

Töö nr 15-10-1249

MULDKEHADES JA DREENIKIHTIDES KASUTATAVATE  
MINERAALMATERJALIDE VEEJUHTIVUS- JA TUGEVSOMADUSED  
SEOTUNA TERASTIKULISE KOOSTISEGA

I ETAPP. MINERAALMATERJALI FILTRATSIOONIMOODULI SEOS  
TERASTIKULISE KOOSTISEGA

TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI VASTAVA UURINGUARUANDE  
TÄIENDAMINE TÄIENDAVATE KATSETULEMUSTE ANALÜÜSIGA

30. jaanuar 2016

Autorid

Annette Talpsep

Pille Sedman

Peeter Talviste

Juhataja

Peeter Talviste

Tallinn, 2016

AUTORIÕIGUS © OÜ IPT PROJEKTJUHTIMINE

Kõik õigused kaitstud. Töö ja selle ülesehitus on kaitstud Eesti Vabariigi autoriõigusseaduse kohaselt. Seda dokumenti või selle osa ei tohi kopeerida ega paljundada mis tahes viisil ilma OÜ IPT Projektjuhtimine antud kirjaliku loata.

## SISUKORD

1 ÜLDOSA .....	4
1.1 Töö tellija ja eesmärk .....	4
1.2 Töö sisu .....	4
1.3 Lähteandmed ja kasutatud kirjandus .....	4
1.4 Koostajad .....	5
1.5 Kasutatud lühendid ja nende selgitus .....	6
2 ANALÜÜSITUD ANDMEKOGUMID .....	7
2.1 TTK uuringu, TTÜ uuringu ja Asfaldiliidu andmekogumite võrdlus .....	7
2.2 Sõelkõveraväljade võrdlus .....	8
3 VEE VOOLAMINE MITTEHOMOGEENSES KESKKONNAS .....	11
3.1 Mittehomogeense keskkonna tekkepõhjustest .....	11
3.2 Mittehomogeense keskkonna veejuhtivus .....	14
4 SEOS VERTIKAALSE JA HORISONTAALSE FILTRATSIOONIMOODULI VAHEL .....	16
4.1 Vertikaalse filtratsioonimooduli (EVS-EN 901:20) sõltuvus peenosise sisaldusest ja efektiivdiameetrist $d_{10}$ .....	16
4.2 Horisontaalse filtratsioonimooduli arvutamine .....	18
4.3 Vertikaalse filtratsioonimooduli leidmine .....	21
5 SOOVITUSED DREENIKIHI PROJEKTEERIMISEKS .....	26
5.1 Vee voolamine dreenikihis .....	26
5.2 Vee voolamine EVS-EN 901-20 katseseadmes .....	26
5.3 Vertikaalne ja horisontaalne filtratsioonimoodul .....	27
5.4 Ettepanek dreenikihi mineraalmaterjali kontrolli muutmiseks .....	27
5.5 Vajalikud kontrollkatsed .....	28
5.6 Soovituslikud varutegurid .....	28
6 TIHEDUSE MÕJU FILTRATSIOONIMOODULILE .....	29
7 KOKKUVÕTE .....	31
7.1 Dreenikihi materjali sobivuse hindamise meetodi lühikirjeldus .....	31
7.2 Arvutuseeskirjad .....	31
7.3 Edasiste uuringute vajadus ja suunitlus .....	31

# 1 ÜLDOSA

## 1.1 Töö tellija ja eesmärk

Käesoleva töö tellis Asfaldiliit.

27.08.2015.a. toimus Asfaldiliidu esindajate ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühine nõupidamine, kus osalesid mineraalmaterjali filtratsioonimooduli määramisega seotud töörühmade esindajad. Lepiti kokku, et Asfaldiliit korraldab täiendavate katseandmete kogumise ja analüüsi TTK I etapi uuringute vaheandmete täiendamiseks.

## 1.2 Töö sisu

Konkreetsemalt on käesolevas aruandes käsitletud järgmisi aspekte:

1. Asfaldiliit kogus ja esitas 03.11.2015 56 täiendava proovi katsetulemused, kus mineraalmaterjali filtratsioonimoodul oli määratud EVS-EN 901-20 kohaselt. Nende katsete tulemusi on käesolevas töös analüüsitud.
2. EVS-EN 901-20 hindab proovid, mille peenosise (<0,063 mm) sisaldus on >8% mittefiltreeruvaks ja katset läbi ei viida. Selliseid proove oli 56-st 7 ja neid analüüsi ei saanud kaasata. Et analüüsida peenosise mõju filtratsioonimooduli väärtusele peenosise sisaldusel >8% kaasati analüüsi ka katseandmed TTÜ 2013.a. uuringutest, kokku 43 katse tulemused.
3. Selgitati põhjused, miks EVS-EN 901-20 meetodika järgi saadakse süstemaatiliselt väiksemad filtratsioonimoodulid võrreldes teaduskirjanduses toodud valemite kaudu arvutatuga.
4. Leiti filtratsioonimooduli väärtused teaduskirjanduses toodud valemite abil, erineva tiheduse juures – 95%, 98%, 100% ja 102% standardsest Proctorteimi maksimaaltihedusest – hindamaks vajadust katsetulemusi vastava teguriga korrigeerida.
5. Analüüsiti sõelkõveraväljasid, mille kaudu hinnata filtratsioonimooduli väärtust. Võrreldi teaduskirjanduses toodud ja TTK uuringute I etapi vahearuaudes toodud sõelkõveraväljasid.
6. Analüüsi tulemuste põhjal pakuti välja praktiline lahendus peenosist sisaldava mineraalmaterjali filtratsioonimooduli hindamiseks ja drenikihi projekteerimiseks vastava juhendi või eksisteeriva projekteerimisjuhendi täiendusena.

## 1.3 Lähteandmed ja kasutatud kirjandus

1. S. Sillamäe, R. Vaidla, „Muldkehades ja drenikihtides kasutatavate mineraalmaterjalide veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega. I etapp.

- Mineraalmaterjali filtratsioonimooduli seos terastikulise koostisega.“ TTK uuringu I etapi vahearuande, 2015.
2. R. Vaidla, „Filtratsioonimooduli seos pinnase terastikulise koostisega“, TTK Ehitusteaduskonna teedeehituse eriala lõputöö, Tallinn, 2015.
  3. O. Talvik, „Tee-ehituses kasutatavate filtratsioonimooduli erinevate määramismeetodite teaduslik LÕPPARUANNE-LISA“, TTÜ Teedeinstituut, 2012-17/L-LISA, 2013.
  4. O. Talvik, „Tee-ehituses kasutatavate filtratsioonimooduli erinevate määramismeetodite teaduslik võrdlusuuring ja otstarbeka katsemeetodi standardiseerimine ning Teedeala standardiseerimistegevuse koordineerimine ja osalemine Eurostandardite väljatöötamisel“, TTÜ Teedeinstituut, 2012-17/L, 2013.
  5. EVS 901-20:2013, „Tee-ehitus. Katsemeetodid. Osa 20: Filtratsioonimooduli määramine“.
  6. K. Tuum „Dreenikihi ja muldkeha materjalide ning pinnaste filtratsioonimooduli määramise võimalused“, ETT 60 LT, TTÜ lõputöö, 2013.
  7. Vilo, A., „Ehitusgeoloogia“, Tartu Riiklik Ülikool, 1986.
  8. Chapuis, R. P., “Similarity of internal stability criteria for granular soils.” *Can Geotech J* 29:711–713, 1992.
  9. Chapuis, R. P. “Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review.” *Bull Eng Geol Environ* (2012) 71:401–434, 2012.
  10. Czurda, K. Clay liners and waste disposal. *Handbook of clay science*, Elsevier, 2006
  11. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52.
  12. ВС-46-83 “Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа.”
  13. ОДН 218.046-01 “ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД”
  14. Foster, M. A. and Fell, R. (1999) Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria. UNIVCIV Report No. R-376, May 1999. School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Australia.
  15. Sherard, J.L. 1979. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. *Transactions*, 13th ICOLD, New Delhi, India. International Commission on Large Dams, Paris, Vol.2, pp.25-35.

#### **1.4 Koostajad**

Käesoleva analüüsi tegid ja aruande koostasid Annette Talpsep, Pille Sedman ja Peeter Talviste. Annette Talpsep on geoloogiadoktor ja geotehnikainsener. Pille Sedman on hüdrogeoloog ja geotehnikainsener. Peeter Talviste on geoloogiadoktor, Eesti volitatud ehitusinsener (geotehnika) ja volitatud mäeinsener.

## 1.5 Kasutatud lühendid ja nende selgitus

Filtratsioonimooduli erinevad tähitused:

$k_V$  – läbi mittehomogeense kihi toimuva vertikaalsuunalist voolamist iseloomustav filtratsioonimoodul

$k_H$  – läbi mittehomogeense kihi toimuva horisontaalsuunalist voolamist iseloomustav filtratsioonimoodul

$k_{EVS}$  – EVS-EN 901-20 meetodika kohaselt katseliselt määratud filtratsioonimoodul

$k_{Ch}$  – Chapuis (2012) valemiga arvutatud filtratsioonimoodul

$k_1...k_n$  – mittehomogeense proovi osakihtide filtratsioonimoodul

Muud tähised:

$e$  – poorsustegur, pooride ruumala suhe tahke faasi ruumalasse pinnases

$d_{10}$  – efektiivdiameeter, diameeter millest väiksema diameetriga pinnaseosakesi on proovis 10% kaaluprotsenti

$d_{15}(j\grave{a}me)$  – jämeda fraktsiooni diameeter, millest väiksema diameetriga pinnaseosakesi on jämedas fraktsioonis 15% kaaluprotsenti

$d_{85}(peen)$  – peene fraktsiooni diameeter, millest väiksema diameetriga pinnaseosakesi on peenes fraktsioonis 85% kaaluprotsenti

$I_r$  – sisemise ebastabiilsuse koefitsient,  $I_r = d_{15}(j\grave{a}me) / d_{85}(peen)$

$b$  – kihi paksus

$b_1...b_n$  – mittehomogeense proovi osakihtide paksus

## 2 ANALÜÜSITUD ANDMEKOGUMID

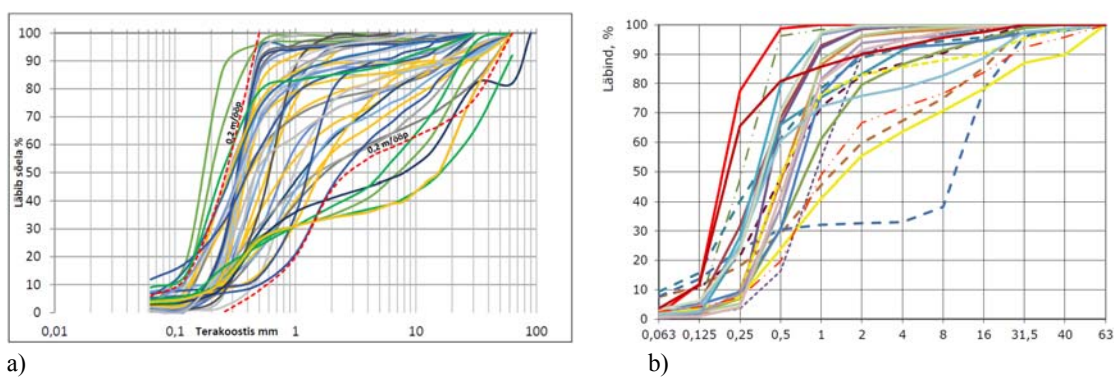
### 2.1 TTK uuringu, TTÜ uuringu ja Asfaldiliidu andmekogumite võrdlus

Kehtestatud standardi (EVS-EN 901-20) meetodika kohaselt määratud filtratsioonimooduli seost mineraalmaterjali terastikulise koostisega on Eestis uuritud enne (TTÜ [3, 4, 6]) ja pärast (TTK [1, 2]) vastava standardi kehtestamist. TTÜ uuringud tehti eesmärgiga leida sobiv meetod standardiseerimiseks ning need sisaldavad erineva meetodika järgi tehtud võrdluskatseid. TTK uuringu eesmärgiks oli filtratsioonimooduli empiirilise (reaalset katsetamist mitte nõudva) määramise võimaluste leidmine. Koostati sõelkõveraväljad ja võrreldi EVS-EN 901-20 meetodika järgi määratud filtratsioonimoodulit teaduskirjanduses avaldatud empiiriliste valemite kaudu arvutatud filtratsioonimoodulitega.

