



**Rainer Vaidla**

**FILTRATSIOONIMOODULI SEOS  
PINNASE TERASTIKULISE  
KOOSTISEGA**

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond  
Teedehituse eriala

Tallinn 2015

Mina

Rainer Vaidla

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Lõputöö autor

Rainer Vaidla

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Üliõpilase kood 100820074

Õpperühm KTEI 81

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendaja

Sven Sillamäe

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Konsultandid

.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Kaitsmisele lubatud „.....“ .....20....a.

Ehitusteaduskonna dekaan.....

Teaduskonna nimetus

Nimi ja allkiri

Ehitusteaduskond

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Rainer Vaidla**  
Üliõpilase kood: 100820074  
Õpperühm: KTEI 81  
Eriala: Teedehitus (kood: 1821)  
Lõputöö teema: **FILTRATSIOONIMOODULI SEOS PINNASE TERASTIKULISE  
KOOSTISEGA**

Lähteandmed töö koostamiseks:

AS Teede Tehnokeskuse poolt väljastatud katseandmed terastikulise koostise, filtratsioonimooduli ja proctor katse kohta.

Töö koosseis, lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Analüüsida materjalide sõelkõvera ja välja selgitada sõelkõvera välja piirväärtused, mille puhul saaks materjali terastikulise koostise katsetulemuse järel veenduda, et katsetatav materjal omab teekonstruktsioonis projektset filtratsioonimoodulit maksimaalsel tihedusel. Võrrelda empiiriliste valemite arvutustulemusi reaalse mõõteväärtusega ning sobivuse korral lihtsustada filtratsioonimooduli määramise protsess.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht: 58 lk

Lõputöö juhendaja:	Sven Sillamäe (nimi)	(allkiri)	(kuupäev)
Lõpetaja:	Rainer Vaidla (nimi)	(allkiri)	(kuupäev)
Kinnitaja:	Martti Kiisa Ehitusteaduskonna dekaan	(allkiri)	(kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 30.03.2015  
Lõputöö esitamise tähtaeg: 11.05.2015

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. VEEJUHTIVUS PINNASES.....	8
1.1. Veejuhtivus.....	8
1.2. Darcy seadus.....	9
1.3. Filtratsioonimoodul .....	10
1.4. Filtratsiooni olulisus pinnases ja teekonstruktsioonis .....	10
1.5. Filtratsioonimoodulit mõjutavad tegurid.....	10
1.5.1. Poorsus ja poorsustegur.....	10
1.5.2. Terastikuline koostis .....	11
1.5.3. Kapillaartõus .....	13
1.5.4. Küllastunud ja küllastamata pinnas.....	14
1.5.5. Külmakeerge ja pinnase vee külmumine .....	14
1.6. Dreenkiht teekonstruktsioonis .....	15
1.7. Maanteeameti juhendid ja normid .....	17
1.8. Filtratsioonimooduli ehk veejuhtivuse määramine.....	17
1.9. EVS 901-20:2013 .....	18
1.9.1. EVS-EN 13286-2 Proctor-teim .....	18
1.9.2. EVS 901-20 katsetoodika lühikirjeldus.....	18
1.9.3. Katse läbiviimine.....	19
1.9.4. Katse hindamine .....	20
2. FILTRATSIOONIMOODULI KATSETE ANALÜÜS .....	21
2.1. Sõelkõvera väli 0,2 m/ööpäevas .....	22
2.2. Sõelkõvera väli 2,0 m/ööpäevas .....	25
2.3. Sõelkõvera väljad ja nende kasutamine.....	30
2.3.1. Sõelkõvera väli 0,2 m/ööpäevas.....	31
2.3.2. Sõelkõvera väli 2,0 m/ööpäevas.....	33
2.4. Filtratsioonimooduli määramine empiiriliste seoste abil.....	35
2.4.1. Amer ja Awad`i valem .....	36

2.4.2.	Kozeny – Carman`i valem.....	36
2.4.3.	Chapuis`i valem.....	37
2.4.4.	Terzaghi valem.....	38
2.4.5.	U.S Bureau of Reclamation (USBR) valem.....	39
2.4.6.	Hazen`i valem .....	40
2.4.7.	Varasemad uuringud .....	41
2.5.	Riikide sõelkõverad külmakerke hindamiseks .....	42
2.5.1.	Ühendkuningriik.....	42
2.5.2.	Soome.....	44
2.5.3.	Venemaa ja Kasahstan .....	48
2.6.	USA graafik filtratsioonimooduli määramiseks .....	49
KOKKUVÕTE.....		52
SUMMARY .....		54
VIIDATUD ALLIKAD.....		56
Lisa 1. Empiiriliste seoste arvutustabel.....		58

## SISSEJUHATUS

Veel on teekonstruktsioonidele suur mõju. Seetõttu on vee mõju mõistmine ja selle liikumise käsitlemine oluline saavutamaks pikaealisi teekonstruktsioone. Eestis on aktuaalne teema teede lagunemine. Üheks peamiseks põhjuseks teede lagunemisel on halvasti drenivad pinnased. Madala filtratsiooniga pinnased soodustavad kapillaarveetõusu, mis omakorda tekitab külmakestet. Teedeehituses tuleb tagada vee kiire äravool katendist, mis kindlustab konstruktsiooni tugevuse. Vastasel korral liigniiske materjal vähendab tee kandevõimet ja põhjustab ebaühtlast vajumist. Eesti paikneb geograafiliselt sademete rohkes piirkonnas ja kliimaatiliselt külmal alal, kus esineb vee külmumis-sulamis protsesse. Seega tuleks kasutada hästi filtreeruvaid materjale, mis tagaks vee kiire äravoolu ja külmakindla katendi.

2013. aastal koostati rahvuslik katsestandard, EVS 901-20, mulde- ja drenikihi ehituseks kasutatavate materjalide filtratsioonimooduli määramiseks Proctorteimi (EVS-EN 13286-2) maksimaalsel tihedusel. Katsemetoodika miinuspoolena tuleb välja tuua ressursimahukuse – katse sooritamine on võrdlemisi ajamahukas ning sellest tulenevalt tellijatele ka kallis.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on võimalusel välja selgitada sõelkõvera välja piirväärtused, mille puhul saaks materjali terastikulise koostise katsetulemuse järel veenduda, et katsetatav materjal omab teekonstruktsioonis projektset filtratsioonimoodulit maksimaalsel tihedusel. Kui mõõtetulemuste analüüs annab selge korrelatsiooni filtratsioonimooduli ja lõimise vahel enamikele pinnastele, suudetakse võita märkimisväärselt aega ja raha tehes reaalne mõõtmine vaid pinnastele, mille osas on tulemus ebaselge.

Teaduskirjanduses on välja toodud mitmeid valemeid filtratsioonimooduli arvutamiseks pinnase terastikulise koostise alusel. Teine eesmärk on võrrelda arvutustulemusi reaalse mõõteväärtusega ning sobivuse korral lihtsustada filtratsioonimooduli määramise protsessi veelgi, kuna valemiga saab veeläbilaskvuse arvutada kohe, kui pinnase lõimise andmed on sisestatud tabelisse.

Käesolev lõputöö on jaotatud kaheks peatükiks. Esimeses peatükis seletatakse lahti filtratsioonimooduli mõiste, selle olulisus ja peamised mõjutegurid. Lisaks tuuakse välja, Maanteeameti nõuded filtratsioonimooduli väärtustele ja kirjeldatakse drenkihti teekonstruktsioonis. Teises peatükis analüüsitakse sõelkõvera välja piirväärtuseid, arvutatakse empiiriliste seoste abil filtratsioonimoodul ja võrreldakse erinevate riikide külmakerke graafikuid.

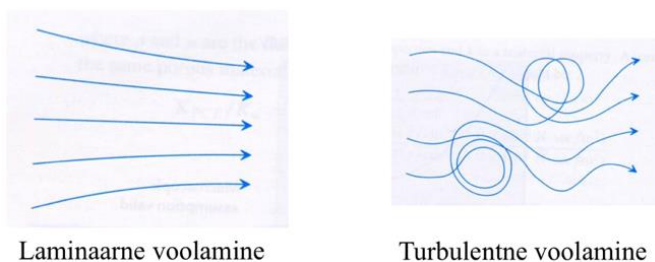
Töö põhineb AS Teede Tehnokeskuse poolt väljastatud katseandmetele 89 proovi osas.

# 1. VEEJUHTIVUS PINNASES

## 1.1. Veejuhtivus

„Veejuhtivus on pinnase omadus lasta endast pooride kaudu vett läbi. Vee voolamine võib toimuda mitmesugustel põhjustel. Tähtsaim neist on gravitatsioonijõud, kuid teatud juhtudel võib see olla tingitud kapillaarjõust, temperatuuride vahest, osmootilisest rõhust või mõnest muust tegurist“ [1, p. 31].

Vesi liigub pinnases läbi tühimike ja pooride. Vee liikumine võib olla laminaarne ehk aineosakesed liiguvad korrapäraselt või turbulentne, kus voolamine toimub korrapäratult. Mida väiksem on vee liikumise kiirus ja voolukanali läbimõõt ning mida suurem on vedeliku viskoossus, seda suuremad on eeldused, et liikumine on laminaarne. Turbulentseks võib voolamine muutuda ainult väga jämedateralistes pinnastes ja kalju lõhedes. Pinnastes on pooride suurus ja vee liikumise kiirus sedavõrd väiksed, et voolamine enamasti laminaarne [1, p. 31]. Vee liikumine pinnases on alljärgneval joonisel (Joonis 1).



Joonis 1. Vee liikumine pinnases [2]

Laminaarse voolamise puhul kasutatakse veejuhtivuse iseloomustamiseks filtratsioonimoodulit, mille saab leida empiirilise Darcy valemiga (1) [1, p. 31]:

$$v = k * I, \tag{1}$$

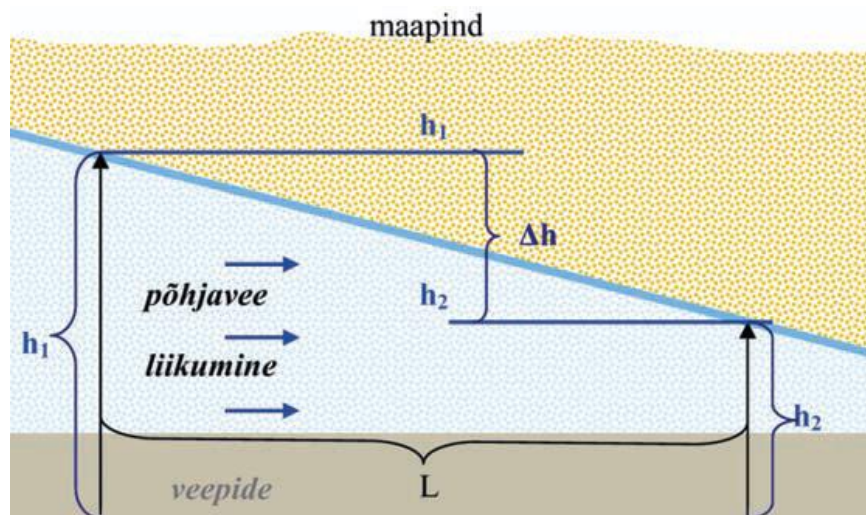
kus  $q$  -filtratsioonikiirus;  
 $k$  -filtratsioonimoodul;

$I$  -hüdrauliline gradient.

## 1.2. Darcy seadus

Darcy seadus kõlab järgmiselt:

põhjavee kogus ( $Q$ ), mis läbib ajaühikus kivimit, on võrdeline rõhu langusega ( $\Delta h$ ) ning veevoolu ristlõike pindalaga ( $A$ ) ja pöördvõrdeline vee liikumise tee pikkusega ( $L$ ). [3, p. 12]



Joonis 2. Vabapinnalise põhjavee liikumine [3, p. 12]

Darcy seadus leitakse valemiga (2) [3, p. 12]:

$$Q = k * A * \frac{\Delta h}{L}, \quad (2)$$

kus

$Q$  -vee vooluhulk;

$L$  -vee liikumise tee pikkus;

$A$  -ristlõike pindala;

$k$  -pinnase filtratsiooni koefitsient;

$\Delta h = h_2 - h_1$  on rõhkude vahe.

$\frac{\Delta h}{\Delta l}$  tähistatakse tavaliselt  $I$  ja nimetatakse hüdrauliliseks kaldeks ehk gradiendiks. [3, p. 12]

### **1.3. Filtratsioonimoodul**

Filtratsioonimoodul on pinnase veeläbilaskvust iseloomustav suurus. Filtratsioonimoodul sõltub lõimisest ehk pinnast moodustavate osakeste suurusest. Näiteks liivade filtratsioonimoodul on kümneid või sadu kordi suurem kui peenematest saviosakestest moodustunud savipinnasel. Sügavuse suurenedes filtratsioonimooduli väärtus väheneb. Filtratsioonimoodulit tähistatakse tavaliselt  $K_f$ -ga ning ühikuks on m/ööpäevas. [4]

### **1.4. Filtratsiooni olulisus pinnases ja teekonstruktsioonis**

Infrastruktuur on majanduses väga olulisel kohal ja see mõjutab tugevalt ühiskonna igapäevaelu. Projekteerides teekonstruktsiooni, peaks insener kasutama filtreerivaid materjale, vastasel korral mittefiltreeruv katend põhjustab teedes deformatsioone. „Teekatend (katend) on mitmekihiline looduslikust või sideainega töödeldud kivimaterjalidest konstruktsioon, mis võtab vastu ja hajutab liiklusvahendite rataste koormuse muldkeha pinnasele“ [5, p. 6]. Sellised deformatsioonid nagu külmakeerge, pragunemine ja roopad teedel on igapäevased probleemid, mis on seotud mittepiisava filtratsioonimooduliga. Vee mõju katendile koos raske liiklusega, on üks suuremaid põhjuseid miks teed lagunevad. Väike veesisaldus pinnases võib märkimisväärselt vähendada teekonstruktsiooni mehaanilisi näitajaid, sealhulgas kiirendades selle lagunemist. Teekonstruktsiooni filtratsioonil on väga oluline osa teedehituses. [6, p. 300]

### **1.5. Filtratsioonimoodulit mõjutavad tegurid**

Filtratsioonimoodulit mõjutavad peamiselt pinnases olevate pooride mõõtmed, hulk ja terastikuline koostis. Filtreerimiskiirust läbi aja mõjutab veel pinnase poorsustegur, küllastusaste ja vedeliku viskoossus, mis omakorda sõltub vee temperatuurist. [6, p. 34] Pinnase deformeerumine, sealjuures mahu- ja kujumuutus on seotud poorsuse muutusega. [1, p. 7]

Sõltudes eelmainitud teguritest, on filtratsioonimooduliga seotud veel kapillaartõus ja külmakeerge.

#### **1.5.1. Poorsus ja poorsustegur**

Poorsuseks nimetatakse tühimikke ja lõhesid, mida esineb pinnaseosakeste vahel. Pooride suurusest ja arvust sõltub vee kogus, mis pinnast läbida saab. Pooride suurenemisel suureneb pinnase veeläbilaskvus. Kui poorid on liiga väikesed, nagu näiteks savide puhul, siis pinnas võib isegi 50 % poorsuse juures olla praktiliselt vettpidav. Mida rohkem on ühesuuruseid osakesi pinnases, seda paremini lasevad materjalikihid vett läbi. Kui pinnases esineb palju peenosakesi, siis need täidavad

ära suuremad poorid, mistõttu veejuhtivus tunduvalt halveneb. [7, p. 8] Poorsust määratakse pooride mahu ja pinnase üldmahu suhtena protsentides. Poorsust tähistatakse tähega „n“, mis on pooride mahu ja pinnase kogumahu suhe ja seega kirjutatav valemiga (3) [1, p. 23]:

$$n = \frac{V_p}{V_t + V_p} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (3)$$

kus  $V_p$  -pooride maht pinnases;  
 $V_t$  -mineraalosade maht;  
 $\rho_d$  -kuivmahumass;  
 $\rho_s$  -erimass (pinnase osakeste mahumass).

Poorsustegur on pinnase pooride ja terade mahusuhe, mida kasutatakse poorsuse iseloomustamiseks. Pooride mahu muutus, näiteks pinnase tihendamisel, on võrdeline poorsusteguriga, kus koos pooride mahuga muutub kogumaht, aga terade arv jääb muutumatuks. [1, p. 24] Poorsustegurit tähistatakse tähega „e“, ja see leitakse valemiga (4) [1, p. 24]:

$$e = \frac{V_p}{V_t} = \frac{\rho_d}{\rho_s} - 1, \quad (4)$$

kus  $V_p$  -pooride maht pinnases;  
 $V_t$  -mineraalosade maht;  
 $\rho_d$  -kuivmahumass;  
 $\rho_s$  - erimass (pinnase osakeste mahumass).

Poorsus ja poorsustegur on omavahel seotud ja arvutatavad juhul kui ühe suurus on teada, alljärgnevate seostega (5) [1, p. 24]:

$$e = \frac{n}{1 - n} \qquad n = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

### 1.5.2. Terastikuline koostis

Pinnased koosnevad tavaliselt erineva suurusega osakestest ja seda iseloomustab terastikuline koostis ehk lõimis. Olevalt terade suurusest ja arvust pinnas liigitatakse ning antakse nimetus. Pinnase saab

liigitada jämeteraliseks (kruus ja liiv) ja peeneteraliseks (möll ja savi), mõlemad erinevad üksteisest oluliselt. Põhilised erinevused on tabelis 1. [1, p. 16]

Tabel 1

Jäme- ja peeneteralise põhilised erinevused [1]

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

Parema ülevaate saamiseks terastikulisest koostisest jaotatakse pinnaseosakesed kindlate mõõtmetega rühmadesse, mida nimetatakse fraktsioonideks. [8, p. 35]

Tabel 2

Pinnaseosakeste liigitus fraktsioonideks terasuuruse järgi [9]

<b>Fraktsioon</b>	<b>Alafraktsioon</b>	<b>Rahvusvaheline tähis</b>	<b>Osakeste suurus, mm</b>
<b>Väga jäme pinnas</b>	Suured rahnud	LBo	>630
	Rahnud	Bo	>200 kuni 630
	Veerised	Co	63 kuni 200
<b>Jäme pinnas</b>	<b>Kruus s.h.</b>	<b>Gr</b>	<b>&gt;2 kuni 63</b>
	Jämekruus	CGr	20 kuni 63
	Kesk kruus	MGr	6.3 kuni 2.0

<b>Fraktsioon</b>	<b>Alafraktsioon</b>	<b>Rahvus- vaheline tähis</b>	<b>Osakeste suurus, mm</b>
	Peenkruus	FGr	2 kuni 6,3
	<b>Liiv s.h.</b>	<b>Sa</b>	<b>&gt;0,063 kuni 2</b>
	Jämeliiv	CSa	0,63 kuni 2
	Keskliiv	MSa	0,2 kuni 0,63
	Peenliiv	FSa	0,063 kuni 0,2
	<b>Möll s.h.</b>	<b>Si</b>	<b>&gt;0,002 kuni 0,063</b>
<b>Peenpinnas</b>	Jämemöll	CSi	0,02 kuni 0,063
	Keskmöll	MSi	0,0063 kuni 0,02
	Peenmöll	FSi	0,002 kuni 0,0063
	<b>Savi</b>	<b>Cl</b>	<b>≤0,002</b>

Pinnase terastikulisel koostisel ehk lõimisel on suur mõju pinnase omadustele ja veejuhtivusele. Filtratsioonimoodul sõltub suuresti lõimise jaotusest ja peenosise sisaldusest. Filtreerimisvõimele omavad suurt mõju peenmõlli (< 0,006 mm) ja saueosiste (<0,002 mm) sisaldused, kuid need pole ainuüksi määravad, sest sarnaseid peenosi leidub nii drenivatel kui vähem drenivatel pinnastel. Peenliiva (<0,2 mm) ja erineva suurusega mölli (<0,06 mm) osiste sisalduse omavahelises kombinatsioonis tekib selline terakoostis, mis vähendab pinnase filtratsioonivõimet. [10, p. 14]

### **1.5.3. Kapillaartõus**

Kapillaartõus tähendab vedeliku omadust tõusta pindpinevuse toimet üle vaba vee pinna. Kapillaarvee tõusu kõrgus varieerub mõnest sentimeetrist jämedateralises materjalis kuni mõne meetrini peeneteralises pinnases. [6, p. 26] Liivades, kus terade läbimõõt on suurem kui 2,5 mm, vee kapillaartõus praktiliselt puudub. Tolmsetes ja savikates kivimites võib kapillaarne vee tõus olla kuni 12 m. Kapillaarvee maksimaalset kõrgust, milleni vesi võib tõusta, nimetatakse kapillaartõusu piirväärtuseks. [7, p. 5] Kapillaartõusule avaldab mõju pinnase küllastusaste. Küllastusaste näitab, kui suures mahus on pinnase poorid veega täitunud.

