



1918

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
TARTU KOLLEDŽ

Säästva tehnoloogia õppetool

# KIILVAIMUDELITE KANDEVÕIME LIIVAS JA SÜVISTAMISEL TOIMUVAD PINNASEMUUTUSED

BEARING CAPACITY OF MINIATURE WEDGED PILES IN SAND AND CHANGES OF SOIL  
CAUSED BY PILE DRIVING

Magistritöö  
Tööstus- ja tsiviilehituse erialal

Üliõpilane: **Erko Vares**  
Juhendajad: doktor **Mait Mets**  
lektor **Villu Leppik**

Tartu, 2015

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

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: EAEI105347

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (põhijuhendaja allkiri ja kuupäev)

..... (kaasjuhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitmisele lubatud: ..... (kuupäev)

Kaitismiskomisjoni esimees: ..... (allkiri)

## ABSTRACT

Vares, Erko. Bearing Capacity of Miniature Wedged Piles in Sand and Changes of Soil caused by Pile Driving. Master's thesis. Tartu, 2015. 102 pages, 53 figures, 38 tables and 3 appendixes. Written in Estonian language. Tallinn University of Technology.

The aim of this study is to find out if the miniature wedged piles are acting similar to full-sized piles when ramming and if the Gersevanov's and Gate-Killar's equations are suitable for estimating the value of bearing capacity of miniature piles. During the research is also studied how the density of sand and the shape and volume of a wedged pile are affecting the bearing capacity and how the sand is acting while ramming. The vertical displacement of sand and the changes in density while ramming are studied. The study has a great importance for tests with miniature wedged piles in the future.

A series of laboratory tests were performed on models of wedged piles. A loose and a dense sand were used to study the effect of density. Three different miniature concrete models were tested to study the effect of volume and shape of a pile. Static loads were applied by a hydraulic loading unit Lukas LZM 25/200. Dynamic loads were applied by a hammer weighing 7.5 kg. The vertical displacements of a pile and sand while pile driving were measured by several ALMEMO FWA100T AHLBORN displacement sensors. The results were compared to former studies made of full-sized piles. The tests took place in the construction laboratory of Estonian University of Life Sciences.

The test results showed that miniature wedged piles are acting similar to full-sized piles and it is possible to make conclusions based on a study of models. It is possible to use Gersevanov's equation to estimate the bearing capacity of miniature wedged piles but the estimated value given by Gate's equation was not accurate. The density of sand has a great importance, because in a dense sand the bearing capacity can be twice as high as in a loose sand. Based on the volume of concrete and the bearing capacity, it is rational to make a wedged pile thicker, not longer. The study about changes in sand's density didn't give conclusive results and should be studied further using full-sized piles or with a more suitable method.

Keywords: miniature wedged piles, bearing capacity, vertical displacement of sand, density of sand, Gersevanov's and Gate's equations, static and dynamic loads, pile driving

## SISUKORD

ABSTRACT .....	3
SISUKORD.....	4
SISSEJUHATUS.....	7
1 TEEMAALASE KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	10
1.1 Kiilvaiade kasutamisest .....	10
1.2 Kiilvaiade otstarbekusest .....	13
1.3 Kiilvaiade kandevõime .....	15
1.3.1 Staatiline kandevõime .....	17
1.3.2 Dünaamiline kandevõime .....	20
1.3.3 Paralleelne meetod kandevõime hindamiseks osavarutegurite abil .....	22
1.4 Pinnasemuutused rammimisel .....	24
1.5 Lühidalt varasemalt tehtud kiilvaiuuringutest.....	26
2 TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED .....	28
3 MATERJAL JA METOODIKA .....	31
3.1 Kiilvaimodelite kirjeldus.....	31
3.2 Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus .....	33
3.3 Katseseadmestik .....	35
3.3.1 Pinnasekast ja talastik .....	35
3.3.2 Mõõtmis- ja koormamiseadmed.....	36

3.4	Katsemetoodika .....	39
3.4.1	Katseplaan .....	39
3.4.2	Tegevuskava .....	39
4	KATSETULEMUSED.....	45
4.1	Kiilvaimudelite kandevõime.....	45
4.1.1	Staatiline kandevõime erinevatel mudelitel .....	45
4.1.2	Staatilise kandevõime võrdlusgraafikud .....	49
4.1.3	Dünaamiline kandevõime.....	54
4.2	Pika vardaga penetromeetri löökide arvu korrelatsioon liiva tihedusega .....	59
4.3	Pinnasemuutused vaia süvistamisel .....	60
4.3.1	Pinnasetõus .....	60
4.3.2	Pinnase tiheduse muutus vaia süvistamisel .....	63
5	ARUTELU.....	67
5.1	Kiilvaimudelite kandevõime käitumise võrdlus täissuuruses vaiade uuringus saadud tulemustega .....	67
5.2	Kiilvaimudelite rammimisel toimuvate pinnasemuutuste võrdlus täissuuruses vaiade uuringus saadud tulemustega.....	71
5.3	Järeldused ja soovitused.....	73
	KOKKUVÕTE.....	76
	TÄNUAVALDUS .....	77
	KIRJANDUS.....	78

LISAD.....	80
Lisa A: katseprotokoll .....	81
Katsetulemused tihedas pinnases .....	81
Katsetulemused kohevas pinnases.....	89
Lisa B: laboripäevik .....	100
Lisa C: pildid .....	101

## SISSEJUHATUS

Eestis on muutuva ristlõikega vaiadest laialdaselt kasutusel kahe kaldküljega ja kahe vertikaalküljega kiilvaiad. Sellisele maailmas unikaalsele vundamendiehitusele pani aluse Võru Kolhooside Ehituskontori (KEK) eksperimentaaljaoskond 1980. aastatel. Hetkel tegutseb kiilvaiade tootmise ja kasutamisega põhiliselt AS Kurmik, kuid ka AS Savi. Kiilvaiadele on tänaseks rajatud mitu tuhat ehitist ning arvatavasti on antud vaiatüüp kasutusel veel pikka aega tänu oma positiivsetele külgedele.

Kiilukujuga vaiade kasutamises on palju eeliseid, mis peamiselt on seotud mullatööde mahu tunduva vähenemisega. Võrreldes tavalise üksikvundamendiga võimaldavad kiilvaiad sama betooni mahu juures vastu võtta suuremat koormust. Konkureerivate püramiidvaiade ees on põhiliseks eeliseks lihtne valmistamine ja ladustamine rõhtasendis. Peamiselt on kiilvaivundeerimise efekt märgata moreenides, liivades ja möllpinnastes. Eelkõige sobivad need suure pindalaga ja madalate hoonete, näiteks põllumajandusehitiste ja ühiskondlike hoonete vundamendi ehitusse.

Hoolimata mitmetest positiivsetest näitajatest ei ole kiilvaiade kasutamine väljaspool Eestit levinud. Peamiseks põhjuseks võib lugeda ehitusvaldkonna konservatiivsust, mistõttu eelistatakse kasutada vanu ja ennast tõestanud lahendusi, uuenduste suhtes ollakse ettevaatlikud. Kiilvaiu on tänaseks kasutatud 35 aastat. Pidev kiilvaiade kasutamine praktikas ja katsete ning uurimistööde tegemine võib tulevikus tekitada olukorra, kus kiilvaiade kasutamine vundamentides saab usaldusväärseks lahenduseks ka välismaal. Seetõttu on tähtis tegeleda kiilvaiu puudutavate uurimistöödega ja laborkatsetustega. Kiilvaiadele toetatud hoonetele tasuks samuti teha vajumisvaatlusi, et näidata nende eeskujulikku käitumist.

Varasemalt on uuritud täissuuruses kiilvaiade kandevõimet ja pinnase käitumist vaiade rammimisel. Katseid on põhiliselt tehtud moreenis ja liivas. Samuti on uuritud kiilvaiade kasutamise otstarbekust teiste vundamendiliikidega võrreldes. On tehtud ka üksikud katsed mudelvaiadega. Metallist mudelvaiadega uuriti kandevõime sõltuvust pinnase omadustest. Kõik nimetatud katsed on läbi viidud Eestis, välismaal sellisel kujul kiilvaiade kasutusest ja katsetusest põhjalikult otsides materjali leida ei õnnestunud.

Antud töö käigus on läbi viidud rohkelt laborkatsetusi mudelkujul kiilvaiadega. Katsetatud on vaiu erineva tihedusega liivpinnases ja erineva kujuga mudeleid. Katsetulemustest on koostatud protokollid, mille põhjal on läbi viidud andmete töötlus. Koostatud on mitmeid graafikuid iseloomustamaks vaiade kandevõimet ja pinnase käitumist ja muutuseid vaia rammimise tõttu. Sarnase uuringu on varasemalt täissuuruses kiilvaiade kohta läbi viinud Riiklik Ehitusuuringute Instituut aastal 1987.

Mudelpõhised katsetused on ehitusvaldkonnas tähtsal kohal, kuna uuringute läbiviimine täissuuruses toodetega võib osutada kalliks ja keerukaks. Siiski vajavad tooted pidevat arendamist ja hea variant oleks vähemalt algusfaasis teaduslikke uuringuid läbi viia vähendatud mudelitega. Esmalt on vajalik hinnata, kas tootest loodud mudel käitub samamoodi õiges mastaabis variandiga.

Antud töös saadud mudelkatsetuste tulemuste põhjal on tehtud järeldused, kas kiilvaimudelid käituvad sarnaselt täissuuruses vaiadega. Selleks on andmeid võrreldud täissuuruses vaiadega tehtud katsete andmetega. Antud võrdlus on tähtis edaspidiste mudelkatsetamiste jaoks, sest toob välja kohad, kus mudelite käitumine õiges mastaabis vaiade käitumisega ei ühti. Sarnasustele tuginedes on võimalik hinnata, milliseid mudelitele tehtud järeldusi saab üle kanda ka täissuuruses vaiadele.

Samuti on vajalik uurida kiilvaiade peamiselt kasutatavaid kandevõimevalemiteid ja järeldada, kas nende hinnang peab paika ka mudelkatsete puhul. Selleks leitakse staatiliste koormuskatsetega erinevate kasutatud mudelite tegelikud kandevõimed, milleks on siin töös loetud proportsionaalsuspiiri  $N_{pr}$  ehk roomepiiri ehk roomeläve. Tegelikku kandevõimet on võrreldud kandevõimevalemite hinnangutega, mille arvutamiseks on viidud läbi dünaamiline koormuskatse vasaraga vaia mudelit pinnasesse rammides. Staatiline koormuskatse toimus koormusastmete kaupa pressi ja survesilindri abil vaia koormates.

Kahes erinevalt tihendatud liivpinnases uuriti pinnase tiheduse mõju vaia kandevõimele. Kolme erineva kujuga kiilvaimudelit samades tingimustes katsetades hinnati vaiade kuju mõju ja betooni mahu mõju kandevõimele. Rammimisel toimuvatest pinnasemuutustest uuriti vertikaalset pinnasetõusu ja pinnase võimalikku tihenemist. Vertikaalse



pinnasetõusu mõõtmiseks kasutati siirdeandureid ja spetsiaalset andmesalvestussüsteemi. Tiheduse muutust uuriti penetromeetritega ning tõusva pinnase mahtu ja süvistatud vaia mahtu võrreldes. Usutakse, et kiilvai tihendab tänu kaldtahkudele pinnast, kuid selgelt pole seda tõestatud.

Töö on üles ehitatud Tallinna Tehnikaülikooli vormistusjuhendite järgi. Esmalt on tutvustatud kiilvaiu ja nende käitumist saadaoleva kirjanduse ja varasemalt tehtud uurimistöode põhjal. Teises peatükis on põhjalikumalt välja toodud töös püstitatud eesmärgid ja nende saavutamiseks läbi viidavad ülesanded. Kolmandana on kirjeldatud kasutatud mudeleid, pinnast, seadmeid ja katsetoodikat. Välja on toodud punktide kaupa kirja pandud tegevuskava laborkatsetuste läbiviimisel ja katsete läbiviimise järjekord. Seejärel on esitatud katsetulemused ehk põhilised katsetuste käigus kogutud andmed ja nende põhjal koostatud graafikud nii vaiade kandevõime kui ka liivpinnase muutuste kohta rammimisel. Viimases põhijaotise punktis toimub arutelu saadud tulemuste osas, võrdlus varasemate avaldatud andmetega ja tehakse järeldused ning soovitused edaspidiseks. Tööl on kolm lisa: lisa A on esitatud terve katseandmete protokoll, lisa B on esitatud laboripäevik ning lisa C on toodud välja mõned pildid katsetuskäigust.

# 1 TEEMAALASE KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Kiilvaiade kasutamisest

Kiilvaiade kasutuselevõtu suunas liikus Võru KEK 1977. aastal, kui traditsioonilisele lintvundamendile hakati otsima alternatiivlahendust. Plaanimajanduse tõttu kehtis kindel tööruum, kus ehitiste valmimine planeeriti suveperioodi. Seetõttu hakati ehitustöödega pihta ja seega ka vundamente ehitama tavaliselt sügisel, mis on aga Eestis kõige sademeterohkem aastaaeg ja Lõuna-Eestile tüüpiline savikas moreenpinnas muutub sademete ja ehitusmasinate tegevuse tõttu suureks poriväljakuks, mis mõjutab negatiivselt nii ehitustööde kulukust, aeganõudvust kui ka kvaliteeti. Inseneride M. Metsa ja A. Kuddu ülesandeks sai leida vundamentide rajamise meetod, mis võimaldaks vundamendikaevikute kaevamisest loobuda ja tuua vundamendi ehitus maa pinnale. Nimetatud eesmärgi täitmiseks sobisid lühikesed, rammitavad paindejäigad vaiad nagu püramidaal- ja trapetsvaiad, mis omasid kaldtahke. Nende vaiade kasutus tolleaegses NSV Liidus oli juba mitmel pool laialt levinud. [1]

Esialgu võetigi Võru KEK-is kasutusele püramidaalvaiad, kuid tehnoloogia praktilisel kasutamisel ilmnis vaiade transpordil, paigaldamisel ja valmistamisel mitmeid tehnilisi kitsaskohti. Püramidaalvaiade valamiseks vajalik vorm on suhteliselt keeruline ja võtab palju ruumi, mistõttu kulub vaiade valmistamiseks palju tootmispinda. Vaia kaalu ja kuju tõttu nõuab vaiade transport spetsiaalse vaia veoki olemasolu ja rammimiseks tuli ümber seada prismaatiliste vaiade rammimiseks mõeldud rammseade, mistõttu jäi rammibrigaadi tootlikkus madalaks. Nendele probleemidele toetudes pakkusid tolleaegse „Eesti Tööstusprojekti“ töötajad M. Mets ja A. Kuddu välja kiilvaia idee, millel erinevalt püramidaalvaiast on vaid kaks kaldtahku, ülejäänud kaks tahku on vertikaalsed. [1]

Kiilvaiade kasutamisel oli võrreldes püramidaalvaiadega mitmeid eeliseid. Näiteks on nende valmistamiseks vajalik vorm tasapinnaline, mis seetõttu nõuab vähem ruumi ning ka vormi valmistamiseks kulub vähem materjale. Teiseks on lihtsam kiilvaiade transport ja ladustamine, kuna nende kaal on väiksem ja neil on kaks vertikaalkülge, mis võimaldavad vaiade ladustamise üksteise peale. Samuti ei vaja need transpordiks spetsiaalset veokit.

Kiilvaiade rammimiseks on vajalik vaid prismaatiliste vaiade jaoks mõeldud rammseadme haamripea välja vahetada, mida on lihtne teha. Kui püramidaalvaiad nõudsid enne rammimist rammimiskohta pesa ettesüvistamist, siis kiilvaiade puhul seda vaja ei ole. Vai tõstetakse lihtsalt rammseadmega püsti ja alustatakse rammimist, mistõttu on töö jõudluseks 15...40 vaia päevas. Püramidaalvaiade puhul oli tootlikkus ligikaudu 6...7 vaia päevas. Püramidaalvaiade eeliseks kiilvaiade ees jääb natuke kõrgem kandevõime kulutatud materjali koguse kohta, kuid arvestades kõiki kiilvaia tehnoloogilisi eeliseid, ei oma väike erinevus kandevõimes suurt tähtsust. [1]

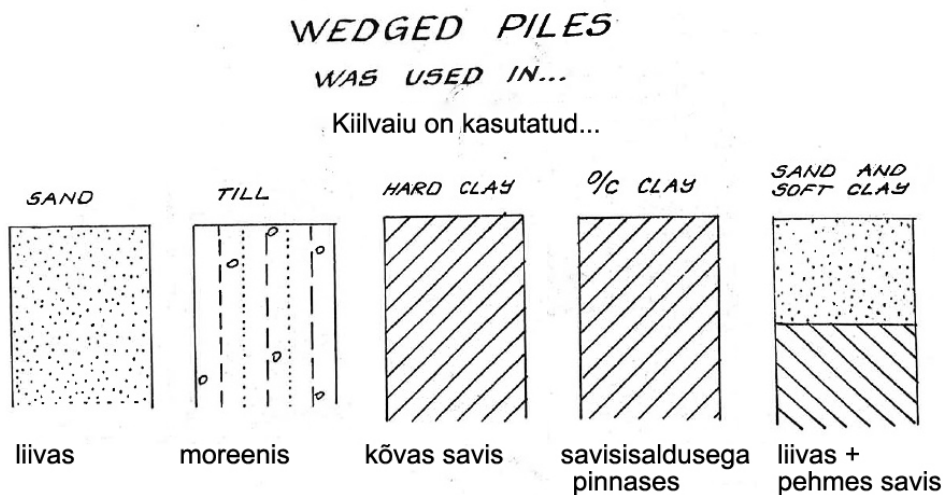
Kiilvaivundamendi väljatöötamine ja praktikas juurutamine sai hoo sisse 1981. aastal, mil sellega Võru KEK-i eksperimentaaljaoskonnas tegelema hakati. Eialgu plaaniti ühendussõlm vaia ja karkassiposti vahel monolitiseerida, kuid see oleks tekitanud montaažis tehnoloogilise pausi. Seepärast töötati välja sõlm, kus karkassipost keevitatakse vahetult kiilvaia külge. Enne tuli posti ja vaia sisse betoneerida vastavad tarirauad, hiljem kasutati ka ühendust, kus vaia külge keevitati spetsiaalne ankrupakett. Lisaks sõlmede väljatöötamisele oli vajalik töötada välja meetoodika vaia kandevõime määramiseks ja seostada see kehtivate normidega. Loodi tehniline baas vaiade tootmiseks ja spetsiaalne rammimisseade, töötati välja kiilvaiade nomenklatuur ja ehitati reaalselt valmis mitmeid katseobjekte, mis võeti ka kasutusse. [1]

Eesti taasiseseisvumise järel toimus suur muutus ka siinsel ehitusturul. Ehitusmahud vähenesid ja soiku jäi põllumajandusrajatiste ehitamine, mis olid olnud kiilvaivundamendi kasutamise peamine sihtgrupp. Võru KEK-ist lõi lahku Andri Needo, kes asutas 1992. aastal oma ehitusfirma AS Kurmik ning puhus kiilvaiandusele taas elu sisse. Alguses toimus kiilvaiade kasutamine peamiselt Lõuna-Eestis väiksemate ehituste juures, kuid peagi laieneti ka Tallinnasse suurematele objektidele. Töötati välja uus ankrukaarega ühendussõlme lahendus, mis ei vajaks enam nii mahukat keevitustööd. [1]

Üldiselt ei erine kiilvaivundamentide projekteerimine tavaliste vaivundamentide projekteerimisest, kuid siiski tuleb teatud omapära silmas pidada. Vundamendi lahendus peaks võimaldama ilma eriliste lisatöödeta luua pärast vaiatöid talvefrondi järgmisteks töödeks kogu hoone ulatuses. Rammimisel toimuva tihenemise tõttu on enne rammimist

paigaldatud täitepinnas põhimõtteliselt samade kandeomadustega, mis sellel pinnasel on looduslikus olekus. Tihti oleks otstarbekam kasutada kiilvaiu kombineerides neid vaipostide ja prismavaiadega. Kiilvaia ümbruse käsitsi lahtikaevamine on tihenemise tõttu väga töömahukas ja sellest tuleks hoiduda. Kiilvaiade rammimine nõuab suurt täpsust ja selle saavutamiseks on äärmiselt tähtis vaiakohtade täpne mahamärkimine. [2]

Pinnase suhtes kiilvai nõudlik ei ole. Neid on kasutatud nii savipinnases, liivas kui ka mitmetes anorgaanilistes täitepinnastes. Kiilvaiade kasutamist ei takista ka jämepeurru ja veeriste sisaldus pinnases. Majanduslikult parim efekt on vaiade kasutamisel moreenis ja suure veesisaldusega liivades. Efekt peaaegu puudub hea kandevoimega liiva puhul, kus madalvundamendi võib rajada külmumispiirist ülespoole. Sobilikke pinnaseid kiilvaiade jaoks on näidatud joonisel 1.1. [2]



**Joonis 1.1.** Sobilikud pinnased kiilvaiade kasutamiseks [3]

Kiilvaiade arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioonis on välja toodud, et neid soovitatakse kasutada savipinnases, mille konsistentsinäitaja  $I_L = 0...0,75$  ja deformatsioonimoodul  $E > 3$  MPa tingimusel, et külmakerkeohtlikkust kontrollitakse täiendava arvutusega. Konsistentsinäitaja savipinnase puhul võib olla ka väiksem nullist, kui vaiad rammitakse liidersüvenditesse. Sobilikuks loetakse ka liivpinnast, välja arvatud kohev liiv deformatsioonimooduliga  $E < 5$  MPa. Liivatäites deformatsioonimooduliga  $E > 5$  MPa soovitatakse kiilvaiu tingimusel, et täide paigaldatakse enne vaiade rammimist. Pinnases, mis ei vasta ülaltoodud kirjeldusele ja mille deformatsioonimoodul  $E < 3$  MPa, on kiilvaia kasutamine lubatud vaid eripõhjendusel. [4]

Kuni tänapäevani toimub peamine kiilvaivundamentide ehitamine ja projekteerimine AS-i Kurmik poolt, mis omab tehnilist baasi vaiade valmistamiseks, seadmeid rammimiseks ja spetsiaalse väljaõppe saanud ehitusbrigaade rostvärkide ehitamiseks. Tegutsemisvaldkonda on laiendatud hoonealuste mullatööde tegemisse, kuna kiilvaivundamendi ehitamise efektiivsus sõltub mullatööde kvaliteedist. Toodetakse erineva pikkusega ja armeeringuga vaiu. Kiilvainomenklatuur peamistest toodetavatest vaiadest on näidatud joonisel 1.2. [1]

*KIILVAIADE NOMENKLATUUR VASTAVALT TEHNILISTELE TINGIMUSTELE  
ENSV 223 TT 88-85*

MARK	ESKIIIS	MÕÖTMED. MM			MASS t	MATERJALIDE KULU		
		L	a	b		TERAS kg		BETON m <sup>3</sup>
CKJ 2-30		2000	600		0,5	5,31		0,20
CKJ 2.5-30		2500	730	300	0,75	6,31	—	0,30
CKJ 3-30		3000	860		1,05	7,27		0,42
CKJ 2-30b		2000	600		0,5	20,50		0,2
CKJ 2.5-30b		2500	730	300	0,75	22,83	8,46	0,30
CKJ 3-30b		3000	860		1,05	25,50		0,42

Joonis 1.2. Kiilvaiade nomenklatuur vastavalt tehnilistele tingimustele [3]

Lisaks tabelis välja toodud vaiadele on tänapäeval kasutusel ka 1,5 meetri pikkune kiilvai ja paindejäigad vaiad. Kiilvaiade külgpindade kalle on ligikaudu 1:7,7. Ehitustööde operatiivsemaks teostamiseks hoitakse AS-i Kurmik laos alati varuks 500...1000 vaia. Rammimisseadmetena kasutatakse kahte diiselhaamri ja vibroseadmega rammimismasinat. [1]

## 1.2 Kiilvaiade otstarbekusest

Tavaliselt on kiilvaiadele ümberprojekteerimine võimaldanud vundamendi maksumust vähendada 20%...60%, mõningatel juhtudel lausa kuni kümme korda. Peamiselt on seda küll mõjutanud asjaolu, et algne vundament pole projekteeritud säästlikult. Lisaks eelmises peatükis nimetatud kiilvaiade väljatöötamise käigus arvestatud eeliseid

püramidaalvaiade ees, on kiilvaivundamentide eelised madalvundamentidega võrreldes järgmised [1]:

- 1) vaiade vajumised on ligikaudu kümme korda väiksemad, kuna kiilvaiu koormatakse rammimisel suurema koormusega kui hoone eksploatatsioonis
- 2) vaiade kandevõimet on rammimisel suhteliselt täpselt võimalik määrata; proovivaiamise järel on seega võimalik koostada suhteliselt täpne vaiavälja plaan, mis annab võimaluse vähendada tagavara vundamendi ehitusel
- 3) saviliivmoreenide puhul sõltuvad kandevõimeomadused väga suurelt veesisaldusest, kiilvaiad saavutavad parema efekti rajamissügavuse vähendamisel ära jäävate mullatööde arvelt
- 4) kui moreenil on halvad kandeomadused, tuleb suurendada madalvundamendi taldmiku mõõte, mille korral kasvab materjali kulu oluliselt kiiremini kui vaiade kasutamisel.
- 5) ka liivades, kus pinnaseveetase on kõrgemal kui normidekohane vajalik vundamendi rajamissügavus, on vesiliiva efekti arvestades eelised kiilvaiadel
- 6) kohevate liivade puhul toimub kiilvaia rammides pinnase tihenemine vaia ümbruses

Kiilvaiade positiivne efekt võrreldes pikkadele tugevasse aluskihti süvistatud vaiadele või pikkadele rippvaiadele toetatud vundamentidega avaldub järgmistel põhjustel [1]:

- 1) sääst saavutatakse roostvärgi materjali kokkuhoiu arvelt, kuna kiilvaiad asetsevad oma väiksema kandevõime tõttu tihedamalt ja roostvärgid võib teha saledamad ja tagasihoidliku armeeringuga
- 2) roostvärgi võib vabalt toetada kiilvaia ülemisele otsale, sest see on suurte gabariitmõõtudega ja vaiapea läbisurumine roostvärgist ei ole probleemiks (eelis väiksemate kruvivaiaade ees)
- 3) vajaliku paksusega täitesse või ülemisse heade kandeomadustega pinnasesse rammitud kiilvaiad vajuvad koos põrandaga ühtlaselt, mis annab suure säästu nõrkadest aluskihtidest läbi süvistatud pikkade vaiade ees, mille juures tuleb vaiadele toetada ka hoone põrand

- 4) kiilvai on võimeline vastu võtma kõiki jõukomponente, mistõttu väheneb vaiade arv ja posti roostvärgi mõõtmed võrreldes variantidega, kus on postisõlmes konstruktiivsetel kaalutlustel vajalik kasutada kahte vaia, millest üks töötaks survele ja teine tõmbele

Kiilvaiade otstarbekust eri liiki hoonete lõikes piirab vaia kandevõime. Võib väita, et kiilvaia kasutamine on seda otstarbekam, mida suurem on hoone pind ja väiksem hoone kõrgus. Seepärast on efektiivne kiilvaid kasutada ühe- kuni neljakordsete kergkonstruktsiooniga hoonete vundamentides, näiteks põllumajandus-, tootmis- ja kaubandushoonete ehitamisel. Ka viiekordsete büroo- ja eluhoonete vundamentides on kiilvaiade kasutamine tihti otstarbekas, kui tegu on pehmete moreenpinnastega ja kõrge pinnaseveetasemega või kohevate liivadega. Elamute ja ridaelamute ehituses on kiilvaiade kasutamise põhiliseks plussiks tööde teostamise kiirus, kvaliteet ja komplekssus. Seega on kiilvaiade kasutamine perspektiivikas, kuna neid on võimalik kasutada mitmekesistes tingimustes, saades seejuures tavalahendustega võrreldes majanduslikku säästu. Eeliseks on ka tööde esteetiline korraldus, kuna terve teostus toimub siledal platsil ilma suurema porita. Lisaks kõigele positiivsele tuleb öelda, et kindlasti on ka olukordi, kus kiilvaiade kasutamine ei ole otstarbekas. [1]

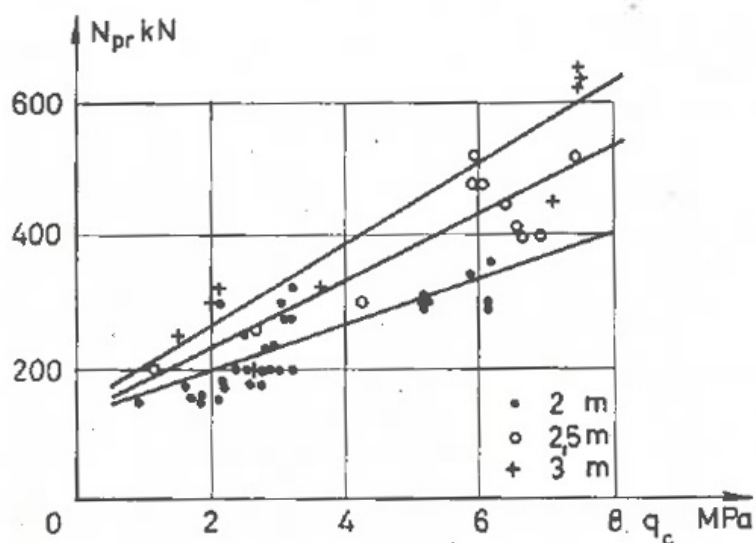
### **1.3 Kiilvaiade kandevõime**

SniP 2.02.03-85 järgi toimub vaia kandevõime määramine ehitise piirvajumi suuruselt lähtudes äärmuseni lihtsustatud skeemi järgi, kuid selle meetodikaga tekivad probleemid, kui ehitise on tundlik lahvajumite suhtes. Vaia koormamisel toimuvat iseloomustab paremini proportsionaalsuspiir  $N_{pr}$ . Tegemist on tingliku piiriga, mille ületamisel domineerivad vaia vajumi põhjustajatena pinnase tugevusomadused. [5]

Sama kandevõimega üksikvundamentide võrdlusest järeldub, et üksiku kiilvaia töös peab olema nii vaiale kui ka tavalisele madalvundamendile omaseid jooni, seega on kiilvai justkui vaheetapiks vaialt madalvundamendile üleminekul. Katseplaadi koormamisel saadakse küll laugemad graafikud kui vaia koormamisel, kuid suhe proportsionaalsuspiiri ja purunemiskiiruse vahel on ligikaudu sama. Vaia vertikaalkoormamisel jaguneb pinnasele

üle kantav koormus vaia külgede ja otsa vahel, seetõttu on kasutatud ka võtet vaia kandevõime jagada kaheks teineteisest sõltumatuks osaks – otsa ja külje kandevõimeks. Maapinna lähedal ehk vaia pea vahetus läheduses on normaalpinged külgpindadel nullilähedased. Normaalpinged külgedele kasvavad sügavuse kasvades, kuid arvatavasti jäävad vaia otsa juures ikkagi väiksemateks otsale mõjuvast püstsüüalisest normaalpingest. Kiilvaia vertikaalkülgedel tekivad normaalpinge otseselt ei osale vertikaalkoormuse vastuvõtus, küll aga mõjutab külghõõret, põhjustades selle muutuse sügavuse suunas. Kuna vaia erihõõre kasvab tunduvalt aeglasemalt kui pinnase nihketugevus, loetakse seda tihti vaia ulatuses konstantseks. Vaia kaldküljel tekivad normaalpinge võtab vertikaalkomponendi tõttu vastu ka osa vertikaalkoormusest, kuigi külghõõret mõjutab vertikaalküljega samal viisil. Kaldküljed ongi kiilvaia juures põhjuseks, miks selle käitumisel koormamisel on katseplaadiga sarnaseid jooni. [5]

Pinnase omadused sõltuvad paljudest erinevatest näitajatest, mis omakorda rammimisel muutuvad, seetõttu on kandevõime hindamine kaudsete meetoditega keeruline. Antud töös on kasutatud arvutusliku kandevõime leidmist koormuskatsetest ja rammimistulemustest, millest on juttu edasistes alajaotistes. Arvutuslikku kandevõimet on kaudselt võimalik määrata surupenetreerimisel leitud koonuseritakistuse  $q_c$  järgi, kuna sellel avaldub korrelatsioon kiilvaia purunemispääriiga. Sõltuvalt vaia pikkusest ja koonuseritakistusest saab jooniselt 1.3 leida vaia proportsionaalsuspääri. [5]



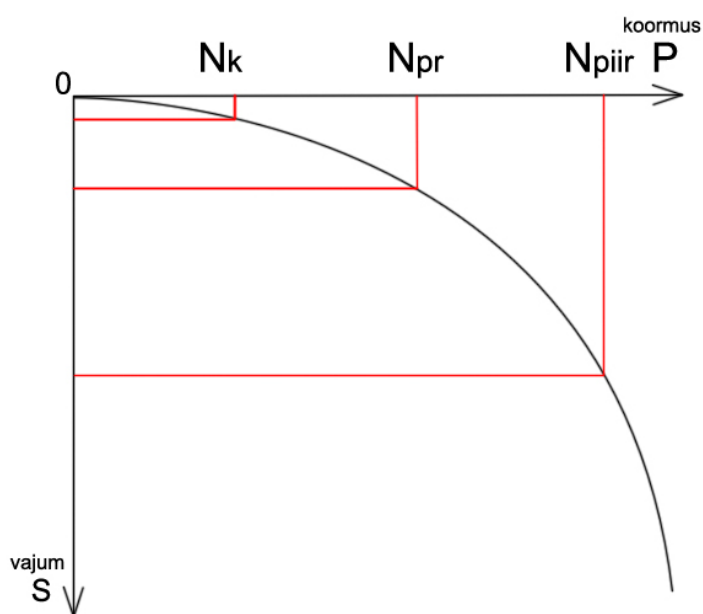
**Joonis 1.3.** Kiilvaia proportsionaalsuspääri sõltuvus otsaku takistusest surupenetratsioonil [5]



Korrelatsioon proportsionaalsuspiiri ja koonuseritakistuse vahel on joonisel välja toodud 2,0 m, 2,5 m ja 3,0 m pikkuste kiilvaiade kohta. Korrelatsiooni uurimisel selgus, et vaia pikkuse ulatuses keskmistatud  $q_c$  väärtus annab parimaid tulemusi. [5]

### 1.3.1 Staatile kandevõime

Staatilise koormuskatse tulemustest saab koostada graafiku (joonisel 1.4), mis näitab sõltuvust rakendatud koormuse ja vaia vajumi vahel. Graafikult on võimalik vaia töö seisukohalt iseloomulikke punkte välja lugeda ja leida seega vaiale kehtivad koormuspiirid. Graafikult loetavateks iseloomulikeks punktideks on  $N_k$  ehk vaia küljevastupanu piir,  $N_{pr}$  ehk proportsionaalsuspiir ja  $N_{piir}$  ehk purunemisperiir. Küljevastupanu piiri on nimetatud ka hõõrdepiiriks ja see iseloomustab punkti, milleni vaia aluses valdavad veel elastsed deformatsioonid. Proportsionaalsuspiirist ehk roomepiirist algab vaia aluse väljasurumine ja purunemisperiir on koormus, millel vaia alus läheb piirseisundisse. [5]



