

TEEHOIUTÖÖDE TEHNOLOOGILISED JUHISED

MULDKEHA PINNASTE TIHENDAMISE JA
TIHEDUSE KONTROLLI JUHISED

Kinnitatud Maanteeameti peadirektori
29.12.2006 käskkirjaga nr 264

2006-41



MAANTEEAMET

Tallinn 2006

SISUKORD

		LK
1.	MULDKEHA EHITAMINE	3
2.	PINNASTE TIHENDAMINE	4
2.1.	Üldist	4
2.2.	Tihendusmasinad	5
2.2.1.	Staatilised rullid	5
2.2.2.	Pneumorullid	5
2.2.3.	Tapprullid	6
2.2.4.	Vibrorullid	7
2.2.5.	Seadmed pinnase tihendamiseks kitsastes oludes	9
2.3.	Erinevate pinnasetüüpide tihendusmasinad	11
2.3.1.	Jäme kaljupinnas ja killustik	11
2.3.2.	Kruus ja liiv	11
2.3.3.	Möll ja savi	12
2.3.4.	Looduslik ja stabiliseeritud pinnas	12
2.4.	Tihendusmasina valik	13
2.5.	Jätkuv tiheduse kontroll (Continuous Compaction Control, CCC)	14
2.6.	Pinnase tiheduse määramise meetodid	18
2.7.	Pinnase optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus	23
2.8.	Nõuded tihendatava pinnase niiskusele ja pinnase lõpptihedusele	25
2.9.	Tihendamistehnoloogiad	26
2.10.	Pinnase tiheduse kontroll	30
2.11.	Pinnase tihendamisel tekkivad probleemid ja nende kõrvaldamine	31
	KASUTATUD INFORMATSIOONIALLIKAD	33

MULDKEHA PINNASTE TIHENDAMISE JA TIHEDUSE KONTROLI JUHISED

1. MULDKEHA EHTAMINE

1.1. Muldkeha on tee katendi pinnasalus (muldes või süvendis); muldkeha koosseisu kuuluvad temaga vahetult seotud küvetid, kraavid, reservid, drenaaž.

1.2. Mulle on ümberpaigutatud pinnasest ehitatud muldkeha osa.

1.3. Süvend on muldkeha osa, mis rajatakse pinnasesse kaevamise teel.

1.4. Muldkeha peab tagama teekatendi püsivuse ja liiklusohutuse igal aastaajal. Muldkeha tugevuse ja püsivuse tagavad:

- mulde rajamine püsivatest (kohaleveetavatest) pinnastest;
- muldkeha korralik tihendamine;
- pinnavete hoolikas ärajuhtimine muldkehalt;
- mulde küllaldane kõrgus seisuvee tasemest;
- pinnasevete taseme alandamine süvendites;
- vajaduse korral aluspinnase vahetamine süvendites;
- nõlvade kalde õige valik, kindlustamine ja astmestamine, et vältida nihkeid, uhtumisi ja tuulekannet.

1.5. Muldkeha tüübi valikul tuleb arvestada:

- maantee klassi;
- teekatendi tüüpi;
- mulde kõrgust ja süvendi sügavust;
- muldkeha- ja aluspinnaste omadusi ning ehitustingimusi;
- ehituspaikkonna looduslikke ja insenergeoloogilisi iseärasusi ning
- maanteede ehitamise ja hoiu varasemaid kogemusi.

1.6. Üldised nõuded muldkeha pinnastele:

- Pinnaseid ja tööstusjäätmekatte, mille tugevus muutub kliimatiliste tegurite mõjul vähe, lubatakse muldes kasutada igasuguste piiranguteta.
- Pinnaseid, mille tugevus kliimatiliste tegurite ja koormuste mõjul aja jooksul muutub, võib kasutada piirangutega, kui katsete alusel on see põhjendatud.
- Vajadusel nähakse ebapüsivate pinnaste kaitseks ette meetmed kliimatiliste tegurite mõju eest.
- Aktiivsooni ülemises osas on soovitatav kasutada drenivaid pinnaseid, mille filtratsioonimoodul standardse *Proctorteimi* maksimaaltihedusel on vähemalt 0,5 m ööpäevas.
- Tsementbetoonkatete pinnast vähemalt 1,2 m sügavuseni ja asfaltkatete puhul vähemalt 1 m sügavuseni peab pinnas olema külmaskindel.

1.7. Mulded tuleb rajada kogu muldkeha laiuses horisontaalsetest, ühtlastest pinnasekihtidest. Kihi paksus oleneb tihendamise meetoditest.

1.8. Kiht-kihilt pinnase laotamist teostatakse, kuni mulle saavutab oma projektkõrguse.

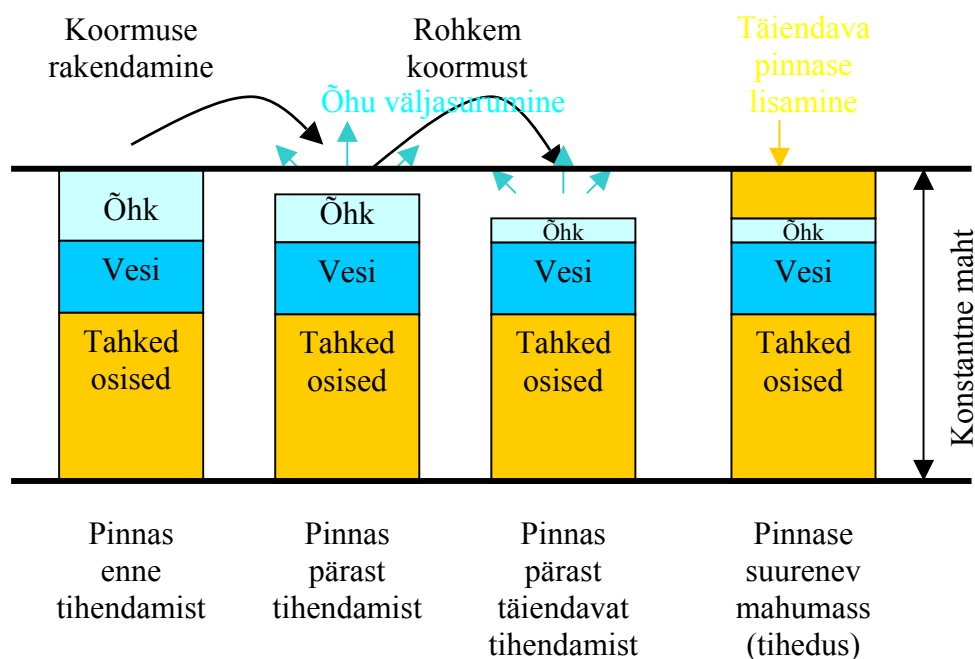
1.9. Erinevate pinnaste korrapäratu puistamine muldesse on keelatud, sest selle tõttu võib mulde keskele moodustuda veekotte ja ülemised kihid võivad lihkuda mööda kallakulisi savikihte.

1.10. Mulde ühtlaseks tihendamiseks peavad pinnast teisaldavad veokid liikuma kogu rajatava mulde laiuses, mille hõlbustamiseks tuleb puistekihte süstemaatiliselt tasandada buldooseri või greideriga.

2. PINNASTE TIHENDAMINE

2.1. Üldist

2.1.1. Tihendamine on pinnase pooride osakaalu vähendamine mehhaaniliselt pinnase konstantse niiskusesisalduse juures (joonis 1).



Joonis 1 Pinnase mahukaalu (tiheduse) suurenemine pinnase tihendamise tulemusena

2.1.2. Tihendamise põhieesmärkideks on:

- pinnase nihketugevuse ja sellega seotult kandevõime tõstmine;
- pinnase jäikuse suurendamine ja sellega seotult võimalike tulevaste püsivate deformatsioonide vähendamine;

- pinnase pooride mahu ja sellega seotult võimaliku tulevase niiskusesisalduse ja külmakerke vähendamine.

2.1.3. Tihendamisel saavutatav pinnase tihedus sõltub paljudest erinevatest mõjuteguritest:

- pinnase olemus ja tüüp, näiteks liiv või savi, terastikuline koostis, plastsus;
- pinnase niiskusesisaldus ja tihendamiseks kulutatud aeg;
- kohalikud tingimused, näiteks ilm, objekti asukoht, tihendatava pinnasekihi paksus;
- tihendamiseks tehtav töö: kasutava seadme tüüp (mass, vibratsioon, korduslööbikute arv).

2.2. Tihendusmasinad

Tihendusmasinad valitakse sõltuvalt tihendatava kihi paksusest ja tihendatava pinnase omadustest. Teedehituses kasutatakse pinnase tihendamiseks tavaliselt rulle, mille tüübid sõltuvad tihendava mehhaanilise jõu pinnasele üle kandmise mehhanismist. Põhilised teedehituses kasutatavad pinnaste tihendusmasina tüübid on:

- staatilised rullid;
- pneumorullid;
- tapprullid;
- vibrorullid;
- muud seadmed tihendamiseks kitsastes oludes.

2.2.1. Staatilised rullid

2.2.1.1. Staatilise silevaltsiga rullid kasutavad pinnasele vertikaalse surve avaldamiseks masina staatilist massi, mille tulemusena pinnaseosakesed surutakse kokku ja väheneb pinnase poorsus. Nõutav tihedus saavutatakse tavaliselt ainult tihendatava kihi ülasas, kuna staatilise tihendamise efektiivne sügavus on piiratud. Seetõttu sobivad staatilised rullid ainult suhteliselt õhukeste pinnasekihtide tihendamiseks.

2.2.1.2. Staatiliste rullide tihendamisvõimet mõjutavad kolm tegurit: teljekoormus, valtsi laius ja läbimõõt ning rullimiskiirus.

2.2.1.3. Staatiliste rullide tihendamisvõime näitajaks on rulli joonkoormus (kg/cm), mis arvutatakse jagades valtsile langeva koormuse (teljekoormuse) valtsi laiusega. Mida suurem on rulli joonkoormus, seda suurem on ka rulli tihendamisvõime. Staatiliste rullide mass varieerub vahemikus 2000-54000 kg rulli laiuse 1 m kohta.

2.2.1.4. Pinnase tüüpidest sobivad staatilise rulliga tihendamiseks praktiliselt kõik sõmerpinnased, välja arvatud ühtlase terastikulise koostisega ja tolmsed liivad.

2.2.1.5. Tavaliselt kasutatakse staatilist rulli koos teiste rullitüüpidega (näiteks pneumo- ja tapprullid), nende poolt tihendatud pinnasekihi pealispinna lõplikuks tihendamiseks.

2.2.2. Pneumorullid

2.2.2.1. 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.

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

2.2.3.5. Ühtlane tihedus 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 allpinnast 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.

2.2.3.6. 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.

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

2.2.3.8. Soovitatav rulli tapi kontaktpinna erisurve on erinevatel pinnastel erinev (tabel 1), sõltudes pinnase kandevõimest, mistõttu lõplik valik tuleb teostada objektil tuginedes proovitihendamisele.

Tabel 1. Soovitatavad optimaalsed arvutuslikud erisurved tapi tugipinnale (kehtivad pinnastele optimaalse niiskuse juures)

Pinnas	Optimaalne erisurve, MPa (kg/cm ²)
Mölline/savine liiv	0,7-1,5 (7-15)
Liivane möll/savi	1,5-4 (15-40)
Savi ja möll	4-6 (40-60)

2.2.3.9. Kui proovitihendamisel rull kerkib kihi pinnale liiga ruttu (näiteks peale kahte kordusläbikut), siis tihendatava kihi alumine osa ei saa tihendatud nõutud tihedusi ja see on indikaatoriks, et rull on liiga kerge või tapi kontaktpind on liiga suur ning rulli massi tuleks suurendada. Kui proovitihendamisel, peale projekteeritud kordusläbikute arvu teostamist, rull ei kerki tihendatava kihi pinnale, siis see on 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.

2.2.3.10. Kuna iseliikuva tapprulli maksimaalne liikumiskiirus on vahemikus 24-32 km/h, siis tekitavad nad kõiki nelja tüüpi tihendusjõude: staatiline koormus, ümberpaigutamine, dünaamiline impulss ja vibratsioon. Selle tulemusena kasvab nende rullide tihendamisvõime ja tootlikkus.

2.2.4. Vibrorullid

2.2.4.1. Vibrorulli valts on analoogne staatilise rulli valtsile, kuid lisaks staatilisele koormusele tekitab valtsis pöörlev ekstsentriline koormus vibratsiooni, mida iseloomustavad sagedus ja amplituud.

Amplituud –vibreeriva valtsi maksimaalne vertikaalne liikumine ühe täistsükli jooksul. Sama valtsi massi ja sageduse juures toodab suurema amplituudiga rull rohkem tihendusenergiat kui rull väiksema amplituudiga.

