



TRANSPORDIAMET

**TAL
TECH**

Pinnaste tihendamine ja tiheduse kontroll

LÕPPARUANNE



Tallinn 2024

Pinnaste tihendamise ja tiheduse kontroll

Lõpparuanne

Tellijaja:

Transpordiamet

Aadress: Teelise 4, 10916 Tallinn

Kontaktisik: Karl-Kristjan Suits (e-mail: karl-kristjan.suits@transpordiamet.ee)

Teostaja:

Sven Sillamäe (sven.sillamae@taltech.ee)

Tallinna Tehnikaülikool

Inseneriteaduskond, Ehituse ja arhitektuuri instituut, teedehituse ja geodeesia uurimisrühm

Aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Uuringumeeskond:

Sven Sillamäe (TalTech), uuringu vastutav täitja, aruande autor

Simmo Talpas-Taltsepp (T-Konsult OÜ), katsetööde läbiviija, peatüki 10 kaasautor

Kristofer Kikut (Tallinna Tehnikakõrgkool), katsetööde läbiviija

Ain Kendra (TalTech), konsultant

Riho Eichfuss (T-Konsult OÜ), konsultant

Täname: Verston Eesti OÜ, Ville Toomik (Ehitus ja Masinad AS), TalTech teedelabor, AS Teede Tehnokeskus, Roadservice OÜ, West Coast Road Masters Oy, Raiki Reiljan (Tallinna Teed AS), Rain Mäekivi (GRK Eesti AS), Sven Veisalu (Infragreen OÜ), Mart Arusoo, Ott Talvik, Ksenia Haavistu.

© Transpordiamet, 2024

Töö tellija on Transpordiamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Transpordiameti seisukohaga ega väljenda Transpordiameti poolt heakskiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö teostajal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

Sisukord

Sissejuhatus	5
Mõisted.....	6
1 Ülevaade pinnaste geotehnilistest omadustest	15
1.1 Pinnaste klassifitseerimine	15
1.2 Pinnaste liigitamine.....	18
1.2.1 Pinnaste terasuurus.....	18
1.2.2 Pinnaste plastsus (peeneteralised pinnased).....	19
1.2.3 Pinnaste koostis.....	23
1.3 Pinnaste koostise ja nende tihendatavuse omavahelised seosed	26
1.4 Vesi pinnases.....	28
1.4.1 Proctor-teim.....	29
1.5 Õhk pinnases	33
1.6 Pinnase struktuur.....	34
1.6.1 Pinnase struktuurisidemed	36
1.7 Pinnase nihketugevus	38
2 Pinnase tihendamise olulisus.....	39
3 Nõuded tihendatava pinnase niiskusele ja pinnase lõpptihedusele	42
4 Tihendamismasinatest ja -protsessist	48
4.1 Tihendamise viisid	48
4.1.1 Staatiline koormus.....	48
4.1.2 Sõtkumine	49
4.1.3 Löökkormus	50
4.1.4 Vibratsioon.....	50
4.2 Sobiva tihendusmasina valik.....	54
4.2.1 Tihendatav pinnas või materjal	54
4.2.2 Tihendusmasina tüübid	57
4.2.3 Tihendamine kitsastes kohtades	63
4.2.4 Nõlvade tihendamine	64
4.3 Pideva tiheduse kontrolli meetmed	65
5 Tihendamisnõuded	71
5.1 Suunised maksimaalseks tihendatavaks kihiks sõltudes pinnasest ja tihendamismasina tüübist.....	72
6 Pinnase tiheduse määramise ja hindamise meetodid.....	76
6.1 Mahumassi mõõtmisel põhinevad meetodid	76
6.1.1 Liivakoonus.....	76

6.1.2 Kummiballooni meetod.....	77
6.1.3 Lõikerõnga meetod.....	78
6.2 Radioaktiivse isotoobiga ja mitteradioaktiivsed mõõtmismeetodid.....	79
6.3 Tihendusekontroll läbi nihketugevuse mõõtmise.....	81
6.4 Plaatkoormus.....	82
6.5 Langeva koormusega rasked deflektomeetrid.....	83
6.6 Langeva koormusega kergdeflektomeetrid	84
7 Tihendamistehnoloogiad	86
7.1 Pinnaste tihendamine kitsendatud tingimustes, sh kaevetööde ja avariikaevetööde järgne pinnaste tagasitäide/tihendamine.....	88
8 Pinnaste tiheduse kontroll	89
9 Pinnaste tihendamisel tekkivad probleemid ja nende kõrvaldamine.....	90
10 Lisa 1. Katsetööde aruanne	93
10.1 Katsetööde lähteülesanne	93
10.2 Katsetööde tulemused ja järeldused	95
10.2.1 Üldosa	95
10.2.2 Mõõtmised liivpinnastelt.....	98
10.2.3 Mõõtmised killustikalustelt.....	106
10.2.4 Mõõtmised moreenpinnaselt	111
10.2.5 Mõõtmised põlevkiviaherainelt (lubjakivikillustik fr 0...90(300) mm)	114
10.2.6 Mõõtmised kergtäitematerjalilt	116
10.2.7 Moodulite suhetest	117
10.2.8 Kruusad	124
10.2.9 Geosünteedi mõju.....	129
10.2.10 Kihi seismise mõju mõõdetavatele kandevõimetele	136
10.3 Analüüs ja kokkuvõtted.....	137
10.3.1 Liivpinnased.....	137
10.3.2 Kruuspinnased.....	141
10.3.3 Keskmise- ja peeneteralised pinnased.....	142
10.3.4 Killustikud.....	144
10.3.5 Väga jämedateralised pinnased	148
10.3.6 Geosünteedid.....	148
Lisa 2. Algne tabel penetromeetri Beldornii D-51 kasutamiseks.....	150
Lisa 3. Peeter Talviste ekspertarvamus	151
Kokkuvõte	156
Viidatud allikad.....	157

Sissejuhatus

Hetkel kehtiv Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend on koostatud aastal 2006 ning hiljem ei ole antud juhendit täiendatud ega parandatud. Juhendis kirjeldatud meetodid ja põhimõtted on üldjoontes õiged, kuid juhend tervikuna vajaks kaasajastamist ning kehtivate EVS-ide (EVS-EN 16907-1:2018, EVS-EN 16907-2:2018, EVS-EN 16907-5:2018, EVS-EN ISO 14688-1:2018 ja EVS-EN ISO 14688-2:2018 ja jms) määruste ja Eurokoodeksitega vastavusse viimist.

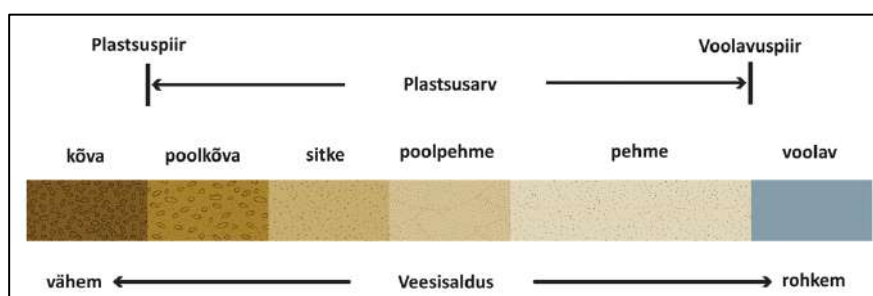
Käesolevasse aruandesse on koondatud erinevatest kirjandusallikatest, standarditest ja juhenditest leitav teooria sideainega sidumata pinnaste ja tee-ehitusmaterjalide tihendamist ning selle kvaliteedikontrolli puudutavalt. Käesoleva uuringu osana teostati ka mitmetel tee-ehitusobjektidel katsemõõtmisi, mille kokkuvõtte ja järeldused on lisatud käesolevasse aruandesse. Arvestades nii teooriat kui praktikat, on välja töötatud uued nõuded kontrollimaks erinevate pinnaste ja sideainega sidumata tee-ehitusmaterjalide tihendamiskvaliteeti.

Käesoleva aruande põhjal on koostatud uus pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhend, mille puhul on jälgitud EVS-EN 16907 nõudeid, soovitusi ja pinnaseliigitusi. Et uut pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhendit kasutada, peaks ka muldkeha projekteerimine olema tehtud EVS-EN 16907 antud nõuete kohaselt.

Käesolevas juhendis antud nõuded tihendamise kvaliteedi hindamiseks lähtuvad valdavalt lõpptoote spetsifikatsioonist (EVS-EN 16907-1).

Mõisted

Atterbergi piirid (ing. *Atterberg limits*) ehk **plastsuspiirid** (ing. *plasticity index*), s.t plastsus- ja voolavuspiirid, mida on kujutatud joonisel 1.



Joonis 1. Atterbergi ehk plastsuspiirid on plastsus- ja voolavuspiir, nende erinevusest tuleb plastsusarv. Sõltuvalt sellest, kui lähedal on pinnas kas plastsus- või voolavuspiirile, tuleneb tema konsistents.

Aluspinnas (ing. *subgrade*) on looduslik pinnas või kalju või ümbertöödeldud looduslik või tehispinnas, millele toetub tee konstruktsioon.

Elastusmoodul e. Young'i moodul (ing. *Young's modulus*) (**E**) on materjali elastseid omadusi iseloomustav võrdetegur, normaalpinge ja suhtelise deformatsiooni suhe, määratakse pinge-suhtelise deformatsiooni graafiku lineaarselt osalt.

$$E = \sigma / \epsilon$$

Pinnase elastsusmoodul määratakse kompressiooniolukorras. Pinnase puhul ei ole tegemist homogeenise materjaliga, elastsusmoodulis sisaldub alati ka mingi jäävdeformatsiooni komponent. Selle tõttu kasutatakse inglisekeelses kirjanduses teedevaldkonnas elastsusmooduli asemel suurust „taastuv elastsusmoodul“ (M_r) (ing. *resilient modulus, M_r*), mis on pinge ja sellele vastava taastuva deformatsiooni suhe, sisuliselt plaatkoormuskatse E_{v2} . Pinge ja kogudeformatsiooni suhe on tinglikult plaatkoormuskatse E_{v1} .

Kalju (ing. *rock*) on EVS-EN ISO 14689 järgi looduses esinev tihenend, tsementeerunud või muul moel liitunud mineraaliterade, kristallide või mineraalosakeste kogum, mida pole võimalik vees käsitsi koostisosadeks lõhkuda.

Kaljumaterjal (ing. *rock material*) on kaljust valmistatud pinnas, mis jagatakse gruppidesse EVS-EN 16907-2 alusel. Käesolevas juhendis kasutatakse mõistet „kaljumaterjal“ kui kaljust valmistatud valdavalt väga jämedateralist pinnast, nt paekivimurd, põlevkiviaheraine, (lõhatud) tardkivimurd jms, aga ka fraktsioneeritud killustikud. Taolist pinnast / materjali nimetatakse inglisekeelsetes tihendamist käsitletavates juhendites ja käsiraamatutes kui „kivi“ ehk „*rock*“.

Kuivmahumass (ing. *dry density*) on ahjus kuivatatud pinnase ühikruumala mass. Vastavalt EVS-EN 1097-5 tuleb kuivatamisega saavutada konstantne mass (kui järjestikuste kaalumiste tulemused pärast vähemalt ühetunnist kuivatamist ei erine teineteisest enam kui 0,1%). Pinnaste veesisaldus määratakse vastavalt EVS-EN ISO 17892-1 alusel ning tehispinnastel ja -materjalidel vastavalt EVS-EN 1097-5.

Kokkusurutavus, nimetatakse ka kui **jäikus** (ing. *stiffness*), on pinnase omadus avaldada vastupanu deformeerumisele pingeseisundi muutudes. Jäikusparameetrid on arvnäitajad, mis iseloomustavad deformatsioonide ja pingete vahelistes seostes materjali jäikust. Praktilistes rakendustes on deformatsioonide määramine vajalik pinnasele rakendatud koormuse mõjul tekkiva vajumi arvutuseks. Näiteks vundamendi koormisest tingitud lisapinged pinnases põhjustavad deformatsioone, mille summaarne mõju avaldub vundamendi vajumisena. Peamine osa vajumisest on põhjustatud pinnase mahumuutusest, mis on seotud tema poorsuse vähenemisega ehk tihenemisega. Pinnase deformeeritavuse käsitlemisel kasutakse sageli jäikuse asemel terminit kokkusurutavus. Vundamendi vajumise prognoosimiseks vajalik teada pinnase mahumuutuse või poorsuse sõltuvust mõjuvast pingest, see tähendab tema jäikusparameetreid ehk kokkusurutavust.

Kokkusurutavuse eksperimentaalseks määramiseks kasutatakse mitmesuguseid laboriteime (õdomeeterteim vastavalt EVS-EN 17892-5) või välikatseid (plaatkoormuskatse sobiva pinge juures). Kokkusurutavuse võib leida ka empiiriliste seoste abil, kui katsetega on kindlaks tehtud sõltuvus kokkusurutavuse ja mõnede lihtsamini määratavate pinnase omaduste, näiteks poorsuse, veesisalduse, plastsusomaduste, vahel.

Mahumass (ing. *bulk density*) on pinnase või kalju ühikruumala mass koos poorides oleva vee ja gaasiga. V.t ka tihedus.

Mineraalpinnas on looduslik pinnas, mis koosneb suurel määral või täielikult mineraalsetest (anorgaanilistest) koostisosadest.

Muldkeha (ing. *subbase*) on vastavalt tee projekteerimise normidele (kliimaministri määrus nr 71) tee ehituseks vajalik geotehniline konstruktsioon koos selle juurde kuuluvate vee ärajuhtimissüsteemide ja tugistruktuuridega.

Mulle (ing. *embankment*) on EVS-EN 16907-1 alusel täitmise tulemusel moodustatud eraldiseisvate pinnasekonstruktsioonide koondnimetus, (sh lineaarsed rajatised ja mittelineaarsed platvormid).

Mullatööd (ing. *earthworks*) on tsiviilehituse toiming, mis muudab maapinna geometriat, luues stabiilseid ja vastupidavaid pinnasekonstruktsioone. Mullatööd hõlmavad looduslike materjalide (pinnased, kalju), tööstuslike kõrvalsaaduste või taaskasutatavate materjalide kaevamist, laadimist, ümberkujundamist/parendamist, paigaldamist, stabiliseerimist ja tihendamist, et saada ettenähtud omadustega stabiilsed ja vastupidavad süvendid või täited. Neid töid võib teostada ka vee all. Pinnasetöödeks tuleb läbi viia planeerimine, projekteerimine, ehitamine ja hooldus. Need sõltuvad täitematerjalide omadustest, pinnaserajamise nõutavatest omadustest ja keskkonnatingimustest.

Nidusus (ing. *cohesion*), nimetatakse ka kui **kohesioon**, on molekulaarjõududest tingitud seos ühe ja sama aine molekulide vahel. Pinnase nidusus sõltub osakeste vahel mõjuvate molekulaarjõudude suurusel, mis omakorda sõltuvad osakeste puutepinnast ja molekulaarselt seotud vee hulgast. Plastsed pinnased (v.t Plastsus) on nidusad pinnased (nt savid), kuid nidusust esineb ka mitteplastsete pinnaste puhul.

Puhtad liivpinnased on mittenidusad, sest nende terakeste vahelised puutepinnad on väga väikesed, mistõttu nendes nidusus puudub. Liivadega seoses võidakse aga kasutada mõistet

„näivnidusus“ (ing. *apparent cohesion*), mis tuleneb kapillaar- ja molekulaarselt seotud vee poolt antavast näilisest nidususest; liiv ei ole niduspinnas, kuna sellest ei saa vormida või rullida mistahes tugevusega pinnasenoõri.

Nihketugevus (ing. *shear strenght*) on vastupanu ühe pinnasemassiivi osa nihkumisele teise suhtes. Pingete suurenedes massiivis teatava piirini tugevusvaru ammendub ja algab püsiva kiirusega nihkumine. Eristatakse dreenitud ja dreenimata tingimusi.

Dreenitud (ing. *drained shear strength* või *effective stress shear strength*) tingimustes moodustavad pinnaseosakesed struktuuri, mille pooridest liigub vesi vastavalt rõhu muutusele koheselt välja (jämedateralised pinnased nagu liiv ja kruus). Koormuse võtab vastu pinnase struktuur ning nihketugevus avaldub pinnase sisehõordenurga ja nidususe kaudu:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan \varphi' + c',$$

kus

τ on nihketugevus, kPa;

σ' on efektiivpinge, kPa;

φ on sisehõordenurk, °;

c' on efektiivnidusus, kPa.

' märk viitab sellele, et tegemist on efektiivpingete analüüsiga, s.t. arvestatakse normaalpinget, mis mõjub pinnaseosakeste vahel, mitte poorirõhku.

Dreenimata (ing. *undrained shear strength*) tingimustes on tavaliselt halva veejuhtivusega veeküllastunud pinnased, kust koormuse tõttu liigub vesi pooridest välja väga aeglaselt. Seetõttu rakendub koormus pooriveele ning nihketugevuse avaldis saab kuju:

$$\tau = c_u,$$

kus

c_u on pinnase dreenimata nihketugevus, kPa.

Pinnase sisehõordenurk ja nidusus leitakse eksperimentaalselt kasutades kas laboriteime (nt nihketeim vastavalt EVS-EN 17892-10) või välikatseid (surupenetratsioon, tiivikkatse). Parameetrid võib leida ka empiiriliste seoste abil.

Labori- ja välikatsetel otseste (mitte tuletatud) mõõtmistega määratud dreenimata nihketugevuse iseloomustamiseks kasutatakse tabeli 1 termineid. Dreenimata nihketugevust määratakse laboris standardi EVS-EN ISO 17892-7 või standardi EVS-EN ISO 17892-8 kohaselt või määrates indeksi katsega standardi EVS-EN ISO 17892-6 kohaselt. Materjale nihketugevusega üle 300 kPa tuleb kirjeldada kui kaljut.

Tabel 1. Peeneteraliste pinnaste dreenimata nihketugevus (nimetatakse ka kui hetktugevus) EVS-EN ISO 14688-2:2018 määratluse kohaselt [9]

Termin	Dreenimata nihketugevus c_u , kPa
Äärmiselt väike (<i>extremely low</i>)	< 10
Väga väike (<i>very low</i>)	10 kuni 20
Väike (<i>low</i>)	20 kuni 40
Keskmine (<i>medium</i>)	40 kuni 75
Suur (<i>high</i>)	75 kuni 150
Väga suur (<i>very high</i>)	150 kuni 300
Äärmiselt suur (<i>extremely high</i>)	> 300

Olekuomadused (ing. *state properties*) on pinnase või materjali omadused, mis käitlemisel võivad muutuda, nagu näiteks veesisaldus ja tihedus.

Orgaaniline aine (ing. *organic matter*) ehk **orgaanika** on aine, mis pärineb elusloodusest ja sisaldab orgaanilisi ühendeid. Orgaanilise aine sisalduse põhjal liigitatakse pinnased vähe- (ing. *low-organic*, kus orgaanikasisaldus on 2 kuni 6%), keskmiselt- (ing. *medium-organic*, kus orgaanikasisaldus on 6 kuni 20%), või rohkesti orgaanilist ainet (ing. *high-organic*, kus orgaanikasisaldus on üle 20%) sisaldavaks pinnaseks.

Organogeenne on pinnas (ing. *organic soil*), milles on suur osakaal taimsel ja/või loomisel orgaanilisel materjalil ja nende materjalide teisenemisproduktidel. Taoline pinnas on väikese tihedusega ja tavaliselt suure veesisaldusega.

Pinnas (ing. *soil*) on mineraalosakeste ja/või orgaanilise aine kogum, mille üksikosi saab vees käega üksteisest eraldada. Looduslik pinnas (ing. *natural soil*) on tekkinud ja ladestunud looduslike protsesside tulemusena. Mittellooduslik pinnas (ing. *anthropogenic soil*) on paigaldatud inimtegevuse käigus ja mida võib jaotada:

- ümber töötatud looduslikeks pinnasteks;
- tehismaterjalidest koosnevateks pinnasteks.

Pinnasekonstruktsioon (ing. *earth-structure*) on pinnastest, kaljust, kõrvaltoodetest või taaskasutatud materjalidest koosnev tsiviilehituse rajatis, mis on valminud mullatööde tulemusena (süvend, täide, tühimikutäide).

Plastsus (ing. *plasticity*) on peeneteralise pinnase omadus muljumisel püsivalt deformeeruda – taolist pinnast nimetatakse on **plastseks pinnaseks** (ing. *cohesive soil*). Peeneteralised on pinnased, mille terasuurus on alla 0,063 mm. Pinnase platsus sõltub pinnases sisalduvate savimineraalide hulgast ja pinnase veesisaldusest.

Plastsuse olemus võetakse hästi kokku EVS-EN ISO 14688-1 antava kirjeldusega: „valmistage pinnasest 25 mm kuul või tomp ning suruge sega sõrmede vahel. Savi deformeerub plastiliselt, purunemata. Möll seevastu pigem pudeneb, kui deformeerub.“ Savi on plastne peeneteraline pinnas, puhas möll on mitteplastne peeneteraline pinnas.

Plastsuspiir (w_p) (ing. *plastic limit*) on selline veesisaldus, mille puhul selle väikene gi vähendamine muudab plastse (savi)pinnase kõvaks.

Proctor-teim on kindlatele parameetritele vastav katsemeetod, mille abil leida pinnase veesisalduse ja kuivtiheduse sõltuvus. Proctor-teimi abil saab hinnata pinnase tihedust, mis on võimalik saavutada ehitusplatsidel, ja see annab võrdluskriteeriumi hindamiseks tihendatud pinnase tihedust ehk tihendusteguri. Metoodikat kirjeldab näiteks standard EVS-EN 13286-2 (v.t peatükk 1.4.1).

Püsiomadused (ing. *intrinsic properties*) on pinnase või materjali omadused, mis käitlemisel ei muutu, nagu näiteks lõimiskoostis ja Atterbergi piirid (plastsus- ja voolavuspiir).

Sisehõrdenurk, v.t nihketugevus.

Süvend iseloomustab tee paiknemist, mille korral tee või tee konstruktsioon on loodusliku maapinna tasemest madalamal. Selleks tuleb pinnasesse rajada sisselõige, mille tagajärjel moodustuvad süvendi nõlvad.

Tee konstruktsioon (ing. *road structure* või *pavement structure*) on tee osa, mis toetub aluspinnasele (ing. *subgrade*) ning koosneb muldkehast (ing. *subbase*) ja katendist (ing. *pavement*).

Teekatend (ing. *pavement*) on mitmekihiline konstruktsioon, mis võtab vastu transpordivahendite koormuse ja jaotab selle allpool asetsevale muldkehale või aluspinnasele. Katend koosneb kattest (sideainega seotud kihid) ja alusest. Nii kate kui alus võivad koosneda mitmest erinevast kihist. Kate võib koosneda näiteks (nimekiri ei ole lõplik) nii pinnatud stabiliseeritud kihist, erinevatest asfaltbetoonkihtidest kui tsementbetoonist. Alus võib koosneda sideainega sidumata (nt killustik) kui seotud (nt stabiliseerimine) kihtidest.)

Tehispinnas ehk **mittellooduslik pinnas** (ing. *anthropogenic soil*) on tehismaterjal, töödeldud või töötlemata looduslik pinnas, mis on inimese poolt ümberpaigutatud ilma kontrollimeetmeid rakendamata.

Tehismaterjal ehk **mittellooduslik materjal** (ing. *anthropogenic material*) on mis tahes materjal, mis on inimtegevuse tulemusel loodud, modifitseeritud või ümber kujundatud, erinedes oma omaduste, koostise või struktuuri poolest looduslikest materjalidest. See hõlmab töödeldud looduslike materjale, täiesti uusi, tehnikult sünteesitud aineid ning kombineeritud materjale, mis ei esine looduslikult.

Täide (ing. *fill*) on koondmõiste, mis kirjeldab kõiki pinnasekonstruktsioone, mis on ehitatud täitematerjali kontrollitud paigaldamisega tehnilisel eesmärgil (sh muldkeha, tühimikutäide jms).

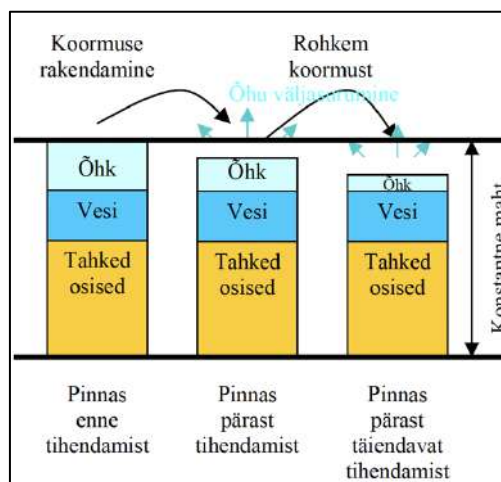
Täitematerjal (ing. *fill material*) on täite rajamiseks kasutatud materjal, kas pinnas ja/või tehispinnas.

Tihedus (ing. *density*), võib nimetada ka **mahumassiks** (ing. *bulk density*) ja vastupidi, kuigi mõistetel on geoteknikas väike erinevus ning eelistatavam on viimane. Tihedust kasutatakse geoteknikas terade omavahelise pakkimistiheduse tähenduses, a'la kohev ja tihe pinnas. Mahumass on pinnase mass mahuühikus, nt kg/m³. On oluline eristada mõisteid „mahumass“ ja „kuivmahumass“ (või ka „tihedus“ ja „kuivtihedus“) millest esimene on

pinnase mass mahuühikus loodusliku veesisalduse juures, kuid teine on ahjus kuivatatud pinnase mass mahuühikus. Pinnase tihendatust puudutavas kvaliteedikontrollis käsitletakse alati kuivmahumassi.

Tihendamine (ing. *compaction*) on täitematerjali tihendamine mehaanilise protsessi abil, et saavutada täite nõutud omadused. Tihendamisega vähendatakse pinnase poorsust suurendades seega pinnase mahumassi ruumalaühiku kohta. Näiteks, kui enne tihendamist on liivpinnase mahumass $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ ja veesisaldus 6%, siis on pinnase kuivmahumass $\rho_d = 1700 / (1+0,06) = 1604 \text{ kg/m}^3$ ja poorsus $n = 1 - (1604 / 2670) = 40\%$ (pinnase veeküllastusaste on samal ajal $S_r = 24\%$). Eeldame, et tihendamise käigus pinnast ei kasteta ja veesisaldus jääb samaks. Kui peale tihendamist on liiva mahumass $\rho = 1950 \text{ kg/m}^3$ ja kuivmahumass $\rho_d = 1840 \text{ kg/m}^3$, tuleb poorsuseks $n = 31\%$ (veeküllastusaste on samal ajal $S_r = 36\%$). Tihendamise protsessiga väheneb seega pinnases olev poorsus ja seega ka õhu hulk nagu näidatud joonisel 2.

Oletame, et kui näiteks kasutatud pinnase maksimaalne kuivmahumass standardse Proctor-teimiga on $\rho_d = 1910 \text{ kg/m}^3$, on tihendatud pinnase tihendussuhteks $1840 / 1910 = 0,96$ (v.t Tihendustegur).



Joonis 2. Pinnase mahukaalu (tiheduse) suurenemine pinnase tihendamise tulemusena. [28]

Tihendamise protsess (ing. *compaction effort*) on täitekihi tihendamiseks rakendatava füüsilise energia üldine kirjeldus: tihendamiseseadme mass/ m^2 , ülesõitude arv, ülesõidu kiirus, vibratsiooni sagedus ja kihi paksus.

Tihendussuhe (ing. *ratio of the modulus*), olenevalt allikast nimetatud ka kui **tihedusnäitaja**, **tihedusfaktor** (võimalik, et sünonüüm on veelgi), leitakse staatilise või dünaamilise koormusplaadiga koormamise tagajärjel kokkusurutavuse mõõtmisel järjestikuste koormamiskäikudega (plaatkoormuskatses E_{v2}/E_{v1} , Inspector-seadmega „Tf“). Mida väiksem on koormamiskäikude omavahelise mooduli erinevus ehk mida vähem kokkusurutavus erineb, seda tihedam pinnas on.

- Levinuim viis on plaatkoormuskatse tegemine (Eestis vastavalt EVS 934), millega võrreldakse esimese ja teise koormamiskäigu vajumise põhjal leitud elastsusmoodulite erinevust, millest arvutatakse tihendussuhe ja mille põhjal

tuletatakse tihendustegur. Näiteks kui liivakihilt mõõdetud esimese koormamiskäigu moodul E_{v1} (võidakse tähistada ka kui E_1) on 40,4 MPa ja teise koormamiskäigu moodul E_{v2} (või E_2) on 101,1 MPa, saadakse tihendussuhteks $E_{v2}/E_{v1} = 101,1/40,4 = 2,5$, mis Saksa juhendite alusel vastab tihendustegurile 98% („*Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134*“).

- Soome MaaRYL 2010-s ja InfraRYLis on tihendussuhted antud ka Loadman-seadmega mõõtmistele, kus käsitletakse E_{max}/E_1 ehk mõõteseeria maksimaalse tulemuse jagatist esimese löögi tulemusega. InfraRYLis tuleb eristada omavahel seadmeid kui „Loadman“ ehk „*kevyt pudotuspainelaite*“ ja „*pudotuspainelaite*“, millest viimane on kas Heavy Loadman või FWD-seade. Kerge Loadman-seadmega ei mõõdetata Soomes teede killustik- ja kruusaluseid, aga seda kasutatakse samadel kihtidel nt kaevikute tagasitäidete kontrollis.
- Euroopas on levinud teistsugused kaasaskantavad kandevõimemõõteseadmed, nt Saksa tootjatest Zorn ja HMP, Taani tootja Dynatest LWD jms, millega ei saada tihendussuhet, kuid mille osas on mõningate riikide kvaliteedikontrollinõuetes antud nõuded konkreetse pinnase/materjali elastsusmoodulile tähisega E_{vd} . Eeldatakse, et kui pinnase nõutud kandevõime on saavutatud, siis on see ka piisavalt tihe.

Tihendustegur (ing. *in situ density against reference density*) olenevalt allikast nimetatud ka kui **tihendusaste** – pinnaseskeleti tegeliku mahumassi (ehk pinnase kuivmahumassi) suhe etalon kuivmahumassi (või maksimaalsesse kuivmahumassi), väljendatakse kas nt 0,95 või 95%. Maksimaalne kuivmahumass (ja selle saavutamiseks vajalik optimaalne veesisaldus) leitakse etteantud kindla meetodika alusel, kuid kuna võimalikke meetodeid on mitmeid, siis alati tuleks täpsustada, mis on võrdluse (või nõude) aluseks. Euroopas on levinuim meetod Proctor-teim vastavalt EVS-EN 13286-2, mis jaguneb standardseks ja modifitseeritud Proctor-teimiks erinedes omavahel tihendamiseks kasutatava energia poolest. Eestis on erinevates nõuetes etalon kuivmahumassi määramisel eeldatud standardse Proctor-teimi kasutamist, Soomes aga modifitseeritud Proctor-teimi.

- Soome InfraRYLis on antud tiheduse nõuded modifitseeritud Proctor-teimi alusel (EVS-EN 13286-2, pinnased ja liivad A vormis, killustikud ja kruusad B vormis), kuid seda ei ole täpsustatud ei MaaRYLis (kuhu on enamuse nõuded InfraRYLis „laenatud“) ega mitte ka erinevates eestikeelsetes refereeringutes, mistõttu on paljud vastavad viited Soome normatiividele ebatäpsed.
 - kuigi otsest üleminekutegurit modifitseeritud ja standardse Proctor-teimi vahel ei ole, kuna see sõltub konkreetsest pinnasest (nt väga ühtlaseteristel liivadel võib mõlema meetodiga saada identse kuivtiheduse aga kruuspinnasel võib kuivtiheduse järgi määratud tihendustegurite erinevuseks tulla ca 6 %-punkti), siis käesolevas töös kasutatakse keskmise väärtusena 3 %-punkti suurust erinevust: nt kui modifitseeritud Proctor-teimi järgi peaks tihendustegur olema 0,95, siis eeldatakse, et standardse Proctor-teimi järgi tuleks tihendusteguriks 0,98.

- Otsene ja parim meetod tihendusteguri määramiseks on ehitusobjektidel tihendatud kihist võetud proovi kuivmahumassi võrdlemine eelnevalt laboris määratud sama pinnase/materjali maksimaalse kuivmahumassiga. Ehitusobjektidel on proovi võtmiseks mitmeid viise olenevalt pinnasest (nt lõikerõngas, liivakoonus, kummiballooni meetod), aga nende kõikide ühisnimetajaks on see, et leitakse, kui palju pinnast/materjali mahub kindlasse ruumalaühikusse ehk mis on mahumass. Teades ka pinnase veesisaldust, saab leida kuivmahumassi.
 - Oletame, et standardse Proctor-teimiga määratud liiva maksimaalne kuivmahumass on 1850 kg/m^3 . 100 mm läbimõõdu ja 120 mm kõrgusega lõikerõngasse (lõikerõnga ruumala on $V = 0,0009 \text{ m}^3$) on ehitusobjektidel võetud liivaproov, mis kaalub 1,750 kg. Liiva veesisaldus on 5,2%, seega mahtus lõikerõngasse $1,75/(1+0,052) = 1,663 \text{ kg}$ kuiva liiva. Kuiva liiva mahumass lõikerõngas on $\rho_d = 1,663 \text{ kg} / 0,0009 \text{ m}^3 = 1765 \text{ kg/m}^3$, millest tuleneb liiva tihendusteguriks $1765/1850 = 0,95$ (95%).
- Lisaks mahumasside võrdlusele on tihendusteguri leidmiseks kasutusel ka kaudseid viise nagu radioaktiivse isotoobi meetod (tuntuimaks seadmeks on Troxler), elektromagneetilised seadmed (ing. *non-nuclear soil density gauge*), penetromeetrid (Eestis kasutatakse dünaamilist penetromeetrit Beldornii D-51 ja selle analooge), staatilised ja dünaamilised koormusplaadid (Eestis tuntuimad plaatkoormuskatse ja Inspector, vähemal määral Loadman). Kõikide kaudsete viiside kasutamiseks on vaja leida seos nende näitajate ja mõõdetava pinnase/materjali tihendusteguri vahel ehk teisisõnu mõõdetakse midagi, mis ei ole tihedus ja empiirilise seosega leitakse mõõtetulemustest vajalik parameeter.
 - Radioaktiivse isotoobi meetodil põhinevate mõõteseadmete kasutamine ehitustöödel Eestis nõuab vastavust nii Euroopa Liidu kui ka riiklikele regulatsioonidele, millest esmaseks lähtekohaks on Kiirgusseadus. Oluline on taotleda vajalikud load, tagada kasutajate pädevus, järgida ohutusnõudeid ning hooldada ja kalibreerida seadmeid regulaarselt.
- Tihendusteguri määramise alternatiivina võidakse kasutada ka tihendatud kihi elastsusmooduli mõõtmist (nt nagu Saksa nõuetes kasutades dünaamilisi kaasaskantavaid plaatkoormusseadmeid ehk deflektomeetreid), s.t kui saavutatud on teatud kokkusurutavus (teedehituse mõistes kandevõime ehk elastsusmoodul) eeldatakse, et kihi tihendamine on tehtud vajalikul tasemel.

Ületihendamine (ing. *over compaction*) on ülemäärane tihenemine koormuse intensiivsuse või kestuse tõttu, mille tulemuseks on liiga kõrge poorirõhk, mis põhjustab täite soovimatuid omadusi, nt veeldumine.

Veeldumine (ing. *liquefaction*) on liigniiske pinnase käitumine tihendamise ajal, mille tulemusena tekivad lained (pinnas hakkab „õõtsuma“), tihendamisseade muutub ebastabiilseks ja edasise tihendamine muutub võimatuks. Teisisõnu on pinnas veeküllastunud ja joonisel 2 näidatud õhk on pinnasest välja surutud.

Voolavuspiir (w_L) (ing. *liquid limit*) on selline veesisaldus, mille puhul selle väikene suurenemine põhjustab pinnase muutumist plastsest voolavaks.

1 Ülevaade pinnaste geotehnilistest omadustest

Pinnase koostise analüüs ja selle mõistmine on kriitilise tähtsusega tihendamise spetsifikatsioonide määramisel ja nõutava kandevõime saavutamisel.

1.1 Pinnaste klassifitseerimine

Pinnaste geotehnilised omadused määratakse geotehnilise uuringuga, mille põhjal pinnased klassifitseeritakse ja mis on aluseks:

- väljakaevatud pinnase muldesse või katendisse sobivuse hindamiseks;
- aluspinnase külmatundlikkuse ja kandevõime hindamiseks;
- aluspinnase parendamisvõimaluste hindamisel,
- projekteerimisel vajalike parameetrite määramisel.

Mitmetes riikides on kasutusel omad süsteemid, mille alusel jagada pinnased sarnaste omadustega (ehk tüüpomadustega) rühmadeks, nt Saksamaal vastavalt DIN18196, Soomes vastavalt juhisele „Tierakenteen suunnittelu“ ja seal antavatele viidetele. Pinnaste kasutamiseks mullatöödeks on loodud ka Euroopa standardiseeria EVS-EN 16907, kus osas 2 jagatakse pinnased tüüpseteks rühmadeks varasemale pikaajalisele kogemusele tuginedes.

Tee projekteerimise normid (määrus nr 71) ütleb, et tee konstruktsiooni projekteerimisel lähtutakse standardisarjas EVS-EN ISO 14688 ja standardis EVS-EN ISO 14689 sätestatud pinnaste identifitseerimisest ning standardis EVS-EN 16907-2 sätestatud liigitusest. Lisaks, et tee konstruktsiooni mullatööde osa projekteerimisel arvestatakse standardisarja EVS-EN 16907 nõudeid. Seega peavad antud standardid olema aluseks ka käesoleva teema (ehk pinnaste tihendamine ja tiheduse kontroll) käsitlemisel.

Pinnase ja kalju klassifitseerimiseks on vaja need identifitseerida. Pinnase identifitseerimine ja kirjeldamine peab toimuma EVS-EN ISO 14688 Osa 1 järgi ning kalju puhul EVS-EN ISO 14689. Pinnase liigitamise üldised põhimõtted on toodud EVS-EN ISO 14688 Osa 2. Peamiselt liigitatakse pinnast granulomeetrilise koostise, plastsuse, orgaanilise aine sisalduse ja dreanimata nihketugevuse järgi, mida käsitletakse peatükis 1.1. Nende põhjal antud pinnase liigituse järgi klassifitseeritakse pinnas EVS-EN 16907-2 alusel erinevatesse gruppidesse alljärgnevalt.

EN 16907-2 määratleb klassifitseerimise kolm etappi:

- vaatlusel põhinev kirjeldus: annab teavet materjalitüüpide, nende geomeetria ja asendi kohta pinnasemassiivis, nende muutlikkuse, lõhelisuse jne kohta;
- klassifitseerimine püsiomaduste alusel, mis on materjali omadused, mida ei saa kergesti muuta ja mis on ehitusjärgus oludest sõltumatud omadused, nt terasuurus, terakoostis või plastsus. Laborikatseid kasutatakse materjalide sortimiseks sarnaste omadustega rühmadesse, nt käitumine pinnaserajatistes pärast tihendamist. Projekti mullatööde tehnilises kirjelduses on täitegrupid tavaliselt määratletud püsiomaduste põhjal;
- klassifitseerimine olekuomaduste alusel, mida pinnasetööde protsessid võivad hõlpsasti muuta, nt veesisaldus, tihedus, niiskus, tugevus: materjalide töödeldavuse

omadused mullatööde käigus. Vastavad klassid võivad olla seotud teatud tööprotsessidega, sealhulgas kaevamine, transportimine, töötlemine, paigaldamine ja tihendamine, või kasutamisel erinevatel eesmärkidel (nt olemasoleva maapinna täide, külmakaitsekihid jms).

Algselt loetakse täitematerjale pinnaserajatistes kasutamiseks potentsiaalselt sobivaks võttes aluseks püsiomadused (kõige sagedamini terasuurus ja plastsus). Seejärel valitakse labori tihendamise katsete tulemuste põhjal konkreetse täitematerjali jaoks aktsepteeritavate muutuvate omaduste vahemik (välja arvatud täited, mis on katsete jaoks liiga jämedateralised). Pinnasetäidete puhul on vastuvõetavad materjaliomadused tavaliselt seotud kas veesisalduse, nihketugevuse või deformatsioonimooduliga (või nende omaduste määramiseks läbiviidavate katsetega). Taaskasutatavate materjalide ja kõrvalsaaduste puhul peab iseloomustus sisaldama ohtlike ainete sisaldust ja keskkonda liikuvust, et hinnata materjali kasutamise keskkonnamõju.

Seega käesoleva töö mõistes on oluline selgitada kõigepealt pinnaserühmad tulenevalt püsiomadustest. EVS-EN 16907-2 annab alljärgnevad pinnaserühmade määratlused, millest lähtutakse kogu käesoleva töö sisus (käesoleva töö kontekstis kõige olulisemad pinnaserühmad on tähistatud „bold“ kirjastiiliga).

1) Väga jämedateralised pinnased, mis sisaldavad osakesi läbimõelduga üle 63 mm ($D_{\max} > 63$ mm), jagunevad:

- väga jämedateraliseks pinnaseks: käitumist kontrollib > 63 mm fraktsioon;
- väga jämedaid osakesi sisaldavaks pinnaseks: käitumist kontrollib ≤ 63 mm fraktsioon.

2) Pinnased, mille osakeste läbimõõt ei ületa 63 mm ($D_{\max} \leq 63$ mm) ja orgaanilise aine sisaldus ei ületa 2 % ($C_{OM} \leq 2$ %), jagatakse kui:

- **jämepinnased**, mille peenosiste sisaldus (läbimõelduga $\leq 0,063$ mm) ei ületa 5% ($C_{0,063} \leq 5$ %), mis jagatakse alamrühmadeks:
 - ühtlase ja ebaühtlase koostisega (C_U piiriks on 6) kruusad (Gr ja saGr), mille peenosisesisaldus on $<5\%$;
 - ühtlase ja ebaühtlase koostisega (C_U piiriks on 6) liivad (Sa ja grSa) mille peenosisesisaldus on $<5\%$.
- **liitpinnased**, mille peenosiste sisaldus (läbimõelduga $\leq 0,063$ mm) ei ületa 15 % ($C_{0,063} \leq 15$ %) jagatakse alamrühmadeks:
 - ühtlase ja ebaühtlase koostisega (C_U piiriks on 6) kruusa-peenosiste segu, mille peenosisesisaldus on 5...15%;
 - ühtlase ja ebaühtlase koostisega (C_U piiriks on 6) liiva-peenosiste segu, mille peenosisesisaldus on 5...15%.

3) Keskmiseteralised pinnased, mille peenosisesisaldus on vahemikus 15...35%:

- madala plastsusega pinnas, mille $w_L \leq 35\%$ või $I_P \leq 12\%$ (voolavus- ja plastsusarvu osas siin ja alljärgnevalt üks või teine ehk korraga vaadatakse ainult ühte parameetrit);
- keskmise kuni suure plastsusega pinnas, mille $w_L > 35\%$ või $I_P > 12\%$.

4) Peeneteralised pinnased, mille peenosisesisaldus on $>35\%$:

- madala plastsusega pinnas, mille $w_L \leq 35\%$ või $I_P \leq 12\%$;
- keskmise plastsusega pinnas, mille $w_L > 35\%$ kuni 50% või $I_P > 12\%$ kuni 22% ;
- suure plastsusega pinnas, mille $w_L > 50\%$ kuni 70% või $I_P > 22\%$ kuni 40% ;
- väga suure plastsusega pinnas, mille $w_L > 70\%$ või $I_P > 40\%$.

Oluline! Peene- ja keskmiseteralised pinnased on veetundlikud ja nende käitumine muutub sõltuvalt veesisaldusest. Erinevad seisundid on normaalne, kuiv ja märg vastavalt EVS-EN 16907-3 teatmelisa B. Muldkeha projekteerimisel on sellega oluline arvestada ning kirjeldada projektis vastavad nõuded, millest mh sõltub ka nii kvaliteedi- kui tihendamise kontroll.

5) Pinnased orgaanilise aine sisaldusega üle $C_{OM} > 2\%$:

- madala orgaanilise aine sisaldusega pinnas, $C_{OM} > 2\%$ kuni 6% ;
- keskmise orgaanilise aine sisaldusega pinnas, $C_{OM} > 6\%$ kuni 20% ;
- turvas, $C_{OM} > 20\%$.

Kalju ja kaljumaterjal rühmitatakse järgnevalt:

- **äärmiselt tugev kalju**, nt purske-, süva- ja moondekivim, mille survetugevus >250 MPa;
 - sellest toodetud kivimaterjali purunemiskindlus on $LA < 25$;
- **väga tugev kalju**, nt purske-, süva- ja moondekivim, mille survetugevus 100 kuni 250 MPa;
 - sellest toodetud kivimaterjali purunemiskindlus on $LA < 35$;
- **tugev kalju**, nt liiva-, lubja-, purske-, süva-, moondekivim, mille survetugevus 50 kuni 100 MPa;
 - sellest toodetud kivimaterjali purunemiskindlus on $LA < 45$;
- **kesktugev kalju**, nt liivakivi, mergel, lubjakivi, kildad, moondekivim, mille survetugevus 25 kuni 50 MPa;
 - sellest toodetud kivimaterjali purunemiskindlus on $LA > 45$;
- nõrk kalju, nt savikivim, aleuroliit, liivakivi, mergel, lubjakivi, kildad, kips, süsi, mille survetugevus 5 kuni 25 MPa;
- väga nõrk kalju, nt murenenud savikivim, aleuroliit, liivakivi, kips, süsi, mille survetugevus 1 kuni 5 MPa;
- äärmiselt nõrk kalju, nt murenenud savikivim, aleuroliit, liivakivi, mille survetugevus 0,6 kuni 1 MPa.

Pärast väljakaevamist käitub kalju pinnasena, enamasti nagu jämedateraline või väga jämedateraline, kuid eri kogust peenosiseid sisaldav pinnas. Jämedad osakesed ja peenosised võivad eraldi olla tugevad ja abrasiivsed, nõrgad ning lagundatavad või tugevad ja lagundatavad. Kaljumaterjale saab tavaliselt pinnaserajatistes kasutada, välja arvatud juhul, kui kalju on lahustuv või lagundatav (olenevalt projektist võib neid kaljusid kasutada erilisi ettevaatusabinõusid rakendades).

Tihendamise seisukohalt on standardi EVS-EN 16907-2 alusel olulisteks pinnasenäitajateks:

- pinnaserühm ja terakoostis;
- tihendamisaegne veesisaldus;
- plastsus;
- maksimaalne kuivtihedus ja optimaalne veesisaldus;
- dreanimata tugevus.

1.2 Pinnaste liigitamine

Pinnase ja kalju klassifitseerimiseks on vaja need identifitseerida:

- pinnase identifitseerimine ja kirjeldamine toimub EVS-EN ISO 14688 Osa 1 järgi;
- kalju identifitseerimine toimub EVS-EN ISO 14689 järgi.

Pinnase liigitamise üldised põhimõtted on toodud EVS-EN ISO 14688 Osa 2. Peamiselt liigitatakse pinnast granulomeetrilise koostise, plastsuse, orgaanilise aine sisalduse ja dreanimata nihketugevuse järgi, mille põhjal pinnased seejärel klassifitseeritakse (nagu peatükis 1.1 käsitletud EVS-EN 16907-2 järgne).

1.2.1 Pinnaste terasuurus

Terasuuruse järgi jagatakse mineraalosakesed peene- ja jämedateraliseks. Piiriks on 0,063 mm, millest suurema läbimõõduga osakesed loetakse jämedateraliseks:

- jämedateralised on rahnud, veerised, kruus ja liiv oma alamjaotistega;
- peeneteralised on mölli- ja saueosakesed.

Granulomeetrilise koostise järgi liigitatakse valdavalt jämedateralistest ja väga jämedateralistest osakestest koosnevaid pinnaseid. Vaid põhipinnased koosnevad ühe terasuurusega fraktsioonist (nt ühtlaseteraline keskliiv mSa), enamik pinnaseid aga koosnevad mitmest fraktsioonist (liitpinnased). Liitpinnaste puhul eristatakse põhifraktsiooni, mis on massi poolest kõige suurem fraktsioon ja teist ning kolmandat fraktsiooni. Pinnasele nimetuse andmisel tähistatakse põhifraktsiooni nimisõnaga ning ühe või enama omadussõnaga, mis kirjeldavad teise ja kolmanda fraktsiooni sisaldust, näiteks:

- saGr – liivane KRUUS;
- orsaGr – orgaanikasisaldusega liivane KRUUS;
- grSa – kruusane LIIV.

Granulomeetriteliste fraktsioonide järgi pinnaste jagunemine pinnaserühmadesse vastavalt nende terasuuruse vahemikule on antud tabelis 1.1

Tabel 1.1. Pinnaste granulomeetriselised fraktsioonid vastavalt EVS-EN 14688-1:2018. [8]

Pinnaserühm	Granulomeetriselised fraktsioonid (tähis)	Terasuuruse vahemik mm
Väga jämedateraline	Suurrahn (<i>large boulder</i>) (lBo)	> 630
	Rahn (<i>boulder</i>) (Bo)	> 200 kuni ≤ 630
	Veeris (<i>cobble</i>) (Co)	> 63 kuni ≤ 200
Jämedateraline	Kruus (<i>gravel</i>) (Gr)	> 2,0 kuni ≤ 63
	Jämekruus (<i>coarse gravel</i>) (cGr)	> 20 kuni ≤ 63
	Keskkruus (<i>medium gravel</i>) (mGr)	> 6,3 kuni ≤ 20
	Peenkruus (<i>fine gravel</i>) (fGr)	> 2,0 kuni ≤ 6,3
	Liiv (<i>sand</i>) (Sa)	> 0,063 kuni ≤ 2,0
	Jämeliiv (<i>coarse sand</i>) (cSa)	> 0,63 kuni ≤ 2,0
	Keskliiv (<i>medium sand</i>) (mSa)	> 0,20 kuni ≤ 0,63
	Peenliiv (<i>fine sand</i>) (fSa)	> 0,063 kuni ≤ 0,20
	Peeneteraline	Möll (<i>silt</i>) (Si)
Jämemöll (<i>coarse silt</i>) (cSi)		> 0,02 kuni ≤ 0,063
Keskmöll (<i>medium silt</i>) (mSi)		> 0,0063 kuni ≤ 0,02
Peenmöll (<i>fine silt</i>) (fSi)		> 0,002 kuni ≤ 0,0063
Sau (<i>clay</i>) (Cl)		≤ 0,002

1.2.2 Pinnaste plastsus (peeneteraliseid pinnased)

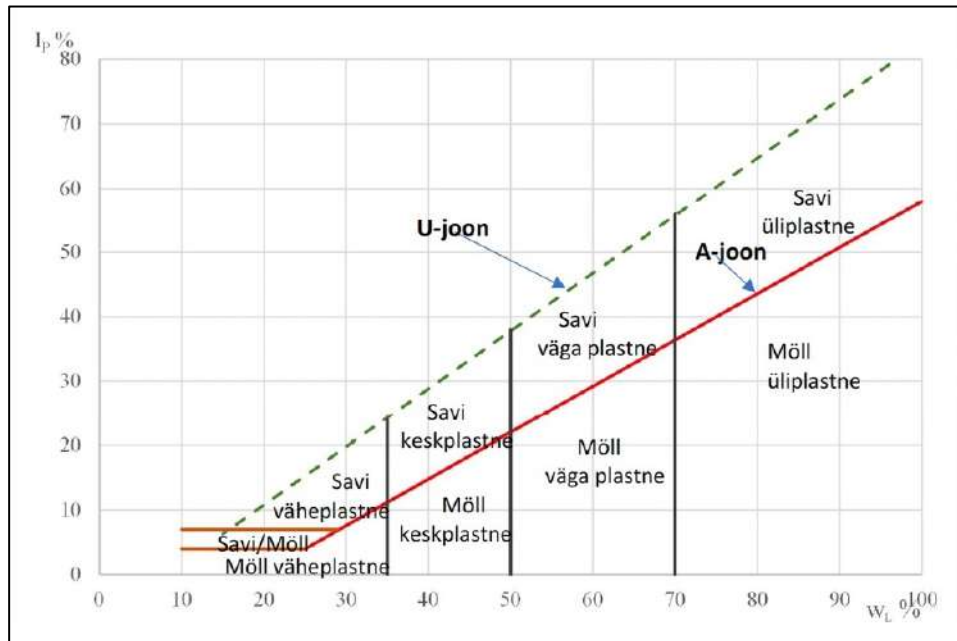
Peeneteraliseid pinnaseid või peenfraktsioone liitpinnastes liigitatakse plastsusomaduste (voolavuspiir w_L , plastsuspiir w_P) järgi „mölliks“ või „saviks“, isegi kui lõimisanalüüs on tehtud. Kuigi mölli ja saueosakeste vaheline piir on määratud terasuuruse järgi, tuleb alati silmas pidada, et osakese suurus ei määra alati geotehnilisi omadusi.

Möll kujutab endast mineraalpinnase füüsikalise murenemise produkti, millel on suures osas säilinud algse materjali omadused. Savi on murenemise lõppsaadus, mis koosneb savimineraalidest ning omab selle tõttu plastseid omadusi. Mineraalne materjal, mis suure purustuse või settimistingimuste (nt järvelubi) tõttu võib kuuluda osakese suuruse järgi sauefraktsiooni, ei pruugi käituda savina.

Peeneteraliste pinnaste liigitus toimub EVS-EN ISO 14688-2:2018 kohaselt plastsusdiagrammi järgi, joonis 1.1. Plastsusdiagrammi kasutamiseks tuleb määrata peeneteraliste pinnaste (või liitpinnaste < 0,063 mm osakekestest) plastsusomadused (Atterbergi piirid) w_L (voolavuspiir) ja w_P (plastsuspiir) standardi EVS-EN ISO 17892-12 kohaselt:

- voolavuspiir määratakse kas Rootsi koonusega või Casagrande aparaadiga;
- plastsuspiir määratakse rullpiiriga.

Käesolevas töös on plastsus kirjeldatud EVS-EN ISO 17892-12 kohaselt määratud meetodite kohaselt ning pinnaste klassifitseerimine plastsuse järgi on antud peatüki 1.1 kohaselt.



Joonis 1.1. Plastusdiagramm EVS-EN ISO 14688-2:2018 järgi. A-joon eristab mölli ja savi, U-joon on empiiriline, looduslike pinnaste ligikaudne ülemine piir. [9]

EVS-EN ISO 14688-1 annab ka lihtsustatud (välioludes kasutatavad) meetodid, kuidas kompimise abil eristada omavahel möll- ja savipinnaseid, tabel 1.2. Detailsem kirjeldus objektipealseks peeneteralise pinnase hindamiseks on antud standardis EVS-EN ISO 14688-1.

Tabel 1.2. Kompimise abil savi ja möllpinnase eristamine vastavalt EVS-EN ISO 14688-1. [8]

Pinnase kirjeldus	SAVI	MÖLL
Dilatatsioon	Puudub	Aeglane kuni kiire
Sitkus	Suur	Väike sitkus või pinnasenööri ei õnnestu rullida
Plastsus	Suur	Mitteplastne kuni väheplastne
Kuivtugevus	Suur kuni väga suur	Puudub kuni väike
Kompimine	Sile, kleepuv (märjalt)	Siidine, sõmerjas
Käitumine vees	Laguneb aeglaselt, kui üldse	Laguneb kiiresti vees
Käitumine õhus	Kuivab aeglaselt, tõmbub kokku	Kuivab kiiresti, saab maha pühkida
Nidusus	Deformeerub purunemata. Käsitsemise ajal säilitab kuju ja niiskuse	Langeb kokku, niiskus valgub välja

Kui peatükis 1.1 on pinnaste plastsus kirjeldatud läbi plastsuspiiride, siis EVS-EN 14688-1 annab lihtsustatud meetodid nende hindamiseks ka välitingimustes määramiseks, tabel 1.3. Detailsem kirjeldus objektipealseks peeneteralise pinnase hindamiseks on antud standardis EVS-EN ISO 14688-1.

Tabel 1.3. Pinnase plastsuse identifitseerimine vastavalt EVS-EN 14688-1. [8]

Kirjeldus	Kriteeriumid
Mitteplastne	Pinnas ei ole mistahes veesisalduse juures rullitav 3 mm läbimõõduga pinnasenööriks.
Väheplastne (<i>low</i>)	Pinnase rullimine pinnasenööriks on napilt võimalik ja kamakat ei saa vormida, kui pinnase niiskusesisaldus on alla plastsuspiiri.
Keskplastne (<i>medium</i>)	Pinnasenööri rullimine on lihtne ja plastsuspiirini jõudmine ei võta kaua. Pärast plastsuspiirini jõudmist ei saa pinnasest uuesti pinnasenööri rullida. Kamakas laguneb, kui pinnase niiskusesisaldus on alla plastsuspiiri.
Väga plastne (<i>high</i>)	Plastsuspiirini jõudmiseks tuleb proovi pikka aega rullida ja muljuda. Pärast plastsusiiri saavutamist saab pinnase korduvalt uuesti pinnasenööriks rullida. Kui pinnas on plastsuspiirist kuivem, saab sellest vormida kamaka, ilma et see laguneks.

Laboritulemustest leitakse pinnase plastsusarv läbi valemi (1):

$$I_p = w_L - w_p,$$

kus

I_p : plastsusarv, mis iseloomustab pinnase "savikust"; mida suurem on I_p , seda rohkem on pinnasel savile iseloomulikke omadusi;

w_L : voolavuspiir, %

w_p : plastsuspiir, %.

Saadud arvvaartusi kasutatakse seejärel peatükis 1.1 esitatud peeneteralise pinnase klassifitseerimisel.

Täiendavalt annab EVS-EN 14688-1 kirjelduse, kuidas määrata välitingimustes (peamiselt) keskplastsete ja suurema plastsusega peeneteraliste pinnaste konsistentsi, mis sõltub pinnase looduslikust veesisaldusest (v.t joonis 1), tabel 1.4.

Tabel 1.4. Peeneteralise pinnases konsistentsi kirjeldus määramaks seda välitingimustes (jaotised on ligikaudsed, eriti väheplastsete pinnaste puhul). [8]

Termin	Konsistentsi kirjelduse definitsioon
Väga pehme	Sõrme saab kergesti suruda kuni 25 mm sügavusele pinnasesse. Pinnas tuleb pigistamisel sõrmede vahelt välja.
Pehme	Sõrme saab suruda kuni 10 mm sügavusele pinnasesse. Pinnast saab sõrmede kerge survega vormida.
Sitke	Pinnasesse saab põidlagaga kergesti jälje vajutada. Pinnast sõrmedega vormida ei saa, aga saab rullida mittekatkevateks või -murenevateks 3 mm jämedusteks rullideks.
Poolkõva	Pinnasesse saab põidlagaga nõrga jälje vajutada. Pinnas mureneb ja murdub 3 mm jämedusteks rullideks rullimisel, kuid on piisavalt niiske uuesti kokkuvormimiseks.
Kõva	Põidlaküünega saab pinnasesse jälje vajutada. Pinnas ei ole enam vormitav, vaid mureneb surve all. Paljud kuivanud pinnased kuuluvad sellesse klassi.