**Joonis 1.4.** Koormus-vajumi graafik ja iseloomulikud punktid

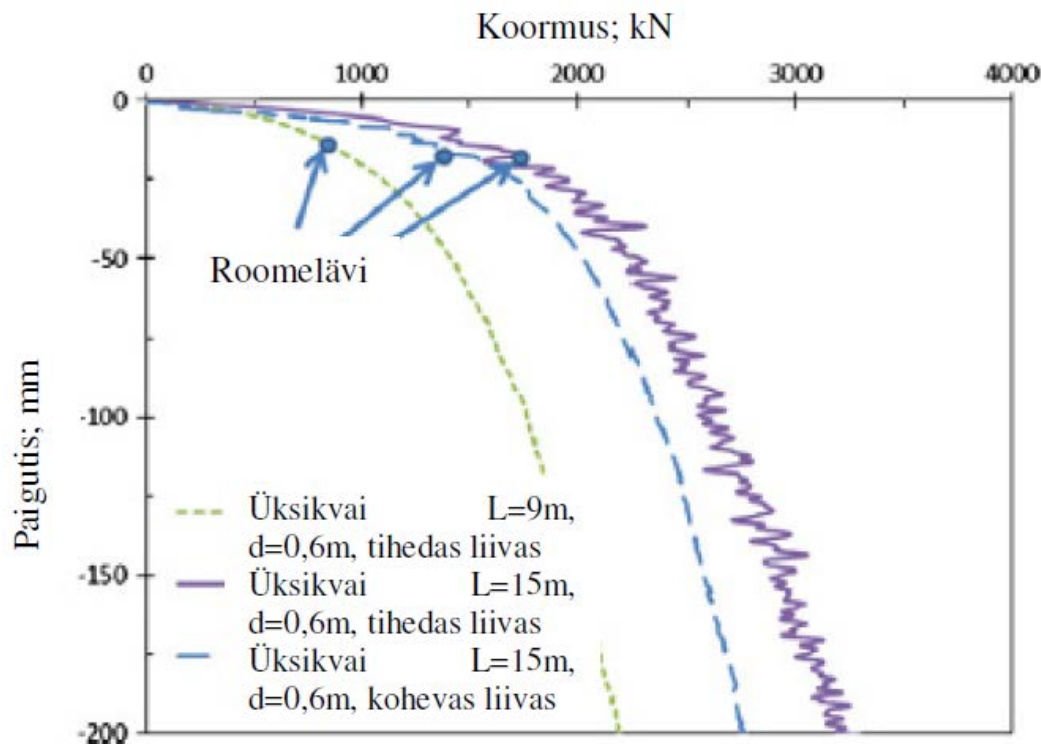
Eelkirjeldatud punktide määramise meetodit nimetatakse ka ajalise meetodikaks. Vaia kandevõimet iseloomustab kõige paremini proportsionaalsuspiir, mis justkui vaia käitumisest kaht etappi eraldab. Sellest piirist väiksemal koormusel toimub pinnase

tihenemine, suuremal koormusel algab pinnase väljasurumine vaia otsa alt. Proportsionaalsuspiiri ületades on iseloomulik märgatavalt suurem lõppvajum. Kuni selle koormuseni on õigustatud elastsusteooria kasutamine deformatsioonide ja koormuse vahelise sõltuvuse kirjeldamiseks. Suuremal koormusel ei ole elastsusteooria kasutamine õigustatud ja selleks, et vaiade vajumit kirjeldada, peab kasutama empiirilisi võtteid, mis arvestaksid vaiade vajumise ajalisust. [6]

Kiilvaia vajumiks punkti  $N_k$  juures on saadud 0,75...2,5 mm, sõltumata  $N_k$  suurusest. Erikülghõõre  $f_k$  on sõltumatu vaia mõõtmetest, kuid selle väärtuste hajuvus on maksimaalne 2 m pikkustel kiilvaiadel ja minimaalne 3 m pikkustel kiilvaiadel, mis on seletatav maapinnalähedase pinnasekihi suurema heterogeensusega ning  $N_k$  määramise meetodika puudulikkusega.  $f_k$  väärtus sõltub oluliselt rammimise käigus toimuvast ümbritseva pinnase tiheduse muutusest, mis on omakorda sõltuv nii pinnase omaduste sesoonsest muutlikkusest kui pinnase optimaalsest looduslikust veesisaldusest. [5]

Proportsionaalsuspiiri  $N_{pr}$  määramine otse koormusgraafikult on tihti raskendatud, kuna graafikul ei joonistu välja mingit selgelt punkti, vaid tegemist on pideva kõveraga. Koormuskatsete tulemuste põhjal saab väita, et kiilvaia vajumid  $N_{pr}$  juures on nii liiv- kui moreenpinnases valdavalt väga ühtlased ja jäävad vastavalt 5...7,5 mm ja 7,5...10 mm piiridesse. Alates proportsionaalsuspiirist suureneb vajum nii ajas kui ka sõltuvalt koormusest ning vajumi ja vaiale rakendatava koormuse sõltuvuses ilmneb hajuvuse suurenemine. Kuni koormuseni  $N_{pr}$  on vajum põhjustatud mõjutsooni pinnamassiivi valdavalt elastsest deformatsioonist, siis pärast piiri ületamist tekitavad suure osa vajumist vaia otsa lähedal tekkivad lokaalsed plastsusalad. [5]

Proportsionaalsuspiiri asukoha paremaks mõistmiseks on välja toodud vaiakatsete põhjal koostatud koormus-vajumi graafik joonisel 1.5. Tegemist on Lõuna-Koreas läbi viidud uuringu põhjal koostatud graafikuga. Joonisel on välja toodud kolme pinnase tiheduse või vaia pikkuse tõttu erinevalt käitunud üksikvaia koormus-vajumi graafikud ja kõigi puhul näidatud proportsionaalsuspiiride asukohad. Graafikule on need punktid märgitud roomeläve nime all. Katsetatud ei ole küll kiilvaiu, kuid vaiade puhul on kõnealuse graafiku kuju ja seega iseloomulike punktide asukohad võrreldavad. [7]



Joonis 1.5. Üksikvaiade tsentrifugaalkatsetused [7]

Koormus-vajumi graafik ja samuti vaia vajum koormusastmel ajas näitavad vajumise intensiivsuse järsku kasvu pärast proportsionaalsuspiiri ehk roomeläve ületamist. Samuti vaibub vajumine pärast seda piiri tunduvalt aeglasemalt, mistõttu pikaajalistele katsetele saadakse väga suured vajumid. Võimalike lahvajumite ning aluse purunemise vältimine ja majanduslik vajadus tagada iga vaia puhul võimalikult suur kandevõime viib  $N_{pr}$  tõlgendamisele arvutusliku kandevõimena. Vaia koormamine üle  $N_{pr}$  võib kõne alla tulla ainult põhjendatud arvutuse alusel piisavale geotehnilisele kontrollile tuginevalt. [5]

Seega ei tähenda eelöeldu, et proportsionaalsuspiir oleks maksimaalselt vaiale lubatav koormus. Seda piiri võib ka ületada, kuid ületamine peab kõigil ehitatava hoone alustel vaiadel olema ühesugune, et sellest tulenevad vajumid oleksid ligikaudu võrdsed. Kõige ohtlikum on hoonele seisund, kus osa vaiu on koormatud proportsionaalsuspiirist väiksema ja osa vaiu suurema koormusega, mis vajumise intensiivse suurenemise tõttu hoone vundamendi erinevat vajumist põhjustab. Kui kandevõime on määratud rammimisandmeil või valemitega, siis ei tohi vaiade roomepiiri ületada. Ületamine tuleb kõne alla vaid juhul, kui vaia kandevõime on määratud katseliselt ja on võimalik määrata üksikvaia vajumise intensiivsust. [6]

Purunemiskiir ehk  $N_{piir}$  saavutatakse kiilvaia vajumil 20...50 mm: tolmiival 20...30 mm ning moreenpinnasel 30...50 mm piires. Proportsionaalsuspiiri ja purunemiskiiri sõltuvuse kohaselt suureneb  $N_{pr}$  kasvades suhteline oht tema ületamisel viia alus piirlokorda. Töötluse käigus leiti ka seos  $N_{pr}$  ja vaia pikkuse vahel. Selgus, et  $N_{pr}$  ja seega samuti ka arvutuslik kandevõime kasvab vaia ruumalast aeglasemalt, ehk kasulik on kasutada lühemaid vaiu. [5]

### 1.3.2 Dünaamiline kandevõime

Dünaamilise katsetuse põhjal kandevõime määramine on üks vanimaid meetodeid ja tänapäevaks on vaiadele rohkem kui 200 erinevat kandevõime hindamise valemit loodud. Oluliseks panustajaks antud uuringusse oli N. M. Gersevanov, kes püüdis esimesena arvestada vaia käitumist pinnases. Ta väitis, et dünaamiliste meetoditega on võimalik üldjuhul määrata vaid vaia proportsionaalsuspiiri. Hilisemad uurijad ei ole aga seda seisukohta arvestanud ja ka Gersevanovi enda loodud valemit on kasutatud piirkoormuse arvutamiseks, mitte proportsionaalsuspiiri. [8]

„Eesti Tööstusprojekti“ tegeleti dünaamika valemite uurimisega ja leiti, et suuremal või vähemal määral sobivad meie tingimustes vaia proportsionaalsuspiiri määramiseks ligikaudu 20 läbi töötatud valemit. Siiski on meil enim levinud Gersevanovi valem, mille uurimisele pöörati erilist rõhku. Vaia staatilise proovikoormamise andmetega ühtisid kõige täpsemalt Gate'i valemi tulemused, mis on kiilvaiade puhul lisaks Gersevanovi valemile teiseks enim kasutatud dünaamilise kandevõime hindamise valemiks. [8]

Gersevanovi valemit saab proportsionaalsuspiiri määramiseks kasutada 2...15 mm vastetel, sest väiksemate vastete puhul valem ülehindab, suuremate vastete juures alahindab tegelikku kandevõimet. Senistest uurimistulemustest on järeldunud, et staatilisel proovikoormamisel külghõõret ja proportsionaalsuspiiri ületavate koormustega kaasnevad vajumid jäävad vastavalt 1,5...2,5 mm ja 5...15 mm vahemikku. See tähendab, et vajumitel kuni 2 mm külghõõret ehk vaia küljevastupanu ei ületata ning seetõttu kulub rohkem energiat vaia süvistamiseks, võrreldes suuremate vastetega, mis ongi kandevõime

ülehindamise põhjustajaks. Suuremate vastete korral kui 15...20 mm pinnase struktuur puruneb ja algab selle väljasurumine vaiaotsa alt, mistõttu vaste suureneb. [8]

Gersevanovi valem esineb järgmisel kujul [8]:

$$R_{c;m} = \frac{\eta \times A_k}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \times m_1 \times H}{\eta \times A_k \times s_e} \times \frac{m_1 + 0,2 \times m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right] \quad (1.1)$$

- A – vaia ristlõikepindala (kiilvaiade puhul  $A_k$  – keskmine ristlõikepindala),  $\text{cm}^2$
- $m_1$  – vasara kaal, t
- $m_2$  – vaia ja kaitsepea kaal, t
- $s_e$  – vaia vajum ühest löögist, cm
- H – vasara langemiskõrgus, cm
- g – raskuskiirendus,  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $\eta$  – vaia materjalist sõltuv tegur,  $\text{t/m}^2$  (kaitsepeata puitvai:  $\eta = 100 \text{ t/m}^2$ , kaitsepeaga raudbetoonvai:  $\eta = 150 \text{ t/m}^2$ , kaitsepeaga terasvai:  $\eta = 100 \text{ t/m}^2$ )

Seniste uurimistulemuste järgi on kõige sobilikumaks rammimisandmete järgi kandevõime hindamise valemiks Gate'i valem. Kui määrata valemis esinev tegur K ainult vastet arvestades, saadakse korrelatsiooniteguriks 0,9. Kui arvestada ka löögi energiat ja vaia ning vasara kaalu suhet, langevad vaia staatilisel koormamisel saadud kandevõime ja Gate'i valemiga hinnatud kandevõime kokku nii raudbetoon- kui terastoruvaiadel. Raudbetoonvaiade puhul kehtib seos, et kui vaste on väiksem kui 5 mm, siis tegur  $K = 3$  ja kui vaste on suurem kui 5 mm, siis  $K = 2$ . [8]

Gate'i valemit täiendas Eesti pinnaste jaoks E. Killar. Gate-Killari valemi puhul tuleb  $N_G$  samastada proportsionaalsuspiiriga ja valem ise avaldub kujul [5]:

$$N_G = K \times \sqrt{0,07 \times G \times H} \times \log \frac{25}{s_a} \quad (1.2)$$

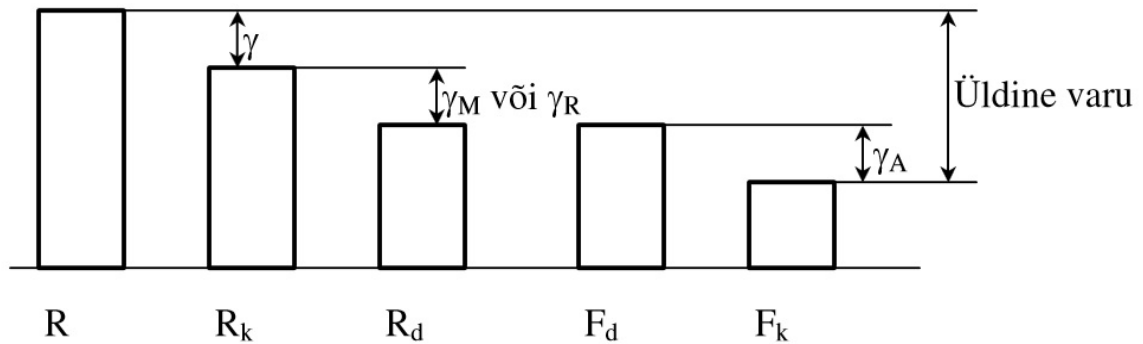
- G – löögiosa kaal, kN

- $H$  – löögiosa efektiivne kukkumiskõrgus, cm
- $s_a$  – vaia vaste, cm
- $K = 2$ , kui  $s_a > 0,5$  cm, ja  $K = 3$ , kui  $s_a < 0,5$  cm

Välja tuleb tuua olukorrad, kus dünaamika valemid vaia kandevõime hindamiseks ei sobi. Näiteks geoloogilises lõikes, kus esinevad kõva konsistentsiga paleosoikumi savid või klindiesine moreen ei saa rammimisel toimuva nihketugevuse muutuse tõttu kandevõimet vastest sõltuvalt dünaamika valemitega määrata. Samuti ei saa seda teha geoloogilises lõikes, kus esineb voolava konsistentsiga saviliiv ning vaste on alla 3 mm või üle 15 mm. Kui rammitakse kolloidset orgaanilist ainet sisaldavatesse liivadesse, kruusadesse ning teistesse dünaamiliste mõjutuste suhtes tundlikesse pinnastesse, siis pinnase struktuur puruneb osaliselt ja nihketugevus väheneb, mistõttu saadakse arvutustega tunduvalt väiksem kandevõime kui tegelikkuses. Tegelikusest suurem kandevõime saadakse arvutusvalemitega siis, kui vaia rammitakse tihedasse tolm- ja peenliiva, milles esineb survevee. Viimase hüdrodünaamiline surve põhjustab vaste selget vähenemist. [8]

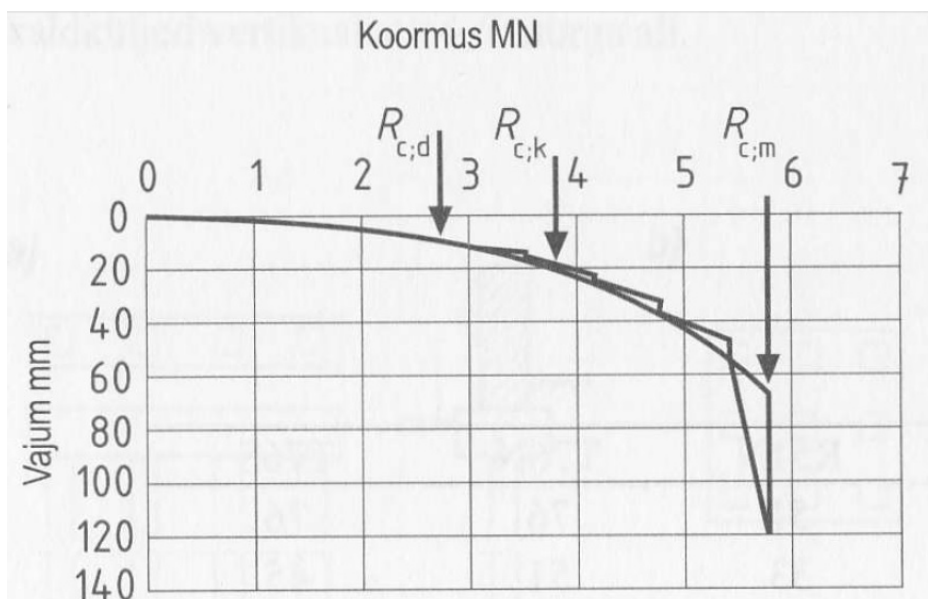
### **1.3.3 Paralleelne meetod kandevõime hindamiseks osavarutegurite abil**

Piirkandevõimeni koormatud vaiad suudavad ühtlase koormusega rajatist küll staatiliselt toetada, kuid koormuste lisamine põhjustaks katastroofilisi tagajärgi. Näiteks muutuvkoormuste suurenemisel sõltuvalt olukorrast võib vai või vaialus puruneda, kui ei ole jäetud piisavat koormusvaru. Sellise olukorra vältimiseks on projekteerimisstandardites kehtestatud kindlad osavarutegurid. Piirkandevõime leitakse kasutades erinevaid arvutamise meetodikaid või koormates vaia katseliselt. Sellest leitakse osavaruteguriga normkandevõime, millest omakorda arvutuskandevõime. Normkoormust arvutustes kasutada ei tohi, selleks peab määrama arvutuskooormuse. Osavarutegurite paremaks mõistmiseks saab tutvuda joonisega 1.6. [9]



**Joonis 1.6.** Osavarutegurite süsteem,  $R$  – materjali keskväärtusega määratud kandevõime;  $R_k$  – materjali normväärtusega leitud kandevõime;  $R_d$  – materjali arvutusväärtusega leitud kandevõime;  $F_k$  – normkoormus;  $F_d$  – arvutuskooormus [9]

Osavarutegureid kasutades ei ühti küll materjali arvutusväärtusega leitud kandevõime täpselt ajalise meetodikaga koormusgraafikult välja loetud proportsionaalsuspiiriga, kuid asuvad ligikaudselt koormus-vajumi graafikul samas kohas. Koormus-vajumi graafik osavaruteguriga leitud piirkoormustega on näidatud joonisel 1.7. Seetõttu võivadki erinevatel meetoditel leitud vaia kandevõimed mingil määral varieeruda.



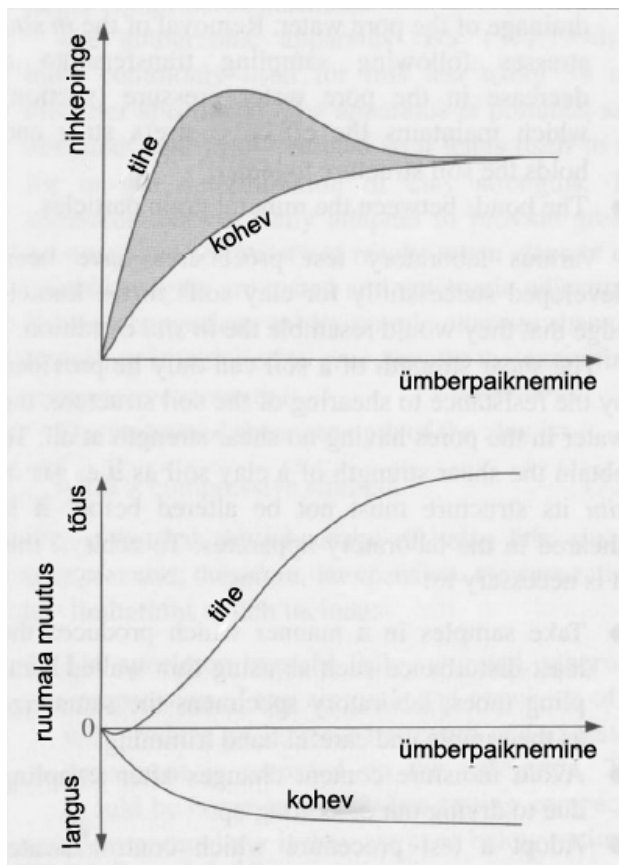
**Joonis 1.7.** Vaia staatilise koormuskatsega määratavad piir-, norm- ja arvutuskandevõime [10]

Seega on kasutusel mitu varianti, kuidas iseloomulikke punkte staatilise koormuskatse graafikul välja lugeda ja nimetada. Varasemalt on kasutusel olnud piirpingete meetod, kus graafikult loetakse välja nii küljevastupanu piir, proportsionaalsuspiir kui ka purunemisiir. Tänapäevasem kasutus eeldab aga purunemisiiri järgi norm- ja

arvutuskandevõime leidmist osavaruteguritega. Kuna antud töös on vajalik võrrelda saadud piirkoormuseid varasemate uuringutega, mis ei põhine tänapäevasel Eurokoodeksil, on kasutatud ka vanemat kasutuselolevat varianti iseloomulike punktide leidmiseks koormusgraafikul ehk ajalisuse meetodikat.

#### 1.4 Pinnasemuutused rammimisel

Rammimisel liiva käitumise paremaks mõistmiseks tuleb rääkida lühidalt üldisest pinnasemehaanikast. Kiilvaiade rammimine tekitab pinnases nihkumist, mis avaldub vertikaalse tõusu ja tiheduse muutuse näol. Liivaosakeste käitumist nihkepingete põhjal iseloomustab hästi joonis 1.8.



Joonis 1.8. Liivaosakeste käitumine nihkepingete korral [11]

Nihkepinged pinnases sõltuvad suuresti osakeste omavahelisest hõõrdumisest ja üksteise taha kinnitumisest. Selleks, et nihutada tihedamat liiva, peame me tihedalt kokku pakitud osakesi teineteisest üle ja eemale nihutama. See nõuab lisanduvaid nihkepingeid olukorrale, kus liiv on kohev ja masside liigutamiseks on vajalik vaid osakestevaheline



hõõre ületada. Lisanduv nihkepinge on seda suurem, mida tihedamini osakesed teineteisega „lukustunud“ on. [11]

Seda käitumist on näha joonise 1.8 ülemisel graafikul: osakeste ümberpaigutumiseks on tiheda pinnase puhul vajalik suurem nihkepinge kui koheva puhul. Kui aga jõutakse nihkepinge haripunkti, liiguvad tiheda pinnase puhul osakesed üksteisest üha kaugemale ja ei suuda enam üksteisega lukustuda selliselt nagu esialgu väga tihedas seisus, põhjustades nihkepingete langust pärast haripunkti. Koheva pinnase puhul toimub protsess vastupidi. Kuna osakesed on sel juhul algusest saadik üksteisega nõrgalt haakunud ehk nende vahel on suured tühimikud, siis nihkepingete mõjul toimuv ümberpaigutamine paigutab neid hoopis tihedamalt kokku. See kõik põhjustab alumisel graafikul näidatud liivaosakeste ümberpaigutuse tulemusena toimuvat pinnase ruumala muutumist. Koheva pinnase puhul liikusid nihkepingete mõjul osakesed tihedamalt kokku ja ruumala väheneb, tiheda pinnase puhul vastupidi – osakesed kaotavad omavahel tiheda kokkupakituse ja pinnamassiivi ruumala suureneb. Seega algse ruumala suurenemisel on tegemist pinnase kohenemisega, vähenemisel aga tihenemisega. [11]

Pinnase omaduste muutust on uuritud lühikeste püramiidvaiade rammimisel, mis käituvad sarnaselt kiilvaiadele oma kaldu olevate tahkude tõttu. Uuringus leiti, et tiheda ja kesktiheda liiva puhul toimub vaia süvistamisel intensiivne pinnase väljasurumine, mis tiheda liiva puhul võib tekitada ka kobestunud tsooni. Koheva liiva puhul toimub rammimise käigus pinnase tihenemine. Samuti on uuringutulemustes väidetud, et tihenemist ei toimu rammimisel veeküllastunud savipinnasesse. Järeldatakse, et tihenemistsooni mõõtmed sõltuvad põhiliselt sisehõõrdenurgast. Loomulikult mõjutab tihenemise-kohenemise piiri lisaks pinnase tihedusele ka selle lasumissügavus. Lühikeste vaiade puhul on sügavuse mõju suhteliselt väike. Leiti, et ka neli aastat pärast rammimist oli tihenemistsoon oma mõõtmed ja tihenemisastme säilitanud ja väljaspool antud tsooni oli penetratsioonitugevus kasvanud kuni 1,8 korda. Põhjendatakse seda struktuuri taastumisega väljaspool tihenemistsooni. [5]

Eestis tehtud uuringutes on saadud tulemus, et kiilvaiade rammimisel toimub nii pinnase väljasurumine kui ka tihenemine. Valdavalt toimub siiski väljasurumine ja tihenemise

osakaal ei ületa 1/3. Jälgitavad on need protsessid nii moreeni kui liivpinnase puhul. Tihenemise ja väljasurumise vahetada mõjutavad kindlasti ka pinnase mehaanilised omadused. Täpseid osakaale ei ole õnnestunud uuringute käigus määrata, sest rammimisel vaia ümber toimuvates protsessides puuduvad teravad piirid. Tihenemist saab ligikaudselt hinnata ka väljasurutud pinnase ruumala ja rammitud vaia ruumala võrreldes. Järeldus, et pikemate vaiade rammimisel oli tihenemise osa suurem kui lühikeste vaiade puhul. Sellist nähtust saab seletada pinnase omakaalust tuleva surve mõjuga rammimisel toimuvale võimalikule tihenemisele – sügavamatest kihtidest on pinnast selgelt raskem välja suruda, mis ongi suhteliselt suurema tiheduse põhjus. Tihenemine toimub eelkõige kiilvaia kaldkülgede vahetus läheduses. Moreenpinnase korral ulatub tihenemistsoon 10...50 cm kaugusele vaia külgpinnast, kusjuures 15 cm kaugusel oli moreenpinnase nihketugevus 1,5 korda suurem ja 2 korda väiksem kui 30 cm kaugusel vaia külgpinnast. Kogu häiritustsooni raadius, kus toimus tihenemine ja väljasurumine, oli ligikaudu võrdne vaia pikkusega. Liivpinnaste puhul ulatub tihenemisala tunduvalt kaugemale moreenpinnastest. [5]

Moreeni ja liiva puhul sõltub tihendamise kergus suuresti veesisaldusest ehk niiskusest. Teadaolevalt on liiva kõige kergem tihendada, kui selle niiskus on optimaalne. Pinnase optimaalne niiskus määratakse üldiselt Proctorteimiga. Olenevalt ilmastikust kõigub ka moreenis olev niiskus suures ulatuses, mis mõjutab omakorda sesoonselt kiilvaiade kandevõimet, sest rammimisel võib tekkida erineva suurusega tihenendunud ala. Vaia kandevõimele tundub olevat määravam rammimise käigus kujunev tihenendunud tsoon kui selle tsooni hilisemad muutused. [5]

### **1.5 Lühidalt varasemalt tehtud kiilvaiuuringutest**

Sellisel kujul kiilvaiade väikese leviku ja vähese kasutusaja tõttu ei ole neist palju varasemaid uurimistöid tehtud. Samuti pole tehtud uuringud laialt levinud ja on raskesti kättesaadavad.

Põhjalik täissuuruses kiilvaiade uuring on läbi viidud Riikliku Ehitusuuringute Instituudi (REI) poolt 1987. aastal. Uuringu käigus katsetati ligi 200 kiilvaia Eesti eri paikades

erinevates pinnastes. Põhiliselt on katsetused tehtud moreenpinnases, kuid ka liivas. Uuringu tulemusena koostati suur hulk graafikuid iseloomustamiseks täissuuruses kiilvaiade käitumist süvistumisel ja pinnase käitumist vaia süvistamisel. Paljusid REI uuringu tulemusel valminud sõltuvusgraafikuid on võrreldud antud mudelvaikatsetuste graafikutega töö arutelus, kuna üheks ülesandeks oli mudelvaiade ja täissuuruses vaiade käitumise võrdlus. [3]

Kiilvaiadest Lõuna-Eesti moreenpinnases on 2003. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis Mait Metsa juhendamisel magistritöö kirjutanud Olavi Tammemäe. Töös on toodud välja Eesti moreenpinnaste omadused ja nende levikuala, samuti on selgitatud kiilvaiade kandevõime arvutamist moreenis. Kokkuvõttena on leitud, et kiilvaivundament on Lõuna-Eesti moreenpinnastes säästlik alternatiiv teistele madalvundamentidele, tagades kokkuhoiu tööjõu ja materjali kulus kuni 60 %. Samuti soovitatakse arvestada moreenpinnaste sesoonset muutlikkust silmas pidades asjaoluga, et kiilvaia kandevõime sõltub rammimisaegsetest pinnase omadustest. [12]

Kindlasti ei saa kiilvaiade edasiarendamises alahinnata AS-i Kurmik tegevust. Nimelt on nende praktilises panuses näiteks tavavaiade armeeringu asendamine teraskiuga, mis võimaldab säästa aega vaiaarmatuuri valmistamise arvelt. Jõudsasti on arendatud kiilvaiadega sobituvaid postisõlmi ja rostvärke. [1]

V. Jaaniso juhendamisel on E. Soonurme, J. Pello ja K. Olli poolt läbi viidud metallist kiilvaiade mudelkatsetused. V. Jaaniso sõnul oli eesmärgiks analüütilise avaldise leidmine, mille abil saaks määrata kandevõime olenevalt pinnase omadustest, vaia omadustest ning süvisest. Katsetustel kasutatava pinnase mahukaal ja sisehõordenurk ning hõordenurk vaia ja pinnase vahel määrati laboris.

AS Geotehnika inseneribüroo poolt on 2001. aastal tehtud geotehniline aruanne „Kiilvaiade staatiline koormamine Tallinnas, Lootsi tänaval 5/7 Norde Centrum maa-alal“. 1987. aastal koostas geoloogilise uurimistöo aruande Projekteerimise Instituut „EKE Projekt“ nimega „Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine Nursi katsepolügoonil“. Käesoleval hetkel ei õnnestunud neid töid analüüsiks enda kätte saada. [1]

## 2 TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Kiilvaiu sellisel kujul nagu Eestis teadupärast mujal maailmas ei kasutata. Ka Eestis on kiilvaiu kasutatud vaid viimase 35 aasta jooksul ning seetõttu on antud valdkonda vähe uuritud. Antud töös läbi viidud katsed mudelitega omavad eelkõige tähtsust seetõttu, et nende tulemustest saab järeldada, kas mudelvaiade puhul käitub kandevõime ja pinnas vaia süvistamisel samamoodi täissuuruses vaiadega. Kui tulemused on võrreldavad, saab edaspidi kiilvaiade valdkonda uurida mudelkatsete abil ja teha seega järeldusi ka täissuuruses vaiade kohta. Vaia mudeleid katsetades võidetakse nii ajas, rahas kui ka keerukuses.

Üheks peamiseks ülesandeks on leida mudelkatsete tulemuste ning täissuuruses vaiade tulemuste vahel seoseid ning sarnasust. Antud töös leitud andmeid mudelite kohta on võrreldud Riikliku Ehitusuuringute Keskuse poolt läbi viidud täissuuruses kiilvaiade uuringu tulemustega, mis on üks väheseid kiilvaiade kohta läbi viidud põhjalikest uuringutest. Võrreldud on nii kandevõimet kui ka rammimisel toimuvaid pinnasemuutuseid puudutavaid jooniseid. Võrdlused on välja toodud arutelus, peatükis 5.

Samuti on uuringu käigus kontrollitud, kas täissuuruses vaiade kandevõime hindamiseks kasutatavad arvutusvalemid kehtivad ka mudelite puhul. Kontrollitud on kahe, Gersevanovi ja Gate-Killari vaia kandevõime valemi paikapidavust, kuna need on põhilised valemid, mida kiilvaiade kandevõime määramiseks tänapäeval kasutatakse. Valemite kehtivust ka mudelite puhul on vaja katsetega kontrollida, kuna varasemad uuringud selle kohta puuduvad.

Valemite paikapidavuse kontrollimiseks on vajalik viia läbi staatiline koormuskatse, mille graafiku alusel saab määrata vaia tegeliku kandevõime. Samuti peab tegema dünaamilise koormuskatse, mille alusel saab mõõta vaia vaste, mida on vajalik teada eespool nimetatud kandevõimevalemitega arvutamiseks. Valemitest saadud kandevõime hinnangut tuleb tegeliku kandevõimega võrrelda ja teha järeldus, kas hinnang peab paika või mitte. Valemite paikapidamatuse korral saab proovida valemid muuta viisil, et need mudelvaiade kohta täpsema tulemuse annaksid. Täpne kandevõime hinnangu valem on

vajalik, kuna siis ei oleks tarvis iga vaimudeli kandevõime teadasaamiseks viia läbi staatilist koormamist.

Järgmiseks eesmärgiks on uurida, kas kiilvaia süvistamisel vaia ümbritsev pinnas tiheneb või hoopis koheneb. Selles küsimuses omatakse kahte erinevat arvamust. Ühed leiavad, et kiilukujulise vaia süvistamisel tiheneb vaia ümber pinnas ligikaudu kahe vaiapikkuse sügavuselt ja laiuselt, ehk vai hakkab tööle koos tihenenud pinnasest ümbrisega. Teised arvavad, et rammimisel kasutatud koormus ei ole piisavalt suur ümbritseva pinnase selgeks tihendamiseks ja mingit arvestatavat tihenemist vaia süvistamisel siiski ei toimu. Süvistamisel toimuvat pinnase tihenemist on vajalik tõestada, kuna see annaks eelise vertikaalsete külgedega vaiade ees, sest tihenenud pinnases on vaia kandevõime suurem.

Tihenemist on uuritud penetromeetrikatsetega enne ja pärast vaia süvistamist. Sellise katse läbiviimine tekitab probleeme, kuna ühes ning samas punktis enne ja pärast vaia rammimist penetromeetriga mõõtmist teha ei tohi, sest varda süvistamine rikub pinnase algse tiheduse süvistuspunkti juures. Võrrelda tuleb erinevates punktides tehtud mõõtmisi, kuid pinnasekast ei pruugi olla terves ulatuses ühtlase tihedusega.