Tabel 3

## Pinnase kapillaartõus [9]

<b>Pinnas</b>	<b>Kapillaartõus, m</b>
Kruus, liiv	Kuni 0,3
Peenliiv, möll	0,3...1,5
Möll	6...12
Sõmer pinnas, mölli sisaldus üle 20%	1,5...6
Savi	Väga suur, kuid väikese filtratsiooni tõttu aeglane

**1.5.4. Küllastunud ja küllastamata pinnas**

Veeküllastunud olek pinnases tähendab, et poorid on täielikult täidetud veega. Allpool pinnasveetasel on pinnas veega küllastunud ja vesi liigub horisontaalselt. Kapillaarjõudude mõjul tõuseb vesi pinnase poorides pinnasveetasemest pisut kõrgemale, mille tulemusel poorid täituvad veega. Üldiselt kõik filtratsioonimooduli leidmise katsetused tehakse veeküllastunud pinnasega, sest siis on tagatud vee sujuv liikumine, andes võimalikult täpse tulemuse.

Küllastumata pinnases on poorid täidetud vee ja õhuga. Õhuga täidetud poorid takistavad vee ühtlast liikumist pinnases, mille tulemusel materjali filtreerimisvõime väheneb. Vesi liigub küllastumata pinnases ülemistest kihtidest alumiste poole.

**1.5.5. Külmakeerge ja pinnase vee külmumine**

Vee maht külmudes suureneb ligikaudu 9%, mille tõttu suureneb ka pinnase maht ja see põhjustab teedel külmakeiget. Kuna pinnase kogumahust moodustab vee maht vaid osa, enamasti alla poole, siis vee paisumine jäätumisel ei saa tekitada pinnase mahu suurenemist üle 3-4%. [1, p. 39] Pinnase veerežiimi mõjutavad aastaringsed temperatuurimuutused, mille tulemusena vesi on pidevas liikumises soojemast kihist külmema poole. [9, p. 23]

Muldkeha külmumisel moodustub temperatuuride vahe +4...+6 °C –st kuni miinuskraadideni pinnase ülemises külmunud kihis. Temperatuuri erinevus põhjustab vee (veeauru) liikumist soojemast pinnasest külmumispiiri poole. Veeauru liikumiseks on mitu võimalust [9, p. 23]:

- niiskus võib ümber paikneda mööda pinnaseosakesi ümbritsevaid veekilesid;
- veeauru liikumine (pooride kaudu) soojematelt aladelt külmematele, kondenseerudes ülemiste kihtide madalama temperatuuriga pinnaosakeste peale;
- veel külmumata vee kapillaartõus külmunud kihti ( jääkristallide teke).

Vee külmumist pinnases saab jagada kaheks – esmane on vee paisumine poorides ja teine vee täiendav juurdevool külmumispiirkonda ning jääläätsede teke [9, p. 23]. Kui sügavamal kihtides asuv vesi on kapillaaride kaudu ühenduses jäätumispiirkonnas asuva veega, hakkavad vee molekulid liikuma jäätumise suunas kuni püsib kontsentratsioonide vahe. Kapillaartõus ei ulatu külmumissügavuseni ja vee lisandumist ei toimu kui pinnasevee tase on piisavalt sügaval. [1, p. 40] Külma mõju võib sõltuda pinnase teramõõdust, poorsusest, vee olemasolust ja temperatuuri muutustest. Pinnase kiirel külmumisel teradel olev veekile külmub, poorid sulguvad ja vee liikumine aeglustub. Vee liikumist külmumispiirkonda vähendab mulde ja katendi omakaalust tekitatud surve pooriveele, mis püüab vett välja tõrjuda. [9, p. 23]

Veetõus pinnases on seda suurem, mida peenemad on pinnaseosakesed. Eelnevaga seoses väheneb ka pooride läbimõõt, millega suureneb vee liikumistakistus ja veetõus aeglustub. [9, p. 23] Kruusade ja jämeliivade puhul külmakerke oht praktiliselt puudub, sest kapillaartõusu kõrgus on väike. Puhastel savidel on kapillaartõusu kõrgus suur, kuid väikse veejuhtivuse tõttu jääb veekogus külmaperioodi jooksul väikseks. Kõige külmakerkeohtlikumad on möllpinnased. Pinnase teeb külmakerkeohtlikuks peamiselt peenemate kui 0,02 mm terade sisaldus ja kui neid esineb alla 1%, siis pinnases külmakerkeid enamasti ei esine. [1, p. 40]

Pinnased, milles puuduvad väiksemad kui 0,125 mm terad on hea filtratsiooni tõttu täiesti külmakindlad. Pinnase paisumist ei teki kui mulde ja liikluskoormuse all surutakse paisunud jää ja vesi ühendatud pooride kaudu allapoole. Külmakerge võib ilmned vaid survealises vees. [9, p. 23] Filtratsioonimoodul on tugevas seoses külmakerkega, sest mitte filtreeruv pinnas on külmatundlik.

## **1.6. Dreenkiht teekonstruktsioonis**

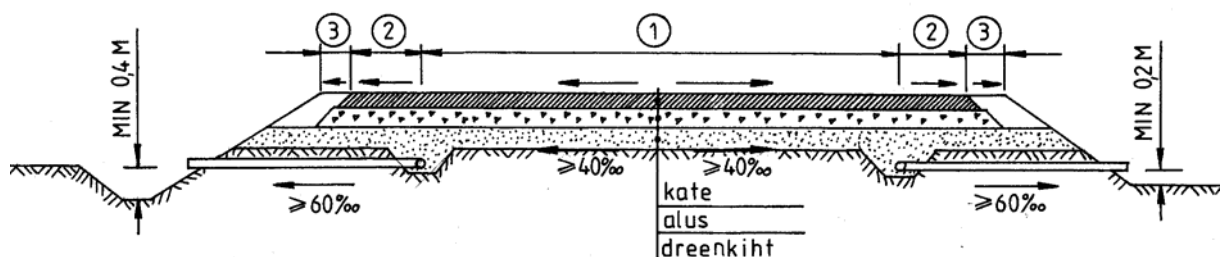
Vesi võib teekonstruktsiooni sattuda mitmel põhjusel. Peamiselt vesi pääseb katendisse läbi katte pragude ja vuukide või imbub peenardest alusesse. Teedeehituses kasutatakse vete ära juhtimiseks drenkihti, mis rajatakse liivast, kruusast, killustikust ja teistest jämedatest sõmermaterjalidest. [9, p. 34]

Dreenkiht on katendi kõige alumine osa, mille peamiseks ülesandeks on läbi katte ja aluse imbuva sademete vee eemaldamine muldkeha nõlvadele, kust see valgub veeviimaritesse või filtreerub pinnasesse. Dreenihi ülesandeks pole kapillaartõusu katkestamine. Muldkeha peab olema projekteeritud nii, et kapillaarvee tõus ei ulatuks dreenihi alapinnani. See tagatakse muldkeha kõrgusega pinna- ja vee suhtes või erandjuhtumil muldkeha sisse ehitatud kapillaartõusu katkestavate spetsiaalsete kihtide või pinnaseveetaseme alandamisega sügavdrenaaži abil. [5, p. 34]

Vee väljadreenimine pole ainuke dreenihi ülesanne, vaid vajadusel ka selle lühiajaline hoiustamine (kevadel sulamisperioodil, kui mulde ääred on veel külmunud). Sellisel teel masinate sõitmine tekitab üleniiskunud pinnases hüdrodünaamilise surve, pinnase vastupidavus nihkele väheneb ja tihti lõpeb kogu protsess katte purunemisega. Halvasti filtreerivad materjalid sellist ülesannet täita ei suuda. Alloleval joonisel on ära näidatud üks võimalik dreenihi konstruktsioon (Joonis 3).

Dreenkiht aitab ära hoida järgmisi probleeme [11]:

- Teekonstruktsiooni kandevõime vähenemine ja püsivate deformatsioonide teke – niiskus ja halvasti filtreeruvad materjalid soodustavad teedel püsivate deformatsioonide teket. Madala filtratsioonimooduliga pinnas küllastub veega, kus raskeliikluse tõttu tee kaotab ettenähtud kandevõime;
- Pinnase vee külmumine ja külmakerge – vee imbumine teekonstruktsiooni teega külgnevatelt aladelt, põhjustades jääläätsede teket ja külmakerget katte pinnal;
- Katendi eluea vähenemine ja ülalpidamiskulude kasv – filtreerimisvõime parandamine tee kriitilistes kohtades, võib katendi eluiga pikendada pooleteist kuni kaks korda.



Joonis 3. Dreenihi konstruktsioon. 1-Sõidutee; 2-kindlustatud peenar; 3-tugipeenar [5]

## 1.7. Maanteeameti juhendid ja normid

Maanteeameti käskkirja nr 0069 (filtratsioonimooduli määramine) alusel tuleb teede projekteerimise ja teetööde hangete korraldamisel juhinduda järgmistest nõuetest [12]:

- Teetöödel kasutatavate pinnaste filtratsioonimoodul tuleb määrata maksimaalse standardtiheduse EVS-EN 13286-2 järgselt ning optimaalse niiskuse juures GOST 25584-90 lisa 5 kohaselt kuni vastavasisulise rahvusliku standardi EVS 901-20 jõustumiseni. EVS-EN 13286-2 järgsed katseandmed tuleb esitada filtratsioonimooduliga ühes ja samas laboriprotokollis;
- Dreenihi filtratsioonimoodul peab olema 1. ja 2. niiskuspaikkonnas vähemalt 1m/ööp ja dreenukihi paksus vähemalt 20 cm;
- Dreenihi filtratsioonimoodul 3.niiskuspaikkonnas peab olema vähemalt 2 m/ööp ja dreenukihi paksus vähemalt 30 cm;
- Ehitatava muldkeha filtratsioonimoodul aktiivsoonis (katte pinnast kuni 1,5 m sügavuseni) peab olema 0,5 m/ööp.

## 1.8. Filtratsioonimooduli ehk veejuhtivuse määramine

Filtratsioonimooduli määramiseks on kaks üldist kategooriat [13]:

- Eksperimentaalne lähenemine, mille järgi filtratsioonimoodul määratakse katsete abil, lähtudes Darcy seadusest;
- Empiiriline lähenemine, mille järgi veejuhtivus on korrelatsioonis pinnase omadustega-terasuuruse ja poori suuruse jagunemine ning lõimimine.

Eksperimentaalne lähenemine jaguneb kaheks [13]:

- Laboratoorsed katsed, kasutades pinnaseproove sõltuvalt teostatavatest katsetest;
- Välitööd, mis omakorda jagunevad suuremõõtmelisteks nagu pumbakatsed kaevudes või olemasolevate dreenuažisüsteemide töö jälgimine ja väiksemõõtmelisteks (veetaseme jälgimine pinnase avaustes).

Empiirilise lähenemise puhul kasutatakse erinevaid seoseid, lähtudes pinnase omaduste lihtsamalt määratavatest näitarvudest [1, p. 34].

Käesolevas lõputöös käsitletakse peamiselt eksperimentaalset lähenemist, sest selline lähenemine tagab võimalikult täpsed andmed, aga vähesel määral analüüsitakse ka empiirilisi seoseid.

## **1.9. EVS 901-20:2013**

EVS 901-20 on standard, mis kirjeldab liiva filtratsioonimooduli määramist optimaalse veesisalduse juures tihendatud proovi, maksimaalsel kuivtihedusel. Selle standardi eesmärk on sätestada ühtne meetod Eesti teedehituses kasutatavate pinnaste ja täitematerjalide filtratsiooniomaduste operatiivseks määramiseks. [14]

Selles standardis määratakse teede- ja tsiviilehituslikes töodes drenkihi ja muldkeha materjalina kasutatavate peen- ja fraktsioneerimata täitematerjalide ning pinnaste filtratsioonimooduli määramise katsemeetod. [14]

### **1.9.1. EVS-EN 13286-2 Proctor-teim**

Proctor-teimi katse käigus pinnaseproov tihendatakse terasest vormi, kasutades selleks määratud tihendamisenergiaga tihendushaamrit. Proctor-teim koosneb vähemalt viiest üksikust osaproovist, erinevatel veesisaldustel ja võimaldab määrata sõltuvuse veesisalduse ( $w$ ) ja kuivtiheduse ( $\rho_d$ ) vahel. Katse eesmärgiks on määrata maksimaalne kuivtihedus. Proctor-tihedus tähistab laboratoorset võrdlustihedust, mis on määratud kuivtiheduse ja veesisalduse vahelisest seosest tüüpiliselt graafiku haripunktina. Mõnede materjalide puhul esineb erandjuhte, kui veesisalduse ja kuivtiheduse graafikul ei moodustu selgelt eristuvat haripunkti. Proovid tihendatakse vormis (A) 2,5 kg haamriga, kasutades selleks igast koondproovist üht eelnevalt ettevalmistatud proovi fraktsiooniga 0/4 mm. [14]

### **1.9.2. EVS 901-20 katsetoodika lühikirjeldus**

Katsetoodika tegemiseks, tuleb võtta koondproov standardi EN 13286-1 lisas A kirjeldatud protseduuri kohaselt nii, et see esindaks partii keskmisi omadusi. Koondproov tuleb laboris jagada kaheks esindusprooviks, millest ühele määratakse terastikuline koostis standardi EN 933-1 protseduuri kohaselt. Kui proovi peenosiste sisaldus (0.063 mm) on suurem kui 8%, siis võib filtratsioonimooduli määramise edasise protseduuri jätta tegemata ja proovi lugeda mittefiltreeruvaks ja esitada protokollis tulemuseks  $K < 0,1$  m/ööp. [14]

Teine esindusproov sõelutakse läbi 4 mm avadega katsesõela ja sõela läbinud osa jagatakse seejärel omakorda kaheks piisava suurusega prooviks, millest ühega sooritakse Proctor-teim ja teisega filtratsioonimooduli määramine. Teine ettevalmistatud proov jagatakse kolmeks või enamaks osaprooviks nii, et igaüks oleks massiga vähemalt 450 kg. Enne katsete sooritamist kuivatatakse proov ahjus ühtlase massini temperatuuril  $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Osaproovidele lisatakse mõõtesilindriga

vesi ja niisutatakse optimaalse veesisalduseni ning segatakse ühtlaselt läbi. Osaproovid suletakse seejärel õhukindlalt ja hoitakse ühtlase niiskuse tagamiseks vähemalt 0,5 tundi. Osaproovidega teostatakse filtratsioonimooduli määramise katse, kus need tihendatakse katsesilindrisse Proctor-teimiga määratud optimaalse veesisalduse juures maksimaalse kuivtiheduseni. [14]

Katsesilindri materjaliga tihendamisel jaotatakse proov massiga  $m_1$  kolmeks võrdseks osaks, mis asetatakse katsesilindrisse kihtide kaupa, tihendades iga kihti 40 haamrilöögiga 300 mm kõrguselt. Enne uue kihi asetamist tuleb eelnevalt kihti 1 mm kuni 2 sügavuselt kobestada (noa või muu terava ja sirge otsaga esemega). Täitmisel muudetakse joonlauaga kõrgust tihendatud proovi tasemest kuni katsesilindri servani. Katsetava materjali kolme kihi kõrgus peab olema  $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Viimase kihi tihendamisel kontrollitakse 20 ja 30 löögi järel vajaliku kõrguse saavutamist ja vajadusel lisatakse materjali. Peenosiste üleskerkimise vältimiseks vee lisamisel asetatakse proovi peale 5 mm kuni 10 mm paksuselt tardkivimist täitematerjal fraktsiooniga 2/4 (5) mm. [14]

### 1.9.3. Katse läbiviimine

Tihendatud prooviga silindrid tõstetakse veega osaliselt täidetud ämbrisse, mida järk-järgult veega täidetakse, kuni veetase ämbris on katsesilindris oleva materjali kõrgusest 1 cm kuni 2 cm kõrgemal. Katsesilinder tuleb ämbrisse asetada raputava liigutusega, et vähendada proovi pooridesse jääva õhu osa. Seejärel lastakse proovil veega küllastuda. Pärast vee ilmumist katsetava proovi pinnale, valatakse katsesilindrisse vett, kuni see täidab katsesilindri ülemise osa umbes 1/3 ulatuses. [14]

Katsesilindrid eemaldatakse ämbrist ja asetatakse veega täidetud veealustesse või anumatesse (sõltuvalt soovitud hüdraulilisest gradiendist katse alghetkel). Kui proovide küllastumine on olnud kiire, siis paigutatakse katsesilindrid hüdraulilise gradiendi  $i_0=1$  (katse alghetkel), tagamiseks sobiva kõrgusega anumasse. Kui proovide küllastumine on aeglane, siis võib valida katse läbiviimiseks veealuse, mis tagab hüdraulilise gradiendi  $i_0=2$ . Filtratsioonimooduli määramise katse sooritatakse hüdraulilise gradiendiga  $i_0=1$ , kui läbijooks 0 mm kuni 50 mm kestab alla kümne minuti, vastasel korral kasutatakse hüdraulilist gradienti  $i_0=2$ . Juhul kui esmalt valitud gradiendi  $i_0=1$  korral on läbijooksu aeg üle 10 minuti, siis vahetatakse järgnevas läbijooksuks veeanum veealuse vastu ja jätkatakse protseduuri. Veeanuma vahetamisel veealuse vastu võib läbijooksude lubatud erinevuse korral kasutada lõpptulemuse esitamisel esimese läbijooksu aega. Ühe osaproovi puhul korratakse läbijooksude protseduuri kaks korda, paralleelsete osaproovide tulemusi peab olema vähemalt kolm. Katse esinduslikuks tulemuseks võetakse osaproovide määrangute keskmine väärtus. [14]

Pärast veealustesse või –anumatesse asetamist täidetakse katsesilinder veega nii, et veetase ületaks piesomeetri nulltasest vähemalt 5 mm ulatuses. Veel lastakse vabalt voolata ja fikseeritakse piesomeetri mõõteskaalalt veetaseme langus valitud vahemikus (võimalusel 0 mm kuni 50 mm) ja määratakse stopperiga veetaseme languse kiirus. Katset korratakse samale proovile uuesti vett peale valades ja veel välja voolata lastes mitte vähem kui kaks korda. Katseseeria jooksul ei tohi veetase alaneda alla proovi pealmise pinna katsesilindris. [14]

#### **1.9.4. Katse hindamine**

Kui ühe osaproovi üksiku läbijooksu aeg erineb sama osaproovi teiste läbijooksude keskmisest rohkem kui 10%, siis tuleb teostada kordusmäärang uue osaprooviga. Kui ühe osaproovi keskmine läbijooksu aeg erineb osaproovide üldkeskmisest üle 20%, siis tuleb märkida katseprotokolli määrangute minimaalne ja maksimaalne väärtus. Lubatud erinevus proovi Proctor – teimiga määratud maksimaalse kuivtiheduse vahel on  $\pm \text{Mg/m}^3$ , saavutatud tihendustegur peab olema vähemalt 0,98. Kui erinevus on suurem, siis analüüsitakse Proctor –teimi tulemust ja vajadusel korratakse katset osaliselt (filtratsioonimooduli määramise protseduuriga) või täielikult (koos Proctor –teimi uue määranguga). [14]

## 2. FILTRATSIOONIMOODULI KATSETE ANALÜÜS

Erinevatel riikidel on graafikud, mis põhinevad sõelkõveratel. USA kasutab sõelkõverat, mis on seotud filtratsioonimooduliga, kuid näiteks Soome, Venemaa ja Ühendkuningriigid tegelevad külmakerkelisuse hindamisega, võttes aluseks terastikulise koostise. Alljärgnevalt analüüsitakse filtratsioonimooduli katseandmeid ja proovitakse sõelkõverate põhjal koostada kindlad piirid, et lihtsustada ning kiirendada mineraalmaterjalide valikut teekonstruktsioonidesse. Eesmärk oleks loobuda filtratsioonimooduli mõõtmisest ja taandada kogu protsess sõelkõveratele.

