



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TARTU KOLLEDŽ

SÄÄSTVA TEHNOLOOGIA ÕPPETOOL

KIILVAIALUSE KANDEVÕIME KUJUNEMINE JA KÄITUMISHINNANG

FORMATION OF WEDGEPILED RAFT BEARING CAPACITY AND THE SYSTEM
BEHAVIORAL ASSESSMENT

Magistritöö
tööstus- ja tsiviilehituse erialal

Üliõpilane: Erik Vares

Juhendajad: Mait Mets

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:

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: (allkiri)

ABSTRACT

Vares. E. Load capacity of piled raft. Master's thesis. In one volume. Tartu, 2015. 92 pages, 49 figures, 9 tables. In Estonian language.

Current thesis focuses on studying the bearing capacity of a wedged piled raft. Many high rise buildings are founded on piled raft foundation systems, which generated a significant interest in understanding the performance characteristics of the foundation system. The piled raft is a geotechnical composite construction consisting of three elements: piles, raft and soil. In the design of piled rafts, the load will be shared between the piles and the raft. Therefore, the piled raft foundation allows to increase in the load capacity and reduction of settlements in a very economic way compared with some of the more traditional foundation concepts.

The aim of the program is to study the behavior of piled raft foundation system using wedged piles subjected to vertical load. Model wedged piled raft and raft only loading tests in dry sand were conducted with applying pressure up to 700 kPa at the surface to investigate the behavior of a raft and piled raft. The applying pressure was raised with 10-minute intervals. The piled raft consisted of 1, 2 and 3 model wedged piles of 40 cm in length. For comparison a raft without piles was also tested under the same conditions. The raft was made of steel plate with plan dimensions of 250 mm x 350 mm with thickness of 20 mm. The settlement was measured at the center of the models of the piled raft. The test results were discussed mainly based from following points of view: the load capacity and the settlement of the yielding point and failure point. Research compares piled rafts with different number of wedged piles underneath it. Tests were also carried out with wedged piles twice as thick to see the effect. The results show that as the number of wedged piles underneath the raft increases, loads improve and settlement reduces. All discussions suggested that the bearing capacity of wedged piled raft is greater than group of piles or raft individually.

Keywords: piled raft, wedge pile, yielding point, load capacity, bearing capacity, foundations

SISUKORD

ABSTRACT	2
SISUKORD	3
TÄHISED JA LÜHENDID	5
SISSEJUHATUS	6
1. Teemaalase kirjanduse ülevaade	8
1.1 Kiilvaiade ajalugu	8
1.2 Vaialuse kasutamise ajalugu ja kontseptsioon.....	12
1.3 Üksikvai ja vaiagrupp	16
1.4 Majanduslik aspekt	17
1.4.1 Kiilvaiade majanduslik aspekt.....	17
1.4.2 Vaialuste majanduslik aspekt	19
1.5 Kiilvaiade võimalikud kasutusviisid tänapäeval.....	19
1.6 Kiilvaivundamentide võimalikud arenguperspektiivid.....	20
1.7 Üksikkiilvaiade kandevõime.....	21
1.8 Pingejaotus vaivundamentides erinevatel vaiade vahekaugustel.....	24
1.9 Plaadi ja vaia parameetrite mõju vaialuse koormusjaotusele	30
2. Töö eesmärk ja ülesanded.....	38
3. Materjal ja meetodika.....	39
3.1 Katsetel kasutatud pinnas.....	39
3.2 Katsemudelite kirjeldus	42
3.2.1 Kiilvaiade mudelid	42
3.2.2 Plaadi mudel	43
3.3 Katseseadmete kirjeldus.....	44
3.3.1 Raudbetoonist pinnasekast ja teraspostid ning -tala.....	44
3.3.2 Koormamisseade	45
3.3.3 Mõõtmisseadmed.....	45

3.4	Katsemetoodika ja katseplaani kirjeldus.....	46
3.4.1	Katsemetoodika	46
3.4.2	Katseplaani kirjeldus	47
4.	Katsetulemused.....	49
4.1	Pinnase tiheduse määramine	49
4.2	Plaat	50
4.2.1	Arvutusliku survepinge võrdlus katselisega.....	52
4.3	Vaiagrupid	56
4.4	Vaialused	58
5.	Järeldused, arutelu	63
	KOKKUVÕTE	67
	TÄNUAVALDUSED.....	69
	KASUTATUD KIRJANDUS	70
	LISAD	72
	Lisa 1. Katsete protokollid. Kandevõimegraafikud.....	73
	Lisa 2. Pinnase purunemispildid.....	90
	Lisa 3. Vaialuse rihtimine.....	92

TÄHISED JA LÜHENDID

Tähised

C_u	lõimisetegur
ρ_d	kuivmahumass (g/cm^3 ; t/m^3)
τ_f	Nihketugevus pinnase purunemisel (kPa)
τ_y	Nihketugevus pinnase roomepiiril (kPa)
W_{opt}	pinnase optimaalne veesisaldus (%)
φ	pinnase sisehõõrdenurk ($^\circ$)
c	nidusus (kPa)
σ_y	survepinge, roomepiir (kPa)
σ_f	survepinge, purunemisiir (kPa)
N_y	koormus, roomepiir (kN)
N_f	koormus, purunemisiir (kN)
q_c	koonustakistus, (mPa)
d	vaiatsentrite vahekaugus (mm)
D	vaia diameeter (mm)
L	plaadi pikkus (mm)
B	plaadi laius (mm)
E	deformatsioonimoodul (kg/cm^2)

Lühendid

<i>EVS</i>	Eesti Vabariigi standard
<i>KEK</i>	Kolhoosi Ehituskontor
<i>EKE</i>	Eesti Kolhoosiehitus
<i>EKUK</i>	Eesti Keskkonnauuringute keskus
<i>PI</i>	Projekteerimisinstituut

SISSEJUHATUS

Maailmas on palju kõrghooneid rajatud vaialusvundamendi peale ning vaialuse kasutamine on üha suuremat tähelepanu leidnud. Ühelt poolt kasvatab huvi trend ehitada kõrgusesse, teiselt poolt ökonoomne lähenemine. Maatükki ostes maksame me ju ruutmeetri, mitte kuupmeetri eest. Muidugi ei tähenda see, et igal pool saaks ehitada lõpmatult kõrgeid pilvelõhkujaid - krundile planeeritud hoone kõrgus on tihti piiratud ehitusõigusega. Kõrghoonete puhul on aga peamised vundamendiliigid plaat- ja klassikaline vaivundament ning nende kõrval ka vaialus. Plaatvundamendi puhul on sageli probleemiks suutmatus kontrollida vajumeid - hoone erinevate osade vajumid ületavad piirväärtusi nii kasutus- kui ka kandepiirteisundis. Vaivundamendi puhul on aga koormuste ülekandmine pinnasele paremini lahendatud. Kasutatakse pidevaid, millega on võimalik kanda koormused läbi nõrkade pinnasekihtide tugevamale kihile. Erinevalt plaat- ja vaivundamendist on vaialus komposiitne konstruktsioon, milles jaotuvad koormused vaiade, plaadi ja pinnase vahel. Seetõttu mõjutavad vaialuse kandvad mehhanismid üksteist läbi keerukate pinnas- tarind koostööefektide. Antud magistritöös uuritakse rostvarkplaadi koostööd hõrdevaiadega, täpsemalt kiilvaiadega, mis on üsna spetsiifiline ja vähekasutatav vaialiik.

Alates 1977. aastast, mil Burland, kes on eelkõige tuntud kui mees, kes hoidis ära Pisa torni ümbervajumise, esitas esimest korda vaialuse kontseptsiooni, on aasta-aastalt hakatud üha enam uurima vaialust kui ökonoomset vundamendisüsteemi. Tehtud on mitmeid eksperimentaalseid katseid nii arvutusmodelitega kui ka pinnasekastides mudelvaiade ja - rostvargiga. Enamik uuringuid on keskendunud ümaratele pidevaiadele, kus vaiad on paigutatud nelinurkselt 2×2 , 3×3 , 4×4 või 5×5 variatsioonid. Uuritud on koormusjaotust vaiade ja plaadi vahel kui ka erinevate parameetrite mõju kandevõimele ja vajumitele.