Tiheduse muutust rammimisel on uuritud ka vaia poolt välja pressitud pinnase mahu võrdlemisel vaia enda ruumalaga. Kui vai pressib välja endast suurema mahuga pinnase, siis on järelikult pinnas kohenenud, kuna kohenemisel pinnase ruumala kasvab. Vastupidisel juhul toimub tihenemine. Pinnase tõusu mõõdeti kindlatesse punktidesse paigutatud siirdeanduritega, mille mõõtmistulemuste järgi koostati tõusumahu 3D-mudel ja arvutati selle ruumala. Probleemiks on sellise käitumise puhul asjaolu, et ei saa teha järeldusi pinnasekihtide kohta eraldi, vaid ainult rammimisest mõjutatud üldmahu kohta.

Veel on katsetamise käigus uuritud, kuidas mõjutab liivpinnase tihedus vaia kandevõimet ja kuidas erineva tihedusega liiv vaia rammimisel käitub. Selleks on katsetatud kahte erineva tihedusega liivpinnast sama tegevuskava alusel ja sama vaimudeli süvistamisel. Tihe pinnas saavutati põhjalikult kihtide kaupa liivakasti plaatvibraatoriga tihendades, koheva pinnase saavutamiseks kaevati pinnas läbi ja tihendati kergelt. Tulemuste võrdlus annab meile teada, kui suurt mõju võib pinnase tihedus kiilvaia kandevõimele omada ja kui tähtis on seega pinnase täiendav tihendamine enne vaiade rammimist.

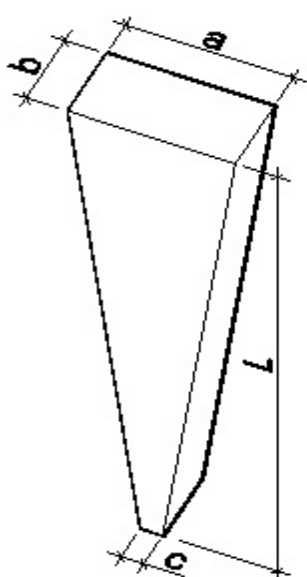
Viimaseks eesmärgiks oli uurida vaia kuju ja kandevõime sõltuvust. Betoonikulust ehk vaia ruumalast lähtudes prooviti leida võimalikult otstarbekas viis vaia kandevõime suurendamiseks muutes kiilvaia mõõtmeid. Antud töös on katsetatud kolme erinevat kiilvaimudelit, mis erinevad üksteisest mõõtmete poolest. Kiilude kaldenurka mudelite puhul muudetud ei ole ja seega ei katsetata erineva nurga all olevate kaldtahkudega vaiade käitumist. Kolme mudeli juures on läbi viidud täpselt samad katsetused sarnases pinnases. Vaiade ruumalasisid ja staatilise koormuskatsega leitud kandevõimeid võrreldes leitakse seoseid kiilvaia kuju ja kandevõime vahel.

Antud uuring on oluline, kuna tänapäeval kasutusel olevatest toodetavatest kiilvaiadest võib olla otstarbekam variant, kus väiksema betooni mahuga saab saavutada suurema kandevõime. Sellisel juhul saaks tulevikus teistsuguse kujuga vaiu toota, mis maksaksid praegu kasutusel olevate vaiadega sama palju, kuid kannaksid rohkem või kannaksid sama palju ja maksaksid vähem.

### 3 MATERJAL JA METOODIKA

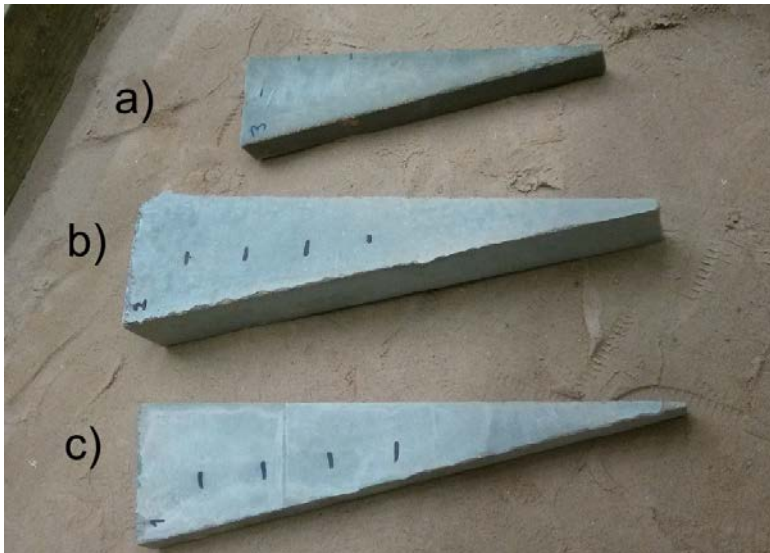
#### 3.1 Kiilvaimudelite kirjeldus

Katsetuste käigus on kasutatud kolme erinevat kiilvaimudelit, mis erinevad üksteisest mõõtmete poolest. Mudelite valmistamisel arvestati asjaolu, et ehitusalastes uuringutes on üldjuhul soovitatav kasutada maksimaalselt kümme korda vähendatud mudeleid. Mudelite suurus valiti samuti pinnasekasti mõõtmetest olenevalt, kuna selle raudbetoonkest ei tohtinud pinnasedeformatsioone mõjutama hakata. Esmalt kasutati kolmemeetrise toodetava kiilvaia kümme korda vähendatud ehk 30 cm pikkust ja 3 cm paksust mudelit (KV30/3). Teiseks tehti katsetusi sama paksuse ja kiilu kaldenurgaga, kuid 40 cm pikkuse kiilvaimudeliga (KV40/3). Antud mudel oli eelnevast oma mahult ligikaudu kaks (1,93) korda suurem, mis andis võimaluse võrrelda vaia käitumise muutust olukorras, kui seda kasvatatakse pikkuse suunas paksust ja kaldenurka muutmata selliselt, et ruumala suureneb kahekordseks. Kolmandana katsetati kiilvaimudelit (KV40/6), mille pikkus jäeti 40 sentimeetriseks, kuid mida suurendati kaks korda paksuse suunas. Sedasi saadi omakorda võimalus võrrelda vaia käitumist ruumala kaks korda paksuse sihis suurendades. Saadud kuju oli ka kahemeetrise toodetava kiilvaia viis korda vähendatud mudel. Kõik katsetel kasutatud mudelite mõõtmed on tabelina välja toodud joonisel 3.1 (ruumalad arvutatud valemiga 4.1) ja valmis valatud mudelid on näha joonisel 3.2.



Tähis	Mõõtmed, mm				Ruumala, cm <sup>3</sup>
	L	a	b	c	V
KV30/3	300	86	30	8	423
KV40/3	400	120	30	16	816
KV40/6	400	120	60	16	1632

Joonis 3.1. Kasutatud kiilvaimudelite mõõtmed



**Joonis 3.2.** Valmis valatud kiilvaimudelid. a) KV30/3, b) KV40/6, c) KV40/3

Kõik mudelid on valatud Uninax valubetonist „Graniitbetoon M500“ tugevusklassiga C45/50. Vaiad armeeriti ehitusmaterjalide poes müüdavast aiavõrgust keeratud karkassiga. Aiavõrk on 1 mm traadist valmistatud keevisvõrk, mille võrgusilm on mõõtudega  $13 \times 13$  mm. Vaia mudel varustati keermestatud pesaga, mis paikneb vaia ülemises otsas pea tsentris. Eelkõige oli seda tarvis rammi juhtvarda kinnitamiseks dünaamilise katsetuse ajal. Pesana kasutati M8 jätkumutreid, mille külge keerati M8 suuruses polt, mis ühtlasi vaia ka keskelt tõmbele armeerib. Armeering ja vaiade valamiseks kasutatud vorm on näha joonisel 3.3. Armatuuri täpne ühtivus ehituses kasutatavate reaalseste kiilvaiadega ei olnud mudelite puhul oluline, kuna neid katsetati survestades, mille võtab peamiselt vastu betoon, mitte armeering. Suurtele tõmbe- ja paindejõududele kiilvaimudelid katsetuste ajal ei töötanud.



**Joonis 3.3.** Kiilvaimudelite valamisel kasutatud vorm ja armeering



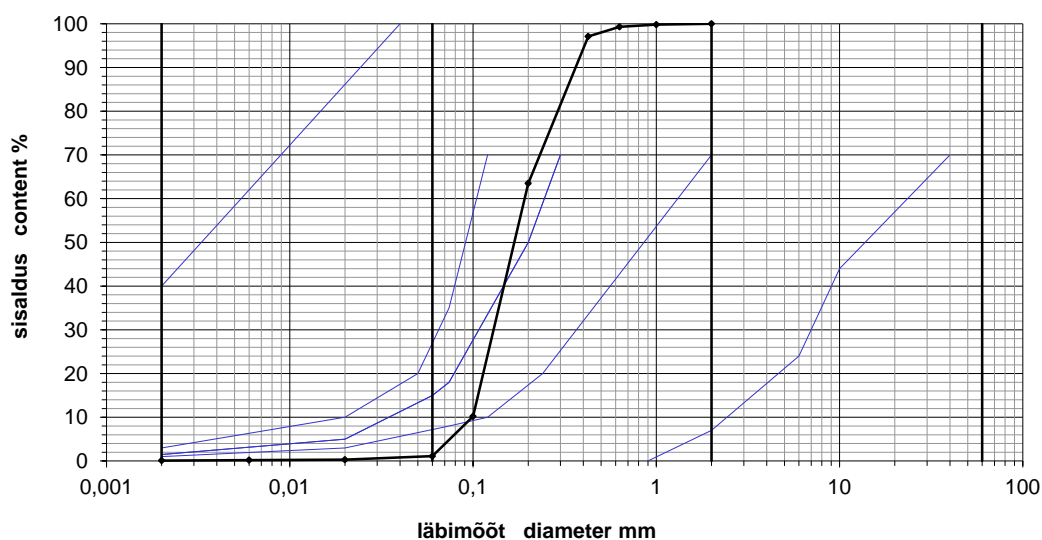
### 3.2 Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus

Katsetel on kasutatud Aardlapalu karjäärast kaevandatud peenliiva, mis on pestud ja sõelutud. Liiv kaevandati hüdrokaevandamise teel, tehnoloogiliste protsesside tõttu on peened savi- ja huumuseosakesed välja uhutud. Liiv on labori pinnasekasti toodud aasta enne katsetega alustamist.

Pinnase parameetrite uuringud toimusid Eesti Keskkonnauuringute Keskuses Tallinnas, kuhu viidi labori pinnasekastist kolmekilone rikutud struktuuriga proov. Uuringute käigus määrati liiva lõimis, veesisaldus, tihedusaste ja nihketugevus. Võetud proovid liigitusid ka Standardi EVS 1997-1:2003 alusel peenliivaks. Lõimise jaotumine fraktsiooni läbimõõdu järgi on toodud välja tabelis 3.1 ja lõimiskõver joonisel 3.4. Nagu tulemustest selgub, oli katsetel kasutatud liiv väga ühtlane. Peamiselt oli tegemist vaid kahe – peenliiva ja keskliiva fraktsiooniga, mis moodustasid 98,2 % kogu sisaldusest.

**Tabel 3.1.** Katsetel kasutatud pinnase lõimise jaotumine fraktsiooni läbimõõdu järgi

Pinnas EVS 1997-1:2003	Fraktsiooni läbimõõt mm, sisaldus %														C <sub>u</sub> d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>		
	Veeris	Kruus				Liiv				Mõll			Sau	<0,06		<0,002 / <0,06	
		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen					
	>60	60...20	20...6	6...2	kokku	2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06	kokku	0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002	kokku	<0,002			
peenliiv	0	0	0	0	0	0,7	35,8	62,4	98,9	0,8	0,1	0,1	1,0	0,1	1,1	9,1	1,9



**Joonis 3.4.** Katsetel kasutatud pinnase lõimiskõver

Loodusliku veesisalduse määramiseks võeti Eesti Keskkonnauuringute Keskuses kolm proovi, mille alusel saadi keskmiseks looduslikuks veesisalduseks  $w_n = 2,4 \%$ . Veesisalduse proove võeti ka katsepäevadel Maaülikooli laboris. Proovid kaaluti kohe peale nende võtmist ja pärast kahenädalast kuivamist. Tulemuste kohaselt varieerus veesisaldus  $w = 3...8 \%$ . Selline varieeruvus võis sõltuda nii proovi võtmise sügavusest, pinnase tihedusest kui ka pinnase niisutamisest. Kuna pinnasekast paiknes soojaõhupuhuri all, pidi seda regulaarselt niisutama, et liivpinnas liialt ei kuivaks.

Liivpinnase tihedusomadusi uuriti nii Proctorteimi kui ka Terzaghi teimi abil. Standard-Proctorteim näitas keskmiseks maksimaalseks tiheduseks  $\rho_{dmax} = 1,59 \text{ g/cm}^3$  ja Terzaghi puhul  $\rho_{dmax} = 1,64 \text{ g/cm}^3$  ning  $\rho_{dmin} = 1,39 \text{ g/cm}^3$ . Poorsustegur tihedaimas olekus  $e_{min} = 0,62$  ja kohevaimas olekus  $e_{max} = 0,92$ . Nihketeimi katsete põhjal saadi pinnase sisehõõrdenurgaks  $\varphi = 31$  kraadi ja nidususeks  $c = 3 \text{ kPa}$ .

Kuna katsetamisel oli eesmärgiks uurida ka pinnase tiheduse mõju vaia kandevõimele ja pinnase muutustele vaia süvistamisel, siis kasutati kahte erinevalt tihendatud pinnast. Tihedama pinnase saavutamiseks tihendati pinnast 86 kilogrammi kaaluva plaatvibraatoriga VIBROPLATE WP1550A 60 sentimeetri sügavuselt 15 sentimeetriste kihtidena (Lisa C, joonis C.1). Sedasi saavutati tiheduseks  $\rho = 1,55...1,59 \text{ g/cm}^3$  sõltuvalt löikerõnga proovi võtmise sügavusest. Tegemist oli tihedusega, mis oli ligilähedaselt saavutanud Proctorteimi järgi leitud maksimaalse võimaliku tiheduse. 60 sentimeetri sügavuselt tihendamine oli piisav, kuna kiilvaimudeli pikkust arvestades ei mõjutunud see enam sügavamal asetsevast pinnasest. Edaspidi nimetatakse sellist pinnast tihedaks pinnaseks.

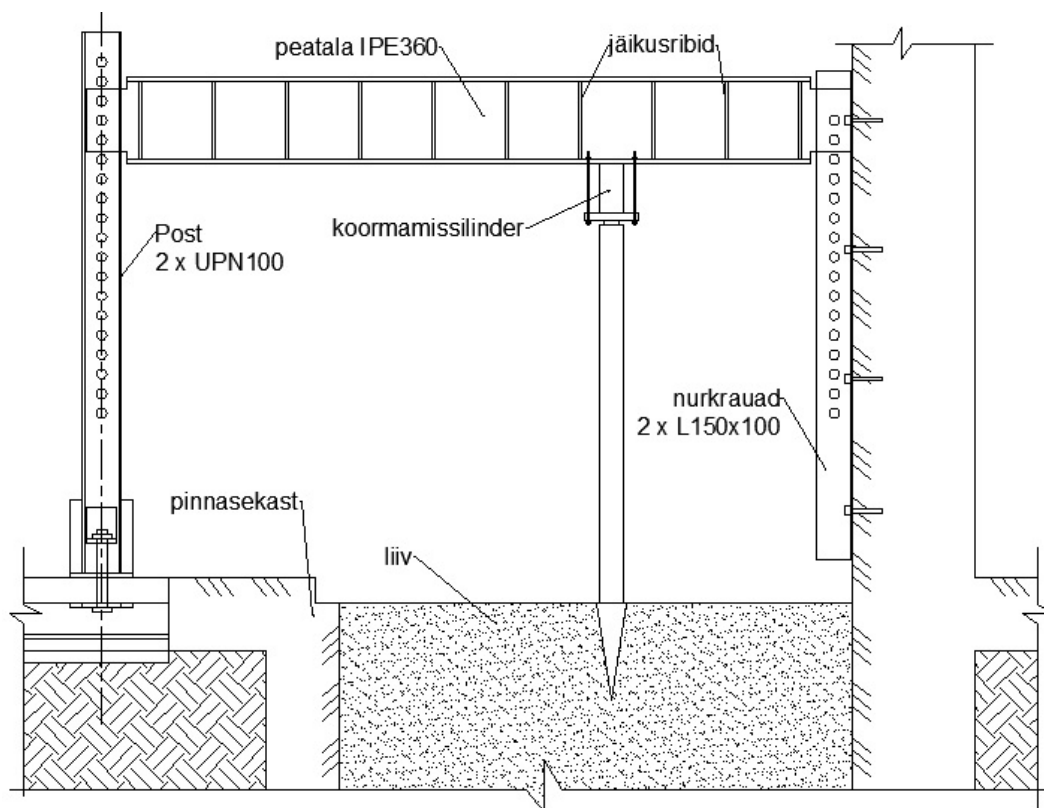
Kohevam pinnas saavutati pinnasekasti läbikaevamisega, mis seejärel tasaseks siluti ja jalgadega peal trampides kergelt tihendati. Sellise pinnase tiheduseks saadi löikerõnga proovidega  $\rho = 1,43...1,50 \text{ g/cm}^3$  sõltuvalt proovi võtmise sügavusest. Katsetel kasutatud tiheda ja koheva pinnase vahel saavutati seega selge tiheduse erinevus. Edaspidi nimetatakse sellist pinnast kohevaks pinnaseks.

### 3.3 Katseseadmestik

#### 3.3.1 Pinnasekast ja talastik

Katsed viidi läbi raudbetoonist pinnase kastis, mis oli täidetud liivaga. Kast oli oma sisemõõtmetelt 3,5 × 2 meetrit pikk. Sügavust ei õnnestunud mõõta, kuid see oli piisav valitud suurusega mudelite katsetamiseks.

Pinnasekasti kohale monteeriti kiilvaiade koormamiseks talastik (joonis 3.5), mis koosnes ühest põrandale kinnitatud postist, kahest seinale kinnitatud L-kujulisest nurkrauast ja nende külge ühendatud peatalast. Põrandale kinnituv post koosnes kahest UPN160 talast, seina külge kinnitatud L-profiilis talad olid mõõtmetelt 150 × 100 millimeetrit ja peatalana kasutati IPE360 terastala. Nurkraudade seina külge kinnitamiseks kasutati M16 suuruses keermelatte, mis kinnitati ankrumassiga betoonseina puuritud aukudesse. Peatala kinnitati poltidega suurimale võimalikule kõrgusele, selle külge monteeriti raam survesilindri kinnitamiseks. Silindrilt vaiale kandis survet üle puitpruss, mille ristlõike mõõtmed olid piisavad, et kasutatud koormuste juures mitte välja nõtkuda.



Joonis 3.5. Pinnasekast ja talastik

### 3.3.2 Mõõtmis- ja koormamisseadmed

Katseandmete salvestamiseks kasutati ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteemi, millega mõõdeti siirdeid nii vaia süvistamisel toimuva pinnasetõusu kui koormamisel tekkiva vajumi puhul. Samuti näitas aparaat survesilindris olevat rõhku. Mõõteseade on kujutatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6. ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteem

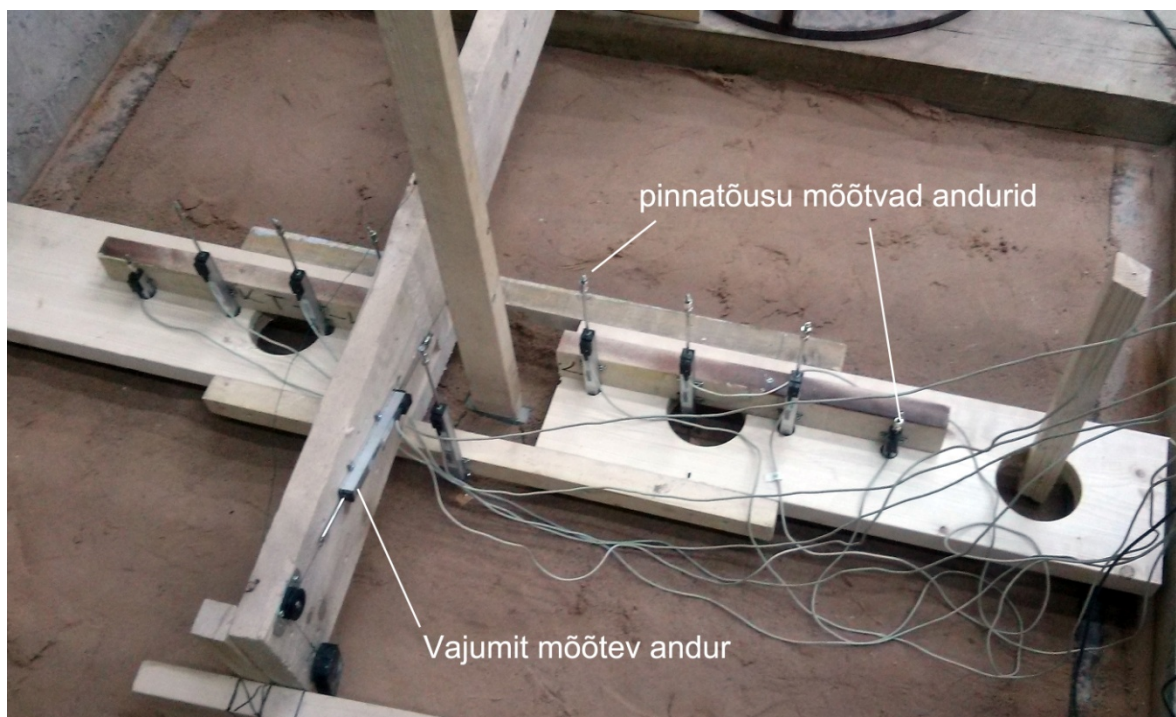
Kiilvaimudelite koormamiseks kasutati hüdraulilisel õlisurvel töötavat survekatseseadet Lukas LZM 25/200, mille maksimaalne jõud on 250 kN ja silindri käik 200 mm. Kuna silindri käigust ei piisanud vaiade süvistamiseks, tuli kasutada puitprussi koormuse ülekandmiseks. Pressi koormust mõõdeti eespool kirjeldatud ALMEMO 5690-2 AHLBORN seadmega, mille mõõtmistäpsus on 10 N. Lukas press on kujutatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7. Lukas LZM 25/200 survekatseseade

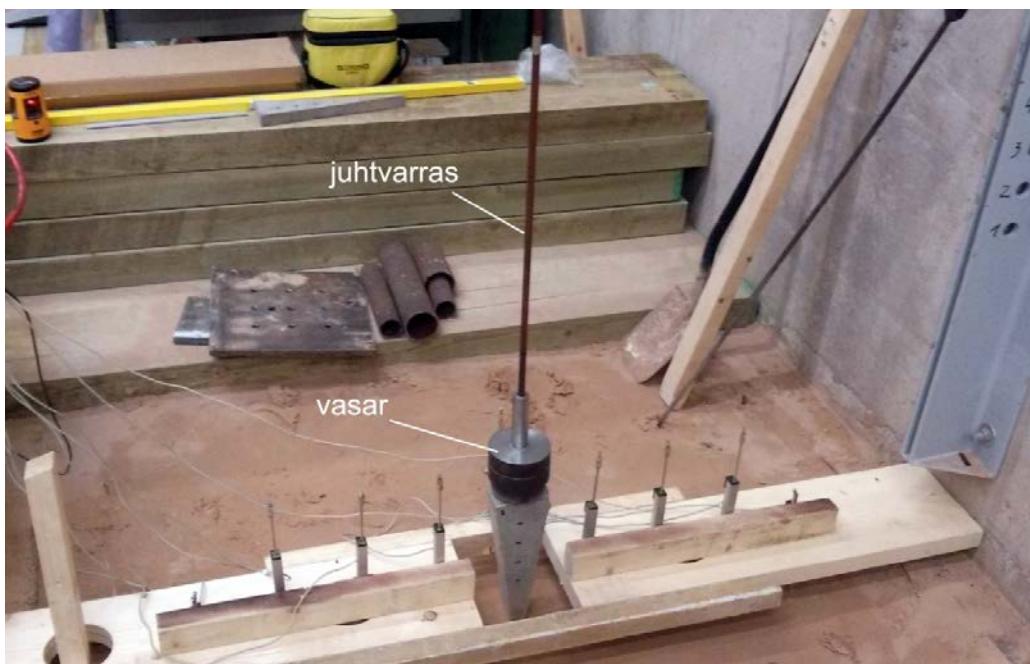
Koormuskatse vajumite ja pinnasetõusude mõõtmiseks kasutati ALMEMO FWA100T AHLBORN siirdeandureid, mille mõõtmistäpsus on 0,01 mm. Esimese vaimudeli katsetuste juures kasutati kahte siirdeandurit – ühte vajumi ja teist pinnatõusu mõõtmiseks. Sedasi organiseeritult tuli pinnasetõuse kindlates punktides mõõta käsitsi asetades anduri teisaldatavale juhtpinnale ja mõõta liivpinnasele asetatud markerite kaugust. Hiljem otsustati töö lihtsustamise ja kiirendamise ning ka täpsemate tulemuste jaoks kasutada pinnatõusu mõõtmiseks üheksat siirdeandurit korraga, nii et koos vajumit mõõtvat anduriga oli korraga töös neid kümme.

Selleks, et tagada siirdeandurite mõõtmistäpsus, tuli valmistada koormamisest sõltumatu konstruktsioon, mis pressi poolt tekitatud jõu toimet ei liiguks. Lahendus leiti puidust raamide valmistamisega. Andurite süsteem ja puidust raamid on näidatud joonisel 3.8. Raamid on teisaldatavad ja asuvad piisaval kõrgusel, et mitte vaia süvistamisel tekkivaid pinnasetõuse mõjutada. Keskel on ava puitprussi ning rammimisvasara jaoks. Vaia kiilukujuliste külgede suunas mõõdavad pinnasetõusu mõlemal pool neli andurit, kuna selles suunas toimub põhiline pinnasetõus. Vertikaaltahu suunas on sellel süsteemil mõõtmataks vaid üks andur.



**Joonis 3.8.** Pinnatõusu ja vajumit mõõtvate siirdeandurite süsteem ja lahendus puidust valmistatud raamidega

Dünaamilise koormuskatse jaoks oli vajalik kasutada löökkõormusseadet. Lasti valmistada vasar, mis koosneb terasest raskusketastest ja käepidemest. Antud katsetuste juures kasutati 7,5 kg nimikaaluga vasarat, kuid vajadusel sai kettaid 2,5 kg kaupa eemaldada või lisada. Selleks, et vasar vaia vertikaalselt tsentrisse rammiks, kasutati juhtvarrast, mis ühendati keermega vaia peadesse valatud keermepesasse. Vasara keskel on avaus juhtvarda jaoks. Vasara langetamiskõrgus märgiti juhtvardale kas teibi või markeriga. Betoonvaia ja metallvasara vahele asetati vaia peast väiksem ja 15 mm paksune vineeritükk, et betoon rammimisel ei puruneks. Vineeritüki tsentris oli puuritud auk, mida läbis vaia juhtvarras. Vai koos vasara ja juhtvardaga on näidatud joonisel 3.9.



**Joonis 3.9.** Vasar ja juhtvarras dünaamilise koormuskatse jaoks

Lisaks olid abivahenditeks veel laserlood ja penetromeetrid (Lisa C, joonis C.2). Laserlood Cross line LP330 leidis kasutuse dünaamilise katse vastete ehk ühest löögist tekkinud vajumi mõõtmisel. Penetromeetritega hinnati pinnase tihedust lugedes kindla raskusega tehtud vajalikke lööke penetromeetri varda süvistumiseks 10 sentimeetri võrra. Kasutusel oli ostetud penetromeeter Englo PM-1, millega sai tihedust mõõta vaid 30 cm sügavuseni, kuid millel oli kaasas ka löökide arvu ja tiheduse sõltuvuse tabel. Pika (1 m) vardaga penetromeeter on kasutusel AS-il Kurmik. See võimaldas tihedust mõõta kuni meetri sügavuselt, kuid löökide arvul ja reaalsel tihedusel puudus katsete põhjal korrelatsioon, millest on täpsemalt räägitud katsetulemuste osas peatükis 4.2.

### 3.4 Katsete meetodika

#### 3.4.1 Katseplaan

Katsete läbiviimisel lähtuti kirjanduse analüüsimisel kogutud andmetest ja juhendajate kogemustest. Erineva kujuga vaiade juures hinnati nende dünaamilist ja staatilist kandevõimet ning pinnasetõusu ja võimalikku tihenemist nende rammimisel. Samuti uuriti kahte erineva tihedusega pinnast. Esialgu viidi katsed läbi tihedamas pinnases ja siis kohevamas pinnases. Kõikidel erinevatel katsetatud variatsioonidel korrati katseid kolm korda, et tulemused oleksid usaldusväärsed. Katsete järjekord on näidatud tabelis 3.2. Katsete teostamise ajad on esitatud laboripäevikus (lisa B, tabel B.1).

**Tabel 3.2.** Katsete järjekord

Katse jrk. nr.	pinnase tihedus	vaimudeli pikkus, cm	vaimudeli paksus, cm	vaimudeli kood	märkus
1.	tihe	30	3	KV30/3	korrektne
2.	tihe	30	3	KV30/3	korrektne
3.	tihe	30	3	KV30/3	ebaõnnestunud
Pika vardaga penetromeetri löökide arvu ja liiva tiheduse korrelatsiooni katse					
4.	kohev	40	3	KV40/3	korrektne
5.	kohev	40	3	KV40/3	korrektne
6.	kohev	40	3	KV40/3	korrektne
7.	kohev	40	6	KV40/6	korrektne
8.	kohev	40	6	KV40/6	korrektne
9.	kohev	40	6	KV40/6	korrektne
10.	kohev	30	3	KV30/3	korrektne
11.	kohev	30	3	KV30/3	korrektne
12.	kohev	30	3	KV30/3	korrektne

#### 3.4.2 Tegevuskava

Esimeste katsete põhjal korrigeeriti järgnevate meetodikat, mistõttu esines erinevate vaimudelite uurimise tegevuskavas erinevusi. Tegevuskava nägi välja järgmine:

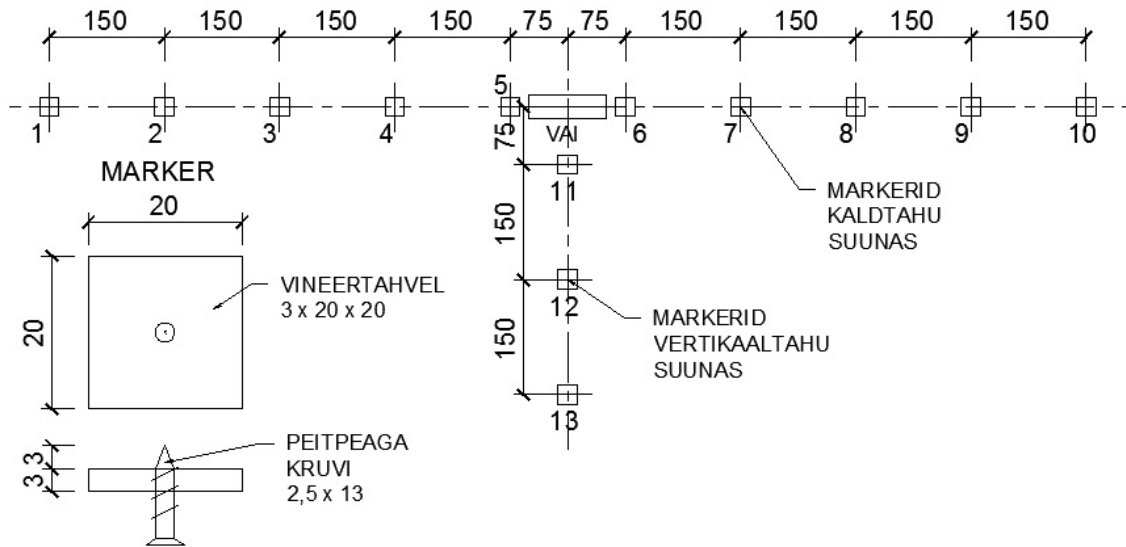
1. Enne katsete teostamist valmistati ette liiv pinnasekastis. Esmalt pinnas niisutati ning vaia süvistamise kohas segati labida sügavuselt. Tihedama pinnase uurimise korral tihendati pinnas plaatvibraatoriga VIBROPLATE WP1550A 60 cm sügavuselt

15 cm kihtidena. Kohevama pinnase uurimisel kaevati pinnas vaia ümber läbi ning tihendati kergelt jalgadega peal trampides. Vajalikku tihedusastet mõõdeti standardse käsipenetromeetriga.

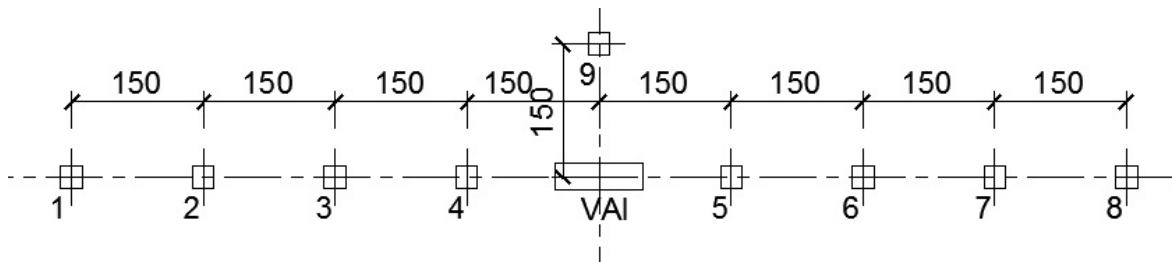
2. Pinnase tiheduse mõõtmine standardse penetromeetriga.
  - a. Penetromeetri varras suruti pinnasesse 10 cm pikkuselt esimese märkekriipsuni.
  - b. Penetromeetri haamer tõsteti ülemisse asendisse ja lasti kukkuda. Lööke tehti seni, kuni penetromeetri varras oli süvistunud järgmised 10 cm (järgmise märkekriipsuni vardal). Saadud löökide arv kirjutati katseprotokollile. Löökide arvu põhjal sai standardse penetromeetriga kaasas olevast tabelist hinnata liiva tihedust (kanti samuti katseprotokollile).
3. Pinnase uurimisel tehti ka pikavardalise penetromeetriga üks katsetus tihendatud alas vaiast vähemalt 1,5-kordse vaia pikkuse kaugusel vaia pea lühemas suunas. Pikk penetromeeter suruti 10 cm sügavusele pinnasesse ning lasti haamril ülemisest asendist kukkuda seni, kuni varras süvistus järgmised 10 cm. Kirjutati üles saadud löökide arv ja varda otsa süvistus peale katset. Korrati seni, kuni varras oli süvistunud 60 cm sügavusele (vastab kahele vaia pikkusele). Iga mõõtmistulemus kirjutati katseprotokollile. Penetromeeter eemaldati pinnasest.
4. Katsetusplats siluti latiga siledaks.
5. Platsile märgiti survesilindri asukohta arvestades vaia süvistamise tšenter. Tiheda pinnase puhul paigaldati vastavalt ettenähtud skeemile pinnase tõusu mõõtmise markerid (joonis 3.10). Markerid valmistati 3 mm paksusest vineerist mõõtudega 20 × 20 mm, mille tsentrisse kruviti peitpeaga puidukruvi mõõduga 2,5 × 13 mm. Marker paigaldati pinnasesse selliselt, et kruvi pea vajutati paigaldamisel pinnase sisse ning teravik jäi üles poole. Koheva pinnase puhul paigaldati markerid pärast andursüsteemiga puitraami (joonis 3.8) paikatõstmist. Markerid paigaldati andurite alla selliselt, et markeri kruvi teravik jääks täpselt anduri varda vastu. Pinnatõusu mõõtmisel kohevas liivas kasutati teistsuguseid punkte kui tiheda pinnase puhul, kuna korraga oli kasutada mõõtmispunktidest vähem siirdeandureid ja vaia rammimiseks vajalik avaus andurite puitraamil ei võimaldanud siiret mõõta vaia peale nii lähedalt kui tiheda pinnase puhul, kus



siirde mõõtmine toimus käsitsi ühe anduriga ilma puitraamita. Pinnatõusu mõõtmise punktide skeem koheva pinnase puhul on näidatud joonisel 3.11.