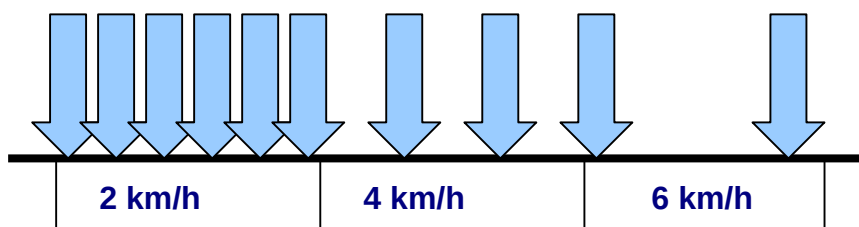
Sagedus – raskuse täistsüklite ehk pöörete arv ümber pöörlemistelje teatud ajaühiku jooksul. Sagedust väljendatakse sageli võnkumiste arvuga minutis. Oluline on seos rulli sageduse ja liikumiskiiruse vahel – soovitatavalt 1 võnge rulli liikumisteedekonna 2,5 cm kohta. Väikese võnkesageduse ja suure rulli kiiruse korral tekib tihendatud pinnale nn „pesulaua“ efekt. Katsed on näidanud, et pinnaste tihendamisel saavutatakse kõige paremaid tulemusi sagedusel 2200-2400 tsüklit minutis

2.2.4.2. Vibrorullid võivad olla sile- või tappvaltsi(de)ga. Silevaltsiga vibrorullid tekitavad kolme tüüpi tihendavat jõudu: staatiline koormus, dünaamiline impulss ja vibratsioon. Tappvaltsiga vibrorullid tekitavad lisaks neile ka ümberpaigutavat jõudu.

2.2.4.3. Vibrorullid on suhteliselt kerged, massiga 270-5000 kg rulli valtsi laiuse kohta.

2.2.4.4. Kõige sobivamad on vibrorullid sõmerate liiv- ja kruuspinnaste tihendamiseks, aga ka raskete savide tihendamiseks. Ühtlase terastikulise koostisega liiva saab efektiivselt tihendada ainult vibrorulliga.

2.2.4.5. Rulli tihendamisvõime sõltub vibro amplituudist, sagedusest ja rulli liikumiskiirusest (joonis 2). Rulli kiiruse kasvades väheneb saavutatav pinnasekihi tihedus sama rulli läbikute arvu juures. Rulli kiiruse sagedane muutmine tekitab ebaühtlaselt tihendatud kihi. Vibrorulli liikumiskiiruseks, mis tagab parima tihendamistulemuse, loetakse vahemikku 3-6 km/h.



Joonis 2 Vibrorulli pinnase tihendamisvõime ehk pinnasele mõjuvate valtsi impulsside arvu sõltuvus rulli liikumiskiirusest

2.2.4.6. Silevalts-vibratorulliga tihendatava kihi paksus sõltub kasutatava rulli massist, kuid üldjuhul ei tohiks tihendatava sõmera materjali kihipaksus olla üle 60 cm.

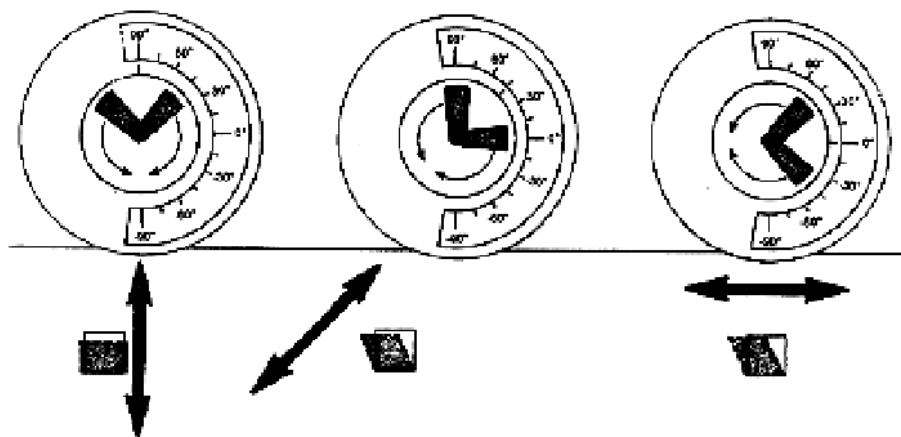
2.2.4.7. Kui tihendatakse küllaltki suurte tükkidega purustatud kaljupinnast, võib tihendatava kihi paksus olla keskmiselt 1,2 m, aga tuleb meele pidada, et sellisel juhul peaks tihendatava kihi paksus olema umbes 30 cm suurem maksimaalsest kivi läbimõõdust.

2.2.4.8. Tappvalts-vibratorulliga tihendatava kihi paksus on tavaliselt vahemikus 30-45 cm.

2.2.4.9. Vibrorulli edasiarenduseks on ostsilleeruv rull. Ostsilleeruva rulli valts võngub väändeliselt. Väändelise liikumise põhjustavad kaks vastupidi pöörlevat ekstsentrilist raskust.

Lisaks vertikaalsele staatilisele koormusele „raputatakse“ pinnast lisaks ka horisontaalselt ja pinnase tihenemine saavutatakse peamiselt valtsi tekitatud nihkelainete tulemusena. Ostsilleeruvaid rulle kasutatakse peamiselt siduspinnaste (ja asfaltsegude) tihendamiseks. Samuti võib ostsilleeruvaid rulle kasutada ka tundlike ehitiste läheduses, kuna nende tekitatud vibratsiooni amplituud ja mõjutsoon on üldjuhul väiksemad, kui tavalisel vibrorullil.

2.2.4.10. VARIO-rull on arendatud BOMAG firma poolt. VARIO-rullis tekitavad kaks vastupidi pöörlevat raskust suunatud vibratsiooni. Need raskused on paigutatud valtsi võllile kontsentriselt. Vibratsiooni suunda saab muuta ergutusüksuse pööramisega, optimeerides tihendusefekti vastavalt tihendatava pinnase tüübile (joonis 3). Kui ergutusüksuse tekitatav vibratsioon on vertikaalne või kallutatud, saab VARIO-rulli võrrelda tavalise vibrorulliga ja kui tekitatav vibratsioon on horisontaalsuunaline, tihendab VARIO-rull pinnast sarnaselt ostsilleeruva rulliga. VARIO- ja ostsilleeruva rulli erinevus on selles, et VARIO-rulli poolt tekitatud pinnase nihkumine on seotud rulli valtsi horisontaalse liikumisega, ostsilleeruva rulli puhul aga tekkivast väändelisest liikumisest.



Joonis 3 VARIO-rulli valtsi muudetav ergutussuund ja tihendusefekt [9]

VARIO-rull sobib nii dünaamilise survega kui ka dünaamilise nihkega ja nende kombinatsiooniga pinnaste tihendamiseks. VARIO-rullid sobivad seega enamale pinnasetüüpidele, kui tavalised vibro- ja ostsilleeruvad rullid, ja optimaalne vibratsiooni suuna saab määrata lähtudes konkreetsetest objekti tingimustest.

2.2.5. Seadmed pinnase tihendamiseks kitsastes oludes

2.2.5.1. Käsirammi sobib kasutada igat tüüpi pinnaste tihendamiseks. Plahvatused sisepõlemismootoris põhjustavad seadme hüppe ülesse. Seadme langedes tagasi pinnasele põhjustab alusplaadi poolt üle kantav dünaamiline löök pinnase tihenemise. Tavaliselt kaaluvad sellised käsirammid umbes 100 kg (ka raskemaid seadmeid on saadaval).

2.2.5.2. Vibroplaadiga on võimalik saavutada liivade ja kruusade suurt kuiva mahumassi ehk tihedust ja sobivad suurepäraselt kasutamiseks kitsastes oludes, kus suuremate seadmete kasutamine pinnase tihendamiseks on võimatu.

2.2.5.3. Tihendusrattad (joonis 4) kindlustavad, et süvendi tihendamine teostatakse kiiremini ja efektiivsemalt, kui vibroseadmetega, säästes nii masinat kui ka operaatorit.

Tihendusrattad tihendavad pinnast kihi põhjast ülespoole (sarnaselt tapprullidega), purustades klompunud pinnasetükke ja täites tühimikke, vältides sellega nn. sillaefekti tekkimist ja tühikuid.



Joonis 4 Tihendusrattad

Tihendamisratta kasutamisel on võimalik tihendada korraga paksemaid kihte, kui vibroplaadiga tihendamisel. Tihendatava kihi paksus võib olla 30-60 cm väikese ratastraktori taha kinnitatud tihendamisrattaga ja 45-90 cm ekskavaatori tööorgani otsa kinnitatud tihendusrattaga.

2.2.5.4. Kitsaste süvendite ja täidete tihendamiseks on välja töötatud spetsiaalsed tranšeerullid (trench rollers), laiusel umbes 0,8-1,0 m, millede töö- ja kasutamispõhimõte on sarnane tavalistele tappvaltsiga (vibro-)rullidele (joonis 5). Sellised rullid on ideaalselt kasutatavad raskete siduspinnaste ja savide tihendamiseks. Vajadusel on võimalik rulli juhtimiseks kasutada kaugjuhtimispulti.



Joonis 5 Sävendi- e tranšeerullid

2.2.5.5. Nn „jaluta järel“ rullid on arendatud kergliiklusteede, peenarde, lappimiste, tagasitaidete jmt liiv- ja kruusaluste tihendamiseks ja nende kasutus- ning tööpõhimõte on sarnane silevalts-vibrorullidele.

2.3. Erinevate pinnasetüüpide tihendusmasinad

2.3.1. Jäme kaljupinnas ja killustik

2.3.1.1. Jämedast kaljupinnasest muldkehal tuleb suhteliselt tihe ja tasane pind valmistatakse ette enne tihendamist.

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

2.3.1.3. Killustiku tihendamine toimub peale selle laotamist silevaltsrulliga (staatiline või vibro) või pneumorulliga.

2.3.2. Kruus ja liiv

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

2.3.2.2. Kruus ja liiv, mis sisaldavad vähem kui 10% peenosist (st on hästi drenivad), on lihtsalt tihendatavad, eriti siis, kui on veega küllastunud. Kui trassi läheduses on veekogusid, siis on mitteridusaid 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.

2.3.2.3. Ühtlase terastikuga liiva saab efektiivselt tihendada ainult vibreerimisega.

2.3.3. Möll ja savi

2.3.3.1. Möll on mitteplastne peenos, mida tavaliselt tihendatakse silevalts-vibrorulliga.

2.3.3.2. Parima tihendustulemuse saavutamiseks ei tohiks mölli niiskusesisaldus suuresti erineda tema optimaalsest niiskusesisaldusest. Kui möllile lisada liiga palju vett, võib ta kiiresti saavutada vedela oleku ja tema tihendamine osutub võimatuks.

2.3.3.3. Möllised pinnased, mis samuti sisaldavad savi, võivad olla märkimisväärselt seotud ja nende tihendamisel annavad parima tulemuse (vibro-)tapp- või pneumorullid.

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

2.3.4. Looduslik ja stabiliseeritud pinnas

2.3.4.1. Mitteseotud sõmerpinnased klassifitseeritakse üldiselt nagu aluse materjalid, mille tihendamiseks kasutatakse tavaliselt (vibro-)silevaltsrulli või pneumorulli.

2.3.4.2. Looduslike pinnaste töötlemine teatud lisanditega (näiteks hüdrauliliste sideainetega) võib märkimisväärselt parandada pinnase stabiilsust ja kandevõimet. Seda protsessi nimetatakse pinnase stabiliseerimiseks.

2.3.4.3. Peale lisandite segamist pinnasega ehk peale stabiliseerimist tuleb ta tihendada. Kasutatava tihendamismasina tüüp sõltub pinnase algomadustest enne stabiliseerimist.