Vaialuseks nimetatakse rostvargi ja vaiade süsteemi, kus mõlemad on kandva funktsiooniga. See tähendab, et koormus jaotub vaia ja plaadi vahel ning vaialus hakkab töötama ühtse süsteemina. Vaialuse koormamisel kanduvad jõud pinnasele läbi vaiade ja plaadi, millest esimese kandvad elemendid on tingitud tavaliselt vaia otsa vastupanust ja külghõõrdest. Kiilvaiade puhul aga vaia otsa vastupanu põhimõtteliselt puudub ning peamiselt võtab ta koormust vastu kaldenurga all olevate külgedega läbi külghõõrde. Vaialus on keeruline vundamendisüsteem, mille projekteerimine nõuab sügavamalt

pinnasekonstruktsioonides tekkivate vastastikmõjude mõistmist. Veel keerulisemaks ja samas ka huvitavamaks teeb käesoleva uurimustöö asjaolu, et kiilvaiad pole maailmas väga laialdaselt kasutusel ning ka Eestis tegeleb nendega peamiselt üks ettevõtte. Kiilvaialuse projekteerimisel on kõige keerulisem ülesanne hinnata tegelikku vaiade ja plaadi vahelist koormusjaotust. Tuleb leida optimaalsed vaiade ja plaadi suurused ning vaiade paigutus. Hõõrdevaiade puhul on neil tavaliselt vaialuses funktsioon ühtlustada eristuvaid vajumeid ja vähendada vundamendisüsteemi koguvajumit. Kandevõime tagatakse rostvärkplaadi endaga.

Vaialused on viimasel kahel kümnendil katsetatud erinevates pinnastes ning on tehtud järeldused, et kõige sobilikumad pinnased on sellised, kus kogu ettenähtud kandevõime saab tagada rostvargiga, kuid erinevate punktide vaheline vajumi erim või keskmine vajumine ületavad piirväärtusi. Sellised pinnased on näiteks suhtelised kõvad savid ja tihedad liivad.

Vaialust, selle sõltuvust erinevatest parameetritest, koormusjaotust vaiade ja plaadi vahel, ja üldist käitumist on suhteliselt vähe uuritud ning selle projekteerimiseks puuduvad kindlad normid. Situatsiooni raskendab ka asjaolu, et vaialuse üks osast on ka pinnas, mis aga võib väga suuresti varieeruda ning see nõuab põhjalikku pinnase analüüsi ning enne vaialuse projekteerimist on kindlasti vaja ka konkreetses pinnases katsed teha. Vaialuse kandevõime hindamine baseerub seetõttu suuresti empiirilisel korrelatsioonil.

Käesolevas töös analüüsitakse varasemaid uuringuid, seletatakse lahti vaialuse kontseptsioon ja võrreldakse informatsiooni katsetulemustega. Vaialuse kandevõime hindamiseks valmistati mudelkatsekehad, mis varustatakse mõõtmisseadmetega, et oleks võimalik määrata kiilvaialusele rakendatavad koormust ja selle vajumeid. Mudeli väljatöötamisel ja katseseeriate läbiviimisel lähtutakse varem tehtud katsetest ja juhendatavate spetsialistide kogemustest.

1. Teemaalase kirjanduse ülevaade

1.1 Kiilvaiade ajalugu

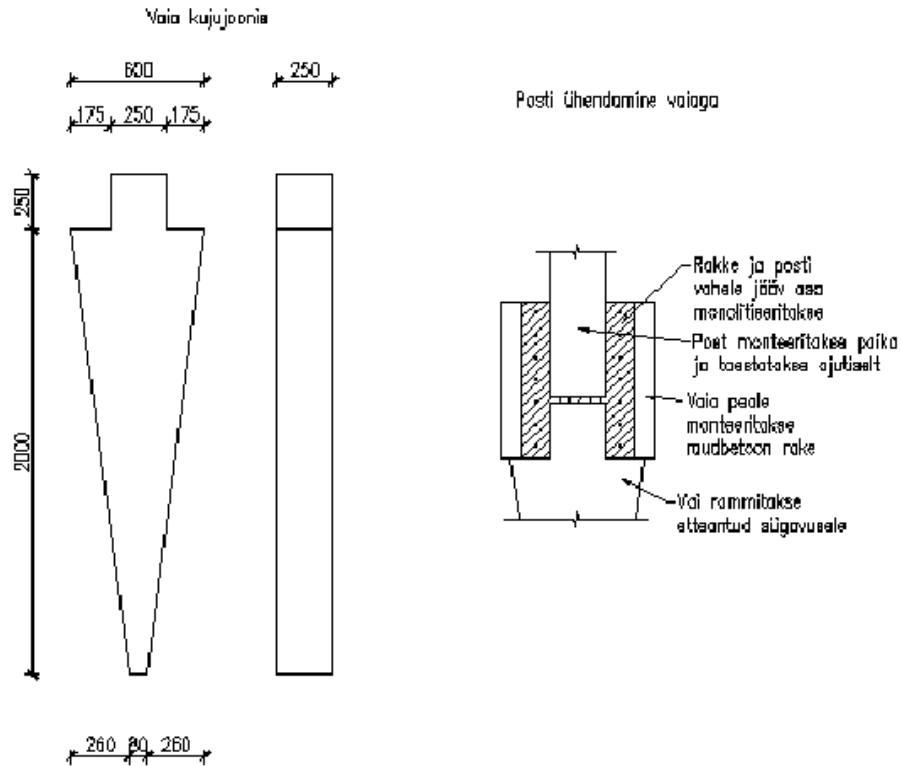
Idee hakata kasutama kiilvaiu tekkis algselt Eestis 1977. aastal, kui Võru Kolhoosi Ehituskontoris (Võru KEK) hakati otsima alternatiivi traditsioonilisele lintvundamendile. Tol ajal kehtis ehitusettevõtetes plaanimajandus ning selle tõttu oli kujunenud tööriitm, kus ehituse valmimine jäi suveperioodi ja uute hoonetega alustamine seega tavaliselt sügisesse. Vundamendi rajamise kvaliteet võis aga kannatada, kuna sademeterohke sügis muutis Lõuna-Eesti savika moreenpinnase tihti läbimatuks poriväljaks. Eesti Kolhoosiehitus süsteemi juhatuse esimehe asetäitja Jaan Kabin tegi inseneridele M. Mets ja A. Kuddu ülesandeks leida vundamendi ehitamise meetod, mille puhul võiks loobuda vundamendikaevikute kaevamisest. Võimalust ehitada maa pealt pakkusid lühikesed, rammitavad ja paindejäigad vaiad nagu püramidaal- ja trapetsvaiad, mida kasutati tollaegses NSV Liidus. [1]

Võru KEK-is prooviti kasutusele võtta püramidaalvaiu, kuid nende transport ja paigaldamine tekitas palju tehnoloogilisi raskusi, vorm võttis liialt ruumi ja oli keeruline. Rammseade nõudis ümberseadistamist ning rammibrigaadi tootlikkus jäi madalaks. 1978. aastal pakkusid aga M. Mets ja A. Kudu välja kiilvaia idee ehk kahe vertikaal- ja kahe kaldtahuga vaia (Joonis 1.1). [1]

Kiilvaia kasutamise eelisteks võrreldes püramidaalvaiadega võib lugeda:

1. Vaia vorm on tasapinnaline ning nõuab vähem ruumi ja vormi valmistamiseks kulub vähem materjali
2. Kiilvaiade kaal on väiksem ja neid on võimalik üksteise peale ladustada.
3. Rammseadme ümberhäälestamine on kerge, piisab haamripea väljavahetamisest.
4. Vaia rammimisel pole vaja eelnevalt rammimiskohta pesa ette süvistada nagu seda tehti püramidaalvaiade puhul. Tootlikkus mitmekordistub.

