

**TAL  
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**MEETOD TÄITEMATERJALI VERTIKAAL- JA  
HORISONTAALSUUNALISE  
FILTRATSIOONIMOODULI MÄÄRAMISEKS  
PÜSIVA RÕHUGA PERMEAMEETRIGA  
METHOD FOR DETERMINING THE VERTICAL AND  
HORIZONTAL PERMEABILITY OF AGGREGATE USING  
CONSTANT HEAD PERMEAMETER  
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Hardo Pajus

Üliõpilaskood: 163558 EAXM

Juhendaja: Kristjan Lill

Kaasjuhendaja: Sven Sillamäe

Tallinn 2020

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"25" mai 2020.

Autor: Hardo Pajus

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"25." mai 2020.

Juhendaja: Kristjan Lill

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Hardo Pajus (sünnikuupäev: 25.09.1988 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
**MEETOD TÄITEMATERJALI VERTIKAAL- JA HORISONTAALSUUNALISE  
FILTRATSIOONIMOODULI MÄÄRAMISEKS PÜSIVA RÕHUGA  
PERMEAMEETRIGA,**

mille juhendaja on Kristjan Lill,

ja kaasjuhendaja on Sven Sillamäe.

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup>*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Hardo Pajus (allkiri)

25.05.2020 (kuupäev)

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Hardo Pajus, 163558EAXM  
**Õppekava, peeriala:** EAXM15 Hooned ja rajatised, teedehitus  
**Juhendaja:** Kristjan Lill  
**Kaasjuhendaja:** Sven Sillamäe

### Lõputöö teema:

MEETOD TÄITEMATERJALI VERTIKAAL- JA HORISONTAALSUUNALISE  
FILTRATSIOONIMOODULI MÄÄRAMISEKS PÜSIVA RÕHUGA PERMEAMEETRIGA  
Method for determining the vertical and horizontal permeability of aggregate using  
constant head permeameter

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vertikaal- ja horisontaalsuunaliste permeameetrite väljatöötamine laborile
2. Permeameetritega täitematerjalide filtratsioonimooduli määramine ja võrdlus meetodi EVS 901-20:2013 järgse filtratsioonimooduliga

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katseplaani koostamine	03.02.2020
2.	Permeameetrite töökorda seadmine	27.03.2020
3.	Katsetamiseks vajaminevate materjalide hankimine	27.03.2020
4.	Permeameetrite tööpõhimõtte endale selgeks tegemine	27.03.2020
5.	Teoreetilise osa kirjutamine	30.04.2020
6.	Katsete sooritamine	11.05.2020
7.	Katsetulemuste analüüsi kirjutamine	21.05.2020
8.	Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks	22.05.2020
9.	Kokkuvõtte eesti keeles	24.05.2020
10.	Kokkuvõtte inglise keeles	24.05.2020
11.	Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus	03.06.2020

Lõputöö ülesanne välja antud: 03.02.2020

Juhendaja:

Kristjan Lill

Ülesande vastu võtnud:

Hardo Pajus

**Töö keel:** eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "25." mai 2020. a

**Üliõpilane:** Hardo Pajus      "25." mai 2020. a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Kristjan Lill      "25." mai 2020. a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Sven Sillamäe      "25." mai 2020. a  
/allkiri/

*Avalikustamise piirangu tingimused:*

*puuduvad*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. TEOREETILISED ALUSED.....	11
1.1 VESI TEEKONSTRUKTSIOONIS .....	11
1.2 FILTRATSIOONI MÕISTE .....	12
1.3 DARCY SEADUS.....	12
1.3.1 Darcy seaduse kehtivuse kontrollimine.....	15
1.4 FILTRATSIOONIMOODULI MÕJUTEGURID.....	16
1.4.1 Materjali omadused .....	16
1.4.2 Vee omadused .....	16
1.5 FILTRATSIOONIMOODULI MÄÄRAMINE .....	17
1.5.1 Laboratoorsed katsed .....	17
1.5.1.1 Püsiva rõhuga permeameeter.....	18
1.5.1.2 Langeva rõhuga permeameeter.....	25
1.5.1.3 EVS 901-20:2013 .....	27
1.5.1.4 Permeameetrite kasutamisel tehtavad vead .....	29
1.6 MATERJALIDE TIHENDAMINE .....	30
1.6.1 Pinnase optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus. Proctor-teim.....	30
1.6.2 Nõuded tihendamisele. Tihendustegur .....	32
1.6.3 Vibratsiooniga tihendamine laboritingimustes .....	33
2. MATERJALID JA KATSEMETOODIKA .....	34
2.1 KATSETATAVAD MATERJALID.....	34
2.1.1 Looduslik liiv .....	34
2.1.2 Looduslik kruus .....	35
2.1.3 Purustatud kruus .....	35
2.1.4 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 16-31,5 mm .....	35
2.1.5 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 4-31,5 mm .....	35
2.1.6 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 0-31,5 mm .....	35
2.2 KATSEMETOODIKA .....	36
2.2.1 Katseseadmed.....	36
2.2.1.1 Vertikaalne püsiva rõhuga permeameeter.....	36
2.2.1.2 Horisontaalne püsiva rõhuga permeameeter .....	40
2.2.1.3 Tihendaja Matest.....	41
2.2.2 Katsete käik.....	42

2.2.2.1	Eeltöö materjalidega .....	42
2.2.2.2	Materjali tihendamine ja tiheduse kontroll.....	43
2.2.2.3	Katsetamine vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga .....	44
2.2.2.4	Katsetamine horisontaalse püsiva rõhuga permeameetriga .....	47
2.2.2.5	EVS 901-20:2013 .....	50
3.	KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS .....	52
3.1	TERASTIKULINE KOOSTIS JA PROCTOR-TEIM .....	52
3.2	KATSED PERMEAMEETRITEGA .....	53
3.2.1	Looduslik liiv .....	53
3.2.2	Looduslik kruus .....	56
3.2.3	Purustatud kruus .....	60
3.2.4	Lubjakivikillustik fraktsiooniga 16/31,5.....	65
3.2.5	Lubjakivikillustik fraktsiooniga 4-31,5 mm .....	67
3.2.6	Lubjakivikillustik fraktsiooniga 0-31,5 mm .....	68
3.3	KATSETULEMUSTE ANALÜÜS .....	70
3.3.1	Püsiva rõhuga vertikaalse permeameetriga määratud tulemused .....	71
3.3.2	Püsiva rõhuga horisontaalse permeameetriga määratud tulemused .....	72
3.3.3	EVS 901-20:2013 järgi määratud tulemused.....	73
3.3.4	Erinevate katsetamismeetodite võrdlus.....	73
3.3.5	Tulemuste põhjal tehtud järeldused .....	75
	KOKKUVÕTE .....	77
	SUMMARY.....	79
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	81
	LISAD .....	84
	LISA 1 VEE DÜNAAMILISTE VISKOOSUSTE SUHE .....	85
	LISA 2 KOEFITSENDI $\phi$ MÄÄRAMINE.....	86
	LISA 3 PERMEAMEETRI KATSELEHT .....	87

## EESSÕNA

Käesolev magistritöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis läbi viidud erinevate permeameetritega filtratsiooni määramise võimaluste uuringu põhjal. Kõik mõõtmised ja katsetused viidi läbi samas laboratooriumis.

Autor soovib tänada järgmisi isikuid:

Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi töötajad Matiko Arde, Rainis Eksi, Virko Pirrus, Kait Värat, Julia Kutsõn ja Jürgen Kern, kes olid abiks katsete ettevalmistamisel ja teostamisel;

Tallinna Tehnikakõrgkooli üliõpilane Madis Aigro, kes abistas mõõtmiste teostamisel;

Laura Künnap, kes innustas kogu protsessi vältel autorit mitte alla andma;

Jussi Kendra, kes oli suureks abiks täitematerjalidest proovide võtmisel ja transpordil;

OÜ Steelmet ja Lauri Ristolainen, kes teostasid seadmete valmistamisel metallitööd;

Kristjan Lill ja Sven Sillamäe, kes olid käesoleva töö juhendajateks.

Lisaks suur tänu uuringu läbiviimisel kasutatud materjalide tootjatele, keda siinkohal ärisaladuste kaitseks nimeliselt välja ei tooda.

**Võtmesõnad:** Teedehitus, pinnasemehaanika, filtratsioon, permeameeter, magistritöö.



## SISSEJUHATUS

Filtratsioonimooduli määramine on Eesti teedehituses olnud aktuaalseks ja palju vaidlusi tekitanud teemaks pikka aega. Dreenihi roll teekatendi konstruktsioonis on vaieldamatult oluline kogu katendi püsimise seisukohalt, seda eriti niisketes piirkondades, kus esineb tugev külmakerke tekkimise oht. Hästifiltreeriv materjal tagab efektiivse vee juhtimise katendist välja. Seetõttu on enne konstruktsiooni rajamist väga tähtis teada sinna paigaldatavate materjalide omadusi. Siin muutubki aktuaalseks materjali dreenvate ehk vett juhtivate omaduste täpne määramine, et valida ehitamiseks sobilikud materjalid. Seejuures aitab materjalide omaduste tundmine kasutada ressursse võimalikult efektiivselt ja vähendab liigset kulu.

Võimalikult täpselt määratud materjali omadused aitavad valida konstruktsiooni rajamiseks materjali, mis tagab vähemalt minimaalsete katendile esitatud nõuete täitmise. Paremate omadustega materjalid on üldjuhul alati ka kallimad ning olukorras, kus ehitustegevus on rahastatud vähempakkumise tingimustes, on ehitaja sunnitud kasutama materjale võimalikult ratsionaalselt ning häälestub üldjuhul minimaalsete nõuete täitmisele. Sellega kaasneb alati aga risk, et materjali omadused pole määratud piisava täpsusega või õigesti (kasutades sobivat meetodikat) ning materjali tegelikud omadused on hoopis teistsugused. Sellest johtuvalt on ka laborikatsete täpsus ja katsemeetodite valik äärmiselt olulised.

Eriti teravalt tõusis probleem materjalide filtreerivate omadustega fookusesse 2013. aastal, kui koostati Eesti rahvuslik katsestandard EVS 901-20:2013, mis tõrjus välja seni teedehituses kasutusel olnud lihtsustatud versiooni katsestandardi GOST 25584-90 lisa 5 järgi teostatud katsemeetodist. Kuna EVS 901-20:2013 järgi saadavad filtratsioonimoodulite väärtused olid eelnevaga võrreldes tunduvalt madalamad, muutis selle katsestandardi kasutuselevõtt väga suure hulga Eestis toodetud täitematerjalidest teede ehitamisel kasutuskõlbmatuks. EVS 901-20 ei ole paraku ideaalne katsestandard, kuna selle järgi on filtratsioonimooduli väärtus võimalik määrata vaid materjalis sisalduvale fraktsioonile 0-4 mm. Siiani on just see üks põhiline vaidlusi tekitav asjaolu, et katses jäetakse kõrvale materjalides (peamiselt kruusades ja liivades) sisalduv suurem kui 4 mm teramõõduga osa ning ei katsetata materjali filtreerivaid omadusi tervikuna.

Käesoleva lõputöö teema arenes välja soovi tõttu arendada Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis usaldusväärne meetod materjali filtreerivate omaduste määramiseks, mis oleks alternatiiviks või paralleelseks meetodiks EVS 901-20:2013 katsestandardis kirjeldatud meetodile. Kuna teemat on ka enne

uuritud, võeti arendustöö aluseks varem teostatud uuringud nii Eestist kui välismaalt. Laboratoorsete katsete puhul keskenduti peamiselt erinevate (vertikaalsed ja horisontaalsed) püsiva rõhuga permeameetritega filtratsioonimooduli määramisele. Horisontaalsuunas filtratsioonimooduli mõõtmist ei ole varem Eestis väga põhjalikult uuritud, seega tuli vastava seadmega töötamisel toetuda rohkem välismaistele analoogsetele uuringutele. Samuti käsitleb töö põgusalt materjalide tihendamist laboratoorsetes tingimustes ja sellega seotud probleeme.

Magistritöö kirjeldab katsemeetodi arendamise esimest etappi seadmete konstrueerimisest kuni esmaste katsete ning katsetulemuste analüüsini. Kindlasti ei ole lõputöös käsitletud arendusprotsess lõplik ning vajab edasist tööd, täiendavat katsetamist ning probleemide lahendamist, mis käesoleva töö aluseks oleva uuringu käigus esile kerkisid.

# 1. TEOREETILISED ALUSED

## 1.1 Vesi teekonstruktsioonis

Materjali poorides leiduval veel on märkimisväärne võime mõjutada pinnase käitumist. Vee mõjul võib muutuda pinnase mahukaal ja tugevus, vee külmumine tekitab pinnases külmakerkeid.[1]

Vesi leiab tee konstruktsiooni sisse teepinnal olevate pooride ja lõhede kaudu, aga ka pinna- ja põhjavee liikumise tõttu. Vesi võib seal põhjustada nähtusi nagu peenosiste ümberpaigutumine, mõrad ja praod katte pinnal, nõlvade ja pervede minemauhtumine ja külmakerked.[2]

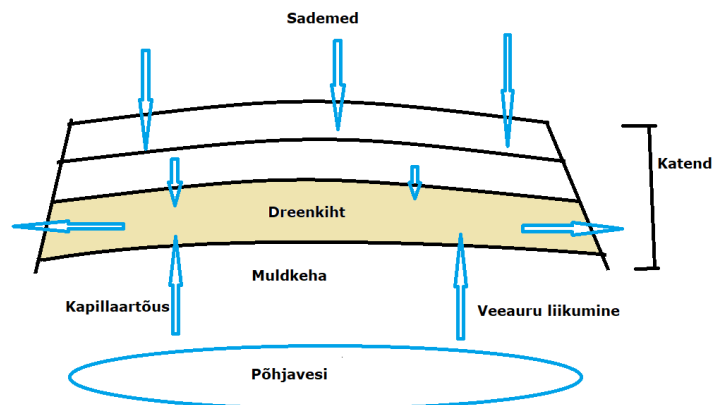
Vältimaks konstruktsiooni lagunemist vee poolt tekitatavate nähtusete mõjul rajatakse teekatendisse drenivast materjalist kiht või kihid, mille peamine eesmärk on vesi konstruktsioonist välja juhtida. Katendit projekteerides tuleb kindlasti arvesse võtta kasutatavate materjalide omadusi, katendi ehitamise niiskuspäikkonda, põhjavee taset, katendi paksust ja teisi tegureid, mis mõjutavad vee liikumist katendi sees ja seeläbi ka katendi vastupidavust eelpool kirjeldatud nähtuste suhtes.[2]

Vastavalt Eestis kehtivatele juhenditele on teekonstruktsioonide alustes nõutud vee väljajuhtimise tagamine. Tavaliselt juhitakse vesi külakraavidesse ja drenikihti. Kui killustikaluse alla jäävatel kihtidel ei ole nõutud veejuhtivus tagatud (filtratsioonimoodul on alla 1 m/ööp) ei lubata aluses sidumata segusid kasutada ja alus tuleb ehitada fraksioneeritud või ridakillustikust.[3]

Kui katendile rajatakse drenikiht, peab see olema piisavalt hea veejuhtivusega, mis välistaks vee tungimise muldkehasse. Vältida tuleb vee sattumist tee muldkehasse läbi teepeenarde, mulde nõlvade, või külakraavide ja aluspinnase kaudu.[4]

Aluspinnasest vee tungimisel katendi kihtidesse toimib drenikiht kapillaartõusu katkestava kihina. Üldjuhul võetakse projekteerimisel arvesse, et vee kapillaartõus ei ulatuks drenikihi alumise pinnani. Drenikiht rajatakse kogu muldkeha laiuses ja vajadusel paigutatakse sellesse pikifiltertorud.[5]

Seega on drenikihi ülesandeks vastu võtta ülemistest (ja mingil määral ka alumistest, kapillaartõusu tõttu) kihtidest vee vastu võtmine ja juhtimine katendist välja, selle külgedele, kust see juhitakse kraavide ja veeviimarite abil ära. Seega ei liigu vesi katendis ainult vertikaal, vaid ka horisontaalsuunas (vt joonis 1.1).[6]



Joonis 1.1 Vee liikumine teekonstruktsioonis. (koostatud [6] põhjal)

Eestis on enamuse materjalide veejuhtivuse määramiseks kasutusel katseolevatest meetoditest keskendunud vee vertikaalsele liikumisele, vee horisontaalset liikumist on vähem uuritud. Käesoleva töö eesmärk on uurida katsemeetodeid ja rakendamise võimalusi nii vee vertikaalse kui horisontaalse liikumise uurimiseks erinevates täitematerjalides.

## 1.2 Filtratsiooni mõiste

Filtratsioon ehk veejuhtivus on pinnase omadus juhtida endast vett läbi, mille tagavad pinnases olevad poorid. Seejuures mõjutavad veejuhtivust väga suurel määral gravitatsioon, aga ka kapillaarjõud, temperatuur, osmootiline rõhk või mõni muu tegur.[1]

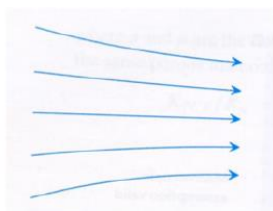
Vesi võib pinnases liikuda nii vertikaal- kui horisontaalsuunas, ehk filtratsioon võib olla nii vertikaalne kui horisontaalne.[2]

## 1.3 Darcy seadus

Vee voolamine pinnases võib olla laminaarne või turbulentne. Laminaarseks loetakse voolamist, mille puhul veesakeste liikumised omavahel ei ristuvad. Turbulentse puhul aga ristuvad (vt joonis 1.2). Üldjuhul on vool laminaarne, kui vee liikumise kiirus on madal ja voolukanali läbimõõt on väike. Samuti on siin oma mõju vedeliku viskoossusel

- suurem viskoossus tagab suurema tõenäosuse, et voolamine on laminaarne, mitte turbulentne.[1]

Enamasti on pinnastes laminaarse voolamise tingimused täidetud, erandiks on siin väga jämedateralised pinnased (nt fraktsioneeritud killustikud).[1]



Laminaarne voolamine



Turbulentne voolamine

Joonis 1.2 Laminaarne ja turbulentne voolamine [7]

Henry Darcy (1803 – 1858) oli prantsuse insener, kelle panus veejuhtivuse uurimisse on raske alahinnata. Oma 1856. aastal läbi viidud katsete, mille eesmärgiks oli liiva veejuhtivust mõjutavate tegurite analüüsimine, tulemusel sõnastas Darcy elementaarsed põhjavee voolupõhimõtted valemina, mida tuntakse Darcy seaduse nime all.[8]

Darcy seade koosnes liivaga täidetud silindrist, ja kahest piesomeetrist, millega sai võrrelda rõhku silindri eri punktide vahel. Katses kasutati täieikult veega küllastunud pinnast. Katse käigus ajaühikus läbi pinnase ristlõike jooksnud veekogus oli võrdeline ristlõike pindalaga, piesomeetrite kõrguse vahe ja filtratsioonimooduliga ning pöördvõrdeline materjalikihi paksusega silindris.[9]

See seos on võimalik vormistada võrrandina 1.1. [1]

$$Q = K \frac{\Delta h}{L} A \quad (1.1)$$

kus  $Q$  – vooluhulk,  $m^3/ööp$ ,

$K$  – filtratsioonimoodul,  $m^3/ööp$ ,

$\Delta h$  – kõrguse koordinaatide muut (piesomeetrite kõrguse vahe),  $m$ ,

$L$  – vee liikumistee pikkus (materjalikihi paksus sedmes),  $m$ ,

$A$  – pinnase ristlõike pindala,  $m^2$ .

Valemis 1.1 olevat konstanti  $K$  nimetatakse filtratsioonimooduliks.[9]

Darcy valem eeldab olukorda, et toimub laminaarne voolamine ja voolamine toimub ühtlase suuna ja kiirusega.[1]

Laminaarse voolamise kontrolliks on võimalik kasutada Reynoldsi valemit 1.2. Laminaarse voolamise korral jääb Reynoldsi arv vahemikku 1 – 10.[10]

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1.2)$$

kus  $Re$  – Reynoldsi arv, ühikuta suurus,

$\rho$  – vedeliku tihedus, kg/m<sup>3</sup>,

$v$  – keskmine voolamise kiirus, m/sek,

$d$  – keskmine pooride diameeter, m,

$\mu$  – vedeliku viskoossus, kg/m×sek(Pa/sek).

Pinnase filtratsioonikiirus arvutatakse valemiga 1.3. [10]

$$u_f = \frac{Q}{A} \quad (1.3)$$

kus  $u_f$  – filtratsiooni kiirus, m/ööp,

$Q$  – vooluhulk, m<sup>3</sup>/ööp,

$A$  – ristlõike pindala, m<sup>2</sup>.

Arvestades materjali efektiivpoorsusega, saame arvutada keskmise laminaarse voolamise kiiruse valemiga 1.4. [10]

$$v = \frac{u_f}{n_e} \quad (1.4)$$

kus  $v$  – keskmine laminaarne voolamise kiirus, m/ööp,

$u_f$  – filtratsiooni kiirus, m/ööp,

$n_e$  – efektiivpoorsus, ühikuta suurus.

Laminaarse voolamise korral saab kasutada ajaühikus läbi pinnaühiku voolanud vee hulga leidmiseks empiirilist Darcy valemit 1.5. [1]

$$Q = Ki \quad (1.5)$$

kus  $Q$  – veehulk ajaühikus, mis läbib ristlõike pindala,  $m^3/ööp$ ,  
 $K$  – filtratsioonimoodul,  $m/ööp$ ,  
 $i$  – hüdrauliline gradient.