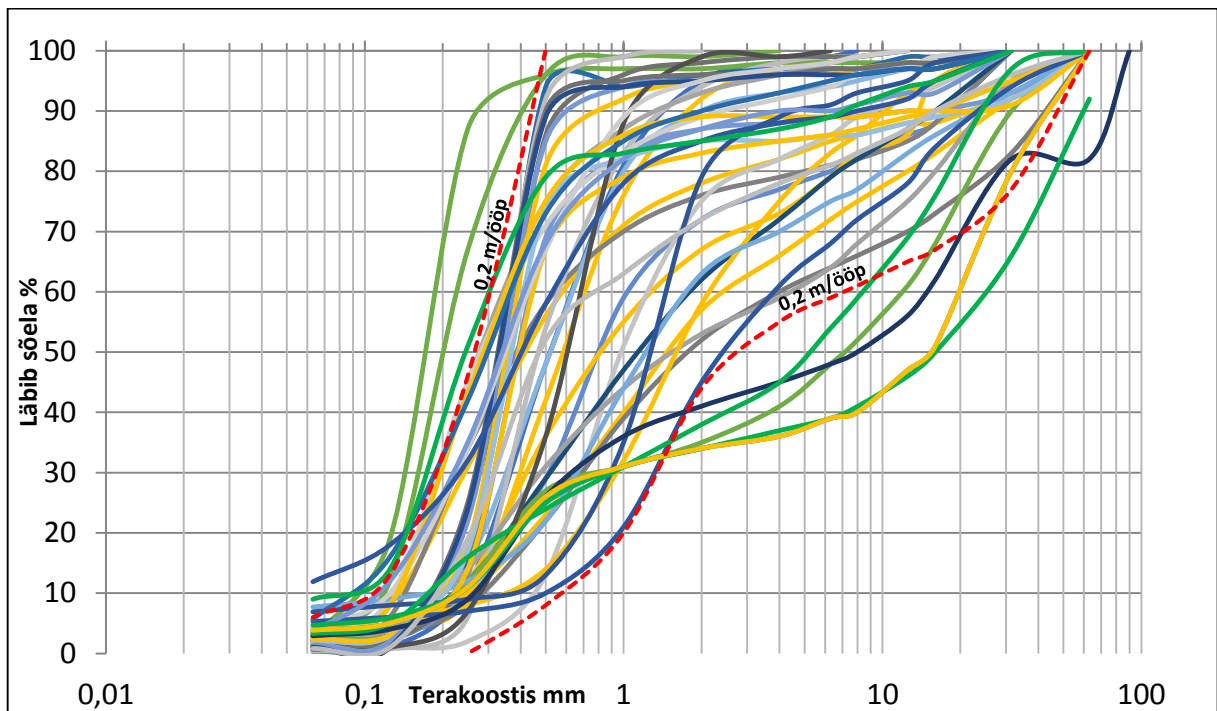
Antud töös kasutatakse sõelkõverate loomisel AS Teede Tehnokeskuse poolt mõõdetud andmeid, mis määrati EVS 901-20:2013 järgi. Graafikutele on loodud sõelkõvera väljad 0,2 m/ööp ja 2,0 m/ööp. Sõelkõvera välju prooviti luua ka 0,5 m/ööp ja 1,0 m/ööp jaoks, kuid tekkinud seos oli väike, mistõttu ei ole võimalik saada usaldusväärseid tulemusi. Käesolevas töös kirjeldatakse sõelkõveraid koos filtratsioonimooduli väärtustega, kuid materjalide nimetusi ei nimetata. Enamjaolt peaksid kõik materjalid saama nimetuse „Liiv“, kuid puuduvad peenemad kui 0,063 mm osakesed, mis saavad määravaks materjali nimetamisel. Antud töös kasutatavate sõelkõvera väljade andmed leiab alljärgnevast tabelist (Tabel 4).

Tabel 4

Sõelkõvera välja andmed

<b>Fraktsioon(mm)</b>	<b>63</b>	<b>31,5</b>	<b>16</b>	<b>12,5</b>	<b>8</b>	<b>6,3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,25</b>	<b>0,125</b>	<b>0,063</b>
<b>0,2 m/ööp;%</b>										100	46	13	6
<b>0,2 m/ööp;%</b>	100	77	67	65	61	59	55	44	20	8	0	0	0
<b>2,0 m/ööp;%</b>										100	35	5	2,5
<b>2,0 m/ööp;%</b>	100	96	81	77	72	70	66	59	34	12	0	0	0

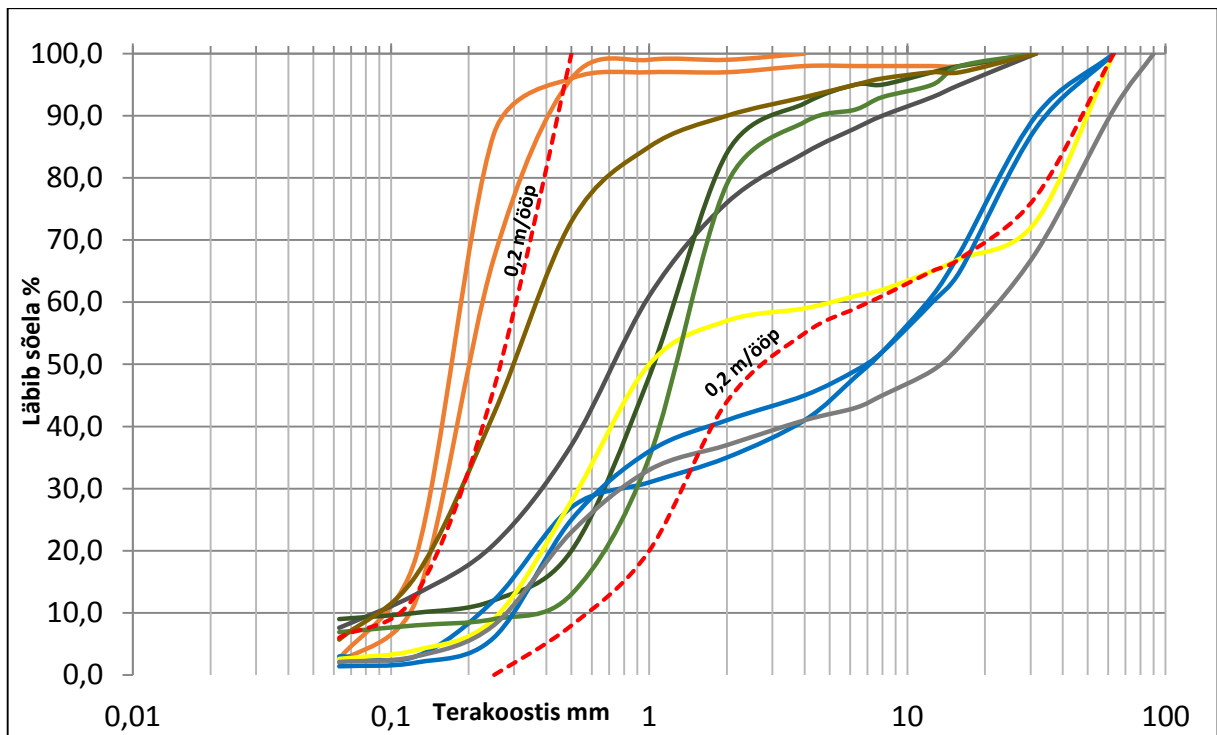
## 2.1. Sõelkõvera väli 0,2 m/ööp



Joonis 4. Filtratsioonimooduli määramine pinnase terakoostise alusel

Graafikul (Joonis 4) on autor loonud sõelkõvera välja, kus punased punktiirjooned tähistavad filtratsioonimooduli 0,2 m/ööp piire. Kõikidel sõelkõveratel, mis jäävad tervikuna kahe punase joone vahele on filtratsioonimoodul alates 0,2 m/ööp tagatud. See graafik ei taga 100-protsendilist tulemust, sest esineb hälbeid. Hälvetega sõelkõverad võivad olla suurema väärtusega kui 0,2 m/ööp, kuid paiknevad väljaspool piire ja esineb vastupidi olukordi, kus proovid jäävad piiride sisse, aga omavad väiksemat filtratsioonimoodulit. Ülaloleval graafikul on näha, et valdav enamus proovidest on piiride vahel, kuid mõned jäävad välja.

Järgnevalt elimineeritakse proovid, mis jäävad punktiirjoonte vahele ja jäetakse alles hälvetega materjalid, et tekiks arusaadavam ülevaade. Alloleval graafikul (Joonis 5) on hälvetega proovid.

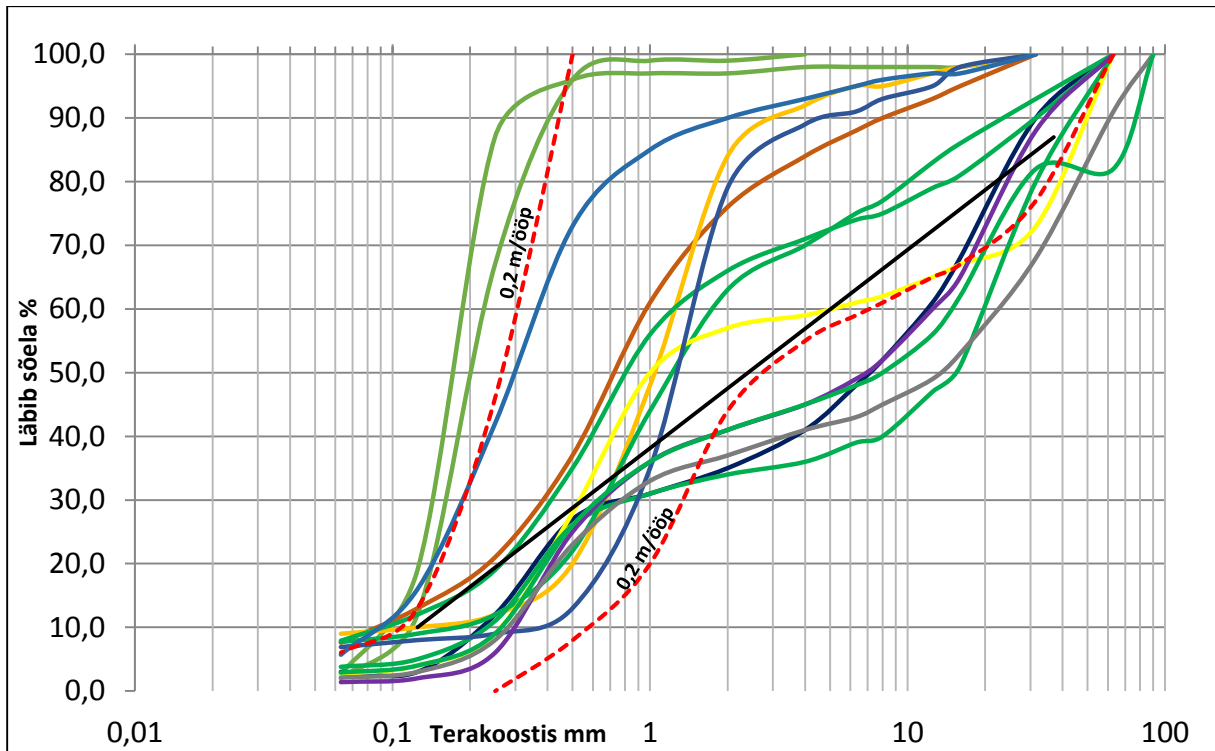


Joonis 5. Filtratsioonimooduli määramine pinnase terakoostise alusel

Ülaloleval graafikul on oranžiga tähistatud jooned erandlikud, sest sõelkõverad paiknevad teistest proovidest eraldi ja omavad kõrget filtratsioonimoodulit. Täpsemalt seletatakse erandlikkust joonisel 12. Kui vaadata sinised sõelkõveraid, siis need kulgevad küllaltki paralleelselt ja mõlemal on 0,063 mm osakesi vähe. Siniste joonte väärtused on 2,5 m/ööp ja 1,0 m/ööp. Autor väidab, et eelmainitud proovid on vigased ja tuleks arvestada kui mitte piisava filtratsioonimooduliga materjalide hulka. Täpsemalt tuleb vigastest proovidest juttu joonisel 12.

Katseproove on kokku 89, millest kümme on hälbega, see teeb protsentuaalselt 88%. Kui arvestada, et sinised ja oranžid on erandlikud proovid siis hälbega proove jääks kuus, mis teeb protsentuaalselt 93%. Eelnevate andmete põhjal saab väita, et kui sõelkõver jääb täielikult punktiirjoonte vahele, siis on 93 % tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit vähemalt 0,2 m/ööp. Kahtluse korral määratakse filtratsioonimoodul laboratoorsel teel.

Järgnevalt esitab autor nõude filtratsioonimooduli määramisel (Joonis 6).

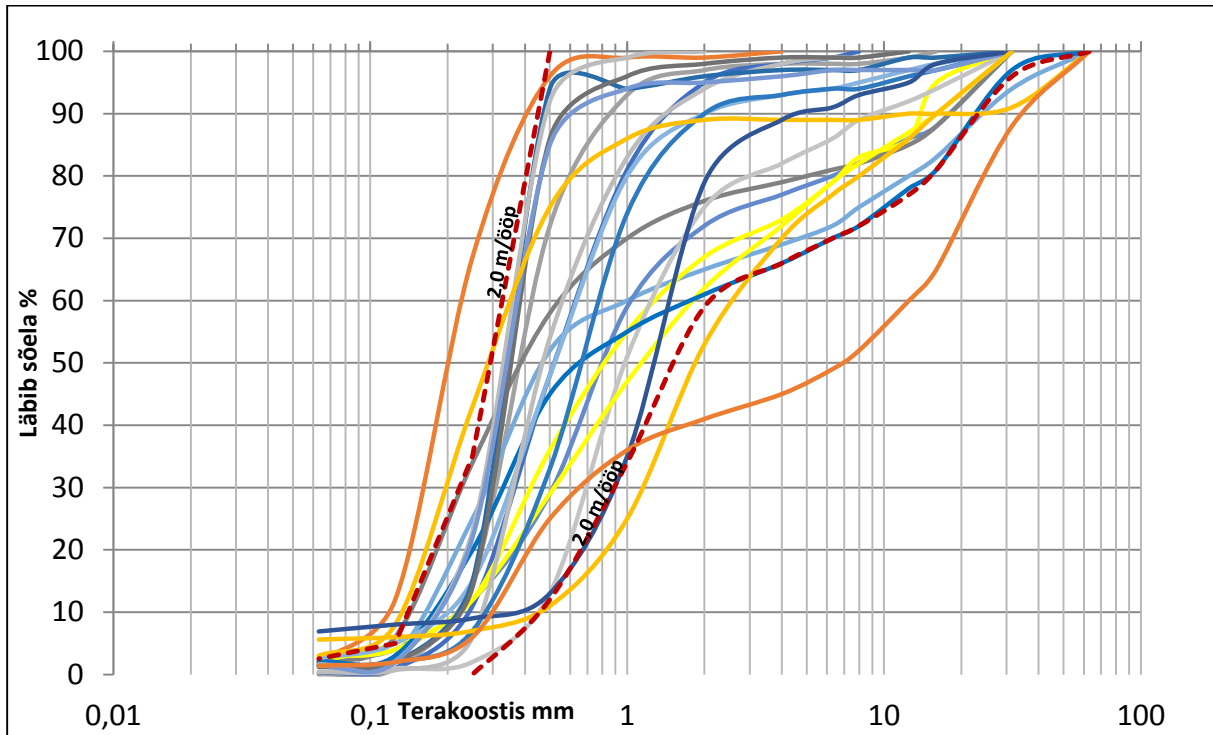


Joonis 6. Filtratsioonimooduli määramise nõue

Kui materjali sõelkõver on enam-vähem taolise sirgjoonena (palju peenosist ja väga ebahütlane terastikuline koostis), tuleb filtratsioonimoodulit katseliselt kontrollida. Sirgjoon on tähistatud musta värviga.

Järgmisel graafikul (Joonis 7) analüüsitakse sõelkõveraid, mis jäävad 2,0 m/ööpäeva piiridesse või lähevad sellest välja.

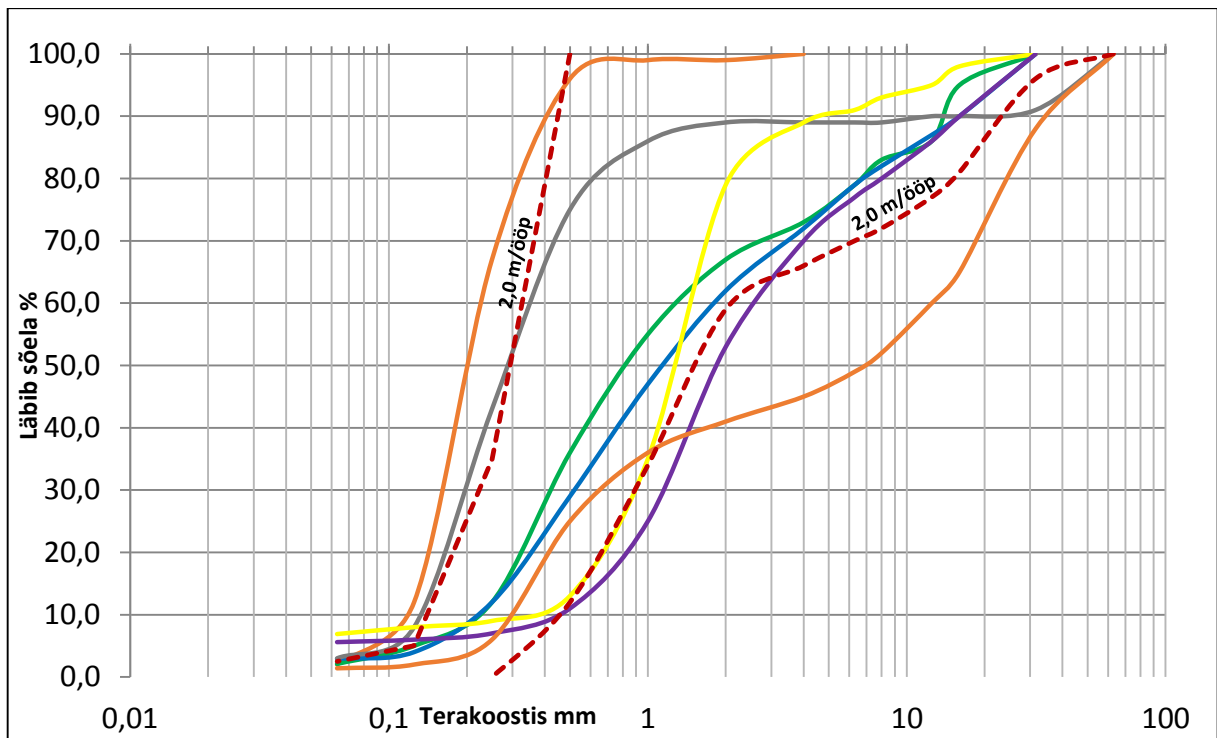
## 2.2. Sõelkõvera väli 2,0 m/ööpäevas



Joonis 7. Filtratsioonimooduli määramine pinnase terakoostise alusel

Graafikul ( Joonis 7) on punaste punktiirjoontega tähistatud sõelkõvera väli, mille väärtus on 2,0 m/ööpäev. Kõik sõelkõverad, mis jäävad tervikuna punaste punktiirjoonte vahele omavad väärtust 2,0 m/ööpäev ja kõrgemat. Kui sõelkõver läheb punasest piirist üle siis on tegemist madalama filtratsioonimooduliga kui 2,0 m/ööpäev. Graafik ei taga 100-protsendilist tulemust, sest esineb hälbeid. Hälbeid esineb nii piiride sees kui väljas. Parema ülevaate saamiseks elimineeritakse sõelkõverad, mis jäävad punaste punktiirjoonte vahele ja jäetakse alles hälvetega sõelkõverad.