TTK uuringus kasutati 89 (ilma konkreetse asukohamääranguta) proovi andmeid. TTÜ uuringutes kasutati 43 proovi andmeid (14 proovi aruandest [3] ja 29 proovi aruandest [4]). Proovid on fikseeritud asukohaga kokku 39 erinevast karjäärist üle Eesti.

Käesolevas analüüsis kasutati TTÜ uuringu andmekogu ning tellijalt saadud 56 proovi andmeid. Viimastest kasutati ainult 49 proovi katsetulemusi, kuna 7 proovis oli peenosise (<0,063 mm) sisaldus üle 8% ning filtratsioonimooduli väärtust vastavalt EVS-EN 901-20 soovitusel katseliselt ei määrata. Kokku kasutati analüüsis 92 proovi andmeid.

Erinevate andmekogumite võrdlemiseks on mitmeid statistikale põhinevaid võimalusi. Kuna TTK uuringus on andmed esitatud vaid graafiliselt, siis on ka andmekogumeid võrreldud graafiliselt (*Joonis 1*). Andmed on võrreldavad ja sarnased, kuna sõelkõverad hõlmavad sarnase ala.



Joonis 1. a) TTK uuringus kasutatud proovide sõelkõverad ja b) TTÜ uuringu sõelkõverad.

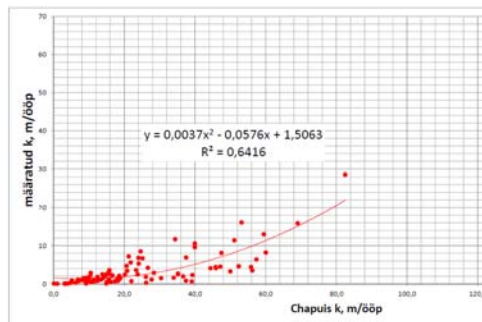
Ilmekamalt tuleb erinevate andmehulkade sarnasus esile regressioonanalüüsil, mis on tehtud katsega EVS-EN 901-20 kohaselt määratud ja Chapuis (20012) valemi [9] kaudu arvutatud filtratsioonimoodulite võrdlemiseks.

Kasutades TTK uuringu andmeid (*Joonis 2, a*), avaldub seos kahe erineval viisil saadud filtratsioonimooduli vahel valemiga:

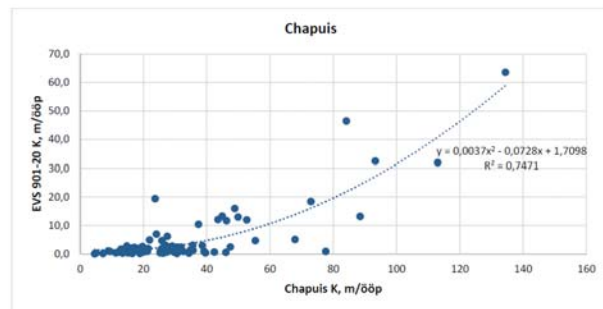
$$k_{EVS} = 0,0037 \cdot k_{Ch}^2 - 0,0728 \cdot k_{Ch} + 1,7098 \quad (R^2=0,75).$$

Kasutades käesoleva uuringu andmekogumit (*Joonis 2, b*) väljendab seost valem:

$$k_{EVS} = 0,0037 \cdot k_{Ch}^2 - 0,0576 \cdot k_{Ch} + 1,5063 \quad (R^2=0,64)$$



a)



b)

Joonis 2. Seos EVS-EN 901-20 kohaselt määratud ja Chapuis (2004) valemi kaudu arvatud filtratsioonimooduli vahel a) käesolev uuring, b) TTK uuring [1]. Mõlemal juhul on arvutuse aluseks proovi täielik lõimis.

Kuna uuritud seost iseloomustavad valemid on praktiliselt identsed, siis määrangute ja arvutuste vahel eksisteerib sarnane seos, seega on ka katseandmed võrreldavad ja sarnased.

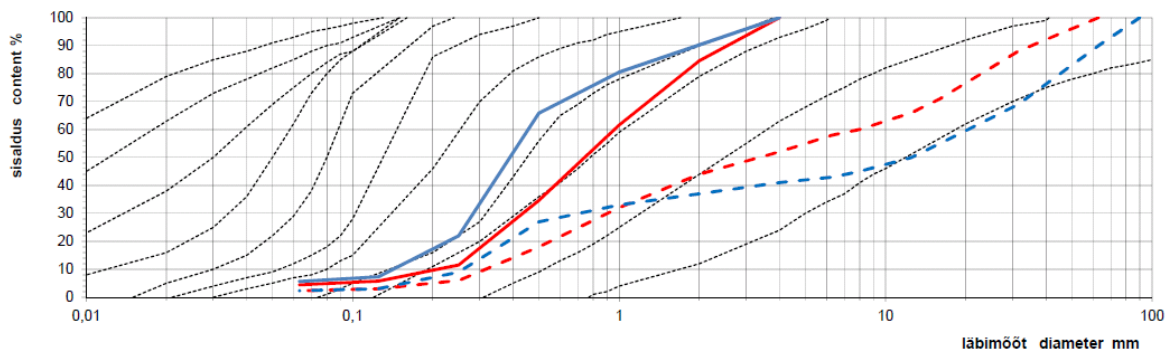
*Joonisel 2* on aga samuti selgelt näha, et EVS-EN 901-20 kohaselt määratakse filtratsioonimoodul reeglina väiksemana kui lõimiskoostise alusel arvatatu. Selle erinevuse põhjuste selgitamiseks käesolev analüüs tehti.

## 2.2 Sõelkõveraväljade võrdlus

Sõelkõveravälju saab koostada erinevatel alustel. TTK uuringus [1, 2] kasutati väljade kontuurimiseks kogu proovi sõelkõverat.

Vastavalt EVS-EN 901-20 katseteetodikale eemaldatakse proovist enne katsetamist fraktsioon üle 4 mm ehk suuremad pinnaseosakesed sõelutakse välja. Selle tulemusel võib aga katseseadmesse tihendatud proov lasundist võetud algsest proovist oluliselt erineda.

Seda kinnitavad *Joonisel 3* esitatud kahe proovi lõimisgraafikud. Mõlema proovi peenosise (<0,063 mm) sisaldus enne katsetamist oli võrdne – 2,3 %. Asfaldiliidu andmebaasi proovi nr. 49 lõimiskõver on näidatud punase katkendjoonega, sama proovi lõimiskõver peale >4 mm osade eemaldamist, on näidatud punase pidevjoonega. Sinise katkendjoonega on näidatud TTK uuringu [1] joonisel 4 „halli“ algse proovi lõimiskõver ning sinise pidevjoonega sama proovi lõimiskõver peale >4 mm osade eemaldamist.

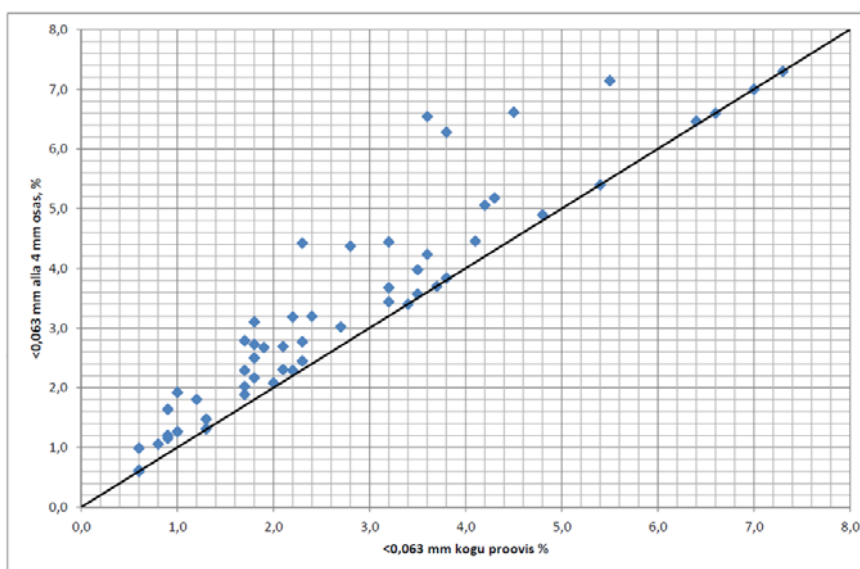


Joonis 3. Proovi nr 49 (punane) ja TTK uuringu [1] Joonisel 4 toodud nn. „halli” proovi (sinine) lõimiskõver (katkendjoon) ja vastavad katseseadmesse tihendatud proovide lõimiskõverad (pidevjoon).

Joonisel 3 on näha, et fraktsiooni  $>4\text{mm}$  eraldamisel proovist, ei muutu mitte ainult lõimiskõvera kuju ja asukoht, vaid oluliselt muutub ka peenosise ( $<0,063\text{ mm}$ ) protsentuaalne sisaldus. Kui algsete proovide peenosise sisaldus oli 2,3%, siis proovil nr 49 kasvas see 4,4%-ni, „hallil” proovil vastavalt 5,6%-ni. Selle tõttu erinevad ka katses saadud filtratsioonimoodulid – vastavalt 1,8 m/ööp ja 0,3 m/ööp.

Ka TTÜ uuringute [3, 4, 6] üheks peamiseks ja olulisemaks järelduseks oli – pinnase filtratsioonimooduli väärtus sõltub peamiselt peenosise sisaldusest.

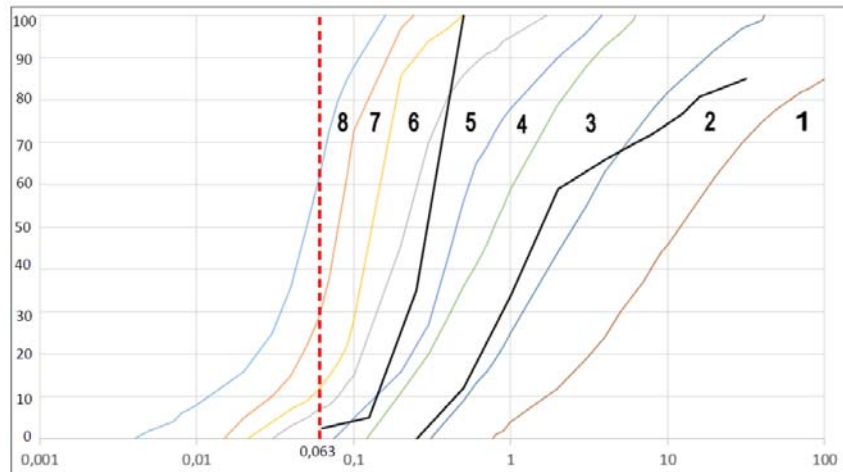
Joonisel 4 on illustreeritud peenosise sisalduse suurenemine katseseadmesse tihendatud proovis käesoleva andmekogumi andmetel. Vaid proovidel, milles fraktsiooni üle 4 mm ei esinenud või esines väga väikesel määral (valdavalt liivad) on peenosise sisaldused muutumatud, teatud juhtudel (valdavalt kruusad ja kruusliivad) muutub katseseadmesse tihendatud proovi peenosise sisaldus aga kuni 2 korda suuremaks võrreldes algse proovi peenosise sisaldusega.