**Joonis 3.10.** Pinnase tõusu markerite paiknemine tiheda pinnase uurimisel



**Joonis 3.11.** Pinnase tõusu markerite paiknemine koheva pinnase uurimisel

6. Tiheda pinnasega katsetamisel asetati markerite kohale teisaldatav juhtpind metallvarda näol, mis looditi. Juhtpinna teisaldamisel ja tagasi panemisel pidi olema tagatud juhtpinna kõrguse ja asendi säilimine. See võimaldati markeriga tehtud märgistega. Koheva pinnase puhul ei olnud juhtpinnad vajalikud, kuna kasutusel oli anduritega raam, mis seisis rammimise algusest lõpuni paigal.
7. Tiheda pinnasega katsetamisel mõõdeti pinnasetõusu ühe siirdeanduriga käsitsi. Selleks asetati digitaalne andur juhtpinna selliselt, et mõõturi keha toetus sellele ning mõõtevarras asetus markeri kruviteravikule. Mõõturit tuli hoida vertikaalasendis. Kõrguslugemeid näitas ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteem, näidud kanti protokollis. Koheva pinnase puhul olid andurid juba koos raamiga vajalikes mõõtepunktides ning tuli vaid tulemused üles kirjutada.

8. Enne vaia rammimist tuli vai, rammi juhtvarras ja rammi haamer kaaluda ning kaalud kanda katseprotokollile. Kasutati 7,5 kg nimikaaluga haamrit. Samuti tuli vai üle mõõta ja kanda mõõdud katseprotokollile.
9. Vai kruviti haamri juhtvarda külge. Vaia ja haamri vahele pandi horisontaalmõõtudelt vaia peast väiksem vineerklots paksusega 15 mm. Haamer asetati alumisse asendisse ja juhtvardale tehti kleeplindi või markeriga märged haamri pealispinnast 60 cm kõrgemale. Vai koos rammiga tõsteti vaiamiskohta hoides kinni juhtvarda ülemisest otsast. Nii jäi vai ja rammimisseade vertikaalsesse asendisse. Haamri raskus surus vaia alguses õrnalt pinnasesse ja fikseeris vaia asendi.
10. Laserlood asetati rammimisest sõltumatule horisontaalpinnale näitama horisontaalset kõrgusjoont. Laserjoone kõrgusele tehti rammi juhtvardale algekõrguse määramiseks markeriga märgis, mille järgi edaspidi vaia pea kõrguse muutumist rammimisel mõõta sai.
11. Haamer tõsteti vardale 60 cm kõrgusele tehtud märgini ja lasti kukkuda ehk tehti üks löök. Seejärel mõõdeti vaia pea kõrguse muut sõltuvalt laserloodiga märgitud algekõrgusest. Vaia pea kõrguse muut tehtud löögist oli selle märgise ja laserjoone vaheline pikkus, sest juhtvarras süvistus pinnasesse koos vaiaga. Kõrguse muut ehk süvistus mõõdeti joonlauaga ning märgiti katseprotokollile.
12. Edasi hakati vaia süvistama kas ühe löögi kaupa või mitmelöögiliste seeriatega sõltuvalt vastest. Tehtud löökide arv märgiti vastavuses vaia pea süvistusega katseprotokollile.
13. Kui jõuti vaia süvistuseni, mis oli selline, et vai oli ligilähedaselt 20 cm pikkuselt pinnasesse süvistatud, siis tehti pinnase markerite nihkumise mõõdistus nagu kirjeldatud punktides 6 ja 7.
14. Sama tehti ka 25 cm süvistuse korral ning 40 cm pikkust vaia katsetades ka 30 cm ja 35 cm süvistuse korral.
15. Rammimine lõpetati, kui vaia pea oli ümbritsevast pinnasest ligikaudu 15 mm kõrgemal. Tehti viimane kolmelöögiline seeria ning määrati vaia süvistus ja kanti protokollile. Taandades selle ühele löögile mõõtmistulemi jagamisel löökide arvuga

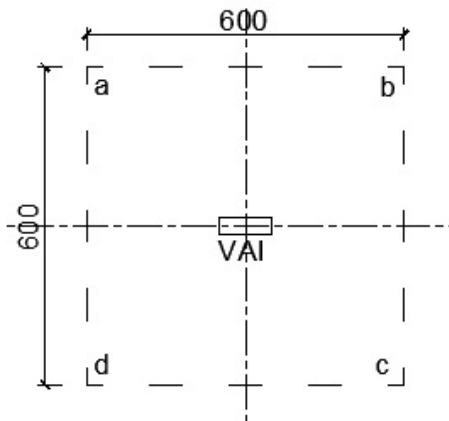
- 3 saadi vaste, mis on vajalik vaia kandevõime arvutamiseks dünaamilisel koormuskatsel.
16. Rammimisseade eemaldati vaia küljest juhtvarda lahtikruvimise teel.
  17. Tehti veelkord markerite nihkumise mõõtmine nagu kirjeldatud punktides 6 ja 7 ning kanti tulemid protokollis.
  18. Alustati staatilise koormuskatse tegemist. Hüdrosilindri alla paigaldati puidust varras ja selle külge kinnitati siirdeandur vaia paigutise mõõtmiseks. Varda vaiapoolne ots oli 6 cm pikkuselt vaia peast väiksemate mõõtudega, et see ei hakkaks vaia surumisel pinnasesse mõju avaldama. Varras suruti kergelt (koormusega 1 kN) paika Lukas pressile rõhku avaldades. Võeti siirdeanduri algnäit, mida kuvas ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse seade ja kanti protokollis.
  19. Käivitati taimer. Vaia koormati esimese koormusastmega 2,5 kN. Rõhku hoiti pressi abil kümne minuti jooksul stabiilsena ning võeti vajumise lugemid 3, 5 ja 10 minuti pärast koormamise algusest. Märgiti protokollis.
  20. Edasi suurendati koormusastet 2,5 kN kaupa hoides iga koormust peal 10 minutit ning võttes vajumisnäidud 3, 5 ja 10 minuti järel.
  21. Staatiline katse lõpetati, kui pinnas purunes. Pinnase purunemiseks loeti antud juhul koormusastet, mille käigus vaia vajum siirdeanduri algnäidu suhtes ületab 40 millimeetrit.
  22. Silindri surve võeti maha pressi kraan lahti keerates ning staatilise katse seade demonteeriti.
  23. Tehti viimane pinnase liikumismarkerite mõõtmine, kirjeldatud punktides 6 ja 7.
  24. Tiheda pinnasega katsetamise käigus tehti pinnase markerite paiknemise kohas pinnase tiheduse mõõtmine penetromeetritega (Lisa C, joonis C.3). Vaia ühe kaldtahu suunas tehti mõõtmine lühikese vardaga ja teise kaldtahu ning vertikaaltahu suunas pika vardaga penetromeetriga. Mõõtmist alustati kaldtahu suunas vaia lähedalt ja lõpetati vertikaaltahu juures suunaga vaiast eemale. Pikka penetromeetrit süvistati 60 cm sügavuseni. Andmed kanti protokollis. Koheva pinnasega katseid viidi läbi hiljem ja selleks ajaks oli juba selge, et pika

penetromeetri löökide arv ei oma korrelatsiooni pinnase tegeliku tihedusega ja seetõttu ei tehtud nii palju mõõtmisi, vaid mõõdeti ainult paaris valitud kohas.

25. Lõpuks võeti löikerõngaga pinnaseproovid selle poole pealt, kus mõõdeti lühikese penetromeetriga. Proovi võtmise koht jäi vaia tsentrist ligikaudu 15...20 cm kaugusele kahe penetratsioonimõõdu koha vahele. Löikerõnga proov võeti pinnast 10 cm, 20 cm ja 30 cm sügavuselt.
26. Võeti pinnase niiskussisalduse proov vaia süvistuskoha lähedalt.
27. Proovid kaaluti ja kirjutati tulemused protokollis.
28. Viimasena eemaldati kiilvai pinnasest ja katse oli lõppenud.

Pärast tihedas pinnases tehtud katsetuste lõppu tekkis huvi pika vardaga penetromeetri löökide arvu ja pinnase tiheduse vahelist korrelatsiooni uurida. Kuna tegemist oli AS-i Kurmik välja töötatud seadmega, ei olnud sellel korrelatsioonitabelit nagu standardsel penetromeetril. Selle uuringu tegevuskava oli järgnev:

1. Märkiti neli punkti ruudu nurkadena selliselt, et ruudu tseenter jäi vaia süvistuskohale. Ruudu küljeks valiti 600 mm. Punktide asetus on näidatud joonisel 3.12.



**Joonis 3.12.** Punktide paiknemine pika vardaga penetromeetri korrelatsiooni katse ajal

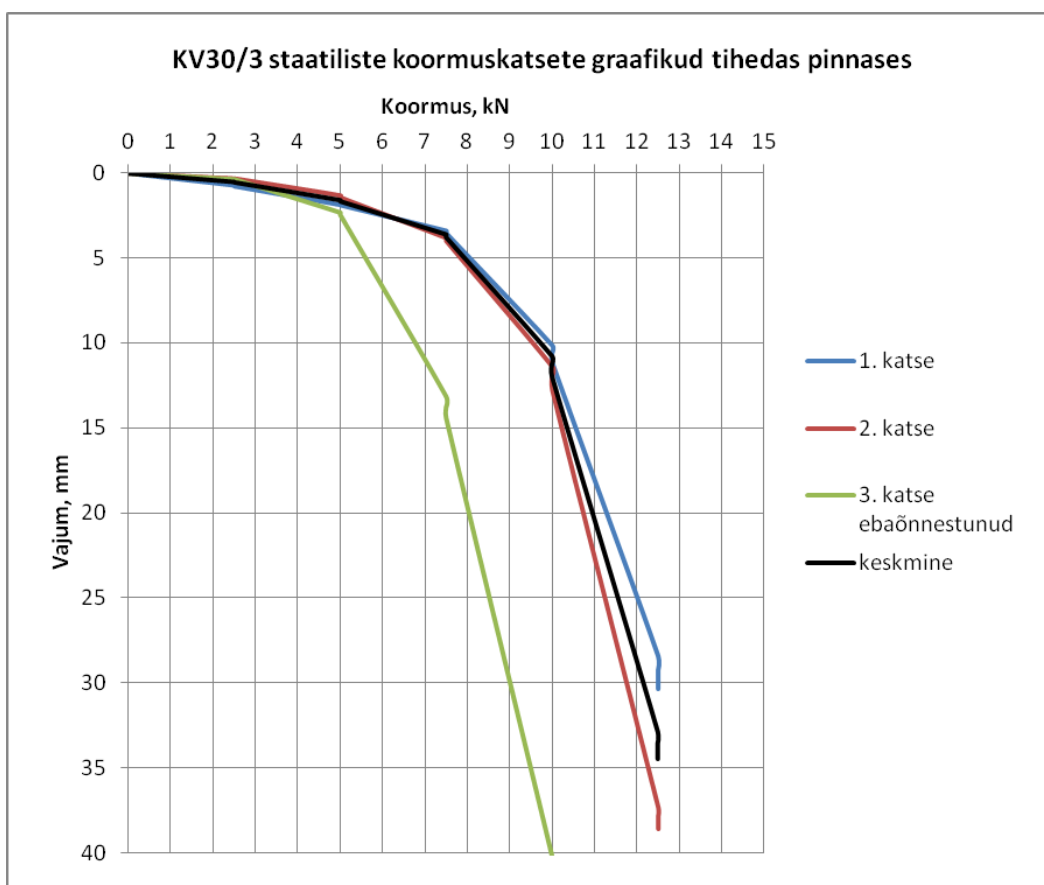
2. Kõigis neljas punktis loeti pika vardaga penetromeetriga tehtud lööke süvistumiseks 10 cm kaupa kuni 60 cm sügavuseni. Andmed kanti protokollis.
3. Kõigis neljas punktis võeti penetromeetri augu kõrvalt löikerõngaga proov samadelt sügavustelt, kus oli tehtud penetromeetriga mõõtmised.
4. Võrreldi löikerõnga proovidest leitud tihedusi samadel sügavustel saadud penetromeetri löökide arvuga.

## 4 KATSETULEMUSED

### 4.1 Kiilvaimudelite kandevõime

#### 4.1.1 Staatiline kandevõime erinevatel mudelitel

Staatilise kandevõime graafikud joonistusid kõikidel katsetel välja ootuspäraselt omades kolme eristuvat piirkonda. Esimeses piirkonnas kasvas koormuse lisades vajum lineaarselt, teises piirkonnas toimus koormuse lisades järjest suurenev vajumine moodustades graafikul kõvera. Tegemist on vaia kandevõime seisukohalt kriitilise tsooniga, kuna igasugune koormuse juurdekasv võib kaasa tuua stabiilsuse kadumise. Kolmandas lõigus toimus taas lineaarne vajumine, kusjuures koormuse lisades kasvas vajum ulatuslikult, näidates et vai on kandevõime kaotanud. Staatilise koormuskatse graafik kõikidest mudeliga KV30/3 (30 cm pikkune ja 3 cm laiune mudel) tihedas pinnases tehtud katsetest ja nende keskmisest on toodud välja joonisel 4.1.



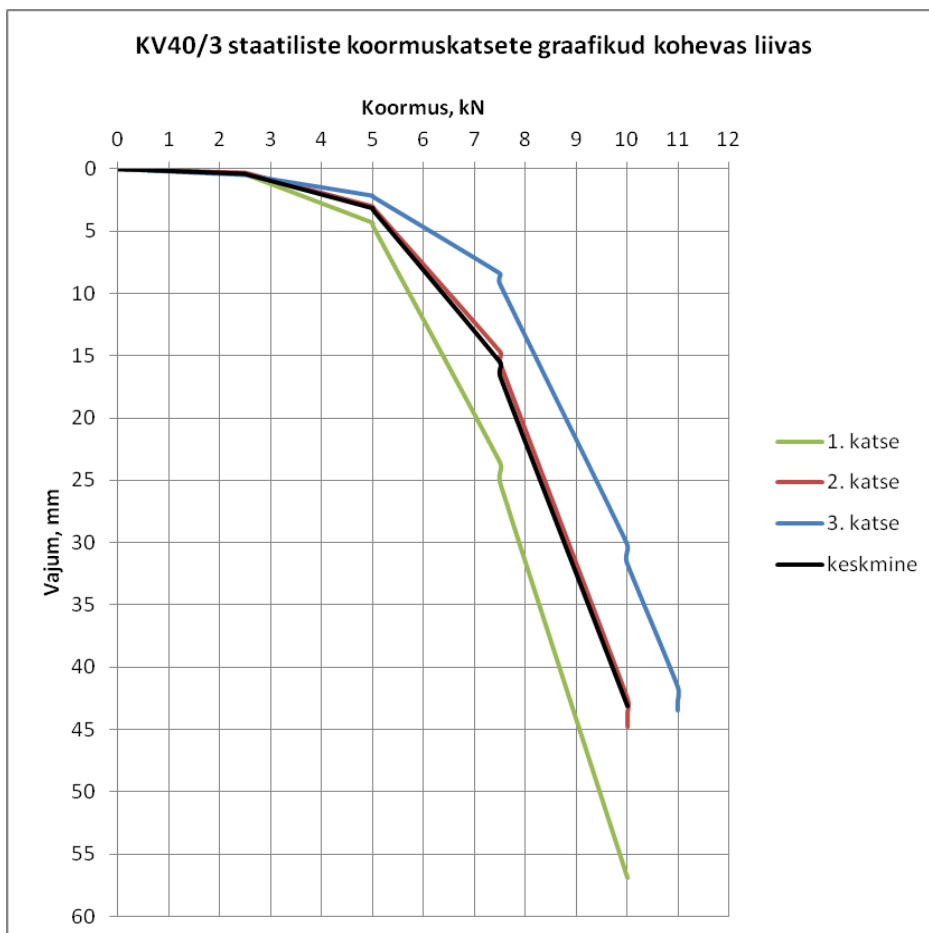
Joonis 4.1. KV30/3 staatiliste koormuskatsete graafikud tihedas pinnases

Kolmandat katsetust võib lugeda ebaõnnestunuks, kuna vai süvistus dünaamilise katse ajal vasara juhtvarda mittevertikaalse asendi tõttu viltu pinnasesse (Lisa C, joonis C.4). Vasar tabas vaia pinnasesse rammides nurga all, tekitades tühimiku ühe vertikaaltahu ja pinnase vahele. Koormuse ekstsentrilisusest tingitult suruti staatilise katse ajal vaia veelgi rohkem viltu. Samuti ei olnud pinnas tiheduse kontrollmõõtmiste järgi nii tihe kui esimese kahe katse ajal, mis näib olevat peamine süüdlane vaia väiksemas kandevõimes. Korrektsuse huvides oli mõttekas katsetus keskmiste arvestamisel kõrvale jätta, kuna see oleks tihedas pinnases KV30/3 mudeli kandevõimet alahinnanud. Pinnase tihedus oli kolmandal katsel ligikaudu  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , samas esimesel kahel katsetusel oli see keskmiselt  $1,57 \text{ g/cm}^3$ . Järgnevate mudelite katsetustel selliseid probleeme enam ei esinenud, kuna rammi juhtvarda keere painutati sirgeks ja pöörati rohkem tähelepanu asjaolule, et pinnas oleks kõikidel kohevas liivas tehtud katsetel tiheduselt sarnane.

Esimesel ning teisel katsel käitus vaia kandevõime sarnaselt ning iseloomulikud punktid graafikult ehk piirkoormused on leitud nende kahe katse keskmiste tulemuste graafiku järgi. Vaia külgede vastupanu iseloomustav piirkoormus (edaspidi  $N_k$ ) väljendub esimese lineaarse lõigu lõpus. Roomepiir ehk proportsionaalsuspiir (edaspidi  $N_{pr}$ ) asub mittelineaarses kriitilises tsoonis ning purunemisiir on kohas, kus vajum ületab 4 cm. Graafikult saab piirkoormuste kohta välja lugeda, et  $N_k = 3,5 \text{ kN}$ ,  $N_{pr} = 8 \text{ kN}$  ja  $N_{piir} = 13 \text{ kN}$ . Kõige raskem on piirkoormustest määrata roomepiiri ja tihti on selle hindamine mingil määral subjektiivne. Üldjuhul jääb see kriitilise tsooni esimesse poolde ja on liivpinnaste korral punktis, kus vajum on 5...7,5 mm.

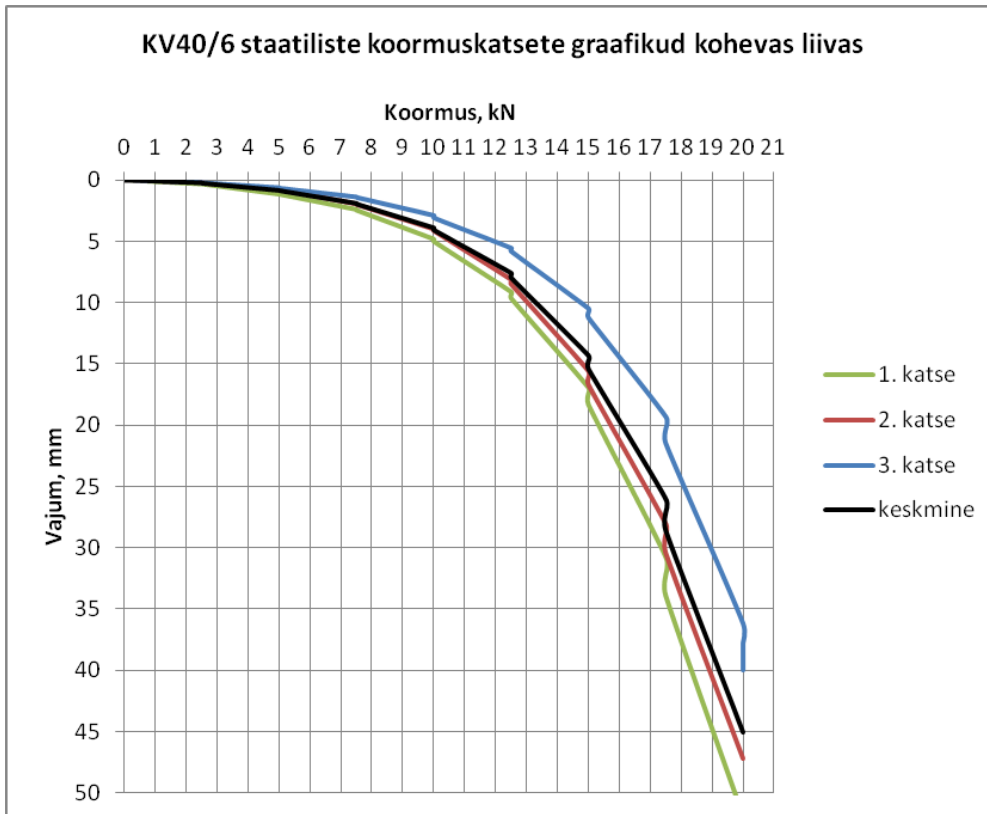
Välja toodud KV30/3 mudeli graafikul tihedas pinnases joonisel 4.1 on selgelt näha kolmandas lõigus toimuv järsk langus. Näiteks katse alguses on 5 kN suuruse koormuse lisamine kaasa toonud vaid 2 mm suuruse vajumi, lõpus on aga 5 kN lisamine toonud kaasa lausa 30 mm suuruse vajumi. Samuti on graafikul selgelt välja joonistunud mittelineaarne kriitiline tsoon, mis algab ligikaudu kohas, kus rakendatud koormus ehk  $P = 4 \text{ kN}$  ja lõppeb seal, kus  $P = 10 \text{ kN}$ . Selles vahemikus suudab vai ligikaudu 9 mm ulatuses pinnasesse vajuda ning tekib olukord, kus vaiale koormuse lisandumisel toimuvad eriti suured deformatsioonid.

Joonisel 4.2 on näha sarnast staatilise kandevõime graafikut kohevas pinnases katsetatud mudeli KV40/3 kohta. Kolme katse keskmiste tulemuste graafikult on välja loetud piirkoormused sarnaselt eelnevale mudelile. Antud juhul on  $N_k = 2,5$  kN,  $N_{pr} = 5,5$  kN ja  $N_{piir} = 9,5$  kN. Graafikult on näha kolme katse varieeruvus antud mudeliga sarnases pinnases ning nende keskmine tulem. Erinevad staatilist koormuskatset puudutavad võrdlusgraafikud on toodud järgmises alajaotises (4.1.2). Kõik mudeliga KV40/3 tehtud katsetused kulgesid plaanipäraselt ja kandevõime varieeruvus võib olla põhjustatud pinnase natuke erinevast tihendamisest enne katsetega alustamist. Antud mudeli juures ühtib keskmiste tulemuste graafik ligikaudselt teisena tehtud katsetuse staatilise kandevõime graafikuga.



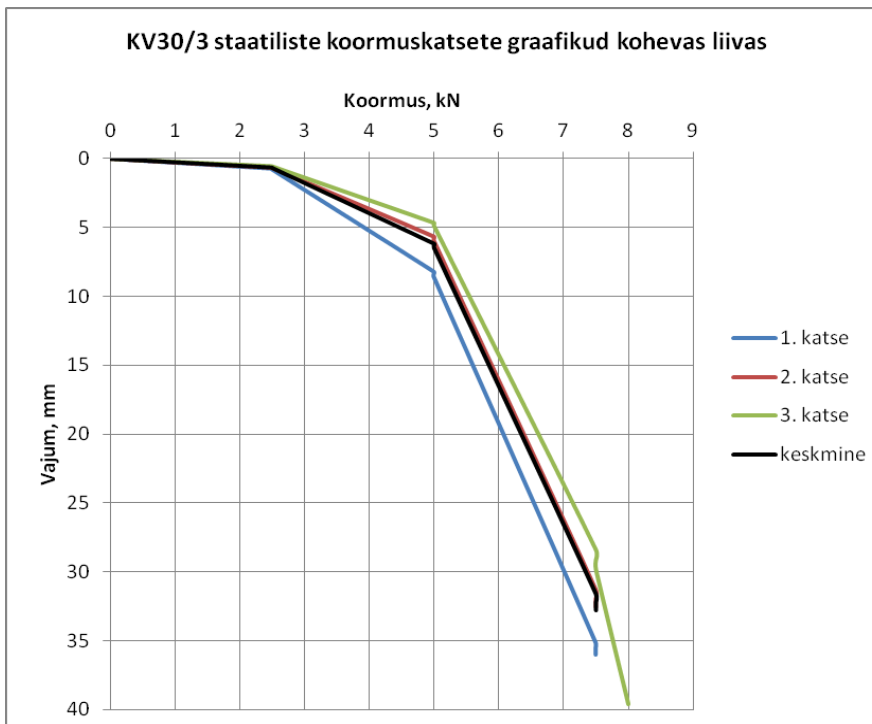
**Joonis 4.2.** KV40/3 staatiliste koormuskatsete graafikud kohevas pinnases

Eelmisest mudelist kaks korda paksema kiilvaimudeli KV40/6 kohta on kohevas pinnases staatilise kandevõime graafik toodud välja joonisel 4.3. Selle mudeli koormuspiiridest oleks  $N_k = 5$  kN,  $N_{pr} = 11,5$  kN ja  $N_{piir} = 19$  kN.



Joonis 4.3. KV40/6 staatiliste koormuskatsete graafikud kohevas pinnases

Viimase mudelina on joonisel 4.4 välja toodud KV30/3 staatilise koormuskatse graafik kohevas liivas. Antud mudeli jaoks on  $N_k = 2$  kN,  $N_{pr} = 4,5$  kN ja  $N_{piir} = 8$  kN.



Joonis 4.4. KV30/3 staatiliste koormuskatsete graafikud kohevas pinnases

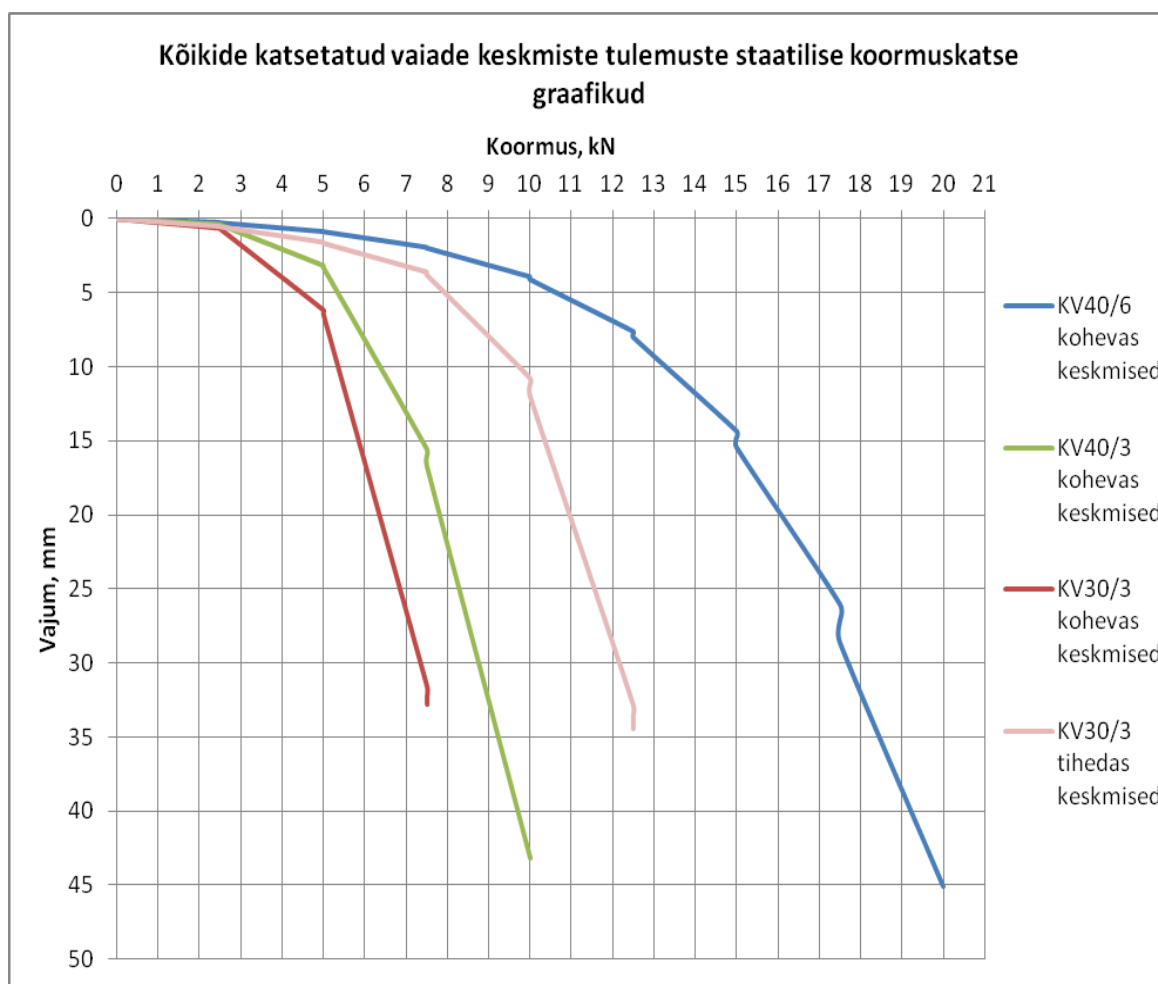


#### 4.1.2 Staatilise kandevõime võrdlusgraafikud

Erinevate mudelite staatilise kandevõime paremaks võrdlemiseks ja hindamiseks on nende koormuspiirid toodud välja tabelis 4.1. Kõikide mudelite keskmiste tulemuste graafikud on kõrvuti näidatud joonisel 4.5.

**Tabel 4.1.** Katsetatud mudelite koormuspiirid

mudel	pinnas	tihedus, g/cm <sup>3</sup>	N <sub>k</sub> , kN	N <sub>pr</sub> , kN	N <sub>piir</sub> , kN
KV30/3	tihe	1,57	3,5	8	13
KV40/3	kohev	1,46	2,5	5,5	9,5
KV40/6	kohev	1,46	5	11,5	19
KV30/3	kohev	1,47	2	4,5	8

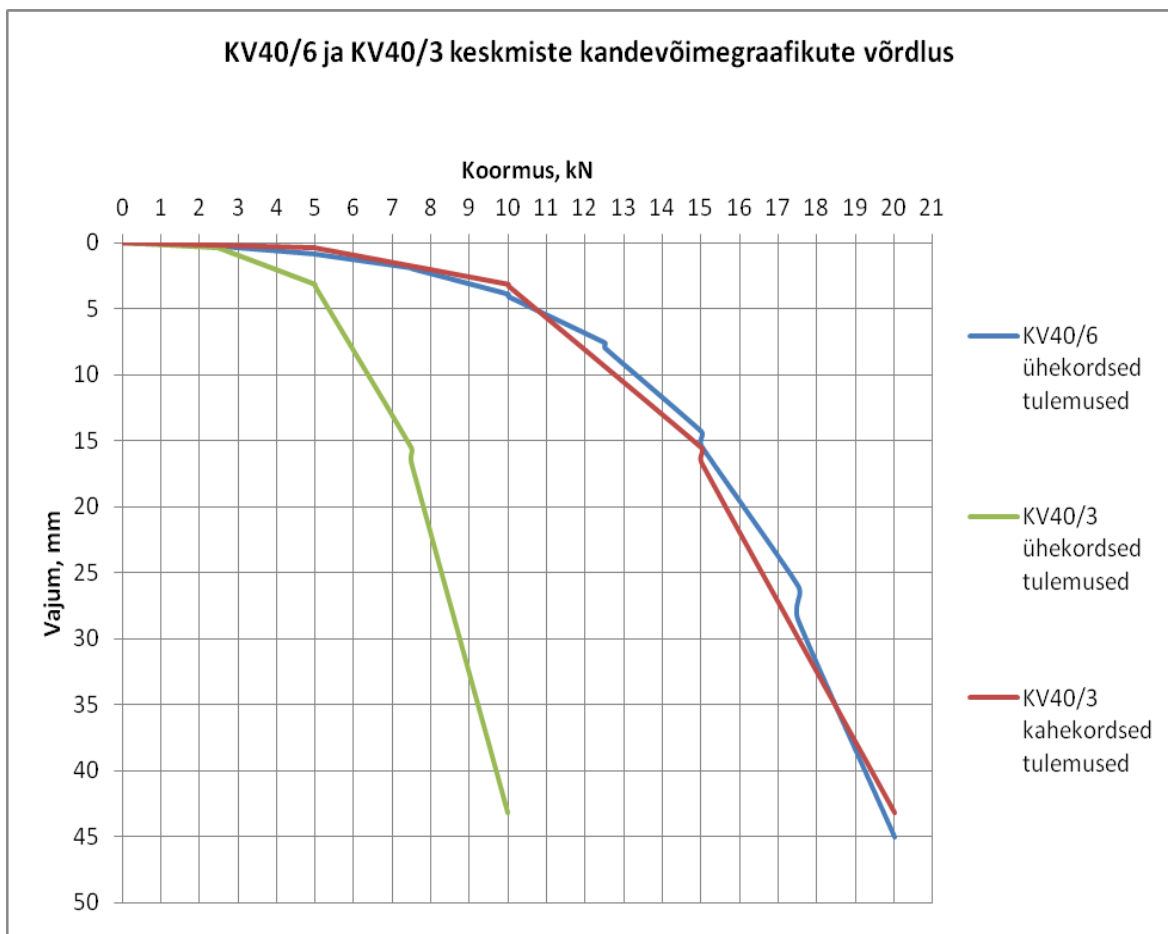


**Joonis 4.5.** Kõikide katsetatud vaiade keskmiste tulemuste staatilise koormuskatse graafikud

Antud graafikult (joonis 4.5) on väga selgelt näha mudeli KV30/3 kandevõime erinevus sõltuvalt pinnase tihedusest. Tihedamas katsetatud pinnases on vaial olnud ligikaudu kaks

korda suurem kandevõime kui kohevas pinnases. Seda kõike saab järeldada ka tabelis 4.1 välja toodud koormuspiiridest. Arvestades asjaolu, et katsetel kasutatud kohevast pinnasest ( $\rho = 1,43...1,50 \text{ g/cm}^3$ ) saab liivpinnas Terzaghi teimi järgi olla veelgi kohevam ehk väiksema tihedusega võib julgelt väita, et pinnase tihedusest sõltuvalt võib vaia kandevõime vähemalt kahekordselt varieeruda.