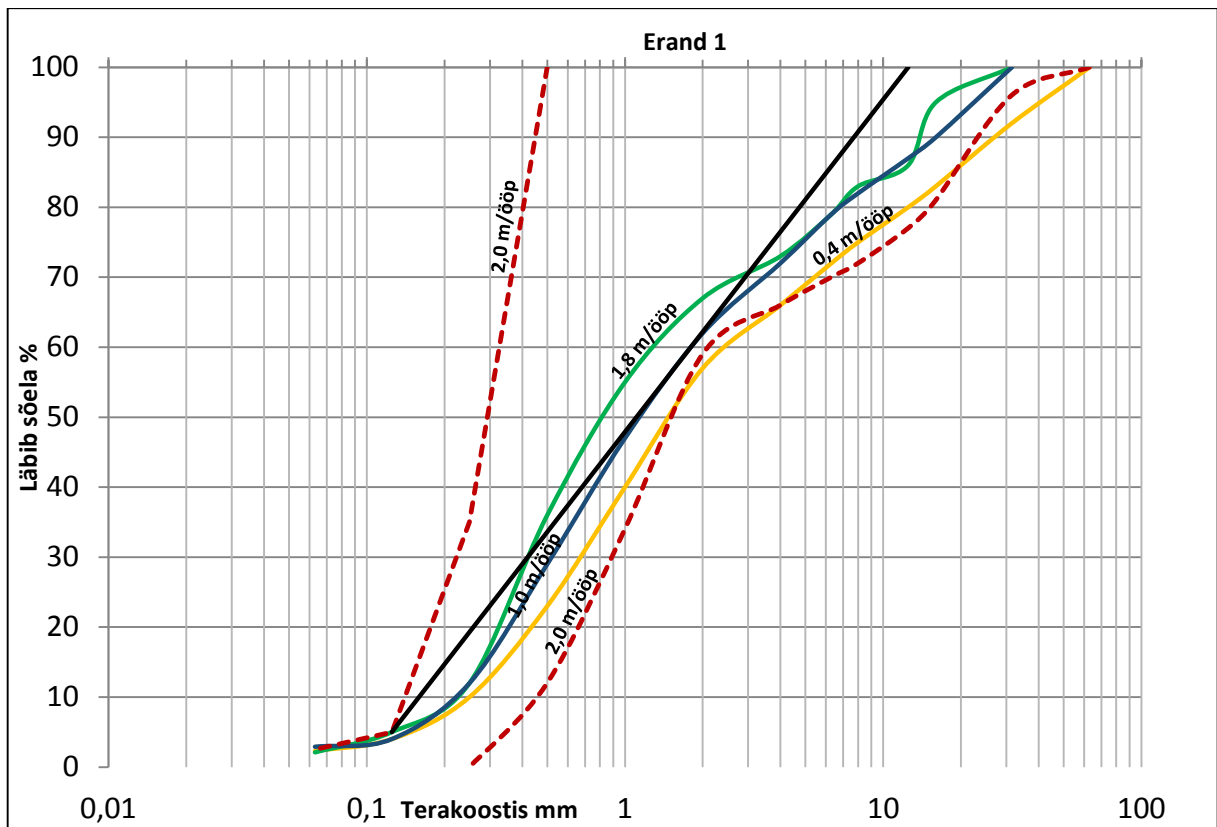
Järgmisel graafikul (Joonis 8) analüüsitakse hälvetega sõelkõveraid ja arvutatakse hälbe protsent.



Joonis 8. Filtratsioonimooduli määramine pinnase terakoostise alusel

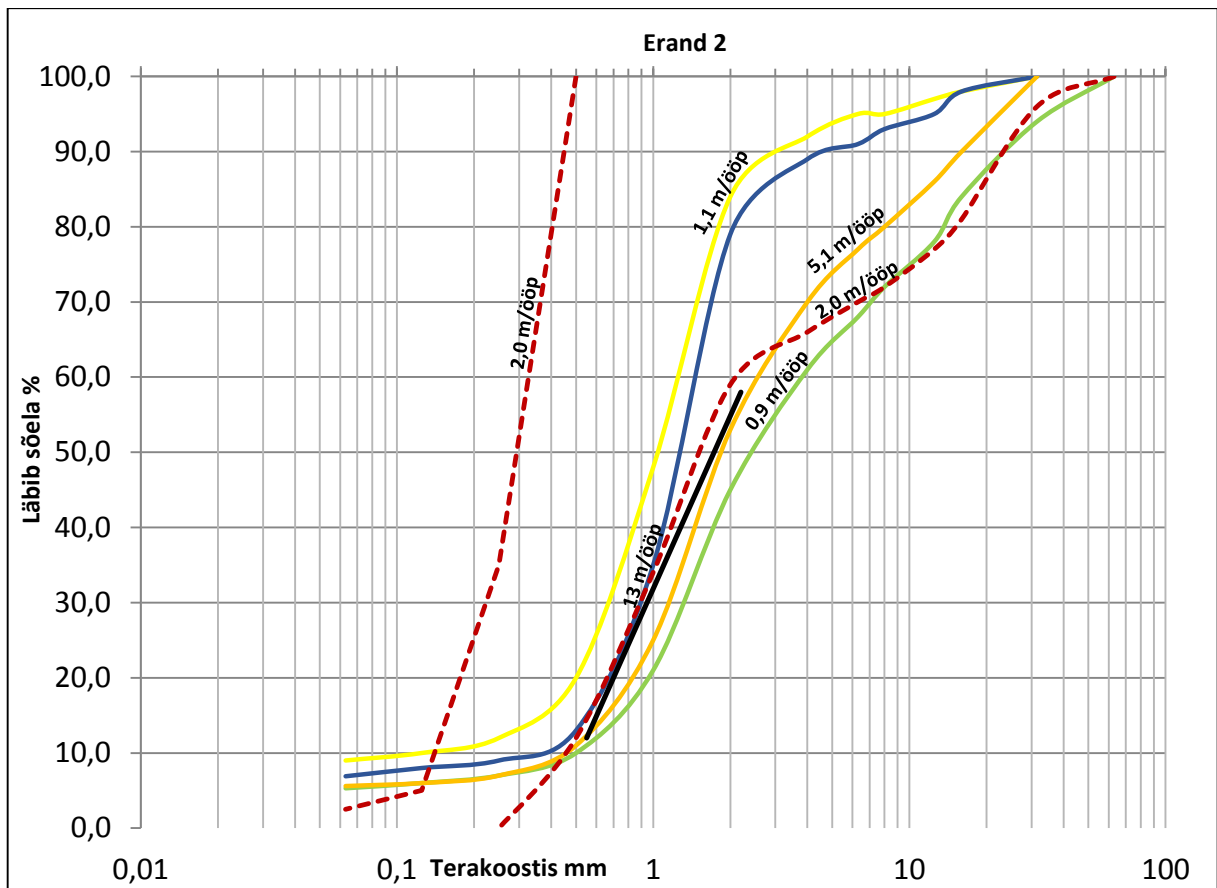
Ülaloleval graafikul kulgevad sinine ja roheline joon peaaegu paralleelselt. Sinise sõelkõvera väärtus on 1,0 m/ööp ja rohelisel 1,8 m/ööp, kuid mõlemad proovid jäävad tervikuna 2,0 m/ööpäeva piiri sisse. Eelneva lause puhul on autor loonud erandi (Joonis 9). Kui sõelkõvera keskmine fraktsioon tõuseb graafikul järsult üles, siis võib tegemist olla erandiga. Selliste proovide korral on autor loonud teise erandi (Joonis 10). Kolmas erand tekib sõelkõveratega (oranžiga tähistatud), mis paiknevad teistest materjalidest tunduvamalt kaugemal. Selliseid materjale käsitletakse joonisel 12.

Katseproove on kokku 89, millest seitse on hälbega, see teeb protsentuaalselt 92 %. Kui maha arvestada oranžid proovid siis hälbeid jääb viis ja protsentuaalselt tuleb 94 %. Eelneva põhjal saab väita, kui sõelkõver jääb täielikult punaste piiride vahele, on 94 % tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit 2,0 m/ööp. Kahtluse korral määratakse filtratsioonimoodul laboratoorsel teel.



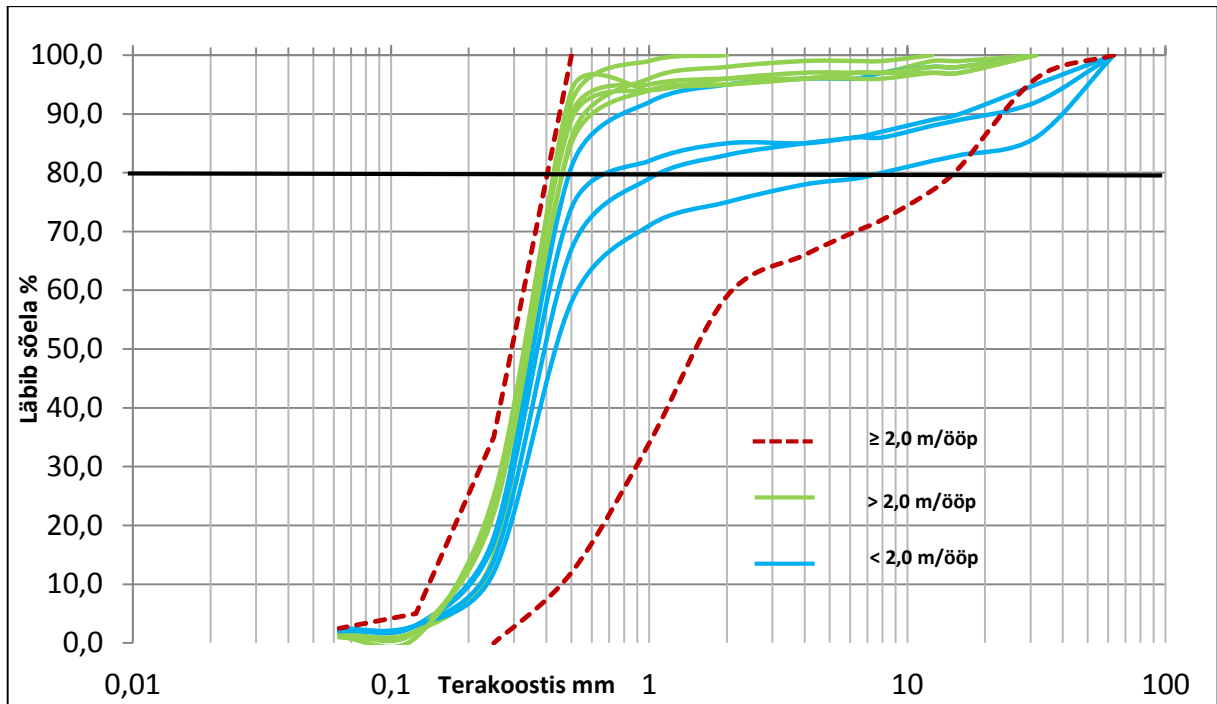
Joonis 9. Erand 1 filtratsioonimooduli määramisel

Graafik (Joonis 9) kirjeldab erandit, mis kehtib sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp. Kui materjali peenosised on täpselt piiripeal ja sõelkõver jookseb ühtlaselt enam-vähem sirge joonena paremalt poolt üles (tähistatud mustaga), siis ei pruugi olla tagatud filtratsioonimoodul üle 2,0 m/ööp ja seda peaks mõõtmisega kontrollima. Graafikul on näha sõelkõverad, mis jäävad musta joone suhtes paremale poole ja millel on peenosised piiripeal. Mida sirgemaks sõelkõverajoon musta joone suhtes läheb ja mida rohkem paremale poole nihkub, seda viletsamaks muutub filtratsioonimooduli tulemus.



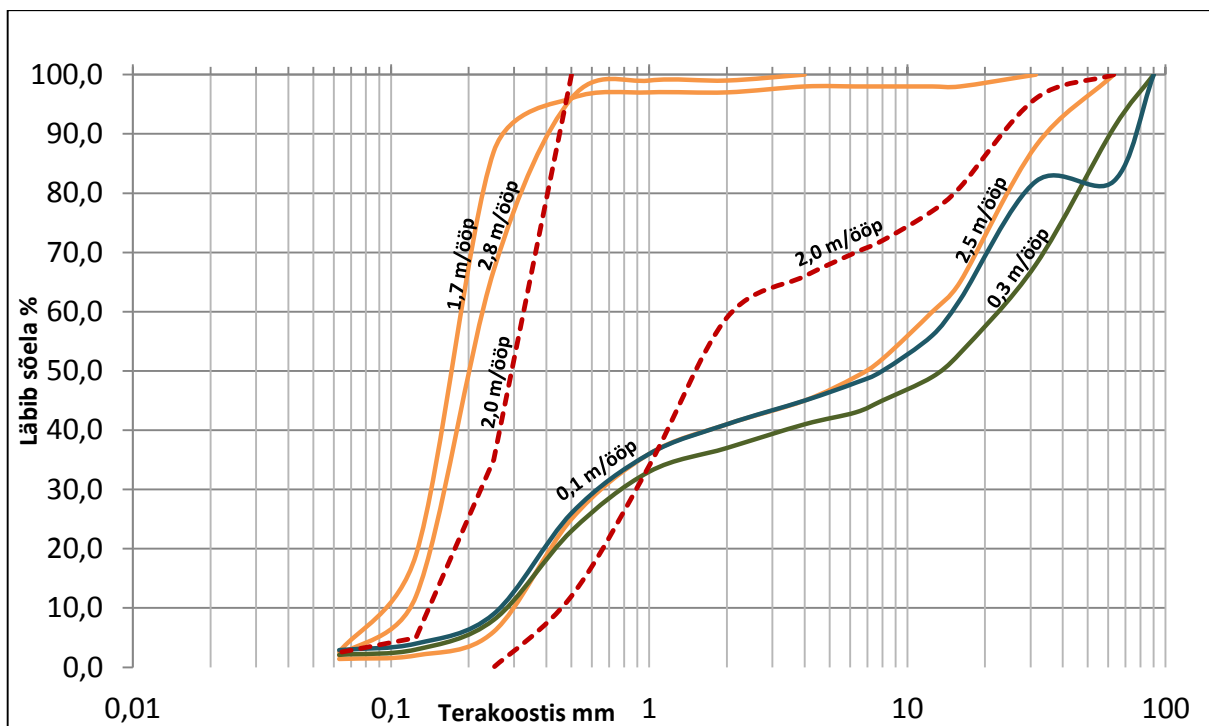
Joonis 10. Erand 2 filtratsioonimooduli määramisel

Ülalolev graafik kirjeldab erandit, mis kehtib sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp. Kui materjali peenosiseid on lubatust rohkem, kuid keskmine fraktsioon paikneb musta joone lähedal ehk jookseb selles piirkonnas järsult üles, siis materjal võib filtreeruda üle 2,0 m/ööp ja seda tuleks katseliselt kontrollida.



Joonis 11. Sarnaste sõelkõverate võrdlus

Graafikul (Joonis 11) kirjeldatakse erandlike proove, millede filtratsioonimoodul jääb alla 2,0 m/ööp. Kõik sõelkõverad on kuni 60-protsendini pea identsed. Kui sõelkõverad lähevad lubatud piiridest väljapoole pärast 80 % joont ( tähistatud mustaga), siis loetakse materjalid piiride sisse. Graafikul (Joonis 7) arvestati madalama filtratsioonimooduliga sõelkõverad 2,0 m/ööp piiride sisse. Ma väidan, et materjalid filtreeruvad üle 2,0 m/ööp, hoolimata sellest, et mõõtmistulemus pole välja andnud.



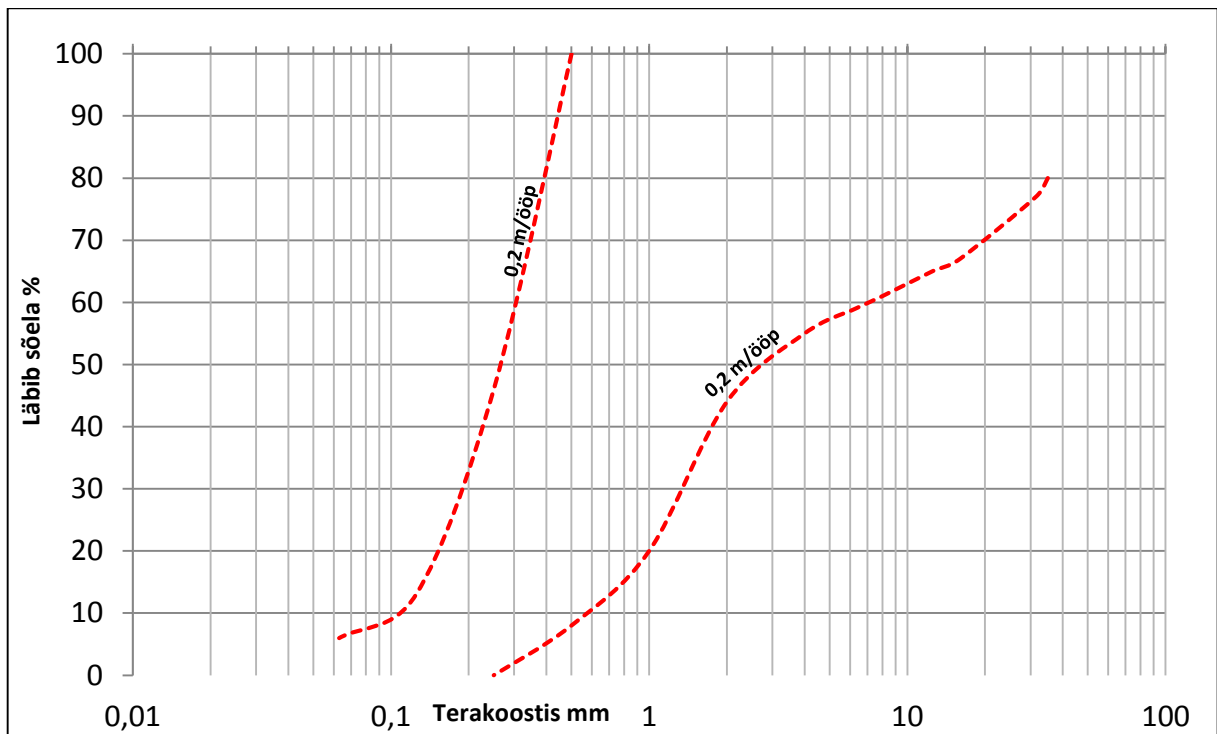
Joonis 12. Erandlikud proovid filtratsioonimooduli määramisel

Ülaloleval graafikul on kirjeldatud erandlikud proovid (oranži värviga). Sõelkõver väärtusega 2,5 m/ööp teeb erandlikuks ebahühtlane terastikuline koostis ja paiknemine väljaspool punaseid piire. Ülejäänud kaks proovi arvestatakse erandiks, sest sõelkõverad paiknevad eraldi grupina väljaspool piire.

### 2.3. Sõelkõvera väljad ja nende kasutamine

Antud alapeatükis kirjeldatakse sõelkõvera väljasid koos reeglitega, kuidas peaks neid kasutama. Arvutatakse protsentuaalselt välja tõenäosus, kui suur hulk proovidest on hälbega ja käsitletakse erandeid, mis sõelkõveratega kaasneb.

### 2.3.1. Sõelkõvera väli 0,2 m/ööpäevas



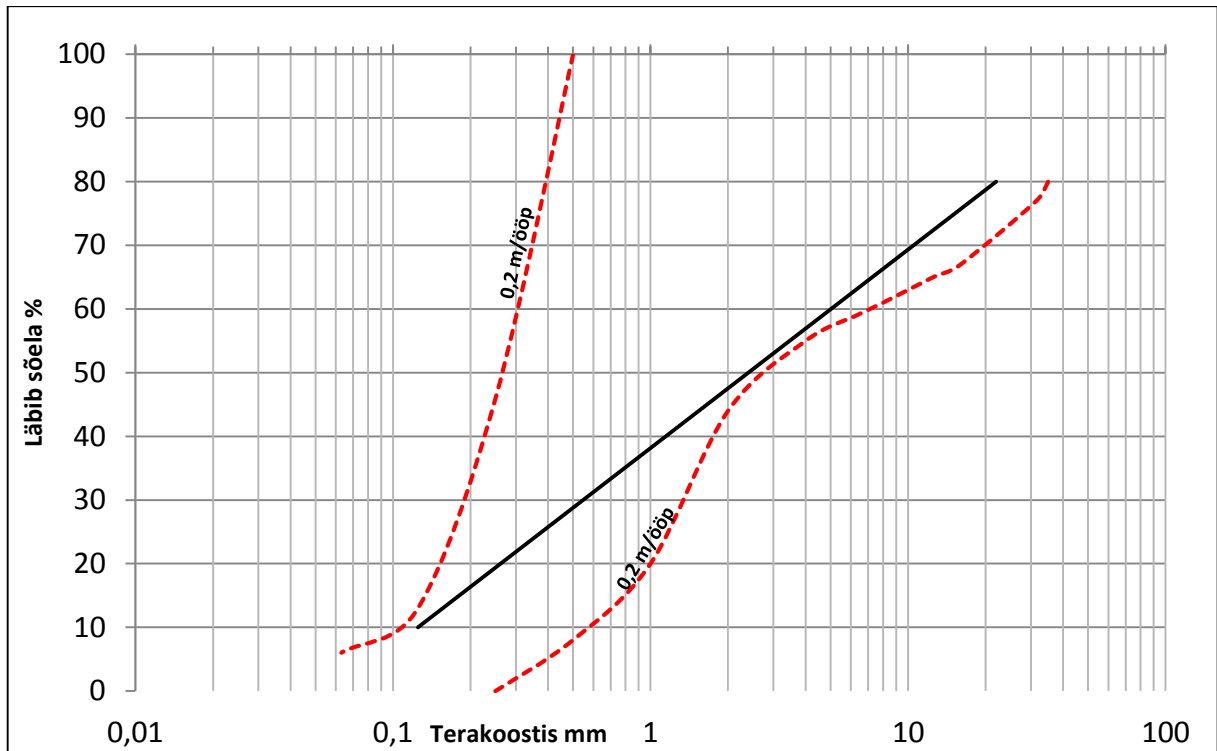
Joonis 13. Sõelkõvera väli 0,2 m/ööp

Graafikul (Joonis 13) on sõelkõvera piirid filtratsioonimooduliga 0,2 m/ööp. Kui materjali sõelkõver jääb tervikuna kahe punase joone vahele on filtratsioonimoodul alates 0,2 m/ööp tagatud. Sõelkõvera väljal on 93 % tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit vähemalt 0,2 m/ööp või kõrgemat, kui sõelkõver jääb täielikult punktiirjoonte vahele. Tõenäosus protsendi hulka arvati neli hällbega proovi, mida kirjeldatakse joonisel 12. Kahtluse korral tuleb filtratsioonimoodulit laboratoorsel teel kontrollida. Graafiku (Joonis 13) kohta kehtib nõue, mis on välja toodud graafikul (Joonis 14).