Joonis 4. Peenosise ( $<0,063\text{ mm}$ ) sisalduse suurenemine fraktsiooni üle 4 mm eraldamisel proovist.

Võrreldes TTK uuringu [1, 2] lõimiskõveraväljasid teaduskirjanduses toodutega [10] selgub, et EVS-EN 901-20 kohaselt määratakse filtratsioonimoodul reeglina väiksemana kui lõimiskoostise alusel eeldada võiks (Joonis 5). Jooniselt on näha, et TTK poolt kontuuritud väli, mis vastab filtratsioonimoodulile 2 m/ööp, langeb kokku käsiraamatust [10] toodud väljadega, mille filtratsioonimoodul on 8...86 m/ööp.

- 8 – 0,0864 m/ööp;
- 7 – 0,864 m/ööp;
- 6 – 4,32 m/ööp;
- 5 – 8,64 m/ööp;
- 4 – 43,2 m/ööp;
- 3 – 86,4 m/ööp;
- 2 – 604,8 m/ööp;
- 1 – 2592 m/ööp.



Joonis 5. TTK uuringu [1, 2] lõimisväli 2 m/ööp (musta pidevjoonega) võrreldes väljadega käsiraamatust [10]. Joonis S. Sillamäe ettekandest 2015.a.

Lõimisväljade kontuurimisel tuleks suurenenud peenosise sisaldusega realselt katsetatud proovis kindlasti arvestada.

## 3 VEE VOOLAMINE MITTEHOMOGEENSES KESKKONNAS

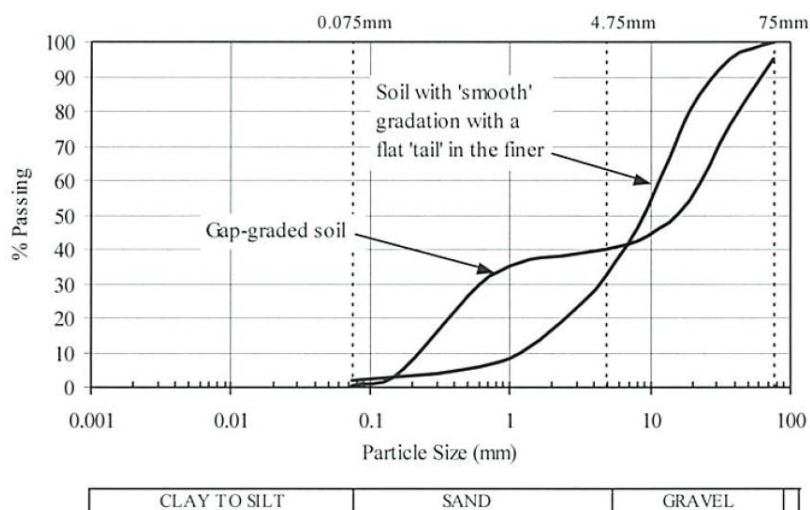
### 3.1 Mittehomogeense keskkonna tekkepõhjustest

Sufosioon ehk väikeste pinnaseosakeste ümber paigutumine suurematest pinnaseosakestest skeleti poolt moodustunud pooriruumis on hästi uuritud geotehniline protsess. Uuringuid on ajendanud suurte pinnastammide äkiline purunemine ja vajadus purunemise põhjuseid mõista ja tammide projekteerimisel arvestada.

Sufosiooniohtlikud on pinnased ja mineraalmaterjalid kui on täidetud järgmised kriteeriumid:

1. Pinnase skelett koosneb jämedamate osakestest ning peenema fraktsiooni osakesed on väiksemad kui poorid jämedama fraktsiooni osakeste vahel.
2. Peenema fraktsiooni kogus on nii väike, et kogu jämedamate osakeste vaheline pooriruum pole täidetud. Kui peened osakesed täidavad kogu pooriruumi, pole neil kuhugi liikuda. Kui pinnas koosneb suuremas osas peenemast fraktsioonist, „ujuvad“ jämedamad osakesed peenemate osakeste massis.

Sufosiooniohtlikke pinnaseid (mineraalmaterjali) iseloomustab alumise osas lauge lõimiskõver või osade fraktsioonide puudumine (*Joonis 6*).

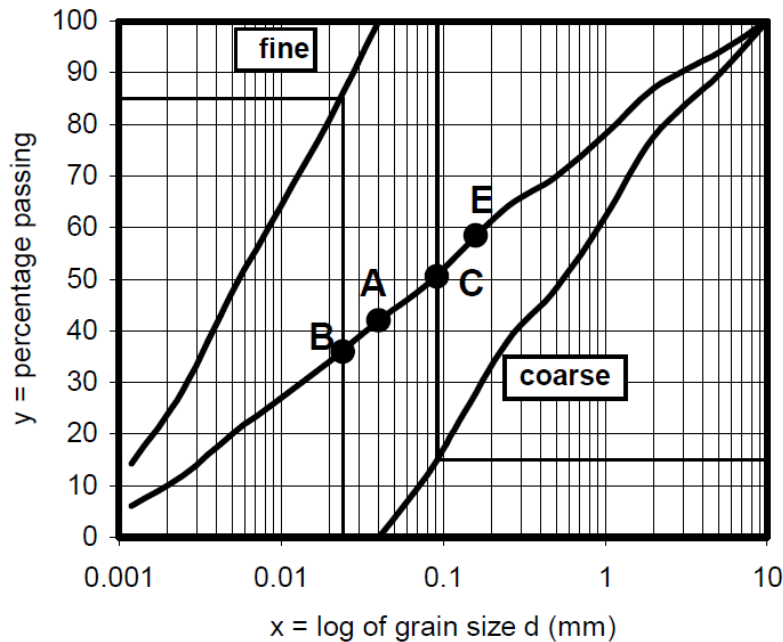


Joonis 6. Sufosiooniohtlikule pinnasele iseloomulikke lõimiskõveraid [14].

Üheks võimaluseks sufosiooniohtlikkuse hindamiseks on Sherardi (1979) poolt välja töötatud meetodika [15]. Lõimiskõver jagatakse kaheks ja võrreldakse peenosise ja jämedama osa lõimiskõveraid (Joonis 7). Sufosioonioht eksisteerib kui  $I_r > 5$ :

$$I_r = d_{15}(\text{jäme}) / d_{85}(\text{peen})$$

kus  $d_{15}(\text{jäme})$  on jämeda fraktsiooni  $d_{15}$  ja  $d_{85}(\text{peen})$  on peenosise  $d_{85}$ .



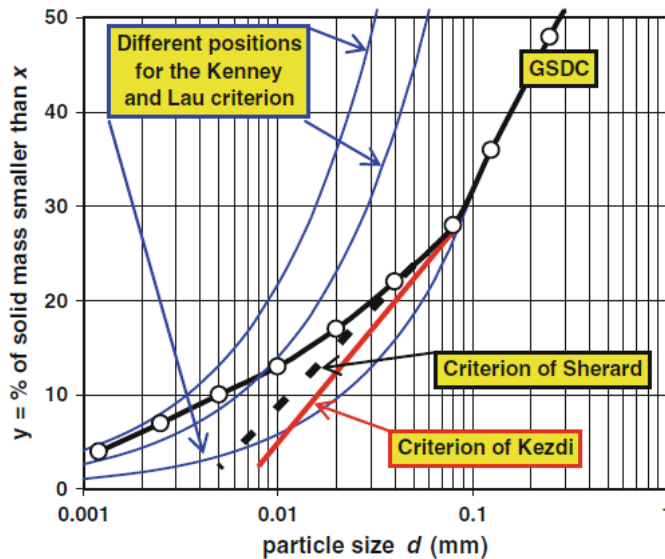
Joonis 7. Sherardi (1979) meetod [15].

Sherardi (1979) meetodi kasutamiseks peab olema analüüsitud peenosise lõimis. Tavapärastelt fraktsiooni  $<0,063$  mm lõimist ei määrata, kuid siiski on seda tehtud TTÜ uuringus [3]. Uuringu katseandmete põhjal arvatud  $I_r$  väärtused, mis on toodud Tabelis 1 (fraktsioonile  $<4$  mm), ületavad kõik kriitilist väärtust 5.

Tabel 1. TTÜ uuringu [3] andmetel leitud mineraalmaterjali proovide (fraktsioon  $<4$  mm) sufosiooniohtlikkus.

	4 mm	2 mm	0.6 mm	0.2 mm	0.06 mm	0.02 mm	0.006 mm	0.002 mm	$d_{85}(\text{peen})$	$d_{15}(\text{jäme})$	$I_r$
Männiku karjäär 1	100	97	59	2.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.010	0.255	26.3
Männiku karjäär 2	100	97	59	2.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.010	0.255	26.3
Karjaküla karjäär 1	100	96	92	20	2.4	1.2	0.8	0.6	0.012	0.157	12.9
Karjaküla karjäär 2	100	96	92	20	2.4	1.2	0.8	0.6	0.012	0.157	12.9
Kalda karjäär	100	94	86	39	4.6	2.3	1.3	0.8	0.013	0.092	6.9
Luige liiklussõlm	100	96	51	10	3.1	1.8	1.1	0.6	0.013	0.237	18.6
Ropka Aardlapalu II jämeliiv	100	94	73	32	1.3	1.1	0.4	0.2	0.015	0.107	7.2
Ropka Aardlapalu peeniiv	100	100	100	71	1.8	1.1	0.9	0.5	0.007	0.077	10.4
Kollerri karjäär 1	100	86	54	10	3.2	2.1	1.3	0.6	0.012	0.238	19.4
Kollerri karjäär 2	100	86	54	10	3.2	2.1	1.3	0.6	0.012	0.238	19.4
Jaani-Hansi karjäär	100	98	94	37	2.7	1.9	1.3	0.8	0.011	0.098	9.0
Krüüdneri karjäär 1	100	91	66	17	1.5	1.1	0.7	0.2	0.012	0.183	15.8
Nogopalu I karjäär	100	95	77	34	6.8	4.0	3.0	1.6	0.010	0.101	10.4
Nogopalu II karjäär	100	97	84	36	6.5	3.6	2.2	1.3	0.013	0.096	7.6

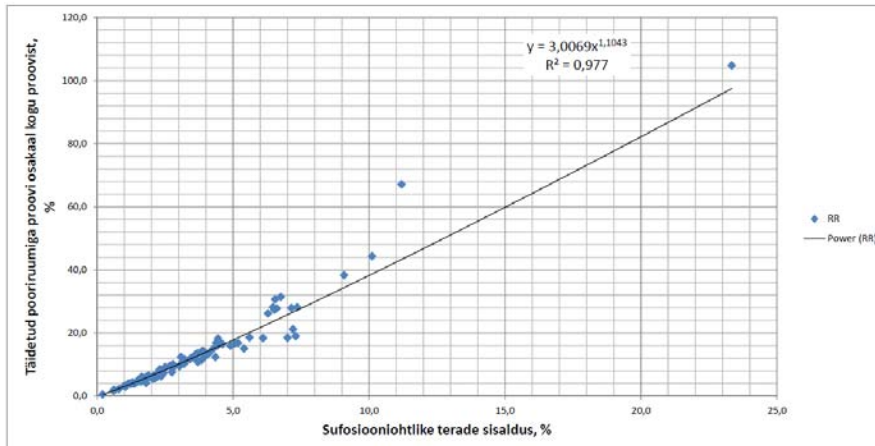
Chapuis (1992) on ülalkirjeldatud meetodi põhjal tuletanud graafilise meetodi sufosiooniohtlikkuse hindamiseks: sufosiooniohtlikud on kõik pinnased, mille lõimiskõvera alumine, peenpurru sisaldust iseloomustav osa on laugem kui 21,5% lõimise logaritmsükli kohta (Joonis 8) [8].