Laboriandmete põhjal määratakse peeneteraliste pinnase konsistents (mis on olekuomadus) kasutades konsistentsiarvu valemit (2):

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p}$$

kus

I_c : konsistentsiarv (voolavuspiiri ja loodusliku veesisalduse arvulise vahe ja plastsusarvu suhe);

w : pinnase veesisaldus, %

w_L : voolavuspiir, %

w_p : plastsuspiir, %.

Saadud konsistentsiarvu põhjal kirjeldatakse pinnas tabeli 1.5 põhjal.

Tabel 1.5. Möll- ja savipinnase konsistentsiarv I_c . Jaotised võivad olla ligilähedased, eriti väheplastsete pinnaste korral. [8]

Termin	Konsistentsiarv I_c
Väga pehme (<i>very soft</i>)	< 0,25
Pehme (<i>soft</i>)	0,25 kuni 0,50
Sitke (<i>firm</i>)	0,50 kuni 0,75
Poolkõva (<i>stiff</i>)	0,75 kuni 1,00
Kõva (<i>very stiff</i>)	> 1,00

Tabelis 1.6 on kokkuvõtlikult antud erinevatele omadustele tuginedes jämeda- ja peeneteralise pinnase erinevused.

Tabel 1.6. Jämeda- ja peeneteralise pinnase erinevused erinevaid omadusi, sh tihendatavust silmas pidades. [13]

Omadus	Jämeteraline pinnas	Peeneteraline pinnas
Tugevus	Sõltub normaalpingest purunemispinnal	Ei sõltu normaalpingest
Kokkusurutavus	Suhteliselt vähene	Erinev väga laiades piirides. Võib olla väga suur.
Veejuhtivus	Hästi juhtiv	Halvasti juhtiv või praktiliselt mittejuhtiv.
Tihendatavus staatilise koormusega	Halb. Praktiliselt ei tihene	Tihendamine võimalik
Tihendatavus dünaamilise koormusega	Hea	Halb. Ei tihene
Tihenemise kiirus staatilise koormuse puhul	Suur, enamasti toimub koos koormuse rakendamisega	Väike, võib kesta aastaid pärast koormuse rakendamist

1.2.3 Pinnaste koostis

Pinnas on reeglina segu erineva suurusega jämedateralistest (kruus, liiv, tehistäitematerjalid nagu killustik) ja/või peeneteralistest osistest, mis võivad olla nii plastsed (sau) kui mitteplastsed (möll). Eestis esineb palju erineva terasuurusega ja koostisega liivasid (teedehituses on laialt levinud olnud ühtlaseteriste keskliivade kasutamine), kruusasid ja moreene. Viimane koosneb savist, möllist, liivast, kruusast, veeristest ja rahnudest ehk kõikvõimalikus suuruses purdosakestest ning tihti omab plastseid omadusi.

Pinnase terade suurus, nende omavaheline kombinatsioon ja jaotumine moodustavad kokku pinnase terastikulise ehk granulomeetrilise koostise (terakoostis on viis, millega kirjeldada pinnase täitematerjalide osakeste suuruse jaotust). See on üks olulisemaid näitajaid, millega pinnast iseloomustada ja mis määrab pinnase kasutuskõlblikkuse ehitusmaterjalina.

Terakoostise kuju mõttes saab pinnased jagada ühtlase- kuni väga ebaühtlaseteralisteks, lisaks ka lünkliku terakoostisega, tabel 1.7. Pinnase lõimistegur C_U leitakse valemi (3) põhjal:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

kus

C_U : pinnase lõimistegur (ing. *uniformity coefficient*);

d_{60} : terasuurus, millest väiksemate osakeste sisaldus on 60%;

d_{10} : terasuurus, millest väiksemate osakeste sisaldus on 10% (seda suurust nimetatakse ka pinnase efektiivdiameetrik).

Pinnase kõverustegur (ing. *coefficient of curvature*) iseloomustab pinnase koostist ja leitakse valemi (4) põhjal:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} * d_{10}},$$

kus

C_c : pinnase lõimise kõverustegur;

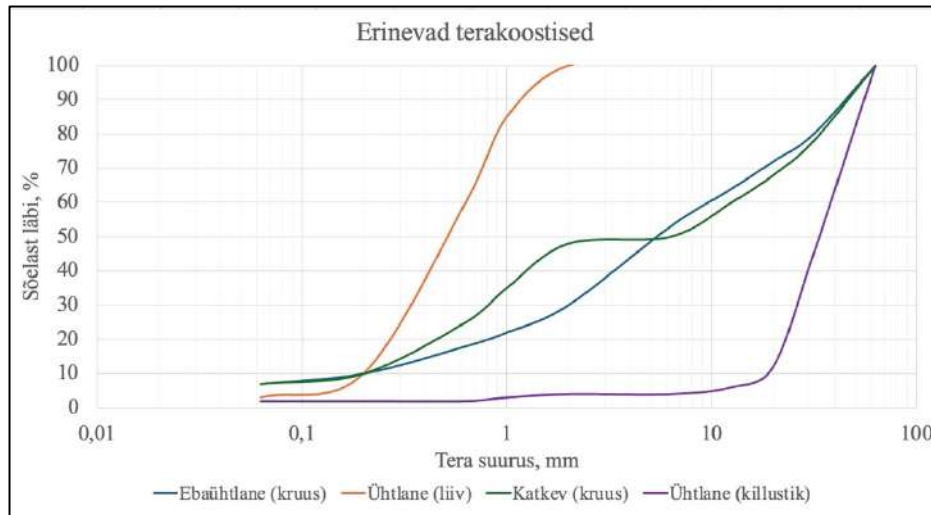
d_{30} : terasuurus, millest väiksemate osakeste sisaldus on 30%.

Tabel 1.7. Pinnase jaotus lõimiskõvera kuju põhjal EVS-EN ISO 14688-2:2018 kohaselt. [9]

Termin	C_U	C_c
Väga ühtlane (<i>uniformly graded</i>)	< 3	< 1
Ühtlane (<i>poorly graded</i>)	3 kuni 6	< 1
Ebaühtlane (<i>medium graded</i>)	6 kuni 15	< 1
Väga ebaühtlane (<i>well graded</i>)	> 15	1 kuni 3
Lünklik (<i>gap graded</i>)	> 15	< 0,5

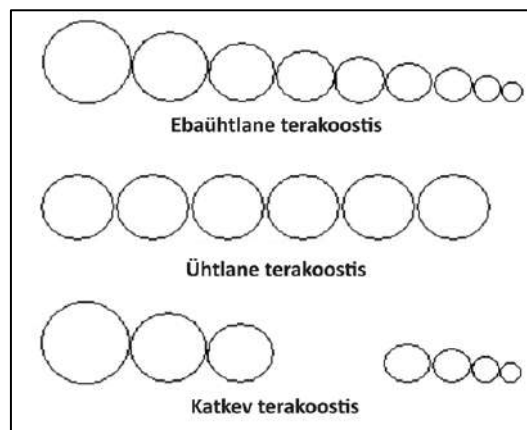
Joonisel 1.2 on antud mõningad näited pinnastest:

- “ebaühtlane (kruus)” on kruuspinnas, kus on peenosiseid 7%, maksimaalne terasuurus on kuni 63 mm, selle $C_U = 10/0,2 = 50$ ehk väga ebaühtlane;
 - peatüki 1.1 alusel liitpinnas, täpsemalt ebaühtlase koostisega peenosisekruusa segu;
- “ühtlane (liiv)” on keskliiv, kus peenosiseid on <5%, mille $C_U = 0,6/0,2 = 3,15$ ehk ühtlane;
 - peatüki 1.1 alusel jämepinnas, täpsemalt ühtlase terakoostisega liiv;
- “katkev” on katkeva terakoostisega kruus või killustik, selle $C_c = 0,8^2/(13*0,2) = 0,24$ ehk lünklik;
 - peatüki 1.1 alusel liitpinnas, täpsemalt ebaühtlase koostisega peenosisekruusa segu.

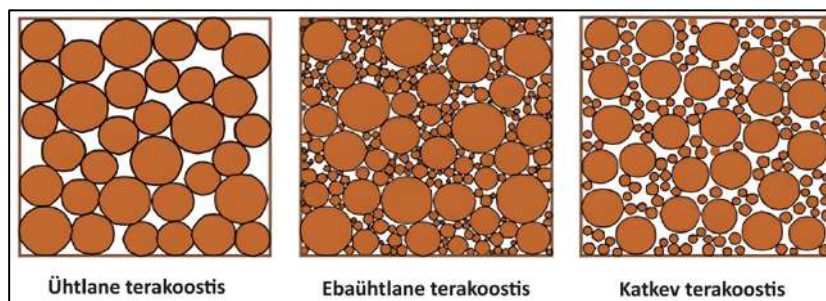


Joonis 1.2. Näited erinevate pinnaste / materjalide terakoostistest ja nende iseloomustus.

Eestile iseloomulikud pinnased on väga ebaühtlase koostisega kruusad ja moreenid ning ühtlase või väga ühtlase koostisega liivad. Katkeva terakoostisega looduslikud pinnased on harvad, kuid sellised võivad olla näiteks tehistäitematerjalid. Taoliste pinnaste illustreeritud terakoostise jagunemine on esitatud joonistel 1.3 ja 1.4.



Joonis 1.3. Ebaühtlase, ühtlase ja katkeva terakoostisega pinnase terakoostise illustreeritud jaotumus. [2]



Joonis 1.4. Ebaühtlase, ühtlase ja katkeva terakoostisega pinnased pinnasemassiivis. [2]

1.3 Pinnaste koostise ja nende tihendatavuse omavahelised seosed

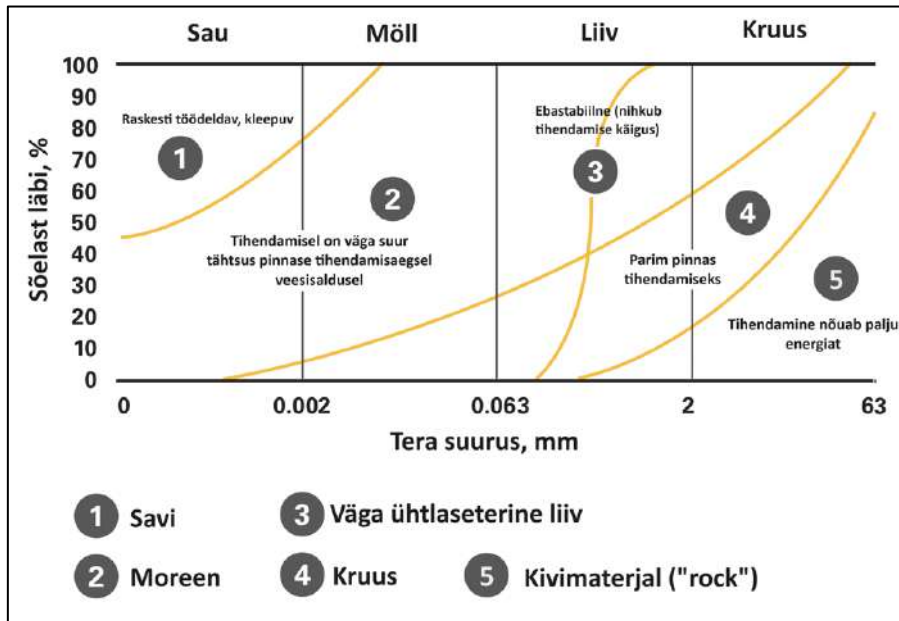
Ebaühtlase koostisega jäme- ja liitpinnased (joonisel 1.5 tähistatud alaga nr 4) tihenevad hästi ja hõlpsasti, sest eri suurusega pinnaseosised pakkuvad üksteise suhtes hästi kokku ja võimaldavad kiiresti vähendada pinnase poorsust. Kõige sobilikumaks tihendusviisiks on dünaamiline tihendamine (silevalts-vibrorull ja teised peatükis 4 käsitletavat dünaamilist koormust andvad tihendusmasinad).

Keskmise- ja peeneteraliste madala plastsusega pinnaste (joonisel 1.5 tähistatud alaga nr 2) kõige sobilikumaks tihendusviisiks on samuti dünaamiline tihendamine, kuid võrreldes eelmise pinnasegrupiga tuleb oluliselt suuremat tähelepanu pöörata pinnase tihendamisaegsele veesisaldusele. Siia alla kuuluvad ka madala plastsusega orgaanikasisaldusega pinnased.

Keskmise- ja peeneteraliste keskmise ja üle selle plastsusega pinnaste (joonisel 1.5 tähistatud alaga nr 2 ja nr 1) kõige sobilikumaks tihendusviisiks on staatilise koormusega tappidega trumlit kasutavad tihendusmasinad. Pinnaste tihendamisel on väga suur tähtsus tihendamisaegsel veesisaldusel. Keskmise plastsusega pinnased tihenevad alla optimaalse veesisalduse juures hästi vibro-tapprulliga (kasutades kõrge amplituudiga vibratsiooni). Siia alla kuuluvad ka keskmise ja üle selle plastsusega orgaanikasisaldusega pinnased.

Kaljast valmistatud kivimaterjali („rock“) (joonise 1.5 piirkond nr 5) nt fraktsioneeritud killustikud, paekivimurd, põlevkiviaheraine jms kõige sobilikumaks tihendusviisiks on dünaamiline tihendamine (silevalts-vibrorull ja teised peatükis 4 käsitletavat dünaamilist koormust andvad tihendusmasinad). Väga jämedateralise pinnase tihendamisel võidakse kasutada tapp- ja võkrulle, et purustada suuremaid kivitükke (nt eesmärgiga vähendada kaevandusmasinate rehvide kulumist).

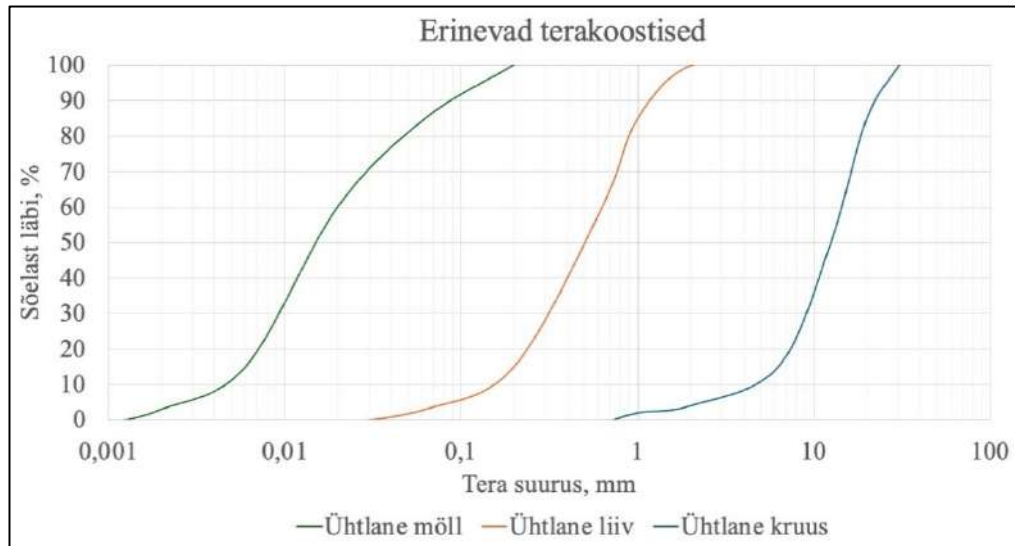
Ühtlaseteriste pinnaste (joonisel 1.5 terakoostise joon nr 3 ning joonis 1.6) tihendamisel saab üldiselt lähtuda samadest eeldustest, mis ebaühtlase terakoostisega pinnastest, aga arvestada tuleb, et ühtlaseteriste pinnaste ülaosa jääb (eriti dünaamilist koormust kasutades) kohevaks, mistõttu võib tekkida mulje, et neid ei ole võimalik tihendada (v.t peatükk 4). Kuna ühtlaseteriste pinnaseterakeste omavaheline sidusus on nõrk, lisaks nende nihketugevus on võrreldes ebaühtlase koostisega pinnastega selgelt madalam, siis tihendatava kihi pealmine osa rullub ja nihkub tihendusmasina all ning tiheneb raskesti või ei tihene üldse. Ühtlaseteriste pinnaste tihendamine on kõige parem lõpule viia läbi pealmise kihi.



Joonis 1.5. Erinevate pinnaste tihendatavus sõltuvuses terakoostisest. [10]

Ühtlaseterised jämedateralised pinnased käituvad tihendamisel teisiti, kui ühtlaseterised peeneteralised pinnased (mõningad näited terakoostisest on esitatud joonisel 1.6). Ühtlaseteristel jämedateralistel pinnastel on väga kõrge veejuhtivus ning nende nihketugevus on võrreldes peeneteraliste pinnastega suurem, mistõttu on need paremini tihendatavad (kasutades dünaamilist koormust). Ühtlaseteriste jämedateraliste pinnaste tihendamisel saadakse parimaid tulemusi vihmasaju tingimustes tihendamisel ehk koostöös rohke veega. Seoses nende kõrge veejuhtivusega on kastmine väheefektiivne (v.a olukorras, kus vahetult tihendusmasina ees kastetakse rohke veega). Üldiselt omab väga ühtlaseteriste jämedateraliste pinnaste (nt keskliiv $C_U < 3$) tihendamisel nende tihendamisega veesisaldus vähem tähtsust, kui ebaühtlase koostisega pinnastel ning need on tihendatavad sarnaselt nii õhkuivalt kui optimaalse veesisalduse juures (EVS-EN 16907-3 peatükk B.7). Õhkuiva ja optimaalse vahepealne veesisaldus lisab pinnaseterakeste vahele näivnidusust, mis vähesel määral raskendab pinnase tihendamist.

Ühtlaseterised peeneteralised pinnased (möllid) on aga väga keerulised pinnased, kuna veejuhtivus ja nihketugevus on madalad, ka ei ole pinnas plastne, mis pinnaseosakesi koos hoiaks, seega vajuvad pinnased, eriti vibrotihendamise käigus, kergesti laiali. Möllpinnased on ka väga tundlikud veesisalduse muutuse suhtes ning liiga kõrge veesisalduse (või ületihendamise tagajärjel) veelduvad kergesti.



Joonis 1.6. Mõningad näited ühtlaseteristest pinnastest: möll ehk peeneteraline pinnas, liiv ja kruus/killustik.

Katkeva terakoostisega pinnaste puhul domineerib nende käitumist peeneteralise pinnase sisaldus. On kaks võimalust, kas jämedad pinnaseosised on peeneteralise pinnase sees või vastupidi. Katkeva terakoostisega pinnaste tihendamine sõltub otseselt nende terakoostisest vastavalt eelnevalt esitatud jaotusele.

1.4 Vesi pinnases

Vesi omab pinnase tihendamisel üliolulist rolli. Igal pinnasetüübil on sobilik/parim veesisaldus, mille juures on pinnasekiht kõige paremini tihendatav. Üldiselt, mida väiksem on osakeste suurus, seda suurem on vee mõju tihendamisele.

Kui pinnase veesisaldus on madal, on seda raske tihendada, v.a puhtad ühtlaseterised liivad ja vabalt drenivad kaljumaterjalid, mis tihenevad hästi ka õhkuivalt. Üldjuhul on aga maksimaalne tihendus saavutatav teatud optimaalse veesisalduse juures, sest vesi aitab ületada pinnaseosakeste vahel tekkivat hõõrdejõudu. Optimaalsest madalam veesisaldus tekitab pinnaseosakeste vahele kohesioonjõud, mis raskendab osakeste omavahelist liikumist ja seega ka tihendamist.

Liiga suure veesisalduse juures pinnase poorid saavad täielikult veega täidetud (pinnas muutub veeküllastunuks), mis takistab pinnase edasist tihendamist, sest pooridesse tekkiv vee surve (vett ennast ei ole võimalik kokku suruda) sunnib pinnaseterakesi üksteisest lahku. Seega pinnas ei saa enam tiheneda, vaid hoopis kobestub ja kaotab nihketugevust.

Peeneteralised pinnased, eriti savid on üldiselt vee suhtes väga vastuvõtlikud ning nende tihendamine on võimalik ainult teatud veesisalduse vahemikus. Kui aga vesi imendub savipinnasesse suures koguses, hakkab vesi saviosakesi tõrjuma üksteisest kaugemale, nõrgendades molekulaarseid sidemeid ja tõmbejõude, mis annavad savile nidusad / plastsed omadused. Seetõttu muutuvad savid veesisalduse suurenedes üha pehmemaks ja nõrgemaks muutudes lõpuks voolavateks.

Tihendamiseks optimaalse veesisalduse määramiseks on kõige levinumalt kasutusel standardne Proctor-teim või selle modifikatsioonid (EVS-EN 13286-2). Lisaks Proctor-teimile on kasutusel veel:

- EVS-EN 13286-3 “Vibrocompression”;
- EVS-EN 13286-4 “Vibrating hammer”;
- EVS-EN 13286-5 “Vibrating table”.

Kõikide laboratoorsete võrdlustihendamistega saadakse uuritava pinnase maksimaalne tihedus optimaalse veesisalduse juures, teisisõnu leitakse, mis veesisalduse juures pinnas kõige paremini tiheneb ning mis on pinnase maksimaalne tihedus etteantud tihendamisenergia või meetoodika juures. Kuna kõige levinumalt kasutatav meetoodika on Proctor-teim, siis alljärgnevalt käsitletakse seda.

1.4.1 Proctor-teim

Proctor-teimi (EVS-EN 13286-2) käigus pinnas tihendatakse mitmesuguse veesisalduse juures, kasutades selleks teatud kindlat energia hulka. Standardsel Proctor-teimil tihendatakse pinnas kolme võrdse kihi kaupa 2,5 kg raskuse tambiga, mis langeb 30,5 cm kõrguselt. Tihendamine toimub anumal, mille läbimõõt on 102 mm ja kõrgus 116 mm. Tihendamise järel määratakse tihendatud pinnase kuivmahu mass ρ_d . Seejärel lisatakse pinnasele vett ja korratakse katset. Saadud andmetel koostatakse graafik ρ_d sõltuvuse kohta veesisaldusest (joonised 1.8 ja 1.9), millelt saab leida tihendamiseks vajaliku optimaalse veesisalduse w_{opt} ja antud tihendamisenergia puhul maksimaalse kuivmahu massi ρ_{dmax} .

Standardne Proctor-teim loodi aastal 1933 Ralph Roscoe Proctor'i poolt. Katsest saadavat tulemust kasutatakse tihendamise kvaliteedinõuete alusena ning võib olla näiteks vahemikus 90...100%.

Kuna algne Proctor-teim oli ette nähtud peeneteraliste pinnaste optimaalse veesisalduse ja maksimaalse kuivtiheduse leidmiseks, siis kasutades jämedateralisi pinnaseid (eriti näiteks kruuspinnased), ei võimaldanud katses kasutatav tihendamisenergia saavutada sellist tihendusastet, mida taolistel pinnastel tee-ehituses vajatakse. Lisaks on aja jooksul muutunud ka tihendamismasinad, mis võimaldavad oluliselt suuremat tihendamisenergiat. Et korrigeerida neid puudujääke, on hiljem arendatud modifitseeritud Proctor-teim, millega rakendatakse proovikehale umbes neli korda rohkem tihendamise energiat võrreldes standardse Proctor-teimiga.

Kuna modifitseeritud teimi tihendamisenergia on kõrgem, tuleneb sellest ka madalam optimaalne veesisaldus, mis on näiteks kriitiliselt oluline tihendades tänapäevaste vibrorullidega ebaühtlase koostisega kruuspinnaseid. Nimelt, kui pinnaste optimaalseks veesisalduseks on määratud liiga kõrge väärtus, siis vibrorullidega on võimalik hõlpsasti pinnas ületihendada, mille tagajärjel pinnas veeküllastub (sest tihendamisega pinnase poorsust vähendatakse ning pinnases olevale veele ei jää enam piisavalt ruumi) ja hakkab „õõtsuma“ või „vetruma“ ehk kaotab olulise osa oma kandevõimest.

Kuna Proctor-teimis kasutatakse kindlat tihendamise energiat, siis objektile tihendades võib saavutada tihendusteguri, mis ületab 100%, sest tihendamismasinaga ületatakse

laboratoorsel tihendamisel kasutatud energia. Näiteks, kui Proctor-teimiga on leitud pinnase maksimaalseks kuivtiheduseks 1990 kg/m^3 , aga objektilt võetud proovide keskmisega 2050 kg/m^3 , on objektil oleva pinnase tihendustegur 103%.

Proctor-teimi põhimõtet on kujutatud joonisel 1.7, kus on antud 100 mm diameetriga (ehk vormi A) proovikeha kasutamisel katse parameetrid, mis tagab standardse Proctor-teimi kasutamisel tihendamisenergia $0,6 \text{ MJ/m}^3$ ja modifitseeritud variandi puhul $2,7 \text{ MJ/m}^3$. Kuna viimase puhul kasutatakse suuremat tihendamisenergiat, saadakse sellega suurem maksimaalne kuivtihedus ja seejuures ka madalam optimaalne veesisaldus (joonis 1.8). Erinevuseks on väga ühtlaseterised liivad, kus erinevust praktiliselt ei ole.

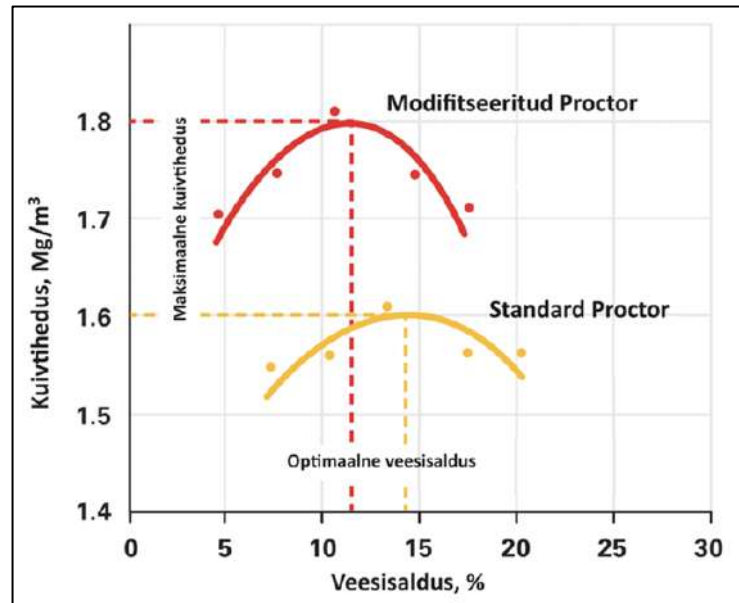
Olenevalt katsetatava täitematerjali maksimaalse teraläbimõõdu suuruselt on kasutusel ka vorm B (diameetriga 150 mm) ja vorm C (diameetriga 250 mm), mille puhul on korrigeeritud katsetingimusi selliselt, et ruumalaühiku kohta jääks tihendamisenergia samaks.

Optimaalse veesisalduse juures on antud tihendamisenergiaga maksimaalse tiheduseni tihendatud pinnase veeküllastusaste umbes vahemikus 90...95%.

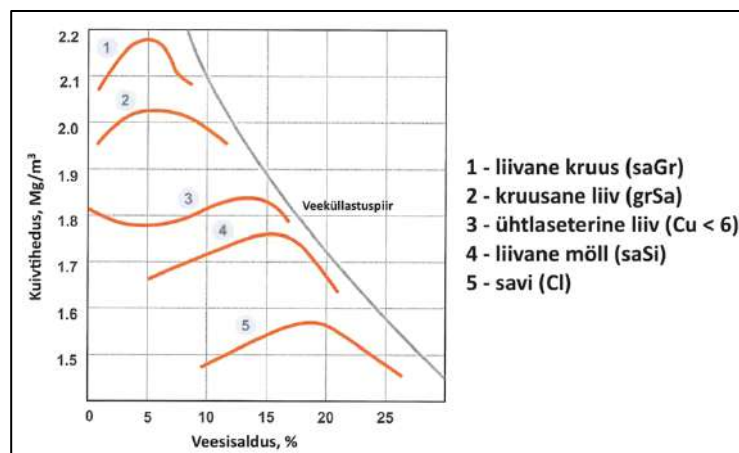
Plastsetel pinnastel on tihendamiseks parim ehk pinnase optimaalne veesisaldus on umbes plastsuspiir pluss kaks protsenti.



Joonis 1.7. 100 mm läbimõõduga katsekeha standardse ja modifitseeritud Proctor-teimi katsetingimuste võrdlus. [10]

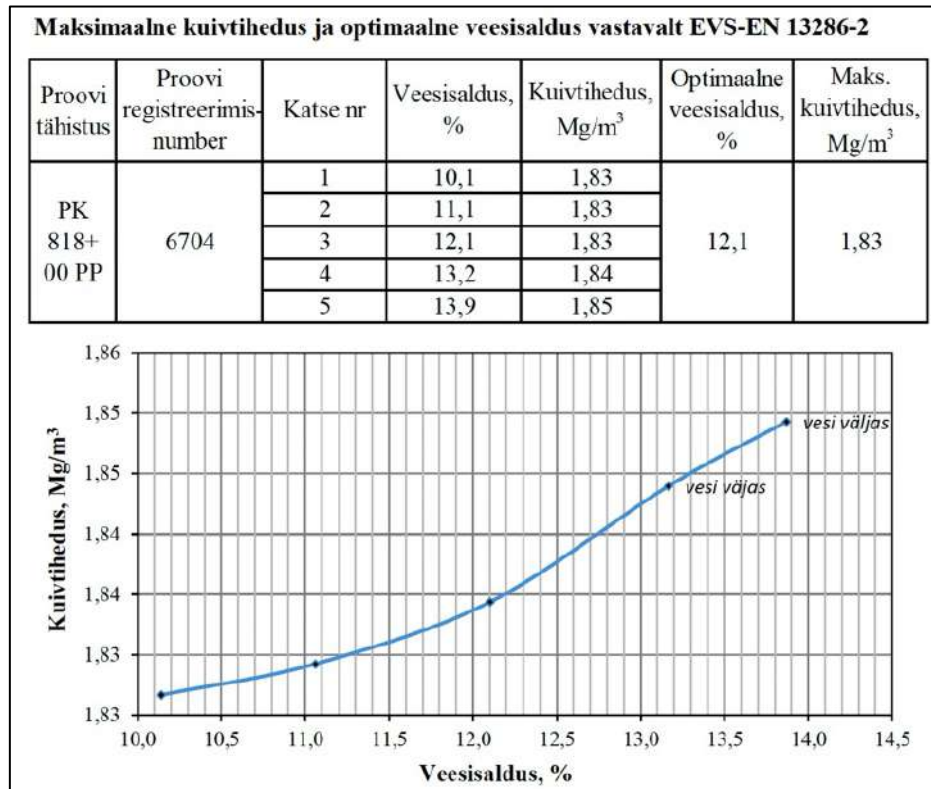


Joonis 1.8 Tüüpilised Proctor-teimi veesisalduse ja kuivtiheduse graafikud. Kuna modifitseeritud Proctor-teimiga kasutatakse suuremat tihendamisenergiat, saavutatakse sellega suurem pinnase kuivtihedus ja madalam optimaalne veesisaldus. [10]



Joonis 1.9. Mõningad tüüpilised veesisalduse-kuivtiheduse graafikud erinevate pinnaste puhul. Graafikul „3“ on antud ühtlaseterise liiva tüüpiline Proctor-teimi kuivtiheduse graafik, millelt nähtub, et õhkuvalt tihendades on võimalik saada suhteliselt lähedane kuivtihedus, kui optimaalse veesisalduse juures. [28]

Väga ühtlaseteristel liivadel (üldisemalt pinnastel, mille veejuhtivus on väga kõrge) ei pruugi veesisalduse-kuivtiheduse graafiline seos olla selline, nagu joonistel 1.8 ja 1.9 esitatud (ehk kaarjas). Kui pinnase veejuhtivus on väga kõrge, siis veel on võimalik hõlpsasti pinnaseterakete vahelisest pooriruumist välja liikuda tekitamata kõrgendatud poorivee rõhku, mille tagajärjel pinnas tihendamise katses kobestub (ehk kuivmahumass väheneb). Selliste pinnaste optimaalne veesisaldus ja maksimaalne kuivtihedus leitakse selle põhjal, millal proovikehale moodustub peale tihendamist nähtav vesi (ehk pinnas on nähtavalt veeküllastunud), protokollile tehakse märges „vesi väljas“, näiteks joonis 1.10, ning optimaalseks veesisalduseks määratakse punkt enne seda, kui vesi ilmus proovikehale.



Joonis 1.10. Väga ühtlaseterised pinnased käituvad Proctor-teimis teisiti, kui joonistel 1.8 ja 1.9 esitatud pinnased tulenevalt nende väga kõrgest veejuhtivusest.

Proctor-teim ei sobi kasutamiseks paekiviliivale, sest katse käigus pinnaseosakesed purunevad, mistõttu saadakse tulemuseks moonutatult kõrge kuivtiheduse väärtus. Pestud paekiviliiva maksimaalne kuivtihedus on vahemikus 1,8...1,9 Mg/m³, kuid Proctor-teimiga on kuivtiheduseks saadud umbes 2,0 Mg/m³.

Taoliste pinnaste maksimaalse kuivtiheduse ja optimaalse veesisalduse leidmisel, mis lõõgihendamisega purunevad ja mille hulka kuuluvad kõik paekivist valmistatud täitematerjalid, sh killustikud, tuleks eelistada muid katsemeetodeid, kui Proctor-teim. Neid meetodeid on loetletud peatükis 1.4. Lisaks oleks sobilik kasutada ka guraatortihendajat (EVS-EN 12697-31), kuigi meetodi kasutamist ei ole standardi tasandil kirjeldatud muudele materjalidele, kui asfaltsegudele.

Uuringus [25] katsetati lubjakivikillustike tihendamist guraatortihendajaga ning leiti, et kui kasutati järgmisi katseandmeid, oli tihendamise käigus killustike purunemine minimaalne ning saavutati umbes sellised poorsused, mis erinevatel killustikel maksimaalse tiheduse juures on:

- pöördenurk $\alpha = 1,25^\circ$;
- pöörete arv minutis, $n = 30$ pööret/min;
- pöörete arv: 400 tk;
- proovikehale avaldatav vertikaalsurve:
 - fraktsioneeritud killustikud ja ridakillustikud (nt fr. 16/31,5 mm ja fr. 4/31,5 mm), $F = 150$ kPa;
 - jätkuva terakoostisega killustikusegud (nt fr. 0/31,5 mm), $F = 300$ kPa.

Suurema vertikaalsurve kasutamisel tuleb sama tihenduse saavutamiseks kasutada vähem pööreid. Näiteks, kui uuringus [25] kasutati güraatortihendaja vertikaalsurvet $F = 600$ kPa, oli maksimaalse tihenduse saavutamiseks vajaminevateks pöörete arvuks umbes:

- fraktsioneeritud killustikel: 30 pööret;
- ridakillustikel: 50 pööret;
- jätkuva terakoostisega killustikusegudel: 350 pööret.

Fraktsioneeritud ja ridakillustikud on vabalt drenivad segud, mistõttu nende puhul ei ole võimalik optimaalset veesisaldust leida. Mõlemad segud tihenevad siiski paremini, kui tihendamine toimub vahetult peale kastmist rohke veega või vihmasaju ajal. Jätkuva terakoostisega killustikusegude optimaalne veesisaldus on vahemikus 3,0...4,0%.

Eelnevalt kirjeldatud tingimustel tihendades saadakse umbes järgmised poorsused ja kuivmahumass, mida võib lugeda maksimaalseks või selle lähedaseks (täpsed väärtused sõltuvad terakoostisest):

- fraktsioneeritud killustik: $n = 30\%$ ja $\rho_{d, \max} = 1,8$ Mg/m³.
- ridakillustik: $n = 25\%$ ja $\rho_{d, \max} = 1,9$ Mg/m³.
- jätkuva terakoostisega killustik: $n = 18\%$ ja $\rho_{d, \max} = 2,1$ Mg/m³.

1.5 Õhk pinnases

Antud peatükk pärineb valdavalt allikast [13].

Nagu esitatud joonisel 2 ja selgitatud mõiste „tihendamine“ juures, vähendatakse tihendamisega pinnase poorsust suurendades seega pinnase mahumassi ruumalaühiku kohta. See eeldab, et pinnases oleva õhu (laiemalt gaaside) osakaal väheneb.

Õhu (üldjuhul mingi gaasi) osatähtsus pinnase koostisosana on tunduvalt väiksem kui veel. Ta ei muuda pinnaseosakeste iseloomu. Teatud juhtudel ta võib aga mõjutada pinnase käitumist. Mõju sõltub gaasi esinemisvormist. Gaas võib pinnases esineda:

- lahtistes, atmosfääriga ühendatud poorides;
- suletud poorides pinnasevee sees;
- pinnasevees lahustunud kujul.

Lahtistes poorides olev õhk ei mõjuta pinnase käitumist mingil määral. Suletud poorides olev gaas muudab pinnase elastsemaks. Pinnasele mõjuva surve suurenedes surutakse mullidena esinev gaas kergesti kokku ning surve vähenedes maht taastub.

Praktiliselt ei mõjuta pinnase mehaanilisi omadusi ka vees lahustunud gaas, kuigi suurendab mingil määral pinnasevee ja sellega ka pinnase kokkusurutavust. Oluline võib olla aga lahustunud gaasi osa veest eraldumisel.

Välitingimuste muutumisel (rõhu või temperatuuri muutumine) muutub gaasi lahustuvus vees. Sel juhul võib eraldunud gaas oma suurema mahu tõttu muuta pinnase mahukaalu, lõhkuda väljakujunenud pinnasestruktuuri jne. Looduses seda tavaliselt ei juhtu, kuid antud nähtusega tuleb tingimata arvestada siis, kui võetakse proove nende teimimiseks laboris. Looduslikust pinnasemassiivist väljavõetud proovis ei mõju enam kõrgemal asuvate

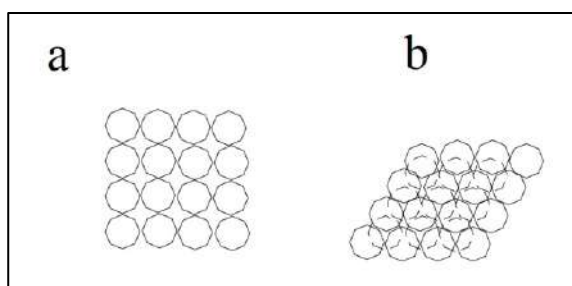
pinnasekihtide surve ja muutub temperatuur. Võib osutada, et looduses veeküllastatuna käituv pinnas määratakse laboris kui osaliselt küllastunud. Struktuuri rikkumise tõttu võivad laboris määratud mehhaanilised omadused olla tunduvalt allahinnatud.

1.6 Pinnase struktuur

Antud peatükk pärineb valdavalt allikast [13].

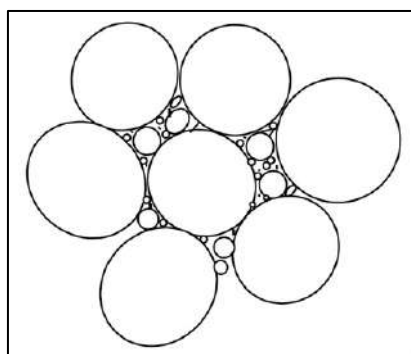
Pinnase koostisosade iseloomu kõrval määrab pinnase omadused ka osade omavaheline asetus - pinnase struktuur. Pinnase struktuuri kujunemist mõjutavad pinnaseosakeste kuju, suurus, mineraloogiline koostis, pinnasevee koostis, pinnase teke ehk genes ja hilisemad mehhaanilised (tihenemine omakaalu ja pinnasele mõjuvate koormuste tõttu, kobestumine nihkedeformatsioonide tõttu) ning keemilised mõjud.

Struktuuri käsitlemisel võib pinnased jaotada kahte gruppi – liivad (jämedateralised pinnased) ja savid (plastsed peeneteralised pinnased). Liivad on oma tekkelt enamasti settepinnased. Suhteliselt suuremõdulised liivaterad langevad settides veekogu põhja ja võtavad gravitatsioonijõu toimele tasakaaluasendi. Kokkupuutepunktides mõjub ainult hõõrdejõud. Sellisel viisil tekkinud struktuuri nimetatakse teraliseks. Olenevalt terade omavahelisest asendist võib tema poorsus olla erinev. Joonisel 1.11a on toodud liivaosakeste settimisel ühesuguse läbimõõduga sfäärilistest teradest moodustatud kõige kohevam struktuur, joonisel 1.11b aga kõige tihedam, tetraedriline struktuur. Nende poorsus on vastavalt ümardatult 48% ja 26%.



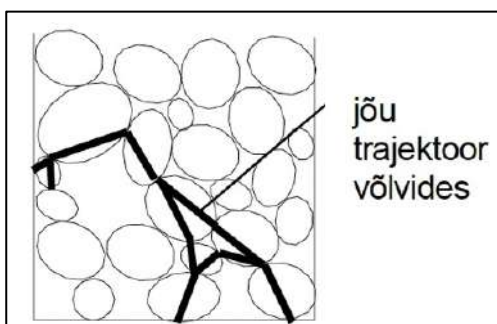
Joonis 1.11. Ühesuuruste osade kohevaim (olukord a) ja tihedaim (olukord b) pakkimine. [13]

Eelnevad olid ideaalmudelid võimalike poorsuspiiride selgitamiseks. Looduslikud pinnased koosnevad erimõõdulistest teradest, mis ei ole ideaalsed sfäärid. Erineva läbimõõduga teradest koosnevad pinnased võivad olla väga tihedad ka siis, kui struktuur ei ole ideaalselt tetraedriline, kuna peenemad terad võivad täita jämedate vahelised poorid, joonis 1.12.



Joonis 1.12. Erineva suurusega osakekestest koosnev pinnas. [13]

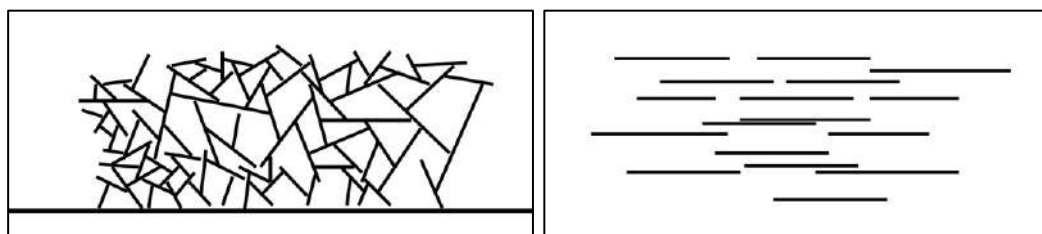
Terade üheaegsel langemisel võivad liivas tekkida ka väikesed võlvikesed, mille alla jäävad tavalisest suuremad poorid (joonis 1.13). Sellised võlvid, olles pealesettinud pinnase koormise all, võivad olla üsnagi tugevad. Staatilisel mõjuv koormus ei suuda neid purustada enne kui ületatakse kvartsi tera muljumistugevus kokkupuutepunktis. Dünaamilise koormuse, löögi või vibratsiooni mõjul survejõud terade vahel teatud ajahetkel väheneb või hoopis kaob. Seetõttu väheneb või kaob ka teradevaheline hõõrdejõud ning võlvid purunevad. Eeltoodu aitab selgitada, miks isegi kohevad liivad staatilise koormise all tihenevad vähe, kuid vibratsiooni mõjul tunduvalt enam.



Joonis 1.13. Võlvid teralises struktuuris. [13]

Saueosakeste settimisel kontaktpunktis tekkiv põhiliselt elektrimolekulaarne jõud on suuteline tasakaalustama osakesele mõjuva gravitatsioonijõu. Osakesed jäävad samasse asendisse, kui nad olid veekogu põhja langedes või üksteisega kokkupuutudes.

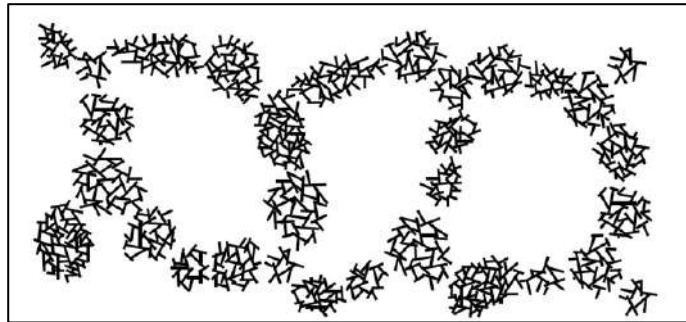
Olenevalt vees lahustunud ainete koaguleerivast (osakeste liikumist soodustavast) või disperseerivast (osakeste eraldumist soodustavast) toimest, võivad saueosakesed moodustada väga mitmekesiseid struktuure. Kuna osakeste tasapinnalistel külgedel on negatiivsed, servadel aga positiivsed laengud, siis liituvad nad külgservaga, moodustades "kaardimajakese" struktuuri (joonis 1.14). Selline struktuur on vaatamata pinnase suurele poorsusele küllaltki püsiv liitekohtades mõjuvate piisavalt suurte elektrimolekulaarse päritoluga jõudude tõttu. Iseloomulik on see soolases vees settinud savidele. Disperseerivas keskkonnas settivad kolloidsed saueosakesed moodustavad struktuuri, kus osakeste orientatsioon on enamvähem paralleelne, joonis 1.15. Selline struktuur on iseloomulik magedas vees settinud savile.



Joonised 1.14 ja 1.15. Vasakul savi „kaardimajakese“ struktuur (iseloomulik soolases vees settinud savidele), paremal savipinnase dispersne struktuur (iseloomulik magedas vees settinud savidele). [13]

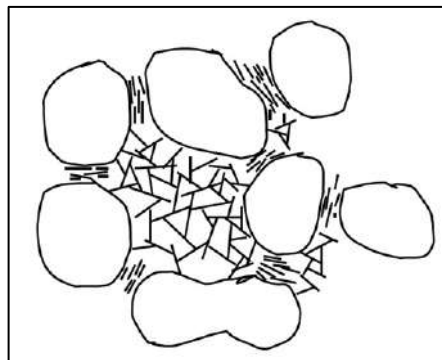
Üksikud osakesed võivad liituda juba enne veekogu põhja langemist ja moodustada teradest koosnevaid agregate. Agregaatide settimisel tekib kärjekujuline (helbeline) struktuur (joonis 1.16). Pinnasele mõjuvate välisjõudude, sealhulgas ka kõrgemal asuva pinnase

omakaalu mõjul selline struktuur järk-järgult puruneb, osakeste orientatsioon muutub enam paralleelseks, põhjustades pinnase tihenemise.



Joonis 1.16. Savi kärjekujuline struktuur. [13]

Looduslikud savipinnased ei koosne kunagi ainult saueosakestest, vaid sisaldavad ka mölli, liiva aga mõnikord ka kruusa osakesi ja kive. Kui jämedate osade hulk on väike, siis need nagu “ujuvad” savis ning ei muuda väga oluliselt pinnase omadusi. Suurema hulga korral need võivad moodustada kandva karkassi. Jõud kantakse sel juhul üle karkassi kaudu, kusjuures jämedate osade kontaktpunktide vahel, kus mõjuvad suhteliselt suured kontaktpinged, asub tugevasti tihenunud savi. Jämedate terade vahelistes osades võib aga savi olla täielikult tihenemata. Sellise savipinnase struktuur on toodud joonisel 1.17. Kui sellise savi struktuuri rikkuda, näiteks muljumise teel, siis jämedate terade vahele satub hoopis nõrgem tihenemata savi ja seega väheneb tunduvalt pinnase tugevus tervikuna.



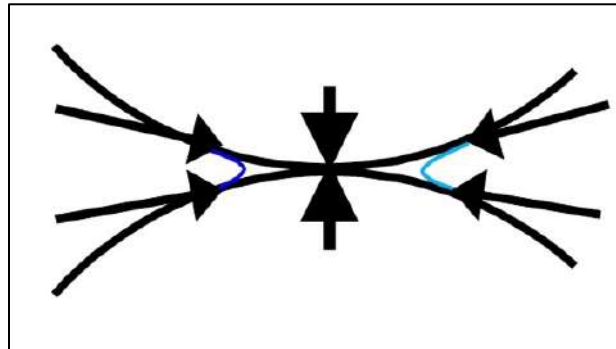
Joonis 1.17. Tüüpiline loodusliku savipinnase struktuur, kui savipinnas sisaldab mölli ja liiva osakesi. [13]

1.6.1 Pinnase struktuurisidemed

Jämedate pinnaseterade vahel võivad sidemed täielikult puududa ja pinnase tugevuse määrab sellisel juhul ainult hõõrdejõud kontaktpunktides. Nii on see puhastes kuivades või veeküllastunud liivades. Enamasti on looduslikes pinnastes terad omavahel tugevamini või nõrgemini seotud. Oma iseloomu järgi võib sidemed jaotada:

1. kapillaarjõududest põhjustatud sidemed;
2. tsementatsioonid sidemed;
3. vesi-kolloidsidemed.

Niiske liiva puhul tekivad osakeste kokkupuute kohtade ümber kapillaarjõu toimetel meniskid (joonis 1.18). Meniski poolt terale mõjuv jõud põhjustab teradevahelise survejõu suurenemise. Seega suureneb ka terade vaheline hõõrdejõud ja pinnase tugevus tervikuna. Kapillaarjõud on võrdeline tera läbimõõduga. Pinnaühikule langev teradevaheliste kontaktpunktide arv on pöördvõrdeline tera läbimõõdu ruuduga. Seega on pinnase tugevuse tõus pöördvõrdeline terasuurusega, olles suurem peeneteralistel pinnastel ja möllistel liivadel.



Joonis 1.18. Menisk pinnaseterade kokkupuutepunkti ümber ja tekkivad kapillaarjõud. [13]

Kapillaarjõud on põhjuseks, miks niiske liiv halvasti tiheneb võrreldes kuivaga ja miks pärast läbikaevamist liiva maht suureneb. Kapillaarjõududest tingitud teradevahelised sidemed kaovad niipea kui pinnas küllastub veega. See on võimalik pinnasevee taseme muutudes või ka lihtsalt sadevete imbumisel pinnasesse.

Pinnase osakesed võivad olla liidetud looduslike tsementidega. Need on näiteks pinnaseveest eralduvad rauasoolad, kaltsium- või magneesiumkarbonaat, amorfne räni jne. Tsementatsioonid sidemed võivad anda pinnasele märkimisväärse tugevuse nii, et puistepinnasest tekib poolkaljupinnas, näiteks liivakivi. Need sidemed on tänu oma kristalsele ehitusele elastsed ja haprad. Terade omavahelise asendi väikegi muutmine purustab sellised sidemed. Purunenud sidemed ei taastu, või õigemini võtab taastumine nii palju aega, et tavalises ehitustegevuses ei saa sellega arvestada.

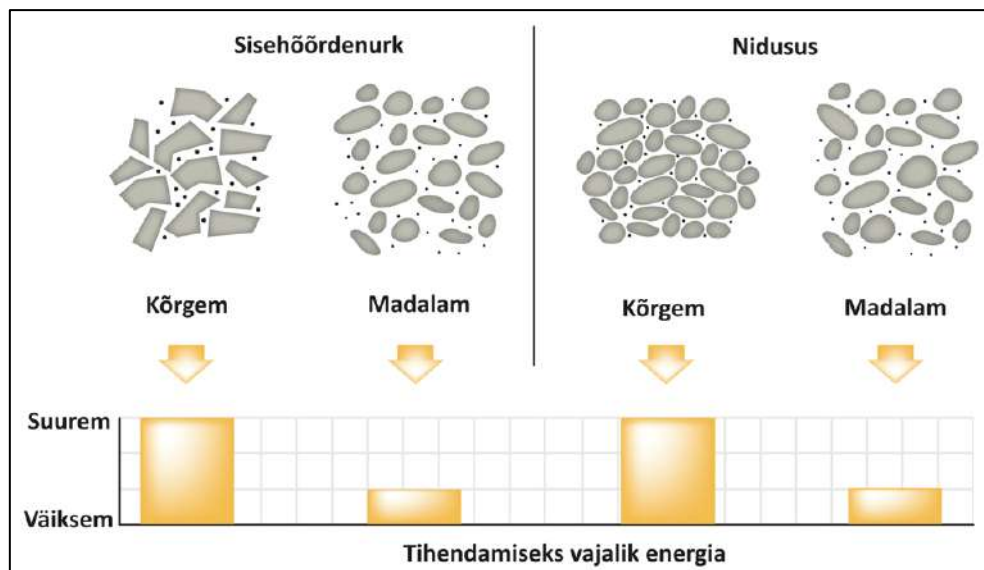
Pinnaseosakesi seovad ka osakeste, neid ümbritseva veekile ja vees leiduvate kolloidide vahel mõjuvad molekulaarsed jõud. Nende jõudude suurus sõltub peamiselt teradevahelisest kaugusest, suurenedes selle kahanemisega. Suure survega tihendatud savipinnastes võivad nad anda pinnasele kaljupinnase tugevuse. Neid sidemeid ei teki puhastes liivades. Juhul kui aga liiv sisaldab väheselgi hulgal saucosakesi, võivad viimased kleepudes liivaterade pinnale põhjustada omakorda liivaterade kleepumise. Vesi-molekulaarsidemed on plastse iseloomuga. Pärast sidemete purustamist osakeste ümberpaigutuse tõttu taastub nende tugevus suhteliselt kiiresti. Pinnase tugevus tervikuna taastub muidugi juhul kui tema tihedus jääb pärast segamist endiseks või suureneb.

Kui mingil looduslikul pinnasel määrata tugevus, seejärel tema struktuur lõhkuda segamise teel nii, et tihedus ning niiskus ei muutu ja uuesti määrata tugevus, siis saab täheldada suuremat või väiksemat tugevuse vähenemist. Kui selline pinnas jätta seisma ja mõningate ajavahemike järel uuesti määrata tugevus, siis selgub, et see on suurenenud. Tugevuse vähenemine pärast struktuuri purustamist on seotud struktuursidemete purunemisega, teatud määral ka struktuuri muutusega. Järgnevate struktuuri rikkumiste puhul on tugevuse lang

väiksem, moodustades ainult taastunud osa. Taastuv osa tugevusest on tingitud vesikolloidsidemetest, taastumatu osa aga tsementatsioonidemetest.

1.7 Pinnase nihketugevus

Mida suurem on pinnase nihketugevus, seda suuremat tihendamisenergiat pinnase tihendamiseks vajatakse. Antud kontekstis kirjeldatakse teinekord pinnaseid ka läbi „tihendatavuse“, mis on suhe, mis leitakse, kui lõplik tihedus miinus algne tihedus jagatud algse tihedusega. Mida suurem on saadud väärtus (suhe), seda lihtsam on pinnast tihendada ja vastupidi. Pinnase tihendatavust mõjutab selle terakoostis, veesisaldus, tihendamise energia ja meetod ning pinnase nihketugevus, joonis 1.19.



Joonis 1.19. Tihendamiseks vajalik energia sõltub suuresti pinnase nihketugevusest. Mida suurem on jämedateralise pinnase sisehõrdenurk või mida suurem on peeneteralise pinnase nidusus, seda suuremat tihendamisenergiat vajatakse. [10]

2 Pinnase tihendamise olulisus

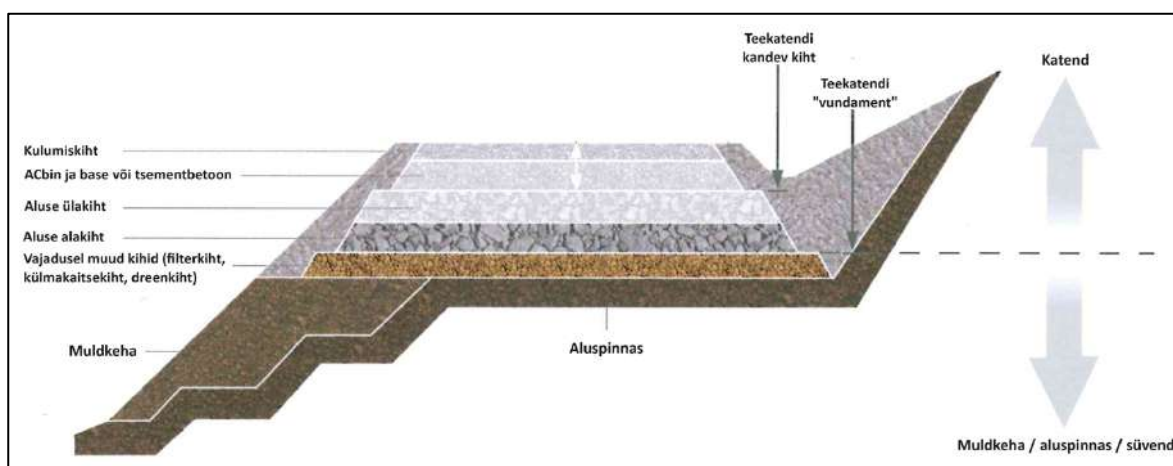
Muldkeha projekteeritakse eesmärgiga tagada teekatte pinnal vajalik kandevõime optimaalsete kattekihtide paksustega. Muldkeha erinevate (pinnase- ja/või materjali) kihtide paksus ja järgnevus vajaliku kandevõime saavutamiseks tuletatakse järgmise lahendina [26]:

- vajalik kandevõime tee pinnale leitakse liikluskoormuse (-sageduse) ja selle prognoosi põhjal;
- tee aluspinnase omadused määratakse pinnaseuuringutega, vajadusel (kuluefektiivsema lahenduse saamiseks) looduslike aluspinnaste omadusi parendatakse;
- tee konstruktsiooni erinevate kihtide omadused saadakse spetsifikatsioonidest või on leitavad tabelväärtustena. Need omadused tagatakse vajaliku tihendamisega;
- tee konstruktsioon – erinevate kihtide paksused ja järgnevus – leitakse katendiarvutusega või kasutades tüüpkonstruktsioone (kataloogilahendeid).

Lisaks kandevõime tagamisele peab projekteeritud tee ja muldkeha [26]:

- olema stabiilne, so. ei tohi esile kutsuda maalihet;
- olema ajas püsivate kalletega piki- ja põiksuunas, so. säilitades normi kohased kalded pika aja jooksul;
- olema külmakindel, so. ei tohi kerkida külmumisel rohkem kui lubatud;
- olema stabiilse niiskusrežiimiga, so. välistab hüdrostaatilisest suurema veesurve tekkimise võimaluse, välistab peenosiste materjalide segunemise (nn „ülespumpamise“ teel), välistab materjalide väljakande muldkehast (suffosiooni).

Peale projekteerimise ja ehitamise protsessi saadakse näiteks joonisel 2.1 kujutatud ristlõige, mis peab tagama eelnevalt nimetatud nõuete täitmise.



Joonis 2.1. Teekonstruktsiooni ristlõike näidis. [11]

Et projekteeritud teekatend ja muldkeha (koos teekonstruktsioon) saaks täita etteantud ülesandeid ning oleks ajas kestav ja püsiv, on üheks kriitiliselt oluliseks teguriks seal kasutatavate pinnaste ja tee-ehitusmaterjalide tihendamine.

