

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Grete Sabine Sarap

**Turba geotehnilised parameetrid ja nende seosed turba
füüsikaliste omadustega**

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Juhendajad: Raul Paat

Argo Jõelet

Annette Talpsep

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Tartu 2022

Turba geotehnilised parameetrid ja nende seosed turba füüsikaliste omadustega

Kuna turvas on väga kokkusurutav, nõrk ja suure omaduste varieeruvusega pinnas, on oluline enne ehitustegevust või veetaseme langetamist määrata turbapinnase geotehnilisi omadusi. Kompressiooni- ja filtratsiooniparameetreid on võimalik kirjeldada laboratoorsete katsetega, mis on aga aeganõudvad ja seega kallid katsed. Seetõttu oleks mõistlik hinnata turba ehitusgeoloogilisi parameetreid läbi lihtsamini leitavate füüsikaliste omaduste. Käesoleva magistritöö käigus viidi läbi laborikatsed Kaasiksoost ja Selisoost pärit erinevat tüüpi turbaproovidega filtratsioonikoefitsiendi ning kokkusurutavuse omaduste määramiseks. Lisaks määrati ka proovide füüsikalisi omadusi. Töö eesmärgiks on analüüsida seoseid geotehniliste parameetrite ja füüsikaliste omaduste vahel ning leida seeläbi lihtsamaid viise, kuidas vajumisarvutusteks vajalikke parameetreid määrata.

Märksõnad: Turvas, ehitusgeoloogia, kokkusurutavus, filtratsioonikoefitsient

P470 Hüdroteoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Geotechnical properties of peat and their relation to physical properties

Peat is a highly compressible and weak material with considerable variety in its properties, so having a good understanding of its geotechnical characteristics is essential when planning construction activities on peaty ground. As the evaluation of geotechnical properties like compressibility and hydraulic conductivity is a time-consuming and therefore a pricy process, an assessment based on other easily determined peat characteristics could be beneficial. Samples of different types of peat from two Estonian bogs, Kaasiksoo and Selisoo, were collected and tested in a laboratory to determine the compressibility and filtration parameters. In addition, the physical properties were measured. The aim of this thesis is to analyze the relationship between geotechnical characteristics and physical properties in order to introduce easier methods to estimate the parameters needed for settlement predictions.

Keywords: Peat, geotechnical engineering, compressibility, hydraulic conductivity

P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Teoreetiline taust	7
1.1 Konsolidatsioon ja kokkusurutavus	7
1.1.1. Konsolidatsioon.....	7
1.1.2. Kompressiooni- ja rekompresiooniindeks	8
1.2. Filtratsioonikoefitsient	9
1.3. Turba füüsikalised omadused	10
2. Uuringuala iseloomustus	12
2.1. Selisoo	12
2.2. Kaasiksoo	13
3. Materjal ja meetodika.....	14
3.1. Proovide kogumine	14
3.2. Veesisaldus, mahukaal ja tuhasus	15
3.3. Lagunemisastme määramine	16
3.4. Ödomeeterkatse	16
3.4. Permeameetri katse	19
4. Tulemused	20
4.1. Füüsikalised omadused	20
4.2. Kompressiooniparameetrid	23
4.3. Filtratsioonikoefitsient	27
4.4. Seosed geotehniliste parameetrite ja füüsikaliste omaduste vahel.....	30
5. Arutelu.....	32
Kokkuvõte	36
Summary	38
Tänuavaldused.....	40
Kasutatud kirjandus	41

Lisa 1. Intervallproovide lagunemisastme, ρ_d ja w väärtused	44
Lisa 2. SELI-6 kompressioonigraafikud	46
Lisa 3. KAS-3 kompressioonigraafikud	47
Lisa 4. SELI-4 kompressioonigraafikud	48
Lisa 5. Koormamiskatsete jooksul mõõdetud K väärtused	49

Sissejuhatus

Turvas on peamiselt orgaanikast koosnev biogeenne sete, mis moodustub aladel, kus pinnamoe, pinnakatte, kliima ning hüdroloogiliste tingimuste koosmõjul tekivad pikaajalised veeküllastunud tingimused ja taimejäänused liigniisketes tingimustes ei lagune (Edil & Dhowian, 1979). Üle maailma on 4,2 miljonit km² kaetud erinevate turbaaladega, mis moodustab kogu maismaa pindalast umbes 2,8% (Xu *et al.*, 2018). Eestis moodustavad Orru (1995) andmetel erinevad turbaalad kogu maismaast ~22,3% kogupindalaga umbes 10 000 km².

Kuigi ehitamist probleemsetele suure orgaanikasisaldusega pinnastele üritatakse vältida, kasvab järjest enam huvi ja vajadus ehitisi ja infrastruktuuriobjekte ka sellistele pinnastele rajada. Turvast kirjeldatakse tavaliselt kui väga nõrka ja problemaatilist pinnast tema suure poorsuse, veesisalduse ning sellest lähtuva suure kokkusurutavuse ja väikse kandevõime tõttu (Edil & Dhowian, 1979). Kuna turvas on suures ulatuses kokkusurutav, on väga oluline määrata turbapinnasele koormuse rakendamise tõttu tekkivate vajumite ulatust. Geotehnikas kasutatakse pinnastes tekkivate vajumite hindamiseks kompressiooni- ja rekompresiooniindekseid ning lisaks on vajumise kestvuse hindamiseks oluline parameeter filtratsioonikoefitsient (Coduto, 1999).

Kompressiooniomadusi kirjeldavaid parameetreid leitakse laboratoorselt kompressioonikatsega (ödomeeterkatsega), mis on aga väga aeganõudev ja seega kallis katse. Ühtlasi on turvaste geotehnilisi omadusi keeruline määrata, kuna proovide võtmiseks on turbaaladele keeruline ligi pääseda ning turba omadused varieeruvad ka juba ühe lasundi lõikes suuresti (Kazemian *et al.*, 2011). Kuna varieeruvus on suur, tuleks kindla turbalasundi kirjeldamiseks teha palju pikaajalisi ning kalleid katseid. Mineraalsete pinnaste jaoks on leitud erinevaid võimalusi, kuidas kompressiooniomadusi teiste pinnaseparameetrite kaudu määrata, mis teeb antud parameetrite kirjeldamise lihtsamaks ning odavamaks. Näiteks savi- ja möllpinnaste puhul kasutatakse kompressiooniindeksi ja rekompresiooniindeksi arvutamiseks korrelatsiooni nende plastsusindeksiga (Kulhawy & Mayne, 1990) ning liivade ja kruusade puhul kasutatakse erinevaid empiirilisi korrelatsioonitabeleid, mis kirjeldavad kompressiooniparameetreid läbi suhtelise tiheduse. Turvaste puhul on kompressiooniindeksit üritatud samuti erinevate lihtsamini leitavate turba füüsikaliste omaduste kaudu hinnata. Varasemalt avaldatud kirjanduse põhjal (Kogure & Ohira, 1977; Mesri & Ajlouni, 2007) on

turba puhul kompressiooniindeksi väärtust üritatud hinnata erinevate teiste turba parameetritega, näiteks veesisalduse, kuivtiheduse või poorsusteguriga.

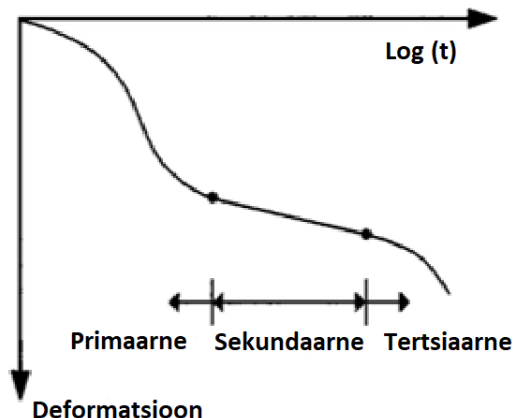
Käesoleva magistritöö käigus viiakse läbi laborikatsed erinevat tüüpi turbaproovidega filtratsioonikoefitsiendi ning kokkusurutavuse omaduste (kompressiooniindeks ja rekompresiooniindeks) määramiseks ning lisaks määratakse ka nende turvaste lihtsasti leitavaid võimalikult looduslike tingimuste lähedasi füüsikalisi omadusi. Eesmärgiks on kirjeldada saadud tulemusi ning hinnata seoseid geotehniliste parameetrite ning füüsikaliste omaduste vahel, et läbi selle leida lihtsamaid viise, kuidas vajumisarvutustes vajalikke parameetreid määrata.

1. Teoreetiline taust

1.1 Konsolidatsioon ja kokkusurutavus

1.1.1. Konsolidatsioon

Ehitistest, täitepinnastest või veetaseme muutustest tingitud lisapingete tõttu väheneb pooriruumi arvelt pinnase ruumala ehk toimub pinnase konsolidatsioon, mille tulemuseks on vajumid. Tekkinud vajumid võivad põhjustada ehitistes ebastabiilsust või halvemal juhul nende purunemist. Klassikaliselt jaotatakse vajumid tekkemehhanismide järgi kolmeks: primaarne konsolidatsiooniline vajum, sekundaarne konsolidatsiooniline vajum, ning vajumine külgsuunalise deformatsiooni tõttu (Coduto, 1999). Loendis viimasena nimetatud deformatsiooni liiki käesolevas töös ei käsitleta. Kuna turba omadused erinevad mineraalsete pinnaste omadustest, on mitmed autorid (Dhowian & Edil, 1980; Fox *et al.*, 1992; Gofar & Sutejo, 2007) turvaste puhul täheldanud peale sekundaarse konsolidatsiooni etappi ka tertsiaarset konsolidatsiooni (Joonis 1).



Joonis 1. Deformatsioon aja logaritmi suhtes: primaarne, sekundaarne ja tertsiaarne konsolidatsioon (Augustesen *et al.*, 2004 järgi).

Primaarne konsolidatsioon toimub pinnastes lisapinge mõjul. Pinnasele lisapinget rakendades kasvab pinnaseosakestele ja pooriveele mõjuv vertikaalne pinge, osa vett surutakse pooriruumist välja ning pinnaseosakestele kanduva efektiivpinge tõttu paigutuvad need omavahel tihedamini kokku. Seda protsessi nimetatakse lisapoorirõhu hajumiseks. Primaarse konsolidatsiooni kiirus sõltub sellest, kui kiiresti suudab vesi pooriruumist välja liikuda, mida iseloomustab pinnase veejuhtivuse võime (Coduto, 1999). Suure poorsuse tõttu on turvaste primaarne konsolidatsioon tihti suurema ulatusega, kui anorgaaniliste pinnaste puhul (Tunar *et al.*, 2020; Zainorabidin & Wijeyesekera, 2008). Erinevusi saab välja tuua ka hästi lagununud ja

halvasti lagunened turba vahel: väiksema lagunemisastmega turba puhul on primaarne konsolidatsioon suurema ulatusega kui amorfsetel hästi lagunened turvastel (Yulindasari, 2006).

Sekundaarne konsolidatsioon tekib pinnaseosakeste roome, kuju muutuse, reorientatsiooni ja orgaanilise materjali lagunemise tulemusena, ning ei ole enam seotud poorirõhu hajumisega. Kui primaarne konsolidatsioon toimub pinnastes suhteliselt kiiresti, siis sekundaarne konsolidatsioon toimub pikema aja jooksul konstantse osakestele mõjuva pinge all. Mineraalpinnastes põhjustab deformatsioone põhiliselt primaarne konsolidatsioon ja sekundaarse konsolidatsiooni osakaal on väike, kuid turvast iseloomustavad kiire primaarne konsolidatsioon ning suurem sekundaarse konsolidatsiooni osakaal (Wong *et al.*, 2009; Zainorabidin & Wijeyesekera, 2008). Adams (1965) on turvaste jaoks välja pakkunud turba struktuuri kaksikjaotuse kontseptsiooni: makropoorid ja mikropoorid. Selle põhjal toimub turvastes primaarne konsolidatsioon turbaosakeste skeletist koosnevatest makropooridest välja liikuva vee poorirõhu hajumise arvelt ning sekundaarne konsolidatsioon toimub väga aeglaselt toimuva vee väljatõrjumise arvelt turbaosakeste sisestest mikropooridest (Adams, J., 1965).

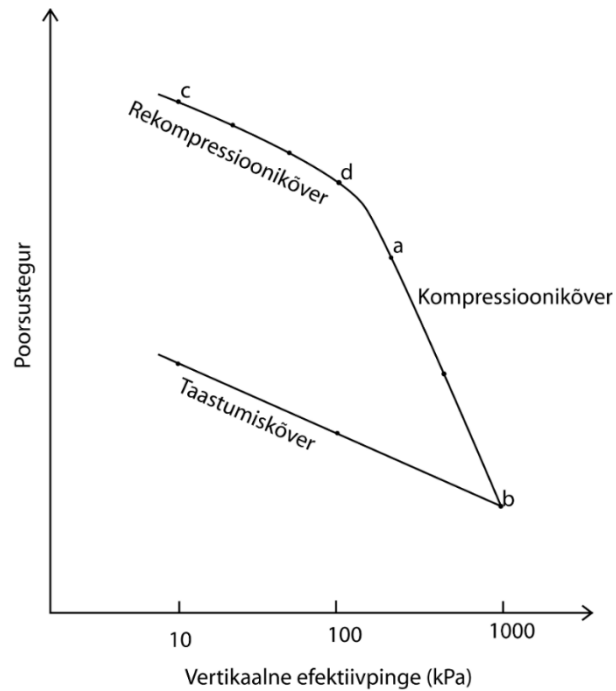
1.1.2. Kompressiooni- ja rekompresiooniindeks

Vajumite ulatuse arvutamiseks kasutatakse geotehnikas kompressiooniindeksit. Kompressiooniindeks (C_c) on kompressioonikõvera tõus (Valem 1), mis leitakse kompressioonikatse tulemuste põhjal. Kompressiooniindeks arvutatakse poollogaritmiliselt kompressioonigraafikult, kus x-teljel on proovile astmeliselt rakendatud koormuse vertikaalse efektiivpinge (σ'_z) logaritmi ning y-teljel proovi poorsustegur (e) 24 tunni möödumisel proovile raskuse rakendamise hetkest (Joonis 2). (Coduto, 1999)

$$C_c = \frac{e_a - e_b}{(\log \sigma'_z)_b - (\log \sigma'_z)_a}$$

Valem 1

Mida suurem on saadud kompressioonikõvera langus, seda suurem on kompressiooniindeks ja seda ulatuslikuma deformatsiooni antud pinge muutus esile kutsub ehk seda kokkusurutavam on pinnas. Turba kompressiooniindeksid on ulatusliku kokkusurutavuse tõttu väga suured, varieerudes mitmete autorite tulemuste põhjal erinevates turbatüüpides alates väärtusest 2 (1/kPa) kuni 13 (1/kPa) (Mohamad *et al.*, 2021; Wilkinson & Tekatch, 2016).



Joonis 2. Kompressiooni-, rekompressiooni- ja taastumiskõverad (Coduto, 1999 järgi).

Konsolidatsioonil tekkiv deformatsioon koosneb valdavalt plastsest, kuid osaliselt ka elastsest deformatsioonist, mille puhul pinnas pinge eemaldamisel taastub. Elastse deformatsiooni ulatust kirjeldatakse geotehnikas rekompressiooniindeksiga, mida leitakse sarnaselt kompressiooniindeksile kompressioonigraafikult. Rekompressiooniindeks on rekompressioonikõvera tõus (Valem 2), mis leitakse kompressioonikatse põhjal saadud poollogaritmiliselt kompressioonigraafikult, kus x-teljel on proovile astmeliselt rakendatud koormuse vertikaalse efektiivpinge (σ'_z) logaritm ning y-teljel proovi poorsustegur (e) (Joonis 2). Rekompressiooniindeksit on võimalik leida rekompressioonikõvera puudumisel taastumiskõveralt, millega teoreetiliselt proovi rekompressioonikõver kokku langeb, kui kompressioonikatsete lõpus katsekehalt raskusi astmeliselt eemaldatakse. (Coduto, 1999)

$$C_r = \frac{e_c - e_d}{(\log \sigma'_z)_d - (\log \sigma'_z)_c}$$

Valem 2

1.2. Filtratsioonikoefitsient

Pinnase veejuhtivuse võimet iseloomustav filtratsioonikoefitsient on vajumite hindamisel oluline parameeter, kuna see kontrollib konsolidatsiooni kiirust. Filtratsioonikoefitsient sõltub paljudest faktoritest: pinnase pooride suurusel, pinnase struktuurist, osakeste kujust, aga ka

vedeliku viskoossusest ja tihedusest. Pinnase filtratsioonikoefitsienti on võimalik arvutada Darcy seadusest, kus filtratsioonikoefitsient (K) on ajaühiku jooksul ühikulise hüdraulilise gradiendi (i) korral proovi ristlabilõiget (A) läbiva vee hulk (Q) (Valem 3). (Freeze & Cherry, 1979)

$$Q = KiA \Rightarrow K = \frac{iA}{Q}$$

Valem 3

Filtratsioonikoefitsiendi väärtust saab määrata nii labori- kui ka välikatsetega, samuti on mineraalsete pinnaste puhul võimalik kasutada erinevaid empiirilisi seoseid lõimise ja poorsusteguriga. Liivade puhul on levinud juba 19. sajandist kasutusel olev Hazeni korrelatsioon, kuid leidub ka täpsemaid, näiteks filtratsioonikoefitsiendi ja poorsuse vahelisel seosel põhinev Koezeny korrelatsioon (Loudon, 1952).