Joonis 8. Sufosiooniohtlikku fraktsiooni hindamise graafiline meetod [8, 9]. Sherardi (1979) meetodit iseloomustab must katkendjoon.

Graafilise meetodi alusel saab väita, et kõik kasutada olnud andmekogumi 92 proovi on peenosise (<0,063 mm) suhtes sufosiooniohtlikud, 5-l neist on sufosiooniohtlik ka fraktsioon 0,063-0,125 mm.

Pinnaseteaduse põhiseoste kaudu on võimalik arvutada jämeda fraktsiooni poorsus standardse Proctorteimi maksimaaltiheduse juures ning prognoosida, kui suur osa sellest pooriruumist on peenosisega täidetud. Joonisel 9 on vastav seos esitatud. Kui peenosise (<0,063 mm) sisaldus on >20%, siis on praktiliselt kogu pooriruum peenosisega täitunud ja pinnase filtratsiooniomadused nii horisontaal- kui vertikaalsuunas määrab peenfraktsioon. Kui proov on vaid osaliselt peenosisega täitunud, siis moodustuvad proovis vett paremini ja halvemini läbi laskvad tsoonid. Peenosise ümberpaigutumine proovis toimub nii filtratsioonikatse ajal, kui ka enne seda – tihendamise ajal.



Joonis 9. Analüüsitud andmekogumi peenosise (<0,063 mm) sisaldus ja vastav fraktsiooni 0,063... 4 mm Proctortiheduseni tihendatud skeleti peenosisega täitunud pooriruum. Vajalike arvutuste tegemisel on kasutatud erikaalu  $G_s = 2,68$  ja peenosise poorsustegurit  $e = 0,7$ .

Mittehomogeenne keskkond tekib sufosiooniohtliku fraktsiooni liikumisel jämeda fraktsiooni pooriruumis. Osakeste ümber paigutumine toimub tihendamisel ja sufosiooni tõttu.

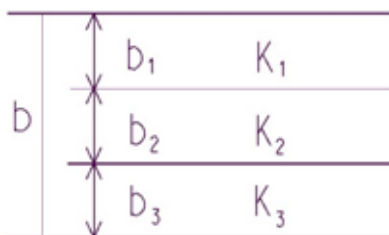
### 3.2 Mittehomogeense keskkonna veejuhtivus

Erineva veejuhtivusega horisontaalsete kihtide korral on vertikaal- ja horisontaalsuunaline keskmine filtratsioonimoodul erinev. Vee vertikaalse filtratsioonimooduli määrab vähima veejuhtivusega tsoon, horisontaalse filtratsioonimooduli suurima veejuhtivusega tsoon:

$$k_V = b / (b_1/k_1 + b_2/k_2 + \dots + b_n/k_n) \text{ ja}$$

$$k_H = (b_1 \cdot k_1 + b_2 \cdot k_2 + \dots + b_n \cdot k_n) / b;$$

kus  $k_V$  - keskmine vertikaalne filtratsioonimoodul,  $k_H$  - keskmine horisontaalne filtratsioonimoodul,  $b$  on kihtide kogupaksus ja  $b_1, b_2 \dots b_n$  erinevate kihtide paksus ja  $k_1, k_2 \dots k_n$  on erinevate kihtide filtratsioonimoodul (Joonis 10).



Joonis 10. Erineva filtratsioonimooduliga tsoonide põhimõtteline skeem.

Vee liikumisel läbi kahe erinevaveejuhtivusega tsooni, kui väikese veeläbilaskvusega tsooni paksus on 1 cm ja filtratsioonimoodul on  $k = 0,5$  m/ööpäevas ning suure veeläbilaskvusega

tsooni paksus on 9 cm ja filtratsioonimoodul on  $k = 10$  m/ööpäevas, siis keskmine filtratsioonimoodul vertikaalsuunas on  $k_v = 0,1\text{m}/((0,01\text{m}/0,5\text{m}/\text{ööp})+(0,09\text{m}/10\text{m}/\text{ööp})) = \mathbf{0,91\text{ m/ööp}}$ , keskmine filtratsioonimoodul horisontaalsuunas on  $k_H = (0,01\text{m}*0,5\text{m}/\text{ööp})+(0,09\text{m}*10\text{m}/\text{ööp})/0,1 = \mathbf{9,5\text{ m/ööp}}$ .

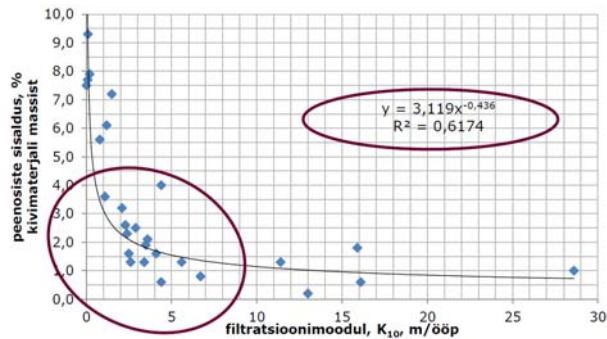
Väikese veejuhtivusega tsoonide olemasolul läbilõikes on vertikaalne filtratsioonimoodul oluliselt väiksem kui horisontaalne.

## 4 SEOS VERTIKAALSE JA HORISONTAALSE FILTRATSIOONIMOODULI VAHEL

Alljärgnevalt on analüüsitud EVS-EN 901-20 katsetulemusi eeldusel, et voolamine katseseadmes toimub vertikaalselt mittehomoogeenses keskkonnas, kus tsooniti veejuhtivus erineb. Analüüsis on kasutatud ainult katseseadmes olevate pinnaseproovide (<4 mm) lõimiskõverate andmeid.

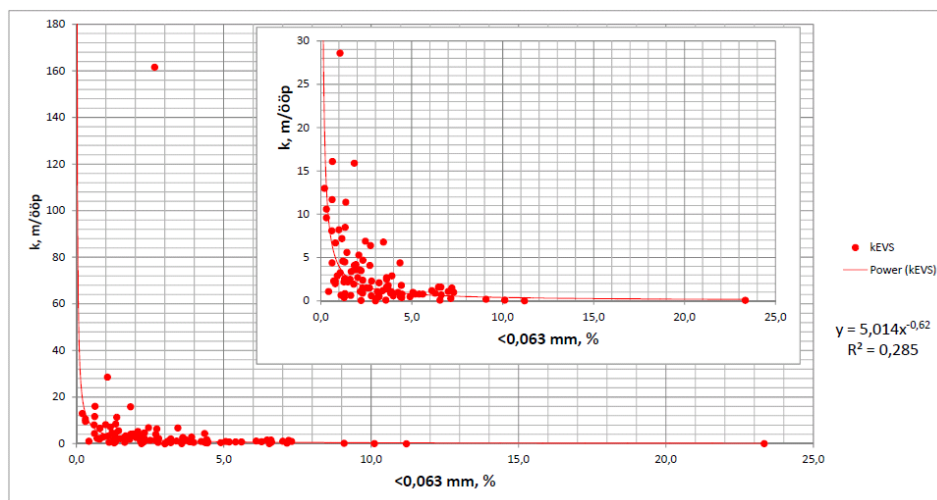
### 4.1 Vertikaalse filtratsioonimooduli (EVS-EN 901:20) sõltuvus peenosise sisaldusest ja efektiivdiameetrist $d_{10}$

TTÜ uuringud toovad esile, et filtratsioonimoodul EVS-EN 901-20 katseseadmes sõltub olulisel määral peenosise (<0,063 mm) sisaldusest (*Joonis 11*).



Joonis 11. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli seos peenosise sisaldusega TTÜ uuringu andmetel.

Käesoleva andmekogumi analüüs kinnitab seda seaduspära (*Joonis 12*).



Joonis 12. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli seos peenosise sisaldusega käesoleva andmekogumi järgi.

Saadud regressioonivõrrand võimaldab arvutada peenosise sisalduse järgi EVS-EN 901-20 kohast filtratsioonimoodulit. Kahjuks on TTÜ analüüsis argumendiks võetud määratud filtratsioonimooduli väärtus ja funktsiooniks on peenosise sisaldus, seetõttu ei saa nende kahe andmehulga regressioonivalemeid võrrelda.

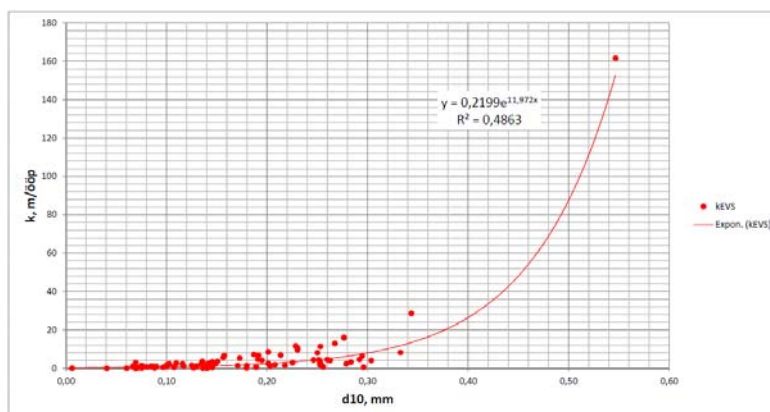
Peenosise ja EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli seose statistiliste parameetrite ja seose enese tugevust analüüsiti programmiga STATISTICA, tulemused on esitatud Tabelis 2.

Tabel 2. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli ja peenosise sisalduse statistilise seose parameetrid

Analüüsitud regressioonseos <b><math>k_{EVS} = A \cdot PO^B</math>,</b> kus PO on peenosise sisaldus, A ja B on astmefunktsiooni kordajad	$R = 0,534$	Variatsioonist kirjeldatud 28,5%
<b>Kordaja</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Kordaja väärtus	5,014	-0,620
Kordaja standardviga	0,473	0,091
t(95) väärtus	10,590	-6,833
Kordaja olulisustõenäosus p	0,00000	0,00000
Veafunktsioon – (mõõdetud suurus-arvutatud suurus) <sup>2</sup> Veafunktsiooni väärtus – 1262,4		

Tabelist nähtub, et filtratsioonimoodul sõltub peenosise sisaldusest oluliselt ( $p < 0,05$ ). Samas ei ole see korrelatsiooniseos tugev ning kirjeldab variatsioonist vaid 28,5%. Järelikult ei saa peenosise sisaldus olla ainus filtratsioonimoodulit määrav parameeter.

Valdav osa teada olevatest lõimiskoostisest lähtuvatest filtratsioonimooduli arvutusvalemite, kasutavad ühe sisendparameetrina efektiivdiameetri  $d_{10}$  väärtust. Ilmne seos EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli ja  $d_{10}$  vahel on näha ka Joonisel 13, mis on koostatud käesoleva andmekogumi põhjal.



Joonis 13. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli ja efektiivdiameetri  $d_{10}$  seos.

Statistilise analüüsi tulemuste põhjal on seos filtratsioonimooduli ja peenosise sisalduse vahel olemas, kuid see ei ole piisavalt täpne. *Joonis 13* põhjal on seos  $d_{10}$  ja  $k$  vahel tugevam.