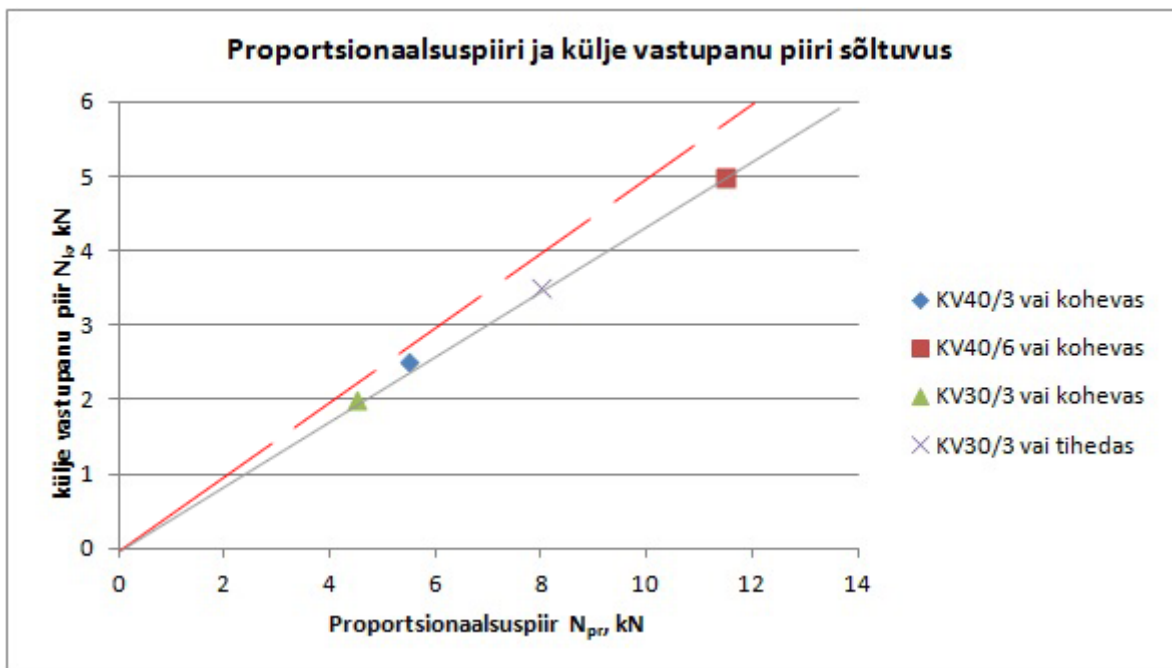
Teise järeldusena saab välja lugeda, et kiilvaimudeli KV40/3 kandevõime on ainult natukene suurem sama tihedusega pinnases katsetatud väiksemast mudelist KV30/3. Samas 6 cm paksune mudel KV40/6 kannab kaks korda peenemast mudelist KV40/3 ligikaudu kaks korda rohkem, ehk kandevõime on suurenenud ligikaudu sama palju kordi, kui palju on suurendatud ka vaia paksust. Selle paremaks mõistmiseks on joonisel 4.6 välja toodud graafik, kus on kirjeldatud mudeli KV40/3 staatilist kandevõimet kohevas pinnases selliselt, kui see oleks kaks korda suuremaid koormusastmeid talunud.



Joonis 4.6. KV40/6 ja KV40/3 staatilise kandevõime võrdlus

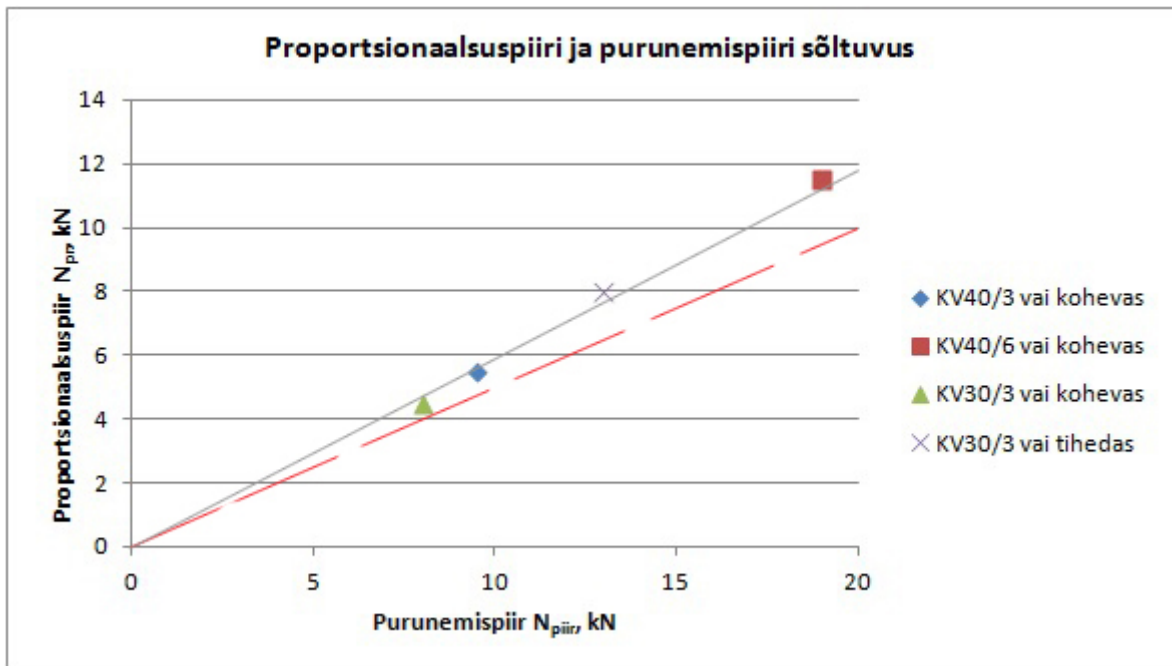
Joonisel 4.6 järeldubki, et kahekordistatud koormusastmetega KV40/3 mudeli staatilise koormuskatse graafik ühtib ligikaudselt kaks korda paksema mudeli KV40/6 graafikuga. Kuna vertikaaltahud on mõlemal mudelil sama suurusega, siis järeldub, et kandevõime seisukohalt on tähtsad ainult kiilvaia kaldküljed ja ots, mida kaks korda kasvatades kasvab ka vaia kandevõime ligikaudu sama palju kordi. Vertikaaltahud oma küljevastupanuga saavad avaldada vaid väikest mõju kandevõimele ja ei oma seetõttu vaia kandvate omaduste loomises suurt tähtsust.

Võrrelda saab ka tehtud katsetuste koormuspiiride suhteid. Proportsionaalsuspiiri  $N_{pr}$  ja külje vastupanu piiri  $N_k$  sõltuvus on näidatud joonisel 4.7 ja proportsionaalsuspiiri  $N_{pr}$  ja purunemisiiri  $N_{piir}$  sõltuvus joonisel 4.8.



Joonis 4.7. Proportsionaalsuspiiri ja külje vastupanu piiri sõltuvus

Kriipsjoonega on näidatud sõltuvus, kus külje vastupanu piir  $N_k = 0,5 \times N_{pr}$ . Katsetustest saadud punktide järgi tõmmatud lineaarne sõltuvusjoon on märgitud pidevjoonega. Sellelt lugedes avaldub külje vastupanu piiri ja proportsionaalsuspiiri ehk roomepiiri tegelik suhe katsetatud kiilvaimudelitel selliselt, et  $N_k \approx 0,43 \times N_{pr}$ . Punktid joonistusid sõltuvusjoonele väga ühtlaselt ja väikesed kõrvalekalded on arvatavasti tingitud sellest, et staatilise koormuskatse graafikult koormuspiiride väljalugemine ei ole täiesti täpne meetod.



Joonis 4.8. Proportsionaalsuspiiri ja purunemiskiiri sõltuvus

Kriipsjoonega on näidatud sõltuvus, kus proportsionaalsuspiir  $N_{pr} = 0,5 \times N_{piir}$ . Katsetest saadud punktide järgi tõmmatud lineaarne sõltuvusjoon on märgitud pidevjoonega. Sellelt lugedes avaldub külje proportsionaalsuspiiri ehk roomepiiri ja purunemiskiiri tegelik suhe katsetatud kiilvaimudelitel selliselt, et  $N_{pr} \approx 0,6 \times N_{piir}$ . Seega purunemiskiiri ja külje vastupanu piiri suhe avaldub eelnevat joonist 4.7 arvesse võttes omakorda järgnevast valemist:  $N_k \approx 0,6 \times 0,43 \times N_{piir} = 0,26 \times N_{piir}$  ehk purunemiskiir on ligikaudu neli korda suurem külje vastupanu piirist.

Vaia kuju otstarbekust saab hinnata vaia valmistamiseks kuluva betoonimahu ja sellega saavutatava kandevõime sõltuvusest. Sõltuvusgraafiku koostamiseks on arvatud erinevate katsetatud vaimudelite ruumalad, mis iseloomustavad betoonikulu. Kiilvaia ruumala on arvatud valemiga 4.1, kus vertikaalseks küljetahuks oleva trapetsi pindala on korrutatud vaia paksusega. Arvutuseks vajalikud mõõtmed on toodud välja joonisel 3.1 (lk 31) kiilvaimudelite kirjelduse juures.

$$V = \left( \frac{a + c}{2} \right) \times h \times b \quad (4.1)$$

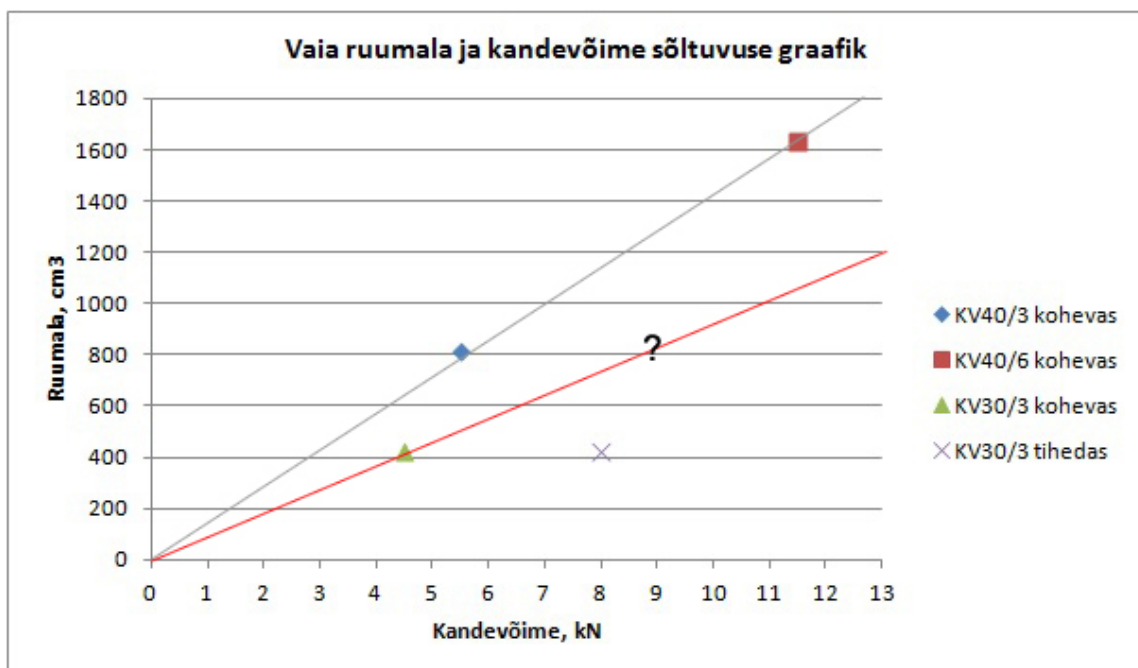
Kolmele katsetatud mudelile arvatati järgmised ruumalad:

$$V_{KV30/3} = \left( \frac{8,6 + 0,8}{2} \right) \times 30 \times 3 = 423 \text{ cm}^3$$

$$V_{KV40/3} = \left( \frac{12 + 1,6}{2} \right) \times 40 \times 3 = 816 \text{ cm}^3$$

$$V_{KV40/6} = \left( \frac{12 + 1,6}{2} \right) \times 40 \times 6 = 1632 \text{ cm}^3$$

Arvutatud ruumalade ja staatilise katse tulemusel leitud kandevõime järgi moodustus sõltuvusgraafik, mis on näidatud joonisel 4.9. Vaiade kandevõimeks on loetud roomepiiri.



Joonis 4.9. Vaia ruumala ja kandevõime sõltuvuse graafik

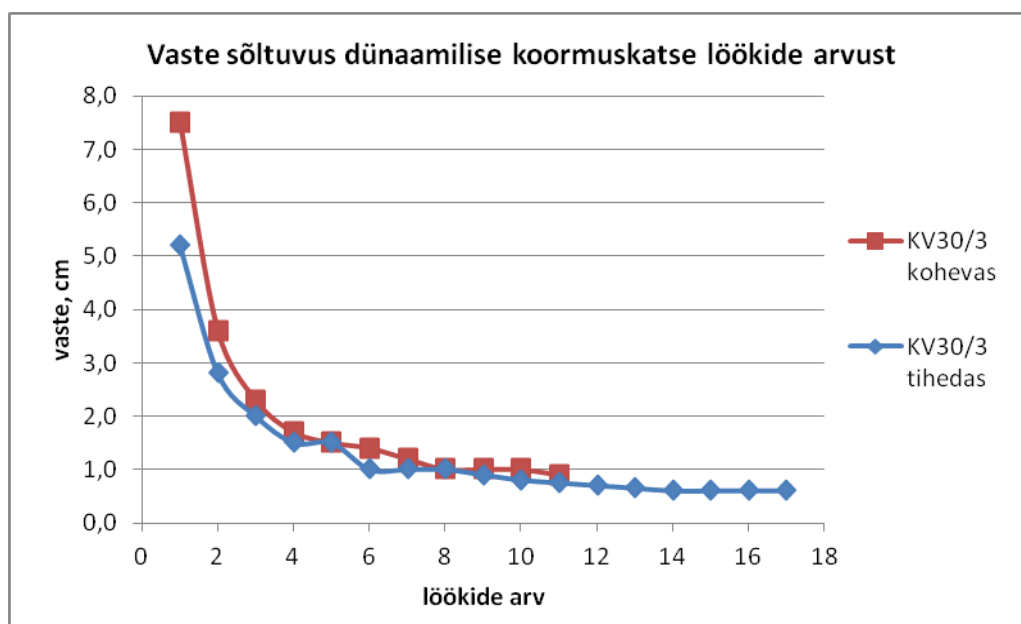
Graafikult on selgelt näha, et kuigi mudel KV40/3 on mudelist KV30/3 ruumalalt ligi kaks korda suurem, siis samades tingimustes kannab see vaid 1,2 korda rohkem. Samas kannab mudel KV40/6 mudelist KV40/3 kaks korda rohkem, olles samuti ruumalalt kaks korda suurem. Põhjus on selles, et ruumala on nendel juhtudel kahekordselt kasvatatud kahes erinevas sihis. Palju otstarbekam on vaia ruumala kasvatada seega paksuse sihis, kui kandevõime suurendamine on vajalik. Graafikule on märgitud „?“ punkti, kus peaks asuma mudeli KV30/3 kahekordselt paksendatud mudel KV30/6. Kahjuks selliste proportsioonidega vaia ei katsetatud ja selle asukoht on oletatud 40 cm pikkuste mudelite

tulemuse põhjal. Alumisest sõltuvusjoonest järeldub, et me saavutaksime mudelit KV30/3 paksuse sihis kasvatades sama kandevõime (5,5 kN) mis mudeliga KV40/3 vaid 500 cm<sup>3</sup> betooniga ja võidaksime seega 300 cm<sup>3</sup> betoonimahtu, kuna mudeli KV40/3 ruumala on 816 cm<sup>3</sup>. Sama ruumalaga oleks võimalik saavutada kandevõimeks aga lausa 9 kN ja saada seega kandevõimes 3,5 kN võitu. Selleks tuleks mudelit KV30/3 kaks korda paksendada.

Pikkuse sihis kiilvaiade mõõtmete kasvatamine ei ole seega antud uuringu kohaselt betooni mahtu arvestades otstarbekas ja mõttekam oleks kasutada vaiu, mis erinevad üksteisest paksuse poolest. Tulevikus peab tegema lisakatseid antud seoste kinnitamiseks.

#### 4.1.3 Dünaamiline kandevõime

Kiilvaimudelite kandevõimet hinnati ka Gersevanovi ja Gate-Killari valemitega, mis on täissuuruses kiilvaiade puhul enim kasutatud kandevõimevalemid. Selleks, et valemeid kasutada saaks, peab teadma vaia pinnasesse rammimise käigus mõõdetavat vastet ehk vajumit ühest vasaraga tehtud löögist. Antud uuringus on vaia mudeli vasteks võetud süvistumise lõpus tehtud kolme löögi keskmine tulemus ehk viimasest kolmest löögist toimunud vajum on taandatud ühele löögile vajumi jagamisel kolmega. Vaste sõltuvus vasaraga tehtud löökide arvust on näidatud joonisel 4.10. Võrdlusena on välja toodud mudeli KV30/3 käitumine nii tihedas kui kohevas katsetatud pinnases.



Joonis 4.10. Vaste sõltuvus dünaamilise koormuskatse löökide arvust

Ootuspäraselt on vaia vasted kohevas pinnases suuremad kui tihedas pinnases ning rammimise alguses suuremad kui lõpus. Mida rohkem lööke on tehtud, seda väiksemaks jääb vaste, kuna rohkem vaiapinda on pinnases vastupanu avaldamas. Esimeste löökide puhul on selgelt näha koheva ja tiheda pinnase erinevus, rammimise lõpus aga vasted ühtlustuvad ja erinevad vaid mõne millimeetri võrra. Siiski vajas sama mudel tihedas pinnases 17 lööki täielikuks süvistumiseks ja kohevas pinnases vaid 11 lööki, seda eelkõige just rammimise alguses tekkivast suurest vastete erinevusest.

Analoogset sõltuvusgraafikut teistsuguste mudelite kohta ei ole välja toodud, kuid kõikide mudelite Gate-Killar valemiga (valem 1.2, lk 21) dünaamilise kandevõime arvutuseks vajalikud andmed on välja toodud tabelis 4.2. Nagu tabelist näha, siis kõikidel mudelitel kasutati sama raskusega löögiosa ja sama kukkumiskõrgust, erinevad vaid vaste ja sellest sõltuv tegur K. Valem annab hinnangulise kandevõime kilonjuutonites.

**Tabel 4.2.** Andmed Gate-Killar valemiga kandevõime hindamiseks

Vaia mudel ja pinnase tihedus	löögiosa kaal	löögiosa efektiivne kukkumiskõrgus	vaia vaste	tegur
	G, kN	H, cm	s <sub>a</sub> , cm	K
KV30/3 tihedas	0,0757	60	0,5	3
KV40/3 kohevas	0,0757	60	0,7	2
KV40/6 kohevas	0,0757	60	0,3	3
KV30/3 kohevas	0,0757	60	1	2

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 tihedas liivas:

$$N_{G\ 30/3/t} = 3 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,5} = 2,87 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 8 \text{ kN}$ .

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/3 kohevas liivas:

$$N_{G\ 40/3/k} = 2 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,7} = 1,75 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 5,5 \text{ kN}$ .

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6 kohevas liivas:

$$N_{G\ 40/3/k} = 3 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,3} = 3,25\ kN$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 11,5\ kN$ .

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 kohevas liivas:

$$N_{G\ 40/3/k} = 2 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{1} = 1,58\ kN$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 4,5\ kN$ .

Tulemustest selgub, et Gate-Killari valem alahindab katsetatud kiilvaimudelite kandevõimet ja seega oleks täpsema tulemuse saamiseks vajalik valemit korrigeerida. Kuna vahe tegeliku kandevõimega on ligikaudu kolmekordne, siis tuleks samakordselt suurendada valemis olevat tegurit K, et saada arvutusega täpsem hinnang kandevõimele. Muudan tegurit K selliselt, et kui vaste on suurem 0,5 cm, siis  $K = 6$  ja kui vaste on väiksem 0,5 cm, siis  $K = 10$ . Sellise muudatuse korral saab järgnevad tulemused:

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 tihedas liivas ( $K = 10$ ):

$$N_{G\ 30/3/t} = 10 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,5} = 9,58\ kN$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 8\ kN$ .

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/3 kohevas liivas ( $K = 6$ ):

$$N_{G\ 40/3/k} = 6 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,7} = 5,25\ kN$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 5,5\ kN$ .

Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6 kohevas liivas ( $K = 10$ ):

$$N_{G\ 40/3/k} = 10 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{0,3} = 10,83\ kN$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 11,5\ kN$ .



Gate-Killar valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 kohevas liivas ( $K = 6$ ):

$$N_{G\ 40/3/k} = 6 \times \sqrt{0,07 \times 0,0757 \times 60} \times \log \frac{25}{1} = 4,73\ \text{kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 4,5\ \text{kN}$ .

Katsetatud mudelite puhul annab selline valemi muutus kandevõimele täpsema hinnangu. Mudeli KV30/3 kandevõime tihedas liivas on ikka veel ülehinnatud, teiste mudelite puhul on selliselt muudetud Gate-Killar valemiga arvatud hinnang suhteliselt täpne.

Kontrollitud on ka Gersevanovi valemiga (valem 1.1, lk 21) saadud kandevõime hinnangute paikapidavust tegelike kandevõimetega. Valemis kasutatud andmed kõikide katsetatud variatsioonide kohta on välja toodud tabelis 4.3. Valem annab hinnangulise kandevõime tonnides. Selleks, et saada tulemus kilonjuutonites, on valemisse lisatud korrutamine raskuskiirendusega  $g$ . Tegur  $\eta$  sõltub vaia materjalist, raudbetooni puhul on selle väärtuseks  $150\ \text{t/m}^2$ .

**Tabel 4.3.** Andmed Gersevanovi valemiga kandevõime hindamiseks

Vaia mudel ja pinnase tihedus	vaia vaste	vaia keskmine ristlõikepindala	vasara kaal	vaia kaal	vasara langemiskõrgus	raskuskiirendus	tegur
	$s_a, \text{cm}$	$A_k, \text{cm}^2$	$m_1, \text{t}$	$m_2, \text{t}$	$H, \text{cm}$	$g, \text{m/s}^2$	$\eta, \text{t/m}^2$
KV30/3 tihedas	0,5	14,1	0,00757	0,00100	60	9,81	150
KV40/3 kohevas	0,7	20,4	0,00757	0,00165	60	9,81	150
KV40/6 kohevas	0,3	40,8	0,00757	0,00335	60	9,81	150
KV30/3 kohevas	1	14,1	0,00757	0,00100	60	9,81	150

Vaia keskmine ristlõikepindala on arvatud kasutades joonisel 3.1 (lk 31) välja toodud mõõtmeid valemiga 4.2:

$$A_k = \frac{a + c}{2} \times b \quad (4.2)$$

$$\text{KV30/3 puhul } A_k = \frac{8,6+0,8}{2} \times 3 = 14,1\ \text{cm}^2$$

$$\text{KV40/3 puhul } A_k = \frac{12+1,6}{2} \times 3 = 20,4 \text{ cm}^2$$

$$\text{KV40/6 puhul } A_k = \frac{12+1,6}{2} \times 6 = 40,8 \text{ cm}^2$$

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 tihedas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{150 \times 14,1}{2} \times \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \times 0,00757 \times 60}{150 \times 14,1 \times 0,5} \times \frac{0,00757 + 0,2 \times 0,00100}{0,00757 + 0,00100}} - 1 \right] \times 9,81$$

$$= 8,08 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 8 \text{ kN}$ .

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/3 kohevas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{150 \times 20,4}{2} \times \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \times 0,00757 \times 60}{150 \times 20,4 \times 0,7} \times \frac{0,00757 + 0,2 \times 0,00165}{0,00757 + 0,00165}} - 1 \right] \times 9,81$$

$$= 5,45 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 5,5 \text{ kN}$ .

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6 kohevas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{150 \times 40,8}{2} \times \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \times 0,00757 \times 60}{150 \times 40,8 \times 0,3} \times \frac{0,00757 + 0,2 \times 0,00335}{0,00757 + 0,00335}} - 1 \right] \times 9,81$$

$$= 11,21 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 11,5 \text{ kN}$ .

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV30/3 kohevas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{150 \times 14,1}{2} \times \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \times 0,00757 \times 60}{150 \times 14,1 \times 1} \times \frac{0,00757 + 0,2 \times 0,00100}{0,00757 + 0,00100}} - 1 \right] \times 9,81$$

$$= 4,04 \text{ kN}$$

Staatilisest katses sellele mudelile leitud tegelik kandevõime ehk roomepiir  $N_{pr} = 4,5 \text{ kN}$ .

Arvutustest järeldub, et Gersevanovi valemi hinnang ühtib täpselt katsetatud kiilvaimudelite tegeliku kandevõimega. Antud valem sobib seega väikeste kiilvaimudelite kandevõime hindamiseks ja annab parema tulemuse kui Gate-Killari valem.

#### 4.2 Pika vardaga penetromeetri löökide arvu korrelatsioon liiva tihedusega

Pärast esimest katset tekkis kahtlus, et pika vardaga penetromeetri löökide arv ei oma korrelatsiooni liiva tihedusega. Kui varda süvistumiseks sügavusel 10...20 cm kulus alla kümne löögi, siis sügavuse 50...60 cm läbimiseks vajas varras juba mõnes kohas viiskümmend lööki. Selge oli see, et kuigi sügavamal võis tõesti olla pinnas tihedam, siis nii suurt löökide arvu erinevust ei oleks tohtinud ette tulla. Korrelatsiooni kontrollimiseks tehti lisakatse, mille tegevuskava on kirjeldatud peatüki 3.4.2 lõpus. Lühidalt öeldes võrreldi neljas punktis penetromeetriga tehtud mõõtetulemusi samades punktides ja samadelt sügavustelt võetud löikerõngaga võetud tihedusproovidega. Tulemused on näidatud tabelis 4.4.

**Tabel 4.4.** Pika vardaga penetromeetri löökide arvu ja pinnase tiheduse võrdlusandmed

sügavus, cm	Punktis a		punktis b	
	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm <sup>3</sup>	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm <sup>3</sup>
10...20	9	1,54	8	1,54
20...30	23	1,61	18	1,56
30...40	29	1,51	27	1,61
40...50	32	1,57	29	1,58
50...60	32	1,49	34	1,59
sügavus, cm	Punktis c		punktis d	
	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm <sup>3</sup>	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm <sup>3</sup>
10...20	5	1,48	9	1,59
20...30	7	1,52	22	1,53
30...40	14	1,50	30	1,52
40...50	26	1,52	35	1,55
50...60	35	1,50	43	1,50

Nagu tabelist näha, siis pika vardaga penetromeetriga tehtud löökide arv kasvab sügavuse kasvades väga suurelt, kuigi löikerõngaga võetud tiheduseproovidest järeldus, et sugugi mitte igal pool ei muutu pinnas sügavuse poole liikudes tihedamaks. See ebakõla on

tingitud penetromeetri varda külghõõrdest pinnasega. Mida sügavamal on varras, seda rohkem vardapinda avaldab vastupanu pinnasesse liikumiseks ja seetõttu kasvab löökide arv sügavuse kasvades.

Antud probleemi on nii pika (1 m) varda puhul väga keeruline ära hoida. Selleks peaks varda otsas olema suurema diameetriga koonus, mis tekitaks süvistumisel piisavalt suure augu, et varda küljed ümbritseva pinnasega kokku ei puutuks. Ka sellisel juhul peaks varrast hoidma täielikult vertikaalses asendis, mida on keeruline saavutada.

Kuigi löökide arvust ei saa korrelatsiooni puudumise tõttu välja lugeda pinnase tihedust numbriliselt, siis löökide arvu saab teiste tehtud katsetega samadel sügavustel siiski võrrelda ja järeldada, kas pinnas on ligikaudu sama või erineva tihedusega. Sellepärast jätkati pika vardaga penetromeetriga uurimist ka järgnevates katsetes, koheva pinnasega katsete puhul tehti sellega lihtsalt vähem mõõtmisi.

### **4.3 Pinnasemuutused vaia süvistamisel**

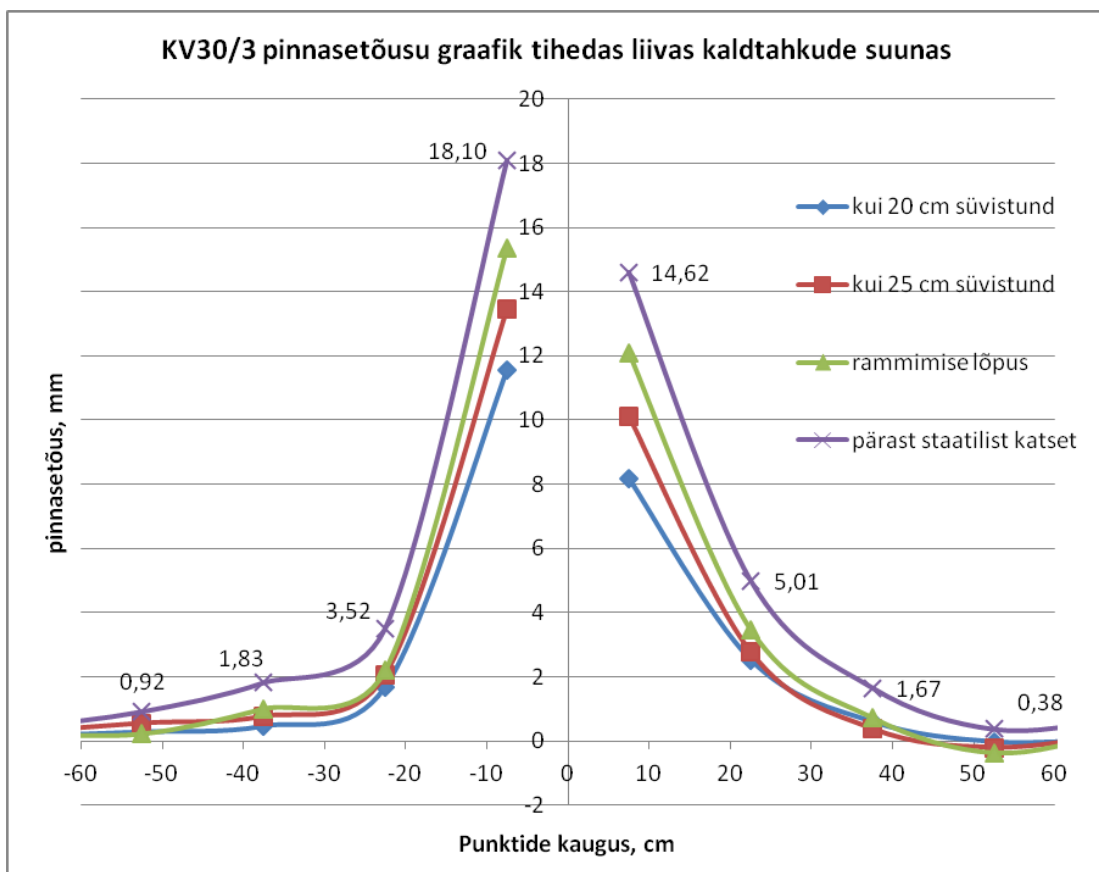
#### **4.3.1 Pinnasetõus**

Siirdeanduritega tehtud mõõtmiste alusel saab hinnata, kui suures ulatuses ja kui suures mahus vaia ümbritsev pinnas rammimisel tõuseb. Pinnasetõusu mõõdeti erinevate süvistuste puhul ja tulemuste alusel sai koostada pinnatõusu graafikud. Suurem pinnasetõus toimub vaia kiilukujuliste tahkude suunas.

Mudeli KV30/3 pinnatõusu graafik kiiltahkude suunas tihedas pinnases erinevate süvistuste puhul on näidatud joonisel 4.11. Vaiamudeli tšenter asus mõõdetavate punktide keskel ehk graafiku X-telje nullpunktis. Näha on neli pinnatõusujoont, millest alumine iseloomustab tõusu hetkel, mil vai oli 20 cm ulatuses liiva sisse rammitud, järgmine hetkel, mil vai oli 25 cm ulatuses pinnasesse rammitud ja kolmas näitab pinnatõusu dünaamilise koormuskatse lõpus ehk vaia täieliku süvistumise hetkel. Kõige ülemine joon näitab pinnase lõplikku tõusu, mis on mõõdetud pärast staatilise koormuskatse käigus tekkinud 4 cm suurust vajumit. Graafik on koostatud antud mudeliga tehtud kahe katse keskmiste tulemuste põhjal, kuna kolmas katse loeti

ebaõnnestunuks. Graafikute puhul on oletatud, et pinnas oli enne vaia süvistamist ideaalselt sile, ehk arvestatud on ainult kõrgusmuute algnäidu suhtes, mitte reaalselt punktide kõrgus.

