

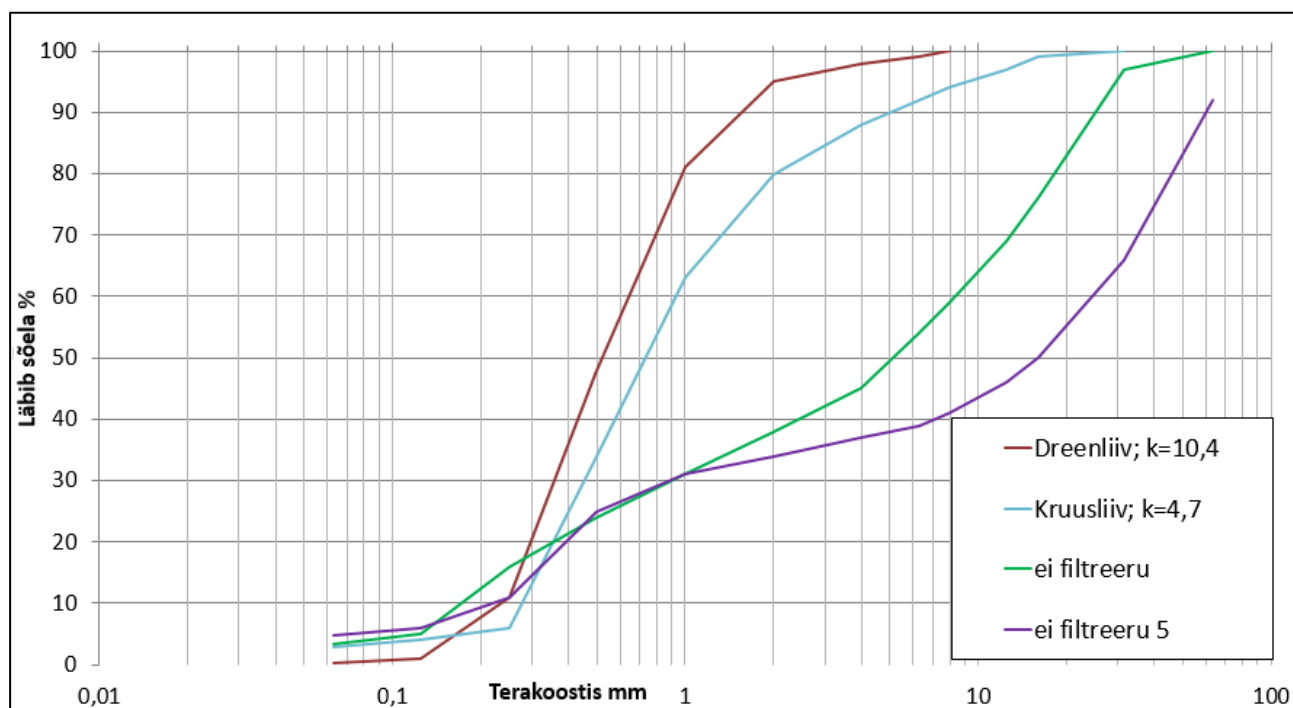


MAANTEEAMET

Muldkehades ja drenkihtides kasutatavate mineraalmaterjalide veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega

Lõpparuanne

Töö nr 2016-008



Tallinn 2016



**Muldkehades ja drenkihtides kasutatavate mineraalmaterjalide
veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega
(töövõtuleping nr 15-00248/003)**

Lõpparuanne

Tellija: Maanteeamet

Aadress: Pärnu mnt 463a, 10196 Tallinn

Telefon: 611 9300

Kontaktisik: Karli Kontson (e-mail: karli.kontson@mnt.ee)

Teostaja: Tallinna Tehnikakõrgkool

Aadress: Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn

Telefon: 666 4500

Vastutav täitja: Sven Sillamäe (e-mail: sven@tktk.ee)

Tallinn 2016

Töö autor ja vastutav täitja: Sven Sillamäe

Kaastäitjad:

- Sten-Kristjan Saarik (TTK, uuringu II ja III etapp ning lisakatsed);
- Rainer Vaidla (TTK, uuringu I etapp);
- TTÜ Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratoorium (Kristjan Lill);
- Tampereen Teknillinen Yliopisto (prof. Pauli Kolisoja, Joonas Mäenpää, Kari Pylkkänen);
- Eesti Keskkonnauuringute Keskuse geotehnikalabor (Uile Lemberg, A. Maasepp, R. Käär, R. Kurrista, M. Oidermaa, S. Truuver, K. Ilustrumm).

Töö tellija on Maanteeamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Maanteeameti seisukohaga ega väljenda Maanteeameti 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	6
1. Teooria	7
1.1 Drenaaži olulisus	7
1.2 Dreenivuse tagamine	10
1.2.1 Huang, H. Y. Pavement Analysis and Design [9]	10
1.2.2 Australian Road Research Board Special report no 35. Subsurface drainage and road structures [12] – vesi läbi terve asfaltkatte	27
1.2.3 Austroads Guide to Pavement Technology. Part 10: Sub-Surface Drainage (AGPT Part 10) (Austroads 2009c) [11]	30
1.2.4 Moulton 1980. Highway subdrainage design [18] – vee äravool muldkehasse	38
1.2.5 Vene projekteerimisjuhendid drenkihtide projekteerimiseks	43
1.3 Külmakerkest	51
1.3.1 Peamised põhimõtted	51
1.3.2 Külmakerkeprotsessist	52
1.3.3 Täiendavad mõtted külmakerkest	56
1.3.4 Pinnaste külmakerkelisuse hindamine	58
1.3.6 Teekonstruktsiooni sulamine	73
1.4 Kapillaartõusust	75
1.5 Liivade tugevusomadused	78
2. Liivade katsetamine Eestis	82
2.1 EVS 901-20 alusel koostatud sõelkõveraväljad	82
2.2 Objektikülastused – tehtud tööde kirjeldus	84
2.2.1 Kandevoime mõõtmine	84
2.3 Objektidelt saadud mõõtetulemused koos laborikatsete tulemustega	86
2.3.1 Objekt I – laborinumbriga 368	86
2.3.2 Objekt II – laborinumbriga 671	88
2.3.3 Objekt III – laborinumbriga 672	90
2.3.4 Objekt IV – laborinumbriga 673	92
2.3.5 Objekt V – laborinumbriga 720	94
2.3.6 Objekt VI – laborinumbriga 722	96

2.3.7 Objekt VII – laborinumbriga 732	99
2.3.8 Objekt VIII – laborinumbriga 733	100
2.3.9 Objekt IX – laborinumbriga 769	102
2.3.10 Objekt X – laborinumbriga 803	104
2.4 Koondandmed ja tulemuste analüüs.....	106
2.4.1 Filtreeruvuse võrdlus.....	107
2.4.2 Kapillaartõus	112
2.4.3 Külmakerkemõõtmised	113
2.4.4 Filtratsioonimooduli seos pinnase kapillaartõusu ja külmaohtlikkuse vahel	119
2.4.5 Pinnase tugevusomadused.....	121
3. Filtratsioonimooduli määramise katsestandardi EVS 901-20:2013 edasiarendus	132
3.1 Filtratsioonimooduli mõõtmine kruusade puhul	132
3.1.1 Modifitseeritud Proctor vorm.....	133
3.1.2 Filtratsioonimooduli määramine püsiva rõhuga permeameetriga.....	136
3.1.3 Kruusade filtratsioonitulemused	141
3.1.4 Tehiskruusa katsetamine	144
3.1.5 Kruusade filtreeruvusest.....	146
4. Järeldused ja soovitused	147
Kokkuvõte	150
Viidatud allikad	151

Sissejuhatus

2013. aastal kiideti heaks Eesti Vabariigi Standardikeskuse tehnilise komitee EVS/TK-31 "Teedeala" poolt rahvuslik katsestandard EVS 901-20:2013 mulde- ja drenkihi ehituseks kasutatavate materjalide filtratsioonimooduli määramiseks standardse Proctorteimi (EVS-EN 13286-2) maksimaalsel tihedusel. Käesolev uuring algatati tulenevalt aja jooksul ilmnenu probleemide ja küsitavustega standardiseeritud meetodi sobilikkuse kohta drenkihi materjalide hindamisel. Uuringu eesmärgiks oli selgitada EVS 901-20 katsestandardi alusel leitud materjalide mõõtetulemuste seoseid objektis ja laboris mõõdetavate suuruste osas, täpsemalt geotehniliste tugevusomaduste, külmakerkelisuse ja kapillaartõusu osas.

Käesolev lõpparuanne käsitleb uuringu teise ja kolmanda etapi tulemusi – tee-ehitusobjektidel nn *in-situ* meetodil filtratsioonimooduli määramise metoodika rakendatavus ja kandevõime mõõtmine eri seadmetega, filtratsioonimooduli seosed külmakerkelisuse ja kapillaartõusuga. Esimese vaheetapi aruandes koostati labori poolt etteantud katseandmetele tuginedes sõelkõverapiirid, millekohaselt oleks võimalik materjali terastikulise koostise põhjal tuletada materjali filtratsioonimoodul EVS 901-20 meetodiga määratuna.

Töö tegemise käigus ilmnes uusi lahendamist vajavaid küsimusi, mistõttu tehti täiendavaid lisakatseid, sh uurimaks erinevaid võimalusi, et kõrvaldada EVS 901-20:2013 puudusi, milleks on kruusade täislõimise katsetamine ning teaduskirjanduses leitavate empiiriliste terakoostist ja muid tegureid arvestavate valemite põhjal arvutatud filtratsioonimooduli suur erinevus võrreldes standardi EVS 901-20 alusel mõõdetava filtratsioonimooduliga.

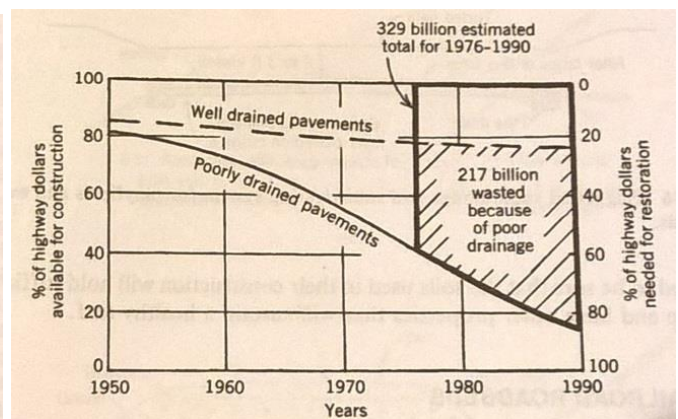
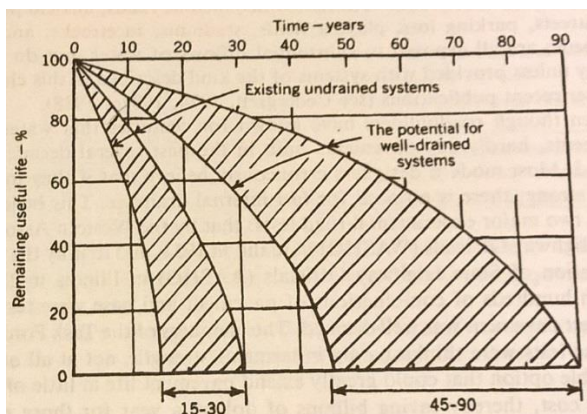
1. Teooria

1.1 Drenaaži olulisus

Allika [1] peatükk 8 „*Drainage*“ algab sõnadega „*There are really only three key things to remember about road construction – drainage, drainage, and drainage*“, mis tõlkes tähendab, et teede ehituse juures on oluline pidada meeles vaid kolme võtmetähtsusega aspekti – drenaaž, drenaaž ja drenaaž.

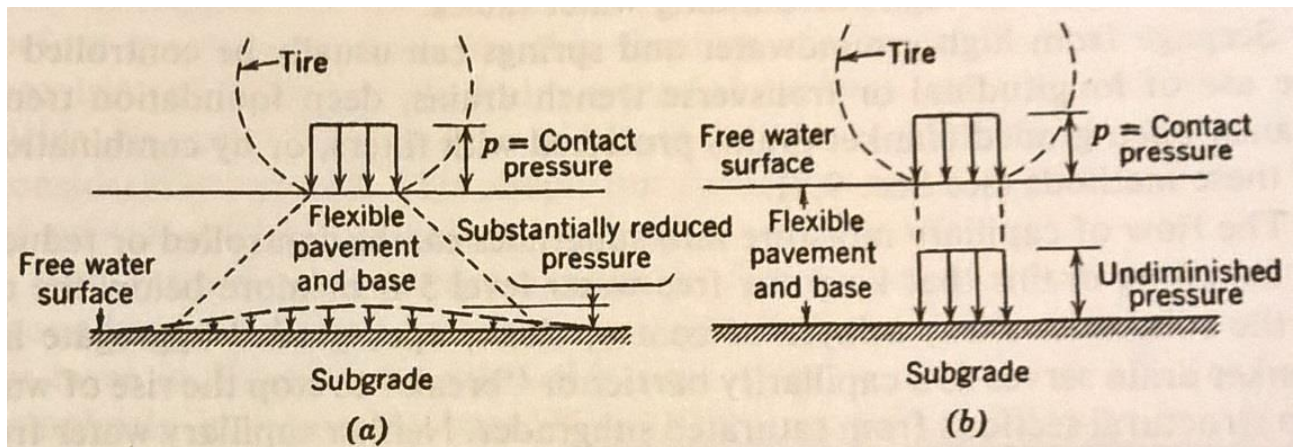
Allikas [2] selgitatakse põhjalikult tagajärgi olukorrale, kui teekonstruktsiooni drenaaž ei ole piisaval määral tagatud. Allikast pärinevad järgnevad laused:

- „*Even though roadbuilders have known for centuries that water destroys pavements, hardly any pavements built in the past several decades are well drained*“ (kuigi teedeehitajad teavad juba sajandeid, et vesi lõhub teekatendeid, ei ole peaaegu üksi tee viimastel kümnenditel ehitatud piisavalt hästi drenivana – tõenäoliselt pärineb märkus mõne aastakümne tagusest ajast, kuna viidatud raamat anti esmakordselt välja aastal 1967);
- „*Most modern designers erroneously believe that if they make pavements strong, there is no need for fast internal drainage.*“ (enamus kaasaegseid insenere usuvad ekslikult, et kui ehitada katend piisavalt tugevaks, siis head sisemist drenaaži ei ole vaja);
- „*... it is responsible for the premature failures of thousands of miles of pavements everywhere and losses of billions of dollars a year that could have been avoided by good drainage practices.*“ (halb drenaaž on igal pool põhjustanud tuhandete miilide ulatuses lagunenud teekatendeid ja miljardite dollarite ulatuses tehtavaid kulusi oleks saanud vältida korraliku drenaaži olemasolul – seda illustreerivad joonised 1.1 ja 1.2);
- „*...well drained pavements can outlast conventional poorly drained ones at least three or four times.*“ (hea drenaažiga teekatendid peavad kolm-neli korda kauem vastu, kui halva drenaažiga teed);
- „*Overcoming the archaic belief that drainage is not necessary is the biggest obstacle to progress.*“ (progressi suurim takistaja on iganenud arusaam, et drenaaž ei ole vajalik).



Joonised 1.1 ja 1.2. Toimiva dreensüsteemiga teede eluiga on kordades pikem halvasti toimiva või olematu drenaažiga teedest, mis võimaldaks säästa märkimisväärsed summasid teede eksploateerimisel.

Drenaažiprobleemid üle kogu arenenud maailma põhjustavad teekatendite enneaegset lagunemist, mistõttu teede tegelikud eluead on vaid kolmandik sellest, mis need tegelikult võiksid olla. Raskeveokite mõju halvasti drenitud ja veeküllastunud katenditele on sadu kuni tuhandeid kordi rängem, kui drenitud katenditele, mistõttu vajavad teed remonti juba 5...8 aasta pärast (joonis 1.3).

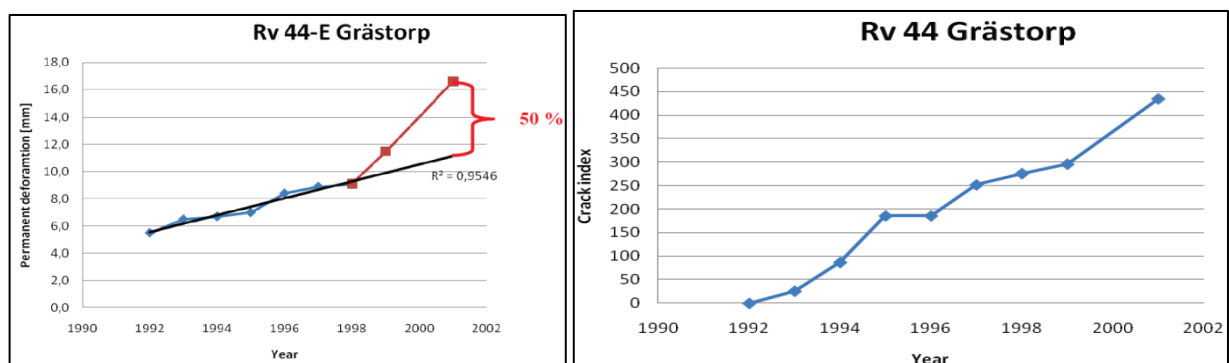


Joonis 1.3. Kui teekatend on veeküllastunud oludes, tõuseb materjali poorides oleva vee rõhk nii kõrgeks, et katend ei täida oma ülesannet jaotada sõidukite koormust muldkehale, mistõttu toimub teekatendi kiire lagunemine. Joonisel illustreeritud olukorrad on äärmused, tegelikkus võib olla nende vahepealne. Mida paremini katend drenib, seda rohkem iseloomustab olukorda vasakpoolne pilt ja vastupidi.

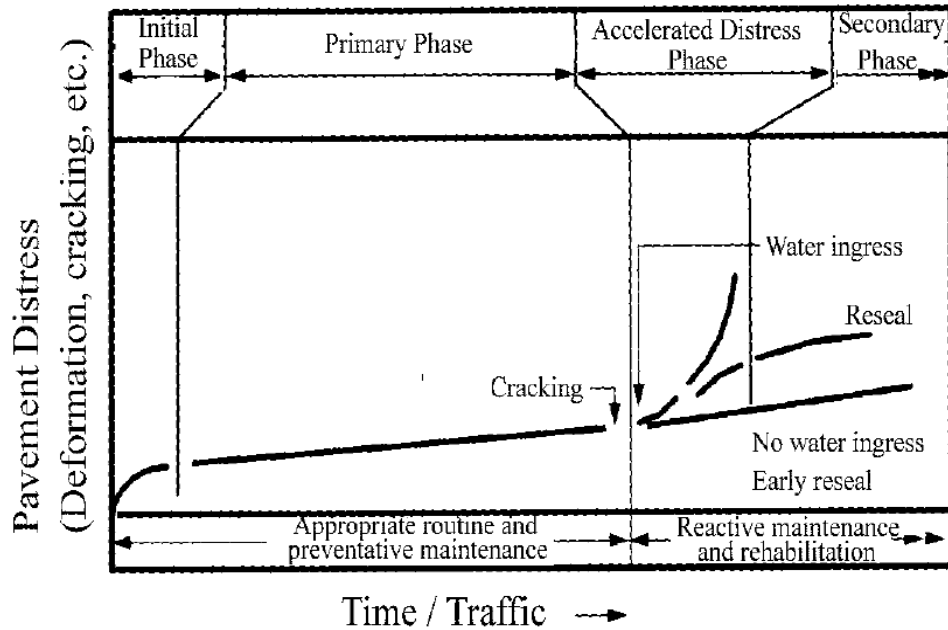
Lisaks öeldakse allikas [2] veel järgmist:

- „Extensive internal flooding can be blamed for about 90% or more of the serious pavement problems.“ „A number of detailed studies have demonstrated that a major percentage of the damage to most pavements can be blamed on the excess water that enters structural sections (primarily from surface water) and remains for long periods of time“. (ca 90% juhtudel, kui teekatenditel ilmneb tõsiseid defekte, on probleeme tegelikult selles, et vesi ei pääse teekatenditest piisava kiirusega välja).

Eelnevat väidet on võimalik hästi illustreerida allikas [3] leitud seosega, kus selgus, et roopa arengu kiirus on otseses sõltuvuses teekattele tekkinud pragude arvuga, s.t katendisse siseneva vee hulga – joonis 1.4. See omakorda seostub suurepäraselt ka allikas [4] esitatud joonisega 1.5, kus on välja toodud katendi lagunemise ja vee sisenemise hulga vaheline seos.



Joonis 1.4. Allikas [3] esitatud üks seos roopa sügavuse arenemise (vasakpoolne pilt) ja pragude indeksi (parempoolne pilt) vahel. Mida rohkem on teekattes pragusid, seda rohkem pääseb vett katendisse ning seda enam halvenevad teekatendis kasutatud materjalide omadused.



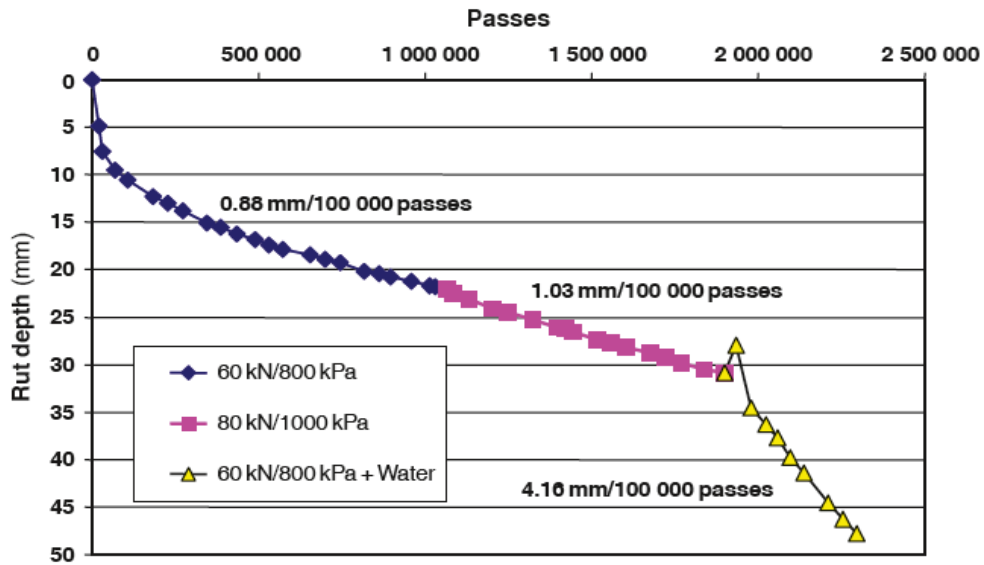
Joonis 1.5. Roopa (püsiva deformatsiooni) tekkimise seos kattekihi olukorraga. [4]

Allikas [5] tuuakse välja, et põhjamaistes oludes ei moodusta vesi ja teedharmoonilist ühendust. Vesi, kui vähegi võimalik, tuleb hoida teekonstruktsioonidest väljas. Reeglina on see võimatu ning järelikult peab teekonstruktsioon sisaldama dreene, mis viivad liigse vee koormatud aladest eemale. Teekatend peab olema dreniv vähemalt 0,7 m sügavuseni, vastasel juhul jääb vesi tsooni sisse, vähendades oluliselt kandevõimet (täiendavaid nõudeid võib esitada veel külmakerkehust lähtuvalt).

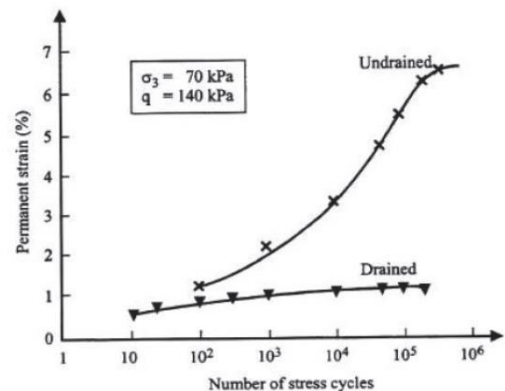
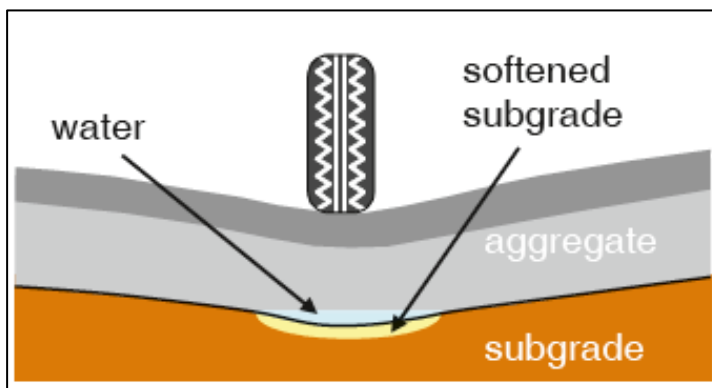
Rootsis tehtud katsed raskeveokite liiklumist teekatendil simuleeriva HVS-iga andsid joonisel 1.6 kujutatud tulemuse, s.t roopa areng suurenes peale veetaseme tõstmist katendi alla hüppeliselt [5]. Katsega koormati konstruktsiooni, mis koosnes 49 mm asfaldist, 89 mm bituumenstabiliseeritud kihist ja 2,5 m paksusest liivakihist. Peale 500'000 koormustsükli 60 kN koormusega ja rehvirõhuga 800 kPa arenes roobas 0,88 mm/100'000 koormustsükli osas. Peale seda koormust suurendati 80 kN peale ja tõsteti rehvi rõhk 1000 kPa-ni ning roopa arengu kiirus oli 1,03 mm/100'000 tsükli kohta. Viimaseks tõsteti vee tase 300 mm sügavusele mõõdetuna bituumenstabiliseeritud kihi pinnast ning kasutati uuesti vähendatud koormust 60 kN ja 800 kPa, mille tagajärjel toimus roopa arengus hüppeline (pea viiekordne) kasv 4,16 mm/100'000 tsükli järel

Eelnev illustreerib ilmekalt olukorda, et vesi peab saama teekatendist välja kiiresti, s.t see ei tohi jääda katendikihtidesse ega vahetult nende alla pikalt seisma, nagu on kujutatud joonisel 1.7. Selle kõrvale võib asetada ka joonise 1.8 allikast [6], mis illustreerib halvasti ja hästi dreenuitud killustikaluse käitumist.

Arvatavasti kõik eelnev on ka põhjuseks, miks AASHTO normides öeldakse, et suurepärase olukorra saavutamiseks (mis kehtib peateedele) peab killustikalusesse sattunud vesi (ükskõik, mis päritoluga) olema eemaldatud täielikult 2 tunni jooksul. Allikas [7] soovib isegi kriteeriumit, et vähemalt 95% vabast veest oleks eemaldatud vähem kui 1 tunniga.



Joonis 1.6. Rootsis HVSiga tehtud katse, mis iseloomustab vee kahjulikku mõju katendi toimivusele. [5]



Joonis 1.7 ja 1.8. Seisev vesi teekatendis või selle all põhjustab teekatendi kiire lagunemise. [8 ja 6]

1.2 Dreenivuse tagamine

Eelnevalt nähtus, et teekonstruktsioonide drenaaž on teede säilimiseks ja teede eluea tagamise seisukohalt elulise tähtsusega. Järgnevalt käsitletakse, tuginedes peamiselt kolmele allikale, kuidas tagada seda, et teekatendisse sattunud vesi saaks sealt kiiresti ära drenituda.

1.2.1 Huang, H. Y. Pavement Analysis and Design [9]

Drenaaž on katendi projekteerimisel üks olulisemaid faktoreid. Pikalt on arvatud, et kui katendikihid on arvutatud, arvestades küllastunud tingimusi, piisavalt tusedateks, ei ole drenaaž kuigi vajalik. See arvamus võis kehtida aegadel, mil liikluskoormused olid väiksemad. Teljekoormuste kasvades ja telgede arvu suurenedes kahjustab vesi teekatendeid läbi kõrge hüdrodünaamilise rõhu. Teoreetiliselt teekatendis olevat drenaaži ei vajata, kui infiltratsioon katendisse on väiksem, kui killustikaluse ja selle alla jäävate kihtide filtratsioonivõime. Kuna infiltratsioon varieerub väga suurtes piirides, tuleks drenikihte kasutada kõikides olulistes teekatendites.

1.2.1.1 Vee mõju

Vesi siseneb teekatenditesse läbi pragude, vuukide, katte ja peenarde või siis altpoolt läbi kapillaartõusu, survele vee, allikate (joonis 1.61). Kui vesi jääb katendisse kinni, hakkavad toimuma järgnevad protsessid:

- sideainega sidumata kihtide tugevus väheneb;
- jäikade katendite alt „pumbatakse“ materjali välja põhjustades pragunemisi;
- liikluse poolt põhjustatud kõrge hüdrodünaamilise jõu tagajärjel „pumbatakse“ peenosiseid killustikalusesse, mis alandab kihi ja kogu tee kandevõimet;
- külmadel aladel tekitab külmakerkeid ja sulades kandevõime vähenemist;
- punduvate pinnaste puhul kerkib tee ebaühtlaselt;
- asfaltkatte pidev kokkupuude veega põhjustab kivimaterjali irdumist.

1.2.1.2 Vee liikumine

Vee liikumine katendites võib toimuda gravitatsiooniga, kapillaarides, auru liikumisel või nende kombineerimisel. Jämedateralistes materjalides põhjustab vee liikumist gravitatsioon, peeneteralistes enamasti kapillaarjõud. Kui ei toimu ei gravitatsioonilist ega kapillaarjõududest toimuvat vee voolu, liigub vesi auru kujul (erinevate rõhkude mõjul).

Gravitatsiooni mõjul liikuv vesi allub Darcy seadusele (veeküllastunud oludes, valem 1.1):

$$v = ki \quad (1.1)$$

kus

v – veevoolu kiirus,

k – filtratsioonimoodul,

i – hüdrauliline gradient, mis on kahe punkti kõrguse erinevus, mis on jagatud nende omavahelise kaugusega.

Voolu kiirust saab kasutada leidmaks väljavoolu hulka (valem 1.2):

$$Q = vA \quad (1.2)$$

kus

Q – väljavool, st vooluhulk ajaühikus,

A – voolamise ristlõike pindala.

Näide 1

Katend koos õhukese asfaltkatte ja killustikalusega asetseb 1,5 m paksusel liivakihil, mille filtratsioonimoodul on 0,046 m/ööp. Vee infiltreerumine on 0,15 m³/ööpäev/m². Pinnasvett liivakihi pole. Mis peab olema killustikukihi veemahtuvus?

Kuna liivakihi paksus võrreldes tee laiusega on väike, on mõistlik arvata, et vee voolamine läbi killustiku ja liiva toimub vertikaalselt, seega saab otseselt kasutada Darcy seadust. Kuna killustikukihi paksus on väike, on veesamba rõhk liiva peal praktiliselt null. Nii liivakihi peal kui põhjas on sama atmosfääriline rõhk, seega on kõrguste erinevus 1,5 m. Omavaheline kaugus on samuti 1,5 m ning seega on hüdrauliline gradient 1,5/1,5 = 1. Kui sama atmosfääriline rõhk esineb nii vaadeldava kihi peal kui põhjas, on hüdrauliline gradient alati 1 olenemata kihi paksusest.

Valemist 1.1 $v = 0,046 \cdot 1 = 0,046$ m/ööp, mis on sama, kui vooluhulk kiirus m³/ööpäev/m². Seega vajalik killustikukihi veemahtuvus on 0,15 – 0,046 = 0,104 m³/ööpäev/m².

Kui näites kasutatud liivakihi paksus oluliselt suureneb, muutub voolukanal sügavamale minnes laiemaks. Mida suurem ala on voolamisele avatud, seda suuremal määral saab toimuda infiltratsioon. Seega Darcy seaduse kasutamine dreensüsteemi projekteerimisel arvestades, et voolamine toimub vaid vertikaalselt, on konservatiivne lähenemine. Mitteküllastatud pinnases toimuva voolamise analüüs, arvestades kapillaarjõududega, on oluliselt keerukam. Nii veeläbilaskvus kui hüdraulilise gradient, sõltuvalt kapillaarsusest, on funktsioonid niiskussisaldusest ja on mõjutatud ka mineviku niiskustingimustest.

On hästi teada, et niiskus liigub auru kujul soojemast keskkonnast külmema poole. Aur kondenseerub katte (või ka katendi) alla, kui see (öö jooksul) jahtub. Külma kliimaga piirkondades toimub ka allapoole suunatud auru liikumist sooja asfaltkatte alt külmematesse kihtidesse suvel ja vastupidine talvel. Taoline ülespoole liikuv veeaur suurendab killustikaluste veesisaldust.

1.2.1.3 Veehulkade leidmine

Vesi siseneb katendisse läbi infiltratsiooni, pinnasvee sisseimbumise ja jääläätsede sulamisvete. Kui vähegi võimalik, peaks pinnasvee tase olema nii madal, et see ei saaks imbuda teekatendisse. Kui see pole võimalik, tuleb vastav veehulk võtta arvutustes arvesse. Arvesse tuleb võtta ka sulamisvesi. Kuna on väga ebatõenäoline, et sulamis- ja pinnasvee imbumine toimuvad samaaegselt, tuleb võtta arvesse nendest suurem.

• Infiltratsioon tee pinnalt

Kui pinnasvee tase on teekatte pinnast suhteliselt sügaval, on infiltratsioon tõenäoliselt ainus veehulk, mida drenaaži projekteerimisel tuleb arvesse võtta. Cedergren soovitas aastal 1973, et infiltratsiooni suurus tuleks leida korrutades maksimaalse 1 tunni/1 aasta sagedusega (*maximum 1-h-duration/1-yr-frequency percipitation – see on arvutusvihma intensiivsus korduvusega 1 kord aastas*) sademete hulk koefitsendiga 0,33...0,5 asfaltkatete osas ja 0,5...0,67 betoonkatete osas.

Eestis ei kasutata sademete hulga iseloomustamiseks 1 tunni maksimaalset sadu, vaid maksimaalset sademete hulka ööpäevas (joonis 1.9). Hinnangu andmiseks võib Eestis kasutada suurust 25 mm/h.

On leitud, et vihmasaju pikkus on kriitilisem faktor, kui intensiivsus. Infiltreerumise suurust saab otseselt seostada pragude arvu ja nende suurusega. Arvestuslikult on vee infiltreerumise määr $I_c = 0,22 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}$ ühe prao kohta. Infiltratsiooni suurust pindalaühikule saab arvestada valemiga 1.3:

$$q_i = I_c \left(\frac{N_c}{W_p} + \frac{W_c}{W_p C_s} \right) + k_p \quad (1.3)$$

kus

q_i – infiltreerumine pindalaühiku kohta;

I_c – praost infiltreerumise kiirus;

N_c – pikipragude arv;

W_p – teekatte laius;

W_c – põikpragude arv;

C_s – põikpragude omavaheline kaugus;

k_p – infiltratsioon läbi terve asfaltkatte.

Valemit 1.3 saab lihtsustada arvestades, et $N_c = N + 1$, kus N on sõiduradade arv, $W_c = W_p$, $k_p = 0$ ning praost infiltreerumise kiirus on $0,009 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ning saades sellest valemi 1.4.

(1.4)

$$q = q_i W_p = 0,009 \left(N + 1 + \frac{W_p}{C_s} \right)$$

kus

q – vee sissevooluhulk teekatendisse $\text{m}^3/\text{h}/\text{jooksev meeter}$;

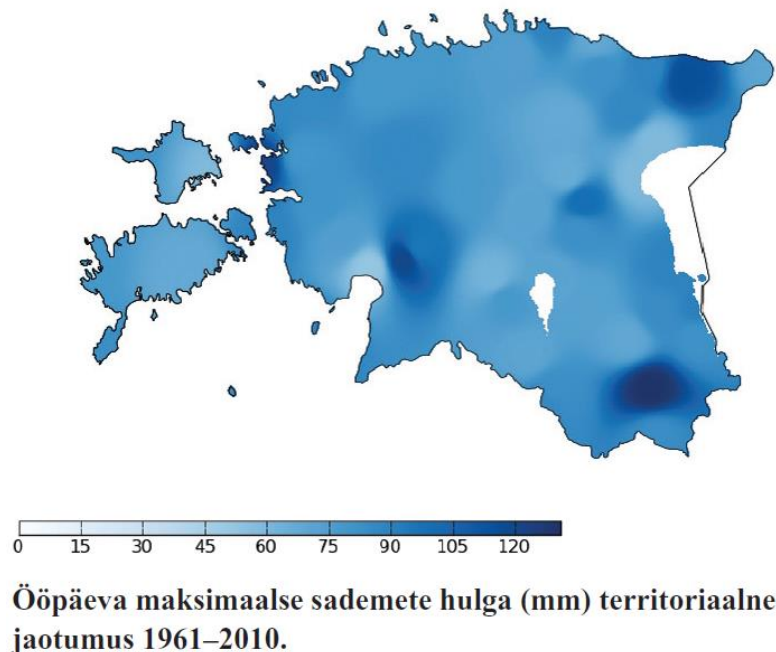
C_s – vuukide vahekaugus betoonkatete osas ja asfaltkatetele kasutatakse konstanti 12,2 m.

Näide 2

Hinnata tee alusesse jõudva vee hulka, kasutades eelpool toodud Cedergreni soovitusi ja arvutusvalemit 1.4, kui tegemist on III klassi maanteega (arvestusega, et infiltratsioon teepeenardelt on sama, mis sõiduteelt ehk teekatte laiuks võetakse 10 m).

Valemist 1.4: $q = 0,009 \cdot (2 + 1 + 10/12,2) = 0,035 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$; $q_i = 0,0035 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ($0,08 \text{ m}^3/\ddot{o}\ddot{o}p/\text{m}^2$), mis võrdub 3,5 mm/h või 0,08 m/ddot{o}p. Arvutuses arvestati ka peenarde mõju tingimusel, et drenikiht ehitatakse kogu tee laiuks.

Cedegren soovitas asfaltkatetel kasutada koefitsenti 0,33...0,5. Eestis võib 1h/1aasta sademetehulgaks arvestada 25 mm/h, mis annab tulemuseks 8,25...12,5 mm/h, mis on märgatavalt suurem kogus, kui valemiga 1.4 arvutatud. Kirjanduses soovitatakse kasutada Cedergreni lähenemist kohtades, kus mõõteandmeid ei ole saadaaval või on kesised. Üldiselt peaks kasutama siiski valemit 1.4, kuna see on ratsionaalsem ja korreleerub paremini mõõtmistulemustega.



Joonis 1.9. Ööpäeva maksimaalse sademete hulga jaotumus Eestis. [Riigi Ilmateenistus]

- **Pinnasvee sisseimbumine**

Eelkõige on pinnasvee sisseimbumine probleemiks siis, kui tee on rajatud süvendisse ning drenikiht peab „tegelema“ ka nõlvast väljuva veevoolu ärajuhtimisega. Taolist olukorda täpsemalt ei käsitleta, kuna seda tuleb põhjamaistes oludes projekteerimise käigus vältida, st pinnasvee sattumist nõlvast teekatendisse ei tohi lubada, vaid sellega tuleb tegeleda eraldi ehk tuleb rajada süvadrenaaz. Juhiseid süvadrenaazi projekteerimiseks leiab näiteks allikast [38].

- **Sulamisvete mahutamine**

Konsolidatsiooniteooria põhjal on välja töötatud lihtne graafik (joonis 1.10), hindamaks sulamisvete sisseimbumist jääläätsedest. Imbumine on maksimaalne kohe pärast sulamist ning väheneb oluliselt pärast seda. Seega arvestatakse, et maksimaalne vee hulk q_m esineb vaid väga lühikest aega ning arvestatakse ühe päevaga vahetult sulamise järgselt.

Vabanenud vee hulk q_m sõltub keskmisest külmakerkest ja filtratsioonimoodulist k ning konsolideeruvast survest σ_p (muldkeha peal/katendi all). Keskmise külmakeerge saadakse laboritulemustest või hinnanguna tabelist, mis on esitatud joonisel 1.11. Jooniselt 1.10 σ_p saadakse arvestades teekatendi raskust ning on väljendatud ühikuna psf (1 psf = 0,048 kPa); q_m ühikuks on $\text{ft}^3/\text{ööpäev}/\text{ft}^2$ (umbkaudu $1 \text{ ft}^3/\text{ööpäev}/\text{ft}^2 = 0,3 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}^2$) ja filtratsioonimooduli k ühikuks on $\text{ft}/\text{ööpäev}$ ($1 \text{ ft}/\text{ööpäev} = 0,00035 \text{ cm/s} = 0,3 \text{ m}/\text{ööp}$).

Kuna joonisel 1.10 kasutatakse teisi ühikuid, kui Eestis ning ka külmakerkelisuse hindamine (joonisel 1.11) ei sobitu täielikult Eesti süsteemiga, saab sulamisvete mahutamise osa siinkohal käsitleda vaid suurusjärgude hindamiseks või alternatiivse lähenemisena.

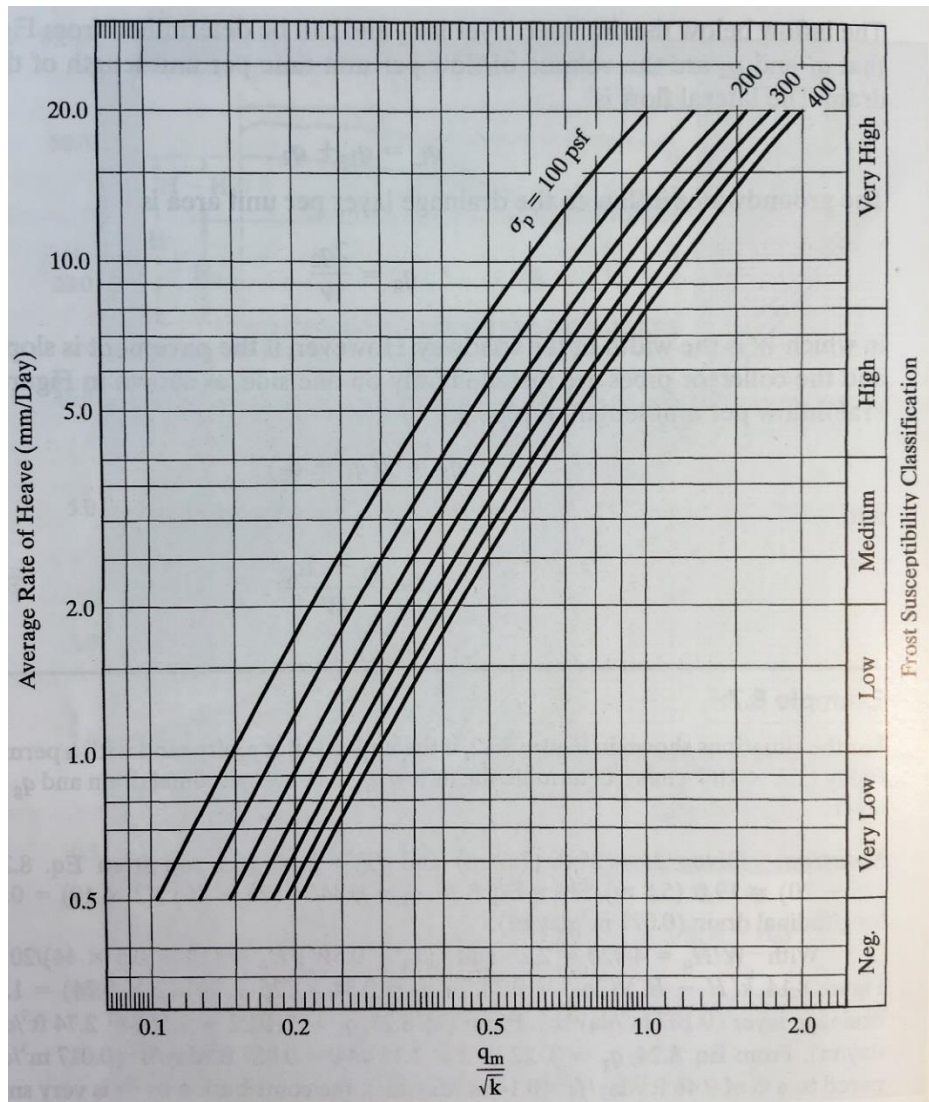
Näide 3

Muldkehas on tolmlüiv (*silty sand*, SM jooniselt 1.11), milles alla 0,02 mm osiseid on 9% ja mille filtratsioonimoodul on 0,1 m/ööp (0,33 ft/ööp). Katendiks on 10 cm asfaltbetoon, 20 cm killustik ja 20 cm keskliivast drenikihti. Leida katendisse tungiva sulamisvee maksimaalne hulk.

Katendi raskuse arvutamiseks kasutatakse siin järgmisi mahumasse:

- asfaltbetooni mahukaal $2,4 \text{ t/m}^3$
- tihendatud killustiku mahukaal $1,8 \text{ t/m}^3$
- tihendatud liiva mahukaal $1,8 \text{ t/m}^3$

Seega on katendi raskus muldkehale $0,96 \text{ t/m}^2$, mis on ca 9,41 kPa, mis on ca 200 psf. Jooniselt 1.10 $q_m/\sqrt{k} = 0,76$, teisisõnu $q_m = 0,76 * \sqrt{0,34} = 0,44 \text{ ft}^3/\text{ööpäev}/\text{ft}^2$, mis on umbes $0,13 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}^2$ ehk samas suurusjärgus läbi katte imbuva veega eelmises näites. Seega võib sulamisest tingituna sattuda teekatendisse korraga märkimisväärne hulk vett.



Joonis 1.10. Sulamisvete hulga leidmiseks kasutatav graafik. Umbkaudu $1 \text{ ft}^3/\ddot{o}\ddot{o}p/\text{ft}^2 = 0,3 \text{ m}^3/\ddot{o}\ddot{o}p/\text{m}^2$, $1 \text{ ft}/\ddot{o}\ddot{o}p = 0,3 \text{ m}/\ddot{o}\ddot{o}p$, $1 \text{ psf} = 0,048 \text{ kPa}$.

Unified classification		Percent passing 0.02 mm	Heave rate (mm/day)	Frost susceptibility classification
Soil type	Symbol			
Gravel and sandy gravel	GP	0.4	3.0	Medium
	GW	0.7–1.0	0.3–1.0	Negligible to low
		1.0–1.5	1.0–3.5	Low to medium
		1.5–4.0	3.5–2.0	Medium
Silty and sandy gravel	GP-GM	2.0–3.0	1.0–3.0	Low to medium
	GW-GM	3.0–7.0	3.0–4.5	Medium to high
	GM	7.0–10.0	4.5–3.0	High to medium
Clayey and Silty gravel	GW-GC	4.2	2.5	Medium
	GM-GC	15.0	5.0	High
	GC	15.0–30.0	2.5–5.0	Medium to high
Sand and gravelly sand	SP	1.0–2.0	0.8	Very low
	SW	2.0	3.0	Medium
Silty and gravelly sand	SP-SM	1.5–2.0	0.2–1.5	Negligible to low
	SW-SM	2.0–5.0	1.5–6.0	Low to high
	SM	5.0–9.0	6.0–9.0	High to very high
	SM	9.0–22.0	9.0–5.5	Very high to high
Clayey and silty sand	SM-SC	9.5–35.0	5.0–7.0	High
	SC	9.5–35.0	5.0–7.0	High
Silt and organic silt	ML-OL	23.0–33.0	1.1–14.0	Low to very high
	ML	33.0–45.0	14.0–25.0	Very high
	ML	45.0–65.0	25.0	Very high
Clayey silt	ML-CL	60.0–75.0	13.0	Very high
Gravelly and sandy clay	CL	38.0–65.0	7.0–10.0	High to very high
Lean clay	CL	65.0	5.0	High
	CL-OL	30.0–70.0	4.0	High
Fat clay	CH	60.0	0.8	Very low

Joonis 1.11. Joonise 1.10 abitabel pinnase külmakerkelisuse hindamiseks.

• Teekatendisse siseneva vee koguhulk

Vesi siseneb teekatendisse läbi asfaltkatte ja peenarde (ehk teekonstruktsiooni pealt), pinnasveena näiteks süvendites või läbi survealise vee ja sulamisvetena (kaks viimast ei toimi samaaegselt, seega valitakse suurem. Projekt tuleb koostada nii, et survealine vesi ega pinnasvesi teekatendisse ei pääseks). Katendisse siseneva vee hulk summeeritakse ning tulemusest lahutatakse väljavool läbi muldkeha pinnase, mis sõltub pinnase filtratsioonimoodulist ja pinnasvee tasemest. Muldkehast väljavoolu leidmist käsitletakse peatükis 1.2.3.

Oletades, et muldkehasse ei ulatu pinnasvee tase, saab kasutada lihtsat, kuid konservatiivset lähenemist, hindamaks väljavoolu, võttes hüdraulilise gradiendi üheks. Seega on väljavool muldkehast võrdne pinnase filtratsioonimooduliga, nagu arvutati näites 1 (reaalsuses on mõjutavaid tegureid siiski oluliselt rohkem). Ehk kui muldkeha pinnase filtratsioonimoodul on näiteks 0,5 m/ööp, siis väljavool muldkehast on 0,5 m³/ööp/m².

Näide 4

Leida näidete 2 ja 3 põhjal vajalik drenkihi mahutavus:

- Näitest 2 tuli sissevool läbi teekatte $q_i = 0,08 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}^2$;
- Näitest 3 tuli sissevool sulamisest $q_m = 0,13 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}^2$. Lisaks võiks veel arvestada sissevoolu pinnasveest, kuid juhul, kui see on suurem, kui sulamisest vabanev veehulk.

Väljavoolu kiirus on võrdne pinnase filtratsioonimooduliga, milleks oli näites 3 0,1 m/ööp (0,1 m³/ööpäev/m²), mis suudab võtta vastu kogu teekattest läbi tuleva veehulga.

Dreenkiht peab töötama ka siis, kui pinnas sulab ehk läbi muldkeha vett ära juhtida ei saa. Väljavoolu võimalust läbi pinnase võidakse ka ignoreerida (eriti, kui pinnasvee tase on kõrgel – näiteks niiskuspäikkonnas 3) ning seega peaks kogu veehulga mahutama dreenkiht. Kui olukord on selline, siis vee vool dreenkihti on $0,21 \text{ m}^3/\text{ööpäev}/\text{m}^2$. Dreenkihi arvutuste jaoks (näide 5) tuleb see korrutada ühele poole jääva tee laiusel. Näiteks kui tee kogulaius on 10 m, aga tee on kahepoolse kaldega, kandub pool veehulgast ühele, pool teisele poole ja seega saadakse $q_L = 0,21 \cdot 5 = 1,05 \text{ m}^3/\text{ööp}/\text{m}$.

1.2.1.4 Dreenkihi mahtuvuse arvutus

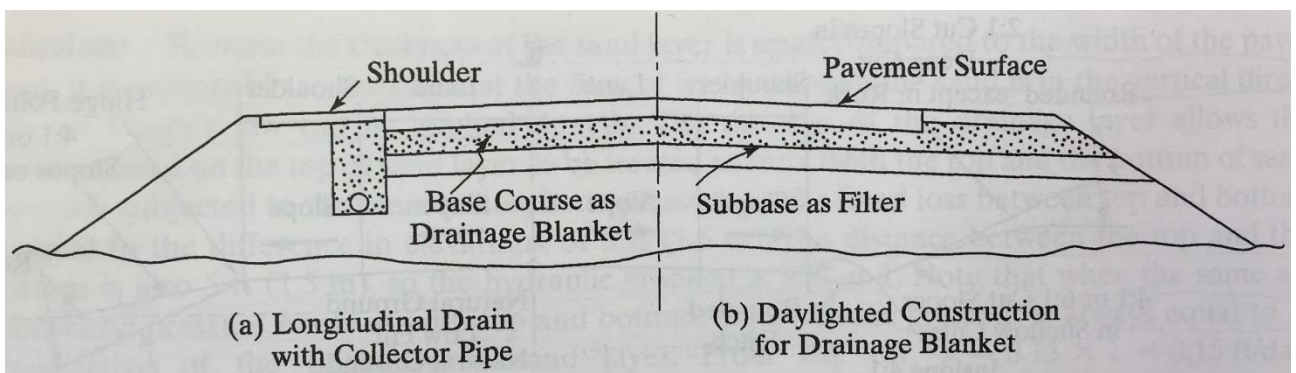
Sisuliselt on dreenkihi rajamiseks kolm võimalust – kas teha see kogu tee laiusena väljapääsuga nõlvadele, rajada dreenkihi äärtesse pikidrenaaž (joonised 1.12 ja 1.15), või teha väljapääsud põiktorudega, mille osas on allikas [9] esitanud joonistel 1.13 ja 1.14 ja allikas [11] joonisel 1.16 olevad variandid. Lisaks on allikas [11] esitanud joonisel 1.17 erinevad pikidrenaaži variandid.

Minimeerimaks dreenkihti sattuva peenosise hulka, peavad dreenkihti ümbritsevad materjalid vastama filterkriteeriumile või materjal peab olema ümbritsetud eraldava geotekstiiliga, s.t vee liikumine teekonstruktsioonis ei tohi põhjustada erinevate materjalide (konstruktsioonikihtide) omavahelist segumist. Pikidrenaaži kasutamine on töökindlam ja võib osutuda majanduslikult otstarbekamaks, kuna nõlvale avatud dreenkihiga võib tekkida probleeme seoses ääre (nõlva) ummistumisega nii ehitamise kui hooldamise ajal. Kuna avatud dreenkiht on laiem, siis seoses sellega on ka hüdrauliline gradient väiksem ja vee äravoolu teekond pikem, mis omakorda nõuab suurema filtratsioonimooduliga materjali või paksema kihipaksuse kasutamist.

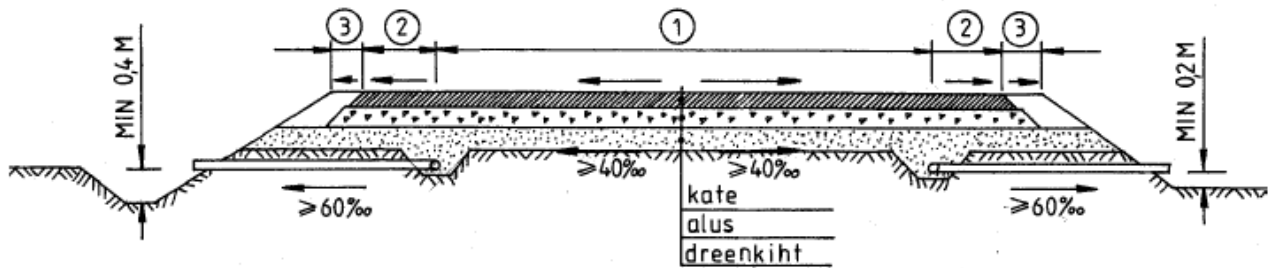
Dreenkihiks võib lugeda ka otse asfaltbetooni all olevat killustikukihti, kuid kuna on ülimalt oluline, et killustikukiht püsiks võimalikult kuivana, peab ka selle all olev kiht olema dreeniv, võimaldamaks killustikust kiiret vee äravoolu. Mida parem on materjali filtratsioonimoodul, seda kiiremini vajub vesi kihi põhja ning kui sealt edasi piisavalt kiiret vertikaalset äravoolu ei toimu, hakkab vesi liikuma horisontaalselt. Kiirendamiseks killustikaluse kuivamist, peaks selle all olema piisava dreenivusega materjal. Kui muldkehas kasutatav materjal ei ole filtreeruv või on selle filtratsioonimoodul madal, siis tuleks kasutada dreenkihti, mille vajalikud veejuhtivusomadused tulenevad arvutustest.

Muldkeha ja katendi vahele võib paigutada vett halvasti läbilaskva või läbilaskmatu kihi, mistõttu vesi saab liikuda vaid horisontaalselt kas nõlvadele või pikidrenaaži.

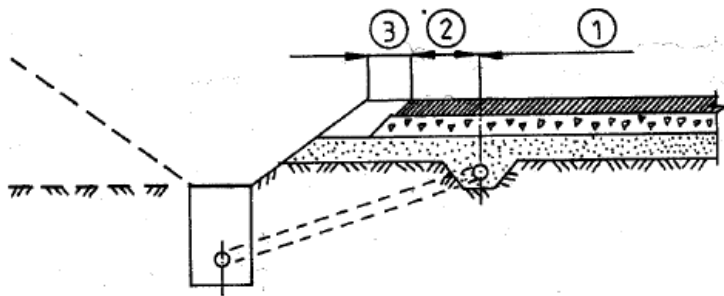
Traditsioonilise pikidrenaaži asemel on võimalik kasutada ka geosüntetikast dreene (joonis 1.18) ja dreenkihi asemel geosüntetikast dreenmatte (joonis 1.19). Mõlemale kehtivad vee ärajuhtimist silmas pidades samad arvutuspõhimõtted, mis mineraalmaterjalidest kihtidele. Samaaegselt on võimalik kasutada geosüntetikast dreene ka kõrge pinnasveetaseme alandamiseks.



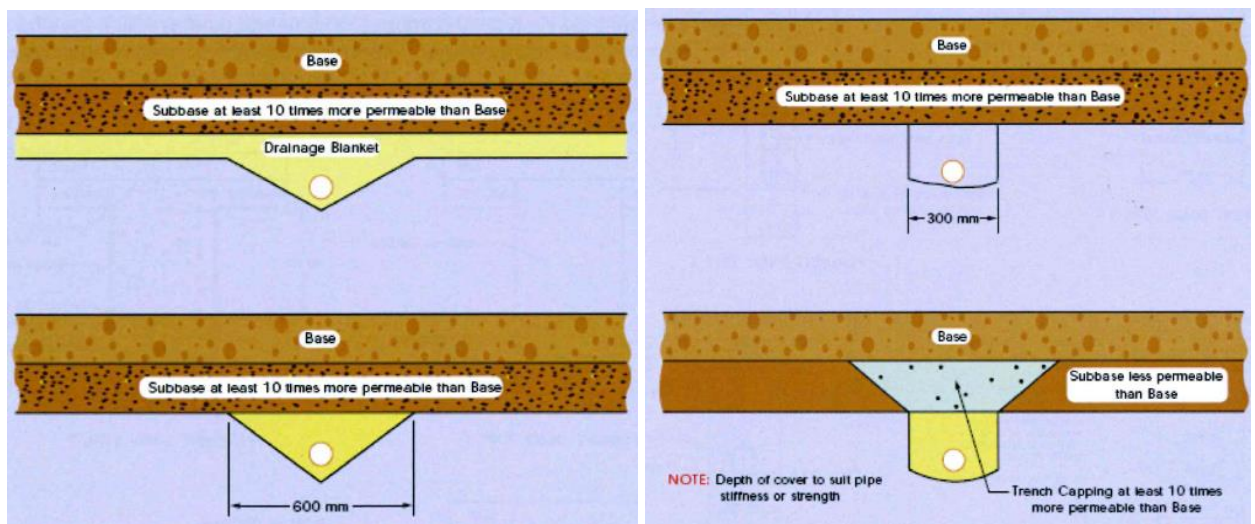
Joonis 1.12. Dreenkihi lahendused. [9]



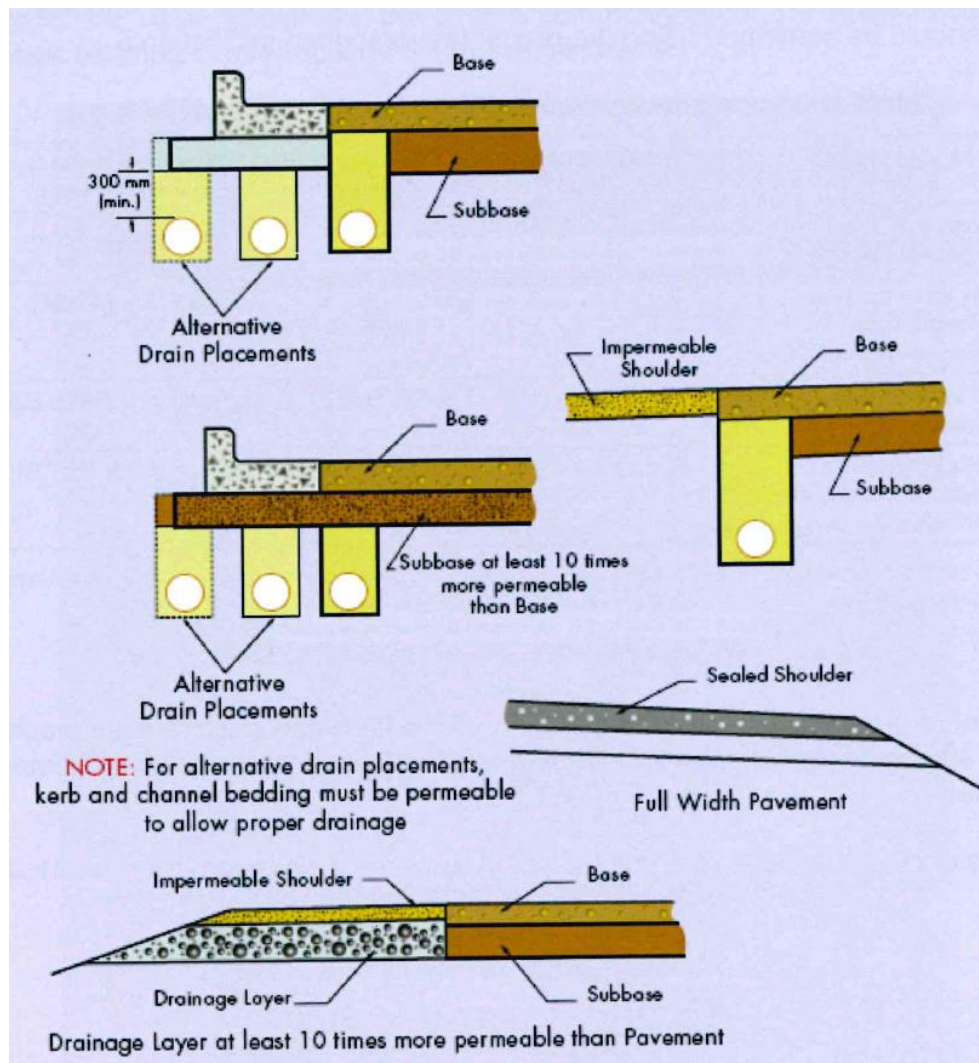
Joonis 1.13. Dreenkihi lahendus allikast [10].



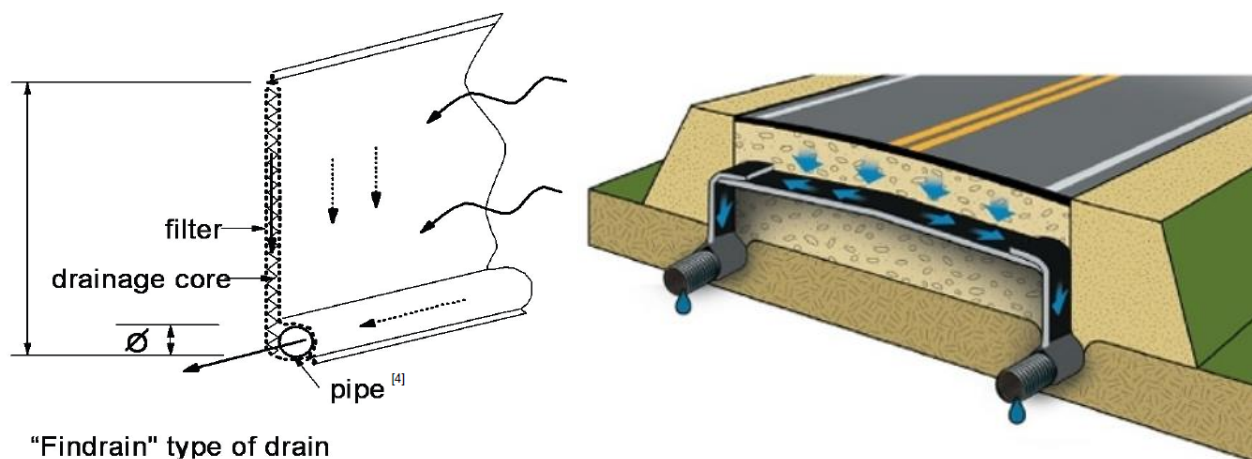
Joonis 1.14 ja 1.15. Näidatud pikidrenaaž võib toimida (tegelikult neid enamasti selletarbeks tehaksegi) ka pinnasvee taseme alandamiseks, mis võimaldab säästa kraavide kaevemahtu ning kaudselt tõsta ka liiklusohutust. Negatiivse poolena tekib nende keerukam hooldus võrreldes avatud kraavidega. [Sven Sillamäe foto]



Joonis 1.16. Lehtilahendused vee dreenkihist väljasuunamiseks. [11]



Joonis 1.17. Pikidreeni paigaldusvariandid. [11]



"Findrain" type of drain

Joonised 1.18 ja 1.19. Geosüntetikast pikidreen allikatest [Enkadrain®] ja [www.soleno.com].

Dreenkihi ja piki- ja/või põikdrenaaži kasutamise puhul vooluturu läbimõõdud tuleb määrata lähtudes sellest, et väljavool oleks suurem, kui sissevool. Dreenkihi osas on kaks arvutusnõuet. Esimene on see, et dreenkihis vee äravool „normaalolukorra“ tingimustes (ing. *steady-state capacity*) peab olema suurem, kui sissevool. Teiseks mahtuvus suurvee korral (ing. *unsteady-state*

capacity) peab olema selline, et vesi saaks voolata ära kiiresti peale igat (suurt/erakordset) vihma sadu.

- **Vee äravool „normaaltingimustes“ (steady-state flow)**

Joonisel 1.20 on kujutatud dreni parameetreid. Vee äravoolu arvutused saab teha kasutades valemit 1.5.

$$q = kH \left(S + \frac{H}{2L} \right) \quad (1.5)$$

kus

q – dreni mahtuvus/drenihist äravool (ing. *discharge capacity*);

k – drenis oleva materjali filtratsioonimoodul;

S – dreni kalle ($S:1$);

H – dreni paksus;

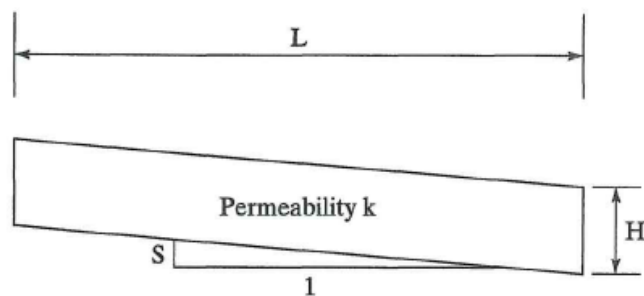
L – dreni laius;

Valem 1.5 kohaselt on dreni mahtuvus/drenihist äravool seotud kahe nüansiga:

- esiteks toimub vee äravool läbi kihipaksuse H hüdraulilise gradiendiga S ;
- teiseks kehtib alale $H/2$ hüdrauliline gradient H/L .

Kui $S = 0$, siis $q = 0,5k \cdot H^2/L$, mis on otsene Darcy seaduse rakendus eeldades, et dreni ühes otsas on vee kõrgus dreni ülaservas (peal) ja teisel pool dreni allosas (põhjas) ning seega on keskmine vee äravoolu ala H/L .

Dreni mahtuvus q peab olema suurem, kui $q_d \cdot L$ (q_d on dreni siseneva vee hulk, mida käsitleti peatükis 1.2.1.3). Kui muldkeha on dreni koos vee väljapääsu võimalusega, peab dreni mahtuvus olema suurem, kui dreni siseneva vee hulk miinus vee väljavool muldkeha kaudu.