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		Tihendatavus - sõltub terastikulisest koostisest - ületihendamine on ebasoovitav		Tihendatavus - kihi paksus peab olema 3 korda paksem kui max teraläbimõõt - vajab suurt tihendavat energiat	
Tihendusseadmed Peamiselt - rasked ja keskmised ühevaltsilised (sile- ja tappvaltsiga) rullid - tranšeetihendajad ja rasked plaadid		Tihendusseadmed - vibrotandemrullid ja ühe valt-silised (silevalts) vibrorullid - rasked ja keskmised plaadid		Tihendusseadmed Peamiselt - rasked ühevaltsilised rullid - rasked plaadid	

Joonis 6 Pinnaste tihendatavus ja tihendamisseadmed

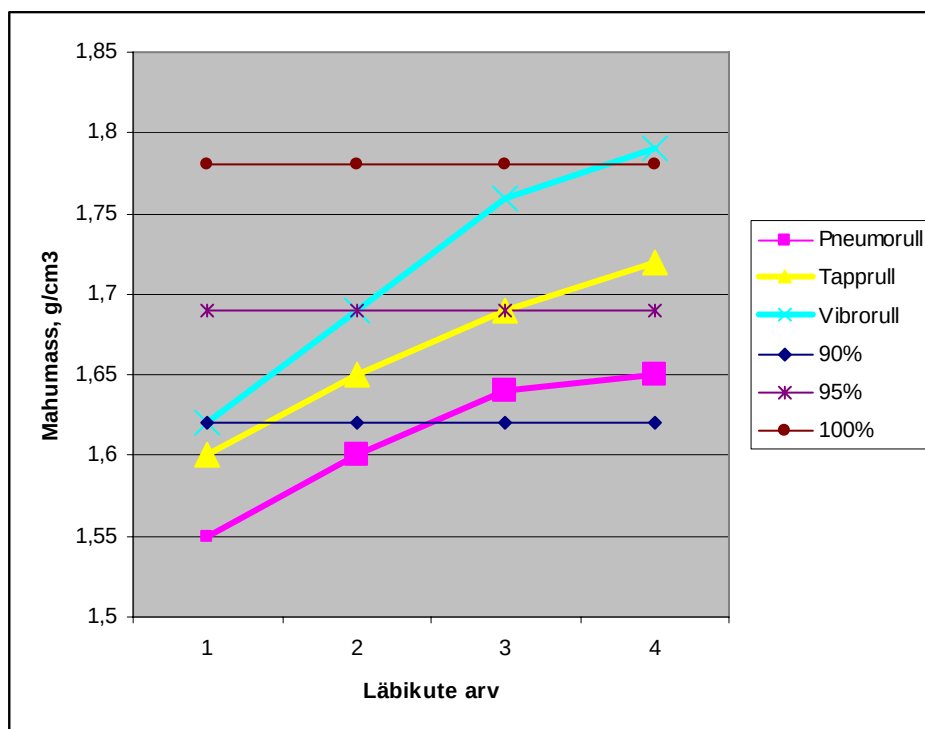
2.4. Tihendusmasina valik

2.4.1. Tavaliselt sobib konkreetsel objektil esinevate pinnasetüüpide tihendamiseks rohkem kui üks rullitüüp. Rullitüübi valikuks tuleb kasutada järgmiseid kriteeriume:

- rulli olemasolu;
- tihendamise efektiivsus.

2.4.2. Tavaliselt kasutab ettevõtja juba olemasolevaid rulle. Suurte projektide puhul, kui olemasolevatest rullidest ei piisa või ettevõtja ei oma vastavat rulli, võib osutada vajalikuks rulli(de) laenutamine/liisimine teiselt ettevõtjalt või teenuse pakkujalt.

2.4.3. Tihendamise efektiivsuse määramine seisneb rulli läbikute arvu määramises igale rulli tüübile pinnase nõutava tiheduse ehk kuiva mahumassi saavutamiseks. Kõige efektiivsema rulli valik tuleks teostada katselõigul, mis asetseb objektil, seal esinevate pinnaste proovitihendamisega. Rullitüüpide (näiteks vibro-, tapp- ja pneumorulli) tihendamisvõime saab esitada võrdlevalt graafikul (joonis 7).



Joonis 7 Proovitihendamise andmete kasutamine rulli efektiivsuse määramiseks

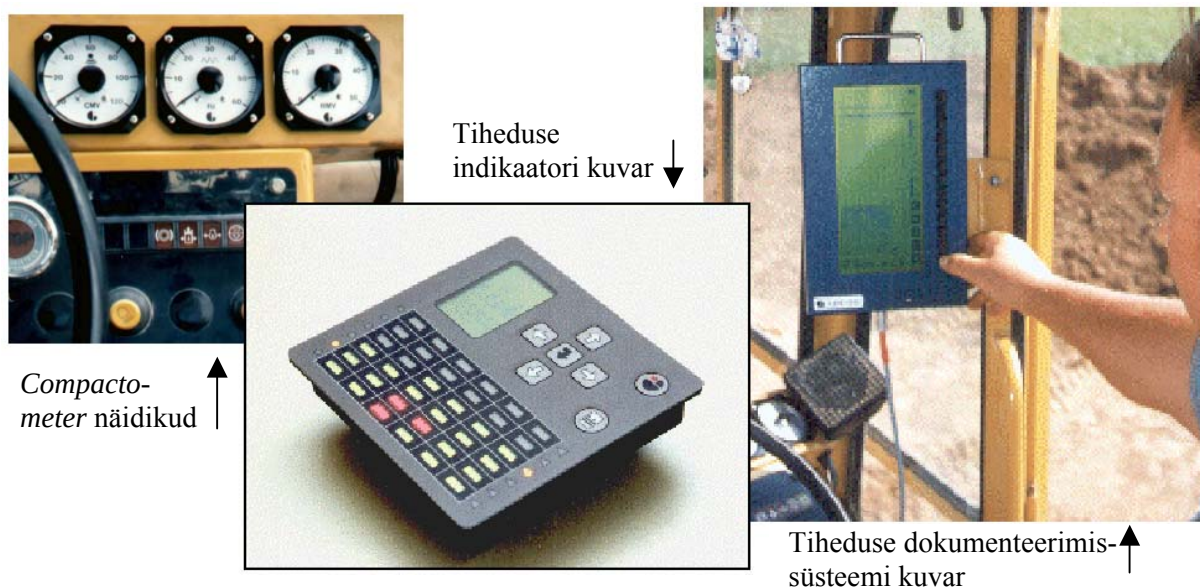
Antud juhul on soovitavaks mahumassiks $1,69\text{--}1,78\text{ g/cm}^3$ ehk tihendustegur vahemikus $0,95\text{--}1,0$. Vibrorull on ainuke, millega on võimalik nõutav tihedus saavutada kolme läbikuga. Samuti tapproll saavutas kolme läbikuga nõutava tiheduse ($1,69\text{ g/cm}^3$), kuid see on täpselt nõutava tiheduse alumine piir ja iga kõrvalekalle tihendatava pinnase omadustes võib põhjustada tegeliku saavutatava tiheduse languse alla nõutava tiheduse. Pneumorull oli antud näite puhul kõige vähem efektiivne ja ei tihendanud pinnast nõutava tiheduseni.

2.4.4. Peale rullitüübi valikut tuleb määrata optimaalsed tihendatava kihi paksused. Jällegi on parimaks ja kõige kindlamaks viisiks teostada optimaalse tihendatava kihipaksuse valikuks proovitihendamised katselõigul konkreetse objekti tingimustes.

2.4.5. Rulli tüübi ja massi ning optimaalse tihendatava kihipaksuse valikuks on koostatud mitmete autorite poolt erinevaid tabeleid. Käesolevas juhendis on toodud neist üks (tabel 2), kuid tuleb märkida, et tabelist valitavad optimaalsed kihipaksused on ainult orienteeruvad, erinevad tekstis toodud väärtustest ja igal konkreetsel juhul tuleks ikkagi teostada proovitihendamine ja määrata selle käigus konkreetse tihendatava pinnase optimaalne kihipaksus tihendamisel konkreetse, kindlate parameetritega, olemasoleva rulliga.

2.5. Pidev tiheduse kontroll

2.5.1. Pidev tiheduse kontroll, PTK (Continuous Compaction Control, CCC) tugineb tihedusemõõtja kasutamisele, milleks on *compactometer*, ostsillomeeter või nendega võrreldav tihedusemõõtja. Tihedusemõõtja väärtus salvestatakse ja kuvatakse LCD-ekraanil. Ekraanil saab rullijuht jälgida rulli asukohta tihendataval alal, samuti rulli kiirust ja valtsi vibratsiooni/ostsillatsiooni sagedust. Lisaks graafilisele kujutisele kuvatakse tihendamistulemused ka numbriliste väärtustena iga üksiku läbiku korra ja paralleelriba kohta. Sõltumata tulemuste esitamise vahenditest (joonis 8) on rullijuhil võimalik lugeda tihedusemõõtja väärtuseid.



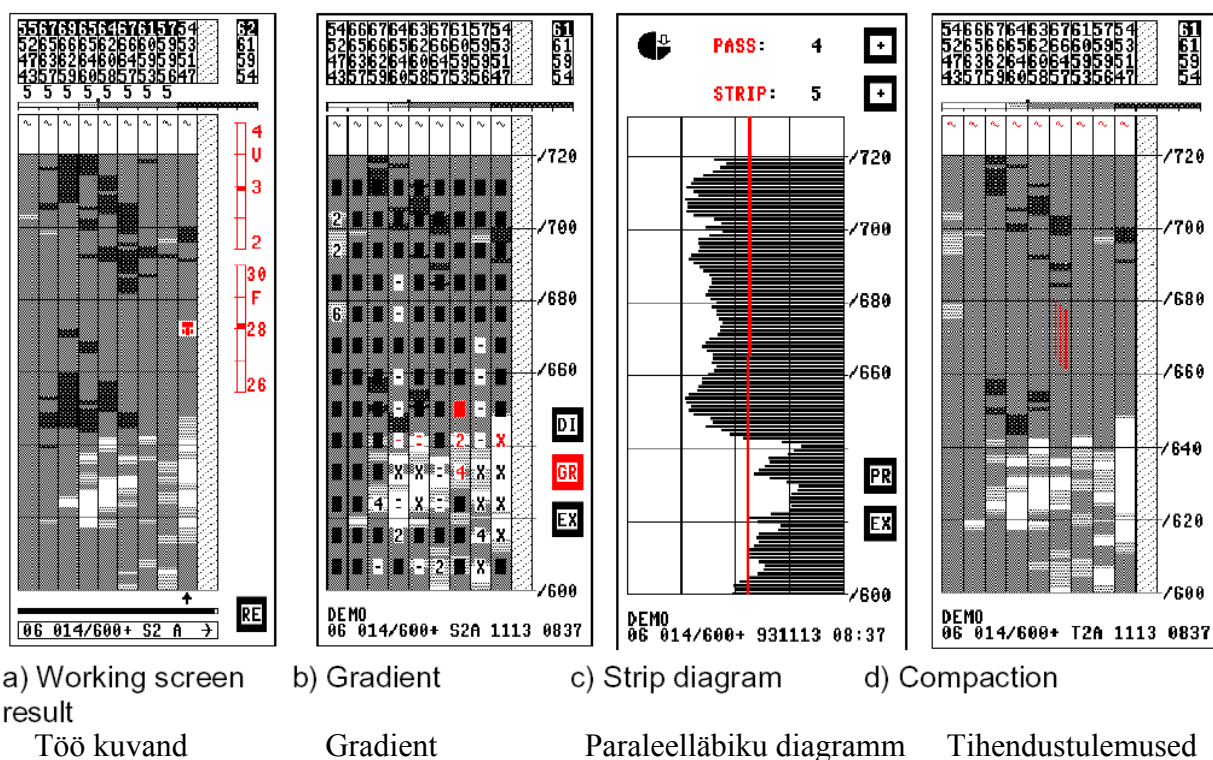
Joonis 8 Erinevad vahendid tihendustulemuste kuvamiseks rullijuhile [13]

2.5.2. Kaasaegseimaks pidevaks tihendustulemuste kuvamise vahendiks on tiheduse dokumenteerimissüsteem, mis vahendab rullijuhile kogu olulise ja vajaliku informatsiooni tihendustöö optimaalseimaks teostamiseks (joonis 9).