Kiilvaia kandevõime jääb kulutatud materjali kohta vaid pisut alla püramidaalvaiadele, kuid tehnoloogilised eelised korvavad selle puudujäägi. [1]



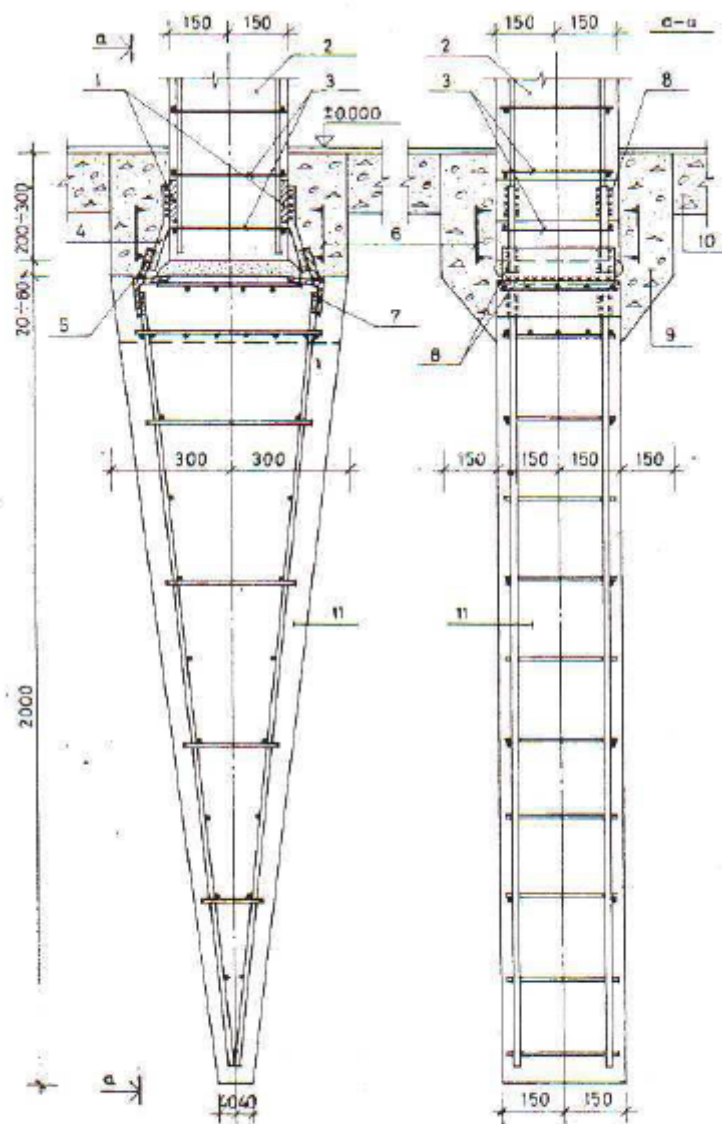
Joonis 1.1. M. Metsa ja A. Kudu väljapakutud kiilvaia kuju ja ühendus postiga. [1]

Kiilvaivundamente arendati ja juurutati Võru KEK-is alates 1981. aastast hoogsalt. Joonisel 1.1 kujutatud ühendussõlm reaalsuses kasutust praktiliselt ei leidnud, kuna hoone karkassiposti montaaži järel tuleks sõlm monolitiseerida, mis eeldab posti ajutist fikseerimist. See tekitab aga montaaži tehnoloogilise pausi, kuna fermide ja muude karkassiosade monteerimine jääb ootama postisõlme kivistumist. Montaažitööde lihtsustamiseks hakati karkassiposte keevitama vahetult vaia külge. Posti ja vaia valmistamisel betoneeriti neisse vastavad tarilapid (Joonis 1.2). Selline lahendus leidis laialdast kasutust. Hiljem on kasutatud, ka ühendust, kus posti asemel keevitati vaia külge spetsiaalne ankrupakett, mis lihtsustas montaažitöid veelgi. Sellist lahendust kasutatakse ka tänapäeval. 1984. aastal avaldati 4 aasta töö tulemused, millest olulisemad punktid olid: [1]

1. Nelja aasta jooksul oli kiilvaiadele rajatud juba 42 katseobjekti: laudad, sigalad, aidad, kartulihoidlad, kuivatid, kombainikuurid, kaarhallid jne.
2. PI „EKE Projekt“ Tartu osakonna geoloogidele oli sisse antud tellimus kiilvaiade kandevõime katsetamiseks.

3. Kiilvaiade esimesed kandevõimekatsed toimusid 1978. aastal Obinitsas. Katseid juhtis geoloog M. Mets. Katsetuse põhimahu on teinud „EKE Projekti“ Tartu osakonna geoloogide grupp T. Väli juhtimisel.
4. Kiilvaiade kasutuselevõtu uurimisprogramm koostati Võru KEK-i poolt A.Needo juhtimisel.
5. Paljudele küsimustele andsid vastused tol ajal kehtinud normid (*CHuII ja ГOCT*), osadele katsetulemused, kuid paljud küsimused jäid ka veel vastuseta.

1. Kiilvaia tööskeem



2. Karkassipostiga ühendus kiilvaia ja sarrusvarraste abil
 1 — tariraud, 2 — post, 3 — posti põjksarrus,
 4 — ühendusvardad, 5 — latiraud, 6 — sarrusekar-
 kass, 7 — nurkraud, 8 —
 9 — koht-
 betoon, 10 — põrand, 11 — kiilvai

Joonis 1.2. Laialt kasutatav kiilvaia ja posti ühendussõlm. [1]

Et kiilvaiu saaks laiemalt kasutusele võtta, oli oluline töötada välja metoodika kandevõime määramiseks, mis tuli siduda ka kehtivate normidega. Samuti loodi tehniline baas vaiade tootmiseks ning hangiti ja ehitati ümber rammimisseade. Välja töötati kiilvaiade nomenklatuur ja vundamentide lahendused vaiade kasutamiseks mitmesuguste hoonetüüpide jaoks. Ehitati regulaarselt valmis katseobjekte, mis võeti ka kasutusse. Mõni neist on osaliselt kasutuses tänapäevani. Võru KEK on kasutanud kiilvaia edukalt kuni Eesti taasiseseisvumiseni, pärast mida toimus koos riigikorra vahetumiseha ka suur muutus Eesti ehitusturul. Rõhku hakati pöörama rekonstrueerimisele ning ehitusmahud vähenesid drastiliselt. Põllumajandusrajatiste ehitamise ja seega ka kiilvaiade järele polnud nõudlust. Mitmed Võru KEK-i juhtfiguurid löid ettevõttest lahku ja moodustasid oma ehitusfirmad. Nii sündis ka 1992. aastal ehitusfirma AS Kurmik, kes on Eestis suurim kiilvaiade tootja. 1997. aastal ostis AS Kurmik Võru KEK-i omanduses oleva rammseadme ja vaiade vormid. Alguses kasutati vaiu Lõuna-Eestis mitmetel väiksematel ehitustel. Kaks aastat hiljem, 1997. aastal saadi juba tööd ka suurematel objektidel Tallinnas ja selle ümbruses.