Lihtsustatult, tihendamine on protsess, mille käigus pinnase tihedus suureneb ning pinnasemassiivis pinnaseterade vahel olev poorsus väheneb. Kohev pinnas võib tiheneda ka ilma inimese sekkumiseta tulenevalt erinevatest välistest mõjutustest, nt vee liikumisest ja veetaseme kõikumisest, kuid ehitamise protsessis vajatakse siiski otsest mehhaanilist mõjutust. Üldiselt teostatakse tihendamist läbi staatilise surve, löökide, sõtkumise ja vibratsiooni.

Korralikult tihendatud materjal suudab kanda raskemaid koormusi ilma deformeerumata (paindumata, pragunemata, nihkumata). Rasket struktuuri toetav aluspinnase materjal peab olema väga tihe, vastasel juhul tiheneb see koormuse all veelgi, põhjustades konstruktsiooni vajumist. Tihedal materjalil on väiksem veejuhtivus, mis vähendab vee infiltratsiooni mõju ning seeläbi ka külmakerkeohtlikkust. Tihendamise protsessiga paljastatakse ehitamise ajal ka struktuurselt nõrgad alad.

Hea viis tihendamise tähtsuse illustreerimiseks on vaadata tüüpilise teekonstruktsiooni / teekatendi erinevaid kihte. Iga kiht on kavandatud täitma konkreetset insenertehnilist eesmärki ning toetama sellele asetatud koormust. Iga kiht peab olema ehitatud õigest materjalist, õige paksuse ja jäikusega. Kui üks kiht ei ole piisavalt tugev, tee laguneb.

Tihendamine toimub kõigis tee-ehituse etappides. Tihendamise kvaliteet mõjutab oluliselt tee vastupidavust ning avaldab mõju nii tee kasutusmugavusele kui ka ohutusele, mida tee kasutajad kogevad.

Kõige odavam element tee kasutusea pikendamiseks on tihendusprotsess. Tee kihtide tiheduse suurendamine ehituse käigus maksab kuupmeetri pinnase kohta väga vähe. Tiheduse nõuete täitmine võib tulevikus märkimisväärselt raha kokku hoida tee hooldus- ja/või ümberehituskuludel.

Kokkuvõttes muudetakse tihendamisega pinnase omadusi paremateks:

- suureneb nihketugevus;
- väheneb peeneteraliste pinnaste veejuhtivus, mis võimaldab säilitada nendest ehitatud kihtide kandevõimet ning vähendada külmakerkelisust;
- väheneb kokkusurutavus;
- suureneb kandevõime;
- väheneb külmakerkelisus (sest suurema tihedusega külmakerkelise pinnase veejuhtivus on madalam, mistõttu vee lisandumine külmumistsooni aeglustub).

Pinnaste tihendamine on seega kriitiliselt tähtis tegur pidades silmas erinevate pinnasekonstruktsioonide toimivust, püsivust ja eluiga.

Nihketugevuse suurenemise osas saab tuua näite kasutades Brinch Hansen ja Lundgren aastal 1960 antud seost liivpinnase nihketugevuse leidmisest empiirilise seosega:

$$\varphi = 36^\circ + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4,$$

kus 36° on keskmine liiva sisehõrdenurk ja φ_1 kuni φ_4 parandustegurid. Parandustegurite suurused on järgmised:

φ_1 – terade kuju arvestav tegur:

- teravaservalised terad: $+1^\circ$;
- keskmised terad: 0° ;
- ümardunud terad: -3° ;
- väga ümardunud terad: -5° ;

φ_2 – terade suurust arvestav tegur:

- liiv: 0° ;
- peenkruus: $+1^\circ$;
- kesk- ja jämekruus: $+2^\circ$;

φ_3 – terastikulist koostist arvestav tegur

- ühtlane: -3° ;
- keskmine: 0° ;
- ebaühtlane: $+3^\circ$;

φ_4 – tihedust arvestav tegur

- kohev: -6° ;
- kesktihe: 0° ;
- tihe: $+6^\circ$.

Valemi põhjal nähtub, et kõige suurem sisehõrdenurka mõjutav tegur on tihedus. Võttes näiteks liiva, millel on keskmised terad ja keskmine terakoostis, on selle orienteeruv sisehõrdenurk kohevalt 30° , aga tihedalt 42° . Tihendamine suurendab seega antud näite korral liiva sisehõrdenurka 40% võrra.

3 Nõuded tihendatava pinnase niiskusele ja pinnase lõpptihedusele

Määruses 101 [27] §8 lõige 5 öeldakse: „Mulde aluspinnase tihendustegur peab olema $\geq 0,94$, kui projektis ei ole ette nähtud erilahendust.“ Seega muldkeha tuleb rajada aluspinnasele, mille tihendustegur on vähemalt 94% standardsest Proctor-teimist, või vastavalt projektile.

Määruses 101 [27] §9 lõige 5 öeldakse: „Liivpinnasest muldkeha tihendustegur peab vastama käesoleva määruse lisas 6 toodud nõuetele.“ Lisas 6 toodud tabel on antud töö tabel 3.1. Kuigi määrus 101 annab tihendusteguri nõuded liivadele, siis tegelikult peaks see kehtiv olema kõikidele pinnastele, millest muldkeha rajatakse, sh kruusad ja moreenid.

Tabel 3.1. Muldkeha nõutud tihendustegurid vastavalt määrusele 101. [27]

Muldkeha kiht	Kihi sügavus h teekatte pinnast, m	Vähim lubatud tihendustegur*	
		Kiirteed, I ja II klassi teed ja magistraaltänavad	Kõik teed, välja arvatud kiirteed, I ja II klassi teed ning magistraaltänavad
Ülakiht (töökiht)**	$H_k + 0,4$	1,00	0,98
	$H_k + 0,4 \leq h < 1,5$	0,98	0,96
Mitteüleujutatav alakiht	$h > 1,5$	0,98	0,95
Üleujutatav alakiht	$h > 1,5$	0,98	0,95
Süvendi töökiht	$h \leq 1,2$	0,95	0,95

* Tihendustegur on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe.

** H_k – katendi paksus, m.

Määruses 101 [27] §11 lõige 3 öeldakse: „Liivpinnasest drenkihi tihendustegur, mis on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe, peab olema vähemalt 0,98.“ Drenkihina on mõeldud kihti, mis asetseb joonise 2.1 kohaselt aluse all. Määruse kohaselt peab antud kihi tihendustegur olema vähemalt 98% standardsest Proctor-teimist. Tegelikult peaks ka selle kihi tihendustegur olema seotud tabeliga 3.1 ehk suurema liiklussagedusega teedel peaks drenkihi tihendustegur olema vähemalt 1,00 ehk 100% standardsest Proctor-teimist.

Tihendustegur on võrdlustihedus etalontihedusse. Etalontihenduse leidmise viisid võivad olla erinevad, näiteks:

- standardne ja modifitseeritud Proctor-teim vastavalt EVS-EN 13286-2;
- vibrokompresioon vastavalt EVS-EN 13286-3 (ing. vibrocompression);
- löökhaamer vastavalt EVS-EN 13286-4 (ing. vibrating hammer);
- vibroalus vastavalt EVS-EN 13286-5 (ing. vibrating table).

Seega on oluline defineerida, mis meetod on võetud võrdlustiheduse aluseks. Eestis majandus- ja taristuministri määrus nr 106 „Tee projekteerimise normid“ [15] (praeguseks

kehtetu) peatükk 3.3 punkt 4 ütleb, et „muldkeha pinnase tihedus, mida iseloomustab tihendustegur K_t (pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardisel Proctor-teimil) peab vastama tabeli /.../ nõuetele“. Tabelis 3.1 esitatud muldkeha nõutud tihendustegurid vastavad seega standardse Proctor-teimiga määratud tihendusteguritele. Võrdluseks, et Soome normides ja nõuetes on antud kõik tihendustegurid vastavalt modifitseeritud Proctor-teimiga.

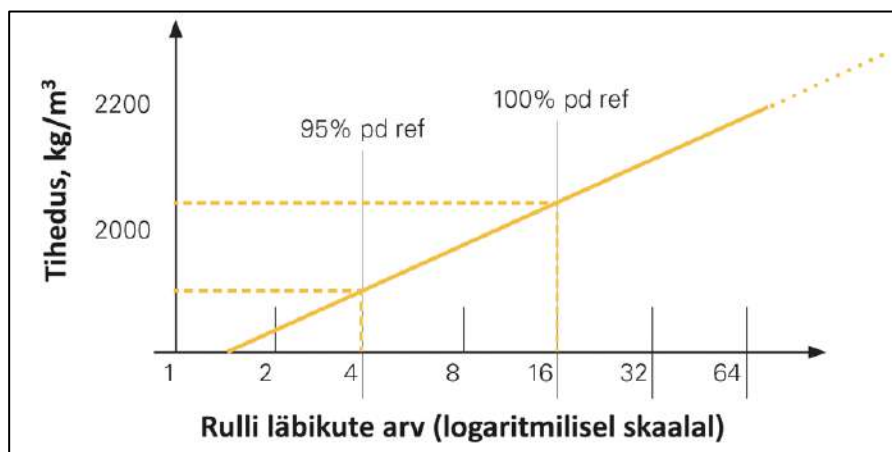
Tabeli 3.1 kasutamiseks tuleb kõigepealt määrata pinnase maksimaalne tihedus ja optimaalne veesisaldus standardse Proctor-teimiga. Seejärel võetakse töömaal tihendatud kihist peatükis 6 kirjeldatud mõne mahumassi mõõtmisel põhineva meetodiga pinnaseproov leides selle kuivtiheduse (kuivmahumassi). Seejärel võrreldakse töömaal saadud kuivtihedust etalon kuivtihedusega ning leitakse tihendussuhe, näiteks:

- liivpinnase maksimaalseks kuivtiheduseks on standardse Proctor-teimiga leitud $\gamma_{dmax} = 1900 \text{ kg/m}^3$;
- töömaal võetud proovist määrati pinnase kuivtiheduseks $\gamma_d = 1800 \text{ kg/m}^3$;
- töömaal oleva pinnase tihendustegur $K_t = \gamma_d / \gamma_{dmax} = 1800 / 1900 = 0,95$.
 - olenevalt võetud proovi asukohast vastavalt tabelile 3.1 on pinnas kas piisava tiheduse juures või tuleb tihendamise jätkata.

Kõik muud (ehk peale otsese pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhte mõõtmisel sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardisel Proctor-teimil) peatükis 6 käsitletud pinnase tiheduse kvaliteedikontrolli mõõtmise meetodid on kaudsed tihendusteguri leidmise viisid, näiteks:

- radioaktiivne isotoop, elektromagneetiline meetod ja peatükis 4 käsitletud pinnaserullide CCC tuleb kalibreerida suhtes leitud pinnase kuivmahumassi;
- elastsusmoduli ja tihendussuhete mõõtmised (plaatkoormuskatse, LWD- ja FWD-seadmed) on kogemuslikult leitud väärtused;
- nihketugevuse (penetromeetrid) mõõtmiste tulemused on nii teoreetiliselt kui katseliselt leitud väärtused.

Pinnase tihendustegur suhtes vajaminevasse tihendamisenergiasse on omavahel seotud logaritmilisel skaalal. Mida tihedamaks pinnast on vaja tihendada, seda suuremat energiat on vaja kasutada ning kõige keerulisem on just kõrgete protsentide saavutamine, joonis 3.1. Seetõttu ei ole ka mõistlik kõikidele (teekonstruktsiooni) kihtidele seada nõudeks näiteks 100% tihendustegur (modifitseeritud) Proctorist, sest sellest saadav kasu on võrreldes vajamineva tihendamisenergiaga küsitav. Tabelist 3.1 nähtub, et mida lähemal on tihendatav kiht teekattele, seda kõrgem peab olema tihendustegur, sest seda suurem on järeltihendamise potentsiaal tulenevalt liikluskoormusest ja vastupidi.



Joonis 3.1. Näidis, kuidas tihendustegur on logaritmilises suhtes rulli läbikute arvuga. [10]

Kuna peamiselt peene- ja keskmiseteralised pinnased on veetundlikud ning nende käitumine muutub sõltuvalt veesisaldusest, antakse tabelis 3.3 lubatavad ja maksimaalsed tihendamisaegsed veesisaldused saavutamaks tabelis 3.1 antud tihendustegureid.

Näide: kui näiteks muldkehas kasutatakse keskmiseteralist pinnast (T_{m_65}), mis liigitub terakoostise aluseks mölliseks liivaks, mille optimaalne veesisaldus standardse Proctor-teimi alusel on 9% ning kui selle nõutud tihendustegur on 0,95, siis võib selle veesisaldus maksimaalselt olla $1,25 \cdot 9 = 11,3\%$. Tihendamisprotsessi jooksul tuleb samaaegselt jälgida, et pinnast ei tihendataks üle, mis toob kaasa “öötsumise”. See võib juhtuda samas juba ka ehitusaegse raskeveokite liiklemisega.

Tabel 3.2. Pinnase jaotus veesisalduse järgi. [15]

Nimetus	Veesisaldus w
Vähese veesisaldusega	$< 0,9w_0$
Normaalse veesisaldusega	$0,9w_0$ kuni w_{lub}
Kõrgenenud veesisaldusega	w_{lub} kuni w_{max}
Liigse veesisaldusega	$> w_{max}$

Märkused:

w_0 – optimaalne veesisaldus standardsel Proctor-teimil;

w_{max} – maksimaalne veesisaldus standardse Proctor-teimi kohase tihendusteguri $K_t = 0,9$ saavutamisel (tabel 3.3);

w_{lub} – lubatav veesisaldus standardse Proctor-teimi kohase nõutava tihendusteguri $K_t \geq 0,9$ – $1,0$ saavutamisel (tabel 3.3).

Tabel 3.3. Keskmise- ja peeneteralise pinnase lubatav ja maksimaalne veesisaldus tihendamisel. [15]

Pinnased	Veesisaldus nõutava pinnase tihendusteguri K_t saavutamisel			
	w_{lub}			w_{max}
	$K_t > 1,0$	$K_t = 0,98$	$K_t = 0,95$	$K_t = 0,90$
Mölline peenliiv, möll	1,30 w_o	1,35 w_o	1,60 w_o	1,60 w_o
Savine või mölline liiv	1,10 w_o	1,15 w_o	1,25 w_o	1,50 w_o
Liivane savimöll või liivane möllsavi	1,05 w_o	1,10 w_o	1,20 w_o	1,40 w_o
Savi, möllsavi	1,00 w_o	1,05 w_o	1,15 w_o	1,30 w_o

Märkused:

- 1) suvel liivpinnasest muldkeha rajamisel veesisaldust ei piirata;
- 2) käesolevad piirangud ei laiene muldkeha rajamisele hüdromeetodil;
- 3) ~~talvel ei tohi~~ külmal ajal, st perioodil, mil õhutemperatuur püsib valdavalt miinuskraadides, ei tohi muldkeha rajamisel pinnase veesisaldus ületada järgmisi piirväärtusi: 1,3* w_o – liivpinnases; 1,2* w_o – savises või möllises liivas; 1,1* w_o – teistes seotud pinnastes;
- 4) pinnase lubatava veesisalduse suurust võib täpsustada, arvestades konkreetsete tihendusmasinate tehnoloogilisi võimalusi;
- 5) muldkeha pinnase tihendustegur K_t (pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardsel Proctor-teimil).

Tabelis 3.4 antakse erinevate pinnaste orienteeruvad optimaalsed veesisaldused ja maksimaalsed kuivmahumassid.

Tabel 3.4. Erinevate pinnaste orienteeruvad optimaalsed veesisaldused ja maksimaalsed kuivmahumassid. [12]

Pinnase liik	Optimaalne veesisaldus	Maksimaalne kuivmahumass
Kruuspinnased	5...10%	2,0...2,2 Mg/m ³
Liivpinnased	5...15%	1,7...2,2 Mg/m ³
Möllpinnased	15...25%	1,6...1,8 Mg/m ³
Savipinnased	20...30%	1,5...1,7 Mg/m ³
Moreenpinnased	5...10%	2,0...2,3 Mg/m ³

Peamiselt peene- ja keskmiseteraliste pinnaste esmaseks tihendamist puudutavaks kvaliteedikontrollimeetmeks on tihendamisega veesisalduse kontrollimine, mis on objektimeeskonna poolt hinnatav mh järgnevalt.

Vaadeldavast pinnasest moodustatakse käte vahel umbes peopesasuurune kuul / pall. Kui pinnase veesisaldus on:

- liiga madal, siis:
 - välimus: pinnas tundub pulbriline ja lahtine;
 - pigistamine: pärast kokkusurumist ei säilita see käe kuju;
 - mahakukutamisel: kukkumisel puruneb täielikult.

Järeldus: pinnas on liiga kuiv, et seda tõhusalt tihendada.

- optimaalne, siis:
 - välimus: pinnas on vormitav, kuid mitte kleepuv;
 - pigistamine: säilitab pärast kokkusurumist käe kuju;
 - mahakukutamisel: kukkumisel murdub see ainult paariks tükiks.

Järeldus: pinnas on sobiva veesisalduse juures, et seda tõhusalt tihendada.

- liiga märg, siis:
 - välimus: pinnas tundub plastiline ja kleepuv ning jätab sõrmedele niiskuse jälgi;
 - pigistamine: säilitab kindlalt oma kuju.
 - mahakukutamisel: kukkumisel jääb see ühte tükki.

Järeldus: pinnas on liiga märg, et seda tõhusalt tihendada.

Kiireks objektipealseks täpsemaks veesisalduse määramiseks saab kasutada näiteks mikrolaineahjuga kuivatamist, mida nimetatakse standardis EVS-EN ISO 17892-1 andmata siiski detailset meetodika kirjeldust. Meetodi detailne kirjeldus on antud standardis ASTM D4643, mille kohaselt:

1. koguge esinduslik pinnaseproov ja kaaluge see;
2. asetage pinnas mikrolaineahjukindlasse anumasse, mis on tavaliselt klaasist või keraamikast, et vältida mikrolaineenergiaga segavaid faktoreid;
3. kuumutage proovi mikrolaineahjus madala võimsusega, et vältida pinnase kahjustamist või ülekuumenemist;
4. jälgige proovi hoolikalt ja kaaluge seda perioodiliselt, kuni see saavutab konstantse kaalu (mis näitab, et kogu vaba vesi on eemaldatud);
5. pärast kuivatamist kaalutakse proov uuesti;
6. veesisalduse arvutamiseks võrreldakse märja pinnase kaalu kuiva pinnase kaaluga. Kaalude erinevus näitab vee hulka, mida väljendatakse kuivkaalu protsendina.

Mikrolainekuivatuse meetod on vähem täpne, kui tavapärane ahjus kuivatamine vastavalt EVS-EN ISO 17892-1 ning sobib kõige paremini madala orgaanilise sisaldusega pinnastele. Katse osas tuleb jälgida ülekuumenemise vältimist, mis võib muuta pinnase omadusi, eriti

savide või orgaanilise aine sisaldusega pinnaste puhul. Meetod ei pruugi sobida kõrge kipsisisaldusega pinnastele või muudele mineraalidele, mis võivad kuumutamisel vett eraldada.

Laboritingimustes määratakse pinnaste veesisaldus vastavalt EVS-EN ISO 17892-1 ning täitematerjalide (täpsemalt tehispinnased ja -materjalid) veesisaldus vastavalt EVS-EN 1097-5 nõuetele.

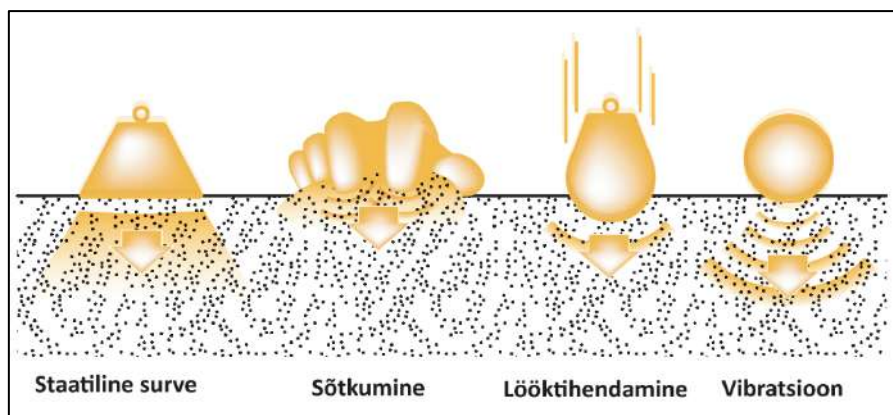
Kui tabelis 3.3 lubatavat veesisaldust ei ole võimalik tagada, tuleb lähtuda peatükis 9 ning EVS-EN 16907-3 teatmelisas B toodust. Reeglina tuleks tihendamiseks liiga kõrgete veesisaldusega pinnaste kasutamist käsitleda juba projektis.

4 Tihendamismasinatest ja -protsessist

4.1 Tihendamise viisid

Tihendamiseks kasutatakse nelja erinevat moodust / koormuse avaldamise viisi (joonis 4.1):

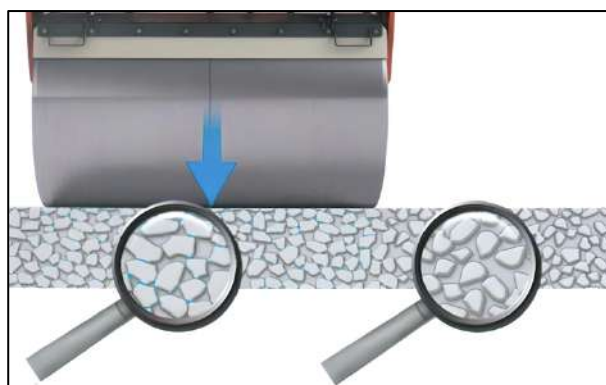
- staatiline surve;
- sõtkumine;
- lööktihendamine;
- vibratsioon, sh ostsilleerimine.



Joonis 4.1. Erineva pinnaste tihendamise viisid ja võimalused. [10]

4.1.1 Staatiline koormus

Staatiline koormus põhjustab pinnases nihkepinged, mis omakorda mõjutab üksikute pinnaseosakeste liikumist üksteise suhtes, joonis 4.2. Et tihendamine saaks toimuda, tuleb ületada pinnase algne nihketugevus. Staatiline surve mõjutab enim pinnasemassiivi pealmisi ja suhteliselt õhukesti kihte.



Joonis 4.2. Staatilise koormusega surutakse pinnaseterakesed üksteise vastu. Edasiseks tihendamiseks tuleb ületada pinnase nihketugevus. Selleks on vaja piisava massiga tihendamismasinat ning pinnas peaks olema optimaalse veesisalduse juures (kõrge veejuhtivusega ühtlaseteriseid pinnaseid tuleks staatilise koormusega tihendamise ajal pidevalt kasta). [11]

Staatilist koormust kasutatakse:

- ühtlaseteriste pinnaste (liivad ja fraktsioneeritud killustikalused) tihendamisel kihi viimistlemiseks (sest vibratsiooniga tihendamisel kihi pealmine osa kobestub);
- suhteliselt nõrkadele pinnastele ehitamisel nende esmaseks tihendamiseks;
- kui vibratsiooni kasutamisel on oht, et pinnas veeldub või kui all on kõrge veesisaldusega pinnas, millest vesi hakkaks vibratsiooni tagajärjel tõusma ülespoole (taolised ohud eksisteerivad nõrkadele pinnastele paigaldatavate kihtide tihendamisel);
- vibratsioonitundlikel aladel (nt hoonete lähedal).

Tihendusmasina efektiivsust staatilise koormusega tihendamiseks hinnatakse läbi joonkoormuse, mis saadakse jagades (tihendamistrumli) teljekoormuse trumli laiusuga. Tabelis 4.1 on antud mõningad näited koos maksimaalse tihendamissügavusega.

Tabel 4.1. Erineva massiga tihendamismasinate staatiline joonkoormus silevaltsrullide puhul ja orienteeruvad maksimaalsed tihendatava kihi paksused staatilise koormuse kasutamisel sõltuvalt materjalist või pinnasest optimaalse veesisalduse juures.

Tihendamis- masin	Staatiline joonkoormus, kN/m	Makadam (fraktsioneeritud killustik), cm	Liivad ja kruusad, cm
Rullid massiga 5...8 tonni	16...20	20...25	15...20
Rullid massiga 8...12 tonni	20...30	25...35	20...25
Rullid massiga 12...15 tonni	30...45	35...40	25...30
Rullid massiga 15...25 tonni	45...70	40...50	30...40
Pneumorullid	10...32 kN/ratas	20...35	-

4.1.2 Sõtkumine

Sõtkumisega tihendatakse plastseid pinnaseid, kus peamine tihendamine antakse algselt tapp- või jalas-tüüpi rullidega ning vajadusel viimistletakse pealmine pind kas silevalts- ja/või pneumorullidega. Viimaseid tuleb kasutada näiteks siis, kui plastsest pinnasest moodustatakse veetõkkekiht või kui mõnel muul eesmärgil on vajadus tihedalt kokkupakkunud pealispinna järgi (nt kruuskattega teed, stabiliseeritud alused).

4.1.3 Löökkoormus

Löökkoormus tekitab oluliselt suurema tihendamisenergia, kui sama massi kasutada staatilise koormusena. Löök tekitab allapoole suunatud impulsi, mis millega ületatakse pinnase nihketugevus ja nihutatakse seeläbi pinnaseosakesi. Löökkoormus on üks dünaamilise koormuse liike, kus koormamise sagedus on madal. Löökkoormust kasutatakse tavaliselt väikeste käsiseadmete puhul (joonis 4.3), kus löökide sagedus on 50...600 vpm (tsüklit minutis) või geotehnilistel töödel.



Joonis 4.3. Näiteks vibrotamperid tihendavad löökkoormuse põhimõttel. [10]

4.1.4 Vibratsioon

Vibratsioon on dünaamilise koormamise liik, kus vertikaalselt (üles-alla) toimuvate löökide sagedus on kõrge, umbes 1400...3000 vpm (tsüklit minutis). Vibratsiooni kasutades suureneb sama staatilise massiga võrreldes tihendamise energia umbes kolmekordseks, teisisõnu staatilise ja vibrotihendamise poolt antava tihendamisenergia suhe on 1:3.

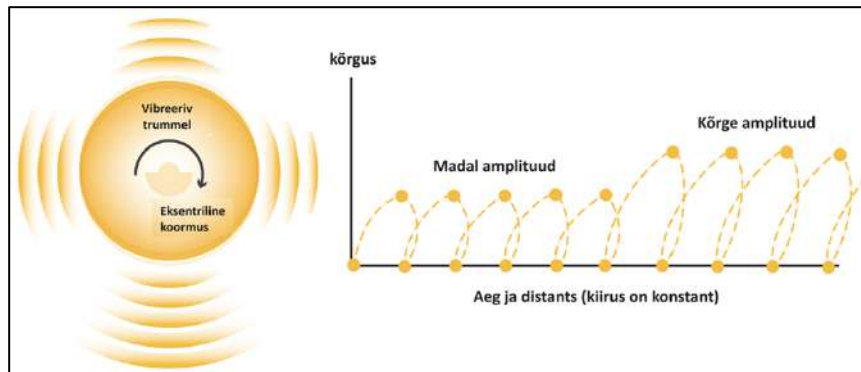
Peamised näitajad, millega vibrotihendamist iseloomustatakse, on:

- trumli võnkumise amplituud;
- trumli võnkumise sagedus;
- rulli liikumiskiirus tihendamise ajal.

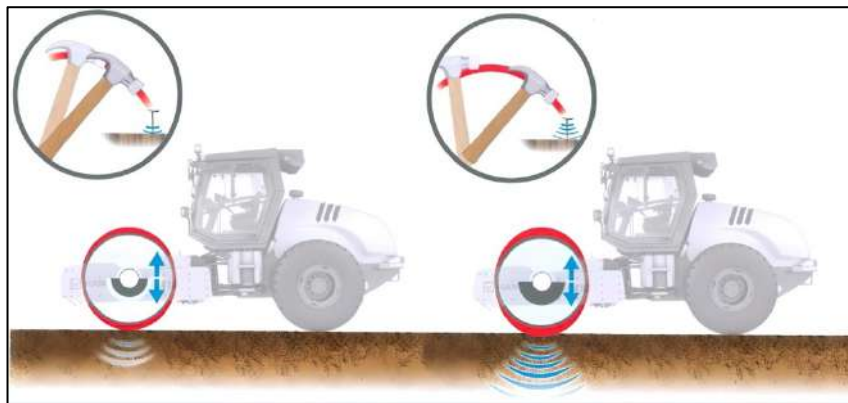
Amplituud on vibreeriva valtsi maksimaalne vertikaalne liikumine ühe täistsükli jooksul (joonis 4.4). Sama valtsi massi ja sageduse juures toodab suurema amplituudiga rull rohkem tihendusenergiat kui rull väiksema amplituudiga, joonis 4.5. Amplituudi muutmisega mõjutatakse trumlilt lähtuvalt koormust tihendatavale kihile. Kui pinnas on maksimaalse tiheduse lähedal, ei suuda see enam neelata trumlilt tulevat vibreerivat koormust, mistõttu hakkab rull „hüppama“ ning operaator tunnetab selget muutust masina käitumises. Taolist kihti edasi tihendades võib tihendusmasin saada kahjustatud, lisaks põhjustab see ka pinnase kobestumist. Sellel momendil peaks operaator vähendama kas amplituudi või jätkama tihendamist staatilise koormusega.

Kõrget amplituudi kasutatakse madalama kandevõimega (nihketugevusega) (vähe)plastsete pinnaste tihendamiseks; lisaks paksemate kihipaksuste tihendamisel. Madalat amplituudi kasutatakse suurema kandevõimega (nihketugevusega) pinnaste korral, lisaks õhemate

kihipaksuste tihendamisel. Mida õhemat kihti tihendatakse, seda väiksem peaks olema amplituud, et vältida kihi kobestamist.

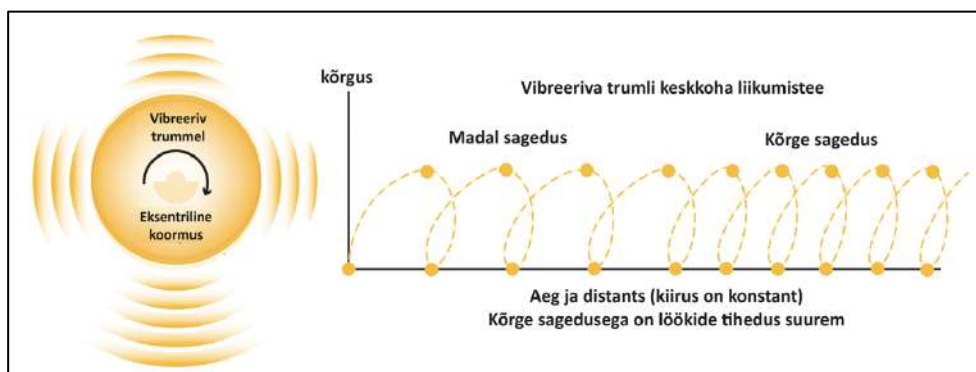


Joonis 4.4. Amplituud on vibreeriva valtsi maksimaalne vertikaalne liikumine ühe täistsükli jooksul. [10]



Joonis 4.5. Sama valtsi massi ja sageduse juures toodab suurema amplituudiga rull rohkem tihendusenergiat kui rull väiksema amplituudiga. [11]

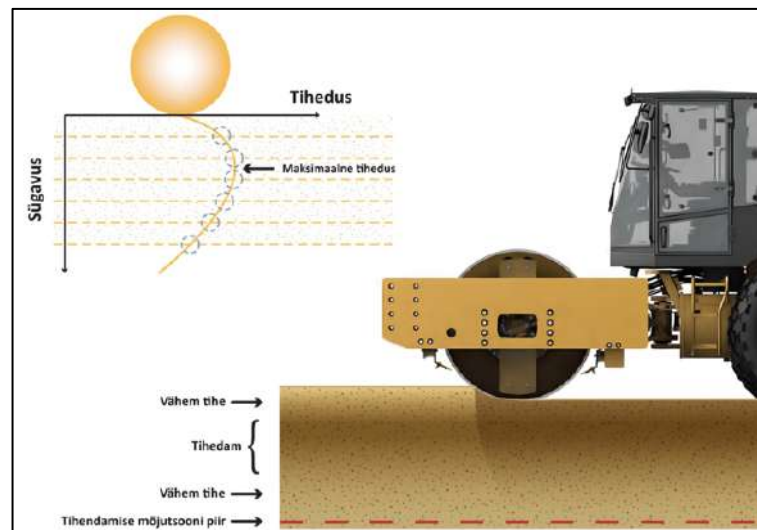
Sagedus on raskuse täistsüklite ehk pöörete arv ümber pöörlemistelje teatud ajaühiku jooksul, mida väljendatakse tavaliselt hertsides (Hz) või tsüklit minutis (vpm). Tüüpiline tihendamiseks kasutatav vahemik on 23...35 Hz (1380...2100 vpm). Oluline on seos rulli sageduse ja liikumiskiiruse vahel: soovitatavalt 1 võnge rulli liikumisteedkonna 2,5...3,0 cm kohta. Väikese võnkesageduse ja rulli suure kiiruse korral tekib tihendatud pinnale nn „pesulaua“ efekt.



Joonis 4.6. Vibrorulli madala ja kõrge sageduse visuaalne selgitus. [10]

Vibrorullidega tihendamisel tuleb arvestada, et tihendatava kihi paksuse suhtes on saavutatav tihendustegur varieeruv, joonis 4.7. Mõningates käsiraamatutes ja nõuetes on see lahendatud arvestades kihi keskmise tihendusteguriga, lisaks võidakse anda natuke leebemad tihendusteguri nõuded kihi alaosale. Üldiselt aga taolisi muutusi registreeritakse vaid siis, kui tihendusteguri kontrolliks kasutatakse radioaktiivsel isotoobil või elektrijuhtimisel põhinevaid mitte-radioaktiivseid mõõtmismetoodikaid, mis võimaldavad tihendustegurit kontrollida erinevatel sügavustel.

Eestis kontrollitakse tihendustegureid tihendatavate kihtide pealt valdavalt kasutades kas langevat või staatilist koormust, mistõttu vibrorulli tihendamisest jääv kohevam kiht võib mõõtetulemusi märkimisväärselt mõjutada (eriti ühtlaseteriste liivade, aga ka fraktsioneeritud killustike puhul), mistõttu tuleks kihid vajadusel viimistleda teistsuguse tihendamise moodusega (nt staatiline koormus, kõrgema sagedusega vibratsioon, ostsilleerimine) või kontrollida tihendustegurit eemaldades pealmise kobestunud kihi.



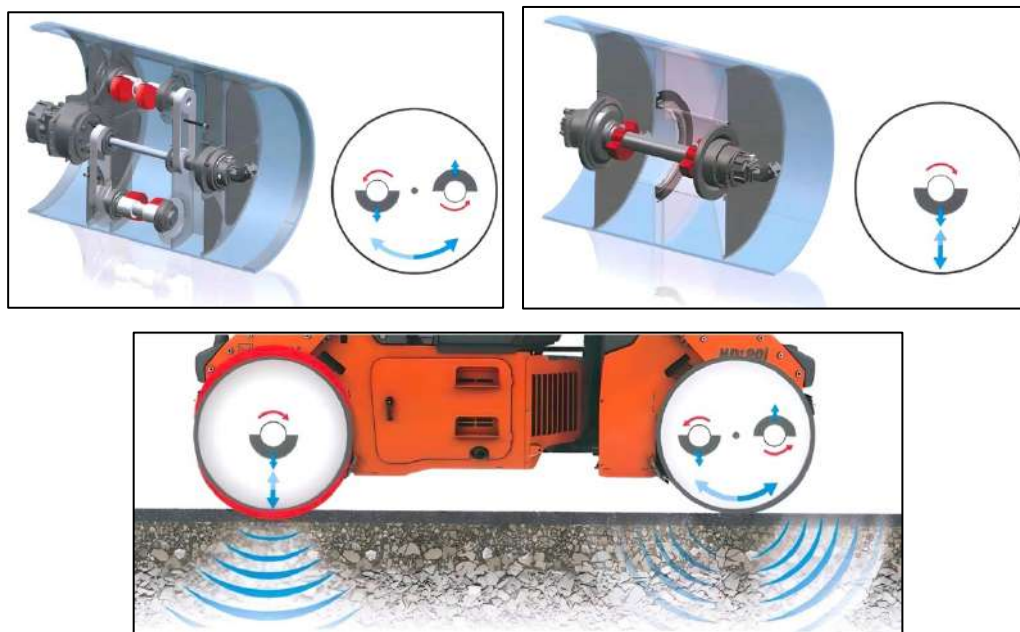
Joonis 4.7. Vibrorullidega tihendamisel jääb tihendatava pinna ülaosa vähem tihedaks (eriti ühtlaseteriste liivade, aga ka fraktsioneeritud killustike puhul), mistõttu tuleks kihid vajadusel kas viimistleda staatilise koormusega või kontrollida tihendustegurit eemaldades pealmise kobestunud kihi. [10]

Vibrotihendamise järgselt kihi ülemise osa tihendamiseks kasutatakse peamiselt staatilist koormust. Ühtlaseteriste pinnaste puhul see aga ei pruugi piisata ning selleks võib kasutada ka rullide taha paigaldatavaid vibroplaate (joonis 4.8), mis töötavad madala amplituudi ja kõrge sagedusega. Kasuks tuleb ka liivade kastmine (hoidmine optimaalse veesisalduse juures).



Joonis 4.8. Tihendamaks joonisel 4.7 kujutatud vähema tihedat pealmist kihti on võimalik kasutada taolisi vibrorulli taha paigaldatavaid vibroplaate. [11]

Dünaamilise tihendamise (vibrotihendamise) üheks liigiks on ka ostsillatsiooni tehnoloogia, kus tavapärase vertikaalkoormuse asemel suunatakse nihkejõud otse tihendatavasse kihti: kui tavalise vibrorulli valts liigub vertikaalselt üles-alla, siis ostsilleeriv valts liigub kontaktpunkti suhtes edasi-tagasi, joonis 4.8. Antud tihendamise viis on pehme ning ei põhjusta ümbritsevale keskkonnale tavapärast vibrorullile iseloomulikku vibratsiooni, kuid väga efektiivne. Kui tavapärane vibrotihendamine jätab tihendatava pinnasemassiivi ülemise osa kohevamaks (ehk vähem tihedamaks), siis ostsillatsiooniga antakse sellele osale kõrgem tihedus ning tihendamise tulemus on ühtlasem.

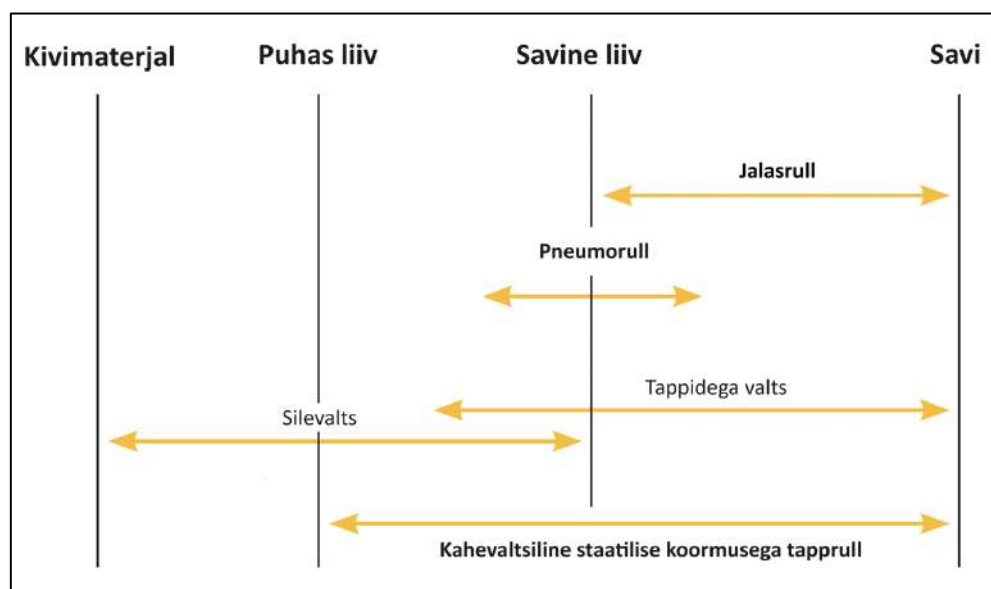


Joonis 4.8. Ostsilleeriv vs vertikaalselt vibreeriv trummel. [11]



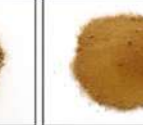



4.2 Sobiva tihendusmasina valik

4.2.1 Tihendatav pinnas või materjal

Tihendamismasina valikut mõjutavad peamiselt tihendatava pinnase / materjali omadused (kokkuvõttes pinnase nihketugevus ja plastsus) ja veesisaldus. Lähtekohad sobiva tihendusmasina tüübi valikuks olenevalt tihendatavast pinnasest on antud joonistel 4.9 ja 4.10, v.t ka peatükki 1.3.



Joonis 4.9 Lähtekohad sobiliku tihendusmasina valikuks sõltuvalt tihendatava pinnase tüübist. [10]

Savi <0,002 mm	Möll 0,002-0,063 mm	Liiv 0,063-2 mm	Kruus 2-63 mm	Veerised 63-200 mm	Rahnud >200 mm
					
Tihendatavus - raske tihendada seotuse tõttu - tihendusefekt sõltub suuresti niiskusesisaldusest - vajab suurt tihendavat energiat Tihendusseadmed Peamiselt - rasked ja keskmised ühevaltsilised (sile- ja tappvaltsiga) rullid - tranšeetihendajad ja rasked plaadid		Tihendatavus - sõltub terastikulisest koostisest - ületihendamine on ebasoovitav Tihendusseadmed - vibrotandemrullid ja tühe valtsilised (silevalts) vibrorullid - rasked ja keskmised plaadid		Tihendatavus - kihi paksus peab olema 3 korda paksem kui max teraläbimõõt - vajab suurt tihendavat energiat Tihendusseadmed Peamiselt - rasked ühevaltsilised rullid - rasked plaadid	

Joonis 4.10. Erinevate pinnaste tihendatavus ja sobilikud tihendusmasinad. [28]

Jäme kivimaterjal, sh aheraine ja fraktsioneeritud killustik (kivimaterjal)

Suurte kivide ümberpaigutamiseks (nihutamiseks) ning tiheda ja stabiilse mulde saamiseks jämedast kaljupinnasest tuleb kasutada rasked silevalts-vibrorulle.

Antud pinnasekategorია alla kuulub ka põlevkiviaheraine, mis on saadaval fraktsioonidena 0-90 mm ja 90-300 mm. Tegemist on kesktugevast kuni tugavast kaljust valmistatud kivimaterjaliga.

Fraktsioneeritud killustiku tihendamine toimub peale selle laotamist silevaltsrulliga (staatiline või vibro); harvadel juhtudel võidakse kasutada ka pneumorulle. Fraktsioneeritud killustiku tihendamisel vibrorullidega peaks viimased tihendamiskäigud olema tehtud staatilise koormusega, sest vibrotihendamine jätab ülemise kihiosa vähemtihedaks. Kui rulli valts ei jäta killustikukihi peale valtsi jälge ning kui tihendatud kihi ja valtsi vahele paigaldada lahtine killustikutükk, mis valtsi all pudeneb, on killustikalus tõenäoliselt piisava tihenduse juures.

Kruus ja liiv

Kruusa ja liiva tihendamiseks on majanduslikult kõige sobivam kasutada silevalts-vibrorulle.

Kruus ja liiv, mis sisaldavad vähem kui 10% peenosist (st on hästi dreenivad), on lihtsalt tihendatavad, eriti siis, kui on märjad. Kui trassi läheduses on veekogusid, siis on mittedrusid pinnaseid kasulik niisutada üle optimaalse (kuni $1,2W_0$). Sellega võib tihendatava pinnasekihi paksust, võrreldes optimaalse niiskusega, suurendada 20-30% ja saavutada tiheduse, mis ületab maksimaalse standardse tiheduse.

Ühtlase terastikuga liivade tihendamine on raskendatud ning nende kihtide ülaosa jääb vibrotihendamisel kohevaks. Seega viimased läbikud tuleks teha staatilise koormusega ja/või arvestada teisi peatükis 4.1 käsitletud viise.

Pinnaseid, mille $C_u < 2,0$ ei peaks pinnasetöödel kasutama. Taoliste pinnaste olemasolul peaks neid segama teiste pinnastega, mis suurendaks pinnase ebaühtlust.

Möll ja savi

Möll (Si) on mitteplastne peenosis, mida tavaliselt tihendatakse silevalts-vibrorulliga. Parima tihendustulemuse saavutamiseks ei tohiks mölli veesisaldus suuresti erineda tema optimaalsest veesisaldusest. Kui möllile lisada liiga palju vett, võib ta veelduda ja tema tihendamine osutub võimatuks.

Saviste möllpinnaste (clSi) tihendamisel saab paremaid tulemusi (vibro-)tapp- või pneumorullide kasutamisel.

Savide tihendamiseks sobivad (vibro-)tapprullid, kuna tapp tungib pinnasesse, lõhkudes osakeste vahel esinevad looduslikud sidemed. Pneumorulle võib kasutada väikese või keskmise plastisusega savide tihendamiseks.

Veesisaldus mängib väga olulist rolli savide tihendamisel. Savide tihendamise peamine eesmärk on saavutada ühtlane pinnasemass, kus ei ole tükikeste vahel tühimikke. Kui veesisaldus on liiga kõrge, kipub rull pinnasesse vajuma ja kui liiga madal, siis tükid ei allu rullimisele.

Sobiv veesisaldus ehk pinnase optimaalne niiskusesisaldus on ligikaudselt plastsuspiir pluss kaks protsenti.

Looduslik ja stabiliseeritud pinnas

Pinnaste stabiliseerimise ja selle tehnoloogiliste nõuete osas tuleb lähtuda kas projektis või vastavas juhendis esitatud tingimustest.

Kui vesi, sideaine ja olemasolevad aluspinnase materjalid on segatud, on järgmine samm tihendamine. Tihendamine peaks toimuma kohe pärast segamist ja kõik stabiliseerimisega seotud tööd peaksid olema lõpetatud valitud tööfrondil sama päeva jooksul (savipinnase lubistabiliseerimisel on võimalik segatud kihti töödelda ja tihendada ka hiljem, nt järgmisel päeval).

Saviste ja mölliste ehk keskmise- ja peeneteraliste pinnaste modifitseerimisel ja stabiliseerimisel tuleks esmane tihendamine teostada tapprulliga, mis tihendab pinnast alt ülespoole (v.t peatükk 4.2.2). Tapprulliga tuleks tihendada seni, kuni saavutatakse nõutav minimaalne tihedus, mida tavaliselt indikeerib olukord, kus tapprull tõuseb kihi pinnale. Seejärel kasutatakse kihi lõplikuks tihendamiseks siledavaltsilisi vibrorulle või pneumorulle.

Stabiliseeritud jäme- ja liitpinnaste tihendamiseks kasutatakse siledavaltsilisi vibrorulle.

Üldiselt on stabiliseeritud kihtide keskmiseks minimaalseks vajalikuks tihendusteguriks 95% maksimaalsest standardsest Proctor-teimist. Tihendatava kihi paksuse ja kasutatava tihendusmasina massi osas tuleb lähtuda peatükis 5 esitatud nõuetest olenevalt stabiliseeritava pinnase tüübist (kas plastne või mitteplastne pinnas).

Peale tihendamist teostatakse stabiliseeritud kihi lõplik profileerimine ja profileeritud kihi tihendamine silevaltsrulli või pneumorulliga.

Kergtäitematerjalid

Kergtäitematerjalidena mõeldakse siinkohal EVS-EN 13055 vastavaid materjale, peamiselt kergkruusa ja vahtklaaskillustikku (kerkillustik).

Kergtäitematerjal tiheneb nii niiskelt kui kuival. Tihendamine vibrorulliga vahetult kergtäitematerjali peal ei ole lubatud. Esmane tihendamine tehakse kas roomikutega töömasinaga, mille surve pinnale on 30...50 kPa kihipaksuses kuni 0,6 m või 150...200 kg vibroplaadiga kihipaksuses kuni 0,4 m. Vajaminevateks tihenduskäikudeks on üldjuhul 2...6 ning tihendamise võib lõpetada, kui pind on tasane, roomikutest (või vibroplaadist) ei jää kihi pinda vajumise jälgi ning kerkillustiku kasutamisel on tuvastav osade suuremate tükide purunemine. Väga nõrkadel pinnastel võib olla vajadus esimese kihi paksust suurendada võimaldamaks kanda ehitusmasinaid ning et mitte rikkuda loodusliku pinnase struktuuri.

Peamine tihedus antakse läbi 0,15...0,20 m paksuse mineraalmaterjali kihi kasutades keskmise kuni raske vibrorulliga ≥ 4 tihendamiskäiku (joonised 4.11 ja 4.12). Tiheda kergkergtäitematerjalist kihi elastsusmoodulina kasutatakse arvutustes 50 MPa. Kergtäitematerjalide kandevõimet ei mõõdetata vahetult nende, vaid nende peale paigaldatud täitematerjalikihi pealt.

Kui kergtäitematerjale kasutatakse hoonealuste põrandate täitematerjalina, tuleb tihendamisel ja kvaliteedikontrollis lähtuda vastavatest juhenditest, mida siinkohal ei käsitleta.

Kergkillustik tiheneb ca 15...25% ehk tihenemisaste on 1,15...1,25x ning kergkruus 5...15% ehk 1,05...1,15x. Õhemate kihtide korral (ca ≤ 30 cm) teede ja tänavate vajumiste ja külmarkerkehajustuste parandamisel on tihenemisaste suurem ning paksemate kihtide kasutamisel väiksem. Kergtäitematerjali kihi tihendusastet hinnatakse ja mõõdetakse geodeetiliste mõõdistustega ja/või saatelehtede arvestustega (ehituseks kulunud materjalide koguse arvestus). Geodeetilise mõõdistusega peab arvestama, et kui ehitamine toimub nõrkade ja kokkusurutavate pinnaste peale, on kihipaksuse mõõtmine ilma vajumisreeperite kasutamisetä ebatäpne.



Joonised 4.11 ja 4.12. Kergtäitematerjal laotatakse ja tihendatakse kas roomikekskavaatori või buldooseriga, millega antakse ka esmane tihendus, ümbritsetakse geotekstiiliga ning kaetakse min 0,15...0,20 m mineraalmaterjalikihiga, mille pealt antakse vibrorulliga lõpptihendus. [Fotod: Timo Taniel ja Leca]

4.2.2 Tihendusmasina tüübid

Kui vähese peenosisesisaldusega jämedateraliste pinnaste tihendamine on suhteliselt lihtne (nendele sobivad siledavaltsilised vibrorullid, peamiselt tuleb arvestada vaid tihendatava kihi paksusega ja nõrkade pinnaste esinemisega tihendatava kihi all), siis plastseid omadusi omavate ja peeneteraliste pinnaste tihendamine on keerukam.

Plastsete pinnaste tihendamiseks on võimalik kasutada:

- jalasulli (joonis 4.13);
- staatilise koormusega kahevaltsilist tappulli (joonis 4.14);
- tappidega valtsiga vibrorulli, kus valikus on olenevalt tootjast kahte tüüpi tapid (joonis 4.17):
 - o ovaalsed ja rohkem väljapoole eenduvad;
 - o ristkülikukujulised;
- pneumorulli (joonis 4.19).

Lampjala-tüüpi Jalasrullide väljajenduvad tapid tungivad tihendatava kihi pealispinnast läbi ning tihendavad sügavamaid kihte (v.t joonis 4.13). Trumli tihenduspinnaal on väljaulatuvad "jalad", mis tungivad pinnasesse ja tihendavad seda efektiivselt, inglise keeles on taoliste rullide üldnimetus „*sheepfoot rollers*“ ehk otsetõlkes lambajala-rullid. Tihendamissügavus on kuni 20 cm. Tulenevalt tihendusmasina eripärast jääb pealmine

pinnasemassiivi osa kohevaks, kuid mis tihendatakse kas läbi peale paigaldatava järgmise kihi või mis viimistletakse silevaltsrulli või pneumorulliga. Jalasrullide väljaenduvad tapid aereerivad tihendatava pinnase ülaosa võimaldades seda kuivatada (eeldusel, et sademetest täiendavat vett ei lisandu, vastasel juhul võib kohev pinnas veeküllastuda). Jalasrullide kasutamine on harv ning seda asendavad tänapäevasemad tihendusmasinad.



Joonis 4.13. Jalasrulli väljaulatuvad "jalad", mis tungivad plastsesse pinnasesse, aereerivad ja tihendavad seda. [37]

Staatilise koormusega kahevaltsilisi tapprulle, joonis 4.14, kasutatakse laialdaselt jäätmejaamadesse ladestatavate jäätmete tihendamiseks, kuid need sobituvad ka vähe- kuni väga plastsete pinnaste tihendamiseks. Antud tihendamismasinad on kõrge jõudlusega liikudes tihendamisel tüüpiliselt kiirusega 10...15 km/h (võimalik on kuni umbes 30 km/h). Tihendamisel ülemine pinnasekiht kohevaks ei jää. 20...30 cm paksuse kihi tihendamiseks piisab tavaliselt 2...3 käigust. Antud tihendusmasinaid on mõistlik kasutada suurtes projektides, kus tihendamiskäigud on pikad (ning näiteks kui pinnased laotatakse skreeperite abil, mis võimaldab kõrget tootlust). Umbes 30 cm paksuste kihtide tihendamisel on antud rullid 2...3 korda tootlikumad võrreldes ühevaltsiliste tappidega vibrorullidega.



Joonis 4.14. Staatilise koormusega kahevaltsiline tapprull. [36]

Vibrorullid (silevalts ja tapprullid) on kõige universaalsemad tihendusmasinad, sest suudavad pakkuda kõiki joonisel 4.1 antud tihendamise tüüpe. Silevaltstrumlitele on võimalik peale panna „koorikud“ (joonised 4.15 ja 4.16), millel on küljes tapid ning kasutada sama rulli nii plastsete kui mitteplastsete pinnaste tihendamisel.

Vibrotihendamiseks soovituslikud liikumiskiirused:

- 1...2,5 km/h on parimad kaljumaterjalile ja plastsetele pinnastele;
- 2...5 km/h on parimad kruusadele ja liivadele.

Silevaltstrumlit kasutatakse mitteplastsete ja väheplastsete (hinnanguliselt $I_p < 12$) pinnaste tihendamiseks. Tapprullidele pakutakse olenevalt tootjast valikut ovaalsete ja ristkülikukujuliste tappide vahel, joonis 4.17. Ovaalseid tappe soovitatakse kõrgema plastsuse (hinnanguliselt alates keskmise plastsusega pinnased) ja suurema kihipaksusega (200...500 mm), ristkülikukujulisi tappe kuni keskmise plastsuse ja väiksema kihipaksusega (kuni 200 mm) pinnastele. Tappide kuju ei ole siiski kohustuslik reegel, mida jälgida, tegemist on soovitusliku lähenemisega.

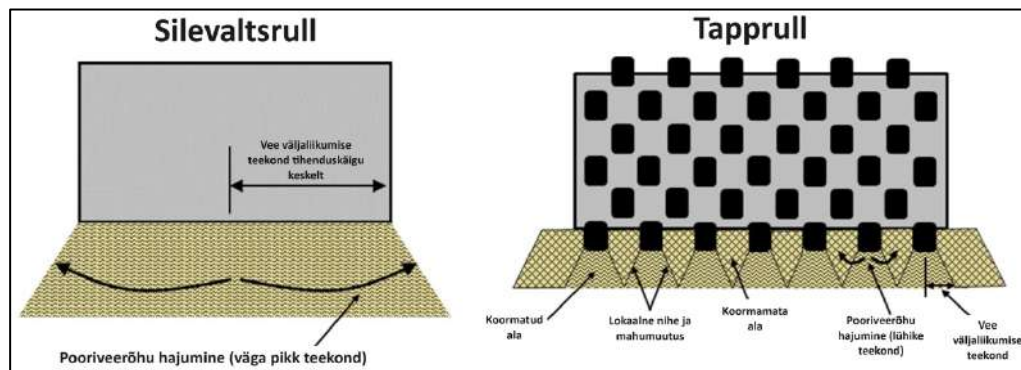


Joonised 4.15 ja 4.16 Tappidega koorikud, mis paigaldatakse vibrorulli silevaltsile (Fotod: J.J. Scheckel Heavy Equipment Corporation [35] ja Sven Sillamäe)



Joonis 4.17. Olenevalt tootjast pakutakse kas ovaalseid ja/või ristkülikukujulisi tappe. Ovaalsed sobivad kõrgema plastsusega pinnastele paremini. [10]

Tapprullide kasutamise eelis võrreldes silevaltsrulliga plastsete pinnaste tihendamisel on esitatud joonisel 4.18. Tapprullid esiteks sõtkuvad pinnast, kuna nende tappide alla jääv kontaktpinge on kõrgem, mis silevaltsrulli all. Olulisem on see, et tapprolli all hajub tihendamisest tekkiv kõrge pooriveerõhk kiiresti, mis võimaldab seeläbi vähendada pinnase poorsust (ehk pinnast tihendada).



Joonis 4.18. Tapprulli all hajub tihendamise tekkiv kõrge pooriveerõhk kiiresti, mis võimaldab seeläbi vähendada pinnase poorsust ehk pinnast tihendada ning tihendatav pinnas ei hakka „õõtsuma“ / „vetruma“. [10]

Tapprull tihendab pinnasekihti selle allosast ülespoole. Peale seda, kui tapprull on oma tihendamisevõime ammendanud, ei tungi rulli tapid enam tihendatavasse pinnasekihti rohkem kui 3...5 cm ehk rull tõuseb tihendatava kihi pinnale. Tihendamata jäänud pealiskiht tuleb tihendada teist tüüpi rullidega (näiteks silevaltsrulliga).

Rull võib tõusta tihendatava kihi pinnale enne, kui kihi nõutav tihendus on saavutatud. Selle vältimiseks võiks pinnast pärast rulli 2...3 esimest läbikut veidike kobestada ja lisada rullile täiendavat koormust.

Ühtlane tihendus kogu tihendatava kihi paksuses on võimalik saavutada juhul, kui pinnas on piisavalt kobe ja töödeldav nii, et tapp tungib rulli esimestel läbikutel läbi kogu kihi. See kindlustab kihi tihenemise selle alapinnast ülespoole. Seetõttu tuleks pinnas, mis on kihi laotamise ajal ja peale laotamist kihil liikunud mehhanismide mõjul või muul põhjusel tihenenu, enne tihendamise algust eelnevalt kobestada. Kobestamisega tagatakse ka kihi homogeensus.

Reeglina tuleks eelnevalt kobestada ka mulde aluspinnase pealmine kiht, et võimalik oleks tagada nõutud tihendustegur vähemalt 0,94.

Suhteliselt tihedate ja klompi kuivanud pinnaste tihendamiseks tapprullid üldjuhul ei sobi (kui rull ei ole võimeline pinnaseklompe purustama).

Sama rulli läbikute arvu juures tiheneb õhem kiht rohkem, kui paksem kiht. Juhul kui tapprulliga tihendamisel nõutavat tihedust ei saavutata, tuleb üldjuhul vähendada tihendatava kihi paksust või võimalusel suurendada rulli massi.