Turvastel esineb tugev korrelatsioon filtratsioonikoefitsiendi ja selle kuivtiheduse vahel: filtratsioonikoefitsient väheneb turba kuivtiheduse kasvades (Päivänen, 1973; Shibchum *et al.*, 2005). Kuna turba filtratsioonikoefitsient on tugevas seoses kuivtihedusega, siis on see tihedalt seotud ka konsolidatsiooniga, vähenedes turba kokkusurumisel eksponentsiaalselt (De Guzman & Alfaro, 2018). Turba puhul varieeruvad filtratsioonikoefitsiendi väärtused suures ulatuses. Üldiselt juhivad turbatüüpidest kõige paremini vett väikse lagunemisastme ja suure poorsusega rabaturbad (Von Posti skaalal 1–3), nende filtratsioonikoefitsiendi väärtused jäävad suurusjärku 10^{-3} – 10^{-5} m/s, keskmise lagunemisastmega siirdesooturvaste (Von Post 4–7) puhul võib filtratsioonikoefitsiendi väärtus ulatuda suurusjärgust 10^{-4} m/s kuni 10^{-9} m/s ning kõrge lagunemisastmega madalsooturvaste (Von Post > 7) filtratsioonikoefitsiendi väärtused on sarnaselt savidele väga väikesed, jäädes reeglina alla 10^{-6} m/s ning ulatudes isegi kuni suurusjärguni 10^{-12} m/s (Letts *et al.*, 2010).

1.3. Turba füüsikalised omadused

Turba füüsikaliste omaduste varieeruvus on suur. Kuna turvas on materjal, mis sisaldab peamiselt surnud orgaanilist materjali, sõltuvad turvaste omadused suuresti asukoha omapäradest: kliimast, taimeliikidest ja aluspinnasest (Zainorabidin & Wijeyesekera, 2008). Lisaks varieeruvad turba poorsus, veesisaldus ja lagunemisaste ka turbalasundis vertikaalselt, ning tihti on füüsikalised omadused omavahel seotud (Boelter, 1969).

Väga oluline turvast iseloomustav omadus on turba lagunemisaste, mis näitab, kui palju taimeosakesed on lagunened ning kui palju on tekkinud laguprodukte ehk huumusaineid. Lagunemisaste on enamasti sõltuv sügavusest, suurenedes turbalasundis sügavuse suunas, kus on vanemad ja kauem lagunened taimejäänused. Lisaks on lagunemisaste tihedalt seotud ka turbaliigiga, suurema lagunemisastmega on tavaliselt madal soo faasis tekkivad puiduturbad ning väiksema lagunemisastmega raba faasis tekkivad samblaturbad (Rusanov, 2016). Turba kuivtihedus ja veesisaldus on tihedalt lagunemisastmega seotud. Kui turvas laguneb, väheneb turbas sisalduvate osakeste suurus ning seetõttu väheneb ka osakeste vaheline pooriruum ja tihedus suureneb (Boelter, 1969). Lagunemisastme määramiseks on olemas erinevaid võimalusi, neist lihtsaim ja kiireim on visuaalne hinnang näiteks Von Posti 10-palli skaala järgi, kuid leidub ka erinevaid laboratoorseid meetodeid.

Veesisaldus (w) ehk niiskus on pinnases sisalduva vee (m_w) ja pinnase tahke osa (m_s) masside suhe protsentides (Valem 4). Setete veesisaldus on tugevalt seotud nende poorsusega – mida rohkem on pinnaseosakeste vahel vaba pooriruumi, seda enam vett pinnas küllastunud olekus sisaldab. Turba veesisaldus on suur: hästi lagunened madal sooturvaste puhul on see 3 kuni 7 korda suurem turba kuivmassist ning vähelagunenud sfangnumiturba puhul võib see olla kuivmassist isegi 15 kuni 20 korda suurem (Rusanov, 2016).

$$w = \frac{m_w}{m_s} * 100\%$$

Valem 4

Tihti iseloomustatakse turvast ka kuivtihedusega, mis näitab tahkete osakeste massi (m_s) suhet koguruumalasse (V) (Valem 5). Turba kuivtihedus on võrreldes mineraalsete pinnastega väike, kuid varieerudes samas suures ulatuses. Turba kuivtiheduse väärtused jäävad Boelter (1969) põhjal rabaturba puhul alla $0,075 \text{ g/cm}^3$ ning võivad madal sooturba puhul küündida üle $0,195 \text{ g/cm}^3$.

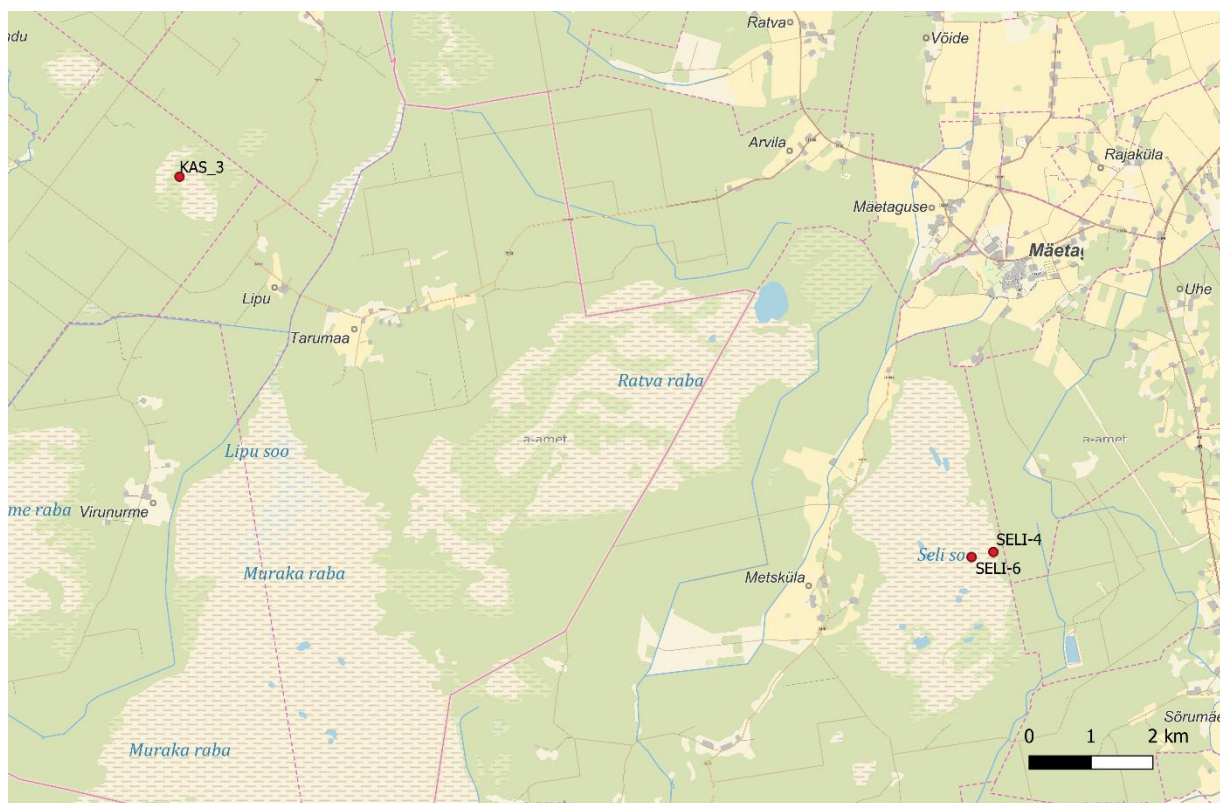
$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

Valem 5

2. Uuringuala iseloomustus

2.1. Selisoo

Selisoo asub Kirde-Eestis, Ida-Virumaal, Alutaguse vallas Mäetaguse aleviku ja Metsküla läheduses ning on osaks Muraka soostikust (Joonis 3). 2051 ha suuruse pindalaga Selisoo ulatus põhjast lõunasse on umbes 7,4 km ja idast läände ligikaudu 3,7 km. Selisood eraldab läänes selge piirina ülejäänud Muraka soostikust kirde-edela suunaline Sildoja-Mäetaguse oosistik ning kaguosas on Selisoo priiriks liivaseljandik. Milloja jõkke suubuvate kuivenduskraavide kaudu toimuva kuivenduse tulemusena on soo põhja-, ida-, ja lõunapiirid ebamäärased. (Hang *et al.*, 2009)



Joonis 3. Kaasiksoo ja Selisoo ning uuringupunktide KAS-3, SELI-4 ja SELI-6 asukohad (Aluskaart: Maa-amet, 2018).

Selisoo asub Põhja-Eesti paeplatoo ja Peipsi järve vahel asetseval Alutaguse madaliku maastikurajoonis, mille alad Peipsi järve põhjaosas on olnud hilisjäaegse suure Peipsi jääjärve põhjaks (Arold, 2005). Selisoo raba alune reljeef on üldiselt tasane ja väikese kallakusega põhjast, Jõhvi kõrgendi nõlvalt, lõunasse Peipsi järve suunas (absoluutkõrgused on põhjas umbes 55 ja lõunas 50 m). Selisoo 2051 ha suurusest pindalast moodustab 734 ha madalsoo,

359 ha siirdesoo ning 958 ha raba (Hang *et al.*, 2009). Raba lõunapoolse kupli piirkonnas asuvad turbalasundi suurimad paksused, kuni 7,5 m, ning põhjapoolse kupli paksus kuni 6 m (Paat *et al.*, 2020).

2.2. Kaasiksoo

Kaasiksoo on Kirde-Eestis, Ida-Virumaa lääneosas, Lüganuse vallas asuv soo Piilse, Rääsa ja Lipu küla aladel (Joonis 3). 504 hektari suurust Kaasiksood ümbritseb madal- ja siirdesoomännik. Samuti Alutaguse madaliku tasases maastikurajoonis paiknev Kaasiksoo on tekkinud moreenküngaste vahelises reljeefinõos mineraalmaa soostumise tulemusena. Kaasiksoo aluse reljeefinõo põhi on kõrgusega ~53,5 m ümp ning soaalune maapind kerkib veidi lääne- ja lõunaosas. Kuna Kaasiksood on kuivendatud, võib Kaasiksoo turbalasundi pinnakiht olla suurenenud lagunemisastmega. Turba paksus jälgib maapinna reljeefi, paksus Kaasiksoo rabakuplil on 2–4 m ning turba lamamiks on liiv. (Paat *et al.*, 2020)

3. Materjal ja metoodika

3.1. Proovide kogumine

Magistritöös kasutatud turbaproovid on pärit Selioost seirepunktide SELI-4 ja SELI-6 ning Kaasiksoost seirepunkti KAS-3 vahetust lähedusest. Proovid koguti 07.04.2021 ja 21.06.2021 toimunud välitööde käigus, kasutades vene tüüpi kannpuuri. Selisoo seirepunktides on varasemalt 2016. aastal valminud projekti „Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks, II etapp“ ja Kaasiksoos 2020. aasta projekti „Põlevkivi piirkonna soode rajoneerimine“ raames tehtud puurimiste käigus määratud turbaliigid ja lagunemisastmed Von Posti skaalal (Tabel 1).

Laboratoorselt määratavate füüsikaliste parameetrite leidmiseks võeti kannpuuriga proovid meetri kaupa ning südamik asetati PVC renni, mis kaeti kilega, et säilitada turba esialgseid omadusi. Proovid võeti Selisoo punktides SELI-4 ja SELI-6 vastavalt 1,0–3,3 m ja 0,0–5,3 m sügavuselt maapinnast ning Kaasiksoo uuringupunktist KAS-3 sügavuselt 0,5–3,4 m. Uuringupunktide SELI-4 ja KAS-3 puhul alustati puurimisi sügavamalt, kuna ülemise kihi turvas ei jäänud kannu ning proove polnud võimalik koguda.

Ödomeetri ja permeameetri katsete jaoks piisava koguse proovimaterjali saamiseks puuriti kindlat sügavusvahemikku mitu korda. Seda tehti laboratoorseteks analüüsideks võetud puursüdamiku puurimise vahetus läheduses. Kogu võetud proovimaterjal asetati õhukindlasse taas-suletavasse kotti säilitamiseks algset veesisaldust ja vältimaks turbaproovi oksüdeerumist. Sügavusvahemikud turba konsolidatsioonikatsete jaoks valiti eelneva kogu läbilõiget hõlmava puursüdamiku põhjal ja jooksva puurimise käigus tehtud visuaalsete vaatluste järgi, et valitud sügavusvahemik kirjeldaks võimalikult sarnaste omadustega ja ühte tüüpi turbamassi. Proove koguti punktis SELI-4 neljalt sügavuselt: 1,2–1,7 m; 1,7–2,2 m; 2,2–2,7 m ja 2,7–3,2 m, punktis SELI-6 üheksalt sügavuselt: 0,5–1,0 m; 1,0–1,5 m; 1,5–2,0 m; 2,0–2,5 m; 2,5–3,0 m; 3,0–3,5 m; 3,5–4,0 m 4,0–4,5 m ja 4,5–5,25 m ning punktist KAS-3 kuuelt eri sügavuselt: 0,6–1,0 m; 1,0–1,4 m; 1,4–1,9 m; 1,9–2,4 m; 2,55–2,9 m ja 2,9–3,4 m. Välitööde käigus kogutud proove hoiti laboratoorsete katsete tegemiseni külmkapis.

Tabel 1. Turba kohapealne kirjeldus seirepunktides SELI-4, SELI-6 ja KAS-3, M. Kohv ja R. Paat avaldamata andmete põhjal.

Puurauk	Sügavus	Turbaliik	Lagunemisaste (Von Post)
SELI-4	0,5–1,2	Sfangnumi	1
	1,2–2,2	Puidu	8–8,5
	2,2–3,2	Pilliroo	4–5
SELI-6	0,0–0,9	Sfangnumi	2
	0,9–1,2	Tupp-villpea	4,5
	1,2–2,4	Sfangnumi	2–5
	2,4–3,1	Älveturvas	2–5
	3,3–3,8	Tupp-villpea	3
	3,8–4,8	Puiduturvas	8
	4,8–5,5	Pillirooturvas	3–4
KAS-3	0–1,4	Sfangnumi	1–5
	1,4–1,7	Tupp-villpea	1
	1,7–2,25	Sfangnumi	1
	2,25–2,5	Tupp-villpea	5
	2,5–3,4	Puidu	6–10

3.2. Veesisaldus, mahukaal ja tuhasus

Turba veesisalduse, mahukaalu ja tuhasuse määramiseks võeti välitöödel kogutud turbaprooviga täidetud PVC rennidest iga 10 cm tagant 3 cm paksused intervallproovid, kokku 104 proovi. Turba kuivmassi leidmiseks proovid kaaluti ja kuivatati ahjus 105°C juures täieliku kuivamiseni ning peale seda kaaluti proovid uuesti. Kuivatamisel saadud masside vahe ning turbaproovi ruumala põhjal arvutati turba veesisaldus (w) ja kuivmahukaal (ρ_d) (Valemid 4 ja 5). Turbaproovi ruumala tuletati puurimisel kasutatud puuri diameetri ja turbaproovi paksuse põhjal. Peale seda uhmerdati proovi homogeniseerimiseks kuiv turbaproov ning kogu kuivast proovimassist kaaluti tuhasuse leidmiseks eelnevalt kaalutud portselanumasse umbes pool. Ülejäänud proovimass säilitati õhukindlas proovikotis lagunemisastme määramiseks. Prooviga portselankauss asetati orgaanika põletamiseks neljaks tunniks 550°C juures kõrgkuumutusahju. Alles jäänud mineraalne aines kaaluti ning arvutati proovi tuhasus. Kuna konsolidatsioonikatsete jaoks kogutud proovide sügavusintervallid võeti palju pikemad kui ligilähedases looduslikus seisundis säilitatud turbaproovid laboratoorseteks analüüsideks, siis kirjeldati kogu vahemiku füüsikalised omadused keskmiste väärtustena vastavast sügavusvahemikust võetud intervallproovide laborikatsete tulemuste põhjal.