[1]

2001. aastal töötas AS Kurmik A. Needo juhendamisel välja uue posti ja vaia ühendussõlme, mis ei nõudnud enam mahukat keevitustööd nagu varsemad. Kuna montaaž on kallid, vähendab postisõlme ratsionaliseerimine ehituse maksumust tunduvalt. Ka ankrupakettide kasutamise puhul oli mitmeid kitsaskohti - paigaldustäpsus jääb keevitamisel tekkivate termopingete tõttu väikseks ning vaiade rammimistäpsus on samuti suhteliselt väike. Vaja oli leida ühendussõlme, mis lubaks suuremaid tolerantse vaia rammimisel. Sõlmelahendus nägi ette ankrukaare kasutuselevõttu (Joonis 1.3). Ankrukaar keevitatakse vaia tarilappide külge ja ankrupakett paigaldatakse ankrukaare alla. See tagab vaia jäiga ühenduse vaiale valatava monoliitse raudbetoonist rostvärgiga. Rostvärk omakorda ühendatakse ankrupaketiga, mille külge kinnitatakse karkassipost poltühenduse teel. Selline lähenemisviis on vajalik ka vaiagruppide kasutamiseks. [1]

sõltub paljudest teguritest, näiteks vaiade arvust ja asetusest, nende omavahelisest kaugusest, plaadi laiuusest ja paksusest ning pinnase omadustest. [3]

Wiesner ja Brown väitsid 1980. aastal, et juhul, kui plaat on aluspinnasega kontaktis, jaotuvad vaialusele mõjuvad koormused vaiade ja plaadi vahel. Nad viisid ülekonsolideerunud savides läbi modelleeritud vundamendi katsed, millega uurisid elastsusteooria põhimõtete kehtivust vertikaalselt koormatud vaialuses. 1986. aastal esitles Cooke modelleeritud vaialuse tulemusi. Tema võrdles vaialuse käitumist vaiadeta plaadi ja vaiagrupiga. Katsed näitasid, et vaiade omavaheline koormusjaotus vaialuses sõltub vaiade arvust ja asetusest. Lisaks leidis ta, et plaatvundamendis tekkisid suurimad vajumid plaadi keskel. Clancy ja Randolph rakendasid 1993. aastal arvutuslikul hübriidmudelil baseeruvat meetodit vaialuse kandevõime hindamiseks. Arvutiprogrammiga koostatud mudel sisaldas lõplike elementide meetodit vaialuse konstruktsioonide modelleerimiseks ja pinnase vastupanu määramiseks. Nad leidsid, et enamasti on vaialuseid projekteerides ignoreeritud plaadi kandevõimet ja selle tulemusena kasutatakse üledimensioneeritud vaiu. 1996. aastal viis Randolph koos Horikoshiga läbi katsed tsentrifugaalkatseseadmega. Taaskord uuriti vaialuseid savipinnastes. Vaatlusel selgus, et isegi väike vaiade grupp suudab märgatavalt vähendada plaadi vajumisi. Ilmnes, et üksikvaiale lisatud ka väiksemõõduline plaat tõstab oluliselt vaialuse kandevõimet. El-Mossallamy koostöös teiste geotehnikutega ühendasid omavahel lõplike elementide ja piiritletud elementide meetodid. Nii jõuti arvutusmudelini, mis arvestab plaadi jäikust, vaiade survest tingitud mitte-lineaarset käitumist ja vaiade külghõõret. Selle mudeliga saab analüüsida vaiade kandevõimeid. Sanctis ja Mandolini töötasid 2006. aastal välja meetodilise juhendi vaialuste arvutamiseks. Nad viisid läbi arvutuslikud analüüside seeriad ja pakkusid välja järgneva valemi: [4],[5]

$$Q_{PR} = \alpha_{UR} \times Q_{UR,ult} + Q_{PG,ult} \quad (1.1)$$

kus

Q_{PR} on vaialuse kandevõime

α_{UR} on koefitsient, mis mõjutab plaadi kandevõimet, kui see töötab osana vaialusest.

$Q_{UR,ult}$ on plaadi kandevõime

$Q_{PG,ult}$ on vaiagrupi kandevõime

De Sanctis ja Mandolini teostasid hulgaliselt mudelkatseid kuni vajumini 10% plaadi küljepikkusest, mis hetkeks peaks kõik süsteemikandemehhanismid ammendunud olema. Tulemustest lähtuvalt tekkinud teguri α_{UR} ja vaialuse geomeetrilise kuju vahelisest arvulisest korrelatsioonist tuletati empiiriline valem koefitsendi α_{UR} arvutamiseks. [5]

$$a_{UR} = 1 - 3 \times \left(\frac{A_G}{A} \frac{s}{D} \right) \quad (1.2)$$

kus

A_G on vaiapeade alla jääva pinnase summaarne pindala

A on plaadi pindala

s on kaugus vaia tsentrite vahel

D on vaia diameeter

Ülalolevad valemid kehtivad konkreetselt ümara ristlõikega vaiade kohta. Kiilvaiadega vaialuse puhul tuleks läbi viia palju erinevaid katseid, kus varieeruks: vaiade arv vaiagrupis; vaiagruppide asetus; vaiatsentrite vahekaugus; vaiade mõõtmed; plaadi küljepikkus; plaadi paksus.

Saadud andmetele tuginedes tuleks üritada leida korrelatsiooni antud parameetrite ja kandevõime vahel ning pakkuda välja empiiriline valem kiilvaiadest vaialuse kandevõime arvutamiseks.

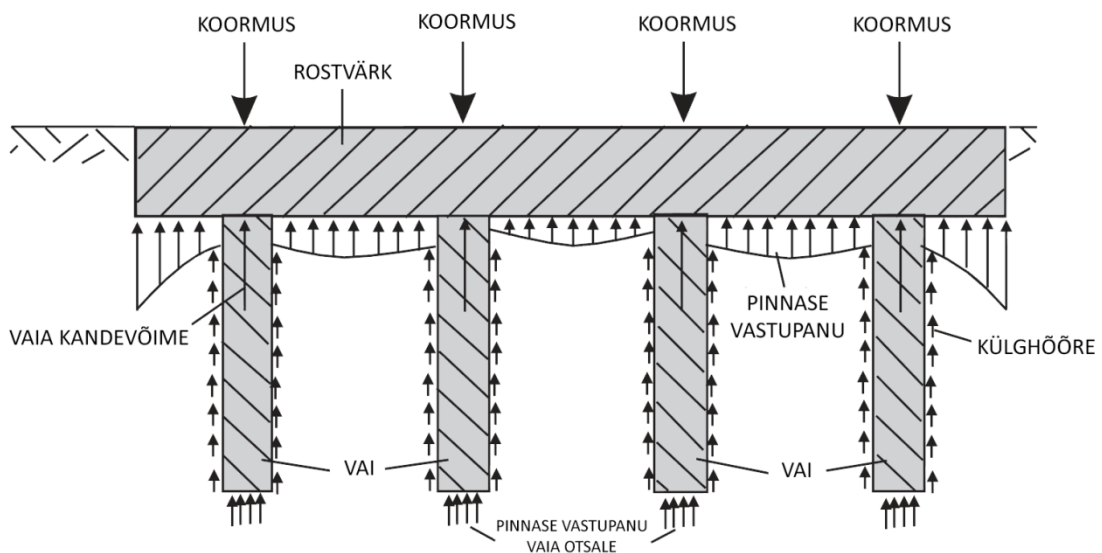
Vundamendisüsteemis võetakse plaadiga vastu kuni pool kogukoormusest. Vaialuse kasutamine hoiab kokku materjali, kuid on samas suurema kandevõimega kui lihtne vaivundament. Vaialuse tööskem lubab koormuste ümberkandumist, mis on oluline, kui mõni vai osutub defektseks. Plaadi surve tihendab aluspinnast, kuna ei lase pinnast välja suruda. Seeläbi suureneb vaialuse kandevõime. [3]

Viimaste kümnendite jooksul on tehtud pingutusi, et ratsionaliseerida vaivundamente. Nii ongi tekkinud vaialuse kontseptsioon. Vaialust tuleks vaadata pigem vaivundamendi edasiarendusena kui alternatiivse meetodina. Vaivundamendi ja vaialuse põhiline erinevus

seisneb selles, et vaivundamendi puhul kandub kogu hoone koormus pinnasele läbi vaiade ja rostvärki ning aluspinnase vahel survet ei teki ehk rostvärk ei toetu pinnasele. [6]