## 4.2 Horisontaalse filtratsioonimooduli arvutamine

Kui pinnases esinevad erineva veejuhtivusega horisontaalsed tsoonid, siis EVS-EN 901-20 meetodikal määratud filtratsioonimoodul iseloomustab vertikaalsuunalist filtratsioonimoodulit (vt. ptk 3.2).

Vee horisontaalsuunalist filtratsioonimoodulit saab leida lõimiskõvera kaudu teaduskirjanduses toodud valemite abil. Käeolevas analüüsis kasutati Chapuis (2012) valemit, kuna nii TTÜ uuringu [3, 4, 6] kui ka TTK uuringu [1, 2] kohaselt oli see seos parim (vt ptk 2.1). Valemis kasutatakse sisendparameetritena lisaks efektiivdiameetrile ka pinnase tihedust (poorsustegurit  $e$ ) :

$$K_{sat} \text{ (cm/s)} = 2.4622 \left( \frac{d_{10}^2 e^3}{1 + e} \right)^{0.7825}$$

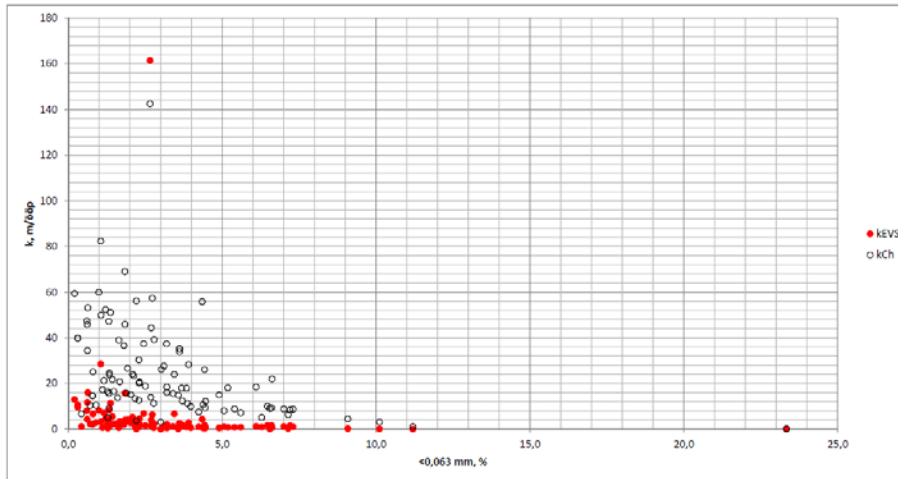
Valemis:

- $d_{10}$  on efektiivdiameeter;
- $e$  on poorsustegur, käesolevalt standardse Proctorteimi maksimaaltiheduse (EN-EVS 13286-2) juures.

Valemi kasutuspiirkond:

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

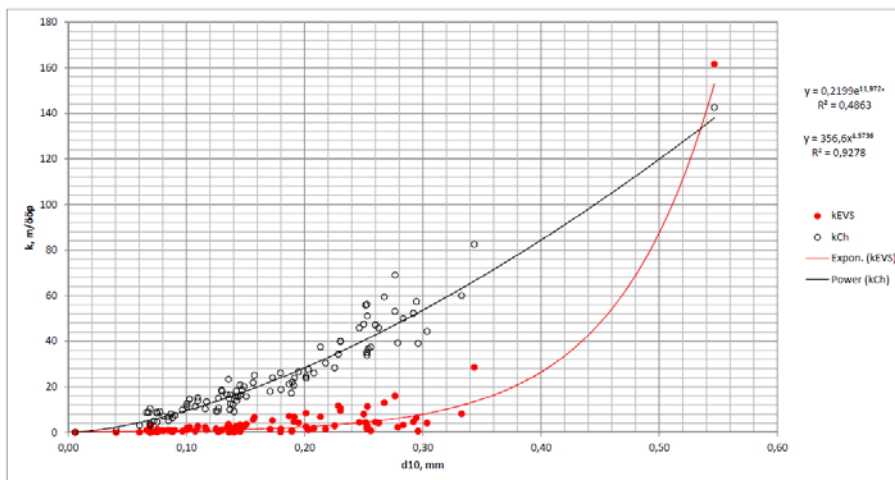
Ülaltoodud valemi järgi arvutatud horisontaalse filtratsioonimooduli ( $k_{Ch}$ ) väärtused on kantud *Joonisele 14* vastavalt proovi peenosise sisaldusele. Võrdluseks on toodud ka EVS-EN 901-20 meetodikal katseliselt määratud vertikaalsuunaline filtratsioonimoodul.



Joonis 14. Chapuis (2012) [9] valemi abil arvatud horisontaalse filtratsioonimooduli seos peenosise sisaldusega. Võrdluseks – EVS-EN 901-20 meetodikal katseliselt määratud vertikaalsuunaline filtratsioonimoodul.

Jooniselt 14 nähtub, et arvatud horisontaalse filtratsioonimooduli ja peenosise sisalduse vahel seos puudub. Kuna eeldatavalt kontsentreerub peenosis katsekeha teatud tsoonides, siis vastavalt peatükis 3.2 toodud valemitele, määravad horisontaalsuunalise filtratsioonimooduli tsoonid, kus peenosist ei ole.

Alljärgneval Joonisel 15, on analüüsitud Chapuis (2012) valemi järgi arvatud horisontaalse filtratsioonimooduli ( $k_{Ch}$ ) ja  $d_{10}$  vahelist seost. Võrdluseks on samuti esitatud EVS-EN 901-20 meetodikal katseliselt määratud vertikaalsuunaline filtratsioonimoodul.

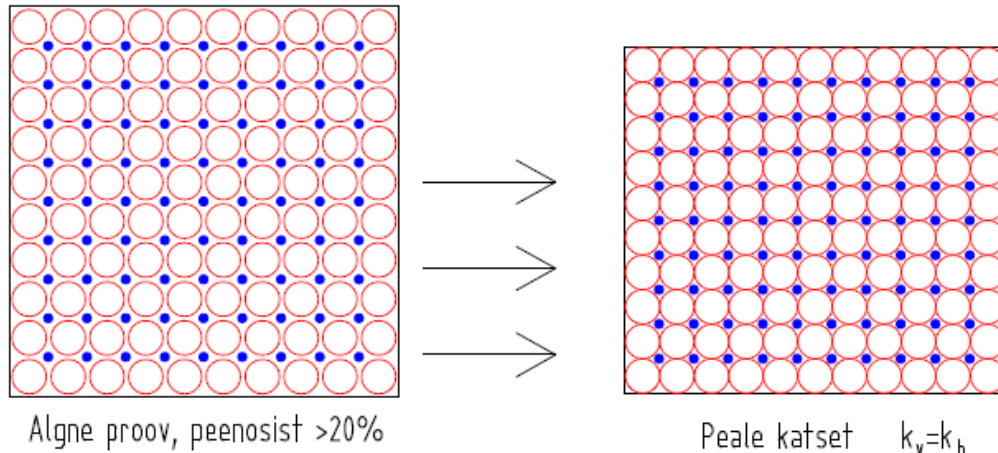


Joonis 15. Chapuis (2012) [9] valemi abil arvatud horisontaalse filtratsioonimooduli seos efektiivdiameetriga  $d_{10}$ . Võrdluseks – EVS-EN 901-20 meetodikal katseliselt määratud vertikaalsuunaline filtratsioonimoodul.

Jooniselt 15 on näha, et efektiivdiameetri ja horisontaalse filtratsioonimooduli vahel eksisteerib selge seos – nii see peabki olema, sest  $d_{10}$  on arvutusvalemi sisendiks ning punktisarve hajuvus joonisel on tingitud poorsusteguri erinevusest Proctori tiheduse juures.

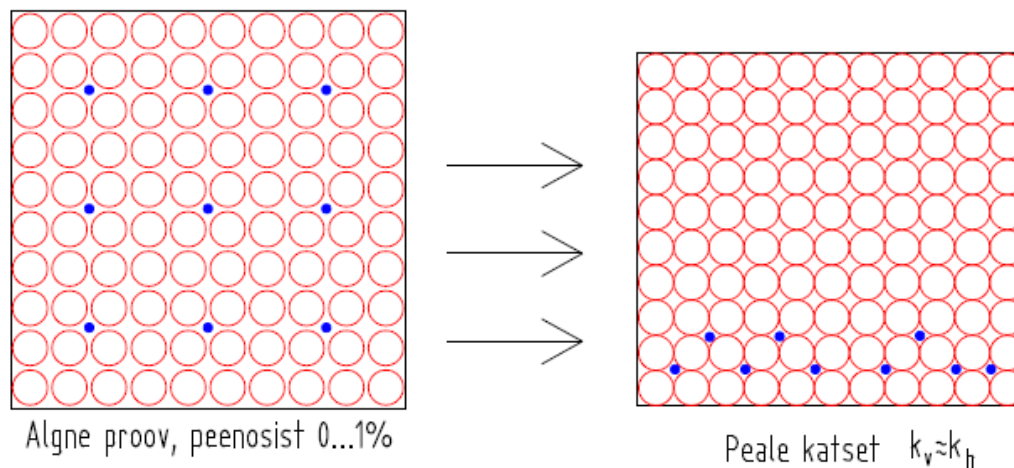
Antud juhul on väga oluline märkida, et teatud tingimustel on horisontaalne ( $k_{Ch}$ ) ja vertikaalne filtratsioonimoodul ( $k_{EVS}$ ) praktiliselt võrdsed (Joonis 15). See on võimalik tingimustel, kus erineva veejuhtivusega tsoone ei moodustu:

- kui peenosist on väga palju (>20%), täidab see kogu pooriruumi. Lihtsustatult on nähtust kujutatud Joonisel 16a. Joonisel 15 vastab antud olukorrale väike  $d_{10}$  väärtus;



Joonis 16a. Kui proov sisaldab palju peenosist, siis on kogu pooriruum sellega täidetud ning vertikaalne ja horisontaalne filtratsioonimoodul on võrdsed ka peale katset.

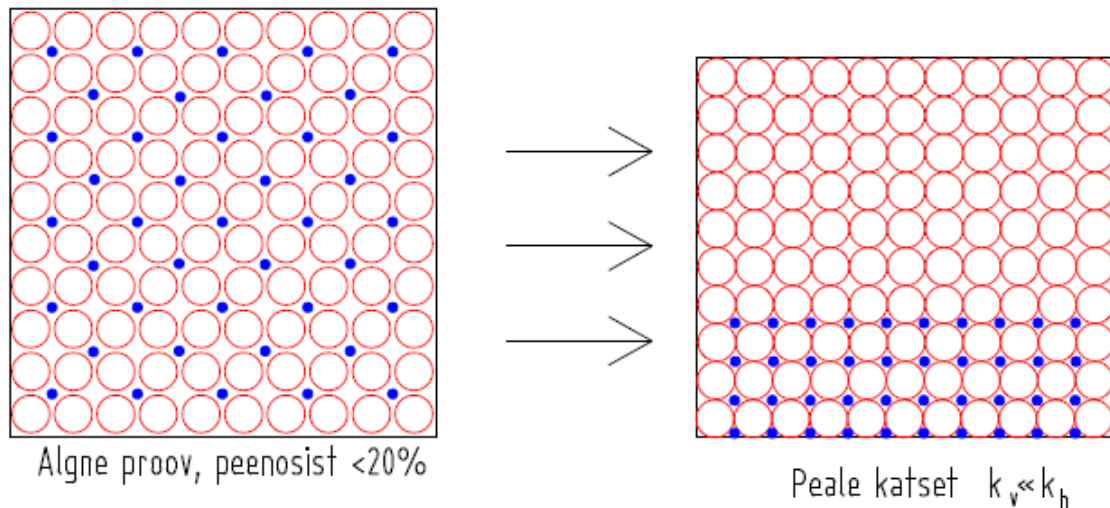
- kui peenosist puudub või seda on väga vähe. Lihtsustatult on nähtust kujutatud Joonisel 16b. Joonisel 15 vastab antud olukorrale suur  $d_{10}$  väärtus.



