkonnamõju hindamise aruanne, Tallinn
22. Kontor A., Kahha A., 2013. Ehitusmaterjalid, Tallinn
23. Dehghambadaki A., Ahmed K., 2013. Stabilization of Soft Soils with Deep Mixed Soil Columns-General Perspectives, Malaysia
24. Allu Finland OY, 2007. Mass Stabilisation Manual, Soome
25. EuroSoilStab, 2002. Design Guide Soft Soil Stabilization, Euroopa Liit
26. Ramboll Eesti AS, 2007. Pinnaste mass-stabiliseerimisvõimaluste uuring. Lõpparuanne. Tallinn
27. Eesti Energia AS, Ramboll, 2011. OSAMAT materials report, Tallinn
28. Otoko G. R., 2014. A Review of a Stabilization Method for the Nigerian Deltaic Peaty Clay (Chicko), Nigeeria
29. HBM, <http://www.hydraulicallyboundmixtures.info/chemical-physical-properties.php> [20.04.2015]
30. Mäeõpik, <http://maeopik.blogspot.com/2011/11/bentoniit.html> [28.04.2015]
31. Kahl, T. W., Laurence P.E., Design and Construction of Slurry Wall to Contain a Low-pH Dense Aqueous Phase Brine, USA
32. Timofejev A., 2011. Bentoniidi ehk montmorilloniidi kasutusala, Tartu
33. Dallas L.N., Nair S., 2009. Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, USA
34. Bauer Maschinen, 2012. SMW Soil Mixing Wall-System, Saksamaa

35. MAST, The Basic Mix: A general teacher's guide to concrete preparation, USA
36. Bruce. D. A., Seepage Cut-off for Levees and dams the technology Review, USA
37. USSD, 2011. 21st Century Dam Design advances and Adaptions, USA
38. Soletanche Bachy, <http://www.soletanche-bachy.com/SBF/referencesb.nsf/%28LTechnicsEN%29/Jet+grouting+%28Jet+grouting%29!OpenDocument> [22.04.2015]
39. Geoengineer, <http://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-remediation-technologies/impermeable-barriers?start=6> [02.05.2015]
40. Bernander S., 2004. Grouting in Sedimentary and Igneous Rock with Special reference to Pressure Induced deformations, Rootsi
41. CGS, http://www.cgsinc.net/about_compaction_grouting.aspx [14.04.2015]
42. Lemminkaine Eesti AS, http://www.lemminkainen.ee/tooted/betoonrajatised_ja_geotehnilised_ehitustood/pinnase_parendamine/jugainjektsioon [14.04.2015]
43. Soilmec, http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co_id=2123 [14.04.2015]
44. Geo-Solutions, <http://www.geo-solutions.com/case-studies/slurry-wall/soil-bentonite-groundwater-cutoff-alberta-canada> [15.04.2015]
45. Tarrawonga Coal PTy Ltd, 2011. Concept Design for Low Permeability Barrier and Permanent Goonbri Creek Alignment, Austraalia
46. Wetland Ltd, 10-12 metric ton amphibious excavator, USA
47. Pioneer Equipment Company, <http://www.pioneerjax.com/swampbuggy.htm> [30.04.2015]
48. Bauer Maschinen, 2015. Bauer Trench Cutter Systems, Saksamaa
49. Scientific, <http://www.scientific.net/AMR.838-841.1715> [30.04.2015]
50. GSE Environmental, http://www.gseworld.com/content/documents/datasheets/membranes/Europe_and_Africa/High_Temperature_-_ISO_-_Europe_Africa.pdf [27.04.2015]
51. Mastenbroek, <http://www.mastenbroek.com/products/deep-trenching/50-60/> [07.05.2015]
52. Inter-Drain, <http://www.interdrain.com/index.php/products/dewatering-trenchers> [27.04.2015]

53. OÜ Inseneribüroo STEIGER, 2014. a Harku V lubjakivikarjääri kaevandamise projekt (töö nr 14/1311), Tallinn
54. Maaparanduse ehitusjärelevalve- ja ekspertiisibüroo, 2005. a Maaparandussüsteemide ehitus- ja hoiukulud ning kalkulaatiivsed ühikumaksumused meetme 3.4 rakendamisel, Tallinn
55. Caterpillar 385B/352B L Hydraulic Excavator specification sheet
56. Tractor and Construction Plant,
http://tractors.wikia.com/wiki/Low_Ground_Pressure#Low_ground_pressure_vehicles [06.05.2015]
57. Riigimetsa Majandamise Keskus, 2014. RMK metsateede katendite projekteerimise, ehitamise ja hooldamise juhend, Tallinn
58. Reinsalu E., 2008. Mäemajandus, Tallinn
59. Neste Eestis AS kodulehekülg,
<http://www.neste.ee/default.asp?path=14388,14431,14652,14714> [03.05.2015]
60. Kilekeskus OÜ kodulehekülg, <http://www.kilekeskus.ee/cms/eesti/hinnakiri/geotekstiil> [03.05.2015]
61. AS Kiirkandur kodulehekülg, <http://www.kiirkandur.ee/hinnad> [03.05.2015]
62. AS Raktoom kodulehekülg,
http://raktoom.ee/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=8 [03.05.2015]
63. Multivara Transport OÜ kodulehekülg, <http://www.multivara.ee/hinnakirjad-2/juhitarendi-hinnakirjad/#all/1/list> [03.05.2015]
64. AS Cramo Estonia kodulehekülg,
<http://www.cramo.ee/Web/Core/Pages/BusinessAreaStartPage.aspx?id=18459&epslanguage=ET> [04.05.2015]
65. OÜ Autorent, <http://www.1autorent.ee/kat/buss> [06.05.2015]
66. AS Kunda Nordic Tsement kodulehekülg, <http://www.knc.ee/et/node/4202> [30.04.2015]
67. Machinery Trader kodulehekülg,
<http://www.machinerytrader.com/list/list.aspx?ETID=2&catid=1015> [5.05.2015]
68. Harku Betoon kodelehekülg, <http://www.harkubeton.ee/prices.php> [05.05.2015]

69. Harju Kaevetööd OÜ kodulehekülg, <http://www.hkt.ee/kaevetehnika-rent/buldooser/> [30.04.2015]
70. OÜ Vão Paas kodulehekülg, <http://vaopaas.ee/tootedteenused/killustik/> [10.05.2015]
71. OÜ BYGG and MASKIN kodulehekülg, <http://www.ehitusmasinad.ee/et/hinnakiri> [07.05.2015]