Hüdraulilise gradiendi all mõistetakse veesamba kõrguste vahena väljendatud rõhkude erinevust pikkuse (materjalikihi paksus seadmes) ühiku kohta.[1]

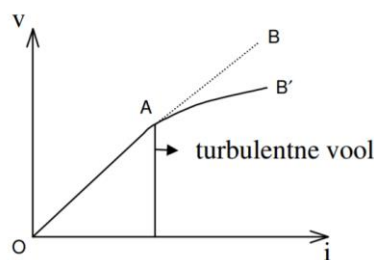
Filtratsioonimooduli ühikuks on kiirus ( $m/s$  või enam levinud  $m/ööp$ ). Filtratsioonimoodul on defineeritud kui filtratsioonikiirus ühikulise gradiendi puhul. Filtratsioonimoodul on defineeritud temperatuuri  $20^\circ C$  juures. Mida suurem on tegur  $K$ , seda paremini juhib selle poolt iseloomustatav pinnas vett.[1]

Pinnase veejuhtivuse määramist mõjutab ka vee viskoossus. Suurte pooride puhul avaldab see väiksemat mõju kui väikeste pooride puhul, kuna vesi ei ole sunnitud nii suurel määral oma trajektoori muutma ja viskoossuse takistav mõju ei tule siis nii suurel määral esile.[1]

Darcy seadus kehtib nii horisontaalses kui vertikaalses suunas voolava vee puhul.[1]

### 1.3.1 Darcy seaduse kehtivuse kontrollimine

Nagu eelnevalt mainitud, töötab Darcy seadus laminaarse voolamise korral. Sel juhul on filtratsioonikiirus  $v$  proportsionaalne hüdraulilise gradiendiga  $i$  selle iga võimaliku väärtuse kõrval(vt joonis 1.3).[1]



Joonis 1.3 Darcy seaduse kehtivus [1]  
 $v$  – filtratsioonikiirus;  $i$  – hüdrauliline gradient

Varasemad uuringud ja katsed on tõestanud, et lineaarne sõltuvus voolukiiruse ja hüdraulilise gradiendi vahel kehtib, seda eelkõige peenikeste pinnaste ja väikeste gradiendi väärtuste puhul. Olukord muutub, kui katsetatakse jämedamaid materjale ja suurema gradiendi puhul. Siis võib täheldada graafiku sirge muutumist kõverjooneks

(vaata joonis 1.3 OAB' osa). Suurte gradientide puhul soovitatakse Darcy valemi asemel kasutada seost 1.6, kus voolukiirus astendatakse suurusega  $m$  (mille väärtus on 1-2) ja mille suurus määratakse katsetamise teel. Seda võimalust tuleks rakendada väga jämedate täitematerjalide või väga suurte gradientide puhul.[1]

$$v^m = K i \quad (1.6)$$

## 1.4 Filtratsioonimooduli mõjutegurid

### 1.4.1 Materjali omadused

Peamiselt avaldavad pinnase veejuhtivusele mõju selle mineraloogiline koostis, veega küllastatuse aste, ja materjali terastikuline koostis. Väga oluline osa on siin materjali peenosiste sisaldusel, mis täidab jämedamate osakeste vahed ning vähendab materjali pooride mahtu. Jämedam materjal seevastu juhib küll suuremate pooride tõttu paremini vett, aga suured osakesed muudavad materjali tihendamise keerulisemaks. Kokkuvõtlikult võib välja tuua, et filtratsioonimooduli väärtust mõjutavad materjali omadused[11]:

- peenosiste sisaldus ja nende plastsus;
- materjali küllastatus veega ja materjali poorides sisalduv õhk;
- materjaliosakeste suurus;
- purustatud pindadega materjali osakaal;
- materjaliosakeste kuivtihedus.

### 1.4.2 Vee omadused

Filtratsioonimooduli mõõtmisel tuleb veel arvesse võtta vee viskoossust ja tihedust ning vee aereeritust ehk õhumullide sisaldust.[10]

**Viskoossuse** all mõistetakse vedeliku osakeste omavahelist sisemist hõõrdumist, mis tekitab vastupanu voolamisele. Dünaamiline viskoossus on tangentsiaalne jõud pindalaühiku kohta, mis suudab vedeliku ühte kihti teise suhtes liigutada. Dünaamilise



viskoossuse põhjal on võimalik arvutada ka kinemaatiline viskoossus, jagades dünaamilise viskoossuse vedeliku tihedusega.[12]

Kuna filtratsioonimooduli määramisel kasutatakse vett, tuleb katsete käigus kindlasti määrata vee temperatuur, et katsetulemuste arvutamisel saaks arvestada vee dünaamilise viskoossuse mõju ja tulemusi ka teiste katsete tulemustega võrrelda. Peamisteks temperatuurideks mille juures filtratsioonimoduleid võrreldakse on 10° ja 20° C. Vee dünaamiliste viskoosuste suhe on toodud Lisas 1.[10]

**Vee tihedus** on vee mass ruumala kohta. Filtratsiooni arvutamisel võetakse vee tihedust arvesse tulemuste täpsuse huvides, kuna vee tihedus muutub temperatuuri muutumisel.[12]

**Vee õhusisaldus** tuleneb asjaolust, et vesi sisaldab endas lahustunud gaase. Filtratsioonimooduli katsetamisel võivad need moodustada suuremaid kogumeid, mis mõjub vee liikumisele pinnases pärssivalt. Seetõttu tuleks katsete tegemisel eelistada deaereeritud vett.[10]

## 1.5 Filtratsioonimooduli määramine

Filtratsioonimooduli määramiseks on aegade jooksul välja töötatud palju erinevaid meetodeid. Mõned neist on teostatavad otse objektil. Paraku on sellised välikatsed üldjuhul väga kulukad ning aeganõudvad. Seetõttu käesolev töö objektil teostatavatel katsetel pikemalt ei peatu, vaid keskendub laboratoorsetele katsetele, mis on üldjuhul võrreldes välikatsetega kiiremad ja odavamad. Peamine fookus on püsiva ja alaneva rõhuga permeameetritel, mida ka käesoleva töö teises osas lähemalt tutvustatakse. Loomulikult ei tähenda odavus ja lihtsus tingimata seda, et laboratoorne katse on ka alati täpsem, kui välikatse.

### 1.5.1 Laboratoorsed katsed

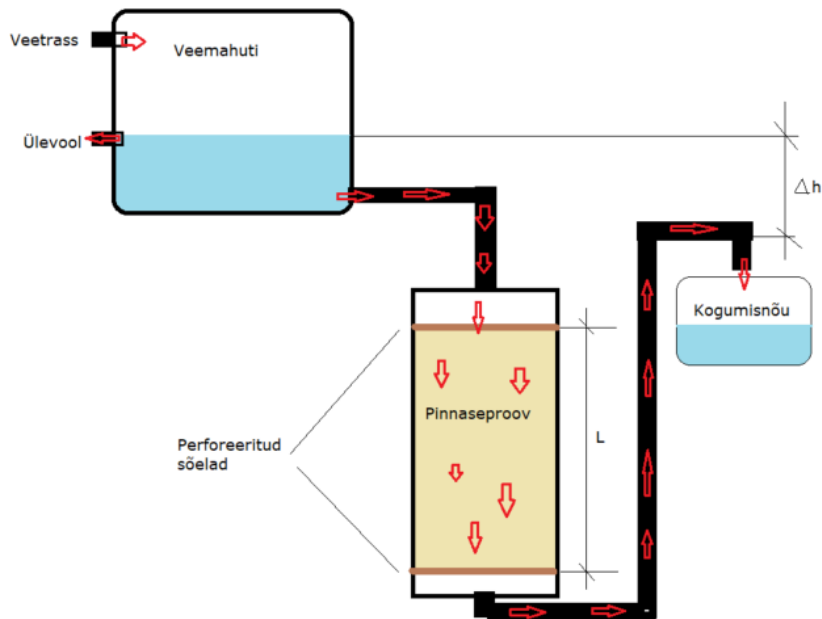
Laboratoorselt määratakse filtratsioonimoodulit peamiselt erinevate permeameetrite abil. Seadmete üldine tööpõhimõte on üsna sarnane ja toetub Darcy seadusele. Permeameeter kujutab endast katsesilindrit, mis täidetakse kindlaksmääratud

paksusega pinnasekihiga ning millest on võimalik vett läbi juhtida ja selle vee hulka ajas määrata. Permeameetris võib katse läbi viia nii püsiva kui alaneva rõhuga.[10]

Konstruksiooni alusel saab eristada kolme tüüpi katsevormiga permeameetreid. Konsolidatsioonipermeameetri puhul juhitakse vett läbi vertikaalselt koormatud katsekeha ja katse viiakse enamasti läbi langeva rõhuga. Jäiga tihendusvormiga permeameetri puhul võib kasutada nii püsivat kui alanevat rõhku, selle seadme puhul valitseb oht, et vesi võib liikuda mööda seadme seina pinnasest mööda. Kolmas tüüp ehk elastse seinaga permeameeter võimaldab seadme seina suruda rõhu abil tihedalt vastu pinnast.[7]

#### **1.5.1.1 Püsiva rõhuga permeameeter**

Püsiva rõhuga permeameeter sobib kruusade ja liivade katsetamiseks, mille saviosakeste sisaldus on madal. Seade koosneb silindrilisest mahutist, millesse saab tihendada kindla paksusega materjalikihi. Silindri küljes on vastavad ühendused, mis võimaldavad juhtida vett läbi seadmes oleva pinnase. Vee juhtimisel läbi pinnase mõõdetakse aega ja selle aja jooksul pinnast läbiva vee hulka. Vesi juhitakse seadme silindrisse nii, et on tagatud pidev vee pealevool ja rõhk – lihtsaim viis selleks on kasutada vastavat veemahutit, milles on võimalik hoida ühtlast veetaset. Otse trassist vee juhtimine seadmesse ei ole lubatud, kuna trassivesi on väga suure surve all ja on keeruline tagada ühtlast veevoolu. Liiga suure surve all olev vesi tekitab pinnasesse kanalid ja muudab filtratsiooni määramise ebatäpseks. Püsiva rõhuga permeameetri tööpõhimõtte on toodud joonisel 1.4.[13]



Joonis 1.4 Püsiva rõhuga permeameetri lihtsustatud skeem (koostatud [13] põhjal)

Püsiva rõhuga permeameeter võib olla nii vertikaalne kui horisontaalne - ühega on võimalik mõõta vee liikumist pinnases vertikaal- ja teisega horisontaalsuunas. Vertikaalsed permeameetrid on üldjuhul silindrilise kujuga ja horisontaalsed risttahuka kujuga. Viimaste puhul tingib teistsuguse kuju materjali tihendamise hõlbustamine.

Järgnevalt kirjeldame lühidalt katse käiku vertikaalse püsiva rõhuga permeameetri puhul.

Enne katse alustamist tuleks määrata katses kasutatava materjali optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus. Selleks sobib näiteks EVS-EN 13286-2 katsestandardi järgi läbi viidud Proctor-teim. Optimaalse niiskuse ja tiheduse teadmine võimaldab ette valmistada õige koguse veega niisutatud pinnast, mis täidab katsesilindri mahu ning optimaalse niiskuse juures peaks olema pinnase tihendamine maksimaalse tiheduse juurde kõige lihtsam.[7]

Järgnevalt kirjeldame lühidalt katse käiku vertikaalse püsiva rõhuga permeameetri puhul.

Katsesilindri, mille alumises kaanes on ühendus veevooliku jaoks, sisse asetatakse sõel ja filterpaber või -kangas. Need on vajalikud selleks, et vesi ei uhuks pinnast läbides voolikusse pinnaseosakesi ega selles leiduvaid peenosiseid. Pinnaseproov tihendatakse katsesilindrisse kihtide kaupa nii, et tihendatava kihi paksus ei ületaks veerandit silindri kõrgusest. Tihendamiseks võib kasutada Proctori käsihaamrit või mõnda muud seadet,

mis võimaldab saavutada materjali nõutud tiheduse. Kihid tasandatakse ja kobestatakse enne järgmise kihi lisamist.[13]

Seadmesse tihendatud materjali kogus kaalutakse ja registreeritakse. Samuti mõõdetakse silindrisse tihendatud materjali lõplik täpne paksus. Materjali peale asetatakse filterpaber või -kangas ja selle peale sõel ja suletakse silinder kaanega.[13]

Permeameetris asuv pinnaseproov küllastatakse veega, juhtides vett silindrisse selle alumises kaanes oleva ühenduse külge ühendatud vooliku kaudu. See protsess peab olema aeglane, et vältida peenosiste väljapesu materjalist.[13]

Mõningad autorid soovivad seda teha lehtri ja vooliku abil, tõstes lehtrit täitmise ajal järk-järgult kõrgemale.[7]

Samas on mõnedes juhendites soovitatud kasutada küllastamise protsessis vaakumit.[13]

Kui permeameetri täitmiseks kasutada sama veepaaki, mida hiljem katse käigus püsiva rõhu tekitamiseks kasutada, tuleks vee pealevoolu hoida kraani abil reguleerides võimalikult madalana.

Kui veetase permeameetri silindris on jõudnud ülemise kaaneni, suletakse alumise kaane küljes olev ühendus. Seejärel ühendatakse silindri külge voolikud nii, et kaane küljes oleva ühenduse kaudu oleks võimalik silindrisse juhtida vett ühtlast veetaset hoidvast veepaagist. Alumise kaane külge ühendatakse voolik, mille teise otsaga on võimalik muuta silindrist väljuva vee kõrguse punkti ja seeläbi muuta hüdraulilist gradienti. Hüdrauliline gradient määratakse veemahuti ja silindrist väljuva vooliku otsa alumise serva kõrguste vahe abil. Voolikust väljuv vesi kogutakse mõõdunõusse. Registreeritakse vee temperatuur ja veekoguse voolamiseks kulunud aeg. Enne mõõtmise alustamist tuleks lasta veel läbi silindri joosta. See võimaldab veetasemetel pinnases ühtlustada ja tagab ka püsivama veesammaste kõrguse vahe ja seeläbi püsiva hüdraulilise gradiendi väärtuse.[13]

Mõõtmise tuleks läbi viia erinevate hüdrauliliste gradientidega ja iga gradiendi juures vähemalt kolm korda, et tagada katseandmete usaldusväärsus.[7]

Samuti võimaldab erinevate gradientidega mõõtmine hiljem arvutuste tegemisel tuvastada turbulentsset voolamist (Darcy seaduse kontroll) ja jätta vastavad katsetulemused lõpptulemuse arvutamisel kõrvale.

Darcy seaduse põhjal on võimalik katsetulemuste alusel arvutada filtratsioonimoodul kasutades valemit 1.7. [1]

$$Q = vAt = K \frac{\Delta h}{L} A t \quad (1.7)$$

kus  $Q$  – vooluhulk, m<sup>3</sup>/ööp,

$K$  – filtratsioonimoodul, m/ööp,

$\Delta h$  – kõrguse koordinaatide muut (veesammaste kõrguse vahe), m,

$L$  – vee liikumistee pikkus (materjalikihi paksus seadmes), m,

$A$  – pinnase ristlõike pindala, m<sup>2</sup>,

$T$  – voolamiseks kuluv aeg, ööp

Rõhu langusega ei ole vaja arvestada, sest voolutakistus pinnases on märgatavalt suurem kui silindri mittetäidetud osas. Seega on võimalik filtratsioonimoodul arvutada, kasutades valemit 1.8. [1]

$$K = \frac{QL}{A\Delta ht} \quad (1.8)$$

kus  $K$  – filtratsioonimoodul, m/ööp,

$Q$  – vooluhulk, m<sup>3</sup>/ööp,

$\Delta h$  – kõrguse koordinaatide muut (veesammaste kõrguse vahe), m,

$L$  – vee liikumistee pikkus (materjalikihi paksus seadmes), m,

$A$  – pinnase ristlõike pindala, m<sup>2</sup>,

$T$  – veehulga  $Q$  voolamiseks kuluv aeg, ööp.

Katse käigus fikseeritakse ka vee temperatuur. Katse tulemusena saadud filtratsioonimoodul arvutatakse ümber konkreetsele temperatuurile kuna vee dünaamiline viskoossus on temperatuuri muutudes erinev. Selleks kasutatakse valemit 1.9. [10]

$$K_{20} = \frac{\eta^T}{\eta_{20}} K \quad (1.9)$$

kus  $K_{20}$  – filtratsioonimoodul vee temperatuuril 20°C, m/ööp,

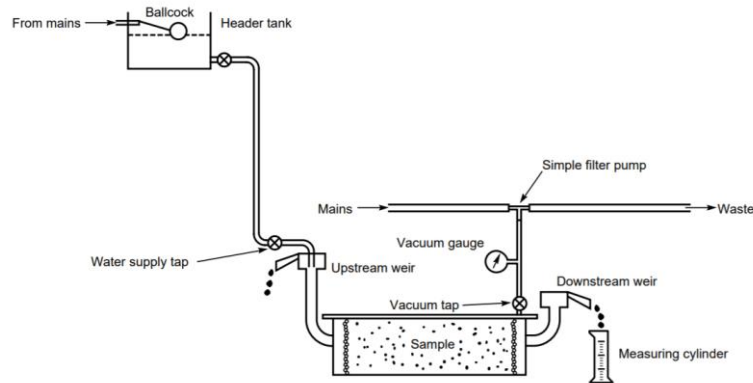
$\eta^T/\eta_{20}$  – vee dünaamiliste viskoossuste suhe (Lisa 1), ühikuta suurus,

$K$  – katseline filtratsioonimoodul.

Samadel alustel saame tulemuste võrdlemiseks (näiteks EVS 901-20 tulemustega) arvutada filtratsioonimooduli ümber vee temperatuurile 10°C, jagades filtratsioonimooduli  $K_{20}$  vee dünaamilise viskoossusega 1,3012.

Mõõtmisi tuleks läbi viia erinevate hüdrauliliste gradientidega ja iga gradiendi puhul vähemalt kolm korda, et tagada katseandmete usaldusväärsus. Katsetulemuste põhjal saab koostada graafiku, millel on esitatud vee voolukiiruse ja hüdraulilise gradiendi suhe. Selline graafik võimaldab jätta kõrvale katsetulemused, kus vee voolamine ei allu Darcy seaduse nõuetele ja tuvastada tulemustes muid anomaaliaid (nt liiga väike vee pealevool, vee tungimine läbi materjali sinna tekkinud kanalitest).[2]

Horisontaalset filtratsiooni mõõta võimaldava permeameetri tööpõhimõte on eelpoolkirjeldatuga üldjoontes sama, erinevused tulenevad vaid seadme kujust ja vee voolamise suunast (vt joonis 1.5).



Joonis 1.5 Horisontaalse püsiva rõhuga permeameetri tööpõhimõte HA 41/17 järgi [14]

Tulemuste arvutamiseks lähtutakse samuti Darcy seadusest. Käesolevas töös võeti horisontaalse permeameetri konstrueerimisel ja tulemuste arvutamisel aluseks Inglismaa Maanteede Agentuuri (Highways Agency England) poolt välja antud juhendit HA 41/17. Vastavalt sellele dokumendile arvutatakse katsetulemuste põhjal filtratsioonimoodul valemi 1.10 järgi.[14]

$$K = \frac{q}{Ai} \frac{10^{-6}}{60} \quad (1.10)$$

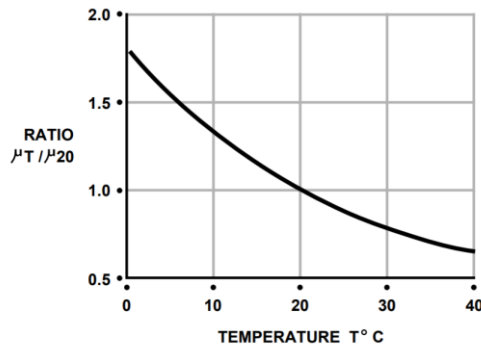
kus  $K$  – filtratsioonimoodul, m/s,

$q$  – vee voolukiirus, ml/min

$A$  – permeameetri ristlõike pindala,  $m^2$ ,

$i$  – hüdrauliline gradient, ühikuta suurus.

Mõõtmised teostatakse erinevate veesamba kõrguste vahe juures ja arvutatakse tulemused, korrigeerides tulemusi arvestades vee dünaamilist viskoossust erinevatel temperatuuridel (vt joonis 1.6). [14]



Joonis 1.6 Seos vee temperatuuri ja dünaamilise viskoossuse vahel [14]

Seejuures arvutatakse hüdrauliline gradient  $i$  valemiga 1.11. [14]

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (1.11)$$

kus  $\Delta h$  – veesamba kõrguste vahe, m,

$L$  – pinnasproovi pikkus permeameetris, m.

Vee voolukiirus pindalaühiku kohta temperatuuril  $20^\circ C$  arvutatakse valemiga 1.12.[14]

$$\frac{q_{20}}{A} = \frac{q \times c}{W \times D} \frac{10^{-6}}{60} \quad (1.12)$$

kus  $q$  – vee voolukiirus, ml/min,

$q_{20}$  - vee voolukiirus temperatuuril  $20^\circ C$ , ml/min,

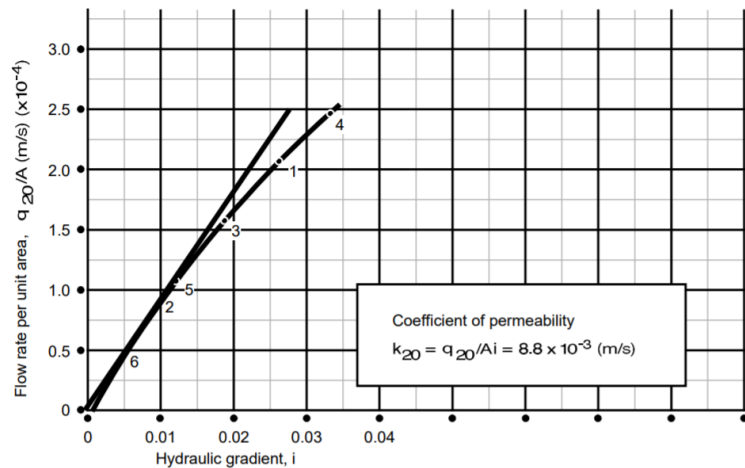
$A$  – pinnaseproovi ristlõike pindala seadmes,  $m^2$ ,

$c$  – temperatuuri korrigeerimistegur (tuleneb vee dünaamilisest viskoossusest),

$W$  – pinnaseproovi laius seadmes, m,

$D$  – pinnaseproovi kõrgus seadmes, m.

Saadud arvutuste põhjal koostatakse graafik, kus vertikaalteljel on vee voolukiirus  $Q_{20}/A$  ja horisontaalteljel hüdrauliline gradient  $i$  (vt näidisgraafikut joonis 1.7). Graafikult on võimalik jälgida Darcy seaduse kehtivust (vt joonis 1.2) ja tuvastada tulemused, kus vee vool ei allu laminaarse voolamise tingimustele. Graafikule tõmmatakse läbi tingimustele vastavate punktide sirge ja selle sirge tõus loetaksegi filtratsioonimooduliks  $K_{20}$ . Seega on lõpptulemuse tõlgendamine graafiline.[14]



Joonis 1.7 Näidisgraafik tulemuste graafilise analüüsi kohta juhendis HA 41/17 [14]

Vajadusel arvutatakse pärast katse lõppu ka katseproovi poorsus valemiga 1.13.[14]

$$n = 1 \frac{M}{LWD} \frac{1}{1000 G_{sa} (1 + \frac{w}{100})} \quad (1.13)$$

kus  $M$  – katseproovi mass seadmes, kg,

$G$  – terade näivtihedus,

$W$  – katseproovi niiskusesisaldus, %,

$L$ ,  $W$  ja  $D$  – katseproovi laius, pikkus ja kõrgus seadmes, m.