Tabel 2. Tihendamisinõuded mullatöödel

D – tihendatud kihi maksimaalne paksus, mm
N – minimaalne läbikute arv

Tihendus- masina tüüp	Kategooria	Sidusad pinnased		Pideva sõelkõveraga sõmer- ja kuivad siduspinnased		Ühtlase terastikulise koostisega materjal	
	<i>Mass 1 m rulli laiuse kohta</i>	D	N	D	N	D	N
Silevalts- rull	Üle 2100 kg kuni 2700 kg	125	8	125	10	125	10
	Üle 2700 kg kuni 5400 kg	125	6	125	8	125	8
	Üle 5400 kg	150	4	150	8	Mitte sobiv	
Võrkrull	Üle 2700 kg kuni 5400 kg	150	10	Mitte sobiv		150	10
	Üle 5400 kg kuni 8000 kg	150	8	125	12	Mitte sobiv	
	Üle 8000 kg	150	4	150	12	Mitte sobiv	
Tapprull	Üle 4000 kg	225	4	150	12	250	4
	<i>Mass ratta kohta</i>						
Pneumo- rull	Üle 1000 kg kuni 1500 kg	125	6	Mitte sobiv		150	10
	Üle 1500 kg kuni 2000 kg	150	5	Mitte sobiv		Mitte sobiv	
	Üle 2000 kg kuni 2500 kg	175	4	125	12	Mitte sobiv	
	Üle 2500 kg kuni 4000 kg	225	4	125	10	Mitte sobiv	
	Üle 4000 kg kuni 6000 kg	300	4	125	10	Mitte sobiv	
	Üle 6000 kg kuni 8000 kg	350	4	150	8	Mitte sobiv	
	Üle 8000 kg kuni 12000 kg	400	4	150	8	Mitte sobiv	
	Üle 12000 kg	450	4	175	6	Mitte sobiv	
	<i>Mass 1 m vibrorulli laiuse kohta</i>						
Vibrorull	Üle 270 kg kuni 450 kg	Mitte sobiv		75	16	150	16
	Üle 450 kg kuni 700 kg	Mitte sobiv		75	12	150	12
	Üle 700 kg kuni 1300 kg	100	12	125	12	150	8
	Üle 1300 kg kuni 1800 kg	125	8	150	8	200	10
	Üle 1800 kg kuni 2300 kg	150	4	150	4	225	12
	Üle 2300 kg kuni 2900 kg	175	4	175	4	250	10
	Üle 2900 kg kuni 3800 kg	200	4	200	4	275	8
	Üle 3800 kg kuni 4300 kg	225	4	225	4	300	8
	Üle 4300 kg kuni 5000 kg	250	4	250	4	300	8
	Üle 5000 kg	275	4	275	4	300	4
	<i>Mass alusplaadi pinnaühikule</i>						
Vibro- plaat- tihendi	Üle 880 kg kuni 1100 kg	Mitte sobiv		Mitte sobiv		75	8
	Üle 1100 kg kuni 1200 kg	Mitte sobiv		75	10	100	8
	Üle 1200 kg kuni 1400 kg	Mitte sobiv		75	5	150	8
	Üle 1400 kg kuni 1800 kg	100	8	125	5	150	4
	Üle 1800 kg kuni 2100 kg	150	8	150	5	200	4
	Üle 2100 kg	200	6	200	5	250	4
	<i>Mass</i>						
Vibro- tampur	Üle 50 kg kuni 65 kg	100	3	100	3	150	3
	Üle 65 kg kuni 75 kg	125	3	125	3	200	3
	Üle 75 kg	200	3	150	3	225	3
	<i>Mass</i>						
Ramm	100 kg kuni 500 kg	150	4	150	6	Mitte sobiv	
	Üle 500 kg	275	8	275	12	Mitte sobiv	
	<i>Rammi mass üle 500 kg, langemiskõrgus</i>						
Tamp- masin	Üle 1 m kuni 2 m	600	4	600	8	450	8
	Üle 2 m	600	2	600	4	Mitte sobiv	



Joonis 9 Kuvaril kuvatav informatsioon rullijuhile

„Töö kuvandil“ (a) saab rullijuht jälgida rulli liikumiskiirust, võnkesagedust ja rulli asukohta tihendataval alal (rulli sümboli kujul). „Gradiendi“ kuvand (b) jagab tihendatava ala graafilise kujundi riskülikuteks, mis iseloomustavad seda, kas tihendustöö on lõppenud (must riskülik) või täiendavate vajalike korduslähikute arv ette antud CMV väärtuse saavutamiseks või pinnas antud riskülikualal ei ole tihendatav (X või -) või üle tihendatud (=). „Paraleelläbiku diagramm“ (c) näitab valitud paralleelläbiku ja valitud korduslähiku CMV väärtusi, võimaldades määratleda nõrga või veega küllastatud materjaliga piirkondi. „Tihendustulemuste“ kuvand (d) kuvab lõpliku CMV jaotuse graafiliselt ja ka CMV keskmised numbrilised väärtused igale paralleel- ja korduslähikule. Lisaks registreeritakse tavalisest erinevad liikumiskiirused, võnkesagedused ja topelthüppe olukorrad.

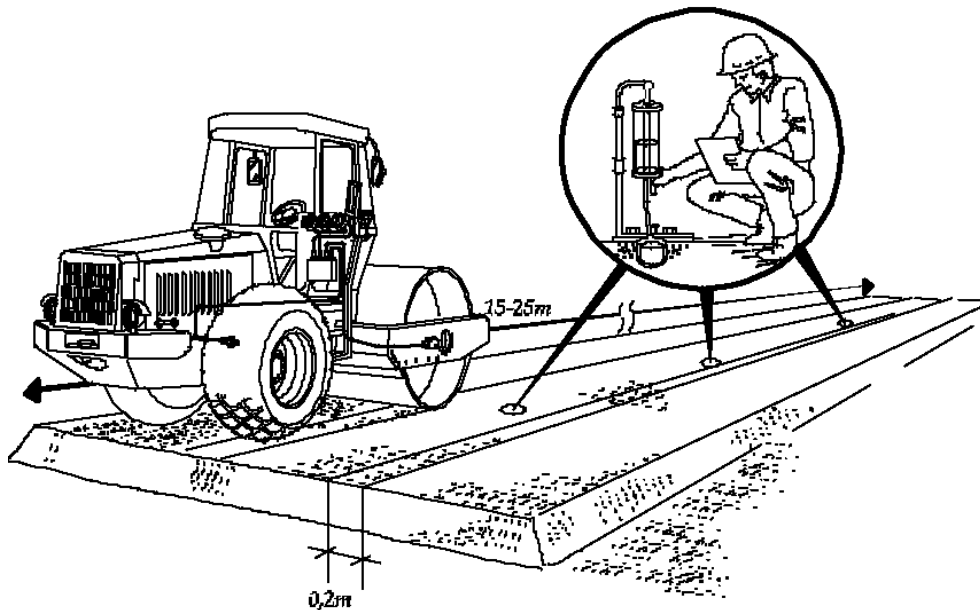
2.5.3. Pidevas tiheduse kontrollis tuleb näha mitte ainult tihendamistulemuste dokumenteerimise vahendit, vaid pidev tiheduse kontroll aitab korraldada tihendamisprotsessi nii, et saavutataks ühtlane tihendamistulemus minimaalse ajakuluga. Homogeensus tähendab üle- ja alatihendatud alade miinimumi ja sellega ka tulevaste remondi- ja hoolduskulude vähendamist, võttes arvesse ka remondist tingitud teekasutaja kulude ja keskkonnasaaste kasvu.

2.5.4. Kalibreerimine

2.5.4.1. CMV (Compaction Meter Value) väärtuse kalibreerimiseks vastavalt tihendatava ala tingimustele tuleb valida katseala umbes 20 m pikk ja 6 m lai (joonis 10). Valitud ala pinnase omadused (tüüp, elastsusmoodul, kihi paksus) peavad vastama tihendatava ala pinnase

omadustele. Kui tihendatava ala pinnased varieeruvad suuresti, on soovitatav teostada eraldi kalibreerimised erinevatele tihendatavatele pinnasetüüpidele.

2.5.4.2. Võrreldavate tingimuste saamiseks tuleb alus ehk kiht, millele laotatakse kõik järgnevad kihid olema hästi tihendatud ja see tihendamine samuti dokumenteeritud. Kui aluse kandevõime on suuresti paikkonniti vahelduv, on soovitatav algul laotada sellele paks kiht homogeenset materjali ja see tihendada. Seejärel laotatakse sellele kihile kalibreeritava pinnase ette nähtud paksusega kiht.



Joonis 10 Kalibreerimisala

2.5.4.3. Kalibreerimine peab toimuma vastavalt konkreetse ehitusobjekti projektis esitatud nõuetele.

2.5.4.4. Järgnevalt on esitatud üldine kalibreerimisprotseduur:

- Tihenda materjal 3 paralleelläbikuga umbes 20 cm ülekattega (umbes 10% valtsi laiuselt) väikese valtsi amplituudiga. Iga läbik tuleb tihendada nii, et vibro on sisse lülitatud rulli eespidisel liikumisel ja välja lülitatud tagurpidi liikumisel. On oluline, et rulli kiirus ja võnkesagedus hoitakse konstantsena.
- Registreeri keskmise paralleelläbiku CMV väärtused kasutades kas *compactometer*'iga ühendatud printerit või dokumenteerimissüsteemi.
- Teosta kontrollmõõtmised vähemalt kolmes keskmise paralleelläbiku punktis (veeballoon, radiomeetriline mõõtmine, FWD vmt.).
- Kokku tuleb teostada umbes 8-10 kordusläbikut. Kui topelthüppe olukord tekib, vaatamata väikesele amplituudile, enne 10-ndat kordusläbikut, tuleb tihendamine katkestada. Kui on kahtlus, et topelthüppe olukord võib tekkida, on soovitatav jätkata tihendamist kuni topelthüppe tekkimiseni ja seejärel dokumenteerida olukord, mille juures topelthüpe tekkis.
- Saadud tulemuste (CMV väärtus ja tihedus, tihendusaste või E-moodul) alusel koostatakse vastastikust sõltuvust iseloomustav graafik. Vastavad näitajad määratakse igale kordusläbikule.

2.5.4.5. Erinevate maade kalibreerimistulemuste võrdlus on näidanud, et CMV väärtus korreleerub kõige paremini plaatkoormusseadme abil määratud elastsusmooduliga.

2.5.4.6. Kalibreerimisgraafikult valitakse teatud piirväärtusele (näiteks tihendustegur 0,98 või E-moodul 60 MPa) vastav CMV väärtus, mida siis rullijuht kasutab tihendamise lõpetamise või täiendava tihendamisevajaduse otsuse tegemisel. See CMV piirväärtus kehtib ainult sellel rulli kiirusel, võnkesagedusel ja –amplituudil ning selle pinnase juures, mida kasutati kalibreerimisel.

2.5.5. Kokkuvõtteks: kaasaegsed nõuded efektiivsele tihendustööle ja homogeensele tihendustulemusele ei ole saavutatavad konstantse rulli korduslähikute arvuga, konstantsete rulli parameetritega ja tiheduse lokaalse kontrolliga. Tänapäeval vajab ettevõtja pidevat tiheduse kontrolli (PTK), et täita tihendamise efektiivsuse ja homogeensuse kasvanud nõudeid.

2.6. Pinnase tiheduse määramise meetodid

Eksisteerib kuus põhilist pinnase tiheduse lokaalse määramise meetodit:

- Liivakoonuse meetod – täpne, kasutatakse radioaktiivse isotoobiga tihedusmõõtjate kalibreerimiseks, ebatäpne poorsetes pinnastes;
- Kummiballooni meetod – ei ole laialdaselt kasutusel, kuid täpne, sarnane liivakoonuse meetodile;
- Radioaktiivse isotoobiga tihedusmõõtja – võib tekkida probleeme killustiku, karbonaatsete materjalide ja süvendite puhul;
- Penetratsiooni meetod – kasutusel Eestis, sobib liivpinnastele;
- Lõikerõngas või –silinder – ei sobi jämedateralistele materjalidele;
- Dünaamilise koormamise meetod.

2.6.1. Liivakoonuse meetod

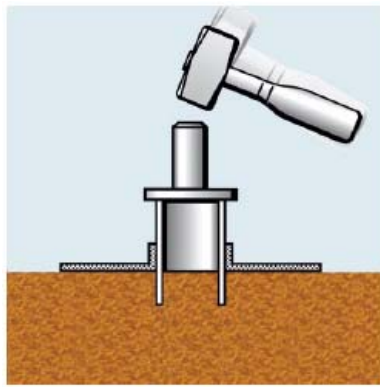
Pinnase tiheduse määramisel liivakoonuse meetodil:

- Määratakse mahuti, koonuse ja mahutit täitva liiva mass (W_1).
- Tihendatud pinnasekihti kaevatakse väike süvend.
- Süvendist kaevatud niiskele pinnasele määratakse mass (W_2) ja niiskusesisaldus (w_c , %).
- Arvutatakse süvendist kaevatud pinnase kuiv mass (W_3):

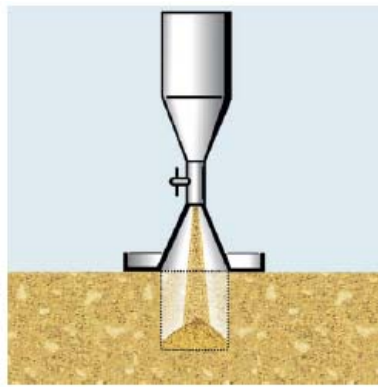
$$W_3 = W_2 / (1 + w_c(\%)/100) \quad (1)$$

- Peale süvendi kaevamist asetatakse liivaga täidetud mahuti süvendi kohale ja lastakse liival voolata süvendisse ja koonusesse.
- Seejärel määratakse mahuti, koonuse ja mahutisse jäänud liiva mass (W_4).
- Arvutatakse süvendi ja koonuse täitmiseks kulunud liiva mass (W_5):