Joonis 1.20. Dreni arvutamiseks kasutatavad parameetrid. [9]

- **Vee äravool suurvee korral (unsteady-state flow)**

Unsteady-state flow on defineeritav drenimise võimekusena, mis on drenitud vee maht peale vihmajärgse lõpu ja dreni veemahtuvuse vaheline seos. Casagrande ja Shannon esitasid aastal 1952 valemi, mille abil arvutada aeg, millal on 50% veest drenitud (valem 1.6):

$$t_{50} = \frac{n_e L^2}{2k(H + SL)} \quad (1.6)$$

kus

t_{50} on aeg, millal 50% veest on drenitud;

n_e on efektiivpoorsus, st poorsus, mida mööda saab vesi voolata. Fraktsioneeritud killustike puhul (nõ „open-graded“ materjalidele) on efektiivpoorsuseks kogu materjali poorsus, kuid liivadel võib esineda olukorda, kus osa poore pole vee liikumisele avatud, mistõttu ei saa selle osa poorsusega arvestada.

Algselt soovitasid Casagrande ja Shannon, et 50% veest (võrreldes veeküllastunud olekuga) oleks drenitud 10 päeva jooksul, kuid reaalsuses on taoline nõue eriti tänapäeval raskeliiklusega teedele ebapiisav, sest kui 50% veest saab drenitud alle 10 päeva jooksul, siis kogu vee eemaldumiseks kulub aega mitmeid kuid. Eelkõige peetakse siin silmas vee äradreenimist killustikalusest.

AASHTO normid jaotavad vee ärajuhtimise viide kvaliteediklassi – suurepärase, hea, rahuldava, halb ja ebapiisava. Igale klassile vastab minimaalne filtratsioonimoodul ning aeg, mille jooksul peab vesi olema vaadeldavast materjalist drenitud. Nõuded on esitatud tabelis 1.1, mille eestikeelne tõlge on selle all.

Tabel 1.1

Dreenivuse nõuded AASHTO järgi

<i>(AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993)</i>		
Quality of Drainage	Minimum Permeability	Time to Drain
Excellent	1000 ft/day	2 hours
Good	85 ft/day	1 day
Fair	11 ft/day	1 week
Poor	0.5 ft/day	1 month
Very Poor	0.02 ft/day	Water will not drain

Dreenivuse kvaliteet	Minimaalne filtratsioonimoodul	Dreenivuse aeg
Suurepärase	300 m/ööp	2 tundi
Hea	26 m/ööp	1 päev
Rahuldav	3,3 m/ööp	1 nädal
Halb	0,15 m/ööp	1 kuu
Ebapiisav	0,01 m/ööp	Dreenimatu

Saavutamaks killustikaluste suurepärase drenitust, peaks seal kasutatav materjal võimaldama vee ärajooksu 2 tunni jooksul ja omama filtratsioonimoodulit vähemalt 300 m/ööp. Peatükist 3.1.4 selgub, et fraktsioneeritud killustik täidab selle nõude. Kirjanduses on soovitatud isegi nõuet, et vähemalt 95% veest peab olema drenitud vähem kui 1 h jooksul (killustikalusest) [7].

Joonisel 1.21 on esitatud graafik määramaks drenivuse aega ükskõik mis küllastusastme juures. Küllastusaste U sõltub ajafaktorist T_f ja kaldefaktorist S_f , mis on defineeritud vastavalt valemitega 1.7 ja 1.8.

$$T_f = \frac{kHt}{n_e L^2} \quad (1.7)$$

$$S_f = \frac{LS}{H} \quad (1.8)$$

kus t on aeg, mil vihmaseadu lõppes ja drenimine algas. Suhe ajafaktori ja kaldefaktori vahel 95% drenivuse osas on esitatud joonisel 1.22.

Näide 5

Killustikukihi kalle on $S = 0,025$, paksus $H = 20$ cm, laius $L = 5$ m, filtratsioonimoodul $k = 400$ m/ööp ja poorsus $n_e = 37\%$. Leida kihi veemahutavus ja aeg, mil 50% ja 95% veest saab ära juhitud olukorras, kui kiht on täielikult veeküllastunud.

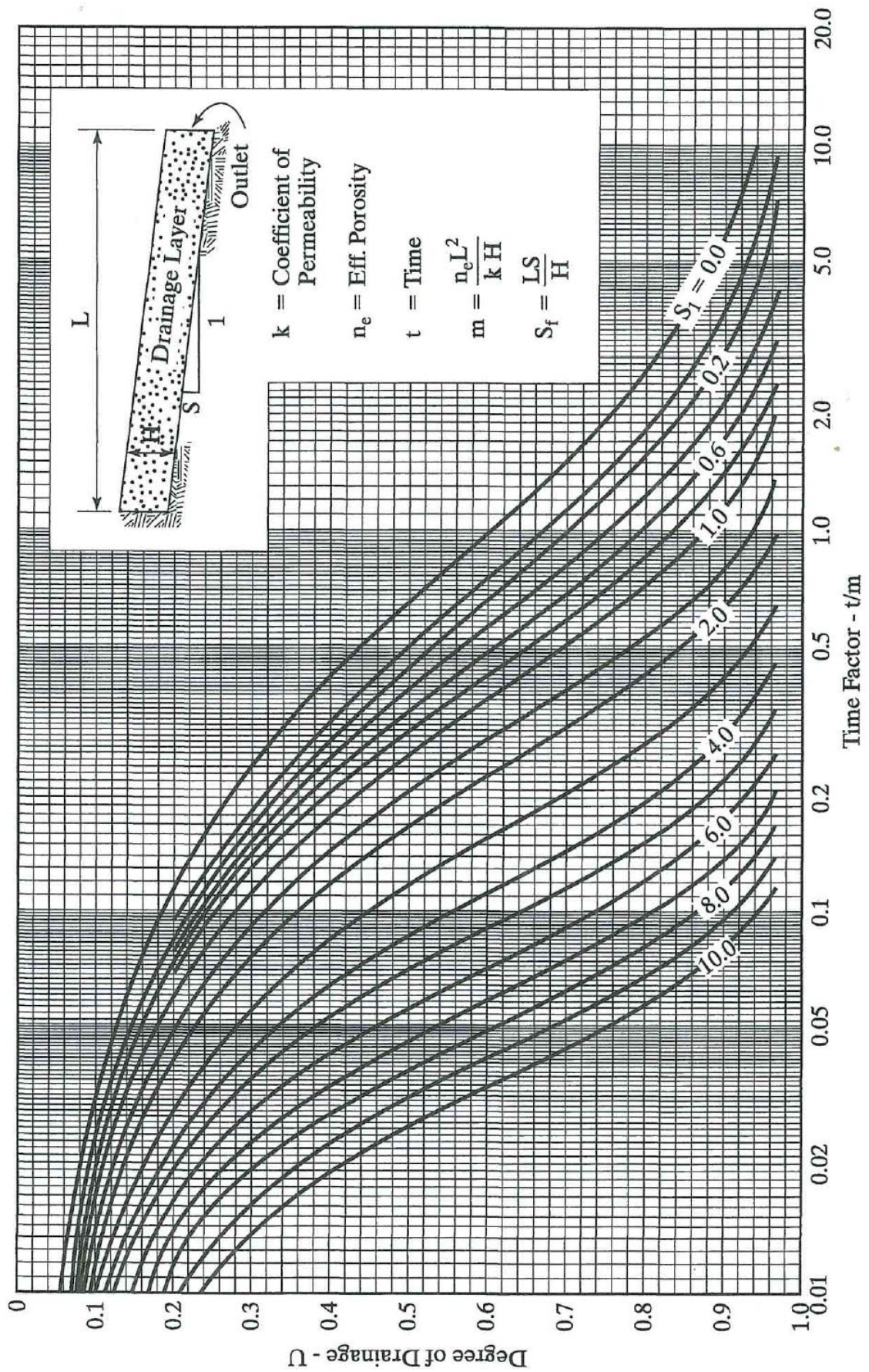
Valemist 1.5 $q = 400 \cdot 0,2 \cdot (0,025 + 0,2/10) = 3,6$ m³/ööp/m, mis on ca 3,4 korda suurem, kui näites 4 leitud siseneva vee hulk.

50% drenivuse aja leidmiseks saab kasutada valemit 1.6 või joonist 2.21. Valemist 1.6 saadakse $t_{50} = 0,37 \cdot 5^2 / [2 \cdot 400 \cdot (0,2 + 0,025 \cdot 5)] = 0,036$ päeva = 0,85 tundi.

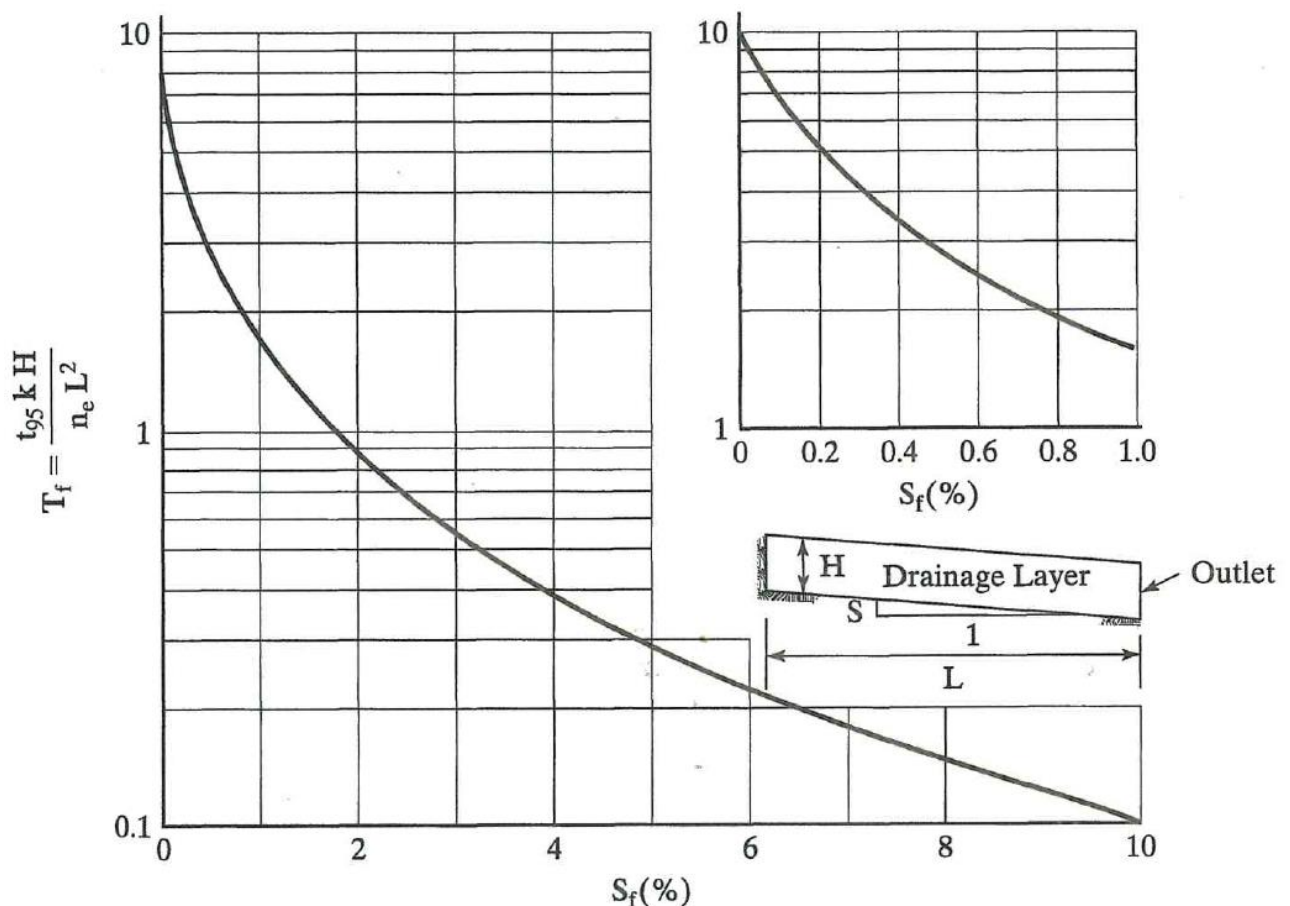
Joonisel 1.21 on graafik, mille abil saab leida vee väljumise aega ükskõik mis küllastumise puhul, samaaegselt tuleb kasutada ka valemeid 1.7 ja 1.8. 50% küllastuvus on $U = 0,5$, valemist 1.8 saadakse $S_f = 5 \cdot 0,025 / 0,2 = 0,625$ ning graafikult tuleb tulemus $t/m = 0,315$. Kasutades seda valemit 1.7 arvestusega, et graafikult saadi t asemel t/m , siis $T_f = 0,315 \cdot 0,37 \cdot 5^2 / (400 \cdot 0,2) = 0,036$ päeva, mis on sama tulemus, kui valemi 1.6 kasutamisel.

95% drenivuse osas saab kasutada paremini loetavat graafikut joonisel 1.22. Selleks saadakse valemist 1.8 $S_f = 0,625$ ning jooniselt 1.22 saadakse $T_f = 2,4$, või $t_{95} = 2,4 \cdot 0,37 \cdot 5^2 / (400 \cdot 0,2) = 0,28$ päeva (6,7 tundi), mis ei täida 1 h filtreeruvuse kriteeriumit. Järelikult tuleb kasutada killustikku, mille filtratsioonimoodul on $6,7 \cdot 400 = 2680$ m/ööp või paksemat kihipaksust. Kirjanduse andmetel on *open-graded* ehk fraktsioneeritud killustiku filtratsioonimooduliks vahemik 800...8000+ m/ööp (Austraalia ja Põhja-Ameerika sõelkõveraväljade põhjal), mistõttu ei peaks reaalsuses olema probleeme arvutatud drenivuse tagamiseks killustikalustes.

Näites 5 tehtud arvutus tehti arvestades sellega, et vesi peab liikuma horisontaalselt ega saa liikuda selle all olevatesse kihtidesse. Kui killustikukihi all on kasutatud ka drenikihti või muldkeha on filtreeruv, saab vesi liikuda ka vertikaalselt ning osa sisenevat vett saab väljuda sedakaudu. Arvutust on seega võimalik selle arvelt korrigeerida ning seda käsitletakse peatükis 1.2.4.



Joonis 1.21. Dreenihi drenivus erinevate küllastusastmete juures. [9]



Joonis 1.22. Graafik 95% drenivuse leidmiseks. [9]

• Pikidrenaaži arvutamine

Kui kasutatakse pikidrenaaži, siis drenikiht suunab kogutud vee sinna, mistõttu on vajalik kontrollida ka selle läbilaskevõimet. Kriitilisemates kohtades võidakse kasutada ka põikdrenaaži, s.t kohtades, kus tee piki- ja põikkalded on sellised, kus vesi kipub pigem voolama piki, kui risti teed (näiteks ka pikiprofiili murdekohad). Vee vastuvõtuosad on sellised torud, kuhu vesi saab sisse voolata (nt perforeeritud dreentorud). Süsteemi projekteerimisel peab arvestama järgnevate teguritega:

- väljaviikude asukohad ja nende omavahelised kaugused;
- kasutatava toru tüüp (kuidas kogub vett);
- torude asukohad plaaniliselt ja nende sügavused;
- torude kalded ja läbimõõdud;
- filterkiht ja/või -kangas toru ja/või pikidreeni ümber vältimaks ummistusi.

Tavaliselt piisab teekatendi konstruktiivsete kihtide kalletest ka torude jaoks, mistõttu võidakse need paigaldada lihtsalt vajalikule sügavusele. Minimaalseteks nõueteks on siledaseinalisele torule kaldeks 1% ja korrigeeritud torudele 2%. Seega kohtades, kus looduslikud kalded pole piisavad, tuleb need torude jaoks rajada. Toru vajalik läbimõõt ja veeläbilaskevõime sõltub muuhulgast ka kaldest ning mõnikord tuleb ka seetõttu rajada suuremad kalded, kui miinimum ette näeb.

Fakte dreentorudest:

- Dreentorude valmistusmaterjalideks on PE, PP ja PVC. Missugust materjali kasutatakse, on valmistajatehase eelistuse küsimus ja toimivuse suhtes see sisulist rolli ei mängi. Kõikidest lähtematerjalidest valmistatud torusid müüakse nii rullis kui lattidena.

- Dreentorud valmistatakse läbimõõtudega 63, 75, 90, 110, 125 ja 160 mm ning jäikusega kas SN4 või SN8. Teepeenardes (kohtades, kus liikluskoormus toru ei mõjuta), võib kasutada rõngasjäikust SN4, kuid kui dren on juba sõiduraja ääres (asfaltkatte all), tuleb kasutada SN8. Teoreetiliselt võiks kasutada D63 ja D75 torusid tee all ka rõngasjäikusega SN4, kuna seoses väiksema läbimõõduga on toru jäikus piisav.
- Torud rõngasjäikusega SN 4 on korrigeeritud sisepinnaga, tavaliselt tarnitakse rulli kujul ning tihti on nende ümber paigutatud ka filterkangas. Osadel põllumajanduslikult kasutatavatel dreentorudel on ümber kookoskiust filter, kuid see sobib kasutamiseks vaid turbas;
- Rullis tarnitud toru (SN 4) ei vaja pöörangukohtadesse kolmikuid, kuna on piisavalt painduv.
- Torud rõngasjäikusega SN 8 on topeltseinaga ja seega on sisesein sile, kuid seetõttu ei ole neid võimalik keerata rulli ja tarnitakse lati kujul. Taoliste torude osas on majanduslikult otstarbekam paigaldada filterkangas objektile, kuid on saadaval ka tehases kangaga ümbritsetud torusid.
- Torud läbimõõduga 63 mm, 75 mm ja 90 mm on olemas vaid rullis.

Joonisel 1.23 kujutatakse pikidrenaaži paigutusvõimalusi. Piirkondadesse, kus ei esine külma ning pinnasvesi on väga sügaval, sobib paigutusvariant „a“. Põhjamaistes oludes, kus talved on külmad ja/või soovitakse alandada kõrget pinnasveetaset, tuleb pikidrenaaži paigutada sügavamale. Nagu joonisel 1.23 kujutatud, on pikidrenaaži võimalikke vahekaugusi tee katte/tee ääre suhtes mitmeid. Kui drenaaž on täiesti tee ääres (peenra alla või isegi eemal), väheneb hüdrauliline gradient ja suureneb vee voolamise teekonna pikkus, mis võib nõuda parema filtratsioonimooduliga materjali kasutamist või drenkihiile paksemat kihipaksust.

Pikidrenaažis kasutatavad materjalid peavad olema nii hea filtratsiooniga, et drenkihist saaks vesi sinna vabalt voolata. Vajaliku filtratsioonimooduli saab arvestada kasutades Darcy seadust võttes hüdrauliliseks gradiendiks 1 või kasutades valemit 1.9.

$$k = \frac{\text{vee vooluhulk ühikulise pikkuse suhtes}}{\text{dreenkanali laius}} \quad (1.9)$$

Valemit 1.9 saab kasutada ka vajaliku drenkanali laiuse määramiseks, kui materjali filtratsioonimoodul on teada. Torude veeläbilaskevõime arvutamisel kasutatakse Manningu valemit (1.10).

$$Q = 86400 \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1.10)$$

kus

Q – vee läbilaskevõime torus (ing. *discharge capacity*, m/ööp);

n – Manningu koefitsient, mis oleneb toru materjalist, näiteks korrigeeritud toru on 0,016...0,02 ja siledapinnaline toru 0,008...0,012;

A – toru pindala (m²);

R_h – hüdrauliline raadius (m);

S – toru kalle (m/m);

Hüdrauliline raadius R_h on vooluala ja märja perimeetri vaheline suhe. Kui toru on täielikult veega täitunud, siis $A = \pi D^2/4$, märgunud perimeeter on πD ning R_h seega $D/4$, kus D on toru diameeter. Kasutades nimetatud seoseid valemis 1.10 ning arvestades, et $Q = q_L L_o$, saadakse valem 1.11.

$$nq_L L_o = 53 S^{0,5} D^{2,667} \quad (1.11)$$

kus

n – Manningu koefitsient;

q_L – vee hulk ($\text{m}^3/\text{ööp}/\text{m}$);

L_o – väljaviigutorude omavaheline kaugus (m);

S – toru kalle (m/m);

D – toru läbimõõt (cm);

Valem 1.11 näitab komponentide n , q_L , L_o , S ja D omavahelisi sõltuvusi. Teades nelja komponendi väärtust, saab ühe nendest arvutades leida. Näiteks vajalik dreentoru läbimõõt leitakse valemi 1.12 abil.

$$D = \left(\frac{nq_L L_o}{53 S^{0,5}} \right)^{0,375} \quad (1.12)$$

Näide 6

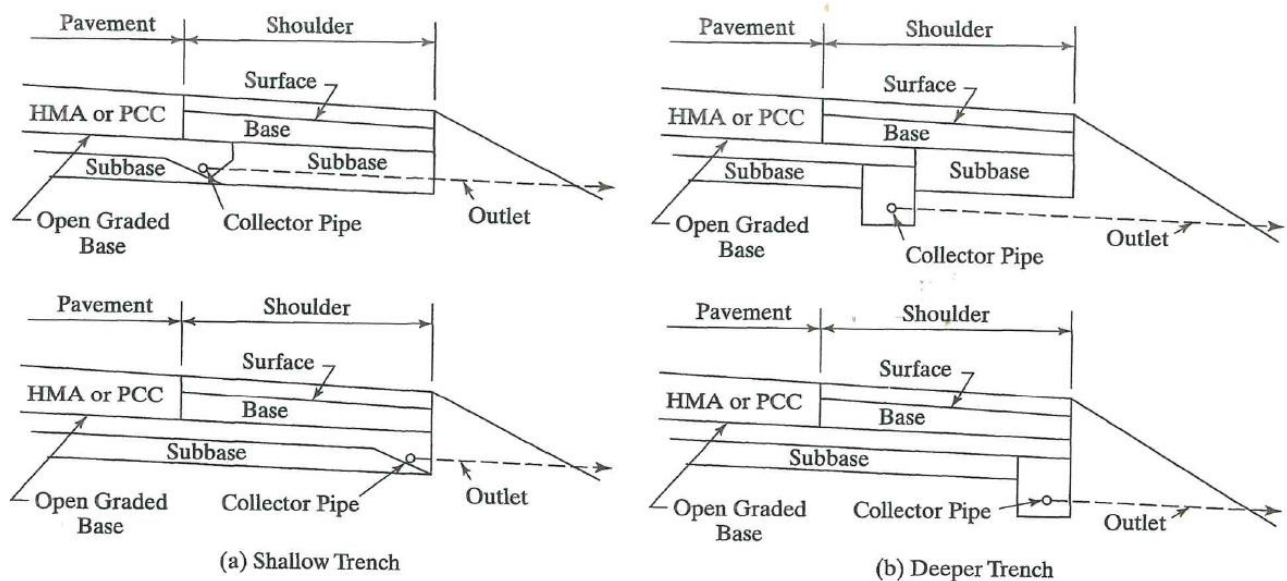
Siledaseinaline dreentoru, mille Manningu koefitsient on 0,01, paigaldatakse 2% kaldega pikidrenaaži kaevikusse. Väljaviigud on planeeritud iga 250 m tagant. Torusse siseneva vee hulk on $1,05 \text{ m}^3/\text{ööp}/\text{m}$ (näitest 4). Leia dreentoru vajalik läbimõõt.

Kasutamaks valemit 1.12 dreentoru läbimõõdu leidmiseks, on vaja kasutada järgmisi andmeid: $n = 0,01$, $q_L = 1,05 \text{ m}^3/\text{ööp}/\text{m}$, $L_o = 250 \text{ m}$, $S = 0,02$.

$$D = [0,01 * 1,05 * 250 / (53 * \sqrt{0,02})]^{0,375} * 100 = 67,5 \text{ mm}$$

Seega peaks minimaalselt kasutama 75 mm läbimõõduga toru (lähtudes sellest, mis läbimõõdudega torusid turul saadaval on), kuid arvutuse lähteandmetena oli kirjas, et toru on siledaseinaline. Tegelikult on D75 torud vaid korrigeeritud seinaga. Seega tuleb teha arvutus uuesti kasutades Manningu koefitsienti 0,02 ning tulemuseks saadakse, et vaja läheb 87,5 mm läbimõõduga toru. Seega on korrektne kasutada hoopis 90 mm läbimõõduga dreentoru.

Märkuseks veel niipalju, et käesolevas näites oli vee hulk üpriski tagasihoidlik. Kui torusse sisenevat vett on oluliselt rohkem, näiteks $3 \text{ m}^3/\text{ööp}/\text{m}$, on soovituslik teha väljaviike tihedamalt, kui iga 250 m tagant, sobilikud on näiteks 100...200 m.



Joonis 1.23. Pikirdeenitoru paigaldusvariandid. [9]

1.2.2 Australian Road Research Board Special report no 35. Subsurface drainage and road structures [12] – vesi läbi terve asfaltkatte

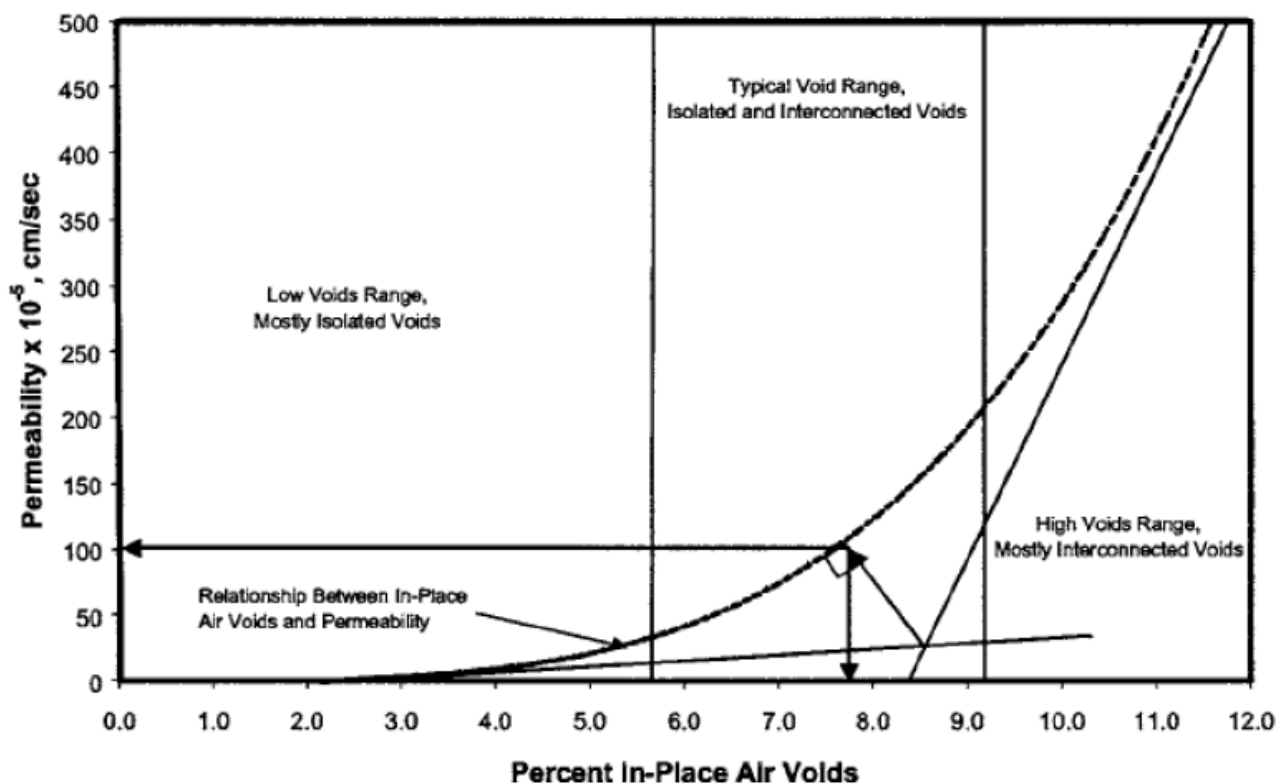
Aastal 1987 anti välja „Australian Road Research Board Special report no 35. Subsurface drainage and road structures“, kus muuhulgas käsitletakse seda, et ka läbi täiesti terve asfaltkatte pressitakse läbi vett, mida eelnevalt käsitletud lähenemine ei arvestanud.

Rehvirõhk 600 kPa tekitab märjal teekatte pinnal 60 m veesurve, mis väheneb kihi põhjas nullini, kuna alumise kihi veeläbilaskvus on (oluliselt) suurem, kui pealmisel. Asfaltkatte veeläbilaskvus sõltub poorsusest. Eestis peab asfaltbetoonkihi jäävpoorsus *surf* ja *bin* segudel jääma vahemikku 1,5...5% (vuugiproovis lubatakse kuni 8%) ning SMA segudel 2...5% (SMA 8 puhul kuni 6% ning vuugiproovides kõikidel seguliikidel 8%).

Allika [13] kohaselt on asfaltkatte veeläbilaskvus väga väike, kui poorsus langeb alla 6%, olles vahemikus 7...8% tõuseb see järsult ja üle 8% puhul on veeläbilaskvus suur.

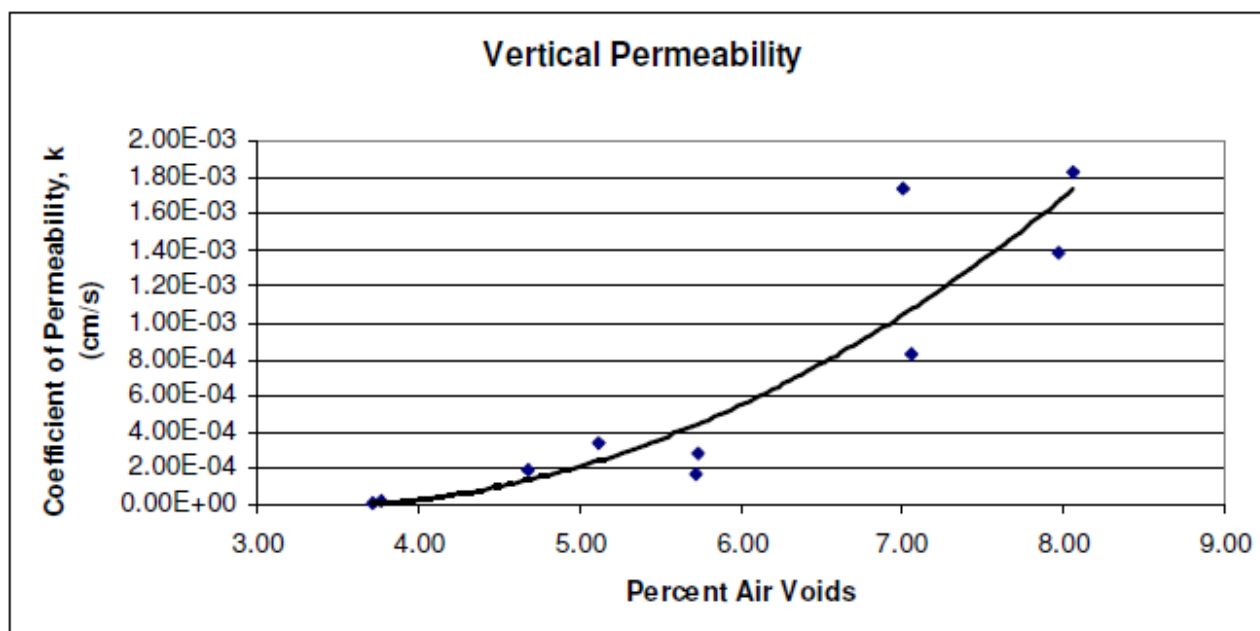
Graafiliselt on poorsuse ja veeläbilaskvuse seos toodud välja allikas [14], kust pärineb joonis 1.24, milles tuuakse välja ka see, alates mis poorsuse protsendist on poorid omavahel ühendatud või millal on poorid enamasti isoleeritud.

Kirjanduse andmetel (k.a peatükis viidatud Austraalia uuringus, joonisel 1.26) on alla 3...4% jäävpoorsusega asfaltkatted praktiliselt veekindlad.

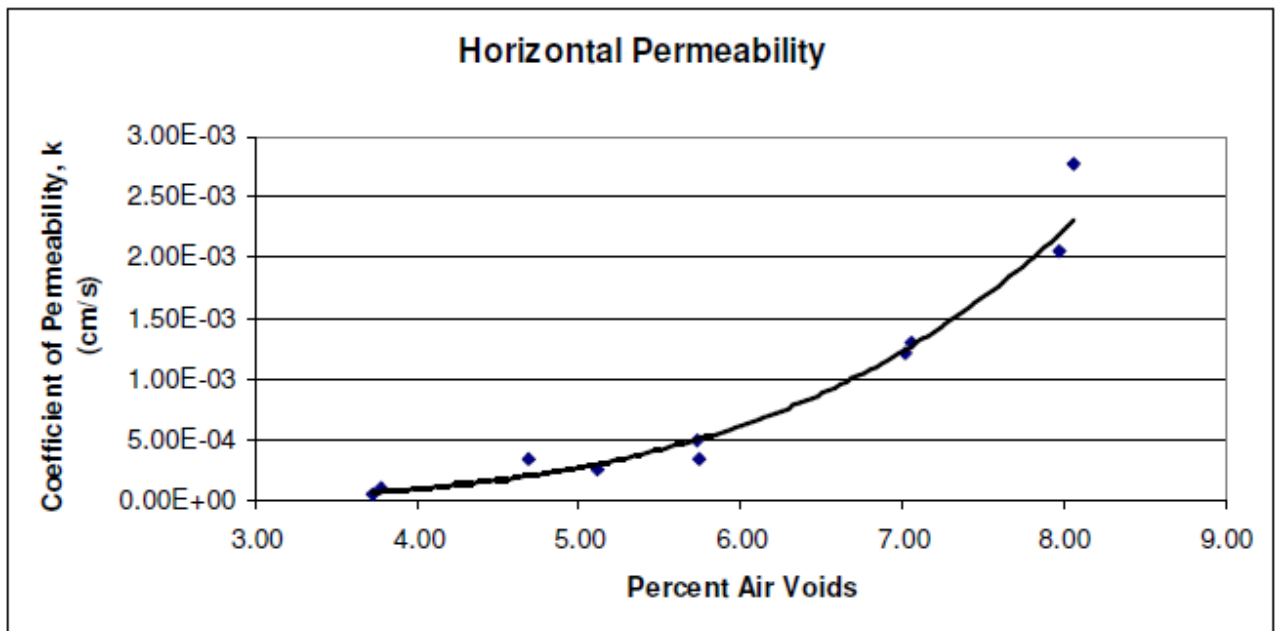


Joonis 1.24. Asfaltkatte veelävilaskvus seostatuna poorsusega. [14]

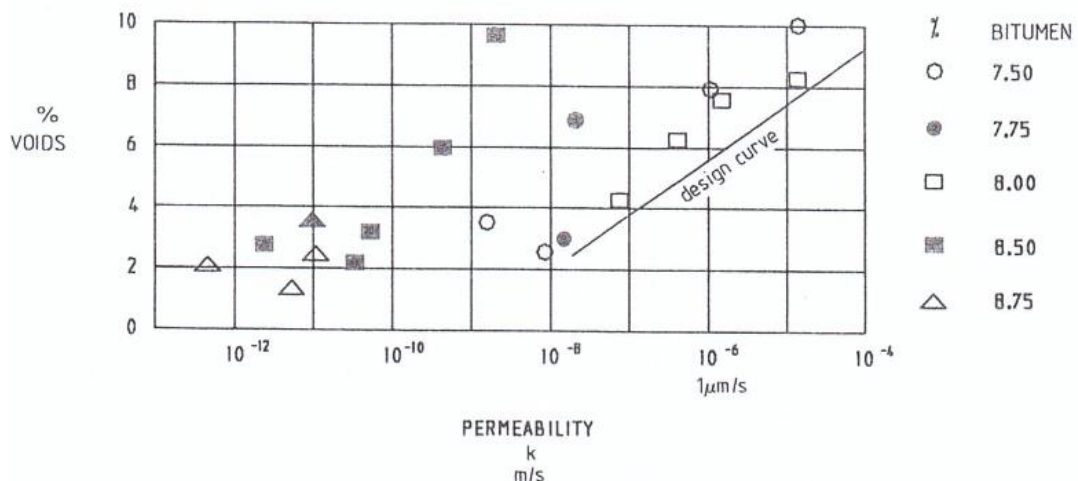
Allikas [15] käsitleti lisaks vertikaalsele veelävilaskvusele ja horisontaalset, mis on esimesest veidi suurem, nagu nähtub joonistelt 1.25.



Joonis 1.25a. Vertikaalne asfaltkatte veejuhtivus seotuna poorsusega [15]



Joonised 1.25b. Horisontaalne asfaltkatte veejuhtivus seotuna poorsusega. [15]



Joonis 1.26. Asfaltkatte veeläbilaskvuse ja poorsuse seos allikast. [12]

Näide 7

Ühe tunni jooksul läbib teekatendit, mille peal on 5 cm AC surf kulumiskihiga asfaltkatte, mille jäävpoorsus on 5%, 500 autot 1 m pikkuse sõiduraja osa sõidukiirusega 100 km/h.

- Teekatte ja rehvi kontakt ajaliselt on $2 \cdot (500 \cdot 1) / (100 \cdot 1000) = 0,01$ h (oletades, et igal sõidukil on kaks telge).
- Rehvi kontaktpinnaks oletatakse 150 mm pikk ja 125 mm lai jälg, mis teeb pindalaks $0,0187 \text{ m}^2$.
- Vesi, mis rehvide kontaktpingega läbi asfaltkatte surutakse, saadakse korrutades veeläbilaskvus gradiendi ja pindalaga. Asfaltkatte veeläbilaskvus 5% poorsuse juures on 0,2 m/ööp, gradient asfaltkatte peal on 60 m. Seega teoreetiliselt võiks sissesurutava vee hulk olla $0,2 \cdot 60 / 0,05 / 24 = 10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, reaalselt sõltub see autode arvust, kiirusest ja kontaktpindalast, mis arvutati eelnevalt.
- **Läbi autorataste surutakse vett läbi pealmise asfaltkatte antud näite tingimustes $0,1 \cdot 0,0187 \cdot 2 = 0,00374 \text{ m}^3/\text{h}$.**

Allika [15] kohaselt on horisontaalne veeläbilaskvus asfaltkattel suurem, kui vertikaalne, mistõttu võib oletada, et mitte kõik vesi ei jõua seega kattest läbi alusesse. Lisaks on teekate ehitatud kalde alla, mistõttu kattele sadav vesi voolab ära, kuid esitatud arvutus kehtib eriti olukordades, kui kattes on roopad. Kui liikluskormust ei ole, arvestatakse vihmasaju korral hüdrauliliseks gradiendiks asfaltkatte peal 1:

kui teekatte laius on 10 m, siis $q = 0,008 \text{ m/h}$ (sama, mis $0,2 \text{ m/ööp}$) $\cdot 1 \cdot 5 \text{ m}$ (kahepoolse kaldega tee üks pool) $= 0,042 \text{ m}^3/\text{h}$.

Seega on vee sisenemine ühe meetri teepikkuse osas $0,00374 + 0,042 = 0,045 \text{ m}^3/\text{h}$.

Kui asfaltkatte jäävpoorsus on väiksem kui 4 %, on kate praktiliselt veekindel ja vesi pääseb seega alusesse vaid läbi kattess olevate pragude, nagu arvestati näites 2.

1.2.3 Austroads Guide to Pavement Technology. Part 10: Sub-Surface Drainage (AGPT Part 10) (Austroads 2009c) [11]

Austraalia juhendid pööravad väga suurt tähelepanu teekatendite drenivuse küsimustele. Peatükis 1.2.2 käsitleti juba vanemat sellekohast kirjandust. Põhimõtted on kõik jäänud samaks, mis peatükis 1.2.2 toodud, kuid järgnevalt käsitletakse mõningaid nüansse lisaks.

Ka allikas [11] ütleb, et täiesti uued asfaltkatted, mis peaksid olema veetihedad (madala poorsusega), võimaldavad siiski mõningal määral veel siseneda läbi kihi alusesse. Taoline veekogus on küll väike ning hajub killustikaluses või aurab ära, sealjuures põhjustamata kahju. Kui vesi siiski ei pääse välja ja koguneb alusesse, tekitab liikluskormus väga kõrge hüdrostaatilise rõhu põhjustades peenosiste surumise ülespoole (isegi läbi asfaltkatte), mis võib olla lõõkaukude üheks põhjuseks õhukese asfaltkattega teedel, aga ka näiteks pinnatud kruusateedel.

Peamiseks veeallikaks teekatenditesse on ülalt läbi pragude ja halva kvaliteediga vuukide tulev vesi. Ka peenardest ja nõlvadest võib imbuda katendisse märkimisväärne kogus vett eriti, kui muldkeha on madal ja katend ühepoolse kaldega.

Teede drenaaži võib jagada kolmeks:

- pindmine drenaaž (põik- ja pikikalded, kraavid jne), mille ülesandeks on juhtida vesi ära teekattelt, peenardelt ja tagada see, et ei tekiks seisva veega piirkondi.
- teekatendis olev drenaaž (dreenkiht, piki- ja põikdrenaaž), mille ülesandeks on koguda kokku katendisse sisenev vesi tulgu see siis ülalt- või altpoolt;
- süvadrenaaž, mille ülesandeks on alandada pinnasveetaset.

Viidatud juhend toob välja kolm punkti selles osas, kas sisemist drenaaži vajatakse või mitte:

- kõrgeklassistel teedel tuleb igal juhul kasutada dreensüsteemi (eelkõige peetakse silmas pikidrenaaži koos drenkihiga), isegi kui probleeme veega pole projekteerimisfaasis ette näha, kuna taolistel teedel ei ole mitte mingi juhul aksepteeritav enneaegne lagunemine, mis võib saada alguse üleliigsest veest.
- madalamate kategooriate teede puhul ei ole alati teekatendis olevate pikidreenide järgi vajadus ning neid peaks kasutama vaid siis, kui probleeme veega on ette näha (nt niiskuspakkonna alusel). Vajaliku drenivuse saab tagada katendikihtide drenivusega.
- Üldiselt on katendi selline dreensüsteem, kus kasutatakse pikidrenaaži koos väljaviikudega, osutunud ökonoomsemaks, kui tee nõlvani väljaulatuvate drenkihite ehitamine (tõenäoliselt seetõttu Austraalia värskem juhend ei käsitle üldse nõlvani ulatuvat drenkihti ning ses osas viidatakse vanematele materjalidele).
 - Pikidreenide ehitamise puhul tuleks alati kasutada koos toruga lahendusi, vastupidisel juhul ei ole võimalik dreene hooldada.

1.2.3.1 Teekatendis oleva dreensüsteemi projekteerimine

Teekatendi dreenide ülesanne on eemaldada ülalt infiltreeruv vesi, takistada vee sisseimbumist peenardelt, nõlvadelt ja mõnikord ka takistada madalate muldkehade ja kõrge pinnasvee taseme puhul pinnasvee sisenemist teekatendisse. Dreenid ei ole sobilikud liigvee ärajuhtimiseks ehituse ajal, kuna siis võivad need veega kaasaskanduva peenosise poolt ummistuda.

Dreenide projekteerimisel tuleb lähtuda järgmistest põhimõtetest:

- mitte ükski katendikiht ei tohi olla täielikult ümbritsetud sellest madalama filtreeruvusega kihiga;
- teekatendi dreenid peaksid olema otseselt ühenduses teekatendi kihtidega. Kui see pole võimalik, siis vee liikumise teekond dreeni poole peab olema läbi järjest kasvava filtratsioonimooduliga kihtide;
- dreensüsteemi võimekus peab olema piisav eemaldamiseks kõik eeldatavalt katendisse siseneva vee;
- mulded peavad olema piisavalt kõrged takistamiseks kapillaartõusu teekonstruktsiooni (ka dreenikihti);

Dreenide projekteerimine on jagatud järgnevateks etappideks:

1. teekatendisse siseneva veehulga hindamine;
2. dreenikihi vajaliku veeläbilaskevõime arvutamine;
3. filtrite veeläbilaskvuse ja pikidreenide laiuse arvutamine;
4. filtrite sobilikkuse määramine seoses ümbritseva pinnase ja torudega;
5. vajaliku toru läbimõõdu ja selle kaldenurga leidmine;
6. ehitamisele ja hooldamisele esitatavad nõuded.

Eriti väiksemate teede puhul võib kasutada pikidreenide asemel nõlvale avanevaid dreenikihte või arvestatakse vee sisseimbumisega muldkehasse. Sellistes olukordades kasutatakse vaid esimest kahte etappi. Järgnevalt käsitletakse punkte 1...4, punkt 5 on käsitletud varasemalt.

1. Katendisse siseneva veehulga hindamine

Katendisse sisenev veehulk leitakse kasutades infiltreerumise faktorit ja maksimaalset ühe tunni vihmasedu, mida on oodata kord aastas. Infiltreeruvus leitakse valemiga 1.13:

$$k = R_{\max} * IC \quad (1.13)$$

kus

k – infiltratsioon (m/s);

$R_{\max}$ – maksimaalne ühe tunni sademete hulk ühes aastas (m/s);

IC – infiltratsiooni koefitsient (tabelis 1.2).

Tabel 1.2

Infiltreerumise koefitsient IC

Katte tüüp	Infiltreerumise koefitsient
Pindamine	0,2...0,25
Tihe asfaltbetoon	0,2...0,4
Betoon	0,3...0,4
Kruuskattega peenrad	0,4...0,6

Kuna teepeenardel on suurem infiltreeruvuse koefitsient, tuleb arvestada ka sellega. Teekatendisse siseneva vee hulk arvutatakse lähtudes Darcy seadusest kasutades valemit 1.14:

$$q = i \cdot (k_l W_l + k_s W_s) \quad (1.14)$$

kus

q – teekatendisse siseneva vee hulk tee jooksva meetri kohta (m^3/s);

k_l – teekatte veeläbilaskvus (m/s);

k_s – peenarde veeläbilaskvus (m/s);

W_l – teekatte kogulaius (m);

W_s – peenarde kogulaius (m);

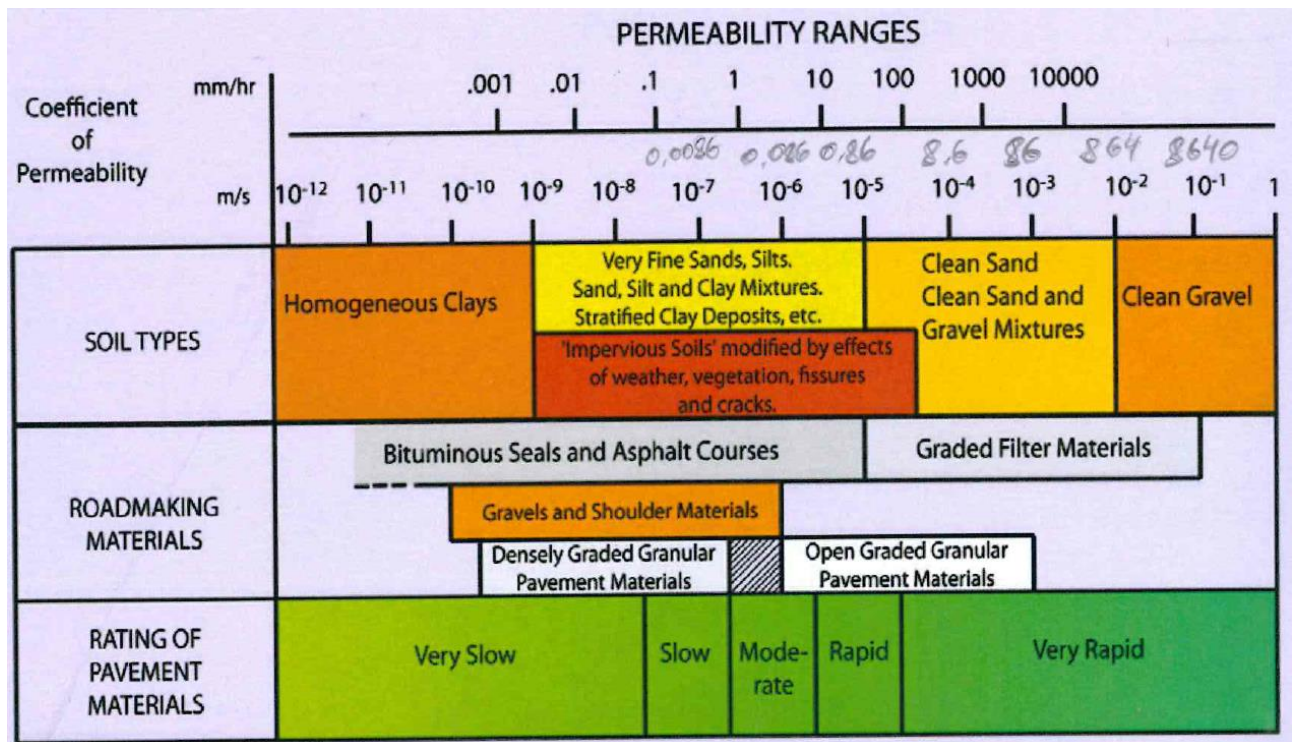
i – hüdrauliline gradient. Vihmasaju korral kasutatakse 1 m/m.

Lisaks eelnevale tuleb arvestada ka sõidukite poolt sissesurutava veega ning pinnasveest või sulamisest pärineva veehulgaga.

2. Dreenihi vajaliku veeläbilaskevõime arvutamine

Nagu käsitletud varasemalt, leitakse dreenuki vajalik veeläbilaskevõime Darcy valemiga $k = q/(i \cdot A)$, kus hüdrauliline gradient, kui vesi voolab horisontaalselt, on kihi kalle. Lisaks, olenevalt dreenuki all oleva kihi filtreeruvusest, võib vesi voolata ka vertikaalselt.

Materjalide filtratsioonimoodulid leitakse laboratoorselt või läbi sõelkõvera, arvutusvalemite. Erinevate materjalide filtratsioonimooduli piirid on esitatud joonisel 1.27.



Joonis 1.27. Eri materjalide filtratsioonimoodulite vahemikud allikast [11].

3. Filtrite veeläbilaskvus ja pikidreenide laius

Filtrite vajalik veeläbilaskvus ja dreeneide laius arvutatakse samamoodi, kui eelmises punktis ehk kasutades Darcy valemit. Pikidreeni laiuse arvutamisel saab võtta eelduseks, et gradient on 1 ning et $A = W$ (laius), saadakse valem 1.15:

$$k = q/W \quad (1.15)$$

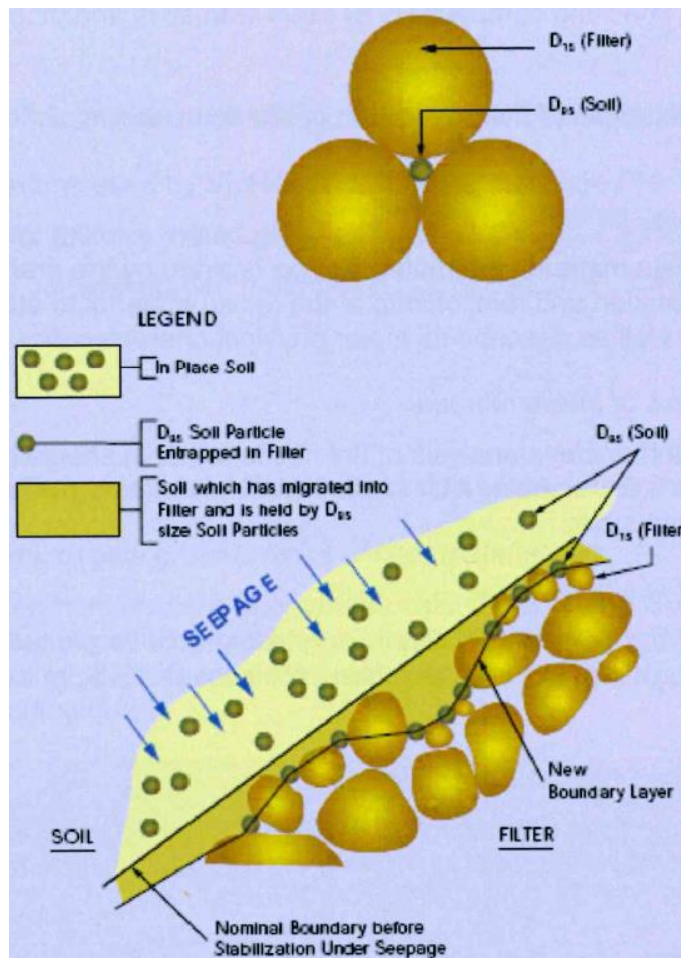
4. Filtrite sobilikkuse määramine seoses ümbritseva pinnase ja torudega

Filtrite ülesanne on takistada vee liikumisega seoses peenosiste siirdumist kõrgema filtratsioonimooduliga materjali sisse. Filtri materjal peab olema küllalt jämedateraline, et tema veejuhtivus oleks suurem kaitstava pinnase omast, kuid samaaegselt küllalt peeneteraline, et vältida kaitstava pinnase osakeste tungimist filtrisse [16], selle põhimõtte on esitatud joonisel 1.28. Filtritena võidakse kasutada kas vaid mineraalmaterjali või koos sellega ka geotekstiili.

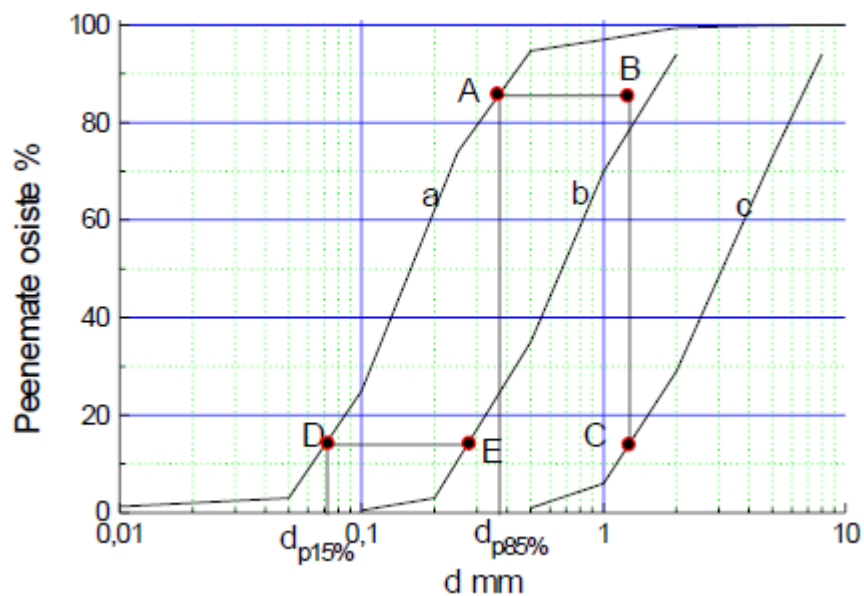
Erinevas kirjanduses eritatakse erinevaid filtrikriteeriume, mis võivad olla alates väga lihtsatest kuni väga keerukateni. Näiteks on V. Jaaniso Pinnasemehaanika konspektis esitatud Terzaghi uurimuse alusel määratav filtri kriteerium:

$$\frac{d_{15(f)}}{d_{85(p)}} < 4 < \frac{d_{15(p)}}{d_{15(f)}} \quad (1.16)$$

kus $d_{15(f)}$ on filtri materjali tera läbimõõt, millest peenemaid osi on 15% ja $d_{15(p)}$ vastav kaitstava pinnase tera läbimõõt. $d_{85(p)}$ on kaitstava pinnase tera läbimõõt, millest peenemaid osi on 85%. Joonisel 1.29 on filtri materjali valiku kriteerium esitatud sõelkõverana.



Joonis 1.28. Pinnaste filterkriteerium. [11]



Joonis 1.29. Filtermaterjaliks sobiva pinnase valiku kriteerium. [16]

Austraalia juhendis tuuakse filterkriteeriumi leidmiseks järgmised kriteeriumid. Vajaminevad suurused filtermaterjalile on järgnevad:

- maksimaalne d_{15f} – kindlustab, et objektis olemasolev materjal ei infiltreeruks ega ummistaks filtrit;
- maksimaalne d_{50f} – kindlustab, et objektis olemasoleva ja filtrina kasutatava materjali sõelkõverad sobiksid kokku;
- minimaalne d_{15f} – kindlustab, et filtrina kasutatav materjal on oluliselt suurema veeläbilaskvusega, kui objektis olemasolev materjal;
- maksimaalne d_{100f} – väldib olukorda, kus filtrina kasutatav materjal vigastaks dreentoru;
- minimaalne d_{85f} – kindlustab, et filtrina kasutatav materjal ei saaks siseneda dreentorusesse ega tekitada ummistusi.

Filterkriteeriumi arvutamisel kasutatakse järgmisi kriteeriume (allikast, mis on avaldatud aastal 1987) (alaindeks „f“ viitab filtrile ja „p“ olemasolevale materjalile):

- $d_{15f} \leq 4 \cdot d_{85p}$
- $d_{50f} \leq 9,5 \cdot d_{50p}$, kui $C_{u,p} \leq 15$ VÕI $d_{50f} \leq 13,5 \cdot d_{50p}$, kui $C_{u,p} > 15$
- $d_{15f} \geq 5 \cdot d_{15p}$
- $d_{100f} \leq 10 \text{ mm}$
- $d_{85f} \geq 3 \cdot \text{dreentoru pilude laius}$ VÕI $d_{85f} \geq 3 \cdot \text{dreentoru ümbritseva filterkanga maksimaalne avasuurus}$.

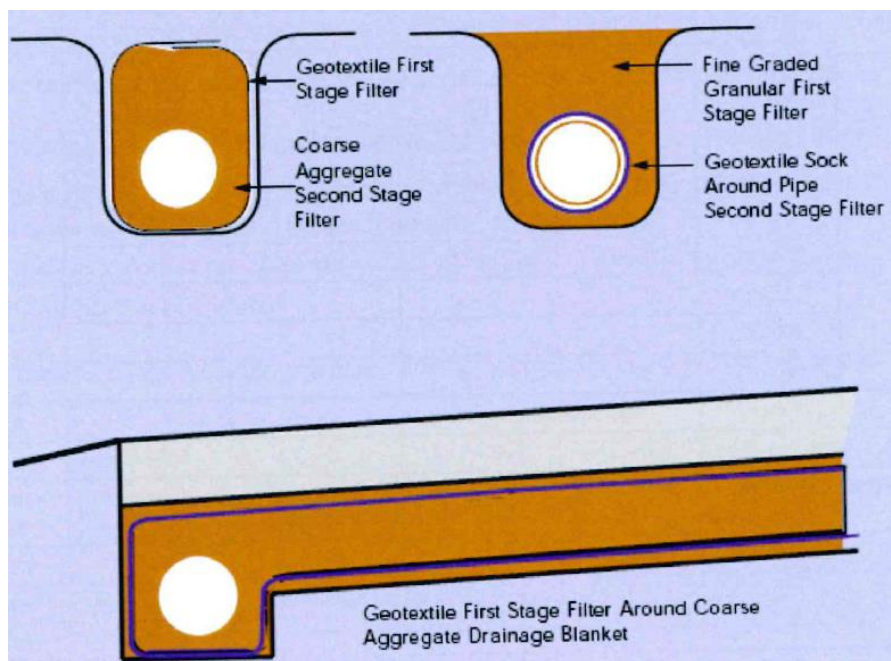
Eksisteerivad veel ka järgmised kriteeriumid (allikast, mis on avaldatud aastal 2004):

- $d_{15f} \leq 5 \cdot d_{85p}$. Kui pinnase $C_{u,p} \leq 1,5$, kasutada kriteeriumit $d_{15f} \leq 6 \cdot d_{85p}$
- $d_{15f} \leq 20 \cdot d_{15p}$. Kui pinnase $C_{u,p} \geq 4$, kasutada kriteeriumit $d_{15f} \leq 40 \cdot d_{15p}$
- $d_{50f} \leq 25 \cdot d_{50p}$
- $d_{15f} \geq 5 \cdot d_{15p}$
- $d_{100f} \leq 75 \text{ mm}$
- $d_{85f} \geq 1,2 \cdot \text{dreentorude pilude laius}$ JA pilude laius $\geq 0,8 \text{ mm}$.

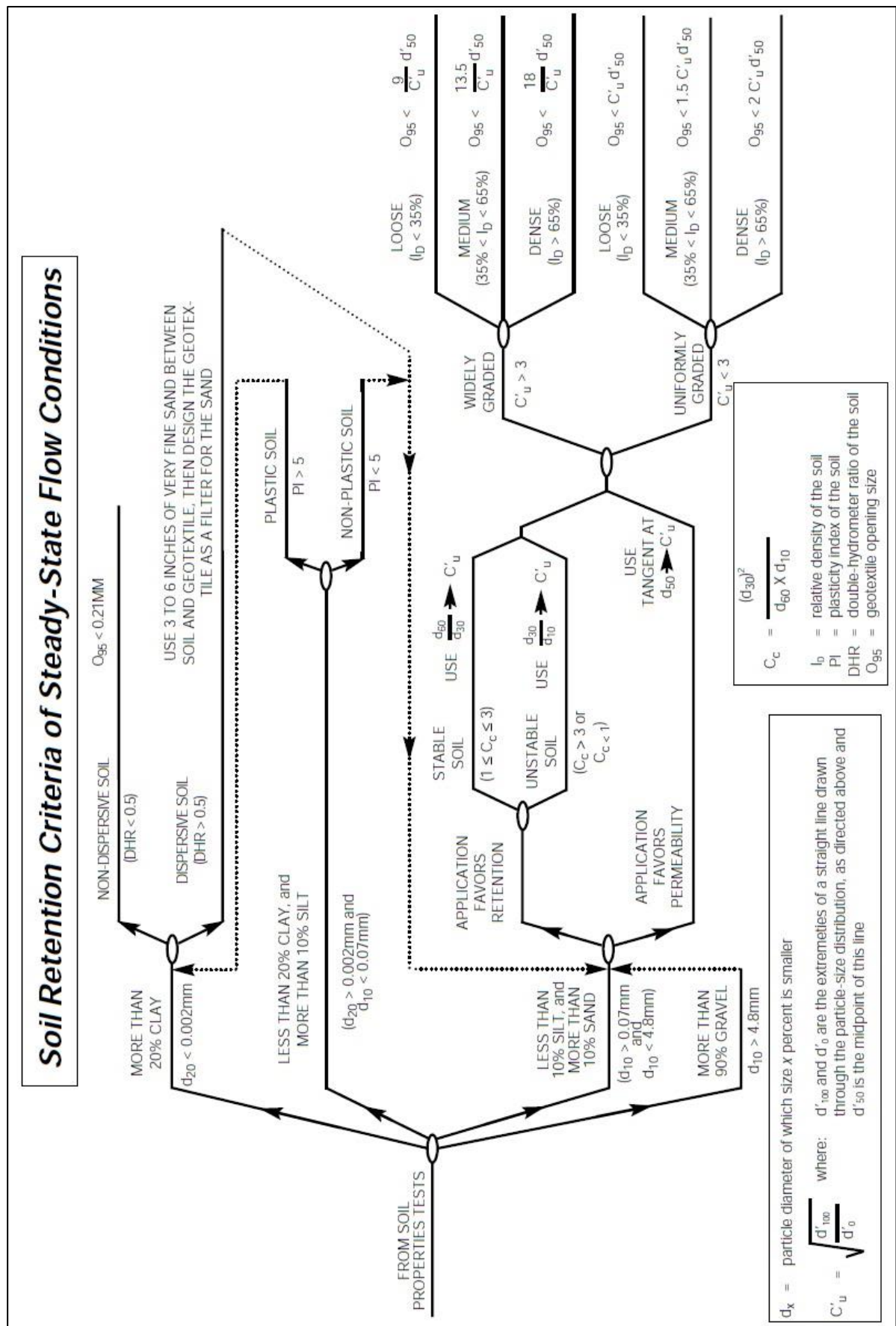
Filtrina võib kasutada ka geotekstiili (joonis 1.30), mille sobilikkus leitakse lähtudes iseloomuliku pooriava suurusest (O_{95} , EVS EN ISO 12956), mis määratakse lähtuvalt ümbritsevast pinnasest, ja veeläbilaskvusest (EVS EN ISO 11058), mis peab olema suurem, kui ümbritseval pinnasel.

Olenevalt sellest, kas veevool on *steady-state flow* ehk ühtlane või *dynamic flow* ehk dünaamiline vool, nagu näiteks veekogude kaldad, on välja töötatud kaks graafikut, mille alusel leida, lähtudes pinnase terakoostisest, geotekstiili vajalik O_{95} . Käesolevalt esitatakse graafik ühtlasele voolule, mis on joonisel 1.31.

Võimalusel peaks valima kasutamiseks NorGeoSpec sertifikaadiga geotekstiili, kuna sellega on tagatud materjali ühtlus ja vastupidavusomadused, kuigi süsteem sobitub eriti just eraldavate geotekstiilide osas.



Joonis 1.30. Geotekstiili paigaldusvariandid dreensüsteemis. [11]



Joonis 1.31. Geotekstiili filterkriteeriumid. [17]

1.2.4 Moulton 1980. Highway subdrainage design [18] – vee äravool muldkehasse

Kui muldkehas on kasutatud filtreeruvaid materjale (nagu Eestis nõutakse), liigub vesi teekatendist vertikaalselt läbi ja osa sellest infiltreerub muldkehasse. Seega tuleb drenkihi (-süsteemi) arvutamisel käsitleda vaid selle vee hulka, mis jääb infiltreerumisest üle. Suuremas pildis eksisteerib mitmeid põhjuseid, mistõttu vesi võib liikuda vertikaalselt muldkehasse ja muldkehas:

1. vesi liigub pinnasveetaseme poole (joonis 1.32), olukord kehtib puhul, kui tee on süvendis;
2. muldkeha all asetseb kõrge filtreeruvusega kiht, mis soodustab pea vertikaalset vee liikumist katendist alla (joonis 1.34);
3. vee voolamine toimub muldkehas nii vertikaalselt kui horisontaalselt väljudes muldkeha nõlvadelt ja ühinedes pinnasveega muldkeha all (joonis 1.35).

Olukord 1. Kui pinnasveetase on horisontaalne, võib toimuda mõningane vertikaalne filtreerumine katendikihtidest sinna, kuid ühtlane vool (ing. *steady-state flow*) ei ole tagatud (joonis 1.32). Teoreetiliselt, kui toimub teatud veehulga infiltratsioon, hakkab toimuma ka vertikaalne väljavool, mis on põhjustatud hüdraulilisest gradiendist. Kui infiltreerumine jätkub mingi ajaperioodi jooksul, infiltreerumise ala laieneb, pinnasvee tase tõuseb, mistõttu keskmine hüdrauliline gradient ja seega ka infiltreeruva vee hulk vähenevad. Taolise olukorra arvutamiseks tuleb koostada vooluvõrk, nagu on näidatud seotud joonistel ning äravoolava vee hulga saab arvutada valemiga 1.17. Meetodi kasutamine nõuab vooluvõrgu konstrueerimist, mis on käesoleva aruande jaoks liiga spetsiifiline teema, kuid selle lühikirjeldus on järgnev.

Vooluvõrk saadakse, kui konstrueeritakse kaks üksteisega täisnurga all lõikuvate kõverate parve, millest üks kujutab endast samarõhujooni ja teine voolujooni. Ühendades pinnases vee liikumise tagajärjel tekkivad ühesuguse pingega punktid, saadakse samarõhujooned, millega risti kulgevad voolujooned. Vooluvõrk võimaldab määrata veerõhu mistahes punktis ning leida ka vooluhulga läbi pinnase. Kui vooluvõrk on moodustatud selliselt, et võrgusilmad on ligikaudu ruudukujulised mõõtmetega $a \times a$, siis gradient ühe samarõhujoone vahel on leitav valemiga 1.17.

$$I = \frac{\Delta h}{n_1 a} \quad (1.17)$$

kus

Δh – veetaseme kõrgus katendi alapinnast (m, täpsemalt veetasemete kõrguse erinevus);

n_1 – võrgusilmade arv ühe voolukanali pikkusel.