Kui tihendamisel tapprull kerkib kihi pinnale liiga ruttu (näiteks peale kahte kordusläbikut), siis tihendatava kihi alumine osa ei saa tihendatud nõutud tihedusele ja see on indikaatoriks, et rull on liiga kerge või tapi kontaktpind on liiga suur ning rulli massi tuleks suurendada. Kui tihendamisel peale eeldatavete kordusläbikute arvu teostamist rull ei kerki tihendatava kihi pinnale, on see indikaatoriks, et rull on liiga raske ja tapi kontaktpinna erisurve ületab tihendatava pinnase kandevõime. Kui tapi kontaktpinna erisurve on korrigeeritud, siis edasi ainukeseks muutujaks saab olla veel ainult kordusläbikute arv.

Olulisteks nõutava pinnase tiheduse saavutamise eeldusteks on lisaks pinnase optimaalsele veesisaldusele ja kihipaksusele ka rulli tapi tugipinna erisurve ja kordusläbikute arv.

Soovitav rulli tapi kontaktpinna erisurve on erinevatel pinnastel erinev (tabel 4.2), sõltudes pinnase kandevõimest, mistõttu lõplik valik tuleks teostada objektil tuginedes proovitihendamisele.

Tabel 4.2. Soovitavad optimaalsed arvutuslikud erisurved tapi tugipinnale (kehtivad pinnastele optimaalse niiskuse juures).

Pinnas	Optimaalne erisurve
Mölline/savine liiv (siclSa, clsiSa)	0,7...1,5 MPa (7...15 kg/cm ²)
Liivane möll/savi (saSi, saCl)	1,5...4 MPa (15...40 kg/cm ²)
Savi (Cl) ja möll (Si)	4...6 MPa (40...60 kg/cm ²)

Pneumorulle, joonis 4.19, kasutatakse pinnasetöödel harva, kuid nendega on võimalik nt kruuskattega teedel saavutada tasase, kõrge kvaliteediga ja väga kõrge tihedusega viimistletud kihid. Ka võimaldavad pneumorullid hästi viimistleda nii stabiliseeritud kihte kui fraktsioneeritud killustikust killustikaluseid.



Joonis 4.19. Pneumorull viimistlemas kruuskattega tee või stabiliseeritud pinnase pealiskihti. [29]

Tavaliselt kujutab pneumorull endast kahe telje vahele asetatud nn konteinerit või platvormi, kusjuures tagateljel on tavaliselt 3-5 ratast ja esiteljel vastavalt 2-4 ratast, mis on nihutatud nii, et esiratta jälg satuks tagarataste vahele.

Staatiline koormus tekitatakse raskuste asetamisega nn. konteinerisse või platvormile nii, et rattale langev mass on 1000-12'000 kg (rulli kogumass jagatud rataste arvuga).

Lisaks rulli massi mehhaanilisele suurendamisele saab pneumorulli tihendavat efekti täiendavalt tõsta rehvirõhu tõstmisega – mida suurem on rulli rehvirõhk, seda suurem on rehvi kontaktsurve pinnasele ja seda suurem on ka rulli tihendamisvõime.

Raskemate pneumorullide kasutamisel tuleb tähelepanu pöörata sellele, et saviste pinnaste veesisaldus ei oleks liiga kõrge selleks, et vältida ülemäärase poorirõhu tekkimist pinnases.

Ülemäärase poorirõhu tekkimise indikaatoriks on pinnase lainetamine või kerkimine rulli all.

Kuna pneumorull ei õhuta tihendavat pinnast nii, et ta tihendamise ajal märkimisväärselt kuivaks, siis peaks pinnase veesisaldus pneumorulliga tihendamisel olema optimaalse lähedal.

Selleks, et tekiks pneumorulli all pinnase tihenemine, peab pinnases tekkima püsiv deformatsioon. Kui aga rataste all tekib pinnase kerkimine ja lainetus, on rulli mass ja rehvirõhk liiga suured ning neid tuleks koheselt vähendada. Konstantse rulli massi ja rehvirõhu juures on pinnase tiheduse edasine kasv peale pneumorulli 6...8 korduslähikut kaduvväike. Rehvirõhu järk-järguline suurendamine tihendamise ajal on pinnaste tihendamisel üks põhitingimusi (tihendamise algetapil on rehvirõhk 0,2...0,3 MPa, lõppetapil kuni 0,8 MPa sõltuvalt tihendatavast pinnasest). Rehvirõhk liivade tihendamisel peaks olema mitte üle 0,3 MPa, mällise/savise liiva tihendamisel 0,3...0,4 MPa ja nidusate pinnaste tihendamisel 0,6...0,8 MPa.

Esimesel ja viimasel lähikul tuleb rulli kiirus valida väike (2...2,5 km/h), kõigil ülejäänud lähikutel võib rulli kiirus olla suurem (8...10 km/h).

Võrkrulle, joonis 4.20, kasutatakse peamiselt nõrgemapoolse kivimaterjali (Eesti lubjakivimurru jaoks sobiks hästi) purustamiseks ja sellest rajatud kihi tihendamiseks, aga ka (märja) peeneteralise materjali tihendamiseks, sest tihendaja toimib sarnasel põhimõttel, mis staatilised koormusega tapprullid.



Joonis 4.20. Võrkrull tihendamas ja purustamas väga jämedateralist pinnast (kaljumaterjali). [30]

Suure energiaga lööktihendajad (ing. *High Energy Impact Compaction, Impact Roller Compaction*), joonised 4.21 ja 4.22, tekitavad maapinnale kõrge löökenergiaga impulsse, mis seejärel tihendab (kohevat mitteplastset peene- ja jämedateralist) pinnast olenevalt seadme massist 2...3 m sügavuses. Tihendamise trumlid võivad olla kas kolm-, neli- või viisnurkse kujuga.

Tüüpiliselt toimub tihendamise rulliku kattuvate radade seeria vormis, kus esmane rullimine toimub päripäeva ja sekundaarne/vahepealne rullimine vastupäeva. Iga raja puhul

tehakse mitu läbimist, sõltuvalt tihendamise nõuetest, ning radade vaheline nihe sõltub kasutatavast trumli tüübist. Mõnel objektil võib olla kasulik pinda vahetult enne rullimist niisutada.



Joonised 4.21 ja 4.22. Suure energiaga lööktihendajad (ing. *High Energy Impact Compaction* ehk *HEIC*). [31]

Langeva koormusega lööktihendajaid (ing. *Rapid Impact Compaction* ehk *RIC*), joonised 4.23 ja 4.24, kasutatakse pinnaseparanduse töödes tihendamaks kohevaid mitteplastseid peene- ja jämedateralisi pinnaseid kuni sügavuseni 6 m. Seadmehel olev hüdrauliline vasar tihendab pinnast löökoormusega.



Joonised 4.23 ja 4.24. Langeva koormusega lööktihendajaid. [32]

4.2.3 Tihendamine kitsastes kohtades

Käsitsi opereeritavad väiksemaid tihendamisseadmeid kasutatakse kohtades, kus ei ole võimalik või praktiline kasutada eelnevalt käsitletud suuremaid ja raskemaid seadmeid. Väikeste tihendamisseadmete valik on suur, aga üldiselt jagunevad need kolme kategooriasse:

- tambid ja rammid;
- vibroplaadid (ühes või kahes suunas liikumisega);
- väikerullid (kas siledate või tappidega valtsidega).

Väikeseadmete valik ja tihendamissügavus on käsitletud peatükis 5.

Lisaks on kitsaste kohtade tihendamiseks kasutusel erinevad **ekskavaatori / ratastraktori / väikeseadme tööorgani külge paigaldatavad lisaseadmed** nagu tihendus rattad (joonis 4.26 plastsetele pinnastele) ja vibroplaadid (joonis 4.25 mitteplastsetele pinnastele).

Tihendus rattad tihendavad pinnast kihi põhjast ülespoole (sarnaselt tapprullidega), purustades ka klompunud pinnasetükke ja täites tühimikke vältides sellega nn. sillaeefekti tekkimist ja tühikuid. Tihendamisratta kasutamisel on võimalik tihendada korraga paksemaid kihte, kui vibroplaadiga tihendamisel. Tihendamisratta kasutamisel tuleb kõige viimane tihendatav kiht tihendada mõne muu sobiva tihendus seadmega, sest ratas jätab pealmise kihi kohevaks (sama põhimõtte, mis jalasrullidega).

Masina tööorgani külge paigaldatavate lisaseadmete tüübi valik ja tihendamissügavus tuleb leida sarnaselt muude käesolevas juhendis esitatud põhimõtete kohaselt. Seadme tihendamissügavus sõltub pinnasele avaldatavast tihendamisenergiast, mis omakorda sõltub kasutatavast masinast. Kuna antud juhul on varieeruvus väga suur, siis tuleb lähtuda nii käesoleva juhendi juhistest muudele seadmetele, kui konkreetse seadme kasutusjuhendist, kuid üldjuhul ei ületa antud seadme gruppi tihendamissügavus 25...30 cm.



Joonised 4.25 ja 4.26. Ehitusmasinate tööorganite külge paigaldatavad tihendus seadmed: vibroplaat ja tihendamisrattas. [33] ja [34]

4.2.4 Nõlvade tihendamine

Muldkeha tihendamise tehnoloogiat käsitletakse peatükis 7, mille kohaselt tuleb tihendamata pinnas (vähemalt umbes 0,3 m paksune kiht) kas nõlvalt eemaldada, või kui see ei ohusta muldkeha püsivust, võib selle ka alles jätta. Vastav hinnang tuleks anda geotehnikul.

Kui muldkeha nõlvadelt ei soovita tihendamata pinnast eemaldada ning kui seda ei ole muldkeha nõlva püsivust ohustamata võimalik alles jätta, tuleb muldkeha nõlvade tihendamiseks kasutada erimeetmeid. Muldkeha servadel oleva selle pinnase tihendamiseks, mida ei ole turvaliselt võimalik tavapäraste tihendamismasinatega tihendada (muldkeha horisontaalsete kihtide tihendamiseks kasutatavad pinnaserullid, mis nõlvale liiga lähedal olles võivad variseda), võidakse kasutada kas kergemaid tihendamismasinaid (vibroplaadid), robotiseeritud või kaugjuhitavaid kergemad tihendus masinad või nõlvatihendajaid.

Nõlvatihendajateks on ekskavaatori tööorgani külge kinnituvad (vibro)rullid, joonis 4.27, mida on nii sileda kui tappidega valtsiga vastavalt mittenidusatele ja nidusatele pinnastele.

Samuti leidub nõlvatihendajaid, mis toimivad eraldiseisvatena ning mida vintsitakse nõlvadel üles-alla.

Muldkeha nõlvade tihendamiseks kasutatakse ka autokraanadele, ekskavaatoritele või traktoritele ripp- või haakeseadmetena monteeritud (vibro)rulle:

- mulde ehitamisel mitte- või väheplastsetest ($I_p \leq 12$) pinnastest võib nõlvade tihendamiseks kasutada haakevibrorulli. Rull liigub nõlva tihendamisel alt üles.
- plastsete pinnaste puhul võib nõlvade tihendamiseks kasutada staatilise koormusega (tapp)rulle või vibrotampereid.



Joonis 4.27. Ekskavaatori tööorgani külge kinnituv nõlvatihendaja. [38]

Kui tihendamistöö tehakse nõlvatihendajatega ning kui pinnas on lähedal optimaalset veesisaldust, on keskmine saavutatav tihendustegur umbes 92...95%, mida võib lugeda piisavaks.

Nõlvade tihendamine nõlvatihendajatega on eriti aktuaalne olukorras, kus nõlvad kaetakse püsiva kattmaterjaliga, nt geomembraanid, tsement- ja asfaltbetoon jms.

Nõlvade tihendamisel peab arvestama, et osa pinnast, eriti liivade korral, võib nõlval variseda, mistõttu vajab nõlv järgnevat profileerimist.

4.3 Pideva tiheduse kontrolli meetmed

Rulliga integreeritud pideva tihendamise kontrolliga (CCC ehk Continuous Compaction Control) saadakse infot selle kohta, kuidas mõõdetav pinnas või kivimaterjal („rock“) käitub dünaamilise koormuse mõjul, mille mõõtmiseks ja registreerimiseks on rullid varustatud kiirendusandurite, protsessorite ja ekraaniga (vibreerimisega rulli läbimise ajal toimub pidev kineetilise energia vahetus rulli trumli ja rulli/pinnase vibreerimise vahel).

Nii pinnase jäikus kui ka rulli vibratsiooni neeldumine muutuvad tiheduse suurenemisega. Vibratsioonikäitumist analüüsides saab teha järeldusi tihendamise kvaliteedi kohta. See analüüs võib põhineda erinevatel põhimõtetel ning seega on erinevatel tootjatel ka erinevad CCC süsteemid.

Pideva tiheduse kontroll kasutades pinnaserulle allub standardile CEN/TS 17006, kus antakse nõuded, millele peavad vastama nii tihendusmasinad kui tihendatavad pinnased. Käesolevalt ei käsitleta mõõtesüsteemi nõudeid, sh nõudeid tulemuste kuvamiseks ja väljavõtuks eeldades, et kui pinnaserull vastab standardile CEN/TS 17006, siis on vajalikud nõuded täidetud. Lisaks on kõikidel tootjatel erinevad süsteemid (vastates samaaegselt standardi nõuetele), mistõttu käesolevalt ei ole võimalik anda ette kindlat malli, mille põhjal tuleb tulemusi esitada. Ka võidakse CCC süsteemi kasutada erinevatel eesmärkidel, mistõttu on vajaliku info esitamine sõltuv kasutuseesmärgist, nagu:

- 1) CCC kalibreeritakse kaudselt mõõtma mõõdetava kihi tihedust ja jäikust kasutades saadavaid andmeid kvaliteedi tõendamiseks. See nõuab eelnevat kalibreerimist CCC mõõtmisväärtuse ja valmis kihile seatud spetsifikatsiooni vahel. Antud meetod sobib nii jäikuse (hinnang kandevõimele) kui kaudseks tiheduse mõõtmiseks ühtlaste omadustega nii jämedateraliste kui liitpinnaste puhul, mille peenosakeste ($\leq 0,063$ mm) osakaal on alla 15%. Iga materjalitüübi puhul tuleb läbi viia kalibreerimise protseduur.
- 2) CCC nõrkade alade analüüs ja nende asukohtade dokumentatsioon kvaliteedikontrolli eesmärkidel. Antud meetodit kasutatakse piirkondade leidmiseks, kus CCC mõõtmise väärtused on madalaimad, ja kus tehakse seejärel täiendavad mõõtmised sobiliku mõõtmeseadmega. Antud meetod sobib jämeda- ja peeneteralistele ning liitpinnastele. Erilist tähelepanu tuleb pöörata pinnaste veesisaldusele (liiga kõrge veesisaldus vähendab pinnase mõõteväärtusi). Pinnaserulli kalibreerimist ei vajata.
- 3) CCC kasutamine maksimaalse võimaliku või saavutatava tihendusastme dokumenteerimiseks. Meetod hõlmab CCC mõõtmisväärtuste saamise protseduuri tihendamise ajal, kuni CCC väärtus suureneb mitte rohkem kui määratud protsendi võrra võrreldes eelmise läbimisega. See meetod sobib igat tüüpi jämedateralistele ja liitpinnastele ning kivitäitematerjalile („rock“).

Mõõdetavaid CCC väärtusi mõjutavad:

- vibrorulli tüüp ja mass: üldiselt peaks kasutama ühevaltsilisi pinnaserulle. Mida suurem on rulli mass, seda paksemat kihti saab tihendada ja samaaegselt ka mõõta.
 - Kui kasutataval rullil on kasutusel „intelligentne“ süsteem, mis muudab tihendamise ajal automaatselt amplituudi ja/või sagedust, siis sellel rullil tuleb CCC mõõtmise kasutamise ajaks amplituud ja sagedus fikseerida (ehk mõõtmise ajal varieeruvus ei ole lubatud);
- vibratsiooni amplituud: CCC süsteemi mõõtesügavus on kõrge amplituudiga suurem, kuid samaaegselt tuleb arvestada, et kõrge amplituudi kasutamine võib kobestada tihendatava kihi pealispinda; lisaks võib rull või hakata „hüppama“, sellisel juhul tuleb mõõtmine teostada madala amplituudi tingimustes;
- vibratsiooni sagedus mõjutab CCC mõõteväärtusi, mistõttu kasutada tuleb sama sagedust, mis kalibreerimisel kasutati;
- rulli liikumiskiirus: madalamate liikumiskiiruste juures saadakse reeglina kõrgemad CCC mõõteväärtused;

- rulli liikumissuund: reeglina tuleks mõõtmist teosta vaid ühes liikumissuunas. Kui CCC mõõtmise ajal on vajalik kasutada edasi-tagasi liikumist, peab eelnevalt olema kontrollitud, kas see mõjutab mõõtetulemust ja kuidas;
- mõõtmise sügavus sõltub rulli joonkoormusest, vibratsiooni amplituudist ja sagedusest ning tihendatava pinnase jäikusest, aga ka tihendatava pinnase all oleva kihi jäikusest. Ühtlaste tingimuste juures võib mõõtmis sügavust hinnata tabeli 4.3 abil, kus on arvestatud kruusase pinnase ja silevaltsrulliga;
- pinnase ebaühtlane jäikus mõjutab mõõtmistugevust tugevalt. CCC mõõtmist ei tuleks kasutada vahetult aluspinnasele rajatud (ehk esimeselt) kihilt, vaid mõõtmisega tuleb alustada järgmiselt (ehk teiselt) kihilt. Seda seetõttu, et mõõtmis sügavus on reeglina suurem, kui tihendatava kihi paksus.

Tabel 4.3. Näidis orienteeruvast CCC süsteemi mõõtesügavusest, kui kasutusel on silevaltsrull kruusasel pinnasel, vastavalt CEN/TS 17006.

Rulli tüüp	Rulli mass	Staatiline lineaarne koormus	Madal amplituud (0,8 – 1 mm)	Kõrge amplituud. (1,5 – 2 mm)
Kerged pinnaserullid	< 10 t	15 – 30 kN/m	u. 0,4 m kuni 0,6 m	u. 0,6 m kuni 1,0 m
Keskmiised pinnaserullid	10 – 15 t	20 – 40 kN/m	u. 0,4 m kuni 0,8 m	u. 0,6 m kuni 1,5 m
Rasked pinnaserullid	15 – 22 t	40 – 60 kN/m	u. 0,6 m kuni 1,2 m	u. 1,0 m kuni 2,0 m
Väga rasked pinnaserullid	> 22 t	60 – 80 kN/m	u. 0,6 m kuni 1,2 m	u. 1,0 m kuni 2,5 m

Mõõdetavad pinnased ja pinnad

Pidevat tihedusekontrolli kasutatakse koos vibrorullidega, seega mõõdetav pinnas peab olema nendega tihendatav. Kõige paremini sobivad CCC süsteemi kasutamiseks pinnased, mille peenosisesisaldus ei ületa 15% ja veesisaldus jääb alla optimaalse.

Liitpinnasete puhul, milles on peenosiseid üle 15%, tuleb erilist tähelepanu pöörata pinnase veesisaldusele ning nende kihtide mõõtmine on võimalik vaid ühtlaste tingimuste (nii pinnas kui selle veesisaldus) korral.

Peeneteraliste pinnaste korral ei ole CCC kasutamine üldiselt soovituslik.

CCC süsteem ei ole kuigi hästi sobilik (väga)ühtlaseteriste pinnaste kvaliteedikontrolliks, sest taoliste pinnaste puhul kipub kihi ülaosa jääma kohevaks. Väga ühtlaseteriste pinnasete lõplik tihedus on soovituslik anda tihendades läbi pealmise kihi.

CCC mõõtmisi mõjutab viimasajuga pehmenenud kihi pealne pind mõõtetulemusi vähendades.

Rulli trummel peab olema täielikult ja kogu oma laiuses kontaktis mõõdetava kihi pinnaga, vastasel juhul ei saa CCC mõõtmisväärtusi kasutada. Näiteks mõõdetava pinna kihis ei tohi olla veoauto ülesõidust sisse jäänud roopaid.

Mõõdetav kiht või tsoon peaks koosnema võimalikult ühtlasest materjalist, kuna trumli all olevad lokaalselt tugevalt varieeruvad kontaktitingimused (nt liiv ühel küljel ja veerised teisel) moonutavad CCC mõõtmisväärtusi, mida ei saa tihendamise hindamiseks kasutada isegi, kui pind on piisavalt tasane. Lisaks peaks täitematerjal olema võimalikult homogeenne, ilma tugevalt varieeruva materjalita, nagu veerised või kivid, peenosakeste

kogunemine või tugevalt varieeruv veesisaldus. Vastasel juhul on mõõdetud tulemuste tõlgendamine keeruline.

CCC-d saab kasutada töödeldud (stabiliseeritud) pinnastel, kuid ainult enne kihi formeerumist.

Aeg, mis jääb pinnasemassiivi tihendamise ja CCC mõõtmise vahele võib mõõtetulemusi mõjutada, eriti kui pinnase veesisaldus on kõrge. Tihendamise lõpetamise ja mõõteperioodi vaheline aeg peab olema võimalikult lühike, kuna see võib põhjustada CCC mõõtmisväärtuste muutusi. Erinevuste põhjuseks võivad olla nii liiklusest kui ilmastikust (nt sademed) tulenevad mõjutused (ilmastiku ja pikemate seisuaegade mõju tihendamise lõpetamise ja järgnevate mõõtmisperioodide vahel mõjutavad CCC-ga mõõdetud väärtusi). Mida pikem on see periood, seda problemaatilisem on esialgse tulemuse taasesitamine.

Nõuded seadme kasutamiseks CCC mõõtmiseks

CCC mõõtmiste ajal peab:

- vibrorulli sagedus olema konstantne vahemikus $\Delta f < 2$ Hz;
- amplituud olema konstantne vahemikus $\Delta a < 0,1$ mm;
- töökiirus olema konstantne vahemikus $\Delta v < 1$ km/h.

Trumli vibratsioonikäitumine peab olema korduv. Perioodilised ebakorrapärasused rullide mõjude tõttu (nt kulunud laagrid, tasakaalustamata trummel) tuleb parandada asjakohase remondiga; vastasel juhul ei tohi selliseid rulle kasutada mõõterullidena.

Mõõteseriad, mis määratakse vahetult üksteise järel samal mõõtemisjäljel, peavad olema sarnaste CCC mõõtmisväärtuse kõveratega, s.t olulised mõõtmisväärtused peavad järjestikuste läbisõitude ajal esinema samades kohtades. Vastasel juhul tuleb kontrollida "pinnase-rulli - mõõtesüsteemi" seadme korratavust määratud amplituudi, sageduse ja liikumiskiirusega.

CCC süsteemi kalibreerimine

CCC mõõtmisväärtused tuleb kalibreerida nõutud vastuvõtu väärtuste järgi, mis on saadud tavapäraste testide, näiteks tihendustegur kuivmahumasside võrdluse teel, staatiline või dünaamiline deformatsioonimoodul, tihendussuhe (moodulite suhe) või mõni muu sobiv parameeter. Nende korrelatsioonide saamiseks tuleb leida lineaarregressioonid. Selle meetodi abil kasutatakse kaudse testiprotseduuriga (st CCC mõõtmisväärtus) tihendatud kihi "täistesti", et otsustada, kas inspekteerimisala võetakse vastu või lükatakse tagasi. Kalibreerimine on vastuvõtutesti oluline eeltingimus ja see tuleb läbi viia enne CCC kalibreerimise kasutamist töödes.

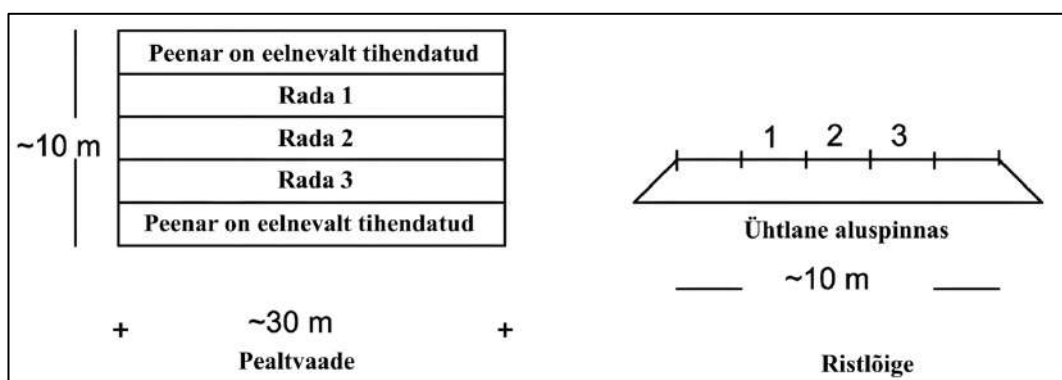
Põhimõtteliselt on ühtlaste omadustega jämedateraliste ja liitpinnaste puhul võimalik korreleerida CCC mõõtmisväärtused mis tahes tavapärase testiparameetriga, mis puudutab tihendamist või kandevõimet. Kuid liitpinnaste puhul tuleb hoolikalt arvestada veesisalduse mõju CCC mõõtmisväärtustele. Plaatkoormustestide tegemisel on vajalik suur hoolsus, et saavutada vastuvõetavad korrelatsioonid CCC mõõtmisväärtustega. Erilist tähelepanu tuleb pöörata ühtlase, kuiva ja tiheda pinna saavutamisele, millel plaatkoormustesti läbi viia; samuti tuleb arvestada plaatkoormustesti ja CCC-rulli erinevaid mõõtesügavusi.

Enne kalibreerimisprotseduuri alustamist tuleb valida sobiv kihipaksus ja rullitüüp.

Kalibreerimisprotsess hõlmab kalibreerimisala rajamist, mille pikkus on vähemalt 30 meetrit iga materjalitüübi jaoks. Piirkond tuleks tihendada vähemalt kolme erineva käiguga kasutades erinevaid läbimise kordusi:

- kerge tihendamine (mõned läbimised),
- keskmine tihendamine (rohkem läbimisi),
- tugev tihendamine (nii palju läbimisi, kuni CCC mõõteväärtustes enam suurenemist ei toimu).

Kõikide käikude puhul peavad tihendamismasina seaded olema samad (st sama sagedus, amplituud ja kiirus, vt joonis 4.28).

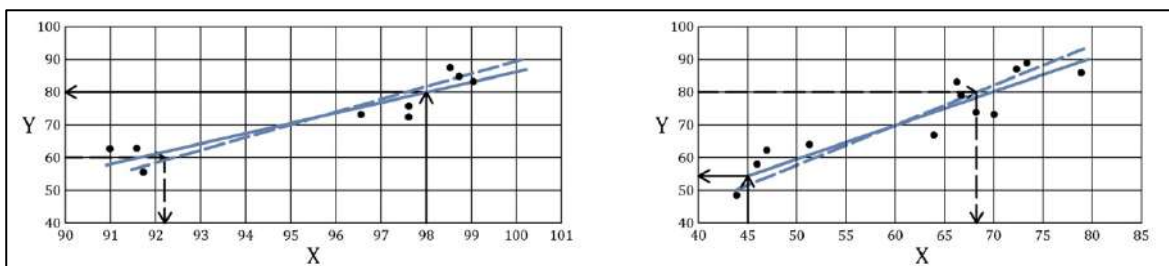


Joonis 4.28. CCC kalibreerimisala plaan vastavalt CEN/TS 17006.

CCC mõõteväärtusi, mis on saadud olukorras kui masin on „hüpanud“, ei tohi kasutada. Et seda vältida, on soovituslik kasutada madalat amplituudi.

Igas kerge, keskmise ja kõrge tihendusega rullirajas tuleks teha vähemalt kolm kuni viis mõõtmist, näiteks deformatsioonimooduli määramiseks staatilise plaadikoormustesti abil või tihendusastme määramiseks. Rulli CCC andmed igas testpunktis korreleeritakse plaadikoormuse deformatsioonimooduli või tihendusastme mõõtmistega kasutades lineaarse regressiooni analüüsi. CCC sihtväärtus määratakse seejärel kindlaks lineaarse regressioonisuhte põhjal, mis on eelnevalt määratud sihtväärtusega plaadikoormuse deformatsioonimooduli või tihendusastme jaoks. Lineaarne regressioonisuhe peab olema vähemalt $r \geq 0,7$. Kui seda ei saavutata, siis CCC ei ole tihendataval pinnase kasutatav.

Kalibreerimise detailsemad nõuded ja tegevused antakse standardis CEN/TS 17006 (uusim versioon). Kalibreerimise tulemisel saadakse näiteks alljärgnevad seosed (joonis 4.29), kus katsetihendamisega on leitud kruusasel liival ($grSa$) korrelatsioon tihendusteguri ja plaatkoormuskatse kandevõime (E_{v2}) vahel.



Joonis 4.29. Näited regressioonikõveratest, kus vasakpoolne on tihendusteguri leidmine ja parempoolne kandevõime leidmine, vastavalt CEN/TS 17006.

Joonise 4.29 parempoolsel graafikul:

- $y = 3,1036x + 224,08$ ja $r = 0,93$;
- tihendusteguri nõue on 98% standardsest Proctor-tihedusest;
- nõude tagab CCC väärtus $T_M = 80$.

Joonise 4.29 vasakpoolsel graafikul:

- $y = 1,0049x + 10,448$ ja $r = 0,88$;
- kandevõime nõue $E_{v2} = 45$ MPa;
- nõude tagab CCC väärtus $T_M = 55$.

T_M aktsepteeritav väärtus on 90% tõenäosuse juures.

5 Tihendamismasinate kasutusvõimalikud

Tabelis 5.1 on antud erinevate tihendusmasinate kasutusvõimalikkus eri tüüpi pinnaste tihendamiseks.

Tabel 5.1. Erinevate tihendamismasinate kasutusvõimalikkus eri tüüpi pinnaste tihendamiseks. [6]

Tihendamismasina tüüp	Tihendatav pinnas				
	Peeneteralised (märg)	Peeneteralised (kuiv kuni optimaalne veesisaldus); eriteralised liitpinnased $C_{0,063} > 15\%$	Jämedateralised, sh ühtlaseteralised, $C_{0,063} \leq 15\%$	Nõrk kivimaterjal ($LA > 45$)	Tugev kivimaterjal ($LA < 45$)
Staatiline koormus, silevaltsrullid	Sobiv	Võimalik	Võimalik	Võimalik	Ebasobiv / võimalik**
Staatiline koormus, võkrullid	Sobiv	Võimalik	Ebasobiv	Sobiv	Ebasobiv
Staatiline koormus, tapprullid	Sobiv	Sobiv	Ebasobiv	Võimalik	Ebasobiv
Pneumorullid	Sobiv	Võimalik	Võimalik	Ebasobiv / võimalik**	Ebasobiv / võimalik**
Tapp-vibrorullid*	Sobiv	Sobiv	Võimalik	Võimalik	Ebasobiv
Silevalts-vibrorullid*	Sobiv	Sobiv	Sobiv	Sobiv	Sobiv
Vibroplaadid	Ebasobiv	Võimalik	Sobiv	Sobiv	Sobiv
Vibrotamperid	Sobiv	Sobiv	Võimalik	Ebasobiv / võimalik**	Ebasobiv / võimalik**
Suure energiaga lööktihendajad	Ebasobiv	Sobiv	Sobiv	Võimalik	Võimalik
Langeva koormusega lööktihendajad	Ebasobiv	Sobiv	Võimalik	Võimalik	Võimalik

*Märkus: vibrorullidega tihendamiseks sobiva amplituudi ja sageduse leidmine: kui tihendusmasin hakkab „hüppama“, on tihendatav kiht kõrge kandevõimega / kõva. Sellisel juhul tuleks tihendamiseks esiteks vähendada sagedust jättes amplituudi samaks. Kui sagedust enam madalamaks vähendada ei saa ning masin ikka „hüppab“, vähendatakse

seejärel amplituudi. Amplituudi vähendamine aga vähendab samaaegselt ka tiheneva kihi paksust.

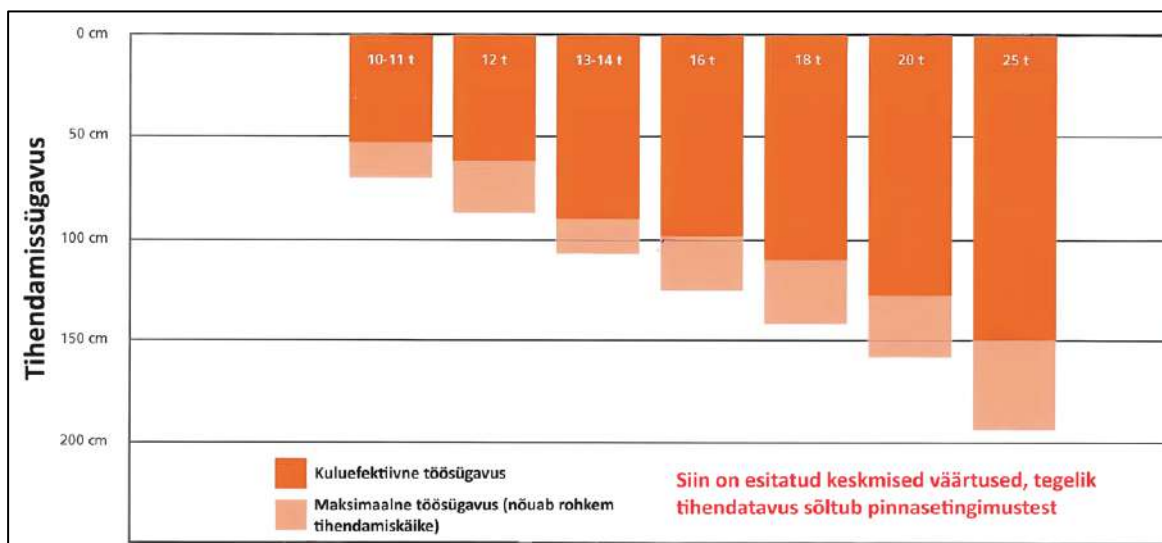
****Märkus:** tihendamismasinad on mullatööde kontekstis näidatud pinnastel üldiselt ebasobivad, kuid on kasutatavad killustikaluste ehitamisel. Staatiline koormus silevaltsrullide või pneumorullidega toimib eriti hästi fraktsioneeritud killustikaluste ehitamisel kiilumismeetodil (makadam) kihti tihendamise ajal kastes.

5.1 Suunised maksimaalseks tihendatavaks kihiks sõltudes pinnasest ja tihendamismasina tüübist

Vabalt dreenevad vähe peenosiseid sisaldava kivimaterjali („rock“) tihendamissügavus (töösügavus) on keskmise väärtusena suhtes kasutatava vibrorulli massi esitatud joonisel 5.1:

- arvestatud on silevalts-vibrorulli kasutamisega;
- tööd tuleks alustada kõrge amplituudiga (mida vajadusel vähendada, v.t tabeli 5.1 märkus);
- läbikute arv 4...10.

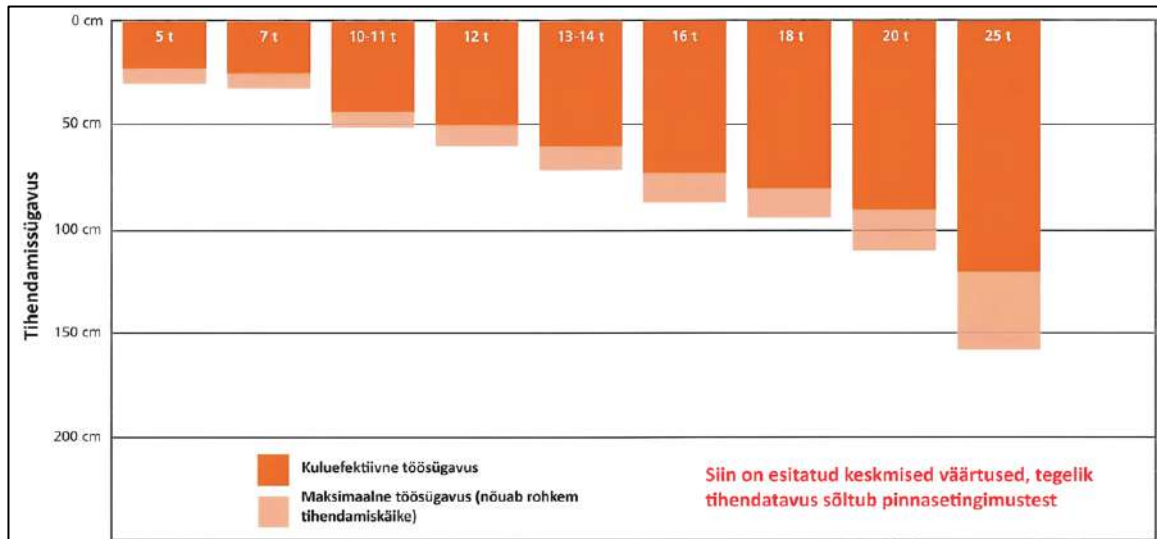
Antud pinnasekategorია alla kuuluvad lõhatud kaljupinnased, põlevkiviaheraine (nt fr 0-90 ja 90-300 mm), fraktsioneeritud killustikud (nt fr 16-31,5 mm ja 31,5-63 mm).



Joonis 5.1. Tihendamissügavused vähe peenosiseid sisaldava jämeda- ja väga-jämedateralise kivimaterjali korral. [11]

Liivade, kruusade, killustikusegude (ridakillustik ja optimaalse terakoostisega killustik) tihendamissügavus (töösügavus) on keskmise väärtusena suhtes kasutatava vibrorulli massi esitatud joonisel 5.2:

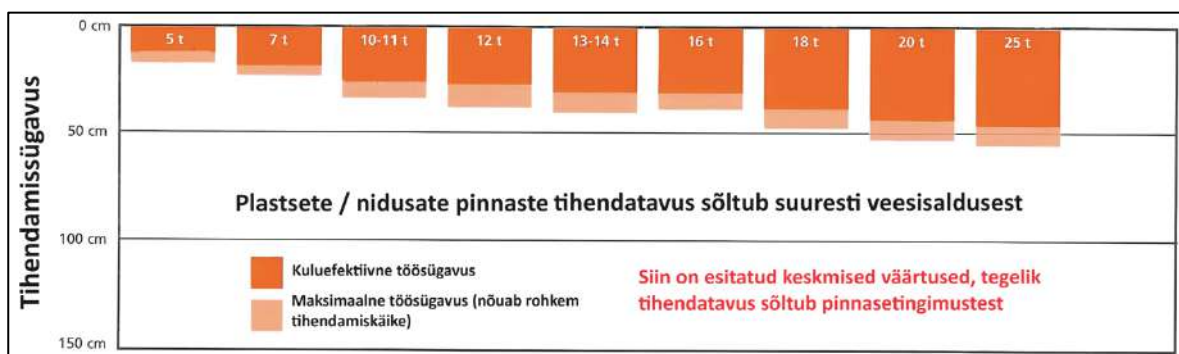
- arvestatud on silevaltsvibrorulli kasutamisega;
- tööd tuleks alustada kõrge amplituudiga (mida vajadusel vähendada v.t tabeli 5.1 märkus);
- läbikute arv 4...12.



Joonis 5.2. Tihendamissügavused liivade, kruusade, killustikusegude (ridakillustik ja optimaalse terakoostisega killustik) korral. [11]

Peeneteraliste ja plastsete pinnaste (orienteeruvalt plastsusarv $I_p > 12$) tihendamissügavus (töösügavus) on keskmise väärtusena suhtes kasutatava vibrorulli massi esitatud joonisel 5.3:

- taprull sõtkumiseks ja pinnasekihi eripinna suurendamiseks, mis võimaldab pinnasel paremini kuivada. Kihi viimistlemine silevaltsrulli või pneumorulliga;
- kõrge amplituud;
- läbikute arv 6...12.



Joonis 5.3. Tihendamissügavused peeneteraliste ja plastsete pinnaste (orienteeruvalt plastsusarv $I_p > 12$) korral. [11]

Joonistel 5.1 ja 5.2 antud töösügavustest veelgi paksemate kihtide tihendamine (nt vajaduse korral tihendada aja jooksul kokkukuhjatud pinnaseid vms) on võimalik kasutada:

- suure energiaga lööktihendajaid (ing. *High Energy Impact Compaction, Impact Roller Compaction*): tihendamissügavus kuni 2...3 m;
- langeva koormusega lööktihendajaid (ing. *Rapid Impact Compaction*): tihendamissügavus kuni 6 m.

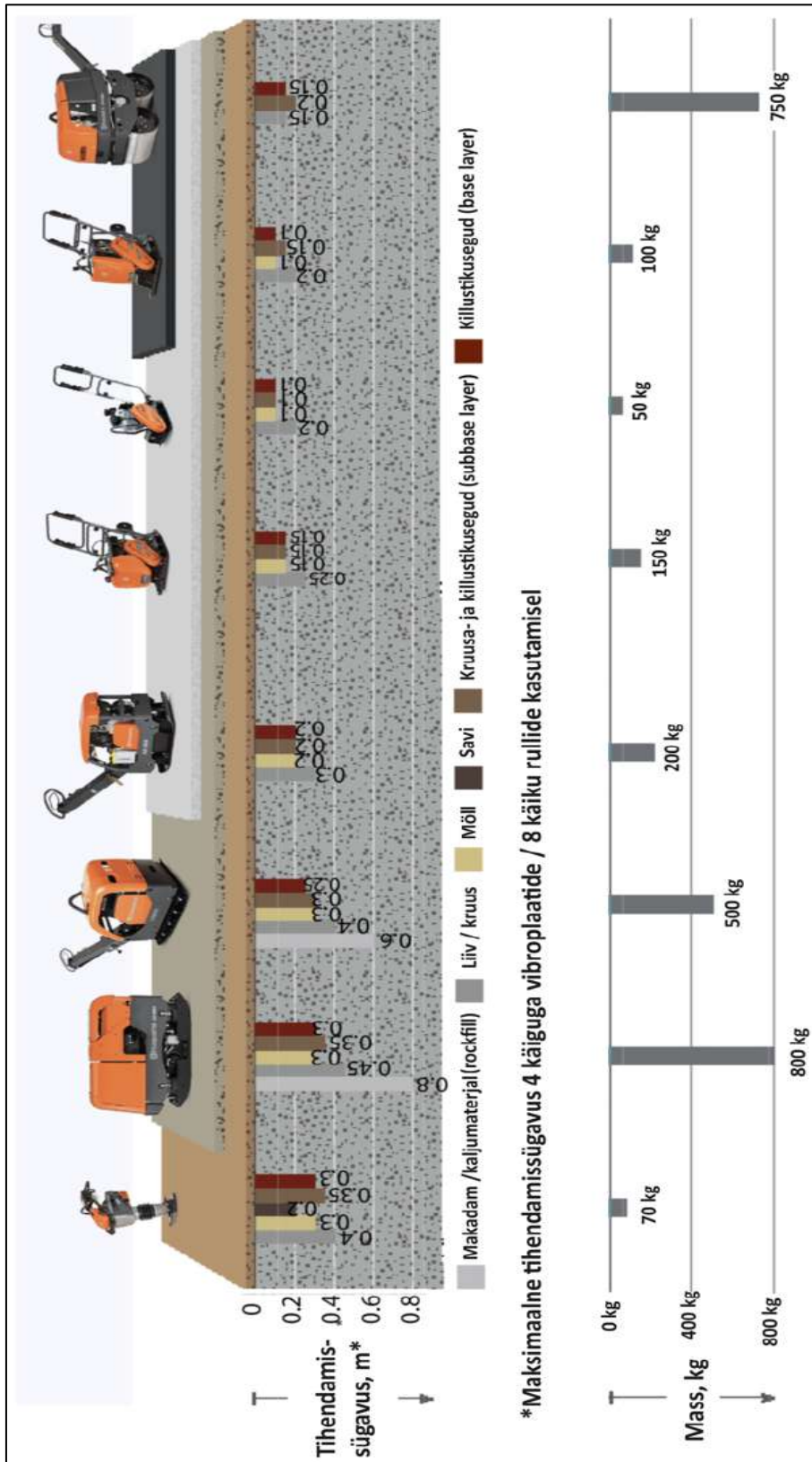
Erinevat tüüpi väikeste tihendamisseadmete orienteeruvad maksimaalsed tihendamissügavused sõltuvalt tihendatavast pinnasest või materjalist on antud joonisel 5.4.

Kuna taoliste tihendamisseadmete valik on suur, siis siinkohal ei ole võimalik katta kogu valimit. Joonis 5.4 annab siiski piisava lähtekoha sobiliku seadme, tihendatava pinnase/materjali ja selle maksimaalse tihendamissügavuse vahel. Killustiku vaates antakse joonisel 5.4 kaks varianti: kas makadam ehk fraktsioneeritud killustik ja killustikusegud ehk pideva terakoostisega materjalid.

Tabelis 5.1 antakse erineva massiga vibroplaatide osas orienteeruvad vajaminevad läbikud optimaalse veesisalduse tingimustes ning maksimaalsed kihipaksused. Joonise 5.4 ja tabeli 5.1 tihendamissügavused veidi erinevad, kuid erinev on ka läbikute arv.

Tabel 5.1 Orienteeruvad vajaminevad erineva massiga vibroplaatide läbikud optimaalse veesisalduse tingimustes ning maksimaalsed tihendatavad kihipaksused [12]

Vibroplaadi mass	Orienteeruvad vajaminevad läbikud optimaalse veesisalduse tingimustes ning maksimaalsed kihipaksused				
	Liivad	Kruusad	Pideva terakoostisega killustikud	Pinnased peenosistega <30%	Pinnased peenosistega >30%
	25 cm	25 cm	20 cm	25 cm	25 cm
50 kg	6	7	6	5	6
100 kg	5	6	6	4	5
200 kg	4	5	5	3	4
400 kg	3	4	4	3	3



Joonis 5.4. Erinevat tüüpi väikeste tihendamiseseadmete orienteeruvad maksimaalsed tihendamissügavused sõltuvalt tihendatavast pinnasest või materjalist. [39]

6 Pinnase tiheduse määramise ja hindamise meetodid

Eksisteerivad järgmised põhilised pinnase tiheduse lokaalse määramise ja hindamise meetodid:

- mahumassi mõõtmisel ja selle võrdlemisel etalonmahumassiga (laboris kindlaks määratud tingimustel määratud maksimaalse kuivmahumassiga, tihti standardse või modifitseeritud Proctor-teimiga) saadavad tihendustegurid:
 - liivakoonuse meetod: täpne, kasutatakse radioaktiivse isotoobiga tihedusmõõtjate kalibreerimiseks, ebatäpne poorsetes pinnastes (nt kivimaterjalid);
 - kummiballooni meetod: täpne, sarnane liivakoonuse meetodile, kuid sobib ka poorsetes pinnastes;
 - lõikerõngas või –silinder: täpsus sõltub proovi võtmisest, sobib peeneteralistele pinnastele ja liivadele; ei sobi kivistele pinnastele;
- radioaktiivse isotoobiga või mitteradioaktiivsed (elektromagneetilised) tihendusmõõtjad: võib tekkida probleeme killustiku, karbonaatsete materjalide ja süvendite puhul;
- kandevõime ja jäikuse mõõtmisel saadavad tihendussuhted:
 - penetratsioonimeetod: mõõdab pinnase nihketugevust ja sobib liivpinnastele;
 - dünaamilise koormamise meetod: sobib jämedateralistele pinnastele;
 - staatilise koormamise meetod: sobib kõikidele pinnastele.

6.1 Mahumassi mõõtmisel põhinevad meetodid

6.1.1 Liivakoonus

Liivakoonuse meetodit (ing. *sand replacement method*) on käsitletud standardites ASTM D1556 ja BS 1377-9.

Pinnase tiheduse määramisel liivakoonuse, joonis 6.1, meetodil:

1. määratakse mahuti, koonuse ja mahutit täitva liiva mass (W_1);
2. tihendatud pinnasekihti kaevatakse väike süvend;
3. süvendist kaevatud niiskele pinnasele määratakse mass (W_2) ja veesisaldus (w_n , %).
4. arvutatakse süvendist kaevatud pinnase kuiv mass (W_3):

$$W_3 = W_2 / (1 + w_n (\%)/100)$$

5. peale süvendi kaevamist asetatakse liivaga täidetud mahuti süvendi kohale ja lastakse liival voolata süvendisse ja koonusesse;
6. seejärel määratakse mahuti, koonuse ja mahutisse jäänud liiva mass (W_4);
7. arvutatakse süvendi ja koonuse täitmiseks kulunud liiva mass (W_5):

$$W_5 = W_1 - W_4$$

8. kaevatud süvendi maht (V) arvutatakse:

$$V = (W_5 - W_c) / \gamma_{d(\text{liiv})},$$

kus

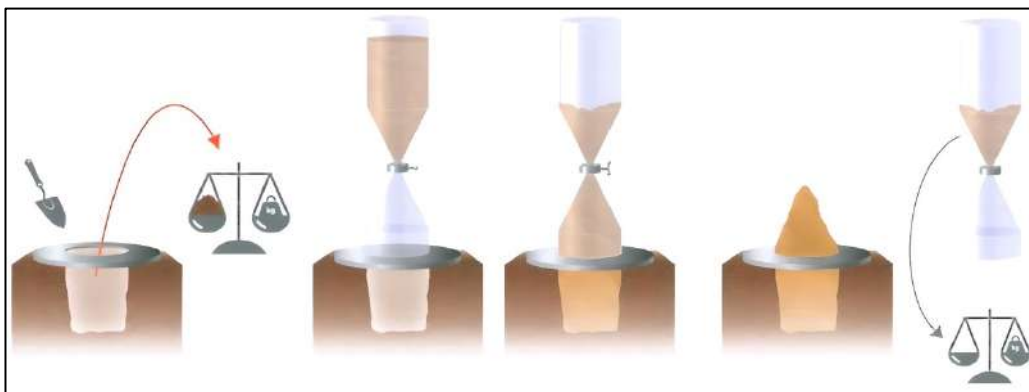
W_c = ainult koonuse täitmiseks kulunud liiva mass;

$\gamma_{d(\text{liiv})}$ = kasutatud liiva kuiv mahumass;

W_c ja $\gamma_{d(\text{liiv})}$ määratakse laboris.

9. tihendatud pinnase kuivmahumass leitakse:

γ_d = süvendist kaevatud pinnase kuiv mass / süvendi maht = W_3 / V .



Joonis 6.1. Liivakoonuse katse põhimõtteline joonis. [11]

Liivakoonuse meetodi eelised:

- võimaldav usaldusväärseid ja täpseid tulemusi mahumassi ja tihendusteguri määramiseks;
- laialdaselt kasutatav ja üldtunnustatud meetod;
- lihtsalt läbiviidav test.

Liivakoonuse meetodi puudused:

- võrreldes teiste meetoditega aeganõudvam;
- tulemused sõltuvad liiva tiheduse täpsest kalibreerimisest ja süvendi mõõtmiste täpsusest;
- vajab hoolikat liiva ja seadmete käsitlemist, et vältida saastumist ja mahavalgumist.

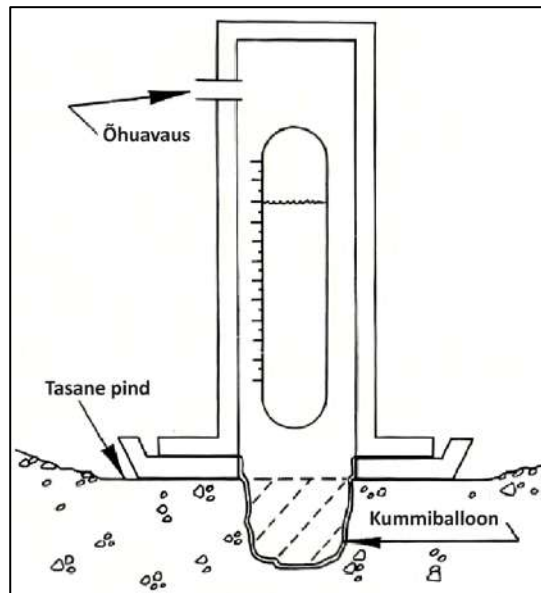
Liivakoonuse meetodi piirangud:

- ei sobi kohevale pinnasele: raske kasutada väga pehmetes või märgades pinnastes, süvend auk võib kokku variseda;
- sügavuse piirang: piirdub pinnapealsete ja madalate sügavustega.
- tülikas kasutada ebasoodsate ilmastikuolude või kaldse maapinna korral;
- ei sobi kasutamiseks suurte tühimikega pinnastes (nt fraktsioneeritud killustikud).

6.1.2 Kummiballooni meetod

Kummiballoonimeetodit (ing. *balloon density* või *volyvessel*) on käsitletud standardites ASTM D2167 ja AASHTO T205.

Meetodi kasutamise põhimõte on sarnane liivakoonuse meetodiga, kuid süvendi täitmiseks ja selle ruumala mõõtmiseks kasutatakse kummiballooni täitvat vett.



Joonis 6.2. Kummiballooni meetodi põhimõtteline joonis. [40]

Kummiballooni meetodi eelised:

- kiirem ja lihtsam üles seada võrreldes liivakoonuse meetodiga;
- kompaktne ja kerge varustus teeb selle ideaalseks kauges asukohtades kasutamiseks;
- puudub sõltuvust kalibreeritud liivast;
- võimalus kasutada suurte tühikimega pinnastes (nt fraktsioneeritud killustikus).

Puudused:

- kasutatavad kummist balloonid on alati torkeaukudele ja kulumisele;
- sobib väiksemate aukude jaoks, mis piirab seadme kasutamist väga jämedateraliste pinnaste korral;
- tulemused võivad olla vähem täpsed võrreldes liivakoonuse meetodiga, eriti ebaühtlase kujuga süvendites.

Piirangud:

- sügavuse piirang: piirdub pinnapealsete ja madalate sügavustega.
- teravate osakestega pinnases on oht, et balloon puruneb või saab kahjustada.

6.1.3 Lõikerõnga meetod

Lõikerõnga meetodit (ing. *surface samplers* või *undisturbed core samplers*) on käsitletud standardites ASTM D2937 ja BS 1377-9.

Meetodi puhul lõigatakse tihendatud pinnasest teatud kindla ruumalaga (V) rikkumata struktuuriga proov (joonis 6.3), mis kuivatatakse ahjus ja kaalutakse. Tihendatud pinnase kuivmahumass leitakse:

γ_d = süvendist löikerõngaga saadud pinnase kuiv mass / süvendi maht



Joonis 6.3. Näidis seadmest, millega võtta löikerõngaproovi, löikerõnga kolb ning kaaned. (Joonis: Controls)

Löikerõnga eelised:

- võimaldab võtta rikkumata struktuuriga proove tiheduse ja muude laboratoorsete testide jaoks;
- sobib hästi kohevate pinnaste jaoks, kus proovide terviklikkust saab säilitada;
- saab kasutada erinevate pinnasekatsetuste jaoks, mitte ainult tiheduse määramiseks.

Puudused:

- ei sobi kivistele pinnastele;
- täpne proovivõtt sõltub õigetest tehnikatest ja varustuse käsitlemisest;

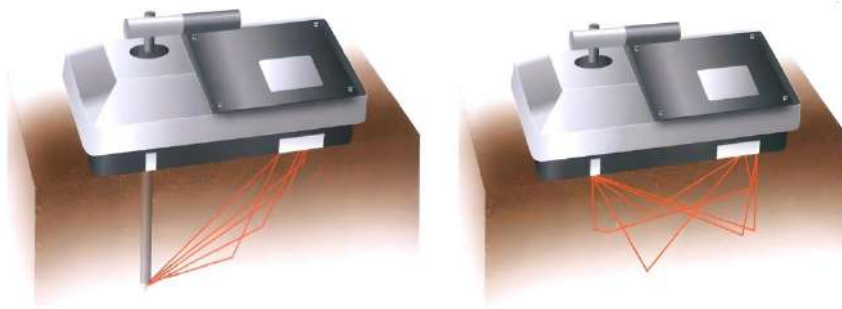
Piirangud:

- sügavuse piirang: piirdub pinnapealsete ja madalate sügavustega.
- proovi rikkumise oht eemaldamise, käsitlemise või transpordi ajal.
- nõuab täpse tiheduse määramiseks laborianalüüsi.

6.2 Radioaktiivse isotoobiga ja mitteradioaktiivsed mõõtmismeetodid

Radioaktiivse isotoobiga (ing. *nuclear density gauges*) seadmed võimaldavad määrata korraga nii pinnase tiheduse kui ka veesisalduse. Radioaktiivse isotoobiga seadmed on kas saatja- või tagasipeegeldustüüpi (joonis 6.3):

- saatjatüüpi seadme kasutamisel paigutatakse energiaallikaga toru eelnevalt puuritud auku. Mõõtesügavus on kuni 30 cm;
- tagasipeegeldustüüpi seadmed asetatakse otse mõõdetava kihi pinnale. Mõõtesügavus on 7,5...10 cm.



Joonis 6.3. Vasakul saatja- ning paremal tagasipeegeldustüüpi mõõtmise. [11]

Radioaktiivse isotoobiga seadmete tööpõhimõte:

- mõõtur koosneb tavaliselt kahest põhikomponendist - radioaktiivsuse allikast (tavaliselt sisaldab see tseesium-137 või ameritsium-241 allikat) ja detektorit. Paigaldades seadme pinnasele kiiratakse kas gamma- või neutronkiiri;
- pinnas hajutab ja neelab osa kiirgusest. Mida tihedam on pinnas, seda rohkem kiirgust hajub ja neeldub;
- tagasi peegelduvat kiirgust mõõdetakse detektoriga. Vähem hajunud ja neeldunud kiirgust tähendab, et pinnas on tihedam ja kompaktsem. Detektor võrdleb tagasi peegelduvat kiirgust algse emissiooniga, et määrata pinnase tihedus ja veesisaldus;
- seade teisendab detekteeritud kiirguse intensiivsuse tiheduseks ja kuvab tulemused kasutajale.

Radioaktiivse isotoobiga mõõturid on täpsed ja kiired, võimaldades hinnata pinnase tihendamise kvaliteeti töömaal. Tulenevalt radioaktiivsete isotoopide allikate olemasolust tuleb rangelt järgida ohutusnõudeid ja seadme kasutusjuhendeid.

Radioaktiivse isotoobiga mõõtmine vastab standarditele ASTM D6938.

Mitte-radioaktiivsete (ing. *non-nuclear density gauges*) ja **elektriliste** (ing. *electrical density gauges*) seadmete tööpõhimõte:

- mõõturid kasutavad elektromagnetilisi laineid või elektrivoolu, et mõõta pinnase tihedust ja veesisaldust. Seade saadab pinnasesse elektromagnetilisi laineid või elektrivoolu ja mõõdab, kuidas need lained või voolud pinnases käituvad.
- pinnase dielektriline konstant muutub vastavalt vee sisaldusele. Seade mõõdab selle konstandi muutusi, mis annab teavet pinnase tiheduse ja veesisalduse kohta;
- mõõdetud elektromagnetilised või elektrilised signaalid analüüsitakse ja võrreldakse teadaolevate kalibreerimisandmetega ning kuvatakse seadme ekraanil.

Üldiselt radioaktiivset isotoopi kasutavad seadmed on täpsemad ja töökindlamad võrreldes mitte-radioaktiivsete ja elektriliste seadmetega, ka on mõõtekiirus kõrgem, need võimaldavad mõõta suurema veesisaldusega pinnaseid, vajavad vähem kalibreerimist ja on vähem tundlikud erinevate keskkonnatingimuste suhtes.