Tabel 5

Sõelkõvera välja 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	0	0



Joonis 14. Filtratsioonimooduli määramise nõue, sõelkõvera väljal 0,2 m/ööp

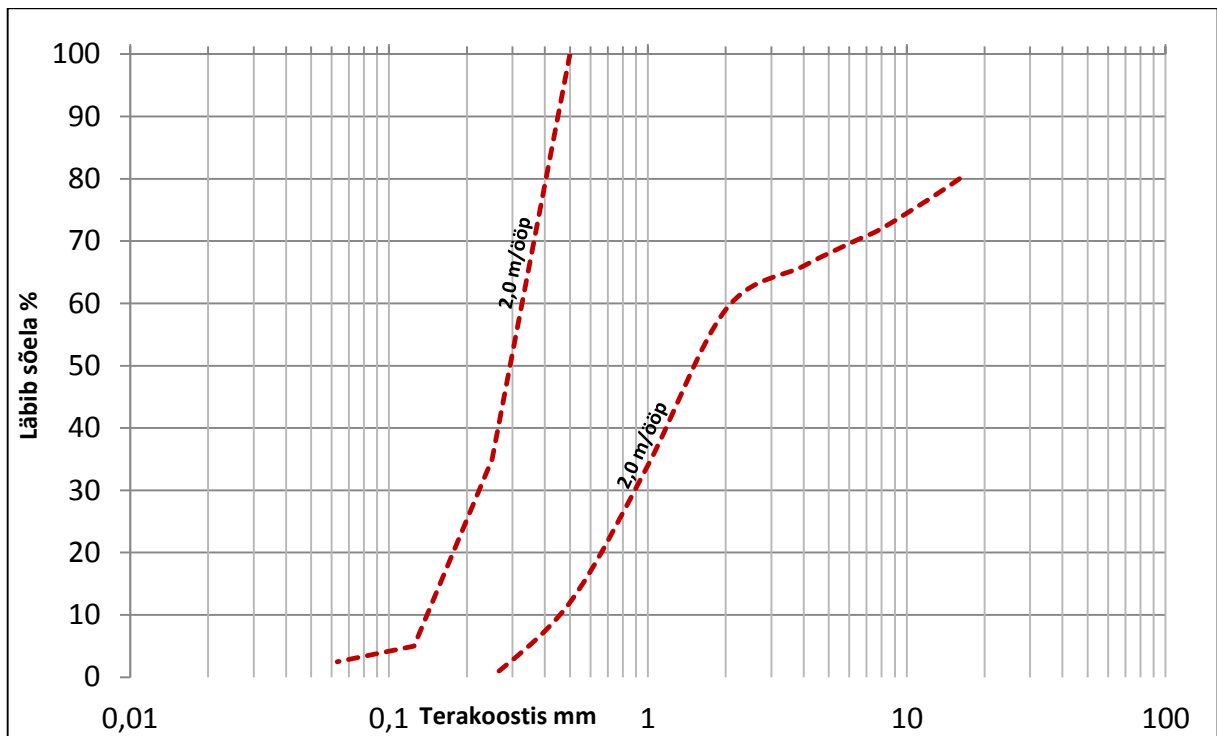
Kui materjali sõelkõver on enam-vähem taolise sirgjoonena (palju peenosist ja väga ebäühtlane terastikuline koostis), tuleb filtratsioonimoodulit katseliselt kontrollida. Sirgjoon on tähistatud musta värviga.

Tabel 6

Nõude (must joon) andmed

<b>Fraktsioon (mm)</b>	22	0,125
<b>%</b>	80	10

### 2.3.2. Sõelkõvera väli 2,0 m/ööpäevas



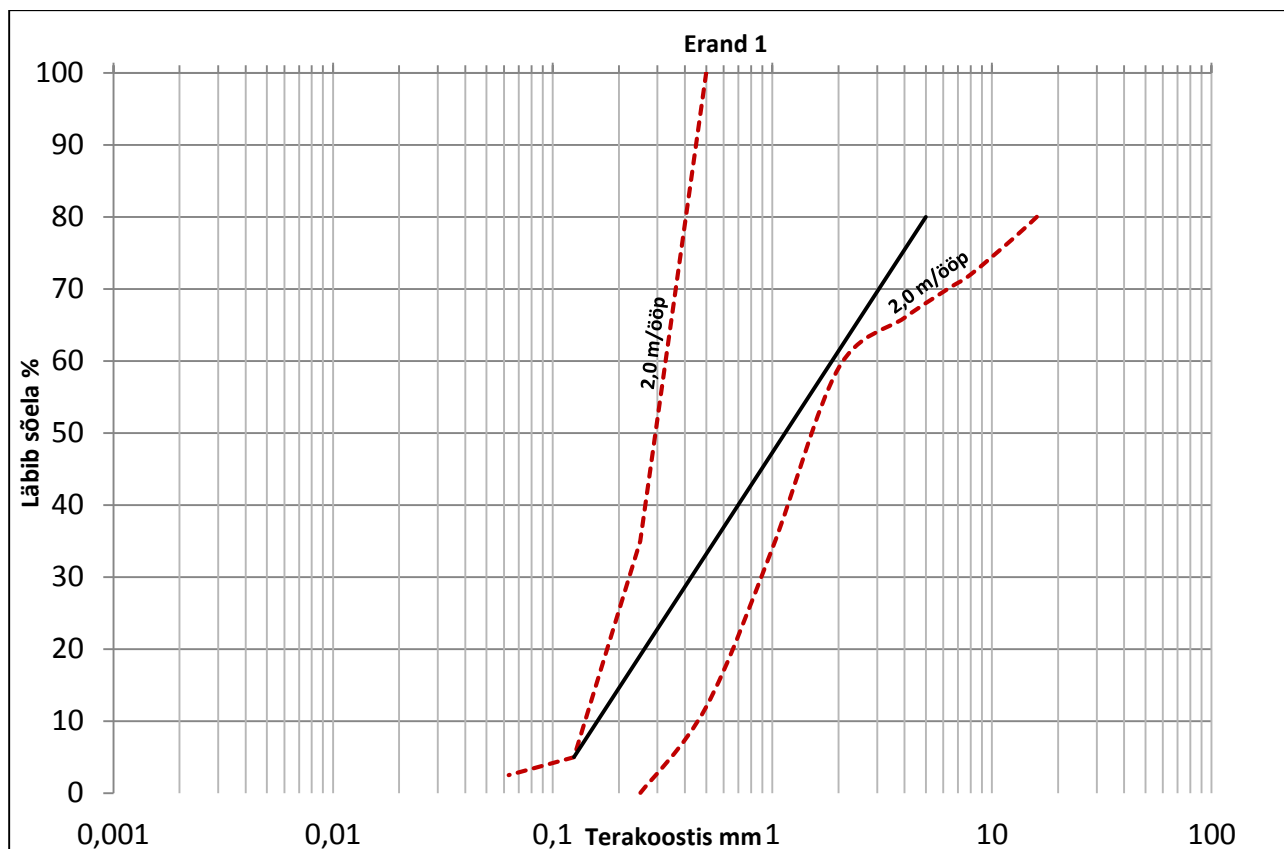
Joonis 15. Sõelkõvera väli 2,0 m/ööp

Graafikul (Joonis 15) on sõelkõvera piirid filtratsioonimooduliga 2,0 m/ööp. Kui materjali sõelkõver jääb tervikuna punaste joonte vahele on filtratsioonimoodul alates 2,0 m/ööp tagatud. Sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp on 94 % tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit 2,0 m/ööp, kui sõelkõver jääb täielikult punktiirjoonte vahele. Tõenäosus protsendi hulka arvati kaks hällbega proovi, mida kirjeldatakse joonisel 12. Kahtluse korral tuleb filtratsioonimoodulit laboratoorsel teel kontrollida. Graafiku (Joonis 15) kohta kehtib kaks erandit, mis on näidatud joonistel 16 ja 17.

Tabel 7

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	0	0



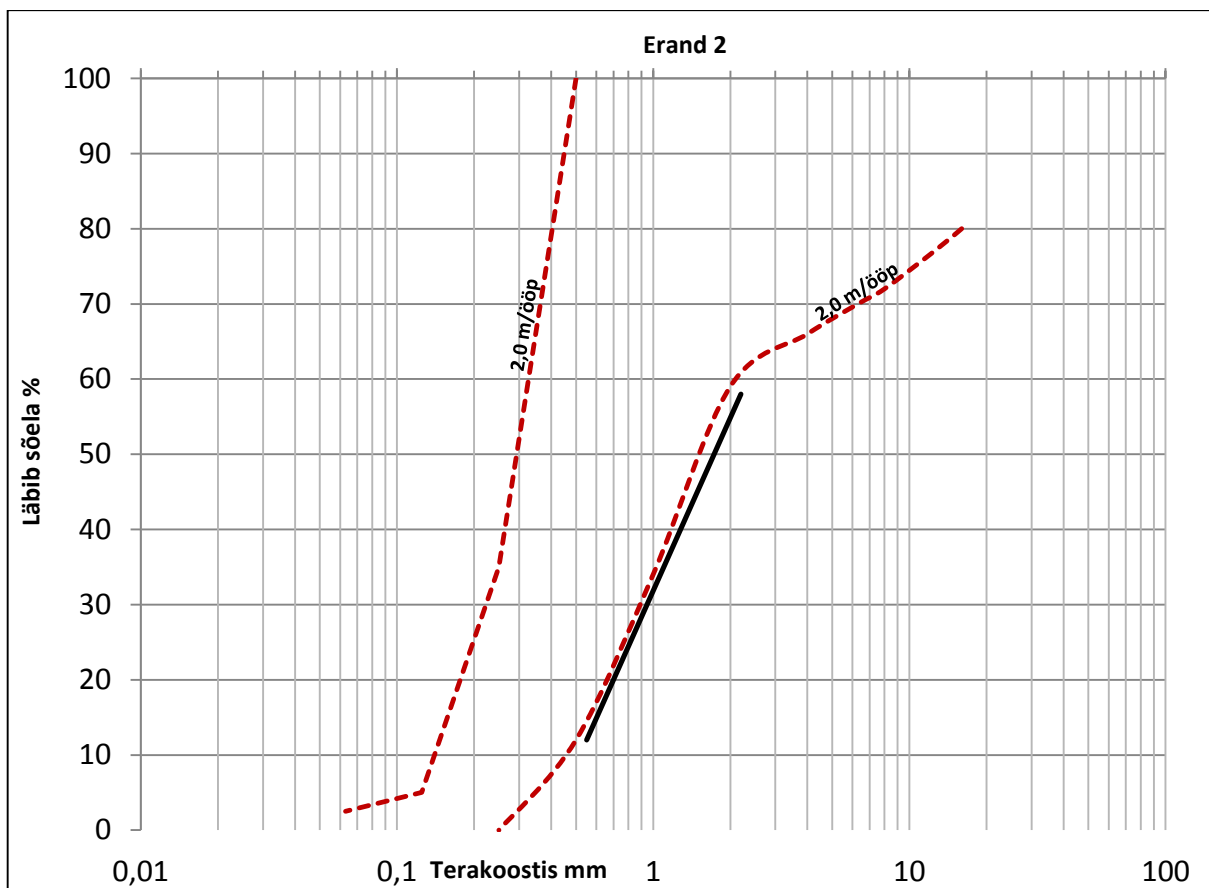
Joonis 16. Erand 1, sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp

Graafikul (Joonis 16) on kirjeldatud erandit, mis kehtib sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp. Kui materjali peenosised (0,063 mm ja 0,125 mm) on täpselt piiripeal ja sõelkõver jookseb ühtlaselt enam-vähem sirge joonena paremalt poolt üles (tähistatud mustaga), siis ei pruugi olla tagatud filtratsioonimoodul üle 2,0 m/ööp ja seda peaks laboratoorselt mõõtmisega kontrollima. Erandi kohta kehtib reegel, et mida sirgemaks sõelkõverajoon musta joone suhtes läheb ja mida rohkem paremale poole nihkub, seda viletsamaks muutub filtratsioonimooduli tulemus.

Tabel 8

Erand 1 (must joon) andmed

<b>Fraktsioon (mm)</b>	5	0,125
<b>%</b>	80	5



Joonis 17. Erand 2, sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp

Graafik (Joonis 17) kirjeldab erandit, mis kehtib sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp. Kui materjali peenosiseid (0,063 mm ja 0,125 mm) on lubatust rohkem, kuid keskmine fraktsioon paikneb musta joone lähedal ehk jookseb selles piirkonnas järsult üles, siis materjal võib filtreeruda üle 2,0 m/ööp ja seda tuleks katseliselt kontrollida.

Tabel 9

Erand 2 (must joon) andmed

<b>Fraktsioon (mm)</b>	2,2	0,55
<b>%</b>	58	12

## 2.4. Filtratsioonimooduli määramine empiiriliste seoste abil

Antud alapeatükis võrreldakse empiiriliste valemitega arvatud filtratsioonimoduleid laboratoorsetega. Empiirilisi seoseid on võrreldud seitsmekümne nelja laboratoorse katseandmega, mis on leitud EVS 901-20 katsetoodikaga. Järgevalt käsitletakse kuute levinumat empiirilist valemit.

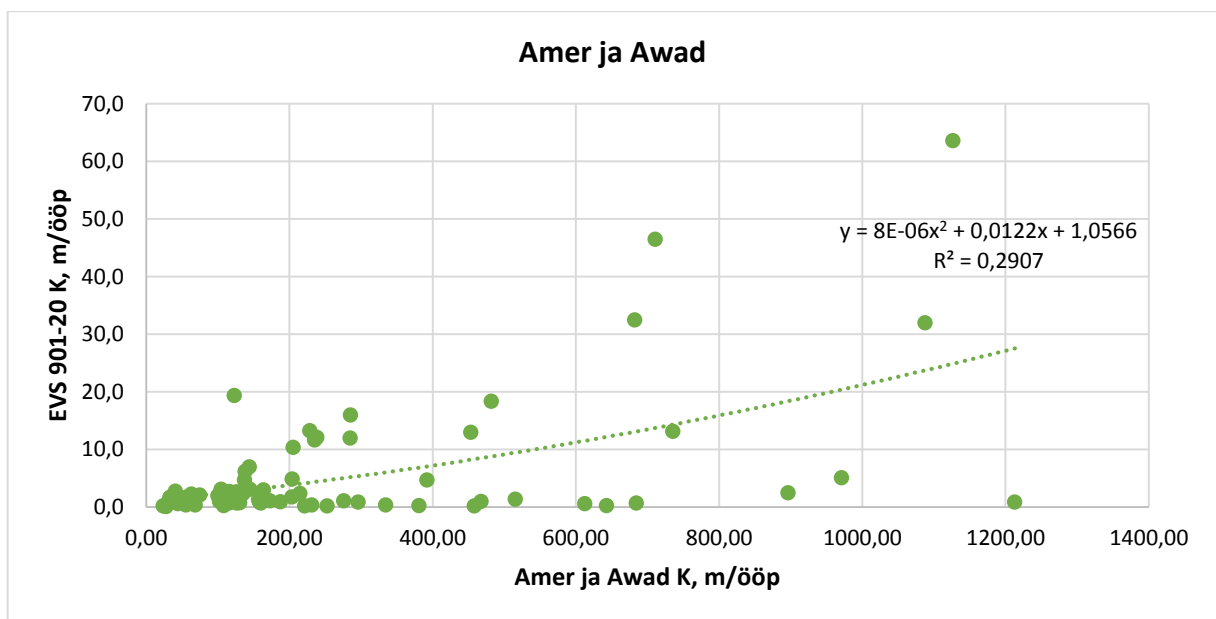
### 2.4.1. Amer ja Awad`i valem

Teoreetilised (Kozeny-Carman) ja eksperimentaalsed uuringud näitavad, et veejuhtivus peaks olema võrdeline  $e^3/1+e$  suurusega. [1, p. 34] Lisades veel lõimise ebahühtlase mõju, on Amer ja Awad esitanud alljärgneva valemi (6) [15]:

$$K = 35 \left( \frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0,6} D_{10}^{2,32}, \quad (6)$$

kus  $K$  -filtratsioonimoodul cm/s;  
 $C_u$  -lõimisetegur;  
 $D_{10}$  -efektiivdiameeter mm;  
 $e$  -uuritava pinnase poorsustegur.

Järgneval graafikul (Joonis 18) võrreldakse Amer ja Awad`i valemit EVS 901-20 meetodiga.



Joonis 18. Amer ja Awad`i valemi võrdlus EVS 901-20 katsetega

### 2.4.2. Kozeny – Carman`i valem

Kozeny-Carman`i võrrand (7) on üks tuntumaid ja tunnustatumaid valemeid, filtratsioonimooduli määramisel. Valem võtab arvesse poorsusteguri, osakeste kuju ja sõltuvuse vee temperatuurist. [16]

$$K = \frac{\gamma}{\mu} * \frac{1}{C_k - c} * \frac{1}{S_0^2} * \frac{e^3}{1 + e}, \quad (7)$$

kus  $K$  -filtratsioonimoodul, cm/s;

$\frac{\gamma}{\mu}$  -vee 20°C juures  $\frac{\gamma}{\mu} = 9,93 \cdot 10^4$  (1/cm s) ja vee 10°C juures  $\frac{\gamma}{\mu} = 7,64 \cdot 10^4$  (1/cm s);

$C_{k-c}$  -Kozeny-Carman'i koefitsient;

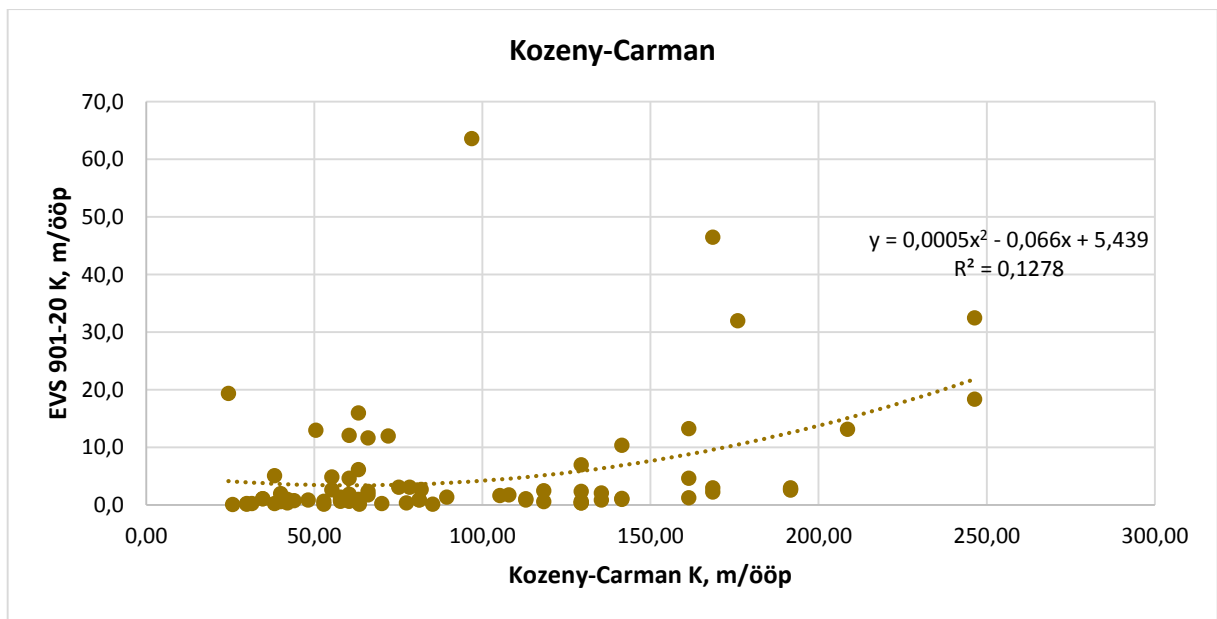
$e$  -poorsustegur;

$S_0$  -osakeste eripind ruumalaühiku kohta, 1/cm.