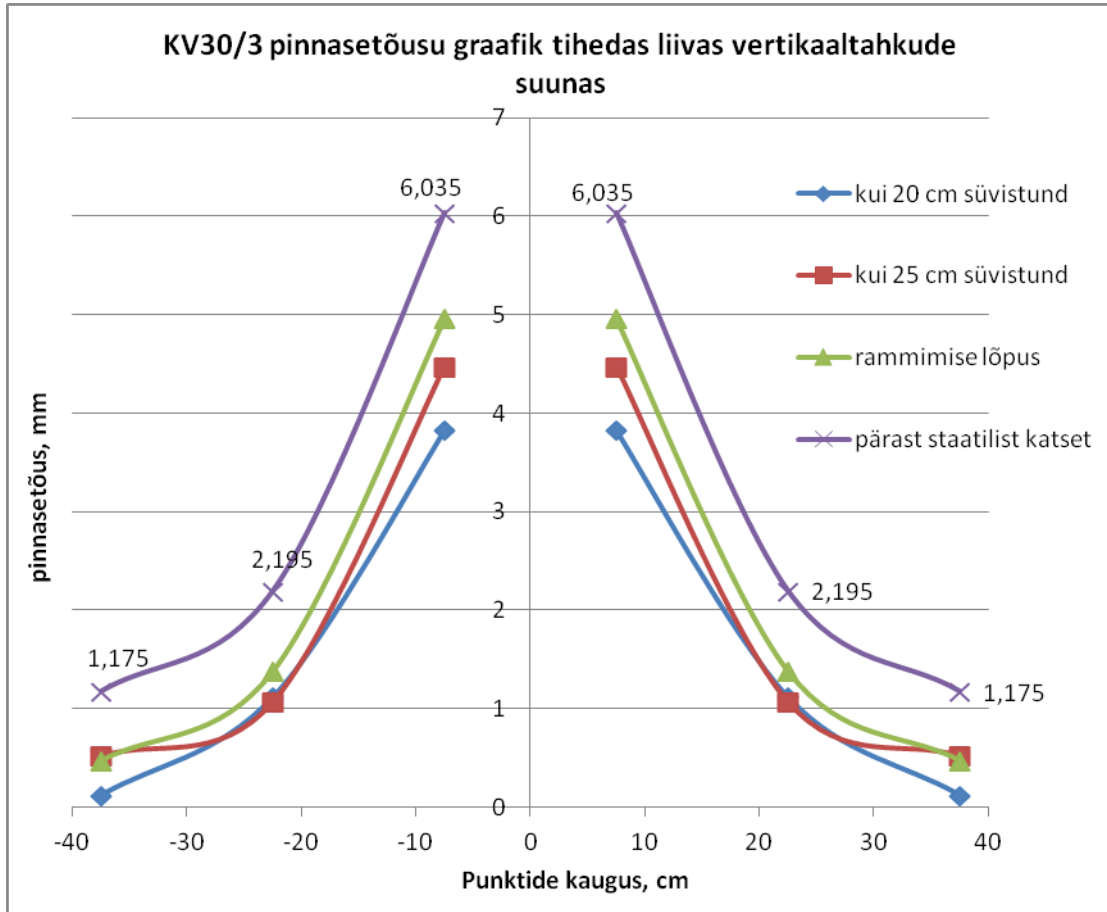
Graafikult saab välja lugeda, et pinnase intensiivsem tõus kaldtahkude suunas algab vaia tsentrist ligikaudu 20 cm kaugusel, kuid vaia süvistumine avaldab mõju ka vähemalt kuni 70 cm kaugusel olevale liivale, mis samuti tõuseb. Ilmselt tõuseb liiv minimaalselt ka kaugemalt, kuigi seal enam mõõtmisi ei teostatud. Seega võib vaia süvistamine tõsta kaldtahkude suunas tihedat pinnast ligikaudu kolme vaiapikkuse kauguselt. Graafikult on näha, et vai ei ole täiesti vertikaalselt pinnasesse süvistunud, kuna ühe kaldtahu suunas on pinnasetõus olnud suurem kui teise suunas.



Joonis 4.11. KV30/3 kiivaimudeli pinnasetõusu graafik kaldtahkude suunas tihedas liivas

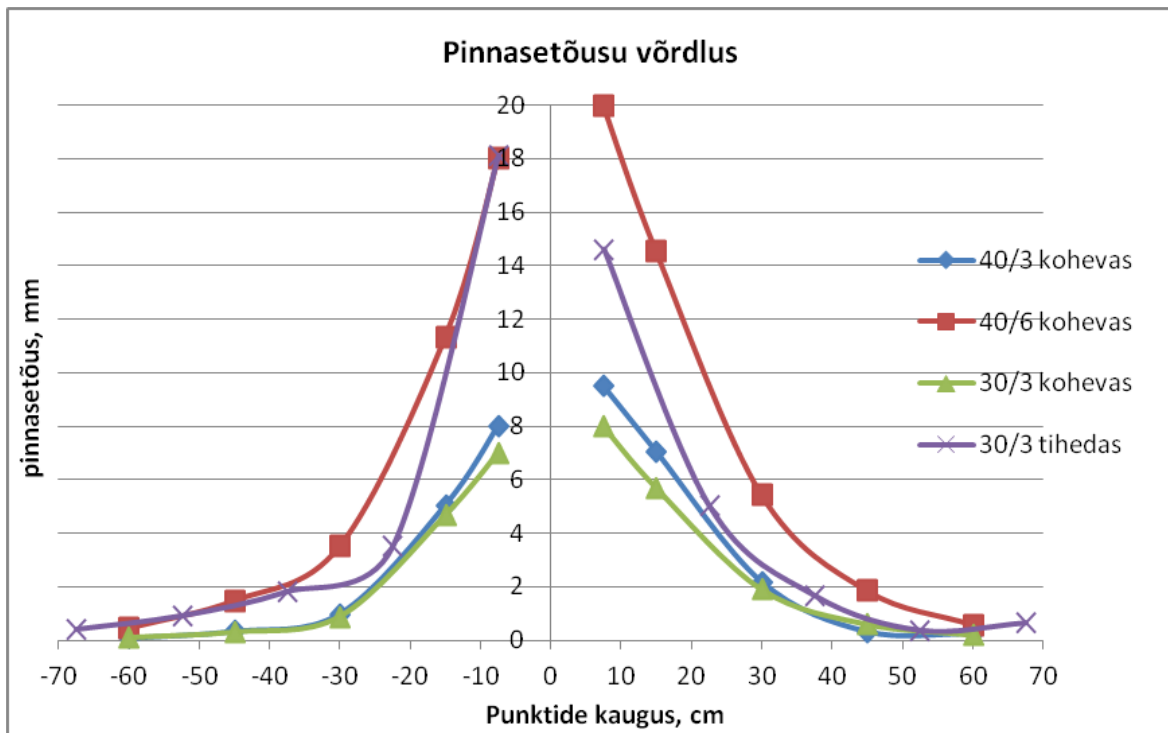
Pinnasetõusu graafik sama mudeli kohta vertikaaltahkude suunas on näidatud joonisel 4.12. Tõusu mõõdeti vaid ühe tahu suunas ja seega on graafiku koostamisel oletatud nagu mõlemalt poolt vaia oleks pinnas samal moel kerkinud, seetõttu on graafik vaia tsentri

suhtes sümmeetriline. Vaiamudeli tsepter asus graafiku X-telje nullpunktis. Maksimaalne tõus on kaldtahkude suunas mõõdetust ligikaudu kolm korda väiksem. Pinnasetõus selles sihis toimub ligikaudu kahe vaiapikkuse kauguselt.



Joonis 4.12. KV30/3 kiilvaimudeli pinnasetõusu graafik vertikaaltahkude suunas tihedas liivas

Teiste katsetatud variatsioonide puhul toimus pinnasetõus analoogselt ning nende pinnatõusu andmed on välja toodud lisas A. Maksimaalse pinnasetõusu võrdluseks on koostatud joonis 4.13, kus on näidatud kõikide katsetatud variatsioonide lõplikud pinnasetõusud kaldtahkude suunas. Vaiamudeli tsepter asub graafiku X-telje nullpunktis. Kuna kohevas pinnases tehtud katsetuste korral ei õnnestunud pinnasetõusu mõõta vaia peale nii lähedalt kui tiheda pinnase puhul, siis peab arvestama, et koheva pinnase tõusu iseloomustavate joonte vaia tseptrile lähimad punktid on järeldatud loogikaga arvestades pinnase käitumist tiheda pinnasega tehtud katsete ajal.



Joonis 4.13. Lõpliku pinnasetõusu võrdlusgraafik erinevatel katsetatud variatsioonidel

Kuna mudelit KV30/3 katsetati nii tihedas kui kohevas pinnases, siis on võrdlus vaia süvistamisel toimuva pinnasetõusu ja pinnase tiheduse vahel olemas. Graafikult on näha, et koheva pinnase puhul toimub vaia ümber ligikaudu kaks korda väiksem pinnatõus kui tiheda pinnase puhul. Tihedasse liiva mudeli KV30/3 rammimisel on pinnatõus peaaegu sama ulatuslik kui kohevasse liiva mudeli KV40/6 rammimisel, kuigi esimese ruumala on ligikaudu neli korda väiksem. Selline tulemus on ootuspärane ja nähtust on selgitatud üldkirjanduse osas, peatükis 1.4.

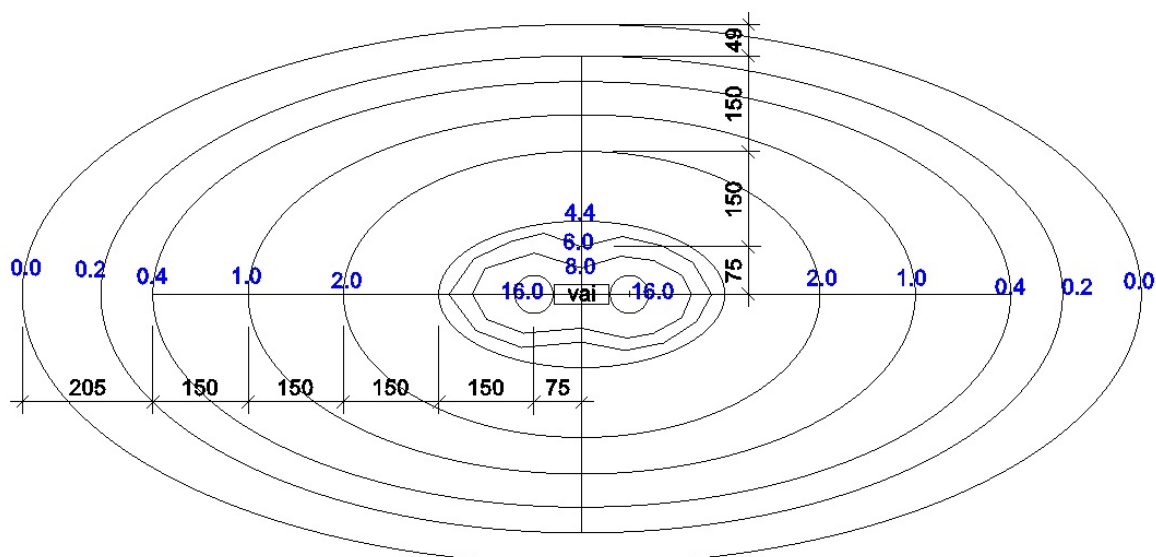
#### 4.3.2 Pinnase tiheduse muutus vaia süvistamisel

Vaia rammimisel toimuv pinnase tiheduse muutus on pinnasetõusuga otseselt seotud, kuna pinnase tihenemisel selle ruumala väheneb ja kohenemisel suureneb. See on selgitatav asjaoluga, et kohevas pinnases on osakeste vahel tühimikud suuremad, tiheda pinnase puhul paiknevad jällegi osakesed tihedalt kokkupakituna. Kui on teada süvistatava vaia ruumala ja tõusnud pinnase ruumala, siis saab teha järelduse pinnase tiheduse muutuse kohta neid kahte ruumala võrreldes. Kui süvistatud vai tõrjub välja pinnasemahu, mille ruumala on vaia ruumalaga võrdne, siis järelikult ei toimu üldmahu

kohta mingit pinnase tiheduse muutust. Kui aga tõusnud pinnase ruumala on süvistatud vaia ruumalast suurem, siis on pinnas vaia ümber kohenenud. Vastupidisel juhul on toimunud tihenemine.

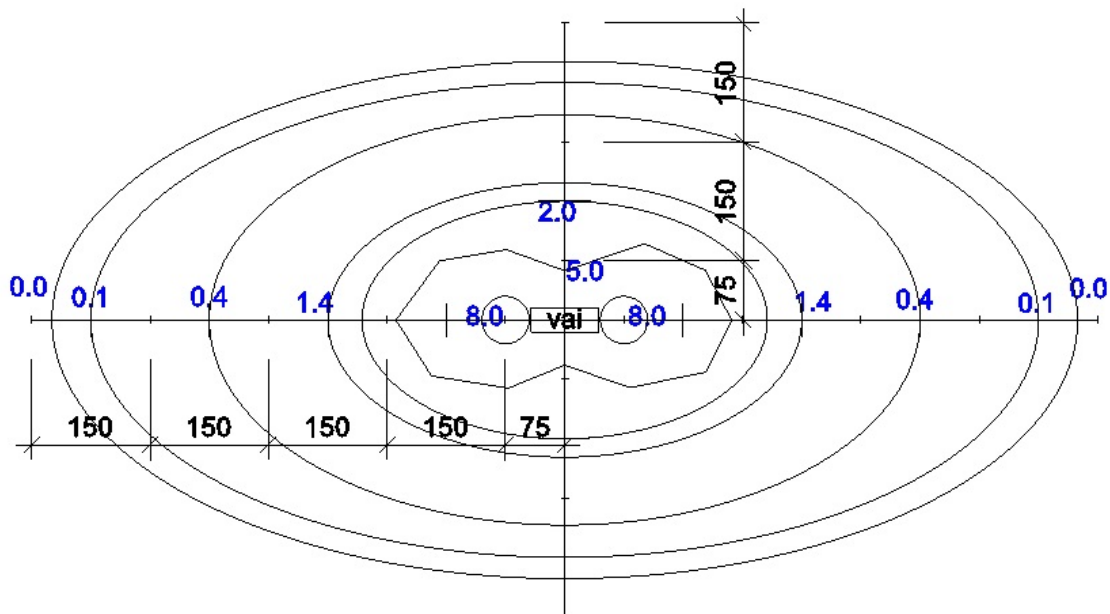
Mõõdetud kõrguspunktide põhjal on koostatud samakõrgusjooned, mille järgi on programmis AutoCAD 2013 loodud tõusnud pinnase 3D-mudel. Programm väljastas mudeli mahu ehk tõusnud pinnase ruumala. Antud tulemust on kontrollitud ka Autodesk Revitis samade kõrgusjoonte põhjal loodud pinnamassiivi alusel. Arvestada tuleb sellega, et koostatud kõrgusjooned on ligikaudsed, kuna kõrguse muute on mõõdetud vaid vertikaal- ja kaldtahkude suunas paiknevates punktides. Vaia peast diagonaalis kõrgusmuute mõõdetud ei ole. Kõrgusmõõtmiste tulemustele tuginedes oletati, et kõrgusjooned tekivad ümber vaia ellipsikujuliselt, vaia pea lähedal aga 8-kujuliselt.

Pinnase väljasurutud mahtu on mõõdetud mudeli KV30/3 puhul nii tihedas kui kohevas katsetatud pinnases. 3D-mudeli loomiseks kasutatud kõrgusjooned tiheda liiva korral on näidatud joonisel 4.14 ja koheva liiva korral joonisel 4.15. Kõik joonisel olevad mõõdud on märgitud millimeetrites, näidatud on nii samakõrgusjoonte kõrgused kui ka kaugused vaia tsentrist. Valminud 3D-mudelist ei ole mõttekas pilti lisada, kuna see jääb ebamääraseks, sest toimub liiga väike tõus liiga suure mastaabi kohta.



**Joonis 4.14.** Pinnasetõusu mahu arutamiseks kasutatud samakõrgusjooned tihedas pinnases





**Joonis 4.15.** Pinnasetõusu mahu arvutamiseks kasutatud samakõrgusjooned kohevas pinnases

Süvistatud vaimudeli KV30/3 ruumala oli  $423 \text{ cm}^3$ . Pinnase tõusumahust tehtud 3D-mudeli ruumala oli tiheda pinnase puhul  $1688 \text{ cm}^3$  ja koheva pinnase puhul  $571 \text{ cm}^3$ . Nagu tulemustest näha, tõusis pinnas mõlemal juhul vaiast suurema ruumala võrra, mis vihjab vaia süvistamisel toimuvale üldisele pinnase kohenemisele. Tiheda pinnase puhul oli tõusnud liiva maht vaimudeli mahuga võrreldes lausa neljakordne, mis näitab, et vaia süvistamisel toimub ulatuslik kohenemine. Koheva pinnase puhul oli tõusumaht vaia mahuga küll samas suurusjärgus, kuid siiski selgelt suurem.

Pinnasetõusu järgi tehtud tihenemise uuring näitab selgelt, et pinnas vaia rammimisel koheneb. Siiski ei saa seda tulemust võtta täpse vastusena ja lõpliku tõena, kuna pinnas võib sõltuvalt sügavusest käituda erinevalt. Tõusnud pinnase ruumala ja vaia ruumala võrdlus näitab küll seda, et suurem osa mõjutatavast pinnasest rammimisel koheneb, kuid see ei välista siiski olukorda, et vaia lähiümbruses kindlal sügavusel kaldtahkude suunas võib toimuda ka tihenemine. Ka penetromeetriga kohevas pinnases suurima mudeliga KV40/6 tehtud mõõtmised enne ja pärast rammimist vihjavad olukorrale, et piisavalt koheva pinnase korral võib vaia rammides ligikaudu 30...40 cm sügavusel vaia lähedal toimuda liiva tihenemine. Sellele viitavad tulemused tabelis A.21 lisas A. Joonisel 4.16 on näidatud pinnasedeformatsioon vaiapea ümber pärast mudeli KV40/6 kohevasse pinnasesse süvistamist.



**Joonis 4.16.** KV40/6 mudeli süvistamisel kohevas pinnases toimunud pinnasedeformatsioon

Vaia pea ümber on selgelt näha kobestunud tsooni ja pinnasepragusid, mis viitavad kohenenud pinnasele. Analoogne joonis tihedas pinnases toimunud deformatsioonidest mudeli KV30/3 süvistamisel on näidatud lisa C joonisel C.5. Samuti näitasid pinnase pealmiste kihtide kohenemist kõik penetromeetrikatsed, mille tulemusi on võimalik näha lisa A tabelites A.5...A.7 ja A.21. Seega võib öelda, et pinnase pealmistes kihtides toimub kindlasti kohenemine. Sügavamal toimuvat tuleks täpsemalt edasi uurida.

## 5 ARUTELU

### 5.1 Kiilvaimodelite kandevõime käitumise võrdlus täissuuruses vaiade uuringus saadud tulemustega

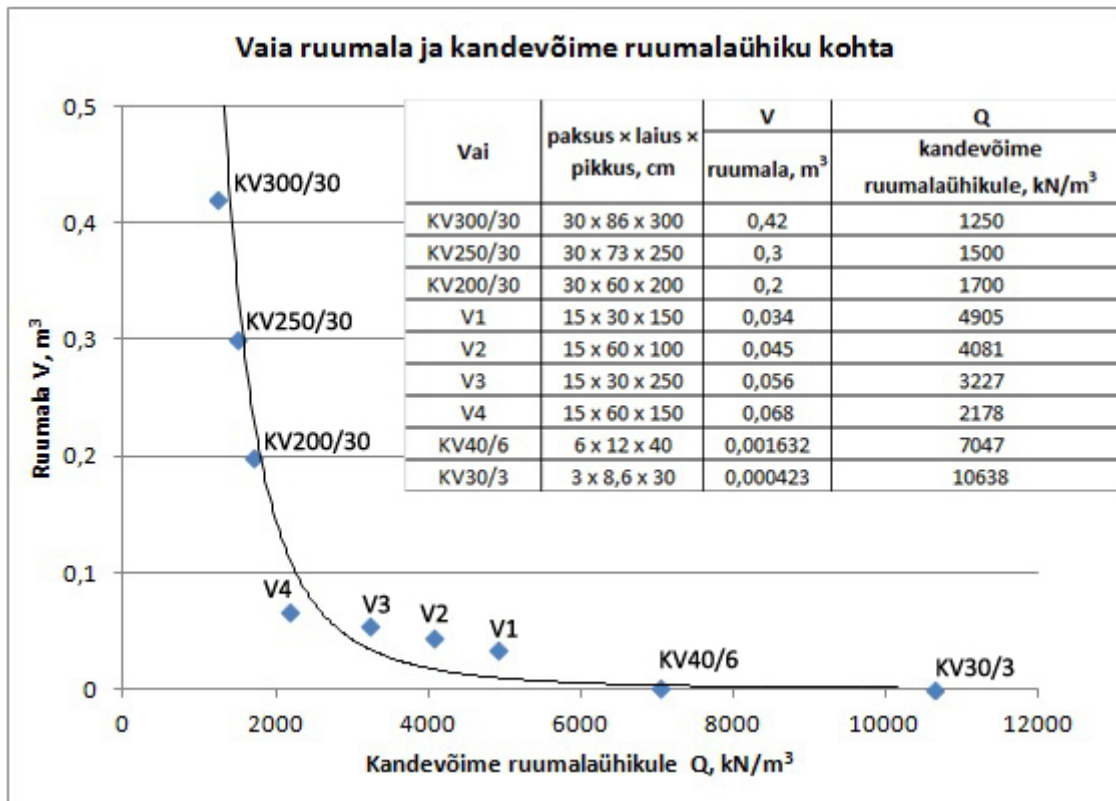
Et teha kindlaks, kas vaia mudelid mõõtkavas 1:5 ja 1:10 käituvad koormamisel sarnaselt täissuuruses kiilvaiadega, tuleb antud töö tulemusi võrrelda täissuuruses vaiadega tehtud uuringu tulemustega. Kiilvaiade põhjaliku uuringu on läbi viinud Riiklik Ehitusuuringute Instituut (REI), mille tulemusi on võrdluseks kasutatud. Arvestada tuleb asjaoluga, et enamus katsetest on läbi viidud moreenpinnases, mitte liivas. Mudeltulemustega võrreldakse nii vaia kandevõime käitumist kui ka pinnasemuutuseid rammimisel. Kui REI poolt läbi viidud uuringus ja antud mudelvaiade uuringus kehtivad tulemuste vahel samad seosed, võib väita, et kiilvaimodelitega tehtud katsetuste põhjal saab teha järeldusi ka täissuuruses vaiade kohta.

Esimesel graafikul (joonisel 5.1) on võrreldud erineva suurusega kiilvaiade ruumala ja kandevõimet ruumalaühiku kohta. REI katsetatud kiilvaiade tulemuste põhjal koostatud sõltuvuskõverat on täiendatud antud uurimistöös leitud kiilvaimodelite andmetega. Võrdlusesse on katsetatud mudelitest toodud KV40/6 ja KV30/3 tulemused kohevas liivas, kuna need mudelid olid toodetavate kiilvaiadega samas proportsioonis. Kandevõime ruumalaühiku kohta on nendele mudelitele leitud järgmiselt:

$$Q_{KV40/6/k} = \frac{N_{pr}}{V} = \frac{11,5}{0,001632} = 7047 \text{ kN}/m^3$$

$$Q_{KV30/3/k} = \frac{N_{pr}}{V} = \frac{4,5}{0,000423} = 10638 \text{ kN}/m^3$$

Arvutustes on kasutatud peatükis 4.1.1 leitud proportsionaalsuspiirile vastavat kandevõimet ja peatükis 4.1.2 arvatud mudeli ruumala. Kuna REI poolt läbi viidud uuringutes on kandevõime ühikuna kasutatud tonne, siis on need ümber arvatud tänapäevasesse vormi ehk kilonjuutonitesse. Olgu öeldud, et 1 t = 1000 kg = 9,81 kN.

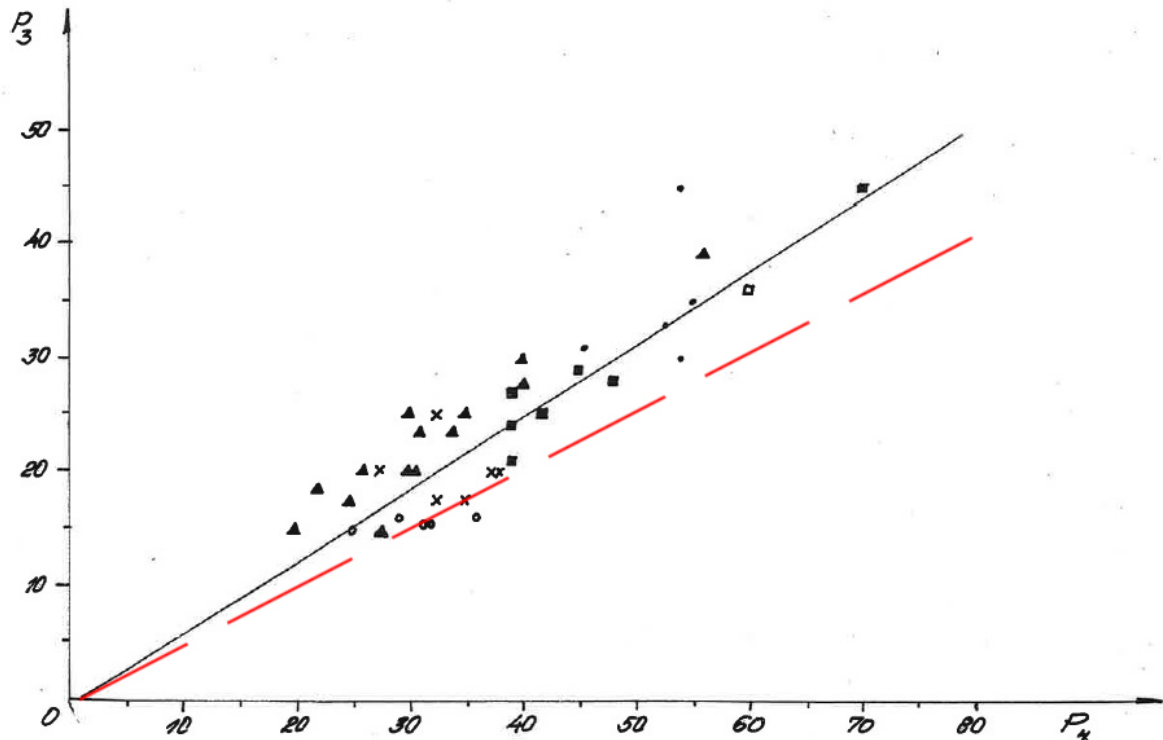


**Joonis 5.1.** Vaia ruumala ja kandevõimet ruumala ühiku kohta iseloomustav graafik (REI poolt saadud tulemusi on täiendatud mudelkatsete andmetega)

Graafikul välja toodud vaiade KV300/30, KV250/30 ja KV200/30 tulemused iseloomustavad täissuuruses toodetavaid vaiu. Vaiad V1, V2, V3 ja V4 on vähendatud suurusega kiilvaimudelid, mida REI on uuringu käigus katsetanud. Nende vähendatud mudelite tulemused ei olnud REI koostatud graafikule kantud täpselt ja neid iseloomustavate punktide asukohad on joonisel 5.1 korrigeeritud.

Graafikult väljendub selgelt, et mida väiksem on kiilvai ruumalalt, seda suurem on selle kandevõime ruumalaühiku kohta. Sellise reegli järgi käituvad nii täissuuruses kiilvaiad kui ka katsetatud mudelvaiad. Kuna vaiad V1, V2, V3 ja V4 ei ole teiste graafikul näidatud vaiadega samades proportsioonides, siis toimub neid iseloomustavate punktide juures graafikul kõrvalekalle. Kui kõik katsetatud vaiad oleksid samades proportsioonides, peaks ka sõltuvusgraafik olema kõverusega, mida hinnanguliselt iseloomustab musta joonega märgitud kõver. Et täpsed punktid kõveral paika seada, tuleks katsetada ruumaladega 0,05 m<sup>3</sup> ja 0,1 m<sup>3</sup> õigetes proportsioonides olevaid vaimudeleid.

Teiseks on võrreldud kiilvaimudelite ja täissuuruses vaiade piirkoormuste suhet. Mudelite kohta käivad graafikud on toodud välja peatükis 4.1.2 joonistel 4.7 ja 4.8. Proportsionaalsuspiiri ja purunemisiipi vaheline seos toodetavate kiilvaiade puhul on näidatud joonisel 5.2.

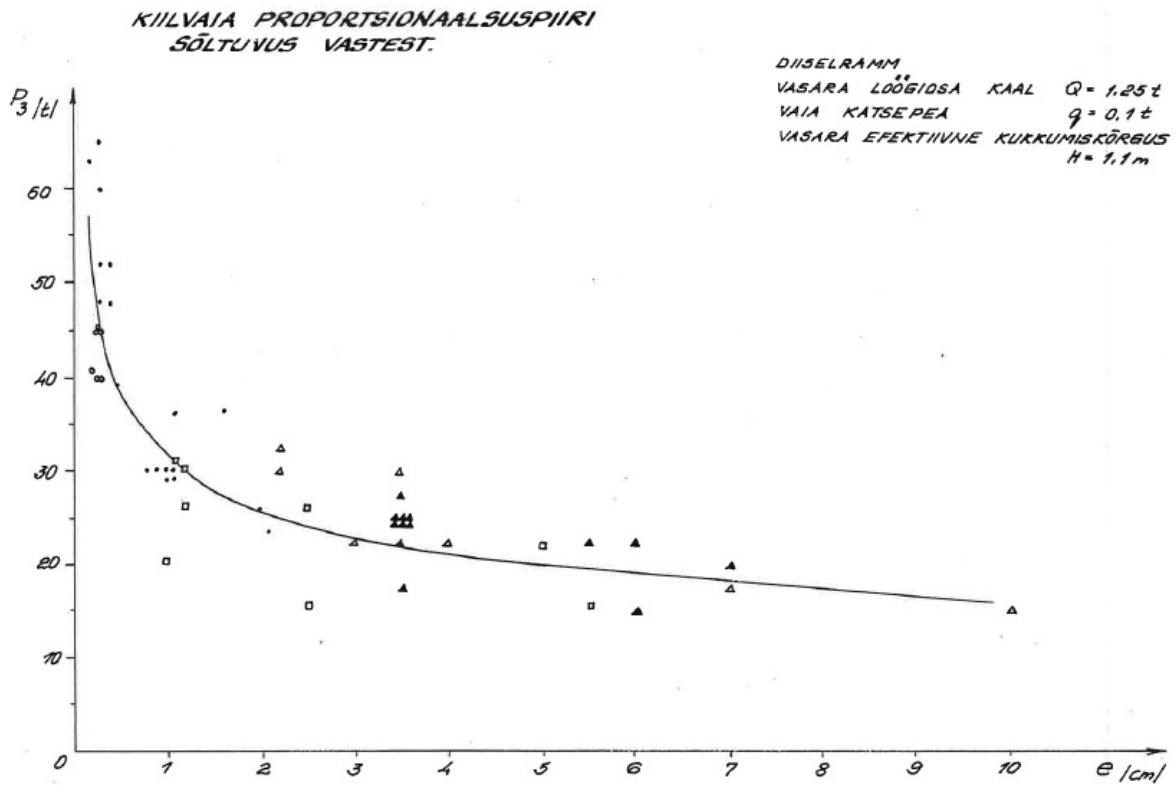


Joonis 5.2. Proportsionaalsuspiiri ja purunemisiipi suhe täissuuruses vaiade puhul [3]

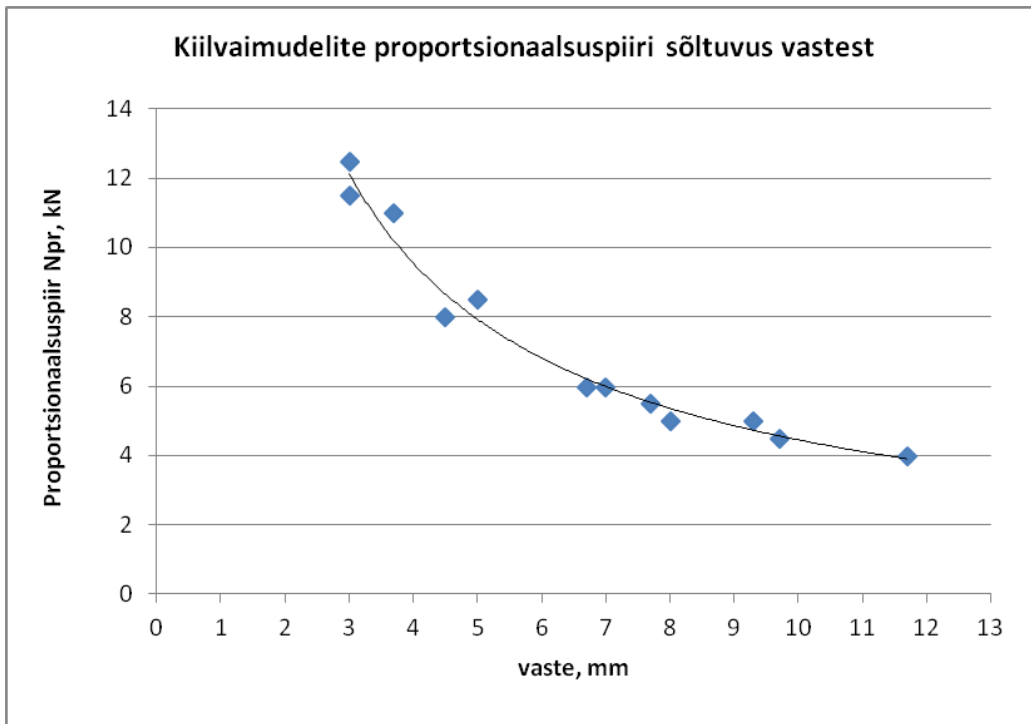
Kriipsjoonega on näidatud sõltuvus, kus proportsionaalsuspiir  $N_{pr} = 0,5 \times N_{piir}$ . Nagu näha, siis tulemuste järgi avalduv tegelik joon käitub reegli järgi  $N_{pr} \approx 0,6 \times N_{piir}$ . Täpselt sama seaduspärasus kehtis ka kiilvaimudelite katsetamise puhul.

Käitumist dünaamilisel katsel saab võrrelda proportsionaalsuspiiri ja vaia vaste sõltuvusega. Täissuuruses vaia kohta on selline sõltuvusgraafik näidatud joonisel 5.3 ja katsetatud kiilvaimudelite kohta joonisel 5.4. Kiilvaimudelite kohta koostatud graafiku puhul on arvestatud kõiki katseid eraldi, mitte keskmiseid tulemusi, et punkte sõltuvusjoone tekitamiseks oleks rohkem. Kõik üksikute katsete tulemused on toodud välja töö lisas A asuvas katseprotokollis. Nagu graafikutelt näha, joonistub sõltuvuskõver välja väga sarnaselt ja võib öelda, et vaste ja proportsionaalsuspiiri suhe on nii mudelitel kui täissuuruses vaiadel ühine. Väiksema vaste puhul on vaia kandevõime suurem, kuid

mitte lineaarselt. Kasutatud on erinevat rammi ja samale graafikule neid tulemusi seega taandada ei ole võimalik.