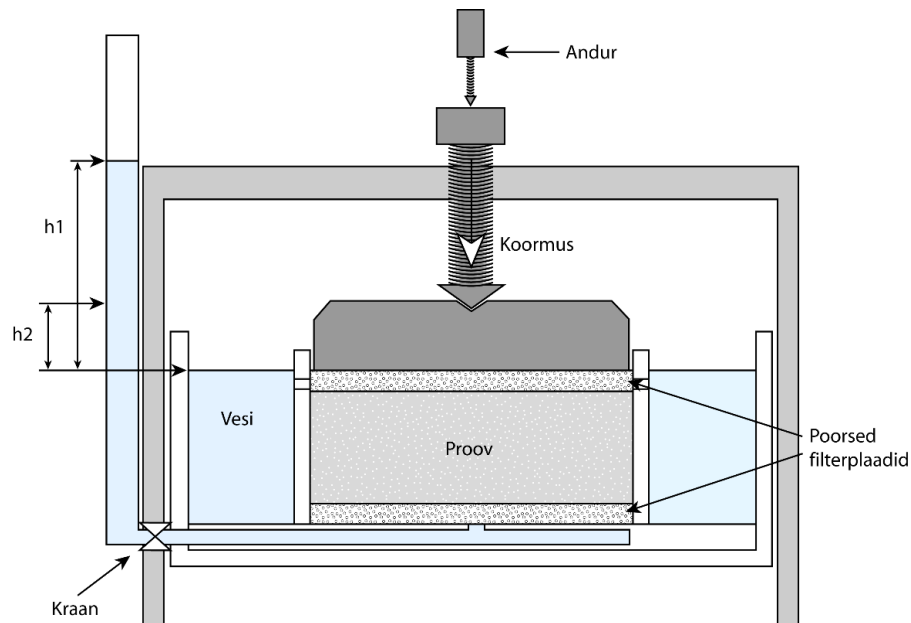
3.3. Lagunemisastme määramine

Turba lagunemisastme määramiseks kasutati fotospektromeetrilist meetodit, kuna laiemalt tuntud Von Posti 10-palli skaala järgi määramine sõltub suuresti määraja kogemustest ja teadmistest ning on seega liialt subjektiivne. Bahnsoni (1968) poolt püstitatud fotospektromeetrilise meetodiga hinnatakse lagunemisastet valguse neeldumise kaudu lahuses, milles sisalduvad turba lagunemisel tekkivad humiinained. Fotospektromeetrilise meetodiga saadud väärtused iseloomustavad lagunemisastet suhtelisel skaalal. Mida suurem on väärtus, seda kõrgem on ka lagunemisaste.

Käesolevas uurimuses kasutati Chambers *et al.* (2011) välja pakutud turba lagunemisastme määramise fotospektromeetrilise meetodi protokoll. Lagunemisastme määramiseks keedeti eelnevalt peeneks jahvatatud ja homogeniseeritud turbaproovist 0,2 g 100 ml-s 8% NaOH lahuses tund aega. Peale keetmist lahjendati lahus destilleeritud veega 200 ml-ni ning saadud lahus filtreeriti tahkete turbaosakeste eemaldamiseks. Filtreeritud lahust koguti 50 ml ning see omakorda lahjendati destilleeritud veega 100 ml-ni. Lõpuks valati saadud humiinainete lahus küvettidesse ja mõõdeti spektrofotomeetris 540 nm lainepikkusega valguse neeldumist. Mõõtmistulemused parandati varasemalt määratud tuhasuse väärtuse suhtes, sest mineraalainese hulk vähendab orgaanika osakaalu 0,2 g proovis, mistõttu lagunemisastme tulemused tulevad tegelikkusest väiksema väärtusega.

3.4. Ödomeeterkatse

Turvaste kokkusurutavuse määramiseks kasutati ödomeetri katset. Ödomeeterkatse ehk kompressioonikatse on laboratoorne ühedimensionaalne katse, mille jooksul rakendatakse proovikehale astmeliselt vertikaalset normaalpinget ja mõõdetakse tekkivat vertikaalset deformatsiooni (Coduto, 1999). Töös kasutati pealt laetavat ödomeetrit, mis salvestas automaatselt logiva anduriga deformatsiooni ulatust ning vajumiseks kulunud ajalise info (Joonis 4).



Joonis 4. Ödomeetri ja langeva veetasemega permeameetri skemaatiline joonis

Kõigi 19 kogutud prooviga viidi läbi astmelisest koormamisest ja taastumisest koosnevad katseseeriad. Kuna turbaproovid koguti mitme puurimise käigus ning proovikotti asetamisel proove muljuti ei säilinud turba looduslik struktuur. Kõigepealt asetati homogeniseeritud proov ödomeetris olevasse 10 cm diameetriga proovirõngasse kahe eelnevalt vees hoitud ja küllastunud poorse filterplaadi vahele, nii et proov ei ulatuks rõnga ülaosas olevate aukudeni. Turbaroovi ja filterplaatide vahele pandi väga väikeste turbaosakestega ummistumise vältimiseks omakorda filterpaber. Proov asetati koormamisraamile ning veevann täideti veega. Veevanni külge kinnitati langeva veetasemega filtratsioonikoefitsiendi katsete tegemiseks vajalik bürett. Turba suure kokkusurutavuse tõttu asendati proovile koormuse ühtlaseks rakendamiseks vajaminev raskus epovaigust valatud kergema variandiga, et vältida liigset katse-eelselt turba kokkusurumist. Suure kokkusurutavuse tõttu alustati katseseeriat kõige väiksema võimaliku raskusega (0,25 kg).

Katseseeria jooksul rakendati astmeliselt koormusi 5,55–88,73 kPa (lisatud raskused 0,25–4 kg, jõuõlast tulenevalt oli tegelikult rakenduv mass 10 korda suurem), igal astmel lasti stabiliseeruda ligikaudu 24 tundi. Katseseeriad kestsid enamikel juhtudel (v.a proov SELI-6 0,5-1,0) 7–9 päeva. Koormamiste vahel tehti ka taastumiskatseid, et kirjeldada turba taastumist erinevate raskuste vahel. Enne iga uue raskuse lisamist või eemaldamist mõõdeti tekkinud deformatsiooni ulatust. Proovidega tehti erineva hulga koormamis- ja taastumisetappidega katseseeriaid, mille koormamiste ja taastumiste järjekord on toodud Tabel 2. Seejuures väikseim kasutatud raskus oli iga proovi puhul 0,25 kg ning suurim 4 kg (v.a SELI-6 0,5-1,0).

Erinevus katseseeriade pikkuses oleneb vahepealsete taastumiskatsete hulgast. Turba suure kokkusurutavuse tõttu vajus ödomeetri haar katsete jooksul kas alumise raami lähedale või vastu raami ning seda tuli enne iga uue koormuse rakendamist tõsta. Kasutatud ödomeetri puhul oli seetõttu maksimaalseks vajumise ulatuseks ühe koormusetapi jooksul umbes 4,5 mm. Kui haar koormusetapi jooksul vastu raami vajus, kergitati haara ning lasti proovil sama raskuse juures edasi vajuda. Lisaks viidi enne iga uue koormamis- või taastumistsükli käimapanekut läbi filtratsioonikatse.

Tabel 2. Kokkusurutavusparameetrite määramiseks tehtud katseseeriad

Koormamiste ja taastumiste järjekord katseseeria jooksul	Proovid
5,5 kPa; 11,1 kPa; 16,6 kPa; 22,2 kPa; 11,1 kPa	SELI-6 0,5-1,0
5,5 kPa; 11,1 kPa; 22,2 kPa; 44,4 kPa; 88,8 kPa; 22,2 kPa; 5,5 kPa	SELI-6 1,0-1,5; SELI-6 1,5-2,0; SELI-6 2,0-2,5; SELI-6 2,5-3,0; SELI-6 3,0-3,5 ja SELI-6 3,3-4,0
5,5 kPa; 11,1 kPa; 22,2 kPa; 5,5 kPa; 44 kPa; 11,1 kPa; 88,8 kPa; 22,2 kPa; 5,5 kPa	SELI-6 4,0-4,5; SELI-6 4,5-5,25; KAS-3 1,4-1,9; KAS-3 1,9-2,4; KAS-3 2,55-2,9; KAS-3 2,9-3,4; SELI-4 1,2-1,7; SELI-4 1,7-2,2; SELI-4 2,2-2,7; SELI-4 2,7-3,2
5,5 kPa; 11,1 kPa; 5,5 kPa; 22,2 kPa; 11,1 kPa; 44 kPa; 88,8 kPa; 22,2 kPa; 5,5 kPa	KAS-3 0,6-1,0; KAS-3 1,0-1,4

Peale katseseeria lõpetamist mõõdeti allesjäänud turbaproovi paksus ning proov kaaluti ja see asetati vähemalt 24 tunniks 105°C juures ahju. Peale kuivamist kaaluti proov uuesti ning saadud massi ja ruumala põhjal arvutati proovi lõplik veesisaldus (w) ja kuivtihedus (ρ_d) kasutades Valemeid 4 ja 5. Arvestades, et proov oli enne ahju panemist täielikult veeküllastunud ning tahke osise ruumala ei muutunud, arvutati tahke osise ruumala (V_s) ja vee massi järgi tuletatud tühimike ruumala (V_v) kaudu poorsustegur (e) (Valem 6).

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Valem 6

Eeldusel, et katsekeha kogu ruumala vähenes katse jooksul ainult pooriruumi kokku surumise arvelt, kalkuleeriti poorsusteguri väärtused kõigi teiste koormusastmete juures tagasiarvutuslikult, võttes arvesse katsekeha kõrguse muutumist. Kompressiooni- ja rekompresiooniindeksi leidmiseks katsete tulemustest kanti need graafikule ning kasutati Valemeid 1 ja 2 (Joonis 7). Kuigi kompressioonikõvera langus ei olnud kõigis etappides täiesti ühtlane, kasutati lihtsuse ja teiste parameetritega võrreldavuse huvides terve pingeintervalli kohta ühte C_c ja C_r väärtust. Rekompresiooniindeksi arvutamiseks kasutati taastumiskatsete

tulemusi, kuna taastumiskõver ja looduslikus olekus proovi rekompresioonikõver langevad teoreetiliselt kokku. Sekundaarse konsolidatsiooni kirjeldamiseks tehti iga proovi katseseeria iga koormamise kohta saadud tulemuste põhjal graafikud, kus vertikaalne deformatsioon on sõltuvuses aja logaritmist.

3.4. Permeameetri katse

Magistritöös kasutati filtratsioonikoefitsiendi (K) määramiseks langeva veetasemega permeameetri katset. Langeva veetasemega katsel kasutatakse nn *standpipe* permeameetrit, kust on võimalik lugeda veetaseme alanemist. Langeva veetasemega katsel vett juurde ei lisata, vaid katse toimumise aja jooksul mõõdetakse veetaseme alanemist. Kuna veetase katse jooksul muutub ja hüdrauliline gradient ei ole enam konstantne, ei ole võimalik Darcy seadust otse rakendada. Seetõttu kasutatakse Darcy seadusest tuletatud valemit, mis arvestab katse jooksul muutuvat voolukiirust (Valem 7). Langeva veetaseme meetodikat kasutatakse tavaliselt pinnaste puhul, millel on väike veejuhtivus, näiteks savid ja möllid, mille filtratsioonikoefitsient jääb alla 10^{-5} m/s. (Coduto, 1999)

$$K = 2.3 \frac{aL}{At} \times \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

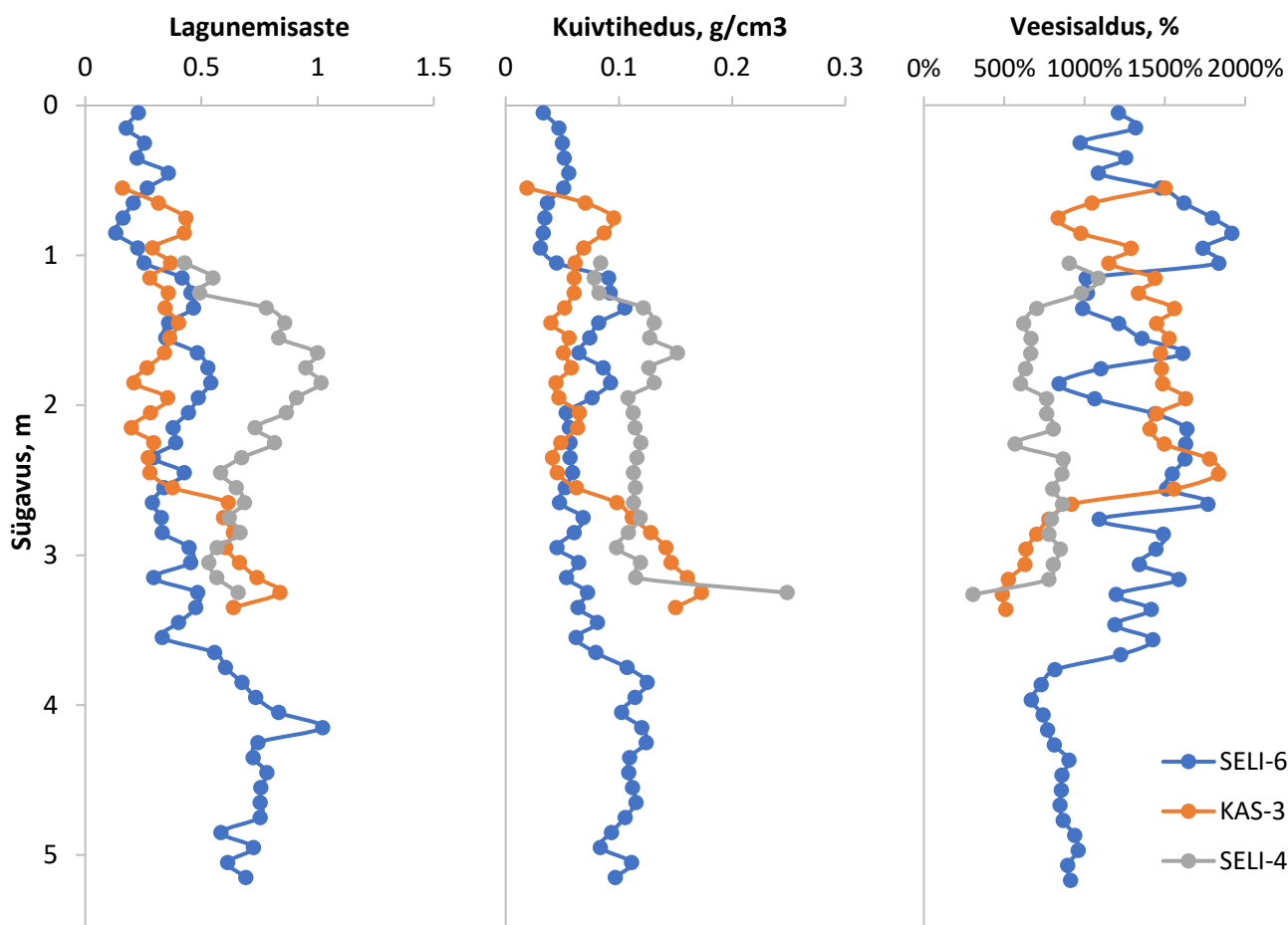
Valem 7

Käesoleva töö jaoks kasutatud ödomeetritele on külge ehitatud süsteem filtratsioonikoefitsiendi mõõtmiseks. Põhimõtteliselt moodustavad ödomeetri küljes olev bürett ning ödomeetri katserakk koos proovi ja filterplaatidega langeva veetasemega permeameetri (Joonis 4). Kokkusurumisele eelnevalt mõõdeti algsete omadustega turbamassi filtratsioonikoefitsienti. Ödomeetri katseseeriale eelnevalt mõõdeti büretis oleva veesamba kõrgus (h_1) ning permeameetris oleva turbaproovi paksus (L). Koos kraani lahtikeeramisega käivitati stopper, millega mõõdeti katse toimumise aega. Büretil oleva skaala järgi saadi läbi proovikeha liikuva vee kogus. Katse kestvuse piiriks võeti enamatel juhtudel 5 ml läbivool, halvema veejuhtivusega turvaste puhul piirati katse kestvust ajaliselt ning katse lõpetati kõige rohkem 2 tunni möödumisel katse algusest. Peale kraani sulgemist mõõdeti uuesti büretis oleva veesamba kõrgus (h_2). Saadud veesamba kõrguse muutuse (h_1/h_2), büreti ristlõike pindala (a), mõõdetud aja (t), proovi kõrguse (L) ja ristlõike pindala (A) põhjal arvutati proovi filtratsioonikoefitsient (Valem 7). Sama protsessi korrati peale iga koormamis- ja taastumiskatse stabiliseerumist, vahetult enne uue raskuse lisamist või eemaldamist, et kirjeldada proovi filtratsioonikoefitsiendi muutumist peale igat kokkusurumise või taastumise etappi.