Seega vooluhulk piki ühte kanalit on Darcy seaduse alusel:

$$\Delta q = kI = k \frac{\Delta h}{n_1 a} = k \frac{\Delta h}{n_1} \quad (1.18)$$

Kui voolukanalite hulk on n_2 , siis kogu vooluvõrgu maht on:

$$q = k \Delta h \frac{n_2}{n_1} \quad (1.19)$$

kus

q – väljavoolava vee hulk ($\text{m}^3/\text{ööp}$);

Δh – veetaseme kõrgus katendi alapinnast (m);

k – pinnase filtratsioonimoodul ($\text{m}/\text{ööp}$);

n_1 – võrgusilmade arv ühe voolukanali pikkusel (kirjanduses tähistatakse ka n_d);

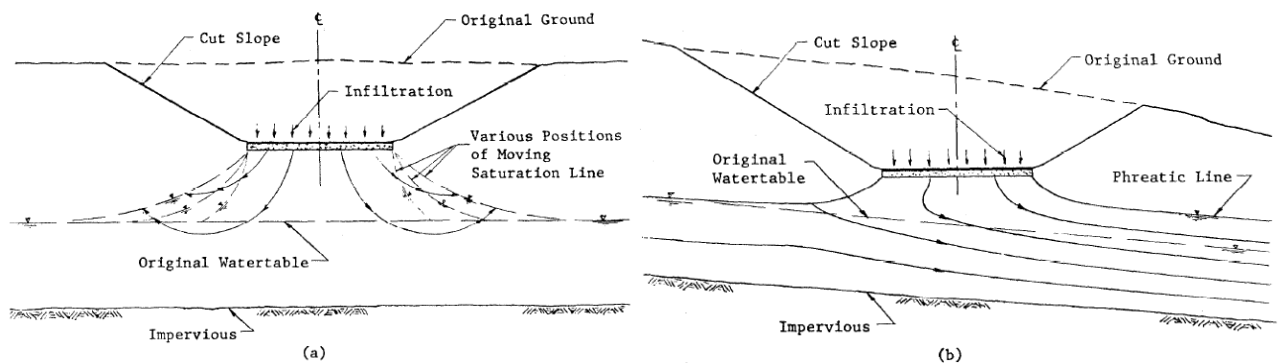
n_2 – voolukanalite hulk (kirjanduses tähistatakse ka n_f).

Näide 8

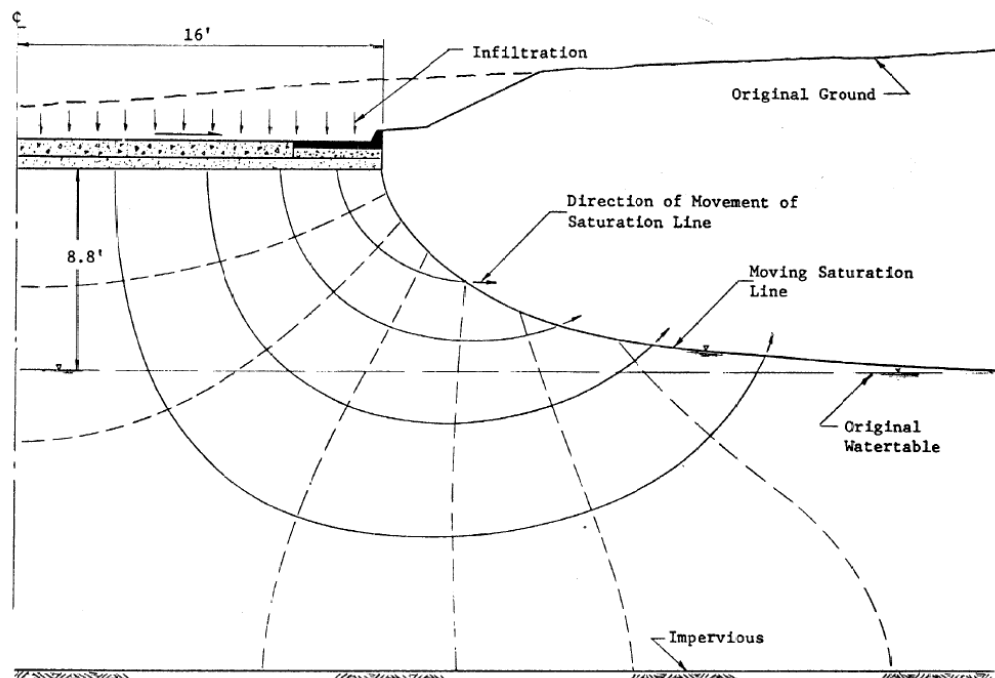
Leida ajutise vooluhulga suurus katendist muldkehasse, vertikaalse pinnasveetaseme poole, mille situatsioon on kujutatud joonisel 1.33, kuhu on konstrueeritud ka vooluvõrk. Kogu veehulga „q“ poole teekatendi laiuuse ulatuses saab leida kasutades valemit 1.19. Lähteandmetest on $\Delta h = 8,8$ jalga (2,68 m), vaadeldava teekatte laius $L = 16$ jalga (4,9 m), $n_2 = 5$ ja $n_1 = 6,5$. Valemist leitakse $q/k = 2,68 \cdot 5/6,5 = 2,06 \text{ m}^2/\text{m}$.

Keskmine väljavooluhulk q_v saadakse, kui kogu väljavoolava vee hulk „q“ jagatakse vaadeldava katendiosa laiuusega (nt pool teekatte laiuusest, kui tegemist on sümmeetrilise olukorraga):

$$\frac{q_v}{k} = \frac{q}{L \cdot k} = \frac{2,06}{4,9} = 0,42 \text{ m}^2/\text{m}^2$$



Joonis 1.32. Olukord 1, vee voolamine süvendis pinnasveetaseme poole. [18]

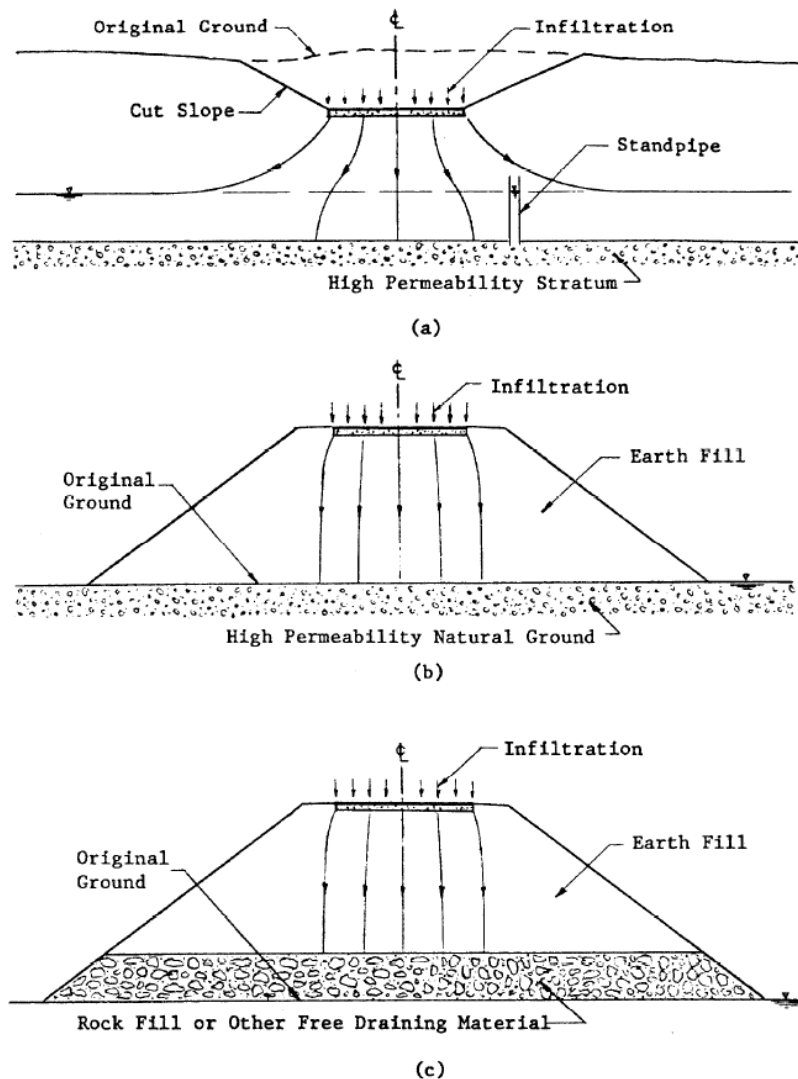


Joonis 1.33. Voolujooned süvendi korral näite 8 jaoks. [18]

Näite 8 põhjal nähtub, et keskmine hüdrauliline gradient väheneb märgatavalt algsest gradiendist, milleks on 1. Olukorra 1 juhul ei arvestatud sellega, et pikemate vihmasadude korral tõuseb pinnasvee tase kõrgemale, mis vähendab katendist muldkehasse infiltreeruva vee hulka. Seega võib taolist vee liikumist arvestada vaid juhul, kui on kindlalt teada, et veetase ei tõuse nii kõrgele, mis

takistab katendist vee äravoolu all olevatesse kihtidesse. Olukord on parem, kui pinnasvesi liigub nurga all (joonis 1.32b), mitte ei ole horisontaalne, kuid ka siis tuleks kasutada konservatiivset lähenemist.

Olukord nr 2. Kui muldkeha pinnas on hea filtratsiooniga, võib vee vertikaalne äravool olla märkimisväärne olenedes muldkeha pinnase filtratsioonimoodulist ja ka sellest, kui muldkeha all on drenkiht (või näiteks kapillaartõusu katkestav kiht).



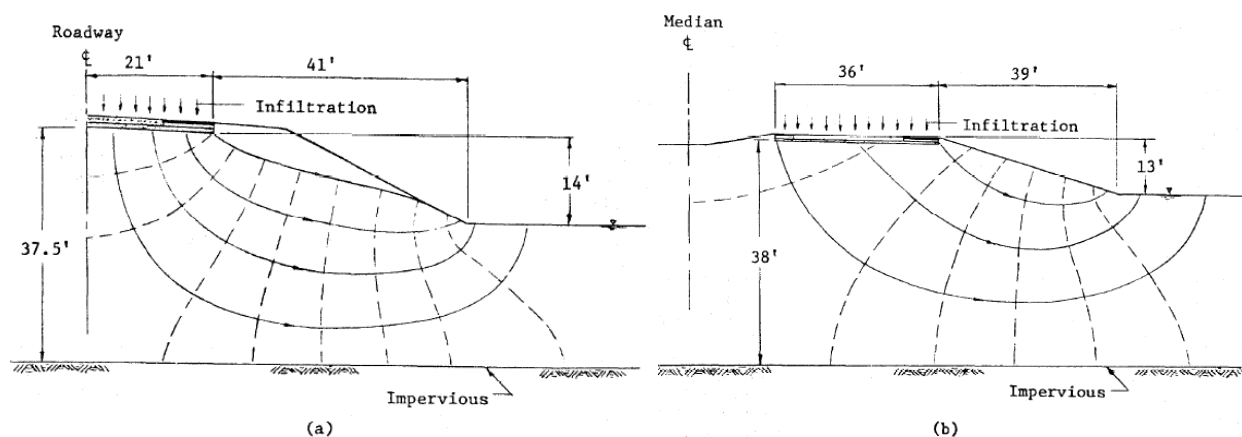
Joonis 1.34. Olukord 2, vee liikumine olukorras, kui muldkeha põhjas on hea veejuhtivusega kiht. [18]

Joonisel 1.34a (kui katend asub süvendis ja allpool asetseb kõrge filtratsioonimooduliga kiht) sõltub vertikaalse väljavoolu keskmine hüdrauliline gradient katendi laiusest, kõrge filtratsioonimooduliga kihi sügavusest, pinnasvee kõrgusest suhtena hästi filtreeruvasse kihti. Kui pinnasvee kõrgus on kuni hästi filtreeruva kihi pealispinnani, on hüdraulilise gradiendi kõrguseks üks, aga kui kõrgem, hakkab gradient vähenema (vajaliku graafiku selleks leiab viidatud allikast [18]). Jooniste 1.34b ja c osas on vertikaalse väljavoolu hüdrauliline gradient alati 1.

Võimalus, et vesi liigub muldkehas vaid verikaalselt, tähendab suuremat hüdraulilist gradienti, kui see, et vesi hakkab liikuma voolujoonte kohaselt ka horisontaalselt, mis omakorda võimaldab suuremal määral ja kiiremini vett muldkehast „läbi lasta“. Seega on taolise kihi ehitamine uue muldkeha alaosasse väga suure kasuteguriga, kuna samaaegselt takistab see ka kapillaarvee tõusu

vähendades seega oluliselt külmakerkeohtlikkust. Taoline kiht ei pea tingimata olema muldkeha põhjas, vaid ükskõik mis kõrgusel olev kõrge veejuhtivusega kiht tekitab sama efekti. Taolise kihi osas peab jälgima seda, et vesi saaks sellest vabalt välja voolata. Kui kiht muutub täielikult veeküllastunuks, tekib oht muldkeha stabiilsusele. Samuti peab olema tagatud, et kiht aja jooksul ei ummistuks; lihtsaim viis selleks on ümbritseda materjal filtreriva geotekstiiliga.

Olukord 3 (joonis 1.35) oli see, kui vesi voolab muldkehas nii horisontaalselt (väljudes muldkeha nõlvadele) kui vertikaalselt. Tegemist on tõenäoliselt kõige tüüpilisema olukorraga Eesti teede muldkehade osas. Taolist vee voolamist saab kujutada taas voolujoonte konstrueerimisega koos valemi 1.19 kasutamisega (mida käesolevalt täpsemalt ei käsitleta) või kasutades joonist 1.36, mis võimaldab praktiliseks kasutamiseks piisavalt täpsed tulemused vee liikumisest. Joonis käsitleb küll kogupaksuse osas sama filtratsioonimooduliga materjali, reaalsuses võib muldkehas ja selle all olla erineva filtratsiooniga materjalid.



Joonis 1.35. Olukord 3, vee voolamine muldkehas nii vertikaalselt kui horisontaalselt. [18]

Joonise 1.35 kasutamiseks on vajalikud järgnevad lähteandmed:

- L_f – teepeenra ja muldkeha nõlva laius (m, ülal joonisel „41“);
- H_f – muldkeha kõrgus (m, ülal joonisel „14“);
- D_r – muldkeha ja selle vundamendi kõrgus vettpidavat kihist (m, ülal joonisel „37,5“);
- W – analüüsitava teekatte laius (tavaliselt pool teekatte kogulaiusest, m; ülal joonisel „21“);
- C_d – parandusfaktor (dimensioonita);
- q_v – äravoolava vee hulk ($m^3/\text{ööp}/m$);
- k – muldkeha ja pinnase filtratsioonimoodul ($m/\text{ööp}$).

Näide 9

Sümmeetriline vee väljavool (mõlemale tee poolele läheb sama palju vett) teekatendist läbi muldkeha ja selle vundamendi kasutades joonisel 1.35a esitatud andmeid (joonisel on pikkusühikud jalgades – ft). $W = 12,8$ m, $L_f = 12,5$ m, $H_f = 4,2$ m, $D_r = 11,4$ m.

Joonise 1.36 kasutamiseks $H_f/W = 4,2/12,8 = 0,328$ ja $L_f/H_f = 12,5/4,2 = 2,976$, mis teeb $q_v/kC_d = 0,35 m^2/m^2$. Sealt ilma dimensioonita sügavuse parandusfaktor $C_d = 1 - 0,75 \cdot H_f/D_r = 1 - 0,75 \cdot 4,2/11,4 = 0,72$. $q_v/k = 0,72 \cdot 0,35 = 0,252 m^2/m^2$.

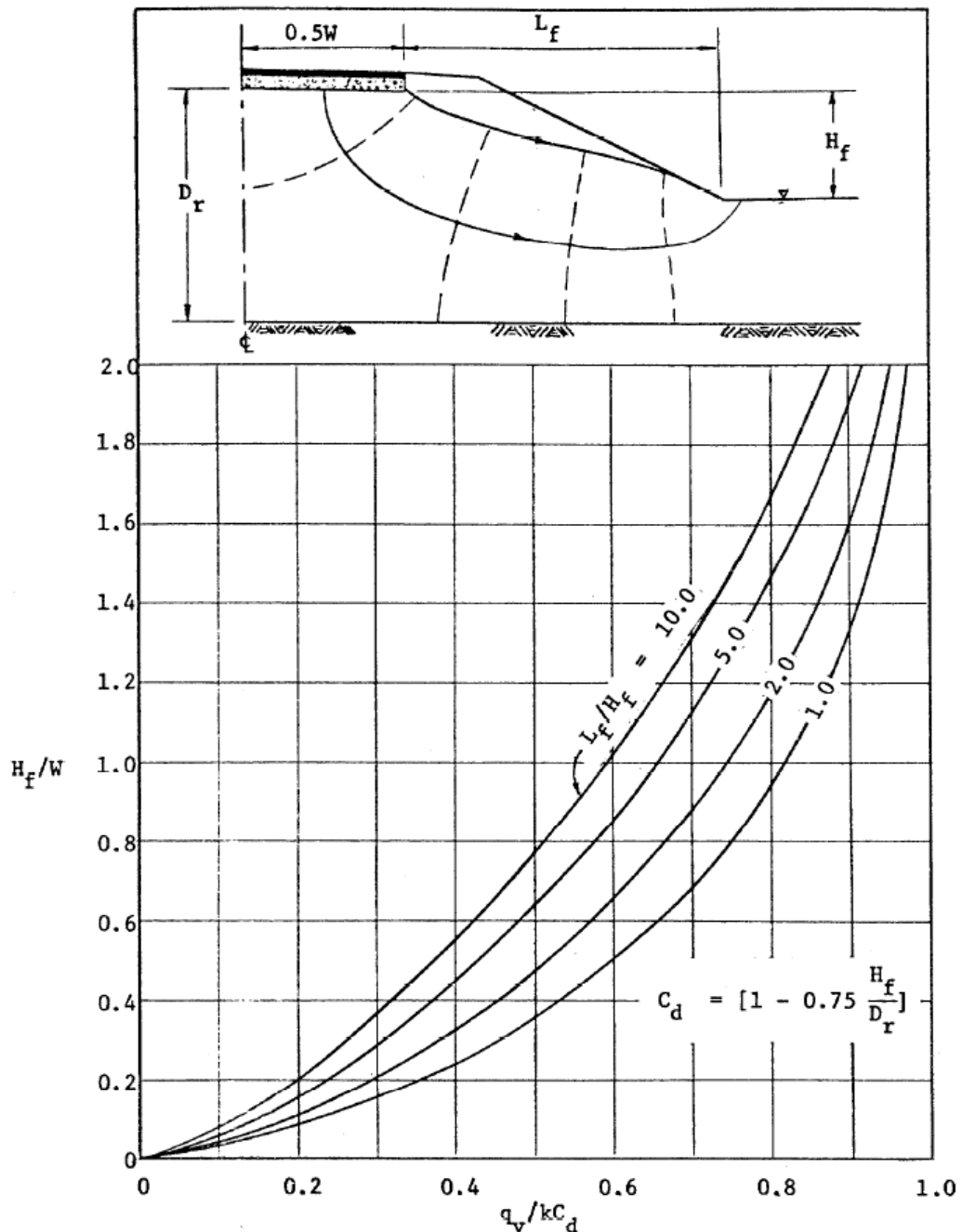
On olukordi, kus vee väljavool katendist läbi muldkeha ei ole sümmeetriline, vaid on assümmeetriline, nagu joonisel 1.35b. Kasutamaks sellises olukorras joonist 1.36, tuleb võtta teekatte laius kaks korda suuremaks, kui see tegelikult on. Näiteks, kui teekatte laius on 12 m, siis arvutuses tuleb kasutada 24 m.

Näide 10

Assümmeetriline vee väljavool teekatendist läbi muldkeha ja selle vundamendi kasutades joonisel 1.35a esitatud andmeid. $W = 11$ m, $L_f = 12$ m, $H_f = 4$ m, $D_r = 11,6$ m.

$H_f/W = 4/22 = 0,18$ ja $L_f/H_f = 12/4 = 3,0$, mis teeb $q_v/kC_d = 0,25$ m²/m². Sealt ilma dimensioonita sügavuse parandusfaktor $C_d = 1 - 0,75 \cdot H_f/D_r = 1 - 0,75 \cdot 4/11,6 = 0,742$. $q_v/k = 0,742 \cdot 0,25 = 0,186$ m²/m².

Näidetest 8...10 nähtub, et vertikaalne väljavool muldkehast võib varieeruda suures ulatuses olenevalt voolamise geometriast. Näidetes ei olnud kasutatud muldkeha filtratsioonimoodulile konkreetseid väärtuseid, kuid see mõjutab väljavoolava vee koguseid (q_v) suuresti. Seega on oluline, et projekteerimisel kasutatakse pigem konservatiivseid filtratsioonimooduli väärtusi.



Joonis 1.36. Veevoolu äravoolu leidmine muldkehast. [18]

1.2.5 Vene projekteerimisjuhendid drenikihtide projekteerimiseks

Dreenihi arvutamist, täpsemalt veerežiimiga seonduvaid arvutusi, käsitleb Maanteeameti Muldkeha remondi projekteerimise juhise 2006-27 [19]. Nime alusel on tegemist remondi juhendiga, kuid käsitletud materjali saab rakendada ka uute teede projekteerimisel. Järgnevalt esitatakse mõningaid tähtsamaid/huvitavamaid punkte antud juhendist.

- Mulde nõlvade katmiseks kasutatavad pinnased ei tohi olla halvemini drenivad kui mulde pinnased. Halvemini drenivad pinnased tuleb asetada alumistesse kihtidesse, paremini drenivad ülemistesse. Erandiks on sellised mulded, mille alaosas peab olema dreniv kiht mulde kaitsmiseks pinnas- ja kapillaarvete eest.
- Teekatte pinna vähimad kõrgused on seotud niiskuspaikkonna ja aktiivtsoonis oleva pinnasega. Teekatte pinna kõrgus võib olla ka väiksem, kuid siis tuleb järgida erinõudeid. Kõik need punktid on käsitletud ka teede projekteerimismäärade tabelis 3.9.
- Eraldi peaks niiskuspaikkondadega rõhutama järgmisi punkte, mis aitab teha kaalutletud otsuseid seoses veerežiimiga:
 - Kui mulde kõrgus on määrades nõutud vähimast kõrgusest vähemalt 1,5 korda suurem, on tegemist, sõltumata muudest asjaoludest, esimese paikkonnaga.
 - Kõik esimese paikkonna süvendid ja 0-profilid (ka määrade ettenähtust madalamad muldkehad) kuuluvad teise paikkonda.
 - Kõik teise paikkonna tüübi süvendid ja määrade ettenähtust madalamad muldkehad kuuluvad kolmandasse paikkonda.
- Aktiivtsooni ülemises osas on soovitatav kasutada drenivaid pinnaseid, mille filtratsioonimoodul standardse Proctorteiini maksimaaltihedusel on vähemalt 0,5 m ööpäevas. Tsementbetoonkatete pinnast vähemalt 1,2 m sügavuseni ja asfaltkatete puhul vähemalt 1 m sügavuseni peab pinnas olema külmakindel.

Külmakerkest:

- Eesti tingimustes on külmakergete tekke ja nende ulatuse osas suure tähtsusega pinnasevee kapillaartõus (pinnasevesi asub suhteliselt kõrgemal).
- Vee külmumise mõju võib jagada kaheks – esmane on vee paisumine poorides, teine sekundaarne, mis seisneb täiendavas vee juurdevoolus (altpoolt läbi kapillaaride üles kerkiv vesi) külmumispiirkonda ja jääläätsede tekkimises. Tee ehituse seisukohalt on oluline just viimane.
- Tee mulde ja katendi omakaalust tekitatud surve poorides olevale veele püüab vett välja tõrjuda, mille tulemusel vee liikumine külmumispiirkonda väheneb ehk teatud külmumissügavuses vee kogunemine külmumistsooni lõpeb. Peentel liivadel on see umbes 80 cm, savisel liival kuni 160 cm (paralleeliks võib tuua selle, et aktiivtsoonina käsitletakse 1,5 m).
- Pinnased, milles pole alla 0,125 mm teri, on hea filtratsiooni tõttu täiesti külmakindlad. Neis olev vesi külmub umbes 0°C juures täies ulatuses ja maht suureneb ligikaudu 9%. Ühendatud pooride tõttu surutakse paisunud jää ja vesi mulde ning liikluse koormusel allapoole ja pinnase paisumist pole. Külmakerge võib esineda vaid survevees.
- Pinnase külmakerkelisuse osas annavad endised nõukogude normid üldiselt Soome määrade ühesuguse tulemuse.
- Külmakerkehoitustest pinnastest muldkehad on väga kindlad, kuid sageli kallid, mistõttu võib osutuda vajalikuks kohalike külmaohtlike pinnaste parendamine. Kohalike külmaohtlike pinnaste omaduste parendamiseks on mehaanilisi (terakoostise muutmise), termilisi (lubja, tsemendi lisamine) või keemilisi (soola lisamine) võimalusi, aga ka vee juurdepääsu füüsiline tõkestamine, mille tulemusel muutub pinnase tugevus ja ka ilmastikukindlus. Täpsemalt käsitletakse neid allika [19] tabelis 23.

- Juhul kui pole võimalik ehitada kogu mullet külmakindlast pinnasest, ehitatakse drenkiht. Selleks kasutatakse jäme- või keskliiva, mille poorsus ja filtratsioonimoodul on suured. Sõltuvalt katte laiuusest peaks filtratsioonimoodul olema 2...10 m/ööpäevas (katte laius 6...12 m). Ühepoolse põikkalde puhul peaks filtratsioonimoodul olema poole suurem, kui kahepoolse põikkaldega teekatendi puhul. Filtratsioonimoodul määratakse optimaalse tiheduse juures.
- Kõige ratsionaalsemad (just külmakindluse seisukohalt) on katendid, mis asuvad vähe- või mitte külmakerkeohtlikest pinnastest muldel ja kus katendi ülemise pinna kaugus arvutuslikust pinnasevee tasemest on suurem või võrdne arvutusliku külmumissügavusega. Lõikudel, kus seda nõuet pole võimalik täita, tuleb ette näha soojusisolatsioonikihid, et vähendada külmumissügavust või üldse külmumist ära hoida. Teine võimalus on näha ette meetmed pinnasevee taseme alandamiseks. Tihti aitab ka veekindlate või kapillaartõusu takistavate kihtide ehitamine. Soojusisolatsioonikihid (näiteks fenoplastidest) tuleks ette näha ainult väga halbade niiskustingimuste puhuks nagu "märjad" süvendid, nullprofiilid ja madalad mulded.
- Teekatend tuleb arvutada külmakerkele iga juhul, kui muldkeha on normidest madalam või asetseb süvendis.
- Kui külmakerkearvutus näitab lubatavast suuremat külmakerget, tuleb katendi alumiste kihtide paksusi suurendada, lisada üks kruusakiht (ülespoole drenkihti) või mõnest spetsiaalmaterjalist soojusisolatsioonikiht.

Veerežiimiga seonduvast:

- Üldjuhul rajatakse külakraavid alati süvendites ja mulletele kõrgusega kuni 1,2 m. Nende kraavide ülesandeks on vihmavee, lumesulamisvee ja pinnavee ärajuhtimine. Kraavide sügavus määratakse kogemuslikult (kolmnurksed ~ 0,3 m, nelinurksed ~ 0,7...0,8 m, maksimaalne 1,2 m) kontrollides vajaduse korral konstruktsiooni hüdrauliliste arvutustega. Kindlustamata kraavide pikikalle on enamasti vahemikus 1-2%, kindlustatud 2-5%. Tähtis on nõue, et drenkihi alumise pinna kõrgus peab olema vähemalt 20 cm kraavi põhjast kõrgemal.
- Olenevalt muldkeha laiusest ja niiskustingimustest peaks drenkihi materjali filtratsioonimoodul olema vahemikus 2...10 m/ööp. Drenkihi ülesandeks on koguda kokku ja ära juhtida vesi, mis koguneb järgnevatest allikatest:
 - peenardest alusesse imbunud vesi;
 - katte pragudest, aga ka vuukidest alusesse imbunud vesi;
 - kevadel külmunud katte ülemistest kihtidest (jääläätsedest) sulav vesi.
- Vene normides on esitatud minimaalsed drenkihi filtratsioonimooduli väärtused seotuna niiskuspakkonna tüübi ja sõidutee laiusega ning on esitatud tabelis 1.3.

Tabel 1.3

Filtratsioonimooduli K_f soovitatavad minimaalsed väärtused

Niiskuspakkond	Sõidutee laius (m)	Min K_f (m/ööp)
2	6	3 (2)
	7...7,5	4
	12 ja enam	5
3	6	4
	7...7,5	6
	12 ja enam	10

- Dreenkihist juhitakse vesi reservidesse või külgkraavidesse, seoses sellega peab dreenikihi laius üldjuhul olema kogu pikkuses võrdne muldkeha laiusega. Heade hüdroloogiliste tingimuste korral võib selle asemel, et dreenkihti rajada kogu laiuses, kasutada vee kraavidesse juhtimiseks nn lehrtrite süsteemi, kuid kuna kevaditi sulab teealune ennem, kui nõlvad ja seega vesi ei pääse välja, kasutatakse lehrtrite asemel pigem torudreene, mis juhivad vee külmunud pinnasest läbi.
- Abinõud, mis aitavad vähendada pinnavete tungimist alusesse ja pinnasesse (ühtlasi ka dreenkihti):
 - peenarde kindlustamine koos vajaliku põikkalde andmisega (0,5-0,75 m);
 - piirete ehitamine sõidutee äärde (mis võimaldab teha muldkeha nõlvad järsemaks);
 - õigete nõlvakallete kasutamine;
 - külgkraavide läbimõeldud paigutus;
 - aluse monoliitsete kihtide ehitamine laiemana kui katte ülaosa;
 - soojustisolatsioonikihtide rajamine (vähendab niiskuse tungimist ~ 20%).

Dreenikihi osas kehtivad põhimõtted

Kõige kriitilisem aeg aastast on kevad, mil muldkeha sulab ja algab vee kogunemine. Autode sõitmisel sellisel teel tekib üleniiskunud pinnases hüdrodünaamiline surve, pinnase vastupidavus nihkele väheneb ja tihti lõpeb kogu protsess katte purunemisega. Järelikult peab olema garanteeritud vee õigeaegne äravool dreenikihi kaudu (või dreenkihti).

Eesti kliimas on pinnase sulamise kiirus katte all umbes 5 cm päevas, peenardel umbes 3 cm päevas. Järelikult tuleb leida koht, kuhu mahutada 3...6 päeva jooksul kogunev vesi. Üks võimalus on kogu vesi mahutada dreenikihi pooridesse.

Sulav pinnas on võimeline mahutama vee hulka, mis on ligikaudu 0,75 voolavuspiirile vastavast niiskusest, ülejäänud osa surutakse üles dreenkihti. Kuna on väga raske täpselt määrata, kui suur on vee kogus mingil konkreetsel teelõigul, kasutatakse kogemuslikul teel (vaatlused, mõõtmised) saadud keskmisi ööpäevaseid veehulki.

Dreenkiht ei ole tingimata vajalik, kui muldkeha pinnas on dreniiv, s.t $K_f > 0,5$ m/ööp. Dreenikihi kasutamisel on selle minimaalseks paksuseks 20 cm (vajalik paksus tuleks leida arvutamise teel).

Kui katendi külmakindluse või tugevusarvutustest tulenevalt on liivakihi paksus ≥ 40 cm, siis võib dreenikihi materjalina kasutada ka peenliiva, mille $K_f \geq 2$ m/ööp (muuljuhul peenliiva kasutamine dreenkihina ei ole lubatud).

Dreenkihi ülesandeks pole kapillaartõusu katkestamine. Muldkeha peab olema projekteeritud nii, et kapillaarvee tõus ei ulatuks dreenkihi alapinnani. See tagatakse muldkeha kõrgusega pinna- ja pinnasevee suhtes või erandjuhtumil muldkeha sisse ehitatud kapillaartõusu katkestavate spetsiaalsete kihtide või pinnaseveetaseme alandamisega sügavdrenaaži abil. Sügavdrenaaži olemasolul on võimalik ja soovitatav dreenkihist vee juhtimine sügavdrenaaži.

Olenevalt tee paiknemisest, geomeetriast ja niiskuseludest määratakse dreenkihi jaoks arvutusprofiilid ja rakendamise ulatus. Igale arvutusprofiilile valitakse dreenkihi konstruktsioon. Peamine valik tuleb teha kahe variandi vahel:

- filterpikitorudeta muldkeha laiune dreenkiht;
- muldkeha laiune pikifiltertorudega dreenkiht.

Pikifiltertorudeta dreenkihi puhul peab arvestama, et muldkeha nõlvadele avanevad dreenkihi otsad võivad aja jooksul osaliselt või täielikult ummistuda. Korraliste remontide ajal tuleb dreenkihi otstes materjal uuendada. Pikifiltertorudeta dreenkihis voolava vee filtratsioonitee pikkus on suurem kui pikifiltertorudega dreenkihi puhul. Seda tuleb arvestada dreenkihi materjali valikul. Pikifiltertoru paigutatakse dreenkihi all asetsevasse filterpuistega 30 cm sügavusega kraavi, mis asetseb sõidutee serva kohal.

Muldkeha laiune pikifiltertorudega dreenkiht valitakse siis, kui:

- tee(lõik) asetseb süvendis;
- muldkeha on normidest madalam;
- paikkonnas on muldkeha pinnaseks mittetolmne liivsavi või savi;
- 2., 3. niiskuspäikkonnas on muldkeha pinnaseks tolme liivsavi või tolme saviliiv;
- projekteerija peab seda vajalikuks muudel põhjendatud olukordadel.

Dreenkihi ühepoolse kalde puhul (viraažidel, kiir- ja I klassi teedel), kui filtratsioonitee pikkus on >10 m, sõltumata muudest asjaoludest, tuleb projekteerida pikifiltertorudega dreenkiht. Viraažidel, kui filtratsioonitee pikkus on < 10 m, võib projekteerida kahepoolse kaldega pikifiltertorudeta dreenkihi.

Pikifiltertorudest väljelasud tehakse põiktorudega, mille

- läbimõõt sõltub veehulgast;
- kalle peab olem suurem pikifiltertoru kaldest, kuid vähemalt 4%;
- vahekaugused pole suuremad kui 200 m ja mis asetsevad sõidutee telje suhtes 45° nurga all.

Pikifiltertoru algab ja lõpeb põikväljallasuga, mis alguses on sõidutee telje suhtes 145° ja lõpus 45° all. Pikifiltertoru pikikalle võrdub sõidutee pikikaldega, kuid peab olema $\geq 5\%$.

Pika ühesuunalise pikikaldega, kui see on suurem põikkaldest, lõikudel ja pikiprofiili nõgusatesse murdepunktidesse asetatakse dreenkihi alla muldkeha põiksuunas läbivasse 30 cm sügavusega filterpuistega kraavi filtertoru läbimõõduga 8–10 cm. Selliste põikfiltertorude (põikdrenaaži) vahekaugus ühesuunalise pikikaldega lõikudel on 50 m.

Dreenkihi arvutamine

Dreenkihi arvutamine koosneb kolmest etapist – dreenkihti siseneva veehulga leidmine, dreenkihi arvutamine veehulga ärajuhtimisele ning dreenkihi arvutamine sulamisvete mahutavusele.

- **Veehulga arvutamine**

Arvutuslik vee hulk q_a , mis võib sattuda dreenkihti ööpäevas, leitakse valemiga 1.20.

$$q_a = \frac{q k_e k_h}{1000} \quad (1.20)$$

kus

q – normatiivne dreenikihti sattuda võiva vee hulk ööpäevas (l/m^2 , tabel 1.4);

k_e – tegur, mis arvestab pinnase ebaühtlast ülessulamist ja sademete hulka (tabel 1.5)

k_h – hüdroloogiline varutegur, mis arvestab dreenikihi filtratsioonivõime vähenemist eksploatatsiooni käigus (peente osakeste sattumine liivakihti jms, tabel 1.5)

Arvutusvalemiga leitava vee hulk on kogemuslik ja peaks arvestama nii peenardest, läbi teekatte ja sulamise tagajärjel ülespoole tungiva vee koguhulgaga.

Tabel 1.4

Ööpäevas dreenikihti sattuda võidava vee hulk ($q = l/m^2$ ööpäevas). Sulgudes on normatiivne dreenikihti sattuda võiva vee koguhulk sulamisperioodil ($Q = l/m^2$)

Niiskuspaiikkond	Mulde pinnas			
	Kerge mittetolmne saviliiv, tolmane liiv	Mittetolmne liivsavi ja savi	Tolmne liivsavi	Tolmne saviliiv
1	2,5 (15)	2,5 (25)	3,75 (43,75)	4,38 (100)
2	3 (25)	3,75 (62,5)	5 (100)	5,6 (162,5)
3	3,5 (60)	5 (112,5)	5,6 (162,5)	6,25 (225)

Märkus: mittetolmsetest pinnastest mullete puhul, mille kõrgus on normatiivsest suurem (Projekteerimisnormide tabel 3.6), võetakse q võrdseks $1,5 l/m^2$ ööpäevas. Haljasriba (eraldusriba) olemasolu korral tuleb normatiivsetest madalamate mullete puhul ja nullprofiilis suurendada tabeli 1.4 väärtusi 20%.

Tabel 1.5

Tegurid k_e , mis arvestab pinnase ebaühtlast ülessulamist ja sademete hulka, ning k_h , mis on hüdroloogiline varutegur

Niiskuspaiikkond	Mittetolmne pinans	Tolmne pinnas	
	k_e	k_e	k_h
1	1,5	1,5	1,0 (1,0)
2	1,5	1,6	1,2 (1,2)
3	1,6	1,7	1,3 (1,2)

Märkus: mittetolmsete mulde pinnaste puhul k_h on 1,0; k_h sulgudes on III-IV klassi ning sulu ees kiirtee, I ja II klassi teele vastavad arvud.

Kuna teekatend sulab sõidutee alt kiiremini, kui peenarde ja nõlvade alt, peab drenkiht suutma mahutada teatud päevade jooksul sulanud vee hulga, mis arvutatakse valemiga 1.21.

$$Q_a = q_a T_{tag} \quad (1.21)$$

kus

T_{tag} – veeviimarite sulamise hiline mine, meie kliimatssoonis 4...6 päeva, suurem hiline mine vastab peenliivadele.

- **Dreenkihi arvutus vee ärajuhtimisele**

Esialgu määratakse projekteerimisel drenkihi (liivakihi) paksus konstruktiivselt või lähtudes külmakindluse kaalutlustest. Seejärel kontrollitakse kihti vee pooridesse mahutavusele. Dreenkihi paksus h arvutatakse kasutades valemit 1.22, mida korrigeeritakse veel valemiga 1.23.

$$\frac{L^2 q_a}{2K_f} = i \left(\frac{2h + h_2}{3} \right) L + \frac{h^2 - h_2^2}{2} \quad (1.22)$$

kus

L – drenkihi laius (m. Täpsemalt, filtratsioonitee pikkus, orienteeruva suuruse saab tabelist 1.6, kuid teades katendi ja drenkihi konstruktsiooni kõiki mõõtmeid, ka mulde nõlva kaldeid, on võimalik filtratsioonitee pikkust iga konkreetse juhtumi jaoks täpselt määrata);

q_a – arvutuslik vee hulk (l/m^2);

K_f – drenkihi materjali filtratsioonimoodul (m/ööp);

i – drenkihi põhja kalle (soovituslikult minimaalselt 4%);

h – drenkihi paksus (m);

h_2 – valemis veevoolu sügavus torudreenis, võib kasutada konstanti 0,05 m.

Valem võimaldab leida drenkihi paksuse h , teades i , L , Q ja K_f väärtuseid, või siis teades ülejäänud parameetreid, leida vajaliku filtratsioonimooduli K_f . Arvutuse tulemusena saab teada, kui suurt filtratsioonimoodulit on vaja antud paksusega veekihi horisontaalseks juhtimiseks drenkihi keskelt äärelle või ühepoolse kalde puhul ühest äärest teise – kapillartõusuga täidetud osas ei toimu vee horisontaalset voolamist, seal „konkureerivad“ vaid pindpinevus ja gravitatsioon.

Tabel 1.6

Filtratsioonitee orienteeruvad pikkused (m)

Sõidutee	Dreenihi konstruktsioon	
	Sõidutee laiune drenkiht ja torudreenid piki sõidutee serva	Dreenkiht kogu mulde laiuse ulatuses
Laius 7-7,5 m, kahepoolne põikkalle	3,75...4	7,5
Laius 7-7,5 m, ühepoolne põikkalle	8	10,5
Neljarealine kahepoolse põikkaldega sõidutee	8	10,5

Siinjuures tuleb arvestada, et veega küllastumist võib lubada ainult liivakihi alumises osas ning et ülemises osas võib olla ainult kapillaartõusust tulenev vesi. Kui kiht oleks 100% vett täis, siis ilmselt tekiksid katte pinnale jäävad deformatsioonid. Niisiis, sõltumata drenihi materjali filtratsioonimoodulist ja konstruktiivsetest iseärasustest, koosneb drenihi kogupaksus H kahest osast:

$$H = h + h_1 \quad (1.23)$$

kus

h – veest täielikult küllastunud kihi paksus; drenihi kogupaksuse määramisel arvutatakse ainult selle kihi paksus;

h_1 – paksuse varu mida ei arvutata, vaid võetakse tabelist 1.7.

Arvutatav osa h annab veega täidetud kihi kõrguse, mille kohta saab järgnevalt teha vee drenihist horisontaalse väljajuhtimise arvutuse. Konstantse osa poorid on keskmiselt 70% osas täidetud veega kapillaartõusu poolt.

Tabel 1.7

Kapillaartsooni veejuhtivustegur ja kapillaarvee liikumise taseme kõrgus

Lüüa tüüp	Kapillaartsooni veejuhtivustegur K_w (m/ööp)	Kapillaarvee liikumise taseme kõrgus h_1 (m)
Jämeliiv	0,55	0,10...0,12
Keskliiv	0,60	0,14...0,15
Peenliiv	0,65	0,18...0,20

Näide 11

Teekatend, mille sõidutee laius on 7,5 m, ehitatakse muldkehale, mis on valmistatud tolmsast liivsavist ning niiskuspakkond on 3. Leida drenihi vajalik paksus, kui kasutusel on keskliiv, mille filtratsioonimoodul on 3 m/ööp.

Arvutuslik veehulk q_a , mis võib sattuda drenkihti ööpäevas, leitakse valemiga 1.20: $q_a = (5,6 \cdot 1,7 \cdot 1,3) / 1000 = 0,0124 \text{ m}^3/\text{ööp}$ (1 m laiuse riba kohta tulev veehulk).

Valemis 1.22 peab võrdusmärgi ees ja taga olevate tehete väärtus olema võrdne. Üheks võimaluseks on avaldada valemist otsitav liige, teiseks võimaluseks on teha lahendus näiteks tabelarvutusena, mida käesolevalt ka tehakse. Valemis on leitav liige h , ning muud liikmed on järgmised: $L = 4 \text{ m}$, $q_a = 0,0124 \text{ m}^3/\text{ööp}$, $K_f = 3 \text{ m}/\text{ööp}$, $i = 0,04$, $h_2 = 0,05 \text{ m}$.

Valem on tasakaalus ($0,033 = 0,033$) siis, kui drenkihi paksuseks on $h = 0,168 \text{ m}$. Drenkihi vajalik paksus saadakse valemi 1.23 abil, millekohaselt $H = 0,168 + 0,14 \approx 0,31 \text{ m}$.

- **Drenkihi arvutus sulamisvee mahtuvusele**

Drenkihi paksuse, mis on võimeline mahutama kogu kevadel koguneva vee, saab arvutada valemi 1.24 abil.

$$h = \frac{\left(\frac{Q}{n} + 0,3h_1\right)}{(1 - \phi_{\text{talv}})} \quad (1.24)$$

kus

Q – sulamisperioodil drenkihti sattuda võiva vee koguhulk ajal, mil nõlvad on veel sulamata, s.t vesi ei pääse drenkihist välja (l/m^2);

n – drenkihi materjali poorsus;

h_1 – tabelist 1.8 kapillaarvee liikumise taseme kõrgus (m);

ϕ_{talv} – tegur, mis arvestab drenkihi materjali pooride täituvust veega enne sulamise algust, võetakse sõltuvalt poorsusest ja kihi paksusest 0,3-0,7 (tabelist 1.8).

Drenkihi materjali poorsus n leitakse valemiga 1.25.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (1.25)$$

kus

ρ_d – pinnase kuivmahumass;

ρ_s – pinnase erimass (kvartsiiliva ja kruusa osas võib arvestada $2,68 \text{ Mg}/\text{m}^3$);

Tabel 1.8

Tegur, mis arvestab drenkihi materjali pooride täituvust veega enne sulamise algust

Drenkihi paksus, cm	ϕ_{talv} drenkihi poorsuse n puhul			
	0,4	0,36	0,32	0,28
Kuni 20 cm	0,4	0,5	0,6	0,7
20...40 cm	0,35	0,4	0,5	0,6
Üle 40 cm	0,3	0,35	0,45	0,55

Näide 12

Kasutades näite 11 lähteandmeid, leida drenkihi vajalik paksus sulamisvee mahtuvusele.

Eesti kliimavöötmes peab drenkiht suutma mahutada 4...6 ööpäeva veehulga. Näitest leiti, et arvutuslikult võib drenkihti sattuda ööpäevas vett $0,0124 \text{ m}^3/\text{ööp/m}$. Korrutame selle viie ööpäevaga (kasutusel on keskliiv) saades drenkihi vajalikuks mahutavuseks $Q = 0,062 \text{ m}^3/\text{m}$. Standardsest Proctorteimist saadi drenkihis kasutatava keskliiva maksimaalseks kuivmahumassiks $\rho_d = 1,71 \text{ Mg/m}^3$, mis teeb $n = 0,36$; $h_1 = 0,14$, $\phi_{\text{talv}} = 0,4$. Lahendades valemi 1.24 saadakse vastuseks, et drenkihi vajalik paksus on $h = 0,35 \text{ m}$.

Näites 11 leiti, et drenkihi vajalikuks paksuseks on $0,31 \text{ m}$, käesolevalt saadi $0,35 \text{ m}$. Drenkihi paksusena tuleb kasutada suuremat.

Drenkihi arvutamise tulemusi on võimalik korrigeerida, muutes:

- drenkihi materjali filtratsioonimoodulit;
- drenkihi põikkallet;
- filtratsioonitee pikkust.

1.3 Külmakerkest

Kui pole viidatud teisiti, pärineb järgnev materjal allikast [20]

1.3.1 Peamised põhimõtted

Sisuliselt kehtib muldkehale kaks kriteeriumit (jättes stabiilsusküsimused kõrvale, oletame, et need on jäädavalt tagatud):

- et kandevõime püsiks sellisena, nagu katendiarvutuses on arvestatud;
- et külmakeerge jääks arvestatud (lubatud) piiridesse.

Vee jäätumine pinnases sõltub pingeseisundist ja vee soolasisaldusest. Seega vesi ei pruugi jäätuda 0°C juures. Külmakerkega on tihedalt seotud see, kui palju on pinnase pooride vahel vaba vett, mida omakorda mõjutavad pinnase mineraloogilised omadused, keskmine terasuurus, terastikuline koostis (sõelkõver), pinnaseosakeste eripind ja nende pindpinevusjõud.

Jämedamaterjalistes (liiv)pinnastes, kus vee kapillaartõus on väike, on pinnasvee kõrgus (tase) praktiliselt sama, mis veega küllastunud ja küllastumata piirkonna piir. Pinnastes, kus kapillaartõus on märkimisväärne, on veega küllastunud piirkond kõrgem, kui geoloogiliste uuringutega määratav pinnasvee kõrguse piir.

Külmakahjude all mõistetakse pinnase külmumisest tingitud külmakerkeid ja/või sulamisest tekkivat sulamispehmenemist. Külmakahjude peamiseks põhjustajaks on jääläätsede teke külmafrondis, mis tekitab külmakerkelise pinnase paisumise, mis põhjustab kogu teekatendi kerkimise, mida nimetatakse külmakerkeks. Külmakerkelised pinnased on sellised, milles toimub sobivates niiskus- ja külmumisoludes märkimisväärne jääläätsede teke. Jääläätsed tekivad sulanud pinnasest külmumispiirile imenduvast veest.

Külmakerkekindlad on sellised materjalid, kus külmumise tagajärjel märkimisväärset jääläätsed ei teki. Kogu külmakeerge ei ole tingimata tingitud jääläätsedest, vaid ka poorides sisalduva vee jäätumine võib põhjustada lokaalseid, väiksemaid kerkeid.

Külmakerke neli eeldust on:

- külmakerkelise materjali olemasolu;
- külmakerkeline pinnas peab jäätuma ehk temperatuur selles peab langema alla 0°C;
- jäätumistsoonis peab olema piisavalt vett;
- külmakerke üleslükkejõud peab ületama pealmiste pinnaste ja konstruktsioonide koormuse.

Külmakerge külmaohututes pinnastes

Kui õhutemperatuur langeb alla 0°C, hakkab soojast maapinnast soojus liikuma välja ning külmumispiir liigub pinnasesse. Kuna õhutemperatuur võib langeda palju kiiremini, kui pinnase temperatuur, tekib õhu ja pinnase vahele suur temperatuurigradient. Kui külmapiir liigub kiiresti, ei jõua jäätumistsooni koguneda piisavalt vett, et saaksid tekkida jääläätsed. Sellest saab tekkida vaid nõ kohalik ehk *in-situ* ehk esmane külmakerge, mis moodustub poorides oleva vee külmumisel.

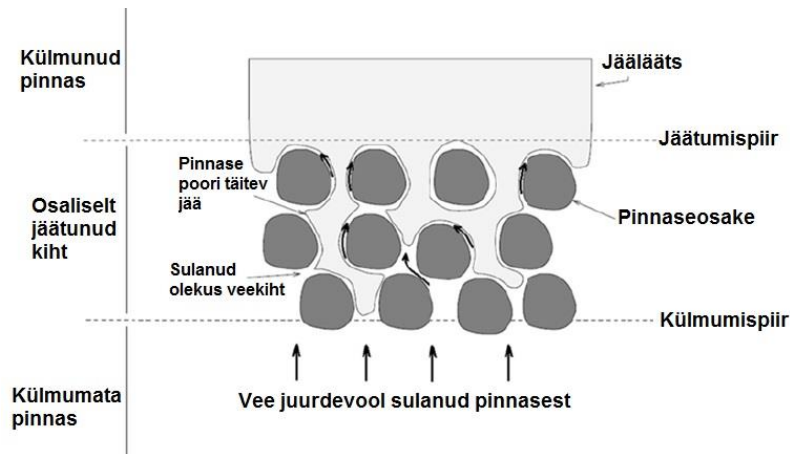
Taoline külmakerge võib esineda ka täiesti külmaohutus pinnases, kui see on veega küllastunud või selle lähedases olekus. Poorides olev vesi paisub külmudes umbes 9%. Külmakerke tekkimise eelduseks on see, et vesi ei mahu algsesse pooriruumi ning paisumine ei saa toimuda ei külgedele ega ka allapoole.

Uuringud on näidanud, et mitte küllastunud pinnastes on külmakerke suurus 2...3% külmumissügavusest. Tavaliselt ei peeta taolist külmakerget ohtlikuks, kuid lõppkokkuvõttes võib just see olla viimane mõjutaja kogu külmakahjude osas.

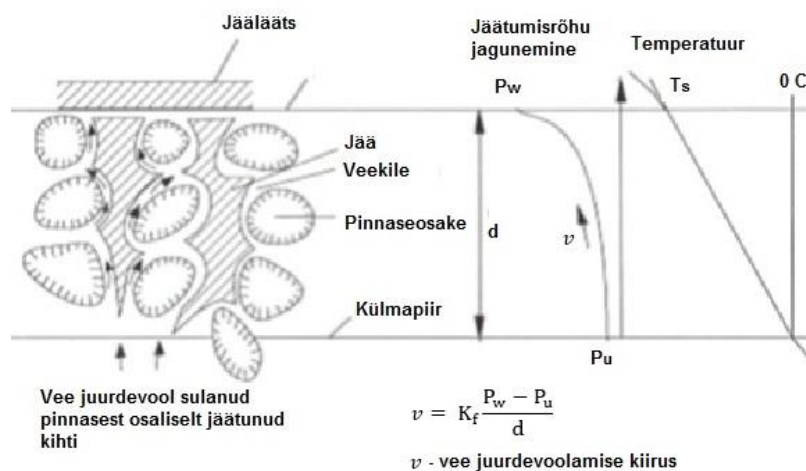
1.3.2 Külmakerkeprotsessist

- **Osaliselt jäätunud pinnasekiht**

Üldine arusaam jääläätse moodustumise osas põhineb nõ osaliselt jäätunud piirkonna olemasolul. Külmumisel pinnaseosakese pinnal olev mittejäätunud veekiht toimib vett juhtiva kihina, mille kaudu vesi pääseb liikuma kasvavasse jääläätse. Jäävaba veekihi olemasolu on vee liikumise eelduseks sulanud pinnasest jääläätse. Osaliselt jäätunud tsoon tekib jäätunud ja sulanud pinnase vahele ja jääläätsed tekivad osaliselt jäätunud tsooni ülapoolele. Tsooni pealmise osa temperatuur on veidi alla 0°C (tolmsetes materjalides umbes -0,2...-0,5°C) ja alumise tsooni temperatuur on 0°C (joonised 1.37 ja 1.38). Uuringud on näidanud, et samaaegselt sulanud ja külmunud vett sisaldava kihi paksus võib olla mitukümmend sentimeetrit. Eelnevalt kirjeldatud osaliselt jäätunud kihi paksus on siiski oluliselt õhem ning selle paksus sõltub pinnase omadustest. Näiteks tol mudes on tsooni paksus vaid 2...4 mm. Kaasaegne arusaam osaliselt jäätunud tsoonist põhineb oletusel, et temperatuuri liikumine järgib Fourieri seadust, pingeolukord Clausiukse-Clapetyoni valemit ja vee liikumine Darcy seadust.



Joonis 1.37. Külmunud pinnase tsoonid ja vee liikumine neis. [20]



1.38. Osaliselt jõõdnud kihis veevoolamine. [20]

• Jääläätsede moodustumine

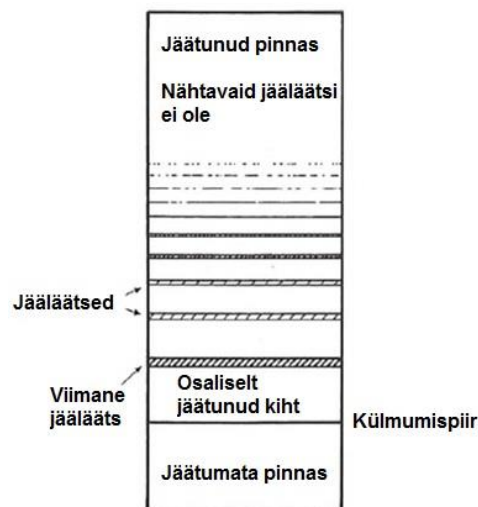
Kui külmatsoon liigub pinnases kiiresti, ei jõua külmatsooni koguneda piisavalt vett, et see võiks moodustada jääläätsi. Sel juhul saab moodustuda vaid esmane külmakeerge poorides olemasolevast veest. Kui külmatsooni edenemine aeglustub, võib pinnases tekkida stabiilne olukord, mil jääläätsede moodustumine on võimalik. Külmumispiiri liikumiskiirust mõjutavad mitmed tegurid, nagu temperatuuride erinevus pinnase ja õhu vahel, lumekihi paksus, taimeistiku olemasolu (viimased aeglustavad külma tungimist pinnasesse). Külmapiiri liikumist aeglustab ka veel vee jäätmise tagajärjel vabanev soojus.

Jääläätsede suurenedes lisandub sinna vett all olevast pinnasemassiivist. Jääläätsede kasvu piirab saada oleva vee hulk, mis saab liikuda jääläätsede moodustumispaika. Nii kaua, kui vesi liigub allpool olevast pinnastest jääläätsede moodustumispaika ja kui temperatuurigradient püsib muutumatuna, võivad jääläätsed kasvada pea lõpmatult.

Vee jäätmise tagajärjel vabaneb energia, mistõttu külmumistsoon võib liikuda sügavamale, mis päädib järjest külmemate temperatuuridega osaliselt jäätunud tsoonis, mille tagajärjel tsooni ülaosa veeläbilaskevõime väheneb ning vee juurdevool jääläätsede katkeb. Seejärel hakkab vesi kogunema eelmise jääläätsede alla uude kohta, kus on saadaval jällegi piisavalt vett kasvavale jääläätsel. Uue veekogunemiskoha määrab hetkel osaliselt jäänud oleva pinnase veeläbilaskevõime ja pinnases saada

oleva vee hulk. Selline protsess jätkub kuniks külm ei tungi enam sügavamale ja moodustub viimane jäälääts.

Kirjeldatud jääläätsede tekkeprotsessi ja nende tungimist sügavamale kujutatakse joonisel 1.39, kus pinnase ülaosas ei ole silmnähtavaid jääläätsesid külmumispiiri kiire edenemise tõttu. Külmumispiiri liikumiskiiruse vähenedes hakkab esinema õhukesi jääläätsi. Nende omavaheline kaugus on üpriski väike, kuna nende moodustamise ajal on temperatuurigradient olnud suur. Aja jooksul temperatuurigradient väheneb ja külmumispiiri nihkumine sügavamale muutub aeglasemaks. Siis osaliselt jäänud kihi paksus suureneb ja jääläätsed kasvavad paksemaks. Kõige paksemad jääläätsed kuivatavad ümbritsevat pinnast tugevamini, kui õhukesed läätsed. Seetõttu jääläätsede omavaheline kaugus (vertikaalsuunas) sügavamale pinnasesse minnes kasvab. Kui külmumissügavus enam ei suurene, saavutab osaliselt jäänud kiht oma maksimumpaksuse.



Joonis 1.39. Jääläätsede asukohad. [20]

Kirjeldatud külmakerkemehhanismi kirjelduse põhjal võib öelda, et mingid pinnased on külmumisele altimad, kui teised. Savis (väga peeneteralises pinnases) on vee liikumine jääläätsede tekkimispaika liiga aeglane. Teisalt liivpinnaste suur poorsus (ja suured poorid) juhib vett ülespoole halvasti. Tolmsed materjalid pakuvad see-eest parimaid tingimusi vee liikumiseks kasvavasse jääläätse ja on seega kõige külmaohtlikumad.

Jääläätsed on tavaliselt mõnest millimeetrist mõne sentimeetrini paksud ja moodustuvad puhtast jääst ega sisalda pinnaseosakesi. Laboris tehtud külmakerkekatsetega on nähtud, et jäälääts moodustub kogu proovikeha läbimõõdu ulatuses. Uuringutes on osutatud sellele, et jäälääts takistab vee liikumise ülespoole jäänud pinnasesse. Katsetulemustega saadud jääläätsede paksused ja jäätumispiirile kogunenud vee hulga vahel on olemas tugev korrelatsioon. Jääläätsede kogupaksus omakorda korreleerub külmakerke suurusega.

- **Külmarkerked ilma väljastpoolt lisanduva veeta**

Nõ kohalik ehk „in-situ“ ehk esmane külmarkerke võib tekkida külmarkerkekindlates pinnastes, kui need on küllastunud või sellelähedases seisundis või külmakartlikes pinnastes, kui külmumine on nii kiire, et jäälääts ei jõua tekkida. Esmane külmarkerke tekib poorides oleva vee jäätmisel, s.t see ei nõua väljastpoolt vee lisandumist. Teine külmarkerketüüp ehk sekundaarne külmarkerke tekib jääläätsedest, mille kasvamine on seotud külmumistsooni juurdevoolava vee hulga.

Külmakerke suurenemine eeldab, et jäätuvasse pinnasesse lisandub pidevalt uut vett. Looduses on täheldatud, et sellises olukorras pinnasvee kõrgus (mida võib lugeda külmumise seisukohalt ka kapillaarvee tõusukõrguseks) ja jääläätse tekkepaik peavad olema üksteisele suhteliselt lähedal. Sügaval olev pinnasvesi vähendab vee juurdepääsu, mis vähendab külmakerke suurusi, kuid ei tingimata väldi külmakergete teket.

Mitmed laboriuuringud on näidanud, et märgatav külmakerge võib toimuda ka ilma vaba vee allikata (pinnasvee olemasoluta), kuna pinnases olev õhk ja vesi võivad paigutuda pinnase jäätumisel ümber. Teiste sõnadega pinnases olev olemasolev vesi võib kulgeda imemisjõudude tagajärjel jääläätse tekkekohtadesse. Kui poorides olev vesi liigub jääläätse poole võib pinnases tekkida tühimikud, kui need ei täitu uuesti veega. Olukordades, kus väljastpoolt ei ole vett saadaval, piirdub jääläätse vaid pinnases saadaoleva veega ning külmakerke suurus on oluliselt piiratum.

- **Vee liikumine veetasapinnast jääläätsedesse**

Vee liikumisega külmuvas pinnases on otseselt seotud pinnases toimuv „*suction*“, millest olulisemad komponendid on osmootne rõhk (ing. *osmotic suction*) ja maatriks rõhk (ing. *matrix suction*). Pinnase jäätumisprotsessi puhul lisandub siia veel jäätumisrõhk (ing. *cryosuction*), mis hakkab mõjutama, kui temperatuur langeb alla 0°C.

Maatriks rõhk on seotud kapillaartõusuga (see seob kokku adsorptsiooni ja kapillaarsuse; vesi liigub madala maatriksrõhuga piirkonnast ehk märjast pinnasest kõrge maatriksrõhuga piirkonda ehk kuiva pinnasesse), mis tõstab vee alumistest pinnasekihtidest lähemale külmumispiirile, kust jäätumisrõhk (ing. *cryosuction*) tõmbab selle jääläätse sisse. Sellele aitab kaasa osmootne rõhk, mis toimib jäätuvas pinnases järgnevalt – jää moodustub puhtast veest, seega poorides oleva vee jäätumisel vabanevad sulamata vette soolad. Seetõttu piirkonna ioonikonsentratsioon kasvab ja sulas olekus oleva vee jäätumpunkt läheb madalamaks. Ioonikonsentratsioonide erinevust püütakse „tasandada“ pooridesse lisanduva vee arvelt, mille tagajärjel alumistest kihtidest, kus vee soolasisaldus on madalam, lisandub vett ülemistesse kihtidesse, kus vee soolasisaldus on kõrgem.

Suurim mõjutaja vee lisandumisele jääläätsedesse on siiski jäätumisrõhk; mida suurem on temperatuuride erinevus, seda suuremaks kasvab vett ülespoole imav rõhk. Jäätumine tekitab negatiivse pooriveerõhu, mis põhjustab veemolekulide voolamise külmafronti. Osaliselt jäätunud tsooni üla- ja alaosa vahele tekib rõhkude erinevus. Jäätumisfrondi all olevas sulanud olekus pinnases on suurem rõhk, kui selle ülal olevas pinnases. Rõhkude erinevused tekitavad vee liikumise alaosast ülaosasse. Pinnaseosakeste külge seotud sulas olekus vesi moodustab jääläätse voolavale veele voolukanalid, mis toimivad kui kapillaarsed torud. Temperatuuri langedes järjest suurem osa veest muutub jääks ning see põhjustab voolukanalite ahenemise, mis kokkuvõtteks viib jääläätse sulgumiseni.

Saksa Freibergi kriteeriumi järgi, mida suurem materjali kapillaartõusust, veeläbilaskvusest, külmumissügavusest ja pinnasvee kõrgusest sõltuv vooluhulk Q on, seda enam kapillaarvett külmumistsooni tõuseb ja seda suurem on külmakerge (valem 1.26).

$$Q = k * \frac{h_c - (Z - R)}{(Z - R)} \quad (1.26)$$

kus

k – pinnase filtratsioonimoodul;

h_c – kapillaartõusu kõrgus pinnases;

R – külmumissügavus;

Z – pinnasvee sügavus mõõdetuna maapinna pealt.

Kui kapillaartõusu kõrgus ja külmumissügavus ei kohtu, on jääläätsede teke ja seega ka külmakerke suurus väiksem. See siiski ei pruugi vältida külmakergete teket, kuna temperatuuride erinevusest tekkiv rõhk on oluliselt suurem, kui maartiks rõhk, mis põhjustab kapillaartõusu.

- **Külmakerke tekke eeldused eri konstruktsioonikihtides**

Külmakerke tekkimine eeldab pinnase jäätumist, pinnase külmakerkeliste omaduste olemasolu ehk kalduvust jääläätsede tekkimisele, jääläätsede tekkeks vajaliku vee saadaolemist ja seda, et jääläätsede tekkimisest põhjustatud üleslükkejõud on suurem, kui pealmiste kihtide raskus. See, millised teekonstruktsiooni kihid jäätuvad, kui kiiresti ja kui sügavale, sõltub materjalide terakoostisest, kihtides oleva vee ja sooja hulgast ning külmahulgast ja selle püsivusest/muutusest.

On leitud, et üheks peamiseks mõjutajaks materjali külmaohtlikkusele on peenosiste sisaldus (kõrged korrelatsioonid on leitud eelkõige 0,02 ja 0,002 mm osakeste, kuid ka 0,063 mm vahel), kui see kasvab, tõuseb ka külmaohtlikkus. Kui materjal on külmaohtlik, siis külmakergete tekkimine eeldab ka vee olemasolu, mis tuleb reeglina pinnasveest, mis on vabalt saadaval kas puuduliku kuivendussüsteemi tõttu või läbi kapillaartõusu sügavamatest kihtidest. Mõningast külmakerget tekitab ka pinnastes endis sisalduv vesi ja selle ümberpaigutumine.

Katendikihtidest jõuab külm reeglina läbi nii kiiresti, et sealt külmaohtu ei teki. Killustiku (või ka hea filtratsiooniga drenkihi) all olevas kihis külmafrondi edenemiskiirus aeglustub, eriti kui see sisaldab palju peenosiseid. Külmapiiri aeglustumist mõjutab ka seotud vee hulk.

1.3.3 Täiendavad mõtted külmakerkest

Eelnevat täiendab vajaliku teooriaga veel allikast [21] leitav.

- **Külmakerkesse liituv**

Külmumispiir on jäätunud ja sulanud pinnase vaheline piir ning sellega kujutatakse ka jäätumise edenemist. Külmamäär (soome keeles „*pakkasmäärä*“) on külma aja päevade või tundide summa, seda kasutatakse talve pikkuse iseloomustamiseks ning see on tähtsaim külmumist puudutav väline tegur. Talve jooksul toimuvat protsessi kujutatakse kokkuvõtlikult joonisel 1.40.