Materjali küllastamiseks seadmes veega soovitatakse kasutada vaakumit.[14]

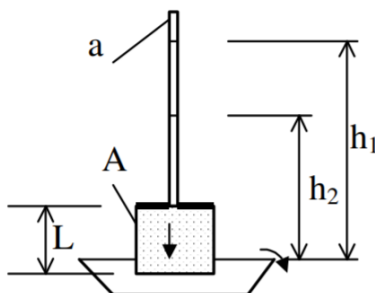
Eelpool kirjeldatud püsiva rõhuga permeameetrid sobivad hea ja mõõduka veejuhtivusega pinnaste katsetamiseks. Madala veejuhtivusega pinnaste katsetamiseks soovitatakse kasutada langeva rõhuga permeameetreid.[10]



### 1.5.1.2 Langeva rõhuga permeameeter

Langeva rõhuga permeameeter on eelistatud katsevahendiks peeneteraliste pinnaste puhul.[7]

Langeva rõhuga permeameetri tööpõhimõte on kujutatud joonisel 1.8.



Joonis 1.8 Langeva rõhuga permeameetri skeem [1]:  
A – seadme läbimõõt, a – piesomeetri toru läbimõõt,  $h_1$  – veesamba kõrgus katse alguses proovi alumisest servast,  $h_2$  – veesamba kõrgus katse lõpus proovi alumisest servast, L - proovi kõrgus seadmes.

Veehulk mõõdetakse vee taseme muutuse järgi täpse mõõtskaalaga varustatud peenikeses torus, kus veesammas tekitab voolamiseks vajaliku rõhu. Kuna veetase muutub, tekitab see ka voolu tekitava rõhu muutuse  $h$  katse vältel. Vooluhulk ajaühikus on  $K \times a \times h / L$ . Peenes torus on see  $A \times (\Delta h / \Delta t)$  kus A on toru ristlõike pindala. Vooluhulkade võrdsuse korral (valem 1.14) [1]

$$KA \frac{h}{L} = A \frac{dh}{dt} \quad (1.14)$$

Kui me eraldame muutujad, saame valemi 1.15.[1]

$$dt = \frac{aL}{KA} \frac{dh}{h} \quad (1.15)$$

Integreerides vasakut poolt nullist  $t$ -ni ja paremat poolt  $h_1$ -st  $h_2$ -ni, saame valemi 1.16.[1]

$$t = \frac{aL}{KA} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1.16)$$

Avaldame valemist 1.17 filtratsioonimooduli K, saame valemi 1.13.[1]

$$K = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1.17)$$

kus  $K$  – filtratsioonimoodul, m/ööp;

$L$  – pinnasega täidetud toruosa kõrgus mm;

$A$  – pinnase ristlõikepindala torus, mm<sup>2</sup>;

$h_1$  – veesamba kõrgus katse algul, mm;

$h_2$  – veesamba kõrgus katselõpul hetkel  $t$ , mm;

$t$  – rõhu langemiseks kulunud aeg, s.

Rohkelt peenosiseid ja savi sisaldava pinnase veejuhtivuse määramine ei õnnestu alati ka langeva rõhuga permeameetri abil. Väga väikese veejuhtivusega pinnase  $K$  saab määrata näiteks kaudselt, pinnase tihenemise kiiruse kaudu.[1]

On äärmiselt oluline, et katses kasutatav pinnas oleks veega küllastunud, sest õhumullid vähendavad katsematerjali ristlõikepindala ja selle tulemuseks on väiksem filtratsioonimoodul. Katsematerjal peab olema tihedalt surutud vastu katseseadme seinale, et vältida vee liikumist seadme seinale ja materjali vahelt läbi, mis tingiks ekslikult suured filtratsioonimooduli väärtused. Mõõteseadmetes ei soovitata kasutada veesamba mõõtmiseks liiga peenikesi torusid (alla 5 mm), mis kapillaartõusuga võivad hakata mõõtmistulemusi mõjutama.[10]

Langeva rõhuga permeameeter on ka Sojuzdornii katseseade (joonis 1.9), mida kasutatakse EVS 901-20:2013 järgi filtratsioonimooduli määramisel.

Seade koosneb 50 mm läbimõõduga ja 220 mm kõrgusega metallsilindrist, mille alla saab keermega kinnitada perforeeritud taldmiku ja mille küljes on veetaseme mõõtmiseks sobiv piesomeeter.[15]



Joonis 1.9 Sojuzdornii katseseade (paremal) koos tihendushaamriga (vasakul) [autori foto]

### **1.5.1.3 EVS 901-20:2013**

Katsestandardi EVS 901-20:2013 järgi filtratsioonimooduli määramine on hetkel Eestis kõige enam levinud meetod. Rahvuslik standard baseerub suuresti GOST 25584-90 lisa 5 kirjeldatud meetodil ja kasutab Sojuzdornii katseseadet. Kui varem (enne 2013. aastat) oli kasutusel katse lihtsustatud versioon (sooritati materjali 5% niiskuse juures ja tihendati 3x25 löögiga), on tänaseks üldjuhul sellest loobutud. Vastavalt EVS 901-20:2013 tihendatakse kuni 4mm teramööduga materjal Sojuzdornii katseseadmesse optimaalse niiskuse ja maksimaalse tiheduse juures. Pinnase optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus fraktsioonile 0-4 mm määratakse eelnevalt katsestandardi EVS-EN 13286-2:2010 (Proctor-teim) järgi.[15]

Samuti näeb standard ette, et materjalile tuleb määrata peenosiste sisaldus ja terastikuline koostis. Üle 8% peenosiste sisalduse juures on lubatud lugeda katse lõpetatuks ja materjal mittefiltreeruvaks.[15]

Katse käigus täidetakse Sojuzdornii katseseade ca 100 mm kõrguse pinnasekihiga, mis saavutatakse kolmes kihis. Igat kihti tihendatakse spetsiaalse tihendushaamriga 40 löögiga. Materjaliga täidetud katseseade asetatakse veenõusse küllastuma nii, et vesi saaks seadme põhjas olevate aukude kaudu materjali tungida. Kui materjali ülemisele pinnale on tekkinud veekiht, asetatakse katseseade vasturõhku tekitavale alusele. Seejärel täidetakse pinnase kohal olev toruosa veega. Seadme küljes olevale piesomeetrile on märgitud skaala, millel saab mõõta veesamba kõrgust. Mõõtmise käigus fikseeritakse aeg, mis veesambal kulub skaala alguspunktist 50 mm langemiseks (halva filtreeruvusega materjalide puhul võib kasutada ka 30 mm). Mõõdetakse katses kasutatud vee temperatuur. Läbijooksu korratakse sama seadmega vähemalt veel üks

kord. Kokku tuleb katse läbi viia kolme osaprooviga, seega arvutatakse lõpptulemus 6 mõõtmise keskmisena.[15]

Osaproovi filtratsioonimoodul  $K_{10}$  arvutatakse valemiga 1.18.[15]

$$K_{10} = \frac{h}{t} \times \phi \frac{S}{H_0} \times \frac{846}{T} \quad (1.18)$$

kus  $K_{10}$  – vee filtratsioonimoodul taandatuna vee temperatuurile 10° C, m/ööp,

$h$  – materjali kõrgus seadmes, mm,

$S$  – piesomeetri skaalalugem mõõtmise algusest kuni lõpuni, mm

$H_0$  – veetaseme kõrgus piesomeetri nullist kuni veeanuma servani, mm,

$\phi$  – ühikuta koefitsient (vt Lisa 2 tabel)

$t$  – veetaseme alanemise aeg, s,

$T$  – Temperatuuri parandustegur, arvutatakse  $T = 0,7 + 0,03 \times T_f$ ,

Kus  $T_f$  on katses kasutatud vee temperatuur, °C.

Katsestandardit EVS 901-20:2013 on peamiselt kritiseeritud selle tõttu, et see näeb ette Sojuzdornii seadme kasutamist, mille läbimõõt ei võimalda katses kasutada materjalis sisalduvaid üle 4mm osakesi ja jätab need kõrvale, arvestamata nende mõju vee liikumisele pinnases.

2016. aastal kasutati Maanteeameti poolt läbi viidud filtratsiooniuuringus lisaks Sojuzdornii seadmele ka selle edasiarendust, mis baseerus vastavalt modifitseeritud 100 mm Proctor-teimi A-vormil (joonis 1.10). Paraku laiemat kasutust see seade ei ole leidnud, kuigi võimaldab katsetada kuni 16 mm teramõõduga materjali. Enne ulatuslikku kasutuselevõttu vajaks see seade kindlasti põhjalikumat uurimist ja testimist.[16]



Joonis 1.10 Sten-Kristjan Saariku konstrueeritud langeva rõhuga permeameeter [16]

#### **1.5.1.4 Permeameetrite kasutamisel tehtavad vead**

Katsetulemuste usaldusväärsus sõltub väga paljudest teguritest. Järgnevalt toome välja mõned asjaolud, mille vastu permeameetreid kasutades eksitakse ning mis võivad katse täpsust olulisel määral mõjutada.

**Proovivõtul tehtud vead.** Katsetamisele eelneb alati proovivõtt. Saavutamaks võimalikult esinduslikku katseproovi, mille omadusi võiks ka ülejäänud materjalile laiendada, tuleb jälgida proovivõttu käsitlevaid standardeid.[14]

**Aereeritud vee kasutamine.** Kui vesi sisaldab suurel hulgal õhumulle, muudab see vee voolamise omadusi kehvemaks. Selle vastu aitab püsiva rõhuga permeameetrite puhul vahepaagi kasutamine ja alaneva rõhuga permeameetrite puhul tuleks kasutada vett, millel on eelnevalt lastud seista. [14]

**Ebapiisav küllastumine.** Tõenäoliselt kõige suurem katsetulemustes vigade tekitaja on proovi ebapiisav veega küllastamine, mille tagajärjel jääb õhk materjali pooridesse lõksu ja takistab vee liikumist läbi pinnase. Selle vastu võib aidata proovi küllastamine vaakumi abil. [14]

**Vee möödavool** proovi ja seadme seinaga vahelt. Probleem on väiksem peenema materjali katsetamisel, kuid kerkib teravalt esile suuri osakesi (üle 4mm) sisaldavate materjalide puhul jäiga seinaga permeameetrites. Selle vastu on üheks lahenduseks jäiga seinaga sisepinna katmine veekindla pehme materjaliga (näiteks pvc matt).[14]

**Materjali hõredus seinaga juures.** Seda probleemi esineb peamiselt siis, kui katsetatavas materjalis sisalduvad maksimaalse suurusega osakesed on võrreldes katseseadme diameetriga liiga suured ja tekitavad seadme seinte juures halvemini tihenenud piirkondi. Selle vastu aitab seadmete mõõtmete valik vastavalt materjali fraktsioonile või ülemõõduliste osakeste eemaldamine materjalist sõelumise abil (nagu näeb ette EVS 901-20:2013. [14]

**Peenosiste väljauhtumise** vältimiseks tuleb nii veega küllastamise faasis kui ka mõõtmiste teostamise faasis tagada, et vee läbivool ei oleks nii tugev, et kannaks materjalis olevad peenosised proovist välja. Väiksema hüdraulilise gradiendi juures teostatud mõõtmised vähendavad riski. [14]

**Turbulentne voolamine.** Väikese hüdraulilise gradiendi kasutamine mõõtmise puhul vähendab riski, et laminaarne voolamine muutub turbulentseks ja ei allu enam Darcy seadusele. Arvutustes tuleks turbulentse voolamise tunnustega andmed kõrvale jätta.[14]

**Temperatuurimuutused.** Vee dünaamiline viskoossus ja tihedus sõltuvad temperatuurist. Arvutustes tuleks kindlasti kasutada temperatuuriparandit. [14]

## 1.6 Materjalide tihendamine

### 1.6.1 Pinnase optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus. Proctor-teim

Pinnase maksimaalne tihedus ja optimaalne tihedus määratakse pinnase standardse tihendamise teostamisega, selleks kasutatakse laboratoorsetes tingimustes standardset Proctor-teimi.[17]

Katse läbiviimist käsitleb katsestandard EVS 13286-2:2010. Proctor-teim võimaldab hinnata nii hüdrauliliselt seotud kui ka sidumata segude tihedust ja seost materjali kuivtiheduse ja veesisalduse vahel.[18]

Katse läbiviimiseks on vajalikud Proctor-tihendaja ja proctor-vorm eemaldatava krae ja alusplaadiga. Haamri mass ja vormi mõõtmed valitakse vastavalt katsetatava materjali fraktsioonile (tabel 1.1).[18]

Tabel 1.1 Proctor-teimi kokkuvõte [18]

Katse tüüp	Katse iseloomustus	Sümbol	Ühik	Proctori vorm		
				A	B	C
Proctor-teim	Haamri mass	$m_R$	kg	2,5	2,5	15,0
	Haamri diameeter	$d_2$	mm	50	50	125
	Langemiskõrgus	$H_2$	mm	305	305	600
	Kihtide arv	-	-	3	3	3
	Löökide arv kihi kohta	-	-	25	56	22
Modifitseeritud proctor-teim	Haamri mass	$m_R$	kg	4,5	4,5	15,0
	Haamri diameeter	$d_2$	mm	50	50	125
	Langemiskõrgus	$H_2$	mm	457	457	600
	Kihtide arv	-	-	5	5	3
	Löökide arv kihi kohta	-	-	25	56	98

Katseproov kuivatatakse 110° C juures. Materjal jagatakse osaproovideks mille mass oleneb materjali fraktsioonist ja kasutatava vormi suurusest. Osaproovidele lisatakse erinevates kogustes vett, saavutamaks 1-2% intervall niiskuse sisalduse erinevuses. Niisutatud osaproovid segatakse hoolikalt läbi ja lastakse seista, tagamaks veesisalduse ühtlustumine materjalis. Materjal tihendatakse kihtide kaupa kas vastava seadme või käsihaamri abil kindlaksmääratud ruumalaga vormi sisse. Pärast viimase kihi tihendamist eemaldatakse vormi krae ja lõigatakse pinnase serv vormiga ühekõrguseks. Proov kaalutakse ja määratakse selle niiskusesisaldus. Protseduur kordub kõikide osaproovide puhul.[18]

Saadud katsetulemuste põhjal arvutatakse iga osaproovi mahumass  $\rho$  megagrammides kuupmeetri kohta valemiga 1.19. [18]

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1.19)$$

Kus  $\rho$  – mahumass, Mg/m<sup>3</sup>,

$m_1$  – vormi ja alusplaadi mass, g,

$m_2$  – vormi, alusplaadi ja materjali mass, g,

$V$  - vormi siseruumala, ml.

Tihendatud osaproovi kuivtihedus  $\rho_d$  arvutatakse valemiga 1.20 [18]

$$\rho_d = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)} \quad (1.20)$$

Kus  $\rho_d$  – kuivtihedus, Mg/m<sup>3</sup>,

$\rho$  – mahumass, Mg/m<sup>3</sup>,

$w$  – materjali veesisaldus, %.

Tulemuste analüüsiks joonistatakse graafik, millelt määratakse materjali optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus.[18]

Proctor-teim sobib liivade ja kruusade katsetamiseks. Fraktsioneeritud killustike puhul ei ole katsetulemused usaldusväärsed sest löökide mõjul killustik katse käigus puruneb.

Killustike puhul kontrollitakse tihedust elastsusmooduli kontrollimise teel, kasutades selleks dünaamilist koormamist.[3]

**Tihendusenergia.** EVS 13286-2:2010 Lisa A toob ära juhendi, kuidas arvutada Proctor-Teimi erienergia alternatiivsete katsevormide ja haamrite kasutamisel. Proctor-teimi erienergia peab olema vahemikus 0,56 MJ/m<sup>3</sup> kuni 0,63 MJ/m<sup>3</sup>, keskmine väärtus on seega 0,6 MJ/m<sup>3</sup>, erienergia arvutamiseks kasutatakse valemit 1.21. [18]

$$\text{Erienergia} = \frac{\text{haamri mass} \times \text{langemiskõrgus} \times \text{löökide arv kihi kohta} \times \text{kihtide arv} \times \text{raskusjõud}}{\text{vormi ruumala}} \quad (1.21)$$

### 1.6.2 Nõuded tihendamisele. Tihendustegur

Tihendatust iseloomustatakse tihendusteguriga ( $K_t$ ) mis on pinnaseskeleti tegeliku mahumassi ja sama pinnase optimaalse niiskuse juures määratud maksimaalse mahumassi suhe (valem 1.22).[17]

$$K_t = \frac{\gamma}{\delta} \quad (1.22)$$

Kus  $\gamma$  – tegelik mahumass, Mg/m<sup>3</sup>,

$\delta$  – mahumass optimaalse niiskuse ja maksimaalse tiheduse juures, Mg/m<sup>3</sup>.



### **1.6.3 Vibratsiooniga tihendamine laboritingimustes**

Alternatiivina Proctor-teimi põhimõtet kasutavale dünaamilisele tihendamisele on uuritud võimalusi kasutada laborikatsetes tihendamiseks staatilist koormust ja vibratsiooni kasutavaid seadmeid. Tihendushaamrite peamiseks probleemiks on käsihaamrite kasutamiseks vajalik suur füüsiline jõud (suurte katsevormide ja pikkade löögiseeriatega puhul) ja mehhaniseeritud haamrite puhul nende kasutusvõimaluste piiratus.

Samuti tekib tihendushaamrite kasutamisel kihtide kaupa tihendamisel oht, et kihtide piiridel tekib materjali osakeste peenenemine ning kokkuvõttes ei ole enam tagatud katseproovi homogeensus vormis või seadmes. Selle vastu kasutatakse küll abinõuna enne iga järgneva kihi lisamist eelneva kihi kobestamist, kuid uuringud annavad alust arvata, et dünaamilisel teel tihendatud materjalides tekib tihendamise käigus juurde olulisel määral peenosiseid.[19]

2011. aastal Doris Asmani poolt läbi viidud uuringu käigus selgus, et staatilise koormusega tihendamise meetod on praktilisem kui dünaamiline, kuna selleks kulub vähem energiat ja saavutatakse materjali ühtlasem ja suurem tihedus ja nihketugevus. Jõuti ka järeldusele, et erinevate pinnaste tihendamiseks kuluv energia ei ole alati võrdne ja tihendusenergia tuleb määrata vastavalt materjali tüübile ja selle optimaalsele veesisaldusele.[20]

## **2. MATERJALID JA KATSEMETOODIKA**

Laboratoorsete katsetuste teostamiseks konstrueeriti Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratoriumis kaks püsiva rõhuga jäiga katsevormiga permeameetrit. Neist esimene, mis võimaldab mõõta materjalide vertikaalset veejuhtivust, on konstrueeritud 2011. aastal Mark Mihhailenko poolt ehitatud permeameetri eeskujul, kuid on sellest oluliselt suurem ja vastupidavam. Teine permeameeter on ehitatud Inglise standardi HA 41/17 eeskujul mõningate modifikatsioonidega ja sellega saab mõõta materjalide veejuhtivust horisontaalsuunas.

Permeameetri katsetega paralleelselt viidi läbi ka samade materjalide katsetamine vastavalt EVS 901-20:2013 katsestandardile. Eesmärgiks oli võrrelda permeameetrite katsetulemusi oma vahel teise (EVS 901-20:2013) meetodi abil saadud tulemustega. Samuti kasutati permeameetritesse materjali tihendamisel kombinatsiooni staatilisest koormusest ja vibratsioonist, et uurida selle rakendusi dünaamilise tihendamise asemel, mis võimaldaks muuta laboratoorsetes tingimustes suuremõõtmeliste permeameetrite kasutamise oluliselt kiiremaks ja hõlpsamaks. Tihendusteguri määramiseks kasutati võrdluseks kõigile materjalidele määratud Proctor-teimi (EVS-EN 13286-2:2010) katsetulemusi. Killustike puhul katsetati tiheduse määramiseks Inspector-tüüpi seadme kasutamise võimalust. Samuti määrati kõigile materjalidele terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus EVS-EN 933-1:2012 järgi.

Uuringuga paralleelselt viidi läbi ka drenmati ja täitematerjali kombineeritud katsetused, kuid käesolev töö neid ei käsitle.

Kõik kasutatud materjalid hangiti käesoleva töö autori poolt otse tootjatelt. Materjali tootjate ärisaladuse kaitseks ei ole töös mainitud ettevõtete ega karjäärade nimetusi.

### **2.1 Katsetatavad materjalid**

#### **2.1.1 Looduslik liiv**

Proov võeti 2020. aasta jaanuaris karjääris asuva kuhila nõlvast. Materjalile määrati terakoostis (tabel 3.1), optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonidele 0/4 ja 0/16 (tabel 3.2).

### **2.1.2 Looduslik kruus**

Proov võeti 2020. aasta jaanuaris karjääri nõlvast. Materjalile määrati terakoostis (tabel 3.1) ja määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonidele 0-4 mm ja 0-31,5 mm (tabel 3.2). Materjal sisaldas üksikuid väga suuri veeriseid. Filtratsioon määrati permeameetrites fraktsioonile 0-31,5 mm, eemaldades proovist üle 31,5 mm kivid ja veerised sõelumise teel.

### **2.1.3 Purustatud kruus**

Proov võeti 2020. aasta jaanuaris karjääris asuva purusti lindi alt kuhilast. Materjalile määrati terakoostis (vt tabel 3.1) ja määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonidele 0-4 mm ja 0-31,5 mm (vt tabel 3.2).

### **2.1.4 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 16-31,5 mm**

Proov võeti 2020. aasta aprillis karjääris asuva purusti alt. Materjalile määrati terakoostis (tabel 3.1) ja määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonile 0-31,5 mm (tabel 3.2).

### **2.1.5 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 4-31,5 mm**

Proovid materjalidest fraktsioonidega 4-16 mm ja 16-31,5 mm võeti 2020. aasta aprillis karjääris asuva purusti alt. Lähtematerjalile määrati terakoostis ja segati materjalid massi alusel kokku vahekorras 1:1. Saadud materjalile määrati uuesti terastikuline koostis (tabel 3.1) ja peenosiste sisaldus ning määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonile 0-31,5 mm (tabel 3.2).