4. Tulemused

4.1. Füüsilised omadused

Selisoo ja Kaasiksoo uuringupunktidest SELI-4, SELI-6 ja KAS-3 pärit 104 intervallproovi kuivmahukaalu, veesisalduse, tuhasuse ja lagunemisastme määramise arvulised tulemused on toodud koondtabelina Lisas 1. Saadud tulemusi kirjeldab ülevaatliselt Joonis 5, kus on toodud lagunemisastme, kuivtiheduse ja veesisalduse muutused proovi võtmise sügavuse suhtes.



Joonis 5. Lagunemisastme, kuivtiheduse ja veesisalduse väärtused SELI-6, KAS-3 ja SELI-4 läbilõigetel.

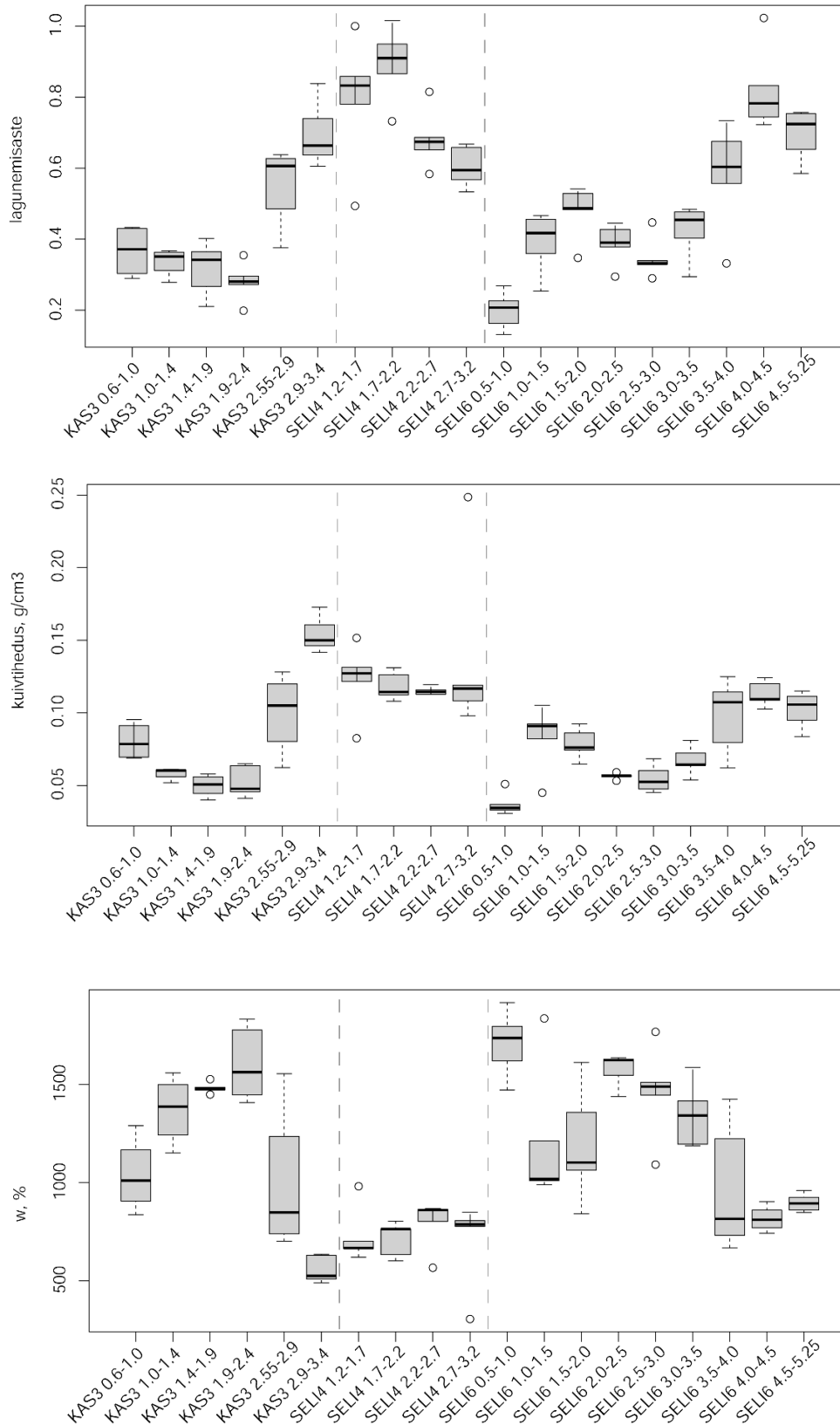
Uuringupunkti SELI-6 lagunemisastmed kõiguvad läbilõike ulatuses väärtuste 0,13–1,02 vahel, jäädes läbilõike ülemises muutlikus rabaturvast sisaldavas 3,75 m paksuses osas 0,13 ja 0,60 vahele. Alates 3,75 m sügavuselt hakkab lagunemisaste sujuvalt tõusma, saavutades 4,15 m peal maksimumväärtuse 1,02. Suurt lagunemisastet selgitab turba koostis, Tabeli 1 järgi on alates 3,8 meetrist tegemist puiduturbaga, mis madal-soo faasis on väga amorfse tekstuuriga. Puuraugu lõpus alates 4,8 m lagunemisaste natukene langeb, jäädes vahemikku 0,45–0,78.

Punktist KAS-3 võetud turbaproovide lagunemisastmete väärtused kõiguvad vahemikus 0,16–0,83. Puuraugu ülemises osas, kuni 2,5 m on tegemist rabaturbaga, mille lagunemisastmed kõiguvad väärtuste 0,16–0,43 vahel. Alates 2,5 m hakkab lagunemisaste järsult turbatüübi muutudes tõusma jäädes 0,60–0,84 vahele kuni puuraugu lõpuni. Uuringupunktis SELI-4 saadud lagunemisastme väärtused jäävad vahemikku 0,43–1,01. Turbamassi lagunemisastmed on puuraugu pinnalähedaseimas turbas vahemikus 0,43–0,55 ning kasvavad alates 1,35 m sügavuse suunas väärtusteni 0,80-st 1,01-ni. Alates 2,15 m sügavusel lagunemisaste turbaliigi muutudes väheneb, väärtused jäävad 0,53–0,69 vahel kõikuma kuni puuraugu lõpuni.

Punktist SELI-6 kogutud proovide kuivtihedused jäävad vahemikku 0,03–0,12 g/cm³. Läbilõike ülemises osas jääb kuivtihedus vahemikku 0,03–0,06 g/cm³ ning turbaliigi muutudes 1,15 m sügavusel hakkab kuivtiheduse väärtus kasvama, olles 1,35 m peal väärtusega 0,11 g/cm³. 2 m sügavusel kuivtihedus veidi langeb kuni puuraugu lõpupoole 3,6 meetri sügavusel uuesti tõuseb, kõikudes augu lõpuni väärtuste 0,08–0,12 g/cm³ vahel. Puuraugu KAS-3 kuivtiheduse väärtused varieeruvad suuresti vahemikus 0,02–0,17 g/cm³. Sarnaselt lagunemisastmele turba kuivtihedus puuraugu KAS-3 ülemises otsas tõuseb järsult, 0,02-st 10 cm allpool 0,10 g/cm³-ni, peale mida kuivtiheduse väärtused langevad ning jäävad väärtuste 0,04–0,06 g/cm³ vahele kuni sujuva tõusuni peale 2,55 m. Uuringupunkti SELI-4 läbilõige algab kuivtihedusega 0,08 g/cm³ ning alates 1,35 m sügavuselt kuivtiheduse väärtus tõuseb 0,15 g/cm³-ni. 2 m sügavusel toimub väike langus ning kuivtiheduse väärtus jääb 0,10–0,12 g/cm³ peale pidama kuni puuraugu lõpus on puuritud mineraalsesse pinnasesse.

Veesisalduse väärtused on kõigis puuraukudes ülemises osas suurema väärtusega kui sügavamates osades. Kõige suurem veesisalduse väärtus on uuringupunktis SELI-6, kõikudes vahemikus 668–1917%. Kõige väiksem mõõdetud veesisalduse väärtus (305%) saadi punktis SELI-4, mille turbamassi veesisaldused kõiguvad tagasihoidlikumalt 305–1085% vahel, kuna puurimist alustati suuremalt sügavuselt juba suurema lagunemisastmega turbamassist. Uuringupunkti KAS-3 läbilõikes jäid veesisalduste väärtused vahemikku 509%–1833%.

Joonisel 6 on toodud turba füüsikaliste omaduste varieeruvus sügavusvahemikes, mida kasutati ödomeetri katsetes, võttes aluseks analüüsitud intervallproovide tulemused, mis on leitavad Lisas 1.

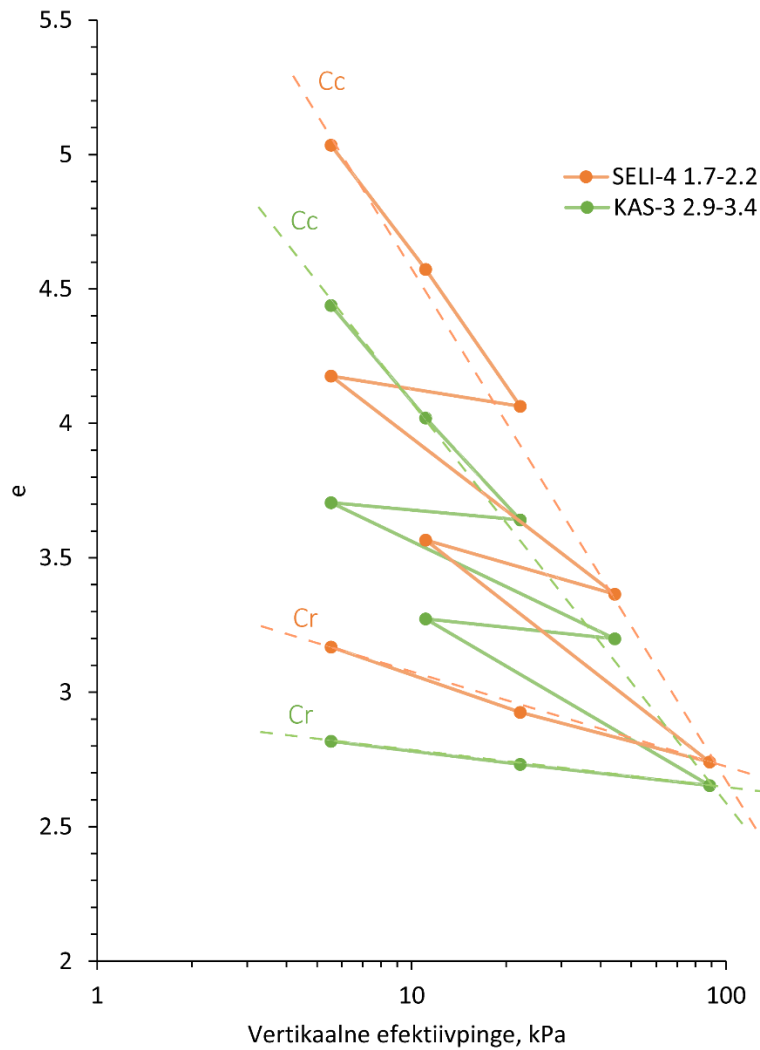


Joonis 6. Lagunemisastme, kuivtiheduse ja veesisalduse (w) intervallproovide mõõtmistulemuste varieeruvus ödomeetri proovile vastavas sügavusvahemikus. Must joon tähistab mediaanväärtust, kast on interkvartiilne vahemik, haarad tähistavad miinimum ja maksimumväärtuseid ning ringid võõrväärtusi.

Konsolidatsioonikatses kasutatud proovide sügavusintervallid olid palju pikemad kui turba füüsikaliste omaduste ja lagunemisastme kirjeldamiseks kasutatud proovidel, viimased olid seejuures ligilähedaselt looduslikus seisundis. Seetõttu on kohati näha suurt varieeruvust füüsikalises omadustes vastavast sügavusvahemikust võetud intervallproovide laborikatsete tulemuste põhjal. Lagunemisastme puhul on näha suuremat väärtuste varieeruvust proovides KAS-3 2,55-2,9, KAS-3 2,9-3,4, SELI-4 1,2-1,7, SELI-4 1,7-2,2, SELI-6 1,0-1,5, SELI-6 3,5-4,0. Kuivtiheduse väärtused kõiguvad kõige rohkem proovide KAS-3 2,55-2,9, SELI-4 1,2-1,7 ja SELI-6 3,5-4,0 puhul. Lisaks on SELI-4 2,7-3,2 puhul näha eraldiseisev punkt, kus kuivtiheduse väärtus on teistest oluliselt suurem, kuna tegemist on suures osas mineraalset osist sisaldava puuraugu sügavaima prooviga. Sarnaselt kuivtihedusele varieerub suures ulatuses proovi KAS-3 2,55-2,9 veesisaldus, lisaks varieeruvad suures ulatuses proovi SELI-6 1,5-2,0 ning proovi SELI-6 3,5-4,0 veesisalduse väärtused. Kuigi nimetatud proovides varieeruvad parameetrid suhteliselt palju, on ülejäänud tulemused siiski väiksema varieeruvusega ja keskmised väärtused kirjeldavad sügavusvahemikku piisavalt ning veesisalduse ja kuivtiheduse tulemused on ödomeetri katse põhjal saadud tulemustega võrreldavad.

4.2. Kompressiooniparameetrid

Kõikide kompressioonikatseseeriade tulemused on esitatud kompressioonikõveratena, kus on iga koormamisetapi jooksul arvutatud poorsusteguri väärtused katsetapil mõjunud vertikaalse efektiivpinge suhtes. Näited kompressioonigraafikutest kahe proovi kohta on toodud Joonisel 7, kõigi katseseeriade kompressioonigraafikud on toodud Lisades 2–4. Saadud tulemuste põhjal jäeti tööst välja kahe prooviga (KAS-3 1,4-1,9 ja KAS-3 1,9-2,4) tehtud katseseeriad. Nende proovide puhul ebaõnnestus proovide ödomeetri rõngast eemaldamise protsess ning proovi lõplikud füüsikalised omadused ja struktuur ei säilinud. Ühtlasi oli tegemist puidu ja pillirooturvastega, kus esinevad suuremad lagunemata taimejäänuste tükid võisid samuti tulemusi mõjutada.



Joonis 7. Proovide KAS-3 2,9-3,4 ja SELI-4 1,7-2,2 kompressiooni- ja taastumiskõverad. Punktirjooned markeerivad kompressiooniindeksi (C_c) ja rekompresiooniindeksi (C_r) tõusu.

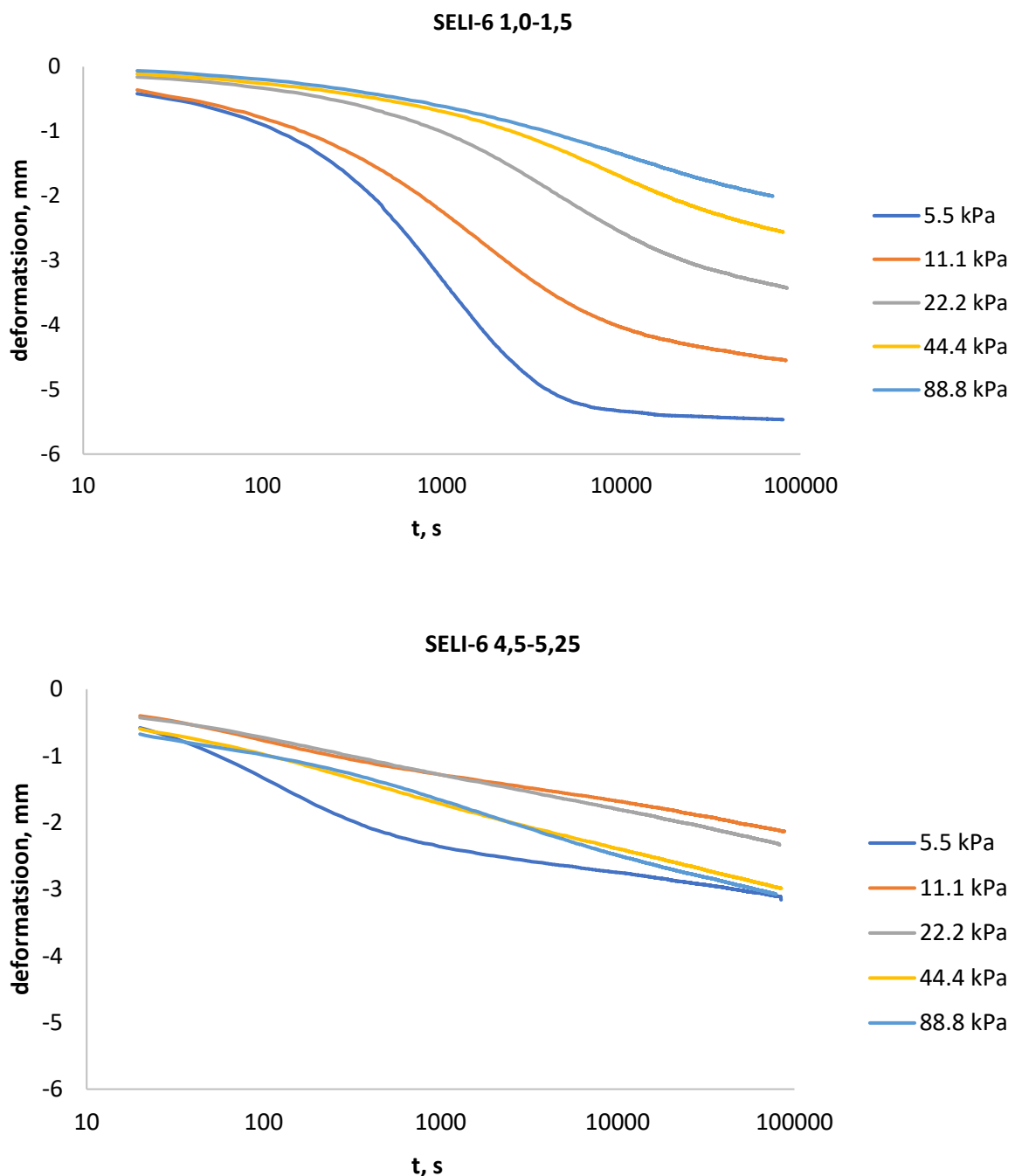
Kompressiooni- ja taastumiskõverate põhjal arvatud kompressiooni- ja rekompresiooniindeksid ning turba kokkusurumisele eelnenud filtratsioonikoefitsiendi mõõtmistulemuse arvulised väärtused on koos intervallproovide põhjal arvatud keskmise lagunemisastme ning ödomeetri katse põhjal arvatud kuivtiheduse ja veesisalduse väärtustega toodud Tabelis 3.