- **Pinnases olev vesi ja selle jäätumine**

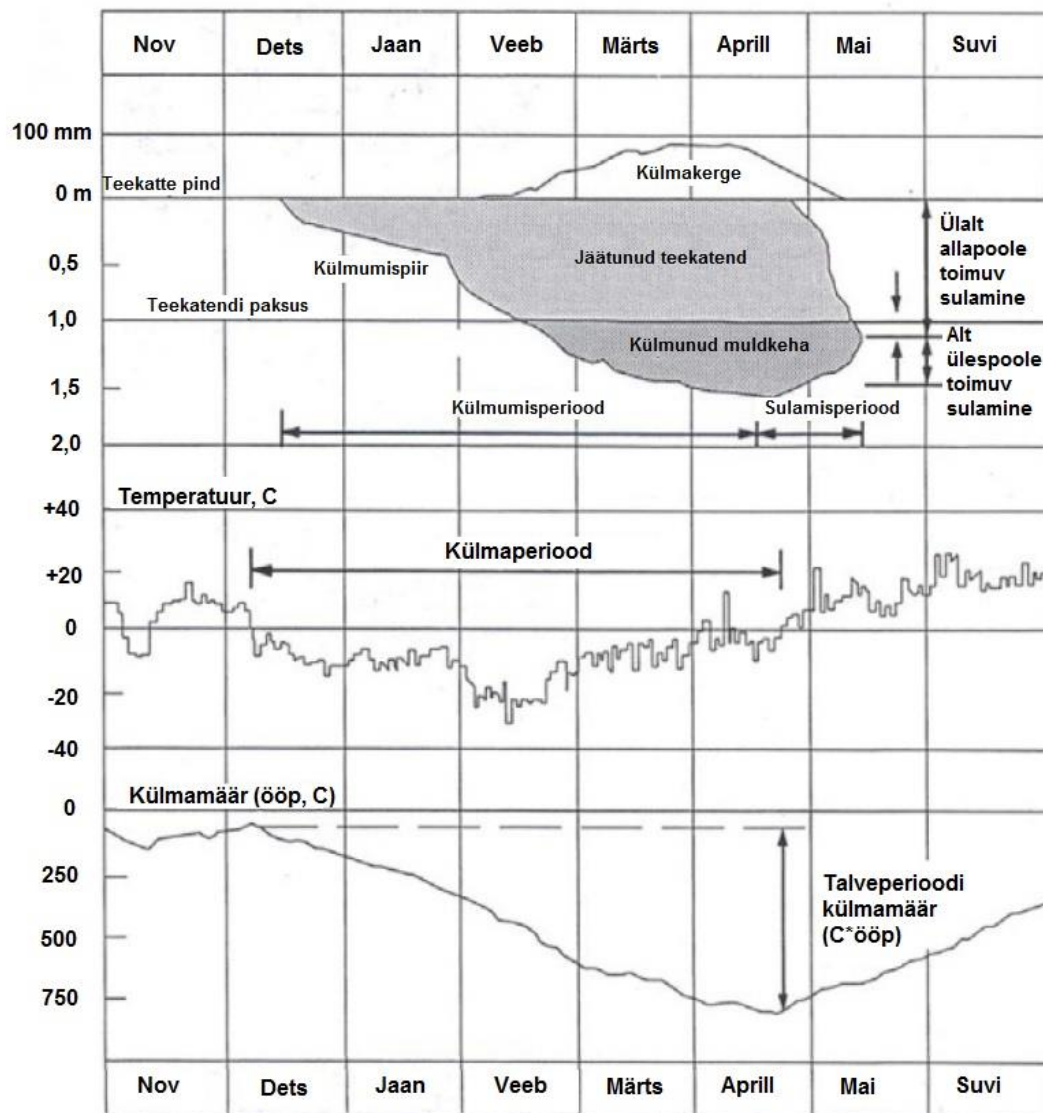
Pinnases olev vesi on üks külmakerke eeldusi. Kui lisavee saadavus raskendub, külmakerke kasv aeglustub või lõpeb täielikult. Poorides oleva vee jäätumine sõltub sellest, kui tugevalt see on seotud pinnaseosakeste külge. Poorides esinev vaba vesi jääb 0°C juures, kuid tugevalt pinnaseosakeste külge seotud adsorbeeritud vesi on 0°C juures veel sulanud olekus.

Jämedateralistes materjalides on vee soojusjuhtivus väiksem, kui pinnaseosakestel ning seega jahtub pinnas kiiremini, kui vesi ning jää moodustumine algab pinnaseosakestest (joonis 1.41). Peeneteralistes materjalides algab jää moodustumine hoopis poori keskelt, kuid pinnaseosakeste külge jääb sulanud vesi (joonis 1.42).

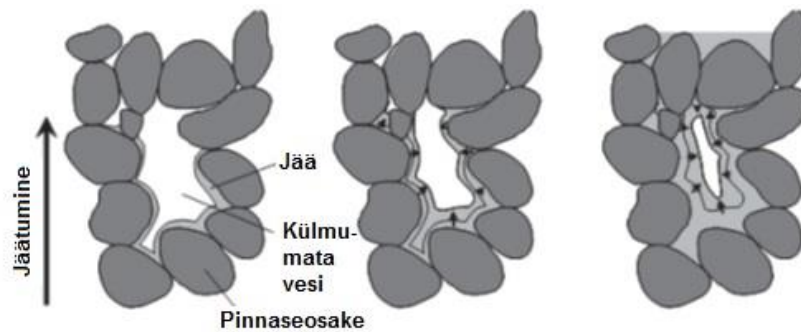
Külmkerge võib tekkida pinnases juba eksisteeriva vee jäätumisest või lisavee jäätumispirkonda lisandumisest. Külmakerkelises pinnases tekib selle tagajärjel jääläätsed, mis moodustuvad osaliselt jäätunud piirkonda, mille ülaosa temperatuur on alla nulli ja alaosas null kraadi. Piirkonna olemasolu põhineb sellele, et pinnases on vett temperatuuril alla 0°C.

Veeläbilaskvus on suurem jämedateralisemates materjalides, mille poorid on suuremad. Teraläbimõõdu vähenedes ka veeläbilaskvus väheneb ja vesi ei pääse seega vabalt liikuma. Peeneteralistes materjalides on poorsustegur suur, mis võimaldab suurema seotud vee olemasolu. Külmakerke osas on oluline just jäätumispirkonnas olemasolev ja sinna lisanduv vesi. Pinnastel, mis on külmakerkelised, peab seega olema piisav veeläbilaskevõime, et vesi saaks lisanduda külmumispüürile ja samal ajal peab vesi olema seotud pinnaseosakeste külge piisavalt tugevalt, et see ei jäätuks 0°C juures, mis võimaldab vee liikumise joonise 1.37 kohaselt. Eelnev annab seega lisaselgituse sellele, miks jämedateralisemad (loe, filtreeruvad pinnased) ei ole külmaohtlikud.

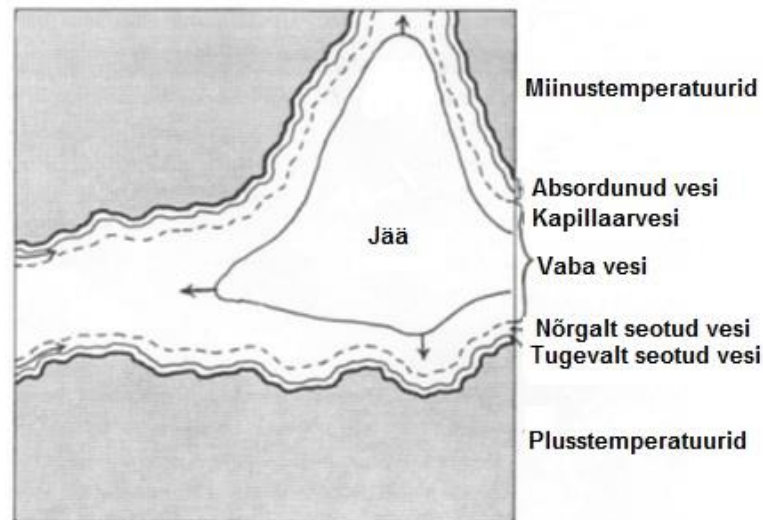
Külmumispüüri all oleva pinnasvee kõrgus külmumissügavuse suhtes mõjutab nii külmakerke suurust kui ka vee liikumist külmumise piirkonda. Pinnasvee kaugus külmumissügavuse osas ei ole siiski lineaarses seoses külmakerkega külmakerkelistes materjalides.



Joonis 1.40. Graafik, mis kujutab külma ja külmakerke arenemist. [21]



Joonis 1.41. Vee käitumine külmumisel jämedamateralistes pinnastes – vesi jäätub kõigepealt pinnaseosakese külge ning jää hakkab kasvama väljas sisse. [21]



Joonis 1.42. Vee käitumine külmumisel peeneteralistes pinnastes – vesi jäätub poori seest väljapoole, pinnaseterakese külge. [21]

1.3.4 Pinnaste külmakerkelisuse hindamine

Kuna teemat on käsitletud ka eestikeelses kirjanduses palju, siis siinkohal ei hakata kõike seda kordama, vaid lisatakse uut materjali.

- **Pinnase külmakerkelisuse hindamine**

Materjali külmakerkelisust hinnatakse kas külmakerketestiga või terakoostise alusel. Külmakerketestiga määratakse soomekeelse mõistena „*rounimiskerroin*“, mida võiks nimetada pinnase külmakerkelisuseks või külmakerkeindeksiks, mida tähistatakse tähisega SP, mille selgitus on esitatud allikas [22] ja koosneb valemist 1.27.

$$SP = \frac{v}{\text{gradT}} = \frac{\Delta h * Z}{\Delta t * (0 - T_{\text{peal}})} \quad (1.27)$$

kus

SP – külmakerkelisus (mm^2/Kh);

Kh – talveperioodi külmamäära ühik (v.t valem 1.28);

v – külmakerke kiirus (mm/h);

$\text{grad}T$ – külmunud pinnasekihi keskmine temperatuurigradient (K/mm);

Δh – külmakerke suurenemine ajavahemikus Δt (mm);

Δt – temperatuurivahemik (h);

Z – külmunud pinnasekihi kõrgus ehk külma sügavus (mm);

T_{peal} – temperatuur maapinnal ($^{\circ}\text{C}$).

Talve külmamäär (valem 1.28) arvutatakse õhutemperatuuri ööpäevastest keskmistest temperatuuridest, mis mõõdetakse 2 m kõrguselt maapinnast ja mis koosneb kolme tunni jooksul saadud tulemuste keskmisest väärtusest. Külmamäära arvutamisel võetakse arvesse nii pluss- kui miinustemperatuurid.

$$F = 24 * \sum_j (T_f - T_{d,j}) \quad (1.28)$$

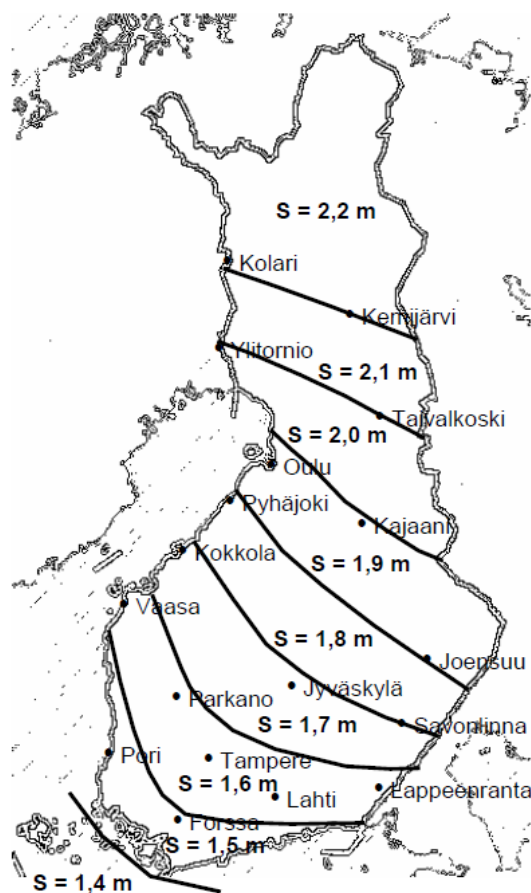
kus

F – talve külmamäär (Kh või siis teise ühikuga h°C);

T_f – jäätumispunkt 0°C ;

$T_{d,j}$ – ööpäevane keskmine temperatuur päevale j , $^{\circ}\text{C}$.

Külmamäär sõltub talvest ning võib seega varieeruda eri aastatel märkimisväärselt. Reeglina arvestatakse külmamääradega F_2 , F_5 , F_{10} , F_{20} , F_{50} ja F_{100} , kus alaindeks näitab külmamäära esinemist iga mitme aasta jooksul. Joonisel 1.43 on kujutatud teede arvutuslikku külmumissügavust, mis kordub kord 2 aasta tagant ning seda, kuidas see on seotud arvutusliku külmamääraga. Taolisi andmeid kasutatakse Soomes teede külmakerkearvutustel.



Külmumis- sügavus S (mm)	Külmamäär F (Kh)
2200	33611
2100	30625
2000	27778
1900	25069
1800	22500
1700	20069
1600	17778
1500	15625
1400	13611

$$F = \frac{S^2}{144}$$

$$S = 12 \cdot \sqrt{F}$$

Joonis 1.43. Külmumissügavuse kaart Soomes, mida kasutatakse teede külmakerkearvutustes. Esitatud valemitega on omavahel seotud külmumissügavus ja külmamäär. Eestis arvestatakse külmumissügavusega 1,25 m, mis vastab külmamäärale 10'850 Kh. [23]

Lühidalt öeldes on külmakerkelisus SP külmakerke kiiruse ja külmumispiiril oleva temperatuurigradiendi suhe. SP on pinnase külmakerke tugevuse tunnusnumber, mida kasutatakse külmakerkearvutustes.

Pinnase külmakerkelisus SP leitakse kas objekti külmakerke mõõtetulemuste, laborikatsega või ka pinnase terastikulise koostise alusel (nimekiri alatest kõige täpsemast kuni rohkem ebatäpseni). Kuna käesolevas uuringus kasutati külmakerketesti, siis järgnevalt lühidalt sellest.

Allikas [22] esitatakse kriteeriumid, mille alusel liigitleda pinnased külmakerkelisuse järgi, mis on esitatud tabelis 1.9. Allikas [22] tuuakse välja veel ka see, et praktikas on tegelikult täiesti külmaohutu materjal, mille SP on kuni 1,1 mm²/Kh ja nelja ööpäeva (96 h) külmakerge 2,2 mm. Olenevalt looduslikest oludest ja vaadeldavast konstruktsioonist, võib külmaohutuks olla ka materjal, mille SP on nimetatust kõrgem. Põhjus on selles, et laboratoorselt määratud külmakerkelisus SP on leitud „ideaaltingimustes“ – proovikeha on veega küllastatud (tekib esmane külmakerge), vesi on vabalt saadaval (vee juurdevool jääläätse sisse ei ole takistatud ehk tekib teisene külmakerge) ning külmumispiiri ja „pinnasvee“ omavaheline kaugus on väga väike. Tegelikult oludes ei pruugi väga külmakerkeliseks liigitatud siiski tekitada teele nähtavaid külmaohutusi, kui objekti olud ei ole külmakerke jaoks soodsad või vaadeldav materjal asetseb konstruktsioonis nii sügaval, et kattekihi kaal ületab külmakerke üleslükkejõu. Külmakerke arvutamist lähtudes SP-st käsitletakse peatükis 1.3.4.

Tabel 1.9

Külmakerkelisuse liigitlus

	SP	h_{24h} (mm)	h_{96h} (mm)
Külmakerkekindel	< 0,5	< 0,6	< 1,2
Vähe külmakerkeline	0,5...1,6	0,6...2,2	1,2...3,7
Keskmiselt külmakerkeline	1,6...3,3	2,2...4,5	3,7...7,4
Väga külmakerkeline	> 3,3	> 4,5	> 7,4

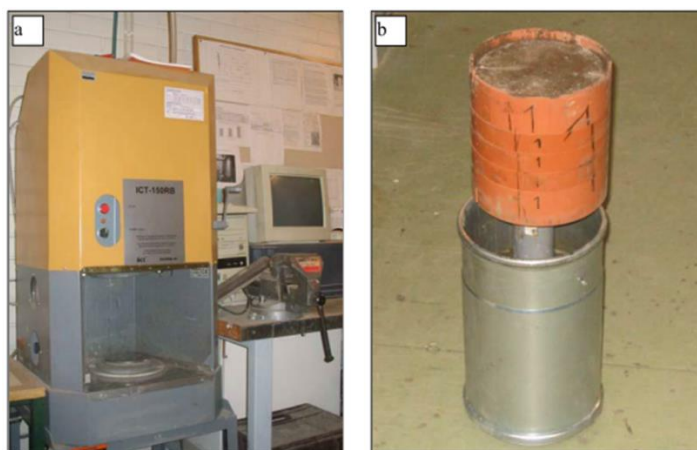
- Külmakerketest**

Järgnevalt kirjeldatakse protseduuri, kuidas käsitleti käesolevas uuringus olevaid materjale Tampere Tehnikaülikoolis. Külmakerketestide konfiguratsioone võib olla mitmeid.

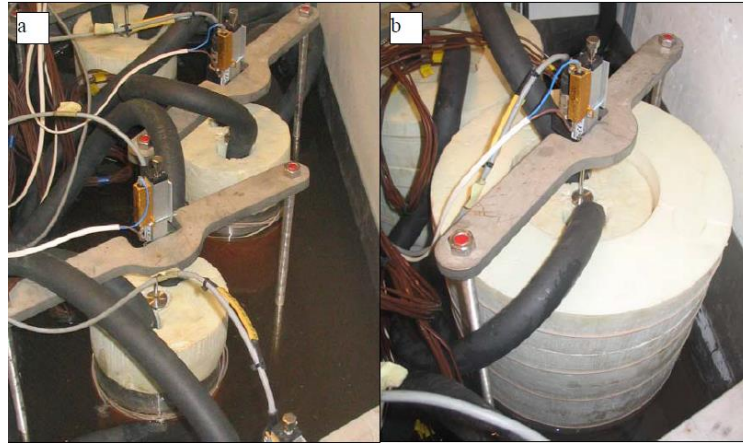
Külmakerketestiga modelleeritakse testitavas pinnases taolist olukorda, mis esineb looduses. Testitav pinnas tihendatakse maksimaaltiheduseni 150 mm läbimõõduga vormi kasutades güraatorihendajat (joonis 1.44). Seejärel paigaldatakse proovikeha veevanni küllastatakse 1 ööpäeva jooksul veega samal ajal seda jahutades temperatuurini $+1...+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (joonis 1.45a ja 1.46). Enne, kui alustatakse külmutamisega, alandatakse veepind umbes 12 mm kõrgusele proovikeha põhjast ning soojustatakse XPS rõngastega vältimaks külmakadusid (1.45b ja 1.46).

Käesolevas uuringus proovikehale ei asetatud peale koormust (koormuseks oli vaid testseadme kaane enda kaal 3 kPa). Proovikeha jahutati ülalt allapoole kasutades keskmist temperatuurigradiendi umbes $27\text{ }^{\circ}\text{C/m}$. Külumispäiiri edenemist jälgiti iga 25 mm tagant paigaldatud temperatuurianduritega ja külmakerge registreeriti liikumisanduriga.

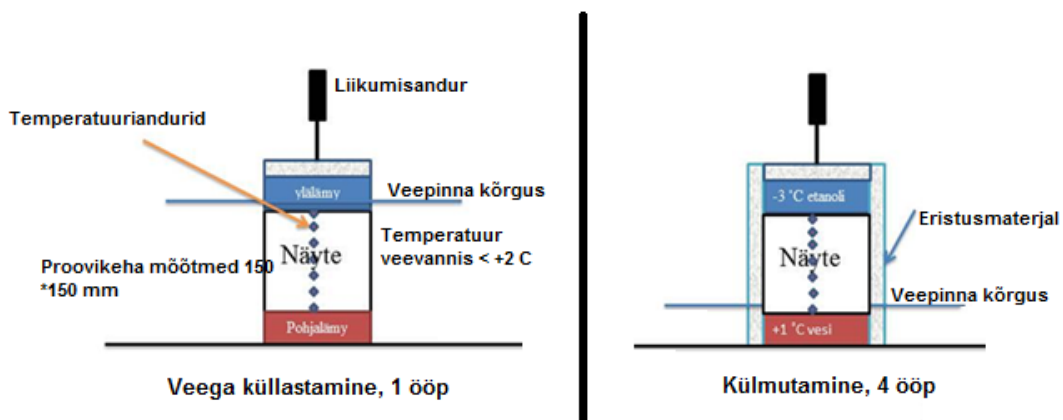
Tulemustena esitatakse külmakerge 24 h ja 96 h jooksul ning pinnase külmakerkelisus SP (mm^2/Kh).



Joonis 1.44. Külmakerketesti proovikeha valmistamisel kasutatakse güraatorit (a). Proovikeha valmistatakse rõngaste sisse, mis ei takista külghõõrde tõttu pinnase kerkimist (b). [22]



Joonised 1.45. Proovikehade küllastamine (a) ning katseseadistus (b). [22]



Joonis 1.46. Külmakerketesti põhimõtteline skeem. Kõigepealt toimub proovikeha veeküllastamine, misjärel veetase alandatakse ning algab külmutamine vee vaba juurdepääsu tingimustes.



Joonis 1.47. Külmakerketesti proovikehad peale katsetust, kui soojustus on eemaldatud ja katsekehad on veevannist välja tõstetud. [22]

- **Külmakerkelisuse kriteeriumid terakoostise alusel**

Allikas [24] öeldakse peatükis 10.4.1, et pinnase külmakerkeliste omaduste hindamine läbi sõelkõvera on osutunud ebatäpseks ning SP tuleks määrata läbi külmakergete mõõtmiste objekt

või materjali testimise külmarkerketestiga laboris. Kui külmarkerketesti ei ole võimalik teha, saab SP-d hinnata tabelis 1.10 toodud andmete põhjal (kehtib muldkeha ja/või loodusliku aluspinnase osas). Tabelis on täpsuse huvides jäetud nimetused soomekeelsetena. Nimetatud pinnaste eestikeelseteks vasteteks võiks olla järgnevad:

- *hiekkamoreeni* – looduslik kruus(liiv);
- *silttimoreeni* – mölline või möllikas kruus;
- *silttinen hiekka* – möllikas liiv;
- *savinen siltti ja savi* – savikas, savine liiv, savi;
- *lihava savi* – savi.

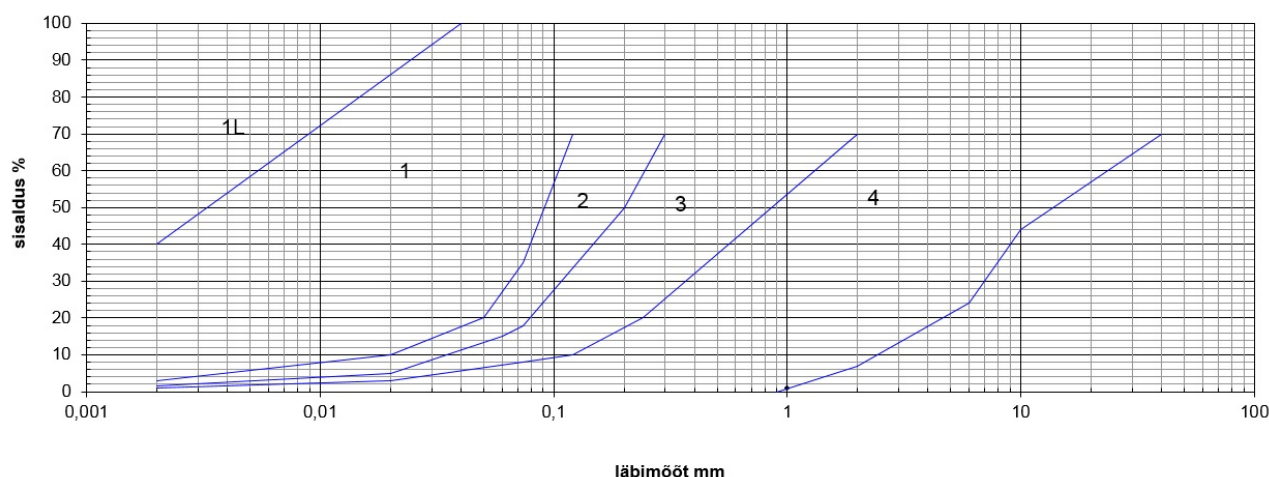
Tabel 1.10

Pinnase külmarkerkelisus SP lähtudes terakoostisest

Materjal	Savisisaldus, %	SP, mm ² /Kh
<i>Hiekkamoreeni</i>	< 10	5
<i>Silttimoreeni</i>	> 10	10
<i>Silttinen hiekka</i>	< 10	5
<i>Savinen siltti ja savi</i>	10...50	10
<i>Lihava savi</i>	> 50	5

Tabelis 1.10 toodi välja SP peamise kriteeriumina savisisaldus. Nii Soomes kui ma kujal maailmas kasutatakse külmarkerkelisuse hindamisel väga laialdaselt 0,02 ja 0,002 mm osake osakaalu. Näiteks andis Casagrande aastal 1932 soovitusel, mis on enimkasutatud kas otse või mingil määral modifitseerituna. Casagrande kohaselt on pinnas kindlasti külmarkerkeline, kui $C_u > 15$ ja kus 0,02 mm terasid on rohkem, kui 3% või kui $C_u < 5$ ja kus 0,02 mm terasid on rohkem kui 10%. Kui $< 0,02$ mm osiseid on alla 1%, külmarkerkeid ei toimu.

Eestis kõige tuntumaks külmarkerkekriteeriumiks on Soomes kasutatav ISSMFE 1989 aastal koostatud külmarkerkekriteeriumid (joonisel 1.48), kuid see on vaid üheks mitmetest. Laborikatsed on näidanud, et sõelkõvera järgi külmaohutud materjalid võivad omada siiski väga suurt külmaohtlikkust. Allikas [22] leidis raudteede uuringuprogrammis, et täiesti külmaohutu materjal on selline, milles ei oleks 0,02 mm läbimõõduga osiseid üle 1,5%. Sellele omakorda vastas peenosiste (0,063 mm) sisaldus 2,7%. Kõige kõrgem seos külmarkerkelisuse ja terakoostise vahel eksisteerib alla 0,02 ja 0,002 mm osakeste osas, kuid korrelatsioon ei ole kuigi tugev (maksimaalselt $R^2 = 0,62$). Võrreldes 0,063 mm osakeste korrelatsiooni külmarkerkega, saadi tulemuseks $R^2 < 0,52$. Seega mõjutavad pinnase külmarkerkelisust tugevalt veel muud tegurid. Külmarkerkelisuse määravad koostöös väga mitmed tegurid ja kõige täpsemini saab määrata selle kas tehes objektil monitooringut või sooritades külmarkerketest.



Joonis 1.48. Materjalid, mille sõelkõverad asetsevad alal 1, on külmakerkelised. Materjalid, mille sõelkõverad asetsevad aladel 2,3 või 4 on külmakindlad niikaua, kuni nende sõelkõvera alumine ots ei ületa vasakpoolse sõelkõverapiiri joont (kriteeriumid tabalis 1.11). Materjalid, mis jäävad ala 1L sisse, on kergesti külmakerkelised. Läbimine 0,063 mm sõelast (täpsemalt, alad 0,02 ja 0,002 mm) on külmakerke suhtes kriitilise tähtsusega. Joonise täpsustus peenosiste osas on esitatud tabelis 1.11.

Tabel 1.11

Peenosiste kriteeriumid joonise 1.48 juurde

Tera läbimõõt (mm)	Seõlkõvera piirkond		
	2	3	4
< 0,002	≤ 3%	≤ 1,5 %	≤ 1%
< 0,02	≤ 10%	≤ 5%	≤ 3%
< 0,074	≤ 35%	≤ 18%	≤ 8%

Lisaks sõelkõveratele, lisas ISSMFE veel ka kriteeriumi kapillaartõusu alusel. Kui kapillaartõus jääb alla 1 m, on materjal tavaliselt külmaohutu, kui vahemikku 1,0...1,5 m, on tegemist kergelt külmakerkelisega, 1,5...2,0 m keskmiselt külmakerkeline ning üle 2 m eriti külmaohtlik.

Lisaks terastikulisele koostisele mõjutavad materjali külmakerkelisust järgnevad omadused:

- pinnase (eelkõige peenosise) mineraloogiline koostis;
- poorsustegur ja pooride suurus;
- eripind, mis määrab selle, kui palju pinnas vett absorbeerib;
- vee hulk, mida pinnas on suuteline endas hoidma teatud välise rõhu juures. See on seotud pinnase kapillaartõusu kaudu pinnase külmakerkelisusega.
- veeläbilaskevõime – kui see on väga väike, ei pääse vesi voolama sulanud piirkonnast külmumispiirkonda. Kui see on kõrge, siis ei moodustu vee liikumiseks vajalikku negatiivset rõhku.

Lisaks nendele määravad külmakerkelisuse veel mitmed välised mõjutajad, millest on olnud juttu eelpool.

Pinnase külmakerkelisus on seega suhteline ning selle liigitamine puhtalt terastikulise koostise alusel vaid teoreetiline. Kõige täpsem on külmakerkelisust hinnata vaadeldavates oludes ehk

objektil esinevate tingimustega. Samuti on oluline arvestada lubatavate külmakerkepiiridega, s.t külmakeerge võib tekkida, kuid teatud piirini.

Muuhulgas pinnase mineraloogilise koostumuse määramise tähtsust külmakerkekriteeriumite osas rõhutab allikas [25], mis keskendub küll tihendamise mõjudele teekonstruktsioonides kasutatavate pinnaste osas, kuid allikas tuuakse välja järgmised mõtted.

Pinnastele mõjuvad külmumis-sulamistsüklitel on märkimisväärne mõju nende kandevõime-deformatsiooniomadustele ja elueale. Kokkuvõtteks on tihendamisel teekatendis kasutatavatele materjalidele kriitiline tähtsus, kuid see omab kahte osapoolt: tihedus kasvab tihendamisenergia suurendamisega, seega kasvab ka pinnase tugevus, kuid väheneb veeläbilaskevõime, mis vähendab jääläätsede suurust. Teisalt põhjustab tihendamine pinnaseosakeste purunemist, mis tõstab peenosiste sisaldust, mis võib põhjustada sulamisaegset märkimisväärset kandevõime vähenemist.

Külmakindel materjal tähendab seda, et jääläätsede moodustamisega selles ei järgne konstruktsiooni deformatsioone ning peale sulamist kandevõime ei vähene. Selget piirjoont külmakindlate ja külmaohtlike materjalide vahel ei eksisteeri, see sõltub mitmetest teguritest, milleks on:

- terastikuline koostis ja selle jagunemine;
- peenosiste mineraloogiline koostis;
- orgaanilise aine sisaldus;
- pinnase keemiline koostis;
- veesisaldus ja küllastumise aste;
- tihedus;
- veeläbilaskvus;
- kapillaarsus;
- nihketugevus;
- pinnasvee kõrgus;
- vee juurdepääs ja selle hulk (sademed, imbumine, pinnasvesi);
- temperatuuritingimused (külmapäevade arv ja miinuskraadide suurus);
- kliima, eriti külmumis-sulamistsüklite arv;
- külmakerkelise pinnasekihi peal oleva katendi raskus;
- konstruktsiooni olemus ja erinevate kihtide koostöötamine (teekatend, raudtee jne).

Pinnase sulamisel mõjutavad selle käitumist samad tegurid, mis külmumisel, kuid oluliselt suuremat rolli mängib peal oleva katendi mass, liikluskoormus ja konstruktsiooni olemus (näiteks teekatendi kihtide omavaheline mõju).

Praktika näitab, et kõikide teguritega täpselt arvestamine on võimatu. Arvesse tuleb võtta kõige määravamad tegurid. Arvestama peab seda, et vesi võib siseneda igasse konstruktsiooni (erinevatest kohtadest) ning projekt peab põhinema kõige halvemal stsenaariumil. Pinnase külmakerkekatsed põhinevad kõige halvema olukorra modelleerimisel.

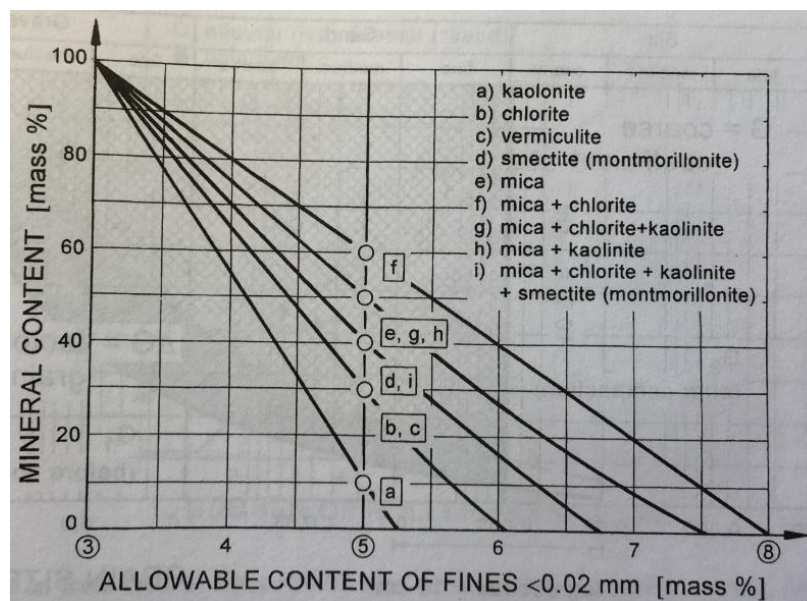
Erinevatel riikidel on eri nõuded külmakerkelisuse osas ning enamik nendest on seotud terastikulise koostisega, täpsemalt peenemate osiste sisaldusega (näiteks arvestatakse osiste $< 0,002$, $0,02$, $0,063$, $0,074$ või $0,1$ mm sisaldusega). Praktika on siiski näidanud, et taolised kriteeriumid on osutunud ebausaldusväärseteks või ebaökonomseteks. Teised kriteeriumid ei ole kas relavantsed (näiteks kapillaartõus, kuna temperatuurierinevustest lähtuvad imamise jõud domineerivad külmumise ajal) või on ebapraktilised.

Peenosiste mineraloogiline koostis määrab suuresti materjali külmakerkelised omadused. Joonisel 1.49 on toodud kriitilised piirid $< 0,02$ mm osiste osas peale modifitseeritud Proctoriga tihendamist (või ka peale objektipealset tihendamist). Mis puudutab tihendamist ning proovide võtmist, siis viidatud allika kohaselt pikaajalised teede monitoorimised koos laboratoorsete töödega on

näidanud, et kindlasti ei ole piisav, kui võtta proove tihendamata kihtidest. Tihendamise ja liikluse käigus materjaliterad purunevad ja peenosistesalduse kasv on vältimatu, kuid seda saab vähendada tihendades materjali veesisalduse juures, mis ületab kergelt Proctoriga leitud optimumi.

Mineral criterion for determining freezing-thawing resistance of soils (and other unbound granular materials): for roads, railtracks, airfields etc.	
Max. allowable fines < 0.02 mm	Mineral composition of the grains < 0.02 mm
3 %	Determination of mineral components is not necessary
5 %	Standard Case : Additional tests are not necessary if the mineral composition, or the material behaviour under freeze-thaw conditions (in the field or in the laboratory) respectively, are known from earlier investigations.
5%	In case of materials whose characteristics are unknown : 1) Non-active minerals 2) Mixture of 1) and a maximum of a) 10 % kaolinite group b) 30 % chlorite group c) 30 % vermiculite group d) 40 % smectite (montmorillonite) group e) 50 % mica group Marginal condition : mixture of 1) and a maximum of f) 60 % mica group + chlorite group g) 50 % mica group + chlorite group + kaolinite group h) 50 % mica group + kaolinite group i) 40 % mica group + chlorite group + kaolinite group + smectite (montmorillonite) group Further mixtures, not listed here, of laminated silicates are allowable up to a total sum of a maximum of 40 %. If this limit value is exceeded, freezing-thawing tests are necessary. 3) Freezing-thawing tests should be performed, if an intensive reddish-brown colour of the material indicates that iron hydroxides are contained.
8%	Non-active minerals, with a maximum of 1 % by mass < 0.002 mm

Joonis 1.49. Külmakerkekriteeriumid Austrias lähtudes peenosiste mineraloogilisest koostisest. Joonisega koos käib veel joonis 1.49, mida kasutatakse interpoleerimiseks. [25]



Joonis 1.50. Mineraloogilise koostise kriteerium joonisele 1.48. [25]

$< 0,02$ mm suuruste osiste määramine on väga ajamahukas. Katsed on näidanud, et fraktsioonide $< 0,1$ mm (aga $0,063$ mm) ja $< 0,02$ mm suhe on tihti lineaarses seoses, mis võimaldab kiiret kontrolli materjali külmaohtlikkuse osas. See kehtib juhtudel, kui peenosiseid on kuni 10%.

Allikas [26] käsitletakse kõiki aastal 1981 leitud külmakriteeriume. Muuhulgas tuuakse välja järgmisi mõtteid:

- pinnas, mis ei sisalda väiksemaid, kui $0,074$ mm osiseid, ei kerki külma tagajärjel üldse;
- uuringutega on leitud, et külmakerge väheneb ühe suurusjärgu võrra, kui külmakerkelisel pinnasel on peal koormus umbes 40 kPa;
- eri riikide ja USA osariikide külmakriteeriumid pinnastele vahelduvad väga laias vahemikus. Välja võiks tuua selle, et Wisconsin osariik arvestab külmaohutuks materjali, milles on väiksemaid, kui $0,074$ mm osiseid alla 5% (ja vastupidi); sama kriteerium on Gröönimaal, kuid Kanadas oli piiriks 10%.
- allikas leidis analüüsis, et kõige usaldusväärsemateks meetoditeks võib lugeda Šveitsi (1976) ja U.S Army Corps of Engineers (1965) meetodid.

Šveitsi külmakriteeriumid koosnevad kolmest etapist. Esimene etapp põhineb Casagrande kriteeriumile ja on esitatud joonisel 1.51. Teine etapp koosneb pinnase klassifitseerimisega ja on esitatud joonisel 1.52. Kolmandas etapise määratakse kruusade külmakerkelisus, mis nõuab laboratoorselt CBR katse sooritamist enne ja pärast veeküllastamist või enne külmutamist ja siis, kui pinnas on sulanud. Nõue on, et CBR ei oleks vähenenud üle 50%. Kruus jaotatakse kahte gruppi – I ja II („Gravel I“ ja „Gravel II“) – sõelkõverad on joonisel 1.53. Kruus I on selline, mida ei mõjuta külmutamine ja Kruus II selline, milles tekivad mõõdukad külmakerked (mis jäävad aksepteeritavatesse piiridesse).

Allikas [25] kirjutab U.S Army Corps of Engineers meetodi osas, et see on liiga laialivalgus ning ei ole seega praktiline. Seetõttu pikemalt meetodi osas siin ka ei peatuta.

Table 20. First level of the Swiss frost susceptibility criteria.

<i>Frost susceptibility</i>	<i>Amount finer than 0.02 mm* (%)</i>
None†	≤1.5
Borderline	1.5–3
High	>3

*Applied only to the fraction smaller than 60 mm.

†Homogeneous sands with $C_u > 5$ are practically non-frost-susceptible if they contain less than 10% finer than 0.02 mm.

Table 21. Second level of the Swiss frost susceptibility criteria.

<i>Frost susceptibility</i>	<i>Soil type</i>	<i>Amount (%) finer than 0.02 mm</i>	<i>U.S.C.S. soil classification*</i>
Slight	Gravel	3–10	GW, GP, GM, GC
Slight to moderate	a) Gravel	10–20	GM, GC-CL, GM-GC, GM-ML
	b) Sand	3–15	SW, SP, SM, SC
Moderate	a) Gravel	>20	GC-CL, GM-GC, GM-ML
	b) Sand (except very fine silty sand)	>15	SC-CL, SM-SC, SM-ML
	c) Clays, $PI > 12$		CL, CH
High	a) Silt		ML, MH
	b) Very fine silty sand	>15	SM-ML
	c) Clayey silt, $PI < 12$		CL, CL-ML
	d) Banded clays and other banded fine soils		In alternate layers: CL, ML, CL, ML, SM, CL, CH, ML, CL, CH, ML, SM

* G = gravel, S = sand, M = silt, C = clay, W = well-graded, P = poorly graded, H = high plasticity, L = low plasticity.

Joonised 1.51 ja 1.52. Šveitsi külmakriteeriumite esimene ja teine etapp. [26]

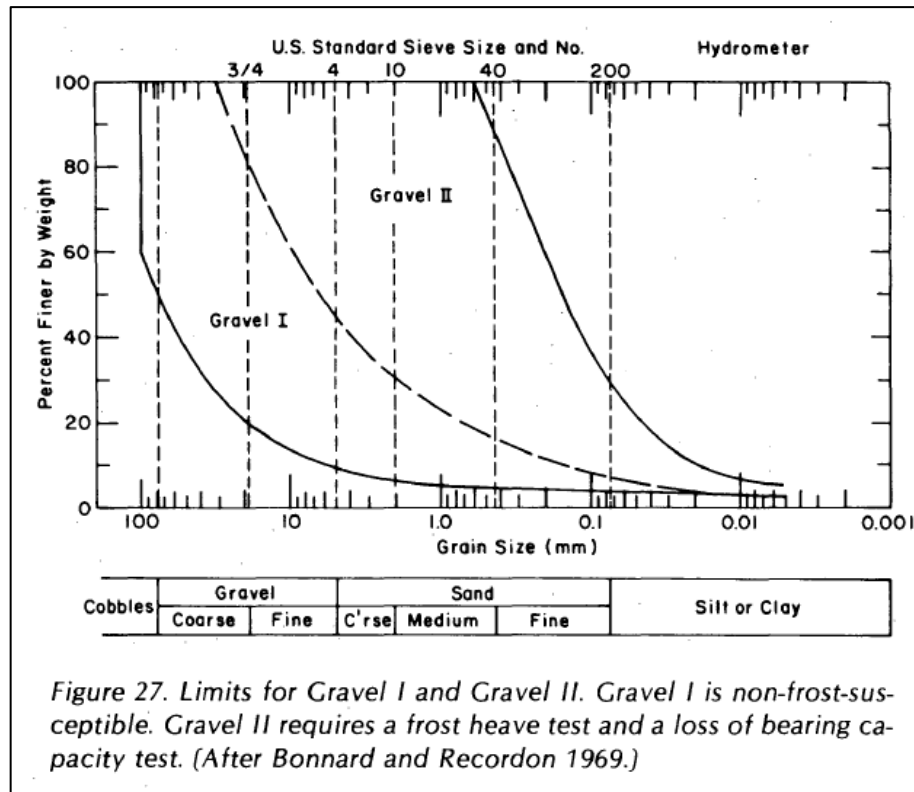
Table 22. Third level of the Swiss frost susceptibility criteria.

<i>Materials characteristics</i>	<i>Gravel I</i>		<i>Gravel II</i>	
	<i>Round</i>	<i>Broken</i>	<i>Round</i>	<i>Broken</i>
Amount (%) < 0.02 mm	≤ 3		≤ 10	
Uniformity coefficient (C_u)	12–100	10–50	—	—
Coefficient of curvature (C_c)	1–31		—	—
Maximum particle size (mm)	30–100		10–100	
Optimum water content (%)	≤ 5		≤ 10	
Plastic limit (%)	—	—	≤ 25	
Plasticity index (%)	—	—	≤ 6	
CBR_2 or CBR_3^* (%)	—	†	≥ 30	≥ 80
CBR_2/CBR_1 or CBR_3/CBR_1	—	†	≥ 0.5	

* CBR_1 = CBR as compacted; CBR_2 = CBR after soaking with water for four days; CBR_3 = CBR after one freeze-thaw cycle.

† Gravel I is not subject to the CBR reduction test.

Joonis 1.53a. Šveitsi külmakriteeriumite kolmas etapp – kruusad. [26]



Joonised 1.53b. Šveitsi külmakriteeriumite kolmas etapp – kruusad. [26]

- **Pinnase külmakerkelisuse hindamine Eestis**

Kuna teemat on piisavas mahus selgitatud näiteks allikates [10], [19] ja [27], siis siinkohal ei hakata kõike seda kordama, vaid tuuakse esile käesoleva uuringu jaoks kõige vajalikum. Üldiselt võtab Eesti külmakriteeriumi kokku allikas [19] öeldud lause „Pinnase külmakerkelisuse osas annavad endised nõukogude normid üldiselt Soome normidega ühesuguse tulemuse“.

Eestis kehtiva külmakerkearvutuse sisu on hästi ära selgitatud uuringus [27]. Eestis on üheks külmakerkearvutuse näitajaks pinnasetegur B, mis koosneb järgmistest liikmetest:

$$B = \frac{K_{\text{külmak}} * \alpha_0}{1,86} \quad (1.29)$$

kus

B – pinnasetegur (cm²/ööp);

$K_{\text{külmak}}$ – külmakerketegur, mis saadakse külmakerkekatsest suhtelise paisumisena $\Delta H/H$ tingimustes, kus proovikeha saab paisuda vaba vee juurdepääsu korral;

α_0 – kliimategur (cm²/ööp) – Eestis kasutatakse $\alpha_0 = 75 \text{ cm}^2/\text{ööp}$

$$\alpha_0 = \frac{(z_{\text{kesk}} - z_{1,0})^2}{2T_{\text{külm}}} \quad (1.30)$$

kus

z_{kesk} – paljude aastate keskmine külmumissügavus. Eestis arvestatakse selleks 125 cm, mis läheb hästi kokku ka Soome kliimaandmetega;

$z_{1,0}$ – katendi paksus uuritava objektis;

$T_{\text{külm}}$ – muldkeha pinnase külmumise kestuse paljude aastate keskmine.

Ehk pinnaseteguri B määramisel on oluline teada külmakerketegurit, mis saadakse külmakerketestist.

Eesti juhendites on pinnase külmaohtlikkuse aste määratud kolmanda niiskuspaikkonna järgi ning liigitus on esitatud tabelis 1.12. Pinnasetegur B ja külmakerketegur $K_{\text{külmak}}$ on omavahel ära seotud tabelis 1.13.

Tabel 1.12

Pinnasetegur B vs külmaohtlikkuse aste 3. niiskuspaikkonnas

B (cm²/24h)	Külmaohtlikkuse aste 3. niiskuspaikkonnas
1,5...2,0	Mõõdukalt külmaohtlik
3,0...3,5	Külmaohtlik
4,0...4,5	Väga külmaohtlik
5,0...8,0	Eriti külmaohtlik

Tabel 1.13

Pinnaseteguri B väärtustele vastavad suhtelised paisumised ja külmakerketegurid

Pinnasetegur B	Suhteline paisumine, %	Külmakerketegur
1	2,5	0,025
2	5,0	0,050
3	7,4	0,074
4	9,9	0,099
5	12,4	0,124
6	14,9	0,149
7	17,4	0,174
8	19,8	0,198

Eestis on külmakerketesti tellimise võimalus Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Geotehnikalaborist, mida käesoleva uuringu raames ka tehti (tulemustest peatükis 2.4.3). Tegemist on akrediteerimata teimiga, milles määratakse suhteline külmakerge rikutud struktuuriga proovi fraktsioonist ≤ 2 mm planeeritud proovi niiskusega $w = 8\%$. Käsitsi tihendatud teimikut ($h = 2,0$ cm, $d = 5,65$ cm) hoitakse $t = -15$ °C juures 72 h ning määratakse suhteline külmakerge. Rõngast, mille sisse proovikeha tihendatakse, kujutatakse joonisel 1.54.

Järelikult määratakse Eestis vaid pinnase esmane (*in-situ*) külmakerge, mis saab moodustuda vaid pinnase poorides sisalduvast veest. Külmakerke teooria osas oli selgitatud, et peamised külmakahjud tekivad teisest külmakerkest, mis tuleneb jääläätsede moodustumisest, mis omakorda saavad tekkida vaid vee juurdevoolu tingimustes, mida kirjeldatud testiga tagada ei saa. Järelikult Eestis täna külmakerketegurit korrektselt määrata ei saa.



Joonis 1.54. Külmakerketesti rõngas KLABi laboris. [Sven Sillamäe foto]

1.3.5 Külmakerkekriteeriumid ja külmakerkearvutus

Täielikult külmakerkekindlate teede ehitamine on kulukas ning tavaolukordades ka tarbetu. Läbi kogemuste on pandud paika kriteeriumid, kui suuri külmakerkeid mis klassi teedel või näiteks raudteedel võib esineda.

Eesti

Eestis kehtivad külmakerkekepiirid on järgmised:

- püsikatendid 4 cm;
- kergkatendid 6 cm;
- siirdekateendid 10 cm;
- pinnatud kruuskatted 6 cm.

Külmaerge arvutatakse alati kolmandas niiskuspaiikkonnas ning siis, kui muldkeha on normidest madalam või asetseb süvendis.

Teises niiskuspaiikkonnas arvutatakse püsikatend nii, et korrutatakse katendi soojustehniliselt redutseeritud paksus läbi konstandiga 0,8 ning kergkatend vaid siis, kui muldkeha on materjalist, mille pinnasetegur $B \geq 5$.

Esimeses niiskuspaiikkonnas katendit külmaerkele ei arvutata (v.t normidest madalama või süvendis asetseva muldkeha korral), kuid püsikatendi osas tuleb pinnase, mille pinnasetegur $B \geq 5$ tagada, et vesi ei satuks muldkehasse ülalt.

Soome

Soomes on teedel lubatavate külmaergete piirid keerulisemad, kui Eestis, seega kõike siin ära ei tooda. Ilma terasvõrku sisaldava ja ühtlasel aluspinnasel olevate teede suurimad arvutuslikud külmaerked võivad olla järgmised:

- kiirteed – 30 mm;
- peateed (80...100 km/h) – 70 mm;
- tugimaanteed (80...100 km/h, AKÖL > 1000) – 100 mm;
- tugimaanteed 60 km/h või AKÖL < 1000 või kõrvalmaanteed AKÖL > 1000 – 130 mm;
- kõrvalmaanteed AKÖL 400...1000 – 160 mm;
- äärekiviga tee 80 km/h – 30 mm ning 50...70 km/h – 70 mm;
- kergliiklusteed – 70 mm

Allikas [24] öeldakse peatükis 11.1, et tavaliselt ei ole (valemitega 1.31 ja 1.32) arvutatud külmaerge sama, mis looduses tegelikult esinev. Kui teed projekteeritakse siiski lähtudes

arvutustulemustest, saadakse selliseid katendeid, mis püsivad piisavalt tasastena ning peavad hästi vastu külma poolt tekitatud ebatasastele kergetele. Eelkõige peetakse eelneva lausega silmas Soome teekatendite projekteerimisjuhendis [23] toodud lähenemise abil arvutatud külmakerke suurust.

Allika [23] teekatendi külmakerkearvutus tehakse valemite 1.31 ja 1.32 abil, millest esimene kehtib, kui teekatend ehitatakse täielikult külmakindlatest materjalidest ja teine siis, kui katendis sisaldub kergelt külmakerkelisi materjale.

$$RN = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne.}) * t / 100 \quad (1.31)$$

$$RN = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 - a_{rva} * R_{rva} \text{ jne.}) * t / 100 + R_{rva} * t_{rva} / 100 \quad (1.32)$$

kus

RN – arvutuslik külmakerge (mm);

S – külmumissügavus (mm);

R_i – külmakindla kihi paksus (mm), i on kihi number;

a_i – materjali soojustehniline ekvivalent;

t – pinnase külmumispaisumine (%);

R_{rva} – külmakerkelise kihi paksus (mm);

a_{rva} – külmakerkelise materjali soojustehniline ekvivalent (tavaliselt võetakse $a_{rva} = 1,0$);

t_{rva} – külmakerkelise materjali külmumispaisumine (%).

Pinnase külmumispaisumine „ t “ on mõõdetud külmakerke ja kerkinud pinnasekihi paksuse suhe, mis saadakse kas tabelväärtusena, külmakerkekatsest või olemasoleva tee (või ka pinnase) külmakerkemõõtmistest. Külmumispaisumine (t) ja külmakerkelisus (SP) on omavahel ligikaudselt seotud valemiga 1.33.

$$\frac{t}{100} = \frac{\Delta h}{\Delta Z} = \frac{\Delta h_s}{\Delta Z} + \frac{\Delta h_i}{\Delta Z} = \frac{2SP}{k^2} + 0,09 \frac{W_{vol}}{100} = \frac{2SP}{k^2} + 0,09 \frac{\rho_d}{\rho_w} \frac{w}{100} \quad (1.33)$$

kus

Δh – pinna külmakerge (mm);

Δh_s – sekundaarne külmakerge (mm);

Δh_i – esmane külmakerge (mm);

ΔZ – kerkinud muldkeha/pinnasekihi paksus (mm). $\Delta Z = Z_f - Z_0$, kus Z_f – külmumissügavus ja Z_0 – katendi paksus;

k – külmumisfaktor (mm/Kh)^{0,5} ($Z_f = k * F^{0,5}$, $k \approx 10 \dots 12$; F – külmamäär);

w_{vol} – külmakerkelise pinnase veesisaldus sulanud olekus (%) ($w_{vol} = R_d * n / 100$, kus R_d – küllastusaste, külmakerkelises pinnases tavaliselt $> 85\%$, n – poorsus %);

ρ_d – vaadeldava pinnase kuivmahumass sulanud olekus (t/m³);

ρ_w – vee tihedus (t/m³);

w – vaadeldava pinnase veesisaldus sulanud olekus (%).

Oletades, et $k = 10 \text{ mm/Kh}^{0,5}$ ja $W_{\text{vol}} = 0,4$, saadakse valem 1.34.

$$SP = \frac{50h}{10\sqrt{F} - Z_0} - 1,8 \quad (1.34)$$

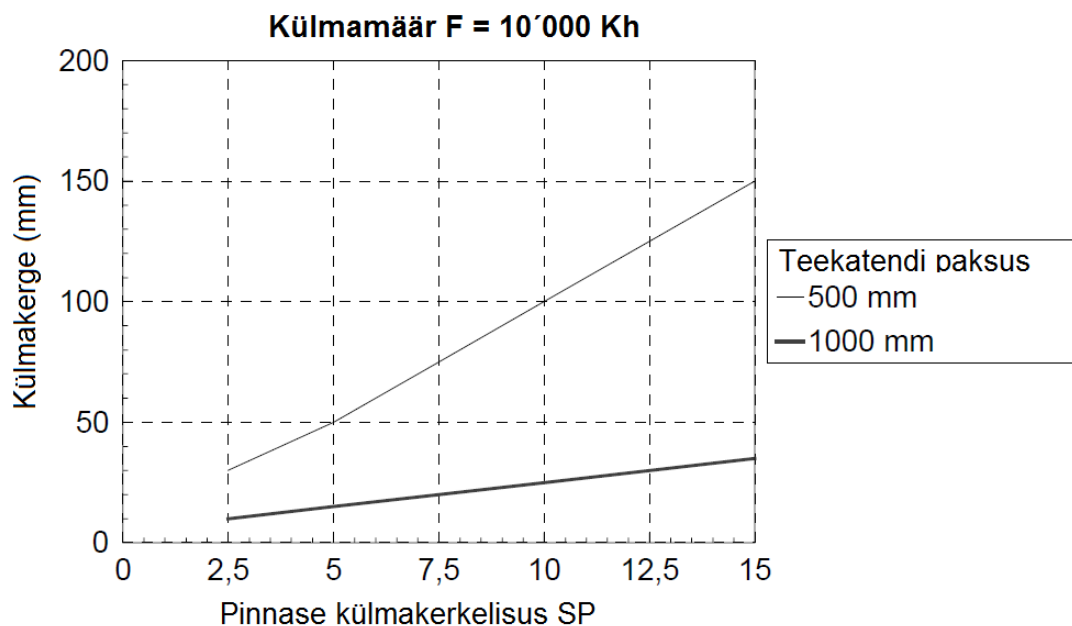
kus

h – külmakerge (mm).

Z_0 – katendi paksus (külmakerkelise kihi peal oleva osa paksus, mm);

Lähenedes külmakerkearvutusele, kasutades lähteandmetena mitte tabelväärtusi, vaid andmeid objektilt ehk kasutades valemit 1.34, saadakse külmakerkearvutuse tulemus väga sarnaseks sellele, mis see reaalselt teel ka olema hakkab. Allikas [28] on toodud näidisena arvutustulemused külmakergete osas, kus lähteandmetena on SP, külmamäär, arvestatud on teekatendi paksusega ning muldkeha pinnaseks on võetud tolmne liiv, mille kuivtihedus on $1,6 \text{ t/m}^3$ ja veesisaldus 25%.

Eestis arvestatakse, et külmumissügavus on 125 cm. Kasutades seda joonisel 1.43 toodud valemis, saadakse, et sellele vastab külmamäär 10851 Kh. Allikas [28] on esitatud graafiliselt olukord, kui külmamäär on 10000 Kh ning sellele vastav külmakerge erinevate muldkeha pinnase SP korral, kui teekatendi paksused on kas 500 või 1000 mm. Kui teekatendi paksus on suurem, siis vähemalt arvutuslikult külmakerget ei esine. Arvutustulemus on esitatud joonisel 1.55 ning see on saadud kasutades arvutiprogrammi „SSR-malli“.



Joonis 1.55. Pinnase külmakerkelisuse SP ja näidisarvutuse parameetrite sõltuvus külmakerke suuruse osas. [28]

1.3.6 Teekonstruktsiooni sulamine

Esimesena hakkavad sulama piirkonnad, mis ei ole lumekatte all. Soojuse liikumine teekonstruktsioonis toimub põhimõtteliselt vastupidiselt sellele, kuidas toimub külma liikumine. Sulamine toimub tavaliselt 70...80% ulatuses ülalt, kuid külmunud kiht hakkab kevadel sulama ka

alt ülespoole mõjutatuna sügavamal olevast maapinna soojusest. Jämedateralistes materjalides, kus kapillaartõus on väga väike või null, toimub peamine sulamisvete eemaldumine gravitatsiooni mõjul vertikaalselt allolevatesse kihtidesse. Kevadel on mõnenädalane periood, mil all olevad kihid on veel jääs, samuti tee peenrad püsivad lumekatte all, mistõttu vesi saab eemalduda vaid aurudes. Kõrge niiskussisaldus kiirendab allolevate kihtide kuivamist, sest kui ülaosa on märg, siis selline olukord võimaldab kapillaartõusu altpoolt üles ning üleliigne vesi pääseb nii välja.

Madal jääsisaldus on materjalides, mis on hästi vettjuhtivad ehk külmakindlates kihtides. Taolistes materjalides ei teki ka sulamiskonsolideerumist, nagu tekib näiteks savides või tolmsetes materjalides. Vahetult peale sulamist pinnasesse jääv vesi ja selle eemaldumise kiirus on võtmeteguriteks pinnase tugevusomaduste püsimise seisukohalt. Olenevalt veeläbilaskevõimest võib pinnase sulamisjärgne konsolideerumine kesta kauem, kui sulamine, eriti kui sulamine on olnud väga kiire. Efektiivpinged alanevad nidusates pinnastes ja veeküllastunud pinnastes kohe peale sulamist järsult. Kui sel hetkel lisandub pinnasesse veelgi vett, võivad efektiivpinged muutuda nulliks, mis sisuliselt tähendab, et pinnas muutub voolavaks.

Peenosise hulk on ka sulamise osas üheks kriitiliseks teguriks, nagu oli seda ka külmakerke tekkimises. On leitud, et üle 10% peenosistes sisaldusega materjalid ei pruugigi suve jooksul kuivada kandevõime seisukohalt soodsale tasemele.

Sulamine edeneb teekattele langeva soojushulgaga võrdeliselt vastavalt valemile 1.35.

$$z_t = \sqrt{\frac{2\lambda_t}{L_t} F_t} \quad (1.35)$$

kus

z_t – sulamise sügavus (m);

λ_t – sulanud pinnase soojustehniline ekvivalent (W/km);

L_t – sulava pinnase sulamistemperatuur (Wh/m³);

F_t – pinnase temperatuurisumma alates sulamise algusest (Kh).

Kasutades mõningaid eeldusi ja lihtsustusi, on võimalik sulamissügavuse arvestamisel kasutada valemit 1.36.

$$z_t = 10 \dots 12 \sqrt{F_t} \quad (1.36)$$

Kevade ja suve temperatuurisumma (F_t) arvutatakse samamoodi, kui külmamäär ööpäevastest keskmistest temperatuuridest. Kuna asfaltkate (mõõtmiste kohaselt ka kruuskate) soojeneb rohkem, kui (alles lumekatte all olev) muu pinnas, siis saab arvestada, et tee temperatuurisumma on kõrgem, kui keskmiste õhutemperatuuride alusel arvutatu. Erinevused on esitatud tabelis 1.14.

Tabel 1.14

Õhu- ja teepinna temperatuuride erinevus ning sellest tulenev temperatuurisumma suurenemine

Kuu	Tee ja õhutemperatuuri vaheline erinevus, °C	Temperatuurisumma lisandumine, Kh
Jaanuar	0	0
Veebruar	0	0
Märts	3	2232
Aprill	5	3600
Mai	7	5208
Juuni	8	5760
Juuli	8	5952
August	4	2976
September	2	1440
Oktoober	1	744
November	0	0
Detsember	0	0

1.4 Kapillaartõusust

Kapillaarsus on füüsikast tuntud vedaliku omadus tõusta peentes torudes või piludes pindpinevuse mõjul üle vaba veepinna taseme. Pinnase poorid on enamasti küllalt peened, et vesi võiks neis üle oma normaaltasapinna tõusta. Kuna pooride mõõdeted on sama suurusjärguga kui teradel, siis on tõusu kõrgus sõltuv terastikulisest koostisest ja seega saab kapillaartõusu kõrgust hinnata valemiga 1.37 [16].

$$h_c = \frac{10C}{ed_{10}} \quad (1.37)$$

kus

C – empiiriline konstant, mis sõltub pinnaseosakeste kujust ning varieerub vahemikus 10...50 mm² (täiesti ümmarguste puhul C = 10 mm²);

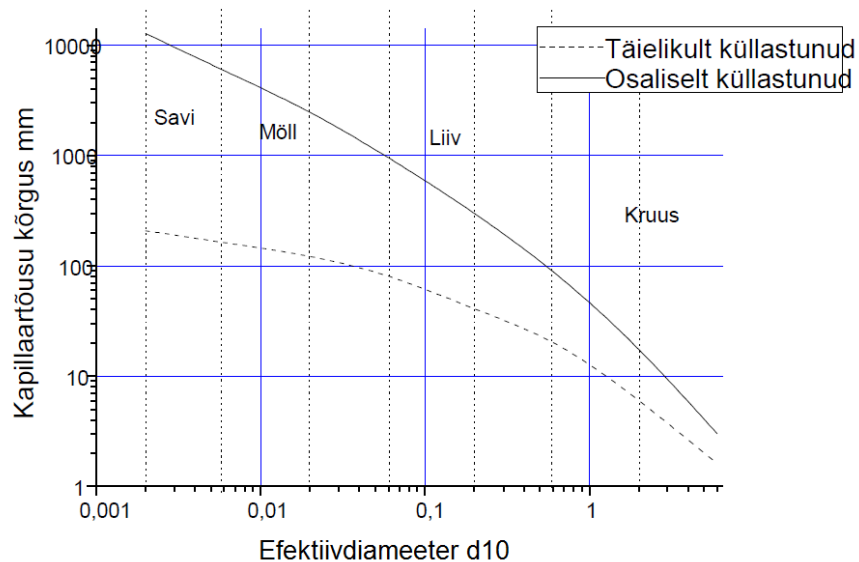
e – poorsustegur;

d₁₀ – efektiivdiameeter.

Teatud kõrguseni üle veepinna on pinnas kapillaarsuse tõttu veega küllastunud. Selle peal asub tsoon, kus poorid on osaliselt täidetud (joonis 1.56).

Kapillaartõusu määramine on eriti aktuaalne kohtades, kus tuleb ehitada madalad muldkehad veega küllastunud pinnasele või kui muldkehad ehitatakse peeneteralistest pinnastest soo peale. Kapillaartõus peab jääma nii madalale (või muldkeha olema nii kõrge), et see ei ulatuks teekatendini.

Kapillaartõusu ka mõõdetakse. Käesolevas uuringus mõõdeti kapillaartõusu otseselt kolme erineva konfiguratsiooniga katsega, kaudselt mõõdeti seda veel ka *tube suction* testiga. Täpsemalt katsetulemustest peatükis 2.4.2.



Joonis 1.56. Kapillaartõusu täielikult ja osaliselt küllastunud tsoonid sõltuvalt pinnase efektiivdiameetrist. [16]

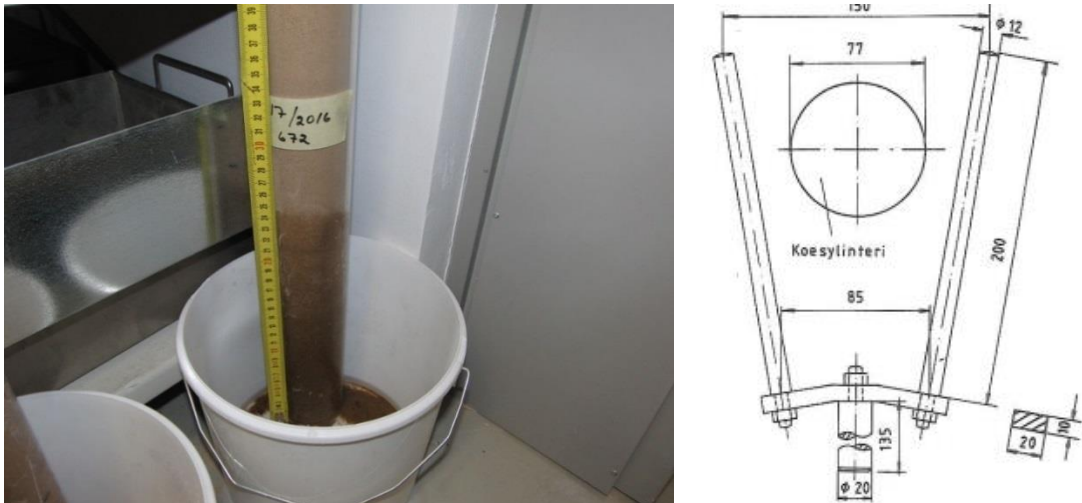
Kapillaartõusu määramine

Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Geotehnikalaboris määrati liivaproovide kapillaartõusud rikutud struktuuriga proovi fraktsioonist ≤ 5 mm. Õhkkuiv materjal tihendatakse käsitsi ühe meetri pikkusesse läbipaistvasse plastmasstorusse mõõtmetega $d = 2,4$ cm, $S = 4,52$ cm² ja leitakse proovi ρ_d (g/cm³). Kapillaarvee tõusu määramiseks asetatakse toru alumine ots veega täidetud anumasse (joonis 1.57). Vee tõusu mõõdetakse visuaalselt cm-tes, katse kestus on 10 – 20 päeva. Joonistatakse graafik kapillaartõusu ja aja sõltuvusest (*log*-skaala) ning määratakse veesisaldus kapillaartõusu piirkonnas.



Joonis 1.57. Kapillaartõusu määramine KLABi laboris. [Sven Sillamäe foto]

Lisaks määrati kapillaartõus kahe meetodiga Soomes Tampere Tehnikaülikoolis. Esimeseks meetodiks oli sama, mis Eestis, kuid toru läbimõõt oli suurem võimaldades kasutada kuni 16 mm läbimõõduga osiseid. Katses tihendati kõigepealt kuiv liiv torusse (joonis 1.58) kasutades tihendajat (joonis 1.59), mis „koputab“ toru välispidisel, tekitades liivas vibratsiooni, mis seda tihendab. Toru asetati anumasse, mille põhjas oli ca 20...30 mm vett ning katse kestis nädala. Vee suurim tõusukõrgus loeti kapillaartõusu kõrguseks.