Kozeny-Carman'i koefitsient  $C_{k-c} = 4,8 \pm 0,3$ . Tavaliselt kasutatakse  $C_{k-c} = 5$ .  $S_0$  väljendatakse järgmise seosega (8) [16].

$$S_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{\frac{\pi D^3}{6}} = \frac{6}{D}, \quad (8)$$

kus  $D$  -osakeste mediaan suurus ehk  $d_{50}$  cm.



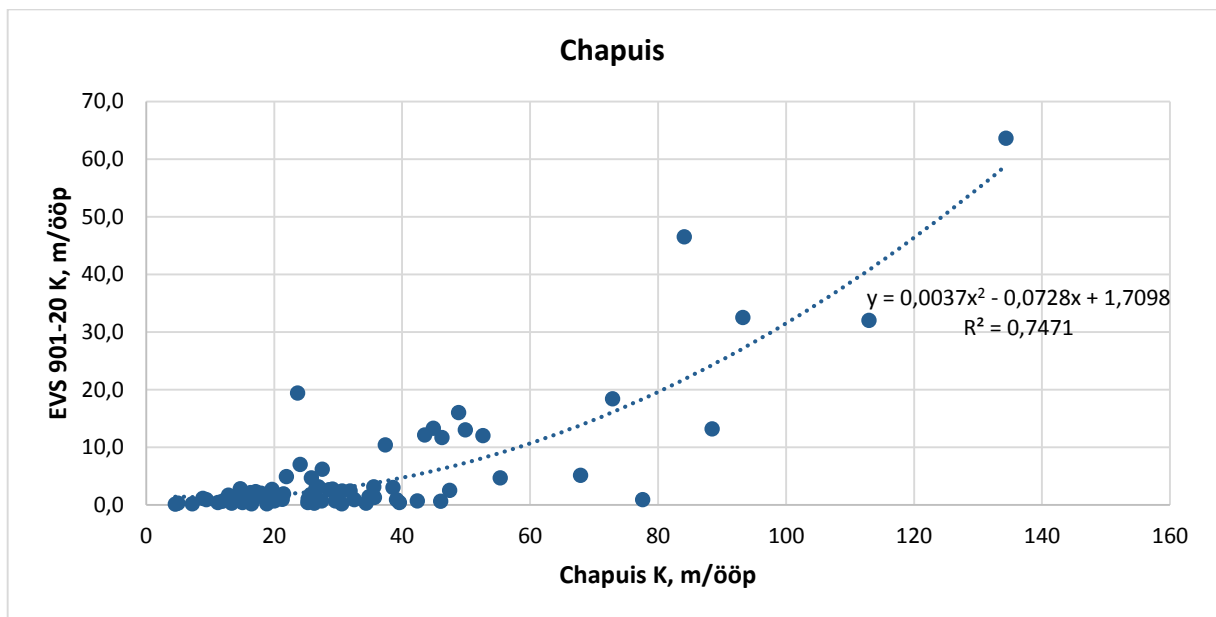
Joonis 19. Kozeny – Carman'i valemi võrdlus EVS 901-20 katsetega

### 2.4.3. Chapuis'i valem

Valemit (9) kasutatakse naturaalses olekus puhaste liivade ja kruusade puhul, millede filtratsioonimoodul jääb vahemikku  $10^{-1}$  kuni  $10^{-3}$  cm/s [15].

$$K = 2,462(D_{10}^2 * \frac{e^3}{1+e})^{0,7825}, \quad (9)$$

- kus  $K$  -filtratsioonimoodul cm/s;  
 $D_{10}$  -efektiivdiameeter mm;  
 $e$  -uuritava pinnase poorsustegur.



Joonis 20. Chapuis'i valemi võrdlus EVS 901-20 katsetega

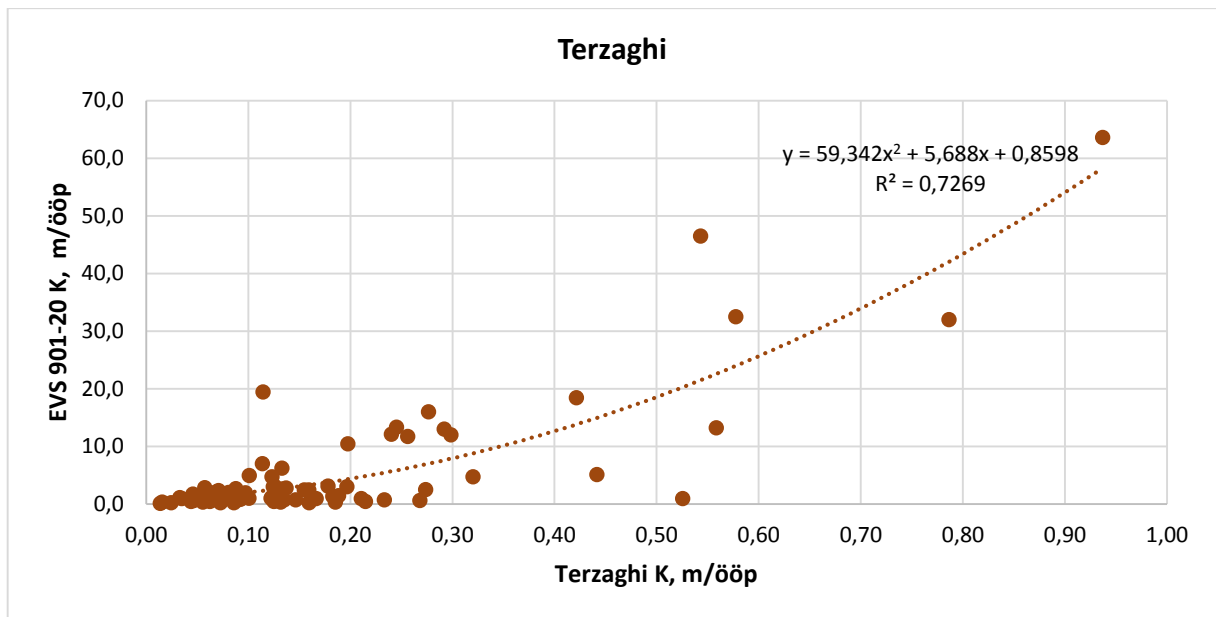
#### 2.4.4. Terzaghi valem

Alljärgnev (10) valem annab kõige paremaid tulemusi suurte teraosakestega liivade puhul. [17, p. 335]

$$K = 0,0084 \frac{g}{v} \left[ \frac{n - 0,13}{(1 - n)^{\frac{1}{3}}} \right]^2 d_{10}^2, \quad (10)$$

- kus  $K$  -filtratsioonimoodul cm/s;  
 $g$  -raskuskiirendus;  
 $v$  -vee viskoossus;  
 $n$  -poorsus;  
 $d_{10}$  -efektiivdiameeter mm.

Koefitsient 0,0084 on keskmine väärtus, mis võetakse vahemikust 0,0061 - 0,00107.



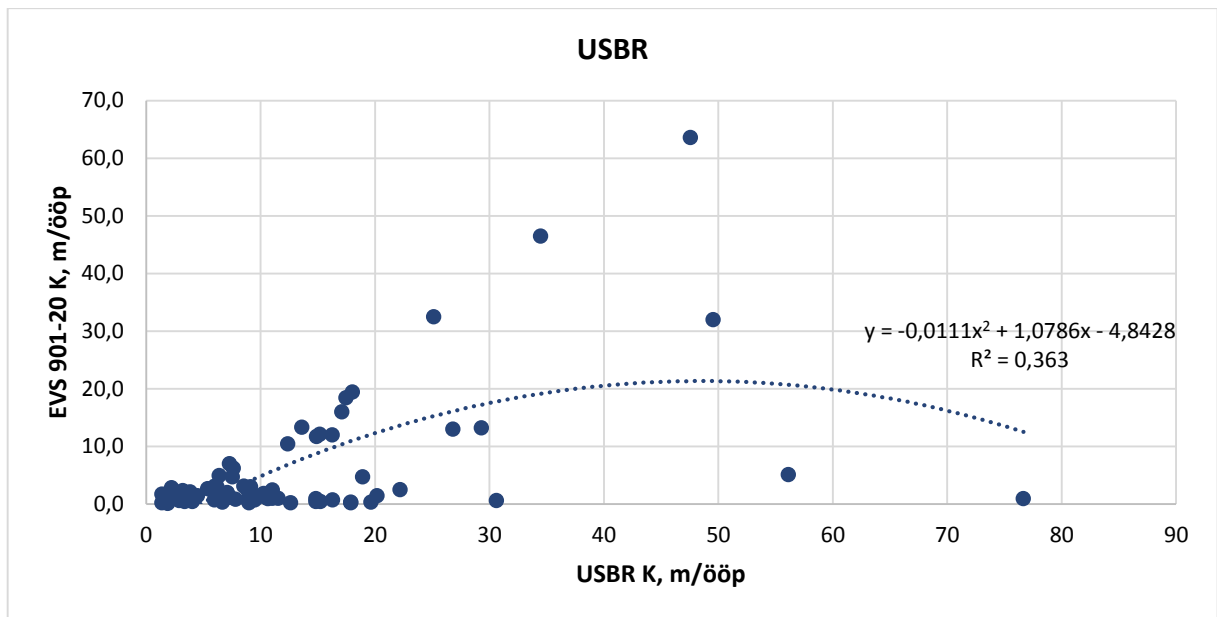
Joonis 21. Terzaghi valemi võrdlus EVS 901-20 katsetega

#### 2.4.5. U.S Bureau of Reclamation (USBR) valem

USBR valem (11) sobib kasutamiseks keskmise terasuurusega liivadele, mille ühtsuse koefitsient jääb alla viie. Valem ei arvesta poorsust. [17, p. 335]

$$K = 0,048 \frac{g}{v} d_{20}^{0,3} d_{10}^2, \quad (11)$$

- kus  $g$  -raskuskiirendus;  
 $v$  -vee viskoossus;  
 $d_{20}$  -efektiivdiameeter mm;  
 $d_{10}$  -efektiivdiameeter mm.



Joonis 22. USBK valemiga võrdlus EVS 901-20 katsetega

#### 2.4.6. Hazeni valem

Allen Hazeni valem (12) on üks lihtsamaid ja levinumaid valemiteid, mis seob filtratsioonimooduli suurused pinnase efektiivdiameetriga. [16]

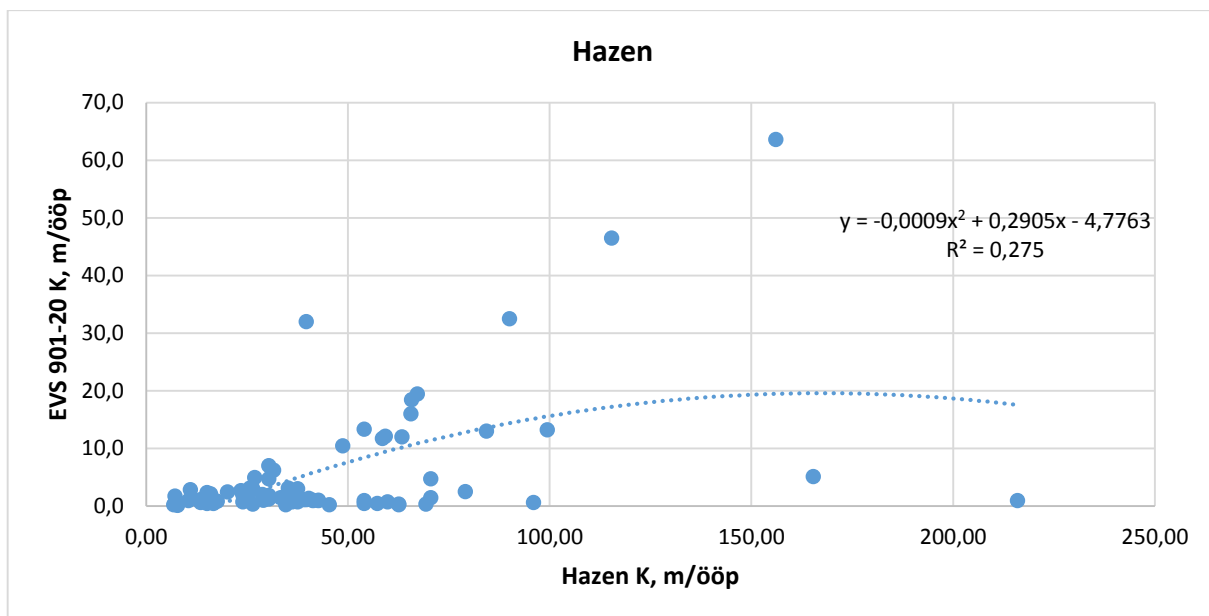
$$K = C d_{10}^2, \quad (12)$$

kus  $K$  -filtratsioonimoodul;

$C$  -empiiriline koefitsient, mille väärtus võetakse vahemikus 0,4 -1,2. Sageli valitakse 1,0;

$d_{10}$  -efektiivdiameeter mm.

Hazeni valem sobib kasutamiseks puhaste ja kohevate liivade puhul, millede efektiivdiameeter ( $d_{10}$ ) jääb vahemikku 0,1-3 mm. Valem ei arvesta poorsust. [15]



Joonis 23. Hazen`i valemi võrdlus EVS 901-20 katsetega

#### 2.4.7. Varasemad uuringud

2013. aastal on Tallinna Tehnikaülikooli üliõpilane Kadi Tuum koostanud lõputöö teemal „Dreenihi ja muldekeha materjalide ning pinnaste filtratsioonimooduli määramise võimalused“. Töös arvutatakse empiiriliste seostega filtratsioonimoodul ja võrreldakse tulemusi laboratoorsete katseandmetega (standardiseerimata Sojuzdornii meetod ja GOST 25584 lisa 5 meetod). Nimetatud töös käsitletakse viit empiirilist valemit, millest tugevama paraboolse seose ( $R^2 = 0,96$ ) annab Amer ja Awad`i valem. Kõikidel töös käsitletud valemitel on tugevam seos standardiseerimata Sojuzdornii meetodiga ja märgatavalt nõrgem seos GOST 25584 meetodiga. Lõputöös on empiirilisi valemeid võrreldud neljateistkümne laboratoorse katsetulemusega. Lisas 1 on esitatud empiiriliste seoste arvutustabel. Vältimaks väikesest võrdlusandmete kogumist tingitud kunstlikku tugevat seost, tuleks tulemusi võrrelda suurema katseandmete koguga. [18, p. 61]

Järgnevalt võrreldakse käesoleva lõputöö empiirilisi valemeid laboratoorsete katseandmetega (Tabel 10). Eesmärgiks on võrrelda  $R^2$  väärtuse muutust, proovide hulga suurenemisel ja leida seoseid K. Tuuma lõputööga.

Tabel 10

Empiiriliste ja laboratoorsete valemite korrelatsioon ( $R^2$ )

	Amer- Awad $R^2$	Kozeny- Carman $R^2$	Chapuis $R^2$	Terzaghi $R^2$	USB $R^2$	Hazen $R^2$
14 proovi	0,905	0,314	0,926	0,925	0,908	0,092
37 proovi	0,532	0,170	0,644	0,659	0,587	0,057
74 proovi	0,290	0,127	0,747	0,726	0,363	0,275

Ülaloleva tabeli põhjal saab järeldada  $R^2$  väärtuse suurt muutust proovide suurenemisel. Proovide hulgas annab parima tulemuse Chapuis'i valem, millele järgneb Terzaghi. Tabelis on näha tugevat seost neljateist proovi hulgas. Sarnaselt K. Tuuma lõputööle ( $R^2=0,96$ ) tekib Amer ja Awad'i valemiga ligilähedane tulemus  $R^2=0,905$ , kuid proovide suurenedes kahaneb väärtus. Tabeli põhjal saame järeldada, et proovide hulk võrdlemisel saab määravaks.

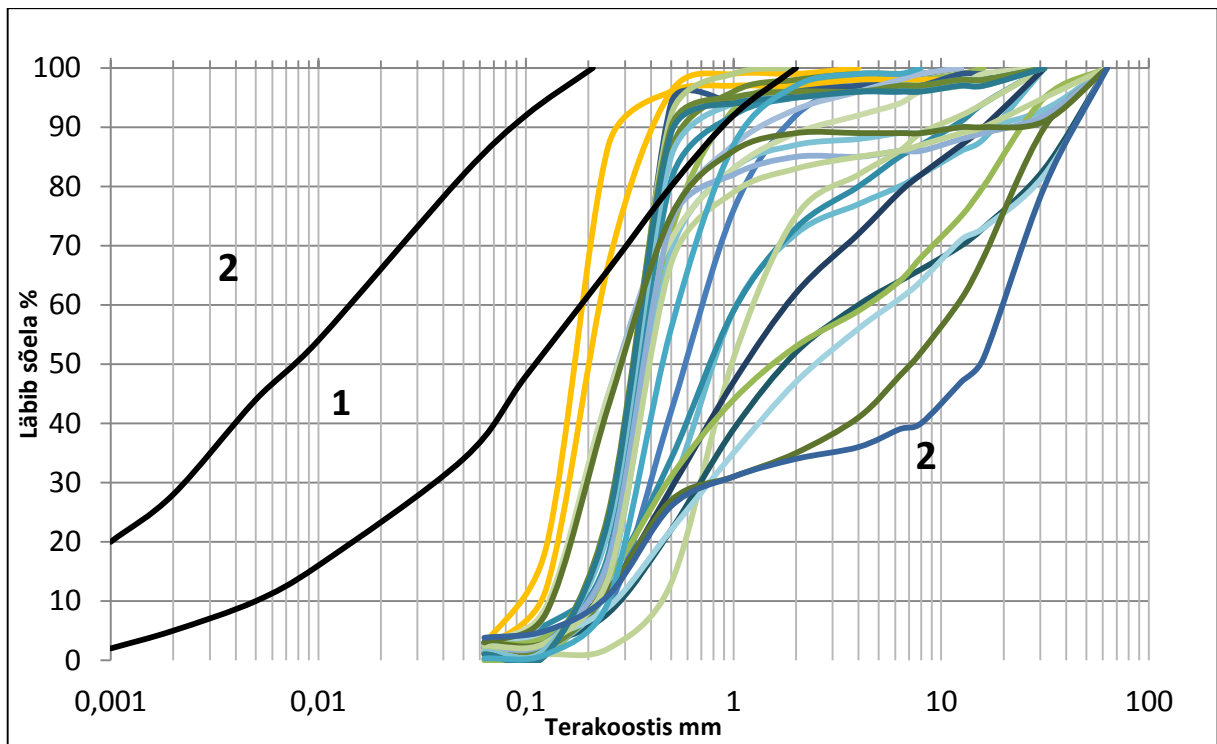
Käesolevas töös kasutatud empiirilistest valemitest tekitab EVS 901-20 andmetega kõige tugevama paraboolse ( $R^2=0,747$ ) seose Chapuis'i valem, millele lähedase tulemuse annab Terzaghi.