### **2.1.6 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 0-31,5 mm**

Proovid materjalidest fraktsioonidega 0-4 mm, 4-16 mm ja 16-31,5 mm võeti 2020. aasta aprillis karjääris asuva purusti alt. Lähtematerjalile määrati terakoostis ja segati materjalid massi alusel kokku vahekorras 1:1:1. Saadud materjalile määrati uuesti terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus (tabel 3.1) ning määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne kuivtihedus fraktsioonile 0-31,5 mm (tabel 3.2).

## 2.2 Katsemetoodika

### 2.2.1 Katseseadmed

#### 2.2.1.1 Vertikaalne püsiva rõhuga permeameeter

Seadme konstrueerimisel võeti eeskujuks 2011. aastal Mark Mihhailenko poolt ehitatud katseseade (joonis 2.1).



Joonis 2.1 Mark Mihhailenko konstrueeritud püsiva rõhuga permeameeter [16]

Permeameetri silinder valmistati 4 mm ning silindri põhi ja kaas 5 mm roostevabast terasest. Silindri põhiosa on väljaspoolt ümbritsetud 3 võrdse vahega kinnitatud terasvitsaga, mille eesmärgiks on suurendada seadme jäikust. Kaas ja põhi kinnituvad silindri kummaski otsas oleva flantsi külge poltide abil. Kaane kaheksast poldist neli on tõsteaasaga, võimaldamaks materjaliga täidetud seadme tõstmist mootorkraana abil. Flantside sisse on freesitud sooned tihendite jaoks, tagamaks silindri veepidavus. Kaane ja põhja tsentrites on keermestatud 1" kuulkraaniga toruliitmikud, mille külge on võimalik kiirühenduste abil kinnitada voolikuid. Lisaks on kaane küljes 1/2" kraan õhu eemaldamiseks materjali küllastamise ajal, mis võimaldab vajadusel kasutada vaakumit. Hiljem lisati drenmati uurimiseks ka silindri küljele 1" kraan, mille väljumistee on silindri sisepinnal kaetud filterkangaga. Permeameetri katsesilinder on kujutatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Vertikaalse permeameetri silinder [autori foto]

Tagamaks uue seadme vastupidavus otsustati ehituseks kasutada roostevaba terast ja oluliselt suurendada ka seadme mõõtmeid (Mihhailenko seadme läbimõõt oli 300 mm, uue seadme läbimõõt 400 mm), mis võimaldaks katsetada varasemast veelgi suuremaid osakesi sisaldavaid materjale. Uue seadme kõrguseks on 500 mm. Seadme põhiosa ehk katsesilinder valmis Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi ning OÜ Steelmet koostöös. Silinder mahutab olenevalt materjali omadustest 80...110 kg katsematerjali.

Katsesilindri sees asub distantrsõngas, mis istub täpselt silindri alumise osa sisse ja selle ülesandeks on hoida materjali ja seadme põhja vahel vee liikumiseks vajalikku vahet. . Distantrsõnga peal asub ümmarguste 3 mm avadega perforeeritud sõel. Sõela ja distantrsõnga kogupaksus on 10 mm. Sõela peale asetatakse enne katsematerjali lisamist filterkangas, mis väldib peenosiste väljauhtumist katsetamise ja materjali veega küllastamise ajal. Arvestades, et ka silindri ülemisse otsa, katses kasutatava materjali ja kaane peaks jääma vähemalt 10 mm paksune vaba osa, on silindri sisse võimalik maksimaalselt tihendada kuni 480 mm paksune materjali kiht. Silinder toetub spetsiaalse nelja jalaga aluse peale, mis võimaldab altpoolt ligipääsu toruliitmikule silindri põhja küljes.

Katsesilindri sisepind vooderdati 10 mm paksuse pehme pvc-materjalist matiga, et vältida materjali ja seina vahelt vee läbi voolamise ohtu. Pärast seda on silindri läbimõõt 380 mm.

Vee juhtimiseks läbi katsesilindri kasutatakse M.Mihhailenko poolt kasutatud ja M. Lilleste ja S.K Saariku poolt täiendatud veemahuti eeskujul ehitatud uut veemahutit, mille konstrueeris käesoleva töö autor, lisades mõned omapoolsed täiendused:

- Loobuti keermelatiga statiivi kasutamisest väljavoolu voolikul. Nii mahutis oleva vee taseme jälgimiseks vajalik piesomeeter kui ka väljavoolu voolik kinnituvad paralleelselt spetsiaalsete klambrite abil niiskuskindlast vineerist alusplaadi külge. Selline paigutus võimaldab hõlpsasti muuta väljavoolu vooliku kõrgust ja samaaegselt mõõta ka hüdraulilise gradiendi arvutamiseks vajalikku kõrguse erinevust, asetades mõõtejoonlaua piesomeetri ja vooliku vahele (joonis 2.3).
- Veemahutisse trassist sisse tulev vesi suunati vooliku abil mahuti põhja, et vähendada vee aereerumist.
- Lisati täiendav kraan trassist tuleva vee hulga reguleerimiseks, mis võimaldab peale jooksvat veekogust mahutis operatiivselt korrigeerida ja hoida veetaset katse vältel ühtlasena.



Joonis 2.3 Hüdraulilise gradiendi muutmise [autori foto]

Veemahutil on ühtlase veetaseme hoidmiseks pidev ülevool. Veemahuti on kujutatud joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Püsiva rõhuga permeameetri veetaset hoidev mahuti [autori foto]

Komplekteeritud vertikaalne permemeeter on kujutatud joonisel 2.5.



Joonis 2.5 Vertikaalne püsiva rõhuga permeameeter [autori foto]

### 2.2.1.2 Horisontaalne püsiva rõhuga permeameeter

Seadme konstrueerimisel võeti eeskujuks brittide juhendis HA 41/17 kirjeldatud kastpermeameeter. Tagamaks seadme vastupidavus otsustati valmistamiseks kasutada 3 mm paksust roostevaba terast ja seadme mõõtmed valiti sellised, et saaks katsetada ka suuremaid kui 4 mm osakesi sisaldavaid materjale. Seadme kõrguseks on 350 mm ja laiuks on 350 mm ning pikkuseks 800mm. Seadme põhiosa ehk katsekast valmis Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi ning OÜ Steelmet koostöös.

Kasti kummaski otsas on 1" kuulkraaniga toruliitmik voolikute ühendamiseks. Kummaski otsast 50 mm kaugusel kasti sees on siinid, millesse asetuvad perforatsioonid 3 mm avadega sõelad koos filterkangaga. Sõelte vahele jääv osa, kuhu paigutatakse katsematerjal, on 680 mm pikk. Kasti siseküljed, põhi ja kaane sisekülg vooderdati 10 mm paksuse pehme pvc-materjalist matiga, et vältida materjali ja seina vahelt vee läbi voolamise ohtu. Pärast vooderdamist on seadmesse võimalik tihendada proov mõõtmetega 330 x 335 x 680 mm. Kast mahutab olenevalt uuritavast materjalist 140...160 kg materjali. Kaas kinnitub kasti serval olevale flantsile poltidega. Flantsi ja kaane vahele paigaldatakse enne kaane sulgemist tihend. Nurkades asuvad poldid on tõsteasadega, kaane jäikust on tõstmise vajadust silmas pidades tugevdatud terasribidega. Kaane mõlema otsa lähedal on ½" kuulkraan õhu eemaldamiseks materjali veega küllastamise ajal. Permeameetri kast on kujutatud joonisel 2.6.



Joonis 2.6 Horisontaalse püsiva rõhuga permeameetri kast [autori foto]



Vee juhtimiseks läbi permeameetri kasutatakse sama veemahutit nagu vertikaalse seadme puhul.

Komplekteeritud horisontaalne permemeeter on kujutatud joonisel 2.7.



Joonis 2.7 Komplekteeritud horisontaalne püsiva rõhuga permeameeter [autori foto]

### 2.2.1.3 Tihendaja Matest

Kuna mõlema permeameetri mõõtmed on väga suured, otsustati materjalide tihendamiseks eksperimentaalses korras kasutada dünaamilise tihendamise asemel staatilise koormuse ja vibratsiooni abil tihendamist, mis jälgendab paremini ka ehitusobjektidel toimivat tihendamisprotsessi. Standartse Proctor-teimi haamri kasutamise korral oleks vajaliku tihendusenergia saavutamiseks (0,6 MJ/m<sup>3</sup> nõude täitmiseks on näiteks käesolevas töös kirjeldatud vertikaalse permeameetri tihendamisel vaja teha 690 lööki ühe materjalikihi kohta, mis viie kihi puhul teeb kokku 3450 lööki!) väga suurt füüsilist jõudu ning ajakulu oleks olnud samuti kordades suurem, kui staatilise koormuse ja vibratsiooni kombinatsiooni korral.[18]

Tihendusseadme otsingul sai esialgu pilgud pööratud ehitusseadmeid rentivate ettevõtete pole, kuid paraku ei ole hetkel turul ühtegi sobivate mõõtmetega vibrotihendajat, mis oleks permeameetrite mõõtmetega sobinud.

Valik langes laboriseadmeid tootva Itaalia ettevõtte Matest pakutavale tihendajale (joonis 2.8).



Joonis 2.8 Vibrohaamer Matest [21]

Seadmel on terasvarda küljes 150 mm ümmargune tihendustald ja varda teises otsas asub Hikoki lööktrell, mis tekitab vibratsiooni. Seadme tald on võimalik vajadusel vahetada teistsuguse läbimõõduga talla vastu. Seade kaalub u 6 kg ja seda kasutatakse peamiselt Proctor-teimi vormides materjalide tihendamiseks koos vastava rakisega Proctor-vormi jaoks.[21]

Käesoleva töö puhul eemaldati rakis ning kasutati seadme paigal hoidmiseks ja ümber paigutamiseks tihendamise ajal tööd teostava isiku füüsilist jõudu.

## **2.2.2 Katsete käik**

### **2.2.2.1 Eeltöö materjalidega**

Enne katse alustamist määratakse katsetatavale materjali Proctor-teimi teel optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus. See tuleb määrata samale fraktsioonile, mida permeameetris katsetada kavatakse. Saadud tulemuste ja permeameetri ruumala põhjal on võimalik välja arvutada vajalik materjalikogus, mis seadmesse tihendada tuleb. Eelnevalt kuivatuskapis kuivatatud materjal segatakse sobivates anumates veega, saavutamaks materjali optimaalne niiskus. Enne katsetamist peaks materjal vähemalt tund aega seisma, et vesi jõuaks materjalis ühtlaselt levida. Vahetult enne katsetamist tuleb materjal põhjalikult läbi segada. Väga kiviste ja/või kõrge peenosiste sisaldusega materjalid vajavad veega segamise järel pikemat aega, kuna neis on vee imendumine aeglasem ja ebaühtlasem. [10]

### 2.2.2.2 Materjali tihendamine ja tiheduse kontroll

Materjali tihendamiseks valiti staatilise koormuse ja vibratsiooni kombinatsiooni põhimõttel töötav tihenduseseade. Võrreldes traditsioonilisema dünaamilise tihendamisega, oli selle eeliseks kiirus ja minimaalne füüsilise jõu vajadus töö teostamisel. Kuna katsetes kasutatavate permeameetrite mõõtmised olid väga suured, oleks minimaalse erieneergia nõude täitmine (0,60 MJ/m<sup>3</sup> nõude täitmiseks kirjeldatud vertikaalse permeameetri tihendamisel standartse Proctor-käsihaamriga vaja teha 690 lööki ühe materjalikihi kohta, mis viie kihi puhul teeb kokku 3450 lööki ning kui haamer asendada raskema ja suurema langemismaaga modifitseeritud Proctor-käsihaamriga on need numbrid vastavalt 370 ja 1850) olnud füüsiliselt väga kurnav ja aeganõudev.

Samas on staatilise koormuse ja vibratsiooniga tihendamise puhul keeruline arvutada tihendamiseks vajalikku erieneegiat, sest see on iga materjali puhul erinev. Lisaks ei sobi kasutatud tihenduseseade väga kiviste materjalide tihendamiseks nagu on näha käesoleva töö kolmandas osas esitatud tulemustes.

Seega otsustati tihendamisele ja tiheduse kontrollile läheneda teisel viisil. Kõigile materjalidele, kaasa arvatud killustikele, määrati optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus Proctor-teimi abil. Vastavalt Proctor-teimi tulemustele ja permeameetrite täpselt mõõdetud siseruumaladele arvutati vajalik optimaalse niiskuse juures oleva materjali mass, mille tihendamise puhul kindlasse ruumalasse on tihendusteguriks 1,00. Kui tihendamise ajal ilmnes, et materjali mahtus arvutatud massiga võrreldes permeameetrisse vähem, oli tegu alatihenemisega. Kui materjali tuli võrreldes algse arvutatud massiga permeameetrisse lisada rohkem, oli tegemist materjali ületihenemisega. Erinevused arvutuslikust massist registreeriti tihendamise käigus.

Kuna materjale tihendati permeameetritesse kihtidena, arvutati iga kihi ruumala ja selle täitmiseks vajalik materjali mass eraldi. Kihtide piirid märgiti permeameetrite sisepindadele. Kuna vajalikku erieneegiat ei arvutatud, siis lähtuti tihendamisel just nendest märgitud piiridest. Materjalikihte tihendati kuni materjal jõudis märgitud kõrguseni või enam ei tihenenud, jõudmata märgini.

Algselt plaaniti killustike tiheduse kontrolliks kasutada Inspector seadet (joonis 2.9). Paraku selgus juba esimeste mõõtmiste käigus, et permeameetrite sisepinna vooderdamiseks kasutatud pvc-matt annab Inspectoriga mõõtmisel nii suure deformatsiooni, et seadmega ei ole võimalik üldse lugemist võtta. Lisaks pvc-matile võis oma osa olla ka vertikaalse permeameetri põhjasõelal, mis deflektomeetri löögi all paindub (seda hoolimata lisatud kontaktseibidest põhja ja sõela vahel, mis peaksid sõela paindumist vähendama).



Joonis 2.9 Permeameetrisse tihendatud killustiku tiheduse kontroll Inspectoriga [autori foto]

### **2.2.2.3 Katsetamine vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga**

Permeameetri põhi asetatakse spetsiaalsele alusele. Silindri alumise flantsi ja põhja vahele tuleb paigaldada tihend. Põhja külge kinnitatakse poltide abil permeameetri silinder. Silindri põhja asetatakse distantsrõngas ja perforeeritud sõel. Sõela ja silindri põhja vahele tuleb sõela deformeerumise vältimiseks asetada distantsrõnga paksused tugiseibid. Sõela peale asetatakse filterkangas.[7]

Seejärel asutakse permeameetrit materjaliga täitma. Materjal tihendatakse kihtide kaupa kasutades selleks sobivat tehnoloogiat. Kihtide arv valitakse katsetatava materjali järgi. Sellest sõltub ka tihendatavate kihtide individuaalne paksus mis samas ei tohiks olla paksem, kui veerand permeameetri silindri kõrgusest. Peale iga kihi tihendamist tuleks mõõta selle paksust, et veenduda materjali piisavas tihendatuses. Enne järgmise kihi lisamist tuleb eelneva kihi pealispind kobestada, vältimaks materjali kihistumist ja peenosiste koondumist kihtide kontaktpindadele.[13]

Tihendamise ajaks tuleb silinder asetada stabiilsele aluspinnale, näiteks fibo-plokkidele (joonis 2.10), et vältida põhja läbinõtkumist tihendamise ajal.[7]



Joonis 2.10. Fibo-plokkidele asetatud permeameetri silinder [autori foto]

Katsetamise ajaks võib permeameetri tagasi spetsiaalse aluse peale tõsta, kasutades selleks mootoritõstukit (joonis 2.11).



Joonis 2.11 Permeameetri silindri tõstmine alusele [autori foto]

Pärast viimase kihi tihendamist mõõdetakse ja registreeritakse pinnaseproovi kogupaksus. Tihendatud materjali ülemise serva ja permeameetri kaane vahel peaks jääma vähemalt 10 mm ruumi filterkanga, sõela ja distantsrõnga paigaldamise jaoks. Ülemise distantsrõnga ja sõela võib vajadusel asendada pestud fraktsioneeritud killustikuga (sobib näiteks fraktsioon 8-11 mm) nagu seda tehti käesolevas töös kasutatud permeameetri puhul. Samuti registreeritakse permeameetrisse tihendatud niiske materjali mass. Tihendusteguri kontrollimiseks vajalike arvutuste jaoks võetakse katse jaoks ette valmistatud materjalist niiskusproov.[13]

Kui permeameetrit ei ole võimalik koos materjaliga kaaluda, tuleks materjali mass järk-järgult registreerida vahetult selle permeameetrisse lisamise eel.

Permeameeter suletakse kaanega. Enne kaane paigaldamist tuleb veenduda silindri serva sees oleva tihendi puhtuses. Materjaliosakesed tihendi vahel võivad põhjustada lekkeid ja mõjutada katsetulemusi.

Katsetamise ajal on permeameeter spetsiaalse aluse peal. Alus võimaldab paremat ligipääsu permeameetri põhja küljes olevale liitmikule ja hõlbustab voolikute ühendamist silindri külge.

Seejärel alustatakse silindris asuva materjali küllastamist veega. Selleks ühendatakse silindri põhja külge voolik, mille kaudu on võimalik sinna juhtida vett.[13]

Mõningad autorid soovivad seda teha käsitsi ja järk-järgult, kasutades letrit ja tõstes voolikut tasapisi kõrgemale.[7]

Soovi korral võib permeameetris olevat materjali küllastada ka vaakumi abil, ühendades samaaegselt põhja külge veenõu ja kaane külge vaakumpumba vooliku. Vaakum aitab eemaldada materjali sisse jäänud võimalikke õhupesasid ja tagab ühtlasema materjali küllastumise ja täpsemad katsetulemused.[13]

Alternatiivina võib teostada mõõtmisi ka suunaga alt üles (vesi liigub silindris sama pidi nagu eespool kirjeldatud küllastamise protsessi ajal).[8]

Väljavoolu vooliku teine ots kinnitub veemahuti seina külge sealse vee taset näitava piesomeetri kõrvale ja selle kõrgust on võimalik reguleerida, muutes seeläbi hüdraulilise gradiendi väärtust.[13]

Seejärel avatakse veemahutisse trassivett juhtiva vooliku kraan, siis vee pealevoolu kraan silindrisse ja viimasena silindrist väljuva vooliku kraan. Silindrist väljuva vooliku otsa alla asetatakse veekogumisnõu. Tuleks veenduda, et voolikutes ei ole õhumulle.[13]

Enne mõõtmiste alustamist tuleb lasta veel silindrist nii kaua läbi voolata, kuni veetase mahutis on ühtlustunud ning mahuti veetaseme ja väljavoolu vooliku otsa alumise serva vaheline kaugus püsib ühtlasena.[13]

Kaalutakse kasutatavad veenõud. Veenõu väljavooluvooliku alla asetamise hetkel käivitatakse stopper. Iga erineva rõhkude erinevuse (ja sellest tuleneva erineva hüdraulilise gradiendi väärtuse) juures tuleb teostada vähemalt kolm mõõtmist, et vähendada mõõtmistäpsusest tulenevate vigade mõju lõpptulemusele. Mõõtmiste vahel

ja pärast kõrguste muutmist tuleb veel lasta vabalt mõnda aega joosta ja jätkata mõõtmist, kui on veendunud veetasemete ühtlases püsimises. Katselehel (Vt Lisa 1) registreeritakse veetasemete kõrguse erinevus mm täpsusega, mõõdetud aja pikkus sekundi täpsusega ja kaalutud vee mass 0,1 grammi täpsusega. Samuti määratakse väljavoolu vooliku all olnud veenõus oleva vee temperatuur 0,1 kraadi täpsusega, et hiljem arvutustes saaks arvesse võtta vee tihedust ja dünaamilist viskoossust.[13]

Kui võimalik, tuleks pidevalt mõõta ka veemahutis oleva vee temperatuuri ja arvutustes kasutada silindrisse siseneva ja sealt väljuva vee keskmist temperatuuri.[10]

Kõik mõõtmistel kogutavad andmed registreeritakse katselehel (Lisa 3).

Pärast soovitud arvu erineva hüdraulilise gradiendi väärtuse juures teostatud mõõtmise sooritamist ja registreerimist suletakse seadme kraanid, ühendatakse voolikud lahti ja tühjendatakse ja puhastatakse silinder materjalist. Kui võimalik, tuleks enne tühjendamist veenduda, et vesi pole erosiooni teel tekitanud materjali sisse voolukanaleid või peenosiste kogunemist sõela peale.[13]

Arvutuste tegemisel kasutatakse käesoleva töö esimeses peatükis kirjeldatud valemeid.

Tulemuste arvutamisel kasutatakse iga erineva rõhkude vahe juures sooritatud vähemalt kolme mõõtmise jooksul kogutud andmete keskmisi väärtusi. Andmete töötlemisel tuleb arvesse võtta ja eemaldada enne lõpliku filtratsioonimooduli väärtuse arvutamist mõõtmistulemused, kus voolamine on muutunud turbulentseks ja ei allu Darcy seadusele. Selleks kontrollitakse vee voolukiiruse ja hüdraulilise gradiendi lineaarset seost. Lihtsaim viis selle tegemiseks on võrrelda seost graafiku abil.[13]

Pärast tingimustele mitte vastavate andmete eemaldamist saab alles jäänud andmete põhjal välja arvutada filtratsioonimooduli väärtused K20 erineva hüdraulilise gradiendi väärtuse puhul, kasutades valemit (1.8). Lõpptulemus esitatakse arvutatud filtratsioonimoodulite keskmisena.[13]

#### **2.2.2.4 Katsetamine horisontaalse püsiva rõhuga permeameetriga**

Permeameetri kast asetatakse tugevale ja stabiilsele alusele (sobib betoonpõrand, selle puudumisel tuleks permeameetri alla asetada betoonplokk). Seejärel asetatakse koos filterkangaga omale kohale kasti sees mõlema otsa lähedal asuvate siinide vahele kinnituvad perforeeritud sõelad.[14]

Seejärel asutakse permeameetrit materjaliga täitma. Materjal tihendatakse kihtide kaupa perforatsioonid sülgede vahele jäävasse kasti ossa, kasutades selleks sobivat tehnoloogiat. Kihtide arv valitakse katsetatava materjali fraktsiooni järgi (tavaliselt 3, 4 või 5 kihti). Peale iga kihi tihendamist tuleks mõõta selle paksust, et veenduda materjali piisavas tihendatuses. Enne järgmise kihi lisamist tuleb eelneva kihi pealispind kobestada, vältimaks materjali kihistumist ja peenosiste koondumist kihtide kontaktpindadele.[14]

Permeameetri kast tuleb materjaliga täita täpselt servani (joonis 2.12), materjali ja kaane vahele ei tohi jääda vaba ruumi, kuna see juhiks vee pinnasest mööda. Seetõttu tuleks materjali alati ette valmistada mõningase varuga, et kasti saaks materjaliga täita ka ületihenemise korral.[14]



Joonis 2.12 Materjaliga täidetud horisontaalne permeameeter [autori foto]

Registreeritakse permeameetrisse tihendatud niiske materjali mass. Tihendusteguri kontrollimiseks vajalike arvutuste jaoks võetakse katse jaoks ette valmistatud materjalist niiskusproov.[14]

Kui permeameetrit ei ole võimalik koos materjaliga kaaluda, tuleks materjali mass järkjärgult registreerida vahetult selle permeameetrisse lisamise eel.