Joonised 1.58 ja 1.59. Kapillaartõusu määramise toru TUTis ning tihendamise raud. [TUT]

Kolmas meetod oli „SAHI-meetod“, kus veeküllastatud proovikeha asetatakse joonisel 1.60 kujutatud aparaati, kust hakatakse vaakumiga alt aeglaselt imema vett proovikehast välja. Vaakum mõõdetakse veesamba kõrgusega. Kõrgus, millal õhk hakkab tulema proovikehast läbi, loetakse kapillaartõusu kõrguseks.



Joonis 1.60. Kapillaartõusu aparaat „SAHI“. [TUT]

Tube suction test

Tube suction testiga (TST) määratakse tihendatud pinnasest dielektrilisus ja elektrijuhtivus. Testiga mõõdetakse materjali veesidumisomadusi. Teoorias mõõdetakse sellega vaba energia hulka, mille tasakaalustamiseks materjal imeb enda sisse vett, kui seda on saada. Dielektrilisus kujutab praktikas vaba vee hulka materjalis.

TSTd on kasutatud eelkõige killustik- ja stabiliseeritud segude külmakerkelisuse hindamiseks. Kui dielektriline väärtus jääb alla 10, on materja külmaohutu, kui vahemikku 10...16 mõõdukalt külmaohtliku ja kui üle 16, külmaohtliku materjaliga. Nimetatud väärtused kehtivad eelkõige jämedateralistele materjalidele ega ole otseselt kohaldatavad liivadele. Seega on täna liivade TST piirväärtused kirjenduse põhjal teadmata.

1.5 Liivade tugevusomadused

Liivpinnase tugevusomadusi on Eestis varasemalt uuritud palju, kuid mitte niivõrd viimasel kahel aastakümnel. Järgnevalt väljavõtted Eestis avaldatud uuringutulemustest.

Allikast [29]:

150 välikatse tulemusel, millega määrati liivpinnaste struktuuritugevus, proportsionaalsuspiir, piirkoormus ja deformatsioonimoodul, leiti et looduslike liivade kandevõime sõltub struktuuritugevusest ja orgaanilise aine sisaldusest tunduvalt rohkem, kui tavalistest liivu iseloomustavatest kriteeriumitest (lõimisest, tihedusest). Üldjuhul ületab liivade kandevõime normides toodu tunduvalt.

- Struktuuritugevus on surve, mis ei tekita mingisuguseid deformatsioone;
- Proportsionaalsuspiir – lineaarsete deformatsioonide lõpp – enne väljasurumise algust;
- Piirkoormus – koormusaste enne purunemist.

Kokkusurutavus sõltub liiva struktuuritugevusest ja orgaanilise aine sisaldusest. Nihkealade areng (proportsionaalsuspiir) sõltub nihketugevusest, aga ka kokkusurutavusest.

Allikast [30]:

Liivpinnaste geotehnilised omadused sõltuvad nende koostisest ja tihedusest.

Käesoleval ajal võib Eesti jäme- ja keskliivade kohta öelda, et nende omadused on ligilähedaselt võrdsed, eriti madala lõimisteguriga erimite osas. Peen- ja jämetolmliivad aga erinevad mehaanilistelt omadustelt.

Efektiivdiameetri suurenemisega liivade tihendatavus väheneb, kusjuures liivad efektiivdiameetriga üle 1 mm on ühesuguse lõimisteguri juures võrdselt tihendatavad. Seepärast ongi jäme- ja keskliivadel ühesuguse tiheduse ja struktuuritugevuse korral võrdsed geotehnilised omadused.

Lõimisteguri vähenemisega liivade tihendatavus kasvab.

Isegi ühesuguse gneesi ja lõimisega liivatüüpide kohta ei saa anda poorsusteguri ja tihedusastme vahelist sõltuvust, mis oleks õige kõikide lõimistegurite jaoks.

Liivade kokkusurutavus kasvab lõimisteguri kasvuga. Tegelikult kaasneb lõimisteguri kasvuga maksimaalse ja minimaalse poorsusteguri vähenemine, kusjuures minimaalne poorsustegur langeb kiiremini, suurendades liivpinnase tihendatavust. Seega sama poorsusteguri korral on suurema lõimisteguriga liivad kohevamad ja rohkem kokkusurutavad.

Kui uhte- ja täiteliivade geotehnilised omadused sõltuvad ainult lõimisest ja tihedusest, siis looduslike liivade puhul ei tohi unustada orgaanilise aine ja struktuuritugevuse mõju. 1...3% orgaanilise aine sisaldus halvendab tunduvalt liivade mehaanilisi omadusi.

Liivade geotehnilisi omadusi mõjutab tugevalt ka struktuuritugevus, mis aja jooksul kasvab. Tegemist on väga nõrga karbonaat- või raudoksiidsemendiga.

Allikast [31]:

Pinnase deformatsioon jaguneb taastuvaks ehk elastseks ja jäävdeformatsiooniks. Kuni proportsionaalsuspiirini on koormuse ja elastse deformatsiooni sõltuvus sirgjooneline, kusjuures sirge algab koordinaatide alguspunktist. Pärast proportsionaalsuspiiri ületamist liivpinnase elastsed deformatsioonid ei kao ega vähene, vaid nende suurus isegi kasvab, kusjuures elastse deformatsiooni ja koormuse sõltuvus muutub kõverjooneliseks ning proportsionaalsuspiirini praktiliselt konstantsena püsinud elastsusmoodul hakkab seda piiri ületavatel koormustel vähenema.

Jäävdeformatsioon liivpinnastel algab koormustel, mis vastab nihkealade arengu algusele katseplaadi all.

Viimastel aastatel avaldatud uuringutest on liivade tugevusomadusi hästi käsitletud allikas [27], mistõttu käesolevalt ei refereerita seda täielikult, kuid muuhulgas on seal kirjas järgmist:

Liivade tugevuse kirjeldamiseks kasutatakse nihketugevust, mis näitab maksimaalset nihkepinget, mida pinnas purunemata talub. Purunemise all mõistetakse seejuures pinnaseosakeste nihkuvat liikumist üksteise suhtes. Nihketugevus (τ) sõltub rakendatavast normaalpingest ja kujuneb kahe komponendi – hõõrde ja nidususe – arvelt.

Teedehituses kasutatavatel puhastel liivpinnastel nidususomadused ehk otsesed sidemed (nt. elektrostaatilised ja elektromagnetilised sidemed, tsementatsioon jms) osakeste vahel reeglina puuduvad, seega sõltub liiva tugevus ainult hõõrdekomponeendist. Kuna normaalpinge on muutuv (sõltub sügavusest ja koormuse suuruselt), kasutatakse nihketugevuse hõõrdekomponeendi iseloomustamiseks sisehõõrdenurka (φ'), mille saab teatud pingevahemikes konstantseks lugeda. Sisehõõrdenurk sõltub mitmetest teguritest nagu pinnase mineraloogiline koostis ning orgaanikasisaldus, tihedus, pinnaseosakeste kuju ja sorteeritus.

Allikas [27] esitati erinevate tegurite mõju ulatus liivpinnaste sisehõõrdenurgale ning näidati ka Eestis tehtud katsetulemuste analüüsile, et seosed on korrektsed. Sarnane seos on toodud ka allikas [16], kus on esitatud valem 1.38.

$$\varphi = 36^\circ + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 \quad (1.38)$$

kus

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°

kesk- ja jämekruus + 2°

ϕ_3 – terastikulist koostist arvestav tegur

ühtlane – 3°

keskmise 0°

ebaühtlane + 3°

ϕ_4 – tihedust arvestav tegur

kohev – 6°

kesktihe 0°

tihe + 6°

Võrdluseks BS 8002:1994 esitatud valem 1.39. Selles sisaldub penetratsioonitestist (SPT vastavalt BS 1377-9) tulenev tegur C.

$$\phi'_{\max} = 30^\circ + A + B + C \quad (1.39)$$

kus

A – terade kuju arvestav tegur (hinnatav visuaalselt)

ümardunud +0°

osaliselt ümardunud +2°

nurgeline +4°

B – liiva sorteeritus

ühtlaseteraline ($c_u < 2$) +0°

keskmiselt sorteeritud ($c_u 2 \dots 6$) +2°

eriteraline ($c_u > 6$) +4°

C – penetratsioonikatse tulemus, millega iseloomustatakse liiva tihedust (alaindeks kujutab 300 mm süvistamist millele järgneb löökide arv. Tulemust tuleb korrigeerida pinnase omakaalusurvega)

$N_{30} < 10$ +0°

$N_{30} = 20$ +2°

$N_{30} = 40$ +6°

$N_{30} = 60$ +9°

Esitatud valemitest ja katsetulemustest nähtub, et liivpinnaste tugevusomadusi mõjutavad mitmed tegurid, millest suurima osakaaluga on tihedus. Võttes näiteks maksimaaltihedusel keskliiva, mille terad on keskmise nurgelisusega ja $c_u = 2,5$, saadakse:

- valemist 1.38: $36^\circ + 0^\circ + 0^\circ - 3^\circ + 6^\circ = 39^\circ$;
- valemist 1.39: $30^\circ + 2^\circ + 2^\circ + 6^\circ = 40^\circ$ (kui $c_u < 2$ saadakse sisehõõrdenurgaks 38° . Kuna C andmeid ei ole, valiti keskliiva puhul selleks $N_{30} = 40$).

Katendiarvutuses kasutatakse (liiv)pinnase tugevusomadustena sisehõõrdenurka, nidusust ja elastsusmoodulit. Tegelikult on sisehõõrdenurk ja nidusus eksperimentaalselt leitavad tugevusparameetrid ja pinnase tugevust iseloomustab nihketugevus τ , mis on pinnase nidususe ja sisehõõrdenurga summa, mis lisaks sõltub veel pingeolukorrast. Pinnastes toimub purunemine, kui nihkepingete väärtus ületab nihketugevuse. Kuna mittenidusates pinnastes on nihketugevus sõltuvuses normaalpingest, toimub purunemine nihke- ja normaaplingete kõige ebasoodsama kombinatsiooni toimetel.

Allikas [16] on kirjeldatud mitmeid tugevusparameetrite määramise meetodeid, millest käesolevas uuringus kasutati nidususe ja sisehõõrdenurga leidmiseks kolmetelgset surveaparaati konsolideeritud drenitud (CD) seades. Katsed tehti nii Eestis (KLAB) kui ka Soomes Tampere Tehnikaülikoolis (TUT). KLABi labor võimaldas kasutada kolmetelgses aparaadis kuni 2 mm läbimõõduga terasid, TUTi laboris katsetati täislõimist (liivaproovide puhul kasutati 50 mm ja kruusal 200 mm läbimõõduga proovikeha).

Kolmatelgses aparaadis on võimalik mõõta ka pinnaste elastsusmoodulit ning see on ka eelistatav, kuna alternatiivne kompressioonikatse ödomeetris ei võimalda proovi külgpaisumist, mistõttu on tulemused moonutatud.

2. Liivade katsetamine Eestis

Käesoleva uuringu põhieesmärk oli leida seoseid liivpinnaste veega ja tugevusega seotud omaduste vahel. Esimeses peatükis toodi välja, et teekatendid peaksid olema pikaajalisuse huvides hästi filtreeruvad. Samas on kogemused Eestis näidanud, et hästifiltreeruvad liivad on enamasti ühtlaseterised ($c_u < 3$), mis omakorda tähendab madalamat kandevõimet ja raskesti tihendatavust. On tõsi, et kirjanduses on taolist informatsiooni käsitletud palju, kuid uuringu raames tehtud katsed viidi läbi seetõttu, et saavutada kindlate katseandmete olemasolu samale materjalile.

Uuringu raames tehtud tegevused olid järgmised:

- uuringu esimeses ja teises etapis analüüsiti ca 300 EVS 901-20:2013 alusel saadud proovi tulemust ning koostati sõelkõveraväljad, mille järgi on ca 90% tõenäosusega tagatud liivpinnase minimaalne filtreeruvus (katsetades liivpinnast vastavalt standardile EVS 901-20);
- külastati 10. objekti, kus kasutati eri päritoluga liiv- ja kruuspinnaseid. Objektidel tehti mõõtmisi ning koguti proove, mis katsetati laboris;
- Objektidel mõõdeti tihendatud kihi kandevõimed staatilise plaatkoormuskatsega (vastavalt DIN 18134), Inspector III-ga, võimalusel ka Taanist hangitud PRIMA 100 ning Saksamaalt hangitud HMP-ga. Lisaks võeti lõikerõngaproovid kuivmahumassi ja niiskussisalduse määramiseks. Kõikidel objektidel ei olnud võimalik teha kõiki nimetatud katseid (näiteks kui staatilise plaatkoormuskatse jaoks ei olnud võimalik kasutada vasturaskust ja lõikerõngaproovi ei saanud võtta kruuspinnasest);
- Objektidel sooritati ka sissevalamiskatsed leidmaks vee infiltreerumise kiirust, mis annaks sobivuse korral võimaluse loobuda ajamahukast laborikatsest määrares pinnase filtreeruvus objektil tihendatud kihist. Sissevalamiskatseid tehti kahel moel kahe rõngaga infiltromeetriga ning „ämbrimeetodil“ valades vett kaevatud auku.
- Laboris määrati objektidelt võetud proovidest järgmised andmed:
 - filtratsioonimoodul vastavalt EVS 901-20:2013 (sh Proctortihedus kuni 4 mm);
 - kapillaartõus kolme erineva meetodiga (< 5 mm osistele ja täislõimisele – katse kirjeldus peatükis 1.4);
 - liivpinnastele TS-katse;
 - külmakerkekatse kahe erineva meetodiga (katse kirjeldus peatükis 1.3);
 - kolmetelgse testiga tugevusomadused.

2.1 EVS 901-20 alusel koostatud sõelkõveraväljad

Vahearuanes I koostati standardi EVS 901-20:2013 alusel laboris saadud tulemuste põhjal sõelkõveraväljad filtratsioonimoodulitele 0,2, 1,0 ja 2,0 m/ööp, mille täpsused on vastavalt 93, 88 ja 94% arvestades 89 analüüsitud proovi. Prooviti leida välja ka 0,5 m/ööp jaoks, kuid see tuli pea identne 0,2 m/ööp joonega. Tulemused on esitatud tabelites 2.1...2.3 ja joonisel 2.1.

Tabel 2.1

Sõelkõveravälja 0,2 m/ööp andmed

Fraktsioon (mm)	35	31,5	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	46	13	6
%	80	77	67	65	61	59	55	44	20	8	0	-	-

Tabel 2.2

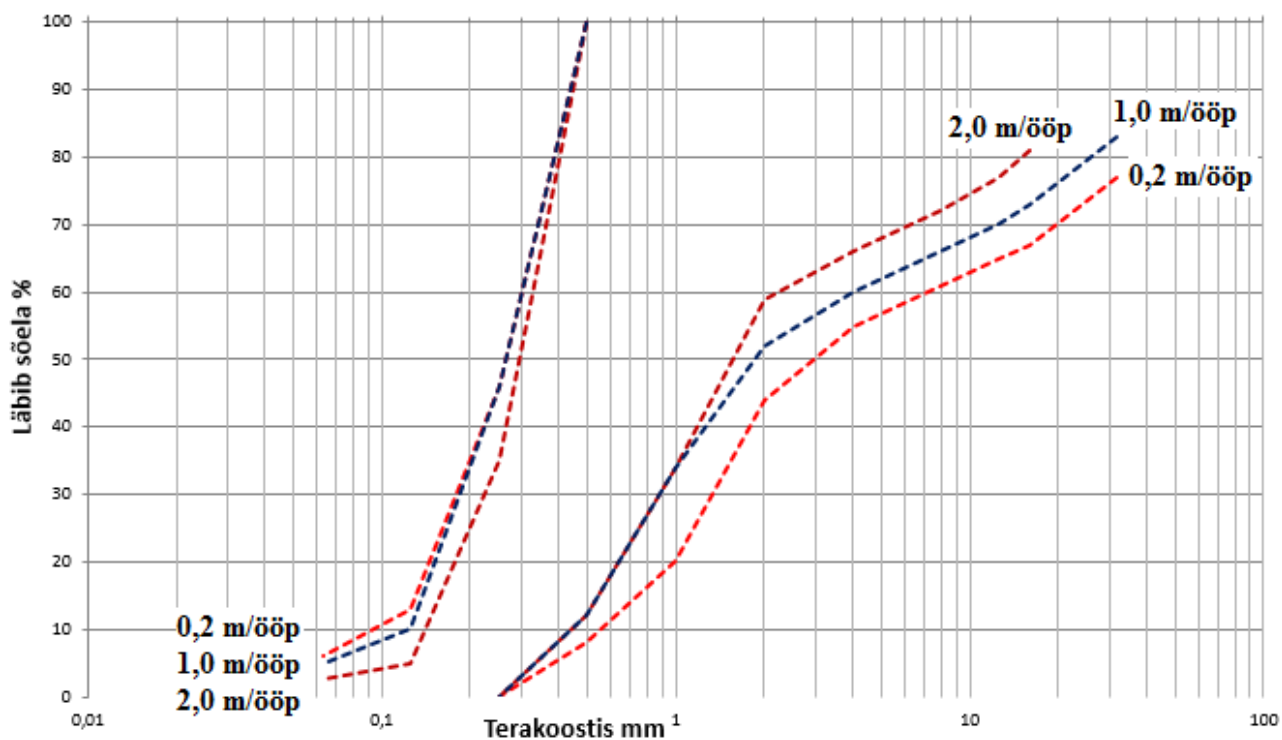
Sõelkõvera välja 1,0 m/ööp andmed

Fraktsioon (mm)	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%	-	-	-	-	-	-	-	100	35	5	2,5
%	81	77	72	70	66	59	34	12	0	-	-

Tabel 2.3

Sõelkõvera välja 2,0 m/ööp andmed

Fraktsioon (mm)	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%	-	-	-	-	-	-	-	100	35	5	2,5
%	81	77	72	70	66	59	34	12	0	-	-



Joonis 2.1. 0,2, 1,0 ja 2,0 m/ööp sõelkõveraväljade omavaheline võrdlus. Täpsused on vastavalt 93%, 88% ja 94% arvestades 89 analüüsitud proovi.

2.2 Objekti külastused – tehtud tööde kirjeldus

2.2.1 Kandevõime mõõtmine

Objektidel mõõdeti kandevõimeid seadmetega Inspector 3 ja plaatkoormusseadmega (vastavalt DIN 18134), hilisematelt ka ka Prima 100 ja HMP-ga (seadmed ei olnud kohe peale tööde alustamist saadaval) (joonised 2.2 ja 2.3). Kui andmetest puudub plaatkoormusseadme tulemus, siis oli põhjuseks vasturaskuseks vajaliku rasketehnika ligipääsmatus mõõtekohale. Lisaks võeti ka lõikerõngaproov tihedusastme ja niiskussisalduse määramiseks (võrdlusena kasutati ka niiskusanurit Extech M0750, joonis 2.4).



Joonised 2.2 ja 2.3. Seadmed, millega mõõdeti objektidelt liiv- ja kruuspinnase kandevõimed [Sten-Kristjan Saariku fotod]



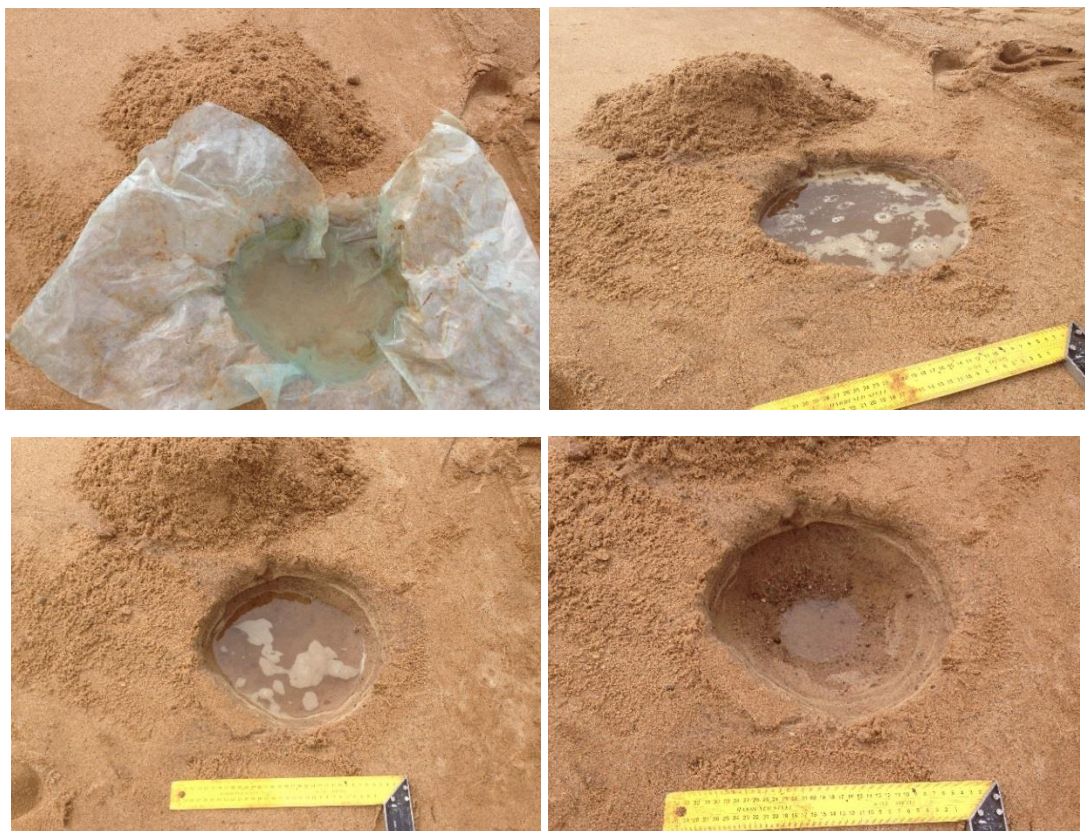
Joonis 2.4. Niiskusanur Extech M0750 [Extech]

2.2.2 Sisesevalamiskatsed

Sisesevalamiskatseteks kasutati infiltromeetrit ehk kahte rõngast läbimõõdudega 20 cm ja 50 cm, mõõtejoonlauda ning stopperit (joonis 2.5). Lisaks tehti mõõtmised ka „ämbrimeetodil“, kus valati kindel hulk vett kihti kaevatud auku („ämbrikatse“, joonis 2.6).



Joonis 2.5. Sissevalamiskatsed kahe rõngaga infiltromeetriga [Sten-Kristjan Saariku fotod]



Joonis 2.6. „Ämbrikatse“ etapid [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Sissevalamiskatsete katsemetoodika väljakujundamisel lähtuti 2012 aastal Maanteeameti soovitusel koostatud ettepanekust (Tõnu Kuusik, 03.10.2012). Põhimõtteliselt toimus katse nii, et kõigepealt suruti rõngad pinnasesse. Seejärel asetati rõngaste põhja kile, et vältida vee valamisel pinnase struktuuri rikkumist. Peale rõnga veega täitmist eemaldati kile ettevaatlikult ning oodati pinnase küllastumist lisades pidevalt vett juurde. Edasi hakati valama vett sisemisse rõngasse, samal ajal hoides välimise rõnga põhjas vähemalt 2-3 cm kõrgust veetaset. Sisemise rõnga veetaseme languse mõõtmiseks asetati rõnga siseküljele mõõtejoonlaud. Pärast seda alustati veetaseme languse aja fikseerimist seni, kuni 1 cm languse ajad ei erinenud omavahel enam kui 5 %. Viimaseks fikseeriti

veetaseme 1 cm languse aegu, korrates protsessi 5 cm kaupa (kui veetase oli langenud 5 cm, valati sama kogus vett silindrisse juurde ning mõõdeti taas 1 cm veetaseme languse aega).

„Ämbrikatse“ sooritati nii, et kaevati ca 30 cm läbimõõduga auk, mille sügavus oleks vähemalt 15 cm. Auku valatud vee hulk oli ca 20 liitrit ning mõõdeti aega, mille jooksul vesi imbus pinnasesse.

2.3 Objektidelt saadud mõõtetulemused koos laborikatsete tulemustega

Tehtud katsed TTÜ teedelaboris:

- lõikerõnga kuivmahumass ja niiskussisaldused;
- pinnase terastikuline koostis täielikust proovist;
- filtratsioonimoodul vastavalt EVS 901-20:2013 ja permeameetris (sh Proctortihedused);

Tehtud katsed KLABis:

- peenosiste koostis 0,063...0,002 mm (määrati siiski laborisse viidud proovi täislõimis, mis kohati erineb TTÜ määrangust oluliselt. Peamiseks põhjuseks on see, et KLABi viidud proovist olid eemaldatud suuremad osised). Andmeid kasutati TTÜs määratud sõelkõvera „pikendamiseks“ kuni saviosisteni välja, arvestades KLABis leitud osakeste protsente;
- kapillaartõus terasuurusele kuni 5 mm;
- suhteline külmakerge terasuurusele kuni 2 mm;
- kolmetelgsed konsolideeritud drenitud katsed terasuurusega kuni 2 mm (kasutusel olev seade ei võimalda suuremat proovikeha läbimõõtu, mida oleks vajalik suurema maksimaalse terasuuruse korral).

Tehtud katsed TUTis (Tampere Tehnikaülikool):

- kapillaartõus torus $fr < 8$ või < 16 mm olenevalt materjalist;
- kapillaartõus SAHI meetodil $fr < 8$ või < 16 mm olenevalt materjalist;
- külmakerge vastavalt TUTi praktikale $fr < 31,5$ mm;
- kolmetelgsed konsolideeritud drenitud katsed $fr < 31,5$ mm.

Kõik detailsed katseandmed on esitatud lisas. Järgnevalt on välja toodud põhilised väärtused.

2.3.1 Objekt I – laborinumbriga 368

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Dreenkiht, materjaliks kruusliiv kihipaksusega 15 cm. Kruusliiva all oli muldkeha.

Objektil infiltromeetri katsel ei toimunud ühe tunni möödudes silindris veetaseme langust. Dreenkihi kandevõime ja tihedus olid suured, kuna drenkihi peale oli välja ehitatud killustiku kiht, mis mõõtmiste ajaks eemaldati ekskavaatoriga.

Objektil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga: 0 m/ööp (veetase ei alanenud);
2. „ämbrikatse“ auku valades: veetase ei langenud (60 min möödudes veetase oli sama kõrge, kui katse alguses).

Objektil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 E = 194 MPa; $T_f = 1,32$;
2. Plaatkoormus $E_{v2} = 362,4$ Mpa;
3. tihedus lõikerõnga proovist objektilt – kivine kruusliiv ei võimaldanud korrektselt proovi võtta, mistõttu tiheduse väärtus ei ole usaldusväärne;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 6,9 %;
5. Niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 9,7 %.

Katsetulemused laboriteimidest

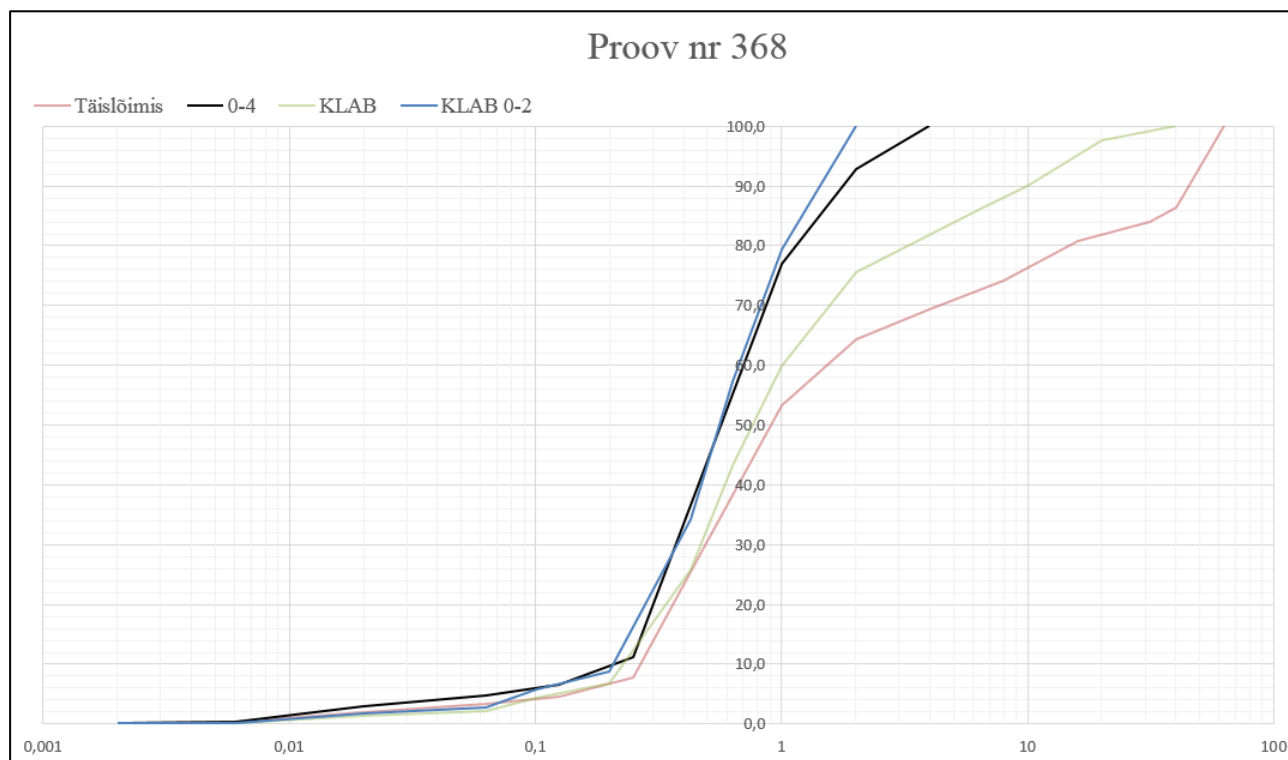
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel kruusaga keskliiv ja GOST alusel jämeliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.4 ning joonisel 2.7 („täislõimis“), samuti arvutuslikult koostatud terakoostis fr 0-4 („0-4“);
3. KLABi viidi eelnevalt sõelutud terakoostis (ehk veidi teine, kui saadi TTÜs sõelumisega) ning nendeni jõudis tabelis 2.4 ja joonisel 2.7 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
4. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 1,1 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – 1,81 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 10,1%);
5. filtratsioon permeameetriga – 0,07 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-32 – 1,92 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 8,7%);
6. suhteline külmakerge KLABis – 0,04, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
7. pinnase külmakerkelisus SP = 2,6 mm²/Kh, 24 h külmakerge 2,10 mm, 96 h külmakerge 4,03 mm. Proovikeha tihedus 2,069 Mg/m³. Veesisaldus proovikeha alaosas 12,0%, keskel 12,5% ja ülaosas 12,1%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – keskmine. 96 h külmakerke alusel arvutatud suhteline külmakerge – 0,027;
8. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 48,9 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,95 Mg/m³;
9. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 16 mm) 34 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,82 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 14,1%, keskosas 5,5% ja ülaosas 2,8%;
10. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 16 mm) 17 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,85 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 11,4%;
11. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 33,7^\circ$, $c' = 15,28$ kPa (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), E = 27 MPa;
12. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist, katse 1 $\phi' = 46,6^\circ$, $c' = 20,2$ kPa, E = 263 MPa; katse 2 $\phi' = 48,4^\circ$, $c' = 13,5$ kPa, E = 293 MPa (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud maksimaalse väärtusena). Katsejärgne veesisaldus ca 4,0%.

Tabel 2.4

Materjali nr 368 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
368	Täislõimis	0,2	0,3	2,0	3,3	4,6	7,7	30,6	53,3	64,3	69,3	74,1	80,9	84	86,5	100	5,4
	0-4	0,2	0,5	2,9	4,8	6,6	11,1	44,2	76,9	92,8	100						3,2

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
386	KLAB	0,1	0,2	1,3	2,1	4,4	6,7	25,9	43,3	60	75,5	86	90,1	97,7	100	4,5
	KLAB 0-2	0,1	0,3	1,7	2,8	5,8	8,9	34,3	57,4	79,5	100,0					3,2



Joonis 2.7. Materjali nr 368 proovide terakoostised.

2.3.2 Objekt II – laborinumbriga 671

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Looduslik aluspinnas keskliiv, kihipaksus ca 1 m. Objektis oli mõõtekohale piiratud ligipääs, mistõttu plaatkoormuskatset ei olnud võimalik teostada (puudus ligipääs vasturaskuseks vajaliku rasketehnikaga). Materjal objektis oli looduslikult tihenenud olekus; sisaldas väikesel määral orgaanikat.

Objektis mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga: 20,2 m/ööp (joonis 2.8);
2. „ämbrikatse“ auku valades: 2 min 49 sek.



Joonis 2.8. Infiltratsioon kahe rõngaga enne ja pärast katset. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Objekttil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 53 MPa, $T_f=1,28$;
2. Prima 100 – 44,63 MPa;
3. HMP – 16,07 MPa;
4. tihedus lõikerõngaprooviga – $1,58 \text{ Mg/m}^3$;
5. niiskus lõikerõngaproovist – 6,37%;
6. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 2,6%.

Katsetulemused laboriteimidest

1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel keskliiv ja GOST alusel keskliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.5 ning joonisel 2.9 („täislõimis“).
3. KLABi viidi eelnevalt sõelutud terakoostis (ehk veidi teine, kui saadi TTÜs sõelumisega) ning nendeni jõudis tabelis 2.5 ja joonisel 2.9 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
4. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 1,0 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – $1,72 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 11,2%);
5. suhteline külmakerge KLABis – 0,035, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
6. pinnase külmakerkelisus $SP = 3,2 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 2,02 mm, 96 h külmakerge 3,85 mm. Proovikeha tihedus $1,897 \text{ Mg/m}^3$. Veesisaldus proovikeha alaosas 15,4%, keskel 15,2% ja ülaosas 14,4%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – keskmine. 96 h külmakerke alusel arvatud suhteline külmakerge – 0,026;
7. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 25,5 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,78 \text{ Mg/m}^3$;
8. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 17 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,65 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus toru alaosas 22,6% ja ülaosas 8,0%;
9. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 19 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,59 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus peale katset 21,6%;
10. TST väärtus 10,0;
11. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 28,5^\circ$, $c' = 36,97 \text{ kPa}$ (sisehõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 28,8 \text{ MPa}$;

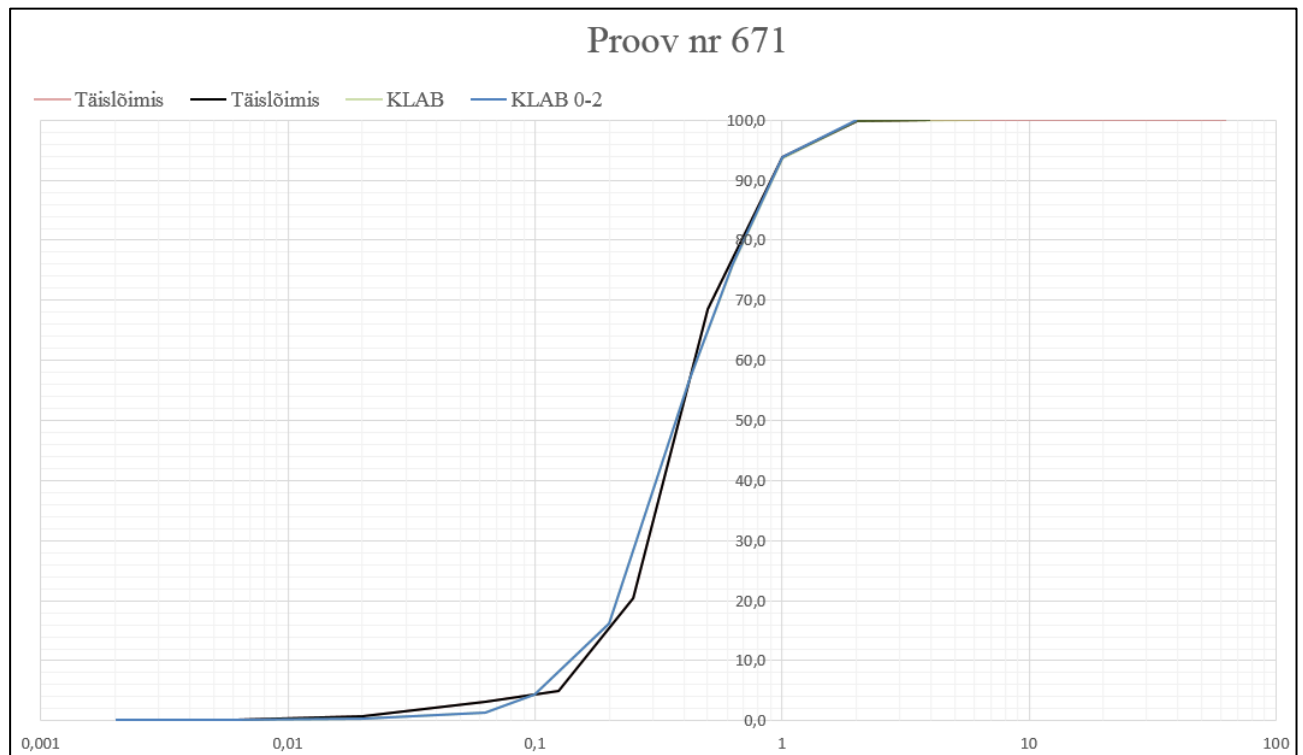
12. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{(\text{maksimaalne})} = 41,5^\circ$, $c'_{(\text{maksimaalne})} = 9,3 \text{ kPa}$, $E = 19 \text{ MPa}$; $\phi'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 34,4^\circ$, $c'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 7,1 \text{ kPa}$. Katsejärgne veesisaldus ca 18,5%.

Tabel 2.5

Materjali nr 671 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
671	Täisloimis	0,2	0,2	0,7	3,2	4,9	20,4	68,5	93,9	99,8	100	100	100	100	100	100	2,6

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
671	KLAB	0,1	0,1	0,3	1,3	4,4	16,2	56,9	76	93,7	99,8	100				3,2
	KLAB 0-2	0,1	0,1	0,3	1,3	4,4	16,2	57,0	76,2	93,9	100,0					3,1



Joonis 2.9. Materjali nr 671 proovide terakoostised.

2.3.3 Objekt III – laborinumbriga 672

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks keskliiv, kihipaksus 70 cm. Objektil oli vahetult enne katseid sadanud vihma ehk liiv oli märg. Kõikiest infiltromeetri katsetest on objekti nr 3 tulemus EVS tulemusega üks lähedasemaid.

Objektil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

- sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 32,9 m/ööp;
- „ämbrikatse“ auku valades – 1 min 06 sek.

Objektil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 67 Mpa, $T_f=1,97$;
2. plaatkoormus – 92,8 Mpa;
3. tihedus lõikerõngaproovist – $1,65 \text{ Mg/m}^3$;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 5,78 %;
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 4,0 %.

Katsetulemused laboriteimidest

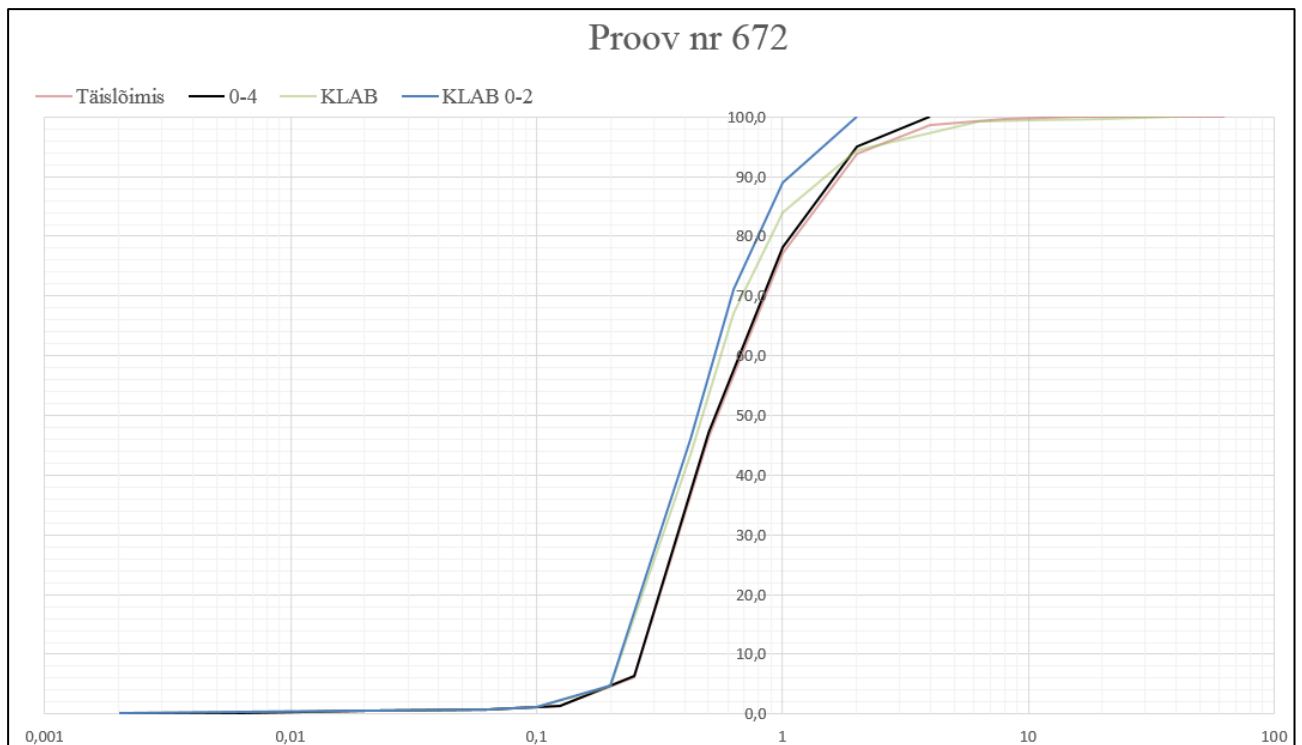
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel keskliiv ja GOST alusel keskliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.6 ning joonisel 2.10 („täislõimimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.6 ja joonisel 2.10 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 7,5 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – $1,76 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 13,8%);
4. suhteline külmakerge KLABis – 0,030, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
5. pinnase külmakerkelisus $SP = 0,3 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 0,31 mm, 96 h külmakerge 0,67 mm. Proovikeha tihedus $1,895 \text{ Mg/m}^3$. Veesisaldus proovikeha alaosas 13,1%, keskel 12,1% ja ülaosas 12,0%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – külmakerkekindel;
6. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 18,8 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,84 \text{ Mg/m}^3$;
7. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 24 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,733 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus toru alaosas 20,0% ja ülaosas 8,5%;
8. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 13 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,62 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus peale katset 19,2%;
9. TST väärtus 10,9;
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 35,1^\circ$, $c' = 0,45 \text{ kPa}$ (sisehõordenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 17,2 \text{ MPa}$;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{(\text{maksimaalne})} = 37,9^\circ$, $c'_{(\text{maksimaalne})} = 10,4 \text{ kPa}$, $E = 14 \text{ MPa}$; $\phi'_{(\text{jääktugevus ehk purunemisel})} = 33,4^\circ$, $c'_{(\text{jääktugevus ehk purunemisel})} = 5,1 \text{ kPa}$. Katsejärgne veesisaldus ca 15,8%.

Tabel 2.6

Materjali nr 672 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
672	Täislõimimis	0,1	0,3	0,5	0,7	1,3	6,2	46,4	77,1	93,8	98,6	99,7	100	100	100	100	2,5
	0-4	0,1	0,3	0,5	0,7	1,3	6,3	47,1	78,2	95,1	100						2,5

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
672	KLAB	0,1	0,3	0,6	0,8	1,2	4,6	43,5	67,2	84	94,4	99,3	99,5	99,7	100	2,5
	KLAB 0-2	0,1	0,3	0,6	0,8	1,3	4,9	46,1	71,2	89,0	100,0					2,4



Joonis 2.10. Materjali nr 672 proovide terakoostised.

2.3.4 Objekt IV – laborinumbriga 673

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks looduslik kruus, kihipaksus: 40 cm. Kuna materjal sisaldas suurel määral jämedateralisi osakesi, ei õnnestunud infiltromeetri katsel rõngaid piisavalt sügavale pinnasesse suruda (joonis 2.11). Sellest tingituna imbus vesi silindri serva alt drenkihi pinnale ja põhjustas kiire veetaseme languse silindris. Materjal oli laotatud ja tihendatud vahetult enne mõõtmiste teostamist.



Joonis 2.11. Infiltromeetrikatse ei ole kruuspinnase puhul võimalik, kuna rõngaid ei saa suruda pinnasesse. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Objektil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – ?;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 7 min 25 sek

Objektil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 107 MPa, $T_f=1,38$;
2. Plaatkoormus – 214,2 Mpa;
3. Prima 100 – 44,31 Mpa;
4. HMP – 27,88 Mpa;
5. tihedus lõikerõngaproovist – kivine kruusliiv ei võimaldanud korrektselt proovi võtta, mistõttu tiheduse väärtus ei ole usaldusväärne;
6. niiskus lõikerõngaproovist – 4,01%
7. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 0%.

Katsetulemused laboriteimidest

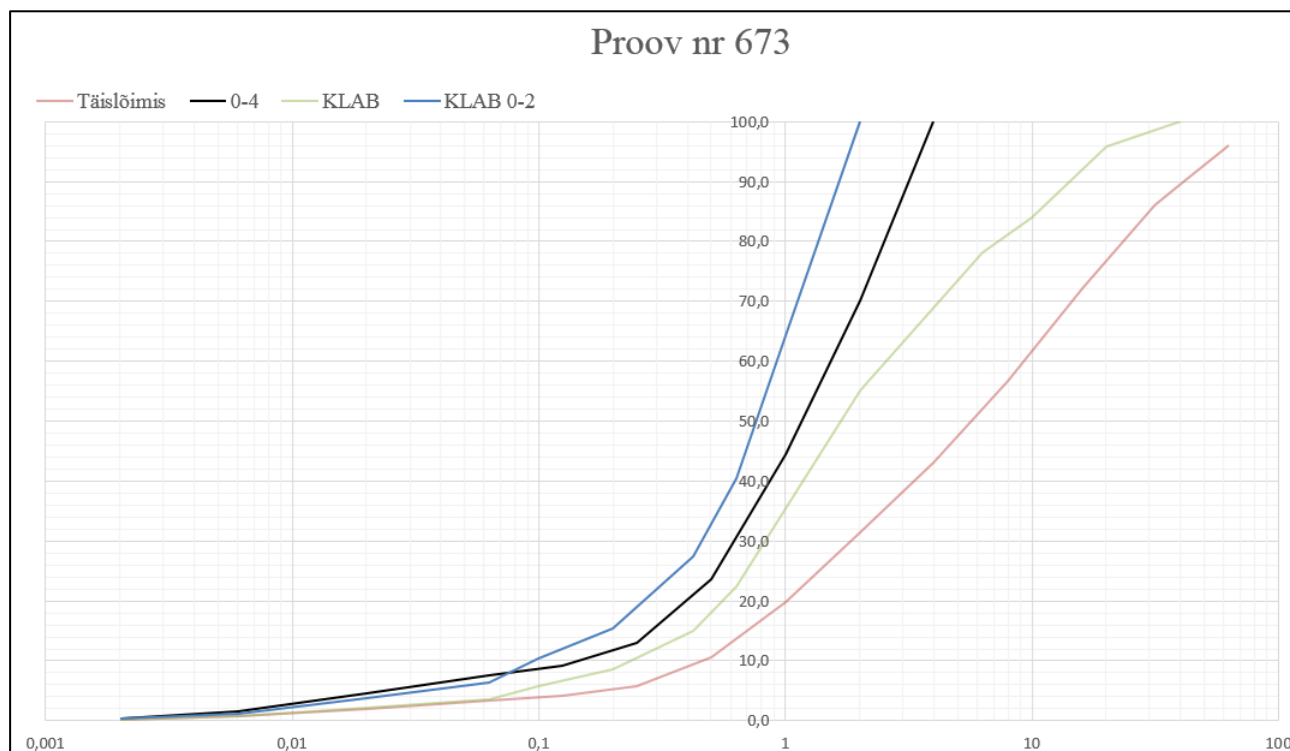
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel rohke kruusaga jämeliiv ja GOST alusel kruusliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.7 ning joonisel 2.12 („täislõimis“), samuti arvutuslikult koostatud terakoostis fr 0-4 („0-4“);
3. KLABi viidi eelnevalt sõelutud terakoostis (ehk veidi teine, kui saadi TTÜs sõelumisega) ning nendeni jõudis tabelis 2.7 ja joonisel 2.12 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
4. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 0,5 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – 1,85 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 11,8%);
5. filtratsioon permeameetriga – 0,05 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-32 – 2,12 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 6,2%);
6. suhteline külmakerge KLABis – 0,05, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
7. pinnase külmakerkelisus $SP = 10,7 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 8,70 mm, 96 h külmakerge 15,14 mm. Proovikeha tihedus 2,286 Mg/m³. Veesisaldus proovikeha alaosas 9,6%, keskel 10,6% ja ülaosas 6,7%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – eriti külmakerkeohtlik. 96 h külmakerke alusel arvatud suhteline külmakerge – 0,101;
8. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 48,9 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,84 Mg/m³;
9. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 16 mm) 37 cm, proovi kuivmahumass peale katset 2,036 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 10,0%, keskosas 5,4% ja ülaosas 3,1%;
10. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 16 mm) 55 cm, proovi kuivmahumass peale katset 2,009 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 6,5%;
11. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 40,0^\circ$, $c' = 16,13 \text{ kPa}$ (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 22,1 \text{ MPa}$;
12. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi' = 53,5^\circ$, $c' = 73,4 \text{ kPa}$, $E = 464 \text{ MPa}$; (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud maksimaalse väärtusena). Katsejärgne veesisaldus ca 3,8%.

Tabel 2.7

Materjali nr 673 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
673	Täislõimis	0,2	0,7	2,0	3,4	4,1	5,8	10,6	19,9	31,4	43	56,8	72,1	86,1	89,6	96	19,6
	0-4	0,4	1,5	4,6	7,6	9,2	12,9	23,7	44,4	70,1	100						10,7

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
673	KLAB	0,2	0,7	2,1	3,5	5,7	8,5	15,1	22,4	35,5	55,2	78,2	84	95,9	100	11,4
	KLAB 0-2	0,4	1,3	3,8	6,3	10,3	15,4	27,4	40,6	64,3	100,0					9,1



Joonis 2.12. Materjali nr 673 proovide terakoostised.

2.3.5 Objekt V – laborinumbriga 720

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks keskliiv, kihipaksus 70 cm. Kõrge õhutemperatuur, kuiv ilm ning suur kihipaksus muutsid materjali küllastamise infiltromeetri katse jaoks väga keeruliseks (joonis 2.13). Välimises rõngas mõne cm kõrguse veetaseme hoidmiseks kulus rohkem kui 20 liitrit minutis.



Joonis 2.13. Mõõtmised objektil V väga kuiva ja sooja ilmaga. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Objekttil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 46,5 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 0 min 52 sek.

Objekttil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 49 MPa, $T_f = 1,69$;
2. plaatkoormus – 46 Mpa;
3. tihedus lõikerõngaproovist – $1,51 \text{ Mg/m}^3$;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 3,91 %
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 0 %

Katsetulemused laboriteimidest

1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel keskliiv ja GOST alusel keskliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.8 ning joonisel 2.14 („täislõimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.8 ja joonisel 2.14 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 11,7 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – $1,62 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 17,0%);
4. suhteline külmakerge KLABis – 0,025, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
5. pinnase külmakerkelisus $SP = 0,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 0,10 mm, 96 h külmakerge 0,25 mm. Proovikeha tihedus $1,768 \text{ Mg/m}^3$. Veesisaldus proovikeha alaosas 15,7%, keskel 14,6% ja ülaosas 14,0%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – külmakerkekindel;
6. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 31 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,77 \text{ Mg/m}^3$;
7. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 29 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,687 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus toru alaosas 20,6% ja ülaosas 7,3%;
8. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 17 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,595 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus peale katset 19,9%;
9. TST väärtus 12,7;

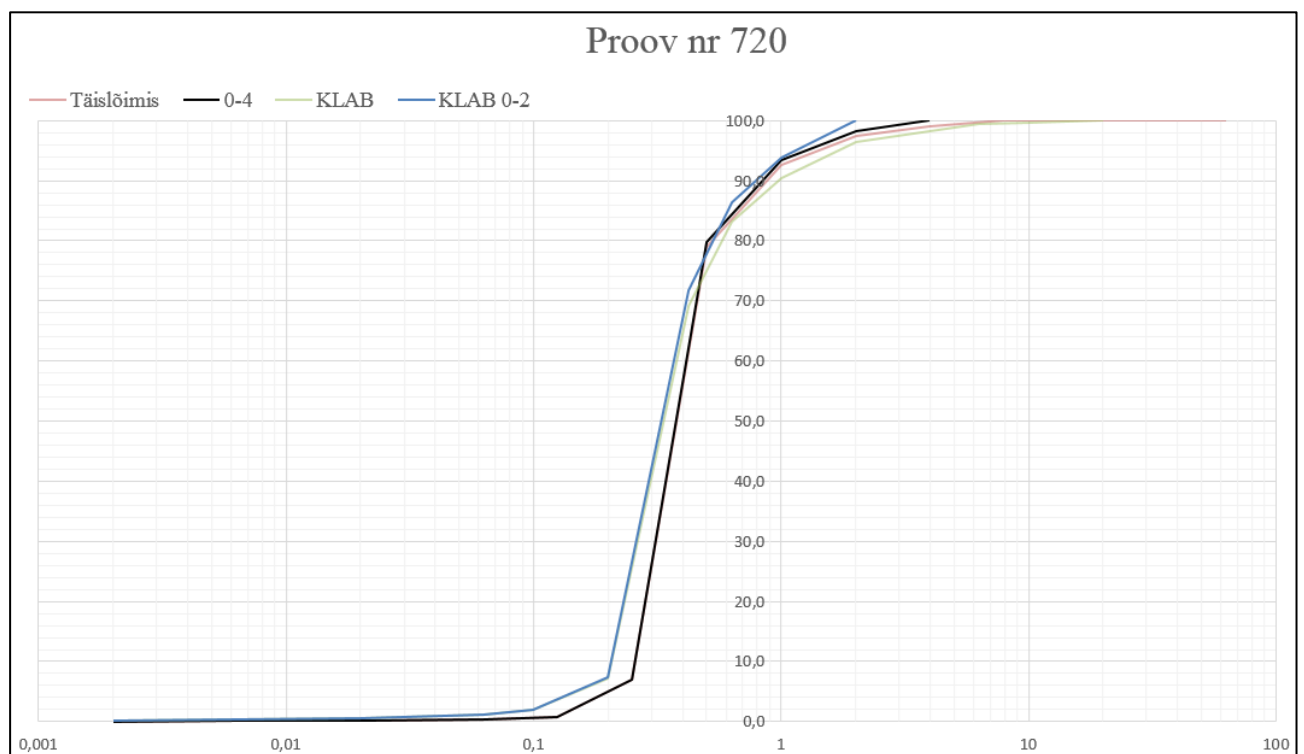
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 32,8^\circ$, $c' = 9,46$ kPa (sisehõordenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 22,3$ MPa;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{(\text{maksimaalne})} = 40,7^\circ$, $c'_{(\text{maksimaalne})} = 7,9$ kPa, $E = 21$ MPa; $\phi'_{(\text{jääktugevus ehk purunemisel})} = 34,5^\circ$, $c'_{(\text{jääktugevus ehk purunemisel})} = 5,1$ kPa. Katsejärgne veesisaldus ca 18%.

Tabel 2.8

Materjali nr 720 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
720	Täislõimis	0,1	0,1	0,2	0,3	0,8	7	79	92,6	97,4	99,1	100	100	100	100	100	1,6
	0-4	0,1	0,1	0,2	0,3	0,8	7,1	79,7	93,4	98,3	100						1,6

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
720	KLAB	0,2	0,4	0,6	1,2	1,9	7,1	69,2	83,3	90,5	96,5	99,4	99,7	100		1,8
	KLAB 0-2	0,2	0,4	0,6	1,2	2,0	7,4	71,7	86,3	93,8	100,0					1,8



Joonis 2.14. Materjali nr 720 proovide terakoostised.

2.3.6 Objekt VI – laborinumbriga 722

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks kruusliiv, kihipaksus 20 cm, mille all oli savikas vett mitteläbilaskev pinnas. Dreenikiht oli külgedelt kaetud nõlva kasvupinnasega ja paistis, et veel ei ole ruumi kuskile liikuda peale horisontaalse liikumise piki dreenukihti (joonis 2.15). Mõõtmiste ajal sadas objektile hoovihma.



Joonis 2.15. Olukord objektil VI, rõnga ümbruses pinnas niiskunud horisontaalsest imbumisest. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Objekttil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 7,9 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 44 min 00 sek.

Objekttil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 78 MPa, $T_f=1,83$;
2. Prima 100 – 60,0 MPa;
3. HMP – 33,78 MPa;
4. plaatkoormus: 121,7 MPa;
5. tihedus lõikerõngaproovist – $1,76 \text{ Mg/m}^3$;
6. niiskus lõikerõngaproovist objektilt – 10,23%;
7. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 10,1 %.

Katsetulemused laboriteimidest

1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel kruusaga keskliiv ja GOST alusel jämeliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.9 ning joonisel 2.16 („täislõimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.9 ja joonisel 2.16 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 0,1 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – $1,81 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 11,8%);
4. filtratsioon permeameetriga – 0,03 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-32 – $1,90 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 9,8%);
5. suhteline külmakerge KLABis – 0,050, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
6. pinnase külmakerkelisus $SP = 5,3 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 4,77 mm, 96 h külmakerge 7,43 mm. Proovikeha tihedus $1,996 \text{ Mg/m}^3$. Veesisaldus proovikeha alaosas 13,4%, keskel 12,5% ja ülaosas 10,9%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – väga külmakerkeohtlik. 96 h külmakerke alusel arvatud suhteline külmakerge – 0,05;
7. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 54 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,97 \text{ Mg/m}^3$;

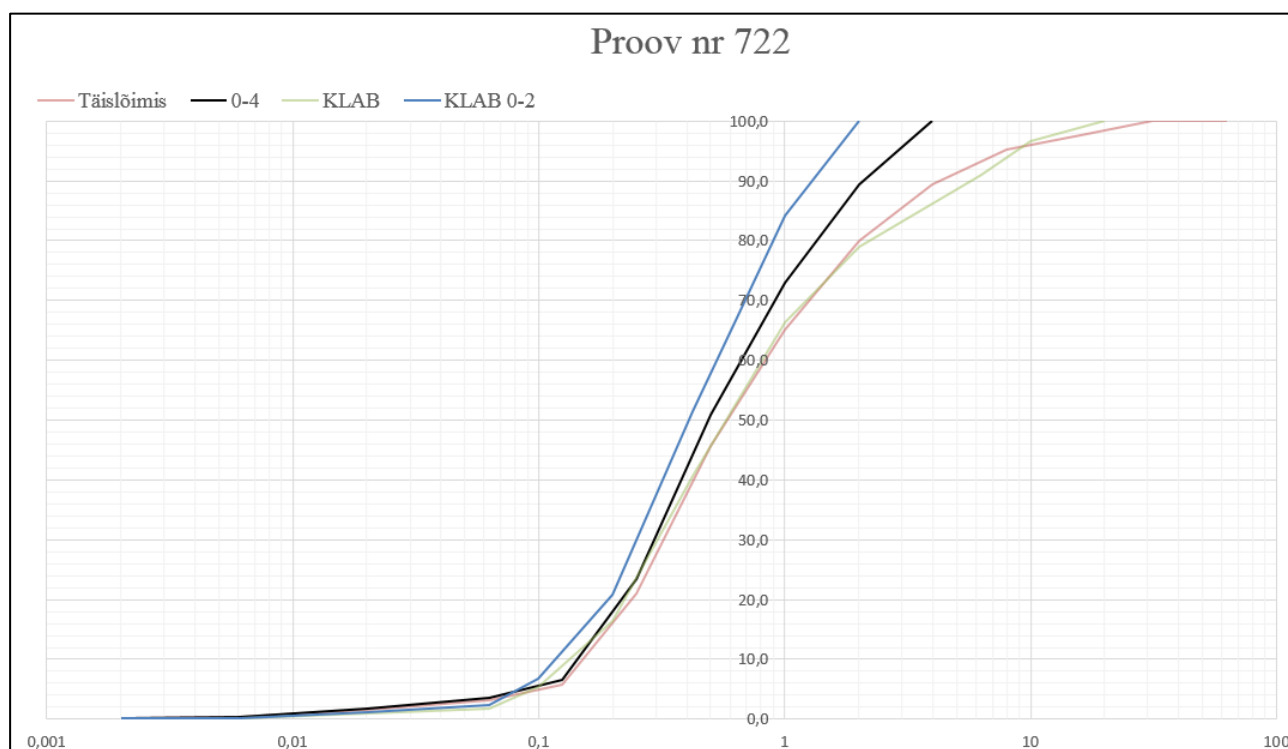
8. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 52 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,840 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 13,1%, keskosas 8,0% ja ülaosas 3,8%;
9. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 20 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,789 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 15,0%;
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 32,5^\circ$, $c' = 15,29$ kPa (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 21,7$ MPa;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{\text{(maksimaalne)}} = 44,8^\circ$, $c'_{\text{(maksimaalne)}} = 13,3$ kPa, $E = 17$ MPa; $\phi'_{\text{(jäätugevus ehk purunemisel)}} = 36,9^\circ$, $c'_{\text{(jäätugevus ehk purunemisel)}} = 8,2$ kPa. Katsejärgne veesisaldus ca 13%.

Tabel 2.9

Materjali nr 722 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
722	Täislõimis	0,2	0,4	1,6	3,2	5,8	21	45,6	65,2	80	89,4	95,2	97,6	100	100	100	5,3
	0-4	0,2	0,4	1,8	3,6	6,5	23,5	51,0	72,9	89,5	100						4,5

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
722	KLAB	0,1	0,2	0,9	1,8	5,3	16,4	40,6	52,7	66,4	78,9	91	96,6	100		5,7
	KLAB 0-2	0,1	0,3	1,1	2,3	6,7	20,8	51,5	66,8	84,2	100,0					4,1



Joonis 2.16. Materjali nr 722 proovide terakoostised.

2.3.7 Objekt VII – laborinumbriga 732

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks kruusliiv, kihipaksus 1,5 m. Dreenikiht oli valmis ehitatud umbes nädal enne filtratsiooni ja kandevõime mõõtmisi. Antud objektile on EVS filtratsiooni ja infiltromeetri erinevus võrreldes teiste objektidega kõige väiksem.

Objektile mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse infiltromeetriga kahe rõngaga – 9,7 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 7 min 35 sek.

Objektile mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 79 MPa, $T_f = 1,02$;
2. Plaatkoormus – 102,6 Mpa;
3. tihedus lõikerõngaproovist – 1,69 Mg/m³;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 10,17 %;
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 7,5 %

Katsetulemused laboriteimidest

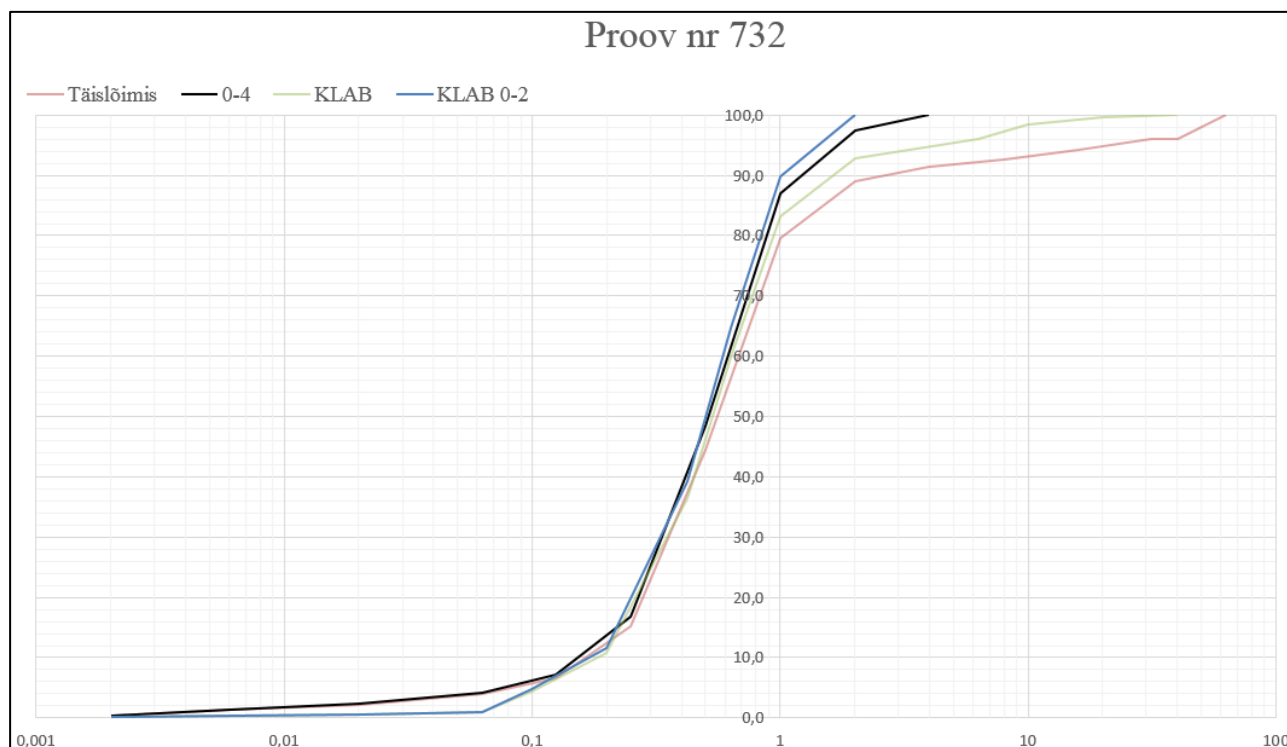
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel keskliiv ja GOST alusel jämeliiv;
2. objektile toodud proovi terakoostis on tabelis 2.10 ning joonisel 2.17 („täislõimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.10 ja joonisel 2.17 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 4,5 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – 1,71 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 14,8%);
4. filtratsioon permeameetriga – 0,22 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-32 – 1,71 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 11,9%);
5. suhteline külmakerge KLABis – 0,035, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
6. pinnase külmakerkelisus $SP = 3,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 2,35 mm, 96 h külmakerge 4,56 mm. Proovikeha tihedus 1,957 Mg/m³. Veesisaldus proovikeha alaosas 12,9%, keskel 13,0% ja ülaosas 12,9%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – keskmiselt külmakerkeohtlik. 96 h külmakerke alusel arvutatud suhteline külmakerge – 0,03;
7. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 43,8 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,89 Mg/m³;
8. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 59 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,809 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 13,0%, keskosas 6,3% ja ülaosas 3,0%;
9. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 17 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,705 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 16,7%;
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 33,7^\circ$, $c' = 25,71 \text{ kPa}$ (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 27,6 \text{ MPa}$;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{(\text{maksimaalne})} = 44,6^\circ$, $c'_{(\text{maksimaalne})} = 8,0 \text{ kPa}$, $E = 16 \text{ MPa}$; $\phi'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 35,0^\circ$, $c'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 18,8 \text{ kPa}$. Katsejärgne veesisaldus ca 15%.