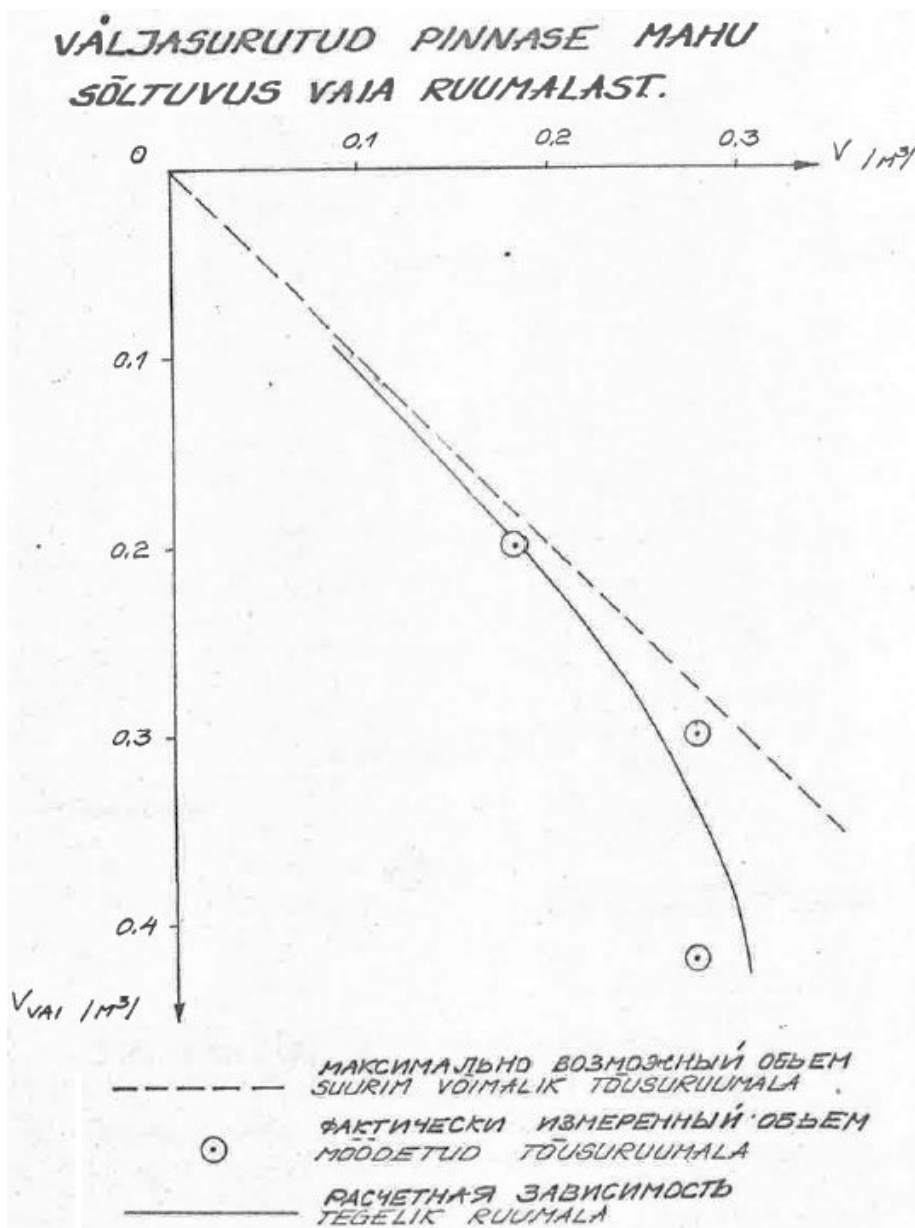
Joonis 5.3. Kiilvaia proportsionaalsuspiiri sõltuvus vastest [3]



Joonis 5.4. Kiilvaimudele proportsionaalsuspiiri sõltuvus vastest

## 5.2 Kiilvaimudelite rammimisel toimuvate pinnasemuutuste võrdlus täissuuruses vaiade uuringus saadud tulemustega

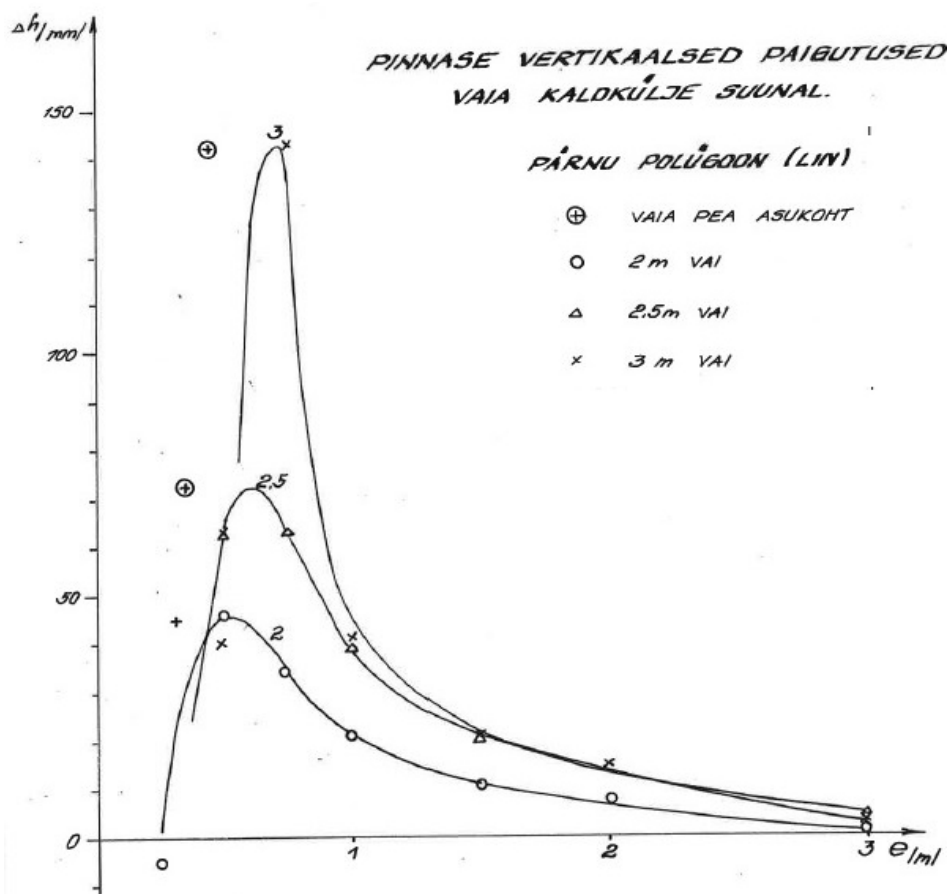
Riiklik Ehitusuuringute Instituut on koostanud mitmeid jooniseid pinnase tõusu kohta kiilvaia süvistamisel, mida saab võrrelda antud mudelvaiade süvistamisel toimunud tõusuga. Pinnase tihenemise mõõtmisi aga täissuuruses kiilvaiade rammimisel ei ole läbi viidud ja seega ei ole võimalik tiheduse muutumist rammimisel võrrelda. Küll aga on REI uuringus joonis pinnase tõusumahu kohta, mis aga tekitab mitmeid küsimusi. Nimetatud joonis rammimisel tõusnud pinnasemahu iseloomustamiseks on välja toodud joonisel 5.5.



Joonis 5.5. Väljasurutud pinnase mahu sõltuvus vaia ruumalast [3]

Kui mudelvaiade katsetuste tulemustest ilmnes selgelt, et tõusnud pinnase maht rammimisel oli suurem vaia enda mahust, siis REI poolt väljastatud joonisel on võetud aluseks, et suurim võimalik tõusuruumala on vaia ruumalaga võrdne. See tähendab, et välistatud on võimalus rammimisel pinnasel koheneda, mis aga justnimelt mudelvaiade katsetuste tulemuste järgi aset leidis. REI pinnasemahu graafikule lisatud punktide järgi on näha, et toimunud on lausa pinnase tugev tihenemine, kuna vai on rammimisel endast väiksema mahuga pinnase välja tõrjunud. Kahjuks ei ole teada, mis põhimõtete alusel ja viisil välja tõrjutud pinnasemahtu hinnati, vaevalt on seda tehtud sama täpsel meetodil kui 3D-mudeli loomine. Seetõttu ei ole võimalik kinnitada, et mudelite ja täissuuruses vaiade rammimisel pinnase tihenemine erinevalt toimub, vaid graafikusse tuleb suhtuda ettevaatlikult.

Täissuuruses vaiade rammimisel toimuva liiva vertikaalse paigutuse kohta kaldkülgede suunas on REI poolt koostatud joonis 5.6. Mudelvaiade kohta on vastavad vertikaalpaigutused näidatud joonisel 4.13 peatükis 4.3.1.



Joonis 5.6. Pinnase vertikaalsed paigutused vaia kaldkülje suunas [3]



Pinnas on tõustes käitunud sarnaselt: pinnase tõusu haripunkt paikneb tsentrist ligikaudu 0,25-kordse vaiapikkuse kaugusel, kusjuures maksimaalne tõus võib ulatuda sõltuvalt pinnase tihedusest ligikaudu 0,05-kordse vaiapikkuse kõrgusele. Vaia peale lähemalt langevad pinnatõusujooned, pinnas pudeneb vaia rammitavasse auku. Intensiivne pinnasetõus toimub vaia pea ligidalt ja algab ligikaudu 0,5-kordse vaiapikkuse kauguselt, mudelite puhul algas see umbes ühekordse vaiapikkuse kauguselt. Eemal toimuv pinnasetõus on lauge, mõjutatud võib olla pinnas ligikaudu kuni kahekordse vaiapikkuse kauguselt. Mudelkatsetuste ajal tihedas liivas on mõjutatud pinnas suuremal mastaabil ehk ligikaudu kolme vaiapikkuse kauguselt. Vertikaaltahkude suunas toimuvat pinnase vertikaalset paigutumist liivas mõõdetud ei ole, küll on seda tehtud moreenpinnases. Üldjoontes toimub pinnase vertikaalne paigutus nii mudelite kui täissuuruses vaiade puhul sarnaselt, erinevused on tingitud erinevast liivpinnasest.

### **5.3 Järeldused ja soovitused**

Võrdlustest avaldub, et rammimisel käituvad kiilvaia mudelid sarnaselt toodetavate kiilvaiadega. Siiski ei pidanud kandevõimehindang Gate-Killari valemiga paika, kuigi täissuuruses kiilvaiade kandevõimet hinnates on see valem andnud suhteliselt täpseid tulemusi. Mis põhjusel selline ebakõla tekib, ei ole selgelt teada ning dünaamilise kandevõime valemid vääriskid edasist uurimist. Põhjus võib olla seotud sellega, et kõiki vaia mõõtmeid vähendati kuni kümnekordselt, samuti ka koormuseid, kuid liiva fraktsioon ja liiva osakeste suurus jääb muutmata. Mudelite kandevõime hindamisel on soovitatav kasutada Gersevanovi valemit.

Hetkel saadi Gate-Killari valemis tegurit  $K$  muutes suhteliselt täpseid hinnanguid, kuid selliselt muudetud valemi paikapidavust peaks veel mitmete mudelkatsetustega kontrollima. Samuti võiks üle kontrollida teiste kandevõimevalemite kehtivust. Kuigi Gersevanovi ja Gate-Killari valemit kasutatakse täissuuruses vaiade puhul kõige sagedamini, siis ehk mõni teine kandevõimevalemitest sobib hästi mudelite hindamiseks. Erinevaid kandevõimevalemiteid vaiadele on maailmas ligi 200 ja antud töö mahu juures ei suudetud neid kõiki läbi kontrollida.

Rammimisel toimuva tihenemise kohta ei saadud antud katsetuste käigus kinnitust. Selgelt tuli välja, et kui rammitav pinnas on väga suure tihedusega, siis kiilvaia süvistamisel seal mingit lisatihenemist ei toimu, kuna kergem on pinnast välja suruda kui tihendada. See avaldus väljasurutud pinnase mahu ja rammitud vaia ruumala võrdlusest. Pinnase maht oli ligikaudu neli korda suurem vaia ruumalast.

Koheva pinnase puhul oli tulemus segasem. Kuigi üldmahult pinnas kohenes, võis siiski vaia ümber kindlal sügavusel toimuda ka tihenemine. Sellele vihjasid suurima mudeli KV40/6 katsetamisel penetromeetriga tehtud mõõtmised enne ja pärast katset. Pärast katset oli liiv vaia ümber umbes 30...40 cm sügavusel tihedam kui enne rammimist. Sellise mõõtmise põhjal ei saa aga teha kindlaid järeldusi, kuna pinnasekast oli kaevamistest ja süvistamistest ebaühtlane. Penetromeetriga ei saa mõõta tulemusi enne ja pärast katsetust täpselt samas punktis, kuna penetromeetri varda süvistamine rikub pinnase. Varda süvistusauk mõjutab mõõtmisi ka punkti lähiümbruses.

Võimalikule tihenemisele vaia ümber viitas ka asjaolu, et kohevas pinnases tehtud staatiliste katsete puhul kandis sama mudel esimesel katsel vähem koormust kui teisel ja teisel katsel omakorda vähem kui kolmandal. Selline oli tulemus kõigi kolme kohevas pinnases katsetatud mudeli puhul, justkui eelnev rammimine oleks järgmise katse jaoks pinnast natukene tihendanud ja seega ka kandevõimet suurendanud. Mingeid kindlaid järeldusi seega antud süvistamiste puhul pinnase tihenemisest vaia ümber teha ei saa ja selle edasiseks uurimiseks tuleks välja mõelda uus ja kindlam meetod. Seda on ehk parem uurida täissuuruses vaiadega. Kindlalt võib järeldada, et pinnase pealmised kihid rammimisel ikkagi kohenevad, mitte ei tihene.

Vaia kandevõime sõltuvus liiva tihedusest joonistus välja väga selgelt ja võib järeldada, et tiheda pinnase puhul on vaia vastupanu ja kandevõime kuni kaks korda suurem kui koheva pinnase puhul. Sellise järelduse sai teha nii dünaamilise katse vaste suurusest, süvistamiseks kuluvast löökide arvust kui ka staatilise kandevõime koormuspiiridest. Pinnase tihedusest sõltub seega vaia kandevõime väga suurel määral. Samuti avaldus ootuspäraselt, et tiheda pinnase puhul surutakse vaia rammimise käigus välja suurem

maht pinnast suuremalt alalt kui koheva puhul. Samuti on maksimaalne pinnatõusu kõrgus ligi kaks korda suurem.

Huvitava järelduse sai teha vaia kuju ja kandevõime sõltuvuse uuringust. Järeldus, et kiilvaia paksuse sihis kahekordselt suurendades suureneb ka kandevõime kaks korda. See omakorda tähendab, et vaia kandevõimet mõjutavad vaid vaia kaldküljed ja ots, vertikaalkülgede vastupanu ei avalda suurt mõju. Asjaolu, et kaldtahkude suurus peamiselt kiilvaia kandevõimet mõjutab, on ka loogiline ning paksuse sihis vaia suurendades saabki võimalikult väikese betoonimahuga võimalikult palju kaldtahkusi kasvatada. Selleks, et antud käitumine kinnitust saaks, tuleks katsetada ka täissuuruses vaiu. Näiteks võiks katsetada kahemeetrise tootetavast kiilvaiast kaks korda paksemat vaia ja kontrollida, kas selle kandevõime on samuti ligikaudu kaks korda suurem.

Hetkel on tootmises nelja kujuga kiilvaiad, mis erinevad teineteisest pikkuse poolest. Kõikide nende vaiade paksusteks on 30 cm, pikkusteks on 3,0 m, 2,5 m, 2,0 m ja 1,5 m. Mudelkatsetuste puhul järeldus, et selline vaiade kasutus ei ole betooni mahu ja vaia kandevõime suhte poolest mõttekas. Palju otstarbekam oleks kasutusele võtta kolm erinevat vaia, mis on sama pikkusega, kuid erinevate paksustega. Siis saab kas vähem betooni kasutades saavutada praegu kasutusel olevate vaiadega samad kandevõimed, või sama betoonimahtu kasutades suuremad kandevõimed. Selline muudatus tootetavates vaiades aitaks tulevikus betooni mahu pealt säästa.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti konstruktsioonide labori pinnasekastis miniatuursete kiilvaimudelite kandevõimet liivpinnases ja pinnases toimuvaid muutusi vaia süvistamisel. Katseid teostati kahes erineva tihedusega liivpinnases ja kolme erineva kujuga kiilvaimudeliga. Kõikide erinevate pinnase ja vaia kuju variatsioonidega sooritati kolm katset, mille keskmiste tulemuste järgi tehti järeldusi ja anti hinnanguid. Ebaõnnestunuks loeti üks tihedas pinnases mudeliga KV30/3 tehtud katsetus, kõik ülejäänud katsed õnnestusid.

Eesmärke oli mitmeid. Esiteks sooviti võrrelda kiilvaimudelite käitumist täissuuruses vaiadega ning uurida, kas hetkel ehituses peamiselt kasutatavate kandevõimevalemite (Gersevanovi ja Gate-Killari valemite) hinnangud sobivad ka mudelite puhul kandevõime hindamiseks. Sooviti uurida liivpinnase tiheduse mõju ning mudeli kuju ja seega ka mahu mõju vaia kandevõimele. Lisaks prooviti tõestada pinnase võimalikku tihenemist kiilvaia maasse rammimisel, mistõttu uuriti ka pinnase väljasurumist ja vertikaalset tõusu.

Eesmärkide saavutamiseks viidi läbi järgmised tööd:

1. Tutvuti varasema teemaalase kirjandusega.
2. Töötati välja katsetamiseks vajalikud kiilvaimudelid. Hangiti vajalikud katseseadmed.
3. Töötati välja põhjalik tegevuskava katsete läbiviimiseks.
4. Valmistati ette laboris olev pinnas ning seati paika katseseadmestik.
5. Teostati tegevuskava järgi läbi viidud katsetusringid kõikide erinevate kiilvaimudelitega ja kahes erineva tihedusega liivas.
6. Tegeleti andmetöötlusega, koostati graafikud, esitati tulemused ja tehti järeldused.

Katsetulemused näitasid, et kiilvaimudelid käituvad koormamisel sarnaselt täissuuruses vaiadega ja seega on nende põhjal järelduste tegemine võimalik ka suurte vaiade kohta. Seda näitasid tulemustena leitud piirkoormuste suhted ja vaiade ruumala ning

kandevõime võrdlus. Piirkoormuste vahel avaldati seosed, et liivas on külje vastupanu piir  $N_k \approx 0,43 \times N_{pr}$  (proportsionaalsuspiir ehk roomepiir) ja  $N_{pr} \approx 0,6 \times N_{piir}$  (purunemispiir).

Peab arvestama, et mudelite puhul ei pea paika Gate-Killari valem, mis alahindas tegelikku mudeli kandevõimet ligikaudu kolmekordselt. Gate-Killari valemit saab muuta hinnangu andmiseks sobivamaks, muutes valemis tegurid  $K$  vastavalt tulemuste osas selgitatule. Soovitav on kasutada Gersevanovi valemit, mis andis mudelite kandevõime kohta täpseid hinnanguid. Järeldus, et liiva tihedus omab väga suurt tähtsust vaia kandevõimele ja sõltuvalt rammitava pinnase tihedusest võib kandevõime varieeruda ligi kahekordselt. Samuti leiti uuringu käigus seos, et vaia kandevõime ja betooni mahu seisukohalt on otstarbekam kasvatada vaia paksuse sihis, mitte pikkuse sihis nagu hetkel toodetavad kiilvaiad varieeruvad.

Pinnase väljasurumise uuring näitas täissuuruses vaiadega sarnaseid tulemusi. Intensiivsem tõus toimub vaiapea vahetus läheduses, kuid pinnas võib olla mõjutatud kaldtahkude suunas lausa kolme vaiapikkuse kaugusele. Tihenemise uuringud ei andnud lõplikke tulemusi. Hetkel järeldus mudeluuringutest, et peamiselt rammimisest mõjutatud pinnas koheneb, kohenevad kindlasti pinnase pealmised kihid, kuid mingeid tihenemise märke avaldus siiski vaia kaldkülgede vahetus läheduses ligikaudu 30 cm sügavusel.

Antud töö loob aluse järgnevate kiilvaiuuringute läbiviimiseks. Erilise tähtsusega on see edasiste mudeluuringute jaoks, kuna kinnitab mudelite sarnast käitumist täissuuruses kiilvaiadega. Uuringus kasutatud meetodid olid sobilikud antud probleemide uurimiseks ja tähtsate järelduste saamiseks, ainult rammimisel toimuva tihenemise uurimiseks läheks vaja läbimõeldumat ja täpsemat meetodit.

## **TÄNUAVALDUS**

Autor soovib tänada oma juhendajaid töö valmimisel osutatud abi eest, Eesti Maaülikooli labori kasutamise võimaluse eest, AS-i Kurmik vajalike seadmetega varustamise eest ja spetsiaalselt Roomelt Needot nõu ja jõuga abistamise eest.

## KIRJANDUS

1. Needo, R., juh. prof. Kaevats, Ü. *Kiilvaivundamendid – mis oli, on ja mis võiks olla*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, Humanitaar- ja Sotsiaalteaduste Instituut, Filosoofia õppetool. 2008.
2. Needo, A., Mets, M., Kärk, J., Kuddu, A.-A. *Kiilvaivundamendid*. Ehitusgeoloogia kogumik, V. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. 1991. lk. 138-145.
3. Таммемяе, О. / Tammemäe, O., Листра, Э. / Listra, E., Кильдер, П. / Kilder, P., Тальвисте, П. / Talviste, P., Нийн, А. / Niin, A. Нийн / A.Niin, *Инженерно геологический отчёт. Рекомендации по оценке инженерно-геологических свойств слабых разновидностей морен для целей строительства на примере Эстонской ССР (слабые моренные грунты)*. Работа № 4266X/4456X. Таллин: Государственный институт инженерных изысканий. 1987.
4. *Kiilvaivundamendtide arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioon*, VEN 57-86. Koostajad: Needo, A., Väli, T., Needo, E., Jaaniso, V., Kuddu, A., Mets, M., Kark, J. Tallinn: ENSV Ministrite Nõukogu Riiklik Ehituskomitee. 1986.
5. Tammemäe, O., Listra, E., Väli, T., Ong, H. *Kiilvaiade kandevõime*. Ehitusgeoloogia kogumik, V. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. 1991. lk 146-156.
6. Mets, M. *Vaia kandevõime*. Ehitusgeoloogia kogumik, IV. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. 1977. lk 160-175.
7. Dang Dinh Chung Nguyen, Seong-Bae Jo, Dong-Soo Kim. *Design method of pile-raft foundation under vertical load considering interaction effects*. Computers and Geotechnics, 47. 2012. lk 16-27.
8. Killar, E., Mets, M., Vares, J. *Vaia kandevõime määramise võimalustest rammimisandmeil*. Ehitusgeoloogia kogumik, IV. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. 1977. lk 176-182.
9. *Geotehniline projekteerimine*, EVS-EN 1997-1:2006. Eurokoodeks 7, osa 1: Üldeeskirjad. K: Jaaniso, V. Tallinna Tehnikaülikool, Ehitiste Projekteerimise Instituut, Eesti Standardikeskus. 2006.

10. *Ehituskonstruktori käsiraamat*. 9.6.2. Üksikvaia kandevõime. K: Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipmann, T., Pukk, O., Õiger, K., Just, E., Just, A., Hartšuk, V. Tallinn: „Ehitame“. 2014. lk 242-243.
11. Barnes, G. E. *Soil Mechanics - Principles and Practice*, second edition. Publisher: Palgrave Macmillan. 2000. p. 186-190.
12. Tammemäe, O., juh. Mets, M. *Kiilvaiad Lõuna-Eesti moreenpinnases*. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Energeetikateaduskond. 2003.

**LISAD**



## Lisa A: katseprotokoll

### Katsetulemused tihedas pinnases

**Tabel A.1.** Kaalud, 30/3 vaiad, 7,5 kg nimikaaluga haamer

haamri kaal	7570,4 g
juhtvarda kaal	893,7 g
vai nr 1 kaal	1013 g
vai nr 2 kaal	1043 g
vai nr 3 kaal	985,3 g

**Tähis** 40/3/3  
 vaia pikkus  
 vaia paksus  
 mitmes katse antud vaiaga

**Tabel A.2.** Lühikese vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/1

Katse 1	Enne rammimist	Suvalistes punktides vaia ja markerite punktidest eemal	Löökide arv süvistusel 10-20cm	hinnanguline liiva tihedus
			8	0,937
			9	0,942
Katse 1	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel 10-20cm	
		6	4,5	
		7	6,5	
		8	7	
		9	7	
		10	7,5	

**Tabel A.3.** Lühikese vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/2

Katse 2	Enne rammimist	Suvalistes punktides vaia ja markerite punktidest eemal	Löökide arv süvistusel 10-20cm	hinnanguline liiva tihedus
			8	0,937
			6	0,9...
Katse 2	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel 10-20cm	
		6	3,5	
		7	4,5	
		8	5	
		9	6,5	
		10	6,5	

**Tabel A.4.** Lühikese vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/3

Katse 3	Enne rammimist	Suvalistes punktides vaia ja markerite punktidest eemal	Löökide arv süvistusel	
			10-20cm	
			6	
			5	
		hinnanguline liiva tihedus		
		0,9...		
		0,9...		
Katse 3	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel	
			10-20cm	
		6	4	
		7	4,5	
		8	5,5	
		9	6	
10	7			

**Tabel A.5.** Pika vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/1

Katse 1	Enne rammimist	Vaia pea lühemas suunas vaaist 45 cm kaugusel	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
			11	28	40	50	61
Katse 1	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
		5	4,5	11	21	31	47
		4	6,5	18	37	58	49
		3	8	22	45	66	
		2	9	26	39		
		1	8,5	23	30		
		11	5,5	14,5	24	35	
		12	8	20	35	49	
		13	9	23	38		

**Tabel A.6.** Pika vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/2

Katse 2	Enne rammimist	Vaia pea lühemas suunas vaaist 45 cm kaugusel	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
			9	26	36	37	35
Katse 2	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
		5	5	11	20	24	35
		4	6,5	17	29	33	36
		3	8	18	28	40	48
		2	8	14	28	37	39
		1	8,5	19	24	31	32
		11	4	11	18	27	42
		12	6	17	22	30	47
		13	8	19	29	43	53

**Tabel A.7.** Pika vardaga penetromeetri tulemused, 30/3/3

	Enne rammimist	Vaia pea lühemas suunas vaiast 45 cm kaugusel	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
			11	26	36	38	39
Katse 3	Pärast rammimist	Punktis	Löökide arv süvistusel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
		5	5	8	13	29	43
		4	5	12	20	32	38
		3	7	13	23	33	43
		2	7	17	22	21	29
		1	8	16	18	18	18
		11	4	8	13	22	37
		12	5	10,5	21	33	39
		13	8	19	24	27	36

**Tabel A.8.** Anduri näidud pinnase tõusu määramisel, 30/3/1

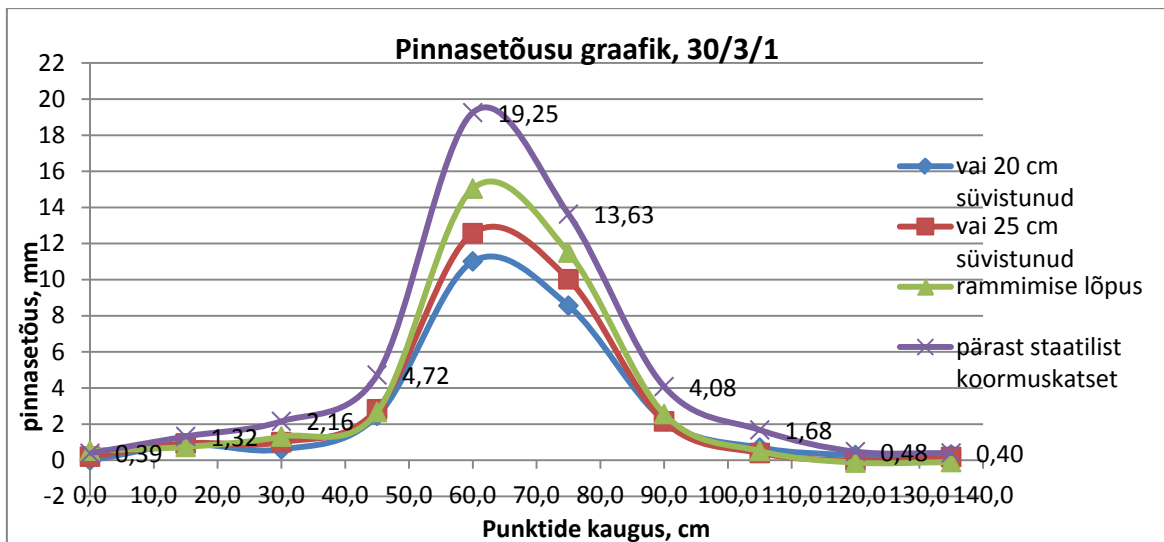
	Punkt	algmõõt	kui vai 20 cm süvistund	kui vai 25 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
Katse 1	1	44,35	44,34	44,55	44,88	44,74
	2	40,70	41,58	41,63	41,44	42,02
	3	44,66	45,26	45,66	45,97	46,82
	4	44,03	46,49	46,85	46,70	48,75
	5	46,69	57,70	59,26	61,73	65,94
	vai					
	6	45,11	53,67	55,13	56,61	58,74
	7	41,77	44,00	43,92	44,33	45,85
	8	46,90	47,60	47,30	47,41	48,58
	9	48,12	48,41	48,10	47,99	48,60
	10	51,06	51,38	51,24	50,96	51,46
	11	20,47	24,60	25,05	25,70	26,50
	12	16,68	17,95	17,76	18,06	18,70
13	17,87	18,49	18,26	18,25	19,07	

**Tabel A.9.** Anduri näidud pinnase tõusu määramisel, 30/3/2

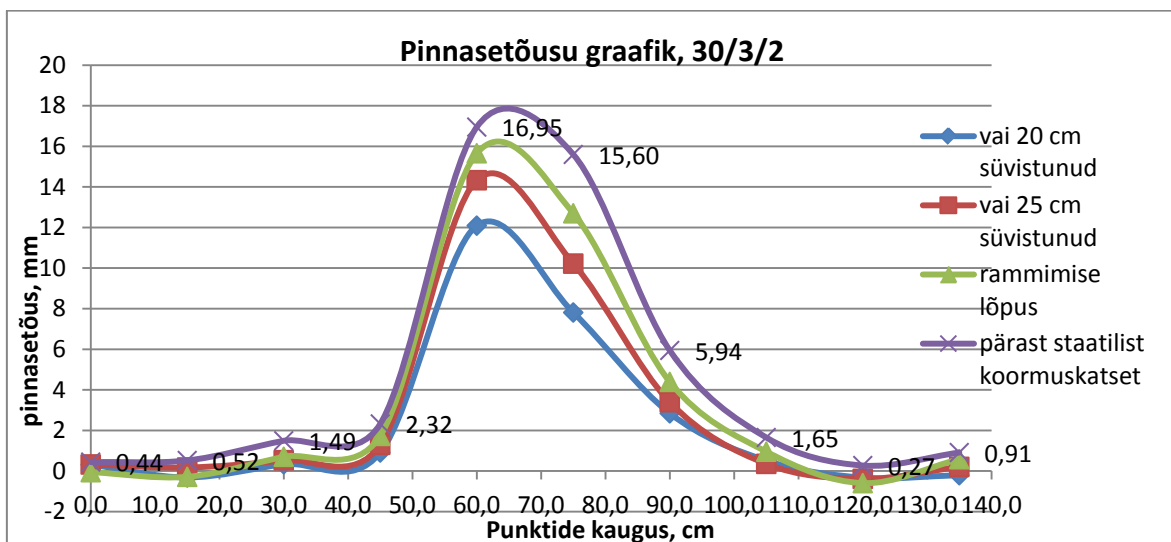
	Punkt	algmõõt	kui vai 20 cm süvistund	kui vai 25 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
Katse 2	1	47,76	48,07	48,08	47,70	48,20
	2	43,53	43,21	43,70	43,24	44,05
	3	40,55	40,88	41,08	41,25	42,04
	4	37,11	38,02	38,40	38,84	39,43
	5	35,71	47,80	50,04	51,37	52,66
	vai					
	6	42,20	50,01	52,42	54,90	57,80
	7	41,83	44,67	45,22	46,22	47,77
	8	50,51	51,02	50,86	51,46	52,16
	9	54,29	53,96	53,90	53,69	54,56
	10	55,62	55,41	55,82	56,20	56,53
	11	10,00	13,52	14,36	14,69	16,04
	12	8,46	9,42	9,52	9,84	10,83
13	7,45	7,07	8,10	8,02	8,60	

**Tabel A.10.** Anduri näidud pinnase tõusu määramisel, 30/3/3

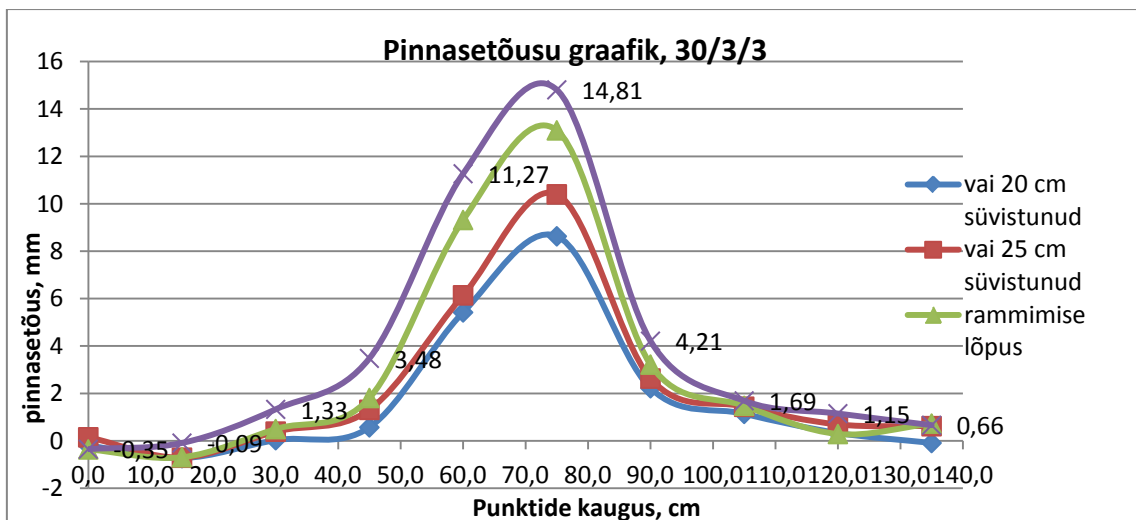
	Punkt	algmõõt	kui vai 20 cm süvistund	kui vai 25 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
Katse 3	1	39,43	39,23	39,58	39,07	39,08
	2	36,03	35,30	35,32	35,34	35,94
	3	34,32	34,35	34,71	34,82	35,65
	4	34,93	35,50	36,24	36,74	38,41
	5	39,45	44,87	45,59	48,77	50,72
	vai					
	6	44,30	52,93	54,70	57,40	59,11
	7	47,91	50,13	50,54	51,13	52,12
	8	53,01	54,15	54,45	54,49	54,70
	9	57,73	58,06	58,42	58,02	58,88
	10	60,93	60,84	61,55	61,66	61,59
	11	18,19	20,61	20,80	21,73	22,19
	12	20,46	20,68	21,32	22,15	22,93
13	16,34	15,46	16,04	16,57	16,84	



Joonis A.1. Pinnatõusu graafik tihedas pinnases kaldkülgedes sihis, 30/3/1



Joonis A.2. Pinnatõusu graafik tihedas pinnases kaldkülgedes sihis, 30/3/2



Joonis A.3. Pinnatõusu graafik tihedas pinnases kaldkülgedes sihis, 30/3/3

**Tabel A.11.** Löökide arvud ja vasted dünaamilisel katsel, 30/3/1

Katse 1	<b>lööke</b>	<b>vajum, cm</b>	
	Pärast 5. lööki	14,3	20cm vaiast süvistunud
	Pärast 8. lööki	17	
	Pärast 9. lööki	18	
	Pärast 10. lööki	18,6	
	Pärast 11. lööki	19,4	
	Pärast 12. lööki	20,1	25cm vaiast süvistunud
	Pärast 13. lööki	20,8	
	Pärast 14. lööki	21,4	
	Pärast 15. lööki	22	
	Pärast 16. lööki	22,5	
	Pärast 17. lööki	23	umb. 15mm vaia ots pinnasest väljas
	Pärast 18. lööki	23,5	
	Pärast 19. lööki	24,1	
Pärast 20. lööki	24,5		