Seejärel alustatakse kastis asuva materjali küllastamist veega. Selleks ühendatakse kasti ühe otsa külge voolik, mille kaudu on võimalik sinna juhtida vett, kõige otstarbekam on seda teha veemahuti abil, ühendades vooliku selle külge ja reguleerida vee liikumist silindrisse kuulkraani abil, jälgides, et vee vool pinnasega täidetud kasti ei oleks liiga kiire, mis võib põhjustada materjali erosiooni ja peenosiste väljauhtumist.[14]



Kuna kastpermeameetri puhul on õhul materjalist raskem väljuda, tuleks võimaluse korral permeameetris olevat materjali küllastada vaakumi abil, ühendades kaane küljes oleva ühe (kaane kummaski otsas on üks) õhueemalduskraaniga vaakumpumba vooliku. Teine kaane õhukraan peaks olema samal ajal suletud. Vesi juhitakse kasti sisse vastasotsas asuva ühenduse kaudu. Vaakum aitab eemaldada materjali sisse jäänud võimalikke õhupesasid ja tagab ühtlasema materjali küllastumise ja täpsemad katsetulemused.[14]

Kui avatud õhueemalduskraanist hakkab tulema vett, see suletakse. Vajadusel kontrollitakse teise kaanes oleva kraani abil, ega seadmesse pole jäänud õhku. Kasti teise otsa külge ühendatakse väljavoolu voolik, mille teine ots kinnitub veemahuti seinale külge seal paikneva veetaseme näitava piesomeetri kõrvale ja selle kõrgust on võimalik reguleerida, muutes seeläbi hüdraulilise gradiendi väärtust.[14]

Seejärel avatakse veemahutisse trassivett juhtiva vooliku kraan, siis vee pealevoolu kraan kasti ja viimasena kastist väljuva vooliku kraan. Kastist väljuva vooliku otsa alla asetatakse veekogumiskoorm. Enne mõõtmiste alustamist tuleb lasta veel silindrist nii kaua läbi voolata, kuni veetaseme mahuti on ühtlustunud ning mahuti veetaseme ja väljavoolu vooliku otsa alumise serva vaheline kaugus püsib ühtlasena.[14]

Katses kasutatavad veenõud kaalutakse. Veenõu väljavooluvooliku alla asetamise hetkel käivitatakse stopper. Iga erineva rõhkude erinevuse (ja sellest tuleneva erineva hüdraulilise gradiendi väärtuse) juures tuleb teostada vähemalt kolm mõõtmist, et vähendada mõõtmistäpsusest tulenevate vigade mõju lõpptulemusele. Mõõtmiste vahel ja pärast kõrguste muutmist tuleb veel lasta vabalt mõnda aega joosta ja jätkata mõõtmist, kui on veendunud veetasemete ühtlases püsimises. Katselehel registreeritakse veetasemete kõrguse erinevus mm täpsusega, mõõdetud aja pikkus sekundi täpsusega ja kaalutud vee mass 0,1 grammi täpsusega. Samuti määratakse väljavoolu vooliku all olnud veenõus oleva vee temperatuur 0,1 kraadi täpsusega, et hiljem arvutustes saaks arvesse võtta vee tihedust ja dünaamilist viskoossust.[14]

Kui võimalik, tuleks pidevalt mõõta ka veemahutis oleva vee temperatuuri ja arvutustes kasutada kasti siseneva ja sealt väljuva vee keskmist temperatuuri.[10]

Kõik mõõtmistel kogutavad andmed registreeritakse katselehel (Lisa 3).

Pärast soovitud arvu erineva hüdraulilise gradiendi väärtuse juures teostatud mõõtmise sooritamist ja registreerimist suletakse seadme kraanid, ühendatakse voolikud lahti ja tühjendatakse ja puhastatakse permeameeter materjalist. Kui võimalik, tuleks enne

tühjendamist veenduda, ega vesi pole erosiooni teel tekitanud materjali sisse voolukanaleid või peenosiste kogunemist perforeeritud sõelte juurde.[14]

Kuna seadme põhi ei ole eemaldatav, tuleb materjal eemaldada väga ettevaatlikult, kasutades selleks kühvlit. Vajadusel saab seadme keerata tühjendamise ajaks küliliasendisse.

Arvutuste tegemisel kasutatakse käesoleva töö esimeses peatükis kirjeldatud valemeid.

Tulemuste arvutamisel kasutatakse iga erineva rõhkude vahe juures sooritatud vähemalt kolme mõõtmise jooksul kogutud andmete keskmisi väärtusi. Andmete töötlemisel tuleb arvesse võtta ja tuvastada mõõtmistulemused, kus ei ole täidetud Darcy seaduse tingimus. Koostatakse graafik, mis näitab vee voolukiiruse ja hüdraulilise gradiendi seost. Graafiku lineaarse osa (kus kehtib Darcy seadus) tõus ongi filtratsioonimoodul  $K_{20}$ . Juhend HA 41/17 soovib graafikule kantud punktidest tõmmata läbi „parima võimaliku“ sirge. Käesolevas töös kasutati graafilisel teel filtratsioonimooduli määramiseks programmi MS Excel graafiku Trendline funktsiooni, mis kuvab ka graafiku aluseks oleva võrrandi.[14]

#### **2.2.2.5 EVS 901-20:2013**

Kuna töö eesmärgiks oli võrrelda permeameetritega saadud tulemusi hetkel kehtivate juhenditega, määrati liivale ja kruusadel ka filtratsioonimoodul  $K_{10}$  vastavalt rahvuslikule standardile EVS 901-20:2013.

Filtratsioonimooduli määramise katsele eelneb optimaalse niiskuse ja maksimaalse kuivtiheduse määramine Proctor-teimiga, mis viiakse läbi materjali 0-4 mm fraktsiooniga osale vastavalt standardile EVS-EN 13286-2:2010 [22]

Katse läbiviimiseks läheb tarvis filtratsioonimooduli määramise katseseadet (Sojuzdornii langeva rõhuga permeameeter) ja tihendushaamrit ning ämbrit või muud sarnast anumad proovide veega küllastumiseks. Filtratsioonimooduli katseseadmeid ehk filtratsioonitorusid on vaja ühe katse tarvis vähemalt 3, kuna katse viiakse läbi kolmele osaproovile. Torude mahud tuleb enne katsetamist mõõtmise teel kindlaks määrata (arvutatakse läbimõõdu ja kõrguse abil).[22]

Materjal sõelutakse 4 mm ruutavaga katsesõela abil ning võetakse sõelutud materjalist piisav kogus kolme katse jaoks.[15]

Pärast Proctor-teimiga fraktsioonile 0-4 mm optimaalse niiskuse ja maksimaalse kuivtiheduse määramist segatakse materjalist kolm osaproovi piisava koguse veega, et viia need Proctor-teimiga määratud niiskuse juurde ning lastakse proovidel vähemalt pool tundi õhukindlalt seista. Seejärel täidetakse katseseadmed materjaliga, tihendades seda kolmes kihis kasutades spetsiaalset tihendushaamrit. Igale kihile sooritatakse 40 lööki. Iga kord, enne uue kihi lisamist kobestatakse eelnevat kihti 1-2 mm sügavuselt, et vältida peenosiste kogunemist kihtide puutepindadele. Tihendamise eesmärgiks on tihendada seadmesse 100 mm paksune materjalikiht. Katseseadme ülaserva ja materjali vaheline kaugus mõõdetakse millimeetri täpsusega, selle põhjal saab arvutada materjali täpse kõrguse silindris. Registreeritakse torusse tihendatud materjali kaal ja materjali ülejäägist võetakse niiskusproov. Protseduur kordub kõigi osaproovide puhul. Tihendatud materjaliga täidetud katseseadmed asetatakse veeämbrisse, kus katseproovid küllastuvad veega.[15]

Veetase ämbris peab ulatuma üle tihendatud materjali pealispinna, kuid mitte üle filtratsioonitoru serva. Veega küllastunud filtratsioonitorud (vesi on kerkinud materjali pinnale) asetatakse kas veealusele või veeanumasse. Kõrget veeanumat (gradient 1) kasutatakse hästifiltreeruvate materjalide katsetamisel, madalat veealust (gradient 2) pigem aeglase läbijooksuga materjalide puhul. Veeanuma kõrgus anumasse asetatud filtratsioonitoru piesomeetri ülemise mõõtjoone ja anuma serva kõrguste vahel mõõdetakse (tavaliselt on see 100 mm). Madala veealuse kõrgus oleneb filtratsioonitoru taldmiku paksusest, anuma serv peab olema sama kõrge, kui on taldmiku ülemine serv.[15]

Seadme taldmiku alla ei tohi jääda õhku. Filtratsioonitoru täidetakse veega kuni veetase jõuab üle seadme küljes oleva piesomeetri ülemise mõõtejoone. Aja mõõtmist alustatakse, kui veetase on mõõtejoone kohal. Registreeritakse aeg, mis kulub veetaseme langemiseks 5 cm või 3 cm võrra. Aega mõõdetakse kaks korda, sama tehakse ka teiste osaproovidega. Mõõdetakse ja registreeritakse katses kasutatava vee temperatuur.[15]

Katsetulemus  $K_{10}$  arvutatakse käesoleva töö esimeses peatükis kirjeldatud valemi 1.18 järgi.

### 3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis on esitatud peatükis 2 kirjeldatud materjalidega teostatud katete tulemused ja katsetulemuste analüüs.

Liivale ja kruusadele määrati filtratsioonimoodulid nii vertikaalse kui horisontaalse permeameetriga ning ka EVS 901-20 standardi järgi. Killustike puhul piirduti filtratsioonimooduli puhul ainult vertikaalse permeameetri katsetega, kuna killustikud ei tihenenud piisava tihendustegurini. Kõikidele materjalidele määrati terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus.

Erinevate permeameetrite filtratsioonimoodulite tulemuste võrreldavuse huvides on horisontaalse permeameetri katsetulemuste puhul välja toodud kaks erinevat tulemust – üks on arvatud erinevate gradientide juures saadud mõõtmiste keskmisena (arvutamisel kasutatakse vaid Darcy seaduse tingimustele vastavaid mõõtmisi) ja teine on graafikult loetud sirge tõusu järgi (nagu näeb ette HA 41/17).

#### 3.1 Terastikuline koostis ja Proctor-teim

Tabelis 2.1 on esitatud kõigi katsetatud materjalide terastikulised koostised ja peenosiste sisaldus (0,063 mm sõela läbind), mis määrati vastavalt EVS-EN 933-1:2012 katsestandardile.

Tabel 3.1 Materjalide terastikulised koostised

Sõel mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3	8	12,5	16	20	31,5	40	63	80
Materjal	Läbind, %															
Lood. liiv	0,5	1	8	60	88	96	98	99	99	100	100	100	100	100	100	100
Lood. kruus	1,1	2	6	28	37	40	44	47	50	55	60	65	74	80	88	100
Purust. kruus	2,1	3	8	24	34	39	43	49	53	64	72	82	99	100	100	100
Killustik 16/31,5	0,6	1	1	1	1	1	1	1	1	3	13	40	55	96	100	100
Killustik 4/31,5	1,1	1	1	1	1	2	3	15	25	42	52	61	100	100	100	100
Killustik 0/31,5	5,4	7	9	13	17	25	35	43	49	62	68	73	98	100	100	100

Tabelis 3.2 on esitatud kõigi katsetatud materjalide Proctor-teimi tulemused.

Tabel 3.2 Materjalide optimaalne niiskus ja maksimaalne tihedus

<b>Materjal</b>	<b>Katsefraktsioon, mm</b>	<b>Optimaalne niiskus, %</b>	<b>Maksimaalne tihedus, Mg/m<sup>3</sup></b>
Looduslik liiv	0/16	15,3	1,68
	0/4	15,0	1,68
Looduslik kruus	0/31,5	6,9	1,99
	0/4	12,4	1,72
Purustatud kruus	0/31,5	5,9	2,17
	0/4	11,0	1,80
Killustik 16/31,5	0/31,5	1,7	1,61
Killustik 4/31,5	0/31,5	2,0	1,71
Killustik 0/31,5	0/31,5	4,5	2,04

## 3.2 Katsed permeameetritega

### 3.2.1 Looduslik liiv

Loodusliku liiva peenosiste sisaldus oli 0,5% ja materjal sisaldas kuni 12,5 mm osakesi. Liiva optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0/16 oli 15,3% ja maksimaalne kuivtihedus 1,68 Mg/m<sup>3</sup>.

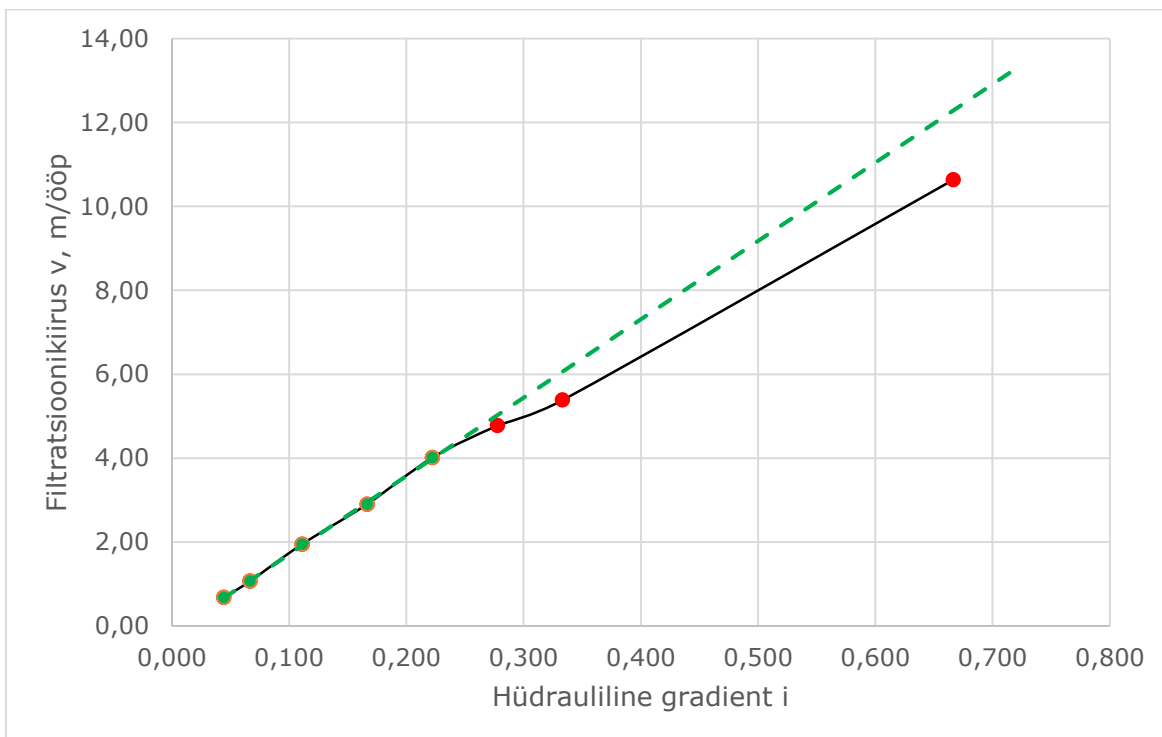
Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 1,00 (tabel 3.3).

Tabel 3.3 Loodusliku liiva tihendamise kokkuvõtte vertikaalseadmes

<b>Määratud omadus</b>	<b>Tulemus</b>	<b>Ühik</b>
Optimaalne niiskus	15,3	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,68	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	15,2	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,68	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	1,00	-

Liivale teostati vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja kaheksa erineva hüdraulilise gradiendi juures. Iga hüdraulilise gradiendi puhul teostati neli mõõtmist ja tulemuste arvutamiseks kasutati mõõtmiste keskmisi väärtusi. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust andmete analüüsimisel graafiku abil (joonis 3.1). Sirge on genereeritud MS Exceli funktsiooni *Trendline* abil. Siin ja edaspidi on selguse huvides graafikul filtratsioonikiirus  $v$  esitatud m/ööp, kuna

m/s väärtused oleksid oma väikse väärtuse tõttu raskemad hoomata. Graafiku kuju sellest ei muutu.



Joonis 3.1 Loodusliku liiva katsetulemuste graafiline kujutis vertikaalseadme puhul Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentne voolamine

Filtratsioonimooduli väärtus  $K_{20}$  (ja  $K_{10}$ ) arvutati viie mõõtmise põhjal (tabel 3.4). Välja jäeti turbulentse voolamise tunnustega tulemused (tabelis märgitud punasega).

Tabel 3.4 Loodusliku liiva filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

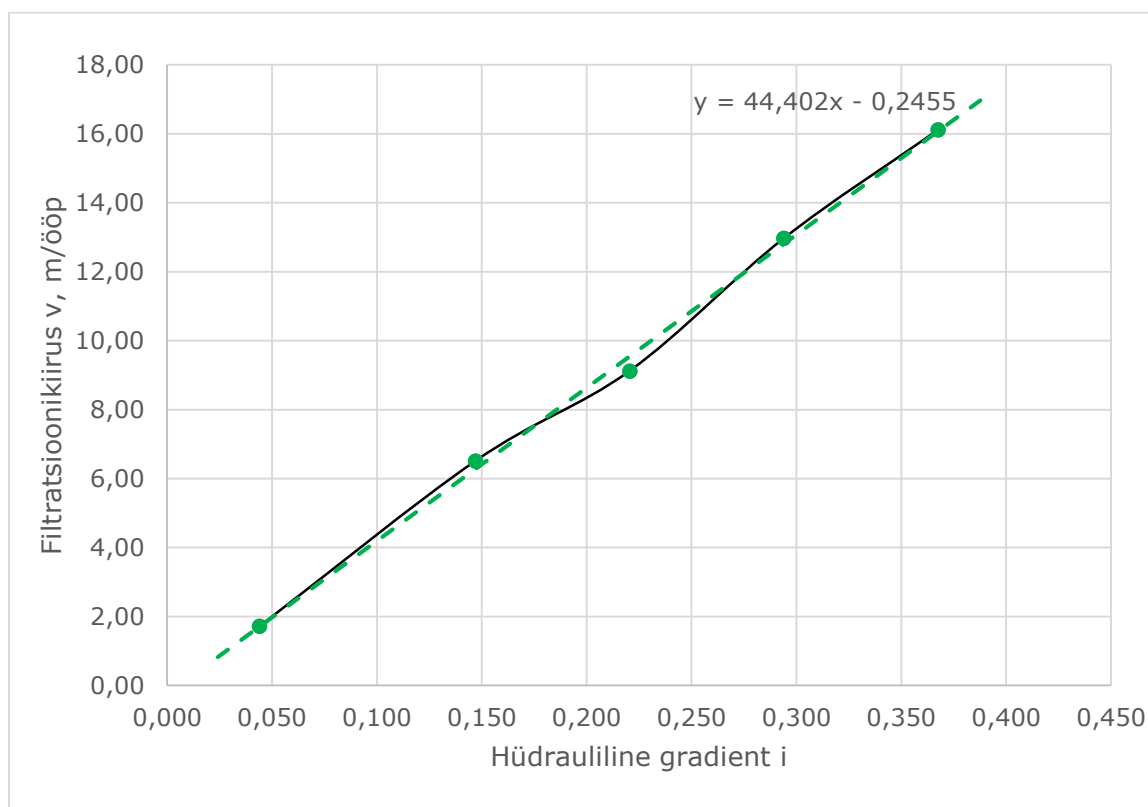
Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$
20	15,9	12,2
30	16,6	12,8
50	18,3	14,0
75	18,1	13,9
100	18,7	14,4
125	17,8	13,7
150	17,0	13,0
300	18,5	14,3
<b>KESKMINE</b>	<b>17,5</b>	<b>13,5</b>

Horisontaalses permeameetris saavutati tihendustegur 1,00 (tabel 3.5).

Tabel 3.5 Loodusliku liiva tihendamise kokkuvõte horisontaalseadmes

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	15,3	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,68	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	15,3	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,68	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	1,00	-

Liivale teostati horisontaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja viie erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust ja võeti filtratsioonimooduli  $K_{20}$  väärtuseks lineaarse sirge tõus graafikult (sirge on genereeritud MS Exceli funktsiooni *Trendline* abil) (joonis 3.2). Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  ka viie mõõtmise keskmise tulemusena (tabel 3.6).



Joonis 3.2 Loodusliku liiva katsetulemuste graafiline kujutis horisontaalseadme puhul

Tabel 3.6 Loodusliku liiva filtratsioonimoodulid horisontaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, Arvutuslik, m/ööp		Filtratsioonimoodul graafiku tõusu järgi, m/ööp	
	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>
30	38,9	29,9	<b>44,4</b>	<b>34,1</b>
100	44,3	34,0		
150	41,4	31,8		
200	44,1	33,9		
250	43,8	33,7		
<b>KESKMINE</b>	<b>42,5</b>	<b>32,7</b>		

Horisontaalse seadme puhul turbulentset voolamist ei tuvastatud, kerge lainetus graafiku joones on tõenäoliselt tingitud mõõtmistäpsusest.

Horisontaalses seadmes mõõdetud filtratsioonimooduli ülisuur väärtus võis olla tingitud vee liikumisest proovist mööda või mõnel muul seadmest tuleneval põhjusel ja sellele tuleks suhtuda teatavate reservatsioonidega.

Tabelist 3.6 on samuti näha, et arvutusliku ja graafilise analüüsi puhul tuleb filtratsioonimooduli väärtus veidi erinev, mis võib samas ka viidata MS Exceli funktsiooni *Trendline* sobimatusele selle määramisel.