Tabel 2.10

Materjali nr 732 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
732	Täislõimis	0,4	1,3	2,2	3,9	6,5	15,3	44,4	79,6	89,1	91,4	92,7	94,2	96	96	100	4,0
	0-4	0,5	1,4	2,4	4,3	7,1	16,7	48,6	87,1	97,5	100						3,8

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
732	KLAB	0,1	0,3	0,5	0,9	4,4	10,8	36,5	60	83,3	92,8	96	98,5	99,6	100	3,5
	KLAB 0-2	0,1	0,3	0,5	1,0	4,7	11,6	39,3	64,7	89,8	100,0					3,3



Joonis 2.17. Materjali nr 732 proovide terakoostised.

2.3.8 Objekt VIII – laborinumbriga 733**Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus**

Materjaliks kruusliiv, kihipaksus 70 cm. Enne mõõtmisi ja ka mõõtmiste ajal olid hoovihmad.

Objektil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 6,2 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 12 min 06 sek.

Objektil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 115 MPa, $T_f=1,45$;
2. plaatkoormus – 132,9 Mpa;
3. tihedus lõikerõngaproovist – kivine kruusliiv ei võimaldanud korrektselt proovi võtta, mistõttu tiheduse väärtus ei ole usaldusväärne;

4. niiskus lõikerõngaproovist – 5,78%;
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 9%.

Katsetulemused laboriteimidest

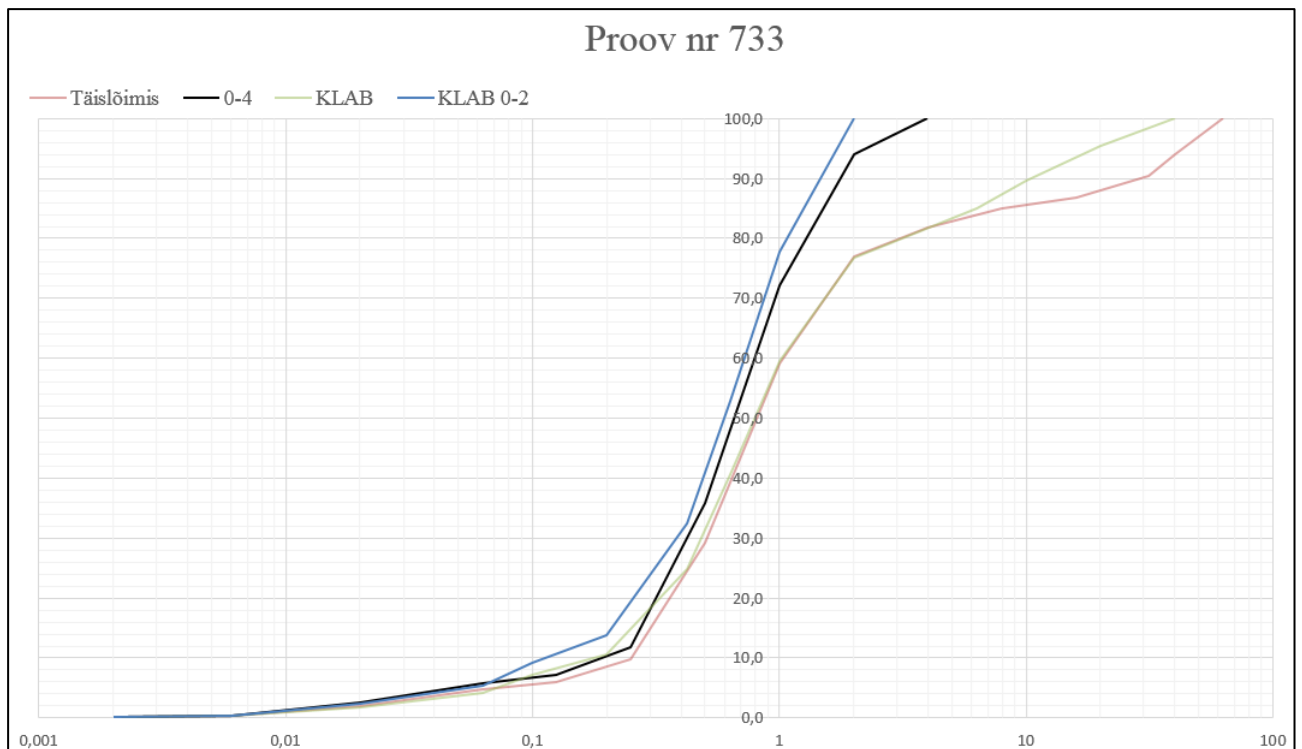
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel rohke kruusaga jämeliiv ja GOST alusel jämeliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.11 ning joonisel 2.18 („täislõimis“), samuti arvutuslikult koostatud terakoostis fr 0-4 („0-4“);
3. KLABi viidi eelnevalt sõelutud terakoostis (ehk veidi teine, kui saadi TTÜs sõelumisega) ning nendeni jõudis tabelis 2.11 ja joonisel 2.18 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
4. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 0,3 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – 1,79 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 12,0%);
5. filtratsioon permeameetriga – 0,01 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-32 – 1,96 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 7,7%);
6. suhteline külmakerge KLABis – 0,04, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
7. pinnase külmakerkelisus SP = 7,6 mm²/Kh, 24 h külmakerge 5,12 mm, 96 h külmakerge 8,82 mm. Proovikeha tihedus 2,081 Mg/m³. Veesisaldus proovikeha alaosas 12,6%, keskel 14,4% ja ülaosas 14,4%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – eriti külmakerkeohtlik. 96 h külmakerke alusel arvutatud suhteline külmakerge – 0,06;
8. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 48,0 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,81 Mg/m³;
9. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 16 mm) 48 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,720 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 11,5% ja ülaosas 4,6%;
10. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 16 mm) 19 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,822 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 11,3%;
11. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\varphi' = 36,4^\circ$, $c' = 15,94$ kPa (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 29,9$ MPa;
12. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\varphi' = 48,5^\circ$, $c' = 26,4$ kPa, $E = 282$ MPa; (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud maksimaalse väärtusena). Katsejärgne veesisaldus ca 3,8%.

Tabel 2.11

Materjali nr 733 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
733	Täislõimis	0,1	0,3	2,1	4,7	5,9	9,7	29,3	59,1	77	81,9	85	86,8	90,5	94	100	4,2
	0-4	0,1	0,4	2,5	5,7	7,2	11,8	35,8	72,2	94,0	100						4,2

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
733	KLAB	0,1	0,3	1,8	4,1	7,1	10,6	24,9	40,6	59,6	76,7	85	89,6	95,5	100	6,5
	KLAB 0-2	0,1	0,4	2,3	5,3	9,3	13,8	32,5	52,9	77,7	100,0					5,9



Joonis 2.18. Materjali nr 733 proovide terakoostised.

2.3.9 Objekt IX – laborinumbriga 769

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks keskliiv, kihipaksus 15 cm. Dreenikihi pealt eemaldati killustiku ja freesipuru kiht mõõtmiste tarbeks. Tihedus oli suur, kuna kiht oli olnud koormatud pealmiste kihtidega 2 nädalat. Plaatkoormuse mõõtetulemus on tõenäoliselt ebakorrektn, seadmel esines probleeme mis ilmesid pärast mõõtmisi objektil.

Objektile mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 4,8 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 45 min 00 sek.

Objektile mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 135; $T_f = 1,48$ Mpa
2. plaatkoormus – ?
3. tihedus lõikerõngaproovist – $1,61 \text{ Mg/m}^3$;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 6,64 %;
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 12,3 %.

Katsetulemused laboriteimidest

1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel keskliiv ja GOST alusel keskliiv;

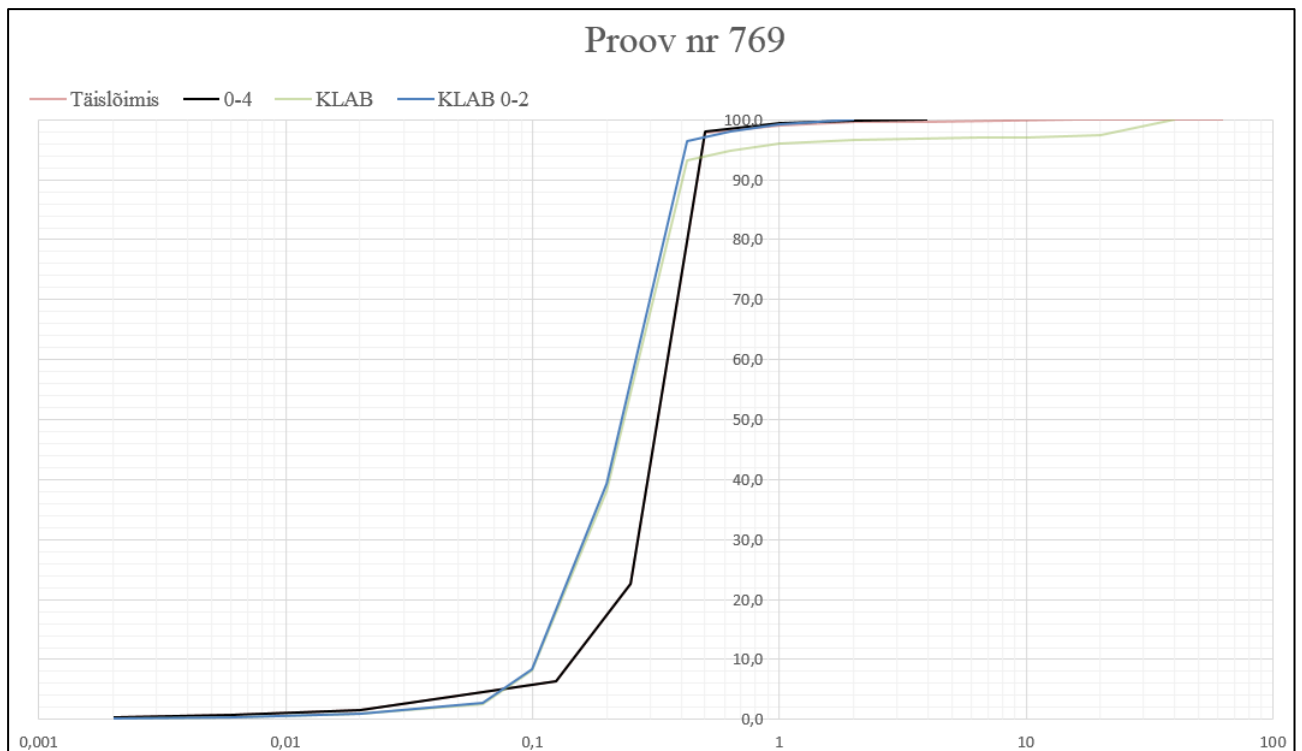
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.12 ning joonisel 2.19 („täislõimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.12 ja joonisel 2.19 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 1,0 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – 1,64 Mg/m³ ja optimaalne veesisaldus 15,3%);
4. suhteline külmakerge KLABis – 0,040, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
5. pinnase külmakerkelisus SP = 0,8 mm²/Kh, 24 h külmakerge 0,69 mm, 96 h külmakerge 1,63 mm. Proovikeha tihedus 1,785 Mg/m³. Veesisaldus proovikeha alaosas 15,9%, keskel 15,7% ja ülaosas 14,8%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – külmakerkeohutu.
6. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 54,0 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,72 Mg/m³;
7. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 50 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,603 Mg/m³. Proovi veesisaldus toru alaosas 22,0% ja ülaosas 7,7%
8. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 32 cm, proovi kuivmahumass peale katset 1,542 Mg/m³. Proovi veesisaldus peale katset 22,9%;
9. TST tulemus 16,6;
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 34,7^\circ$, $c' = 3,00$ kPa (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 21,7$ MPa;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{\text{(maksimaalne)}} = 40,4^\circ$, $c'_{\text{(maksimaalne)}} = 12,6$ kPa, $E = 17$ MPa; $\phi'_{\text{(jäätugevus ehk purunemisel)}} = 38,4^\circ$, $c'_{\text{(jäätugevus ehk purunemisel)}} = 1,6$ kPa. Katsejärgne veesisaldus ca 19,5%.

Tabel 2.12

Materjali nr 769 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
769	Täislõimis	0,4	0,7	1,6	4,6	6,3	22,6	97,8	99,1	99,6	99,7	99,8	100	100	100	100	2,3
	0-4	0,4	0,7	1,6	4,6	6,3	22,7	98,1	99,4	99,9	100						2,3

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
769	KLAB	0,2	0,4	0,9	2,6	8,1	38	93,2	94,8	96	96,7	97	97	97,5	100	2,4
	KLAB 0-2	0,3	0,5	1,2	3,4	10,7	50,3	123,4	125,6	127,2	128,1					2,3



Joonis 2.19. Materjali nr 769 proovide terakoostised.

2.3.10 Objekt X – laborinumbriga 803

Konstruksioonikiht ja materjal, objekti iseloomustus

Materjaliks peenliiv, kihipaksus 30 cm. Materjali tihedus oli väga suur, sest dreenikiht oli olnud killustiku ja asfaltkihi all mitu kuud. Mõõtmisteks eemaldati pealmised kihid. Infiltrimeetri rõngaid ei õnnestunud pinnasesse piisavalt sügavale suruda, ekskavaatori või mõne muu rasketehnika ligipääs ei olnud võimalik. Rõngad olid lõpptulemusena vaid 2-3 cm sügavusel (joonis 2.20).



Joonised 2.20. Mõõtmised X objektil. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Objektil mõõdetud infiltreeruvuse tulemused

1. sissevalamiskatse kahe rõngaga infiltromeetriga – 6 m/ööp;
2. „ämbrikatse“ auku valades – 5 min 32 sek.

Objektil mõõdetud kandevõime ja tiheduse tulemused

1. Inspector 3 – 185 MPa, $T_f=0,98$;
2. HMP – 50,56 Mpa;
3. tihedus lõikerõngaproovist – $1,54 \text{ Mg/m}^3$;
4. niiskus lõikerõngaproovist – 11,11%;
5. niiskus mõõdetud niiskusanduriga – 0 %.

Katsetulemused laboriteimidest

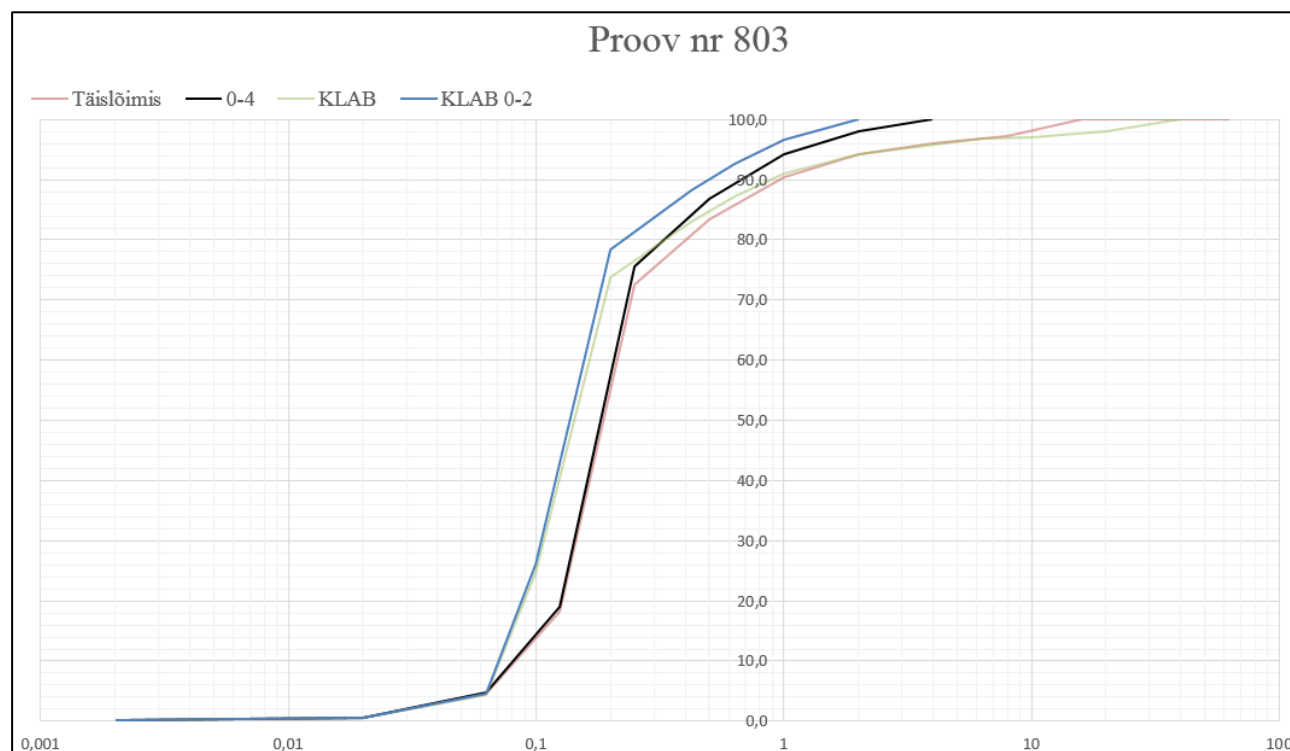
1. laboris määratud pinnase nimetus EVS-i alusel peenliiv ja GOST alusel peenliiv;
2. objektilt toodud proovi terakoostis on tabelis 2.13 ning joonisel 2.21 („täislõimis“). KLABis katsetatud materjali terakoostised on tabelis 2.13 ja joonisel 2.21 kujutatud sõelkõveraga materjal („KLAB“). Kuna enamus katseid tehti fr 0-2, siis on esitatud ka see („KLAB 0-2“);
3. filtratsioon vastavalt EVS 901-20 – 0,6 m/ööp (maksimaalne tihedus standardse Proctori järgi fr 0-4 – $1,68 \text{ Mg/m}^3$ ja optimaalne veesisaldus 14,0%);
4. suhteline külmakerge KLABis – 0,050, külmaohtlikkuse iseloom – keskmine;
5. pinnase külmakerkelisus $SP = 2,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, 24 h külmakerge 1,51 mm, 96 h külmakerge 3,14 mm. Proovikeha tihedus $1,975 \text{ Mg/m}^3$. Veesisaldus proovikeha alaosas 13,1%, keskel 13,8% ja ülaosas 12,9%. Pinnase külmaohtlikkuse iseloom vastavalt Soome praktikale – keskmiselt külmakerkeline. 96 h külmakerge alusel arvatud suhteline külmakerge – 0,021.
6. maksimaalne kapillaartõus (fr kuni 5 mm) KLABis 46,0 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,66 \text{ Mg/m}^3$;
7. maksimaalne kapillaartõus TUTi torus (fr kuni 8 mm) 38 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,559 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus toru alaosas 22,1% ja ülaosas 8,9%;
8. maksimaalne kapillaartõus SAHI meetodil (fr kuni 8 mm) 46 cm, proovi kuivmahumass peale katset $1,591 \text{ Mg/m}^3$. Proovi veesisaldus peale katset 21,0%;
9. TST tulemus 17,7;
10. tugevusomadused KLABi kolmetelgsest testist fr kuni 2 mm $\phi' = 32,4^\circ$, $c' = 0,41 \text{ kPa}$ (sisehõõrdenurk ja nidusus määratud proovi purunemisel), $E = 21,5 \text{ MPa}$;
11. tugevusomadused TUTi kolmetelgsest testist $\phi'_{(\text{maksimaalne})} = 40,2^\circ$, $c'_{(\text{maksimaalne})} = 8,5 \text{ kPa}$, $E = 17 \text{ MPa}$; $\phi'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 34,5^\circ$, $c'_{(\text{jäätugevus ehk purunemisel})} = 5,6 \text{ kPa}$. Katsejärgne veesisaldus ca 17,9%.

Tabel 2.13

Materjali nr 803 proovide terakoostised

Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63	Cu
803	Täislõimis	0,1	0,3	0,6	4,5	18,2	72,5	83,4	90,5	94,2	96	97,2	100	100	100	100	2,5
	0-4	0,1	0,3	0,6	4,7	19,0	75,5	86,9	94,3	98,1	100						2,6

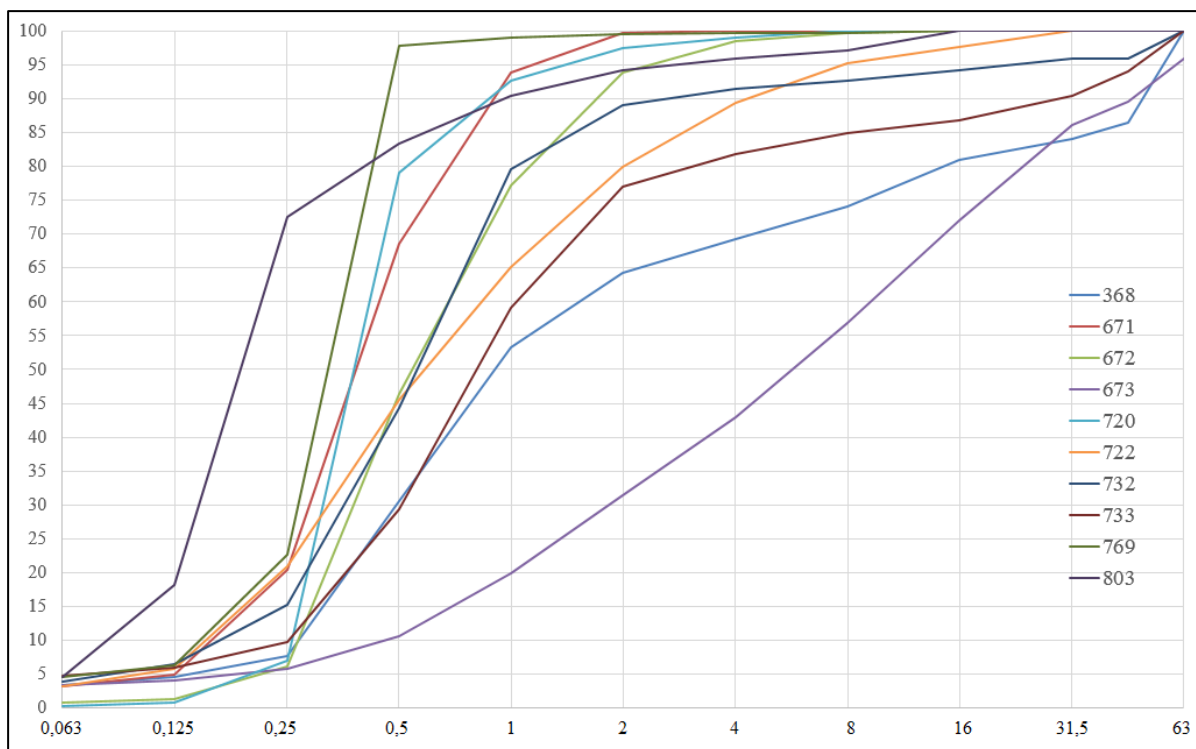
Proovi nr.	fr.	0,002	0,006	0,02	0,063	0,1	0,2	0,425	0,63	1	2	6,3	10	20	40	Cu
803	KLAB	0,1	0,3	0,6	4,4	24,6	73,8	83,1	87,2	91	94,2	96,9	97,1	98	100	2,3
	KLAB 0-2	0,1	0,3	0,6	4,7	26,1	78,3	88,2	92,6	96,6	100,0					2,3



Joonis 2.21. Materjali nr 803 proovide terakoostised.

2.4 Koondandmed ja tulemuste analüüs

Katsetatud materjalide terakoostised on „tavakujul“ (mittelogaritmilisel graafikul) kujutatud joonisel 2.22.



Joonis 2.22. Kümnele objektile kogutud materjalide terakoostised.

2.4.1 Filtreeruvuse võrdlus

Otseselt filtreeruvusega seotud andmed on kujutatud ühtse tabelina tabelis 2.14. Kuna filtreeruvus on muude tegurite kõrval seotud tugevalt ka tihedusastmega, on nende andmed võrdlevas tabelis 2.15, kus on kirjas ka kihtide paksused.

Tabel 2.14

Pinnaste veeläbilaskvused koondtabelina

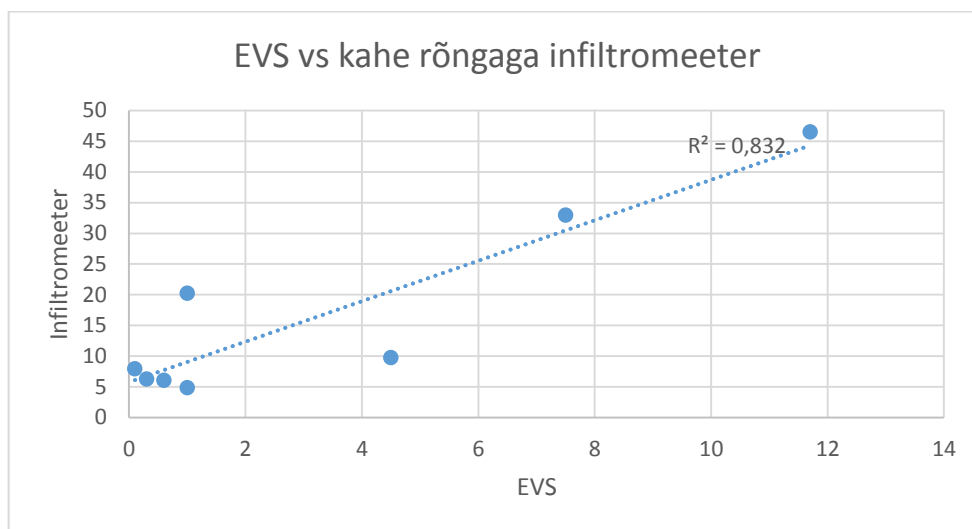
Proovi nr.	EVS 901-20 (m/ööp)	Permeameeter (m/ööp)	Kahe rõngaga (m/ööp)	„ämbrikatse“ (min)
386	1,1	0,07	0,0	0,00
671	1,0	-	20,2	2,82
672	7,5	-	32,9	1,10
673	0,5	0,05	-	7,42
720	11,7	-	46,5	0,87
722	0,1	0,03	7,9	7,58
732	4,5	0,22	9,7	7,58
733	0,3	0,01	6,2	12,10
769	1,0	-	4,8	45,00
803	0,6	-	6	5,53

Tabel 2.15

Pinnaste tihedusnäitajad

Proovi nr.	Inspectori Tf	Lõikerõngas (Mg/m ³)	Max kuivmahumass (< 4 mm/ < 31,5 mm)	Tihedus objektil	Kihipaksus (cm)
386	1,32	1,71 (?)	1,81 / 1,92	OK	15
671	1,28	1,58	1,72	0,92	100
672	1,97	1,65	1,76	0,94	70
673	1,38	1,67 (?)	1,85 / 2,12	OK	40
720	1,69	1,66	1,62	1,02	70
722	1,83	1,76	1,81 / 1,9	0,97	20
732	1,02	1,69	1,71	0,99	150
733	1,45	1,69 (?)	1,79 / 1,96	OK	70
769	1,48	1,61	1,64	0,98	15
803	0,98	1,54 (?)	1,68	?	30

Esmapilgul nähtub, et infiltromeetrikatsed annavad liiga korrapäratuid tulemusi saamaks meetodit kasutada kasvõi indikatsiooniks. Peamisi probleeme andmetes tekitavad kruusade tulemused, kus mõõtesilindreid ei olnud võimalik kihti korralikult sisse suruda. Kõrvaldades infiltromeetrikatsetest kruusade tulemused (proovid nr 386 ja 673) ning vaadates liivadele tehtud katseid, saadakse kahe rõnga infiltromeetri puhul korrelatsiooniks $R^2 = 0,83$ (joonis 2.23), mis on hea. Korrelatsiooni EVSi ja ämbrikatse puhul ei eksisteeri ($R^2 = 0,2$). Hoolimata käesolevasse uuringusse kaasatud tulemuste suhteliselt heast korrelatsioonist, tuleb infiltromeetriandmeid kasutada teatava konservatiivsusega, kuna infiltromeetrikatsete tulemusi moonutavad võrreldes laboritulemustega mitmed objekti iseloomulikud näitajad nagu kihi tihedus, paksus (tabel 2.15), all oleva materjali omadused, ilmastik ja kuna mõõtmine tehakse objektil, siis on mõõtjal tõenäoliselt raskem jälgida ka nii rangelt mõõteprotokolli, kui kontrollitud laboritingimustes. Kõrvaldades andmehulgaset kasvõi ühe hea filtratsiooniga materjali, langeb korrelatsioon märgatavalt.



Joonis 2.23. EVS 901-20:2013 ja kahe rõngaga infiltromeetri katsetulemuste võrdlus.

Kahe rõngaga tehtud infiltromeetrikatsete ja EVSi tulemuste erinevus on kohati mitmekordne, nagu selgub jooniselt 2.23. Allikas [32] toodi samuti välja see, et EVS-EN 901-20:2013 metoodika järgi saadakse süstemaatiliselt väiksemad filtratsioonimoodulid võrreldes teaduskirjanduses toodud valemite kaudu arvutatuga. Tuginedes allikale [33] soovitati allikas [32] määrata pinnaste filtratsioonimoodulit kasutades Chapuisi valemit (valem 2.1).

$$K = 2,4622 \left(\frac{d_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0,7825}$$

kus (2.1)

K – filtratsioonimoodul (cm/s);

d_{10} – pinnase efektiivdiameeter;

e – poorsustegur

Valemi kasutustingimused $e = 0,3 \dots 1,0$; $d_{10} = 0,003 \dots 3$ mm; materjaliks looduslik liiv või kruus.

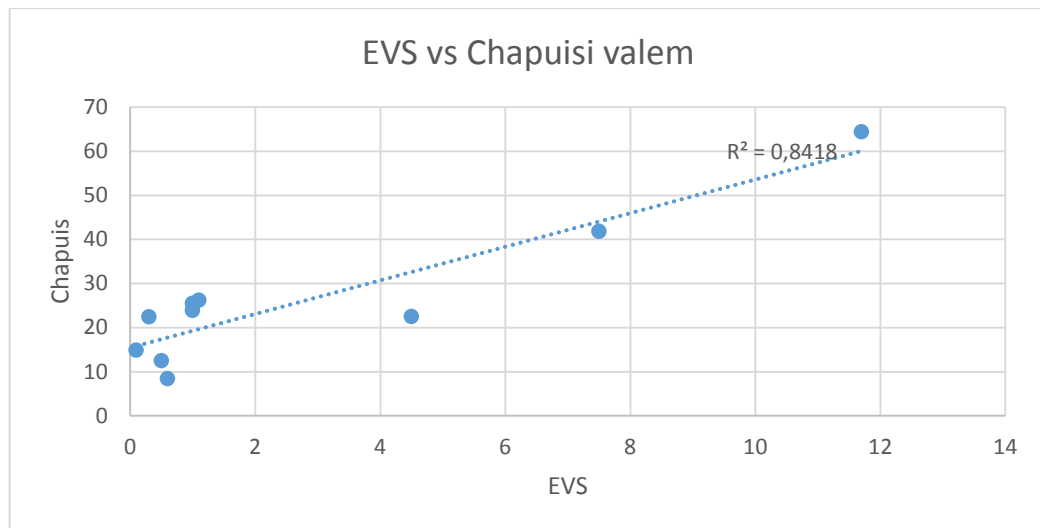
Võrdlemaks uuringusse kaasatud materjalide filtreeruvusomadusi Chapuisi valemiga, kasutatakse tabelis 2.16 olevaid andmeid ning saadakse järgmised arvutuslikud filtratsioonimoodulid (m/ööp).

Võrdlemaks EVS 901-20:2013 alusel mõõdetud filtratsioonimoodulit Chapuisi valemiga, tuleb kasutada tabelist 2.16 ridasid tähisega 0/4. Võrdlemaks arvutatut infiltratsiooni tulemustega, tuleb kasutada ridasid 0/32 (kui seda pole, siis 0/4). Tulemused on esitatud joonistel 2.24 ja 2.25.

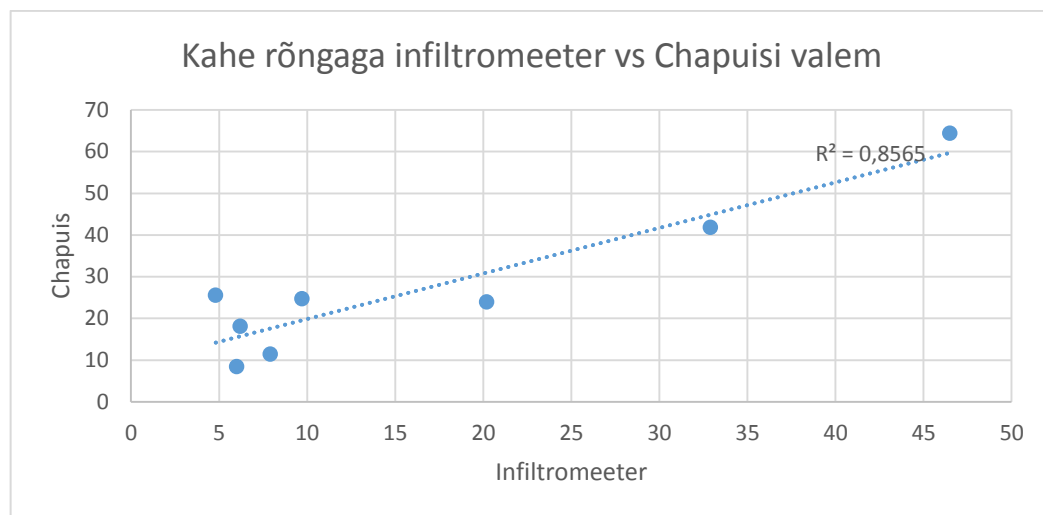
Tabel 2.16

Chapuisi valemiga arvutatud filtratsioonimoodulid

Proov ja fraktsioon	Kuivmahumass (Mg/m ³)	d_{10}	e (kui $\rho_s = 2,68$ Mg/m ³)	Arvutuslik filtratsioonimoodul (m/ööp)
368 – 0/4	1,81	0,22	0,48	26,2
368 – 0/32	1,92	0,28	0,4	25,4
671 – 0/4	1,72	0,17	0,56	23,9
672 – 0/4	1,76	0,27	0,52	41,8
673 – 0/4	1,85	0,15	0,45	12,5
673 – 0/32	2,12	0,47	0,26	23,9
720 – 0/4	1,62	0,26	0,65	64,4
722 – 0/4	1,81	0,15	0,49	14,9
722 – 0/32	1,90	0,16	0,41	11,4
732 – 0/4	1,71	0,16	0,57	22,5
732 – 0/32	1,71	0,17	0,57	24,7
733 – 0/4	1,79	0,19	0,50	22,4
733 – 0/32	1,96	0,25	0,37	18,1
769 – 0/4	1,64	0,15	0,63	25,5
803 – 0/4	1,68	0,08	0,60	8,4



Joonis 2.24. EVS 901-20:2013 ja Chapuisi valemi võrdlus.



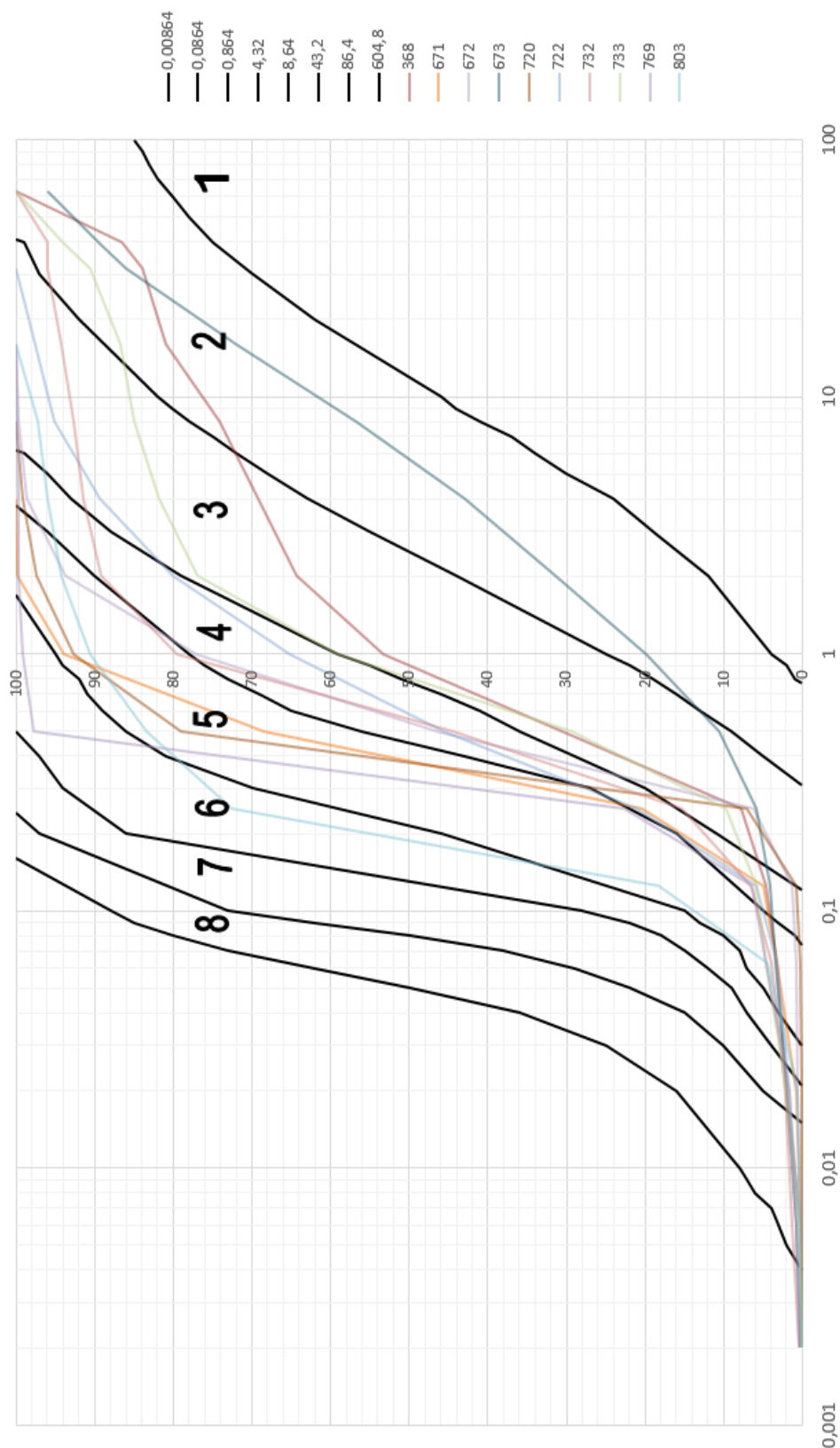
Joonis 2.25. Kahe rõngaga infiltromeetri ja Chapuisi valemi võrdlus.

Korrelatsioon nii EVSi kui kahe rõngaga infiltromeetri ja Chapuisi valemi vahel on hea. EVSi erinevuseks on see, et filtratsioonimooduli numbrilised väärtused erinevad nii arvutatust kui infiltromeetrist märkimisväärselt.

Kahe rõngaga infiltromeetri ja Chapuisi valemi tulemused on üpriski sarnased, kuid arvutuslikult saadakse suuremad tulemused. Chapuisi järgi on valemi 2.1 täpsus „2“ (ehk arvutatud filtratsioonimoodul tuleks jagada varuteguriga „2“). Tsiviilehituses kasutatakse tavaliselt samuti varutegurit „2“. Seega võiks rakendada Chapuisi valemile varutegurit „4“, mis garanteeriks selle, et vajalik filtratsioonimoodul on kindlasti tagatud. Saavutamaks olukorda, kus näiteks joonise 2.25 „trendline“ alusel infiltromeetri 20 m/ööp = arvutatud 20 m/ööp, peaks Chapuisi arvutustulemuse jagama teguriga 1,5. Arvestades siiski infiltromeetri võimalike ebatäpsustega, tuleks tõenäoliselt siiski rakendada suuremat varutegurit, kui 1,5 ja varuteguriks on mõistlik jätta „4“.

Joonisel 2.26 on näidatud see, kuhu katsetatud materjalid jäävad võrreldes Põhja-Ameerikas tuntud sõelkõverapiiridesse. Alade filtratsioonimoodulid (m/ööp) on kujutatud legendis ülevalt alla alates nr. 8 kuni nr. 1. Jooniselt selgub, et mitte ükski materjal ei mahu täielikult etteantud piiridesse,

mistõttu on taoliste kriteeriumite kasutamine keeruline. Joonisel 2.26 etteantud piirid eeldavad seda, et materjali sõelkõver jääks joonte vahele, kui see pole tagatud, on filtratsioonimoodul madalam.



Joonis 2.26. Uuringus käsitletud proovide sõelkõverad Põhja-Ameerika sõelkõveraväljadel. Ala 8 filtratsioonimoodul 0,00864 m/ööp, ala 1 – 864 m/ööp.

2.4.2 Kapillaartõus

Kapillaartõusu koondtulemused on esitatud tabelis 2.17, kus on ka arvutuslikud kapillaartõusud vastavalt valemile 1.37. Valemiga arvutatud on kapillaartõusud fraktsioonidest 0/4 või 0/32, kuna nende osas on saadaval täpsed andmed Proctortihedusest.

Tabel 2.17

Proovide kapillaartõusud

Proovi nr.	KLAB (cm) fr < 5 mm	TUT (cm) fr < 16 mm	SAHI (cm) fr < 16 mm	Arvutatud kapillaartõus (cm)
386	48,9	34	17	28,4
671	25,5	17	19	31,6
672	18,8	24	13	21,7
673	48,9	37	55	44,6
720	31	29	17	17,6
722	54	52	20	45,7
732	43,8	59	17	33,1
733	48	40	19	32,7
769	54	50	32	31,5
803	46	38	46	59,3
Keskmine	41,9	38,0	25,5	34,6

Mõõtmisandmetest nähtub, et kuigi teoreetiliselt peaksid need olema üksteisega võrdsed või vähemalt ligilähedased, siis tegelikkuses tulemused kõiguvad palju. Iga meetodiga saadi erinev materjal, kus oli kapillaartõus kõrgeim. Võrreldes KLABi ja TUTi „torumeetodit“ saadakse korrelatsiooniks $R^2 = 0,58$. Muud võrdlused annavad oluliselt halvema korrelatsiooni, s.t seost ei eksisteeri.

Keskmine kapillaartõusu kõrgus KLABis oli 41,9 cm, TUTis 38 cm. Vähemalt osaline selgitus sellele saadakse tabelist 2.18, kus on võrreldud katsejärgseid tihedusi, millekohaselt on KLABis kuivmahumassid olnud kõrgemad. KLABis tehti tihendamine käsitsi, TUTis aparaadiga. Tulemusi võib mõjutada ka see, et KLABis kasutati 2,4 cm, aga TUTis 7 cm läbimõõduga toru. Kahes erinevas kohas saadud tulemused on suurusjärgude osas siiski võrreldavad ning üpriski sarnased tulemused saadi ka arvutuslikult.

Oluliselt madalamad kapillaartõusu kõrgused saadi SAHI meetodiga, kus keskmiseks kõrguseks tuli vaid 25,5 cm. Põhjuseks on põhimõtteliselt teine mõõtmisviis. „Torumõõtmiste“ puhul hinnatakse kapillaartõusu kõrgus visuaalselt, st piir võetakse selle alusel, kus pinnase värvus muutub tumedast heledaks (ehk üleminek niiskest kuivale pinnasele). SAHI meetodi alusel mõõdetakse aparaadiga see piir, millal küllastunud pinnasesse tuleb vaakumi tagajärjel õhk. Tabelis 2.19 on esitatud mõõtmisjärgsed veesisaldused. Vaadates veesisaldusi SAHI ja TUTi toru alaosast nähtub, et need on väga sarnased, millest järeldub, et SAHI meetodil saadakse kapillaartõusu kõrgus piirkonnale, mis on väga lähedal veeküllastunud olekule. „Torumeetodil“ arvestatakse kapillaartõusu kõrguse sisse ka osaliselt küllastunud tsoon. Erinevus tuleb siiski sisse materjalide 673 ja 803 puhul.

Tabel 2.18

Kapillaartõusuproovide katsejärgsed kuivmahumassid

Proovi nr.	KLAB katsejärgne kuivmahumass Mg/m ³ (tihedus)	TUT katsejärgne kuivmahumass Mg/m ³	SAHI katsejärgne kuivmahumass Mg/m ³
386	1,95 (1,08)	1,82 (<16 mm)	1,85 (<16 mm)
671	1,78 (1,03)	1,65	1,59
672	1,84 (1,05)	1,73	1,62
673	1,84 (0,99)	2,04 (< 16 mm)	2,01 (< 16 mm)
720	1,77 (1,09)	1,69	1,60
722	1,97 (1,09)	1,83 (< 8 mm)	1,79 (< 8 mm)
732	1,89 (1,11)	1,81 (< 8 mm)	1,71 (< 8 mm)
733	1,81 (1,01)	1,72 (< 16 mm)	1,82 (< 16 mm)
769	1,72 (1,05)	1,60	1,54
803	1,66 (0,99)	1,56 (< 8 mm)	1,59 (< 8 mm)

Tabel 2.19

Katsejärgsed niiskussisaldused (%)

Proovi nr.	KLAB ¹	TUT			SAHI
		ülaosa	keskosa	alaosa ²	
386	7,5	2,8	5,5	14,1	11,4
671	7,3	8,0		22,6	21,6
672	11,8	8,5		20,0	19,2
673	14,6	3,1	5,4	10,0	6,5
720	7,3	7,3		20,6	19,9
722	12,3	3,8	8,0	13,1	15
732	8,4	3,0	6,3	13,0	16,7
733	8,1	4,6		11,5	11,3
769	7,8	7,7		22,0	22,9
803	11,9	8,9		22,1	21

Märkused:

¹ veesisaldus mõõdetud kapillaartõusu piirkonnas;² alaosa niiskussisaldus on mõõdetud 1/2 või 1/3 kapillaartõusukõrgusest.**2.4.3 Külmakerkemõõtmised**

Peatükis 1.3.4 toodi välja mõningad kirjandusest leitavad külmakriteeriumid, millekohaselt on käsitletavad materjalid terakoostise alusel külmaohtlikkuse sisukohalt järgnevad:

- ISSMFI 1989 (Soome külmakriteeriumid) – kõik materjalid on külmaohutud;

- Casagrande – kõik materjalid on külmaohutud;
- Šveits 1976 – täiesti külmaohutud on 671, 672, 720, 732, 733, 769. Ülejäänud materjalid on piiripealsed / vahepealsed ning võivad olla vaid kergelt külmakerkelised;
- Brandl – kõik materjalid on külmaohutud;
- Nurmikoulu – täiesti külmaohutud on 671, 672, 720, 803, ülejäänute külmaohtlikkus sõltub objekti oludest.

Külmakerketestid tehti nii Eestis KLABis kui Soomes TUTis. Eestis määrati suhteline külmakerge nii, et vee juurepääsu pinnasele ei olnud ja seega sai tekkida vaid esmane külmakerge, mis toimub siis, kui lisavee juurdepääs on takistatud (näiteks on muldkeha ja pinnasvee vahel kapillaartõusu katkestav kiht või membraan) ja kerge toimub vaid pinnasepoorides oleva vee arvelt (katseaegne veesisaldus oli ca 8%). KLABis tehtud mõõtmiste osas peab arvestama ka seda, et külmakerkelisust hinnati kuni fr. 2 mm. Soomes tehtud mõõtmised võimaldasid vee vaba juurdepääsu andes maksimaalse külmakerke. Külmakerketulemused on esitatud tabelis 2.20.

Tabel 2.20

Mõõdetud külmakerked (rohelised on külmaohutud, kollased keskmiselt ja punased eriti külmaohtlikud materjalid)

Proovi nr.	KLAB (suhteline)	SP
386	0,04	2,6
671	0,035	3,2
672	0,030	0,3
673	0,050	10,7
720	0,025	0,1
722	0,050	5,3
732	0,035	3,1
733	0,040	7,6
769	0,040	0,8
803	0,050	2,1

KLABi mõõteandmeid saaks otseselt kasutada pinnaseteguri B leidmisel, aga kuna tegemist on vaid esmase külmakerke alusel leitud suhtelise külmakerkega, ei ole tulemus piisavalt täpne ning seega sellega edasi ei minda.

Soomes toimub teekatendite külmakerke arvutamine valemi 1.31 abil, kuid seal vajatakse tegurit „t“, mida otseselt külmakerkekatsetest ei saada, kuid see on võimalik tuletada kasutades valemit 1.33. Kõik andmed selleks on olemas tabelis 2.21, kus on väljaarvutatud ka suhteline külmakerge ($\Delta h/\Delta Z$) ja pinnase külmumispaismine „t“. Andmed tabelisse saadi külmakerketesti tulemustest, mis on esitatud lisas. Tabelisse on lisatud ka suhtelise külmakerke alusel arvutatud pinnaseteguri B.

Tabel 2.21

Suhtelise külmakerke ja külmumispaisumise „t“ leidmine

Proovi nr.	P _d	w	SP	$\Delta h/\Delta Z$	t	B
386	2,069	12,5	2,6	0,075	7,53	3,0
671	1,897	15,2	3,2	0,090	9,00	3,6
672	1,895	12,1	0,3	0,027	2,66	1,1
673	2,286	10,6	10,7	0,236	23,58	9,5
720	1,768	14,6	0,1	0,025	2,52	1,0
722	1,996	12,5	5,3	0,128	12,85	5,2
732	1,957	13	3,1	0,085	8,49	3,4
733	2,081	14,4	7,6	0,179	17,90	7,2
769	1,785	15,7	0,8	0,041	4,12	1,7
803	1,975	13,8	2,1	0,067	6,65	2,7

Järgnevalt esitatakse külmakerkearvutus kolme meetodiga – Soome teekatendite projekteerimisjuhendi, Eesti katendiarvutusjuhendi ja Soomes kasutatava arvutusprogrammiga SSR-malli.

Soome teekatendite projekteerimisjuhendi alusel koostatava näidisarvutuse (tulemuseks arvutuslik külmakerge „RN“ ehk *routanousu*) jaoks valitakse järgmiste kihipaksustega teekatend:

- asfaltbetoon – 12 cm;
- killustikalus – 25 cm;
- drenikiht – 35 cm.

Külmumissügavusena arvestati 125 cm, soojustehnilisteks ekvivalentideks võetakse liival 0,9, killustikul 1,0 ja asfaltbetoonil 1,0 (lähudes Soome andmetest). Arvestades kõige halvema stsenaariumiga (külmumistsooni on vesi vabalt ligipääsetav), on tabelis 2.22 arvutatud arvutuslik külmakerge, kui uuritav materjal on paigaldatud muldkehasse. Tegelikuses saab külmakerge olema tõenäoliselt väiksem, kuna antud arvutusega pole arvestatud kõikide teguritega, mis külmakerget mõjutavad.

Tabelis 2.22 on esitatud ka Eestis kehtiva juhendi kohaselt arvutatud arvutuslik külmakerge kasutades tabelist 2.18 pinnasetegurit B, külmumissügavust $z = 125$ cm, pinnasevee sügavus katte pinnast $H = 130$ cm ja soojustehniliste ekvivalentidena:

- 5 cm ACsurf – 1,15;
- 7 cm ACbase – 1,22;
- 25 cm killustik – 1,15;
- 35 cm drenikiht – 0,87.

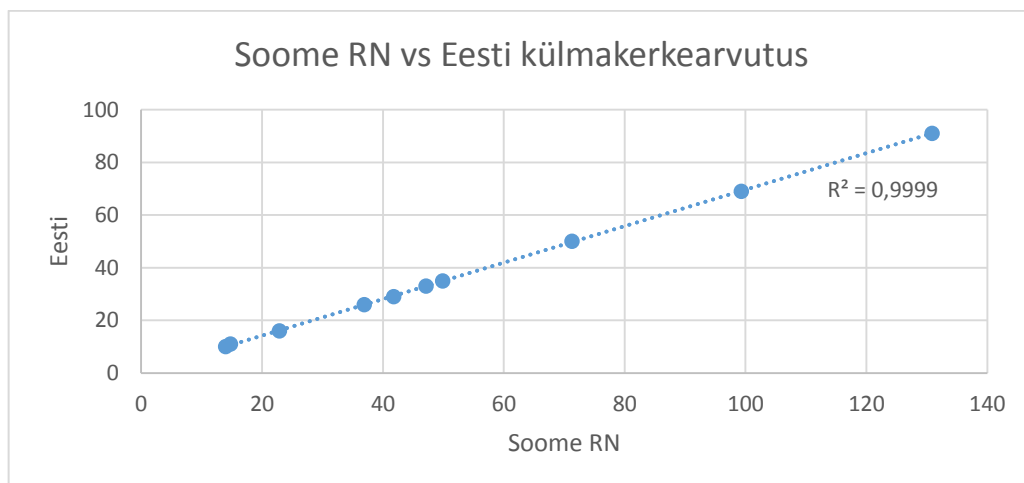
Kolmandaks on tabelis 2.22 esitatud külmakerge kasutades arvutiprogrammi SSR-malli, mille abil arvutatakse Soomes külmakerget otseselt läbi SP. Selle arvutustulemusi peetakse kõige täpsemateks ning need on ka valideeritud objektimõõtmistega. Täpsete arvutustulemuste jaoks on vaja teada pinnase külmakerkelisust (SP) ja piirkonna külmamäära (Kh), viimane võeti lähudes külmumissügavusest $S = 125$ cm, mis teeb $F = 10'850$ Kh (arvutused tehti $F = 10'000$ Kh).

Tabel 2.22

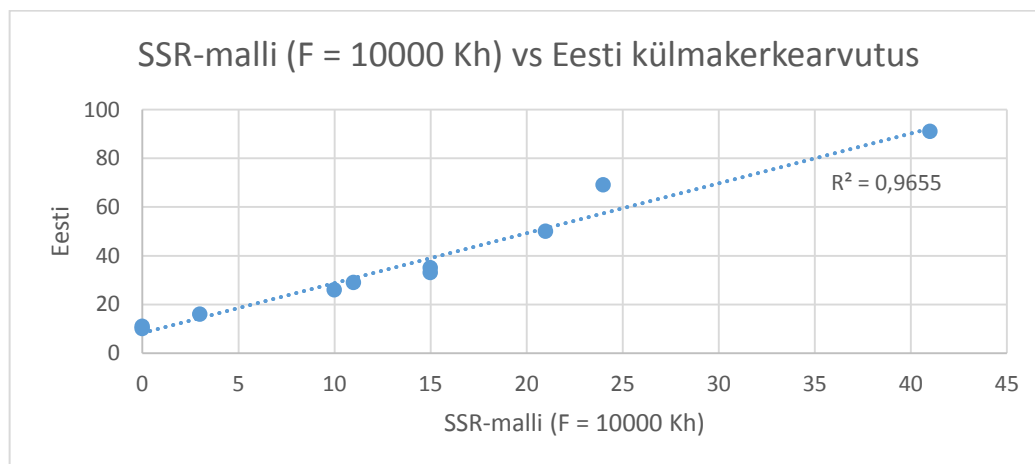
Arvutatud külmakeerge

Proovi nr.	Soome RN (mm)	Eesti (mm)	SSR (mm)
386	42	29	11
671	50	35	15
672	15	11	1
673	131	91	41
720	14	10	1
722	71	50	21
732	47	33	15
733	99	69	24
769	23	16	3
803	37	26	10

Eriti ilmekalt tulevad külmakerkearvutustes esile materjalid 673, 722 ja 733, mis olid liigitatud, tuginedes külmakerkemõõtmistele, ka kui erakordselt külmaohtlikud. Eesti ja Soome arvutatud külmakerked korreleeruvad omavahel eriti hästi, nagu ka SSR-iga arvutatu (joonised 2.27 ja 2.28).



Joonis 2.27. Soomes ja Eestis tehtavate teekatendite külmakerkearvutuste võrdlus.



Joonis 2.28. SSR-malli ja Eesti külmakerkearvutuse võrdlus, kui külmumissügavus on 125 cm.

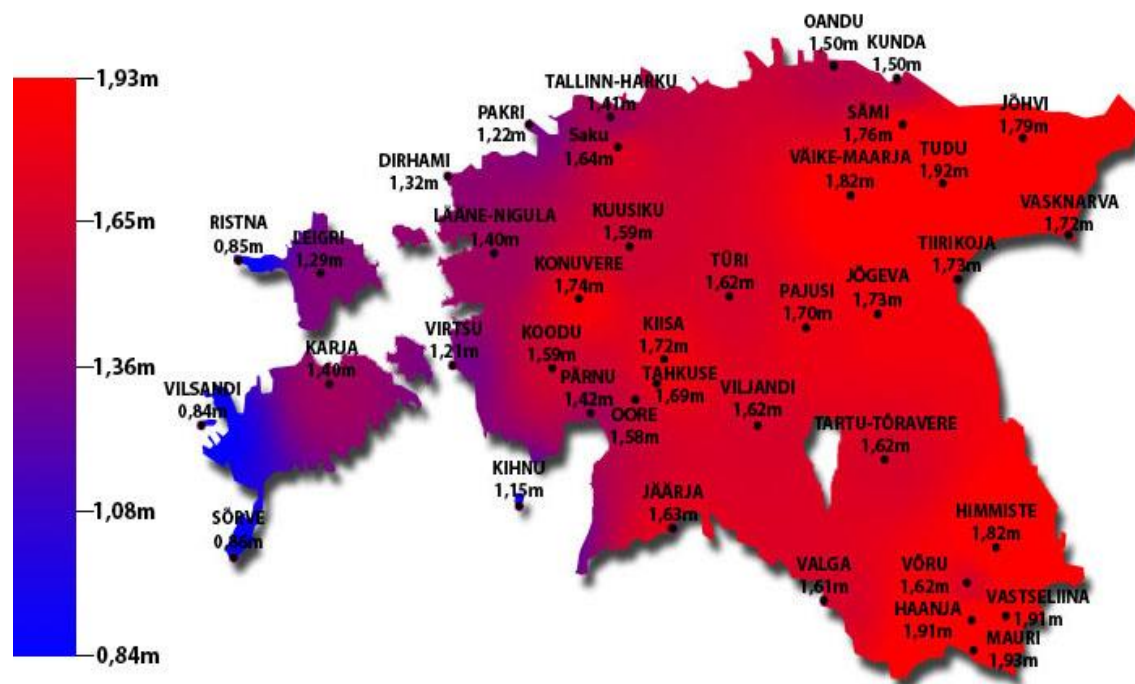
Võttes aluseks Eestis lubatava külmakerke piiri püsikatendile, mis on 4 cm, ja Eesti külmakerkearvutuse, ei tohiks kasutada muldkehas materjale 673, 722 ja 733. Kõik kolm materjali on kruusad või kruusliivad. Samad materjalid tulevad välja ka SSR-mallis, mis annab eelduslikult sama külmakerke ka looduses, kui esineb arvutuses kasutatud külmamäär.

Tabelis 2.23 esitatud arvutustulemused vastasid külmamääradele $F = 10'000$ Kh, mis joonise 1.43 kohaselt tähendab külmumissügavust ca 125 cm. Mart Olman koostas magistritööna [34] Eesti teede külmumissügavuse kaardi saades tulemuseks joonisel 2.29 kujutatut, millekohaselt võib külmumissügavus Eesti teedel ulatuda ca 1,9 meetrini, väga levinud on külmumissügavus ca 1,7 m. Nendele vastavad külmamäärad on vastavalt ca 25'000 ja ca 20'000 Kh, mille kasutamisel arvutustes SSR-malli'ga saadakse tulemusteks tabelis 2.23 kujutatud tulemused.

Tabel 2.23

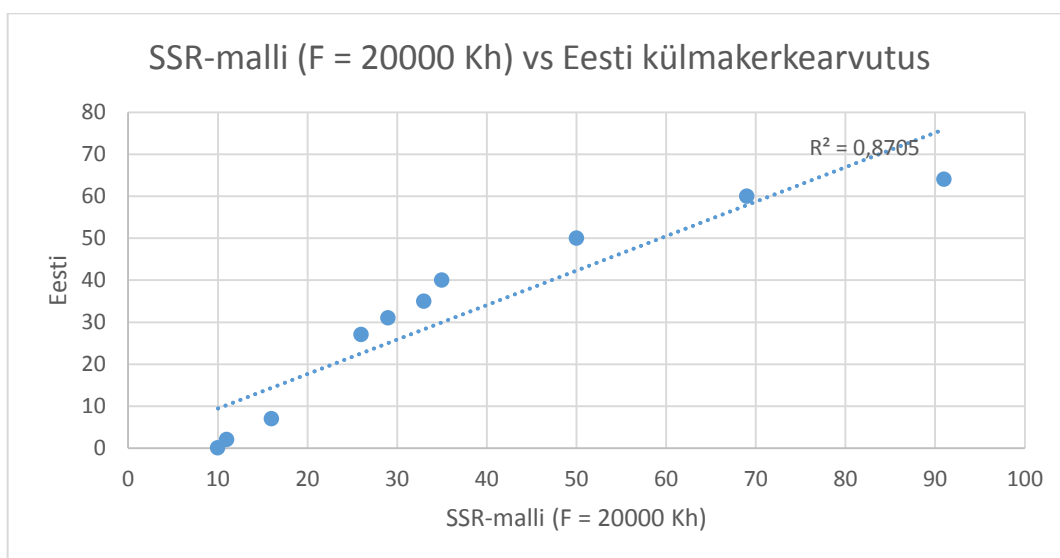
SSR-malliga arvutatud külmakerked külmamäärade $F = 10'000$, $20'000$ ja $25'000$ Kh puhul sentimeetrites

Proovi nr.	F = 10000	F = 20000	F = 25000
386	11	31	36
671	15	40	47
672	1	2	2
673	41	64	79
720	1	0	0
722	21	50	62
732	15	35	44
733	24	60	74
769	3	7	9
803	10	27	35

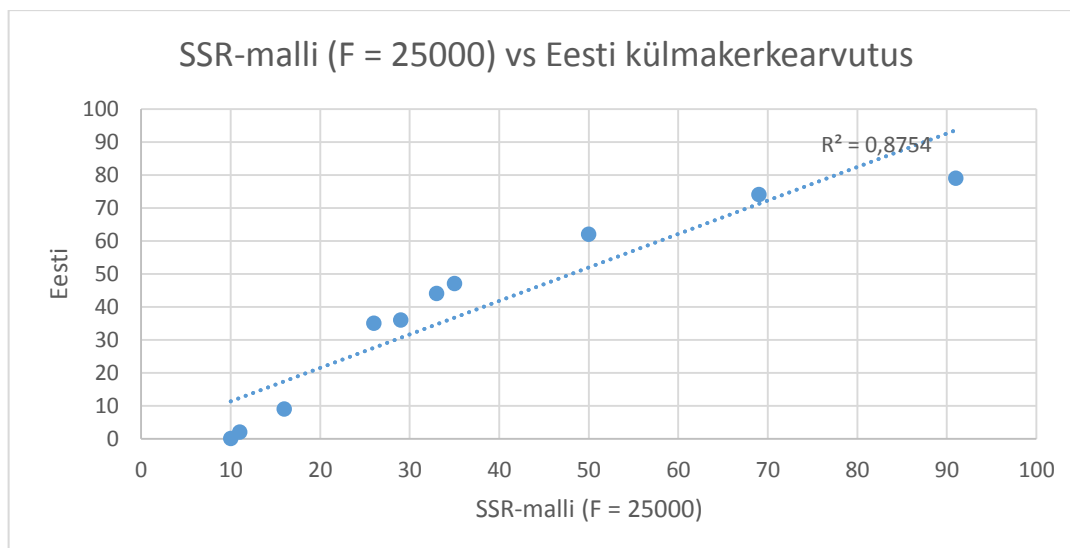


Joonis 2.29. Eesti teede külmumissügavused. [34]

Joonistelt 2.31 nähtub, et SSR-malliga arvatatud tulemus kasutades külmamäära $F = 25'000 \text{ Kh}$ on väga sarnane Eesti külmakerkearvutusega, kuigi korrelatsioon võrreldes $F = 10'000 \text{ Kh}$ on vähenenud ($R^2 = 0,875$). Tulemustest võiks järeldada seda, et Eestis täna tehtav külmakerkearvutus tegelikult annabki sama tulemuse, kui täpsem arvutusmetoodika külmamäära $F = 25'000 \text{ Kh}$ (ehk külmulissügavuse ca 1,9 m puhul) ning see vastab tegelikule külmakerkele teedel külmematel talvedel.



Joonis 2.30. SSR-malli ja Eesti külmakerkearvutuse võrdlus, kui esimesega on arvestatud, et külmamäär on 20'000 Kh (külmumissügavus ca 170 cm).



Joonis 2.31. SSR-malli ja Eesti külmakerkearvutuse võrdlus, kui esimesega on arvestatud, et külmamäär on 25'000 Kh (külumumissügavus ca 190 cm).

2.4.4 Filtratsioonimooduli seos pinnase kapillaartõusu ja külmaohtlikkuse vahel

Tabelis 2.24 on esitatud katseandmed filtratsioonimoodulist (EVS 901-20), külmakerkest, kapillaartõusust, lisaks arvutatud filtratsioonimoodul Chapuisi valemiga, kus on juba arvestatud varuteguriga 4, ning andmed 0,02 mm ja 0,063 mm osistest, Cu, d₁₀ ja e, kuna neid on tavaliselt seostatud pinnase omadustega seoses veega (veeläbilaskvus, külmakerkelisus ja kapillaartõus). Tabelis on näidatud ka fraktsioonid, mille osas välja toodud numbrid kehtivad. Kuna filtratsioon EVSi alusel tehakse fraktsioonist 0/4, siis on esitatud ka sellekohased andmed tabelis 2.25.

Tabel 2.24

Andmed filtratsioonist (*Chapuisi valemiga arvutatud väärtuses on arvestatud varuteguriga 4), külmakerkelisusest, kapillaartõusust ning pinnase koostisest fraktsioonile kuni 32 mm

Nr	Kapillaartõus						0,02	0,063	Cu	d ₁₀	e
	EVS 0/4	Chapuis* 0/32	SP 0/32	KLAB 0/5	TUT 0/16	SAHI 0/16					
368	1,1	6,35	2,6	48,9	34	17	2,0	3,3	5,4	0,28	0,40
671	1	5,975	3,2	25,5	17	19	0,7	3,2	2,6	0,17	0,56
672	7,5	10,45	0,3	18,8	24	13	0,5	0,7	2,5	0,27	0,52
673	0,5	5,975	10,7	48,9	37	55	2,0	3,4	19,6	0,47	0,26
720	11,7	16,1	0,1	31	29	17	0,2	0,3	1,6	0,26	0,65
722	0,1	2,85	5,3	54	52	20	1,6	3,2	5,3	0,16	0,41
732	4,5	6,175	3,1	43,8	59	17	2,2	3,9	4,0	0,17	0,57
733	0,3	4,525	7,6	48	40	19	2,1	4,7	4,2	0,25	0,37
769	1	6,375	0,8	54	50	32	1,6	4,6	2,3	0,15	0,63
803	0,6	2,1	2,1	46	38	46	0,6	4,5	2,5	0,09	0,60

Tabel 2.25

Andmed filtratsioonist (*Chapuisi valemiga arvutatud väärtuses on arvestatud varuteguriga 4),
külmakerkelisusest, kapillaartõusust ning pinnase koostisest fraktsioonile kuni 4 mm

Nr	EVS	Chapuis*	SP	Kapillaartõus			0,02	0,063	Cu	d ₁₀	e
	0/4	0/4	0/32	KLAB	TUT	SAHI	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
368	1,1	6,55	2,6	48,9	34	17	2,9	4,8	3,2	0,22	0,48
671	1	5,975	3,2	25,5	17	19	0,7	3,2	2,6	0,17	0,56
672	7,5	10,45	0,3	18,8	24	13	0,5	0,7	2,5	0,27	0,52
673	0,5	3,125	10,7	48,9	37	55	4,6	7,6	10,7	0,15	0,45
720	11,7	16,1	0,1	31	29	17	0,2	0,3	1,6	0,26	0,65
722	0,1	3,725	5,3	54	52	20	1,8	3,6	4,5	0,15	0,49
732	4,5	5,625	3,1	43,8	59	17	2,4	4,3	3,8	0,16	0,57
733	0,3	5,6	7,6	48	40	19	2,5	5,7	4,2	0,19	0,50
769	1	6,375	0,8	54	50	32	1,6	4,6	2,3	0,15	0,63
803	0,6	2,1	2,1	46	38	46	0,6	4,7	2,6	0,08	0,60

Tabelis esitatud andmete põhjal on võimalik leida seoseid erinevate andmete vahel.