Vaialus ise on kombinatsioon rostvärgist ja vaiagrupist, mis on kinnitatud rostvärki alla. Vaialuste puhul on põhiliseks kandevõime tagajaks rostvärk ning vaiad töötavad põhiliselt vajumite vähendamiseks, kuid panustavad ka kandevõime kasvu. Kuigi rostvärk suudaks ka üksi tagada vundamendi kandevõime, ei suudaks see kontrollida vajumeid. Vaiad ning rostvärk moodustavad kokku ühtse süsteemi, mida peetakse üsna keerukaks kombinatsiooniks. Keerulisus seisneb eelkõige erinevate osade koostöös - tuleb arvestada nii vaiade omavahelist kui ka vaia ja rostvärki ning nende koostööd pinnasetüüpidega. Sageli tuleb arvesse võtta ka erinevate rostvärkide omavahelist koostööd. [2]

Joonisel 1.4 on toodud vaialuse koormusjaotus. Jõud kanduvad pinnasele läbi vaiade ja plaadi. Vaiade puhul võetakse koormust vastu nii külghõõrde kui ka vaiaotsaga. Kiilvaiade puhul on peamiseks kandvaks elemendiks külgtahud, mis võtavad koormust vastu külghõõrde abil. Vaiaots praktiliselt puudub, ega anna suurt efekti. Rostvärk võtab koormused vastu alapinnaga ning tänu oma suurele pindalale jaotab surve ühtlasemalt. Vaiade vahel on pinnasevastupanu plaadile väiksem, kuna vaiad võtavad osa koormust endale. Plaadi äärtes on pinnase vastupanu suurem. [7]



Joonis 1.4. Koormuste ülekandumine vaialuse puhul. [7]

Vaialuseid jaotatakse peamiselt kaheks. Liigitus on toodud allolevas tabelis 1.1. [8]

VAIALUSTE JAOTUS	
Väikesemõõduline vaialus: Vaiadele mõjub väliskoormusest suur osakaal. Tüüpiliselt jääb plaadi pikkus vahemikku 5-15m. Vaiad sellest pikemad.	Suuremõõduline vaialus: Plaat on iseseisvalt piisav hoone või rajatise koormuste vastuvõtmiseks. Vaiad projekteeritakse keskmise vajumi ja vajumite erisuse vähendamiseks.

Tabel 1.1. Vaialuste jaotus.

1.3 Üksikvai ja vaiagrupp

Üksikvai on üks osa vaiagrupidist ja vaiagrupp osa vaialusest. Vaiagrupidiks võib nimetada vaivundamenti. Vaivundamendi puhul on vaiad omavahel seotud rostvärgi või plaadiga. Rostvärk pinnasele ei toetu ja seega võtavad koormuse vastu vaid vaiad ning rostvärgile koormust ei kandu. Vaiagrupidiks ei saa nimetada üksikvundamenti, kus plaadi all asub vaid üksik vai, kuna seal ei saa olla vaiade omavahelist koostööd. Kuigi vaialused on ehitusmaastikul suhteliselt uus suund, on vaivundamente kasutatud juba pikka aega. Vaivundamente kasutatakse juhtudel, kui tavalise vundamendiga ei ole võimalik tagada piisavat kandevõimet või osutub madalvundamendi vajum liialt suureks. Reeglina koosneb vaivundament vaiadest, mis läbivad nõrku pinnasekihte ning kannavad koormuse sügavamal asuvatele tugevamatele kihtidele, ja rostvärgist, mis võtab vahetult vastu ehitise osadelt tuleva koormuse ja jaotab selle vaiadele. [9], [10], [11]

Vaiade arv üksikvundamendis on tavaliselt 3 kuni 16 ja neid kasutatakse peamiselt ehitise postide all. Lintvundamendi puhul on otstarbekas üherealine vaiade asetus seinaga, et rostvärgi maht oleks väiksem. Vaiade lausvundamenti ehk vaiavälja kasutatakse väga suurte koormustega ehitiste all ja ka suure pinnaga ühtlast koormust kandvate ehitiste all (reservuaarid). [9], [10]

Vaiu liigitatakse põhiliselt materjali, kuju, asendi, valmistamisviisi ja koormuse pinnasele ülekandmise iseloomu põhjal. Materjali põhjal kasutatakse enim raudbetoonvaiu. Juhul kui vaiadele mõjub vaid survejõud, kasutatakse ka armeerimata betoonvaiu. Järjest rohkem kasutatakse terasvaiu ning üha vähem puitvaiu, mis enne raudbetooni kasutusele võtmist

olid ainuvõimalikuks variandiks. Valmistamisviisi järgi jaotatakse vaiad põhiliselt kaheks: valmisvaiad, mis valmistatakse eelnevalt ja seejärel süvistatakse pinnasesse, ja vaiad, mis betoneeritakse vahetult pinnasesse tehtud süvendisse. Neid kutsutakse vastavalt rammvaiadeks (enimlevinud süvisusviisi järgi) ja kohtvaiadeks. Valmisvaiad süvistatakse pinnasesse rammimise, vibreerimise, kruvimise või surumisega. [10], [11]

Vaivundamentides kasutatakse peamiselt pidevaiu, mis ulatuvad läbi nidusate pinnasekihtide suurema kandevõimega kihini. Vaia ots võtab hoone koormused vastu ja otsa vastupanu sõltub suuresti pinnasekarakteristikutest. Kasutatakse ka hõõrdevaiu, mille kandevõime tuleneb külje ja pinnase koostööst. Hõõrdevaia ots võtab vastu vähe koormust ja kandevõime tagatakse külghõõrdega. Vaialustes kasutatakse peamiselt just hõõrdevaiu. Parim näide hõõrdevaiadest on kiilvai, mille kandevõime tuleneb peamiselt vaia kaldtahkude külghõõrdest. Seetõttu on sellise vaiatüübi puhul nakkumine pinnasega eriti oluline. [12]

1.4 Majanduslik aspekt

1.4.1 Kiilvaiade majanduslik aspekt

Kiilvaivundamentide ehitamine võimaldab vähendada vundamentide töö- ja materjalimahukust, sellega ka nende hinda ja ehitamisaega. Plussiks võib lugeda ka seda, et vundamenti ehitamisega seotud tööd on toodud maapinnale – kaevikutest välja. Kõik eelnimetatud aspektid võivad anda kokku umbes 20-60 % hinnavõidu võrreldes traditsiooniliste ja töömahukamate ehitistega. Kiilvaivundamentide püstitamise ei hoiu kokku vaid materjalikulu ja töölistepalga pealt, vaid ka ehitusplatsi üldkuludelt, kuna üldine ehituskestus väheneb. [1]

Kui võrrelda kiilvaivundamente madalvundamendiga, tekib majanduslik efekt järgmistel põhjustel [1]:

1. Kiilvaiu koormatakse rammimisel suurema koormusega kui hoone eksploatatsiooni käigus. Seega on vaiade vajumised kümneid kordi väiksemad.
2. Vaiade kandevõimet on rammimisel võimalik täpselt määrata. Pärast proovivaiamist on võimalik koostada suhteliselt täpne vaiaväljaplaan, mis võimaldab vähendada tagavara vundamenti ehitusel.

3. Saviliivmoreenide kandeomadused sõltuvad suuresti veesisaldusest, mistõttu saavutatakse suur efekt esmalt rajamissügavuse vähendamisel ära jäävate mullatööde arvelt. Savipinnases olev vundamendi kaevik võib leonduda ning pinnase kaotab oma kandeomadustes. Seda saab ära hoida drenaažiga, mis oleks aga lisakulu. Kiilvaia puhul neid muresid ei teki.
4. Mida halvemad on moreeni kandeomadused, seda suuremaks kasvab madalvundamendi taldmiku puhul materjalikulu. Kasvutempo on oluliselt kiirem, kui vaiade puhul. Madalvundamendi puhul pinnas kaevamisel koheneb, kuid savipinnas rammimisel vaia ümbruses tiheneb.
5. Kui pinnasevee tase on liivades kõrgemal kui normidekohane vundamendi rajamissügavus, tekib nõ „vesiliiva efekt“ ja pinnas võib kaotada oma kandevõime täielikult. Selleks tuleks madalvundamendi puhul veetaset alandada, kuid see on kulukas ja keeruline protsess.
6. Kiilvaiad on sobilikud kasutada ka kohevates liivades, kuna vaia rammimisel tekib vaia ümber teatud sorti pinnase tugevnemine (tihenemine).