Liiva fraktsioonile 0-4 mm määratud optimaalne niiskus oli 15,0% ja maksimaalne kuivtihedus 1,68 Mg/m<sup>3</sup>. Fraktsioonile 0-4 mm määrati filtratsioonimoodul EVS 901-20:2013 järgi (tabel 3.7).

Tabel 3.7 loodusliku liiva filtratsioonimoodul EVS901-20:2013 järgi

K <sub>10</sub> , m/ööp	Keskmine kuivtihedus, Mg/m <sup>3</sup>	Tihendustegur
<b>8,6</b>	1,75	1,04

Katse käigus tekkis tugev materjali ületihenemine, mida ei õnnestunud vältida ka kordusmääramistel.

### 3.2.2 Looduslik kruus

Loodusliku kruusa peenosiste sisaldus oli 1,1% ja materjal sisaldas kuni 100 mm osakesi. Loodusliku kruusa optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0/31,5 oli 6,9% ja maksimaalne kuivtihedus 1,99 Mg/m<sup>3</sup>.

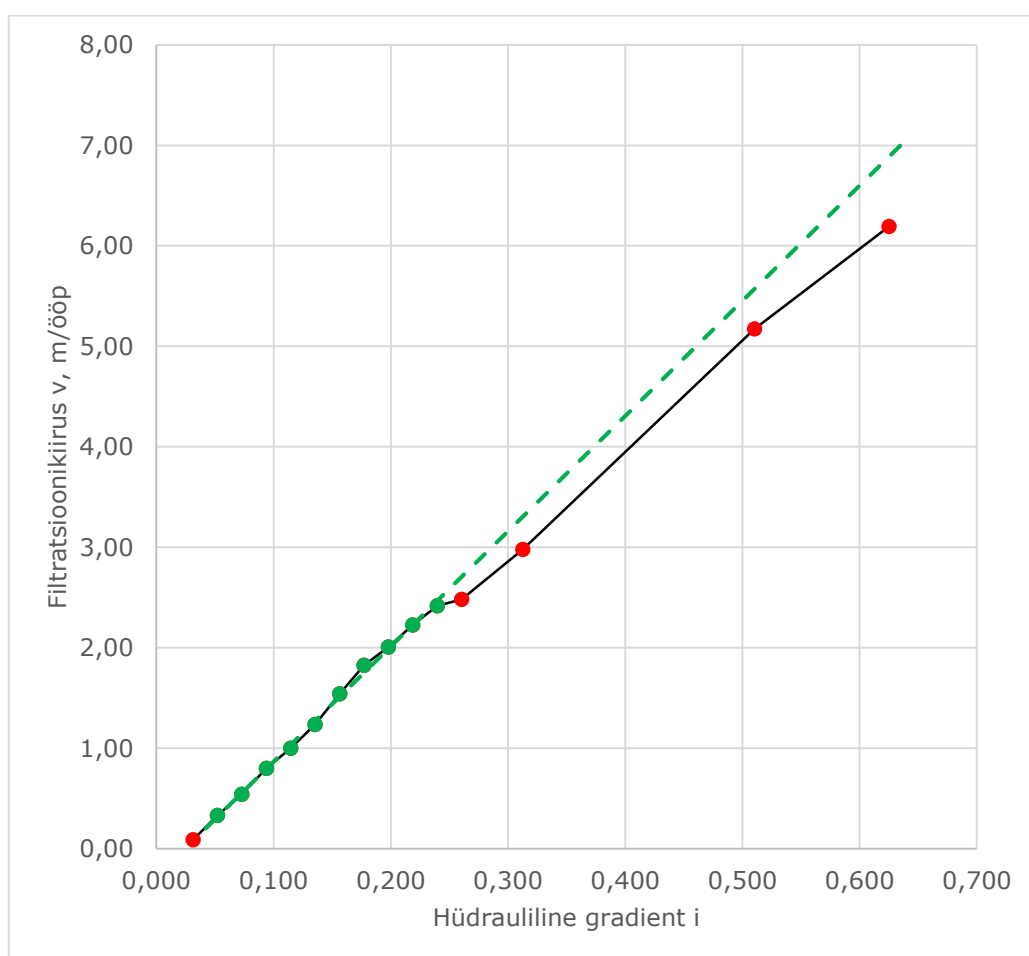
Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 0,94 (tabel 3.8).



Tabel 3.8 Loodusliku kruusa tihendamise kokkuvõte vertikaalseadmes

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	6,9	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,99	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	6,7	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,87	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	0,94	-

Looduslikule kruusale teostati vertikaalse püsiva rõhuga permameetriga mõõtmised ühe prooviga ja viieteistkümne erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust (joonis 3.3).



Joonis 3.3 Loodusliku kruusa katsetulemuste graafiline kujutis vertikaalseadme puhul. Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentne voolamine ja üks tulemus mis erines ülejäänud mõõtmistest kordades

Keskmine filtratsioonimoodul  $K_{20}$  (ja  $K_{10}$ ) arvutati kümne mõõtmise põhjal. Välja jäeti turbulentsse voolamise tunnustega 4 tulemust ja 1 teistest kordades erinev tulemus, mis tõenäoliselt tulenes mõõtmiseveast (tabelis 3.9 märgitud punasega).

Tabel 3.9 Loodusliku kruusa filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

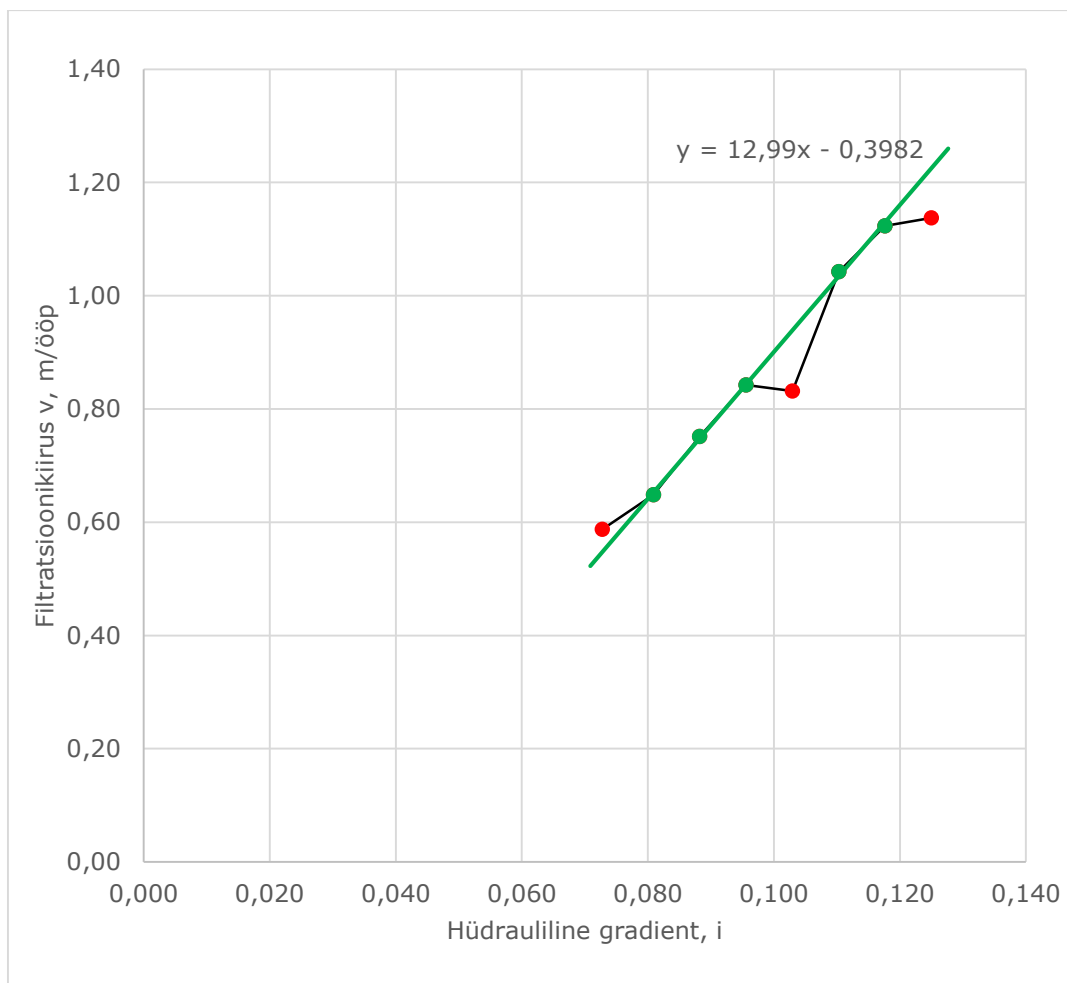
Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>
15	3,0	2,3
25	6,6	5,1
35	7,8	6,0
45	8,9	6,9
55	9,1	7,0
65	9,4	7,2
75	10,1	7,7
85	10,5	8,1
95	10,7	8,2
105	10,8	8,3
115	10,8	8,3
125	10,2	7,9
150	10,3	7,9
245	11,2	8,6
300	11,2	8,6
<b>KESKMINE</b>	<b>9,5</b>	<b>7,3</b>

Horisontaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 1,00 (tabel 3.10).

Tabel 3.10 Loodusliku kruusa tihendamise kokkuvõtte horisontaalseadmes

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	6,9	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,99	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	6,9	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,99	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	1,00	-

Looduslikule kruusale teostati horisontaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja kaheksa erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust ja võeti filtratsioonimooduli K<sub>20</sub> väärtuseks lineaarse sirge tõus graafikult (joonis 3.4).



Joonis 3.4 Loodusliku kruusa katsetulemuste graafiline kujutis horisontaalseadme puhul. Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentsne voolamine ja kaks mõõtmisveast tulenevat anomaaliat.

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  viie mõõtmise keskmise tulemusena (kõrvale jäeti tabelis 3.11 punasega märgitud tulemused).

Tabel 3.11 Loodusliku kruusa filtratsioonimoodulid horisontaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, arvutuslik, m/ööp		Filtratsioonimoodul graafiku tõusu järgi, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$	$K_{20}$	$K_{10}$
49,5	8,1	6,2	13,0	10,0
55	8,0	6,2		
60	8,5	6,5		
65	8,8	6,8		
70	8,1	6,2		
75	9,4	7,3		
80	9,5	7,3		
85	9,1	7,0		
<b>KESKMINE</b>	<b>8,7</b>	<b>6,7</b>		

Loodusliku kruusa fraktsioonile 0-4 mm määratud optimaalne niiskus oli 12,4% ja maksimaalne kuivtihedus 1,72 Mg/m<sup>3</sup>. Fraktsioonile 0-4 mm määrati filtratsioonimoodul EVS 901-20:2013 järgi (tabel 3.12).

Tabel 3.12 Loodusliku kruusa filtratsioonimoodul EVS901-20:2013 järgi

<b>K<sub>10</sub>, m/ööp</b>	<b>Keskmine kuivtihedus, Mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tihendustegur</b>
<b>3,3</b>	1,77	1,03

Katse käigus tekkis tugev materjali ületihenemine, mida ei õnnestunud vältida ka kordusmääramistel.

### 3.2.3 Purustatud kruus

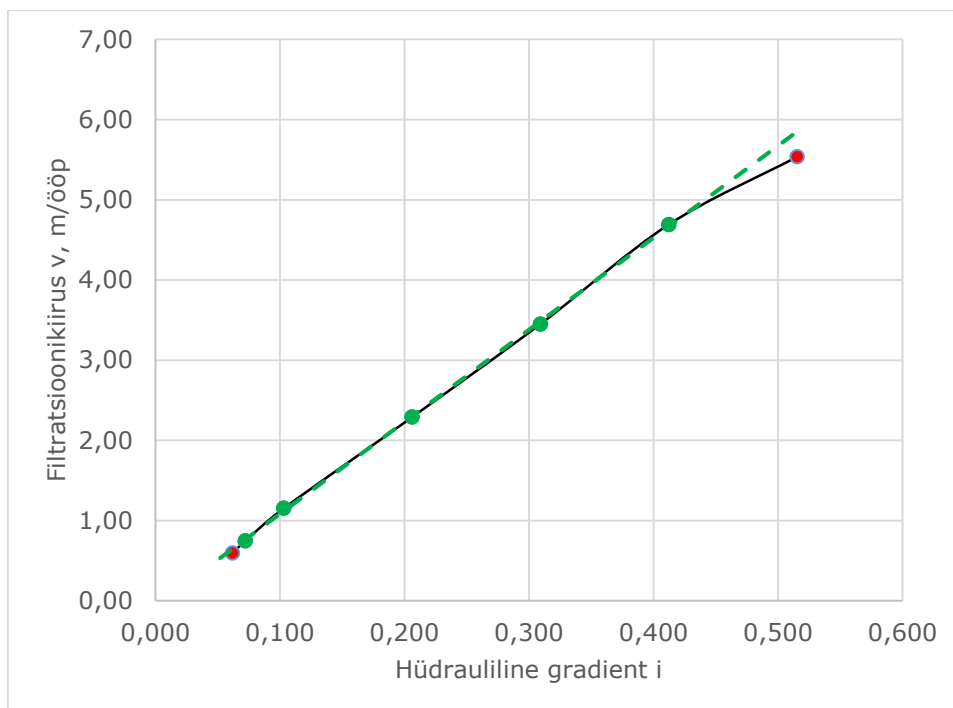
Purustatud kruusa peenosiste sisaldus oli 2,1% ja materjal sisaldas kuni 40 mm osakesi. Purustatud kruusa optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0-31,5 mm oli 5,9% ja maksimaalne kuivtihedus 2,17 Mg/m<sup>3</sup>.

Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 0,93 (tabel 3.13).

Tabel 3.13 Purustatud kruusa tihendamise kokkuvõtte vertikaalses permeameetris

<b>Määratud omadus</b>	<b>Tulemus</b>	<b>Ühik</b>
Optimaalne niiskus	5,9	%
Maksimaalne kuivtihedus	2,17	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	5,9	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	2,01	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	0,93	-

Purustatud kruusale teostati vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja seitsme erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust (joonis 3.5).



Joonis 3.5 Purustatud kruusa katsetulemuste graafiline kujutis vertikaalseadme puhul Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentne voolamine ja üks mõõtmisveast tuleneva anomaaliaga tulemus

Filtratsioonimoodul  $K_{20}$  (ja  $K_{10}$ ) arvutati viie mõõtmise põhjal, kõrvale jäeti tabelis 3.14 punasega märgitud tulemused.

Tabel 3.14 Purustatud kruusa filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

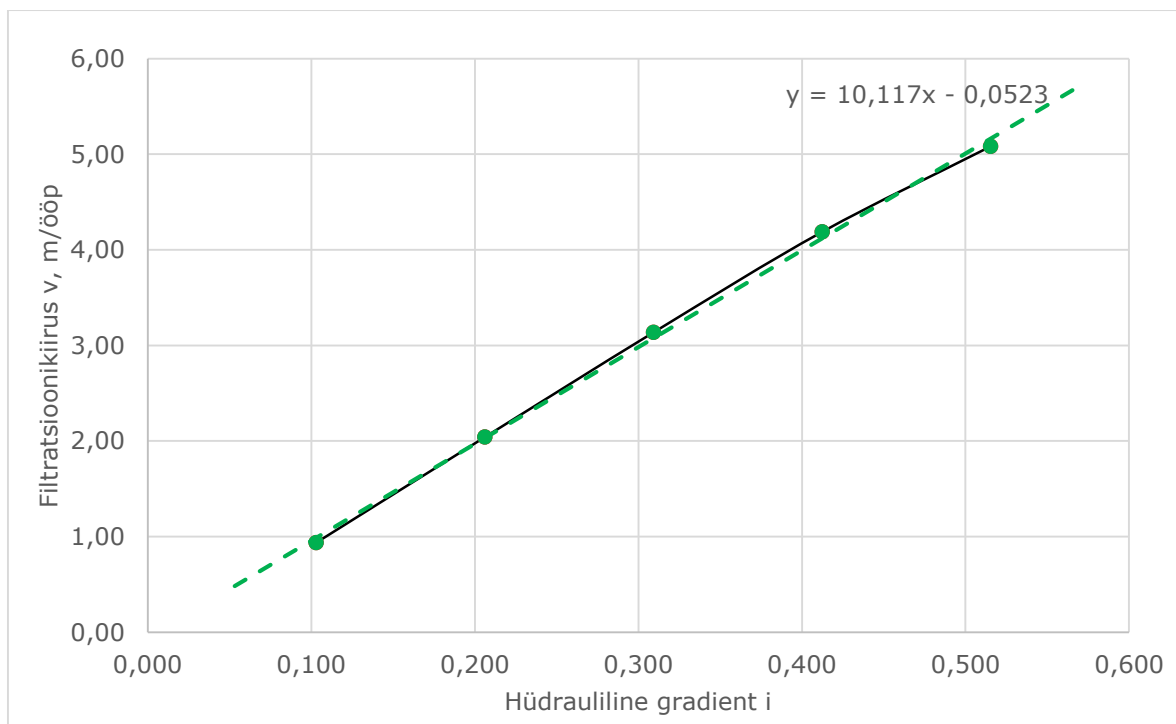
Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$
30	10,1	7,8
35	10,9	8,4
50	11,8	9,0
100	11,6	8,9
150	11,5	8,9
200	11,7	9,0
250	11,0	8,5
<b>KESKMINE</b>	<b>11,5</b>	<b>8,8</b>

Kuna eelnevalt oli ka loodusliku liiva katsetamise puhul täheldatud, et vertikaalses permeameetris mõõdetud filtratsioonimoodulid on kohati ligi kolm korda väiksemad kui sama materjaliga horisontaalses permeameetris teostatud mõõtmiste korral, otsustati vertikaalne permeameeter keerata tõstuki abiga 90° asendisse (joonis 3.6) ja teostati mõõtmised selles asendis.



Joonis 3.6 Külili ehk 90° keeratud silindriga permeameetriga kontrollmõõtmise teostamine

Arvutused tehti juhendi HA 41/17 järgi. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust ja võeti filtratsioonimooduli  $K_{20}$  väärtuseks lineaarse sirge tõus graafikult (joonis 3.7).



Joonis 3.7 Külili ehk 90° keeratud silindriga purustatud kruusale teostatud mõõtmiste graafiline kujutis

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  viie mõõtmise keskmise tulemusena (tabel 3.15).

Tabel 3.15 Purustatud kruusa filtratsioonimoodulid 90° keeratud silindriga seadmes

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, arvutuslik, m/ööp		Filtratsioonimoodul graafiku tõusu järgi, m/ööp	
	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>
50	9,1	7,0	<b>10,1</b>	<b>7,8</b>
100	9,9	7,6		
150	10,1	7,8		
200	10,2	7,8		
250	9,9	7,5		
<b>KESKMINE</b>	<b>9,8</b>	<b>7,5</b>		

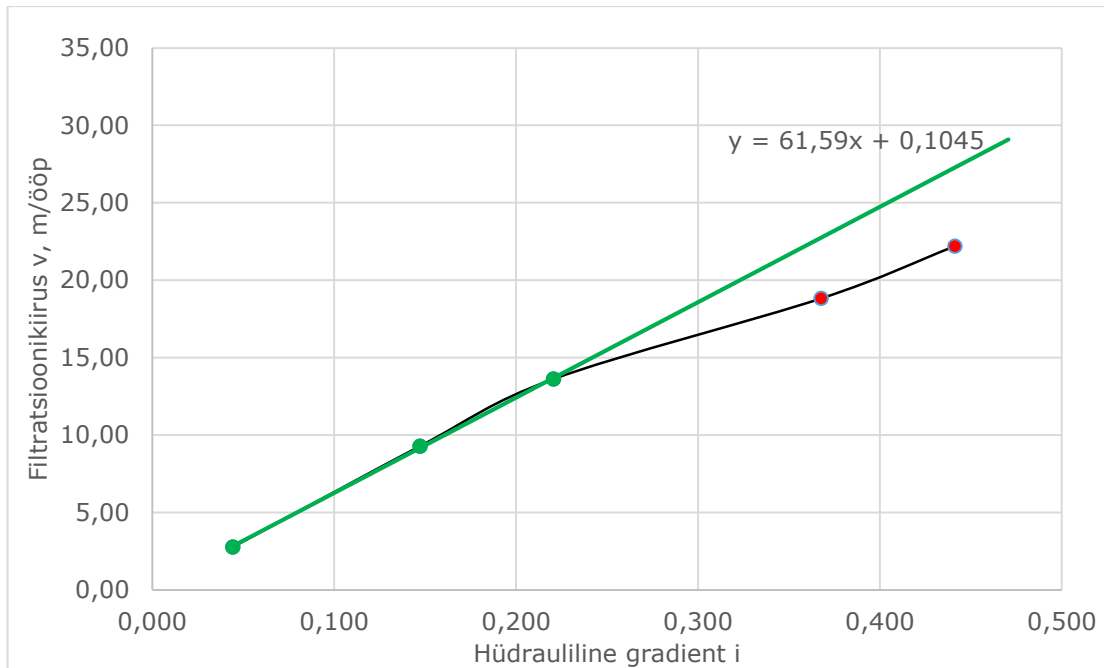
Tulemused näitavad, et permeameetri keeramine ei muutnud tulemust väga olulisel määral. Horisontaalasendis oli silindri keskmine läbijooks veidi väiksem kui vertikaalasendis.

Horisontaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 0,96 (tabel 3.16).

Tabel 3.16 Purustatud kruusa tihendamise kokkuvõtte horisontaalses permeameetris

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	5,9	%
Maksimaalne kuivtihedus	2,17	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	5,9	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	2,01	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	0,93	-

Purustatud kruusale teostati horisontaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja viie erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust ja võeti filtratsioonimooduli  $K_{20}$  väärtuseks lineaarse sirge tõus graafikult (joonis 3.8).



Joonis 3.8 Purustatud kruusa katsetulemuste graafiline kujutis horisontaalseadme puhul. Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentsne voolamine.

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  kolme mõõtmise keskmise tulemusena (kõrvale jäeti Darcy seadusele mitte allunud mõõtmiste tulemused, tabelis 3.17 on need märgitud punaselt).