Seosed EVS 901-20 ja tabeli väärtuste vahe on järgmised:

- EVS 901-20 ja Chapuis (0/32) – $R^2 = 0,858$ ehk seos on tugev;
- EVS 901-20 ja SP – $R^2 = 0,32$ ehk seos praktiliselt puudub;
- EVS 901-20 ja kapillaartõus KLAB – $R^2 = 0,41$ ehk seos on väga nõrk;
- EVS 901-20 ja kapillaartõus TUT – $R^2 = 0,08$ ehk seos puudub;
- EVS 901-20 ja kapillaartõus SAHI – $R^2 = 0,19$ ehk seos praktiliselt puudub;
- EVS 901-20 ja pinnasefraktsioon 0,02 mm – $R^2 = 0,36$ ehk seos praktiliselt puudub;
- EVS 901-20 ja pinnasefraktsioon 0,063 mm – $R^2 = 0,73$ ehk seos on rahuldav;
- EVS 901-20 ja Cu – $R^2 = 0,11$ ehk seos puudub;
- EVS 901-20 ja d₁₀ (fr 0/4) – $R^2 = 0,52$ ehk seos on nõrk;
- EVS 901-20 ja poorsustegur e – $R^2 = 0,26$ ehk seos praktiliselt puudub.

Chapuisi valemi järgi arvutatud filtratsioonimooduli seosed tabeli väärtuste vahel on sarnased, kui EVSi puhul.

Seosed külmakerkelisuse SP ja tabeli väärtuste vahel on järgmised:

- SP ja kapillaartõus KLAB – $R^2 = 0,2$ ehk seos praktiliselt puudub;
- SP ja kapillaartõus TUT – $R^2 = 0,03$ ehk seos puudub;
- SP ja kapillaartõus SAHI – $R^2 = 0,24$ ehk seos praktiliselt puudub;
- SP ja pinnasefraktsioon 0,02 mm – $R^2 = 0,39$ ehk seos on väga nõrk;
- SP ja pinnasefraktsioon 0,063 mm – $R^2 = 0,17$ ehk seos puudub;
- SP ja Cu – $R^2 = 0,68$ ehk seos on rahuldav;
- SP ja d₁₀ – $R^2 = 0,33$ ehk seos praktiliselt puudub;
- SP ja poorsustegur e – $R^2 = 0,75$ ehk seos on rahuldav.

Kapillaartõusu KLAB osas leiti kõige parem seos fraktsiooniga 0,063 mm, kus $R^2 = 0,53$. Kapillaartõusu TUT osas leiti kõige parem seos fraktsiooniga 0,02 mm, kus $R^2 = 0,40$. Kapillaartõus SAHI korreleerus kõige paremini C_u -ga, kus $R^2 = 0,43$.

Korrelatsioonide tulemused ei olnud kõik sellised, mida oleks võinud kirjanduse andmetele tuginedes oodata. Näiteks on leitud, et pinnase külmakerkelisus on suhteliselt tugevas seoses fraktsiooniga 0,02 mm, kuid käesolevasse uuringusse kaasatud materjalide katseandmed seda ei toetanud. Põhjus võib olla ka selles, et katsetatud materjalid olid 0,02 mm osas suhteliselt sarnased, mistõttu ei saanud joonistuda kindlat mustrit. Suur erinevus materjalide vahel oli terakoostise ühtluses ehk C_u ning just sellega leitigi kõige suurem korrelatsioon SP vahel.

Vaadates uuringusse kaasatud materjalide katseandmeid konkreetsemalt, selguvad siiski mõningad mustrid. Kõige külmaohtlikumad materjalid on ühtlasi ka EVSi järgi kõige madalama filtratsioonimooduliga (materjalid 673, 722 ja 733). Samuti kerkisid need esile kui kõige kõrgema kapillaartõusuga materjalid. Nimetatutel on ka C_u kõige kõrgem. Kõige suurema filtratsioonimooduliga materjalidel olid kõige madalamad külmakerkelisused (materjalid 762 ja 720).

Tabeli 2.24 analüüsist nähtub ka see, et Chapuisi valemi kasutamine ei pruugi olla piisav eemaldamiseks (dreenikihi) ehitamiseks sobimatuid materjale. Tabelist 1.3 nähtus, et Vene juhendite kohaselt peab drenkihis kasutatav materjal olema minimaalse filtratsioonimooduliga 3,0 m/ööp (paksu peenliivakihi korral võib olla ka 2,0 m/ööp). Chapuisi valemiga arvutades vastavad sellele kriteeriumile kõik materjalid v.a 722 ja 803. Järelikult võiks Chapuisi valemiga arvutades kasutada drenkihtide ehitamisel piiranguteta materjale 673 ja 733, mis olid kõige külmaohtlikumad põhjustades väga ebasoodsates oludes (vee vaba juurdepääs jääläätse tekkesse) märkimisväärsed külmakerked.

Tehes külmakerkearvutuse Eesti juhendite kohaselt esitatud tingimuste kohaselt nii, et materjalid 673 või 733 on muldkehas ning drenkihti ei kasutata (nendest materjalidest moodustub fiktiivne drenkiht), saadakse arvutuslikuks külmakerkeks vastavalt 16 cm ja 12,2 cm, mis ületab lubatud 4 cm piiri kordades. Siinkohal tuleb rõhutada, et taolised numbrid kehtivad kõige halvema stsenaariumi kohaselt ja tegelikkuses ei pruugi külmakerked olla nii tõsised. Dreenikihi ülesanne on juhtida vesi killustikukihist kiiresti välja, et ei killustikukiht ega teekatend tervikuna ei saaks liikluskooormusest kahjustatud. Kui materjal on külmaohtlik, jääb sinna sisse suhteliselt palju niiskust, mis tähendab, et isegi kui jääläätse tekkida ei saa, võivad tekkida külmakahjustused esmasest külmakerkest. Seega näiteks materjale 673 ja 733 drenkihis kindlasti kasutada ei tohi isegi, kui Chapuisi valemiga saadakse enam kui piisav arvutuslik filtratsioonimoodul.

2.4.5 Pinnase tugevusomadused

Tabelist 2.24 selgus, et kõige paremini filtreeruvad materjalid, mis olid ka kõige külmaohtumad, olid 672 ja 720. Väga madala külmakerkelisusega olid ka materjalid 769 ja 803. Nende nelja materjali ühisnäitaja on väga madal C_u ehk liivad on ühtlaseteralised. Teooriast, aga ka praktikast on väga hästi teada, et C_u on üks peamistest mõjutajatest pinnaste tugevusomadustele. Lisaks analüüsiti näiteks allikas [27] ka seda, et madala C_u -ga liivpinnastest on teekatendikihtide ehitamine (tihendamine) raskendatud. Seetõttu oli käesoleva töö üheks etapiks pinnaste tugevusomaduste määramine, mida tehti (nagu eelnevalt ka selgitatud) nii objekti- kui laborimõõtmistega. Järgnevalt koondatakse kokku kõik mõõdetud tugevusomadused ja analüüsitakse neid. Objektilt saadud mõõtetulemused kandevõime osas on esitatud tabelis 2.26.

Tabel 2.26

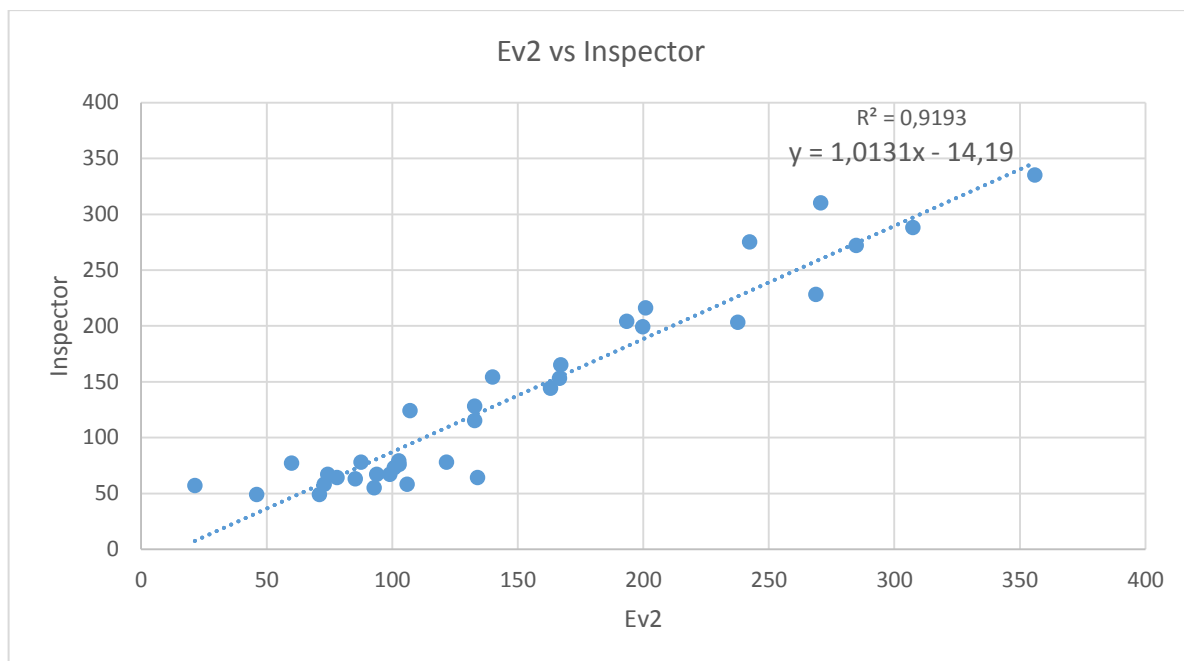
Objektilt mõõdetud kandevõimed

Proovi nr.	Ev2	Inspector	HMP	PRIMA 100	Tf	Kihipaksus	Cu	SP	k
386	362,4	194	-	-	1,32	15 cm	5,4	2,60	1,1
671	-	53	44,63	16,07	1,28	100 cm	2,6	3,20	1
672	92,8	67	-	-	1,97	70 cm	2,5	0,30	7,5
673	214,2	107	44,31	27,90	1,38	40 cm	19,6	10,70	0,5
720	46	49	-	-	1,69	70 cm	1,6	0,10	11,7
722	121,7	78	60,00	33,80	1,83	20 cm	5,3	5,30	0,1
732	102,6	79	-	-	1,02	150 cm	4,0	3,10	4,5
733	132,9	115	-	-	1,45	70 cm	4,2	7,60	0,3
769	-	135	-	-	1,48	15 cm	2,3	0,80	1
803	242	185	-	50,56	0,98	30 cm	2,5	2,10	0,6

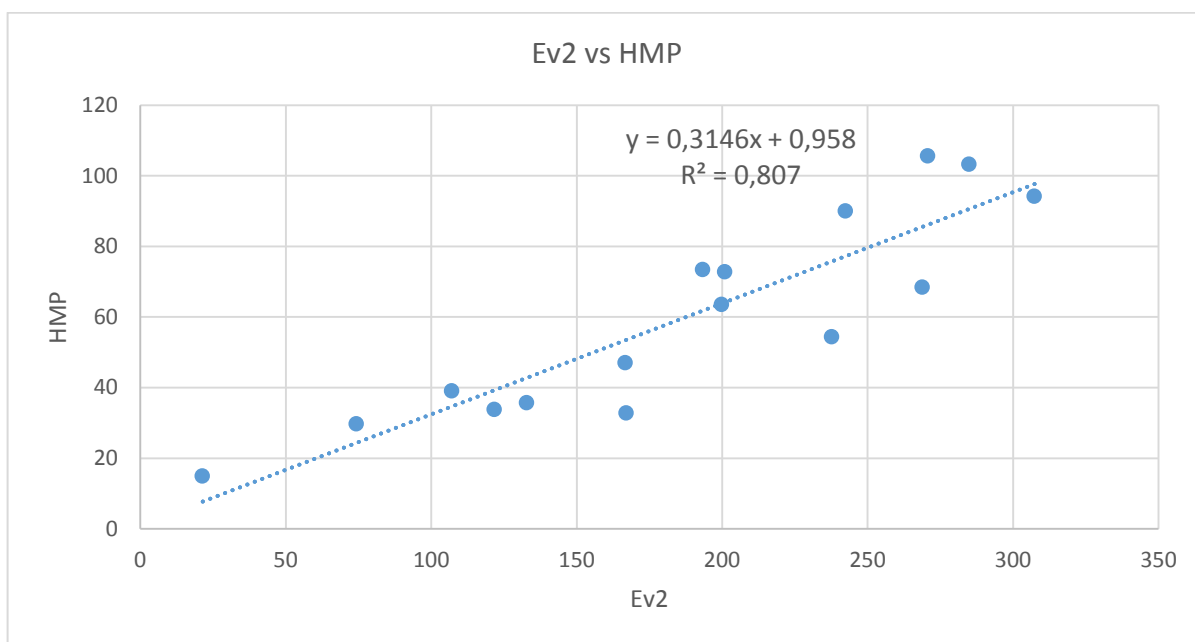
Tulemustest nähtub, et kõige madalama C_u -ga materjalil 720 on ühtlasi ka kõige madalam mõõdetud kandevõime, kuid väga otsest seost C_u ja kandevõime vahel ei ole. Näiteks on materjalid 673 ja 769 Inspectoriga mõõdetud kandevõime poolest sarnased, aga nende C_u erineb suuresti. Kõik see kinnitab peatükis 1.5 toodud teooriat, millekohaselt on C_u vaid üheks komponendiks pinnase tugevusomaduste kujunemisel. Kõige suurem mõjutaja on tihedus, mida kinnitab ka materjal 803, mis on peenliiv, aga mille tihedus oli, võib öelda, et maksimaalne võimalikust (kuna asetses vana teekatendi all) ja mille kandevõime oli väiksem vaid materjalist 386, mis oli kruusliiv ja mis oli samuti mõõdetud olukorras, kui killustikukiht selle pealt oli eemaldatud.

Kuna objektidel mõõdeti kandevõimeid nelja erineva seadmega, on huvitav ka nende omavaheline võrdlemine. Kuna käesolevas uuringus ei mõõdetud kandevõimeid kõikide seadmetega kõikidelt objektidelt, ei ole andmehulk nende võrdlemiseks vaid tabeli 2.26 andmetele tuginedes piisav. Seega kaasati andmehulga suurendamiseks mõõtetulemused teistelt objektidelt, millega käesoleva töö autor on seotud olnud. Tulemused on järgmised:

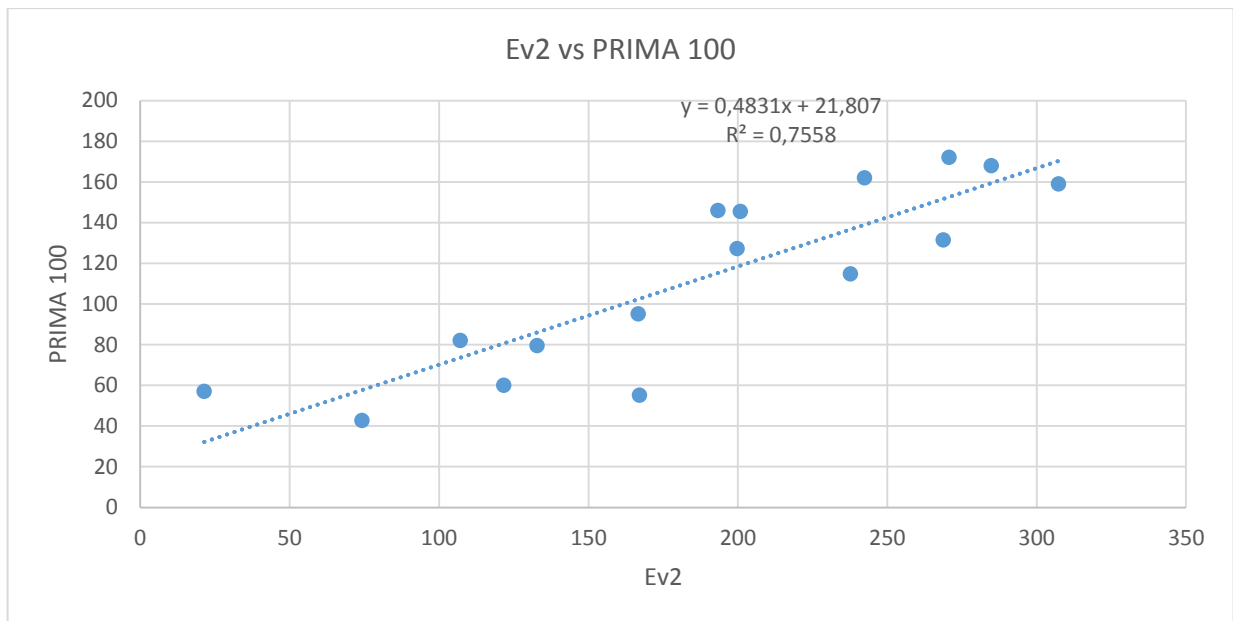
- staatilise koormuse E_{v2} vs Inspector III võrdlevad mõõtmised 35-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,92$ (joonis 2.32);
- staatilise koormuse E_{v2} vs Saksa HMP võrdlevad mõõtmised 16-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,807$ (joonis 2.33);
- staatilise koormuse E_{v2} vs Taani PRIMA 100 võrdlevad mõõtmised 16-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,76$ (joonis 2.34).



Joonis 2.32. Staatilise plaadi ja Inspectori omavaheline võrdlus.



Joonis 2.33. Staatilise plaadi ja Saksa HMP omavaheline võrdlus.



Joonis 2.34. Staatilise plaadi ja Taani PRIMA 100 omavaheline võrdlus.

Tulemustest nähtub, et Inspector III ja staatilise plaadi E_{v2} (mõõdetuna 300 mm läbimõõduga plaadiga) korreleeruvad omavahel peaaegu 1:1, korrelatsioon on $R^2 = 0,92$. HMP ja PRIMAGA on korrelatsioon väiksem, samuti on tulemusena saadud kandevoimetulemused erinevad.

Kaasaskantavate seadmete omavahelise võrdluse tulemusel saadi järgnevad andmed:

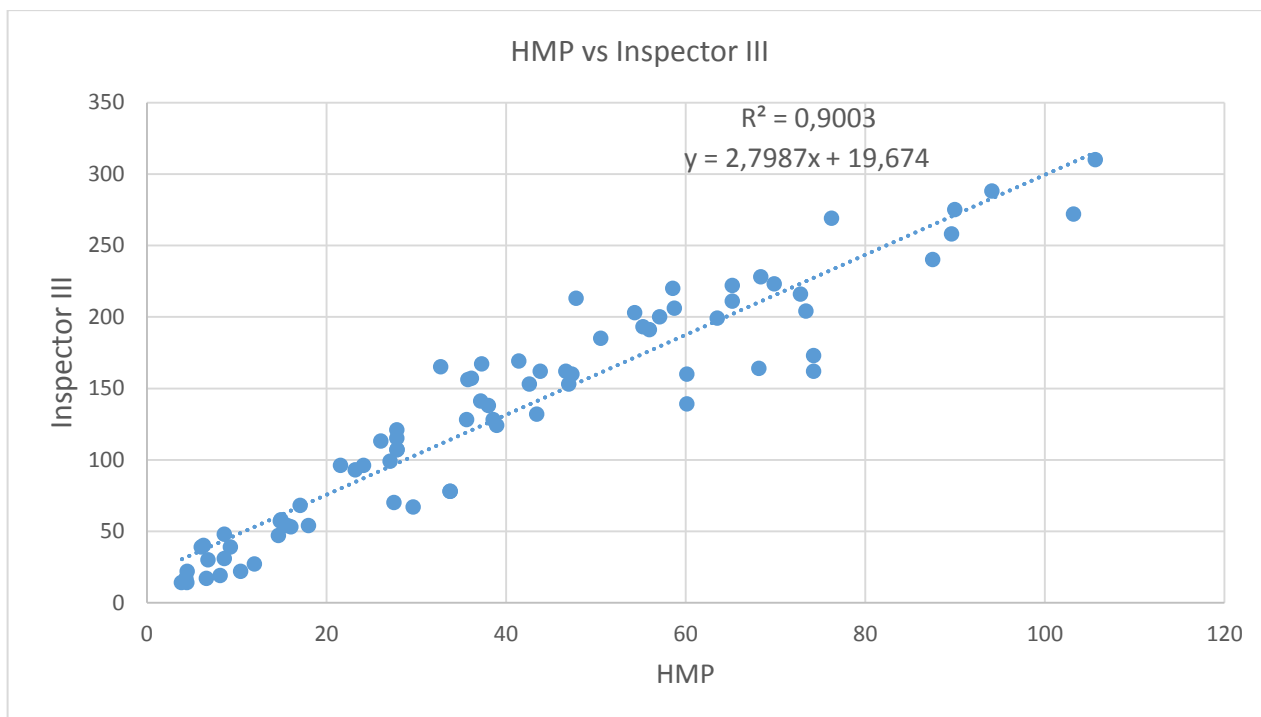
- Inspector III vs Saksa HMP võrdlevad mõõtmised 77-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,9003$ (joonis 2.35);
- Inspector III vs Taani PRIMA 100 võrdlevad mõõtmised 42-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,65$ (joonis 2.36);
- Saksa HMP vs Taani PRIMA 100 võrdlevad mõõtmised 42-st erinevast punktist nii pinnaselt, liivalt kui killustikult – $R^2 = 0,68$ (joonis 2.37).

Inspectori tööpõhimõtte võrreldes HMPga on väga sarnane – mõlemate puhul eeldatakse, et langeva koormuse poolt tekitatud koormus pinnasele on alati konstant. Nendest erineb PRIMA 100, mis mõõdab koormust läbi anduri iga mõõtmispunkti puhul eraldi ning kasutab seega elastsusmooduli arvutamisel igakordselt mõõdetud koormuse andmeid, mis annab oluliselt täpsema tulemuse (elastsusmoodul sõltub teatavasti koormuse suurusest), kuna pinnasele langevast koormusest avalduv koormus sõltub pinnase kandevoimest ja seega ei ole korrektne eeldada, et koormus on alati konstant. Seega on loogiline, et PRIMA 100 mõõteandmed ei korreleeru Inspectori ega HMP omadega kuigi hästi.

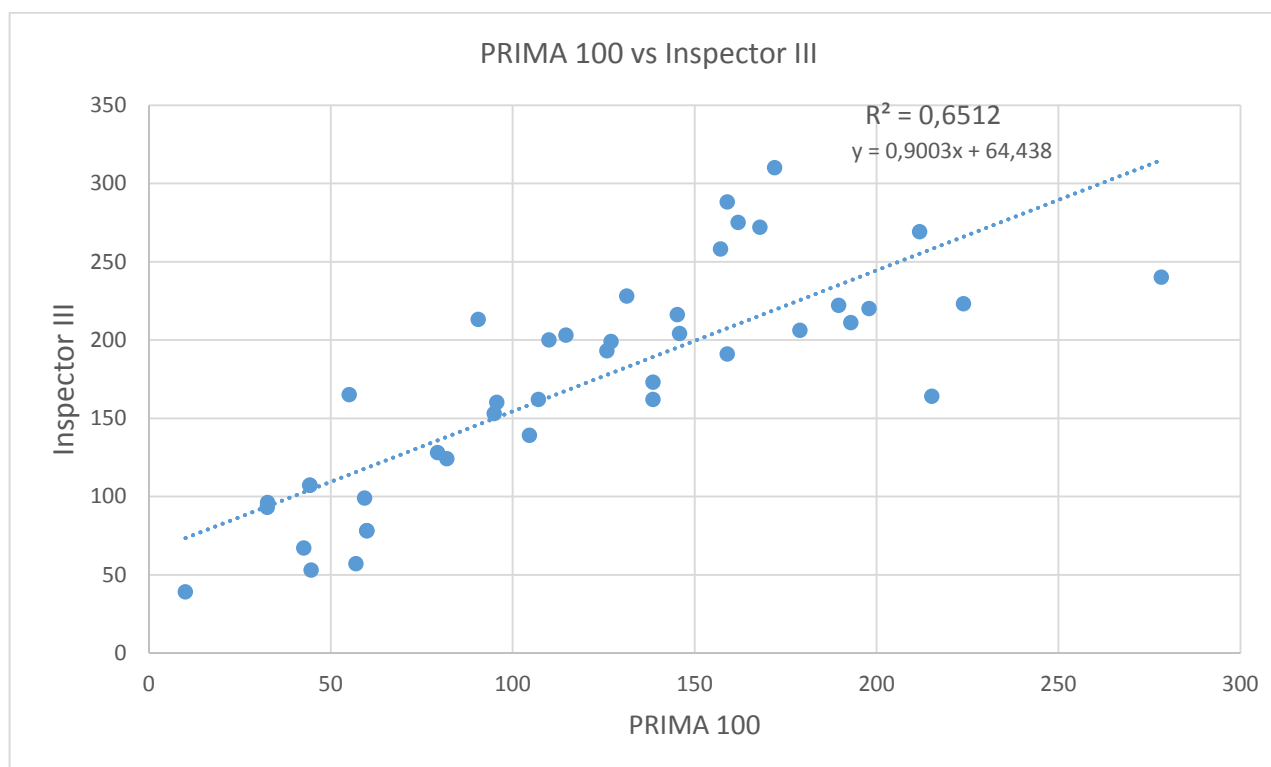
Kasutades mõõteandmeid Inspectori ja HMP vahel, saab neid omavahel teisendada kasutades valemeid 2.2 ja 2.3, mis kehtivad 80...90%-lise tõenäosusega olenevalt erinevatest tingimustest.

$$\text{INSPECTOR} = 2,8 \cdot \text{HMP} + 19,67 \quad (2.2)$$

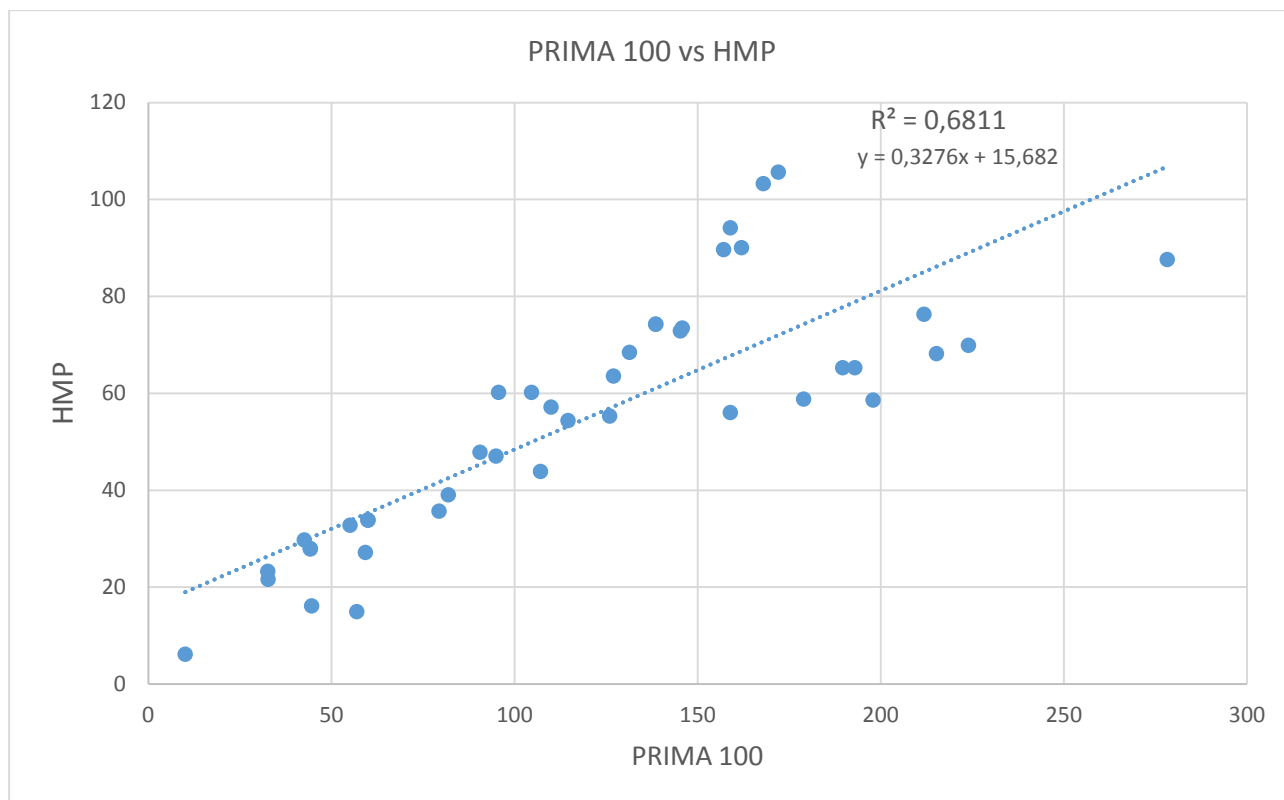
$$\text{HMP} = 0,32 \cdot \text{INSPECTOR} - 2,30 \quad (2.3)$$



Joonis 2.35. HMP ja Inspectori omavaheline võrdlus.



Joonis 2.36. PRIMA 100 ja Inspectori omavaheline võrdlus.



Joonis 2.37. PRIMA 100 ja HMP omavaheline võrdlus.

Lisaks objektile mõõdetud kandevõimetele, määrati pinnaseproovide tugevusomadused ka laboratoorselt kolmetelgse katsega. Tulemused on esitatud tabelis 2.27.

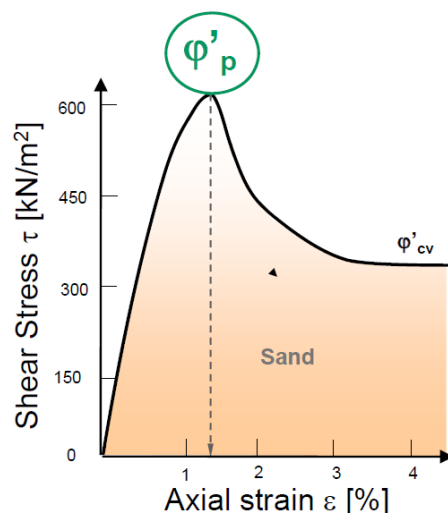
Tabel 2.27

Tugevusomadused kolmetelgsest katsest

Proovi nr.	TUT				C _u	KLAB ²		C _u	k
	Maksimaalne ¹		Jääk ¹			φ°	c (kPa)		
	φ°	c (kPa)	φ°	c (kPa)					
386	46,6	20,2	-	-	5,4	33,7	15,28	3,2	1,1
671	41,5	9,3	34,4	7,1	2,6	28,5	36,97	3,1	1
672	37,9	10,4	33,4	5,1	2,5	35,1	0,45	2,4	7,5
673	53,5	73,4	-	-	19,6	40	16,13	9,1	0,5
720	40,7	7,9	34,5	5,1	1,6	32,8	9,46	1,8	11,7
722	44,8	13,3	36,9	8,2	5,3	32,5	15,29	4,1	0,1
732	44,6	8,0	35,0	10,8	4,0	33,7	25,71	3,3	4,5
733	48,5	26,4	-	-	4,2	36,4	15,94	5,9	0,3
769	40,4	12,6	38,4	1,6	2,3	34,7	3	2,3	1
803	40,2	19,4	36,5	9,8	2,5	32,4	0,41	2,3	0,6

¹ maksimaalse ja jääktugevuse tähendus on näidatud joonisel 2.38.

² tegemist on jääktugevusega määratuna < 2 mm fraktsioonist.



Joonis 2.38 Liivad saavutavad nihketestis maksimumväärtuse, mis hakkab deformatsioonide suurenemisel vähenema, minnes üle jääkväärtusele kuni proovikeha purunemiseni. Soomes mõõdeti mõlemad väärtused, Eestis mõõdeti parameetrid purunemisel ehk anti jääkväärtus.

Tabelis 2.28 on esitatud samad andmed üleviiduna nihketugevuseks, kui pingeolukord on 50 kPa.

Tabel 2.28

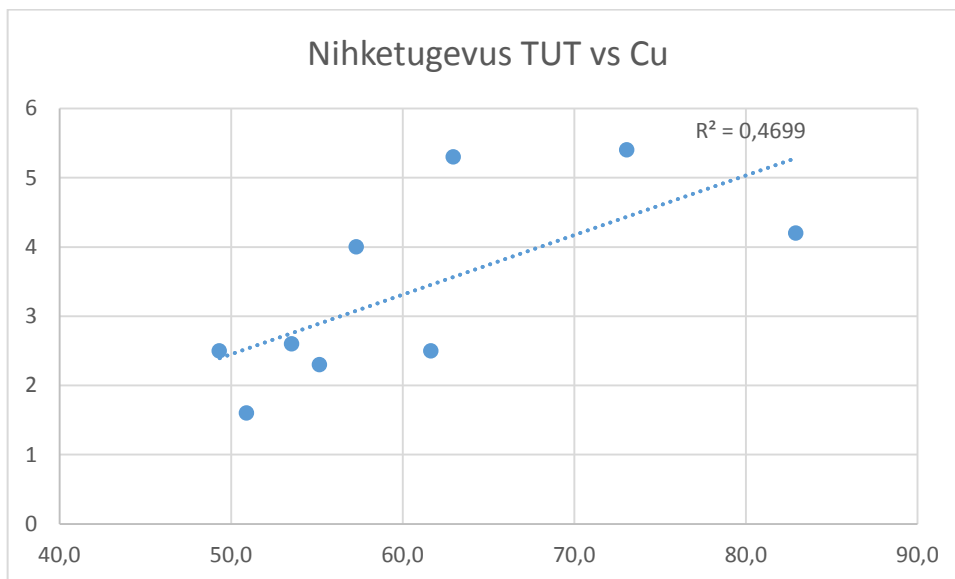
Nihketugevus τ kasutades tabelis 2.27 esitatud andmeid, kui $\sigma = 50$ kPa

Proovi nr.	TUT		C_u	KLAB τ (kPa)	C_u	k
	Maksimaalne τ (kPa)	Jääk τ (kPa)				
386	73,1	-	5,4	48,6	3,2	1,1
671	53,5	41,3	2,6	64,1	3,1	1
672	49,3	38,1	2,5	35,6	2,4	7,5
673	141,0	-	19,6	58,1	9,1	0,5
720	50,9	39,5	1,6	41,7	1,8	11,7
722	63,0	45,7	5,3	47,1	4,1	0,1
732	57,3	45,8	4,0	59,1	3,3	4,5
733	82,9	-	4,2	52,8	5,9	0,3
769	55,2	41,2	2,3	37,6	2,3	1
803	61,7	46,8	2,5	32,1	3,2	1,1

TUTi ja KLABi mõõteandmetes on märkimisväärsed erinevused. Põhjus võib olla selles, et KLABis määrati tugevusomadused < 2 mm fraktsioonist, TUTis kasutati suuremaid fraktsioone. Samuti olid erinevad niiskussisaldused, aga ka koormusastmed – TUTis kasutati astmeid 25, 50 ja 100 kPa, KLABis 50, 100 ja 200 kPa.

Tulemustest nähtub, et C_u ja nihketugevuse vahel eksisteerib teatav seos, kuid mitte väga tugev (joonis 2.39). Vaadeldes tulemusi nii, et arvutades keskmise nihketugevuse pinnasele $C_u < 3$ ja $C_u > 3$, saadakse vastavalt 54,1 kPa ja 69,1 kPa (kasutades TUTi maksimaalset); ühtlaseterine on seega ca 21% väiksem kui ebaühtlane pinnas (arvutusest jäeti välja 673, kuna see moonutab võrdlevaid tulemusi liigselt). Siisjuures peab kindlasti arvestama, et ühtlaseteralised materjalid ($C_u < 3$) olid

kõik peen- või keskliivad ja kui $C_u > 3$, oli tegemist kruusliivaga ehk jämedamaterialise materjaliga, mille nihketugevus on terasuurusest lähtudes suurem.



Joonis 2.39. Nihketugevuse ja C_u omavaheline seos. Kõrvale on jäetud proov 673, mis moonutas tulemusi.

Allikas [10] on toodud liivade tugevusomaduste osas tabelväärtused, millest on arvutatud nihketugevus, kui pinge on 50 kPa:

- kruus- ja jämeliiv – $\phi = 42^\circ$ ja $c = 7$ kPa, $\tau = 52$ kPa;
- keskliiv – $\phi = 40^\circ$ ja $c = 6$ kPa, $\tau = 48$ kPa;
- peenliiv – $\phi = 38^\circ$ ja $c = 5$ kPa, $\tau = 44$ kPa
- ühtlase terastikuga liiv – $\phi = 33^\circ$ ja $c = 5$ kPa, $\tau = 37,5$ kPa.

Materjalid 386, 722, 732 ja 733 on kruusliivad, 671, 672, 720 ja 769 keskliivad ning 803 peenliiv. Materjal 673 tuleks liigitleda kruusaks ning erineb teistest sedavõrd, et hakkab moonutama tulemusi, mistõttu jäetakse see hetkel kõrvale. Keskmised sisehõõrdenurgad ja nihketugevused arvutatuna TUTi katseandmetest on tabelis 2.29.

Tabel 2.29

Liivade keskmised tugevusomadused võrrelduna tabelväärtustega

Materjal	Maksimaalne		Jääktugevus		Tabelväärtus	
	ϕ°	τ (kPa)	ϕ°	τ (kPa)	ϕ°	τ (kPa)
Kruusliiv	46,1	69,1	36,0	45,8	42	52
Keskliiv	40,1	52,2	35,2	40,0	40	48
Peenliiv	40,2	61,7	36,5	46,8	38	44

Allikast [10] ei selgu, kas tegemist on maksimaalse või jääktugevusega, kuid arvestades teekatendite olemust, on loogiline arvata, et tegemist on maksimaalse tugevusega, mitte jääkväärtusega, kuna teekatendites ei esine nii suuri deformatsioone, kui jääkväärtusega

arvestamine eeldaks. Mõõtetulemuste kohaselt nähtub, et keskliivade puhul saadi mõõtetulemused praktiliselt identseteks tabelväärtusega võrreldes. Kruus- ja peenliivad olid kõrgemad, kuid kuna peenliivaproove oli vaid üks, ei saa sellest teha muid järeldusi kui see, et maksimaalne terasuurus üksi ei määra liivpinnase tugevusomadusi.

Ühtlaseteraliseid liivad vastavalt GOSTile (kus arvestatakse, et C_u on alla 3) on 671, 672, 720, 769 ja 803. Nende keskmine sisehõõrdenurk on $40,1^\circ$, kusjuures materjali 720 C_u on vaid 1,6 ning selle sisehõõrdenurgaks tuli $40,7^\circ$. Võrdluseks, tabelväärtusena on ühtlaseteralisele liivale antud sisehõõrdenurgaks 33° .

Eraldi andmereana anti TUTis tehtud kolmetelgsete testidega kaasa sisehõõrdenurk, kui nidusus on võetud nulliks. Neid andmeid saaks võrrelda arvutuslikult leitud sisehõõrdenurgaga, nagu oli valemite 1.38 ja 1.39. Võrdlus on tehtud tabelites 2.30 ja 2.31. Kõikide liivade puhul on terade kujuks arvestatud keskmised/osaliselt ümardunud ja tihedusena maksimaaltihedus, ülejäänud on kirjas tabelites.

Joonistel 2.40 ja 2.41 on võrdlused valemitega arvutatud ja mõõdetud sisehõõrdenurga vahel, millekohaselt on korrelatsioon väga hea. Mõõtmine andis alati suurema väärtuse, kui arvutatud.

Tabel 2.30

Mõõdetud sisehõõrdenurk võrrelduna valmiga 1.38 leitud väärtusega

Proovi nr	TUT ϕ	TUT ϕ kui $c=0^1$	ϕ valemist 1.38	Valemi 1.38 materjal	Valemi 1.38 terakoostis
368	46,6	46,6	44	keskkruus	keskmine
671	41,5	43,7	39	liiv	ühtlane
672	37,9	40,7	39	liiv	ühtlane
673	53,5	53,5	47	keskkruus	ebaühtlane
720	40,7	42,6	39	liiv	ühtlane
722	44,8	47,4	43	peenkruus	keskmine
732	44,6	46,3	43	peenkruus	keskmine
733	48,5	48,5	44	keskkruus	keskmine
769	40,4	43,3	39	liiv	ühtlane
803	40,2	42,3	39	liiv	ühtlane

¹ Proovidel 368, 673 ja 733 ei ole sisehõõrdenurga andmeid juhuks, kui $c = 0$.

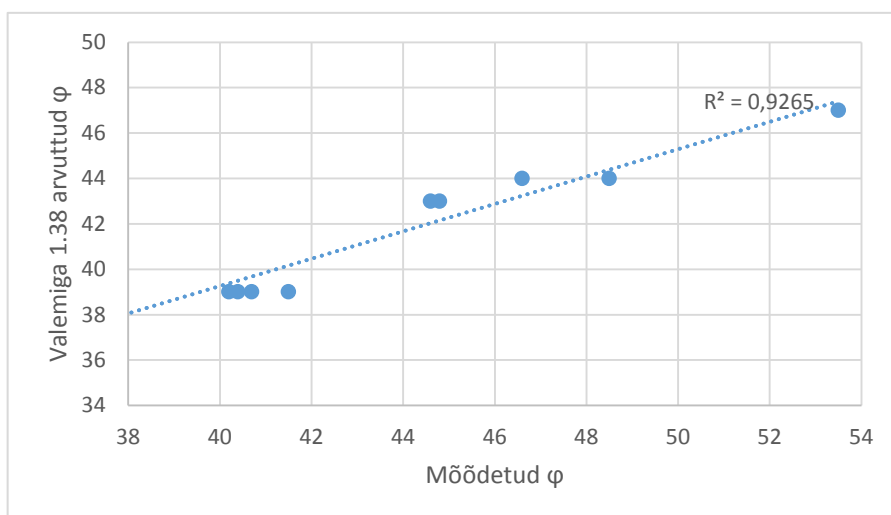
Tabel 2.31

Mõõdetud sisehõordenurk võrrelduna valmiga 1.39 leitud väärtusega

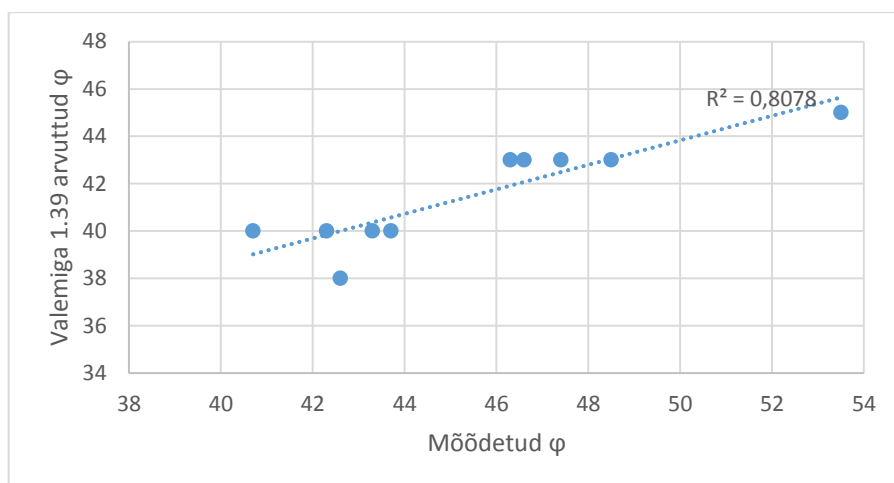
Proovi nr	TUT ϕ	TUT ϕ kui $c=0^1$	ϕ valemist (1.39)	Valemi 1.39 sorteeritus	Valemi 1.39 C ²
368	46,6	46,6	43	keskmine	N = 60
671	41,5	43,7	40	keskmine	N = 40
672	37,9	40,7	40	keskmine	N = 40
673	53,5	53,5	45	eriteraline	N = 60
720	40,7	42,6	38	ühtlane	N = 40
722	44,8	47,4	43	keskmine	N = 60
732	44,6	46,3	43	keskmine	N = 60
733	48,5	48,5	43	keskmine	N = 60
769	40,4	43,3	40	keskmine	N = 40
803	40,2	42,3	36	keskmine	N = 40

¹ Proovidel 368, 673 ja 733 ei ole sisehõõrdenurga andmeid juhuks, kui $c = 0$.

² kuna andmed puuduvad, siis kruusliivadel kasutati suuremat väärtust, kui liivadel.

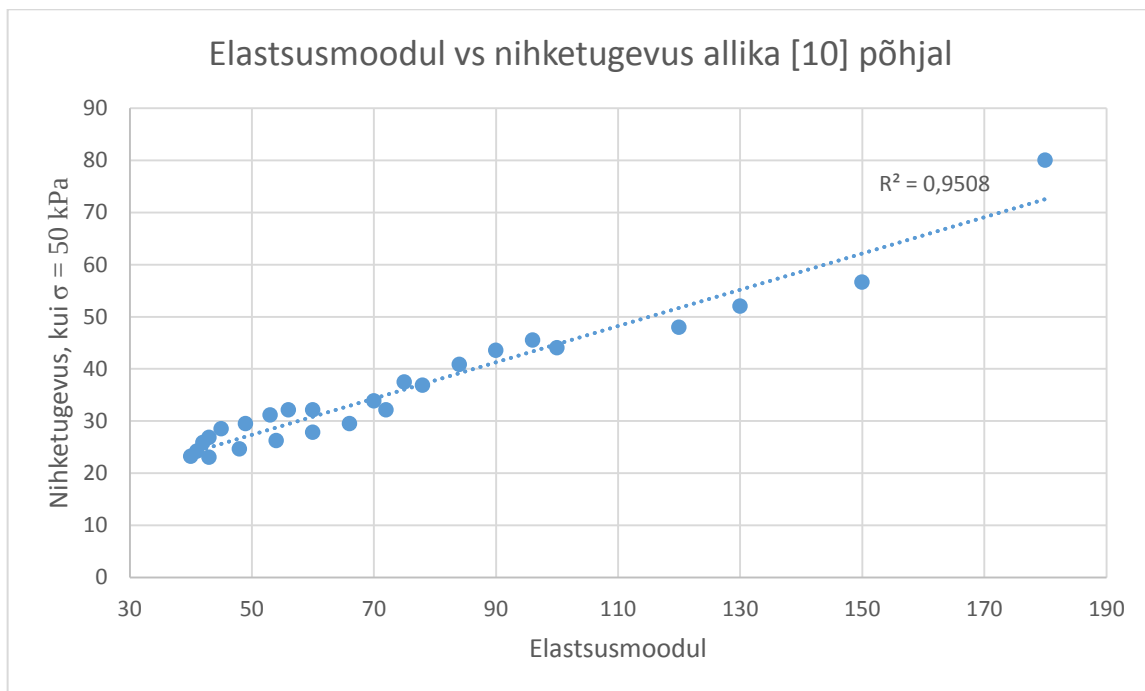


Joonis 2.40. Valemiga 1.38 arvutatud φ võrdlus TUTis mõõdetuga.



Joonis 2.41. Valemiga 1.39 arvutatud ϕ võrdlus TUTis mõõdetuga.

Teekatendite projekteerimisel kasutatava elastsusmooduli leidmise üheks meetodiks on kasutada analoogiat. Allika [10] andmete põhjal on liivadele arvutatud nende nihketugevus (kui $\sigma = 50$ kPa) ning pandud võrdlusesse sama materjali elastsusmooduliga. Tulemused on joonisel 2.42.



Joonis 2.42. Juhendi [10] andmetel arvutatud nihketugevuse, kui $\sigma = 50$ kPa ja elastsusmooduli onavaheline seos.

Joonise 2.42 põhjal on tabeli 2.29 kruusliivade elastsusmooduliks ca 170 MPa ja keskliivadele ca 120 MPa. Käesoleva töö autor on mõõtnud keskliivadelt Inspectoriga oludes, kus kiht on olnud eelnevalt killustikukihi all (mõõtmiskoht on kaevatud killustiku alt välja) väärtusi 143 MPa, 124 MPa, 128 MPa, aga ka lausa 275 MPa, kusjuures materjalid on olnud ühtlaseteralised.

3. Filtratsioonimooduli määramise katsestandardi EVS 901-20:2013 edasiarendus

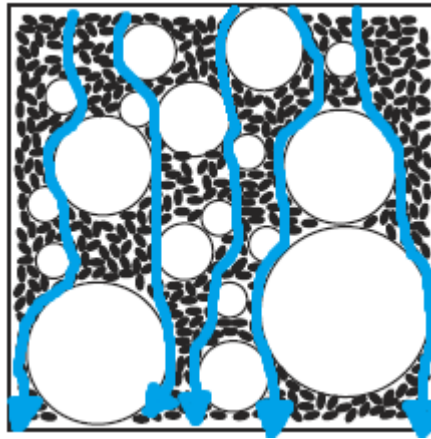
Alates 2013. aastast, kui kehtestati Eesti rahvuslik katsestandard EVS 901-20:2013 mulde- ja drenkihi ehituseks kasutatavate materjalide filtratsioonimooduli määramiseks Proctorteimi (EVS-EN 13286-2) maksimaalsel tihedusel, on jõustunud standardi juures ilmenud kahtlusi kruusade puhul katses kasutatava fraktsiooni mittevastavusest tegelikule materjalile - katsetatava materjali mittevastavus tegelikule sõelkõverale (EVS-i jaoks sõelutakse välja fraktsioon 0/4 ning katsetatakse seda);

Filtratsioonimooduli määramisel kehtiva standardi järgselt katsetatakse katsetorus kõikide erinevate materjalide korral fraktsiooni 0/4 mm. Enamik Eesti karjääridest leiduvatest drenkihti sobivatest liivpinnastest mahuvad antud piiridesse, kuid drenkihtide ja muldkehade ehituseks ei kasutata aga ainult liiva, vaid tihti ka looduslikku või purustatud kruusa. Siinkohal on juurde tulnud ka nn komposiitmaterjale (fraktsioneeritud killustiku ja madala lõimiseteguriga liivade segu) kasutamine teede drenkihtides. Kõik kruusad sisaldavad mingil määral jämedamaid osakesi kui 4 mm, tihti peale on kruusad fraktsiooniga kuni 63-90 mm. Siinkohal kerkib üles põhjendatud küsitavus katsetulemuste tõepärasusele, kuna katsetav materjal ning tegelikult ehitusobjektile teekonstruktsiooni paigaldatav materjal erinevad teineteisest märgatavalt.

3.1 Filtratsioonimooduli mõõtmine kruusade puhul

Peenosiste mõju filtratsioonile on uuritud suhteliselt palju eelnevates Eestis tehtud filtratsioonimoodulit puudutavates uuringutes ning lõputöödes, kuid jämedamate osakeste mõjust filtratsioonile uuringud puuduvad. Seetõttu pööras käesolev uuring suuremat tähelepanu just üle 4 mm suuruste osakeste mõjule filtratsioonile. Katsetati nii looduslikke karjäärimaterjale, kui ka tehiskivide kokku segatud materjale.

Kruusade puhul on peamiseks eelduseks olnud, et kuna seal on sees suurema osised, peab nende filtratsioonimoodul olema suurem, kui liivadel või kui laboris määratud fr 0/4 puhul. Eeldatavasti tekivad suuremate kivide pindade ümber parema veejuhtivusega piirkonnad, kust vesi saab kiiremini filtreeruda (joonis 3.1).

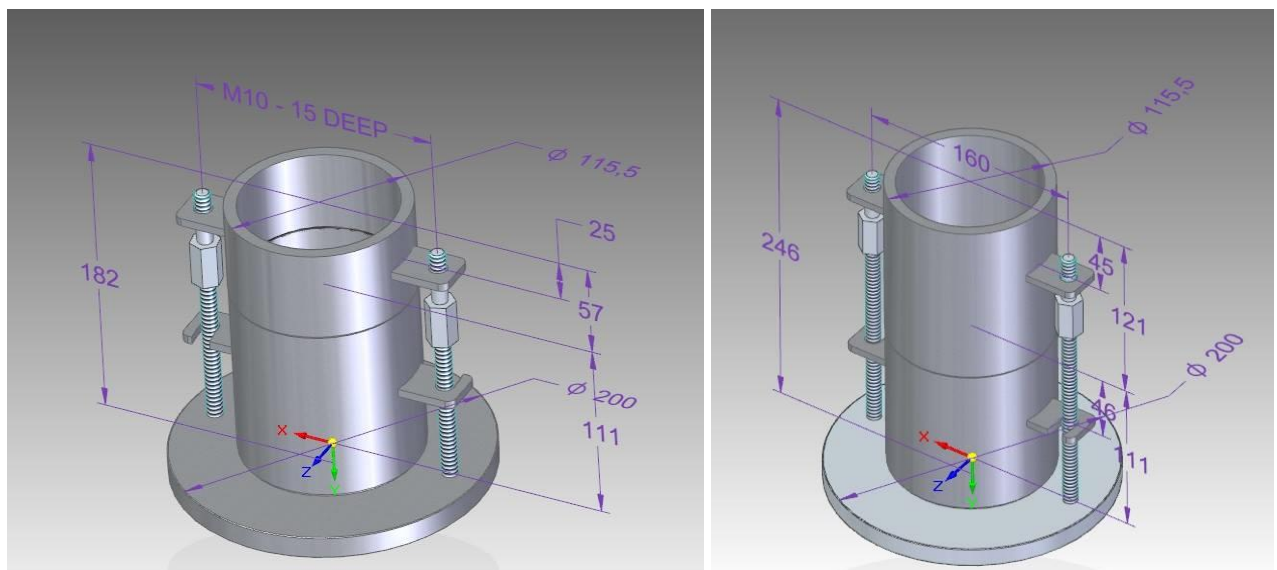


Joonis 3.1. Eeldatav vee liikumine suuremate kivide ümbert.

Väite kontrollimiseks konstrueeriti uus katseseade kruusadele ning filtratsioonikatse tehti võrdluse huvides EVS 901-20 katsetoodika põhimõtteid muutmata. Uuringus määrati kruusadel filtratsiooni võrdluseks nii Sojuzdornii torus, Procotor vormis, kui ka permeameetris.

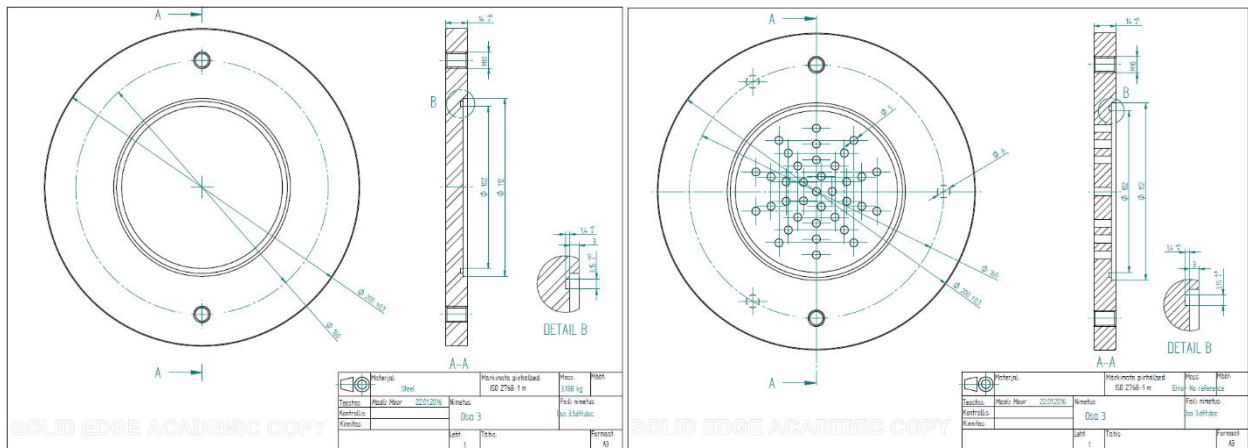
3.1.1 Modifitseeritud Proctor vorm

Probleemile lahenduse leidmiseks sai kohandatud uus mõõtetoru hetkel kehtiva katsetoodikaga täpses kooskõlas, suurendades vaid toru diameetrit ning kõrgust. Uus mõõteseade konstrueeriti koostöös Tallinna Tehnikakõrgkooli mehaanikateaduskonna masinaehituse õppejõududega. Materjaliks kasutati terast margitähistusega S355J2H. Aluseks sai võetud standardne Proctorvorm, põhiparameetriteks sisediameeter 100 mm ja silindri kõrgus 246 mm. Allikas [33] on soovitatud silindri sisediameetrigs võtta 8 kuni 10 korda suurem läbimõõt suurimast katsetatava materjali terasuurusest D . Käesoleva uuringu raames lähtuti seadme konstrueerimisel Proctor-teimi standardist EVS-EN 13286-2, kus on kirjutatud, et Proctor vormi diameeter peab olema segu D -st vähemalt neli korda suurem [35]. Kõik mõõdud näidatud joonisel 3.2. Tihendamiseks valmistati madalam krae kõrgusega 57 mm ja filtratsiooni mõõtmiseks kõrgem 121 mm.



Joonis 3.2. Mõõtudega 3D mudelid vormist. Vasakul tihendamiseks kasutatav krae ja paremal filtratsiooni mõõtmisel kasutatav krae.

Vormile ehitati kaks alust. Üks analoogne esialgse Proctor vormi alusega tihendamiseks ja teine aukudega alus filtratsiooni katse tarbeks, et võimaldada põhjast vee läbijooks (joonis 3.3).



Joonis 3.3. Modifitseeritud Proctor vormi alused. Vasakul tihendamiseks kasutatav ja paremal filtratsiooni määramiseks kasutatav alus.

Lisaks sai paigaldatud uuele mõõtetorule vee langemiskiiruse mõõtmiseks piesomeeter. Piesomeetrile märgiti markeriga joonides peale kolm joont, mis võimaldasid fikseerida vee langemiskiirust 10, 30 ja 50 mm laguse möödudes nulljoonest (joonis 3.4).



Joonis 3.4. Piesomeeter vee liikumiskiiruse mõõtmiseks. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Veepidavuse tagamiseks kasutati filtratsiooni määramise katse ajal detailide ühenduskohtades kummitihendeid. Detailid pingutati omavahel kokku keermelattide otsa keeratud liblik-kinnituste abil. Katse ajal kasutati aukudega alusel ka 0,25 mm suuruste avadega sõelda, et vältida materjali peenemate osakeste välja uhtumist filtratsiooni katse ajal (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Vasakul Proctor vormi pealtvaade erinevatele alustele ja kummitihendid. Paremal alus koos sõelaga. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Modifitseeritud Proctor vormis filtratsiooni mõõtmiseks katsetatav materjal kõigepealt kuivatati ahjus 110 °C juures, seejärel lasti materjalil jahtuda toatemperatuurini. Järgmisena sõeluti täisloomisest välja 16 mm ruutavadega sõela läbinud 2 kg materjali, mis segati vastavalt Proctorteimile määratud veesisaldusele veega ning jäeti suletud anumasse 30 minutiks imenduma. Enne tihendamist segati märg materjal uuesti korralikult läbi, et tagada materjali homogeensus ja ühtlaselt jaotunud niiskusesisaldus.

Tihendamine toimus standardse Proctorseadme tihendusmeetodi ja -seadmega. Tihendushaamri löökidega materjalile kolmes kihis, igale kihile 25 lööki (joonis 3.6).



Joonis 3.6. Proctor tihendusseade koos vormiga. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Pärast tihendamist eemaldati ülearune materjal kraest ning pind siluti vormi servaga tasaseks, suuremate kivide tühimikud täideti ülejäänud peenema kruusa puruga. Seejärel vahetati tihendamisalust aukudega filtratsiooni aluse vastu kuhu asetati ka sõel. Samuti asendati tihendamisel kasutatav madalam krae kõrgema piesomeetriga kraega ning vorm tihendatud materjaliga pandi vette küllastuma. Silindrit vette asetades raputati seda kergelt, et kõrvaldada põhja alla jäänud õhumullid, vastasel juhul aeglustaksid õhumullid küllastumise kiirust märgatavalt. Küllastumine toimus veega täidetud äbris, kuhu lisati järk-järguliselt vett niikaua, kuni veetaseme kõrgus ületas materjali pinna kõrguse 1-2 cm võrra. Kui materjal oli küllastunud ehk vesi oli tekkinud materjali pinnale tõsteti vorm 40 mm sügavusega veega täidetud anumasse nii, et veepind oleks täpselt materjali alumise pinnaga ühel kõrgusel.

Järgmisena täideti krae ülemine osa veega, et mõõtmise hetke alguses oleks tagatud hüdrauliline gradient 1. Standardist EVS 901-20 juhindudes täideti mõõtesilinder veega esialgu 5 mm kõrgemale ülemisest piesomeetri joonest, et vee langemine jõuaks enne mõõtmise algust ühtlustuda ning kui veetase oli jõudnud piesomeetri ülemise jooneni alustati veetaseme languse kiiruse mõõtmist stopperiga. Sooritati kaks kordusmõõtmist ning filtratsioonimooduli väärtuse arvutamisel kasutati kahe aja keskmist



Joonis 3.7. Filtratsiooni mõõtmine modifitseeritud Proctor vormis. [Sten-Kristjan Saariku foto]

3.1.2 Filtratsioonimooduli määramine püsiva rõhuga permeameetriga

Selleks, et kaasata katsetatavasse materjali suuremaid osakesi kui 16 mm kasutati eelnevast veel suuremat katseseadet, milleks oli 2011 aastal Mark Mihhailenko poolt konstrueeritud püsiva rõhuga permeameeter (joonis 3.8). Permeameetri välisdiameetriks oli 300 mm ning see võimaldas filtratsiooni katses kasutada materjali terasuurusega kuni 32 mm. Katseseadme kasutamisel juhinduti Martti Lilleste poolt 2012 aastal koostatud lõputöö [36] juhistest.



Joonis 3.8. Püsiva rõhuga permeameetri katsesilinder koos osade numbriliste tähistustega. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Joonisel 3.8 nummerdatud osade kirjeldus:

1. Pleksiklaasist silinder välisläbimõõduga 300 mm, seinapaksusega 4 mm ja kõrgusega 415 mm. Silindri siseseinale on kleebitud 10 mm paksune porolooni kiht, mis aitab takistada katse käigus vee liikumist mööda katsesilindri serva, et vältida ebatäpsusi katsetulemustes.
2. Katteplaat, materjaliks PE polümeer paksusega 15 mm. Ruudukujulise plaadi küljepikkuseks on 400 mm ning plaadi alumise osa sisse on freesitud 150 mm raadiusega ja 4 mm laiune soon, kuhu permeameetri kokkumonteerimisel suruti katsesilindri ülemine äär. Enne katteplaadi paigaldamist katsesilindrile määrati soonde molübdeenmäärdeainet, mis muutis katsesilindri ja katteplaadi ühenduse vee ning õhutihedaks. Katteplaadi küljes on ka kuulkraan.
3. Põhjaplaat, materjaliks samuti PE polümeer paksusega 15 mm. Ruudukujulise plaadi küljepikkuseks on 400 mm ning plaadi ülemise osa sisse on freesitud 150 mm raadiusega ja 4 mm laiune soon, kuhu permeameetri kokkumonteerimisel suruti katsesilindri alumine äär. Enne permeameetri kokkumonteerimist määrati soonde molübdeenmäärdeainet, mis muutis katsesilindri ja alusplaadi ühenduse vee ning õhutihedaks. Alusplaadi külge oli ühendatud 500 mm pikkune voolik, mille otsas oli kraan. Voolik võimaldas kraani tuua katse ajal permeameetri alt välja, mis lihtsustas oluliselt selle reguleerimist.
4. Katteplaadi küljes olev ülemine kuulkraan, mis võimaldas katsekeha veega küllastamise ajal õhul välja pääseda ning katse käigus lasta veel voolata läbi pinnase.
5. Alusplaadiga ühenduses oleva 500 mm vooliku külge ühendatud alumine kuulkraan, mis võimaldas vee voolamist läbi katsekeha ning mida mööda toimus materjali veega küllastamine.
6. Kergkruusaplokid, mille peal katseseade seisis ning mis vähendasid materjali tihendamisel vibratsiooni ja kõikumist. Samuti aitasid plokid vältida permeameetri toetumist põhjaplaadist väljuva vooliku peale.

Lisaks joonisel 3.8 kujutatud osadele kuulusid permeameetri juurde ka järgnevad detailid (joonistel 3.9 ja 3.10):

- PE polümeerist valmistatud 15 mm paksused ringikujulised sõelad, diameetriga 292 mm. Sõeltesse oli puuritud 240 ava, mille läbimõõduks oli 3 mm. Sõelte eesmärgiks oli materjali proovi katse ajal hoida permeameetris nii, et välja pääseks sealt ainult vesi. Sõelte peal kasutati ka hea vee läbilaskvusega geotekstiilist filterkangast, mille filtratsioonimoodul pidi olema suurem kui katsematerjalil, et vältida filtratsioonimooduli vähenemist filterkanga tõttu. Igaks katseks lõigati geotekstiilist välja alati uued puhtad filterkangad, et eelnevalt katsetatud materjali tolmu ei halvendaks uue katse filtratsiooni.
- Tõsterõngas, mis hoidis proovikeha permeameetri põhjast kõrgmal, et ei tekiks olukorda, kus alumine sõel võiks sulgeda alusplaadi keskel oleva väljavooluava.
- Veemahuti, millest oleks tagatud vee vool läbi permeameetris oleva katsekeha.



Jonised 3.9 ja 3.10. Vasakul sõelad, tõsterõngas ja filterkangast lõigatud kettad ning paremal veemahuti. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Mark Mihhailenko poolt konstrueeritud katseseadmele oli esialgsele versioonile tehtud Martti Lilleste poolt juurde ka täiendusi, mis võimaldasid tõsta katsetulemuste usaldusväärsust ja korduvust. Joonisel 3.11 on kujutatatud Martti Lilleste poolt seadmele lisatud täiendused, mida ka käesoleva töö autor samuti permeameetriga katsetustes kasutas ning lisades ka omalt poolt mõne täiendava detaili.



Joonis 3.11. Permeameetri katseseadme juures kasutatud nummerdatud täiendused. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Fotol kujutatud nummerdatud täienduste kirjeldus ning nende olulisus katsetulemuste juures:

1. Väljavoolu vooliku otsa kinnitatud messingist 10 mm läbimõõduga põlv, millele käesoleva töö autor lisas 1 mm paksusest plastikust otsa, mis suunaks vee paremini ämbrisse, vältimaks väga aeglase filtratsiooniga materjalide puhul välja tilkuvat vee kadu nõrgumise teel mööda voolikut. Antud täiendus võimaldas täpselt mõõta väljuva vee kõrgust. Väljuva vee kõrguse täpsem mõõtmine andis hüdraulilise gradiendi arvutamisel oluliselt adekvaatsema tulemuse. Ühe millimeetrine eksimus väljavoolava vee kõrguse määramisel tingiks filtratsioonimooduli arvutamisel arvutusvea +/- 0,5-2 m/ööp, olenevalt katsetava materjali filtratsioonimooduli suurusjärgust. Eelnevalt spetsiaalne ots väljavooluks puudus, statiivi abil asetati voolik asendisse, et veega täidetud vooliku osa ei jääks kõrgemale vooliku otsast väljavoolava vee tasemest. Selline meetod oli küllaltki keerukas, sest

väiksemgi värin võinuks vooliku kõrguse paigast liigutada ning katsetulemused ei oleks olnud enam usaldusväärsed.