Joonis 16b. Kui peenosist on vähe, siis on ka pooriruumi täitumine peenema materjaliga katse käigus vähene ning vertikaalne ja horisontaalne filtratsioonimoodul on ka peale katset lähedased.

Paraku näitab Joonisel 15 esitatud analüüs, et valdava osa proovide filtratsioonimoodulid, mis on arvatud Chapuis (2012) valemiga on oluliselt suuremad kui need, mis on määratud kasutades EVS-EN 901-20 meetodikat. Tegemist on proovidega, milles peenosise sisaldus on mõni

protsendikümnendik kuni 20%. Põhjuseks võib olla pinnaseosakeste ümberpaiknemine katse käigus, mida on kujutatud alljärgneval *Joonisel 16c*.



Joonis 16c. Tihendamise ja sufosiooni tõttu koguneb peenosist proovikeha alla, täites suuremate osakeste vahelise pooriruumi ning tekitades vett halvasti juhtiva kihi. Seetõttu on katseadmes määratud filtratsioonimoodul väiksem kui Chapuis (2012) valemiga arvutatud. Määratud filtratsioonimoodul iseloomustab just halvemini vettjuhtivat kihti, kuigi ülemises osas, kust peenem materjal on välja viidud, on filtratsioonimoodul selle tõttu suurem.

Kui erineva veejuhtivusega tsoone katse käigus ei moodustu (horisontaalne ja vertikaalne filtratsioonimoodul on võrdsed), siis on EVS-EN 901-20 meetodika järgi määratud ning Chapuis (2012) valemiga arvutatud filtratsioonimoodulid võrdsed.

### 4.3 Vertikaalse filtratsioonimooduli leidmine

Tihendamise käigus halvasti vett juhtivate kihtide tekkimise tõenäosust EVS-EN 901-20 katsekehades kontrolliti statistiliste meetodite abil. Vastavalt peatükis 3.2 esitatule saab vertikaalse filtratsioonimooduli arvutada seosest:

$$k_v = b / (b_1/k_1 + b_2/k_2 + \dots + b_n/k_n)$$

kus,  $k_v$  on vertikaalne filtratsioonimoodul,  $b$  on kogupaksus ja  $b_1, b_2 \dots b_n$  erinevate kihtide paksus ja  $k_1, k_2 \dots k_n$  on erinevate kihtide filtratsioonimoodul.

Kui eeldus, et proovikehas tekivad erineva veejuhtivusega tsoonid, on õige, peaks ülaltoodud valemile vastav seos andma regressioonanalüüsil parema statistilise tulemuse, kui senini proovi homogeensena käsitlenud seosed, mis lähtusid ainult peenosise (<0,063 mm) sisaldusest või efektiivdiameetrist  $d_{10}$ .

Seetõttu konstrueeriti regressioonanalüüsiks valem, mis lähtub vertikaalse filtratsioonimooduli arvutusvalemist kihilise läbilõike kohta ning seob Chapuis (2012) valemiga arvutatud filtratsioonimooduli ( $k_{Ch}$ ), peenosise sisalduse ( $<0,063$  mm) ning peenosise keskmise filtratsioonimooduli (korrelatsioonikordaja A):

$$k_{EVS} = 100 / (\text{peenosisega täitumata tsooni osakaaluprotsent} / k_{Ch} + \text{peenosisega täitunud tsooni osakaaluprotsent} / A)$$

Kirjeldatud seose statistiliste parameetrite ja seose enese tugevust analüüsiti programmiga STATISTICA, tulemused on esitatud *Tabelis 3*.

Tabel 3. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli ja peenosise sisalduse statistilise seose parameetrid kui on arvestatud peenosise jaotumist jämeda fraktsiooni skeleti pooriruumi.

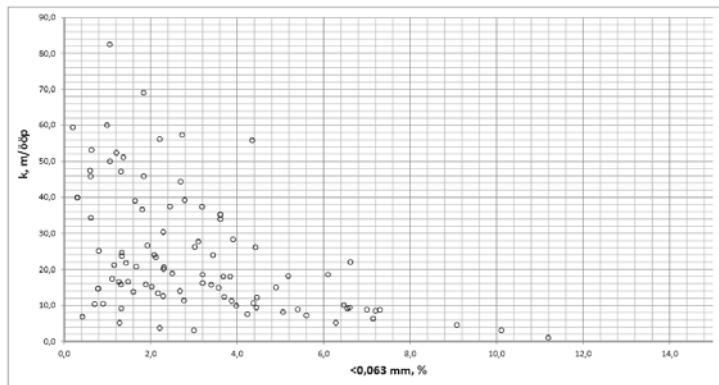
Analüüsitud regressioonseos		
<b><math>k_{EVS} = 100 / (\text{peenosisega täitumata tsooni osakaaluprotsent} / k_{Ch} + \text{peenosisega täitunud tsooni osakaaluprotsent} / A)</math></b>		
$k_{Ch}$ on Chapuis (2012) järgi arvutatud täitumata osa filtratsioonimoodul, A funktsiooni kordaja, füüsikalise sisu poolest peenosise filtratsioonimoodul		
	R = 0,817	Variatsioonist kirjeldatud 66,8%
Kordaja	<b>A</b>	
Kordaja väärtus	0,202	
Kordaja standardveiga	0,014	
t(95) väärtus	14,265	
Kordaja olulisustõenäosus p	0,00000	
Veafunktsioon – (mõõdetud suurus-arvutatud suurus) <sup>2</sup> Veafunktsiooni väärtus – 585,9		

Analüüs näitab, et funktsiooni kordaja A väärtus on 0,202 standardveaga 0,014. Korrelatsioonikordaja on 0,817, mis näitab tugevat seost, variatsioonist kirjeldatakse 66,8%.

Võrreldes nüüd *Tabelis 2* ja *Tabelis 3* esitatud seoseid, on näha, et kihilist läbilõiget kasutades erinevad määratud ja arvutatud väärtused teineteisest vähem (veiga on väiksem), samuti on paremini kirjeldatud variatsioon, regressioonseos on tugevam ning see võimaldab funktsiooni ( $k_{EVS}$ ) täpsema prognoosi argumentide ( $k_{Ch}$ , peenosisega täitumata ja täidetud proovi osa) kaudu. Samuti on peenosise keskmise filtratsioonimooduli väärtus  $A = 0,202$  m/ööp teooriaga kooskõlas, vastates peenosise efektiivdiameetri väärtusele  $d_{10} = 0,006$  mm. Üheargumendilise regressiooni  $k_{EVS} = f$  (peenosise sisaldus) veafunktsiooni väärtuseks oli 1262,4 ja selle

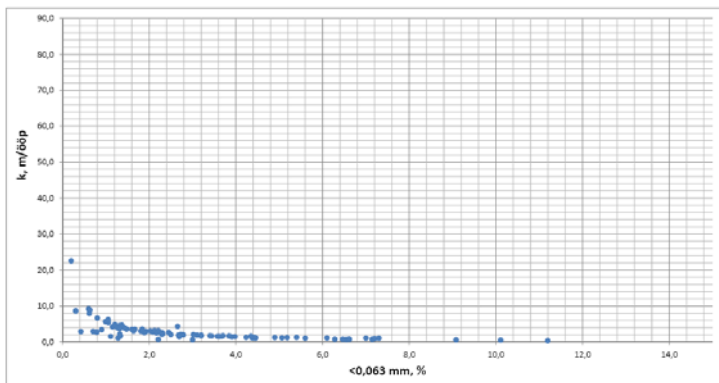
funktsiooniga kirjeldati vaid 28,5% variatsioonist. Mitmeargumendilise regressiooni  $k_{EVS} = f(k_{Ch}, \text{peenosis sisaldus, proovi tihedus})$  veafunktsiooni väärtuseks oli vaid 585,8 ja selle funktsiooniga kirjeldati 66,8% variatsioonist.

Ülalkirjeldatud regressioonanalüüsi käigus andmetega toimuv transformatsioon on graafilisena näidatud *Joonisel 17 a, b ja c*.



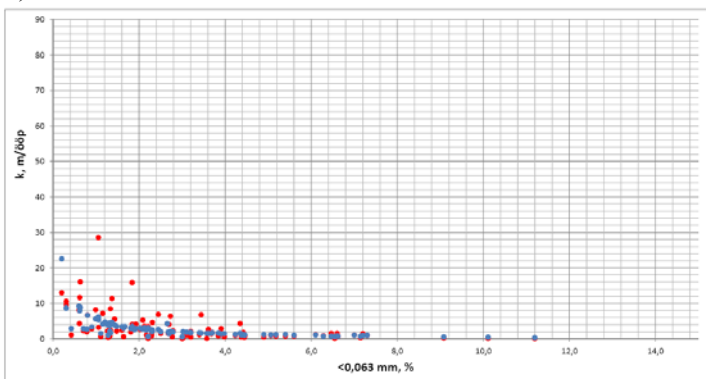
*Joonisel 17a* on näidatud Chapuis (2012) valemiga arvatud filtratsioonimoodulid. Valem arvestab  $d_{10}$  ja poorsustegurit ning tulemustest on moodustunud hajus punktigrupp.

a)



*Joonisel 17b* on siniste punktidega näidatud seose  $k_{EVS} = 100 / (\text{peenosisega täitumata tsooni osakaaluprotsent} / k_{Ch} + \text{peenosisega täitunud tsooni osakaaluprotsent} / A)$  abil arvatud filtratsioonimoodulid. Ilmekalt on näha, et hajusast  $k_{Ch}$  punktigruppest on moodustunud korrelatsiooni abil teatud korrastatusega väli.

b)

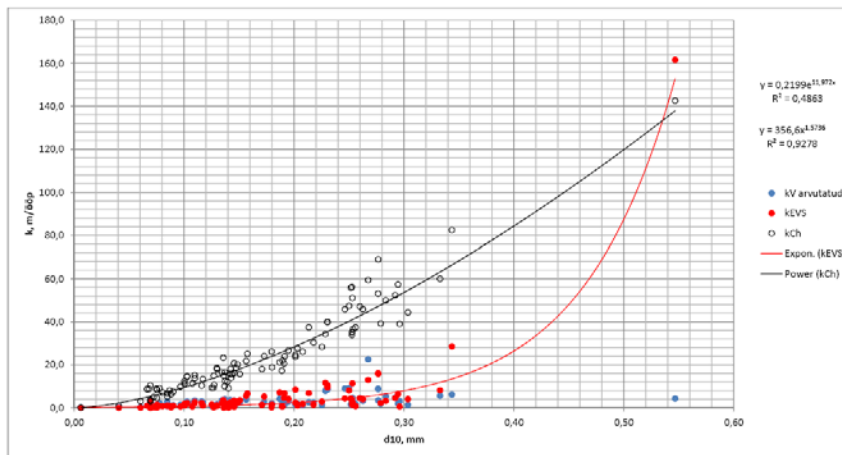


*Joonisel 17c* on punaste punktidega näidatud samade proovide EVS-EN 901-20 meetodika järgi katseliselt määratud filtratsioonimoodulid. Jooniselt on näha mõlemate väljade kokkulangevus.

c)

Joonis 17. Regressioonanalüüsi graafikud seosele  $k_{EVS} = 100 / (\text{peenosisega täitumata tsooni osakaaluprotsent} / k_{Ch} + \text{peenosisega täitunud tsooni osakaaluprotsent} / A)$ .