Kui võrrelda kiilvaivundamente pikkade tugevatesse aluskihtidesse süvistatud vaiade või pikkadele rippvaiadele toetatud vundamendiga, tekib majanduslik efekt järgmistel põhjustel [1]:

1. Ühe kiilvaia kandevõime jääb vahemikku 100-300 kN, mis on üldjuhul väiksem kui pikkadele vaiadele lubatud koormused (400 kN kuni mitutuhat). Selle tõttu asetsevad kiilvaiad tihedama sammuga rostvärgi all ning rostvärgi enda saab teha saledama.
2. Kiilvaia ülemine ots on suurte gabariitmõõtmetega, mistõttu tekib sääst võrreldes väikese kandevõimega kruvivaiadega, sest rostvärgi võib vabalt toetatada kiilvaiale, ilma et tuleks teostada eriarmeering vaiapea läbisurumise vastu.
3. Pikkade vaiade puhul, mis on süvistatud läbi pinnase alumistest nõrkadest kihtidest, tuleb toetada ka hoone põrand vaiadele, kuid kiilvaiade puhul pole see vajalik, kuna õige paksusega täitesse rajatud põrand ja heade kandeomadustega pinnasesse rammitud kiilvaiad vajuvad põrandaga ühtlaselt. See aspekt on üks suurimaid sääste võrreldes pikkade kandvatele aluskihtidele toetuvate vaiadega.
4. Kerghoonete puhul on vundamentidele mõjuvad vertikaalkoormused võrreldes horisontaal- ja paindekoormustega suhteliselt väiksemad, mistõttu tuleb

konstruktiivsetel kaalutlustel postisõlmes kahte vaia kasutada, millest üks võtab vastu survet ja teine töötab tõmbele. Kiilvai on aga võimeline vastu võtma kõiki jõukomponente. Väheneb vaiade arv ja posti roostvärgi mõõtmed.

1.4.2 Vaialuste majanduslik aspekt

Vaialuste kasutamiseks sobilikud pinnased on sellised, kus ettenähtud kandevõime põhiosa on võimalik tagada vaid plaadiga, aga vajumite erim või keskmine vajum ületavad piirväärtusi. Selliseid pinnased on näiteks suhteliselt kõvad savid ja tihedad liivad. Vaiad lisatakse vajumite vähendamiseks, mitte koormuste vastuvõtmiseks. Nii on võimalik saavutada majanduslikult kõige kasulikum süsteem. Võrreldes vaivundamentidega väheneb materjalikulu vaiapikkuste ja arvu arvelt. [7],[8]

1.5 Kiilvaiade võimalikud kasutusviisid tänapäeval

Kiilvaiade kasutamine vundamendi lahendamisel ei tohiks saada projekteerija kinnisideeks, kuna hea kandevõimega liival ja kruusal, keldriga hoonetes, süvenditesse või süvendite vahele jäävate vundamentidena on otstarbekas kasutada siiski madalvundamente. Küll aga on kiilvaivundamendid järjest populaarsust kogumas ja seda eriti Lõuna-Eestis, kus tegutseb AS Kurmik. Kõnealune ettevõtte toodab umbes 8 erisorti vaiu, pikkuses 1,5 m, 2 m, 2,5 m ja 3 m. Vaiadel varieerub ka armeering - A ja F tüüpi vaiad on mõeldud vertikaalkoormuste vastuvõtmiseks ning on seetõttu armeeritud vaid transpordi ja rammimise seisukohalt ja B tüüpi vaiad suudavad vastu võtta ka mõningast momenti ja horisontaaljõude ning on varustatud vastava armeeringu ja tariraudadega. Valmistatakse ka paindejäikasad vaiu, kus tarilapid on asendatud vindipesadega. [1], [13]

Kiilvaiu soovitatakse kasutada savipinnastes, mille konsistentsinäitaja on vahemikus 0...0,75. Kui vaiad rammitakse liidersüvendisse ja külmarkerkeht puudub, võib konsistentsinäitaja olla ka alla nulli. Samuti on sobivad liivpinnased, välja arvatud kohev liiv deformatsioonimooduliga $E < 50 \text{ kg/cm}^2$ [14]

Kiilvaia kasutamise otstarbekusele seab piirid ette kandevõime. Põhimõtteliselt on kiilvaia kasutamise seda otstarbekam, mida suurem on hoone pind ja mida väiksem on selle kõrgus. Praktikas on kiilvaiadel vundamente otstarbekas kasutada ühe- kuni neljakordsete kergkonstruktsioonidega põllumajandus-, tootmis- ja kaubandushoonete ehitamisel. Postilt

vundamendile mõjuvad koormused peaksid jääma vahemikku 100-1500 kN. See piir sõltub konkreetset pinnase omadustest ja vaiade arvust posti all. Tihti on kiilvaiade kasutamine otstarbekas kohevates liivades, pehmetes moreenides ja kõrge pinnaseveetasemega liivades. Kiilvaiad on andnud häid tulemusi samuti nõrkades pinnastes, mille all 2-3 m sügavusel on tugev pinnas. [1], [13]

Kokkuvõttes võib öelda, et kiilvaiade kasutamine on perspektiivikas, kuna nad annavad majandusliku säästu ja neid on võimalik kasutada küllaltki mitmekesistes tingimustes. Oluliselt väheneb mullatööde maht. Ehituses kasutatakse pigem laialdaselt tuntud traditsioonilisi meetodeid, kuid ei tuleks karta värskemaid lahendusi nagu näiteks kiilvaiade või kiudbetooni kasutamine.

1.6 Kiilvaivundamentide võimalikud arenguperspektiivid

AS Kurmik on praeguseks praktikas kiilvaia kasutamise võimalusi edasi arendanud, et pakkuda rohkem alternatiive ning kiirendada ja muuta odavamaks vaiade tootmisprotsessi. Proovitud on vaiade armeeringu asendamist teraskiuga, mis võimaldab säästa aega armatuuri valmistamise arvelt. Kasutatud on mitmekihilisi madalaid soojustatud monoliitset raudbetoonist sokkelrostvärke, mis valatakse objektile. Selliseid rostvärgeid toetuvad vabalt seinale ning nii kandvaks kui ka lõppviimistlusega elemendiks. Kasutusele on võetud väikesemõõtmelised postisõlmed, mille küljed on 400 mm ja 700 mm ning kõrgus 300 mm. Samuti on lahendusi otsitud loobumaks ehitusplatsil keevitamisest. [1]

Kiilvaivundamentide edasiste arenguetappidena näeb AS Kurmiku Projektgrupi juhataja Roomelt Needo perspektiivikamate uurimisvõimalustena [1]:

1. Pinnase käitumine kiilvaia ümbruses ja pinnase omaduste muutumine vaia rammimisel. lühiajalisel ja pikaajalisel koormamisel.
2. Vundamenti kuju ja süvistusmeetodi mõju uurimine vaiade valmistamise jaoks, et leida veelgi materjalisäästlikum vundamenti kuju ning rajamise meetod.
3. Vaia käitumise uurimine koormuskombinatsiooni rakendamisel erineva tugevusega pinnasekihtide esinemisel nii vaia pikkuse ulatuses kui ka kaugemal vaia ümber. Antud teema uurimine võimaldaks tuletada täpsemaid arvutuseeskirju vaiade kasutamisel erinevates koormusolukordades.
4. Vaia töötamine külmakergete puhul.