Tabel 3. Arvutatud kompressiooniindeksi (C_c), rekompresiooniindeksi (C_r) ja filtratsioonikoefitsiendi (K) tulemused ning katse järgselt määratud kuivtihedus (ρ_d), veesisaldus (w) ning intervallproovidest määratud lagunemisaste.

ID	Lagunemisaste	ρ_d , g/cm ³	w, %	K, m/s	C_c , 1/kPa	C_r , 1/kPa
SELI-6 0,5-1,0	0,20	0,05	1639		9,79	1,57
SELI_6 1,0-1,5	0,39	0,06	1085	1,5E-07	4,86	0,66
SELI-6 1,5-2,0	0,48	0,05	1256		5,23	1,26
SELI-6 2,0-2,5	0,39	0,05	1462	1,6E-06	7,68	1,06
SELI-6 2,5-3,0	0,35	0,05	1708	8,2E-07	9,15	0,94
SELI-6 3,0-3,5	0,42	0,07	1254	3,5E-07	4,02	0,37
SELI-6 3,5-4,0	0,58	0,07	1021	4,6E-07	4,37	0,37
SELI-6 4,0-4,5	0,50	0,11	805	6,8E-08	3,90	0,56
SELI-6 4,5-5,25	0,69	0,09	810	5,6E-07	3,36	0,40
KAS-3 0,6-1,0	0,37	0,06	1265	1,0E-06	9,63	2,46
KAS-3 1,0-1,4	0,34	0,05	1424	9,9E-06	7,06	1,57
KAS-3 1,4-1,9	0,32			4,6E-06		
KAS-3 1,9-2,4	0,28			8,7E-06		
KAS-3 2,55-2,9	0,56	0,09	1001	3,0E-08	3,71	0,40
KAS-3 2,9-3,4	0,70	0,14	537	3,5E-08	1,48	0,14
SELI-4 1,2-1,7	0,79	0,13	605	1,1E-08	2,23	0,48
SELI-4 1,7-2,2	0,89	0,11	647	5,9E-08	1,91	0,36
SELI-4 2,2-2,7	0,68	0,08	889	1,4E-05	3,24	0,29
SELI-4 2,7-3,2	0,59	0,10	792	4,6E-06	2,45	0,19

Arvutatud kompressiooniindeksite (C_c) väärtused jäävad kõigi mõõdetud proovide hulgas vahemikku 1,48–9,79 1/kPa, kusjuures kõige suurem väärtus on Selisoo kõige pinnalähedaseimal proovil SELI-6 0,5-1,0, ning kõige väiksem väärtus on Kaasiksoos puuraugu kõige sügavamal proovil KAS-3 2,9-3,4. Kõige suurema varieeruvusega on uuringupunkti KAS-3 tulemused, kus C_c väärtused ulatuvad 1,48–9,36 1/kPa. SELI-6 mõõdetud C_c väärtused on vahemikus 3,36–9,79 1/kPa. Kõige väiksema amplituudiga muutuvad uuringupunktis SELI-4 saadud C_c mõõtmistulemused, saadud väärtused jäävad vahemikku 1,91–3,24 1/kPa. Taastumiskõverate põhjal arvutatud rekompresiooniindeksite (C_r) mõõtmistulemused varieeruvad väärtuste 0,14–2,64 1/kPa vahel. Uuringupunkti KAS-3 turbaproovide C_r tulemused on kõige suurema varieeruvusega (0,14–2,46 1/kPa), selle punkti turbaproovides mõõdeti C_r maksimum- ja miinimumväärtused vastavalt kõige pinnalähedasemas proovis KAS-3 0,6-1,0 ja kõige sügavamalt pärit proovis KAS-3 2,9-3,4. Uuringupunkti SELI-4 C_r väärtused ulatuvad 0,19–0,48 1/kPa-ni ning teise Selisoo uuringupunkti SELI-6 turbaproovide mõõdetud C_r väärtused kõiguvad 0,37–1,57 1/kPa vahel.

Kompressioonikatse iga koormamisetapi käigus mõõdetud vertikaalset deformatsiooni muutumist katse toimumise ajal näitlikustavad alltoodud graafikud (Joonis 8). Näidetena on toodud kaks uuringupunkti SELI-6 eri sügavuselt võetud proovi SELI-6 1,0-1,5 ja SELI-6 4,5-5,25, millel on erinev turbatüüp ning lagunemisaste. Vajumise erinevuste paremaks visualiseerimiseks on deformatsioon esitatud koormamisele eelneva deformatsiooni suhtes.

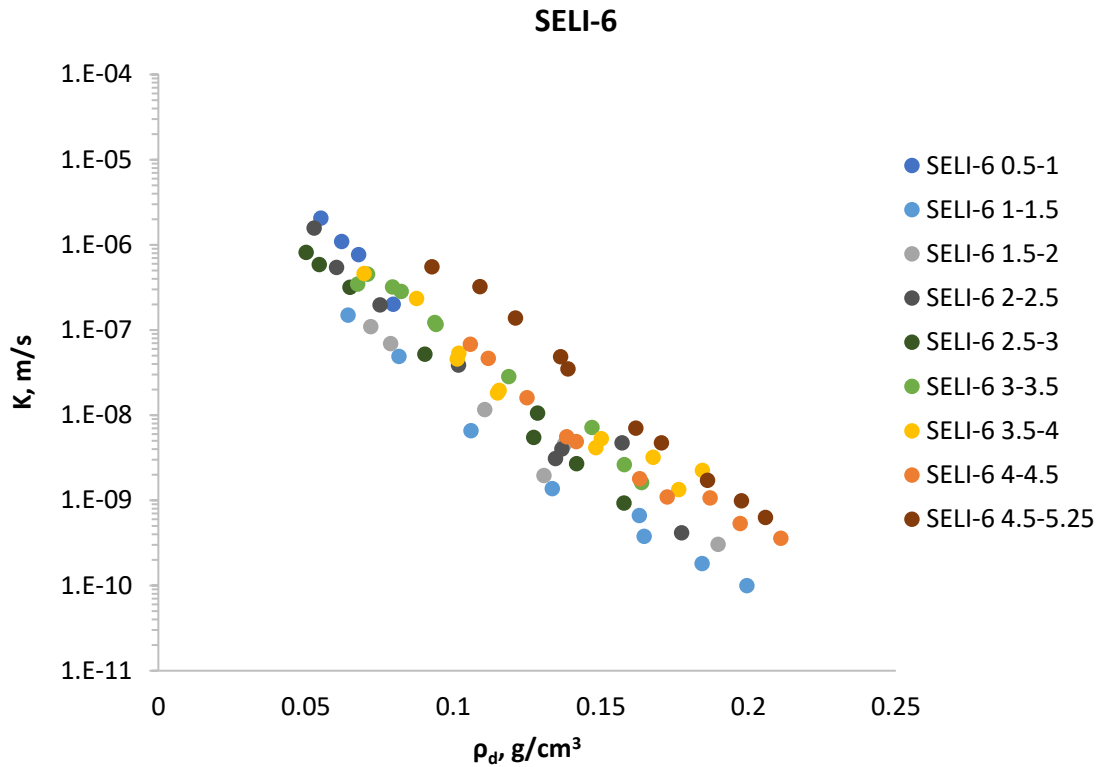


Joonis 8. Proovide SELI-6 1,0-1,5 ja SELI-6 4,5-5,25 deformatsiooni ja aja kõverad erinevatel koormamisetappidel.

Proovi SELI-6 1,0-1,5 puhul on tegemist rabaturbaga, mille intervallproovide põhjal määratud keskmine lagunemisaste on 0,39. Esimese koormusega (5,5 kPa) on suur osakaal primaarsel konsolidatsioonil (algne väikse langusega ja järsk löik) ning sekundaarset konsolidatsiooni (hiline väikse langusega löik) peaaegu ei toimu. Koormuste suurenedes aga primaarse konsolidatsiooni ulatus ning kiirus väheneb ja sekundaarse konsolidatsiooni osakaal suureneb. Samuti kaob koormuste suurenedes selge piir primaarse ja sekundaarse konsolidatsiooni etappide vahel. Proov SELI-6 4,5-5,25 on puuraugu kõige alumisest sügavusintervallist pärit pillirooturvas. Jällegi on esimese koormamise jooksul näha üleminek primaarselt konsolidatsioonilt sekundaarsele, kuid juba järgneva koormuse (11,1 kPa) juures ei ole võimalik enam sekundaarset konsolidatsiooni primaarsest eristada.

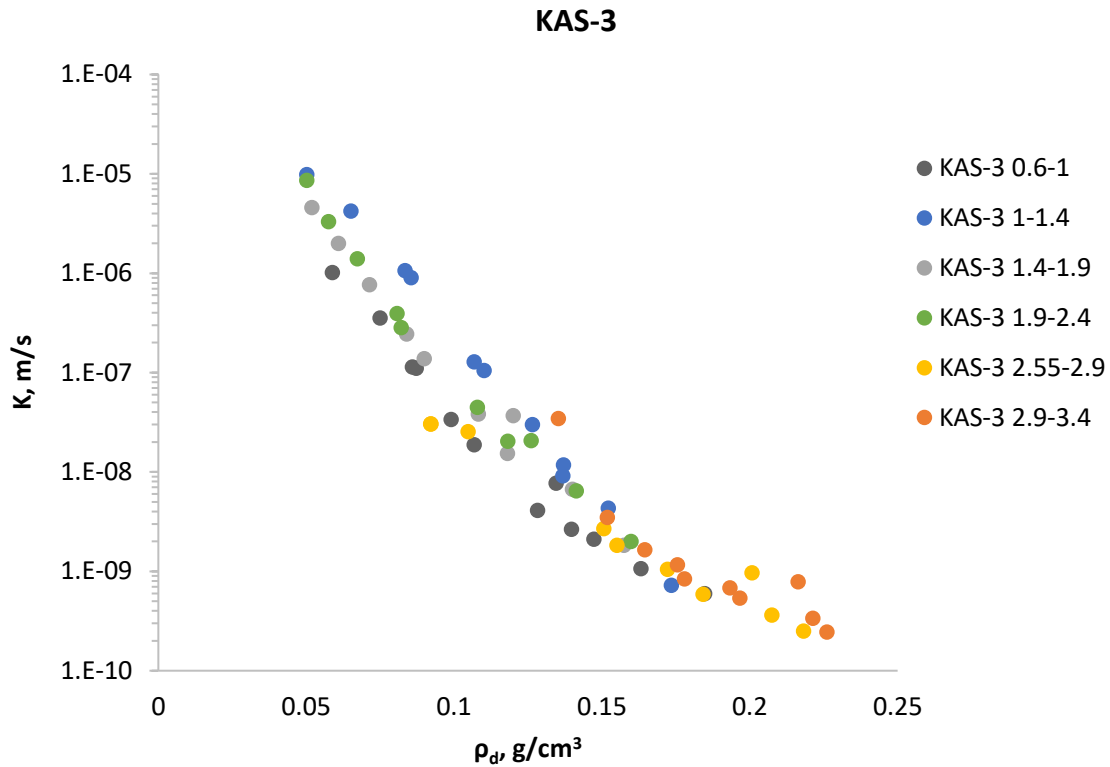
4.3. Filtratsioonikoefitsient

Enne kompressioonikatse esimese koormuse rakendamist viidi läbi alaneva veetasemega permeameetri katsed (va proovid SELI-6 0,5-1,0 ja SELI-6 1,5-2,0), mille detailsed tulemused iga proovi kohta on toodud Tabelis 3. Turbaproovide kompressioonikatsete eelselt mõõdetud filtratsioonikoefitsiendi (K) väärtused jäävad vahemikku $1,1 \cdot 10^{-8}$ – $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Lisaks tehti K mõõtmisi ka peale igat koormamisetappi, mõõtmistulemuste arvulised väärtused on toodud Lisas 5. Saadud tulemusi kirjeldavad Joonised 9–11. Kuna filtratsioonikoefitsiendi ja kuivtiheduse vahel on kokkusurumisel tugev seos, on graafikutel toodud filtratsioonikoefitsiendi muutus katseseeria jooksul kuivtiheduse suhtes.



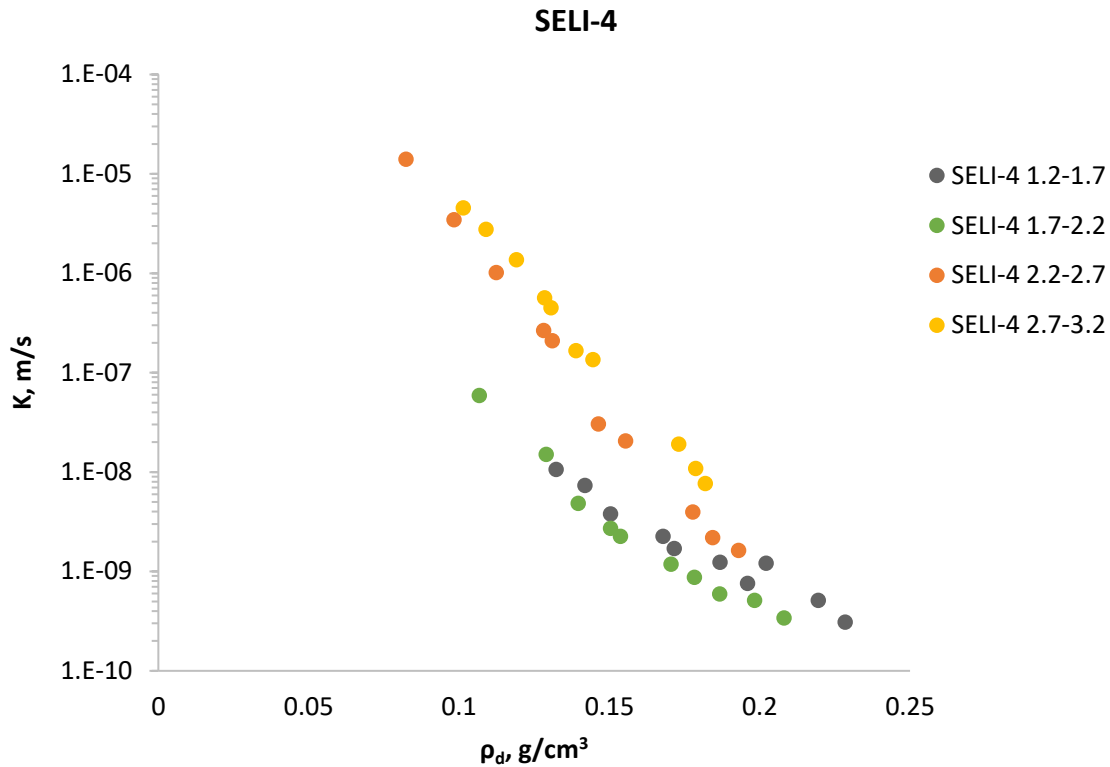
Joonis 9. Uuringupunkti SELI-6 turbaproovide filtratsioonikoefitsiendi sõltuvus kuivtihedusest.