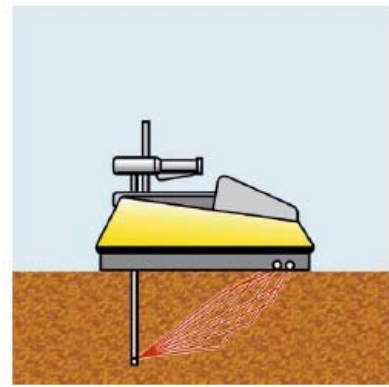
$$W_5 = W_1 - W_4 \quad (2)$$



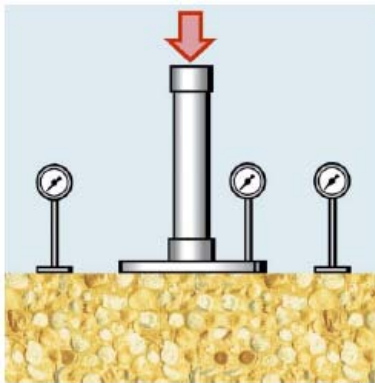
Lõikerõngas



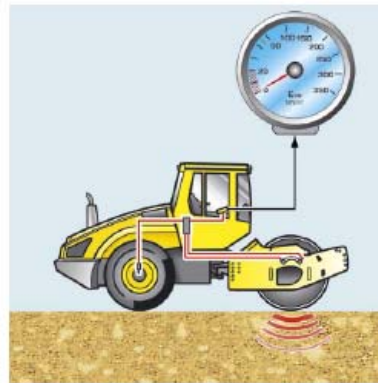
Liivakoonus



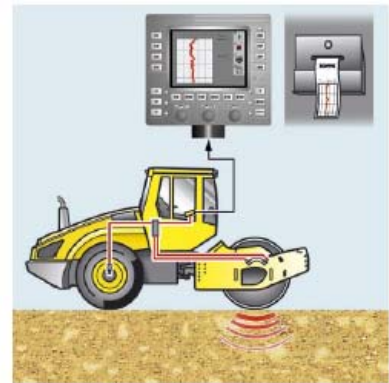
Radioaktiivne isotoop



Koormamine (staatiline või dünaamiline)



Pidev tihedus jälgimine



Pidev tiheduse dokumenteerimine

Joonis 11 Pinnaste tiheduse määramise meetodid

- Kaevatud süvendi maht (V) arvutatakse:

$$V = (W_5 - W_c) / \gamma_{d(sand)} \quad (3)$$

W_c = ainult koonuse täitmiseks kulunud liiva mass

$\gamma_{d(sand)}$ = kasutatud liiva kuiv mahumass

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

- Tihendatud pinnase kuiva mahumassi saab arvutada:

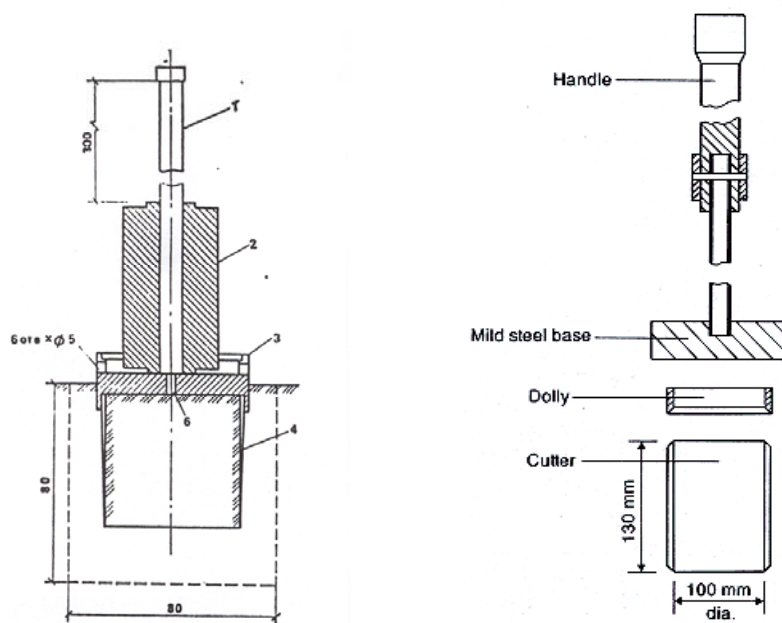
$$\gamma_d = \text{süvendist kaevatud pinnase kuiv mass} / \text{süvendi maht} = W_3 / V \quad (4)$$

2.6.2. Kummiballooni meetod

Kummiballooni meetod on põhimõtteliselt sarnane liivakoonuse meetodile, kuid liiva asemel kasutatakse süvendi täitmiseks kummiballooni täitvat vett.

2.6.3. Lõikerõnga meetod

Lõikerõnga meetodi puhul lõigatakse tihendatud pinnasest teatud kindla ruumalaga (V) rikkumata struktuuriga proov (joonis 12). Tihendatud pinnase kuiva mahumassi saab arvutada kasutades seost (4) lõigatud pinnaseproovi kuiva massi ja lõikerõnga ruumala (V) suhtena.



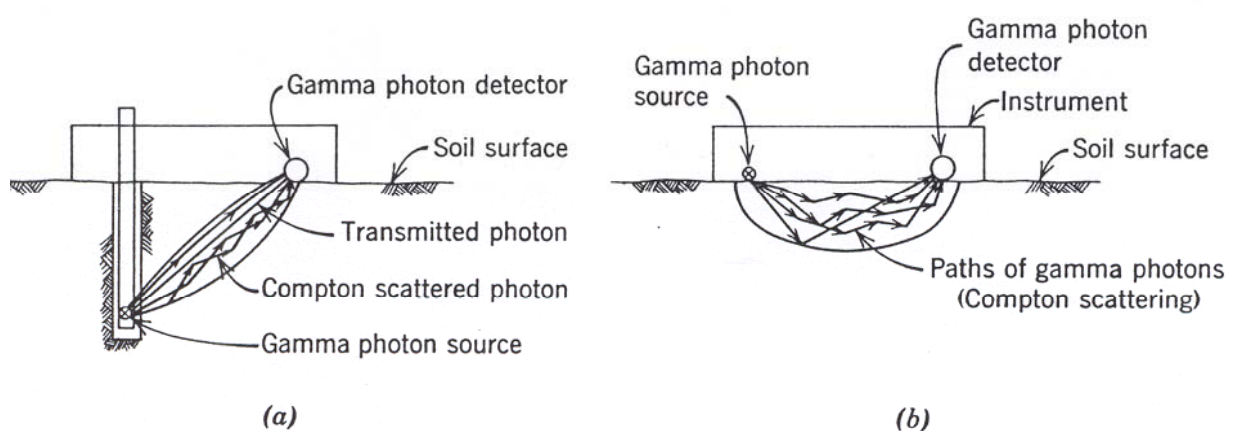
Joonis 12 Lõikerõngad pinnaseproovi võtmiseks

2.6.4. Radioaktiivse isotoobi meetod

Radioaktiivse isotoobiga seadmed võimaldavad määrata korraga nii pinnase tiheduse kui ka niiskusesisalduse.

Radioaktiivse isotoobiga seadmed on kas saatjatüüpi või tagasipeegeldustüüpi (joonis 13):

- 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 13 Radioaktiivse isotoobiga seadmed pinnase tiheduse ja niiskusesisalduse määramiseks: a) saatjatüüpi; b) tagasipeegeldustüüpi. [6]

2.6.5. Penetratsiooni meetod

2.6.5.1. Liivaste pinnaste tihedus määratakse kas staatilise või dünaamilise penetromeetriga.

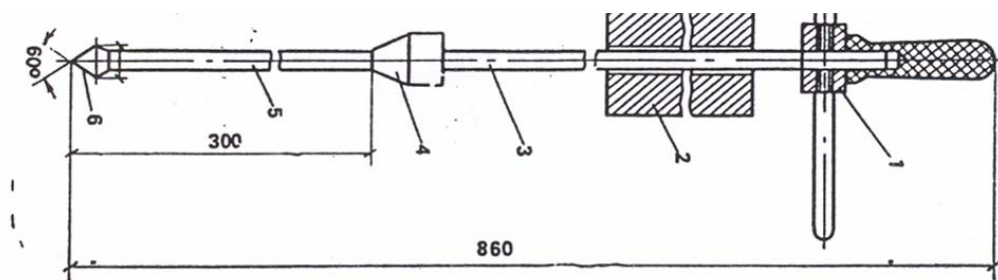
2.6.5.2. Penetromeetrid on instrumendid, mis koosnevad koonilisest peast, mis on kinnitatud metallvarda otsa ja mis süvistatakse pinnasesse.

2.6.5.3. Staatiliste penetromeetrite puhul süvistatakse koonilise otsaga metallvarras pinnasesse staatilise koormusega, dünaamiliste penetromeetrite puhul dünaamilise (löök-)koormusega.

2.6.5.4. Koonilise pea pinnaühikule pinnase poolt tekitatud takistusjõudu nimetatakse pinnase vastupanujõuks (penetrometer soil strength - PSS). Mida suuremat takistusjõudu avaldab pinnas penetromeetri koonilisele peale, seda suurem on pinnase vastupanujõud.

2.6.5.5. Eestis kasutatakse liivaste ja kruusaste pinnaste tiheduse kontrolliks dünaamilist penetromeetrit D-51 (Beldornii) (joonis 14), mis koosneb:

- 6, 5 – tööotsikuga vardast (tööotsiku koonuse nurk on 60° ja max diameeter 16 mm);
- 2 – langevast raskusest massiga 2,5 kg;
- 4 – langeva raskuse lööki vastu võtvast alusest;
- 1 – käepidemest.



Joonis 14 Dünaamilist penetromeeter D-51 (BELDORNII)

2.6.5.6. Koonus süvistatakse langeva raskuse abil pinnasesse 30 cm, lugedes vajaliku raskuse löökide arvu süvistamiseks sügavuselt 20 cm kuni 30 cm.

2.6.5.7. Pinnase tinglik dünaamiline vastupanujõud P_D :

$$P_D = K \cdot E \cdot N_{20-30} / h \quad (5)$$

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.

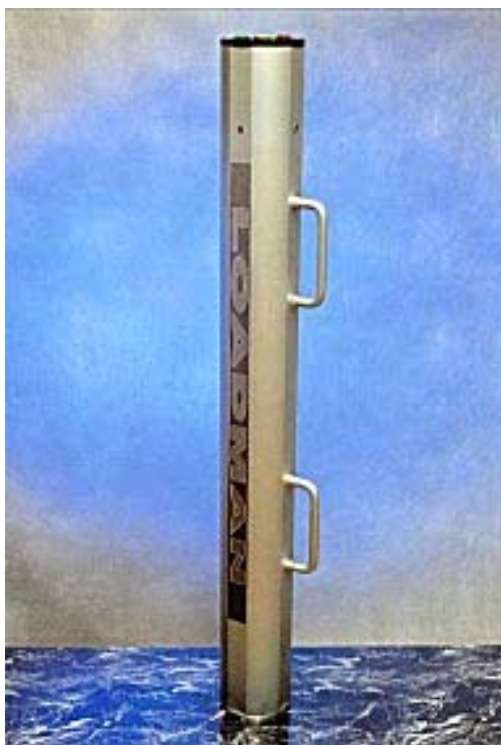
2.6.5.8. Pinnase vastupanujõud (P_D) määratakse ühel kohal (40x40 cm) 3-5 korda. Keskmise P_D väärtuse järgi määratakse tareerimisgraafikult liiv- või kruuspinnase tihedus. Penetromeeter tareeritakse liiv- ja kruuspinnastele, kasutades kiht-kihilt erineva tiheduseni

tihendatud pinnaseid. Tareerimise tulemusena koostatakse tareerimisgraafik, mis iseloomustab pinnase tiheduse sõltuvust pinnase tinglikust dünaamilisest vastupanujõust.

2.6.6. Dünaamilise koormamise meetod

2.6.6.1. Dünaamilise koormamise meetodil kasutatakse pinnase tiheduse määramiseks Loadman ja Inspektor tüüpi seadet (joonis 15), millega mõõdetakse langeva raskuse poolt tekitatud pinnase vertikaalset deformatsiooni.

2.6.6.2. Seadet saab kasutada praktiliselt kõigil ehitusobjektidel igat tüüpi materjalide E-mooduli ja tiheduse mõõtmiseks.



Joonis 15 Seade Loadman

2.6.6.3. Loadman seadme mõõtmistulemustena saadakse:

- maksimaalne deformatsioon,
- arvutatud E-moodul,
- koormuskestus,
- taastuva deformatsiooni % maksimaalsest deformatsioonist,
- tihendustegur, mis on esimese mõõdetud deformatsiooni suhe teise ja järgnevate deformatsioonide keskmisega (seadmel Inspektor – teise mõõdetud deformatsiooni suhe kuuenda kuni kaheksanda mõõdetud deformatsiooni keskmisega).

2.7. Pinnase optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus

2.7.1. Pinnase suurim ehk maksimaalne tihedus δ_0 ja optimaalne niiskus w_0 määratakse pinnase standardse tihendamisega. Pinnaste standardseks tihendamiseks kasutatakse standardset Proctorteimi (joonis 16).