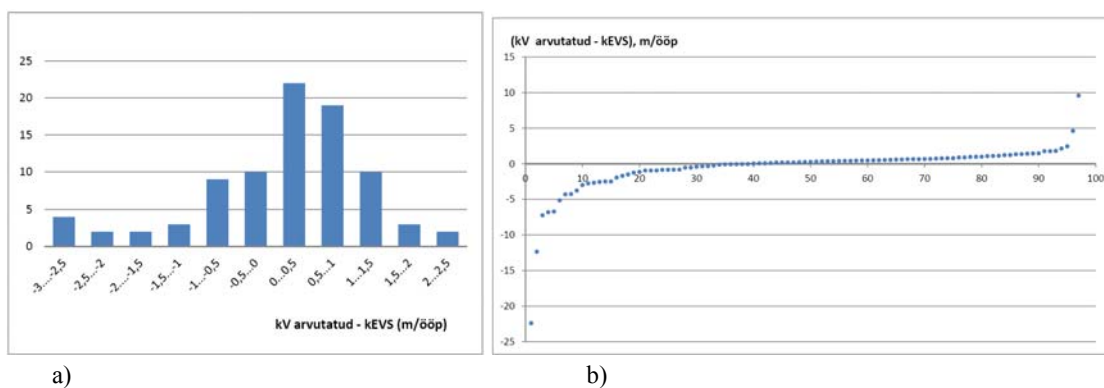
Ülaltoodud graafikutele sarnased graafikud on toodud ka *Joonisel 18*, kus argumendi teljena on kasutatud efektiivdiameetrit ( $d_{10}$ ). Selles teljestikus katab arvutatud  $k_V$  väli määratud filtratsioonimooduli  $k_{EVS}$  välja täielikumalt, kuna efektiivdiameetri kaudu leitakse uuritud seosesse  $k_{Ch}$ , peenosise sisaldus väljendub aga seoses läbi täidetud pooriruumi osakaalu ja proovi tiheduse.



Joonis 18.  $k_V$ ,  $k_{Ch}$ ,  $k_{EVS}$  väljendatuna  $d_{10}$  teljestikus.

Võrreldes *Joonistel 17c* ja *18* näidatud katsetega määratud filtratsioonimooduli ( $k_{EVS}$ ) ja arvutatud filtratsioonimooduli ( $k_V$ ) väärtusi, selgub, et vaid kahel proovil ületas arvutatud väärtus ( $k_V$ ) määratud ( $k_{EVS}$ ) väärtust 2,5...2 m/ööp võrra, vaid kolmel proovil 1,5...2 m/ööp võrra ja kümnel proovil 1...1,5 m/ööp võrra. Ülejäänud 77 proovil oli erinevus piirides, kus positiivne erinevus oli alla 1 m/ööp. Erinevused on oluliselt väiksemad kui keskmine erinevus arvutatud ja määratud väärtuste vahel, lihtsatel üheargumendilistel seostel  $k_{EVS}$  ja peenosise sisalduse ning  $k_{EVS}$  ja  $d_{10}$  vahel (*Joonised 12* ja *13*).

Katsetega määratud filtratsioonimooduli ( $k_{EVS}$ ) ja arvutatud filtratsioonimooduli ( $k_V$ ) erinevuste jaotuskõver on näidatud *Joonisel 19b* ning nomogramm *Joonisel 19a*.



Joonis 19. Regressioonvõrrandi  $k_{EVS} = 100 / (\text{peenosisega täitumata tsooni osakaaluprotsent} / k_{Ch} + \text{peenosisega täitunud tsooni osakaaluprotsent} / A)$  veafunktsiooni analüüs

Teoreetiliselt põhjendatud regressioonimudeli rakendamine võimaldas saavutada oluliselt suurema täpsuse EVS-EN 901-20 katsemetoodikale vastava filtratsioonimooduli ( $k_{EVS}$ ) prognoosimisel. On võimalik üsna täpselt prognoosida vertikaalse filtratsioonimooduli väärtust  $d_{10}$ , horisontaalse filtratsioonimooduli  $k_{Ch}$  ja peenosisega täitunud proovi osakaalu kaudu, eriti arvestades filtratsioonimooduli laboratoorse määramise mõõtemääramatust.

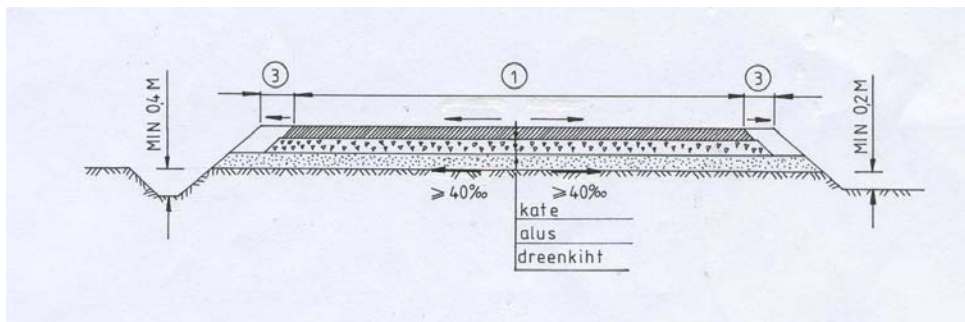
Halvasti vett juhtivate tsoonide tekkimine EVS-EN 901-20 meetodika järgi tehtud katse käigus on käesoleva analüüsiga tõestatud teoreetiliselt, statistiliselt ja ka katseliselt:

- proovikehas toimub peenosise kontsentratsioon teatud tsoonidesse (*Joonis 16c*);
- see toimub jämeda fraktsiooni skeleti pooride täitumisena;
- nende tsoonide filtratsioonimoodulid on erinevad – peenosisega täitunud tsooni filtratsioonimooduli määrab peenosise lõimiskoostis ja tihedus ning jämeda fraktsiooni skeleti filtratsioonimooduli määrab jämeda osa lõimiskoostis ja tihedus.

## 5 SOOVITUSED DREENIKIHI PROJEKTEERIMISEKS

### 5.1 Vee voolamine drenikihis

Dreenikiht, olles katendi kõige alumine osa, on samaaegselt madaldrenaažiks, mille peamiseks ülesandeks on ülaltpoolt, s.o läbi katte ja aluse imbuva sademetevee eemaldamine muldkeha nõlvadele, kust see valgub veeviimaritesse või filtreerub teemaa pinnasesse [11]. Vesi drenikihis voolab horisontaalsuunas (*Joonis 20*).

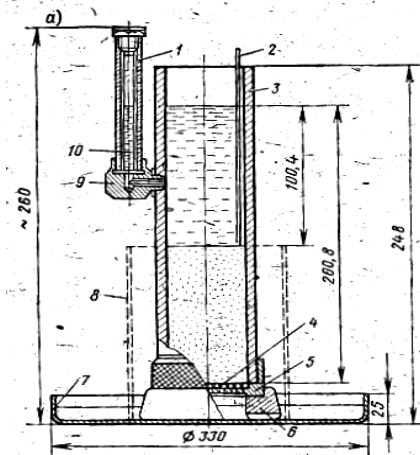


Joonis 20. Vesi drenikihis voolab horisontaalsuunaliselt [11].

Vajalik drenikihi paksus ja materjali filtratsioonimoodul sõltuvad tee laiusest ja kaldest. Vastavad arvutused tehakse lähtuvalt vee lubatud viibeajast katendis [12, 13]. Mida laiem on tee, seda suurem on muude samade tingimuste juures vee viibeag katendis. Viibeaga saab lühendada teele suurema kalde andmisega aga see võimalus on piiratud. Viibeaga saab lühendada ka suurema filtratsioonimooduliga materjali kasutades. Dreenikihi paksuse määravad maksimaalne võimalik katendisse sattuv veehulk (ajauhikus) ja drenikihi materjali kapillaartõusu suurus. Suurema filtratsioonimooduliga materjalil on reeglina ka väiksem kapillaartõus.

### 5.2 Vee voolamine EVS-EN 901-20 katseseadmes

EVS-EN 901-20 katseseadmes voolab vesi vertikaalsuunaliselt, ülevalt alla (*Joonis 21*).



Joonis 21. EVS-EN 901-20 filtratsioonimooduli määramise seade [5].

### 5.3 Vertikaalne ja horisontaalne filtratsioonimoodul

Dreenikihiks sobilik mineraalmaterjal Eesti kruusa- ja liivakarjäärides on settinud veelises keskkonnas ning sisaldab oma geneesi tõttu alati peenosist (<0,063 mm). Veelises keskkonnas settinud materjal on alati kihitatud, fraktsioneerumine toimub juba settimise käigus. Materjali kaevandamisel erineva terasuurusega kihid segunevad. Kui peenos ei täida kogu pooriruumi (vt *Joonis 16c*), siis on peenosis võimeline pooriruumis migreeruma ning ja üldreeglina kogunema kihi alaosas. Selline protsess toimub nii tee katendis, kui ka labori proovikehas.

Kuna vee liikumine EVS-EN 901-20 seadmes toimub vertikaalsuunas siis, nagu eelnevates peatükkides toodud analüüs näitas, on vertikaalsuunaline filtratsioonimoodul peenosise poolt oluliselt mõjutatud. Vesi teekatendi dreenikihis voolab aga horisontaalsuunaliselt. Horisontaalsuunalist filtratsioonimoodulit peenosise sisaldus samavõrd ei mõjuta.

Kehtiva, dreenikihile esitatud nõudeid määrava normatiivse baasi käsitluses kasutatakse EVS-EN 901-20 seadmes määratud ja peenosise sisaldusest oluliselt sõltuvat filtratsioonimoodulit dreenikihile omase horisontaalse veejuhtivuse hindamiseks. Selle katse spetsiifika tõttu osutuvad paljud mineraalmaterjalid, mille horisontaalne veejuhtivus tagaks dreenikihi eesmärgipärase funktsioneerimise, kõlbmatuks.

Antud vastuolu ei ole võimalik lahendada muutmata dreenikihiks kasutatava mineraalmaterjali kontrolli põhimõtteid.

### 5.4 Ettepanek dreenikihi mineraalmaterjali kontrolli muutmiseks

1. Loobuda filtratsioonimooduli määramisest EVS-EN 901-20 kohaselt kui aeganõudvast ja tegelikku reaalselt veejuhtivust väiksemana näitavast meetodist.
2. Arvutada filtratsioonimoodul Chapuis (2012) valemiga standardse Proctorteimi maksimaaltiheduse juures.
3. Valemi kasutamiseks määrata lõimiskõver täislõimimisena, st. määratakse peenosise detailsem jaotus vahemikus 0,002 mm kuni 0,063 mm. Proctorteim tehakse kogu proovist (ka osakesed >4 mm). See võimaldab detailselt analüüsida sufosiooniohtliku fraktsiooni hulka ja suurust.
4. Vastavalt peenosise sisaldusele leitakse maksimaalne pooride täitumine peenosisega, selle võrra ehitatakse dreenikiht tusedam. Seejuures võib isegi arvestada võimalikku dreenikihi täitumist killustikust moodustuva tolmuaga.
5. Kui dreenikihi arvutuslik täitumine ületab 30% (vastab peenosise sisaldusele >8%), siis materjal dreenikihti ei sobi.

6. Tõsta kontrollkatsete hulka – lõimise osas 1 katseni 1000 m<sup>2</sup> kohta ja Proctor-teimi osas 1 katseni 5000 m<sup>2</sup> kohta. See võimaldab täpsemalt kirjeldada kasutatud materjali ja vastab tsiviilehituses kasutatavale kontrolli sagedusele.