Kompressioonikatsete jooksul mõõdetud Selisoo uuringupunkti SELI-6 proovide filtratsioonikoefitsientide (K) väärtused jäävad vahemikku $2,1 \cdot 10^{-6}$ – $9,9 \cdot 10^{-11}$ m/s ning kuivtiheduste väärtused vahemikku $0,05$ – $0,21$ g/cm³. Kõige suurema algse K -ga on proov SELI-6 0,5-1,0 ning kõige väiksemaga proov SELI-6 4,0-4,5, mis ühtlasi saavutab kompressioonikatse lõpuks suurima kuivtiheduse ($0,21$ g/cm³). Kõige suuremas ulatuses langeb proovi SELI-6 1,0-1,5 K väärtus (algsest $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s, lõpus $9,9 \cdot 10^{-11}$ m/s).



Joonis 10. Uuringupunkti KAS-3 turbaproovide filtratsioonikoefitsiendi sõltuvus kuivtihedusest.

Kaasiksoo uuringupunktist KAS-3 võetud proovide filtratsioonikoefitsiendi (K) väärtused jäävad vahemikku $9,9 \cdot 10^{-6}$ – $2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s, seejuures väärtused vähenevad kompressioonikatse jooksul. Samal ajal kasvab kuivtiheduse väärtus $0,05 \text{ g/cm}^3$ pealt $0,23 \text{ g/cm}^3$ -ni. Kõige suurema algse K väärtusega on läbilõike ülemisest osast pärit proov KAS-3 1,0-1,4 ($9,9 \cdot 10^{-6}$ m/s), mille K väärtus langes kompressioonikatse jooksul ka kõige suuremas ulatuses. Ülejäänud proovidest eristuvad selgelt madalsooturbast koosnevad proovid KAS-3 2,55-2,9 ja KAS-3 2,9-3,4 (vastavalt $3,0 \cdot 10^{-8}$ m/s ja $3,5 \cdot 10^{-8}$ m/s), mille algne K väärtus on teistest mitu suurusjärku väiksem. Nende puhul on ka filtratsioonikoefitsiendi langus katse käigus teistest, rabaturbast koosnevatest proovidest, väiksem.

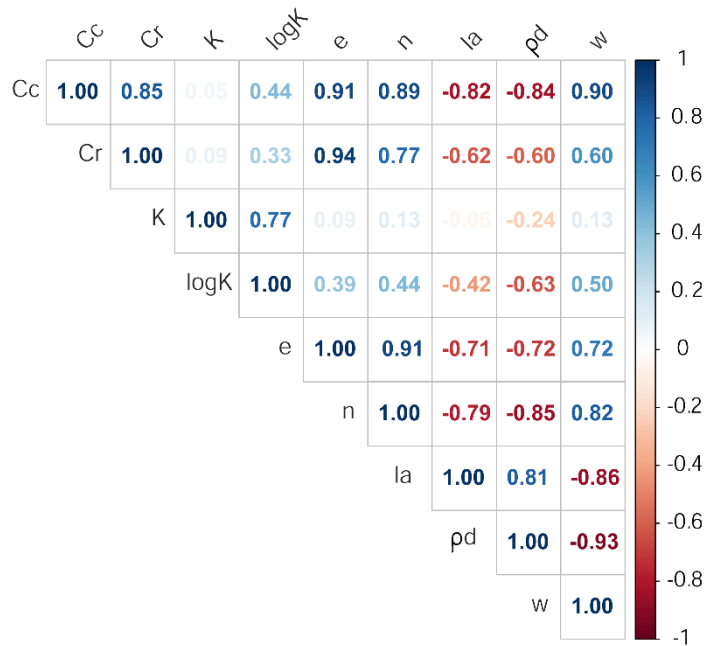


Joonis 11. Uuringupunkti SELI-4 turbaproovide filtratsioonikoefitsiendi sõltuvus kuivtihedusest.

Selisoo teises uuringupunktis SELI-4 muutuvad filtratsioonikoefitsiendi (K) väärtused kompressioonikatsete jooksul vahemikus $1,40 \cdot 10^{-5}$ – $3,09 \cdot 10^{-10}$ m/s, kuivtihedus muutub vahemikus 0,08–0,23 g/cm³. Kõige suurema algse K väärtusega on proov SELI-4 2,2-2,7, mille K väärtus langeb kompressioonikatse jooksul ka kõige suuremas ulatuses ($1,40 \cdot 10^{-5}$ – $1,63 \cdot 10^{-9}$ m/s). Kõige väiksema algse K väärtuse ja kompressioonikatse lõpuks kõige väiksema K väärtusega (vastavalt $1,07 \cdot 10^{-8}$ ja $3,09 \cdot 10^{-10}$ m/s) on proov SELI-4 1,2-1,7. Sarnaselt uuringupunktile KAS-3 on näha erinevus kõrgema ja madalama lagunemisastmega turvaste filtratsioonikoefitsiendi väärtuste languse vahel.

4.4. Seosed geotehniliste parameetrite ja füüsikaliste omaduste vahel

Arvutatud kompressiooni- ja rekompresiooniindeksite ning filtratsioonikoefitsiendi väärtuste ja füüsikaliste omaduste tulemuste omavaheliste seoste paremaks visualiseerimiseks ning hindamiseks on Joonisel 12 toodud korrelatsioonimaatriks. Korrelatsioonimaatriksi loomiseks kasutati 15 proovi mõõtmistulemusi, sest meetodika arendamisel ei mõõdetud kahe proovi algset filtratsioonikoefitsienti.



Joonis 12. Korrelatsioonimaatriks: kompressiooniindeks (Cc), rekompresiooniindeks (Cr), filtratsioonikoefitsient (K), filtratsioonikoefitsiendi kümnendlogaritm (logK), poorsustegur (e), poorsus (n), lagunemisaste (la), kuivtihedus (pd) ja veesisaldus (w).

Korrelatsioonimaatriksile tuginedes on kompressiooniindeksi puhul kõige suuremad seosed turba poorsusteguri ($r = 0,91$), poorsuse ($r = 0,89$) ja veesisaldusega ($r = 0,90$). Poorsusteguri leidmine on aga keerulisem kui veesisalduse või kuivtiheduse väärtuste leidmine. Tugevamaid seoseid on ka näha kompressiooniindeksi ning turba kuivtiheduse ($r = -0,84$) või lagunemisastme ($r = -0,82$) vahel. Rekompresiooniindeksi puhul on olemas tugev seos poorsusteguri ($r = 0,94$) ning poorsusega ($r = 0,77$), kuid selgeid seoseid lihtsamini leitavate füüsikaliste omadustega, nagu veesisaldus, kuivtihedus või lagunemisaste, välja ei tule. Küll aga on rekompresiooniindeksil olemas tugev positiivne seos kompressiooniindeksiga ($r = 0,85$). Kuna filtratsioonikoefitsiendi väärtused varieeruvad mitme suurusjärgu suurus vahemikus, ei ole antud väärtusel teiste parameetritega tugevat seost. Seega transformeeriti filtratsioonikoefitsiendi väärtus kümnendlogaritmi. Transformeeritud väärtuse puhul on näha, et filtratsioonikoefitsiendil on kõigi parameetritega keskmine seos, neist selgeim on seos kuivtihedusega ($r = -0,63$).

5. Arutelu

Käesolevas uurimistöös tulevad välja turba kompressiooniomaduste ja füüsikaliste omaduste vahelised seosed. Saadud tulemused sarnanevad varem avaldatud tulemustele, kus parimad seosed on turba kompressiooniindeksil poorsusteguri, veesisalduse ning kuivtihedusega (Kogure & Ohira, 1977). Kuigi omaduste korrelatsioonimaatriksist selgus, et tugevaim seos on kompressiooniindeksi ja poorsusteguri vahel (Joonis 12), kasutati lineaarse regressioonimudeli koostamisel veesisaldust. Esiteks näitas veesisaldus peaaegu sama tugevat seost kui poorsustegur (Joonis 12). Teiseks on veesisaldust lihtsam määrata kui poorsustegurit, eriti rikutud struktuuriga proovide puhul, kuna poorsustegur sõltub rohkem pooriruumi ruumala määramise täpsusest. Seega on kompressiooniindeksi ja veesisalduse vahelise seose põhjal valminud mudelit lihtsam rakendada.

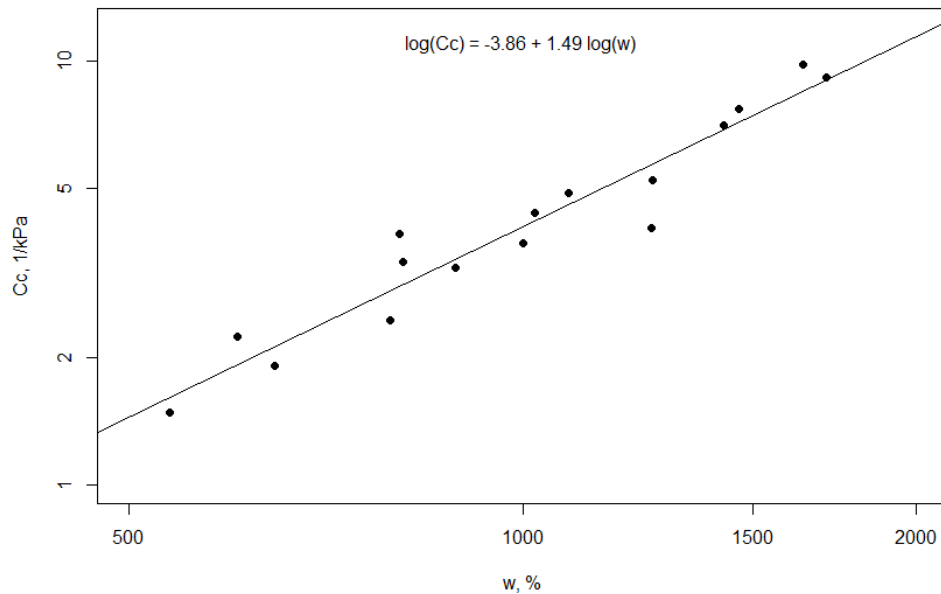
Tugeva suhte põhjal turba kompressiooniindeksi ja veesisalduse vahel loodi lineaarne regressioonimudel (Valem 8), kus kompressiooniindeksit seletav muutuja on veesisaldus (w) (Joonis 13). Mudeli loomisel katsetati ka erinevaid teisi parameetreid kasutavaid mitme muutujaga mudeleid, kuid kõige parem ennustusvõime ja väikseim p -väärtus ($2,36 \cdot 10^{-9}$) saadi antud mudelile. Kuigi juba algse korrelatsioonikordaja väärtus parameetrite vahel oli hea, võeti kümnendlogaritmi nii kompressiooniindeksi kui ka veesisalduse väärtused. Väärtused transformeeriti, kuna mõlema parameetri varieeruvus on suur, mistõttu paraneb transformeerides mudeli ennustusvõime. Mudeli tulemused on toodud Tabelis 4. Valminud mudeli parandatud determinatsioonikordaja väärtuseks saadi 0,92, mis näitab, et saadud mudel kirjeldab 92% kompressiooniindeksi varieeruvusest.

$$\log(C_c) = -3,86 + 1,49 \times \log(w)$$

Valem 8

Tabel 4. Lineaarse regressioonimudeli tulemused, veesisalduse (w) logaritmi ja löikepunkt, $R^2 = 0,92$.

Muutuja	Koefitsient	Standardhälve	p-väärtus
Log(w)	1.49	0.11	2.36E-09
Löikepunkt	- 3.86	-0.34	1.58E-08

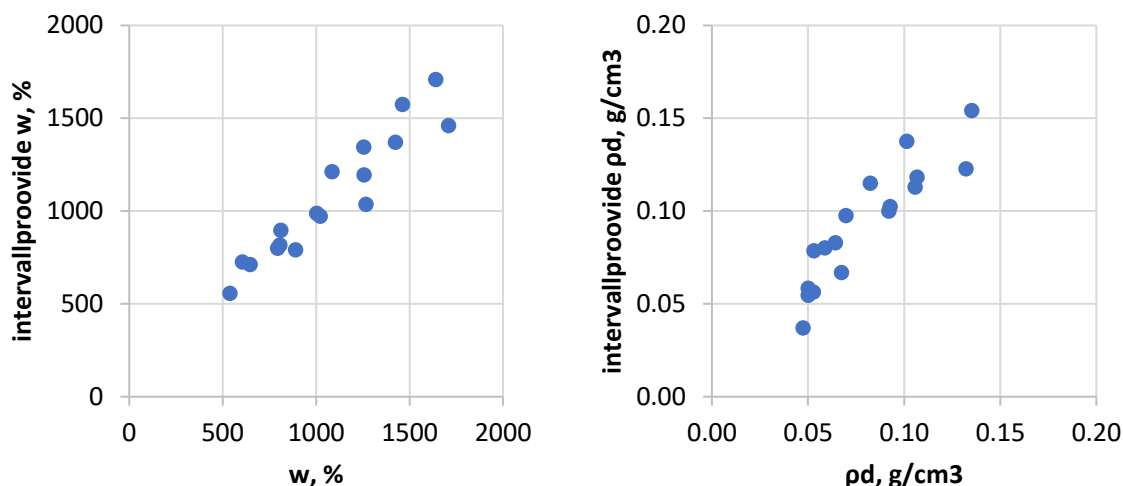


Joonis 13. Suhe kompressiooniindeksi ja veesisalduse vahel.

Koostatud mudel erineb mõnevõrra teiste autorite loodud mudelitest (Kogure & Ohira, 1977; Mesri & Ajlouni, 2007), mis hindavad käesolevas töös saadud veesisalduste juures kompressiooniindeksit üle. Seega tuleb arvestada, et turvas on väga suure omaduste varieeruvusega materjal, mille tõttu võivad tulla sisse ka erinevused piirkondlike omapärade tõttu.

Kuigi rekompresiooniindeksi puhul on olemas tugev seos poorsusteguri, poorsuse ja kompressiooniindeksiga, ei tule rekompresiooniindeksi seosed lihtsamini leitavate füüsikaliste omaduste või nende kombinatsioonidega käesoleva töö põhjal nii hästi välja, seetõttu vajaks see protsess edaspidi täpsemat kirjeldamist.

Lisaks leiti uurimistöö käigus peale katseseeria lõppu ödomeetri proovidele tagasiarvutuslikult määratud algsete kuivtiheduse ja veesisalduse väärtuste ka intervallproovide põhjal kuivtiheduse ja veesisalduse väärtuste keskmised vastavatele sügavusvahemikele. Järgnevatel graafikutel (Joonis 14) on kujutatud looduslikus seisundis intervallproovide ja ödomeetri proovide kuivtiheduse ja veesisalduse kokkulangevust.



Joonis 14. Intervallproovide ja ödomeetrikatse proovide veesisalduse (w) ja kuivtiheduse (ρ_d) võrdlus.

Veesisaldused langevad paremini kokku kui kuivtihedused, mille puhul on intervallproovide põhjal arvutatud vahemiku keskmised väärtused suures osas suuremad ödomeetri katse tagasiarvutuslikest tulemustest. Kuna veesisaldus sõltub vaid mõõdetud massidest, on veesisalduse väärtus väiksema veaga kui kuivtiheduse väärtus, mille puhul sõltub väärtus ka ruumala määramise täpsusest ning seetõttu võivad intervallproovidel tulenevalt kasutatud meetodikast suuremad vead sisse tulla. Kuna töö tulemusena saadud kompressiooniindeksi arvutamise mudel hindab kompressiooniindeksi väärtust veesisalduse suhtes, võiks uurimuse põhjal valminud mudel ka looduslikus seisus turba kompressiooniomaduste kirjeldamiseks sobida.

Algse filtratsioonikoefitsiendi ja lihtsasti leitavate füüsikaliste omaduste nagu veesisaldus, kuivtihedus või lagunemisaste ning nende kombinatsioonide vahel tugev korrelatsioon puudub. Keskmise negatiivne seos ($r = -0,63$) on olemas filtratsioonikoefitsiendi logaritmi ja kuivtiheduse vahel. Tugevate seoste puudumine võib tuleneda asjaolust, et materjali segati enne katseanumasse asetamist läbi ja seetõttu ei olnud turbamass ühtlaselt ödomeetri rõngas jaotunud ning katsekeha ei olnud jõudnud enne katse läbiviimist stabiliseeruda. Kompressioonikatse jooksul on aga selgelt näha filtratsioonikoefitsiendi sõltuvust turba kuivtihedusest, vähenedes kokkusurumisel eksponentsiaalselt (De Guzman & Alfaro, 2018; Sarap, 2020; Wong et al., 2009). Filtratsioonikoefitsiendi ja kuivtiheduse sõltuvuse graafikutel on näha ka erinevate turbaproovide filtratsioonikoefitsiendi erinev käitumine kompressiooniseeria jooksul. Kõrgemate lagunemisastmetega proovidel SELI-4 1,2-1,7, SELI-4 1,7-2,2 ja KAS-3 2,55-2,9 ja KAS-3 2,9-3,4 on filtratsioonikoefitsiendi kahanemine väiksem kui väiksema lagunemisastmega turbaproovide puhul (Joonised 10 ja 11).