## 2.5. Riikide sõelkõverad külmakerke hindamiseks

Põhjamaise kliimaga riikides hinnatakse materjale rohkem nende külmakerkelisuse järgi ja filtratsioonimoodulile tuginetakse vähem, kuid teatavasti on mõlemad üksteisega tugevas seoses. Riikidel on välja kujunenud kindlad sõelkõvera piirid, mida ületades materjal on külmakerkeline ja vastupidi. Järgnevalt analüüsitakse erinevate riikide sõelkõveraid, mille peale on paigutatud ka mõningad iseloomulikud sõelkõverad AS Teede Tehnokeskuse poolt väljastatud katseandmetest.

### 2.5.1. Ühendkuningriik

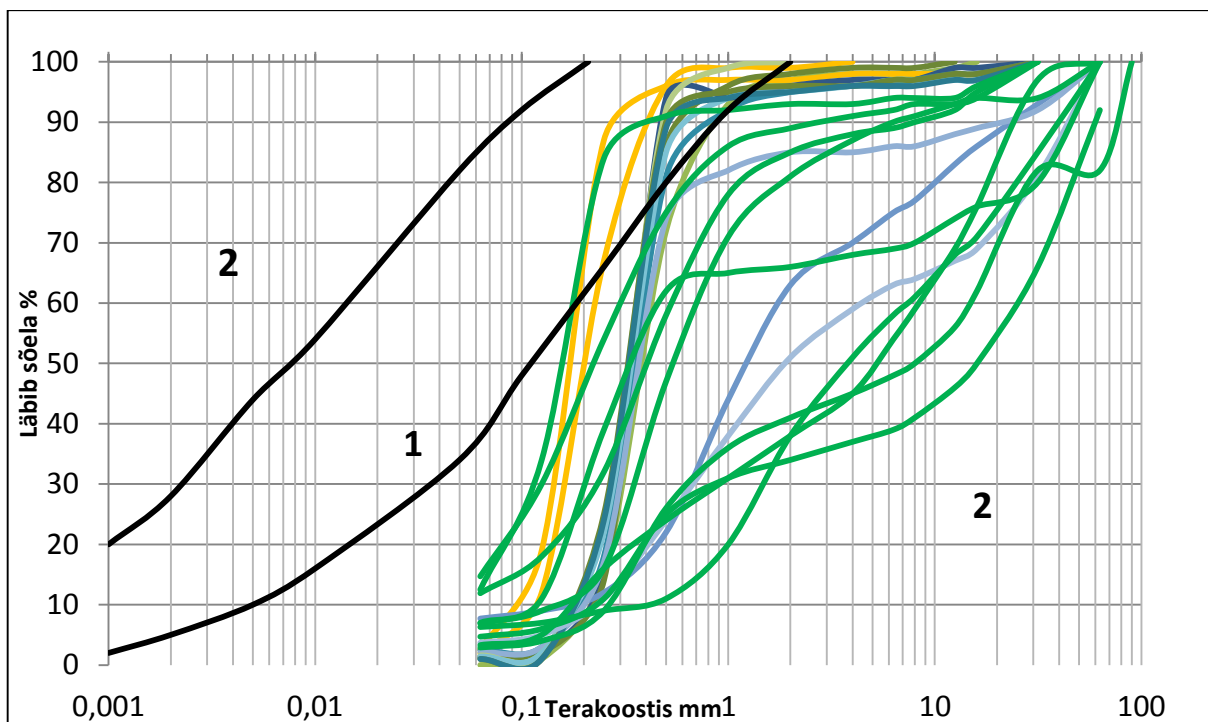
Suurbritannias kasutatav graafik pinnase külmakerkelisuse hindamiseks on esitatud joonisel 24. Graafikul alale „1“ jäävad materjalid on külmakerkelised ja alale „2“ külmakindlad. Graafikule on peale kantud ka mõningad Eestis mõõdetud andmed, mida käsitleti täpsemalt alapeatükis „2.1“.



Joonis 24. Ühendkuningriigi graafik külmakerkelisuse hindamiseks [19]

Graafikult (Joonis 24) on näha, et üksikud proovid ületavad külmaohtliku tsooni piirjoont, kuid seda vaid suuremate teraläbimõõtude osas. Enamus proovidest, mille filtratsioonimoodul ületab 1,5 m/ööp, paiknevad graafikul külmakindlas tsoonis. Mõned proovid, mille mõõdetud filtratsioonimoodul on kõrgem, kui 1,0 m/ööp, ületavad külmakerkeohutu materjali piirjoone, mistõttu tekib vastuolu. Teine erinevus tekib proovidega, mis jäävad tsooni kaks ja millel filtratsioonimoodul on väiksem, kui 0,2 m/ööp. Sellistel materjalidel on peenosise protsent kõrge, mille tõttu vesi filtreerub pinnases aeglaselt ja soodustab kapillaartõusu, mis omakorda põhjustab jääläätsede teket.

Suurbritannia graafikut analüüsid näeme, et seal esitatud kriteeriumid ei sobi kindlasti kasutamiseks põhjamaises kliimas, kuna nõuded on liiga leebed, mistõttu ei selekteerita piisava täpsusega välja mittefiltreeruvaid ja seega külmakerkelisi pinnaseid. Alljärgneval graafikul (Joonis 25) on esitatud proovid, mille filtratsioonimoodul on < 0,2 m/ööp, kuid enamik nendest oleks justkui täiesti sobilikud materjalid külmakerkelisust silmas pidades.



Joonis 25. Ühendkuningriigi graafik külmakerkelisuse hindamiseks [19]

Graafik (Joonis 25) annab ülevaate katseproovide ja külmakriteeriumite erinevusest. Graafikul on väiksemad kui 0,2 m/ööp materjalid tähistatud roheliste joontega. Antud graafikul jäävad madala filtratsioonimooduliga proovid külmakindlale alale, mille tõttu saab järeldada, et saadud katseandmed ei sobi Suurbritannia omadega. Ühendkuningriigi nõuded külmakerkele on leebed, sest 0,063 mm osakeste sisaldus võib olla kuni 35 %, mis Eesti mõistes tähendab mittefiltreeruvat materjali.

Tabel 11

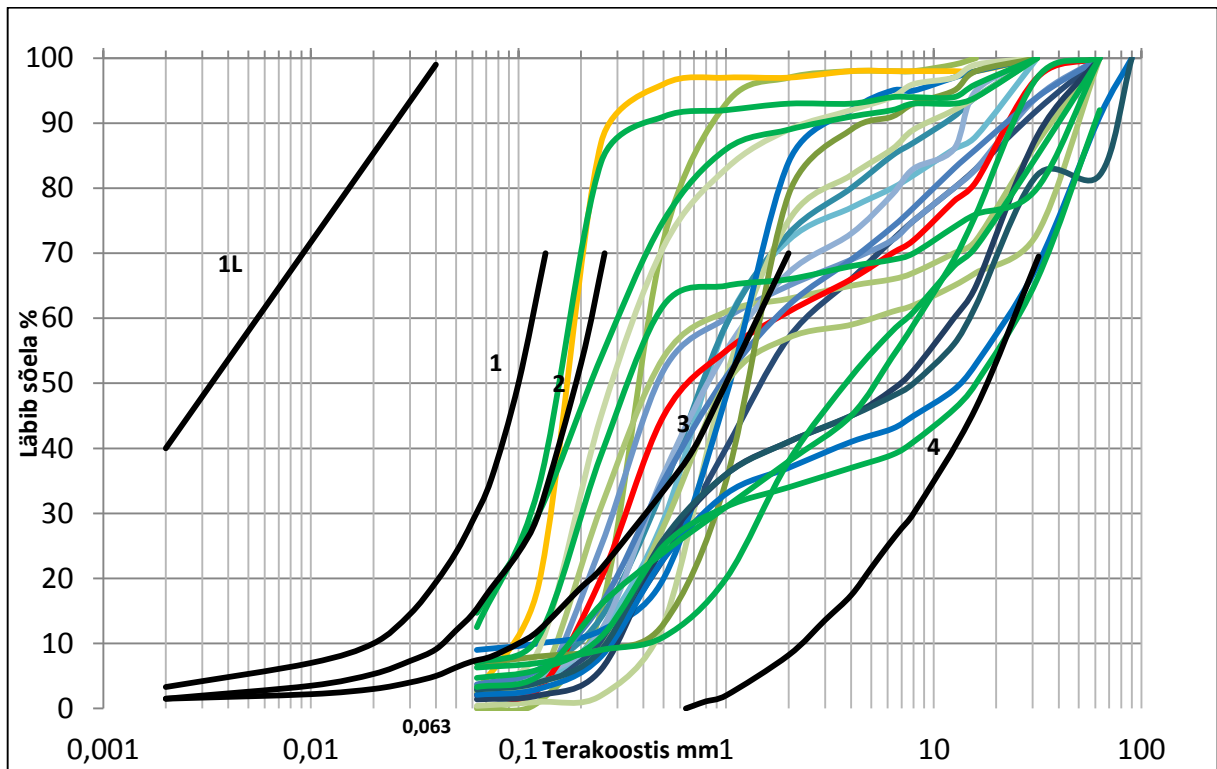
Ühendkuningriigi külmakriteeriumi ( mustad jooned) andmed [19]

Fraktsioon (mm)	2	1	0,5	0,25	0,21	0,1	0,05	0,01	0,005	0,002	0,001
%					100	92	82	54	44	28	20
%	100	92	80	66		48	34	16	10	5	2

### 2.5.2. Soome

Soomes kasutatav külmakindluse graafik on esitatud joonisel 26. Materjalid, mille sõelkõverad asetsevad alal „1“, on külmakerkelised. Materjalid, mille sõelkõverad asetsevad aladel „2“, „3“ või

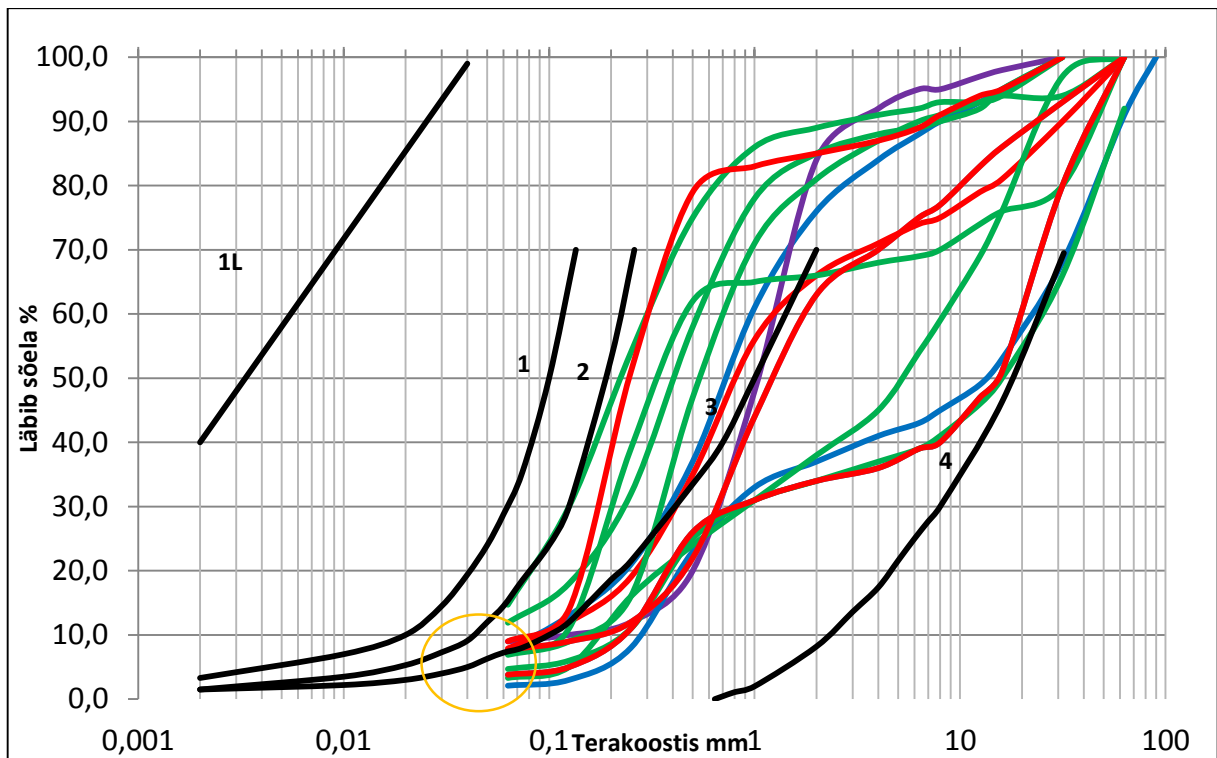
„4“ on külmakindlad niikaua, kuni nende sõelkõvera alumine ots ei ületa vasakpoolse sõelkõverapiiri joont. Materjalid, mis jäävad alla 1L sisse, on kergesti külmakerkelised. [20]



Joonis 26. Pinnaste külmakerkelisuse hindamine terastikulise koostise alusel [20]

Ülaloleval graafikul (Joonis 26) nähtub, et üksikud proovid filtratsioonimooduliga 0,1 – 1,1 m/ööp, lähevad külmakindlast alast välja, kuid valdav enamus jääb külmakindlasse tsooni. Kaks proovi, lähevad tsoonist „4“ välja ja omavad filtratsioonimoduleid 0,3 m/ööp ja 0,1 m/ööp.

Järgnevalt eemaldatakse graafikult proovid, mis jäävad Soome sõelkõvera piiride järgi külmakindlasse tsooni ja jäetakse alles materjalid, mis on külmakerkelised. Alloleval graafikul (Joonis 27) on külmakerkelised materjalid.



Joonis 27. Pinnaste külmarkerkelisuse hindamine terastikulise koostise alusel [20]

Graafikul (Joonis 27) on rohelised sõelkõverad väiksema filtratsioonimooduliga kui 0,1 m/ööp. Punased jooned on filtratsioonimooduliga 0,1 m/ööp ja sinised alates 0,3 m/ööp ning kõrgemad. Soome graafikul nähtub, et materjalide sõelkõverad on enamjaolt külmakindlates piirides, kuid kriitiliseks osutub ala, mis on ringiga tähistatud. Sõelkõverate 0,063 mm sõelast läbimine (alad 0,02 ja 0,002 mm) on külmarkerke suhtes kriitilise tähtsusega. [20] Ringiga tähistatud alas on näha, et materjalid võivad ületada vasakpoolset nr kolm joont, kui oleks näha peenemate kui 0,063 mm terastikuline koostis.

Antud graafikul esineb üksikud hälbeid, millest erandlikum materjal on filtratsioonimooduliga 1,1 m/ööp (lillaga tähistatud). Sõelkõver tõuseb graafikul järsku üles, kuid alumine ots jääb külmarkerke tsooni. Proovi erandlikkus seisneb materjali kõrges filtratsioonimoodulis, mille tagab ühtlane terakoostis ja kõrges peenosise sisalduses, mis paigutab joone külmarkerke tsooni.

Soome graafikute põhjal saame järeldada, et proovid, mis on piisava filtratsioonimooduliga jäävad külmakindlasse tsooni ja vastupidi. Esines üksikuid erandeid, kuid valdav enamus pidas paika ja näeme, et Eestis mõõdetav filtratsioonimoodul ja Soomes mõistetava külmarkerke kriteeriumi vahel on tugev seos.

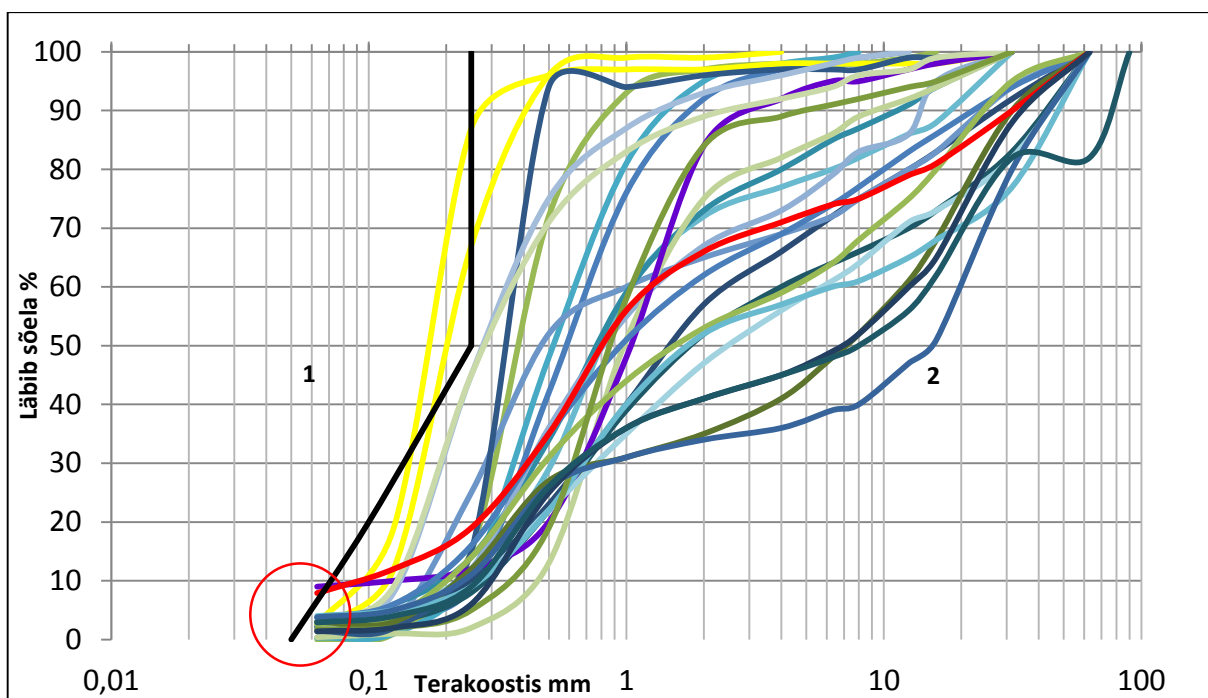
Tabel 12

## Soome külmakriteeriumi andmed [20]

<b>Fraktsioon (mm)</b>	<b>1L</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
0,002	40	3,3	1,5	1,5	
0,01	99	7	3,5	2,2	
0,02		10	5,3	3	
0,03		14,5	7,3	4	
0,04		19,4	9,1	5	
0,05		24	12	6,3	
0,06		28,8	14,5	7,25	
0,074		35,3	19,4	8	
0,1		50	24	10	
0,125			30	12	
0,135		70			
0,2			53	18,6	
0,25				21,5	
0,26			70		
0,5				33,5	
0,64					0
0,7				40	0,45
0,8					1,1
1				50	2
2				70	8,2
3					13,6
4					17,4
5					21,6
6					25
7					27,7
8					30
16					46,3
32					69,5

### 2.5.3. Venemaa ja Kasahstan

Venemaa ja Kasahstan kasutavad külmakerkelisuse hindamiseks joonisel 28 kujutatud graafikut. Materjalid, mille sõelkõverad jäävad alasse „1“, on külmakerkelised ja proovid, mis paiknevad alas „2“, on külmakindlad. Alasid eraldab must joon.



Joonis 28. Venemaa ja Kasahstani graafik külmakerkelisuse hindamiseks [19]

Ülaloleval graafikul (Joonis 28) on näha, et neli sõelkõverat satuvad külmakerke alale. Kollased jooned lähevad külmakerke tsooni 40 % juures ja suunduvad külmakindlasse tsooni 90 % juures. Tegemist on sõelkõveratega, mis tulid esile ka Suurbritannia graafikus (Joonis 24). Kollaste joontega tähistatud materjalidel mõõdeti filtratsioonimooduliks 1,7 ja 2,8 m/ööp.

Ülejäänud kaks sõelkõverat satuvad külmakerke alale 0,063 mm juures ja on väärtustega 1,1 m/ööp ja 0,1 m/ööp. Külmatundliku tsooni sattumise põhjus, seisneb peenosise kõrges sisalduses.