Joonis 16 Proctor katse seadmed

2.7.2. Pinnase optimaalse niiskuse ja maksimaalse tiheduse laboratoorne määramine toimub järgnevalt:

- Uuritava pinnase proovile lisatakse enne tihendamist teatud kogus vett (kokku 4-6 korda). Alustama peaks õhkuiva pinnase niiskusest pisut suuremast niiskusest, kuid 8-10% alla optimaalse niiskuse.

Liival on Sojuzdornii seadmega määratud optimaalne niiskus umbes 8-10%, savisel/möllisel liival 9-15%, liivasel savil/möllil 12-22% ja savil/möllil 16-26%.

- Vajaliku niiskuse jaoks lisatav vee hulk (Q, g):

$$Q = P(w_n - w_a)0,01 \quad (6)$$

P – tihendatava pinnase mass, g;

w_n , w_a – nõutav ja algniiskus, %.

- Pinnas asetatakse silindrisse ja tihendatakse kihtide kaupa nõutud löökide arvuga.
- Tihendatud pinnase niiske mahumass (γ , g/cm³):

$$\gamma = (P_1 - P_2)/V \quad (7)$$

P_1 – silindri ja tihendatud pinnase üldmass;

P_2 – tühja silindri mass, g;

V – silindri maht, cm³.

- Tihendatud pinnase niiskuse määramiseks võetakse 15-20 g pinnast proovikeha pealt, keskelt ja alt ning saadud proov kaalutakse ja kuivatatakse.

Tihendatud pinnase niiskusesisaldus (w, %):

$$w = (M_1 - M_2) * 100 / M_2 \quad (8)$$

M_1 – märja pinnaseproovi mass, g;

M_2 – kuivatatud pinnaseproovi mass, g.

- Pinnase tihedus ehk kuiv mahumass (δ , g/cm³):

$$\delta = \gamma / (1 + 0,01 * w) \quad (9)$$

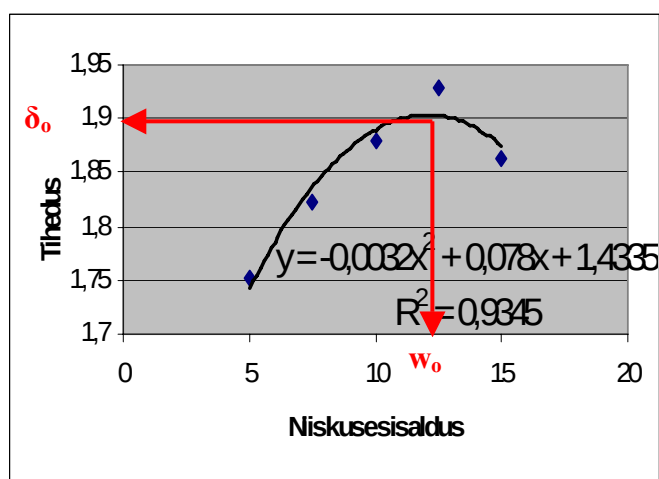
γ – tihendatud pinnase mahumass, g/cm³;

w – tihendatud pinnase niiskusesisaldus, %.

- Saadud tulemuste alusel joonistatakse standardse tiheduse graafik, mille järgi määratakse suurim tihedus (δ_o) ja sellele vastav optimaalne niiskus (w_o) (joonis 7).

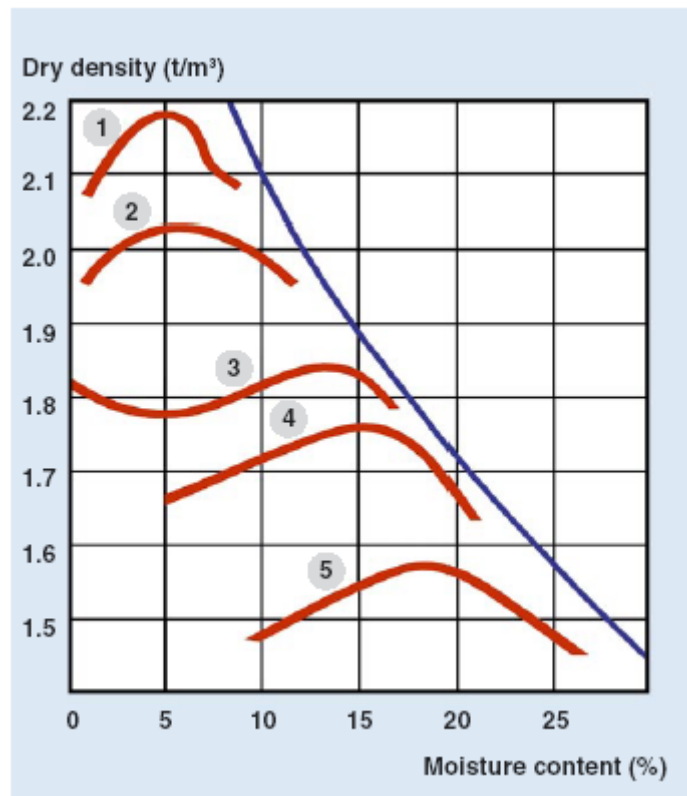
Tabel 3. Proctor seadmete põhiparameetrid

Seadme põhiparameetrid	EVS-EN 13286-2:2004			
	Standard Proctor		Modifitseeritud Proctor	
Tambi mass, kg	2,5		4,5	
Tambi langemiskõrgus, mm	305		457	
Tihendatavate kihtide arv	3		5	
Pinnasesilindri läbimõõt, mm	100	150	100	150
Silindri kõrgus, mm	120		120	
Igale kihile langevate löökide arv:	25	56	25	56
Katsetatava pinnase maksimaalne teraläbimõõt, mm	16 või 31,5		16 või 31,5	



Joonis 7 Standardse tiheduse graafik (maksimaalne tihedus δ_o ja sellele vastav optimaalne niiskus w_o)

2.7.3. Pideva sõelkõveraga sõmerpinnaste kuiv mahumass (tihedus) on suurem, kui savistel pinnastel. Järsu tipuga Proctor-kõver on tavaliselt iseloomulik pideva sõelkõveraga sõmerpinnastele ja ühtlane lame Proctor-kõver aga iseloomustab ühtlast terakoostist (Joonis 8).



Joonis 8 Erinevate pinnaste Proctor-kõverad [10]

- 1- liivane kruus
- 2- kruusane liiv
- 3- ühtlane liiv
- 4- liivane möll
- 5- raske savi

2.8. Nõuded tihendatava pinnase niiskusele ja pinnase lõpptihedusele

2.8.1. Muldkeha tihendatust iseloomustatakse tihendusteguriga (K_t) - pinnaseskeleti tegeliku mahumassi (γ) ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi (δ_o) suhe:

$$K_t = \gamma / \delta_o \quad (10)$$

2.8.2. Muldkeha pinnase tihedus, mida iseloomustab tihendustegur K_t (pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardsel *Proctorteimil*) peab vastama [tabeli 4](#) nõuetele.

2.8.3. Pinnaste tihendamine maksimaalse tiheduse saavutamiseks toimub pinnase optimaalse niiskuse (w_o) juures ($\pm 2\%$). Vähema niiskuse juures pinnast niisutatakse. Pinnaste puhul, mille niiskus on alla 0,9 standardse *Proctorteimi* kohast optimaalset niiskust ($W < 0,9W_o$), tuleb projektis ette näha erimeetmed nende tihendamiseks (niisutamine, tihendamine tavalisest õhemate kihtidena jms). Üleniiskunud pinnas ($>3\%$) kuivatatakse või asendatakse teise pinnasega.

Tabel 4. Muldkeha pinnaste vähimad tihendustegurid K_t

Muldkeha kiht ja niiskuspakkond	Kihi sügavus h teekatte pinnast, m	Tihendusteguri K_t vähimad väärtused erinevate katendite puhul	
		püsikatend	kerg- või siirdekate
Aktiivtsoon	$h < H_k + 0,5$	1,00	0,98
	$H_k + 0,5 \leq h < 1,5$	0,98	0,95
Esimene niiskuspakkond	$h \geq 1,5$	0,95	0,95
Teine ja kolmas niiskuspakkond	$h \geq 1,5$	0,98	0,95

Märkused:

1. H_k – katendi paksus, m.
2. Madalas täiend, nullprofiilis või süvendis oleva muldkeha puhul tuleb aluspinnast tihendada nii, et oleksid täidetud tabel 4 esimese rea nõuded.

2.9. Tihendamistehnoloogiad

2.9.1. Pinnaste algne tihedus muldes sõltub mulde ehitamise meetodist:

- Autode ja skreeperitega mulde ehitamisel on mulde pinnase esialgne tihedus 0,85-0,9 optimaalsest tihedusest.
- Mulde ehitamisel draglainiga on mulde esialgne tihedus väike – 0,65-0,75 optimaalsest tihedusest, buldooseriga mulde ehitamisel – 0,7-0,8 optimaalsest tihedusest.

2.9.2. Selleks, et pinnase tihedus vastaks nõutule (0,95-1,0 optimaalsest tihedusest, tabel 4), tuleb kasutada täiendavalt spetsiaalseid tihendusmasinaid. Teede muldkeha rajamine tihendamisetä (arvestades loomulikku tihenemist) on keelatud.

2.9.3. Põhiliseks tihendamise kvaliteeti mõjutavaks teguriks tuleb lugeda pinnase niiskust. Korraga tihendatava pinnasekihi paksus sõltub pinnase niiskusest ja tihendamiseks kasutatavatest masinast. Väheniisket pinnast tuleb tihendada õhemate kihtide kaupa võrreldes optimaalse niiskusega pinnasega.

2.9.4. Mulle tuleb tihendada kogu laiuses ühtlaselt. Ebaühtlane tihendamine põhjustab mulde vajumist, mille tulemusena tekivad defektid muldele ehitatud katendis. Ka mulde laiuses ühtlane, kuid mittepiisav tihendamine põhjustab ebaühtlaseid vajumisi.

2.9.5. Süvendi ehitamisel peab katendi alla jääva aluspinnase tihedus 0,3 m sügavuseni vastama nõutud tihendustegurile.

2.9.6. Kobeda pinnase tihendamiseks tuleb kasutada kahte tüüpi tihendusmasinaid: abi- ja põhimasinaid:

- Abimasinaid (6-12 t) kasutatakse pinnase eeltihendamiseks, põhimasinatega (>25 t) tihendatakse pinnas ettenähtud tiheduseni.
- Eeltihendamisega väheneb põhimasina korduslõikude arv, mis annab kokkuhoidu.
- Eeltihendamise käigus tuleb kergemate tihendusmasinatega teha 30-40% üldisest vajalikust lõikude arvust.

- Kui mullatöömasinad ja veokid liiguvad kogu mulde laiuses, pole eeltihendamine vajalik.

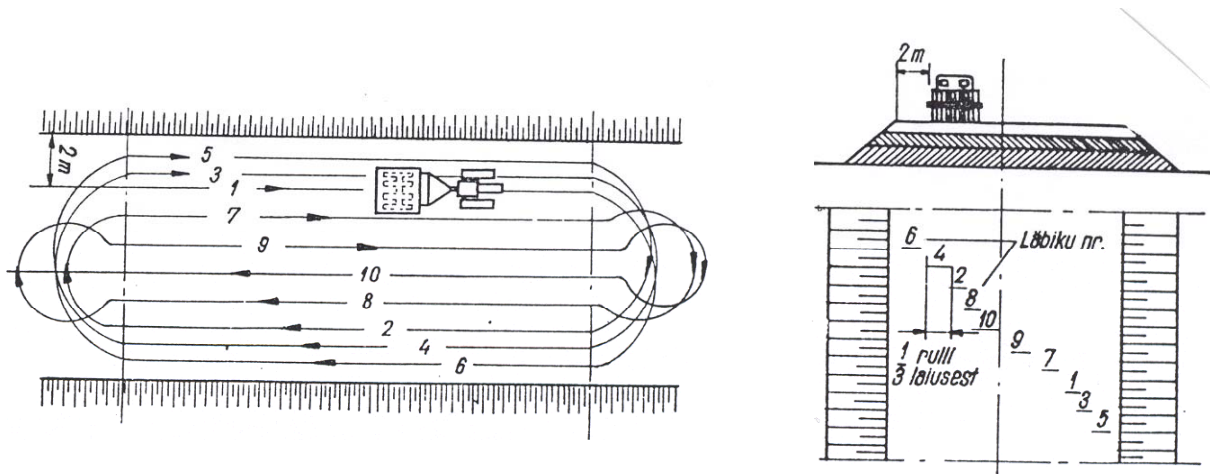
2.9.7. Pinnase tihedust saab suurendada järgmiste meetoditega:

- Erisurve suurendamisega masina tööseadises;
- Tihendatava pinnasekihi paksuse vähendamisega;
- Tihendusmasinate läbikute arvu suurendamisega;
- Tihendusmasina otstarbeka töörežiimi kasutamisega (õige rullitüübi valik, eeltihendamise kasutamine).