- Radioaktiivset isotoopi kasutavate seadmetega pinnaste tiheduse ja nende veesisalduse mõõtetäpsus on $\pm 1...2\%$.

- Mitte-radioaktiivsete seadmetega on mõõtetäpsus $\pm 2...10\%$ sõltuvalt seadmest ja pinnasest; mõõtetäpsus väheneb jämedateralistes pinnastes.
- Elektriliste seadmete mõõtetäpsus on $\pm 2...4\%$. Sobivad kõige paremini peeneteraliste pinnaste mõõtmiseks.

Mitte-radioaktiivsete seadmetega mõõtmine vastab standardile ASTM D6758 ja elektriliste seadmetega mõõtmine standardile ASTM D7698.

6.3 Tihendusekontroll läbi nihketugevuse mõõtmise

Nagu peatükis 2 selgitati, siis tihedamal pinnasel on suurem nihketugevus, kui kohevamal pinnasel. Seda teavet ära kasutades saab hinnata pinnase tihendusastet kas surudes (staatiline koormus) või lüües (dünaamiline koormus) penetratsioonivarrast pinnasesse. Mida rohkem energiat tuleb kulutada, seda suurem pinnase nihketugevus on, mis sama pinnase korral sõltub vaid selle tihedusest (või tihendustegurist).

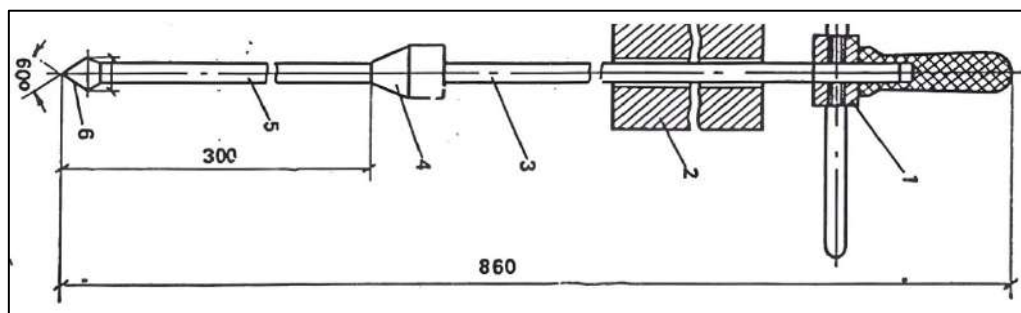
Penetromeetrid on instrumendid, mis koosnevad koonilisest peast, mis on kinnitatud metallvarda otsa ja mis süvistatakse pinnasesse. Staatiliste penetromeetrite puhul süvistatakse koonilise otsaga metallvarras pinnasesse staatilise koormusega, dünaamiliste penetromeetrite puhul dünaamilise (löök-)koormusega.

Eestis on kasutatud liivpinnaste (antud juhul hinnanguliselt selline pinnas, kus $>6,3$ mm terasid $< 20\%$) tiheduse kontrolliks joonisel 6.4 esitatud tingimustele vastavat penetromeetrit (originaalis Beldornii D-51), mille seos liivpinnase tihendustegurisse on antud tabelis Lisas 2. Vene juhistes võrdsustatakse vaadeldava penetromeetri osas jämeliiv keskliivaga, mistõttu mõlemal on samad andmed.

Teistsuguste parameetritega, kui esitatud joonisel 6.4, penetromeetrite kasutamisel tabel Lisas 2 ei kehti ning hinnang tihendustegurile tuleb leida vastavalt kasutatavale penetromeetrile. Kuna muid penetromeetreid ei ole Eestis pinnaste tiheduse kvaliteedikontrolliks kasutatud, siis neid käesolevalt ka ei käsitleta.

Tabelis Lisas 2 esitatud tihendustegurite seoste kehtimiseks peab kasutatav penetromeeter vastama järgmistele nõuetele:

- koonuse nurk 60° (joonisel 6.4 tähistatud kui „6“) ja maksimaalne diameeter 16 mm;
- alasile (joonisel 6.4 tähistatud kui „4“) langeva raskuse mass 2,5 kg (joonisel 6.4 tähistatud kui „2“) langemiskõrgusega (alasi ja haamri vaheline vaba ruum, kui haamer on kõige ülemises asendis) 290 mm.



Joonis 6.4. Eestis kasutatav penetromeeter (originaalis Beldornii D-51).

Koonus süvistatakse langeva raskuse abil pinnasesse 30 cm sügavusele, lugedes vajaliku raskuse löökide arvu süvistamiseks sügavuselt 20 cm kuni 30 cm. Penetratsioonivardale (joonisel 6.4 tähistatud kui „5“) on süvistustega märgitud kaks joont 10 cm ja 20 cm kõrgusele. Tihendusteguri mõõtmiseks surutakse varras teise jooneni (ehk 20 cm sügavuseni) ning alustatakse katsega. Katse käigus kulutatakse haamer maksimaalselt kõrguselt alasile niikaua, kuniks alasi alumine serv puutub vastu pinnast ehk kui penetratsioonivarras on süvistatud pinnasesse 30 cm ulatuses.

Pinnase tinglik dünaamiline vastupanujõud P_D arvutatakse:

$$P_D = K \cdot E \cdot N_{20-30} / h,$$

kus:

K – tegur, mis arvestab löögi energiakadu;

E – kineetiline energia, N/cm;

N_{20-30} – löökide arv, mis on vajalik koonuse süvistamiseks pinnasesse 20 → 30 cm;

h – koonuse süvistamissügavus, 10 cm.

Pinnase vastupanujõud (P_D) määratakse ühel kohal 40x40 cm suurusel alal 3...5 korda. Keskmise P_D väärtuse järgi määratakse mõõdetava liivpinnase tihedus kasutades tabelis Lisas 2 antud seoseid.

6.4 Plaatkoormus

Plaatkoormuskatset kasutatakse pinnaste (aga ka sidumata tarindikihtide) deformeeritavuse kaudu kandevõime ning tihendatuse hindamiseks. Väga üksikasjalikult kirjeldatud standardite tõttu on see kõige täpsem pinnasetööde katse, millel on kõrgeim korratavus. Plaatkoormuskatse on kirjeldatud standardis EVS 934:2016 “Pinnas. Katsemeetodid ja katseseadmed. Plaatkoormuskatse”, mis on tõlge Saksa standardist DIN 18134:2012-04 (Plate Load Test).

Plaatkoormuskatsega määratakse vajumi sõltuvus koormusest (koormus-vajumi graafik), saadud graafiku alusel määratud deformatsioonimooduli E_v (saksa keeles *Verformungsmodul*) ning aluse reaktsioonimooduli (k_s) abil saab hinnata pinnaste deformeeritavust ja tugevust.

Plaatkoormuskatse läbiviimiseks on vaja: koormusplaat koos raamiga, hüdrotungraud, mõõteseadete koos anduritega, mis mõõdavad rakendatavat jõudu ja vajumi suurust, arvuti elastsusmooduli arvutamiseks ning vasturaskus, joonis 6.5.



Joonis 6.5. Plaatkoormuskatse läbiviimine. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]

Plaatkoormuskatset võib teha jämeda- ja segateralistel pinnastel, samuti sitketel kuni kõvadel tihedatel peeneteralistel pinnastel. Vajadusel kasutatakse pinna tasandamiseks õhukest liivakihti (mõni millimeeter). Koormusplaati ei tohi asetada vahetult teradele, mille suurus ületab neljandiku plaadi läbimõõdust. Kiiresti kuivavate pinnaste korral tuleb eemaldada pealmine, kobestunud kiht.

Koormusplaadi koormamist alustatakse eelkoormamisega (5-10 kPa), seejärel koormatakse (koormust 1 minuti vältel konstantsena hoides) ühtlaste juurdekasvudega (vähemalt 6) maksimaalse normaalpingeni, vähendatakse koormust kolme astmena ning seejärel toimub teine juurdekasvudega koormamine (esimese tsükli eelviimase koormuseni).

Teekonstruktsioonide elastsusmoodulite määramisel kasutatakse 300 mm koormusplaati ning koormust suurendatakse normaalpingeni 500 kPa. Juhul kui enne maksimaalse normaalpinge saavutamist ületab vajum 5 mm, loetakse vastav normaalpinge suurimaks ning korratakse katset. 600 mm plaadi korral loetakse vastavaks piirväärtuseks vastavalt normaalpinget 250 kPa ja 10 mm ning 762 mm plaadi korral 200 kPa ja 13 mm

Plaatkoormuskatset kasutatakse laialdaselt sideainega sidumata kihtide tihenduse kvaliteedikontrollis andes nõuded elastsusmoodulile E_{v2} ning moodulite suhtele E_{v2} / E_{v1} .

Lisaks Saksa meetodile, millest lähtuvalt on koostatud EVS 934:2016, on plaatkoormuskatset võimalik teostada ka teiste meetodite kohaselt, nt omad nõuded on Soomes, Venemaal, Itaalias, ASTM standardis jm, mida aga siinkohal täpsemalt ei käsitleta.

6.5 Langeva koormusega rasked deflektomeetrid

Langeva koormusega raskete deflektomeetrite alla kuuluvad FWD-seadmed, mille esimesed prototüübid leidsid kasutust juba 1980, ja Heavy Loadman (mis erineb sisuliselt FWD seadmest seeläbi, et kasutab vaid üht vajumisensorit ja on monteeritud pakiauto kaubaruumi või siis sõiduautohaagisele). Sidumata kihtidel saadakse langeva koormusega raskete deflektomeetritega plaatkoormuskatse tulemustele lähedased väärtused (erisused 10% piires).

Plaatkoormusseadme puhul on tegemist 50 kN ehk veokirattaga võrdse koormuse rakendamise veoki ratta kontaktäljega lähedasele pinnale (300 mm diameetriga koormusplaat). FWD seadme puhul veokiga võrreldav mõju (700 kPa) saavutatakse koormuse langetamisega ca meetriselt kõrguselt 300 mm koormusplaadile (koormus plaadile umbes 50 kN), kusjuures koormuse rakendumise impulsi pikkust reguleeritakse puhvri valikuga.

FWD-seadmed vastavad ASTM D4694 ja D4695 nõuetele. Euroopas standardit ei ole, kuid näiteks seadme kasutust on analüüsitud Euroopa uuringus COST action 336. Seade on tee-ehituse kvaliteedikontrollis laialdaselt kasutusel Soomes, kus on antud seadme kasutuskirjeldus allikas [24]. Soomes võib FWD-seadet kasutada tihenduse kvaliteedikontrollis plaatkoormuskatsete asemel mõõtes sarnaselt kandevõimet (E2) ja moodulite suhteid (E2 / E1), kuid nõuded on veidi erinevad. FWD-seadmega tuleb saada madalamad moodulite suhted ning olenevalt kihist võivad ka nõutud kandevõimed erineda (FWD-seadmega on suuremad nõutud väärtused).

FWD-seadme kasutuselevõtt pinnaste ja sideainega sidumata tee-ehitusmaterjalide tihendamise kvaliteedikontrollis Eestis vajab täiendavaid katsetusi, sh on vaja selgitada Eestis olemasoleva Dynatest FWD ja Soomes kasutatava KUAB FWD võimalikud erisused.

6.6 Langeva koormusega kergdeflektomeetrid

Kergdeflektomeetrite (LWD, *lightweight deflectometer*) tööpõhimõte on sama, mis rasketel deflektomeetritel, kuid langev koormus on oluliselt väiksem, reeglina 10 kg (olenevalt seadmest võib olla erinevusi). Seade mõõdab koormusplaadile langeva raskuse mõjul tekkiva deformatsiooni ja arvutab selle alusel mõõdetava konstruktsiooni (pinna) elastsusmooduli (kandevõime).

Seadmed võib üldistatult jagada kolme koolkonda:

- Soome koolkond – Loadman ja Inspector. Omadus: monoblokk seade, fikseeritud raskus 10 kg ja koormuse langemiskõrgus, seade vinnastatakse 180 kraadise pöördega; mõõterežiim oluliselt suurema pingega kui konstruktsioonis reaalses tööolukorras;
- Saksa koolkond (tootjad/seadmed Zorn, HMP, Weber ja Terratest), tuntud ka kui GDP (*German Dynamic Plate*) või LDWT (*Light Drop-Weight Tester*). Omadus: seade kahes osas – tugivarras raskusega (reeglina 10 kg, kuid võimalik ka 15 kg koormus lisavarustusena, fikseeritud langemiskõrgus), 300 mm koormusplaat sensoriga, reeglina fikseeritud 100 kPa pingerežiim. Seade vastab Saksa “Technical testing regulations for soil and rock in road construction” (TP BF-StB), Part B 8.3 ning ASTM standardile E2835 “Standard Test Method for Measuring Deflections Using a Portable Impulse Plate Load Test Device” nõuetele.
- Taani koolkond (tootjad/seadmed Keros, Sweco Prima, Dynatest LWD, Terratest 9000, Rincen MiniDyn ja 3ipe). Omadus: võimalik erinevad koormused 10...20 kg, valitav langemiskõrgus, vahetatavad/lülitatavad alusplaadid (100, 150, 200 ja 300 mm), kaks lisa-andurit vajumikausi mõõtmiseks (lisavarustuses). Mõõterežiim

valitav vastavuses mõõdetava kihi tegeliku töörežiimiga. Vastab ASTM standardile E2583 „Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)“

7 Tihendamistehnoloogiad

Pinnaste algne tihedus muldes sõltub mulde ehitamise meetodist:

- autode ja skreeperitega mulde ehitamisel on mulde pinnase esialgne tihedus 0,85-0,9 maksimaalsest kuivtihedusest (rattajälgedes on tihendusaste kõrgem);
- mulde ehitamisel draglaineekskavaatoriga on mulde esialgne tihedus väike, umbes 0,65-0,75 maksimaalsest kuivtihedusest;
- buldooseriga mulde ehitamisel saadakse 0,7-0,8 maksimaalsest kuivtihedusest.

Selleks, et pinnase tihedus vastaks nõutule (0,95-1,00 maksimaalsest kuivtihedusest), tuleb kasutada täiendavalt spetsiaalseid tihendusmasinaid. Teede muldkeha rajamine tihendamiseteta (arvestades loomulikku tihenemist) ei ole lubatud.

Põhiliseks tihendamise kvaliteeti mõjutavaks teguriks on pinnase veesisaldus. Korruga tihendatava pinnasekihi paksus sõltub pinnase veesisaldusest ja tihendamiseks kasutatavatest masinatest. Väheniisket pinnast tuleb tihendada õhemate kihtide kaupa võrreldes optimaalse veesisaldusega pinnasega. Liiga suure veesisaldusega pinnase kasutamine ei ole lubatud ning ette tuleb näha meetmed pinnase veesisalduse vähendamiseks (näiteks kuivatamine kas aereerimisega, vähese koguse hüdraulilise sideainega või kuiva pinnasega segamisega).

Mulle tuleb tihendada kogu laiuses ühtlaselt. Ebaühtlane tihendamine põhjustab mulde ebaühtlast vajumist. Ka mulde laiuses ühtlane, kuid mittepiisav tihendamine põhjustab ebaühtlaseid vajumisi. Süvendi ehitamisel peab teekonstruktsiooni alla jääva aluspinnase tihedus 0,3 m sügavuseni vastama nõutud tihendustegurile või vastavalt geotehnilisele projektile (nt süvatihendamise vajaduse korral).

Tihendamist alustatakse nõlva servast. Esimesed läbikud tehakse 2...2,5 m kaugusel mulde servast, et ära hoida nõlvade võimalikku varisemist ja rulli allalibisemist. Tihendamist jätkatakse äärelt telje suunas, kusjuures iga eelneva läbiku jälg kaetakse 1/3...1/4 laiuse võrra.

Mulde ääred tihendatakse järgnevate läbikutega nii, et iga läbiku jälg on 1/3 laiuse võrra nihutatud mulde serva suunas. Mulde äärte turvaliseks tihendamiseks võib kasutada järgmisi meetodeid.

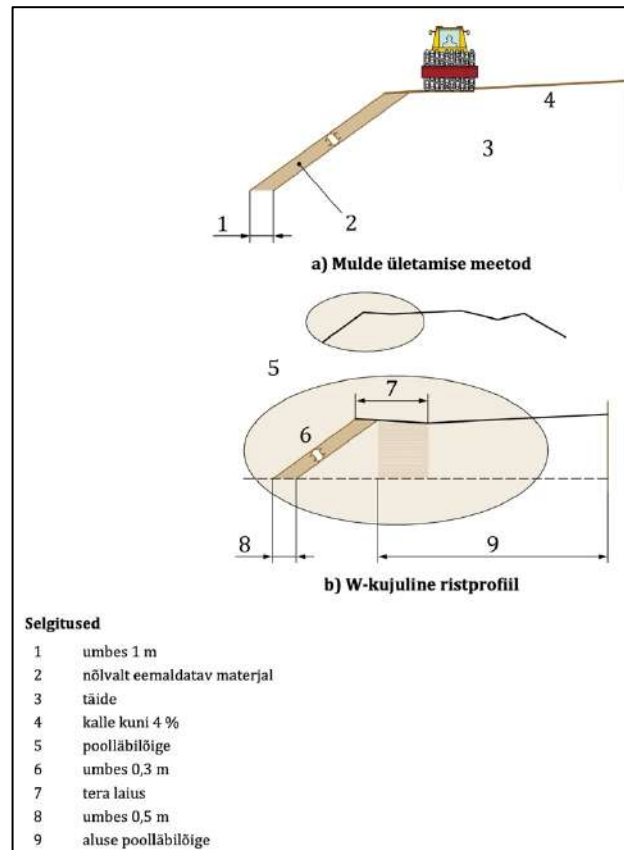
Mulde ületamise meetod, joonis 7.1 olukord a. Täiendava laiuse rakendamine tähendab, et tihendamismasin ei pea mulde servale lähenema. Muldele paigutatud lisamaterjali laius on umbes 1 m üle lõpliku gabariidi, mis tähendab, et nõlvuse 1:1,5 saavutamiseks tuleb hiljem nõlvalt eemaldada umbes 0,60 m lisamaterjali.

Vastassuunalise kalde kasutamine (W-kujuline ristprofiil), joonis 7.1 olukord b. See meetod kasutab vastassuunalise, tasandusmasina tera laiuse kalde loomist mulde servale. Kalle on umbes 4 %. Vastassuunaline kalle iseenesest ei ole piisav, et tihendaja saaks pinnast tihendada kuni mulde servani, mistõttu on tihendamise ja ohutuse tagamiseks tavaliselt vaja väikest lisalaiust. See hõlmab tavaliselt 0,30 m paksust materjalikihti, mis tuleb hiljem nõlvalt eemaldada. Selle meetodi eeliseks on äravooluerosiooni minimeerimine nõlval, aga puuduseks veekõrvaldus, mis tuleb alati korraldada väikeste pikikalde korral, et vältida

muldkeha pinnaste üleniiskumist. Lõpuks kujundatakse mulle selliselt, et vesi juhitakse mullatööde käigus rajatud ajutistesse äravoolukanalitesse.

Nõlva varisemise ja rulli allalibisemise vältimiseks ei tohi tihendusmasina valtsi äär olla mulde servale kunagi lähemal kui 0,3 m.

Nõlvadel tihendamata jäänud (üleliigse) materjali võib kohale jätta, kui see ei kahjusta nõlva stabiilsust ning on ruumilises vaates võimalik. Kui liigne materjal eemaldatakse, siis tuleb seda teha viisil, mis ei kahjusta nõlva, eriti väga jämedateraliste pinnaste korral. Nõlvasid on võimalik tihendada peatükis 4.2.4 antud viisidel.



Joonis 7.1 Mulde servade tihendamine kas mulde ületamise või W-kujulise ristprofiili kasutamise meetoditega vastavalt EVS-EN 16907-3. [6]

Kui aluspinnase kandevõime on <math><45\text{ MPa}</math>, pinnas on savikas ja plastse konsistentsiga, tuleks selle peale paigaldatavat esimest kihti vibrorullide kasutamisel tihendada esimeste tihendamiskäikude puhul staatilise koormusega (esmane tihendamine) ning õhema kihipaksuse juures (kuni ca 20 cm). Peale esmast tihendamist võib kasutada vibrorežiimi madala amplituudi ja kõrge sageduse juures jälgides samaaegselt seda, kuidas aluspinnas käitub. Nõrgemapoolsele niiskustundlikule (ehk peeneteralistele pinnastele) aluspinnasele ehitamisel on oht selle struktuuri rikkumiseks ja ületihendamiseks. Muudel juhtudel lähtuda nii tihendatava kihi paksuse, valitava tihendusmasina, vibrorullide amplituudi, sageduse ja liikumiskiiruse osas peatükist 4.

7.1 Pinnaste tihendamine kitsendatud tingimustes, sh kaevetööde ja avariikaevetööde järgne pinnaste tagasitäide/tihendamine

Eriti hoolikalt tuleb pinnast tihendada tee-ehitiste vahetus läheduses (sildade ja truupide juures, sildade kaldasammaste täitmisel) ja erinevate kaevandite (drenaaži tranšee) täitmisel.

Pinnase tihendamiseks kitsastes tingimustes kasutatakse erinevaid vibroplaate ja tampmasinaid.

Tampseadmete ja vibrorullide kasutamisel tuleb truubitorud vigastuste vältimiseks katta kas vähemalt 0,5 m paksuse või vastavalt tootja juhistele, eelnevalt muude vahenditega (nt kergete vibroplaatidega) tihendatud pinnasekihiga.

Rajatiste kaitsmiseks raskete tampseadmete kasutamisel tekkiva vibratsiooni eest peab tambi jälje ja silla kaldasamba või vundamendi vaheline kaugus olema vähemalt 2 m, tambi jälje ja truubi külge vaheline kaugus vähemalt 3 m ning eelnevalt muude vahenditega tihendatud pinnasekiht truubi peal vähemalt 2 m.

Raudbetoonlülidest truupide ümbruse täitmisel peab jälgima, et lülid ei nihkuks üksteise suhtes ja metalltruupide puhul, et ei tekiks külgede deformatsiooni. Metalltruupide tagasitäitel ja tihendamisel peab mõlemal pool truupi paigaldatav pinnas olema samal kõrgusel või maksimaalselt 30 cm kõrguste erinevusega.

Truubi kohale mulde ehitamine peab olema ühe kihi võrra ees kõrvalasetseva mulde ehitusest (kui truubi ehitus toimub üheaegselt mulde ehitusega). Pinnas tuleb paigaldada horisontaalsete kihtidena, mille paksus määratakse olenevalt tihendusmasina tüübist.

Kõrgete mullete tihendamiseks silla kaldasammaste vahetus läheduses, ristluste kohal ja peale-mahasõiduteede ehitamisel on soovitatav kasutada vabalt langeva raskusega mehaanilist tampurit või langeva koormusega lööktihendajaid, millega saab kitsastes tingimustes tihendada suure paksusega kihte.

Pinnaste tihendamine tranšeedes (kaevikutes) teostatakse kahes etapis:

1. puistatakse ja tihendatakse toru all olev sängituskiht; paigaldatakse toru; puistatakse pinnas mõlemale poole toru ja tihendatakse; puistatakse torule pinnase kaitsekiht ja tihendatakse kas vibroplaadi või tampuriga;
2. puistatakse ja tihendatakse põhiline osa pinnasest (peale toru katsetamist) – tihendatakse kas tampide, vibroplaatide, vibrorullide või ehitusmasinate tööorganite külje paigaldatavate tihendusseadmetega, mis valitakse vastavalt pinnase tüübile, tranšee mõõtmetele, toru materjalile ja kaitsekihi paksusele.

Maksimaalsed kaevikute tagasitäitmise kihipaksused sõltuvad kasutatava pinnase ja tihendusmasina omavahelisest kombinatsioonist, mida on käsitletud peatükis 5.1

8 Pinnaste tiheduse kontroll

Vastavalt peatükile 10.3. Kui seal esitatud seisukohad on sobilikud, kantakse need üle tihendamise juhendi käesolevasse peatükki.

9 Pinnase tihendamisel tekkivad probleemid ja nende kõrvaldamine

Ületihendamine on pinnase ülemäärane tihenemine koormuse intensiivsuse või kestuse (sh ehitusmasinate liiklemise) tõttu, mille tulemuseks on liiga kõrge pooriveerõhk, mis põhjustab täite soovimatuid omadusi, nt veeldumine (pinnas hakkab „vertruma“ või „õõtsuma“). Probleemi lahenduseks on:

- pinnase asendamine;
- ootamine, millal pinnas kuivab;
- pinnase kobestamine ja kuivada laskmine (aereerimine) ning sobiliku veesisalduse saavutamisel planeerida ja tihendada uuesti;
- pinnase segamine sideainetega (nt põlevkivituha või lubjaga);
- pinnase segamine teise pinnasega (nt ühtlaseteraline liiv, fraktsioneeritud killustik, vähese peenosisesisaldusega kruus), et võimaldada mahutada pinnasesse paremini seal olevat vett ning suurendada pinnase veejuhtivust, või segamine kuiva pinnasega;
- kõrge veejuhtivusega vahekihtide kasutamine, mis läbi on võimalik liigset vett peeneteralisest pinnasest välja drenida.

Probleemi saab ennetada teades tihendatava pinnase looduslikku ja optimaalset veesisaldust. Kui nt kuiva kruus- või moreenpinnast tuleb tihendamiseks kasta ning kui kiht jääb seejärel intensiivse koormamisega sõiduteeks, tuleks optimaalne veesisaldus leida kasutades modifitseeritud Proctor-teimi, mis arvestab kõrgema tihendamisenergiaga ning annab seega madalama optimaalse veesisalduse väärtuse. Kui on oodata sademeid, siis paigaldatud pinnased tuleks tihendada võimalikult kiiresti, et sademeveed ei muudaks pinnaseid märjemaks (tihendatud pinnase poorsustegur on madalam, mistõttu sademevete infiltreerumine on aeglasem ja suurem osa vett valgub kihilt ära).

Vihmaperioodidel tuleb veetundlike pinnaste korral kaaluda mullatööde katkestamist. Vajaduse korral tuleb maapind tihendada, et takistada liigse vee sissepääsemist pinnasesse.

Alatihendamine on olukord, mil ei ole saavutatud pinnase soovitud omadusi, sest poorsustegur on veel liiga kõrge. Kui olenemata tihendamisest ei saavutata soovitud tihedust, siis võimalikeks variantideks on:

- tihendatava kihi all oleva pinnasemassiivi kandevõime on ebapiisav (nt plastsele savile paigaldatakse 20 cm killustikku): sellisel juhul, ei suuda aluspinnas tihendatavat kihti piisavalt toetada ning peale paigaldatav kiht ei tihene. Probleem tuleb lahendada koostöös projekteerija ja/või geotehnikuga;
- tihendatava kihi veesisaldus on liiga madal, mistõttu pinnas ei tihene: veesisaldust tuleb kastmisega suurendada;
- tihendatava kihi veesisaldus on liiga kõrge, mistõttu pinnase poorides olev vesi takistab pinnase tihendamist, sest pooriveerõhk surub pinnaseosiseid üksteisest eemale: pinnasel tuleb lasta kas kohapeal olles kuivada (võib võtta väga kaua aega), pinnas tuleb uuesti kobestada ja lasta kuivada (võimalik kuiva ilmastiku korral), kasutada hüdraulilist sideainet pinnase kuivatamiseks (põlevkivituhk või lubi, eeldab eelnevat laboratoorset katsetamist vajaliku sideainekoguse leidmiseks).

Probleemi saab ennetada teades ja arvestades käesoleva juhendi nõuete ja soovitustega tihendamistööde läbiviimisel.

Vette paigaldatud mulde tihendamine. Mulle paigaldatakse veepiirist mõnevõrra kõrgemale. Seejärel toimub tihendamine tavalisel viisil, näiteks kasutades vibrorulli joonkoormusega 30 kN/m kuni 45 kN/m, on optimaalne ülesõitude arv 6 kuni 10.

Edasine täitmine veepinnast kõrgemal toimub tavalise täite tihendamise toimingutega. Kui deformatsioonidele esitatakse spetsiaalseid nõudeid, võib täitematerjali tihendada dünaamilise süvatihendamisega või ajutise ülekoormamisega.

Raskesti ligipääsetavate kohtade tihendamine, nt joonisel 9.1 näidatud eelnevalt valmis valatud viadukti tiibade alus ja ümbrus.

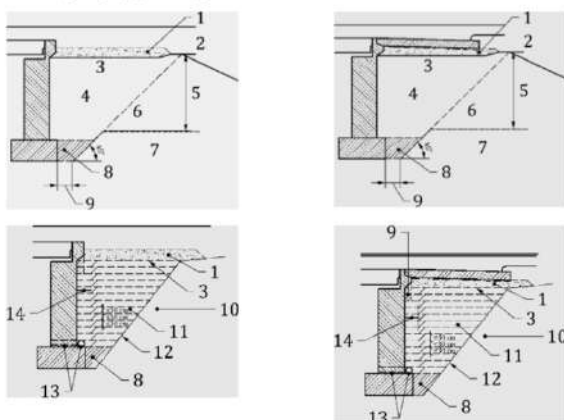


Joonis 9.1. Viadukti tiibade tagused ja alused täited jms raskesti ligipääsetavad kohad. [Foto: Kimmo Paap]

Taoliste raskesti ligipääsetavate kohtade tihendamist on käsitletud standardis EVS-EN 16907-1 joonisel B.2 (siin joonis 9.2) ja sellega seotud peatükis kus öeldakse: „tihendamise seadmed, protseduurid ja kihi paksused peavad olema sobivad nii tagasitäite- kui ka täitematerjali omaduste ja nõutava ühtluse poolest. Isegi raskesti ligipääsetavates kohtades tuleb tähelepanu pöörata tihendamise kõrgele kvaliteedile. Eemaldatud tugeidest ja halvasti ligipääsetavatest tagasitäitealadest tingitud tühimikud rajatistes tuleb täita lahja betooni, ühtlaseteralise betooni või pinnase-sideainesegudega. Pinnase paigaldamine tihendamata ei ole lubatud“.

Seega taolist olukorda, mis on näidatud joonisel 9.1, ei peaks tekitama ning muldkeha tuleks enne betooni valamist või betoonelementide paigaldamist valmis ehitada. Kui aga selline olukord on tekkinud, siis tuleb tihendada nii kõrgele, kui see on tihendusmasinatega füüsiliselt võimalik (arvestada tuleb, et ka tihendustegurit peab saama kontrollida, milleks on vajalik teatud ligipääsetavus) ning seejärel tuleb paigaldada EVS-EN 16907-1 mainitud sideainega seotud kiht, mida on võimalik tihendada kasutades vibratsiooni. Kui pinnas jääb taolises kohas tihendamata, tekib märkimisväärne oht nii erosiooniks kui niiskusevajumiteks, aga seoses pinnase madalama nihketugevusega ka lokaalseks nõlva purunemiseks.

Suhteliselt raskesti ligipääsetavad tagasitäitmisalad on alad, kus piisav tihendamine standardsete tihendamisseadmete abil ei ole võimalik. Neil aladel tuleb tagasitäitena kasutada lahjat betooni või sobivat pinnase-sidematerjalisegu (vt joonis B.2).



Sełgitused

- 1 Sidumata alus
- 2 Pealesõidu ramp
- 3 Katte alune kiht
- 4 Tagasitäide (vt jaotis 5.8.4.2)
- 5 Töökiht
- 6 Mulle (vt jaotis 5.8)
- 7 Looduslik pinnas
- 8 Raskesti ligipääsetavade alade tagasitäide (vt jaotis 5.8.2.3)
- 9 Töö tegemiseks vajalik kaeve
- 10 Looduslik pinnas või olemasolev muldkeha
- 11 Tagasitäide ja tihendamine (vt jaotis 5.8.4.2)
- 12 Kaevatud nõlv (nõlvus vastavalt nihketugevusele) või toestav süsteem
- 13 Dreenaž (vajadusel)
- 14 Dreeniv ala (vt jaotis 5.8.3.2)

Joonis B.2 — Tagasitäitmine

Joonis 9.2. EVS-EN 16907-1 väljavõte seoses rajatiste raskesti ligipääsetavate kohtadega, mida ei ole võimalik tihendada. [4]

10 Lisa 1. Katsetööde aruanne

Pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli uuringu eesmärkideks oli muuhulgas (vastavalt töö lähteülesandele):

- Luua usaldusväärne tabel (analoogne tabel nagu on kehtivas Pinnaste ja tihendamise kontrolli juhises *Tabel 5*), kus on käsitus Muldkeha liivpinnaste vähimate tihendustegurite (Kt) ja tihedusnäitajate (T) vahel.
- Töövõtja ülesandeks on teostada uued katsed liivpinnastel, kruuspinnastel, killustikalustel, savikatel pinnastel, kergmaterjalidel ja aherainel, mis oleksid usutavad, annaksid usaldusväärseid tulemusi tihedusnäitaja ja tihedusteguri vahel ja säiliks kergseadmete (Inspector, Dynatest, Saksa nõuetele vastavad kergseadmed ja muud Eestis kasutusel olevad mõõteseadmed) kasutamise võimalus. Lisaks anda ka plaatkoormuseadme tihedusteguri väärtused eelnimetatud materjalide/kihtide kohta (E2/E1 tihedusteguri väärtus).
- Anda juhised teedeehituslikult kasutatavate materjalide ja pinnaste (kruuspinnased, killustikalused, savikad pinnased, kergmaterjalid ja aheraine) tiheduse saavutamise ning lõpliku tiheduse kontrollimise kohta (anda mõõdetavad väärtused nimetatud mõõteseadmetega).
- Koostada nõuded ja kontrollmeetmed, kuidas mõõta kandevõimet killustiku kihilt nimetatud mõõteseadmetega (kui saab) kui liiva ja killustiku vahele on paigaldatud geotekstiil või geovõrk. Uuringuga tuleb leida sobiva kandevõime hindamiseks usutavad väärtused ja nõuded (kontrollmeetmed), mille põhjal saaks sellises olukorras killustiku kihti vastu võtta ja hinnata selle sobivust.
- Kui on tegemist nõ kogemusliku tiheduse hindamisega (kui on materjalid, mille puhul ei saa tihedustegurit mõõta), siis öelda ette antud materjalile number, mis on kogemuslikult piisav hindamiseks saavutatud tihedust (Saksa koolkonna lähenemine).

Täitmaks nimetatud eesmärke, koostati alljärgnev katseplaan, mille täitmist käesolev katsetööde kokkuvõtte käsitleb.

10.1 Katsetööde lähteülesanne

Liivpinnaselt

Määratakse liiva terakoostis ning optimaalne veesisaldus ja maksimaalne kuivtihedus standardse Proctoriteimiga.

Buldooseriga laialilükatud liivakihilt mõõdetakse peale iga rulliga ülesõidu järel vähemalt kolmest punktist:

- Inspector-seadmega (140 ja 200 mm tald);
- Saksa HMP-ga (10 kg);
- Dynatest LWD-ga 300 mm tald, pinge 100 kPa;
- Penetromeetri D-51-ga;
- võetakse löikerõnga proov ning määratakse laboris mahumass ja veesisaldus.

Lõplikult tihendatult kihilt mõõdetakse plaatkoormusega E_{v1} ja E_{v2} .

Moreenilt (Tm 65) või kruusalt

Määratakse pinnase terakoostis ning optimaalne veesisaldus ja maksimaalne kuivtihedus standardse Proctoriteimiga.

Buldooseriga laialilükatud kihilt mõõdetakse peale iga rulliga ülesõidu järel vähemalt kolmest punktist:

- Inspector-seadmega (140 ja 200 mm tald);
- Saksa HMP-ga (10 ja 15 kg);
- Dynatest LWD-ga 300 mm tald, pinge 100 kPa;

Lõplikult tihendatult kihilt mõõdetakse plaatkoormusega E_{v1} ja E_{v2} . Lisaks määratakse tihedus liivakoonuse meetodil.

Paekiviliivalt

Buldooseriga laialilükatud kihilt mõõdetakse peale iga rulliga ülesõidu järel vähemalt kolmest punktist:

- Inspector-seadmega (140 ja 200 mm tald);
- Saksa HMP-ga (10 kg);
- Dynatest LWD-ga 300 mm tald, pinge 100 kPa;
- Penetromeetri D-51-ga;
- võetakse lõikerõnga proov ning määratakse laboris mahumass ja veesisaldus ning võrreldakse standardse Proctor-teimi andmetega.

Lõplikult tihendatult kihilt mõõdetakse plaatkoormusega E_{v1} ja E_{v2} .

Killustikaluselt

- fraktsioneeritud killustikust alus;
- ridakillustikust alus;
- kui killustiku all on geosünteed.

Laialilükatud kihilt mõõdetakse peale iga rulliga ülesõidu järel vähemalt kolmest punktist:

- Inspector-seadmega (140, 200 mm tald);
- Saksa HMP-ga (10 ja 15 kg);
- Dynatest LWD-ga 150 mm tald, pinge 300 kPa;

Lõplikult tihendatult kihilt:

- jälgitakse, kuidas kiht peale tihendamist käitub (rulli jäljed, killustikutera purunemine valtsi all);
- mõõdetakse plaatkoormusega E_{v1} ja E_{v2} ;
- mõõdetakse FWD-seadmega $E1$ ja $E2$.

Aherainest kihilt, kui kiht on pealt kiilutud

Mõõdetakse valminud kihilt peale seda, kui tihendusmasina kohaselt on kiht tihe.

- Inspector-seadmega (140 ja 200 mm tald).
- Saksa HMP-ga (10 ja 15 kg);
- Dynatest LWD-ga
 - 300 mm tald, pinge 100 kPa;
 - 150 mm tald, pinge 300 kPa;
- plaatkoormuse E_{v1} ja E_{v2} .

Savikas pinnas

Mõõdetakse valminud kihilt peale seda, kui tihendusmasina kohaselt on kiht tihe.

- Inspector-seadmega (140 ja 200 mm tald).
- Saksa HMP-ga (10 kg);
- Dynatest LWD-ga 300 mm tald, pinge 100 kPa;
- plaatkoormuse E_{v1} ja E_{v2} ;
- liivakoonusega mahumass ja võrdlus standardse Proctor-teimiga.

10.2 Katsetööde tulemused ja järeldused

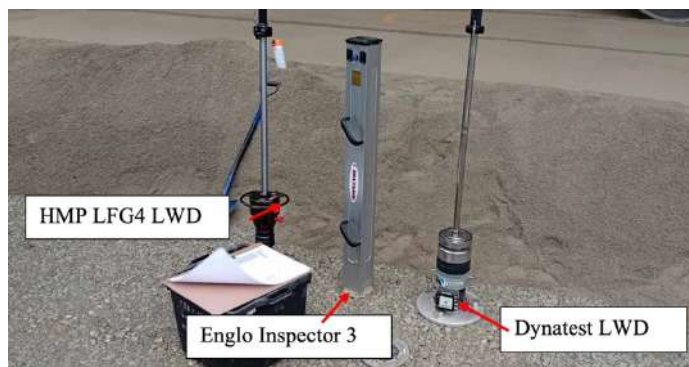
Uuringu raames võeti proove ja tehti katsetusi erinevatel materjalidel ning erinevate seadmetega vastavalt katseplaanis püstitatud eesmärkidele. Kokku tehti 12-l ehitusobjektile 627 mõõteseeriat. Katsete eesmärgiks oli välja selgitada sobilikud meetodid kiireks tihendus kvaliteedi kontrollimiseks kasutades kaudseid meetodeid.

10.2.1 Üldosa

Suures pildis jagunevad uuringus kasutatud ja testitud kergdeflektomeetrid (LWD ehk Light Weight Deflectometer) kolme kategooriasse:

1. Taani koolkond, mis vastab ASTM E2583 nõuetele. Seadmete tootjad on või on olnud: Keros, Carl Bro/Grontmij/Sweco Prima, Terratest 9000, Dynatest, 3ipe, Rincent MiniDyn);
2. Saksa koolkond, mis vastab ASTM E2835 nõuetele. Seadmete tootjad on: Zorn, HMP, Terratest, Olson;
3. Soome koolkond. Seadmete tootjad on: AL-Engineering Oy (Loadman) ja Englo OÜ (Inspector).

Eeldatakse, et ühe koolkonna, kas Taani või Saksa, seadmed annavad omavahelises võrdluses võrdväärseid tulemusi. Kuigi katseid tehti ühe Taani (Dynatest LWD) ja ühe Saksa (HMP) koolkonna LWD-ga, siis tulevikus ühe koolkonna piirides konkreetset LWD tootjat ei eelistata ega piirata. Soome koolkonnast kasutati Inspector-seadet (Inspector 3), mille võrdlus Loadman-seadmega on teada varasematest uuringutest [21]. Käesolevas uuringus kasutatud kergdeflektomeetrid on kujutatud joonisel 10.1 ning nende omavaheline võrdlus antud tabelis 10.1.



Joonis 10.1: Töö raames kasutatud kergdeflektomeetrid, paremalt HMP, Inspector 3 ja Dynatest LWD [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp].

Tabel 10.1: Kergdeflektomeetrite võrdlus, seadmete erinevad pingerežiimid.

	Englo Inspector 3 (Soome koolkond)		HMP LFG4 LWD (Saksa koolkond)		Dynatest LWD (Taani koolkond)	
Talla diameeter (mm)	140	200	300	300	150	300
Langev mass (kg)	10	10	10	15	10	10
Pinge talla all (kPa)	1500	740	100	150	300	100

Märkus: Tabelis on välja toodud ainult uuringus kasutatud pingerežiimid. Tegelikke võimalikke pingerežiime on Englo Inspectori ja Dynatest LWD puhul rohkem.

Mõõtmistega alustades veenduti kõigepealt, et mõõdetav kiht oleks piisavalt tasane ning kui seade asetati mõõtmispunktile, pidi see olema püstloodis, et langev raskus saaks kukkuda ilma liigse hõõrdumiseta. Deflektomeeter ei tohi mõõtmise ajal „kõlkuda“ ehk seade peab sobituma mõõdetavale pinnale sedasi, et plaat oleks täies ulatuses kontaktis mõõdetava pinnaga.

Mõõtmiste pingerežiimide osas lähtuti üldjoones järgmistest, kuigi katsetamise eesmärkidel katsetöödel varieeriti erinevate pingerežiimidega (igapäevases kvaliteedikontrollis peaks lähtuma alljärgnevast):

- liiv- ja moreenpinnastel (laiemalt muldkeha pinnased, sh liivadest dren-, filter- ja külmakaitsekihid, looduslikud aluspinnased) Taani ja Saksa koolkonna puhul umbes 100 kPa (langev mass 10 kg 300 mm plaadile) ja Inspector seadme puhul maksimaalselt 740 kPa („suure“ Inspectori kasutamisel eeldab 200 mm talla kasutamist, joonis 10.2). **Inspector seadme puhul on tungivalt soovituslik kasutada seadmest eraldi plaati (kas 200 või 300 mm), mis jääb kogu mõõteseeria vältel mõõdetavale pinnale.** Vastasel juhul suureneb võimalik mõõteviga, sest seadme vinnastamisel eemaldatakse see katsepunktilt ning on tõenäosus, et katsepunkt veidi nihkub, kui seade asetatakse tagasi pinnasele ning mõõtetulemus võib seeläbi saada mõjutatud;
- killustikelt (laiemalt kõrge kandevõimega tee-ehitusmaterjalid, sh kruusad, aheraine, sideainega seotud kihid) Taani ja Saksa koolkonna puhul umbes 150...300 kPa (Saksa seadmetel langev mass 15 kg 300 mm plaadile; Taani seadmetel 10 kg 150 mm plaadile). Inspector seadme puhul sobib kasutamiseks nii 140 kui 200 mm tald.



Joonis 10.2: Inspector-seade koos 200 mm tallaga, mida ei kinnitata seadme külge. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]

Mõõtmisseerias kasutati järgmisi löökide arvu:

1. Taani koolkond: 8 lööki;
2. Saksa koolkond: 6 lööki;
3. Englo Inspector: 8 lööki.

Iga plaatkoormuskatse ja/või FWD katsepunkti lähedasest alast (<4 m) mõõdeti iga kergseadmega minimaalselt 3 mõõtmisseeriat ning liivpinnastel võeti 3 löikerõnga- ja 1 pinnaseproov. Kui mõõdetava liivpinnase kihipaksus võimaldas, teostati mõõtmine ka penetromeetriga. Selliselt leiti iga katsepunkti mõõtmisseeriade aritmeetiline keskmine. Saadud kandevõimet (elastsumoodulit) võrreldi laboratoorsel teel mahumasside võrdlusega saadud tihendusteguriga eesmärgiga leida seosed, mille põhjal oleks ehitusobjektidel võimalik anda kiiresti hinnang kontrollitava kihi tiheduse osas.

Katsemõõtmised teostati tabelis 10.2 näidatud objektidel koos seal katsetatud pinnase või materjaliga.

Tabel 10.2: Katseobjektide asukohad ning katsetatud materjalid.

Objekt	Materjal
Hooneümbruse plats, 1	Pestud paekivisõelmed
Hooneümbruse plats, 2	Pestud paekivisõelmed
Põhimaantee	Kruus- ja jämeliiv (Cu>3)
Linnatänav Tallinnas	Kvartsliid (keskliiv, Cu>3)
Kergliiklustee Harjumaal	Kvartsliid (keskliiv, Cu 2..3)
Karjäär, looduslik kehand	Kvartsliid (keskliiv, Cu 2..3)
Viadukti muldkeha tugimaanteel, 1	Kvartsliid (keskliiv, Cu 2..3)
Tugimaantee	Killustikalus (graniit + paekivi + geotekstiil)
Viadukti muldkeha tugimaanteel, 2	Killustikalus (paekivi + geotekstiil)
Hooneümbruse plats, 3	Killustikalus (kiilutud)
Raskelt koormatud juurdepääsutee	Killustikalus (kiilutud)
Viadukti muldkeha tugimaanteel, 3	Moreen
Viadukti muldkeha tugimaanteel, 4	Moreen
Laoplatz	Põlevkivi aheraine fr 0-300

10.2.2 Mõõtmised liivpinnastelt

Järgnevalt on välja toodud lõikerõngaste alusel leitud tihendusteguri ja LWD seadmete E_{vd} näitaja korrelatsioonikordaja. Valemid põhinevad reaalsel katsetulemusel.

Pestud paekivisõelmete ehk paekiviliiva ning kvartsliliva puhul võrreldi lõikerõngaste alusel leitud kuivmahumasse standardse Proctorteimiga leitud kuivmahumassidega, misjärel saadi tihendustegurid. Seejärel võrreldi tihendustegureid ja LWD seadmete tulemusi ning leiti järgnevad seosed. Saksa ja Taani koolkonna seadmete puhul on oluline kasutada liivadel 100 kPa pingerežiimi, sest eesmärk on hinnata kihi olemasolevat seisundit. Suurema kontaktpingega mõõtes hakkab deflektomeeter tallaalust kihti mõõtmisreeia käigus liigselt tihendama, mis moonutab saadavat E_{vd} väärtust. Liiga suure kontaktpinge kasutamisel (nt Inspectori 140 mm tallaga 1500 kPa) võidakse ületada ka pinnase nihketugevus.

Liivpinnaseid katsetati järgnevate seadmetega:

- kergdeflektomeetrid: Dynatest LWD, HMP, Inspector 3;
- plaatkoormuskatsed;
- penetromeeter PM-1 (joonis 10.5, tootjaks Englo; vastab penetromeeter Beldornii D51 näitajatele) siis, kui liivakihi paksus seda võimaldas;
- lõikerõngaproovid, joonised 10.3 ja 10.4



Joonis 10.3: Lõikerõnga proovi võtmine kvartsliidast. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]



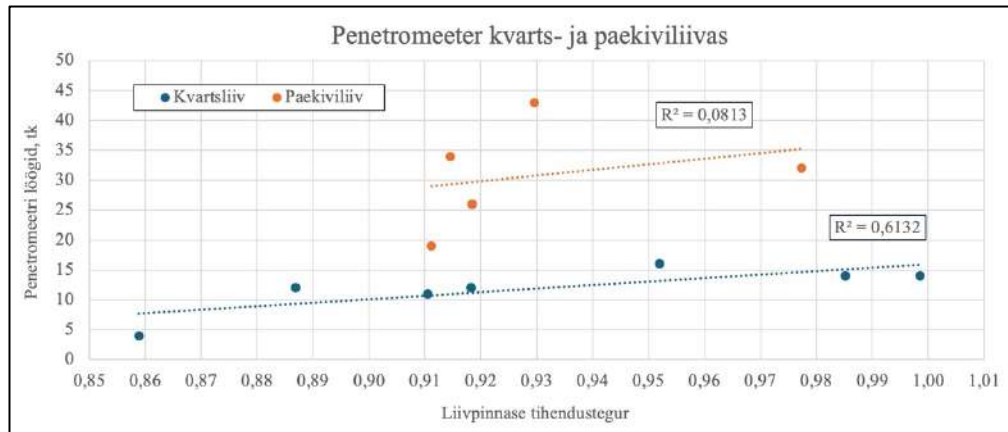
Joonis 10.4: Lõikerõnga proovi võtmine pestud paekiviliivast. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]



Joonis 10.5: Penetromeetri katse kvartsliidal. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]

Penetromeeter

Penetromeetriga saadud katsepunkte oli suhteliselt vähe, sest objekte, kus oleks olnud piisavas paksuses liivakihti (min. umbes 35 cm), ei olnud piisavalt. Kvarts- ja paekiviliival saadud katsetulemused on koondatud joonisele 10.6, mille kohaselt eriti paekiviliiva puudutavad seosed on ebapiisavad.



Joonis 10.6. Penetromeetri löökide arvu ja löikerõngaga leitud liiva tihendusteguri seosed.

Penetromeetri kasutamisel mõõdetakse sisuliselt pinnase nihketugevust, sest penetromeetri koonuse süvistamisel pinnasesse peab toimuma nihketugevuse ületamine ehk pinnase purustamine. Mida suurem on pinnase nihketugevus, seda rohkem penetromeetri lööke vajatakse ja vastupidi. Kui kvartsiiva terad on ümarad kuni kuupjad, siis paekiviliiva terad on suuresti plaatjad, mistõttu penetromeeter käitub nendes pinnastes erinevalt. Penetromeetriga kaasa antud löökide arvu ja tihendusteguri andmed põhinevad vaid kvartsiivade katsetamisel, mistõttu neid ei saa üle kanda paekiviliivale. Praeguste andmete kohaselt ei ole penetromeetrit seega võimalik paekiviliiva tihendusteguri hindamiseks kasutada või tuleb sellele pinnasele koostada eraldi graafik.

Käesolevalt katsetatud kvartsiivad olid valdavalt väga ühtlaseteralised ($C_u < 3$), mille nihketugevus on nõrgem, kui eriteralistel pinnastel. Olemasolev penetromeeter ei sobitu kuigivõrd hästi väga ühtlaseteraliste liivade tihendusteguri hindamiseks, mida kinnitavad ka käesolevalt saadud katsetulemused, sest kõrged tihendustegurid saadi “liiga väheste” löökide arvuga. Nimelt, kuna ühtlaseteraliste liivade nihketugevus on võrreldes eriteralistel liivadega madalam, siis sama tihendusteguri juures saab ühtlaseteralistel liivadel olla vähem penetromeetriga saadud lööke.

Eeldame näiteks, et võrreldavate liivade ainsaks erinevuseks on nende terakoostise ühtlus, siis Hansen ja Lundgren (1960) valemi kohaselt on nende liivade sisehõrdenurk:

- ühtlaseteralistel liivadel 33° ;
- keskmistel liivadel 36° ;
- ebahõrdealistel liivadel 39° .

Ebahõrdealistel (eriteralistel) liivade sisehõrdenurk on antud näite põhjal ümardades 20% kõrgem, kui ühtlaseteralistel liivadel. Või toome teise näitena terade kuju arvestava teguri, kus, kui kõik muud tingimused on samad, saadakse sisehõrdenurkadena:

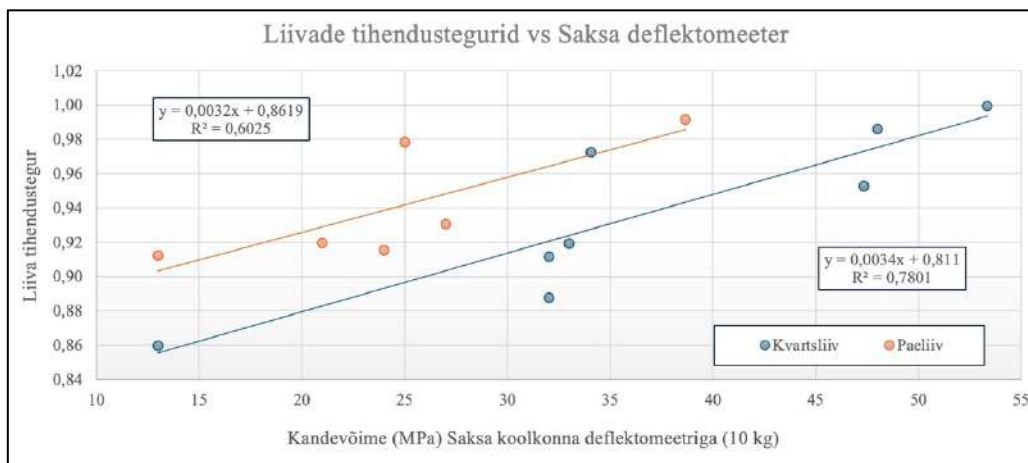
- keskmise teraga liivad: 36° ;
- ümardunud teraga liivad: 33° ;
- väga ümardunud teraga liivad: 31° .

Oletame, et omavahel võrreldakse väga ümardunud teradega väga ühtlaseteralist liiva keskmise tera ja ebaühtlase koostisega liivaga, mis mõlemad on keskmise tiheduse juures. Sellisel juhul on esimese sisehõordenurk 28°, teisel aga 39° ehk teine on esimesest pea 40% suurema sisehõordenurgaga. Penetromeetri kasutamist silmas pidades võib seega näiteks 16 lööki tähendada erinevatel liivadel samaaegselt tihendustegurit 0,97 või 0,99.

Lisas 1 on antud originaalgraafik kasutamiseks koos penetromeetriga, mis vastab Beldornii D-51 näitajatele. Käesolevast töös on seda oluliselt täiendatud, mille põhjendus oli antud osaliselt eelnevalt ning mida jätkatakse peatükis 10.3.1.

Deflektomeetrid

Joonisel 10.7 on kujutatud HMP LWD ehk Saksa koolkonna seadmega saadud korrelatsioonid nii kvarts- kui paekiviliivalt mõõdetud kandevõime ja pinnase kuivmahumasside põhjal leitud tihendustegurite vahel.



Joonis 10.7. Liiva tihendusteguri ja Saksa koolkonna LWD vaheline seos (100 kPa).

Seosed liivade tihendustegurite ja Saksa koolkonna LWD-ga saadud kandevõime (kasutades langeva massina 10 kg ehk kontaktpinget 100 kPa) vahel on esitatatavad järgmiselt.

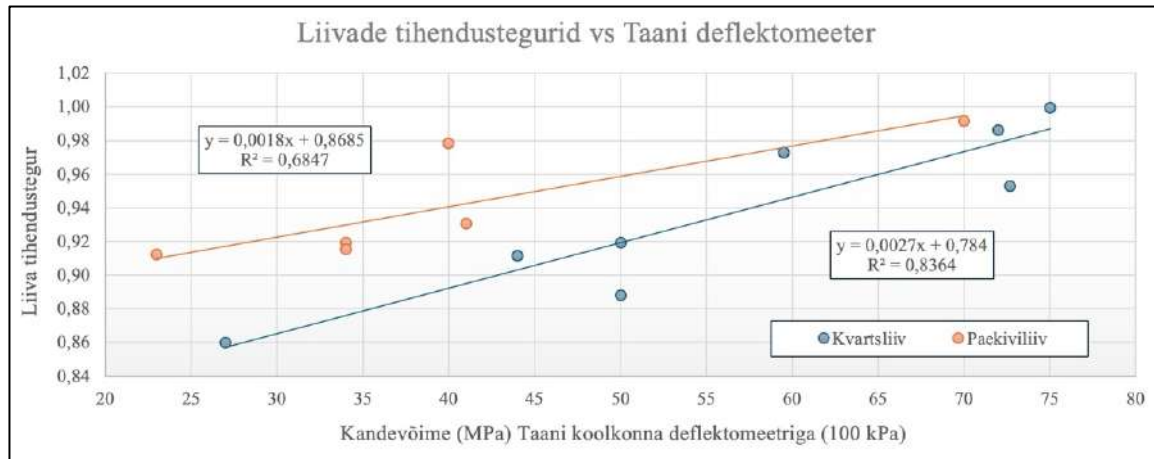
- **Kvartsiiva tihendusteguri ja Saksa koolkonna LWD mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{kvartsiiv}} = 0,0034 * \text{Saksa } E_{vd(@100 \text{ kPa})} + 0,811; R^2 = 0,78$$

- **Paekiviliiva tihendusteguri ja Saksa koolkonna LWD mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{paekiviliiv}} = 0,0032 * \text{Saksa } E_{vd(@100 \text{ kPa})} + 0,8619; R^2 = 0,60$$

Joonisel 10.8 on kujutatud Dynatest LWD ehk Taani koolkonna seadmega saadud korrelatsioonid nii kvarts- kui paekiviliivalt mõõdetud kandevõime ja pinnase kuivmahumasside põhjal leitud tihendustegurite vahel.



Joonis 10.8. Liiva tihendusteguri ja Taani koolkonna LWD vaheline seos (100 kPa).

Seosed liivade tihendustegurite ja Taani koolkonna LWD-ga saadud kandevõime (kasutades langeva massina 10 kg ja 300 mm koormusplaati ehk kontaktpinget 100 kPa) vahel on esitatavad järgmiselt.

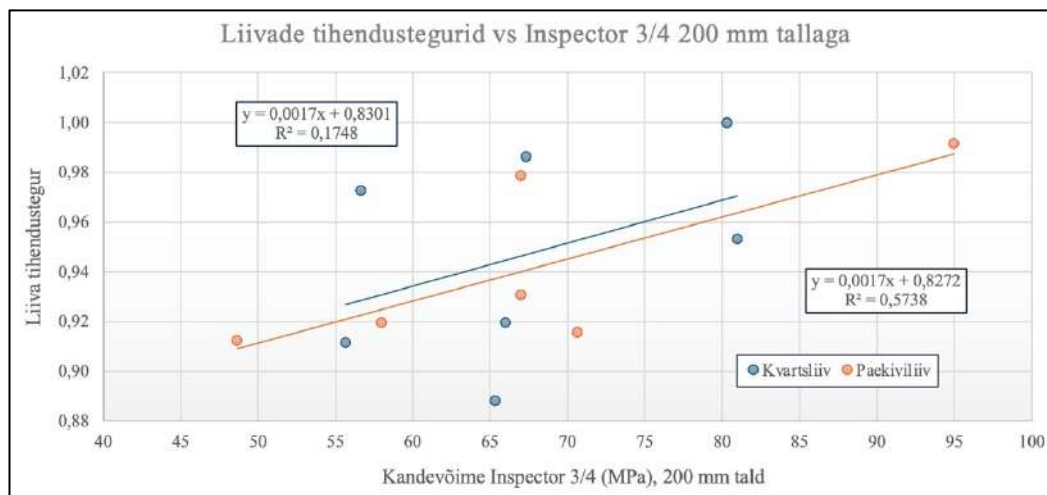
- **Kvartsiiva tihendusteguri ja Taani koolkonna LWD mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{kvartsiiv}} = 0,0027 * \text{Taani } E_{vd}(@100 \text{ kPa}) + 0,784; R^2 = 0,84$$

- **Paeliiva tihendusteguri ja Taani koolkonna LWD mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{paekiviiv}} = 0,0018 * \text{Taani } E_{vd}(@100 \text{ kPa}) + 0,8685; R^2 = 0,68$$

Joonisel 10.9 on kujutatud Inspector-seadme 200 mm läbimõõduga tallaga saadud korrelatsioonid nii kvarts- kui paekiviivalt mõõdetud kandevõime ja pinnase kuivmahumasside põhjal leitud tihendustegurite vahel.