Filtratsioonikoefitsiendi ja kuivtiheduse muutumine kokkusurumisel on omavahel seotud (Joonised 9–11). Koormamisel väheneb turba pooriruum, mistõttu kuivtihedus kasvab. Koormuse eemaldamisel toimub elastse deformatsiooni arvelt vastupidine, kuid väiksema amplituudiga protsess – poorsus suureneb ja kuivtihedus väheneb. Seega võivad kuivtiheduse ja poorsusteguri väärtused olla sama efektiivpinge juures erinevad, olenevalt sellest, milline on olnud varasemalt turbale mõjunud koormus (Joonis 7). Filtratsioonikoefitsient käitub sarnaselt kuivtihedusele, muutudes seejuures vastupidiselt, mis viitab samadele kontrollivatele teguritele. Koormuse kasvades filtratsioonikoefitsiendi väärtus kahaneb ja koormuse eemaldamisel filtratsioonikoefitsiendi väärtus kasvab, kuid väiksema amplituudiga. Filtratsioonikoefitsiendi kahanemine ja kuivtiheduse kasv käituvad selliselt koormamisel konkreetse proovi puhul, mis tuleneb sellest, et sõltuvalt koostisest, lagunemisastmest ja varasemalt mõjunud koormusest on filtratsioonikoefitsiendi ja kuivtiheduse graafikute lähtepunkt erinev (mälu efekt).

Deformatsiooni ja aja kõveratel (Joonis 8) on näha, et turvaste puhul primaarse konsolidatsiooni osakaal väheneb ja sekundaarse konsolidatsiooni osakaal koormuste suurenedes kasvab. Seda nähtust kinnitavad ka koormamiskatsete vahel tehtud filtratsioonikoefitsiendi mõõtmised: kui filtratsioonikoefitsient kahaneb, siis ka primaarse konsolidatsiooni kiirus väheneb, kuna primaarse konsolidatsiooni kiirus sõltub sellest, kui kiiresti vesi pooriruumist välja liigub. Kuna käesoleva uurimuse eesmärgiks oli leida ja üldistada suurema hulga erinevate turbaproovide seoseid kompressiooniomaduste ja füüsikaliste omaduste vahel, siis seda efekti detailselt ei kirjeldatud ning see asjaolu vajaks edaspidi täpsemat käsitlemist.

Kuna turvas on suuresti kokkusurutav materjal, ei olnud kasutatud meetodika turvaste sekundaarse konsolidatsiooni hindamiseks kõige optimaalsem. Esiteks oleks vaja sekundaarse konsolidatsiooni algushetke ja kiiruse täpsemaks hindamiseks teha ajalise kestvuse poolest pikemaid katseid, kuna suurema lagunemisastmega ja kuivtihedusega proovide ning väiksema lagunemisastmega proovide puhul suuremate koormuste juures ei tule primaarse ja sekundaarse konsolidatsiooni piir selgelt välja (Joonis 8). Samuti tekkis probleem katse tehnilise poolega: suurema kokkusurutavusega proovide puhul vajus ödomeetri koormust kandev haar vastu alumist raami, mis piiras katse jooksul tekkiva maksimaalse deformatsiooni ulatust umbes 4,5 mm-ni. Kui koormamisetapi jooksul tekkiv deformatsioon oli sellest suurem, tuli haara katse ajal tõsta. Mõlemad liigutamised tekitasid aga nii kompressioonikõveratel kui deformatsiooni ja aja logaritmi kõveratel defekte ning ebatäpsusi.

Kokkuvõte

Käesoleva töö käigus viidi läbi kompressiooni- ning filtratsiooniomaduste määramise katsed Kaasiksoost ja Selisoost pärit 19 turbaprooviga. Lisaks määrati nende turvaste füüsikalisi omadusi nii katsejärgselt tagasiarvutuslikult kui ka rikkumata kujul läbilõiget kirjeldavatest intervallproovidest. Uurimuse tulemusena kirjeldati turba käitumist kokkusurumisel ning saadud geotehniliste parameetrite tulemusi ja seoseid geotehniliste parameetrite ning füüsikaliste omaduste vahel. Saadud tulemuste põhjal prooviti leida lihtsamaid viise, kuidas vajumisarvutusteks vajalikke parameetreid määrata.

Töö tulemuste põhjal tehti järgnevad järeldused:

1. Läbiviidud ödomeetri ja langeva tasemega permeameetri katsete tulemused sarnanevad varasemates töodes väljatooduga. Määratud kompressiooniindeksid väärtused on võrreldes mineraalsete pinnastega oluliselt suuremad, jäädes vahemikku 1,48–9,79 1/kPa. Rekompresiooniindeksid jäävad vahemikku 0,14–2,64 1/kPa. Filtratsioonikoefitsiendi algsed väärtused on samuti varasemate tulemustega võrreldavad, kõikides vahemikus $1,07 \cdot 10^{-8}$ – $1,40 \cdot 10^{-5}$ m/s.
2. Tugevale kompressiooniindeksi ja veesisalduse suhtele tuginev mudel hindab kompressiooniindeksi väärtust veesisalduse suhtes, mille puhul langesid intervallproovide põhjal saadud keskmised väärtused ja ödomeetri katse põhjal arvutatud väärtused suhteliselt hästi kokku. Seega võiks uurimuse põhjal valminud mudel ka looduslikus seisus turba kompressiooniindeksi kirjeldamiseks sobida.
3. Rekompresiooniindeksi puhul leiti tugev seos poorsusteguri, poorsuse ning kompressiooniindeksiga, kuid kuna rekompresiooniindeksi seosed lihtsamini leitavate füüsikaliste omaduste või nende kombinatsioonidega käesoleva uurimuse põhjal nii hästi välja ei tule, vajab see protsess edaspidi täpsustamist.
4. Algse filtratsioonikoefitsiendi ja füüsikaliste omaduste, nagu veesisaldus, kuivtihedus või lagunemisaste, vahel tugevat korrelatsiooni ei leitud. Selleks tuleks teha katseid rikkumata struktuuriga proovidega, mis võimaldaks arvestada proovile varasemalt mõjunud koormuste ja seetõttu toimunud konsolidatsiooniga. Suuremõõtmeliste rikkumata struktuuriga proovide võtmine turbast, eriti lasundi sügavamast osast, on aga väga raske.

5. Kokkusurumise jooksul ilmneb filtratsioonikoefitsiendi ja kuivtiheduse vahel tugev sõltuvus, kus kokkusurumisel kuivtiheduse kasvades turba filtratsioonikoefitsient kahaneb eksponentsiaalselt, mis viitab samadele kontrollivatele teguritele.
6. Kasutatud meetodika tõttu ei olnud võimalik sekundaarset konsolidatsiooni väga täpselt kirjeldada ning see vajab käsitlemist edaspidistes uuringutes.

Summary

Geotechnical properties of peat and their relation to physical properties

Laboratory testing was conducted to determine the compression and permeability characteristics of 19 peat samples collected from two Estonian bogs, Selisoo and Kaasiksoo. In addition, the physical properties of both undisturbed samples and samples collected for consolidation and permeability tests were determined. In this thesis, the compressibility and filtration characteristics of different types of peat were described. The relationship of these geotechnical parameters to more easily measured physical properties (i.e., water content, bulk density and degree of humification) was analyzed in order to introduce easier methods to estimate the parameters needed for settlement predictions.

The following conclusions can be drawn from the results:

1. The results of oedometer and permeability tests are comparable to previous studies. The compression indices are relatively high compared to mineral soils, varying from 1,48 to 9,79 1/kPa. The recompression indices vary in the range 0,14–2,64 1/kPa. Calculated values of coefficient of permeability also vary in a comparable range: from $1,07 \cdot 10^{-8}$ to $1,40 \cdot 10^{-5}$ m/s.
2. Based on a strong correlation between the compression index and water content a linear regression model was created to evaluate the compression index based on water content. Although the samples in oedometer tests were disturbed, this model could be used to evaluate the compression indices of undisturbed samples, as the water content values measured in the undisturbed interval samples and in the oedometer samples were comparable.
3. As the correlations between recompression index and water content, bulk density, degree of humification or their combinations were moderate, this process needs further investigation.
4. The relation between coefficient of permeability and physical properties such as water content, bulk density and degree of humification were not strong. Further investigation is needed using undisturbed samples, which would also consider previous consolidation. However, collecting large-scale samples, especially from the deeper layers of a peat deposit, is complicated.

5. Based on the measurements conducted during the compression tests, there is a strong correlation between bulk density and coefficient of permeability. When the bulk density increases during the compression of the material, the coefficient of permeability decreases exponentially, which implies that both are controlled by the same factors.
6. Due to the limitations of the used method, the secondary consolidation of peat could not be described accurately, this phenomenon needs further investigation.

Tänuavaldused

Soovin tänada kõiki, kes käesoleva töö valmimisele kaasa aitasid.

Suur tänu töö juhendajatele Raul Paadile, Argo Jõehele ja Annette Talpsepale põneva idee, praktiliste ja teoreetiliste nõuannete ning abivalmiduse ja toetuse eest.

Kasutatud kirjandus

- Adams, J., I. (1965). The Engineering Behaviour of a Canadian Muskeg. *Sixth International Conference on Soil Mechan- Ics and Foundation Engineering*, 3–7.
- Augustesen, A., Liingaard, M., Lade, P. V., & Asce, M. (2004). Evaluation of Time-Dependent Behavior of Soils Evaluation of Time-Dependent Behavior of Soils. *International Journal of Geomechanics*, 3641(September).
- Bahnsen, H. (1968). Kolorimetriske bestemmelser af humificer- ingstal i højmosetørv fra Fuglsø mose på Djursland. *Meddelelser Fra Dansk Geologisk Forening*, 18, 55–63.
- Boelter, D. H. (1969). Physical Properties of Peats as Related to Degree of Decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 33, 606–609.
- Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical engineering* (M. Horton, Ed.). Upper Saddle River: Prentice-Hall.
- De Guzman, E. M. B., & Alfaro, M. C. (2018). Geotechnical properties of fibrous and amorphous peats for the construction of road embankments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(7), 1–12.
- Dhowian, A. W., & Edil, T. B. (1980). Consolidation Behavior of Peats. *Geotechnical Testing Journal*, 3(3), 105–114.
- Edil, T. B., & Dhowian, A. W. (1979). Analysis of Long-term Compression of Peats. *Geotechnical Engineering*, 10.
- Fox, P. J., Edil, B., & Li-Tus, L. (1992). Ca/Cc concept to Compression of Peat. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(8), 1256–1263.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Gofar, N., & Sutejo, Y. (2007). Long Term Compression Behavior of Fibrous Peat. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 14–26.
- Hang, T., Hiiemaa, H., Jõelet, A., Kalm, V., Karro, E., Kirt, M., Kohv, M., Marandi, A. (2009). Selisoo hüdrogeoloogilised uuringud kaevandamise mõju selgitamiseks. Tartu Ülikool,

Geoloogia osakond.

- Kazemian, S., Huat, B. B. K., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). A state of art review of peat: Geotechnical engineering perspective. *International Journal of Physical Sciences*, 6(8), 1974–1981.
- Kogure, K., & Ohira, Y. (1977). Statistical Forecasting of Compressibility of Peaty Ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(4), 562–570.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. In *Ostigov*. New York.
- Letts, M. G., Roulet, N. T., Comer, N. T., Skarupa, M. R., Versegny, D. L., Letts, M. G., ... Comer, N. T. (2010). Parametrization of Peatland Hydraulic Properties for the Canadian Land Surface Scheme. *Atmosphere-Ocean*, 5900.
- Loudon, A. G. (1952). The computation of permeability from simple soil tests. *Geotechnique*.
- Mesri, G., & Ajlouni, M. (2007). Engineering properties of fibrous peats. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 850–866.
- Mohamad, H. M., Zainorabidin, A., & Musta, B. (2021). Compressibility behaviour and engineering properties of North Borneo Peat Soil. *Eurasian Journal of Soil Science*, 10(3), 259–268.
- Orru, M. (1995). *Eesti turbasood*. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- Paat, R., Jõelett, A., Kohv, M., Polikarpus, M., 2020. Põlevkivi piirkonna soode rajoneerimine. Aruanne. Tartu Ülikool.
- Päivänen, J. (1973). Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica*, 129, 41.
- Rusanov, F. (2016). *Turba tehniliste näitajate analüüsi meetodika väljatöötamine , nende seosed turba omaduste muutuste ja kasutusalaadega*. Tallinna Tehnikaülikool.
- Sarap, G. S. (2020). *Turba filtratsioonikoefitsiendi muutuse uurimine järk - järgulisel tihendamisel kasutades modifitseeritud permeameetrit*. Tartu Ülikool.

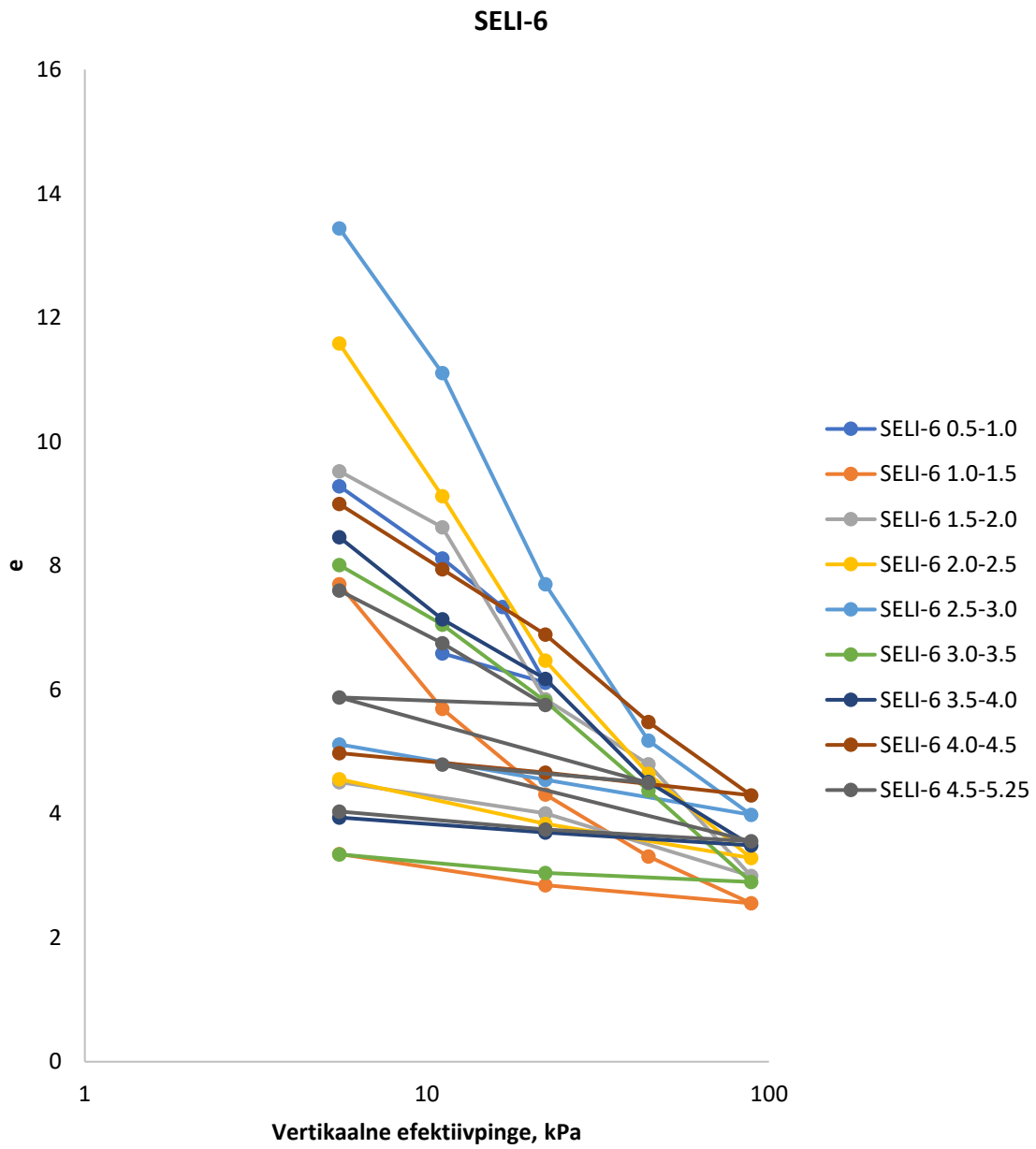
- Shibchum, A., Van Geel, P. J., & Kennedy, P. L. (2005). Impact of density on the hydraulic properties of peat and the time domain reflectometry (TDR) moisture calibration curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 279–286.
- Tunar Özcan, N., Ulusay, R., & Işık, N. S. (2020). Geo-engineering characterization and an approach to estimate the in-situ long-term settlement of a peat deposit at an industrial district. *Engineering Geology*, 265(February 2019), 105329.
- Wilkinson, S. L., & Tekatch, A. M. (2016). Fiber Effects on Compressibility of Peat. *Soft Soil Engineering International Conference*, 9.
- Wong, L. S., Hashim, R., & Ali, F. H. (2009). A review on hydraulic conductivity and compressibility of peat. *Journal of Applied Sciences*, 9(18), 3207–3218.
- Xu, J., Morris, P. J., Liu, J., & Holden, J. (2018). PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160(April 2017), 134–140.
- Yulindasari. (2006). *Compressibility Characteristics of Fibrous Peat Soil*. Universiti Teknologi Malaysia.
- Zainorabidin, A., & Wijeyesekera, D. (2008). Geotechnical Characteristics of Peat. *Proceedings of the Advances in Computing and Technology 3rd Annual Conference*, (January), 71–78.