5. Erinevate süvistamismeetodite uurimine ja võrdlemine (vaiade rammimine, pinnasesse surumine, vibrosüvistamine, kupüüriaga ettelöödud aukude hilisem täitmine betooniga)
6. Kaasaegse mõõtmistehnika rakendamine vaiade täpsemaks ja kiiremaks paigaldamiseks.
7. Vaia ja posti ühendussõlme tehnoloogiline arendamine.
8. Monteeritavate rostvargisüsteemide väljatöötamine, mis võimaldaks viia rohkem tööd ehitusplatsilt tehasesse ning lühendada ehitustööde kestust.
9. Mehhaniseerida ja muuta raketisevabaks monoliitsete rostvarkide ja lõppviimistlusega sokkelrostvarkide ehitus ehitusplatsil.
10. Uurida kiilvaivundamendi töötamist horisontaalkoormustele ja painemomendile erinevates konstruktsioonides (tugimüürid, aiad, valgusti- ja elektriliini postid jne)
11. Uurida kiilvaiadest ja pinnasest koosneva aluse käitumist ja kasutusvõimalusi (Põrandate toetamine vaiavõrgule)

1.7 Üksikkiilvaiade kandevõime

Kiilvaiade kandevõime arvutamiseks on mitmeid empiirilisi valemeid. Nendes on küllaltki palju erinevaid tegureid, kuna arvestama peab ka pinnaseomadustega, mis võivad olla vägagi erinevad. Nii võib juhtuda, et mõnes kindlas pinnasetüübis ei saagi teatud valemeid rakendada ning mis sobib ühele pinnasetüübile ei pruugi sobida teisele. Kaks enim kasutatust leidnud valemit vaiade kandevõime leidmiseks rammimisel (dünaamiliselt) on Gate-Killari ja Gersevanovi valem (põhiline valem NSV Liidu ajal). Vaia kandevõime määramine rammimistulemustest on üks vanemaid meetodeid ja need põhinevad energia jäävuse seadusel. [13]

Gate-Killari valem [13]:

$$N_G = K \times \sqrt{0,07 \times G \times H} \times \log \frac{25}{s_a} \quad (1.3)$$

kus

G on löögiosa kaal, kN

H on löögiosa efektiivne kukkumiskõrgus, cm

s_a on vaia vaste, cm

$K = 2$, kui $s_a > 0,5$ cm,

$K = 3$, kui $s_a < 0,5$ cm

Gate-Killari valemi (1.3) kasutamisel tuleb N_G samastada arvutusliku kandevõimega ehk antud tulemust ei pea enam osavaruteguritega läbi jagama. [13]

Gersevanovi valem [9]:

$$R_{ck} = \frac{\eta A}{2} \times \left[\sqrt{1 + \frac{4E_d}{\eta \times A s_e} \times \frac{m_1 + 0,2m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right] \quad (1.4)$$

kus

A on vaia ristlõikepindala, m^2

m_1 on vasara kaal, t

m_2 on vaia ja kaitsepea kaal, t

s_e on vaia vaste (vajum ühest löögist), m

$E_d = m_1 H g$ - löögienergia, kNm

H on vasara langemiskõrgus, m

g on raskuskiirendus, $9,81 \text{ m/s}^2$

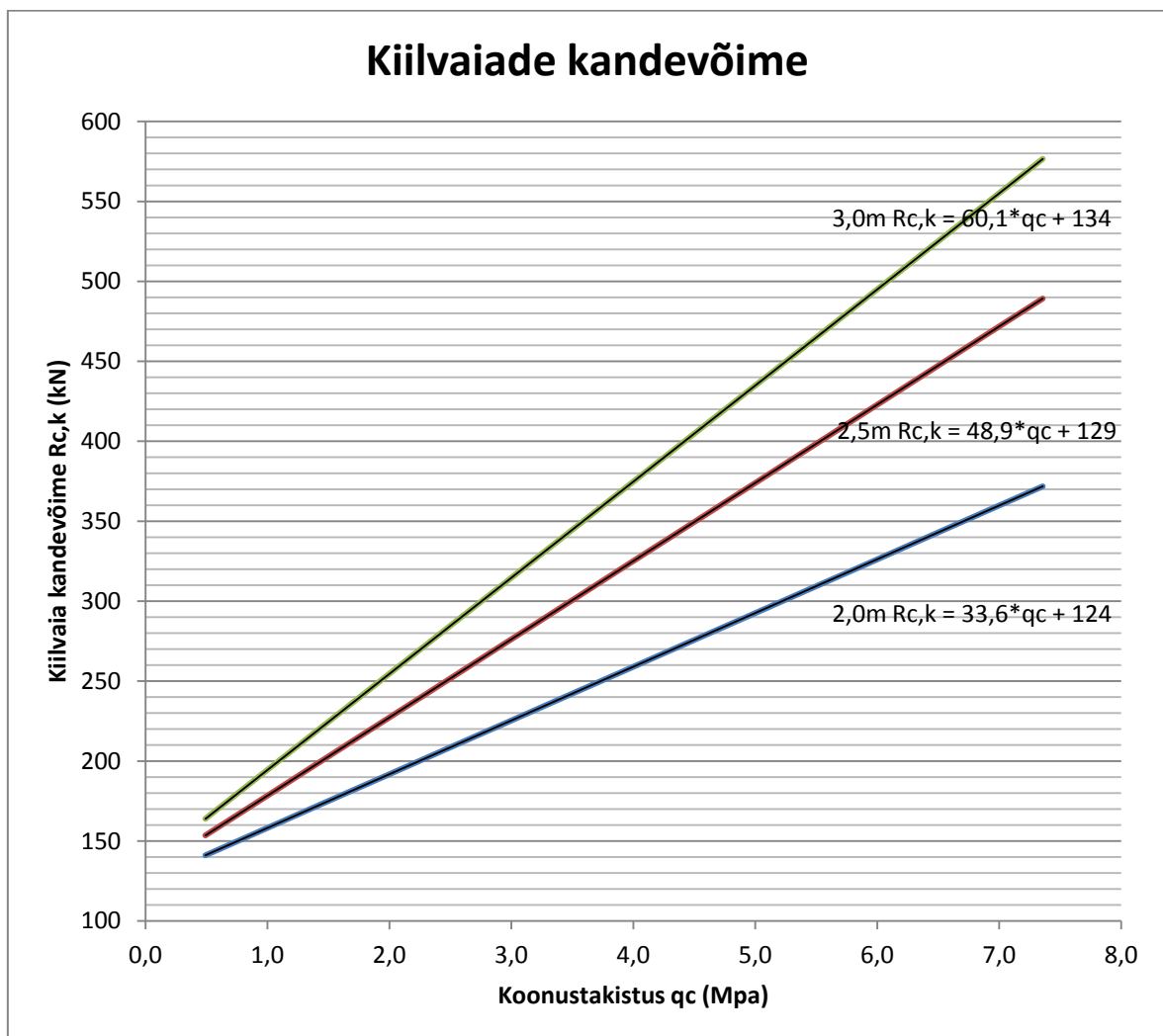
η on vaia materjalist sõltuv tegur, kN/m^2 , mille suurused on toodud allolevas tabelis (Tabel 1.2).

Vaia materjal	η (kN/m^2)
Puitvai ilma kaitsepeata	1000
Raudbetoonvai kaitsepeaga	1500
Terasvai kaitsepeaga	5000

Tabel 1.2. Teguri η väärtused. [9]

Tavaline dünaamiline katse seisneb ühest rammimisvasara löögist põhjustatud vaia vajumi ehk vaste mõõtmises. Fikseerida tuleb ka vaia langemiskõrgus ja kaal. Vaia normkandevõime saab määrata Gersevanovi valemiga (1.4). [9]

Mait Metsa 1983. aastal läbi viidud kiilvaiakatsete järgi on võimalik määrata empiiriliste valemite abil ligikaudne kiilvaia normatiivne kandevõime sõltuvalt koonustakistusest (Joonis 1.5). Graafikul on kujutatud lineaarsed seosed 2, 2,5 ja 3 m kiilvaiade koonustakistuse ja kandevõime vahel. Vaiapea paksus on 300 mm ja pikkus 600 mm.