Tabel 3.17 Purustatud kruusa filtratsioonimoodulid horisontaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, arvutuslik, m/ööp		Filtratsioonimoodul graafiku tõusu järgi, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$	$K_{20}$	$K_{10}$
30	62,8	48,3	<b>61,6</b>	<b>47,3</b>
100	63,1	48,5		
150	61,7	47,5		
250	51,2	39,3		
300	50,3	38,7		
<b>KESKMINE</b>	<b>62,6</b>	<b>48,1</b>		

Tulemused on analoogselt loodusliku liiva mõõtmistele võrreldes vertikaalse seadmega väga suured. Katse puhul esines väga suur tõenäosus, et vesi leidis lihtsama tee materjalist läbi või mööda ja see on ka väga suure filtratsioonimooduli väärtuse põhjuseks.



Purustatud kruusa fraktsioonile 0-4 mm määratud optimaalne niiskus oli 11,0% ja maksimaalne kuivtihedus 1,80 Mg/m<sup>3</sup>. Fraktsioonile 0-4 mm määrati filtratsioonimoodul EVS 901-20:2013 järgi (tabel 3.18).

Tabel 3.18 Purustatud kruusa filtratsioonimoodul EVS901-20:2013 järgi

<b>K<sub>10</sub>, m/ööp</b>	<b>Keskmine kuivtihedus, Mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tihendustegur</b>
<b>0,8</b>	1,87	1,04

Nagu ka eelmiste katsete puhul, tekkis tugev materjali ületihenemine, mida ei õnnestunud vältida ka kordusmääramistel.

### 3.2.4 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 16/31,5

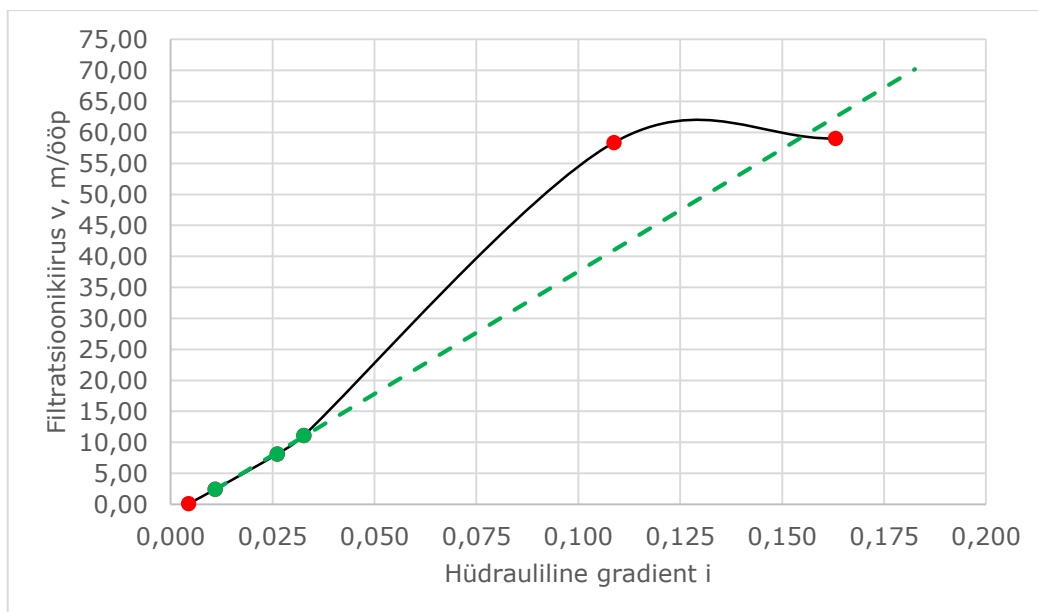
Lubjakivikillustiku fraktsiooniga 16/31,5 peenosiste sisaldus oli 0,6% ja materjal sisaldas kuni 40 mm osakesi. Killustiku optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0-31,5 mm oli 1,7% ja maksimaalne kuivtihedus 1,61 Mg/m<sup>3</sup>.

Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 0,96 (tabel 3.19).

Tabel 3.19 Killustiku 16/31,5 tihendamise kokkuvõte vertikaalses permeameetris

<b>Määratud omadus</b>	<b>Tulemus</b>	<b>Ühik</b>
Optimaalne niiskus	1,7	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,61	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	1,7	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,55	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	0,96	-

Killustikule teostati vertikaalse püsiva rõhuga permameetriga mõõtmised ühe prooviga ja kuue erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust (joonis 3.9).



Joonis 3.9 Killustiku 16/31,5 katsetulemuste graafiline kujutis vertikaalseadme puhul Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentsne voolamine ja anomaaliaga tulemus, mis tingitud ebapiisavast vee pealevoolust

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  kolme mõõtmise keskmise tulemusena (kõrvale jäeti Darcy seadusele mitte allunud mõõtmiste tulemused ja üks vee pealevoolust tingitud anomaaliaga tulemus, tabelis 3.20 on need märgitud punaselt).

Tabel 3.20 Killustiku 16/31,5 filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$
2	28,8	22,1
5	239,2	183,8
12	325,7	250,3
15	353,8	271,9
50	607,6	467,0
75	393,0	302,0
<b>KESKMINE</b>	<b>306,2</b>	<b>235,3</b>

Killustikule 16-31,5 horisontaalse permeameetriga ega EVS 901-20:2013 järgi filtratsioonimoodulit ei määratud.

### 3.2.5 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 4-31,5 mm

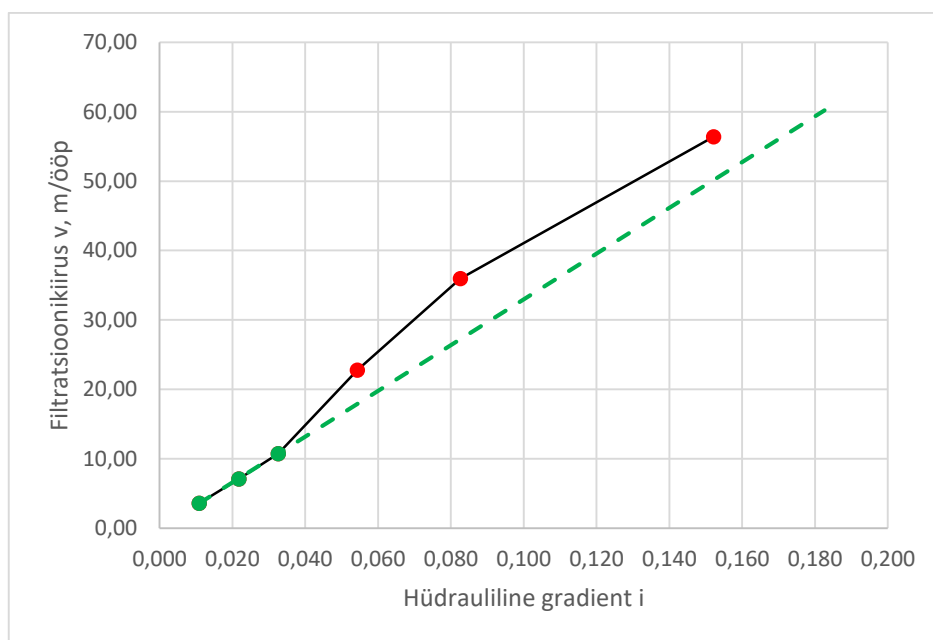
Lubjakivikillustik fraktsiooniga 4-31,5 mm saadi fraktsioneeritud killustike 4-16 ja 16-31,5 segamisel vahekorras 1:1. Saadud segu peenosiste sisaldus oli 1,1% ja materjal sisaldas kuni 31,5 mm osakesi. Killustiku optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0-31,5 mm oli 2,5% ja maksimaalne kuivtihedus 1,71Mg/m<sup>3</sup>.

Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 1,01 (tabel 3.21).

Tabel 3.21 Killustiku 16/31,5 tihendamise kokkuvõtte vertikaalses permeameetris

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	2,0	%
Maksimaalne kuivtihedus	1,71	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	2,0	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,73	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	1,01	-

Killustikule teostati vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja kuue erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust (joonis 3.10).



Joonis 3.10 Killustiku 4/31,5 katsetulemuste graafiline kujutus vertikaalseadme puhul. Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatut turbulentsset voolamist.

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  kolme mõõtmise keskmise tulemusena (kõrvale jäeti Darcy seadusele mitte allunud mõõtmiste tulemused, tabelis 3.22 on need märgitud punasega).

Tabel 3.22 Killustiku 4/31,5 filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	K <sub>20</sub>	K <sub>10</sub>
5	360,0	276,7
10	368,2	282,9
15	350,1	269,1
25	528,4	406,1
38	533,7	410,2
70	453,4	348,4
<b>KESKMINE</b>	<b>359,4</b>	<b>276,2</b>

Killustikule 4-31,5 horisontaalse permeameetriga ega EVS 901-20:2013 järgi filtratsioonimoodulit ei määratud.

### 3.2.6 Lubjakivikillustik fraktsiooniga 0-31,5 mm

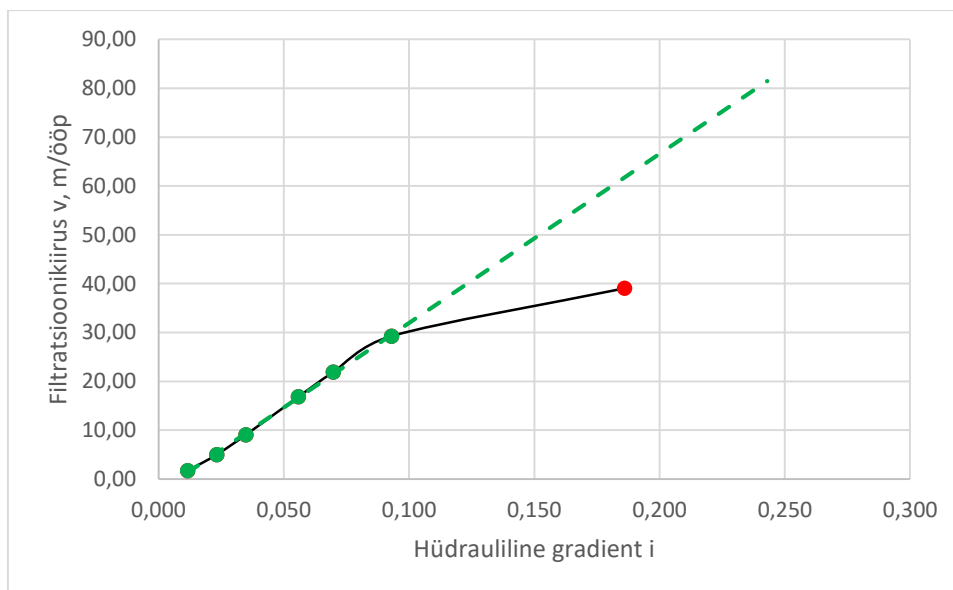
Lubjakivikillustik fraktsiooniga 0-31,5 mm saadi sõelmete fraktsiooniga 0-4 mm ning fraktsioneeritud killustike 4-16 ja 16-31,5 segamisel vahekorras 1:1:1. Saadud segu peenosiste sisaldus oli 5,4% ja materjal sisaldas kuni 31,5 mm osakesi. Killustiku optimaalne veesisaldus fraktsioonil 0-31,5 mm oli 4,5% ja maksimaalne kuivtihedus 2,04 Mg/m<sup>3</sup>.

Vertikaalses permeameetris saavutati materjali tihendustegur 0,91 (tabel 3.23).

Tabel 3.23 Killustiku 0/31,5 tihendamise kokkuvõtte vertikaalses permeameetris

Määratud omadus	Tulemus	Ühik
Optimaalne niiskus	4,5	%
Maksimaalne kuivtihedus	2,04	Mg/m <sup>3</sup>
Materjali niiskus permeameetris	4,4	%
Materjali kuivtihedus permeameetris	1,86	Mg/m <sup>3</sup>
Tihendustegur	0,91	-

Killustikule teostati vertikaalse püsiva rõhuga permeameetriga mõõtmised ühe prooviga ja seitsme erineva hüdraulilise gradiendi juures. Mõõtmistulemuste puhul analüüsiti Darcy seaduse kehtivust (joonis 3.11).



Joonis 3.11 Killustiku 4/31,5 katsetulemuste graafiline kujutis vertikaalseadme puhul Punasega on märgitud katsetulemused, mille puhul esines Darcy seadusele allumatu turbulentne voolamine

Seejärel arvutati filtratsioonimoodul  $K_{20}$  kuue mõõtmise keskmise tulemusena (kõrvale jäeti Darcy seadusele mitte allunud mõõtmiste tulemused, mis tabelis 3.24 on märgitud punasega).

Tabel 3.24 Killustiku 0/31,5 filtratsioonimoodulid vertikaalses permeameetris

Hüdraulilise gradiendi määramiseks seadmel mõõdetud veesammaste kõrguste vahe, mm	Filtratsioonimoodul, m/ööp	
	$K_{20}$	$K_{10}$
5	154,9	119,1
10	231,9	178,2
15	269,0	206,8
24	352,2	270,7
30	384,7	295,6
40	394,4	303,1
80	265,3	203,9
<b>KESKMINE</b>	<b>297,9</b>	<b>228,9</b>

Killustikusegule 0-31,5 horisontaalse permeameetriga ega EVS 901-20:2013 järgi filtratsioonimoodulit ei määratud.

### 3.3 Katsetulemuste analüüs

Käesolevas uurimistöös viidi läbi võrdlevaid katseid materjalide filtratsioonimooduli määramisel vertikaal- ja horisontaalsuunal. Põhjalike järelduste tegemiseks tuleks kindlasti läbi viia palju rohkem katseid suurema materjalide valimiga, kuid mõningaid järeldusi saab juba teha ka tehtud katsete tulemuste põhjal.

Vertikaalse permeameetriga tehtavad mõõtmised vajavad siinkohal kõige suuremat tähelepanu, kuna kohati olid katsetulemused väga kummalised, mis võis olla tingitud seadme ebaõigest toimimisest.

Edaspidiste katsete puhul tuleb ka väga suurt tähelepanu pöörata materjalide tihendamise võimalustele. Permeameetrite suured mõõtmised tingivad vajaduse leida sobiv tihendusvahend, sest Proctor-teimi käsihaamrite kasutamine ei ole nende puhul ratsionaalne. Muude alternatiivide puudumisel tuleks kaaluda uue tihenduseadme konstrueerimist spetsiaalselt nende permeameetrite täitmiseks. Samuti tuleks edaspidi määrata kõikidele katsetatavatele materjalidele tihendamiseks vajalik erienergia. Suuri osakesi sisaldavate materjalide puhul on tiheduse saavutamine palju raskem, kui peenikeste ja keskmise fraktsiooniga materjalide puhul. Käesolevas töös kasutatud tihenduseade jääb paraku jämedate materjalide puhul nõrgaks.

Hetkel tundubki tihendamine peamiseks probleemiks, mis adekvaatsete tulemuste saamist pärsib.

Samuti võib mõne proovi puhul horisontaalses permeameetris kahtlustada vee voolamist proovist mööda (vesi liikus tõenäoliselt permeameetri seina ja pinnase vahelt hoolimata kasutusele võetud abinõudest (veekindel matt mis kleebiti silikooni abil seina ja materjali vahele). Tõenäoliselt on siin oma osa ka tihendamisprobleemidel, kuna vähe tihendatud materjal on erosiooni suhtes tundlikum.

Võimalusel tuleks edaspidiste katsete puhul kaaluda võimalust määrata peale katsetamist permeameetrist välja võetavale materjalile terastikulise koostise määramist, mis võimaldaks hinnata peenosiste väljauhtumist katse käigus.

Suurt tähelepanu vajab ka küllastamise protsess. Anomaaliad vertikaalse ja horisontaalse permeameetri mõõtetulemustes sama materjali korral võivad olla tingitud ka materjali ebapiisavast küllastatusest nagu väidavad mõned uuringud. Küllastumisprobleemide puhul võivad tulemused erineda isegi 3...4 korda.[23]

Selle vastu aitaks suure tõenäosusega permeameetrite küllastamisel vaakumi kasutamine, mis eemaldab materjali pooridesse lõksu jäänud gaasimullid.[13]

### 3.3.1 Püsiva rõhuga vertikaalse permeameetriga määratud tulemused

Tabelis 3.25 on esitatud vertikaalse permeameetriga katsetatud materjalide filtratsioonimoodulid.

Tabel 3.25 Vertikaalse permeameetriga määratud katsetulemused

<b>Materjal</b>	<b>Filtratsioonimoodul <math>K_{20}</math>, m/ööp</b>	<b>Filtratsioonimoodul <math>K_{10}</math>, m/ööp</b>	<b>Tihendustegur</b>
Looduslik liiv	17,5	13,5	1,00
Looduslik kruus	9,5	7,3	0,94
Purustatud kruus	11,5	8,8	0,93
Lubjakivikillustik 16/31,5	306,2	255,3	0,96
Lubjakivikillustik 4/31,5	359,4	276,2	1,01
Lubjakivikillustik 0/31,5	297,9	228,9	0,91

Enamiku katsetatud materjalide puhul tuleks filtratsioonimooduli määramise tulemustesse suhtuda teatud reservatsioonidega, võttes arvesse permeameetri silindris saavutatud tihendustegureid.

Permeameetritega teostatavate katsete töömaht oli väga suur tingituna seadmete suurtest mõõtmetest. Seetõttu ei tehtud samale materjalile korduskatseid.

Kuna iga materjali puhul viidi mõõtmised läbi vaid ühe katseprooviga, ei ole võimalik tulemustest välja tuua korrelatsiooni filtratsioonimooduli ja materjali tihendusteguri vahel. Seose täpsemaks uurimiseks on vaja läbi viia täiendavaid katseid, korrates katseid iga materjaliga vähemalt 3 korda.

Arvestades katsete väga suurt töömahtu eeldab katsete kordamine väga suurt kogust materjali ja aega.

Purustatud kruusa puhul võis halb tihenemine olla tingitud töid teostava isiku kogenematuses tihenduseseadmega, kuna hiljem horisontaalses permeameetris tihenes sama materjal tihendustegurini 1,00.

### 3.3.2 Püsiva rõhuga horisontaalse permeameetriga määratud tulemused

Tabelis 3.26 on esitatud horisontaalse permeameetriga katsetatud materjalide filtratsioonimoodulid.

Tabel 3.26 Horisontaalse permeameetriga määratud katsetulemused

Materjal	Arvutuslik		Graafiline		Tihendus-tegur
	Filtratsioonimoodul $K_{20}$ , m/ööp	Filtratsioonimoodul $K_{10}$ , m/ööp	Filtratsioonimoodul $K_{20}$ , m/ööp	Filtratsioonimoodul $K_{10}$ , m/ööp	
Looduslik liiv	42,5	32,7	44,4	34,1	1,00
Looduslik kruus	8,7	6,7	13,0	10,0	1,00
Purustatud kruus	62,6	48,1	61,6	47,3	0,96
Lubjakivikillustik 16/31,5	Ei katsetatud				
Lubjakivikillustik 4/31,5					
Lubjakivikillustik 0/31,5					

Horisontaalses permeameetris saavutati tunduvalt paremad tihendustegurid. See võis olla tingitud asjaolust, et tihendamisel kasutatud seadme käsitsemisel olid selleks hetkeks olemas suuremad kogemused.

Filtratsioonimoodulite väärtused on liiva ja purustatud kruusa puhul üllatavalt suured. Siin võis olla põhjuseks üks või mitu tegurit, mis võisid katsetulemusi niimoodi mõjutada:

- vee liikumine proovist mööda (mööda permeameetri seinu);
- parem küllastumine veega (materjali sisse jäi vähem gaasimulle);
- materjali kihtide ebaühtlane tihenemine;
- vee lihtsam teekond läbi pinnase, kuna tihendatud kihid on vee liikumisega samas suunas ja tekitavad voolukanaleid – sellele viitab näiteks horisontaalasendisse keeratud vertikaalpermeameetriga teostatud lisakatse, kus tihendatud kihid jäid voolu suunaga risti ja horisontaalselt mõõdetud filtratsioonimoodul tuli arvutuslikult sarnane sama prooviga vertikaalselt mõõdetud filtratsioonimooduli väärtusele
- madal tihendustegur, mis aitab kaasa erosioonile (väga tõenäoline purustatud kruusa puhul) ja vee liikumisele läbi proovi mööda sinna uhutud kanaleid.



Lisaks tuleb veel ära märkida, et graafiku järgi filtratsioonimooduli lõppväärtuse määramist tuleks pigem pidada ebatäpseks (käesolevas töös kasutati MS Exceli funktsiooni „Trendline“). Briti juhend HA 41/17 mis soovitus tulemuse graafikult määramise suhtes annab, ei ole piisavalt selge, kuidas antud sirge graafikule joonistada tuleks. Seega tuleks pigem eelistada Darcy seadusele alluvate mõõtmiste keskmiste põhjal lõpptulemuse arvutamist, nagu vertikaalse seadme puhul. Lõplikus võrdluses seetõttu graafilist määrangut ei kasutatud.

### 3.3.3 EVS 901-20:2013 järgi määratud tulemused

Tabelis 3.27 on toodud katsestandardi EVS 901-20:2013 järgi määratud filtratsioonimooduli väärtused.

Tabel 3.27 EVS 901-20:2013 järgi määratud katsetulemused

<b>Materjal</b>	<b><math>K_{10}</math>, m/ööp</b>	<b>Keskmine kuivtihedus, Mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Tihendustegu r</b>
Looduslik liiv	<b>8,6</b>	1,75	1,04
Looduslik kruus	<b>3,3</b>	1,77	1,03
Purustatud kruus	<b>0,8</b>	1,87	1,04

Tabelis toodud andmetest selgus, et kõigi materjalide puhul tekis väga suur ületihenemine – see võib omakorda põhjustada materjalide halvemat veejuhtivust. Katseid korrati, kuid ühelgi juhul ei jäänud saavutatud materjali tihedus filtratsioonitorudes standardis lubatud  $\pm 0,03$  Mg/m<sup>3</sup> erinevuse sisse võrreldes proctor-teimi tulemusega. Madalamat tihendustegurit ei õnnestunud saavutada ka katsete kordamisel ning võib eeldada, et valimisse sattunud materjalide puhul on tegemist ületihenemise suhtes altime materjalidega, kui katsetatakse fraktsioone 0-4 mm.

### 3.3.4 Erinevate katsemetoodikate võrdlus

Tabelis 3.28 on toodud erinevate meetoditega samadele materjalidele määratud filtratsioonimoodulid. Võrreldavuse lihtsuse huvides on esitatud vaid filtratsioonimooduli väärtus  $K_{10}$ . Horisontaalse permeameetri puhul kasutati ainult arvutuslikku katsetulemust.