2. Väljavoolu vooliku otsa kinnitatud messingist 10 mm läbimõõduga põlv, millele käesoleva töö autor lisas 1 mm paksusest plastikust otsa, mis suunaks vee paremini ämbrisse, vältimaks väga aeglase filtratsiooniga materjalide puhul välja tilkuva vee kadu nõrgumise teel mööda voolikut. Antud täiendus võimaldas täpselt mõõta väljuva vee kõrgust. Väljuva vee kõrguse täpsem mõõtmine andis hüdraulilise gradiendi arvutamisel oluliselt adekvaatsema tulemuse. Ühe millimeetrine eksimus väljavoolava vee kõrguse määramisel tingiks filtratsioonimooduli arvutamisel arvutusvea $\pm 0,5-2$ m/ööp, olenevalt katsetava materjali filtratsioonimooduli suurusjärgust. Eelnevalt spetsiaalne ots väljavooluks puudus, statiivi abil asetati voolik asendisse, et veega täidetud vooliku osa ei jääks kõrgemale vooliku otsast väljavoolava vee tasemest. Seline meetod oli küllaltki keerukas, sest väiksemgi värin võinuks vooliku kõrguse paigast liigutada ning katsetulemused ei oleks olnud enam usaldusväärsed.
3. Keermelatiga statiiv väljavoolu vooliku fikseerimiseks ja väljavoolu otsa kõrguse muutmiseks. Võimaldas hüdraulilise gradiendi muutmist sujuvalt ning täpselt ilma veevoolu peatamata.
4. Veemahuti külge monteeritud piesomeeter, mis lihtsustas veetaseme kõrguse mõõtmist veeanumas. Vee kõrguse täpsem mõõtmine andis hüdraulilise gradiendi arvutamisel oluliselt täpsema tulemuse. Ühe millimeetrine eksimus väljavoolava vee kõrguse määramisel tingiks filtratsioonimooduli arvutamisel arvutusvea $\pm 0,5-2$ m/ööp, olenevalt katsetava materjali filtratsioonimooduli suurusjärgust.
5. Pidev ülevool, mille abil sai veemahutis oleva vee taset hoida stabiilsena kogu katse jooksul. Seetõttu oli katsekäigus materjalile määratud hüdrauliline gradient tunduvalt ühtlasem ja ühtlustusid ka arvutustulemused.

Lisaks eelmainitule kasutati veemahutis oleva vee temperatuuri fikseerimiseks termomeetrit. Vee pealejooksu võimaldanud veekraani asend fikseeriti katse alguses ning seda hoiti muutumatuna terve katse vältel, et vee temperatuur oleks stabiilne. Temperatuur fikseeriti välja voolanud veel katse lõppedes, et määrata vee tihedus ning seeläbi leida arvutuslikult täpne vee kogus 10°C juures.

Katse ettevalmistus

Katse läbiviimiseks kulus keskmiselt 40-45 kg materjali, sõltuvalt materjali mahumassist. Proovis kasutatava materjali tihendamine katsesilindrisse toimus materjalile eelnevalt Proctor-teimi kaudu määratud optimaalse veesisalduse juures. Proctor-teimiga leitud maksimaalse kuivmahumassi kaudu leiti pärast materjali permeameetrisse tihendamist ka materjali tihendustegur.

Permeameetris katsetatava suure materjali koguse tõttu jagati materjal eelnevalt seitsmeks osaprooviks, et lihtsustada materjali niisutamist optimaalse veesisalduse juurde. Kõik seitse osaproovi segati ettenähtud veekogusega ning jäeti suletud kaanega anumatesse vähemalt 0,5 tunniks imenduma.

Kõigepealt tuli katseseadme katte- ja põhjaplaati freesitud sooned määrada vett hüljava ainega, et vältida katse käigus vee väljumist permeameetri silindri ja põhja- ning katteplaatide ühenduskohast. Seejärel asetati põhjaplaat kergkruusplokkidele ning freesitud ringi sisse pandi tõesterõngas, sellele

omakorda sõel ja sõela peale asetati eelnevalt veega niisutatud filterpaber. Sõela ja põhjaplaadi vahele asetatati vaheelemendid, et vältida vetrumist materjali katseseadmesse tihendamisel. Järgmisena suruti permeameetri silinder põhjaplaati freesitud ringikujulisse avasse nii, et silindri ääred tungiksid lõigatud soonde. Jälgida tuli seda, et põhjaplaadi soone ja katsesilindri ääre vahelt väljuks mõningal määral sinna eelnevalt määratud molübdeenmäärdeainet, mis näitas, et permeameetri katsesilindri äär oli korralikult pessa tunginud. Katsesilindri asetamisel alusele pidi hoolikalt jälgima, et eelnevalt sõelale asetatud filterkangast või –paberit selle käigus ei vigastataks.

Materjali tihendamine

Varasemalt seitsmeks osaprooviks jaotatud optimaalse veesisaldusega materjal tihendati permeameetrisse seitsmes eraldi kihis. Tihendamiseks kasutati 2,5 kg raskust Proctor-tihendushaamrit, langemiskõrguselt 300 mm ning sooritades 242 lööki igale kihile liikudes ringikujuliselt üle materjali pinna suunaga väljast keskele. Eelnevalt oli permeameetrisse materjali tihendamisel kasutatud 50 lööki kihile, kuid käesoleva uuringu käigus võeti eesmärgiks ühildada erinevate filtratsiooni määramise katseseadmete tihendamiseks kuluv energia. Seetõttu arvutati Proctori standardis EVS-EN 13286-2 kirjeldatud tihendamiseks kuluv tihendamisenergia välja standardis oleva valemi põhjal. Proctor-teimi erienergia peab olema vahemikus $0,56 \text{ MJ/m}^3$ kuni $0,63 \text{ MJ/m}^3$ (keskmine väärtus $0,6 \text{ MJ/m}^3$).

Katse läbiviimine

Küllastamine toimus suunaga alt üles, et aidata väljuda materjalis oleva õhul. Voolikud ühendati joonisel 3.12 kujutatud viisil ning ülemine veemahuti täideti veega. Pärast seda keerati kraanid lahti. Järgnevalt liigutati veemahutiga ühenduses olevat voolikut, eemaldada voolikusse jäänud õhumull, mis küllastumise protsessi vastasel juhul oleks märgatavalt aeglustanud. Materjali küllastumisest andis märku ülemisest voolikust välja tilkuma hakanud vesi. Sõltuvalt katsetatavate materjalide filtratsioonimooduli väärtusest võttis küllastumine aega 1 kuni 12 tundi. Pärast küllastumist võis alustada filtratsiooni aja mõõtmist.



Joonis 3.12. Permeameetri veega küllastamine. [Sten-Kristjan Saariku foto]

Enne filtratsiooni aja mõõtmist tuli keerata kinni kraanid, et küllastunud materjalist vett enne katse algust välja ei lekiks. Pärast kraanide sulgemist vahetati voolikud omavahel joonisel 3.13 kujutatud viisil. Veemahutiga ühenduses olev voolik ühendati nüüd katsesilindri ülemise kraaniga ning teine lühem voolik vee väljavoolu mõõtmiseks kinnitati alumise kraani külge ning selle teine ots fikseeriti kindlale kõrgusele keermelatiga statiivi külge. Seejärel mõõdeti joonlauga abil toru

väljavoolu ning veemahuti küljes oleva piesomeetri vaheline kõrgus, mida kasutati gradiendi määramiseks. Väljavoolu vooliku otsa alla asetati eelnevalt kaalutud tühi ämber, kuhu hakati väljavoolavat vett koguma. Stopperiga aja mõõtmine algas hetkest, millal esimene tilk väljavoolust ämbrisse langes.



Joonis 3.13. Filtratsiooni mõõtmiseks ühendatud katseseade. [Sten-Kristjan Saariku foto]

3.1.3 Kruusade filtratsioonitulemused

Proctori vormis ja püsiva rõhuga permeameetris katsetati nelja erinevat karjäärimaterjali, lisaks määrati nende filtratsioonimoodul vastavalt EVS 901-20:2013. Viiest materjalist neli olid kruusliivad, mille lõimised on tabelis 3.1 ja joonisel 3.14.

Tabel 3.1

Liiva ja kruusade terakoostised Proctori ja permeameetrikatsetes

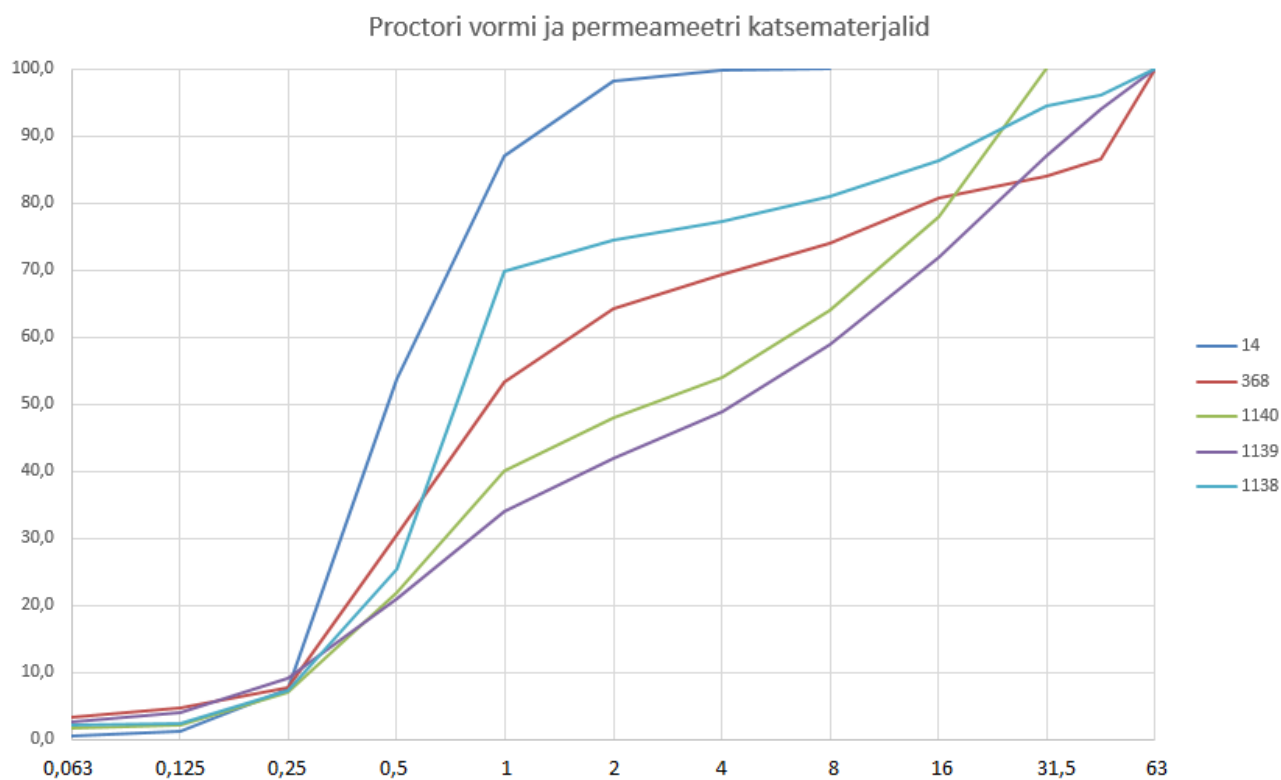
Proovi nr.	Materjal	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	40	63
14	keskliiv	2,7	15,1	98,5	99,5	99,9	100	100	100	100	100	100	100
368	kruusliiv	3,3	4,6	7,7	30,6	53,3	64,3	69,3	74,1	80,9	84	86,5	100
368 (0/4)		3,8	6,6	11,1	44,2	76,9	92,8	100,0					
1140	kruusliiv	1,7	2	7	22	40	48	54	64	78	100	100	100
1140 (0/4)		2,1	3,7	13,0	40,7	74,1	88,9	100,0					
1139	kruusliiv	2,6	4	9	21	34	42	49	59	72	87	94	100
1139 (0/4)		4,3	8,2	18,4	42,9	69,4	85,7	100,0					
1138	kruusliiv	2,0	2,4	7,2	25,3	69,8	74,5	77,4	81,1	86,3	94,5	96,2	100,0
1138 (0/4)		2,6	3,1	9,3	32,7	90,2	96,3	100,0					

EVS 901-20 kasutab fraktsiooni 0/4, Proctori vorm 0/16 ja permeameeter 0/32. Kõikide proovide Proctortihedused koos optimaalse veesisaldusega on tabelis 3.2.

Tabel 3.2

Liiva ja kruusade Proctortihedused koos veesisaldusega Proctori ja permeameetrikatsetes

Proovi nr.	fr 0/4		fr 0/16		fr 0/32	
	Proctor Mg/m ³	Opt. veesisaldus	Proctor Mg/m ³	Opt. veesisaldus	Proctor Mg/m ³	Opt. veesisaldus
14	1,69	13,3	-	-	-	-
368	1,81	10,1	1,87	9,8	1,92	8,7
1140	1,91	9,9	2,12	7,2	2,14	5,4
1139	1,87	10,0	2,04	6,6	2,13	5,6
1138	1,70	15,1	1,88	8,8	1,97	9,0



Joonis 3.14. Liiva ja kruusade lõimisekõverad Proctori ja permeameetrikatsetes.

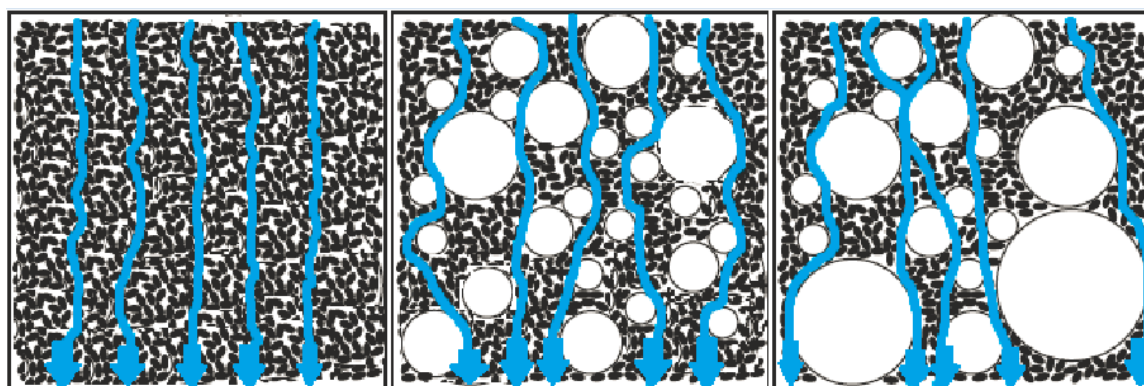
Tabelist 3.2 on näha, kuidas kruusliivadel suurema fraktsiooni kaasamisel Proctor-teimi maksimaalne kuivtihedus kasvab ja optimaalne veesisaldus kahaneb. See on tingitud suuremate kivide kõrgest terade tihedusest ning väikesest veeimavusest. Järelikult suuremate kivide kaasamisel väheneb materjali siseselt ka poorsus. Teisalt suureneb suurte osiste olemasolul efektiivdiameeter, mis teoreetiliselt peaks korreleeruma pooride suurusega. Tabelis 3.3 on esitatud proovide poorsustegurid ja vastavad efektiivdiameetrid olenevalt vaadeldavast fraktsioonist ning juurde on lisatud ka Chapuisi valemiga arvatud filtratsioonimoodul, millekohaselt on täislõimisel väiksem filtreeruvus, kui väljasõelutud fraktsioonil 0/4.

Tabel 3.3

Materjalide poorsustegurid ja efektiivdiameetrid

Proovi nr.	Poorsustegur	Efektiivdiameeter	Chapuis (m/ööp)	Varuteguriga 4
14	0,586	0,26	52,6	13,1
368	0,396	0,28	25,4	6,3
368 (0/4)	0,481	0,22	26,2	6,6
1140	0,252	0,3	10,7	2,7
1140 (0/4)	0,403	0,21	16,8	4,2
1139	0,258	0,27	9,5	2,4
1139 (0/4)	0,433	0,15	11,6	2,9
1138	0,360	0,29	21,8	5,4
1138 (0/4)	0,576	0,26	49,7	12,4

Ka ilma filtratsioonimooduli mõõtmisteta nähtub, et tabelis 3.3 oleva loodusliku kruusa filtratsioonimoodul on väiksem, kui sellest väljasõelutud fraktsiooni 0/4 oma. Olukorda on võimalik näitlikustada joonisega 3.15. Loomulikult sõltub see mitmetest teguritest ja teatud tingimustel võib tulla tulemus ka vastupidine – tõenäoliselt siis, kui suurte osiste osakaal ületab teatud protsendi ehk efektiivdiameeter suureneb oluliselt.



Joonis 3.15. Vee võimalikud liikumistrajektorid kruusade 0/4, 0/16 ja 0/32 fraktsioonides.

Filtratsiooni mõõtmise tulemused on esitatud tabelis 3.4 ning tihendustegurid tabelis 3.5.

Tabel 3.4

Filtratsioonitulemused Proctori vormis ja permeameetris

Proovi nr.	EVS	Proctori vorm	Permeameeter
14	12,6	10,65	7,9
368	1,10	0,27	0,26
1140	0,12	0,05	0,45
1139	0,90	0,04	0,05
1138	6,20	0,32	0,20

Tabel 3.5

Liiva ja kruusliivade kolme erineva fraktsiooni tihendustegurid filtratsiooni katse ajal

Proovi nr.	Tihendustegur		
	EVS 0-4 mm	Proctori vorm 0-16 mm	Permeameeter 0-32 mm
14	1,00	0,99	1,02
368	1,02	1,00	1,01
1140	1,01	0,98	1,00
1139	1,00	1,02	1,00
1138	1,01	1,02	1,01

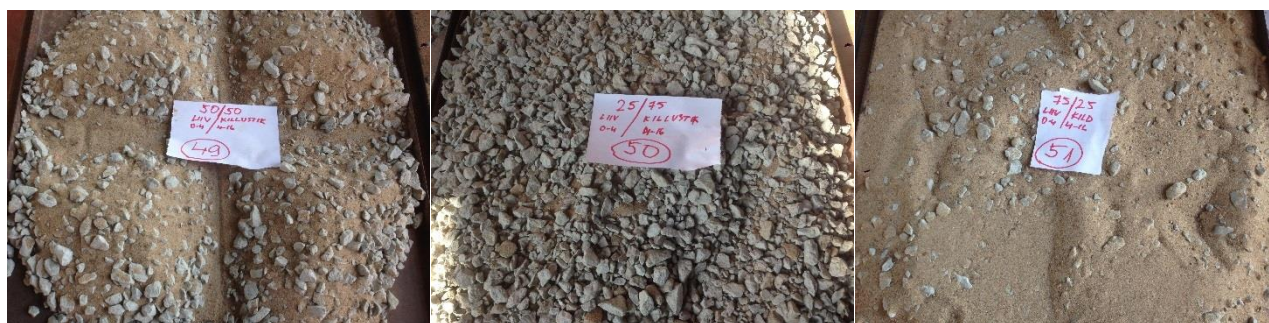
Kruusadele Proctorvormis ja permeameetriga määratud filtratsioonimoodulid tulid võrreldes EVS 901-20 meetodil määratud tulemustega 2-20 korda väiksemad. Liiva puhul on kolmel erineval meetodil määratud filtratsioonide vahe kõige väikesem, kuigi teoreetiliselt pidanuks tulemuseks saadama sama väärtuse. Tulemustest nähtub, et eranditult kõikidel kruusaproovidel on filtratsioonimoodul oluliselt väiksem, kui fraktsioonist 0/4 tehtud katse, mida kinnitas ka eelnevalt esitatud teoreetiline arutelu.

3.1.4 Tehiskruusa katsetamine

Lisaks looduslikule kruusale katsetati ka hästifiltreeruvast liivast ja paekivikillustikust kokku segatud tehiskruusasegu. Katsetamisel kasutati kvartsi liiva Kiiu Soon karjäärast fraktsiooniga 0/4 ning paekivikillustikku Harku karjäärast fraktsiooniga 4/16. Kokku segati kolm erinevat tehisliku materjali segu fraktsiooniga 0/16. Segude proportsioonid olid järgnevad:

- segu 1 – 50% liiva ja 50% killustikku;
- segu 2 – 25% liiva ja 75% killustikku;
- segu 3 – 75% liiva ja 25% killustikku.
- lisaks mõõdeti filtratsioonimoodulid Proctori vormis nii puhtal liival kui killustikul.

Enne materjali tihendamist modifitseeritud Proctor vormi segati materjal vastavalt proovi vähendamise standardile EVS 932-2 ühtlasesse kuhilasse ja jaotati neljaks sektoriks. Eesmärk oli tagada killustiku ühtlane jaotus segus. Valmissegatud segud on näidatud joonisel 3.16 ning sõelkõverad tabelis 3.6 ja joonisel 3.17.

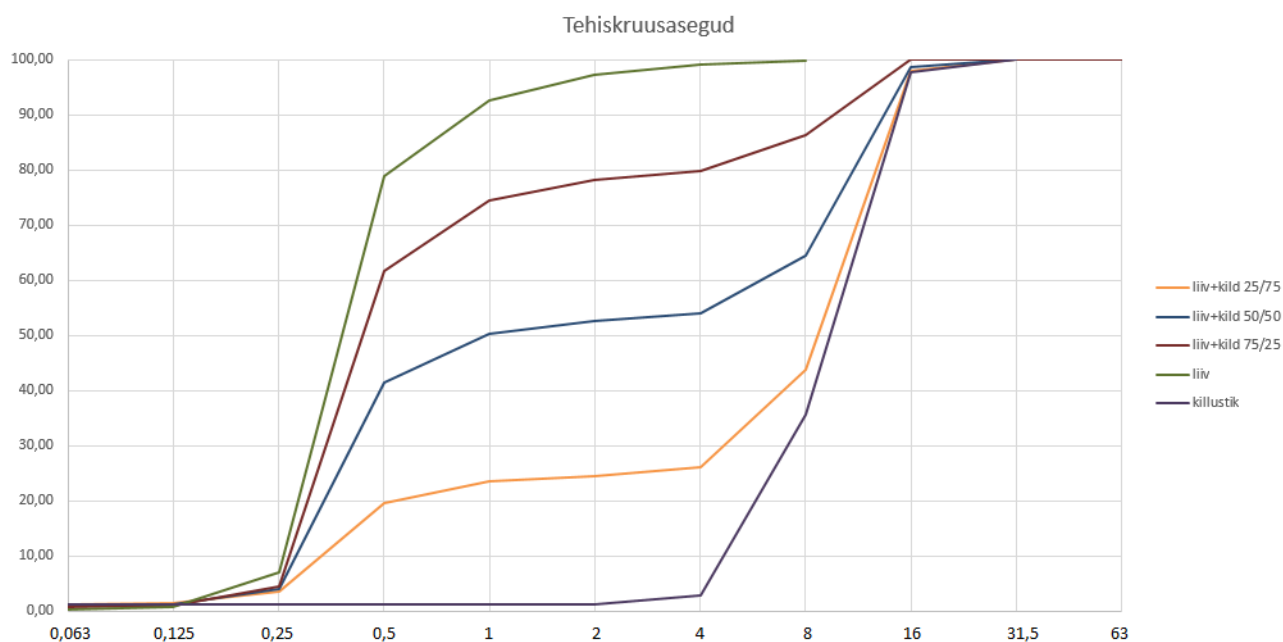


Joonis 3.16. Kolm erinevat liiva ja killustiku segu, vasakul liiv/killustik 50/50, keskel liiv/killustik 25/75 ja paremal liiv/killustik 75/25. [Sten-Kristjan Saariku fotod]

Tabel 3.6

Tehiskruusasegud

Materjal	Proovi nr.	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
liiv + kild 25/75	50	1,2	1,4	3,5	19,6	23,5	24,5	26,0	43,7	97,9	100,0
liiv + kild 50/50	49	0,9	1,1	3,9	41,5	50,2	52,7	54,0	64,4	98,8	100,0
liiv + kild 75/25	51	0,7	1,0	4,5	61,8	74,4	78,3	79,9	86,3	100,0	100,0
liiv	720	0,3	0,8	7,0	79,0	92,6	97,4	99,1	100,0	100,0	100,0
killustik	0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	2,8	35,6	97,7	100,0



Joonis 3.17. Tehiskruusasegud

Tehiskruusaproovide Proctortihedused koos optimaalsete veesisaldustega, poorsustegurite ja efektiivdiameetritega on esitatud tabelis 3.7.

Tabel 3.7

Tehiskruusade näitajad

Materjal	Proovi nr	Proctor Mg/m ³	Opt. veesisaldus	Poorsus- tegur	Efektiiv- diameeter
liiv + kild 25/75	50	2,05	6,60	0,307	0,35
liiv + kild 50/50	49	2,01	9,10	0,333	0,29
liiv + kild 75/25	51	1,81	12,50	0,481	0,27
liiv	720	1,62	17,00	0,654	0,26
killustik	0	1,70	3,00	0,588	4,60

Tabelis 3.8 on esitatud tehiskruusade filtreeruvuse andmed Proctorvormist, juurde on võrdluseks lisatud Chapuisi järgi arvutatud filtratsioonimoodulid. Tulemustest nähtub, et killustiku filtratsioonimoodul on väga kõrge, selle poorsustegur on väiksem, kui liival, kuid efektiivdiameeter suur. Kohe, kui lisada killustikule hästifiltreeruv liiv, väheneb poorsustegur, efektiivdiameeter ning

ka filtratsioonimoodul. Liiva-killustiku segu filtratsioonimoodul on madalam, kui puhtal liival. Täpselt sama järelduseni jõuti ka looduslike kruusade katsetamisel. Tabelis 3.8 esitatud filtratsioonimoodulite osas tuleb vaikumisi arvestada ka sellega, et killustiku lisamine suurendas liiva peenosise sisaldust, mistõttu on tulemused veidi moonutatud suhtena liiva filtratsioonimoodulisse.

Tabel 3.8

Tehiskruusade filtreeruvus Proctorvormis

Materjal	Proovi nr	Proctorvorm (m/ööp)	Tihendustegur	Chapuis (m/ööp)	Chapuis varuteguriga 4
liiv + kild 25/75	50	10,50	0,99	20,9	5,2
liiv + kild 50/50	49	5,12	0,96	18,6	4,6
liiv + kild 75/25	51	5,86	1,01	36,1	9,0
liiv	720	14,07	1,02	64,5	16,1
killustik	0	427,10	0,97	4643,3	1160,8

3.1.5 Kruusade filtreeruvusest

Looduslike ja tehiskruusade katsetamisega jõutakse tegelikult samasse kohta, kus on Ameerikas kasutatav sõelkõveragraafik, mis esitati joonisel 2.26. Kui materjal on sees suuri osakesi, on filtratsioonimoodul väga kõrge vaid siis, kui selle efektiivdiameeter kui ka poorsustegur on kõrged. Looduslike kruusadega reeglina taolist olukorda ei saavutata ning nende poorsustegurid on enamasti madalad. Näiteks proovil 673 oli poorsustegur 0,26, võttes sellest välja fraktsiooni 0/4, saadi poorsusteguriks 0,45 ning EVSi järgi mõõdetakse filtratsioonimoodul sellest. Külmaerkekatsetest selgus, et proov 673 oli eriti külmaohtlik, kuigi EVSi järgi oli selle filtratsioonimoodul 0,5 m/ööp. **Seega EVS 901-20 ei sobi kasutamiseks kruusadele/kruusliivadele, kuna see moonutab nende filtreeruvuse paremaks, kui see tegelikult on.** Kruusade/kruusliivade katsetamine tuleks sooritada suurema läbimõõduga katsekolvis, nagu oli näiteks käesolevas uuringus kasutatud Proctori vorm.

Looduslike kruusade poorsustegurid on märgatavalt väiksemad puhta killustiku ning liivade poorsusteguritest. Tehiskruusade katsetamine näitas, et alates 50% suurusest killustiku sisaldusest oli poorsustegurite suurusjärk looduslike kruusade omaga samas vahemikus (0,3...0,4). Filtratsioonimooduliga võrdluseks on näha, et madalate poorsusteguritega looduslikel kruusadel on ka vastavalt väga väike filtratsioonimoodul. Kuna katsetatud puhaste liivade näol oli tegemist ühtlaseteralist materjalidega, oli ka nende poorsustegurid suhteliselt suured, see tähendab, et ühtlaseteralistel liivadel jääb ka maksimaaltiheduse juures materjali pooride näol piisavalt vaba ruumi vee liikumiseks. Mida rohkem suuremaid kive segusse kaasatud on, seda väiksemaks jääb materjali poorsustegur, kuid teisalt kasvab sellevõrra efektiivdiameeter.

Kruusade osas tuleb kokkuvõtteks öelda seda, et kivist vesi läbi ei lähe. Kruusade filtratsiooni määrab kruusaterade vahel olev peenem materjal. Kui seda ei ole, on tegemist killustikuga.

4. Järeldused ja soovitused

EVS 901-20 võrdlus kapillaartõusu ja külmakerkelisusega

Vaadates kogu kümne proovi andmehulka, ei leitud küll otsest, lineaarset korrelatsiooni EVSi, kapillaartõusu ega külmakerkelisuse vahel, kuid siiski nähtus teatud seaduspärasus – EVSi alusel kolm kõige halvemini filtreeruvat materjali olid kõige külmakerkelisemad, mis andsid ühtlasi ka arvutuslikult kõige suurema külmakerke. Seevastu EVS 901-20 järgi kõige parema filtratsiooniga materjalid olid külmakerkelisuse seisukohalt täiesti külmaohutud. Ühtlasi olid kõige väiksema filtratsiooniga materjalid ka ühed kõige suurema kapillaartõusuga materjalid.

Mõõdetud filtratsioonimooduli, külmakerkelisuse ja kapillaartõusu vahel oli üldine seaduspärasus siiski liiga väike, et teha lõplikke järeldusi. Kahe äärmuse (hästi ja halvasti filtreeruvad) vahele jäänud materjalide osas oli nimetatud omaduste varieeruvus liiga suur.

Teede projekteerimisel on seega mõistlik eraldada filtratsioonimooduli, külmakerkelisuse ja kapillaartõusu omadused. Dreenkihtides tuleb jälgida eelkõige materjali filtreerivust, kuna selle ülesanne on eemaldada vesi teekatendist ja mahutada kevadised sulamisveed. Muldkehadesse paigaldatavatel materjalidel tuleks tulevikus arvestada hoopiski pinnase külmakerkelisust ja kapillaartõusu, kuna külmakerked saavad alguse just sealt, olles seda suuremad, mida enam vett imetakse jäätumistsooni.

EVS 901-20:2013 võrdlus pinnase tugevusomadustega

Hästifiltreeruvad materjalid on enamasti ühtlaseteraliseid, ning nii teooriast kui ka praktikast on teada, et see vähendab pinnase tugevusomadusi ja ka tihendatavust. Siiski ei ole ühtlaseteralisus ainus tugevusomadusi mõjutav omadus, sest see sõltub ka terade kujust, suurusest ja pinnase tihedusega.

Mõõdetud andmete kohaselt olid kõikide proovide sisehõõrdenurgad kas suuremad või samad, kui tabelväärtused hoolimata sellest, et osadel materjalidel oli C_u väga madal. Kuna pinnaseproovide valim uuringus koosnes kümnest eri proovist, ei tuleks teha nendest lõplikku järeldust ja kõrvale tuleb vaadata ka kirjandusest leiduvaid andmeid. Vaadeldes seega nii teooriat kui ka objektil tehtud mõõtmisi nii plaatkoormustesti kui Inspectoriga on mõistlik järeldada, et arvutustes peaks eraldama omavahel ühtlase ja ebaühtlase terakoostisega liivpinnased.

Allikas [10] annab liivpinnase tugevusomaduste suhtes ette olukorra, kus kõik ühtlaseterised liivad ($C_u < 3$) on antud elastsusmooduliga 75 MPa, $\phi = 33^\circ$ ja $c = 5$ kPa. Käesoleva uuringu andmetest nähtus, et valimisse kaasatud ühtlaseteraliste liivpinnaste sisehõõrdenurk oli oluliselt suurem, kui nimetatud tabelväärtus. Kasutades arvutatud nihketugevuse ja elastsusmooduli vahelist analoogiat joonisel 2.42 võib väita, et ka arvutuslik elastsusmoodul peab olema suurem. Seega uuritud pinnaseproovide mõõtmisandmetele tuginedes ei saa väita, et pinnaste tugevusomadused vähenevad vaid terastikulise koostise ühtlusest tingituna niivõrd palju, mistõttu oleks vaja leida kesktee.

Teemat on teooria põhjal käsitletud veel põhjalikult allikas [27], kus on püütud leida vajalikke lahendusi.

Filtreeruvuse mõõtmistest objektil

Kuigi kahe rõngaga infiltromeetri tulemused korreleerusid suhteliselt hästi laborimõõtmistega, siis käesolevas uuringus esitatud andmetesse tuleks infiltromeetrit silmas pidades suhtuda siiski ettevaatlikult, kuna kasutusel oli kaheksa objekti andmed. EVSi ja infiltromeetri korrelatsioon oli $R^2 = 0,83$, kuid eemaldades sealt näiteks proovi 720 andmed langeb korrelatsioon $R^2 = 0,59$ peale.

Lisaks ei ole objektil võimalik infiltromeetri katseid teha kruusade või ka kruusliivade puhul, ehk lühidalt öeldes materjalidele, mis sisaldavad kruusaterasid. Sissevalamiskatsed sõltuvad suuresti selle sooritamise, isegi ilmastikust, mistõttu tulemused ei pruugi tulla tõesed. Väga tihti saavutatakse liivpinnaste lõplik tihedus alles peale seda, kui on tehtud ka killustiku tihendamine. Seega ei pruugi olla tagatud kihi vajalik tihedus, mis suurendab materjali filtratsioonimoodulit kunstlikult. Nende mitmete põhjuste tõttu sissevalamiskatseid saab soovitada vaid indikatsiooniks sellekohta, kas materjal võiks omada piisavat filtratsioonimoodulit.

Chapuisi valemist

Uuringus kasutatud materjaliproovide andmete analüüsi tulemusena tuleb järeldada, et Chapuisi valem ei anna piisavalt usaldusväärseid tulemusi, kui materjali mõõdetud filtratsioonimoodul on madal. Näiteks ei sobi drenikihtidesse kindlasti kasutamiseks materjalid 673, 722 ega 733, kuna tegemist oli väga külmaohtlike materjalidega. EVSi järgi oli nende filtratsioonimoodulid vastavalt 0,5, 0,1 ja 0,3 m/ööp, mis omakorda Maanteeameti nõuete kohaselt drenikihti ei sobiks. EVS 901-20 mõõtmisandmeid vaadates oleks taoliste materjalide sattumine drenikihtidesse välistatud (kasutades tabelit 1.3). Tuginedes kruusadega tehtud mõõtmistele võib väita, et tegelikult on nende materjalide filtratsioonimoodulid veelgi väiksemad, kuid see vajab veel täiendavaid katsetusi. Chapuisi valemi järgi arvutades (arvestades juurde ka varuteguri 4) on nende materjalide filtratsioonimoodulid vastavalt 5,97, 2,85 ja 4,5 m/ööp ehk oleksid drenikihtidesse igati sobilikud.

Chapuisi valem oleks sobilik kasutamiseks näiteks sellisel juhul, kui objektil kasutatavast materjalist on mõõdetud filtratsioonimoodul ning on leitud korrelatsioon Chapuisi valemi vahel. Seejärel jätkuks kvaliteedikontroll lähtudes terastikulisest koostisest ja Proctortihedusest, mille abil arvutatakse filtratsioonimoodul, selmet seda regulaarselt mõõta. Nii on võimalik ka katsetatavate proovide tihedust suurendada, kattes suurema osa drenikihis kasutatud materjalist võrreldes tänasega.

Soovitused projekteerimismõõtmistest

Täna kehtivates projekteerimismõõtmistest nõutakse, et teekonstruktsioon peab olema 1,5 m sügavuseni dreniv, mis on külmakerke seisukohalt suhteliselt ohutu lahendus, kuid teatud tingimustes (objektile lähedal oleva sobiliku materjali puudumine) võib osutuda põhjendamatult kalliks. Seetõttu on soovituslik pöörata suuremat tähelepanu veega seotud arvutustele, mis võimaldaks kasutada töökihtides ka mõnevõrra rohkem külmakartlikke pinnaseid. Sarnane võimalus oli varasemates projekteerimismõõtmistest ka olemas.

Eestis täna kehtiv katendiarvutus arvestab, et muldkeha võidakse valmistada külmaohtlikest pinnastest, mille tugevusomadused on otseselt sõltuvuses niiskussisaldusest. Kui teekonstruktsioon peab olema 1,5 m ulatuses dreniv (EVS 901-20:2013 alusel), tähendab see praktiliselt külmaohutute pinnaste kasutamist, mille tugevusomadused ei sõltu (katendiarvutuslikult)

niiskussisaldusest, mis teeb arvutuste jaoks muldkeha kandevõime nii suureks, et katendikihid saavad olla suhteliselt õhukesed, mis omakorda võib põhjustada tegelikult teekatendite aladimensioonimist. Samuti kui muldkeha tugevus on praktiliselt alati sama, ei ole katendiarvutusel enam rolli ning mõistlik oleks üleminek tüüpkatenditele. Näiteks allikas [37] on kaudselt seda ka juba tehtud, kui analüüsi Teeregistri põhjal killustikaluseid sisaldavate teekonstruktsioonide toimivust. Tulemusena jõuti soovituslike minimaalsete asfaltkatete ja killustikaluste paksusteni sõltuvalt teekatendi vajalikust elastsusmoodulist (tabel 4.1)

Tabel 4.1

Soovituslik minimaalne asfaltkatte ja killustikaluse paksus sõltuvalt E_{vaj}

E_{vaj} , MPa	<125	125-180	180-220	220-250	250-300	300-320	320-340
Asfaldikihtide kogupaksused, cm	7	7-11	11-13	13-15	15-18	18-19	19-20
Killustikaluste kogupaksused, cm	15	15-22	22-26	26-30	30-36	36-38	38-41

Ka siis, kui muldkehas kasutada mittedreenivaid (või väga halvasti dreenivaid) pinnaseid, on võimalik lahendada teekonstruktsioon piisavalt tugevana ja külmaohutuna. See eeldab veerežiimiga seonduvate arvutuste ja arvestuste tegemist – dreenihi arvutus, külmakerkearvutus, kapillaartõusuga arvestamine, niiskuspakkonna muutmised jne. Näiteks sisaldub Eesti projekteerimisnormides teekatte minimaalse kõrguse nõue sõltuvalt pinnasvee kõrgusest ja muldkeha töötkoonis kasutatud pinnasest (kui muldkeha on dreeniv, kaotab see tabel mõtte), mis peaks tagama selle, et kapillaartõus ei ulatu teekatendisse (Projekteerimisnormide tabel 3.6). Harri Rõuk, kes konsulteeris käesolevas töös veerežiimiga seonduvate arvutuste osas, kommenteeris, et algselt oli mainitud minimaalse kõrgusena mõeldud kõrgust mitte teekatte pinnast, vaid mulde pealispinnast, mis oleks loogilisem, kuna minimaalne kõrgus arvestatakse pinnasvee kõrgusest, mis ei tohi külmakerkearvutusi silmas pidades olla kõrgemal, kui 1,25 m. Muldkeha minimaalse kõrguse (või pinnasvee vajaliku sügavuse) võiks teoreetiliselt seostada ka otseselt muldkehas kasutatava pinnase kapillaartõusuga.

Kapillaartõus on kindlasti tegur, millega külmema kliimaga piirkondades tuleb arvestada. Soovituslikult tuleb tee tõsta nii kõrgele, et kapillaartõusu front ei ulatuks külmumispiirile, kuid selle saavutamine võib olla väga keeruline. Teine võimalus on kasutada kapillaartõusu katkestavaid kihte.

Kokkuvõte

- Eesmärgiks tuleks võtta tee-ehitusobjektidel või sellele lähedalasuvate materjalide võimalikult laialdane kasutamine võimalikult väheste kuludega. See eeldab projekteerimisfaasis põhjalikke veerežiimiga seonduvaid arvestusi ja arvutusi, millele Eestis on pööratud liiga vähe tähelepanu. Vaid drenivate materjalide kasutamine teekatendi töötsoonis on turvaline variant, kuid võib osutuda ehitamise käigus, olenevalt objekti asukohast, kalliks lahenduseks.
- EVS 901-20:2013 ei ole sobilik kruusade (või ka kruusliivade) filtreeruvuse mõõtmisel, kuna arvesse ei ole võetud kogu lõimiskõvera mõju. Uuringusse kaasatud materjalide katseadmete kohaselt saadakse EVSi kasutamisel looduslike kruusade osas paremad filtratsiooniomadused, kui materjalidel tegelikult on. Kruusade osas tuleb kasutada suurema läbimõõduga mõõtekolvi.
- Kiirendamaks filtreeruvusega seonduvat kvaliteedikontrolli on mõistlik siduda mõõtmisandmed Chapuisi valemiga, mis korreleerus hästi uuringus käsitletud materjalide veejuhtivusega. Chapuisi valem nõuab andmeid terastikulisest koostisest ja Proctorteimiga määratud maksimaalsest tihedusest. Siiski vajab valemi kasutamine võrdlusandmeid, kuna madalamate mõõdetud filtratsioonimoodulite puhul (külmakerkelistes pinnastes) näitas valem üpriski kõrgeid arvutuslikke filtratsioonimooduli väärtuseid, mistõttu sobiksid need justkui ka drenikihtidesse, kuid mida tuleb siiski vältida..
- Uuringusse kaasatud materjalide tugevusomaduste mõõtmine ei võimalda järeldada, et hästifiltreerivad materjalid, mis on ühtlaseteralised, põhjustaksid teekatendite aladimensioonimise kasutades katendiarvutuses käsitletavale liivatüübile vastavaid tabelväärtusi. Kirjanduse andmed viitavad siiski selgelt, et ühtlaseteralistel materjalidel on nõrgemad tugevusomadused kui eriteralistel, mistõttu on sellega mõistlik katendiarvutustes arvestada ja millekohased soovitusel on antud uuringus [27].
- Chapuisi valemi kasutamine filtratsioonimooduli määramisel oleks väga lubav lahendus, kuna kiirendab protsessi oluliselt, kuid Chapuisi valemi tulemus on küsitav materjalide osas, millelt mõõdetav filtratsioonimoodul on madal ja materjal on külmakerkeline. Seetõttu võib valemi kasutamisel drenikihtidesse sattuda materjale, mida sinna paigaldada ei tohi. Teoreetiliselt oleks võimalik kehtestada teatud reeglid, mille ületamisel valemit kasutada enam ei tohi (näiteks peenosiste sisalduse ja C_u omavaheline seos, või miski muu lähtudes näiteks d_{10} , poorsustegurist), kuid need tuleb leida täiendavate katsetuste ja analüüside teel. Võimalik on jätkata ka nii, et analüüsitakse näiteks Soomest saadavate külmakerketestide andmeid, mis ei nõua Eestis täiendavate katsete tegemist.

Viidatud allikad

1. Douglas, R. A. Low-Volume Road Rngineering. Design, Construction, and Maintenance. CRC Press. 2016;
2. Cedegren, H. R. Seepage, Drainage, and Flow Nets, 3rd Edition. Wiley 1997;
3. Acikgoz, O., Rauf, R. Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement. Chalmers University of Technology, 2010;
4. Rust, F.C., S.V. Kekwick, E.G. Kleyn, and E.S. Sadzick, "The Impact of the Heavy Vehicle Simulator (HVS) Test Programme on Road Pavement Technology and Management," Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Wash., Aug. 10–14, 1997;
5. Dawson, A. Water in Road Structures. Movement, Drainage, and Effects. Springer 2008;
6. Barksdale R. D. (1972): *Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials*. Proceeding of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 1972;
7. Ridgeway, H. H. Pavement Subsurface Drainage Systems, Synthesis of Highway Practice 96. Transportation Research Board. 1982;
8. Roadex Permanent Deformation e-learning course;
9. Huang, H. Y. Pavement Analysis and Design, 2 edition. Pearson;
10. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52;
11. Austroads Guide to Pavement Technology. Part 10: Sub-Surface Drainage (AGPT Part 10) (Austroads 2009c);
12. Australian Road Research Board Special report no 35. Subsurface drainage and road structures;
13. Hainin, M. R., Cooley, L. A. Jr., and Prowell, B. D. (2003). An Investigation of Factors Influencing Permeability of SuperPave Mixes. Transportation Research Board. National Center for Asphalt Technology. Auburn, AL;
14. Cooley, L. A. Jr, Brown, and E. R., Maghsoodloo, S. (2001). Development of Critical Field Permeability and Pavement Density Values for Coarse-Graded SuperPave Pavements. National Center for Asphalt Technology. Auburn, AL. CAT Report 01-03;
15. Christopher H. Harris, 2007. Hot Mix Asphalt Permeability: Tester Size Effects and Anisotropy;
16. Jaaniso, V. Pinnasemehaanika konspekt;
17. Koerner, M., R. Designing With Geosynthetics, 5th edition;
18. Moulton, K., L. Highway subdrainage design. Federal Highway Administration. 1980;
19. Muldkeha remondi projekteerimise juhhis 2006-27. Maanteeamet;
20. Pylkkänen, K. Nurmikoulu, A. Routa ja routiminen ratarakenteessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. 22-2015;
21. Saariainen, M. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyd. Ratahallintokeskus. 2008;
22. Nurmikoulu, A. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyyd. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskus 2006;
23. Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohje TIEH 2100029-04;

24. RIL 261-2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet;
25. Brandl, H. Freezing-thawing behaviour of soil and other granular material – influence of compaction;
26. Chamberline, E., J. Frost susceptibility of soil. Review of index test. CRREL Monograph 81-2. 1981;
27. Elastsete teekatendite projekteerimise juhendi pinnaste klassifikatsiooni kohandamine EVS-EN ISO 14688-1 ja 2 klassifikatsioonile. Ühtlaseteralise liiva ($CU < 3$) geotehnilisi omadusi mõjutavad tegurid. TTÜ Teedeinstituut. Maanteeamet 2014;
28. Saarelainen, S. Routimiskertoimen määrittäminen. Menetelmäkuvaus TPPT 7. 2011;
29. Killar, A., Mets M. Liivipinnaste kandevõime. Ehitusgeoloogia kogumik II. Tallinn 1967;
30. Mets M. Liivipinnaste koostis ja tihedus. Ehitusgeoloogia kogumik II. Tallinn 1967;
31. Killar, A. Liivipinnaste elastne ja jäävdeformatsioon. Ehitusgeoloogia kogumik III;
32. Talviste, P., Talpsep, A., Sedman, P. Mineraalmaterjali filtratsioonimooduli seos terastikulise koostisega TTK I etapi 2015.a. vahearuande täiendamine. ITP Projektijuhtimine. Tallinn 2016.
33. Chapuis, R., P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. Springer 2012.
34. Olman, M. Eesti teede külmumissügavuse kaart. TTÜ 2014;
35. EVS-EN 13286-2:2010. Sidumata ja hüdrauliselt seotud segud. Osa 2: Kuivtiheduse ja veesisalduse laboratoorse määramise katsemeetodid. Proctor-teim, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2010.
36. M. Lilleste, Sidumata segude filtratsioonimooduli määramine püsiva rõhuga permeameetriga, Tallinna Tehnikaülikool, 2012.
37. Fortuna-Juks, Ragnar. Killustikust katendikihtide analüüs ja olemus Eestis. TTK 2016;
38. Vaimel, A. Teealade kuivenduse projekteerimise juhend. Tallinn 2002.

LISAD

Lisa 1 – Tampere Tehnikaülikooli kapillaartõusutulemused;

Lisa 2 – Tampere Tehnikaülikooli külmakerketesti tulemused;

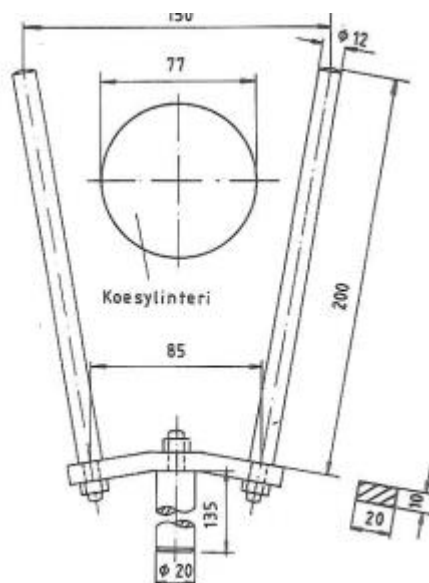
Lisa 3 – Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Geotehnikalabori tulemused;

Lisa 4 – Tampere Tehnikaülikooli kolmetelgse testi tulemused.

LISA 1

KAPILLAARISEN NOUSUKORKEUDEN MÄÄRITYSKOKEET VIRON HIEKOISTA

Kapillaariset nousukorkeudet määritettiin kahdella eri tavalla: niin sanotulla suoralla putkimenetelmällä ja niin sanotulla Sahi-menetelmällä. Suorassa menetelmässä kuiva näyte tiivistettiin läpinäkyvään muoviputkeen. Tiivistys tehtiin koputtelemalla putkea ulkopuolelta huokosluvun minimin (GLO-85) määrittäessä käytetyllä täryraudalla. Täytetty muoviputki laitettiin astiaan, jonka pohjalle vettä noin 20-30 mm. Viikon ajan seurattiin veden kapillaarista nousua näytteeseen. Suurin korkeus, johon veden nähtiin nousevan tulkittiin kapillaariseksi nousukorkeudeksi. Kokeen loputtua tutkittiin näytteen imemän veden määrä määrittämällä vesipitoisuus kastuneen näytteen ala-, keski- ja yläosasta.



Kuva 1. Suoran putkimenetelmän koejärjestelyt ja tiivistyksessä käytetty täryrauta.

Sahi –menetelmässä täysin vedellä kyllästetty näyte asetettiin kuvan 2 mukaiseen laitteeseen. Laitteessa näytteestä alettiin hitaasti imeä alakautta vettä pois alipaineen avulla. Alipaine mitattiin vesipatsaan korkeutena. Korkeus, jossa ilman havaittiin tulevan näytteen läpi tulkittiin kapillaariseksi nousukorkeudeksi. Kokeen lopuksi mitattiin näytteen korkeus ja vesipitoisuus kuivairtotiheyden laskentaa varten.

Molemmissa menetelmissä näytteiden maksimiraekokoa jouduttiin rajoittamaan käytettävissä olleita putkikokoja vastaavaksi. Näytteistä 368, 673 ja 733 seulottiin pois > 16 mm rakeet ja näytteistä 722, 732 ja 803 > 8 mm rakeet. Näytteet 671, 672, 720 ja 769 käytettiin sellaisenaan.



Kuva 2. Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen Sahi-menetelmällä.

Taulukko 1. Kapillaarisuuskokeiden tulokset.

Näyte	Kapillaarinen nousukorkeus [cm]		Vesipitoisuus kokeen jälkeen [% kuivapainosta]				Kuivavirtotiheys kokeessa [kg/m ³]	
			Putkimenetelmä			Sahi		
	Putki	Sahi	yläosa	keskiosa	alaosa		Putki	Sahi
368 < 16 mm	34	17	2,8	5,5	14,1	11,4	1821	1847
671	17	19	8,0		22,6	21,6	1648	1591
672	24	13	8,5		20,0	19,2	1733	1619
673 < 16 mm	37	55	3,1	5,4	10,0	6,5	2036	2009
720	29	17	7,3		20,6	19,9	1687	1595
722 < 8 mm	52	20	3,8	8,0	13,1	15	1840	1789
732 < 8 mm	59	17	3,0	6,3	13,0	16,7	1809	1705
733 < 16 mm	40	19	4,6		11,5	11,3	1720	1822
769	50	32	7,7		22,0	22,9	1603	1542
803 < 8 mm	38	46	8,9		22,1	21	1559	1591

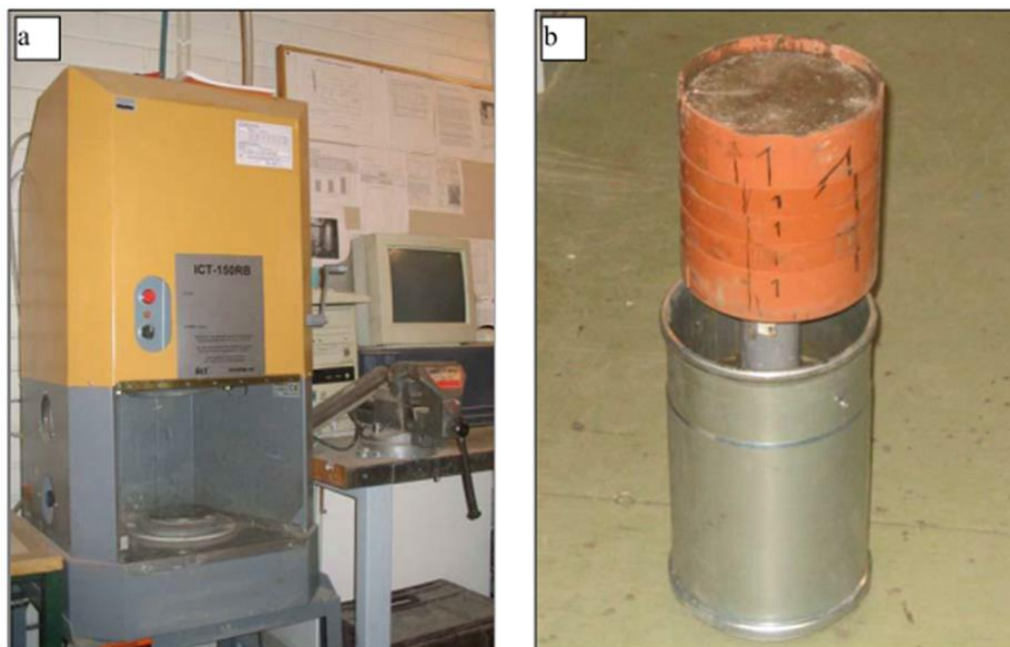
Putkimenetelmällä on tutkituissa näytteissä saatu useimmiten suurempia kapillaarisia nousukorkeuksia kuin Sahi –menetelmällä. Putkimenetelmässä vesi nousee kuivaan näytteeseen ohuina kalvoina myös rakeiden pintoja pitkin. Vesi ei tällöin täytä yläosan huokosia kokonaan mutta näkyy kokeessa näytteen kastumisena. Tämä näkyy hyvin vesipitoisuuksissa: vesipitoisuus pienenee selvästi ylöspäin mentäessä. Tämä tarkoittaa erilaista kyllästysastetta näytteen eri osissa. Alaosan korkeus on noin ½ tai ⅓ putkimenetelmällä määritetystä kapillaarisesta nousukorkeudesta. Putkimenetelmässä alaosan vesipitoisuus on kokeen lopussa lähes sama kuin Sahi –menetelmässä, jossa näyte on kokeen alussa siis täysin veden kyllästämä. Tämän vesipitoisuuden kautta tarkasteltuna voisi tuoda alaosan korkeutta pitää putkimenetelmässä Sahi –menetelmällä määritettyä kapillaarista nousukorkeutta vastaavana. Joissakin putkimenetelmällä tehdyissä kokeissa alaosan suurempi vesipitoisuus näkyi hieman tummempana rajana kuin yläosan perusteella määritetty, vaaleampana näkynyt kapillaarisen nousukorkeuden raja.

Lähteet: GLO-85. Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1. luokituskokeet. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki 1985.

LISA 2

ROUTAKOKEET VIRON HIEKOISTA

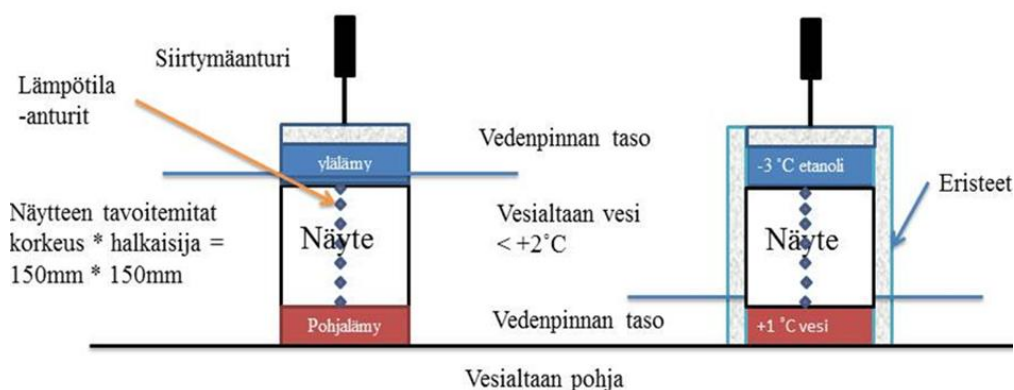
Routakokeet tehtiin TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden laboratoriossa 2000-luvun alusta lähtien käytössä olleella nelipaikkaisella routanousukoelaitteisto, jossa näytteen sisähalkaisija on 150 mm. Näyte tiivistetään kiertotiivistyslaitteella tukimuottia käyttäen viisiosaiseksi paloitetuun muoviputkimuottiin (kuva 1). Koekappaletta varten tarvittava, raekooltaan alle 31,5 mm kiviainesmäärä ja vesimäärä valittiin kokemukseen perustuen tuottamaan tiivistetyn koekappaleen korkeudeksi noin 150 mm (tutkituilla Viron hiekoilla toteutuneet korkeudet 149,8-157,5 mm). Tässä tutkimuksessa hiekkojen vesipitoisuutena routanousukoenäytteen valmistuksessa käytettiin 4-4,5 %.



Kuva 1. Routakoenäytteiden tiivistykseen käytetty kiertotiivistin (a) ja paloitetuun muottiin tiivistetty näyte tukimuotista poiston jälkeen (b) (Nurmikolu 2005).

Routakoe aloitettiin 1 vrk kestäväällä kyllästysvaiheella, jonka aikana näyte myös jäähdytettiin +1 – +2 °C lämpötilaan. Ennen jäädytysvaihetta vedenpinta laskettiin noin 12 mm näytteen pohjan yläpuolelle ja näyte eristettiin XPS-kiekoilla vaakasuuntaisen lämpövirtauksen minimoimiseksi (kuva 2). Vain jäädytys-elementin kuormittama (3 kPa) näyte jäädytettiin luonnonmukaisesti ylhäältä alaspäin keskimääräisen lämpötilagradientin ollessa noin 27 °C/m. Routarajan etenemistä seurattiin näytemateriaalin kylkeen 25 mm välein asennetuilla lämpötila-antureilla. Näytteen pystysuuntaisia muodonmuutoksia rekisteröitiin jäädytys-elementin eristetyn yläpinnan välityksellä siirtymäanturilla, jossa oli pienitehoinen lämmitys anturin jäätymisen estämiseksi. Kyllästys- ja jäädytysvaiheen aikana kaikki neljä routakoeselliä olivat yläpuolelta lämpöeristetyssä altaassa.

Routanousukoejärjestely



Kyllästysvaihe 1 vrk.

Jäädytysvaihe 4 vrk.

Kuva 2. Havainnepiirros vakioidun routakokeen koejärjestelystä (Penttilä 2013).

Taulukko 1. Tulokset routakokeista.

Näyte	Routanousu [mm]		Routimiskerr oin $SP_{0(12-24h)}$ [mm ² /Kh]	Vesipitoisuus kokeen jälkeen [% kuivapainosta]			Kuivairtitiheys kokeessa [kg/m ³]
	24 h	96 h		yläosa	keskiosa	alaosa	
368 < 31,5 mm	2,10	4,03	2,6	12,1	12,5	12,0	2069
671	2,02	3,85	3,2	14,4	15,2	15,4	1897
672	0,31	0,67	0,3	12,0	12,1	13,1	1895
673 < 31,5 mm	8,70	15,14	10,7	6,7	10,6	9,6	2286
720	0,10	0,25	0,1	14,0	14,6	15,7	1768
722	4,77	7,43	5,3	10,9	12,5	13,4	1996
732 < 31,5 mm	2,35	4,56	3,1	12,0	13,0	12,9	1957
733 < 31,5 mm	5,12	8,82	7,6	14,4	14,4	12,6	2081
769	0,69	1,63	0,8	14,8	15,7	15,9	1785
803	1,51	3,14	2,1	12,9	13,8	13,1	1975

Kokeellisesti tutkittujen kapillaaristen nousukorkeuksien ja annettujen rakeisuuksien perusteella tutkitut näytteet on luokiteltavissa routimattomiksi. Rakeisuuteen perustuva luokittelu on kuitenkin herkkä hienoaineksen (< 0,063 mm) ja erityisesti < 0,02 mm aineksen määrälle. Seulonnan tarkkuudesta ja tavasta (kuiva- vai pesuseulonta) riippuen rakeisuuteen perustuvaan routivuuden arviointiin liittyy epävarmuutta. Alle 0,02 mm aineksen määrää näytteistä ei ole selvitetty.

Routakokeiden routimiskertoimien perusteella näytteet 672 ja 720 ovat routimattomia, näyte 769 lievästi routiva, näytteet 368, 671, 732 ja 803 keskimukaisesti routivia ja näytteet 673, 722 ja 733 erittäin routivia kun arviointi tehdään Nurmikolun 2005 esittämän luokittelun perusteella. Routakokeessa näytteiden routivuutta testataan kuitenkin routivuuden kannalta erittäin suotuisissa olosuhteissa : kyllästetty näyte, vettä routimiseen saatavilla ja routarajan ja ”pohjaveden” pinnan etäisyys hyvin pieni. Todellisissa olosuhteissa tutkitut materiaalit eivät välttämättä roudi, jos

olosuhteet eivät ole routimiselle suotuisat tai materiaalista tehdyn rakenteen yläpuoliset kuormat estävät routimisen.

Tutkittujen hiekkamaisten ja soramaisten materiaalien tietyissä tapauksissa odottamattoman voimakas routiminen ei tule yllätyksenä, sillä olemme saaneet rakeisuudeltaan vastaavanlaisilla näytteillä aiemminkin samankaltaisia tuloksia (Pylkkänen, Nurmikolu 2011 ja 2015, Saarinen 2008).

Lähteet

Nurmikolu, A. 2005. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology. Publication 567. Tampere 2005. 235 p., 65 app.

Penttilä, J. 2013. Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikka. Tampere 2013. 113 s., 42 liites.

Pylkkänen, K & Nurmikolu, A 2011, 'Frost Susceptibility of Railway Subballast Materials'. in IHHA 2011, 2011 International Heavy Haul Association Conference, June 19-22. 2011, Calgary, Canada. International Heavy Haul Association Conference, International Heavy Haul Association (IHHA); Canadian Pacific (CP); Canadian National Railway Company; The Railway Association of Canada; National Research Council Canada, pp. 1-5.

Pylkkänen, K & Nurmikolu, A 2015, Routa ja routiminen ratarakenteissa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, no. 22/2015, Liikennevirasto, HELSINKI.

Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A7/2008. Ratahallintokeskus. Helsinki 2008. 75 s., 15 liites.

LISA 3

LISA 4

Kolmiaksaalikokeet

* asiakkaan oman
määrityksen perusteella

50 mm	Näyte	Sellipaine	Vesipitoisuus sullottaessa	Kuivatilavuuspaino	Kuivatilavuuspainon max. *	Kuivatilavuuspainon max. *	Tiliviyaste	Lujuusparametrit (huippulujuus)		Lujuusparametrit (jäännöslujuus)		Kitkakulma (koheesio = 0)		Sellipaine	E50-moduuli	Sellipaine	Vesipitoisuus (kokeen jälkeen)			
		[kPa]	[%]	[kN/m3]	[Mg/m3]	[kN/m3]	[%]	Kitkakulma [°]	Koheesio [kPa]	Kitkakulma [°]	Koheesio [kPa]	Huippu [°]	Jäännös [°]	[kPa]	[MPa]	[kPa]	[%]			
	671	25	4,0	17,0	1,73	17,0	100,1	41,5	9,3	34,4	7,1	43,7	36,6	25	10	25	19,3			
		50	4,0	17,1	1,73	17,0	100,9							50	16	50	18,4			
		100	4,0	17,2	1,73	17,0	101,1							100	19	100	18,5			
	672	25	4,0	17,0	1,8	17,7	96,4	37,9	10,4	33,4	5,1	40,7	35,1	25	8	25	15,9			
		50	4,0	17,6	1,8	17,7	99,6							50	16	50	15,8			
		100	4,0	17,5	1,8	17,7	99,3							100	14	100	15,6			
	720	25	4,0	16,0	1,66	16,3	98,3	40,7	7,9	34,5	5,1	42,6	36,1	25	7	25	18,6			
		50	4,0	15,8	1,66	16,3	97,1							50	9	50	18,0			
		100	4,0	16,0	1,66	16,3	98,5							100	21	100	18,1			
	722	25	4,0	18,3	1,83	18,0	101,9	44,8	13,3	36,9	8,2	47,4	39,4	25	7	25	13,5			
		50	4,0	18,8	1,83	18,0	104,9							50	12	50	12,4			
		100	4,0	18,7	1,83	18,0	103,9							100	17	100	12,8			
	732	25	4,0	17,4	1,75	17,2	101,4	44,6	8,0	35,0	10,8	46,3	38,2	25	7	25	15,2			
		50	4,0	17,4	1,75	17,2	101,3							50	9	50	15,1			
		100	4,0	17,4	1,75	17,2	101,1							100	16	100	14,8			
	769	25	5,0	15,9	1,64	16,1	98,8	40,4	12,6	38,4	1,6	43,3	38,9	25	8	25	19,7			
		50	5,0	15,7	1,64	16,1	97,6							50	12	50	19,9			
		100	5,0	15,8	1,64	16,1	98,2							100	17	100	19,2			
803	25	4,0	17,2	1,65	16,2	106,1	40,2	8,5	34,5	5,6	42,3	36,2	25	7	25	17,9				
	50	4,0	17,0	1,65	16,2	104,8							50	9	50	17,9				
	100	4,0	17,3	1,65	16,2	107,0							100	17	100	17,8				
733 (keskeytynyt)	25	4,0	18,1	1,81	17,8	102,2	41,6	19,4	36,5	9,8	45,9	39,3	25	4	25	13,4				
	50	4,0	18,2	1,81	17,8	102,6							50	9	50	13,6				
	100	4,0	18,1	1,81	17,8	102,0							100	16	100	13,1				
200 mm															sisäpuoli		ulkopuoli		näyteosa	
															[MPa]		[MPa]			
	673	25	4,0	19,8	1,85	18,1	109,1	53,5	73,4	Jäännöslujuuksia ja 0-koheesio määrittämisä ei tehty 200 mm halkaisian näytteille	25	226	113	yläosa	3,5					
		50	4,0	19,8	1,85	18,1	109,1									25	400	232	keskiosa	3,8
		100	4,0	19,8	1,85	18,1	109,1													
	368 (koe 1)	25	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0	46,6	20,2		25	91	57	yläosa	4,0					
		50	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0									50	189	126	keskiosa	4,3
		100	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0													
	368 (koe 2)	25	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0	48,4	13,5		25	97	59	yläosa	3,7					
		50	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0									50	211	152	keskiosa	3,9
		100	4,0	17,6	1,85	18,1	97,0													
	733	25	4,0	17,6	1,81	17,8	99,1	48,5	26,4		25	93	61	yläosa	3,7					
		50	4,0	17,6	1,81	17,8	99,1									50	217	143	keskiosa	3,8
		100	4,0	17,6	1,81	17,8	99,1													