**Tabel A.12.** Löökide arvud ja vasted dünaamilisel katsel, 30/3/2

Katse 2	<b>lööke</b>	<b>vajum, cm</b>	
	Pärast 1. lööki	5,2	20cm vaiast süvistunud
	Pärast 2. lööki	8	
	Pärast 3. lööki	10	
	Pärast 4. lööki	11,5	
	Pärast 5. lööki	13	
	Pärast 6. lööki	14	
	Pärast 7. lööki	15	
	Pärast 8. lööki	16	25cm vaiast süvistunud
	Pärast 9. lööki	16,9	
	Pärast 10. lööki	17,7	
	Pärast 11. lööki	18,45	
	Pärast 12. lööki	19,15	
	Pärast 13. lööki	19,8	umb. 15mm vaia ots pinnasest väljas
	Pärast 14. lööki	20,4	
	Pärast 15. lööki	21	
	Pärast 16. lööki	21,6	
Pärast 17. lööki	22,2		

**Tabel A.13.** Löökide arvud ja vasted dünaamilisel katsel, 30/3/3

Katse 3	lööke	vajum, cm	20cm vaiast süvistunud  25cm vaiast süvistunud  umb. 15mm vaia ots pinnasest väljas
	Pärast 1. lööki	7,4	
	Pärast 2. lööki	10,6	
	Pärast 3. lööki	13	
	Pärast 4. lööki	14,5	
	Pärast 5. lööki	16	
	Pärast 6. lööki	17,2	
	Pärast 7. lööki	18,35	
	Pärast 8. lööki	19,5	
	Pärast 9. lööki	20,3	
	Pärast 10. lööki	21,2	
	Pärast 11. lööki	22	
	Pärast 12. lööki	22,9	

**Tabel A.14.** Pinnaseproovid, 30/3/1, löikerõnga maht 49,79 cm<sup>3</sup>

Katse 1	Topsid	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g	Pinnas, g	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>
		10	161,61	77,11	1,548705
		20	161,55	77,05	1,547499
		30	162,03	77,53	1,55714
		40	163,27	78,77	1,582045

Proov	tops nr	tühi tops, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus
10 cm süg.	526	24,96	60,41	35,45	58,70	33,74	1,71	5,07
20 cm süg.	534	24,77	61,10	36,33	59,40	34,63	1,70	4,91
30 cm süg.	536	22,59	63,08	40,49	60,80	38,21	2,28	5,97
40 cm süg.	921	26,85	61,92	35,07	59,70	32,85	2,22	6,76
vaia kohalt	975	27,92	68,04	40,12	66,60	38,68	1,44	3,72

**Tabel A.15.** Pinnaseproovid, 30/3/2, löikerõnga maht 49,79 cm<sup>3</sup>

Katse 2	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g	Pinnas, g	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>			
				10	161,9	77,4	1,554529
				20	162,9	78,4	1,574613
				30	164,2	79,7	1,600723

Proov	tops nr	tühi tops, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus
10 cm süg.	675	25,60	79,70	54,10	76,90	51,30	2,80	5,46
20 cm süg.	845	27,00	74,20	47,20	71,50	44,50	2,70	6,07
30 cm süg.	968	26,95	75,90	48,95	72,40	45,45	3,50	7,70

**Tabel A.16.** Pinnaseproovid, 30/3/3, löikerõnga maht 49,79 cm<sup>3</sup>

Katse 3	Topsid	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g	Pinnas, g	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>				
		10	161,6	77,1	1,548504				
		20	159,9	75,4	1,51436				
		30	160,7	76,2	1,530428				
Proov	tops nr	tühi tops, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus	
10 cm süg.	597	23,05	69,10	46,05	66,80	43,75	2,30	5,26	
20 cm süg.	887	26,61	69,30	42,69	67,20	40,59	2,10	5,17	
30 cm süg.	929	27,22	69,90	42,68	67,40	40,18	2,50	6,22	

**Tabel A.17.** Staatilise koormuskatse tabel, 30/3/1

Katse 1	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min
76,01	76,72	76,73	76,77	77,86	77,86	77,88	79,4	79,47	79,55	
Katse 2	algnäit mm	20 bar			25 bar					
		10 kN			12,5 kN					
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min			
		86,14	86,56	87,15	104,4	105,2	106,36			

**Tabel A.18.** Staatilise koormuskatse tabel, 30/3/2

Katse 2	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min
83,69	84,00	84,00	84,00	85,00	85,12	85,12	87,50	87,57	87,69	
Katse 3	algnäit mm	20 bar			25 bar					
		10 kN			12,5 kN					
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min			
		95,08	95,60	96,46	121,04	121,50	122,30			

**Tabel A.19.** Staatilise koormuskatse tabel, 30/3/3

Katse 3	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3min	5min	10min	3 min
85,84	86,19	86,19	86,19	88,15	88,20	88,29	98,97	99,61	100,23	126,00	



## Katsetulemused kohevas pinnases

Tabel A.20. Kaalud

haamri kaal	7570,4 g
juhtvarda kaal	893,7 g
vai 40/3 kaal	1646 g
vai 40/6 kaal	3345 g
vai 30/3 kaal	985 g

Tähis 40/3/3  
 vaia pikkus  
 vaia paksus  
 mitmes katse antud vaiaga

Tabel A.21. Penetromeetriga mõõtmised

	Katse	Punktis	Löökide arv süvistel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
Enne rammimist	40/3/1	suvalises	3	5	5	4	7
	40/3/2	suvalises	2,5	5	5	5	5
	40/3/3	suvalises	3	4,5	8	17	27
	40/6/1	suvalises	3	6	6	6	4
	40/6/2	suvalises	3	4	5	6	16
	30/3/1	suvalises	2	4	6,5	13	25
	30/3/1	suvalises	3,5	4	4	4,5	7
	30/3/1	suvalises	4,5	6,5	11	22	30

	Katse	Punktis	Löökide arv süvistel				
			10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50-60 cm
Pärast rammimist	40/3/1	4	2	4,5	5,5	10	15
	40/3/1	3	3	5	8	11	12
	40/3/1	9	1,5	3	6	11	11
	40/3/2	4	2	2,5	6	10	16
	40/3/2	3	2	3	9	17	22
	40/3/2	9	1	1,5	3	3,5	6
	40/3/3	4	2	4	6,5	12	21
	40/3/3	3	1	2	6,5	12	20
	40/3/3	9	2	4	5,5	9,5	9
	40/6/1	5	3	6	10	15	23
	40/6/1	5 kõrval 15 cm	2,5	4	7	10	11
	40/6/1	6	3	7	17	23	32
	40/6/1	6 kõrval 15 cm	3	8	13	17	24
	40/6/2	4	3	7	9	15	23
	40/6/3	3-4 vahel	3	6	10	18	25
	40/6/3	15cm kõrvalt	4	6	9,5	16	25
	40/6/3	5-6 vahel	2,5	3,5	11,5	20	29
	30/3/1	5	3	6	9	13	18
	30/3/1	4	3,5	5	8,5	12	19
	30/3/2	5	3	5	8	14	20
30/3/2	4	2,5	4,5	6,5	9	14	

**Tabel A.22.** Anduri näidud pinnatõusu määramisel, 40/3

<b>40/3/1</b>	<b>Punkt</b>	<b>algmõõt</b>	<b>kui 25 cm süvistund</b>	<b>kui 30 cm süvistund</b>	<b>kui 35 cm süvistund</b>	<b>rammimise lõpus</b>	<b>pärast staatilist katset</b>
	1	4,61	4,61	4,62	4,66	4,68	4,77
	2	87,10	87,10	87,10	87,12	87,14	87,36
	3	93,15	93,21	93,27	93,31	93,43	94,03
	4	91,06	93,30	93,82	94,33	94,85	96,63
	vai						
	5	98,95	101,30	101,98	102,71	103,53	105,88
	6	88,28	88,62	88,82	88,99	89,17	89,72
	7	87,30	87,30	87,30	87,30	87,30	87,50
	8	1,99	2,06	2,09	2,12	2,17	2,37
9	99,42	100,66	100,97	101,28	101,63	102,67	

<b>40/3/2</b>	<b>Punkt</b>	<b>algmõõt</b>	<b>kui 25 cm süvistund</b>	<b>kui 30 cm süvistund</b>	<b>kui 35 cm süvistund</b>	<b>rammimise lõpus</b>	<b>pärast staatilist katset</b>
	1	4,83	4,84	4,84	4,85	4,85	4,83
	2	86,99	87,05	87,10	87,17	87,20	87,35
	3	85,28	85,45	85,59	85,74	85,87	86,28
	4	96,99	99,00	99,57	100,01	100,44	101,68
	vai						
	5	92,31	95,89	96,81	97,68	98,48	100,17
	6	88,08	88,63	89,10	89,53	89,85	90,70
	7	90,96	90,98	91,03	91,11	91,19	91,24
	8	1,83	1,87	1,90	1,94	1,97	2,01
9	98,08	99,37	99,79	100,11	100,43	101,19	

<b>40/3/3</b>	<b>Punkt</b>	<b>algmõõt</b>	<b>kui 25 cm süvistund</b>	<b>kui 30 cm süvistund</b>	<b>kui 35 cm süvistund</b>	<b>rammimise lõpus</b>	<b>pärast staatilist katset</b>
	1	4,68	4,69	4,70	4,73	4,76	4,76
	2	86,41	86,48	86,53	86,60	86,67	86,78
	3	88,90	89,08	89,22	89,42	89,62	89,97
	4	88,50	90,62	91,08	91,62	92,13	93,36
	vai						
	5	90,82	93,44	94,14	95,09	96,03	97,20
	6	89,28	89,91	90,32	90,76	91,17	91,79
	7	90,04	90,12	90,23	90,38	90,50	90,54
	8	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,03
9	91,12	91,84	92,11	92,46	92,79	93,26	

**Tabel A.23.** Anduri näidud pinnatõusu määramisel, 40/6

40/6/1	Punkt	algmõõt	kui 25 cm süvistund	kui 30 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
	1	5,00	5,05	5,10	5,14	5,16	5,58
	2	90,71	90,85	91,01	91,21	91,33	92,47
	3	87,55	88,04	88,39	88,84	89,20	91,31
	4	89,10	93,15	94,44	95,84	97,10	102,02
	vai						
	5	90,24	95,79	97,36	99,48	100,84	102,95
	6	86,48	87,50	88,13	88,94	89,68	91,37
	7	87,20	87,57	87,83	88,18	88,44	89,04
	8	1,82	1,98	2,06	2,18	2,27	2,67
9	94,61	95,69	96,13	96,61	96,92	98,07	

40/6/2	Punkt	algmõõt	kui 25 cm süvistund	kui 30 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
	1	5,42	5,44	5,45	5,47	5,49	5,72
	2	89,68	89,88	89,97	90,11	90,25	90,85
	3	90,00	90,72	91,00	91,40	91,82	92,84
	4	89,46	93,62	94,82	96,40	97,53	99,56
	vai						
	5	89,48	96,03	97,61	99,71	101,07	106,81
	6	80,55	82,09	82,67	83,38	84,08	86,75
	7	89,75	90,08	90,30	90,59	90,86	91,81
	8	2,11	2,23	2,29	2,36	2,41	2,65
9	92,72	93,85	94,16	94,46	94,75	95,39	

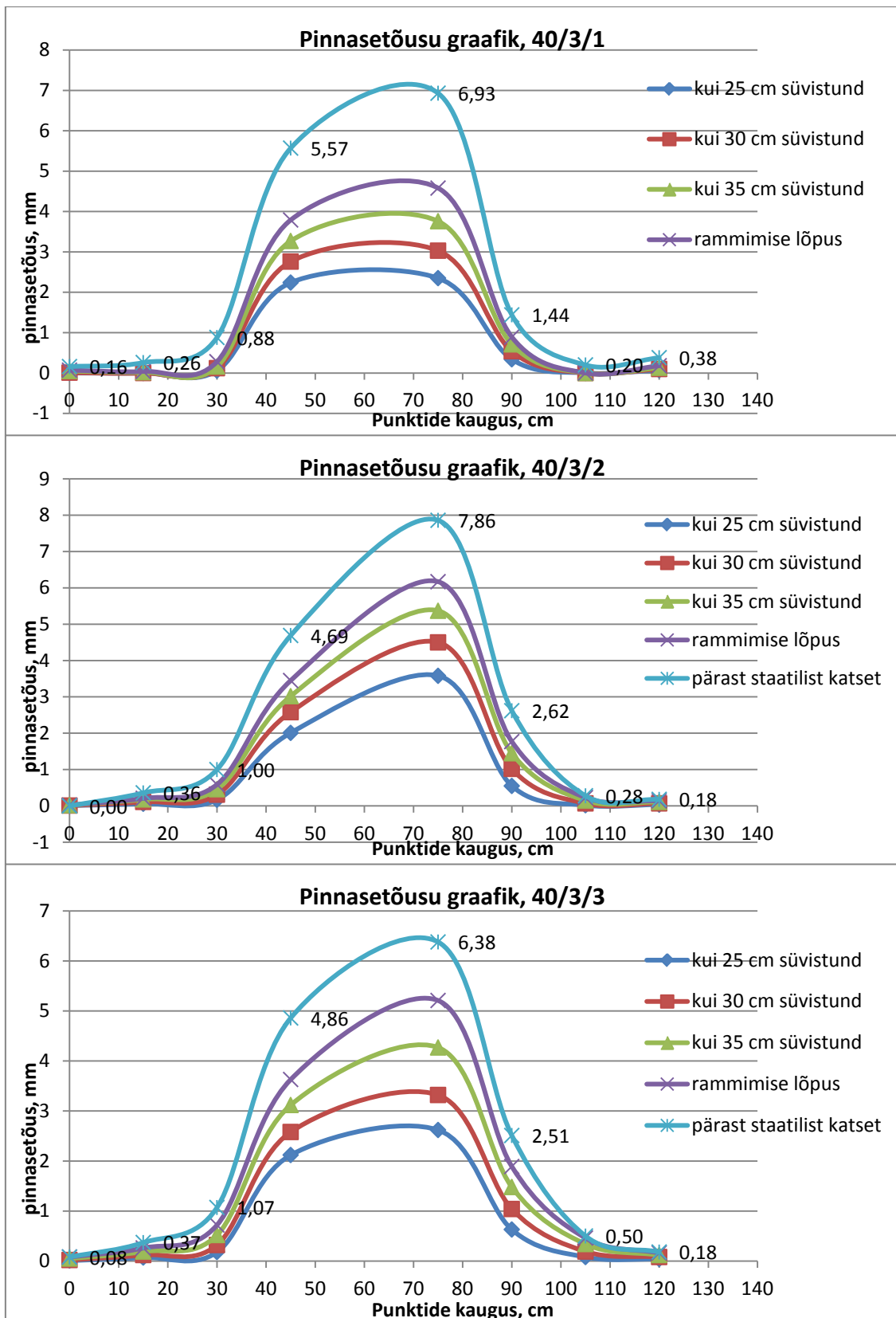
40/6/3	Punkt	algmõõt	kui 25 cm süvistund	kui 30 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
	1	5,54	5,60	5,63	5,66	5,69	6,04
	2	87,75	87,96	88,10	88,29	88,45	89,28
	3	87,76	88,55	88,93	89,51	90,01	91,73
	4	91,30	95,17	96,30	97,92	99,14	102,32
	vai						
	5	92,20	98,05	99,68	101,97	103,62	105,81
	6	86,68	88,19	88,87	89,78	90,44	91,90
	7	90,57	90,95	91,19	91,44	91,60	92,24
	8	1,88	1,95	1,99	2,03	2,04	2,22
9	92,82	93,87	94,10	94,54	94,86	95,53	

**Tabel A.24.** Anduri näidud pinnatõusu määramisel, 30/3

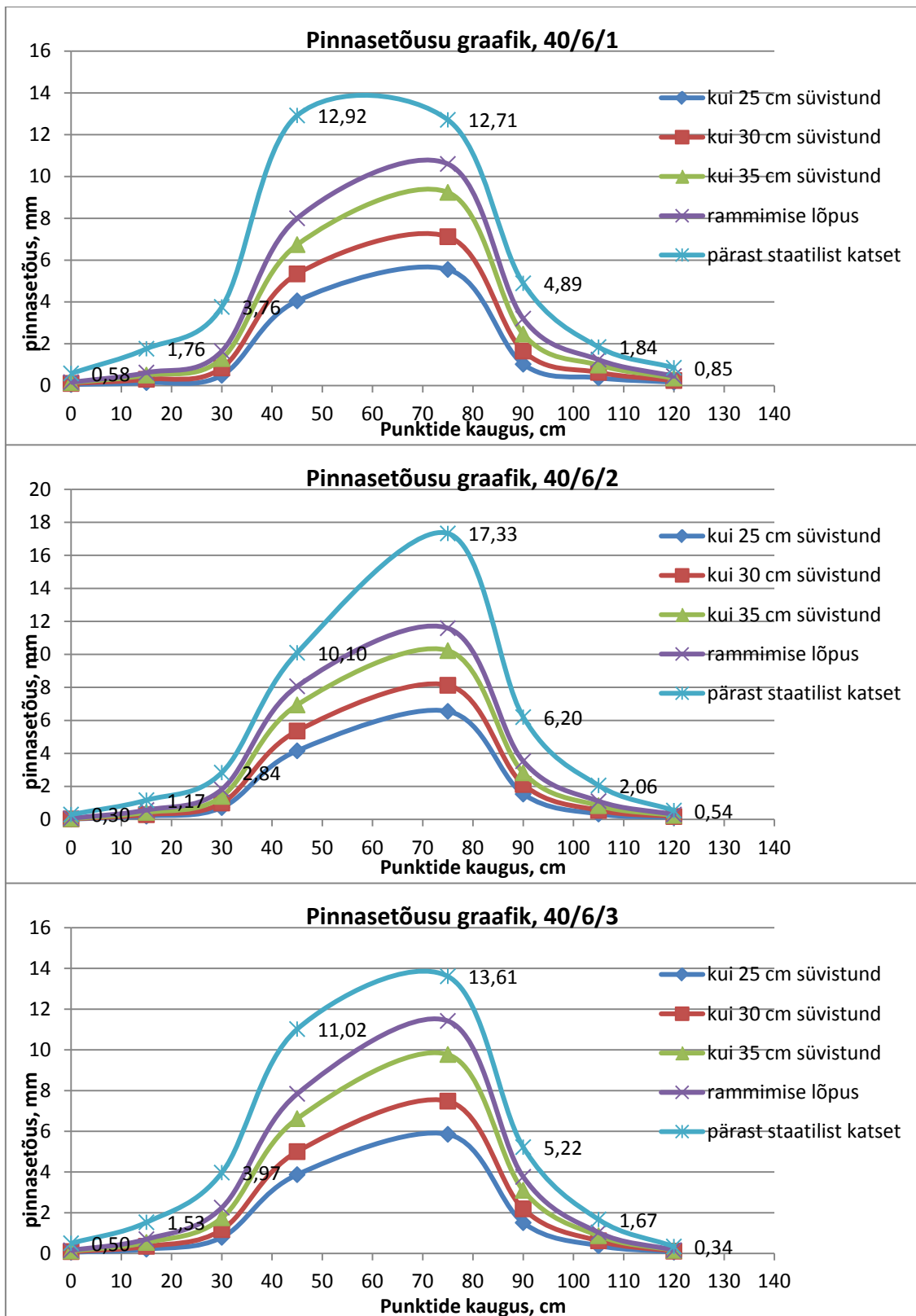
	Punkt	algmõõt	kui 20 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
<b>30/3/1</b>	1	6,17	6,19	6,20	6,23	6,27
	2	86,67	86,71	86,74	86,83	86,96
	3	86,05	86,22	86,32	86,49	86,74
	4	81,56	83,61	84,20	84,92	85,61
	vai					
	5	93,74	96,35	97,31	98,23	99,82
	6	86,77	87,15	87,47	87,94	88,70
	7	88,12	88,22	88,27	88,39	88,54
	8	0,55	0,64	0,70	0,75	0,90
9	91,22	91,90	92,12	92,39	93,05	

	Punkt	algmõõt	kui 20 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
<b>30/3/2</b>	1	4,16	4,18	4,20	4,24	4,28
	2	86,64	86,72	86,76	86,86	87,00
	3	86,94	87,09	87,27	87,56	87,90
	4	84,15	86,76	87,55	88,64	89,48
	vai					
	5	92,14	94,27	95,22	96,38	97,87
	6	86,84	87,34	87,75	88,21	88,91
	7	88,83	88,93	89,11	89,37	89,56
	8	2,31	2,31	2,32	2,35	2,38
9	91,76	92,37	92,64	93,35	93,96	

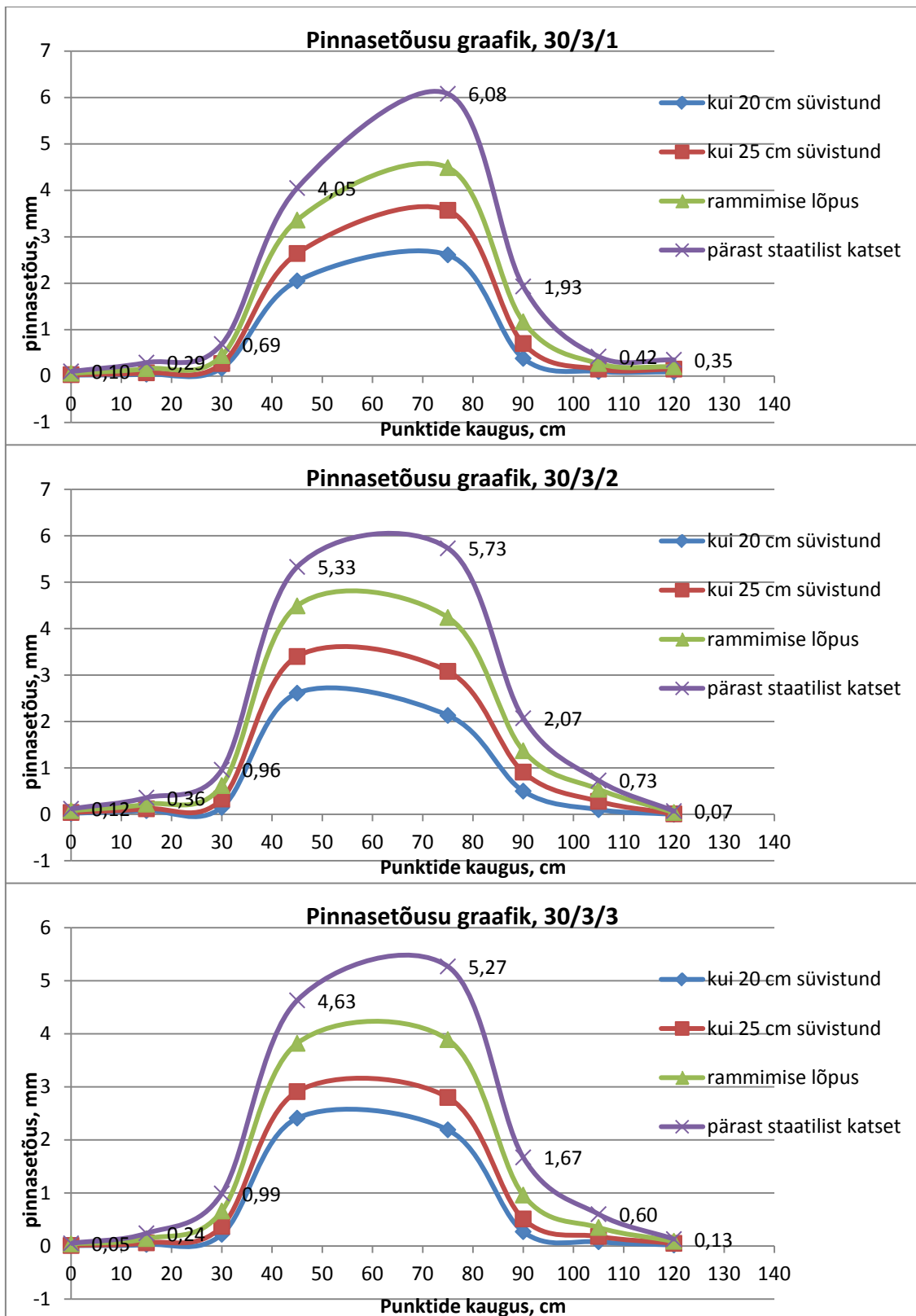
	Punkt	algmõõt	kui 20 cm süvistund	kui 35 cm süvistund	rammimise lõpus	pärast staatilist katset
<b>30/3/3</b>	1	4,19	4,20	4,20	4,23	4,24
	2	88,03	88,06	88,09	88,17	88,27
	3	90,20	90,42	90,57	90,86	91,19
	4	82,65	85,06	85,56	86,47	87,28
	vai					
	5	90,78	92,97	93,58	94,67	96,05
	6	87,62	87,89	88,13	88,58	89,29
	7	87,56	87,64	87,74	87,91	88,16
	8	0,05	0,07	0,10	0,14	0,18
9	93,90	94,39	94,61	95,09	95,71	



Joonis A.4. Pinnatõusu graafikud kohevas pinnases kaldkülgedes suunas, 40/3 kolmel katsel



Joonis A.5. Pinnatõusu graafikud kohevas pinnases kaldkülgede suunas, 40/6 kolmel katsel



Joonis A.6. Pinnatõusu graafikud kohevas pinnases kaldkülgede suunas, 30/3 kolmel katsel

**Tabel A.25.** Dünaamilise koormuskatse löökide arv ja vajum, 40/3

40/3/1	lööke	vajum	40/3/2	lööke	cm	40/3/3	lööke	cm
	1	7,8		1	6,4		1	8,5
	2	12,2		2	10,8		2	12,5
	3	15,1		3	13,9		3	15,2
	4	17,4		4	16,4		4	17,1
	5	19,3		5	18,4		5	18,8
	6	20,9		6	20,0		6	20,1
	7	22,4		7	21,5		7	21,3
	8	23,7		8	22,6		8	22,5
	9	24,9		9	23,8		9	23,5
	10	26,0		10	24,9		10	24,3
	11	27,0		11	25,9		11	25,2
	12	28,0		12	26,8		12	26,0
	13	28,9		13	27,5		13	26,8
	14	29,7		14	28,3		14	27,5
	15	30,5		15	29,0		15	28,2
	16	31,3		16	29,8		16	28,9
17		17		17	29,6			
					18	30,2		

**Tabel A.26.** Dünaamilise koormuskatse löökide arv ja vajum, 40/6

40/6/1	lööke	vajum, cm	40/6/2	lööke	cm	40/6/3	lööke	cm
	1	5,2		1	4,5		1	4,9
	2	8,4		2	7,2		2	7,7
	3	10,5		3	9,5		3	9,8
	4	12,2		4	11,1		4	11,5
	6	14,8		6	13,9		6	14,0
	8	16,8		8	15,9		8	15,9
	10	18,5		10	17,7		10	17,6
	12	19,9		12	19,1		12	19,0
	14	21,2		14	20,5		14	20,2
	16	22,4		16	21,7		16	21,3
	18	23,3		18	22,8		18	22,3
	20	24,3		20	23,8		20	23,3
	22	25,2		22	24,7		22	24,2
	24	26,1		24	25,6		24	25,0
	26	27,0		26	26,5		26	25,8
	28	27,7		28	27,2		28	26,5
30	28,4	30	28	30	27,2			
32	29,1	32	28,7	32	27,9			
35	30,2	34	29,4	34	28,5			
		37	30,3	36	29,1			
				39	30,0			



**Tabel A.27.** Dünaamilise koormuskatse löökide arv ja vajum, 30/3

30/3/1	lööke	vajum, cm	30/3/2	lööke	cm	30/3/3	lööke	cm
	1	7,3		1	7,5		1	8,1
	2	11,5		2	11,1		2	12,2
	3	14,5		3	13,4		3	14,5
	4	16,9		4	15,1		4	16,3
	5	18,7		5	16,6		5	17,7
	6	20,4		6	18,0		6	19,1
	7	21,6		7	19,2		7	20,2
	8	22,8		8	20,2		8	21,2
	9	23,9		9	21,2		9	22,1
	10			10	22,2		10	23,0
		11	23,1					

**Tabel A.28.** Pinnaseproovid, löikerõnga maht 49,79 cm<sup>3</sup>

40/3	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g			Pinnas, g		tihedus	
	10	156,1			71,4		1,43	
	20	157,2			72,5		1,46	
	30	159,3			74,6		1,50	
topsi nr	tühi tops kaalutud, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus	
929	27,10	70,40	43,30	68,70	41,60	1,70	4,09	
40/6	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g			Pinnas, g		tihedus	
	10	156,3			71,6		1,44	
	20	157			72,3		1,45	
	30	158			73,3		1,47	
	topsi nr	tühi tops kaalutud, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus
887	26,60	68,20	41,60	66,70	40,10	1,50	3,74	
30/3	Proovi sügavus, cm	pinnas + löikerõngas + klaas, g			Pinnas, g		tihedus	
	10	159			74,3		1,49	
	20	158,3			73,6		1,48	
	30	157,5			72,8		1,46	
	40	159			74,3		1,49	
	topsi nr	tühi tops kaalutud, g	tops ja märg liiv, g	märg liiv, g	tops ja kuiv liiv, g	kuiv liiv, g	vesi, g	vee % sisaldus
968	26,90	68,70	41,80	67,40	40,50	1,30	3,21	

**Tabel A.29.** Staatilise koormuskatse tulemid, 40/3

40/3/1	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min
	85,9	85,52	85,47	85,47	81,58	81,51	81,35	62,33	61,58	60,7	29

40/3/2	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min
	89,95	89,65	89,65	89,65	86,95	86,92	86,88	75,28	74,86	74,37

20 bar		
10 kN		
3 min	5 min	10min
47,42	46,42	45,2

40/3/3	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min
	85,23	84,76	84,76	84,76	83,09	83,04	83,03	76,87	76,58	76,06

20 bar			22 bar		
10 kN			11 kN		
3 min	5 min	10min	3 min	5 min	10min
55,2	54,45	53,66	43,7	42,58	41,8

**Tabel A.30.** Staatilise koormuskatse tulemid, 40/6

40/6/1	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN		
		3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
	100,9	100,54	100,54	100,54	99,71	99,71	99,71	98,46	98,44	98,4	96,04	95,98	95,85

25 bar			30 bar			35 bar			40 bar		
12,5 kN			15 kN			17,5 kN			20 kN		
3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
91,74	91,5	91,22	83,94	83,43	82,55	70,13	68,64	66,96	49		

40/6/2	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN		
		3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
	97,17	96,97	96,97	96,93	96,39	96,39	96,39	95,21	95,19	95,17	93,16	93,09	93,03

25 bar			30 bar			35 bar			40 bar		
12,5 kN			15 kN			17,5 kN			20 kN		
3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
89,05	88,89	88,68	81,6	81,06	80,47	69,15	68,26	66,76	50		

40/6/3	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN		
		3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
	90,26	90,06	90,03	90,03	89,63	89,63	89,59	88,87	88,83	88,83	87,36	87,23	87,16
		25 bar			30 bar			35 bar			40 bar		
		12,5 kN			15 kN			17,5 kN			20 kN		
		3min	5min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10m	3min	5min	10m
		84,71	84,59	84,44	79,78	79,48	79,02	70,96	69,97	68,77	54,1	52,5	50,3

Tabel A.31. Staatilise koormuskatse tulemid, 30/3

30/3/1	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10min
	98,6	97,88	97,84	97,83	90,4	90,24	90,03	63,47	63,14	62,6

30/3/2	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar		
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN		
		3 min	5 min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10min
	100	99,35	99,35	99,34	94,35	94,22	94,04	68,7	68,08	67,45

30/3/3	algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			16 bar
		2,5 kN			5 kN			7,5 kN			8 kN
		3 min	5 min	10min	3min	5min	10min	3min	5min	10min	3 min
	100,58	100,04	100,04	100,03	95,93	95,84	95,72	72,2	71,47	70,78	61

## Lisa B: laboripäevik

Tabel B.1. Laboripäevik

Päev	Kellaeg	Tehtu
Reede, 23.01.2015	8.00 - 13.00	Laboriga tutvumine, katseseadmete valmistamine, labori talastiku valmistõstmise, proovikatsetuste tegemine.
Esmaspäev, 26.01.2015	13.30 - 19.00	Liivakasti ümberkaevamine, pinnase tihendamine vibroplaadiga kolmes kihis, katsetuskava järgi dünaamilise koormuskatse läbiviimine, pinnase tõusu mõõtmine ja mõõtmised penetromeetriga
Teisipäev, 27.01.2015	12.00 - 16.30	Staatilise koormuskatse läbiviimine, pinnasetõusu viimane mõõtmine, pinnaseproovide võtmine, esimese katsetusringi lõpetamine 30/3 vaiaga tihedas pinnases
Reede, 30.01.2015	8.00 - 17.00	Pinnase ettevalmistamine, terve teise katseringi läbiviimine, kolmanda katseringi algus
Laupäev, 31.01.2015	10.30 - 13.00	Kolmanda katseringi lõpetamine, labori kordaseadmise, 30/3 vaiaga tihedas pinnases katsed tehtud
Reede, 06.02.2015	9.00 - 12.30	Kahe vaia + rostvärgi katse ülesehitamine ja proovimine
Esmaspäev, 09.02.2015	12.00 - 17.30	Dünaamilise ja staatilise koormuskatse proovid 40/3 ja 40/6 vaiadega, labori kordaseadmise
Reede, 20.02.2015	10.00 - 13.30	Pika vardaga penetromeetri korrelatsioonikatse liiva tihedusega, lõikerõngaproovide võtmine
Neljapäev, 26.02.2015	12.00 - 14.00	Labori paikaseadmise järgnevateks katsetusteks
Reede, 27.02.2015	10.00 - 15.30	Erik Varese katsetel (plaat+kiilvai) abis
Esmaspäev, 02.03.2015	08.00 - 16.00	Kohevamas pinnases katseringid 40/3 vaiadega, töö kiirenes tänu andurite uuele süsteemile, vähenenud penetromeetriga mõõtmistele ja pinnase kohevusele
Teisipäev, 03.03.2015	08.00 - 15.30	Kohevamas pinnases katseringid 40/6 vaiadega
Kolmapäev, 04.03.2015	12.00 - 17.00	Kohevamas pinnases katseringid 30/3 vaiadega

Lisa C: pildid



Joonis C.1. Pinnasekasti läbikaevamine ja plaatvibraatoriga tihendamine



Joonis C.2. Abivahendid: lühikese vardaga penetromeeter, pika vardaga penetromeeter ja laserlood



**Joonis C.3.** Tiheduse mõõtmine pika vardaga penetromeetriga kindlates punktides vaia ümber



**Joonis C.4.** Ebaõnnestunud katse, 30/3/3. Vai süvistus viltu pinnasesse



**Joonis C.5.** KV30/3 vaia süvistamisel tihedas pinnases toimunud pinnasedeformatsioon