Joonis 10.9. Liiva tihendusteguri ja 200 mm läbimõõduga tallaga Inspector 3/4 vaheline seos.

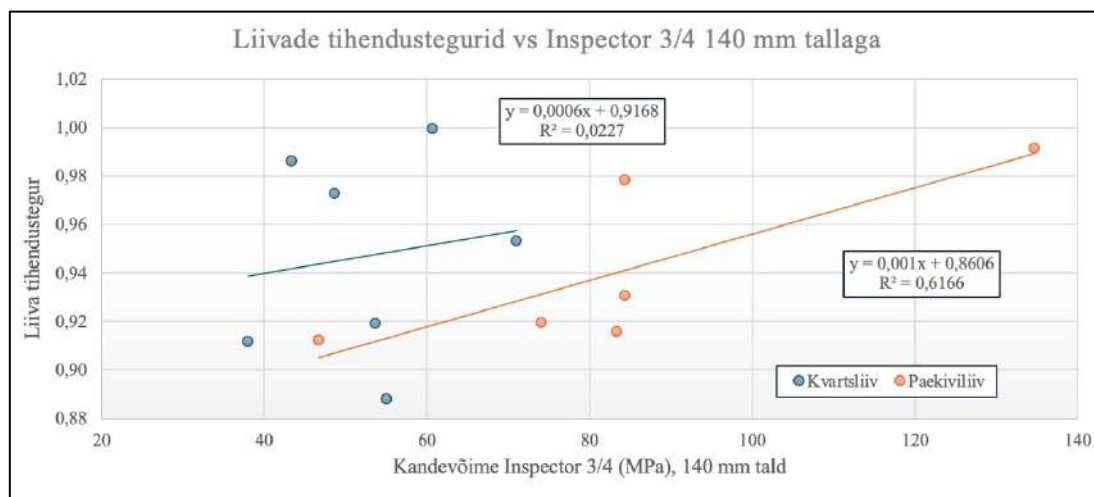
- **Kvartsiiva tihendusteguri ja Inspector 3/4 200 mm tallaga mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Seos on ebapiisav, } R^2 = 0,17$$

- **Paeliiva tihendusteguri ja Inspector 3/4 200 mm tallaga mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{paekiviliiv}} = 0,0017 * \text{Inspector}_{200 \text{ mm}} + 0,8273; R^2 = 0,57$$

Joonisel 10.10 on kujutatud Inspector-seadme 140 mm läbimõõduga tallaga saadud korrelatsioonid nii kvarts- kui paekiviliivalt mõõdetud kandevõime ja pinnase kuivmahumasside põhjal leitud tihendustegurite vahel.



Joonis 10.10. Liiva tihendusteguri ja 140 mm läbimõõduga tallaga Inspector 3/4 vaheline seos.

- **Kvartsliaiva tihendusteguri ja Inspector 3/4 140 mm tallaga mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Seos on ebapiisav, } R^2 = 0,02$$

- **Paeliiva tihendusteguri ja Inspector 3/4 140 mm tallaga mõõdetud E_{vd} seos:**

$$\text{Tihendustegur}_{\text{paekiviliiv}} = 0,001 * \text{Inspector}_{140 \text{ mm}} + 0,8606; R^2 = 0,62$$

Kvartsliaivadelt saadi head korrelatsioonid mõõdetava kandevõime ja kuivmahumasside võrdlusest saadud tihendusteguri vahel, v.a Inspector-seadme kasutamise korral. Inspector-seadmega saadud tulemused on kooskõlas varasemate uuringutulemustega, mille osas järeltas Peeter Talviste oma ekspertarvamuses 16.09.21 (Lisas 3) järgmiselt: “TTÜ uuringuga andmetel ei võimalda tihendatud liiva katsete tulemused leida rahuldava tugevusega seost tihedusnäitaja ja tihendusteguri vahel.”

Inspector-seadme kasutamisega liivadel on probleemiks liiga kõrge kontaktpinge talla all. Nimelt nende suurtel seadmetel (kuni mudelini 4) on pinge talla all mõõtmishetkel sõltuvalt kasutatud koormusplaadi diameetrist 1500 kPa (140 mm), 730 kPa (200 mm) või 330 kPa (300 mm). Kergemal Inspector-5 seadmel on samade talladiameetrite korral pinge vastavalt 750 kPa, 365 kPa või 165 kPa. Liiga suurte kontaktpingete kasutamisega ületatakse mõõtmise käigus liiva nihketugevus ja/või järeltihendatakse mõõtmise käigus liivakihti liialt, millega moonutatakse mõõtetulemusi.

Joonistel 10.11 ja 10.12 on esitatud võrdlus, kuidas Inspector-seade on käitunud samal liivakihil 140 mm ja 200 mm talla kasutamiseks. Suurema tallaga väheneb Inspectori pingerežiim ligi 2 korda ehk 1500 kPa väheneb 740 kPa juurde ning seetõttu ei suruta suurema talla all liiva külgedele ning seade ei „upu“ pinnasesse. Suurema talla eeliseks on ka asjaolu, et katseseeria käigus on välistatud mõõdetava punkti pikisuunaline liikumine. Englo pakutaval suuremal 200 mm tallal on juhtpuksid, mis tsentreerivad seadme peale igat vinnastamist ning plaat jääb kuni katse lõpuni sama koha peale.



Joonised 10.11 ja 10.12. Inspector-seade on „upunud“ liivakihti 140 mm talla kasutamisel ning jäänud sama liivakihi peale 200 mm tallaga. [Fotod: Simmo Talpas-Taltsepp]

Käesolevas uuringus tehtud katsete põhjal saab hinnata, et Inspector-seadme kasutamisel kvartslüivade mõõtmiseks tuleks kasutada vähemalt 200 mm läbimõõduga koormusplaati (kuigi ka selle puhul olid saadud seosed kandevõime ja tihendusteguri vahel ebapiisavad). Seadme tootjal on olemas ka 300 mm plaat, mida käesolevas uuringus ei katsetatud, sest see ei ole olnud kuigivõrd levinud. Tõenäoliselt oleks liivade mõõtmiseks kõige sobilikum Inspectori kergem mudel ehk käesoleval hetkel nr 5. Saamaks Inspector-seadmetega usaldusväärsemaid seoseid kvartslüivade tihendustegurite hinnanguks, tuleks teostada nende seadmetega täiendavaid katseid leidmaks sobilikku pingerežiimi. Katsetulemuste kohaselt sobib Inspector-seade paekivi-liiva mõõtmiseks, kuna selle nihketugevust katsetamise käigus ei ületata.

Pestud paekivi-liival läbiviidud mõõtmised näitasid rahuldavaid korrelatsioone mõõdetava kandevõime ja kuivmahu masside võrdlusest saadud tihendusteguri vahel.

Saadud andmete põhjal on koostatud tabelid 10.3 ja 10.4, mis võimaldavad hinnata liivpinnaste tihendustegurit läbi mõõdetava kandevõime. Antud teemat käsitletakse veel täiendavalt peatükis 10.3.1.

Tabel 10.3. LWD seadmega mõõdetud kandevõime üleminekutabel kvartslüiva, mis terakoostise poolest on pigem ühtlaseterised ($C_u < 6$) kesk- kuni jämeliivad (kõige iseloomulikumaks pinnaseks võib lugeda Tm_105), tihendusteguriks.

Kvartslüivad			
Tihendustegur (standardsest Proctorist)	Saksa LWD 10 kg (MPa)	Taani LWD @100 kPa (MPa)	Inspector
0,90	25	40	Ei ole piisavalt usaldusväärseid andmeid
0,91	30	45	
0,92	33	50	
0,93	35	55	
0,94	38	58	
0,95	40	60	
0,96	45	65	
0,97	48	70	
0,98	50	73	
0,99	53	75	
1,00	55	80	
1,01	58	85	
$R^2 =$	0,78	0,83	

Tabel 10.4. LWD seadmega mõõdetud kandevõime üleminekutabel pestud paekiviüiva tihendusteguriks.

Pestud paekiviüiv				
Tihendustegur (standardsest Proctorist)	Saksa LWD 10 kg (MPa)	Taani LWD @100 kPa (MPa)	Inspector 200 mm	Inspector 140 mm
0,90	10	20	40	45
0,91	13	25	50	50
0,92	15	30	55	55
0,93	20	35	60	60
0,94	25	40	65	70
0,95	30	45	70	80
0,96	33	50	80	90
0,97	37	58	85	100
0,98	40	65	90	110
0,99	45	73	95	120
1,00	50	78	100	130
1,01	55	85	105	140
$R^2 =$	0,60	0,68	0,57	0,62

10.2.3 Mõõtmised killustikalustelt

Kuna killustikalustest, eriti fraktsioneeritud killustikust, on väga tülikas võtta mahumassi proovi, lisaks on keerukas saada etalontihedust (nt modifitseeritud Proctor purustab lubjakivikillustikku moonutades selle kuivmahumassi), siis käesolevas uuringus võeti eelduseks, et killustike puhul peaks kontrollima kandevõimet (kergeflektomeetrite puhul) ning näiteks Soome ja Saksa näidetele plaatkoormuskatse ja FWD-seadme korral ka moodulite suhet. Seega siin tehtud katsetöödega otsiti muuhulgas plaatkoormuskatse teise koormamise käigus arvatud elastsusmooduli E_{v2} ja LWD seadmete E_{vd} vahelist seost.

Iga plaatkoormuskatse punkti kohta teostati iga seadmega minimaalselt 3 kergseadme mõõtmisseeriat. Killustikaluste puhul on oluline kasutada ka suuremat pingerežiimi, kui liivpinnastel, sest killustikalusele mõjub reaalses tööolukorras suurem koormus. Kui Taani ja Saksa koolkonna seadmetel kasutati liivpinnastel 100 kPa pingerežiimi, siis killustikalustel kasutatakse Taani koolkonna seadme puhul lisaks 300 kPa ja Saksa seadme puhul 200 kPa režiimi.

Dynatest LWD puhul saavutatakse suurem pinge tänu väiksema talla võimalusele (150 vs 300 mm) ning langemiskõrguse muutmisele. Saksa HMP seadme puhul suurendatakse pinget läbi langeva raskuse suurendamise 5 kg võrra ehk 10 vs 15 kg. Inspector seadmega kasutati 1500 kPa (140 mm tallaga) ja 740 kPa (200 mm tallaga).

Killustikalustelt tehti katseid järgenvate seadmetega:

1. kergseadmed: Dynatest LWD @300 kPa; HMP kasutades 15 kg ja Inspector 3;
2. plaatkoormuskatsed vastavalt EVS 934;
3. osadel objektidel mõõtmised FWD-seadmega.

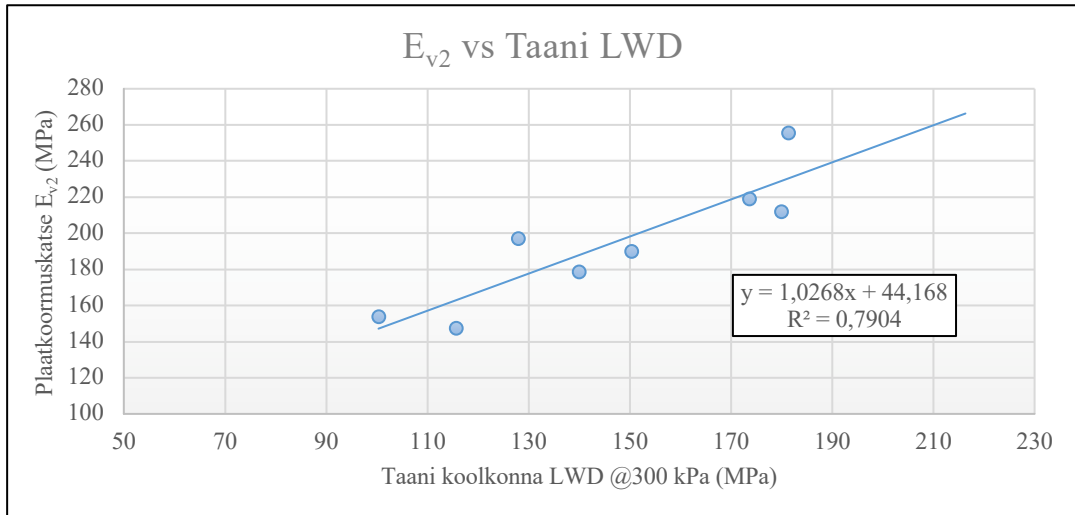


Joonis 10.13: Katsepunkt killustikalusel, kus on nähtavad kasutatud kergseadmed. Foto tegemise ajal toimub plaatkoormuskatse ülesseadmine. [Foto: Simmo Talpas-Taltsepp]

Joonisel 10.14 on esitatud võrdlus plaatkoormuse E_{v2} ja Taani koolkonna LWD (Dynatest LWD 300 kPa pingerežiimis) vahel killustikalustel.

- Mõõtes killustikaluselt, saab Taani koolkonna LWD mõõtetulemuse teisendada plaatkoormuse E_{v2} väärtuseks järgmise valemi abil:

$$E_{v2} = 1,0268 * \text{Taani LWD}_{E_{vd} (@300 \text{ kPa})} + 44,168; R^2 = 0,79$$

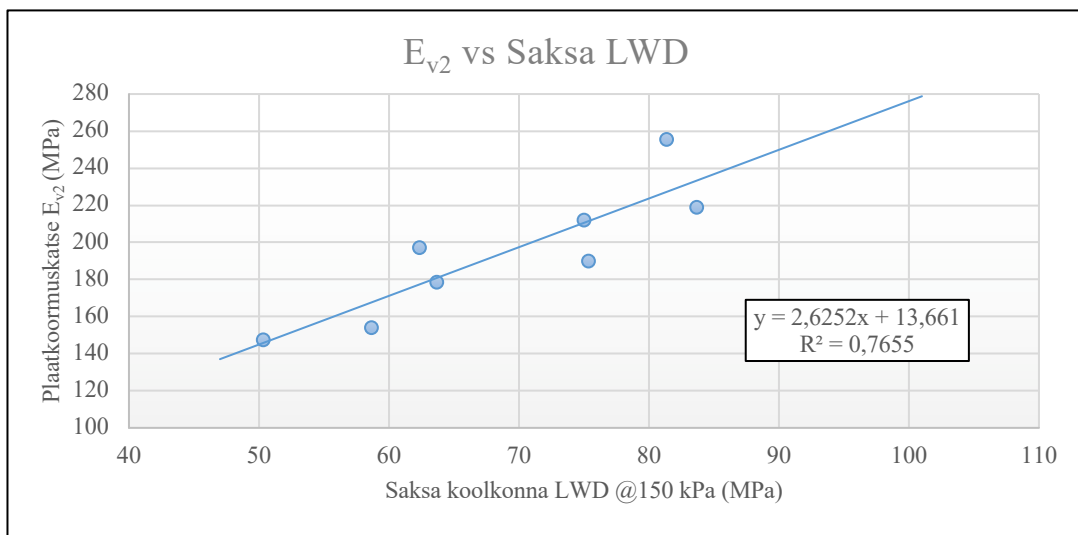


Joonis 10.14. Plaatkoormuskatse teise koormamise tulemusel arvatud elastsusmooduli E_{v2} ja Taani koolkonna LWD tulemuse (E_{vd} @300 kPa) vaheline seos mõõtes killustikalustelt.

Joonisel 10.15 on esitatud võrdlus plaatkoormuse E_{v2} ja Saksa koolkonna LWD (kasutades 15 kg langevat massi) vahel killustiklustel.

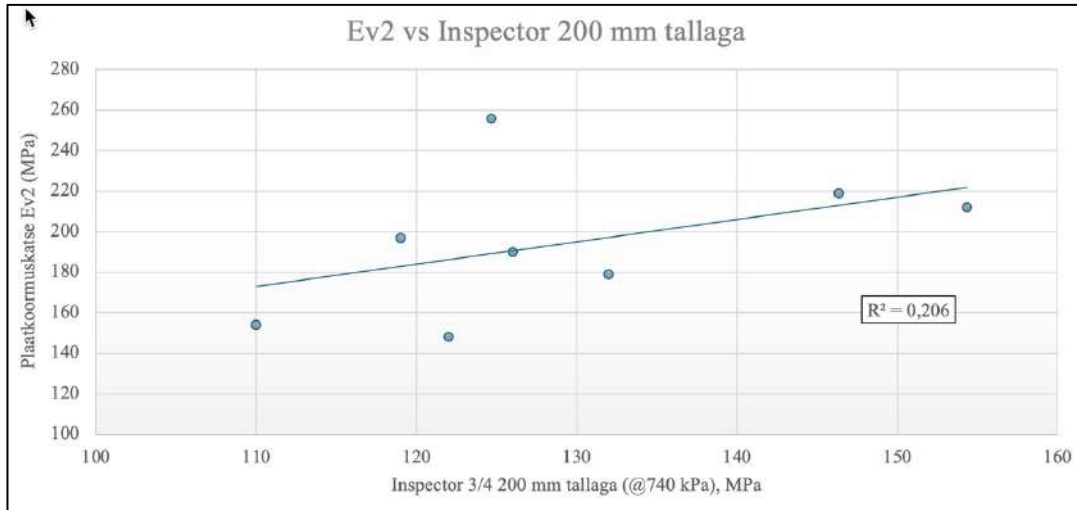
- Mõõtes killustikaluselt, saab Saksa koolkonna LWD mõõtetulemuse teisendada plaatkoormuse E_{v2} väärtuseks järgmise valemi abil:

$$E_{v2} = 2,6252 * \text{Saksa LWD}_{E_{vd} (@150 \text{ kPa})} + 13,661; R^2 = 0,76$$



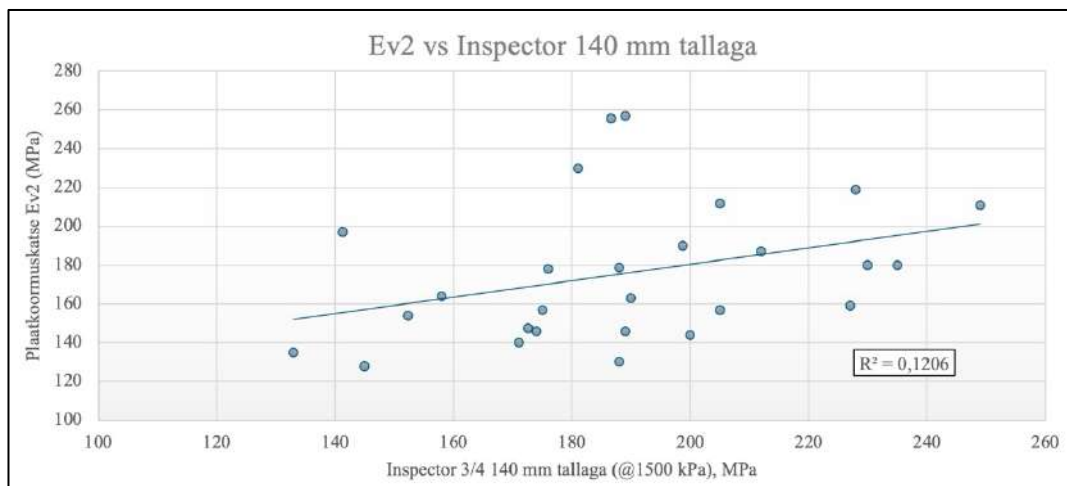
Joonis 10.15: Plaatkoormuskatse teise koormamise tulemusel arvatud elastsusmooduli E_{v2} ja Saksa koolkonna LWD tulemuse (E_{vd} @150 kPa) vaheline seos mõõtes killustikalustelt.

Joonisel 10.16 on esitatud võrdlus plaatkoormuse E_{v2} ja Inspector-seadme 200 mm tallaga vahel killustikalustel. Antud tallaga oli mõõtepunkte vähe ning joonisel esitatud järeldus on väga tundlik üksikute punktide suhtes. Olemasolevatele andmetele tuginedes on seos ebapiisav, $R^2 = 0,21$.



Joonis 10.16: Plaatkoormuskatse teise koormamise tulemusel arvatud elastsusmooduli E_{v2} ja Inspector 3/4 200 mm tulemuse vaheline seos mõõtes killustikalustelt.

Joonisel 10.17 on esitatud võrdlus plaatkoormuse E_{v2} ja Inspector-seadme 140 mm tallaga vahel killustikalustel. Siin on mõõtepunkte enam, kuid ka antud juhul esitatud järeldus on tundlik üksikute punktide suhtes. Olemasolevatele andmetele tuginedes on seos ebapiisav, $R^2 = 0,12$.



Joonis 10.17: Plaatkoormuskatse teise koormamise tulemusel arvatud elastsusmooduli E_{v2} ja Inspector 3/4 140 mm tulemuse vaheline seos mõõtes killustikalustelt.

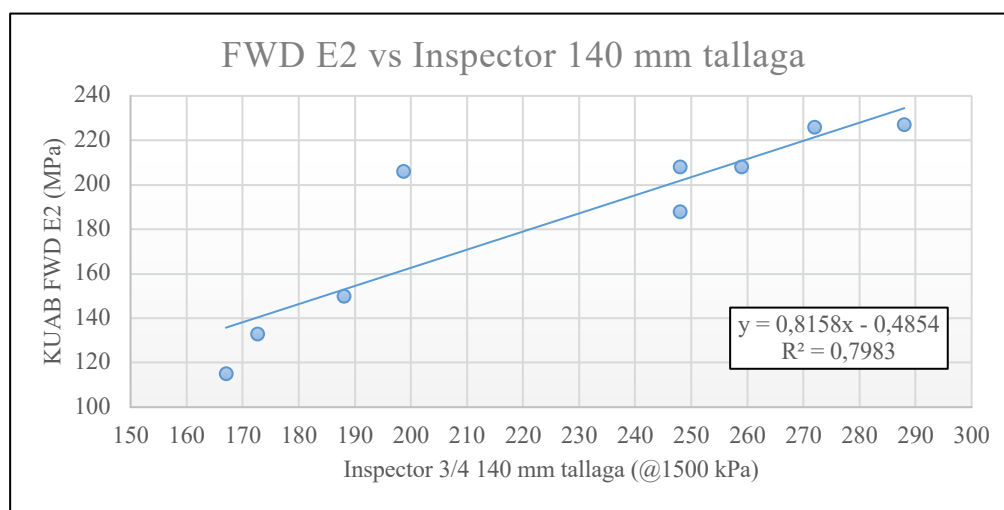
Katseandmetest nähtub, et nii Taani kui Saksa koolkonna kergdeflektomeetrid oleksid sobilikud hindama killustikaluse kandevõimet plaatkoormuskatsega võrreldaval tasemel ning seetõttu sobiksid need seadmed ka killustikukihi tihendamiskvaliteedi kontrollimiseks. Inspector-seadme puhul oli saadav seos selgelt nõrgem.

Lisaks plaatkoormusele testiti kahel objektil killustikalusel ka FWD-seadet (joonis 10.18), mis on killustikaluste (täpsemalt jagavate ja kandvate kihtide) kvaliteedikontrollis sisuliselt ainuvõimalusena kasutusel Soomes (võimalik on ka plaatkoormuse kasutus, kuid selle ajamahukuse tõttu kasutatakse pigem langeva koormusega seadmeid; Inspector-seadme analoogi kergem Loadman-seadet killustikaluse kvaliteedikontrollis ei kasutata). FWD-seadmega mõõdeti moodulid E1 ja E2 vastavalt nii, nagu seda tehakse Soomes kasutades koormusplaadi all umbes 700 kPa kontaktpinget. Näiteks UKs alandatakse killustikaluste puhul kontaktpinget umbes 300 kPa juurde, kuid see võimalus jäi käesolevas uuringus testimata.

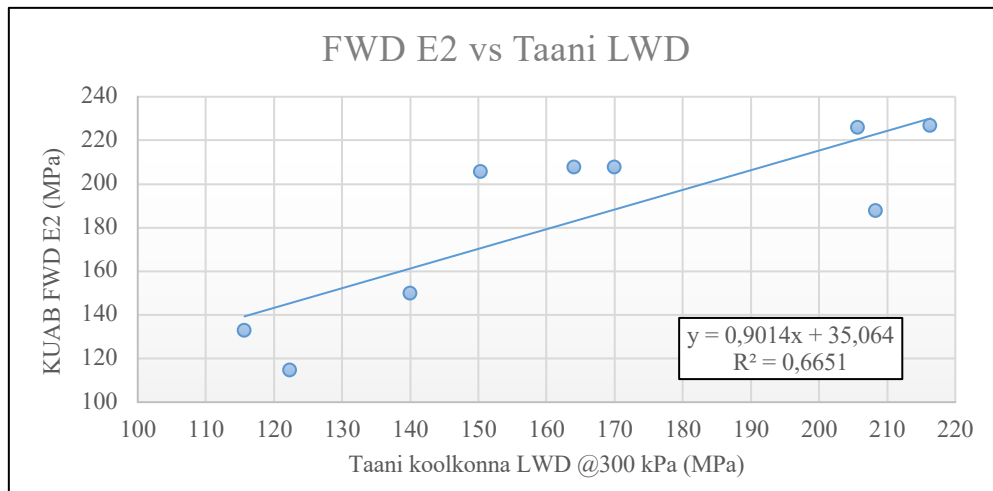


Joonis 10.18: Uuringu raames KUAB FWD mõõtmised killustikalusel, millelt teostati ka kergseadmetega mõõtmine. [Foto: Sven Sillamäe]

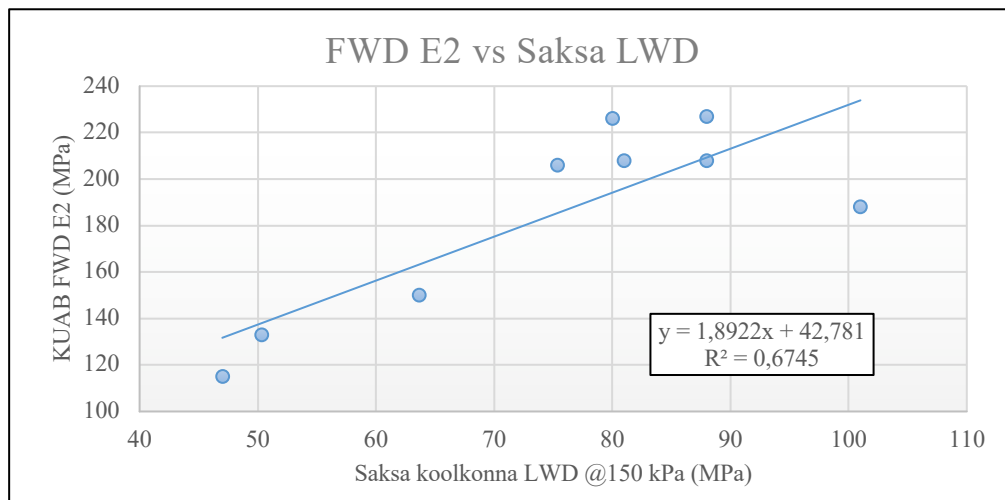
Joonistel 10.19 kuni 10.21 on esitatud võrdlused kergseadmete ja FWD tulemuste vahel. Inspector-seadme tulemus korreleerub paremini FWD tulemusega, kui teised LWD seadmed ning tõenäoline põhjus selleks on, et Inspector-seade 140 mm tallaga mõõdab FWD seadmele ligilähedasema pingega (FWD-seadme talla alla tekib umbes 700 kPa kontaktpinge, Inspectori 140 mm tallaga 1500 kPa). Seos 200 mm läbimõõduga tallaga Inspector-seadme ja FWD vahel oli madalam, $R^2 = 0,47$.



Joonis 10.19. Inspector-seadme mõõdetud elastsusmooduli (E) ja FWD-seadmega mõõdetud elastsusmooduli (E2) seos mõõtes killustikalustelt.



Joonis 10.20. Taani koolkonna LWD seadme mõõdetud elastsusmooduli (E_{vd}) ja FWD-seadmega mõõdetud elastsusmooduli (E_2) seos mõõtes killustikalustelt.



Joonis 10.21. Saksa koolkonna seadme mõõdetud elastsusmooduli (E_{vd}) ja FWD-seadmega mõõdetud elastsusmooduli (E_2) seos mõõtes killustikalustelt.

Käesolevas uuringus saadud üleminekud kergseadmetelt FWD E_2 tulemusele on esitatavad järgmiselt:

$$\text{FWD}_{E_2} = 0,8158 * \text{Inspector}_{140 \text{ mm} (@1500 \text{ kPa})} - 0,4854; R^2 = 0,80$$

$$\text{FWD}_{E_2} = 0,9014 * \text{Taani LWD}_{E_{vd} (@300 \text{ kPa})} + 35,064; R^2 = 0,66$$

$$\text{FWD}_{E_2} = 1,8922 * \text{Saksa LWD}_{E_{vd} (@150 \text{ kPa})} + 42,781; R^2 = 0,67$$

Killustikaluse kvaliteedikontrollis, eriti maanteede ja linnatänavate korral, tuleb kergseadmete kasutamisel olla ettevaatlik olenemata sellest, et käesolevas uuringus saadi valdavalt suhteliselt head korrelatsioonid plaatkoormuse ja FWD ning kergseadmete näitude osas. Soomes näiteks ei ole kergseadmete (täpsemalt kerge Loadman) kasutamine viimase InfraRYLi järgi enam lubatud, sest seadmed on liiga kerged ega koorma killustikalust piisavalt suure koormusega. Seega kandevõimet ja tihendustegureid hinnatakse valdavalt

FWD-seadmetega (harvem plaatkoormusega) ning kergseadmed (täpsemalt kerge Loadman) on kasutusel vaid hoonetehituses ning kitsastes kohtades, kus suuremate seadmetega mõõtmine ei ole võimalik (nt trasside tagasitäited jms).

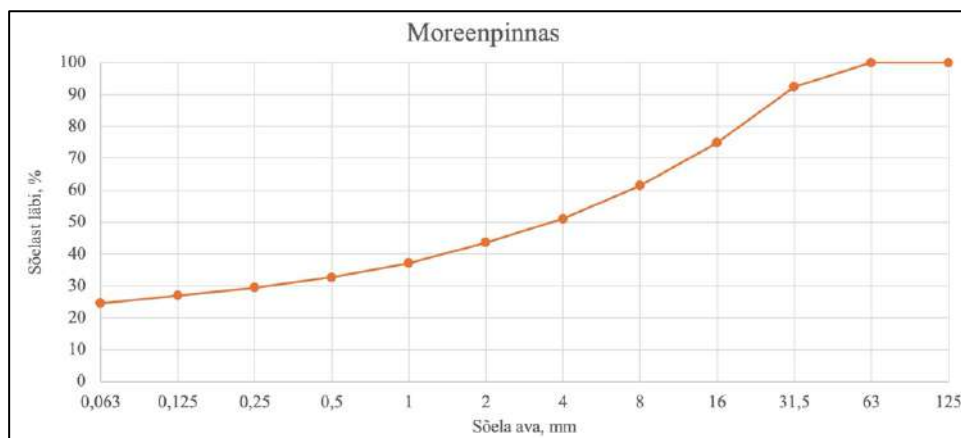
Kergseadmed on väga head kasutamiseks madalama kandevõimega pinnastel nagu liivad (nt liivadel on Soomes kerge Loadman kasutuses, mis on võimalik seetõttu, et Soomes ei kasutata ühtlaseteriseid liivasid – kuigi mitte muldkeha ehituses vaid kaevetööde taastäitel), kuid nende koormuse mõju võib kõrge kandevõime (ja nihketugevusega) materjalidel nagu killustikud jääda ebapiisavaks. Tõenäoliselt siiski, kui tihendatuse kontrolli ja kandevõimet mõõdetakse süsteemselt kiht-kihilt, võiks kergseadmete kasutamine olla Eestis võimalik ka killustikaluste korral.

Soomes näiteks on võimalus, et kandevõimeid (ja seega ka tihendustegureid) ei mõõdetata igalt kihilt, vaid ainult killustikaluselt, mis eeldab raskemate seadmete kasutust. Kui leitakse, et mõõdetud kandevõime ei vasta soovitudle, uuritakse, kas see tuleneb madalatest tihendusteguritest, ebakvaliteetsetest materjalidest, liiga õhukestest kihtidest, projekteerimise veast või selle ebakorrektsustest lähteandmetest, mille põhjal otsustatakse seejärel korrigeerimise vajadus ja viisid.

FWD-seadme kasutamise kasuks räägib veel see, et seade võimaldab ebapiisava kandevõime korral analüüsida ka vajumikausi parameetreid, mille põhjal on võimalik järeldada, kas probleem on killustikus (nt ebapiisav tihedus või kvaliteet), või lähtub probleem sügavamatest kihtidest.

10.2.4 Mõõtmised moreenpinnaselt

Uuringu raames tehti mõningaid katseid ka moreenpinnastelt. Katsetatud pinnase terakoostis on esitatud joonisel 10.22. Antud juhul on moreeniks liigitatud ning arvestatud vähemalt täitepinnase Tm_65 nõuetele vastavaks pinnas, mille jämedateraliste terade sisaldus on 75% (sealhulgas 20% liiva) ja peenosiseid 25. Soome liigituse alusel on tegemist kruusaga S3, EVSi alusel mõllise kruusaga (üle 2 mm on üle 50%). Kahtlemata tohib sellise materjaliga asendada projektset Tm_65 materjali, kuid mõõdetud näitajaid ei saa lugeda Tm_65 omaseks. Sellegipoolest saab antud pinnase katsetulemuste põhjal teha järeldusi tihendamise kvaliteedikontrolliks sobilike viiside osas.



Joonis 10.22. Katsetatud moreenpinnase terakoostis.

Moreenpinnaselt mõõdeti kahel objektil, millele tarniti pinnast samast karjäärast, järgnevate seadmetega:

1. kergseadmed: Dynatest LWD @100 kPa, HMP 10 ja 15 kg, Inspector 3;
2. plaatkoormuskatsed vastavalt EVS 934;
3. liivakoonuse katsed.

Kergseadmete kasutamisel ilmnes, et kihi elastsusmoodul varieerub väga suurel määral. Tabelis 10.5 on näide, missuguseid tulemusi võib saada ühel katseobjektil kergdeflektomeetritega mõõtes. Kergseadmega võidi saada kihi kandevõimeks 150+ MPa, kuid juba 0,5 m eemalt aga vaid 10-30 MPa. Antud nähtuse põhjus on moreenpinnase suur tundlikkus veesisalduse muutustesse, mida ilmestab tabel 10.6, mis näitab, et seisnud kiht on mitu korda tugevam kui värskest paigaldatud (tihendatud) kiht. Seisnud kihi pealmisele osale moodustub kuivamiskoorik, mis suurendab oluliselt kergseadmetega saadavaid kandevõimeid. Taoliste pinnaste tihendus kvaliteedi hindamine on kergseadmetega seega raskendatud ning kasutada tuleb muid meetodeid, näiteks mahumassil põhinev ehk volümeetriline mõõtmine (liivakoonus ja kummiballooni meetod), plaatkoormus ja FWD.

Tabel 10.5. Ühe nädala seisnud moreenikihi pealt mõõdetud elastsusmoodulid kergdeflektomeetritega, kus kõik mõõtmised on teostatud ühest lähialast.

Löögid	Dynatest 10kg (@100 kPa)						HMP LWD 10kg						HMP LWD 15kg						Inspector 140 mm						Inspector 200 mm					
	Mõõteseriad erinevatelt punktidelt, Evd (MPa)																													
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	
1	574	164	199	378	16	21	105	150	117	16	29	37	129	120	71	115	18	37	168	159	156	52	39	95	98	86	78	38	30	
2	533	171	241	476	16	24													239	299	318	71	56	153	155	148	201	57	38	
3	532	179	254	500	16	26													258	355	365	77	61	164	155	171	214	64	40	
4	604	185	265	513	16	26													261	362	398	79	64	172	168	170	243	63	41	
5	603	184	261	485	16	26													280	394	388	82	63	177	177	177	237	64	40	
6	620	189	271	523	16	27													273	425	422	83	65	178	173	178	246	67	41	
7	606	189	267	510	16	26													285	381	454	82	64	174	182	182	247	66	41	
8	605	190	278	509	16	26													278	439	430	81	66	169	181	191	230	68	41	

Tabel 10.6. Moreenilt mõõdetud elastsusmoodulid ja seismise mõju.

	Inspector 200 mm	Inspector 140 mm	Dynatest 10 kg (@100kPa)	HMP 10 kg	HMP 15 kg
Tihendatud	32 MPa	49 MPa	48 MPa	12 MPa	25 MPa
Tihendatud + seisnud 1 nädal	108 MPa	131 MPa	80 MPa	30 MPa	39 MPa

Vaadeldud moreenpinnase maksimaalne kuivmahumass standardse Proctoriteimiga oli 2,05 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 9,0%. Liivakoonusekatsega leitud tegelikud kuivmahumassid olid ning nendele vastavad plaatkoormuskatse andmed olid:

- punkt 1: 1,60 Mg/m³ (ümardatud tihendustegur 0,8) ja looduslik veesisaldus proovikeha võtmise ajal 9,9%; plaatkoormuse $E_{v2} = 73,9$ MPa ning $E_{v2}/E_{v1} = 3,48$;
 - Inspector 140 mm: nelja punkti põhjal $E = 110...169$ MPa (keskmine 130,8 MPa), $T_f = 1,2...1,6$ (keskmine 1,35);
- punkt 2: 1,75 Mg/m³ (ümardatud tihendustegur 0,9) ja looduslik veesisaldus proovikeha võtmise ajal 4,5%; plaatkoormuse $E_{v2} = 59,1$ MPa ning $E_{v2}/E_{v1} = 2,13$;

- Inspector 140 mm: kolme punkti põhjal $E = 200...257$ MPa (keskmine 230 MPa), $T_f = 1,2...1,4$ (keskmine 1,3).

Moreen- ja muude pinnaste, kus peenosisesisaldus on (tuntavalt) $> 15\%$, on tihendamisel väga oluline, et nende tihendamisaegne veesisaldus ei oleks optimaalsest veesisaldusest kuigi palju kõrgem. Vastasel juhul ei saa pinnaseid tihendatud vajaliku tihendusteguri juurde, sest tihendamise käigus tõuseb pinnase veeküllastusaste 100%. Ehitusobjektidel tuntakse sellist nähtust ka kui pinnase “õõtsumisena”.

Majandus- ja taristuministri määruse nr 106 Tee projekteerimise normid anti tabelites 3.7 ja 3.8 juhised pinnase veesisalduse osas sõltudes nõutud tihendusteguritest, mis on käesolevalt esitatud joonistel 10.23 ja 10.24. Vaadeldav moreen on joonise 10.24 alusel mölline liiv, mille tihendamisaegne veesisaldus võib 0,95 tihendusteguri tagamiseks maksimaalselt olla $1,25 \cdot 9 = 11,3\%$. Tihendamisprotsessi jooksul tuleb samaaegselt jälgida, et pinnast ei tihendataks üle, mis toob kaasa “õõtsumise”. See võib juhtuda samas juba ka ehitusaegse raskeveokite liiklemisega.

(7) Muldkeha rajamiseks kasutatavaid pinnaseid liigitatakse veesisalduse järgi (tabelis 3.7) Lubatud veesisaldusega on pinnased, mille veesisaldus vastab tabelis 3.7 toodud nõuetele.

Tabel 3.7

Pinnase jaotus veesisalduse järgi	
Nimetus	Veesisaldus w
Vähese veesisaldusega	$< 0,9w_0$
Normaalse veesisaldusega	$0,9w_0$ kuni w_{lub}
Kõrgenenud veesisaldusega	w_{lub} kuni w_{max}
Liigse veesisaldusega	$> w_{max}$

Märkus:
 w_0 – optimaalne veesisaldus standardisel *Proctorteimil*;
 w_{max} – maksimaalne veesisaldus standardse *Proctorteimi* kohase tihendusteguri $K_t=0,9$ saavutamisel (tabel 3.8);
 w_{lub} – lubatav veesisaldus standardse *Proctorteimi* kohase nõutava tihendusteguri $K_t \geq 0,9-1,0$ saavutamisel (tabel 3.8).

Joonis 10.23. Pinnase jaotus veesisalduse järgi vastavalt määrusele nr 106. [15]

Tabel 3.8

Pinnased	Pinnase lubatav ja maksimaalne veesisaldus tihendamisel			
	Veesisaldus nõutava pinnase tihendusteguri K_t saavutamisel			
	w_{lub}			w_{max}
	$K_t > 1,0$	$K_t = 0,98$	$K_t = 0,95$	$K_t = 0,90$
Mölline peenliiv, möll	$1,30 w_0$	$1,35 w_0$	$1,60 w_0$	$1,60 w_0$
Savine või mölline liiv	$1,10 w_0$	$1,15 w_0$	$1,25 w_0$	$1,50 w_0$
Liivane savimöll või liivane möllsavi	$1,05 w_0$	$1,10 w_0$	$1,20 w_0$	$1,40 w_0$
Savi, möllsavi	$1,00 w_0$	$1,05 w_0$	$1,15 w_0$	$1,30 w_0$

Märkus: 1) suvel liivpinnasest muldkeha rajamisel veesisaldust ei piirata;
 2) käesolevad piirangud ei laiene muldkeha rajamisele hüdromeetodil;
 3) talvel ei tohi muldkeha rajamisel veesisaldus olla üle: $1,3w_0$ – liivpinnases; $1,2w_0$ – savises või möllises liivas; $1,1w_0$ – teistes seotud pinnastes;
 4) pinnase lubatava veesisalduse suurust võib täpsustada, arvestades konkreetsete tihendusmasinate tehnoloogilisi võimalusi;
 5) muldkeha pinnase tihendustegur K_t (pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltiheduse standardisel *Proctorteimil*).

Joonis 10.24. Pinnase lubatav ja maksimaalne veesisaldus tihendamisel vastavalt määrusele nr 106. [15]

Moreenpinnaste (täpsemalt, joonisel 10.24 nimetatud ning joonisel 1.5 alal "2" olevate pinnaste) tihendamisel on esmatähtis tagada nende sobilik tihendamisaegne veesisaldus. Kui seda teha võimalik ei ole, tuleb lähtuda peatüki 9 nõuannetest. Antud pinnasegrupi tihendamiskvaliteedi hindamiseks on sobilik kasutada volümeetrilisi meetodeid (nt liivakoonus või kummiballooni meetod) ning plaatkoormuskatse moodulite suhet, mille osas oleks sobilik lähtuda järgnevast:

- tihendustegur 0,95: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,7$;
- tihendustegur 0,98: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,5$;
- tihendustegur 1,00: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,3$.

Teemat on täiendavalt käsitletud veel peatükis 10.3.3.

Kergseadmete kasutamine võib olla võimalik siis, kui ehitusobjektile on nende sobilikkus tõendatud kasutades katselõigul tehtud võrdlusmõõtmisi.

10.2.5 Mõõtmised põlevkiviaherainelt (lubjakivikillustik fr 0...90(300) mm)

Mõõtmisi väga jämedateraliselt pinnaselt, "põlevkiviaherainelt" fr 0...90(300) mm, teostati järgmistel viisidel:

1. kergseadmed: Dynatest LWD @300 kPa, HMP 10 kg, Inspector 3 140 mm tallaga;
2. plaatkoormuskatsed vastavalt EVS 934;
3. mõõtmised FWD-seadmega.

Mõõdetav objekt oli konstruktsiooni vaates jagatud kolme osasse:

- > 1 m paksune aherainekiht;
- 0,4...0,5 m paksune aheraine moreenil;
- 0,4...0,5 m paksune aheraine mullal (materjalid olid omavahel eraldatud geotekstiiliga).

FWD-seadmega, mõõdeti kõikidest eelnevalt nimetatud kohtadest saades järgnevad tulemused:

- > 1 m paksune aherainekiht: 16 mõõtepunkti keskmine 291 MPa, E2/E1 keskmine 1,08 ehk mõõdetud kiht oli väga suure tiheduse juures. Tegemist oli raskesti koormatud juurdepääsuteega, kus väljakaevatud turvas oli asendatud aherainega;
 - teisel objektile saadi > 1 m paksuselt aherainekihtilt plaatkoormusega mõõtes viie punkti põhjal keskmiselt $E_{v2} = 125$ MPa ja moodulite suhteks 1,75;
- ca 0,5 m paksune aheraine moreenil juurdepääsuteel: 12 mõõtepunkti keskmine 154 MPa, E2/E1 keskmine 1,10;
- ca 0,5 m paksune aherainekiht moreenil laoplatsil, joonis 10.25, 9 mõõtepunkti keskmine 118 MPa, E2/E1 keskmine 1,23;
 - plaatkoormuskatsetega saadi 22 punkti keskmiseks 101 MPa ja moodulite suhteks 2,0;

- ca 0,5 m paksune aherainekiht mullal (mullakihi e-moodul oli vahemikus umbes 10...15 MPa), 7 mõõtepunkti keskmine 57 MPa, E2/E1 keskmine 1,38;
 - plaatkoormuskatsetega saadi 18 punkti keskmiseks 56 MPa ja moodulite suhteks 1,9.



Joonis 10.25. Mõõtmised aherainekihtilt FWD-seadmega. [Foto: Sven Sillamäe]

Seoses aheraine terasuurusega ei suuda kergseadmed kihti piisava koormusega mõjutada, mistõttu vastavad erinevad seosed on analüüsimiseks ja järelduste tegemiseks valdavalt ebapiisavad. Kergseadmetega, joonis 10.26, mõõtes saadi järgmised keskmised tulemused, kusjuures aluspinnase erinevust nendega praktiliselt ei tuvastatud:

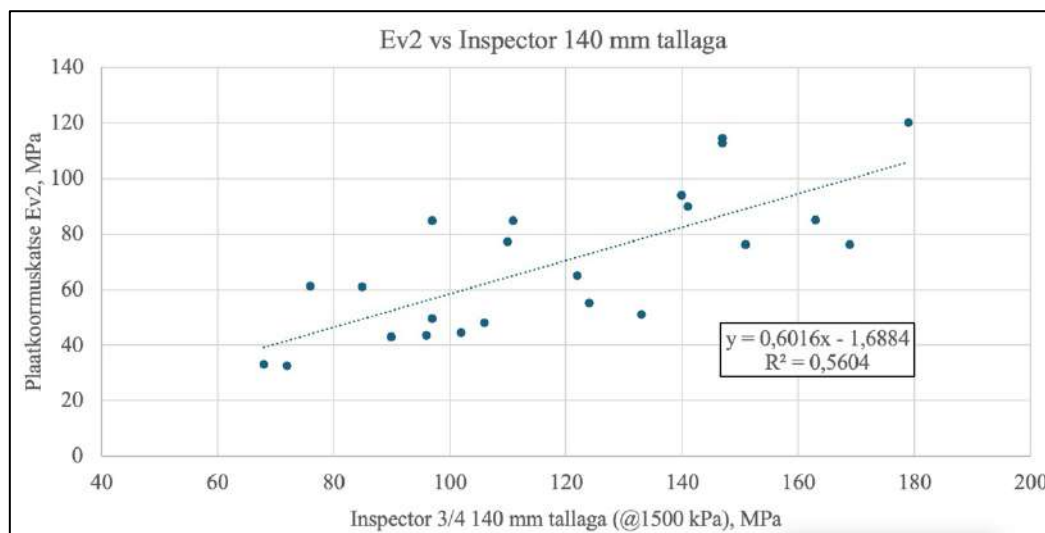
- Inspector-seadmega kasutades 140 mm koormusplaati, saadi 23 mõõtmispunkti keskmiseks $E = 119$ MPa ja $T_f = 1,14$. Plaatkoormuskatse ja Inspector-seadme mõõtetulemuste vaheline seos tuli $R^2 = 0,56$, joonis 10.27 (muude kergseadmetega oli $R^2 < 0,2$);
- Saksa koolkonna seade 10 kg langeva massiga: 43 MPa (6 mõõtepunkti);
- Taani koolkonna seade @300 kPa: 81 MPa (6 mõõtepunkti).



Joonis 10.26. Kergseadmete katsetamine aherainekihtilt, mis on pealt kiilunud. [Foto: Sven Sillamäe]

EVS-EN 16907-5 punkt 8.3.5 Jämedateraliste materjalide tihendamise kvaliteedi kontrollimise meetodid ütleb sellega seoses järgmist:

“Kui eespool kirjeldatud katsete liike ei saa täitematerjali jämedateralisuse tõttu rahuldavalt kasutada, võib tihendamise kvaliteedi kontrollimiseks kasutada kaudset meetodit, mis põhineb täite pinna deformatsiooni mõõtmisel kindlaks määratud mõõtmispunktides. Täide loetakse piisavalt tihendatuks, kui iga kihi viimasel ülesõidul ei ületa deformatsioon kindlaks määratud väärtust. Näiteks on piisav tihedus saavutatud, kui iga kihi puhul on kahe viimase ülesõidu järel vajumi erinevus väiksem kui 0,5% kihi paksusest.”



Joonis 10.27. Aherainelt mõõdetud Inspector-seadme ja plaatkoormuskatse omavaheline seos, $R^2 = 0,56$.

Käesoleva uuringu raames leiti, et nii plaatkoormuskatse, kui mõõtmine FWD-seadmega võimaldab hinnata aherainest valmistatud kihi tihendatust ja kandevõimet. Kuna kihi pealt saavutatav kandevõime on suuresti mõjutatud aherainekihi alla jäävast pinnasest, tuleb saavutatava kandevõime osas lähtuda projektist. Aherainekihi tihendatust on sobilik hinnata kas plaatkoormuskatse või FWD-seadmega saadud moodulite suhete abil või lähtudes EVS-EN 16907-5 punktist 8.3.5. Kergseadmete kasutamise osas tuleks olla ettevaatlik, kuigi nende kasutamine ei pruugi olla välistatud.

10.2.6 Mõõtmised kergtäitematerjalilt

Kergtäitematerjale on Eestis kasutatud vähe ning käesoleva uurimustöö jaoks oli kasutada vaid üks objekt, millelt on olemas kandevõimemõõtmise tulemused valmis teekonstruktsiooni pealt. Kergtäitematerjalide kasutamisel tuleks lähtuda nii Soome InfraRYLis kui tootjate poolt antavast infost, mida on käsitletud peatükis 4.2.1 ning mida Eestis tehtud mõõtmistulemused ka toetavad.

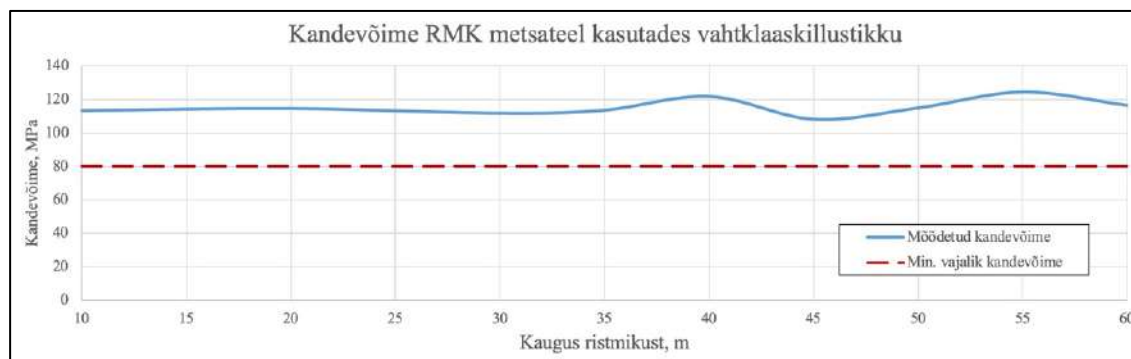
Vahtklaaskillustikku on kasutatud Lääne-Virumaal RMK teel katastritunnusega 66001:003:0090 (Jäägrimetsa tee). Kergtäitematerjalide kasutuskoht asub koordinaatidel XY: 6543829.46, 631999.88. Tee oli algselt ehitatud paksule (ca 6 m) turbalasundile, mis vajus lubamatult palju. Analüüs näitas, et täitmine tavapärase täitematerjaliga põhjustaks täiendavaid vajumeid lubamatus ulatuses, mistõttu otsustati kasutada kergtäitematerjale.

Selleks eemaldati umbes 50 cm olemasolevat kruuskatet ning vajunud koht täideti soovitud kõrguseni vahtklaaskillustikuga lähtudes tootjapoolsest paigaldusjuhendist, mis kaeti seejärel 50 cm kruusakihiga.



Joonised 10.28 ja 10.29. Vahtklaaskillustiku kasutamine RMK metsateel ning kandevõimemõõtmine FWD-seadmega valmis teelt. [Fotod: Sven Sillamäe]

Valmis teelt mõõdeti kandevõimed FWD-seadmega. Vahtklaaskillustikuga täidetud teelõigu keskmiseks kandevõimeks saadi 115 MPa, joonis 10.30, mis vastas peaaegu täielikult katendiartvutuses eeldatud tulemusel 117 MPa. Katendiartvutuses arvestati vahtklaaskillustiku E-mooduliks 50 MPa ja kruusakihil 150 MPa. Antud objektiga saadi kinnitust sellele, et tootjapoolsed eeldused ja nõuded on korrektsed ning kasutatavad, sh kvaliteedikontroll.



Joonis 10.30. FWD-seadmega kandevõimemõõtmise tulemused RMK metsateelt, kus teekonstruktsioonis oli kasutatud kergtäitematerjali (vahtklaaskillustikku).

10.2.7 Moodulite suhetest

Moodulite suhteid on käsitletud Soome InfraRYLis, mille andmed on esitatud:

- tabel 10.7: nõuded teekonstruktsioonide jagavalt kihilt (kiht, mis on [killustik]aluse all) ning raudteede filterkihilt (“eristyskerros”, joonis 10.31);
 - minimaalne keskmine tihendustegur on 0,95 modifitseeritud Proctorteimist (umbes 0,98 standardsest Proctorteimist) ning vähim lubatud üksikväärtus on 0,92 mod. Proctor (umbes 0,95 standard Proctor);
 - teekonstruktsioonide jagavale kihile ei ole antud minimaalset nõuet kandevõimele;

- raudtee filterkihi kandevõimed kruusalt või liivalt (eraldi nõuded on ka olukorraks, kui kasutatakse purustatud kaljut ehk kaljumurdu, mida siinkohal ei esitata, kuid kus on nõrgemad nõuded kandevõimele ning suuremad lubatud moodulite suhted) peavad olema:
 - plaatkoormustestiga keskmiselt minimaalselt 130 MPa ning üksikväärtus minimaalselt 110 MPa, samaaegselt peavad olema täidetud tabelis 10.7 antud moodulite suhted;
 - FWD-seadmega keskmiselt minimaalselt 150 MPa ning üksikväärtus minimaalselt 125 MPa, samaaegselt peavad olema täidetud tabelis 10.7 antud moodulite suhted;
- tabel 10.8: nõuded raudteede vahekihilt (“välikerros”, joonis 10.31); Raudtee vahekihile on antud samad tihendustegurid, mis filterkihile, kuigi lubatud moodulite suhted on veidi väiksemad ning kandevõimed kruusalt või liivalt peavad olema:
 - plaatkoormustestiga keskmiselt minimaalselt 160 MPa ning üksikväärtus minimaalselt 140 MPa, samaaegselt peavad olema täidetud tabelis 10.8 antud moodulite suhted;
 - FWD-seadmega keskmiselt minimaalselt 185 MPa ning üksikväärtus minimaalselt 160 MPa, samaaegselt peavad olema täidetud tabelis 10.8 antud moodulite suhted;
- tabel 10.9: nõuded teekonstruktsioonide kandvalt kihilt (killustikaluselt); kandvale kihile ei ole antud nõuet tihendusteguri osas ning tihendamise kvaliteeti soovitatakse hinnata eelkõige kasutades moodulite suhteid ja nõutud kandevõimet (mis tuleb katendiarvutusest või kataloogist, aga mis on minimaalselt kas 145 või 160 MPa vastavalt liiklussagedusele kas alla või üle 1300 a/ööp teedele);
- tabel 10.10: nõuded teekonstruktsioonide muldkehale kuni sügavuseni 2 m teekattest. Purustatud kalju ning kruusade ja liivade, kus peenosised on kuni 15%, kasutamisel on tihendusteguri nõue antud 0,95 modifitseeritud Proctorteimist (umbes 0,98 standardsest Proctorteimist). Pinnaste, kus peenosiseid on üle 15%, tihendusteguri nõue on 0,92.

Tabel 10.7. Soome InfraRYLi järgi teekatendite jagavalt kihilt (kiht, mis on [killustik]aluse all) nõutud moodulite suhted sõltudes E2 väärtusest. Samad nõuded kehtivad ka raudteede konstruktsioonis kihile “eristyskerros” (joonis 10.31, mis võiks tõlkes tähendada filterkihti), kui see on valmistatud kas kruusast või liivast.

Kandevõime E2, MPa	Plaatkoormuse E2/E1	FWD-seadme E2/E1
< 125	≤ 2,2	≤ 1,9
125...134	≤ 2,3	≤ 2,0
135...144	≤ 2,4	≤ 2,1
145...154	≤ 2,5	≤ 2,2
155...164	≤ 2,6	≤ 2,3
165...174	≤ 2,7	≤ 2,4

175...184	$\leq 2,8$	$\leq 2,5$
≥ 185	$\leq 2,9$	$\leq 2,6$

Tabel 10.8. Soome InfraRYLi raudteede konstruktsioonis kihile “välikerros” (joonis 10.31), kui see on valmistatud kas kruusast või liivast, nõutud moodulite suhted sõltudes E2 väärtustest.

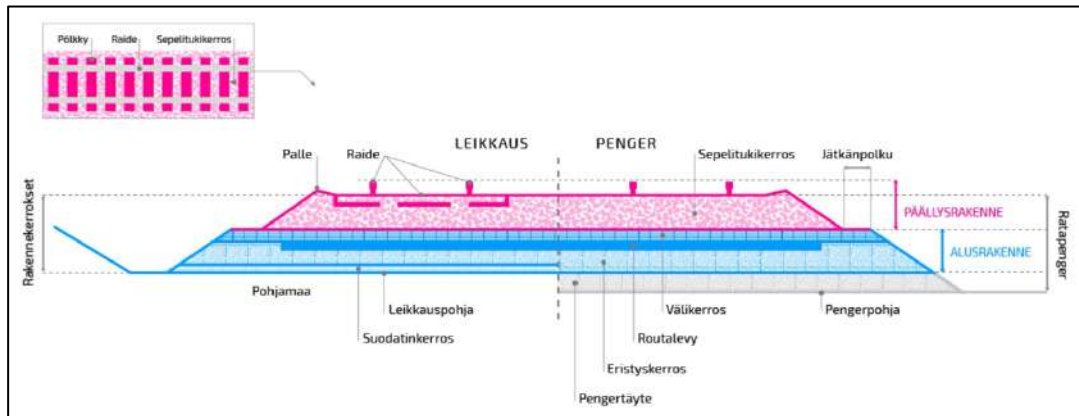
Kandevõime E2, MPa	Plaatkoormuse E2/E1	FWD-seadme E2/E1
< 125	$\leq 2,0$	$\leq 1,7$
125...134	$\leq 2,1$	$\leq 1,8$
135...144	$\leq 2,2$	$\leq 1,9$
145...154	$\leq 2,3$	$\leq 2,0$
155...164	$\leq 2,4$	$\leq 2,1$
165...174	$\leq 2,5$	$\leq 2,2$
175...184	$\leq 2,6$	$\leq 2,3$
≥ 185	$\leq 2,7$	$\leq 2,4$

Tabel 10.9. Soome InfraRYLi järgi teekatendite kandvalt kihilt (killustikaluselt) nõutud moodulite suhted sõltudes E2 väärtusest.