Tabel 3.28 EVS 901-20:2013 järgi määratud katsetulemused

Meetod	Vertikaalne permeameeter		Horisontaalne permeameeter		EVS 901-20:2013		
	K <sub>10</sub> , m/ööp	Tihendus tegur	K <sub>10</sub> , m/ööp	Tihendus tegur	K <sub>10</sub> , m/ööp	Keskmine kuivtihedus, Mg/m <sup>3</sup>	Tihendus tegur
Looduslik liiv	13,5	1,00	32,7	1,00	8,6	1,75	1,04
Looduslik kruus	7,3	0,94	6,7	1,00	3,3	1,77	1,03
Purustatud kruus	8,8	0,93	48,1	0,96	0,8	1,87	1,04
Lubjakivikillustik 16/31,5	255,3	0,96	ei määratud				
Lubjakivikillustik 4/31,5	276,2	1,01					
Lubjakivikillustik 0/31,5	228,9	0,91					

Otsest korrelatsiooni erinevate meetoditega mõõdetud tulemuste vahel on raske tuvastada. Peamiselt raskendab seda tihendustegurite ebaühtlus, mis raskendab filtratsioonimoodulite võrdlust. Purustatud kruusa ja loodusliku liiva katsetamisel horisontaalse permeameetriga võib eeldada vee tungimist materjalist mööda. Kuna EVS 901-20:2013 järgi teostatud katsetes tihenesid materjalid üle, võib seal saavutatud tulemused olla mõningal määral madalamad, kui need oleksid samaväärse tihendusteguri juures nagu saavutati püsiva rõhuga permeameetrites. Tõenäoline on ka see, et püsiva rõhuga permeameetritega saavutatud tulemuste ja EVS 901-20:2013 järgi saadud tulemuste erinevusi põhjustab katsetes kasutatud erinev katsefraktsioon. Üle 4 mm osa eemaldamine tõstab EVS 901-20:2013 katses peenosiste osakaalu seadme sees olevas proovis võrreldes permeameetris katsetatava fraktsiooniga ning see võib olla üheks veejuhtivust pärssivaks teguriks.

Kõige sarnasem on loodusliku kruusa puhul teostatud vertikaal- ja horisontaalmõõtmiste tulemused. Kuna vertikaalseadmes on tihendustegur madalam, on see ka tõenäoliselt veidi suurema filtratsioonimooduli saamise põhjuseks.

### 3.3.5 Tulemuste põhjal tehtud järeldused

Katsetulemuste põhjal võib järeldada, et filtratsiooni määramise võimalusi erinevate permeameetritega tuleb kindlasti edasi uurida. Katsemeetodite suurema usaldusväärsuse tagamiseks ja tõestamiseks on tarvis läbi viia täiendavaid katseid. Eriti oluline on see horisontaalse permeameetri puhul. Kui vertikaalse permeameetri katseid on juba ka enne üsna palju uuritud, siis horisontaalse permeameetri kasutamine on Eestis veel üsna tundmatu ning vajab täiendavat uurimist. Läbi viidud katsete tulemused lubavad uskuda, et pärast teatavate probleemide kõrvaldamist võiks horisontaalse filtratsiooni määramine muutuda usaldusväärseks meetodiks.

Võrreldes hetkel kehtiva standardiga EVS 901-20:2013 on suurte permeameetrite kasutamine paraku väga töö- ja ajamahukas tulenevalt seadmete suurtest mõõtmetest. Kindlasti ei saa nende seadmetega katseid sooritada samas mahus võrreldes sellega, kui palju EVS 901-20 katseid hetkel tellitakse. Kui saavutada püsiva rõhuga permeameetrite puhul suurem tulemuste usaldusväärsus, võiks esialgu kaaluda nendega läbiviidavaid katseid paralleelseks võimaluseks materjalide omaduste kontrollimisel, kuid vähendatud mahus võrreldes EVS 901-20:2013 meetodiga.

Katsetulemuste usaldusväärsuse suurendamiseks on kindlasti vaja leida lahendused mõningatele probleemidele ja täiustada katsemetoodikaid.

Vähendamaks õhu ja gaaside mõju veejuhtivusele tuleks edaspidi materjalide küllastamisel proovida rakendada vaakumit. Vaakum aitaks tagada proovide ühtlasema küllastamise ja täpsemad tulemused. Samas võib vaakum tekitada ka probleeme – liiga tugeva vaakumi korral võib see põhjustada peenosiste väljauhtumist proovist ja erosiooni, kui vesi tungib liiga kiiresti materjali sisse.

Väga suurt tähelepanu vajab materjali tihendamine püsiva rõhuga permeameetritesse. Juba varasemad sarnased uurimused on tõdenud, et kihtide kaupa tihendamine ei taga materjali ühtlast tihenemist katsevormis. Käesolevas uurimuses kasutatud seade osutus jämedamate täitematerjalide puhul üsna ebatõhusaks. Samas välistab permeameetrite suurus manuaalsete seadmete (nagu Proctor-teimi standartne või modifitseeritud haamer) kasutamise. Parema alternatiivi puudumisel tuleks kaaluda uue tihendusseadme konstrueerimist, millel on vahetatav tald ja võimalus valida töörežiime erinevate materjalide katsetamisel tulenevalt vajalikust erienergiast.

Täiendavat uurimist vajab ka tihendamise suuna mõju filtratsioonile. Vertikaalses seadmes on vesi sunnitud liikuma ristisuunas tihendatud kihtide pinnaga, mis võib peenosiste koondumisel kihtide puutepindadele mõjuda vee liikumisele pärssivalt, horisontaalses suunas liigub vesi aga paralleelselt kihtidega ja takistus on väiksem.

Horisontaalse püsiva rõhuga permeameetri puhul tuleb suuremat tähelepanu pöörata materjali kõige ülemise kihi tihendamise protseduurile. Kuna katsetamiseks on tarvis saada seadme kast servani materjali täis, tuleks kaaluda kasti täitmist hõlbustava krae lisamist seadmele – see tagaks ka kõige ülemise kihi ühtlase tihendatuse.

Materjalide valikul tuleks edaspidi kindlasti katsetada ka madala filtratsioonimooduliga täitematerjale (purustatud kruusad, saviliivad) ja kõrvutada tulemusi EVS 901-20:2013 tulemustega.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös kirjeldatakse erinevaid meetodeid katendis kasutatavate täitematerjalide veejuhtivuse uurimiseks. Peamiseks uurimissuunaks oli materjalide filtratsioonimoodulite määramise võimalused vertikaalsete ja horisontaalsete permeameetrite abil. Määramiste aluseks on Darcy seadus, mis kirjeldab vee laminaarset liikumist.

Mõõtmiste läbi viimisteks konstrueeriti Tallinna Tehnikaülikooli labori eestvedamisel kaks erinevat püsiva rõhuga permeameetrit – üks horisontaal- ja teine vertikaalsuunalise vee liikumise määramiseks.

Vertikaalse seadme konstrueerimisel võeti eeskujuna 2011. aastal Mark Mihhailenko poolt konstrueeritud ja 2012. aastal Martti Lilleste poolt täiendatud katseseadmest ning analoogsete seadmete kirjeldustest mujalt. Seadme konstrueerimisel pandi suur rõhk selle vastupidavusele ja võimalusele edaspidi uurida ka väga suuri osakesi sisaldavate materjalide (kuni 80 mm) filtreerivaid omadusi. Seadmele tehti ka mõned täiendused, mis hõlbustavad katsetamist.

Horisontaalse seadme konstrueerimisel võeti eeskujuna Briti juhendis HA 41/17 kirjeldatud permeameetrit. Seade oli uudne ning vajab veel edaspidist täiendamist nii seadme kui katsete meetodika poole pealt, et tagada tulemuste suurem usaldusväärsus. Esmased kogemused ja tähelepanekud on eeldatavasti abiks edasiste sarnaste uuringute läbiviimisel.

Paralleelselt püsiva rõhuga permeameetritega teostatud katsetega viidi samadele materjalidele läbi filtratsioonimooduli määramine EVS 901-20:2013 (alaneva rõhuga permeameeter ehk Sojuzdornii katseseade) järgi ja võrreldi saadud katsetulemusi.

Püsiva rõhuga permeameetrites saadud tulemused olid märkimisväärselt suuremad, võrreldes alaneva rõhuga permeameetriga, kuid katsete käigus erinesid materjalide tihendustegurid väga palju ning seda tuleks filtratsioonimoodulite väärtuste kõrvutamisel kindlasti arvesse võtta.

Katsete läbiviimisel tõstus väga teravalt materjalide tihendamise probleem. Permeameetrite suurte mõõtude tõttu ei ole manuaalne tihendamine teostatav. Tagamaks katsetulemuste usaldusväärsus, vajavad mõlemad püsiva rõhuga permeameetrid sobiva tihendusviisi väljatöötamist, mis tagaks nii materjali üksikkihtide kui ka üleüldise tiheduse ühtluse kogu seadmes.

Loodusliku kruusaga läbi viidud katsed lubavad eeldada, et pärast mõningast täiustamist ja täiendavat katsetamist saaks ka horisontaalse püsiva rõhuga permeameetri võtta kasutusele alternatiivse meetodina materjali veejuhtivuse uurimisel. Oma tööpõhimõtte tõttu sobib seade hästi teekatendis kasutatavate materjalide uurimiseks, kuna katendist juhitakse enamus vett välja horisontaalsuunal. Siinkohal tuleb ära märkida, et püsiva rõhuga permeameetri katseid ei saa töömahukuse tõttu kindlasti rakendada samas mahus, nagu EVS 901-20:2013 katseid.

## **SUMMARY**

### **Method for determining the vertical and horizontal permeability of aggregate using constant head permeameter**

The aim of this thesis is to study different methods of determining vertical and horizontal permeability of aggregates and soil. The main focus is on using different constant head permeameters.

The subject of permeability in different aggregates has been in the focus of many studies over the years. In road construction water is a very undesirable factor when it comes to longevity of pavements due to causing several problems including erosion, frost heaves, loss of bearing capacity and cracking of the surface layers. Such issues can be prevented by ensuring proper drainage in the pavement. The use of suitable materials has become of utmost importance in this matter. Roads are usually built as cost-effective as possible and in the light of this, knowing the properties of construction materials is a serious factor. Therefore, precise and suitable methods for determining these properties is essential.

The determination of permeability using the method described in Estonian national standard EVS 901-20:2013 has been the target of severe criticism since its implementation in 2013. The main problem is that the method only applies to the fine part of aggregates (0-4 mm) and does not include the larger particles in the test process. Therefore the accuracy of the method has been debated, but lack of a better alternative has left the method to be the most used way to determine permeability in aggregates to this day. This has rendered many of the local aggregates produced in Estonia unusable in road construction due to not meeting the requirements determined by Estonian Road Administration.

Using large-sized constant head permeameters for determination of permeability is still quite uncommon in Estonia. This is mainly due to the cost, slow process and unreliability of tests carried out with such methods.

Vertical constant head permeameters have already been researched previously on several occasions (M. Mihhailenko in 2011, M. Lilleste in 2012 and S.-K. Saarik in 2016) but horizontal constant head permeameters are relatively unknown in Estonia. In this study the process of constructing and using such device is described. The test method is loosely based on British manual HA 41/17 (published by Highways England).

Several tests with different aggregates were carried out using both vertical and horizontal constant head permeameters. For reference and comparison, the same materials were also tested using the method described in the Estonian national standard EVS 901-20:2013 (method uses falling head permeameters with small diameter). One sand, two different gravels and three types of limestone aggregate were tested.

The results obtained with constant head permeameters were significantly higher than the ones obtained using the method described in EVS 901-20:2013. This may be mainly caused by the fact that different fractions (0-4 mm versus 0-31,5 mm) of material were tested with these methods but also due to differences in compaction parameters of samples and also other factors, for example content of fines.

Several observations were made during the tests and some problems were encountered which must be resolved before carrying out any similar tests with the equipment used. The problem with material compaction arose to attention during the tests and must be addressed before continuing any research in the matter of constant head permeameters. Problems with compaction caused several issues in the measuring process and made the analysis of results difficult. Due to the large size of both permeameters, finding a new method of compaction is required, since manual compaction is not rational. Construction of a new permeameter-specific compaction device may be required in the future.

Analysis of the data collected during the tests suggests that if the problems with compaction are dealt with, more reliable data may be collected during further tests. Further tests should be carried out with a larger variety of materials. In addition a series of tests with the same device on the same material in order to estimate the repeatability and reliability of the methods should be conducted.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Valdo Jaaniso, Pinnasemehaanika, Tallinna Tehnikaülikool, 2011, 247 lk
2. Andrew Dawson, Water In Road Structures. Movement, Drainage and Effects, Springer Science+Business Media B.V, 438 lk
3. Killustikust katendikihtide ehitamise juhend, Maanteeamet, 2016, 21 lk
4. Muldkeha ja drenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhend, Maanteeamet, 2016, 35 lk
5. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend, Maanteeamet, 2017, 58 lk
6. Pavement Guide: Pavement Drainage, Virginia Asphalt Association, <https://vaasphalt.org/pavement-guide/asphalt-pavement-drainage/>  
22.05.2020
7. Mark Mihhailenko, Sidumata segude filtratsioonimooduli laboratoorsed määramisvõimalused, Tallinna Tehnikaülikool, 2011, 106 lk
8. Craig T. Simmons, Henry Darcy (1803-1858): Immortalised by his scientific legacy, Hydrogeology Journal, 2008, 17 lk  
[https://www.researchgate.net/publication/226867468\\_Henry\\_Darcy\\_1803-1858\\_Immortalised\\_by\\_his\\_scientific\\_legacy](https://www.researchgate.net/publication/226867468_Henry_Darcy_1803-1858_Immortalised_by_his_scientific_legacy)  
19.05.2020
9. Charles R. Fitts, Groundwater Science, Academic Press, 2012, 692 lk
10. Martti Lilleste, Sidumata segude filtratsioonimooduli määramine püsiva rõhuga permeameetritega, Tallinna Tehnikaülikool, 116 lk
11. Rawee Tangpithakkul, Study of permeability of pavement base materials, Ohio University, 1997, 110 lk  
[https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=ohiou1184344573&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ohiou1184344573&disposition=inline)  
22.05.2020

12. Albert Ernest Dunstan, The viscosity of liquids, RareBooksClub.com, 2012, 24 lk
13. ASTM D2434-19 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM International, 2019, 6 lk
14. DMRB Volume 4 Section 2 HA 41/17 Geotechnics and Drainage. Drainage. Permeameter for road drainage layers, Highways England, 2017, 21 lk
15. Eesti Standard EVS 901-20:2013 Tee-ehitus. Katsemeetodid. Osa 20: Filtratsioonimooduli määramine, Eesti Standardikeskus, 2013, 16 lk
16. Sven Sillamäe, Muldkehas ja dreenikihtides kasutatavate mineraalmaterjalide veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega. Lõpparuanne, Maanteeamet, 2016, 162 lk
17. Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised, Maanteeamet, 2006, 35 lk
18. Eesti Standard EVS-EN 13286-2:2010 SIDUMATA JA HÜDRAULILISELT SEOTUD SEGUD. Osa 2: Kuivtiheduse ja veesisalduse laboratoorse määramise katsemeetodid. Proctor-teim, Eesti Standardikeskus, 2010, 32 lk
19. Sten-Kristjan Saarik, Filtratsioonimooduli määramise katsestandardi EVS 901-20:2013 laboratoorsete katsete edasiarendus, Tallinna Tehnikakõrgkool, 2016
20. Doris Asmani Mat Yusof, Mohamed Halfeez Ahamed Jaheen, Static laboratory compaction method, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 16 lk  
[https://www.researchgate.net/publication/286551461\\_Static\\_laboratory\\_compaction\\_method](https://www.researchgate.net/publication/286551461_Static_laboratory_compaction_method)  
23.05.2020
21. Matesti koduleht  
<https://www.matest.com/en/asphalt/compaction/vibrating-compaction-hammer/>  
24.05.2020

22. Hardo Pajus, Labori tehniku käsiraamat, Tallinna Tehnikakõrgkool, 2016, 68 lk

23. Robert P. Chapuis, Hydraulic anisotropy of homogeneous soils and rocks: influence of densification process, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1989, 39 lk

**LISAD**

**Lisa 1 Vee dünaamiliste viskoossuste suhe [10]**

Viskoossuste suhe $\eta_t/\eta_{20}$										
°C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	1,3012	1,2976	1,2940	1,2903	1,2867	1,2831	1,2795	1,2759	1,2722	1,2686
11	1,2650	1,2615	1,2580	1,2545	1,2510	1,2476	1,2441	1,2406	1,2371	1,2336
12	1,2301	1,2268	1,2234	1,2201	1,2168	1,2135	1,2101	1,2068	1,2035	1,2001
13	1,1968	1,1936	1,1905	1,2873	1,1841	1,1810	1,1777	1,1746	1,1714	1,1683
14	1,1651	1,1621	1,1590	1,1560	1,1529	1,1499	1,1469	1,1438	1,1408	1,1377
15	1,1347	1,1318	1,1289	1,1260	1,1231	1,1202	1,1172	1,1143	1,1114	1,1085
16	1,1056	1,1028	1,0999	1,0971	1,0943	1,0915	1,0887	1,0859	1,0803	1,0802
17	1,0774	1,0747	1,0720	1,0693	1,0667	1,0640	1,0613	1,0586	1,0560	1,0533
18	1,0507	1,0480	1,0454	1,0429	1,0403	1,0377	1,0351	1,0325	1,0300	1,0274
19	1,0248	1,0223	1,0198	1,0174	1,0149	1,0124	1,0099	1,0074	1,0050	1,0025
20	1,0000	0,9976	0,9952	0,9928	0,9904	0,9881	0,9857	0,9833	0,9809	0,9785
21	0,9761	0,9738	0,9715	0,9692	0,9669	0,9646	0,9623	0,9600	0,9577	0,9554
22	0,9531	0,9509	0,9487	0,9465	0,9443	0,9421	0,9399	0,9377	0,9355	0,9333
23	0,9311	0,9290	0,9268	0,9247	0,9225	0,9204	0,9183	0,9161	0,9140	0,9118
24	0,9097	0,9077	0,9056	0,9036	0,9015	0,8995	0,8975	0,8954	0,8934	0,8913
25	0,8893	0,8873	0,8853	0,8833	0,8813	0,8794	0,8774	0,8754	0,8734	0,8714
26	0,8694	0,8675	0,8656	0,8636	0,8617	0,8598	0,8579	0,8560	0,8540	0,8521
27	0,8502	0,8484	0,8465	0,8447	0,8428	0,8410	0,8392	0,8373	0,8355	0,8336
28	0,8318	0,8300	0,8282	0,8264	0,8246	0,8229	0,8211	0,8193	0,8175	0,8157
29	0,8139	0,8122	0,8105	0,8087	0,8070	0,8053	0,8036	0,8019	0,8001	0,7984
30	0,7967	0,7950	0,7934	0,7917	0,7901	0,7884	0,7867	0,7851	0,7834	0,7818

**Lisa 2 Koefitsendi  $\phi$  määramine [15]**

$\frac{S}{H_0}$	$\phi\left(\frac{S}{H_0}\right)$	$\frac{S}{H_0}$	$\phi\left(\frac{S}{H_0}\right)$	$\frac{S}{H_0}$	$\phi\left(\frac{S}{H_0}\right)$
0,01	0,010	0,34	0,416	0,67	1,109
0,02	0,020	0,35	0,431	0,68	1,139
0,03	0,030	0,36	0,446	0,69	1,172
0,04	0,040	0,37	0,462	0,70	1,204
0,05	0,051	0,38	0,478	0,71	1,238
0,06	0,062	0,39	0,494	0,72	1,273
0,07	0,073	0,40	0,510	0,73	1,309
0,08	0,083	0,41	0,527	0,74	1,347
0,09	0,094	0,42	0,545	0,75	1,386
0,10	0,105	0,43	0,562	0,76	1,427
0,11	0,117	0,44	0,580	0,77	1,470
0,12	0,128	0,45	0,598	0,78	1,514
0,13	0,139	0,46	0,616	0,79	1,561
0,14	0,151	0,47	0,635	0,80	1,609
0,15	0,163	0,48	0,654	0,81	1,661
0,16	0,174	0,49	0,673	0,82	1,715
0,17	0,186	0,50	0,693	0,83	1,771
0,18	0,196	0,51	0,713	0,84	1,833
0,19	0,210	0,52	0,734	0,85	1,897
0,20	0,223	0,53	0,755	0,86	1,966
0,21	0,236	0,54	0,777	0,87	2,040
0,22	0,248	0,55	0,799	0,88	2,120
0,23	0,261	0,56	0,821	0,89	2,207
0,24	0,274	0,57	0,844	0,90	2,303
0,25	0,288	0,58	0,868	0,91	2,408
0,26	0,301	0,59	0,892	0,92	2,526
0,27	0,315	0,60	0,916	0,93	2,659
0,28	0,329	0,61	0,941	0,94	2,813
0,29	0,346	0,62	0,967	0,95	2,996
0,30	0,357	0,63	0,994	0,96	3,219
0,31	0,371	0,64	1,022	0,97	3,507
0,32	0,385	0,65	1,050	0,98	3,912
0,33	0,400	0,66	1,079	0,99	4,605

### Lisa 3 Permeameetri katseleht

Proovi nr	
Katsetamise aeg:	
Permeameeter:	Vertikaalne/Horisontaalne
Materjali nimetus:	
Optimaalne niiskus:	
Maksimaalne kuivtihedus	
Materjali kõrgus permeameetris, mm	
Materjali mass permeameetris, g	
Niiskusproov enne kuivatamist, g	
Niiskusproov pärast kuivatamist, g	

#### MÄRKUSED

Nõu kaal, g					
Nõu+vesi, g					
Aeg, hh, mm, ss					
Vee temperatuur, °C					
Veesammaste vahe (gradiendi määramiseks), mm					

Nõu kaal, g					
Nõu+vesi, g					
Aeg, hh, mm, ss					
Vee temperatuur, °C					
Veesammaste vahe (gradiendi määramiseks), mm					

Nõu kaal, g					
Nõu+vesi, g					
Aeg, hh, mm, ss					
Vee temperatuur, °C					
Veesammaste vahe (gradiendi määramiseks), mm					

Nõu kaal, g					
Nõu+vesi, g					
Aeg, hh, mm, ss					
Vee temperatuur, °C					
Veesammaste vahe (gradiendi määramiseks), mm					

Nõu kaal, g					
Nõu+vesi, g					
Aeg, hh, mm, ss					
Vee temperatuur, °C					
Veesammaste vahe (gradiendi määramiseks), mm					