Lisa 1. Intervallproovide lagunemisastme, ρ_d ja w väärtused

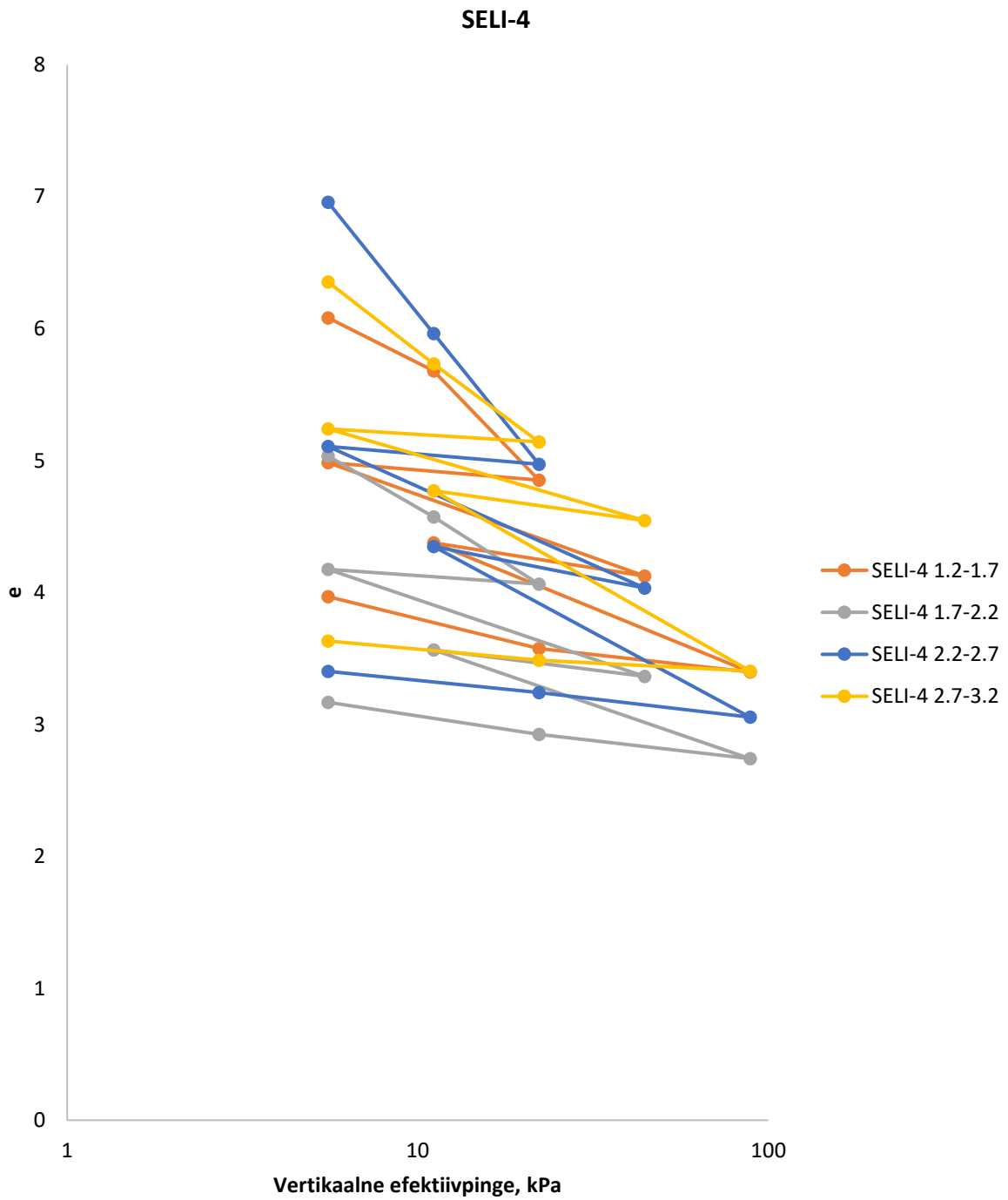
	Sügavus, m	ρ_d , g/cm ³	w , %	Lagunemisaste
SELI-6	0,05	0,033	1210	0,23
	0,15	0,047	1317	0,18
	0,25	0,050	972	0,26
	0,35	0,052	1255	0,22
	0,45	0,056	1086	0,36
	0,55	0,051	1472	0,27
	0,65	0,037	1620	0,21
	0,75	0,035	1797	0,16
	0,85	0,033	1918	0,13
	0,95	0,031	1737	0,23
	1,05	0,045	1836	0,25
	1,15	0,091	1010	0,42
	1,25	0,092	1018	0,46
	1,35	0,105	989	0,47
	1,45	0,082	1212	0,36
	1,55	0,074	1358	0,35
	1,65	0,065	1612	0,48
	1,75	0,086	1102	0,53
	1,85	0,092	841	0,54
	1,95	0,076	1063	0,49
	2,05	0,053	1438	0,44
	2,15	0,056	1637	0,38
	2,25	0,057	1629	0,39
	2,35	0,057	1625	0,29
	2,45	0,059	1547	0,43
	2,55	0,052	1511	0,34
	2,65	0,047	1768	0,29
	2,75	0,068	1092	0,33
	2,85	0,060	1490	0,33
	2,95	0,045	1445	0,45
	3,05	0,064	1342	0,45
	3,15	0,054	1587	0,29
	3,25	0,072	1196	0,48
	3,35	0,064	1416	0,48
	3,45	0,081	1188	0,40
	3,55	0,062	1425	0,33
	3,65	0,079	1224	0,56
	3,75	0,107	816	0,60
	3,85	0,125	731	0,68
	3,95	0,114	668	0,73
	4,05	0,102	742	0,83
	4,15	0,120	770	1,02
	4,25	0,124	811	0,74
	4,35	0,109	904	0,72
	4,45	0,109	859	0,78
	4,55	0,112	856	0,76
	4,65	0,115	848	0,75
	4,75	0,106	866	0,75
	4,85	0,093	939	0,58
	4,95	0,084	960	0,72
	5,05	0,111	894	0,61
	5,15	0,097	912	0,69

KAS-3	0,55	0,019	1502	0,16
	0,65	0,070	1045	0,32
	0,75	0,095	836	0,43
	0,85	0,087	977	0,43
	0,95	0,069	1290	0,29
	1,05	0,061	1151	0,37
	1,15	0,060	1440	0,28
	1,25	0,060	1335	0,36
	1,35	0,052	1559	0,34
	1,45	0,040	1449	0,40
	1,55	0,056	1527	0,36
	1,65	0,051	1472	0,34
	1,75	0,058	1479	0,27
	1,85	0,044	1486	0,21
	1,95	0,047	1629	0,35
	2,05	0,065	1448	0,28
	2,15	0,064	1408	0,20
	2,25	0,049	1496	0,30
	2,35	0,041	1778	0,27
	2,45	0,046	1833	0,28
	2,55	0,062	1555	0,38
2,65	0,098	918	0,62	
2,75	0,112	778	0,60	
2,85	0,128	702	0,64	
2,95	0,142	635	0,61	
3,05	0,146	629	0,66	
3,15	0,160	525	0,74	
3,25	0,173	489	0,84	
3,35	0,150	509	0,64	
SELI-4	1,05	0,084	906	0,43
	1,15	0,078	1086	0,55
	1,25	0,082	981	0,49
	1,35	0,122	702	0,78
	1,45	0,131	621	0,86
	1,55	0,127	666	0,83
	1,65	0,152	664	1,00
	1,75	0,126	633	0,95
	1,85	0,131	602	1,02
	1,95	0,108	764	0,91
	2,05	0,112	765	0,87
	2,15	0,114	805	0,73
	2,25	0,119	567	0,81
	2,35	0,116	868	0,67
	2,45	0,113	860	0,58
	2,55	0,114	803	0,65
	2,65	0,113	864	0,69
	2,75	0,119	794	0,62
	2,85	0,108	779	0,67
	2,95	0,098	849	0,57
3,05	0,119	806	0,53	
3,15	0,115	777	0,57	
3,25	0,249	306	0,66	

Lisa 2. SELI-6 kompressioonigraafikud



Lisa 4. SELI-4 kompressioonigraafikud



Lisa 5. Koormamiskatsete jooksul mõõdetud K väärtused

Proov	ϵ , kPa	ρ_d , g/cm ³	K, m/s
SELI-6 0.5-1		0,047	
	5,55	0,055	2,1E-06
	11,09	0,062	1,1E-06
	16,64	0,068	7,7E-07
	22,18	0,080	2,0E-07
	11,09	0,075	
SELI-6 1-1,5		0,064	1,5E-07
	5,55	0,082	4,9E-08
	11,09	0,106	6,6E-09
	22,18	0,133	1,4E-09
	44,37	0,165	3,8E-10
	88,73	0,199	1,0E-10
	22,18	0,184	1,8E-10
	5,55	0,163	6,7E-10
SELI-6 1,5-2		0,053	
	5,55	0,072	1,1E-07
	11,09	0,079	7,0E-08
	22,18	0,111	1,2E-08
	44,37	0,131	2,0E-09
	97,78	0,190	3,1E-10
	26,71	0,151	
	5,55	0,138	4,6E-09
SELI-6 2-2,5		0,053	1,6E-06
	5,55	0,060	5,4E-07
	11,09	0,075	2,0E-07
	22,18	0,102	3,9E-08
	44,37	0,135	3,1E-09
	88,73	0,177	4,2E-10
	22,18	0,157	4,8E-09
	5,55	0,137	4,0E-09
SELI-6 2,5-3		0,050	8,1E-07
	5,55	0,054	5,9E-07
	11,09	0,065	3,2E-07
	22,18	0,090	5,2E-08
	44,37	0,127	5,5E-09
	88,73	0,158	9,3E-10
	22,18	0,142	2,7E-09
	5,55	0,129	1,1E-08
SELI-6 3-3,5		0,067	3,5E-07
	5,55	0,071	4,6E-07
	11,09	0,079	3,2E-07
	5,55	0,082	2,8E-07
	22,18	0,094	1,2E-07
	11,09	0,094	1,2E-07
	44,37	0,119	2,8E-08
	88,73	0,164	1,6E-09
	22,18	0,158	2,6E-09
	5,55	0,147	7,2E-09
	SELI-6 3,5-4		0,070
5,55		0,088	2,3E-07
11,09		0,102	5,3E-08
5,55		0,101	4,6E-08
22,18		0,115	2,0E-08

	11,09	0,115	1,8E-08
	44,37	0,150	5,3E-09
	22,18	0,148	4,2E-09
	97,78	0,184	2,3E-09
	26,71	0,176	1,3E-09
	5,55	0,168	3,2E-09
SELI-6 4-4,5		0,106	6,8E-08
	5,55	0,112	4,7E-08
	11,09	0,125	1,6E-08
	22,18	0,142	4,9E-09
	5,55	0,138	5,6E-09
	44,37	0,172	1,1E-09
	11,09	0,163	1,8E-09
	88,73	0,211	3,6E-10
	22,18	0,197	5,4E-10
	5,55	0,187	1,1E-09
SELI-6 4,5-5,25		0,093	5,6E-07
	5,55	0,109	3,2E-07
	11,09	0,121	1,4E-07
	22,18	0,139	3,5E-08
	5,55	0,136	4,9E-08
	44,37	0,171	4,7E-09
	11,09	0,162	7,1E-09
	88,73	0,206	6,3E-10
	22,18	0,198	9,9E-10
	5,55	0,186	1,7E-09
KAS-3 0,6-1		0,059	1,0E-06
	5,55	0,075	3,5E-07
	11,09	0,087	1,1E-07
	5,55	0,086	1,1E-07
	22,18	0,107	1,9E-08
	5,55	0,099	3,4E-08
	44,37	0,140	2,7E-09
	22,18	0,128	4,1E-09
	88,73	0,185	6,0E-10
	22,18	0,163	1,1E-09
	5,55	0,134	7,7E-09
	22,18	0,147	2,1E-09
KAS-3 1-1,4		0,050	9,9E-06
	5,55	0,065	4,2E-06
	11,09	0,085	9,1E-07
	5,55	0,083	1,1E-06
	22,18	0,110	1,1E-07
	11,09	0,107	1,3E-07
	44,37	0,137	9,2E-09
	22,18	0,137	1,2E-08
	88,73	0,173	7,3E-10
	22,18	0,152	4,3E-09
	5,55	0,126	3,0E-08
KAS-3 1,4-1,9		0,052	4,6E-06
	5,55	0,061	2,0E-06
	11,09	0,071	7,7E-07
	22,18	0,090	1,4E-07
	5,55	0,084	2,5E-07
	44,37	0,118	1,5E-08
	11,09	0,108	3,8E-08
	88,73	0,157	1,8E-09

	22,18	0,140	6,7E-09
	3,33	0,120	3,7E-08
KAS-3 1,9-2,4		0,050	8,6E-06
	5,55	0,057	3,3E-06
	11,09	0,067	1,4E-06
	22,18	0,082	2,8E-07
	5,55	0,081	3,9E-07
	44,37	0,118	2,0E-08
	11,09	0,108	4,5E-08
	88,73	0,160	2,0E-09
	22,18	0,141	6,5E-09
	3,33	0,126	2,1E-08
KAS-3 2,55-2,9		0,092	3,0E-08
	5,55	0,092	3,1E-08
	11,09	0,105	2,6E-08
	22,18	0,155	1,8E-09
	5,55	0,151	2,7E-09
	44,37	0,184	5,9E-10
	11,09	0,172	1,0E-09
	88,73	0,218	2,5E-10
	22,18	0,207	3,6E-10
	5,55	0,201	9,7E-10
KAS-3 2,9-3,4		0,135	3,5E-08
	5,55	0,152	3,5E-09
	11,09	0,165	1,7E-09
	22,18	0,178	8,4E-10
	5,55	0,176	1,2E-09
	44,37	0,197	5,4E-10
	11,09	0,193	6,8E-10
	88,73	0,226	2,5E-10
	22,18	0,221	3,4E-10
	5,55	0,216	7,9E-10
SELI-4 1,2-1,7		0,132	1,1E-08
	5,55	0,142	7,4E-09
	11,09	0,150	3,8E-09
	22,18	0,172	1,7E-09
	5,55	0,168	2,3E-09
	44,37	0,196	7,6E-10
	11,09	0,187	1,2E-09
	88,73	0,228	3,1E-10
	22,18	0,219	5,1E-10
	5,55	0,202	1,2E-09
SELI-4 1,7-2,2		0,107	5,9E-08
	5,55	0,129	1,5E-08
	11,09	0,140	4,8E-09
	22,18	0,154	2,3E-09
	5,55	0,150	2,7E-09
	44,37	0,178	8,7E-10
	11,09	0,170	1,2E-09
	88,73	0,208	3,4E-10
	22,18	0,198	5,1E-10
	5,55	0,187	5,9E-10
SELI-4 2,2-2,7		0,082	1,4E-05
	5,55	0,098	3,5E-06
	11,09	0,112	1,0E-06
	22,18	0,131	2,1E-07
	5,55	0,128	2,7E-07

	44,37	0,155	2,1E-08
	11,09	0,146	3,1E-08
	88,73	0,193	1,6E-09
	22,18	0,184	2,2E-09
	5,55	0,178	4,0E-09
SELI-4 2,7-3,2		0,101	4,6E-06
	5,55	0,109	2,8E-06
	11,09	0,119	1,4E-06
	22,18	0,131	4,5E-07
	5,55	0,128	5,7E-07
	44,37	0,145	1,4E-07
	11,09	0,139	1,7E-07
	88,73	0,182	7,7E-09
	22,18	0,179	1,1E-08
	5,55	0,173	1,9E-08

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Grete Sabine Sarap,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Turba geotehnilised parameetrid ja nende seosed turba füüsikaliste omadustega**“mille juhendajad on Raul Paat, Argo Jõelet ja Annette Talpsep, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Grete Sabine Sarap

27.05.2022