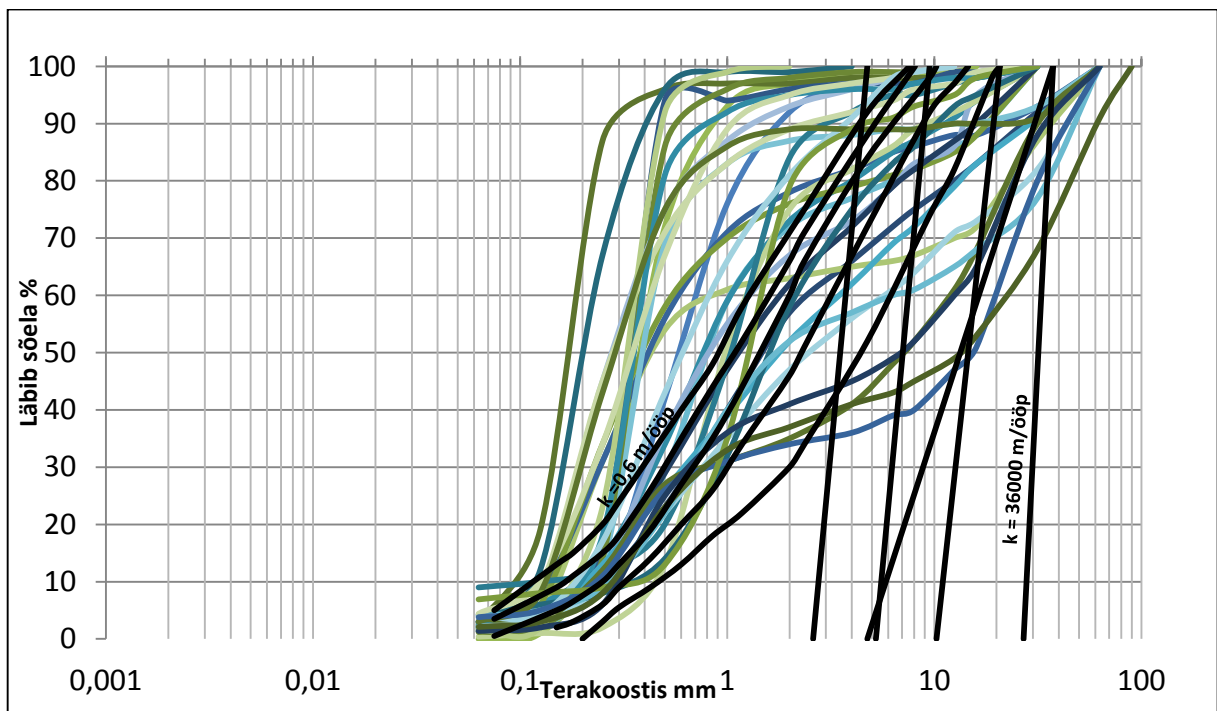
Tabel 13

Venemaa ja Kasahstani külmakriteeriumi andmed (must joon) [19]

Fraktsioon (mm)	0,25	0,25	0,25	0,1	0,05
%	100	50	50	20	0

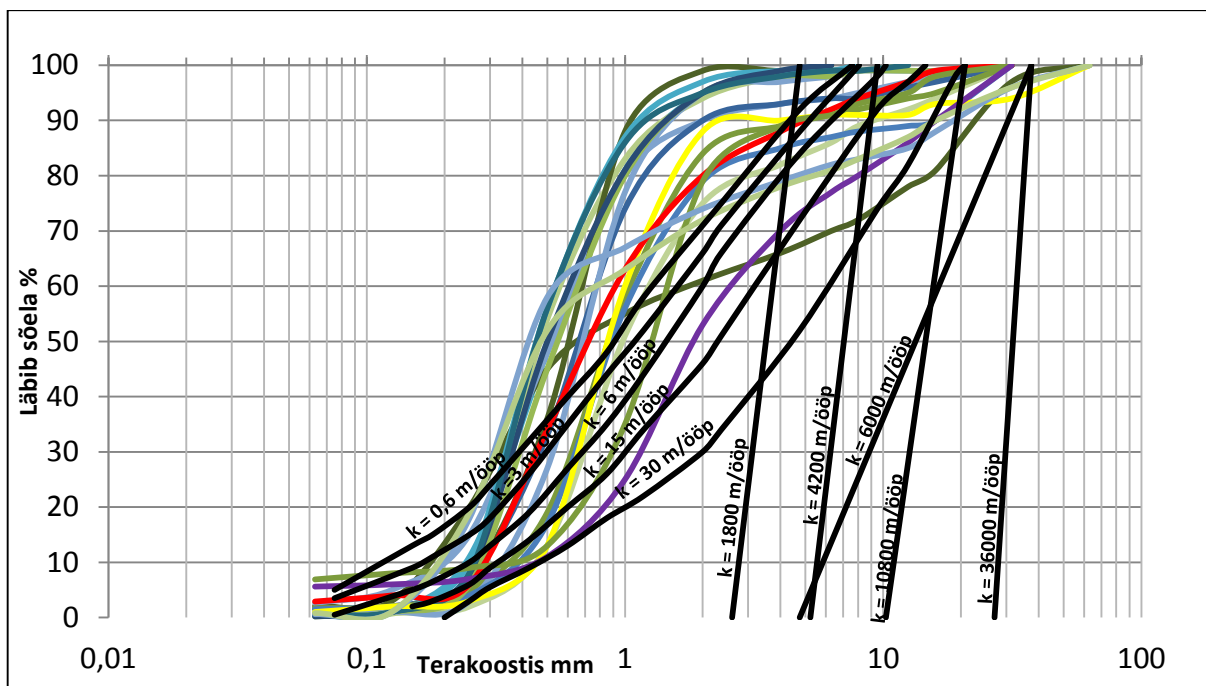
## 2.6. USA graafik filtratsioonimooduli määramiseks

Ameerika Ühendriigid on loonud sõelkõverate põhjal graafiku, mille abil on näha, mis filtratsioonimooduliga on mingi materjal. Autor proovib EVS 901-20:2013 meetodiga leitud filtratsioonimooduli tulemusi seostada USA graafikuga. Joonisel 29 on USA filtratsioonimooduli määramise graafik.



Joonis 29. Filtratsioonimooduli määramine terastikulise koostise alusel [21]

USA graafikul on näha, et sõelkõverad asetsevad kasvavas järjekorras. Väiksema filtratsioonimooduliga sõelkõver on vasakul pool ja kõige suurem paremal pool. Kuna proove on palju, siis autor eemaldab sõelkõverad, mis ei ühti graafikuga. Järgmisel graafikul (Joonis 30) on alles jätud kõrge filtratsioonimooduliga materjalid.



Joonis 30. Filtratsioonimooduli määramine terastikulise koostise alusel [21]

Ülalolev graafik kirjeldab materjale, millede väiksem filtratsioonimoodul on 4,7 m/ööp (punane joon) ja suurim 63,6 m/ööp (kollane joon). Graafikul on kõrge filtratsioonimooduliga materjalid, sest need moodustavad ühtse grupi, mida on hea võrrelda USA graafikuga.

Graafikul on näha, et materjalid on koondunud vasakpoolsesse serva, kus USA graafiku järgi asuvad madala filtratsioonimooduliga proovid. Seoseid luua USA sõelkõverate ja materjalide vahel ei saa, sest jooned tõusevad juba 40 % juures 0,6 m /ööpäeva joonest üle. Ühe seose saab siiski välja tuua, kui vaadata lillat joont (5,1 m/ööp), siis see kulgeb peaaegu paralleelselt USA sõelkõveraga, jäädes 6 m/ööp ja 15 m/ööp vahele.

Graafikult (Joonis 30) saame järeldada, et EVS 901-20-ga määratud materjalide sõelkõverad ei lähe kokku USA omadega. Tõenäoliselt seisneb erinevus mõõtemetoodikates ehk kui tihedas olekus proovi katsetatakse.

Tabel 14

USA graafiku andmed ( mustad jooned, m/ööp ) [21]

<b>Fr.</b> (mm)	<b>0,6</b> m/ööp	<b>3</b> m/ööp	<b>6</b> m/ööp	<b>15</b> m/ööp	<b>30</b> m/ööp	<b>1800</b> m/ööp	<b>4200</b> m/ööp	<b>6000</b> m/ööp	<b>10800</b> m/ööp	<b>36000</b> m/ööp
0,075	5	3,5	0,5							
0,15	13	9	5	2						
0,18	15	11	6,5	3						
0,2					0					
0,25	20	15	10	6	3					
0,3	24	18	13	9	5,5					
0,425	32	26	19	14	9					
0,6	40	35	27	20	13					
0,85	48	44	35	26	18					
1,18	58	52	44	34	22					
2	71	66	60	46	30					
2,36	75	71	66	51	34					
2,6						0				
4,75	92	88	84	72	52	100	0			
5,225								0		
7,6	100									
8,075		100								
9,5			98	92	74			100		
10,25			100						0	
12,5				97	82					
14,6				100						
19					98					
20,75					100				100	
25										
27										0
37,5							100			100

## KOKKUVÕTE

Filtratsioonimoodulil on kahtlemata suur mõju teekonstruktsioonile. Halvasti filtreeruvad materjalid soodustavad kapillaarveetõusu, mis omakorda tekitab külmakerget. Veega küllastunud pinnas kaotab liikluskoormuse all ettenähtud kandevõime, mis põhjustab tee vajumise. Seega on tähtis kasutada hästi filtreeruvaid materjale, mille juures tuleks tagada filtratsioonimooduli väärtuse täpsus.

Lõputöö raames analüüsiti EVS 901-20 katsetoodikaga leitud väärtusi ja loodi sõelkõvera välja piirväärtused 0,2 m/ööp ja 2,0 m/ööp jaoks. Sõelkõvera väljade puhul kehtib reegel, kui materjali sõelkõver jääb tervikuna piirväärtuste vahele on nõutud filtratsioonimoodul tagatud. Sõelkõvera väljad ei taganud 100-protsendilist tulemust, sest esines hälbeid.

Katseproove on mõlema sõelkõvera välja puhul kokku 89. Sõelkõvera väljal 0,2 m/ööp esines kümme hälbeiga proovi, mille hulgast arvestati maha neli erandlikku. Tulemuste põhjal selgus, et kui sõelkõver jääb täielikult piirväärtuste vahele siis on 93% tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit vähemalt 0,2 m/ööp. Kahtluse korral tuleks filtratsioonimoodul määrata laboratoorsel teel. Sõelkõvera väljal 2,0 m/ööp oli hälbeiga proove seitse, millest arvestati maha kaks erandiga proovi. Tuginedes eelnevale lausele on 94% tõenäoline, et materjal omab filtratsioonimoodulit vähemalt 2,0 m/ööp, kui sõelkõver jääb tervikuna punktiirjoonte vahele. Kahtluse korral tuleks filtratsioonimoodul määrata laboratoorsel teel.

Analüüsitud katseandmed ei taganud 100-protsendilist tulemust, kuid on arvestusliku suurusega. Tehtud mõõtetulemuste analüüs andis selge korrelatsiooni filtratsioonimooduli ja lõimise vahel. Seoses tulemuste kõrge tõenäosusprotsendiga ja piisavalt paljude andmete võrdlemisega, tuleks tehtud rakendada ehitusvaldkonnas. Selliste sõelkõvera väljadega võidetakse aega ja raha, tehes reaalse mõõtmise vaid pinnastele, mille osas on tulemus ebaselge.

Lõputöös arvatati empiiriliste seoste abil filtratsioonimoodul ja tulemusi võrreldi laboratoorsete katsetega. Kõige tugevama seose andis Chapuis'i valem, millele järgnes Terzaghi.

Lisaks empiirilistele valemitele, analüüsiti riikide külmakerke graafikuid, mis baseeruvad materjalide terastikulisel koostisel. Analüüsimise põhjuseks oli madala filtratsioonimooduli ja külmakerkelise

materjali tugev seos. Graafikute võrdluse käigus andis kõige tugevama seose EVS 901-20 katseandmetele Soome graafik, mida kasutatakse ka Eestis. Külmakerke graafikutele lisaks, kasutati USA graafikut, mis tugineb filtratsioonimooduli mõõtmisele materjali terakoostise põhjal. USA ja EVS 901-20 katseandmed erinesid üksteisest oluliselt, tõenäoliselt seisneb erinevus mõõtemetoodikates.

## SUMMARY

### „THE CORRELATION BETWEEN THE PERMEABILITY AND THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF THE SOIL“

This topic is important, because laboratory experiments for determining the filtration module are time consuming and thus expensive for the customer. The aim of the thesis is to find out the limit values of the grading curve's field, in the case of which it could be determined after the experimental results of the materials granular composition that the tested material has the maximum density in the designed filtration module of the road's construction.

Filtration module is the magnitude that characterizes the soil's water permeability, which is expressed by the unit meter a day (m/day). When the soil has a low filtration module or poor drainage then it is important that when water gets into the road's construction it would flow out quickly. When the road's construction holds excessive water which has nowhere to flow, then the road might lose its planned load bearing capacity, which causes the road subsidence.

Within the thesis the values found with the EVS 901-20 test methods were analyzed and the limit values of the grading curve's field of 0,2 m/day and 2,0 m/day were created. With the grading curve's fields there stands a rule that when the material's grading curve stays as a whole between the limit values the required filtration module is guaranteed. The grading curve's fields did not guarantee a 100% results, because anomalies occurred. There are 89 sample tests for both grading curve's fields. The results showed that when the grading curve stays as a whole between the limit values there is a 93% probability that the material has a filtration module of at least 0,2 m/day. On the grading curve's field of 2,0 m/day there is a 94% probability that the material has at least a 2,0 m/day filtration module, when the grading curve as a whole stays between the dotted line. In case of concern the filtration module should be determined with the laboratory method.

The analyzed test results did not guarantee a 100% result, but are of book value. The analysis of the measurement results showed a clear correlation between the filtration module and the particle size of

distribution. In connection with the high probability percentage of the results and comparing a sufficient amount of data the results should be put into practice in the field of construction. With these kind of grading curve's fields time and money could be saved notably with measuring in real only the soil that has a vague result.

In this thesis six empirical formulas were used: Amer and Award, Kozeny-Carman, Chapuis, Terzaghi, USBR and Hazen. The obtained results from the formulas were compared to EVS 901-20 test method. Chapuis formula gave the best parabolic connection, which was followed by Terzaghi's formula.

In addition to comparing empirical formulas, frost heaving graphs of different countries were analyzed, which is based on the material's granular composition. The reason for this analysis was a strong connection between the filtration module and the material's heaveability by the frost. The comparisons showed the strongest connection between EVS 901-20 test results and Finland's graph, which is also used in Estonia. In addition to frost heaving graphs USA's graph was used, which is based on the filtration modules measurements of the materials granular composition. USA's and EVS 901-20's test results differentiated notably from each other, which is probably due to different measuring methods.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] V. Jaaniso, Pinnasemehaanika inseneridele, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- [2] O. Talvik, „Filtratsioonimooduli määramine,“ Tallinn, 2012.
- [3] Põhjaveekomisjon, Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse, Tallinn, 2004.
- [4] m. Tallinna Tehnikaülikool, „Mäendusõpik,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://maeopik.blogspot.com/2010/03/filtratsioonimoodul.html>.
- [5] A. Vaimel, „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.mnt.ee/failid/juhised/elastsete\\_teeakatendite\\_projekteerimise\\_juhend.pdf](http://www.mnt.ee/failid/juhised/elastsete_teeakatendite_projekteerimise_juhend.pdf).
- [6] A. Dawson, WATER IN ROAD STRUCTURES. Movement and Drainage & Effects, 2008.
- [7] D. Ü. Sõstra, „AKG3700. Loengu materjalid 8,“ 16 10 2002. [Võrgumaterjal]. Available: [www.hot.ee/peainsener/L8.doc](http://www.hot.ee/peainsener/L8.doc).
- [8] „Ehitusgeoloogia ülesanded ja sisu,“ [Võrgumaterjal]. Available: [hot.ee/e/ehitajad/ehitusgeoloogia\\_parandatud.doc](http://www.hot.ee/e/ehitajad/ehitusgeoloogia_parandatud.doc).
- [9] Maanteeamet, „Muldkoha remondi projekteerimise juhise,“ 29 Detsember 2006. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.mnt.ee/failid/juhised/muldkoha\\_remondi\\_projekteerimise\\_juhis.pdf](http://www.mnt.ee/failid/juhised/muldkoha_remondi_projekteerimise_juhis.pdf).
- [10] Maanteeamet, „Tee-ehituses kasutatavate filtratsioonimooduli erinevate määramismeetodite teaduslik võrdlusuuring ja otstarbeka katsemeetodi standardiseerimine ning Teedeala standardimistegevuse koordineerimine ja osalemine Eurostandardite väljatöötamisel, 2012-17/L,“ 2013. [Võrgumaterjal].
- [11] „Roadex,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.roadex.org/e-learning/lessons/drainage-of-low-volume-roads/introduction-why-drainage-is-important/>. [Kasutatud 1 mai 2015].
- [12] Maanteeamet, „käskiri filtratsioonimääramise kohta,“ 14 veebruar 2013. [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.mnt.ee/public/juhendid/Maanteeameti\\_kaskkiri\\_nr\\_0069\\_14.02.13.pdf](http://www.mnt.ee/public/juhendid/Maanteeameti_kaskkiri_nr_0069_14.02.13.pdf).

- [13] „Vikipeedia. Hüdrauliline veejuhtivus,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_conductivity](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_conductivity).
- [14] EVS 901-20:2013. Tee-ehitus. Katsemeetodid. Osa 20: Filtratsioonimooduli määramine, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2013.
- [15] J. Assaad ja J. Harb, „Assaad, Joseph; Harb, Jacques, Use of the Falling-head Method to Assess Permeability of,“ 2013. [Võrgumaterjal].
- [16] C. W. David, „Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman,“ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, november 2003.
- [17] A. Sezer, A. Göktepe ja S. Altun, Estimation of the permeability of granular soils using neuro-fuzzy system, Department of Civil Engineering, Ege University, 2009.
- [18] K. Tuum, Dreenkihi ja muldkeha materjalide ning pinnaste filtratsioonimooduli määramise võimalused, Tallinn, 2013.
- [19] Z. Shakhmov, A. Zhussupbekov ja Y. B. Uteпов, Evaluation frost heaving of soils based in Astana, Astana, 2012.
- [20] „yleiset perusteet,“ 1993. [Võrgumaterjal]. Available: [http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset\\_perusteet.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf). [Kasutatud 10 aprill 2015].
- [21] Y. H. Huang, Pavement analysis and design, 2004.

## Lisa 1. Empiiriliste seoste arvutustabel

Materjali jrk nr	Materjali päritolu	erimass $\rho_s$ , g/cm <sup>3</sup>	*kuivmahu-mass $\rho_d$	poorsus n	poorsustegur e	efektiiv-deiameer D50, cm	efektiiv-deiameer D10, mm	lõimisetegur Cu	Kozeny-Carman'i valemi järgi K, m/ööp	Amer ka Awad'i valemi järgi K, m/ööp	Chapuis'i valemi järgi K, m/ööp	Berg'i valemi järgi K, m/ööp	Hazeni valem järgi K, m/ööp
1	Männku karjäär	2,63	1,75	0,335	0,503	0,053	0,230	2,7	87,07	107,43	21,61	0,074	45,71
2	Karjaküla karjäär		1,64	0,376	0,604	0,030	0,140	2,4	45,23	51,30	14,50	0,043	16,93
3	Kalda karjäär		1,81	0,312	0,453	0,032	0,082	5,0	24,01	10,75	3,46	0,019	5,81
4	Luije liichussõlm		1,88	0,285	0,399	0,074	0,210	4,5	91,04	63,40	11,51	0,064	38,10
5	Ropka (Aardlapah) II		1,80	0,316	0,461	0,033	0,110	4,1	26,77	19,77	5,68	0,021	10,45
6	Ropka (Aardlapah) I		1,59	0,395	0,654	0,016	0,080	2,1	15,87	15,94	7,12	0,016	5,53
7	Koller karjäär		1,82	0,308	0,445	0,063	0,210	4,8	88,70	88,58	14,51	0,068	38,10
8	Jaani-Hansi karjäär		1,68	0,361	0,565	0,025	0,110	2,8	26,45	27,08	8,69	0,024	10,45
9	Krüüdneri (Kalda) karjäär		1,82	0,308	0,445	0,051	0,150	4,9	58,13	41,09	8,57	0,045	19,44
10	Nogopah I		1,92	0,270	0,370	0,040	0,080	7,5	21,64	7,47	2,16	0,014	2,21
11	Nogopah II		1,87	0,289	0,406	0,030	0,079	4,7	15,74	7,08	2,59	0,011	5,39
12	Vaidasoo karjäär		1,73	0,342	0,520	0,042	0,180	3,5	59,85	77,81	15,81	0,052	27,99
13	Soomaa karjäär		1,70	0,354	0,547	0,033	0,150	2,5	42,22	47,21	13,19	0,038	19,44
14	Tammenäe III karjäär		1,70	0,354	0,547	0,046	0,280	2,0	82,03	175,23	35,03	0,074	67,74