Alternatiiviks on drenikihiks kasutatavast materjalist peenosise eraldamine (välja pesemine).

### 5.5 Vajalikud kontrollkatsed

1. EVS-EN 933-1:2012, Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod.
2. EVS-EN 13286-2:2010, Sidumata ja hüdrauliliselt seotud segud. Osa 2: Kuivtiheduse ja veesisalduse laboratoorse määramise katsemeetodid, Proctor-teim.

### 5.6 Soovituslikud varutegurid

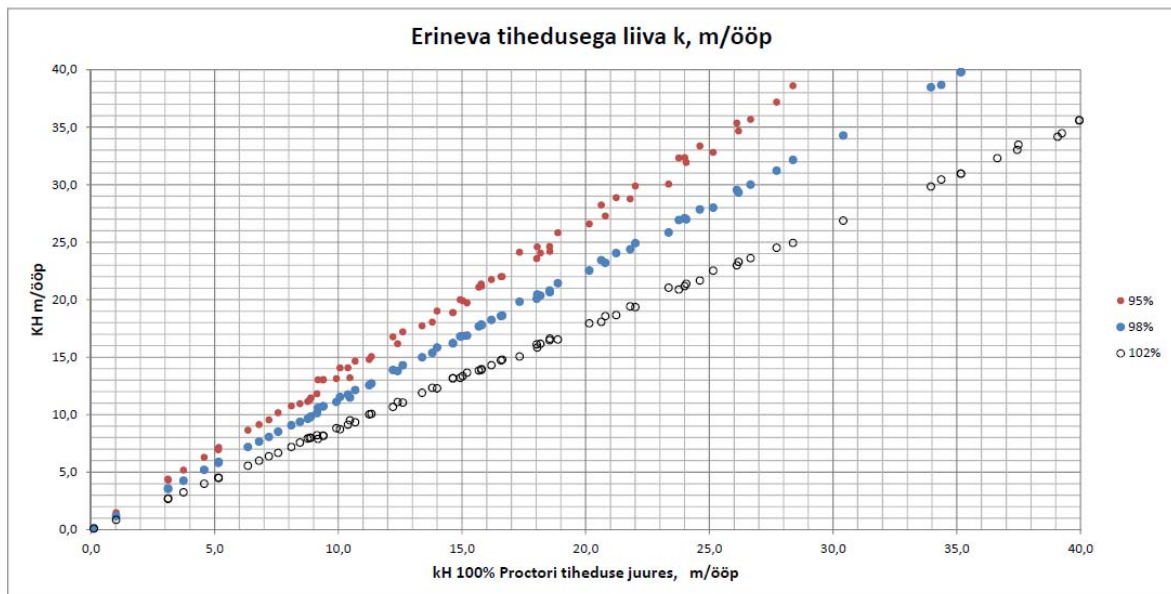
1. Chapuis (2012) valemiga arvatud filtratsioonimoodulile – soovituslik rakendatav varutegur 2. Alus – valemi täpsus valemi autori hinnangul [9]. Mineraalmaterjal sobib drenikihti, kui arvatud filtratsioonimoodul ületab 2 kordselt vajalikku filtratsioonimooduli väärtust.
2. Peenosise poolt täitunud drenikihi paksusele – 1,5. Alus – tsiviilehituses pinnastele tavapäraselt rakendatav varutegur. Peenosise poolt täidetud drenikihi paksust suurendatakse 1,5 kordseks. Dreenikiht ehitatakse täitunud osa võrra paksem, selle juures arvestatakse täitunud osa 1,5 korda arvatutust paksemaks.
3. Dreenikihi paksuse suurendamine tehakse muldkeha arvelt. Vajalik korrektuur projekti tehakse drenikihi materjali kinnitamisel. Võimalik on seda aspekti silmas pidada ka juba projekteerimise ajal – nähes ette түsedama drenikihi ja ette kirjutades vastava drenikihi rajamiseks kasutatava mineraalmaterjali maksimaalse lubatud peenosise sisalduse.

Rakendatavate varutegurite põhjendamine ja drenikihi paksuse muudu rakendamise protseduur nõuavad edasist uurimist, erinevate osapoolte kokkuleppeid ja ametkondlikku jõustamist juhendite ja eeskirjade näol.

## 6 TIHEDUSE MÕJU FILTRATSIOONIMOODULILE

Vesi liigub pinnases vaid pooriruumis. Kui pooriruum (tihendamisel) kahaneb, siis vee läbilaskvus väheneb ja see väljendub väiksemas filtratsioonimooduli väärtuses. Tee-ehituses tihendatakse drenikiht standardse Proctoriteimi maksimaaltiheduseni.

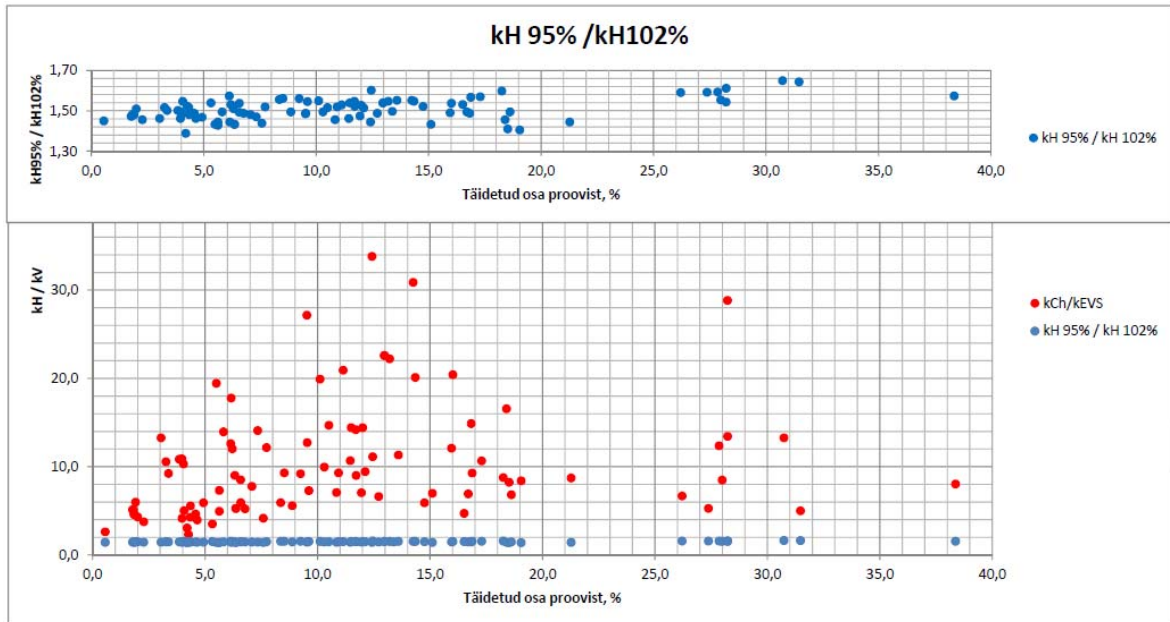
Chapuis (2012) valem [9] võimaldab filtratsioonimoodulit arvutada erineva tiheduse juures. *Joonisel 22* on horisontaalteljel toodud filtratsioonimoodulid, mis on Chapuis (2012) valemi järgi leitud kõikidele proovidele tihedusel 100% standardsest Proctoriteimi maksimaaltihedusest. Filtratsioonimooduli sõltuvuse selgitamiseks tihendamise astmest, on filtratsioonimoodulid leitud ka tihedustel 95%, 98% ja 102% standardse Proctoriteimi maksimaaltihedusest.



Joonis 22. Filtratsioonimoodul  $k_{Ch}$  tihedusel 95%, 98%, 102% standardse Proctoriteimi maksimaaltihedusest.

Jooniselt on näha, et tihedusel 95% on filtratsioonimoodul ca 1,32 korda suurem, kui tihedusel 100%. Tihedusel 98% on filtratsioonimoodul ca 1,12 korda suurem kui tihedusel 100%. Tihedusel 102% on filtratsioonimoodul ca 0,89 filtratsioonimoodulist tihedusel 100%.

Kuigi pinnase tihendamisel saavutatakse filtratsioonimooduli vähenemine, siis realselt kahaneb filtratsioonimoodul tihendamisel 95%-lt 102%-ni standardse Proctoriteimi maksimaaltihedusest 1,4...1,7 korda (sinised punktid *Joonisel 23*). EVS-EN 901-20 meetodikal määratud filtratsioonimoodul ja Chapuis (2012) valemiga arvatud filtratsioonimoodul erinevad aga kuni 30 korda (punased punktid *Joonisel 23*). Sellist suurt erinevust ainult tiheduse erinevusega seletada ei saa, põhjus saab olla ainult peenosise kontsentreerumise tagajärjel proovkehas moodustuva väikese veejuhtivusega tsoonide tekkimises.



Joonis 23. Erineva Proctori tiheduse juures leitud filtratsioonimoodulite suhe ja  $k_{Ch} - k_{ESV}$  suhe.

## 7 KOKKUVÕTE

### 7.1 Dreenikihi materjali sobivuse hindamise meetodi lühikirjeldus

1. Dreenikihi materjali kinnitamine toimub lõimiskoostise ja Proctorteimi alusel.
2. Materjali filtratsioonimoodul arvutatakse Chapuis (2012) valemiga standardse Proctorteimi maksimaaltihedusel.
3. Arvutatud filtratsioonimoodul jagatakse varuteguriga. Varuteguriga jagatud filtratsioonimoodul peab olema suurem kui dreenikihile esitatud nõue.
4. Arvestatakse, et peenosise liikuvuse tõttu osa dreenikihist täitub. Selle täitumise võrra rajatakse dreenikiht tusedam. Dreenikihi täitunud osa arvutatakse ja arvutatud suurus korrutatakse varuteguriga. Selle korrutise võrra projekteeritakse või rajatakse dreenikiht paksem. Dreenikihi paksuse suurenemine toimub muldkeha arvelt.
5. Kui dreenikihi prognoositud täitumine ületab 30% (vastab umbes 8%-le peenosise sisaldusele), siis materjal dreenikihti ei sobi.

### 7.2 Arvutuseeskirjad

Soovitav on koostada tabelarvutuspõhised alused, mis lõimiskõvera ja standardse Proctorteimi maksimaaltiheduse andmete alusel arvutaks Chapuis (2012) valemiga filtratsioonimooduli, varuteguriga korrigeeritud arvutusliku filtratsioonimooduli, peenosisega täitunud dreenikihi paksuse ja varuteguriga läbi korrutatud arvutusliku dreenikihi paksuse. Sellistest standardiseeritud katseprotokollidest moodustub teelõigu dreenikihi kvaliteedipass.

### 7.3 Edasiste uuringute vajadus ja suunitlus

Täiendavalt vajab uurimist mineraalmaterjali lõimis vahemikus 0,002...0,063 mm ja erineva lõimiskoostisega peenosise mõju peenosise liikumisvõimele dreenikihis. Soovitame läbi viia uuringu, mis iseloomustaks TTÜ uuringutega [3, 4] hõlmatud karjäärade liiva ja kruusa peenosise lõimiskoostist, mineraloogilist koostist (eriti savimineraalide esinemine ja hulk) ja terade ümardatust.

Dreenikihi täitumine killustikukihi purunemisel tekkiva tolmu arvelt vajab samuti täiendavat uuringut ja analüüsi. Võib-olla on võimalik dreenikihi paksuse projekteerimisel sellega arvestada.

Rakendatavate varutegurite põhjendamine ja dreenikihi paksuse muudu rakendamise protseduur projekteerimise käigus leitud arvutusliku paksuse suhtes nõuavad samuti uurimist, vähemalt ametkondlike otsustuste tasemel.