Kandevõime E2, MPa	Plaatkoormuse E2/E1	FWD-seadme E2/E1
< 145	$\leq 2,0$	$\leq 1,7$
145...159	$\leq 2,1$	$\leq 1,8$
160...174	$\leq 2,2$	$\leq 1,9$
175...189	$\leq 2,3$	$\leq 2,0$
190...204	$\leq 2,4$	$\leq 2,1$
205...219	$\leq 2,5$	$\leq 2,2$
220...234	$\leq 2,6$	$\leq 2,3$
≥ 235	$\leq 2,7$	$\leq 2,4$

Tabel 10.10. Soome InfraRYLi järgi muldkeha pinnaste (sügavusel < 2 m teekattest) nõutud moodulite suhted sõltudes E2 väärtusest.

Kandevõime E2, MPa	Plaatkoormuse E2/E1	FWD-seadme E2/E1
< 125	$\leq 2,6$	$\leq 2,2$
125...134	$\leq 2,7$	$\leq 2,3$
135...144	$\leq 2,8$	$\leq 2,4$
145...154	$\leq 2,9$	$\leq 2,5$
155...164	$\leq 3,0$	$\leq 2,6$
165...174	$\leq 3,1$	$\leq 2,7$
175...184	$\leq 3,2$	$\leq 2,8$
≥ 185	$\leq 3,3$	$\leq 2,9$



Joonis 10.31. Soomes raudtee-ehitamises kasutatavad kihid.

Saksamaa [22] ja [23] kohaselt saab kasutada plaatkoormuskatset ka tihendusastme määramiseks. Tabelis 10.11 on välja toodud seosed Proctor tihendusastme (D_{Pr}) leidmiseks elastsusmooduli E_{v2} ja moodulite E_{v2}/E_{v1} suhtarvu kaudu. See kehtib teedeehituses kasutatavate jämeda- ja segateraliste pinnaste korral, milles peenosise ($<0,063$ mm) osakaal on väiksem kui 15%. Suurema kandevõimega pinnaste korral, kus E_{v1} väärtus ulatub 60%-ni tabelis 10.11 toodud E_{v2} väärtusest, on lubatud suuremad E_{v2}/E_{v1} suhtarvu väärtused, kuid neid ZTV ei täpsusta. Juhul kui liiv- ja kruuspinnaseid kasutatakse külmakaitse kihi ülaosas, peavad need olema tihendatud vastavaks $D_{Pr} = 100\%$.

Tabel 10.11. Pinnaste ja materjalide tihendusteguri hindamine plaatkoormuskatsega vastavalt Saksa nõuetele (Saksa pinnasegruppide tähendused leiab näiteks siit: https://de.wikipedia.org/wiki/DIN_18196)

Pinnase liik (grupp ¹)	D_{Pr} [%]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2}/E_{v1} [-]
Kruuspinnased GW, GI ($C_u > 6$)	≥ 100	≥ 100	≤ 2.3
	≥ 98	≥ 80	≤ 2.5
	≥ 97	≥ 70	≤ 2.6
Kruuspinnas GE ($C_u < 6$) ja Liivpinnased SE, SW ja SI	≥ 100	≥ 80	≤ 2.3
	≥ 98	≥ 70	≤ 2.5
	≥ 97	≥ 60	≤ 2.6

Tabelis 10.11 olevad pinnased:

- GW ja GI on ebaühtlase terakoostisega kruusa-liiva segud;
- SW ja SI on ebaühtlase terakoostisega liivad;
- GE ja SE on vastavalt ühtlaserised kruusad ja liivad, kus $C_u \leq 6$.

Eestis on siiani kasutusel olnud kaks nõuet:

- muldkehalt $E_{v2} \geq 100$ MPa ning $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$;
- killustikult $E_{v2} \geq 150$ MPa ning $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$.

Tehnokeskuse aruandest [21], kus pärineb ka tabel 10.12:

- keskmine E_{V1} aluse pealt oli 56 MPa, E_{V2} 177 MPa ning E_{V2}/E_{V1} suhtarv 3,9. Sarnased tulemused on drenkihil märkega „killustik“ vastavalt E_{V1} 38 MPa, E_{V2} 148 MPa ning E_{V2}/E_{V1} suhtarv 4,8. Saksa nõuetele tuginedes võib sellist kihti pidada antud suhtarvu põhjal sisuliselt mittetihendatuks.
- Drenkihilt tehtud muud katsetulemused on E_{V1} osas võrreldavad aluse omadega – keskmiselt 57 MPa, E_{V2} osas on tulemused aga oluliselt madalamad, jäädes keskmiselt 147 MPa juurde ning E_{V2}/E_{V1} suhtarv on 2,6...2,7.

Tabel 10.12. Tehnokeskuse aruandest [21] koondatud plaatkoormustesti keskmised tulemused.

Kiht/omadused	Ev1 (MN/m ²)	Ev2 (MN/m ²)	Ev2/Ev1	Katseid
Muldkeha	85	192	2.4	210
Muldkeha (stabi)	78	182	2.5	23
Muldkeha (stabi/liiv)	84	192	2.5	13
Muldkeha keskmine	84	191	2.4	246
Alus (killustik/liiv)	46	196	4.6	2
Alus (freespuru)	52	173	4.0	34
Alus (kild)	120	230	2.0	3
Alus (freespuru/liiv)	41	148	3.7	2
Aluse keskmine	56	177	3.9	41
Drenkiht	59	156	2.7	18
Drenkiht (liiv)	61	140	2.6	25
Drenkiht (killustik)	38	148	4.8	8
Drenkihi keskmine	57	147	3.0	51
Keskmine	76	183	2.7	338

Käesoleva uuringu raames teostatud plaatkoormuse katsetulemused olid järgmised:

- kruusliivalt (aluse all paiknev kiht, Soome mõistes jagav kiht) 7 punkti keskmisena: $E_{V2} = 174$ MPa (vahemikus 132...228 MPa), moodulite suhe 2,3;
- paekiivalt kaks punkti:
 - $E_{V2} = 132$ MPa ja E_{V2}/E_{V1} suhtarv 4,29 (tihendustegur tuli ka mahumasside võrdluses madal, 0,93);
 - $E_{V2} = 178$ MPa ja E_{V2}/E_{V1} suhtarv 1,81 (tihendustegur mahumasside võrdluses 0,99);
- ühtlaseteriselt ($C_u = 2...3$) kvartslüivalt (keskliiv) kolm punkti:
 - $E_{V2} = 30$ MPa ja E_{V2}/E_{V1} suhtarv 2,5 (kiht tihendatud, mahumasside võrdluses 0,97, aga kuna oli ehitatud savikale ja märjale kihile, oli üleüldine kandevõime nõrk);
 - $E_{V2} = 136$ MPa ja E_{V2}/E_{V1} suhtarv 3,43 (tihendustegur mahumasside võrdluses 1,00);
 - $E_{V2} = 126$ MPa ja E_{V2}/E_{V1} suhtarv 4,51 (tihendustegur mahumasside võrdluses 0,95);

- killustikaluselt 8 punkti keskmisena $E_{v2} = 194$ MPa (vahemikus 148...256 MPa), moodulite suhe 2,1;
- moreenpinnaselt kaks punkti:
 - $E_{v2} = 74$ MPa ja E_{v2}/E_{v1} suhtarv 3,46 (tihendustegur mahumasside võrdluses 0,8);
 - $E_{v2} = 59$ MPa ja E_{v2}/E_{v1} suhtarv 2,13 (tihendustegur mahumasside võrdluses 0,9);
- aherainelt 22 punkti keskmisena (parema kandevõimega aluspinnaselt) $E_{v2} = 101$ MPa (vahemikus 76...152 MPa), moodulite suhe 2,0.

Käesolevas uuringus saadi seega üldiselt head moodulite suhted, v.a ühtlaseteriselt kvartsliavalt. Sarnaseid tulemusi on kajastatud ka Riho Eichfussi magistritöös [3], kus mh võrreldi ühtlaseteriselt keskliivalt plaatkoormuskatse ja Dynatest LWD-ga saadavaid tulemusi, tabel 10.13, kusjuures kõikides mõõdetud punktides oli pinnas tihendatud.

Tabel 10.13. Väljavõte Riho Eichfussi magistritööst [3] seoses plaatkoormuskatse ja Dynatest LWD tulemustega ühtlaseterisel keskliival.

Nr.	Plaatkoormuskatse [MPa]	LWD [MPa]	
1	Ev1	9.03	67
	Ev2	70.25	65
	Ev2/Ev1	7.78	70
		ÜT = 1.04	$\bar{x} = 67$
2	Ev1	33.68	92
	Ev2	96.2	105
	Ev2/Ev1	2.86	91
		ÜT = 1.00	$\bar{x} = 96$
3	Ev1	6.42	79
	Ev2	72.4	40*
	Ev2/Ev1	11.28	56*
		ÜT = 0.92	$\bar{x} = 79$
4	Ev1	11.71	68
	Ev2	66.1	69
	Ev2/Ev1	5.64	66
		ÜT = 0.98	$\bar{x} = 68$
5	Ev1	15.79	75
	Ev2	73.63	87
	Ev2/Ev1	4.66	75
		ÜT = 0.93	$\bar{x} = 79$

* - Ehitusmasina kobestatud liival sooritatud katse
 \bar{x} - Aritmeetiline keskmine
 ÜT - Ülemineku tegur LWD-lt

Plaatkoormuse moodulite suhe sõltub väga palju katse ettevalmistamisest ning sellest, mis kihilt mõõdetakse. Hea kandevõime korral on vajumid plaadi all suhteliselt väiksed, nt ühe katseprotokolli põhjal (mis ei ole teostatud käesoleva uuringu jaoks) oli $E_{v1} = 49,8$ MPa ja maksimaalne nihe = 3,26 mm ning teises punktis $E_{v1} = 78,4$ MPa ja maksimaalne nihe 1,98 mm. Mõlemas punktis oli $E_{v2} = 168,8$ MPa, aga esimesel korral oli moodulite suhe 3,39 ja teisel korral 2,15. Kahe vaadeldava katsepunkti E_{v1} nihete erinevus on vaid 1,28 mm, kuid omab väga suurt mõju. Nii väike nihete erinevus võib kergesti sisse tulla kasvõi plaadi

natuke „lohakamast“ asetamisest või sellest, kas killustikaluse korral ulatuvad mõned killustikuterad teistest veidi kõrgemale ning standardikohase 72 kg eelkoormusega seda ei pruugi kompenseerida.

Plaatkoormuskatse koormusplaati peab paika „mugandama“ enne silindri peale asetamist. Seda ütleb ka katsestandard, aga viis, kuidas seda konkreetselt tehakse, võib määrata, kas moodulite suhe on nõuete piires või mitte, kuigi mõlemal juhul võib kiht olla vajaliku tiheduse juures.

Eesti eripäraks võrreldes nt Soome või Saksaga on laialdane ühtlaseteriste teehitusmaterjalide (fraktsioneeritud killustikud ja ühtlaseterised liivad) kasutamine. Taolistest materjalidest ehitatud kihtidel on suurem järeltihendamise potentsiaal, kui eriteralistel materjalidel. Ühtlaseteristel materjalidel kipub vibrotihendamisel ülemine osa jääma kohevamaks, kui tervikkiht (joonis 4.7), mis staatilise plaatkoormustesti käigus esimese koormustsükli käigus hõlpsasti järeltiheneb. Seda nähti näiteks ka käesolevas töös killustikaluste ja aheraine mõõtmise plaatkoormuskatse ja FWD tulemuste võrdluses:

- killustikult oli plaatkoormuse keskmine moodulite suhe 2,1, aga FWD-seadmega 1,22;
- aherainelt oli plaatkoormuse keskmine moodulite suhe 2,0, aga FWD-seadmega 1,23.

Soomes näiteks on kasutusel praktika, kus enne plaatkoormustesti teostamist võidakse killustiku ülemine osa tihendada kerge (50 kg) vibroplaadiga. See tervikkihi tihedust ei muuda, kuid tihendab mõõdetava kihi pealmist osa, mis jääb vibrorulliga tihendamisel natuke kohevamaks (või surub väljaulatuvad killustikuosised paika), mis võib kõrvaldada just selle eelnevalt näiteks toodud 1,28 mm erinevuse, mis põhjustab moodulite liiga suure suhte. FWD-seadmega moodulite suhet mõõtes tehakse enne E1 mõõtmist üks sängituslöök (madalamalt kõrguselt), millega põhjendada ka eelnevalt mainitud oluliselt paremaid tihendustegureid võrreldes plaatkoormuskatsega. Selle sängituslöögi mõju kogu kihi tihendustegurile on tühine, kuid võib omada suurt mõju kihi vastuvõtmisel.

Kerge (50 kg) vibroplaadiga tihendamist katsetati ühel objektil, kus konstruktsioon koosnes liivale ja geovõrgule paigaldatud killustikalusest fr 0/120 mm, mis oli kiilutud pealt fr 0/63 mm, joonis 10.32. Kui tavapäraselt mõõtes saadi moodulite suhted reeglina veenvalt üle 2,5...3, siis peale kerge (50 kg) vibroplaadiga tihendamist 11 mõõtepunkti keskmisena 1,54. Seda, et kiht on tihendatud, näitasid ka FWD-mõõtmised, millega saadi moodulite suhteks keskmiselt 1,15.

Kuigi plaatkoormuse moodulite suhete kasutamine on ülemaailmselt aksepteeritud viis jämedateraliste pinnaste tihendus kvaliteedi hindamiseks, siis ühtlaseteristel pinnastel ja materjalidel (eriti fraktsioneeritud killustikud) tuleb selle kasutamisega olla ettevaatlik ning teadlik sellest, kui vähe vajumeid on vaja, et moodulite suhted ei vastaks enam nõuetele. Seega võiks ka Eestis, sarnaselt Soome praktikale, kasutada killustikalustelt tihendus kvaliteedi mõõtmiseks rohkem FWD-seadmeid, kui plaatkoormustesti.

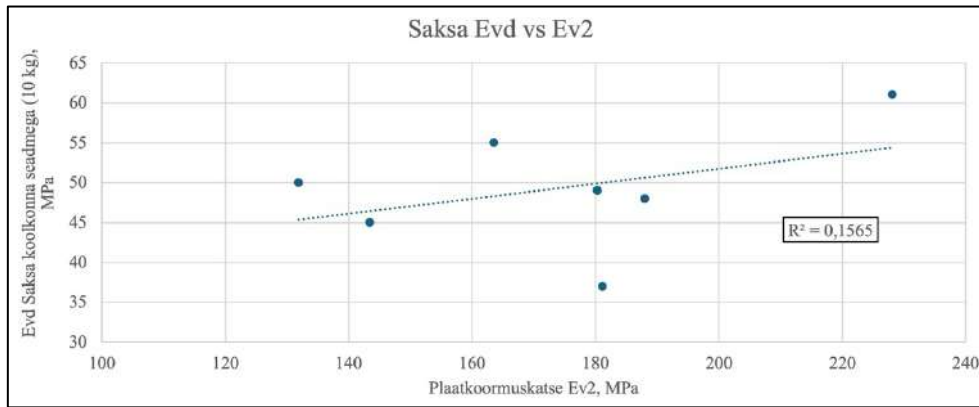


Joonis 10.32. Killustikalus, millelt katsetati Soome praktikat, kus jämedateralist alust tihendatakse enne plaatkoormuse teostamist kerge (50 kg) vibroplaadiga, mis tasandab mõõdetavat pinda. Vastasel juhul toimub vastav tasandamine plaatkoormustesti käigus, mis aga mõjutab tugevalt moodulite suhteid. [Foto: Marko Miir]

10.2.8 Kruusad

Kui varasemates peatükkides käsitleti kvarts- ja paekiviliiva, killustikku, moreeni ja aherainet, siis sellest nimekirjast puudusid kruuspinnased. Kuigi terakoostise poolest võinuks katsetatud moreeni käsitleda ka kruusana, siis käitus antud pinnas veetundlikult ning selle põhjal järeldusi kruusade osas teha ei õnnestunud. Ühel katseobjektil kasutati stabiliseeritud aluse all kruusliiva, kuid selle asukoha ja ehitustööde ajalise surve tõttu ei õnnestunud seal teostada mahumassil põhinevaid tihendusteguri võrdlusi. Objektile teostati seitsmest punktist plaatkoormustestid, mille ümbruses mõõdeti kandevõimeid kõikide uuringusse kaasatud kergseadmetega. Antud peatükk on asetatud peale peatükki, mis käsitles moodulite suhteid, et aidata seeläbi analüüsida tihendamise kvaliteedikontrollivõimalusi kruusadel.

Üldiselt olid leitud seosed eri mõõtmisviiside ja -näitajate vahel nõrgad. Mh ei leitud seost Saksa deflektomeetri E_{vd} ja plaatkoormuskatse E_{v2} vahel, joonis 10.33, mida tavaliselt Saksa vastavates allikates esitatakse ning mille kohaselt peaks jämedateralistel pinnastel, kus peenosisesisaldus ei ületa 15%, E_{vd} väärtus olema 2x väiksem E_{v2} väärtusest, tabel 10.14 (v.t ka tabelit 10.11, kus on antud eri pinnaseliikide tähendused). Tabelis 10.15 antakse veel täiendav seos ka teistsuguste kandevõimete jaoks.



Joonis 10.33. Kruusliivalt saadud mõõtetulemuste võrdlus plaatkoormuse E_{v2} ja Saksa koolkonna kergdeflektomeetri E_{vd} vahel. Esitatud seos on tundlik üksikute punktide suhtes.

Tabel 10.14. Väljavõte Saksa ZTV E-StB 09 juhendist. [23]

In the case of coarse-grained soils, the allocation values set out in Tables 9 and 10 may be applied.

Table 9: Guide values for allocation of the static modulus of deformation E_{v2} to the degree of compaction D_{Pr} for coarse-grained soils

Soil group	Static modulus of deformation E_{v2} in MN/m ²	Degree of compaction D_{Pr} in % in %
GW, GI	≥ 100 ≥ 80	≥ 100 ≥ 98
GE, SE, SW, SI	≥ 80 ≥ 70	≥ 100 ≥ 98

The ratio of the modulus of deformation E_{v2}/E_{v1} shall additionally be applied to assess the compaction status. Herewith apply $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.3$ for $D_{Pr} \leq 100\%$ and $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.5$ for $D_{Pr} \leq 98\%$. If the value of E_{v1} already reaches 60% of the value of E_{v2} given in Table 9, higher ratios E_{v2}/E_{v1} are also permissible.

Table 10: Guide values for allocation of the dynamic modulus of deformation E_{vd} to the degree of compaction D_{Pr} for coarse-grained soils

Soil group	Dynamic modulus of deformation E_{vd} in MN/m ²	Degree of compaction D_{Pr} in % in %
GW, GI, GE, SW, SI, SE	≥ 50 ≥ 40	≥ 100 ≥ 98

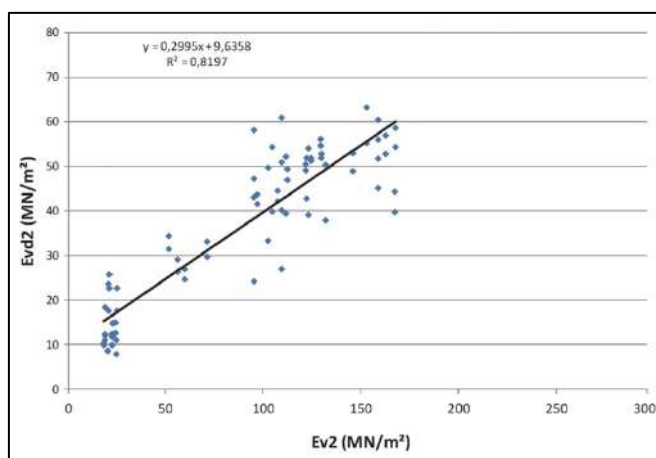
For the soil groups GE and SE the allocations in Tables 9 and 10 are to be checked in the course of trial compaction.

Tabel 10.15. Täiendavad seosed E_{vd} ja E_{v2} osas allikast [22]

Korrelation E_{v2}/E_{vdyn} (dynamischer Verformungsmodul)	Forderung der ZTV A-StB 12	Grenzwerte
	E_{v2} in MN/m ²	E_{vdyn} in MN/m ²
	150	80
	120	65
	100	50
	80	40
	45	25

Järeldus, et plaatkoormuse ja Saksa deflektomeetri vahel ei ole konstant ning sõltub palju mõõdetavast pinnasest, saadi Müncheneri Tehnikaülikoolis läbiviidud uuringus allikas [1], kus

meetodite omavahelise seosena leiti kõikide pinnaste keskmisena $R^2 = 0,28$. Vaadeldes siiski konkreetselt kruusasad, on seos oluliselt tugevam, $R^2 = 0,82$ (joonis 10.34), mistõttu oleks alust deflektomeetrite kasutamiseks plaatkoormuskatse moodulite suhte asemel hindamaks kruuspinnaste tihendus kvaliteeti ka Eestis.



Joonis 10.34. Saksa deflektomeetri 10 kg langeva koormusega saadud E_{vd} väärtuse ning plaatkoormuse E_{v2} omavaheline seos uuringust allikast [1].

Viidatud Saksa uuringus toodi tabelis 10.16 antud üleminekusuhted E_{v2} / E_{vd} koos determinatsioonikordajatega nii 10 kui 15 kg langeva koormuse kohta. Kui tabelis antud üleminekutegur on 2,7, siis tähendab see näiteks $E_{vd} = 40 \text{ MPa} * 2,7 \Rightarrow E_{v2} = 108 \text{ MPa}$, või vastupidi, $E_{v2} = 108 \text{ MPa} / 2,7 \Rightarrow E_{vd} = 40 \text{ MPa}$. Käesolevas uuringus saadud andmed aga nii madalaid Saksa kergdeflektomeetriga saadavaid numbreid ei toeta, mistõttu tabelis 10.16 antud üleminekutegurid ei ole siinkohal kasutatavad.

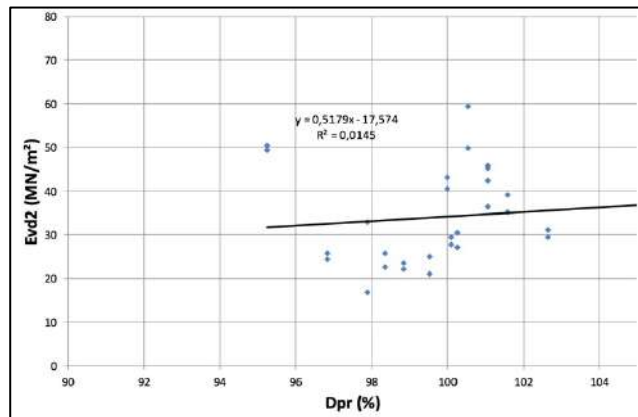
Tabel 10.16. Saksa uuringus allikas [1] leitud seosed plaatkoormuse E_{v2} ja Saksa kergdeflektomeetri E_{vd} vahel erinevatel pinnastel.

Pinnas	10 kg langev koormus		15 kg langev koormus	
	E_{v2} / E_{vd}	R^2	E_{v2} / E_{vd}	R^2
Kruusad	2,7	0,81	2,6	0,89
Liivad	1,3	0,18	0,8	0,13
Keskmiseteralised pinnased*	1,9	0,75	2,3	0,87
Kiviliiv**	3,3	0,53	1,9	0,45

*Saksa keeles: *Fein- und gemischtkörnige Böden*, mis eesti keeles on “peen- ja segateralised pinnased;

**Saksa keeles: *Mineralische Ersatzbaustoffe*, mis inglise keeles selgitatult “*refers to mineral-based substitute building materials. These materials are typically used as alternatives to natural resources in construction, such as gravel or sand, and are often derived from recycled or secondary raw materials*” ning mille eestikeelne vaste on: “mineraalsed asendusehitusmaterjalid, mida kasutatakse ehituses tavaliselt loodusvarade, nagu kruus või liiv, alternatiividena ning need on sageli saadud ringlussevõetud või teisestest toorainetest.”

Saksa uuringus otsiti seoseid mh ka liivade kuivmahumasside põhjal määratud tihendustegurite ja deflektomeetri E_{vd} väärtuste vahel, kuid seost ei leitud ($R^2 = 0,0145$, joonis 10.35), mis on vastuolus käesolevas uuringus saadud järeldusega. Võimalik põhjus sellele on, et käesolevalt vaadeldi suhteliselt sarnaste liivade (sarnane genees ja liivpinnase liik Tm_105) kandevõime ja tihendustegurite omavahelisi seoseid, mistõttu saadi paremad seosed.



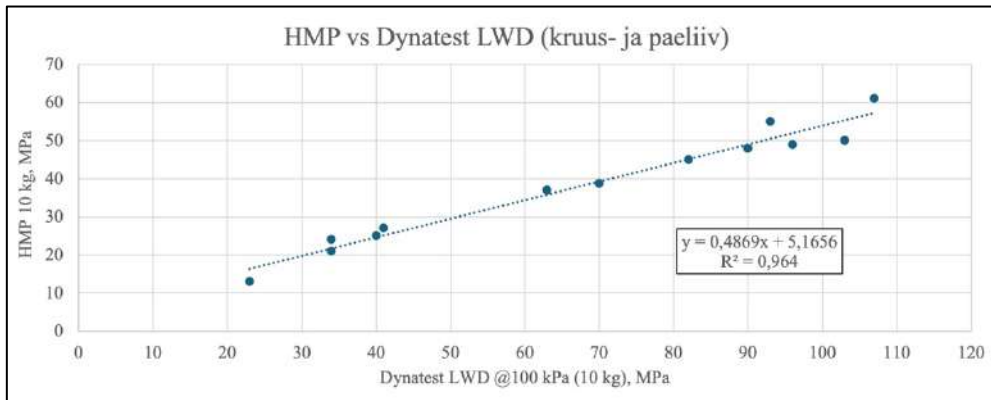
Joonis 10.35. Saksa uuringus allikas [1] ei leitud liivade tihendustegurite ja deflektomeetri kandevõime vahel seoseid.

Käesolevas uuringus mõõdeti tihendatud (valmis) kruusliivakihilt keskmiselt:

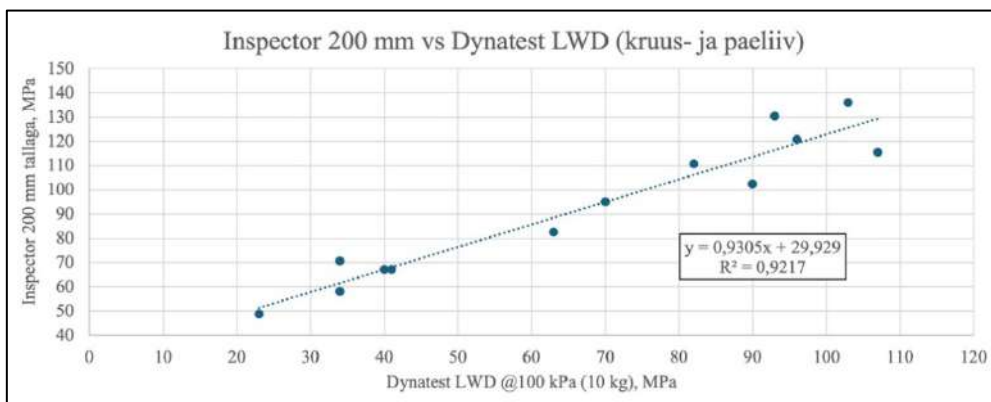
- Saksa deflektomeetriga kasutades 10 kg langevat koormust: 49 MPa;
- Taani deflektomeetriga pingerežiim 100 kPa (10 kg): 91 MPa;
- Inspector-seadme 140 mm tallaga: 134 MPa;
 - $T_f = 1,4$;
- Inspector-seadme 200 mm tallaga: 114 MPa;
- plaatkoormuskatsega E_{v2} : 174 MPa;
 - $E_{v2} / E_{v1} = 2,3$.

Taolised väärtused lähevad hästi kokku nii Saksa (kruuspinnased GW ja GI) kui Soome (jagav kiht) nõuetega. Laiemas mõttes saaks antud teema alla koondada kõik jämedateralised pinnased, mille peenosisesisaldus on $< 15\%$ ja $C_u > 6$, ning seeläbi võrrelda erinevate kergseadmetega saadud tulemusi.

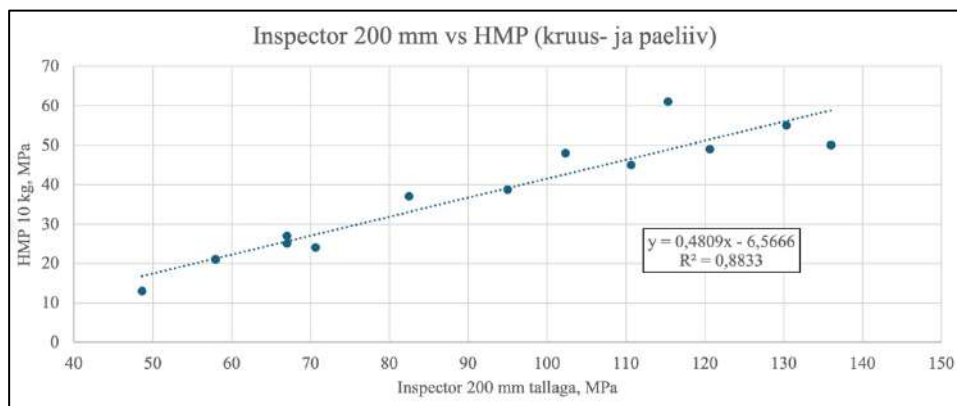
Vastavad seosed on esitatud joonistel 10.36 kuni 10.38, mis on koostatud paekivi- ja kruusliivalt saadud andmete põhjal. Analüüsi hulka ei ole arvestatud peatükis 10.2.2 käsitletud kvartsliivasid, sest need olid ühtlaseterised ning mille puhul Inspector-seadme kasutamine on kahtluse all. Siia ei ole lisatud ka killustikke, sest tegemist on samuti ühtlaseteriste materjalidega ning kus samuti ei leitud Inspectori kasutamisel tugevaid seoseid.



Joonis 10.36. Käesolevas uuringus leitud Saksa- ja Taani kergdeflektomeetrite omavaheline seos kruus- ja paekiviliival. Mõlemad seadmed peavad olema 300 mm tallaga ning langeva koormusega 10 kg (Taani LWD @100 kPa).



Joonis 10.37. Käesolevas uuringus leitud omavaheline seos Inspector-seadme ja Taani kergdeflektromeetri vahel kruus- ja paekiviliival. Kasutada tuleb raskemat Inspectorit 200 mm tallaga ning Taani seade langeva koormusega 10 kg 300 mm plaadile (@100 kPa).



Joonis 10.38. Käesolevas uuringus leitud omavaheline seos Inspector-seadme ja Saksa kergdeflektromeetri vahel kruus- ja paekiviliival. Kasutada tuleb raskemat Inspectorit 200 mm tallaga ning Saksa seadet langeva koormusega 10 kg.

Lähtudes Eestis kasutatavast nõudest muldkeha pinnastele $E_{V2} \geq 100$ MPa ning Saksa seosest E_{V2} ja E_{Vd} vahel saaks seda käesolevas uuringus toodud andmete põhjal täiendada kergdeflektomeetrite kasutamisega nii nagu on välja toodud peatükis 10.3.2.

10.2.9 Geosünteedi mõju

Käesolevas uuringus oli geotekstiil kahe objekti killustikaluse all. Objekt 1 oli mõõdetav konstruktsioon järgnev:

- 15 cm tardkivikillustik 0/32 mm;
- 20 cm kiilutud paekivikillustik fr 32/63 mm;
- III-profiili eraldav geotekstiil;
- Tm_105 liivpinnas.

Sellelt saadi kolme mõõtepunkti põhjal keskmiselt:

- plaatkoormuse $E_{v2} = 195$ MPa, $E_{v2} / E_{v1} = 2,01$;
- Inspector-seadme 140 mm tallaga $E = 195$ MPa ning 200 mm tallaga $E = 134$ MPa;
- Dynatest LWD seadmega 100 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 94$ MPa ning 300 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 151$ MPa;
- HMP LWD seadmega 10 kg langeva massiga $E_{vd} = 64$ MPa ning 15 kg langeva massiga $E_{vd} = 72$ MPa.

Objekt 2 oli mõõdetav konstruktsioon järgnev:

- 12 cm kiilutud paekivikillustik fr 16/32 mm;
- 22 cm paekivikillustik fr 32/63 mm;
- III-profiili eraldav geotekstiil;
- Tm_105 liivpinnas.

Sellelt saadi kolme mõõtepunkti põhjal keskmiselt:

- plaatkoormuse $E_{v2} = 178$ MPa, $E_{v2} / E_{v1} = 1,93$;
- Inspector-seadme 140 mm tallaga $E = 171$ MPa ning 200 mm tallaga $E = 122$ MPa;
- Dynatest LWD seadmega 100 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 102$ MPa ning 300 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 131$ MPa;
- HMP LWD seadmega 10 kg langeva massiga $E_{vd} = 54$ MPa ning 15 kg langeva massiga $E_{vd} = 63$ MPa;
- FWD-seadmega 8 punkti põhjal $E2 = 169$ MPa ning $E2 / E1 = 1,26$.

Kolmandal objektil, kus geotekstiili killustikaluse all ei olnud, oli konstruktsioon:

- 15 cm paekivikillustik fr 0/32 mm;
- 20 cm paekivikillustik fr 32/63 mm;

- Tm_105 liivpinnas.

Sellelt saadi:

- kahe mõõtepunkti keskmisena plaatkoormuse $E_{v2} = 217$ MPa, $E_{v2} / E_{v1} = 2,56$;
- 8 mõõtepunkti keskmisena:
 - Inspector-seadme 140 mm tallaga $E = 232$ MPa ning 200 mm tallaga $E = 153$ MPa;
 - Dynatest LWD seadmega 100 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 130$ MPa ning 300 kPa pingerežiimis $E_{vd} = 176$ MPa;
 - HMP LWD seadmega 10 kg langeva massiga $E_{vd} = 75$ MPa ning 15 kg langeva massiga $E_{vd} = 79$ MPa;
- FWD-seadmega 10 mõõtepunkti keskmisena $E2 = 205$ MPa ning $E2 / E1 = 1,20$.

Kui võtta eelduseks, et kõikidel objektidel olid muidu võrdsed tingimused (kuna killustiku kihipaksused olid praktiliselt samad ehk 35 cm ning kõikide puhul kasutati killustikukihi all sama tüüpi liiva ehk Tm_105), siis **geotekstiili olemasolu vähendas mõõdetavat kandevõimet kõikide kasutatud seadmete keskmisena umbes 19%** ning seadmete võrdluses järgmiselt:

- plaatkoormuse korral umbes 14%;
- Inspector-seadme 140 mm tallaga umbes 21%;
- Inspector-seadme 200 mm tallaga umbes 16%;
- Dynatest LWD seadmega 100 kPa pingerežiimis umbes 24%;
- Dynatest LWD seadmega 300 kPa pingerežiimis umbes 20%;
- HMP 10 kg langeva massiga umbes 21%;
- HMP 15 kg langeva massiga umbes 15%;
- FWD-seadmega umbes 18%.

Eraldava geotekstiili kasutamise mõju mõõdetava kandevõime vähendamisel on käsitletud veel vähemalt neljas lõputöös: Riho Eichfuss [3], Simmo Talpas-Talpsepp [20] ja Rait Kopti [14] magistritööd TalTechis ning Ats Peetris [17] lõputöö Tallinna Tehnikakõrgkoolis.

Riho Eichfuss magistritööst [3] tabel 10.17 ning järeldus: “Katse tulemustest nähtub väga selgelt, et geotekstiil mõjutab konstruktsiooni mõõdetavat kandevõimet. Mõlema killustikukihi puhul on geotekstiiliga konstruktsioon madalama kandevõimega kui ilma. Eriti tugev oli vahe kiilutud killustiku 32/64 puhul, kus tulemused erinesid üle pooleteise korra.”

Tabel 10.17. Väljavõte Riho Eichfuss magistritööst seoses geotekstiili mõjudega mõõdetavale kandevõimele. [3]

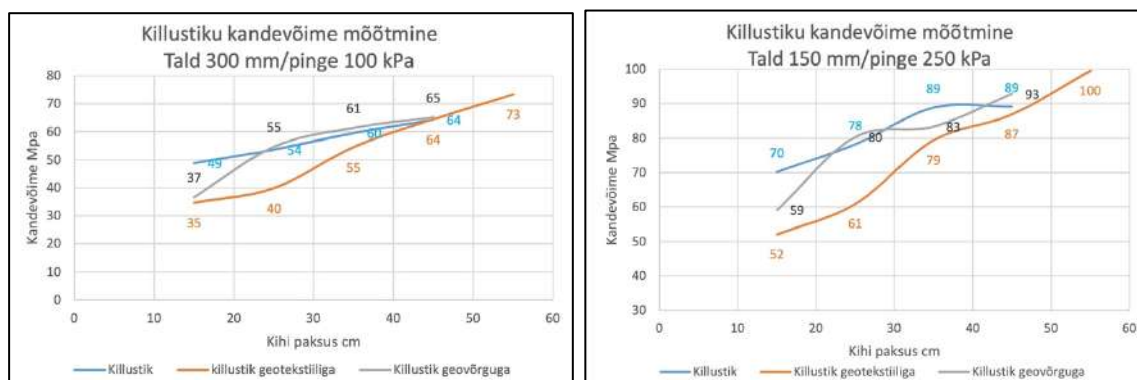
	Tekstiiliga 4/32 killustikalus			4/32 killustikalus		
	Plaatkoormuskatse	Inspector	LWD	Plaatkoormuskatse	Inspector	LWD
1	Ev1=54.9* Ev2=140.3* Ev2/Ev1=2.56	171 (1.20)	133.7	Ev1=43.8* Ev2=149.9* Ev2/Ev1=3.42	227 (1.35)	169.0
2	Ev1=60,8 Ev2=164.3 Ev2/Ev1=2.7	158 (1.25)	114.0	Ev1=57.4 Ev2=257.2 Ev2/Ev1=4.48	189 (1.35)	167.3
3	Ev1=48.3 Ev2=157.1 Ev2/Ev1=3.25	175 (1.23)	107.0	Ev1=69.0 Ev2=230.2 Ev2/Ev1=3.34	181 (1.40)	152.3
\bar{x}	160.7	168.0	118.2	243.7	199.0	162.9
ÜT	1.36	1.42	1.0	1.50	1.22	1.0
	Tekstiiliga 32/64 kiilutud 4/32			32/64 kiilutud 4/32		
		Inspector	LWD		Inspector	LWD
1		209 (1.34)	116.0		324 (1.30)	236.0
2		182 (1.39)	140.0		274 (1.50)	242.0
3		186 (1.52)	142.7		273 (1.43)	200.7
\bar{x}		192.3	132.9		290.3	226.2
ÜT		1.45	1.0		1.28	1.0
* - Ilma liivapadjata						
\bar{x} - Aritmeetiline keskmine						
ÜT - Ülemineku tegur LWD-It						

Simmo Talpas-Talpsepp magistritööst [20] tabel 10.18 ning järeldus: “Töö autori isiklik kogemus ning eelnevalt tehtud uuringud (viide Rait Kopti magistritööle) tõestavad, et geosünteedil on mõju teekonstruktsiooni kihi peal mõõdetavale kandevõimele. Rait Kopti on oma magistritöös geosünteedi mõju uurinud ning leidnud, et Dynatest LWD seadmega mõõtes killustikukihilt väheneb tulemus kuni 30%. See korreleerub suhteliselt hästi töö autori poolt plaatkoormuskatse käigus mõõdetud tulemustega. Kuigi plaatkoormuskatsega kipub erinevus olema pigem 40%. /.../ Tõenäoline selgitus võib olla materjali eelpingestamises ehk vinnastamises, mis toimub nii järgnevate kihtide paigaldamise/tihendamisega kui ka reaalse koormuse all esimesel tööaastal.”

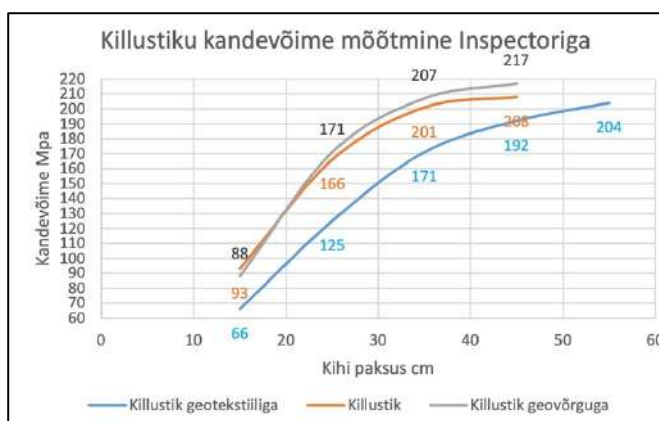
Tabel 10.18. Väljavõte Simmo Talpas-Talpsepp magistritööst seoses geotekstiili mõjudega mõõdetavale kandevõimele. [20]

Geosünteediga konstruktsioon	
geosünteediga konstruktsioon (E_{v1} , MPa)	geosünteediga konstruktsioon (E_{v2} , MPa)
42	128
58	102
65	111
Geosünteedita konstruktsioon	
geosünteedita konstruktsioon (E_{v1} , MPa)	geosünteedita konstruktsioon (E_{v2} , MPa)
111	229
91	192
110	204
90	152
112	213

Rait Kopti magistritööst [14] joonised 10.39 kuni 10.41, millekohaselt geovõrk vähendas killustikukihilt mõõdetavat kandevõimet minimaalselt, kuid eraldav geotekstiil tuntuvalt, tabel 10.19.



Joonised 10.39 ja 10.40. Väljavõtted Rait Kopti magistritööst seoses geosünteedi mõjudega mõõdetavale kandevõimele Dynatest LWD-seadmega. [14]



Joonis 10.41. Väljavõtte Rait Kopti magistritööst seoses geosünteedi mõjudega mõõdetavale kandevõimele Inspector-seadmega. [14]

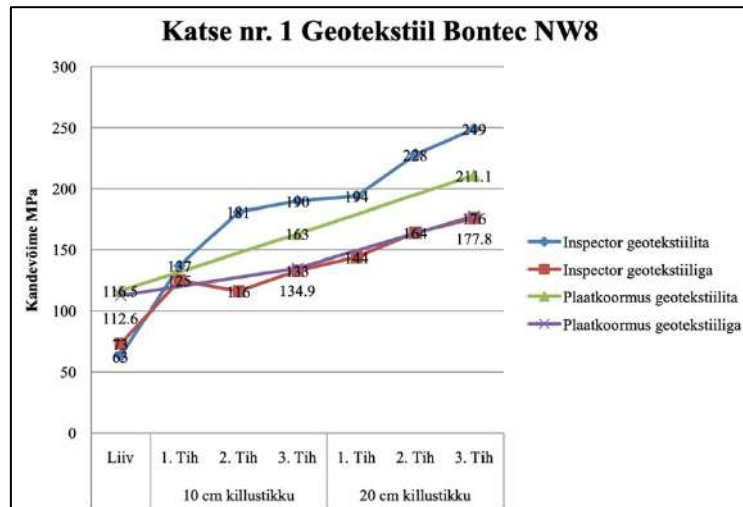
Tabel 10.19. Kokkuvõtlik tabel Rait Kopti magistritööst seoses eraldava geotekstiili mõjudega killustiku pealt mõõdetavale kandevõimele. [14]

Tabel 5.1 Killustiku kandevõime vähenemise % geotekstiili paigaldamisel liiva ja killustikukihi fr.16/32 vahele

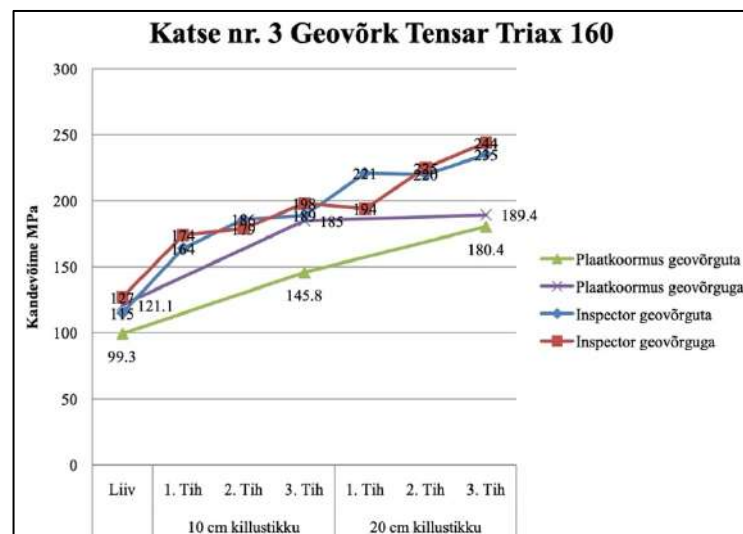
Mõõteseade	Talla diameeter mm	Pinge kPa	Killustikukihi paksused cm			
			15	25	35	45
			Geotekstiilist tingitud kandevõime vähenemine %			
Dynatest LWD	300	100	29	26	8	0
Dynatest LWD	150	250	26	22	11	2
Inspector	140	1500*	29	25	15	8

* Inspectori ligikaudne pinge talla all on 1500 kPa [9]

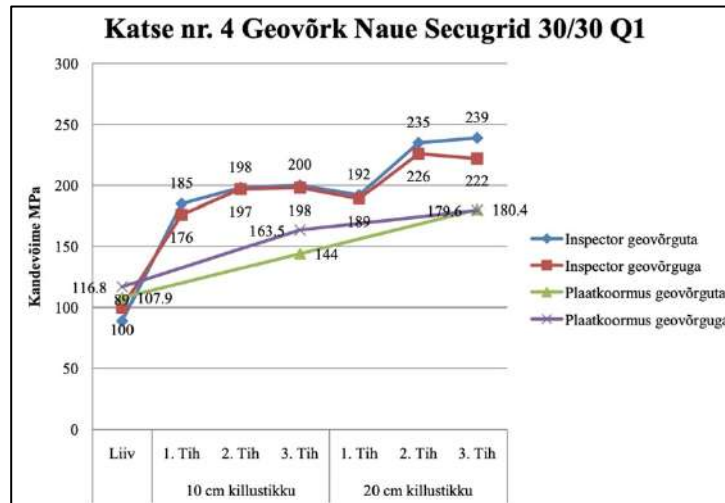
Ats Peetrise Tallinna Tehnikakõrgkooli lõputööst [17] pärinevad joonised 10.42 kuni 10.45, mille kirjeldusse on lisatud saadud järeldused.



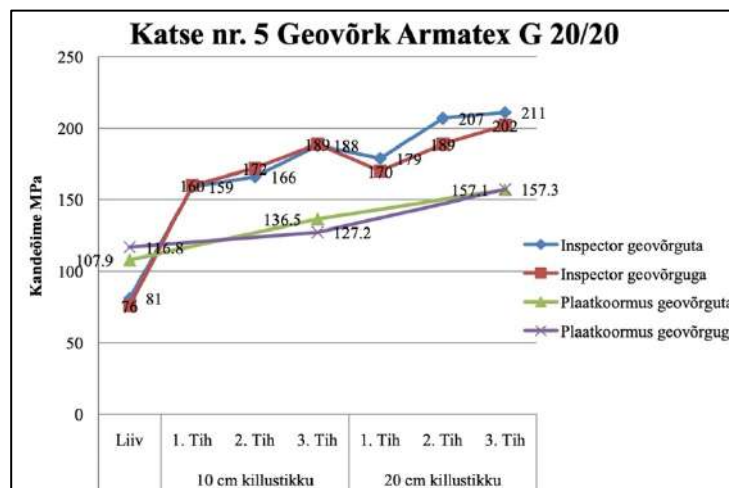
Joonis 10.42. 20 cm killustiku pealt mõõtes on plaatkoormuskatse tulemus 211,1 MPa geotekstiilita ja 177,8 MPa geotekstiiliga pinnalt, erinevus 16%. Inspector-seadme tulemused samalt kihilt on 249 MPa geotekstiilita ja 176 MPa geotekstiiliga konstruktsioonis, erinevus 29%. [17]



Joonis 10.43. 20 cm killustiku pealt on plaatkoormuskatse tulemused geovõrguga pinnalt 189,4 MPa ja geovõrguta pinnalt 180,4 MPa, erinevuseks 5%. Inspector-seadme tulemus geovõrgult on 244 MPa ja geovõrguta pinnalt 235 MPa, erinevuseks 4%. [17]



Joonis 10.44. 20 cm killustiku pinnalt mõõdetuna on plaatkoormusseadme tulemused 179,6 MPa geovõrguga ja 180,4 MPa geovõrguta konstruktsioonis, erinevus 0,5%. Inspector-seadme tulemused on 222 MPa geovõrguga ja 239 MPa geovõrguta pinnalt, erinevus 7%. [17]



Joonis 10.45. 20 cm killustiku kihi pealt mõõtes on plaatkoormuskatse tulemused 157,3 MPa geovõrguga ja 157,1 MPa geovõrguta pinnalt, erinevus 0,1%. Inspector-seadme tulemused on 211 MPa geovõrguta ja 202 MPa geovõrguga pinnalt, erinevus 4%. [17]

Ats Peetris järeltas oma lõputöös järgmist:

- „põhjuseks võib olla liiga õhukene täitematerjali kiht geotekstiili peal, mis ei tihene ning hakkab geotekstiili pinnalt tagasi pörkuma. Tulemused näitavad, et 20 cm kihi peal kandevõimete erinevused vähenevad, seega olukord paraneb, kui geotekstiilile lisada rohkem killustiku. Teiseks põhjuseks, miks geotekstiil mõjutab kandevõimet, võib olla materjalide omavahelise nakke kadumine geotekstiili tõttu. Ehk liiva ja killustiku vahel ei teki piisavat nihketugevust ning kandevõime mõõtmisel võib tekkida olukord, kus killustik saab mööda geotekstiili pinda mõõteseadmete alt niielda välja roomata.“

- „Geovõrkude kasutamise puhul ei ole kandevõime erinevused nii suured, kui geotekstiiliga. Tulemusi vaadates on näha, et kandevõime on vägagi sarnane geovõrgu kasutamisel, kui ka mittekasutamisel ja seda kõigi kolme katse puhul.“

Geosünteedide mõju osas saab kokkuvõtteks järeltada järgmist:

- geovõrgud mõõdetavat kandevõimet praktiliselt ei mõjuta (v.a üpriski õhukeste kihipaksuste korral), mistõttu tihendusteguri kvaliteedikontrolli mõttes sellega nõuete koostamisel eraldi arvestada pole vajalik;
- geotekstiilid mõjutavad (killustikukihi) kandevõimet kõikide seadmete korral, keskmiselt võib arvestada umbes 20%. Mida suurem on geotekstiilil olev kihipaksus, seda väiksem on mõju ja vastupidi. Samuti näib, et dünaamiliste seadmetega mõõtes on geotekstiili mõju suurem, kui staatilise koormusega kasutades plaatkoormuskatset.

Fakt, et eraldavad geotekstiilid mõjutaksid tuntavalt killustikaluse kandevõimet, ei ole saanud kinnitust välismaiste ekspertidega suheldes ning sellele teemale ei ole pühendatud ka teadusuuringuid. Antud teave on ka geosünteedide tootjatele üldiselt teadmata. Kõige tõenäoliselt põhjus, miks meil on taoline probleem esile kerkinud, tuleneb geotekstiilil kasutatavast fraktsioneeritud killustikust. Mujal Euroopas kasutatakse pideva terakoostisega killustikke, mistõttu kiht on sidusam ning „pakkub“ oluliselt tihedamaks. Fraktsioneeritud killustikus on aga üksikud suured terad, mille vahel on suured poorid. Taoline kiht on tundlik geotekstiili „põrkavale“ mõjule eriti siis, kui tihendatakse kasutades vibratsiooni ning kandevõimet mõõdetakse dünaamiliste seadmetega. Antud järeltust toetab kaudselt Riho Eichfuss magistritöös esitatud tähelepanek „Eriti tugev oli vahe kiilutud killustiku 32/64 puhul, kus tulemused erinesid üle pooleteise korra.“

Kuna eraldava geotekstiili kasutamine fraktsioneeritud killustike ja ühtlaseteriste liivade vahel on vajalik, siis näiteks selle kasutamise loobumist ei saa toetada. Alternatiiviks võiks aga olla geovõrgu kasutamine geotekstiili asemel.

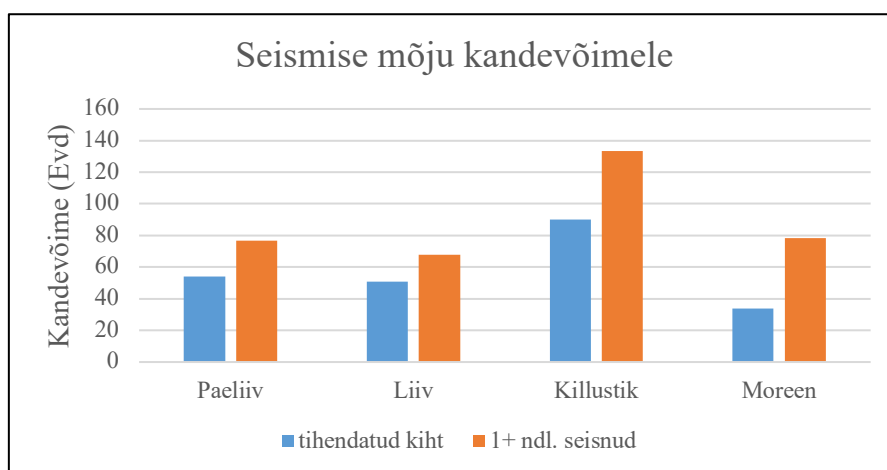
Kui fraktsioneeritud killustiku all kasutatakse eraldavat geotekstiili, siis:

- tuleks erilist tähelepanu pöörata killustikaluse ehitamisele ja selle tihendamisele;
- killustikalus peab olema korrektselt kiilutud kasutades selleks sobilikke fraktsioone, et terad oleksid tugevalt lukustatud (hetkel ei ole teada, kuidas erinevad üksteisest olukorrad, kus killustikalus kiilutakse vastavalt makadamkatte reeglitele või kui killustikaluse ülaosas kasutatakse sideainega sidumata segu, sh freesasfalti);
- viimased tihenduskäigud tuleks teha kasutades staatilist koormust;
- kandevõimekontroll on soovituslik teostada plaatkoormuskatsega. FWD-seadme võimalik positiivne mõju (kuna seade koormab killustikalust suurema koormusega) vajab täiendavaid katsetusi; kergseadmete kasutamisel on geotekstiilist tulenev kandevõime vähenemine suurem, kui plaatkoormuskatsega;
- kvaliteedikontrollis võib nõutud kandevõimeväärtusi vähendada 20% võrra, kuid moodulite suhted peavad jääma samaks, mis ilma geotekstiilita olukorras.

10.2.10 Kihi seismise mõju mõõdetavatele kandevõimetele

Käesolevas uuringus oli võimalik hinnata ka seismise mõju erinevatele kihtidele. Vastavad võrdlused on esitatud joonisel 10.46, kus on võrreldud tulemusi vahetult tihendamise järgselt ning peale vähemalt 1 nädalast seismist, mille kohaselt on seismisel mõõdetavale kandevõimele positiivne mõju. Joonisel 10.46 antud graafikus on esitatud kõikide kergseadmete tulemuste põhjal aritmeetilised keskmised väärtused. Kandevõime tõus on selgitatav eelkõige vee ja teradevaheliste nõrkade sidemete tekkimise mõjudega (v.t peatükk 1.6.1).

Seega deflektomeetritega tehtavat kandevõimekontrolli on soovituslik teostada mitte vahetult peale tihendamist, vaid mitte varem, kui järgmisel päeval (vähemalt ca 12...24 tunni möödudes peale tihendamist). Sama soovitus võib anda ka plaatkoormuse, FWD kui penetromeetriga tehtavatele mõõtmistele. Näiteks joonisel 10.47 olev killustikalus mõõdeti vahetult peale tihendamist. Minimaalseks vajalikuks kandevõimeks oli LWD-seadmega 100 MPa, kuid saavutati mitte üle 90 MPa. Järgmisel päeval tehtud mõõdistustega saadi samadest ristlõigetest vajalikud kandevõimed ilma, et vahepeal oleks pidanud täiendavalt tihendada.



Joonis 10.46. Seismise mõju materjali elastsusmoodulile. Joonisel on antud kõikide kergdeflektomeetrite keskmised mõõteväärtused.



Joonis 10.47. Katsetatud killustikalus. [Foto: Sven Sillamäe]

10.3 Analüüs ja kokkuvõtted

Antud peatükis seostatakse omavahel peatükis 1.1 antud pinnaste liigitus ja tihenduskontrollimeetodid. Alljärgnevalt ei ole käsitletud kuivmahumasside võrdlusel põhinevaid tihendustegureid, kuna need on sobilikud kasutamiseks pea kõikides pinnastes (v.a väga jämedateralised) ega rullidega tehtavat pidevat tihendusemõõtmist, mille kalibreerimine tuleb teostada peatükis 4.3 antud juhiste kohaselt.

10.3.1 Liivpinnased

Antud peatükis käsitletavad pinnased kuuluvad valdavalt peatüki 1.1 alusel jäme- ja keskpinnaste hulka täpsustusega, et vaadeldavad pinnased on liivad (S_a) kuni kruusased liivad (grS_a). Antud pinnaste peenosisesisaldus peaks olema $\leq 5\text{...}7\%$ (Transpordiameti peadirektori 10.06.2024 käskkiri nr 1.1-1/24/92, mille kohaselt tuleb kasutada pinnaseid peenosisesisaldusega enne paigaldamist $\leq 5\%$ ning kus peenosisesisaldus tihendatud kihist võetud proovist võib olla $\leq 7\%$).

Peatükis 1.1 käsitletud jäme- ja keskpinnased, mis on terakoostise poolest kruusad (Gr) ja liivased kruusad ($saGr$) liigitatakse killustike alla.