2.9.8. Pinnaste tihendamine rullimisega

2.9.8.1. Kaasajal on pinnaste tihendamise kõige efektiivsemaks ja ökonoomsemaks meetodiks rullimine iseliikuvate ehk mootor- ning haakerullidega.

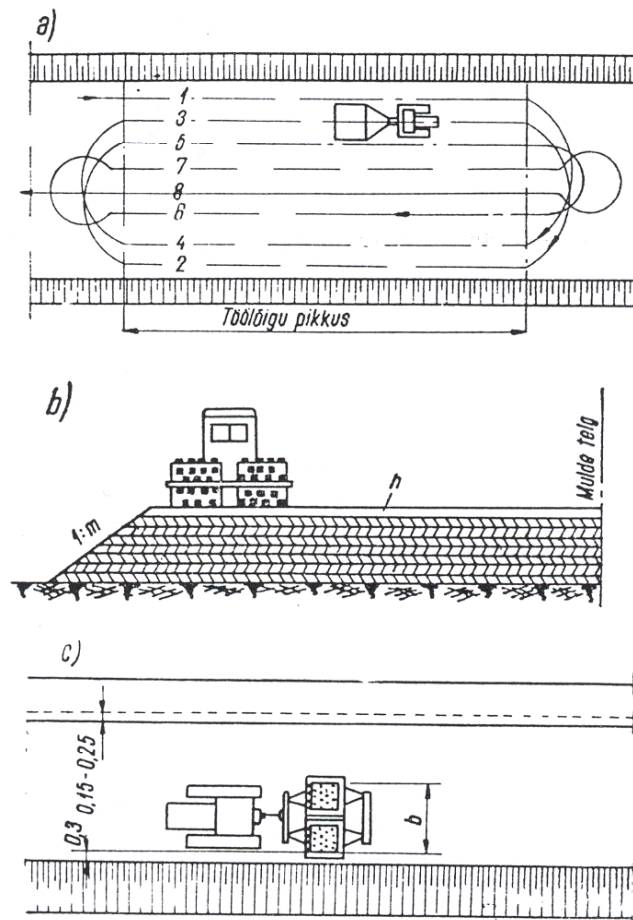
2.9.8.2. 10 m ja laiemaid muldeid tihendatakse tapp- ja pneumorullidega tööloigu ulatuses ringskeemi kohaselt (joonised 9 ja 10). Esimesed läbikud tehakse 2-2,5 m kaugusel mulde servast, et ära hoida nõlvade võimalikku varisemist ja rulli allalibisemist. Mulde ääred tihendatakse järgnevate läbikutega nii, et iga läbiku jälg on 1/3 laiuse võrra nihutatud mulde serva suunas. Nõlva varisemise ja rulli allalibisemise vältimiseks ei tohi valtsi äär olla mulde servale lähemal kui 0,3 m. Tihendamist jätkatakse äärelt telje suunas, kusjuures iga eelneva läbiku jälg kaetakse 1/3-1/4 laiuse võrra.



Joonis 9 Pneumorulli töötamise skeem (1-10 – läbikute järjekord)

2.9.8.3. Mulde ülemiste kihtide (katendi aluse) tihendamiseks on otstarbekas kasutada tapp- ja pneumorullidega tihendamise lõppjärgus siledaid valtsrulle. Tappidest kobestunud tihendatava kihi ülemine osa tihendatakse ja silutakse sellisel juhul täiendavalt ning järgmisele pinnasekihile saadakse jäigem alus.

2.9.8.4. Rullide normaalseks tööks on vaja ette valmistada vähemalt 200 m pikkune lõik (haardeala) kogu muldkeha laiuses. Rullitava lõigu pikendamine suurendab rullide tootlikkust, kuid seejuures tuleb arvestada, et kuiva ja kuumaga väheneb oluliselt pinnase niiskus.



a — traktoriga veetava tapprolli liikumise skeem; b — ristlõige; c — rullitud ribade kattumine; 1...8 — läbikute järjekord; h — kobedast pinnasest kiht paksusega 0,25 m; b — rullitava riba laius.

Joonis 10 Tapprolli töötamise skeem

2.9.8.5. Pinnasekihi paksus ja rulli korduslähikute arv määratakse proovitihendamisega. Tihendatava pinnasekihi paksus valitakse lähtudes rulli kaalust, tappide mõõtmetest ja pinnase liigist.

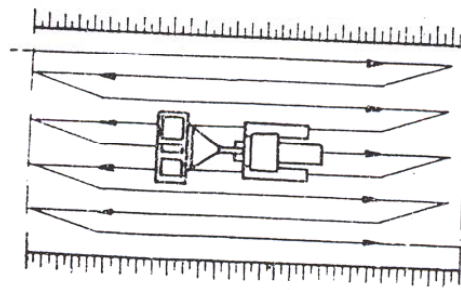
2.9.8.6. Vibrorull võib töötada süstik- või ringskeemi kohaselt (joonis 11).

2.9.9. Pinnaste tihendamine tranšeedes

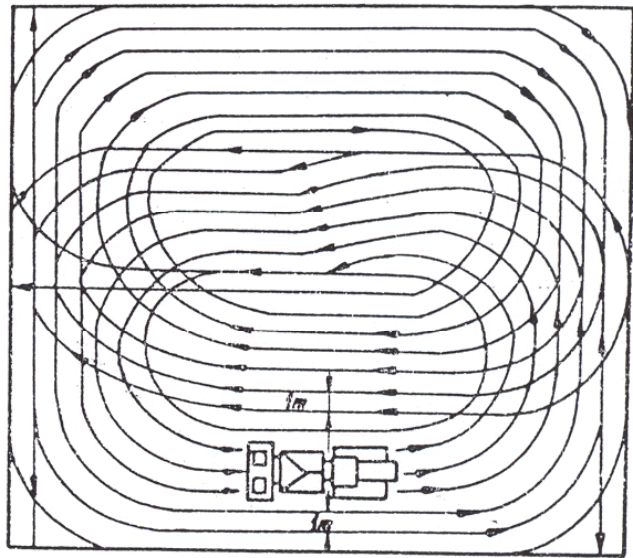
teostatakse kahes etapis (joonis 12):

I - puistatakse ja tihendatakse toru all olev kaitsekiht; paigaldatakse toru; puistatakse pinnas mõlemale poole toru (5) ja tihendatakse; puistatakse torule pinnase kaitsekiht (4) ja tihendatakse – tihendatakse käsitsi või elektri-, mootor- või pneumovibraatoriga, mille tööseade mõõtmed vastavad tihendatava ala laiusele;

II - puistatakse ja tihendatakse põhiline osa pinnasest (3) (peale toru katsetamist) – tihendatakse mehaaniliselt tampmasinate, vibrotampide või vibraatoritega, mis valitakse vastavalt pinnase tüübile, tranšee mõõtmetele, toru materjalile ja kaitsekihi paksusele.

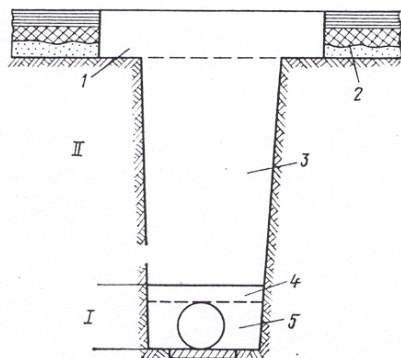


a) süstikskeem

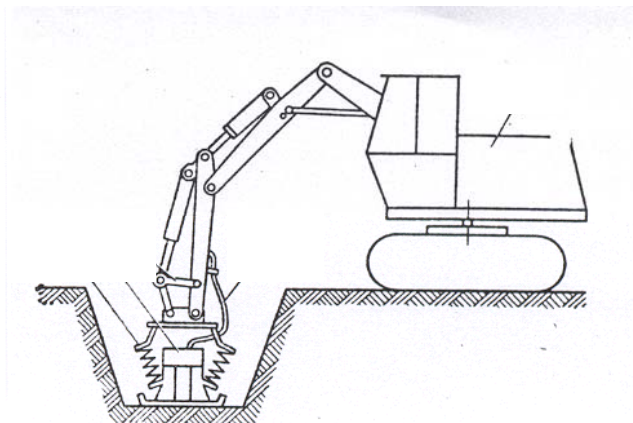


b) ringkeem

Joonis 11 Vibrorulli töötamise skeem



a)



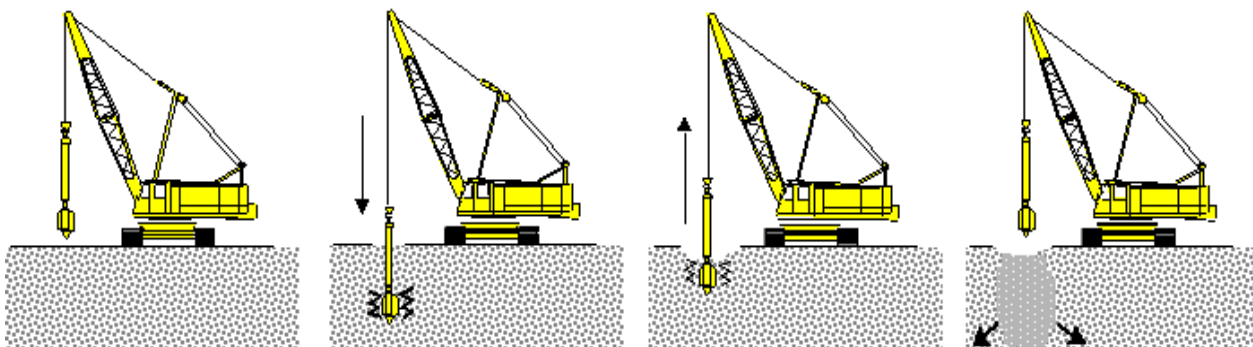
b)

Joonis 12 Süvendi täitmine (a) ja tihendamine (b) [1]

2.9.10. Pinnaste tihendamine eritingimustes

2.9.10.1. Vibrosügavtihendamine on kõige efektiivsem sõmerate pinnaste ja kuni 25% tolmu sisaldavate pinnaste tihendamiseks.

2.9.10.2. Kraana otsas rippuv vibroseade lastakse alla mulde pinnale (joonis 13). Seade süvistub omakaalu ja vibratsiooni tulemusel muldepinnasesse, tihendades seadet ümbritsevat pinnast kuni 2,5 m raadiuses. Tihenduskohtade vahekaugus on tavaliselt 1,5-3 m ja sobivate pinnaste tihendamissügavus võib olla kuni 12 m.



Joonis 13 Pinnase vibrosügavtihendamine

2.9.10.3. Jäme purdmaterjalist ja lõhatud kaljupinnasest mullete tihendamine teostatakse raskete tihendusmasinatega: pneumorullid koormusega rattale mitte vähem kui 7,5 t, võkrullid massiga >25 t, vibrorullid massiga >6 t, tamp- ja vibrotampmasinad erisurvega >0,1 MPa.

2.9.10.4. Jäme purdmaterjalist ja lõhatud kaljupinnasest mullete tihendamiseks vajalik masinate korduslõikude arv määratakse kindlaks tihendatava kihi pinna summaarse vajumise alusel. Nõutud tiheduse saavutamise tingimuseks võib lugeda vajumit 8-10%, ülemistel kihtidel 10-12% esialgsest tihendatava kihi paksusest. Kui nõutav vajum ei teki valitud tihendusmasinaga, asendatakse see võimsamaga.

2.9.10.5. Ühtlase terastikuga liivadest mullete tihendamine on mehhanismide raske läbitavuse tõttu soovitatav teostada talvetingimustes või pinnase suurima loodusliku niiskusesisalduse juures (või intensiivse kastmisega suvel). Liiv tihendatakse vibrorullidega, vibrolöök- või tampmasinatega. Liivakihil liikumiseks on soovitatav ehitada tehnoloogiline kiht killustikusõelmetest (0-10 mm), kruusa-liivasegust jmt paksusega 8-15 cm.

2.10. Pinnase tiheduse kontroll

2.10.1. Teehoiutööde tehnoloogia nõuded (Majandus- ja kommunikatsiooniministri 13. mai 2004. a määrus nr 132) näeb ette, et muldkeha pinnase tihendamist kontrollitakse vastavalt projektis esitatud nõuetele.

Juhul kui projektis nõuded puuduvad, peab pinnase tihendamist kontrollima ristlõike kolmes punktis, muldkehal kõrgusega kuni 3 m iga 100 m tagant ja muldkehal kõrgusega üle 3 m iga 50 m tagant. Liivpinnasest muldkeha tihendustegur peab vastama tabelis 4 toodud nõuetele.

Muudest pinnastest ehitatud muldkeha kihil kontrollitakse tihendamist elastsusmooduli mõõtmise teel kas INSPECTOR või LOADMAN seadmega. Elastsusmoodul muldkeha pinnal ei tohi olla väiksem projektis esitatud nõuetest.

2.10.2. TTÜ teedeinstituudi poolt 2005. a kevadel koostatud Maanteede projekteerimismäärustiku uus eelnõu näeb ette, et muldkeha ükskõik mis tüüpi pinnase tihedus,

mida iseloomustab tihendustegur K_t (pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardisel *Proctorteimil*) peab vastama tabeli 4 nõuetele.

2.10.3. Teades liivpinnase kihil Loadmani või Inspectori mõõtmistulemuste alusel arvutatud tihedusnäitajat, on võimalik selle alusel arvutada sama liivpinnasekihi tihendustegur K_t kasutades järgmiseid seoseid:

- Loadmani kasutamisel:
 $K_t = -0,1537 \cdot T_L + 1,1712$,
 kus: K_t - tihendustegur
 T_L - Loadmani mõõtmistulemuste alusel arvutatud tihedusnäitaja
- Inspectori kasutamisel:
 $K_t = -0,1264 \cdot T_I + 1,1449$,
 kus: K_t - tihendustegur
 T_I - Inspectori mõõtmistulemuste alusel arvutatud tihedusnäitaja

2.10.4. TTÜ teedeinstituudi poolt 2005. a kevadel koostatud Maanteede projekteerimismäärde uues eelnõus ette nähtud pinnaste tihendusteguri K_t nõuete tabelit (tabel 4) saab täiendada ka liivpinnaste tihedusnäitajate nõuetega (vastavalt kasutatavale seadmele - kas Loadman või Inspector) (tabel 5).

Tabel 5. Muldkeha liivpinnaste vähimad tihendustegurid K_t ja tihedusnäitajad T

Muldkeha kiht ja niiskuspaiikkond	Kihi sügavus h teekatte pinnast, m	Püsikatend			Kerg- või siirdekataend		
		Vähimad tihedusnäitajate väärtused					
		Tihendus- tegur K _t	Tihedusnäitaja T		Tihendus- tegur K _t	Tihedusnäitaja T	
			Load- man	Ins- pector		Load- man	Ins- pector
Aktiivsoon	h < H _k + 0,5	1,00	1,11	1,15	0,98	1,24	1,30
	H _k + 0,5 ≤ h < 1,5	0,98	1,24	1,30	0,95	1,43	1,54
I niiskuspaiikkond	h ≥ 1,5	0,95	1,43	1,54	0,95	1,43	1,54
II ja III niiskuspaiikkond	h ≥ 1,5	0,98	1,24	1,30	0,95	1,43	1,54

Märkused:

1. H_k – katendi paksus, m.
2. Tihedusnäitaja T – Loadmani või Inspectori mõõtmistsükli 3 viimase mõõtmistulemuse (6-s, 7-s ja 8-s) keskmise ($\Sigma E/3$) ja teisena mõõdetud elastsusmooduli ($E(2)$) suhe ($T = \Sigma E/3 / E(2)$).
3. Tihendustegur K_t - pinnaseskeleti tegeliku tiheduse suhe sama pinnaseskeleti maksimaaltihedusse standardisel *Proctorteimil*.
4. Madalas täienddis, nullprofiilis või süvendis oleva muldkeha puhul tuleb aluspinnast tihendada nii, et oleksid täidetud tabel 5 esimese rea nõuded.

2.11. Pinnase tihendamisel tekkivad probleemid ja nende kõrvaldamine

Üldjuhul võib esineda pinnase tihendamisel neli probleemi:

- ületihendamine;
- alatihendamine;
- pinnas on liiga märg;
- pinnas on liiga kuiv.

On võimalik olukord, kus üks või mitu probleemi ilmnevad korraga, näiteks kui pinnas on liiga kuiv ja samas ka alatihendatud.

2.11.1. Ületihendamine

Ületihendamine tekib, kui materjali on tihendatud üle teatava tiheduse (vt p 2.7). Ületihendatud materjal võib olla tugevam, kui nõutud, see tähendab:

- raisatud võimsust (mis ei vaja tihendatud materjali seisukohast sekkumist);
- katki surutud materjali (mis ei oma enam projekteeritud elastsusmoodulit).

Viimasel juhul tuleb ületihendatud kiht kobestada ja uuesti tihendada nõutud tiheduseni.

2.11.2. Alatihendamine

Alatihendamine võib tähendada:

- puuduvat rulli korduslābikut;
- pinnase tüübi muutumist;
- rulli ebapiisavat massi;
- vibrorullide kasutamisel vibratsioonisageduse või –amplituudi muutumist;
- defektset rulli valtsi;
- ebasobiva tihendusseadme kasutamist.

Probleemi lahendamiseks tuleb kõigepealt suurenda kasutatavat tihendamisvõimsust. Kui alatihendamine on teatud korduva sagedusega või ühe paani ulatuses, võib tegemist olla puuduva korduslābikuga.

2.11.3. Tihendatav pinnas on liiga mārg

Liiga niisked tihendatud pinnased on aldid nihkele ja tugevuse kaotusele. Tihendamiseks liiga mārg pinnas tuleb:

- kobestada;
- kuivatada (ōhutada);
- māārata uuesti niiskusesisaldus;
- uuesti tihendada, kui niiskusesisaldus on nõutud vahemikus;
- māārata uuesti niiskusesisaldus ja tihedus.

2.11.4. Tihendatav pinnas on liiga kuiv

Liiga kuivad pinnased ei saavuta tihendamisel nõutud tihendustegurit. Tihendamiseks liiga kuiv pinnas tuleb:

- kobestada;
- lisada vett;
- segada korralikult;
- māārata uuesti niiskusesisaldus;
- uuesti tihendada, kui niiskusesisaldus on nõutud vahemikus;
- māārata uuesti niiskusesisaldus ja tihedus.

KASUTATUD INFORMATSIOONIALLIKAD

1. Autoteede muldkehade rajamise juhend. BCH 97-63. Kirjastus „Valgus“, Tallinn, 1968.
2. Autoteede ehitus (Stroitelstvo Avtomobilnõh Dorog) 1 ja 2. Moskva, „Transport“, 1980.
3. Andrus Aavik, Tee-ehitus I, (3) Mullatööde koosseis. Loengukonspekt. TTÜ, 2005.
4. Andrus Aavik, Tee-ehitus I, (7) Põhilised mullatööd. Mulded reservi ja karjääri pinnastest. Loengukonspekt. TTÜ, 2005.
5. Andrus Aavik, Tee-ehitus I, (9) Põhilised mullatööd. Pinnaste tihendamine. Loengukonspekt. TTÜ, 2005.
6. Andrus Aavik, Tee-ehitus I, (25) Pinnaste tiheduse kontroll. Loengukonspekt. TTÜ, 2005.
7. 510 Compaction Manual. ASTC Polymers, 24 p
www.aqualoc.us/docs/510%20Compaction%20Manual.pdf - 12 märts 2005.
8. Compaction. Napier University. Edinburgh, 34 p. www.napier.ac.uk – 12.märts 2005.
9. INTELLIGENT COMPACTION: OVERVIEW AND RESEARCH NEEDS ...
www.webs1.uidaho.edu/bayomy/trb/afh60/IntCompaction_Briaud_September2004_.pdf - 16. märts 2005.
10. BOMAG. “Heavy Equipment, Compaction Control and Documentation System BTM,” Brochure, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany.
11. FM 5-410. Military Soils Engineering ... Section I - Soil properties affected by compaction. Advantages of soil compaction. Settlement ...
<https://atiam.train.army.mil/portal/atia/adlsc/view/reference/FM+5-410> – 16. märts 2005.
12. Putk A., Vahelaid O. Teedehitusmasinate ülesannete kogu. Tallinna Polütehniline Instituut, ehitustehnoloogia kateeder. Tallinn, 1989.
13. HEINZ F THURNER and ÅKE SANDSTRÖM Geodynamik AB, Stockholm, Sweden: Continuous Compaction Control, CCC. European Workshop COMPACTION OF SOILS AND GRANULAR MATERIALS, Paris, May 19th 2000 p.p. 237-246
14. Adam, Dietmar (1996): Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen (Continuous compaction control (CCC) with vibrating rollers). Technical University of Vienna, Civil Engineering Department. Vienna, p. 268.
15. Floss, R. et al. (1991): Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten. Bundesminister für Verkehr. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, p. 284.
16. Forssblad, Lars (1980): Compaction meter on vibrating rollers for improved compaction control. Proceedings of International Conference on Compaction, Vol. II, Paris, pp. 541-546.
17. Jönsson, Per-Ola (1999): Introducing innovative tendering and contracting based on functional quality parameters. EAPA publication 1999, p. 17.

18. Kopf, Fritz (1999): Flächendeckende dynamische Verichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten (Continuous compaction control (CCC) during compaction of soils by means of dynamic rollers with different kinds of excitation). Technical University of Vienna, p. 205.
19. Sandström, Åke (1993): Oscillatory compaction. Proceedings of XII IRF World Congress. Madrid, pp. 957-961.
20. Sandström, Åke (1994): Numerical simulation of a vibratory roller on cohesionless soil. Geodynamik report, Stockholm, p. 22.
21. Sandström, Åke (1985): Packningsmätare på vältrar. VTI-meddelande 466, Linköping, pp. 52-60.
22. Thurner, Heinz (1993): Continuous compaction control - specifications and experience. Proceedings of XII IRF World Congress. Madrid, pp 951-955.
23. Thurner, Heinz and Sandström, Åke (1980): A new device for instant compaction control. Proceedings of International Conference on Compaction, Vol. II, Paris, pp. 611-614.
24. Thurner, Heinz and Sandström, Åke (1991): Quality assurance in soil compaction. Proceedings of the XIXth PIARC World Congress, Question II, Marrakech, pp. 468-477.
25. Utterodt, Ronald (1999): VDBUM publications, Heft 6, 12/99.
26. AMMANN (2003). ACE - Soil Compaction and Compaction Control. CD, AMMANN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
27. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Penger- ja kerrosrakenteet. Tielaitos, Helsinki, 1994.
http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/4000_penger_ja_kerrosrakenteet.pdf - 05.aprill 2005.a.
28. Sand Cone Method, ASTM Designation D-7556.
29. Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil, ASTM D3441-98.
30. Plate Bearing Test Apparatus 35-T116 Series. Determination of deformation moduli of foundations and sub-bases (ASTM D1194) and foundations on road and airport pavements (ASTM D1195, D1196 - BS 1377 - CNR N.92 and 146).
<http://www.controls.it/img/prodotti/35-t116e.pdf> - 06.aprill 2005.
31. BS 1377: British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes: Part 4: Compaction related tests.
32. ASTM D1557-02e1 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/REDLINE_PAGES/D1557.htm?E+mystore - 06.aprill 2005.
33. ASTM D698 Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.
34. Maanteede projekteerimismid. Eelnõu
http://www.mnt.ee/atp/failid/projekt_juh/mnt-proj-norm-03.pdf - 06.aprill 2005.
35. Maanteede projekteerimismid. Eelnõu. TTÜ teedainstituut, 2005.
36. Teehoiutööde tehnoloogianõuded. Majandus- ja kommunikatsiooniministri 13. mai 2004. a määrus nr 132.
http://estlex.info/estlex/kehtivad/AktDisplay.jsp?id=62823&akt_id=62823 - 13.aprill 2005.
37. EVS-EN 13286-2:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and moisture content.

38. Topic VII: One-dimensional flow of water through soils (permeability of soils).
<http://teaching.ust.hk/~civl272/Class272/Topic-VII.doc> - 11.mai 2005.
39. Geology and Soil Mechanics, UW-Stout. Permeability and Dewatering.
http://physics.uwstout.edu/geo/perm_dewat.htm - 11.mai 2005.
40. Soil Mechanics, 6th ed., R.F. Craig, 1997 (Chapman & Hall).
41. Principles of Geotechnical Engineering, 4th ed., B.M. Das, 1998 (PWS)
42. An Introduction to Geotechnical Engineering, R.D. Holtz & W.D. Kovacs. 1981 (Prentice Hall)
43. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd, ed., John Wiley & Sons, New York.
44. **BS 8004:1986 Code of practice for foundations.** Design and construction of foundations for the normal range of buildings and engineering structures, excluding foundations for special structures.
45. Soil Permeability Rates. Data from „Civil Engineering Design Manual“, 1995.
<http://www.invisiblestructures.com/Med&tech/WhitePapers/SoilPermRates.pdf> - 11.mai 2005.
46. Das, Braja M. 1998. Principles of Geotechnical Engineering, Fourth Edition. Boston, MA: PWS Publishing Company. 712 pages.