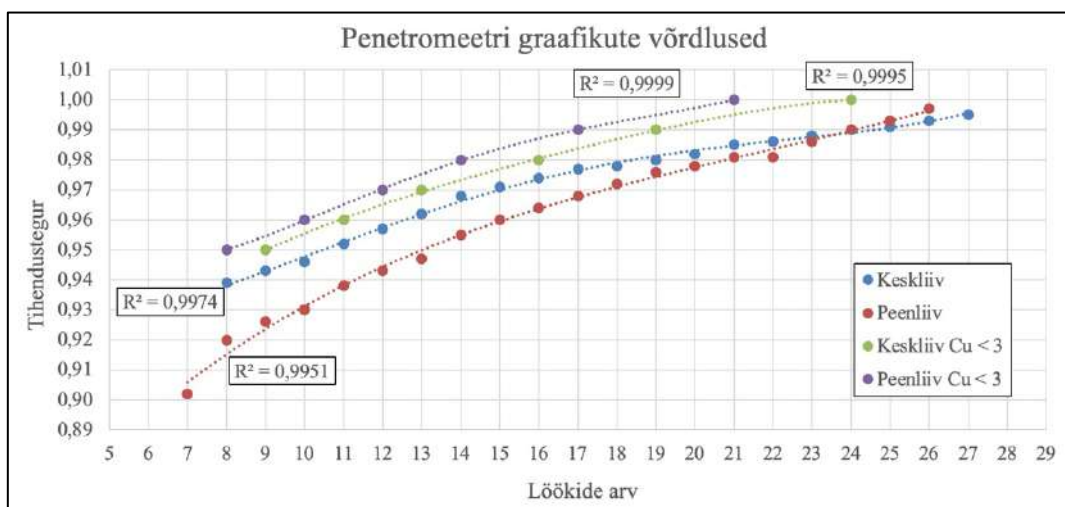
Käesolevas uuringus katsetati peamiselt ühtlaseteriseid liivasid, mille C_u oli valdavalt alla 3. Ühtlaseteraliste liivade ($C_u < 6$) korral on terad suhteliselt sama suurusega, mis tähendab, et nad kipuvad vähem pakkuma endas "lukustuvat" struktuuri, mis vähendab liivpinnase nihketugevust. Eriteralised liivad ($C_u > 6$) sisaldavad see-eest erineva suurusega teri, mis võimaldab paremat pakkimist ja struktuuri lukustumist. See lisab liivale tugevust ja parandab vastupanuvõimet nihkele (ehk liiva kandevõime on suurem). Tavaliselt jääb ühtlaseteraliste liivade nihketugevus eriteralaste liivade nihketugevusest 20...30% madalamaks. Protsentuaalne erinevus sõltub siiski konkreetsetes materjali omadustest ja välistingimustest, kuid üldiselt võiks olla turvaline hinnata umbes 25% võrra madalamaks ühtlaseteralise liiva nihketugevust eriteralise liivaga võrreldes.

Tulenevalt nii eelnevast selgitusest kui ka peatükis 10.2.2 antud katsetulemustest ja näidetest tuleb järeldada, et penetromeetriga kaasa antava tabeli (Lisa 2) abil ei ole sobilik hinnata kõikide liivade tihendustegureid. Arvestades tabelis antud löökide arvu, on esitatud andmed suure tõenäosusega leitud kasutades eriteraseid (arvestades tabeli ajalugu, siis tõenäoliselt C_u vähemalt 5) liivasid. Teisalt ei saa C_u väärtus minna ka väga kõrgeks, mistõttu ei oleks katsetatava pinnase näol tegemist enam puhta liivaga, vaid nt kruusase liiva või liivase kruusaga. Penetromeetri kasutusjuhendis samas on nõue, et katsetatava materjali 5...10 mm sisaldus ei tohi ületada 15%, kuid sellele vastavad pinnased kipuvad juba liigituma kruusasteks liivadeks.

Eelnevast tulenevalt on tabelisse 10.20 koostatud täiendatud penetromeetriga D-51 tihendusteguri hindamise näitajad, kus liivadele on antud terakoostisest tulenevad piirangud ning tihendusteguri osas on piiratud kahe kohaga peale koma (kolm kohta peale koma on ebarealistlikult suur täpsus, lisaks nt ka tee ehitamise kvaliteedinõuetes (määrus 101)

antavad nõuded defineerivad kaks kohta peale koma). Olemasolevas tabelis olev kolm kohta peale koma on näiteks toonud kaasa ebanõistlikke nõudeid, kus töövõtjatelt on nõutud tõendada väga ühtlaseteristes ($C_u < 3$) keskliivades tihendustegurit 1,000 kasutades penetromeetriga 31 lööki, mis aga ei ole olnud võimalik enne, kui liivpinnas on mingi aja seisnud või kui mõõtmine on teostatud peale killustikaluse ehitamist (ehk liiva mõõtmine on tehtud läbi šurfiaukude).

Tabelisse 10.20 on võrreldes algsete veergudega juurde lisatud veel kaks halli veergu arvestades väga ühtlaseteriste ($C_u < 3$) liivadega, kus vajaminevate löökide arvu on vähendatud lähtudes eeldusest, et nende nihketugevus on madalam. Joonisel 10.48 on antud originaaltabelist võetud peen- ja keskliivade graafikud ning täiustatud andmed ühtlaseteristele liivadele. Antud andmeid oleks soovituslik erinevatel tee-ehitusobjektidel täiendavalt kontrollida.



Joonis 10.48. Tabelis 10.20 olevad peen- ja keskliivade andmed esitatuna graafiliselt.

Tabel 10.20. Penetromeetri D-51 löökide arv ja nende seos erineva liivpinnase tihendusteguriga. Käesolevas töös on originaaltabeli kasutamise piiriks seatud liiva terakoostise ühtlustegur $C_u > 3$ ning juurde on tuletatud andmed, kui $C_u < 3$. Käesolev tabel on mõeldud asendamaks lisa 2 olevat tabelit. Mõõdetav kiht peab olema vähemalt 35 cm paksune.

Penetromeetri D-51 löökide arv	Penetromeetriga D-51 leitud tihendustegur					
	Liivast ($C_u > 3$) mulle üle ühe kuu	Värsketel mulletel				
		Tolmliiv (siSa), $C_u > 3$	Peenliiv (fSa), $3 < C_u < 15$, Tm_100	Kesk- ja jämeliiv (mSa ja cSa), $3 < C_u < 15$, Tm_120 ja 130	Peenliiv (fSa), $2 < C_u < 3$, Tm_90	Kesk- ja jämeliiv (mSa ja cSa), $2 < C_u < 3$, Tm_105 ja 115
7	0,91	-	0,90	0,91	-	-
8	0,93	-	0,92	0,94	0,95	-
9	-	-	0,93	-	-	0,95
10	0,94	0,91	-	0,95	0,96	-
11	-	0,92	0,94	-	-	0,96
12	0,95	-	-	0,96	0,97	-
13	-	0,93	0,95	-	-	0,97
14	-	-	0,96	0,97	0,98	-
15	0,96	0,94	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	0,98
17	-	0,95	0,97	0,98	0,99	-
18	0,97	-	-	-	-	-
19	-	0,96	0,98	-	-	0,99
20	-	-	-	-	-	-
21	0,98	0,97	-	0,99	1,00	-
22	-	-	-	-	-	-
23	-	0,98	0,99	-	-	-
24	-	-	-	-	-	1,00
25	-	-	-	-	-	-
26	-	-	1,00	-	-	-
27	0,99	0,99	-	1,00	-	-
28	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-
30	-	1,00	1,01	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-
34	1,00	-	-	-	-	-

Eesti, aga ka Saksa uuringutest saadud andmed on näidanud, et plaatkoormustestiga ei pruugi saada liivpinnaste, eriti kui tegemist on väga ühtlaseteriste liivadega, katsetamisel usaldusväärseid tihendustegureid (peatükid 10.2.8 ja 10.2.9). Näiteks tuuakse ka standardis EVS-EN 16907-3 välja, et väga ühtlaseteriste (liiv)pinnaste tihendusteguri kontroll on problemaatiline ning tihenduskatsete tegemist soovitatakse läbi järgnevalt paigaldatava materjalikihi või kasutades penetratsioonikatseid.

Seega plaatkoormuskatsete tegemist vahetult ühtlaseteristel liivpinnastel ei saa soovitada. Kui aga liivpinnastel plaatkoormuskatseid teostatakse, siis võib lähtuda peatükis 10.3.2 antud moodulite suhetest.

Käesolevas uuringus leiti head seosed ühtlaseteriste kvartsliidade (Tm_105) tihendustegurite ning Taani ja Saksa koolkonna deflektomeetritega saadud kandevõimete vahel, tabel 10.3. Inspector-seadme kasutamisel piisavaid seoseid ei leitud, mis on kooskõlas ka varasemate teadmistega (Lisa 3). Tõenäoliselt võiks Inspector-seade sobida tingimusel, kui kasutatakse

kas suuremat talda (300 mm) ja/või väiksemat langevat koormust (ehk Inspector 5 mudelit), kuid käesolevas uuringus neid ei katsetatud.

Kuna käesolevas uuringus ei õnnestunud katsetada ühtlaseteriseid peenliivasid (Tm_90), siis on küsitav, kas tabelis 10.3 antud näitajad on ka sellele pinnasetüübile sobilikud. Arvestades, et Tm_90 arvutuslik elastsusmoodul on võrreldes Tm_105-ga umbes 16% väiksem, siis tõenäoliselt mitte. Võttes eelduseks, et Tm_90 on võrreldes Tm_105-ga umbes 16% nõrgema kandevõimega, saadakse tabel 10.21.

Siinkohal võiks aga küsida, kas nt jämeliiva kasutamisel peaks kasutama suuremat kandevõime väärtust ning vastus sellele on eitav. Tabeli 10.21 potentsiaalseks probleemiks on see, et (ühtlaseteralistele) kvartsliidadele on antud kõrgemad kandevõimenõuded, kui nt Saksa nõuetes (peatükid 10.2.8 ja 10.2.9) kruusadele. Seega vajaksid esitatud andmed suurema katsetulemuste andmebaasi vastu võrdlemist, kuid igal juhul on esitatud andmed konservatiivsemal poolel ehk nõutud on pigem suuremat kandevõimet, mis nõuab omakorda kõrgemaid tihendustegureid.

Tabel 10.21. Kvartsliidade Tm_90 ning Tm_105 ja parem kandevõimete suhted tihendusteguriga. Tm_105 liivade andmed tulenevad tabelist 10.3 ning Tm_90 väärtused on tuletatud arvestusega, et KAPis on nende elastsusmoodul võrreldes Tm_105-ga 16% väiksem (90 vs 105 MPa).

Tihendustegur (standardsest Proctorist)	Kvartsliidad			
	Tm_105 ja parem		Tm_90	
	Saksa LWD 10 kg (MPa)	Taani LWD @100 kPa (MPa)	Saksa LWD 10 kg (MPa)	Taani LWD @100 kPa (MPa)
0,90	25	40	21	34
0,91	30	45	25	38
0,92	33	50	27	42
0,93	35	55	29	46
0,94	38	58	32	48
0,95	40	60	34	50
0,96	45	65	38	55
0,97	48	70	40	59
0,98	50	73	42	61
0,99	53	75	44	63
1,00	55	80	46	67
1,01	58	85	48	71

Tabelis 10.4 anti pestud paekiviliiva tihendustegurite ning kergdeflektomeetrite omavahelised suhted. Paekiviliiv on oma struktuuri tõttu hea nihketugevusega, mistõttu on selle tihendatust sobilik hinnata kasutades ka Inspector-seadet. Paekiviliiva osas sobib hästi kasutamiseks ka plaatkoormuskatse, mille osas lähtuda peatükist 10.3.2.

10.3.2 Kruuspinnased

Antud peatüki nõuded kehtivad peatükis 1.1 käsitletud liitpinnastele.

Käesolevas uuringus saadi kruusasele pinnasele (kruusane liiv ja liivane kruus) andmeid vaid ühelt objektilt, kus kergseadmete ja plaatkoormuskatse tulemused omavahel ei korreleerunud. Seetõttu lähtuti Soome ja Saksa nõuetest ning võrreldi kruusaselt pinnaselt ning paekiviliivalt saadud andmeid nendega. Võtteks lisaks veel aluseks Eestis kasutatava nõude, mille alusel peaks muldkeha pinnaste $E_{v2} \geq 100$ MPa ning Saksa seosest E_{v2} ja E_{vd} vahel saaks seda käesolevas uuringus toodud andmete põhjal täiendada kergdeflektomeetrite kasutamisega järgmiselt:

- tihendusteguri 100% (1,00) korral:
 - Saksa deflektomeetritega kasutades 10 kg langevat massi: $E_{vd} \geq 50$ MPa;
 - Taani deflektomeetritega kasutades 100 kPa kontaktpinget: $E_{vd} \geq 90$ MPa;
 - Inspector-seadmega (10 kg langeva massiga) kasutades 200 mm talda: $E \geq 115$ MPa;
 - plaatkoormuskatse kasutamisel, kui $E_{v2} < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,3$ (suuremate E_{v2} väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt E_{v2} väärtusele);
 - FWD-seadme kasutamisel, kui $E2 < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,0$ (suuremate $E2$ väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt $E2$ väärtusele);
- tihendusteguri 98% (0,98) korral:
 - Saksa deflektomeetritega kasutades 10 kg langevat massi: $E_{vd} \geq 40$ MPa;
 - Taani deflektomeetritega kasutades 100 kPa kontaktpinget: $E_{vd} \geq 70$ MPa;
 - Inspector-seadmega (10 kg langeva massiga) kasutades 200 mm talda: $E \geq 95$ MPa;
 - plaatkoormuskatse kasutamisel, kui $E_{v2} < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,5$ (suuremate E_{v2} väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt E_{v2} väärtusele);
 - FWD-seadme kasutamisel, kui $E2 < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,2$ (suuremate $E2$ väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt $E2$ väärtusele);
- tihendusteguri 95% (0,95) korral:
 - Saksa deflektomeetritega kasutades 10 kg langevat massi: $E_{vd} \geq 30$ MPa;
 - Taani deflektomeetritega kasutades 100 kPa kontaktpinget: $E_{vd} \geq 50$ MPa;

- Inspector-seadmega (10 kg langeva massiga) kasutades 200 mm talda: $E \geq 75$ MPa.
- plaatkoormuskatse kasutamisel, kui $E_{v2} < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,7$ (suuremate E_{v2} väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt E_{v2} väärtusele);
- FWD-seadme kasutamisel, kui $E2 < 125$ MPa, siis $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,4$ (suuremate $E2$ väärtuste puhul lähtuda tabelite 10.7...10.10 loogikast ehk suurendada lubatud moodulite suhet vastavalt $E2$ väärtusele);

10.3.3 Keskmise- ja peeneteralised pinnased

Antud pinnasekategorია alla kuuluvad mh moreenpinnased ja Tm_65. Taoliste pinnaste tihendamisel on kõikide muude pinnastega võrreldes oluliselt suurem tähtsus tihendamisaegsel veesisaldusel (kuigi ka muude pinnaste korral ei tohi seda alahinnata). Kui pinnase tihendamisaegne veesisaldus on optimaalsest veesisaldusest oluliselt erinev, ei ole võimalik soovitud tihendustegurite saavutamine. Näiteks Soome InfraRYLis tuuakse välja, et kui tihendamisaegne veesisaldus erineb optimaalsest üle 4 %-punkti võrra, ei ole üldjuhul tihendustegur üle 95% (mod. Proctori järgi, mis on umbes 98% standardse Proctori järgi) saavutatav ning kui erinevus on üle 6 %-punkti on maksimaalne võimalik tihendustegur umbes 90% (mod. Proctori järgi, mis on umbes 93% standardse Proctori järgi).

Vastavalt InfraRYLile on optimaalsed veesisaldused ja orienteeruvad maksimaalsed kuivmahu massid pinnaseliikide kaupa esitatud tabelis 10.22.

Tabel 10.22. Erinevate pinnaste orienteeruvad optimaalsed veesisaldused ja maksimaalsed kuivmahu massid.

Pinnase liik	Optimaalne veesisaldus	Maksimaalne kuivmahu mass
Kruuspinnased	5...10%	2,0...2,2 Mg/m ³
Liivpinnased	5...15%	1,7...2,2 Mg/m ³
Möllpinnased	15...25%	1,6...1,8 Mg/m ³
Savipinnased	20...30%	1,5...1,7 Mg/m ³
Moreenpinnased	5...10%	2,0...2,3 Mg/m ³

Seega antud pinnasegrupi esmaseks kvaliteedikontrollimeetmeks on tihendamisaegse veesisalduse kontrollimine, mis on objektimeskonna poolt hinnatav näiteks järgnevalt.

Vaadeldavast pinnasest moodustatakse käte vahel umbes peopesasuurune kuul / pall. Kui pinnase veesisaldus on:

- liiga madal, siis:
 - välimus: pinnas tundub pulbriline ja lahtine;

- pigistamine: pärast kokkusurumist ei säilita see käe kuju.
- mahakukutamisel: kukkumisel puruneb täielikult.

Järeldus: pinnas on liiga kuiv, et seda tõhusalt tihendada.

- optimaalne, siis:
 - välimus: pinnas on vormitav, kuid mitte kleepuv;
 - pigistamine: säilitab pärast kokkusurumist käe kuju;
 - mahakukutamisel: kukkumisel murdub see ainult paariks tükiks.

Järeldus: pinnas on sobiva veesisalduse juures, et seda tõhusalt tihendada.

- liiga märg, siis:
 - välimus: pinnas tundub plastiline ja kleepuv ning jätab sõrmedele niiskuse jälgi;
 - pigistamine: säilitab kindlalt oma kuju.
 - mahakukutamisel: kukkumisel jääb see ühte tükki.

Järeldus: pinnas on liiga märg, et seda tõhusalt tihendada.

Kiireks objektipealseks täpsemaks veesisalduse määramiseks saab kasutada näiteks mikrolaineahjuga kuivatamist, mida nimetatakse standardis EVS-EN ISO 17892-1. Meetodi detailne kirjeldus on antud standardis ASTM D4643, mille kohaselt:

1. koguge esinduslik pinnaseproov ja kaaluge see;
2. asetage pinnas mikrolaineahjukindlasse anumasse, mis on tavaliselt klaasist või keraamikast, et vältida mikrolaineenergiaga segavaid faktoreid;
3. kuumutage proovi mikrolaineahjus madala võimsusega, et vältida pinnase kahjustamist või ülekuumenemist;
4. jälgige proovi hoolikalt ja kaaluge seda perioodiliselt, kuni see saavutab konstantse kaalu (mis näitab, et kogu vaba vesi on eemaldatud);
5. pärast kuivatamist kaalutakse proov uuesti;
6. veesisalduse arvutamiseks võrreldakse märja pinnase kaalu kuiva pinnase kaaluga. Kaalude erinevus näitab vee hulka, mida väljendatakse kuivkaalu protsendina.

Mikrolainekuivatuse meetod on vähem täpne kui tavapärane ahjus kuivatamine ja sobib kõige paremini madala orgaanilise sisaldusega pinnastele. Katse osas tuleb jälgida ülekuumenemise vältimist, mis võib muuta pinnase omadusi, eriti savide või orgaanilise aine sisaldusega pinnaste puhul. Meetod ei pruugi sobida kõrge kipsisisaldusega pinnastele või muudele mineraalidele, mis võivad kuumutamisel vett eraldada.

Keskmise- ja peeneteraliste pinnaste tihendus kvaliteedi mõõtmiseks on kõige sobilikum kasutada kuivmahumasside võrdlust (objektilt võetud kuivmahumass võrreldes maksimaalse kuivmahumassiga). Teiseks sobilikuks meetodiks on plaatkoormuskatse, kus E_{v2} peab vastama projektile ning moodulite suhete osas on sobilik lähtuda järgnevast:

- tihendustegur 0,95: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,7$;
- tihendustegur 0,98: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,5$;
- tihendustegur 1,00: $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,3$.

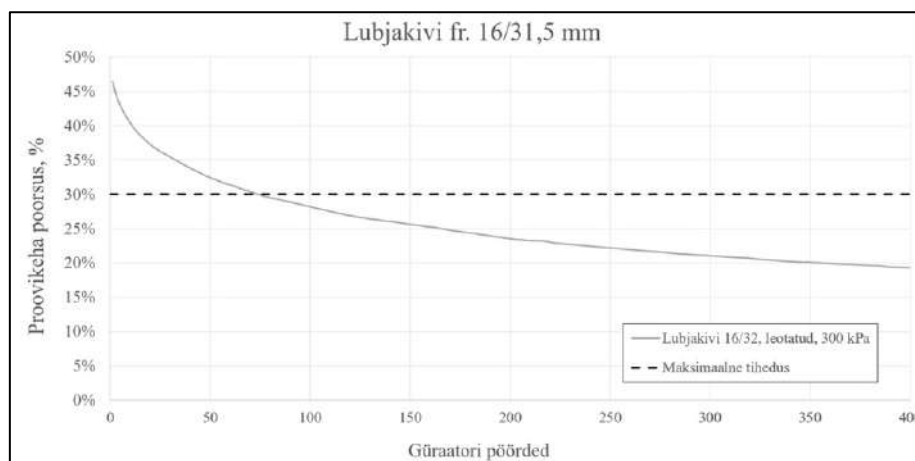
Keskmise- ja peenteralise pinnase korral ei peaks kasutama moodulite suhete suurendamist vastavalt E_{v2} väärtusele, kuna pinnasekihil võib mõõtmise ajal peal olla kuivamiskoorik, mislābi võib tegelik moodulite suhe saada moonutatud.

Kergseadmete kasutamine on võimalik siis, kui tehakse objektile nende kohapealne kalibreerimine.

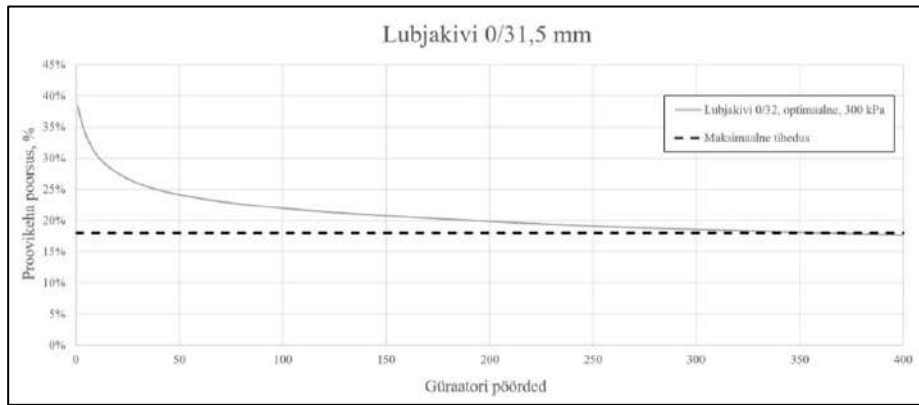
10.3.4 Killustikud

Kāesolev peatūkk käsitleb killustikke ehk tegemist ei ole pinnasega. Kāesolevat peatūkki vōib laiendada ka peatūkis 1.1 nimetatud jāmepinnastele, mis ei ole liivad ning kus peenosisesisaldus enne paigaldust on $\leq 5\%$ (peale tihendamist $\leq 7\%$).

Eesti eripāra seoses killustikega on laialdane ūhtlaseteriste materjalide ehk fraktsioneeritud kivi kasutamine. Fraktsioneeritud kivist valmistatud kiht tiheneb hāsti ja kiiresti, nāiteks joonistel 10.49 ja 10.50 on antud vōrdlus laboritingimustes gūraatortihendajaga saadud tihendamisandmetest fraktsioneeritud (fr 16/31,5 mm) ja pideva terakoostisega segu (fr 0/31,5 mm) osas, millest nāhtub, et esimese puhul vajatakse vaid umbes 60...70 gūraatoripōoret, teise osas aga umbes 350, et saavutada kihi maksimaalne tihedus (mōlemad saadi vertikaalsurve 600 kPa kasutamisel). Katseandmed nāitasid ka seda, et kui fraktsioneeritud killustiku osas tihendamisega jātkata, hakkab see kivi mārkimisvāarselt purustama jōudes terakoostise vaates lōpuks pideva terakoostisega seguni (ehk sarnane, mis on fr 0/31,5 mm).



Joonis 10.49. Fraktsioneeritud killustiku fr 16/31,5 mm maksimaalne tihedus saavutati gūraatortihendajaga umbes 60 kuni 70 pōõrde juures (kasutades 600 kPa vertikaalsurvet).



Joonis 10.50. Killustikusegu fr 0/31,5 mm maksimaalne tihedus saavutati güraortihendajaga umbes 350 pöörde juures (kasutades 600 kPa vertikaalsurvet).

Fraksioneeritud killustikust valmistatud kihi tihendusteguri määramine võib aga olla väljakutse, sest nagu peatükis 10.2.8 selgitati, on materjalil potentsiaal järeltihendamiseks staatilise koormuse all ning seda eriti siis, kui kiht ei ole kiilutud selliste fraksioonidega nagu makadamkattele vajalik ja ei ole viimistletud staatilise koormusega. Eriti suureks probleemiks on fraksioneeritud killustike kasutamine geotekstiilil, kuna killustik hakkab vibrotihendamise käigus geotekstiilil kergelt “põrkuma”, kihis ei ole piisavalt siduvat / segu stabiliseerivat peenemat osist, mistõttu kiht jääb lahtisem. Seetõttu väheneb nii mõõdetav kandevõime kui suureneb moodulite suhe, eriti kui mõõtmisi teostatakse plaatkoormuskatsetega (moodulite suhted fraksioneeritud killustikel kipuvad jääma liiga suureks ka ilma geotekstiili kasutamata).

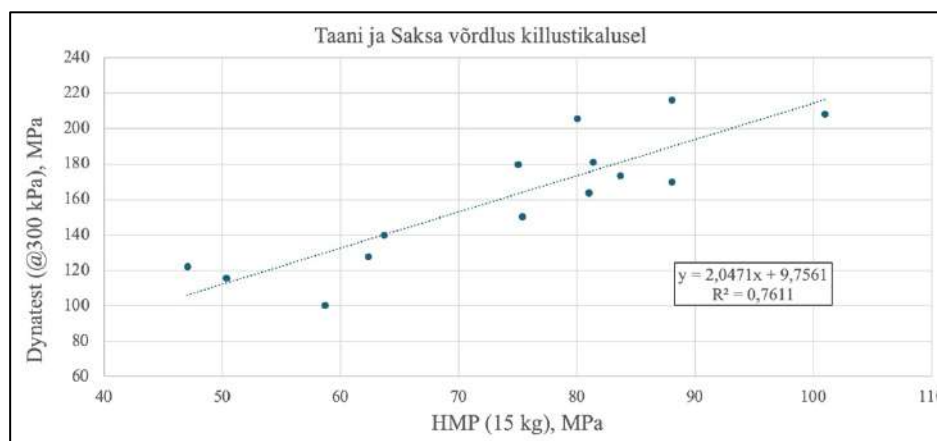
Killustikaluste puhul on (vähemalt alguses suurematel) tee-ehitusobjektidel soovituslik hakata tihendamiskvaliteeti hindama kasutades FWD-seadmeid (või sarnaseid, nagu Heavy Loadman). Eestis on kasutusel Dynatesti poolt toodetud FWD-seade, Soomes kasutatakse eranditult KUABi seadet. Killustikaluste kvaliteedikontrolli mõttes ei ole seadmeid omavahel võrreldud, kuid võrdlust on tehtud nii kruus- kui asfaltkattega teede kandevõimete osas, mida on kajastatud aastal 2019 TalTechi uuringus [18] peatükis 3. Viidatud aruandes anti ülevaade seadmete toimimisest ja nende erisustest ning esitati võrdlusmõõtmiste tulemusi. Aruandes järeldati seadmete omavahelise võrdlusena järgmist: “Nii kirjandusest leiduva info põhjal, varasemalt Eestis kui käesoleva projekti tarbeks tehtud mõõtmiste põhjal saab järeldada, et mõlemad seadmed on kandevõimemõõtmisteks sobilikud, kuid KUAB kipub andma kõrgemaid väärtusi (keskmiselt 5...10% rohkem).”

Sobilikuks lähtekohaks killustikaluste tihendamise kvaliteedikontrolliks võib võtta Soome lähenemise täiendades nõudeid selliselt, et 100% tihendusteguri juures peaks moodulite suhe plaatkoormuskatset kasutades olema $\leq 2,3$, mis tõuseb E_{v2} suurenemisel. Vastavad andmed on esitatud tabelis 10.23.

Tabel 10.23. Killustikaluse tihenduskontrollis kasutatavad moodulite suhted sõltudes E_{v2} või E2 väärtusest. Andmed on koostatud kombineerides omavahel Saksa ja Soome nõudeid ning arvestades sellega, et Eestis on seni valdavalt kasutusel fraktsioneeritud killustikud, kus moodulite suhted on reeglina kõrgemad, kui jätkuva terakoostisega killustikusegudel.

Kandevõime E_{v2} , MPa	Plaatkoormuse E_{v2}/E_{v1}	FWD-seadme E2/E1
< 145	$\leq 2,3$	$\leq 1,9$
145...159	$\leq 2,4$	$\leq 2,0$
160...174	$\leq 2,5$	$\leq 2,1$
175...189	$\leq 2,6$	$\leq 2,2$
190...204	$\leq 2,7$	$\leq 2,3$
205...219	$\leq 2,8$	$\leq 2,4$
220...234	$\leq 2,9$	$\leq 2,5$
≥ 235	$\leq 3,0$	$\leq 2,6$

Kergseadmete kasutamiseks tuleks killustikalustel olla ettevaatlik. Kuigi käesolevas uuringus saadi kergseadmete ning plaatkoormuskatse ja FWD-seadme tulemuste vahel vähemalt rahuldavad seosed, siis suures pildis andmed omavahel hästi ei klapi. Joonisel 10.51 on esitatud käesoleva uuringu andmetele tuginedes seos Taani (300 kPa pingerežiimis) ja Saksa (kasutades 15 kg langevat massi) kergdeflektomeetrite vahel, kus mõõteandmed pärinevad vaid killustikalustelt.



Joonis 10.51. Taani ja Saksa koolkonna kergdeflektomeetrite omavaheline võrdlus killustikalusel.

Kui lähtuda näiteks nõudest, et killustikaluselt on vaja kandevõimeks plaatkoormuse või FWD-seadmega mõõtes 150 MPa, siis peaks Dynatest LWD (300 kPa pingerežiimis) peatükis 10.2.4 esitatud seoseid kasutades näitama minimaalselt vastavalt umbes 105 MPa või 130 MPa ning HMP 15 kg langevat massi kasutades vastavalt umbes 50 või 60 MPa. Saksa seoste kohaselt peaks HMP aga näitama vähemalt 80 MPa. Seega erinevad seosed on siinkohal kaudsed ja nõrgad.

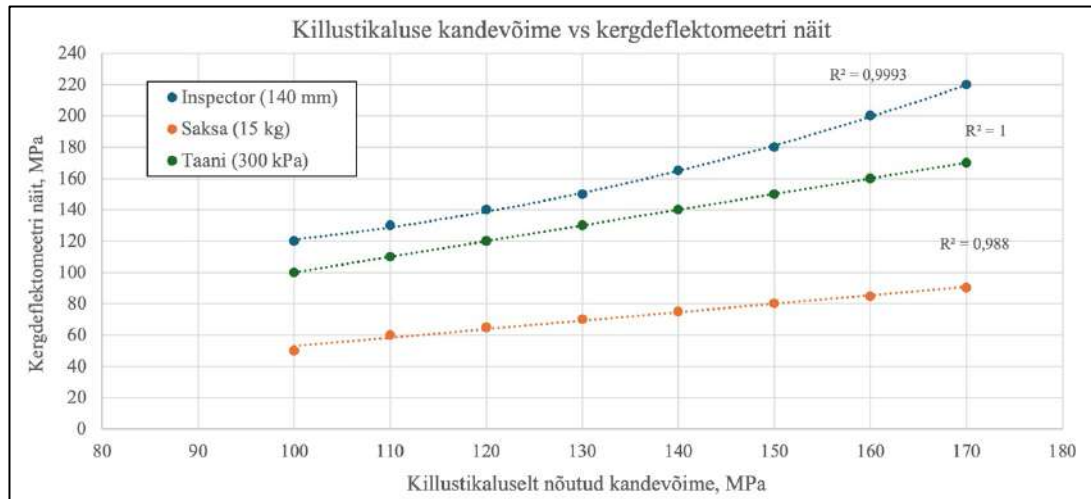
Tuginedes siiski käesoleva uuringu käigus kogutud andmetele võiks killustikaluse kvaliteedikontrolli vaates lähtuda tabelis 10.24 ja joonisel 10.52 esitatust, mis on koostatud kasutades peatükis 10.2.4 olevaid seoseid, peatükis 10.2.9 esitatud taustainfost ning arvestades juurde veel ka Tallinna tüüpkatendite juhust [19], kus on antud E_{v2} ja Dynatest

LWD (pingerežiimis 100 kPa) omavahelised seosed. Antud tabel ja joonis on koostatud lähtudes järgmistest kaalutlustest:

- mida suurem on killustikaluselt nõutud kandevõime, siis kas seda paksem peab killustikukiht olema ja/või selle all peab olema kõrgema kandevõimega kiht;
 - nt kui truubi alla on nõutud paigaldada 20 cm paksune killustikukiht, mis on looduslikust savipinnasest eraldatud geotekstiiliga, ei ole sellelt võimalik nõuda Inspector-seadmega mõõdetavat väärtust ei 120, 140 või 170 MPa. Eeldades loodusliku savipinnase kandevõimeks 30 MPa, saadakse kandevõimeks killustikaluse pealt maksimaalselt 63 MPa (mis on killustikaluse kandevõime katendiarvutusest);
- kuna Inspector-seadmel on talla all väga kõrge kontaktpinge, suurendati selle kasutamisel nõutud elastsusmoodulit mitte lineaarselt, vaid kasutades teise astme polünoomi;
- Saksa koolkonna kergseadme osas lähtuti tabelist 10.15 inter- ja ekstrapoleerides puuduolevad väärtused;
- Taanis koolkonna kergseadme osas leiti, et mõõtes killustikaluselt 100 vs 300 kPa pingega, on nende erinevuseks umbes 1,35x. Seejärel kasutati Tallinna tüüpkatendite juhendis toodud seost ning korrutati väärtused 1,35-ga. Kuna saadud tulemused olid väga lähedased nõutud kandevõime väärtustega, ümardati need vastavateks.

Tabel 10.24. Kergdeflektomeetritega nõutavad väärtused hindamaks killustikaluse tihendatust erineva nõutud kandevõime juures.

Killustikaluselt nõutud E_{v2} kandevõime, MPa (katendiarvutusest)	Kergdeflektomeetriga nõutud kandevõime (MPa) 100% tihendusteguri juures		
	Saksa (@15 kg)	Taani (@300 kPa)	Inspector (140 mm)
170	90	170	220
160	85	160	200
150	80	150	180
140	75	140	165
130	70	130	150
120	65	120	140
110	60	110	130
100	50	100	120



Joonis 10.52. Kergdeflektomeetritega nõutavad väärtused hindamaks killustikaluse tihendatust erineva nõutud kandevõime juures.

10.3.5 Väga jämedateralised pinnased

Käesolev peatükk puudutab Eesti kontekstis nii põlevkiviaherainet kui lubjakivimurdu, kuigi mõõtmisi teostati vaid esimeselt. Katsemõõtmiste põhjal saadud kandevõimed ja moodulite suhted olid väga head, mistõttu võiks aheraine tihenduse kvaliteedikontrollis lähtuda samadest nõuetest, mis Soome InfraRYLi järgi teekatendite jagavalt kihilt, tabel 10.7.

Seoses aheraine suure terakoostisega ei ole kergseadmete kasutamine üldiselt sobilik (sama järelalus ka lubjakivimurru osas).

Lubjakivimurdu käesolevas uuringus katsetada ei olnud võimalik. Taolise pinnase kasutamisel on sobilik lähtuda EVS-EN 16907-5 punkt 8.3.5 „Jämedateraliste materjalide tihendamise kvaliteedi kontrollimise meetodid“:

“Kui eespool kirjeldatud katsete liike ei saa täitematerjali jämedateraliseuse tõttu rahuldavalt kasutada, võib tihendamise kvaliteedi kontrollimiseks kasutada kaudset meetodit, mis põhineb täite pinna deformatsiooni mõõtmisel kindlaks määratud mõõtmispunktidest. Täide loetakse piisavalt tihendatuks, kui iga kihi viimasel ülesõidul ei ületa deformatsioon kindlaks määratud väärtust. Näiteks on piisav tihendus saavutatud, kui iga kihi puhul on kahe viimase ülesõidu järel vajumi erinevus väiksem kui 0,5% kihi paksusest.”

Soome InfraRYLis on antud “*kalliomurske*” ehk kaljumurrust valmistatud väga jämedateralise pinnase osas olenevalt selle paiknemissügavusest konstruktsioonis sarnaselt muudele kihtidele kandevõimest ehk E_{v2} või E2 sõltuvad moodulite suhted. Esmaseks lähtekohaks näib olevat sobilik võtta tabelis 10.10 esitatu.

10.3.6 Geosünteedid

Kui geotekstiil paikneb kuni 40 cm sügavusel mõõdetavast pinnast, võib kvaliteedikontrolliks kasutatavat kandevõimenõuet vähendada kuni 20% võrra. Näiteks, kui nõutud kandevõime killustikaluse peal on 150 MPa, siis plaatkoormus- või FWD-seadmega on sobilik, kui kandevõimeks saavutatakse minimaalselt 120 MPa. Vastavalt sellele tuleb

korrigeerida ka moodulite suhteid. Kergdeflektomeetrite kasutamisel võib antud näite puhul samuti lähtuda eeldusest, et nõutud kandevõime on 120 MPa, misjärel leitakse tabelist 10.24 sellele minimaalne vaste.

Geovõrkude kasutamisel nõutud kandevõimet vähendada ei ole lubatud.

Lisa 2. Algne tabel penetromeetri Beldornii D-51 kasutamiseks

Dünaamilise penetromeetri süvituslöökidele vastav tihedustegur				
Penetromeetri löökide arv	Mulle üle ühe kuu	Värsketel mulletel		
		Peenliiv	Keskliiv	Tolmliiv
5	0.902			
6	0.907			
7	0.912	0.902	0.910	
8	0.928	0.920	0.939	
9	0.932	0.926	0.943	
10	0.937	0.930	0.946	0.907
11	0.942	0.938	0.952	0.918
12	0.946	0.943	0.957	0.922
13	0.950	0.947	0.962	0.928
14	0.954	0.955	0.968	0.931
15	0.958	0.960	0.971	0.940
16	0.961	0.964	0.974	0.944
17	0.964	0.968	0.977	0.950
18	0.967	0.972	0.978	0.953
19	0.970	0.976	0.980	0.960
20	0.972	0.978	0.982	0.964
21	0.975	0.981	0.985	0.970
22	0.976	0.981	0.986	0.974
23	0.978	0.986	0.988	0.976
24	0.980	0.990	0.990	0.980
25	0.981	0.993	0.991	0.981
26	0.983	0.997	0.993	0.984
27	0.985	1.000	0.995	0.986
28	0.986	1.002	0.996	0.990
29	0.988	1.004	0.998	0.994
30	0.989	1.006	0.999	0.996
31	0.992	1.008	1.000	0.998
32	0.993	1.010	1.001	1.000
33	0.994	1.013	1.002	1.002
34	0.995	1.014	1.003	1.004
35	0.996	1.015	1.004	1.006
36	0.998	1.016	1.005	1.008
37	0.999	1.017	1.006	1.010
38	1.000	1.018	1.007	1.011
39	1.001	1.019	1.008	1.012
40	1.002	1.020	1.009	1.013

Lisa 3. Peeter Talviste ekspertarvamus



16. september. 2021.a.

Taivo-Ahti Adamson

Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised
Kinnitatud Maanteeameti peadirektori käskkirjaga nr 264 29.12.2006
Peatükk 2.10. Pinnase tiheduse kontroll – lõik 2.10.3 kuni 2.10.4

EKSPERTARVAMUS

1 Juhendi ekspertiisi objektiks olevate punktide sisu

Juhise ekspertiisi objektiks olevad punktid käsitlevad liivpinnase tihendusteguri K_t määramist Loadmani või Inspektor tüüpi katseseadmega. Väljavõte juhisest:

„2.10.3. Teades liivpinnase kihil Loadmani või Inspektori mõõtmistulemuste alusel arvatud tihedusnäitajat, on võimalik selle alusel arvutada sama liivpinnasekihi tihendustegur K_t kasutades järgmiseid seoseid:

*- Loadmani kasutamisel: $K_t = -0,1537 * T_L + 1,1712$,*

kus:

K_t - tihendustegur

T_L - Loadmani mõõtmistulemuste alusel arvatud tihedusnäitaja

*- Inspektori kasutamisel: $K_t = -0,1264 * T_I + 1,1449$,*

kus:

K_t - tihendustegur

T_I - Inspektori mõõtmistulemuste alusel arvatud tihedusnäitaja“

Sealjuures on:

„Tihedusnäitaja T – Loadmani või Inspektori mõõtmistsükli 3 viimase mõõtmistulemuse (6-s, 7-s ja 8-s) keskmise ($\Sigma E/3$) ja teisena mõõdetud elastsusmooduli ($E(2)$) suhe ($T = \Sigma E/3 / E(2)$)“

„Tihendustegur K_t - pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardsel Proctorteimil.“

2 Juhendi ekspertiisi objektiks olevate punktide 2.10.3 kuni 2.10.4 teaduslik põhjendus

Kõne all olevad punktid on koostatud TTÜ 2005.a. uurimistöö tulemustele tuginedes. Uurimistöö käigus tihendati flotoliiva, kruusast liiva ja Männiku liiva pinnasekastis. Tihendamise eri faasis katsetati pinnaseid Loadmani ja Inspektor seadmega, ning määrati tihedus lõikerõngaga.

Flotoliiva tihendati 1, 2, 3, 4 ja 5 rulli ülesõiduga. Iga ülesõidu järel teostati katsed ja võeti proovid.

Kruusast liiva 1, 2, 3, 4, 5, 10 ja 15 rulli ülesõiduga. Iga ülesõidu järel teostati katsed ja võeti proovid.

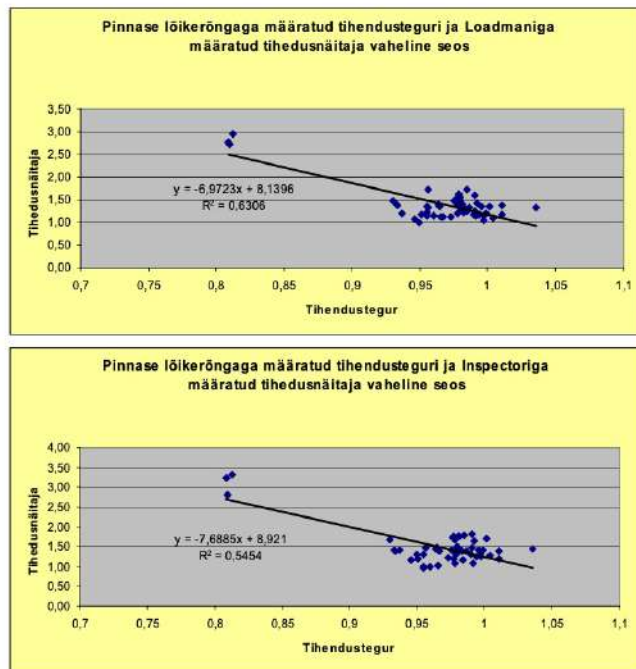
Männiku liiva 1, 2, 3, 4 ja 5 rulli ülesõiduga. Iga ülesõidu järel teostati katsed ja võeti proovid. Lisaks tehti katsed ja võeti proovid tihendata (0 rulli ülesõitu) Männiku liival.

IPT Projektjuhtimine OÜ
Kalda 60A-2, 10922 Tallinn
Tel.: 6 279 220

E-post: ipt@geotehnika.ee
Reg. Nr. 10670486
Fax: 6 279 221

Juhendi aluseks on uurimistöö järgmine järeldus:

„Rahuldava tulemuse annavad seosed Loadmani ja Inspectoriga määratud tihedusnäitajate ja löikerõngaga võetud proovidele määratud tihedustegurite vahel (Loadmaniga $R^2=0,63$, Inspectoriga $R^2=0,54$) (joonis 4.28).

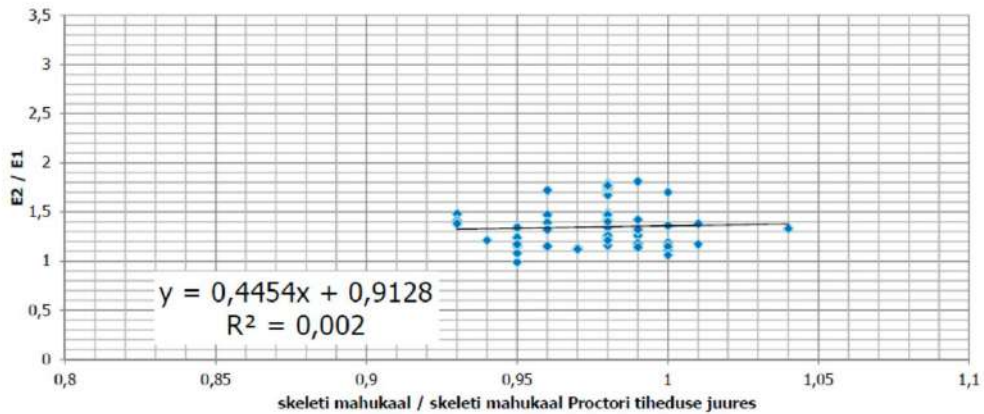


Joonis 4.28 Liivpinnase kihi Loadmani ja Inspectoriga määratud tihedusnäitajate ja löikerõngaga võetud proovidele määratud tihedustegurite vaheline seos.

3 TTÜ 2005.a. teadusuuringu järelduste kriitiline analüüs

TTÜ uuringut juhtinud A. Aaviku käest saadi analüüsi aluseks olnud originaalkatseandmed tabelitena, so. järgnev analüüs tugineb samale katseandmete kogumile, millele tugines TTÜ 2005 uuring.

Esmalt tehti analüüs kuhu kaasati kõik katsed, mis olid tehtud liival mida oli tihendatud vähemalt 1 rulli ülesõiduga – Joonis 1. Selgus, et liival mida oli tihendatud vähemalt 1 rulli ülesõiduga, ei ole seost Inspectoriga määratud tihedusnäitaja ja tihedusteguri vahel ($R^2 = 0,002$).



Joonis 1. Seos Inspektoriga määratud tihedusnäitaja (E2/E1) ja tihendusteguri (skeleti mahukaal/skeleti mahukaal Proctori tiheduse juures) vahel juhul kui tihendamine on toimunud vähemalt 1 rulli ülesõiduga. Seose tugevus $R^2 = 0,002$ tähendab, et seost ei ole.

Edasi lisati analüüsitud andmekogumisse 3 katse tulemused Männiku liivaga täidetud pinnasekastis, mis saadi enne liiva tihendamist (*Joonis 2*). Regressioonanalüüs näitab sarnase tugevusega ja valemiga seost, kui saadi 2005.a. TTÜ uurimistöös.

Kahe andmekogumi analüüsi kõrvutamisel hakkab silma, et:

- seos liiva tihedusnäitaja ja tihendusteguri vahel on kontrollitud tihendamata liiva katsetamisel saadud andmete poolt.
- tihendatud liival puudub seos tihedusnäitaja ja tihendusteguri vahel.
- tihendatud liiva korral ei iseloomusta see uus, tihendamata liiva katsetulemuste poolt kontrollitud sirge punktisarve paremini või täpsemalt kui esialgne sirge – iga üksiku punkti keskmine kaugus valemist iseloomustavast sirgest praktiliselt ei muutu.

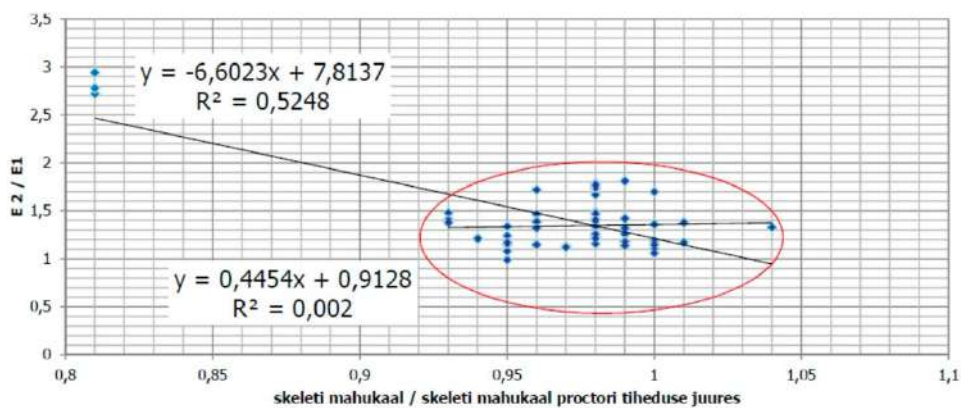
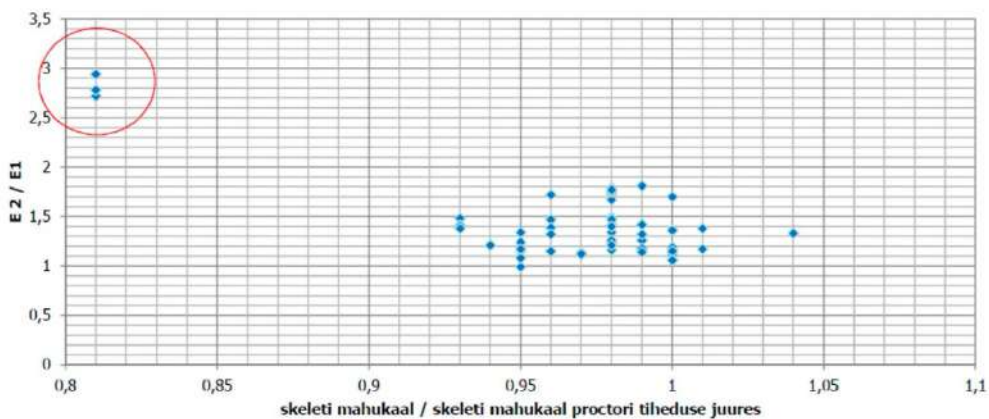
Joonisel 1 toodud tihendatud liiva katsete tulemustele tuginedes tuleb tõdeda, et ei eksisteeri rahuldavat seost tihedusnäitaja ja tihendusteguri vahel.

Näiteks on tihedusnäitaja $E2/E1 = 1,2$ juures reaalselt mõõdetud tihendusteguri K_t väärtused 0,94; 0,95; 0,98; 0,99; 1,00 ja 1,01 ehk $K_t = 0,94..1,01$. Juhendis toodud valem aga annab tihendusteguri K_t väärtuseks: $K_t = -0,1264 * T_t + 1,1449 = -0,1264 * 1,2 + 1,1449 = 0,99$.

Tihedusnäitaja $E2/E1 = 1,7$ juures on reaalselt mõõdetud tihendusteguri K_t väärtused 0,96; 0,98; 0,98 ja 1,00 ehk $K_t = 0,96..1,00$. Juhendis toodud valem aga annab tihedusnäitaja väärtuseks: $K_t = -0,1264 * T_t + 1,1449 = -0,1264 * 1,7 + 1,1449 = 0,93$.

Esimese näite korral on arvatud tihendustegur enamasti suurem, kui katsega määrati (0,99 valemist ja isegi ainult 0,94 määratud). Teise näite korral on arvatud tihendustegur aga oluliselt väiksem, kui ühegi katsega määratud (0,93 valemist ja 0,96...1,00 määratud). Selline katsetulemustele mitte

vastavus kinnitab, et juhise lõige 2.10.3 valemid ei sobi otsitavat seost iseloomustama ja lõige 2.10.4 Tabel 5 on ekslike T väärtustega.



Joonis 2. Analüüsitud kogumisse lisati 3 tihendamata proovi tulemused (ülemine joonis). Alumisel joonisel on esitatud täiendatud kogumi jaoks seos Inspektoriga määratud tihedusnäitaja ($E2/E1$) ja tihendusteguri (skeleti mahukaal/skeleti mahukaal Proctori tiheduse juures) vahel. Seose tugevus $R^2 = 0,525$.

4 Järeldused

1. TTÜ uuringuga andmetel ei võimalda tihendatud liiva katsete tulemused leida rahuldava tugevusega seost tihedusnäitaja ja tihendusteguri vahel.
2. TTÜ uuringu järeldusena toodud valemide katsepunktidel rakendades selgub, et valemiga leitud tihendustegur teatud juhtudel ülehindab tihendustegurit ja teatud juhtudel selgelt alahindab. Põhjuseks on asjaolu, et valemi määravad katsed tihendamata liival.
3. Juhise punktid 2.10.3 ja 2.10.4 tuleb kustutada.

Koostas,



Peeter Talviste
Eesti volitatud ehitusinsener (geotehnika)

Kokkuvõte

Käesolev aruanne on koostatud, et uuendada aastast 2006 pärinevat Transpordiameti Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhendit. Selle lähtekohaks võeti Euroopa standardite seeria EVS-EN 16907, mida tuleb vastavalt tee projekteerimise normidele kasutada mullatööde projekteerimisel. Antud standardiseeria käsitleb lisaks veel erinevate mullatööde tegemist kui ka kvaliteedikontrolli ja pinnaste liigitust.

Käesolevas juhendis antud nõuded tihendamise kvaliteedi hindamiseks lähtuvad valdavalt lõpptoote spetsifikatsioonist vastavalt EVS-EN 16907-1. Nõudeid selle jaoks saadi peamiselt Soome ja Saksa juhenditest, kui ka peatükis 10 kajastatud katsetööde tulemuste analüüsist. Käesoleva töö tulemusel on võimalik põhjalikult uuendada Transpordiameti Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhendit, sh andes uued mõõdetavad väärtused kõikidele Eestis levinud pinnastele ja sideainega sidumata tee-ehitusmaterjalidele. Enne juhendi lõplikku valmimist tuleb siiski käesolevas töös ettepanekuna esitatud uued nõuded läbi arutada ning võimalik, et täiendavate katsetega veel ka katsetada.

Viidatud allikad

1. Bräu, G and Vogt, S. (2020), s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch. Straßenbau Heft S 143, Bundesanstalt für Straßenwesen (https://www.nw-verlag.de/media/nwdownload/S%20143_barrierefrei.pdf)
2. Compaction of Fill Materials. Course Reference Manual. Pennsylvania Department of Transportation. April 2020.
3. Eichfuss, R. (2018). Tee konstruktsiooni kihtide kandevõime ja selle mõõtmine seadmega Dynatest LWD. Tallinna Tehnikülikool.
4. EVS-EN 16907-1: 2018. Mullatööd. Osa 1: Põhimõtted ja üldeeskiri.
5. EVS-EN 16907-2: 2018. Mullatööd. Osa 2: Materjalide klassifitseerimine.
6. EVS-EN 16907-3:2018. Mullatööd. Osa 3: Ehitustegevus.
7. EVS-EN 16907-5: 2018. Mullatööd. Osa 5: Kvaliteedikontroll.
8. EVS-EN ISO 14688-1:2018. Geotehniline uurimine ja katsetamine. Pinnase identifitseerimine ja liigitamine. Osa 1: Identifitseerimine ja kirjeldamine.
9. EVS-EN ISO 14688-2:2018. Geotehniline uurimine ja katsetamine. Pinnase identifitseerimine ja liigitamine. Osa 2: Liigituspõhimõtted.
10. Guide to Soil Compaction. Caterpillar.
11. Hamm Compaction Book.
12. InfraRYL.
13. Jaaniso, V. Pinnasemehaanika inseneridele.
14. Kopti, R. (2019). Geosünteedide mõju katendikihtide kadevõimele ja ettepanekud kvaliteedikontrollinõuete korrigeerimiseks. Tallinna Tehnikaülikool.
15. Majandus ja taristuministri määrus nr 106 (RT I, 07.08.2015, 14).
16. Multiquip Soil Compaction Handbook.
17. Peetris, A. (2017). Geosünteedide mõju kandevõimele ja tihedusele. Tallinna Tehnikakõrgkool.
18. Sillamäe, S. (2019). Madalaklassiliste (kruusateede) remondi/uuendamise meetodika laiendamine katttega teedele. Lõpparuanne. Tallinna Tehnikaülikool.
19. Tallinna Linnavalitsuse 18. septembri 2019 määruse nr 27 LISA 1 "Sillutiskivi, asfalt- ja tsementbetooniga teede ja tänavate tüüpkatendikonstruktsioonide projekteerimisele, rajamisele ja remondile esitatavad nõuded"
20. Talpas-Taltsepp, S. (2024). Eestis kasutusel oleva katendiarvutusmeetodika probleemid ning alternatiivse programmi realiseerimine kasutades Soome meetodikat. Tallinna Tehnikaülikool.

21. Truu, M. (2017). Teadus- ja arendustöö „Mulde kandevõime ja tihendusnõuete kontrollimethodikate arendamine kasutamiseks riigimaanteedel rekonstrueerimisel ja ehitamisel. I osa Riigimaanteedel 2017 teostatud plaatkoormus- katsetuste praktika analüüs ja teiste riikide kogemused plaatkoormuskatse rakendamisel“ AS Teede Tehnokeskus.
22. ZTV A StB 12. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen
23. ZTV E-StB 09. Additional technical conditions of contract and directives for earthworks in road construction. Road and Transportation Research Association Working Group Earthworks and Foundations.
24. Pudotuspainelaitemittaus (PPL-mittaus). TPPT Menetelmäkuvaus. Espoo 2000.
25. Kontson, K, et.al (2024). Pakri poolsaarele rajatava vesisalvest alumiste reservuaaride ehitamise käigus välja kaevandatavate gneisside teedeehituses kasutamise tehnilise teostatavuse ning majandusliku ja sotsiaalmajandusliku mõju hindamine. TalTech.
26. Talviste, P (2022). Eestis kasutatava katendarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring, III etapp. Lõpparuanne. IPT Projektijuhtimine OÜ. Transpordiamet 2022
27. Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ (majandus- ja taristuministri määrus nr 101), redaktsioon 29.11.24.
28. Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised. Maanteeamet 2006.
29. <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/compaction/roller-compactors/> (25.10.24)
30. <https://www.broons.com/product/grid-roller/> (25.10.24)
31. <https://www.geoinstitute.org/node/627> (25.10.24)
32. <https://menardcanada.ca/soil-expert-portfolio/rapid-impact-compaction-2/> (25.10.24)
33. <https://himac.com.au/products/excavator-vibratory-plate-compactor> (25.10.24)
34. https://www.cat.com/en_US/products/new/attachments/compactors/compaction-wheels/15970025.html (25.10.24)
35. <https://jjscheckel.com/product/a02579-new-roller-shell-kit-to-fit-cat-cs54b-cs56b-cs64b-cs66b-cs68b-cs74b-cs76b-cs78b-rollers/> (25.10.24)
36. <https://wagnerequipment.com/heavy-equipment-rental/compactor-rental/> (25.10.24)
37. <https://jjscheckel.com/product/holmes-48-48-padfoot-roller/> (25.10.24)
38. <https://www.ajashy.com/Products/Soil-Compaction/Slope-Compactor-Roller> (25.10.24)
39. <https://talhu.fi/opas/maantivistajan-valinta/> (25.10.24)
40. <https://www.semanticscholar.org/paper/Methods-for-achieving-and-measuring-soil-compaction-Schmidt/2652c91d5ad6d3416989157073fff882794fce55> (25.10.24)