Joonis 1.5. Vaia normatiivse kandevõime graafik. [15]

Empiirilised valemid on järgnevad:

2 m pikkuse kiilvaia normatiivne kandevõime

$$R_{ck} = 33,6 \times q_c + 124 \quad 1.5$$

2,5 m pikkuse kiilvaia normatiivne kandevõime

$$R_{ck} = 48,9 \times q_c + 129 \quad 1.6$$

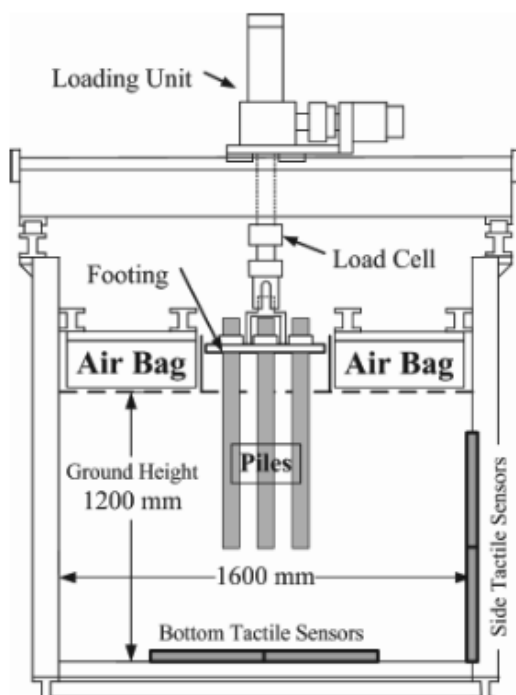
3 m pikkuse kiilvaia normatiivne kandevõime

$$R_{ck} = 60,1 \times q_c + 134 \quad 1.7$$

1.8 Pingejaotus vaiundamentides erinevatel vaiade vahekaugustel

2013. aastal viisid Tokyo Ülikooli teadlased S. Goto, S. Aoyama, B. Liu ja I. Towata koos A. Takita ja A. A. Renzoga läbi vaiagruppide mudelkatsed kuivas liivas. Nad rakendasid pinnasele koormust 50-200 kPa, et uurida vaiagruppide käitumist. Vaiagrupp koosnes üheksast silindrikujulisest alumiiniumvaiast, mille diameeter oli 40 mm. Kasutati kahesuguseid vaia tsentrite vahekauguseid: 2,5 korda diameeter ehk 100 mm ja 5 korda diameeter ehk 200 mm. Samuti kasutati kahesuguseid vaiapikkuseid: 1000 mm ja 1300 mm. Et katseandmed oleks võrreldavad, katsetati ka üksikvaid. Põhiliselt jälgiti nelja punkti: vajumit roomepiiril maksimaalsel koormusel, vaiaotsa koormusjaotust vastavalt tema asukohale vaiagrupid, pingejaotust pinnases ning viimaseks ka pinnasedeformatsioone pärast koormuskatseid. Jõuti järeldusele, et vaiagrupid, mille vaiatsentrite vahe oli 2,5 diameetrit (2,5D vaiagrupp), tekkisid märkimisväärsed koosmõjud vaiade vahel. Vaiagrupid, mille vaiatsentrite vahe oli 5 diameetrit (5D vaiagrupp), käitusid vaiad seevastu individuaalsemalt ja sarnasemalt üksikvaia käitumisele. Vaiagrupid olevate vaiade käitumine ei ole sama selge, kui üksikvaia puhul. Praeguseks pole veel jõutud põhjapanevate järeldusteni, kas grupis töötava vaia kandevõime on suurem või väiksem üksikvaia kandevõimest. [16]

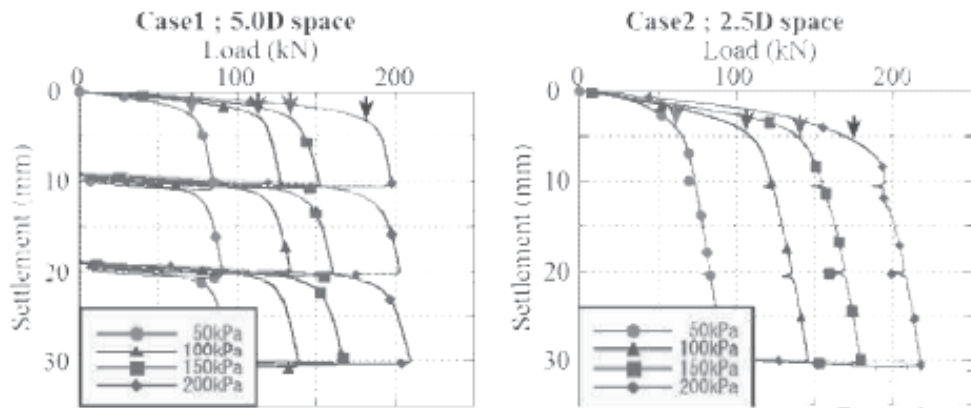
Katsed viidi läbi suures pinnasekastis, mille külgede mõõtmeteks oli 1600mm x 1600 mm ja kõrguseks 1650 mm. Surveseadmega sai rakendada maksimaalselt 500 kN koormust. Mõlemale poole katsemudelit asetati õhkpadjad, et hoida survet. Pinnasekasti põhja ja külgseinadele paigaldati surveandurid. Pinnaseks oli kuiv liiv ja see paigaldati kuni kõrguseni 1200 mm ja tihendati iga 150 mm kihi tagant. Liiva suhteline tihendus oli umbes 90%. Huvitavaks tegi asja see, et iga kiht oli erivärvi liiv, tänu millele sai uurida pinnasdeformatsioone, kui kõik koormustestid olid lõppenud. Katseseadet kirjeldab joonis 1.6. [16]



Joonis 1.6. Katseseadme ristlõige. Loading unit - koormamisseade, footing - rostvärk, load cell - pingeaundur, air bag- õhkpadi, piles - vaiad, ground height - pinnase kõrgus, bottom tactile sensors, põhja pingeseensorid, side tactile sensors - külje pingeseensorid. [16]

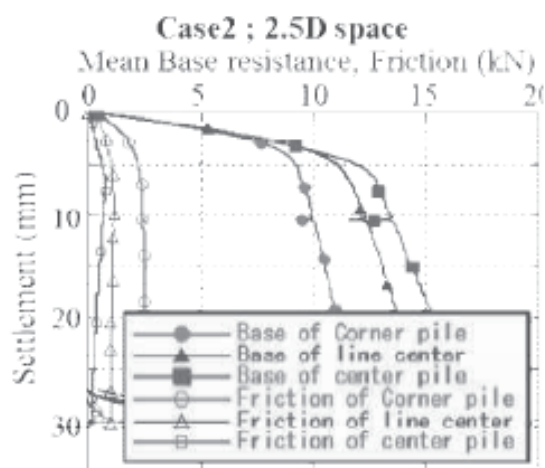
Vaiad kinnitati metallist plaadi külge ja koormustestid viidi läbi kontrollides vajumite tempot 0,1 mm/min. Plaadile avaldati koormust nii, et kõik vaiad liiguksid koos pinnasesse. Avaldatav koormus kasvas 50 kPa kuni 200 kPa, 50 kPa astemete kaupa. Koormati nii kaua kuni jõuti vajumini 30 mm. Koormamine katkestati iga 10 mm vajumi kohta, et mõõta survekoormuse jagunemist sensoritega. Üksikvaia testides olid kõik tingimused samas, kuid koormamiskiirus oli 0,2 mm/min. [16]

Katseandmed näitasid, et vaiagruppide kandevõimed, olid samas suurusjärgus, kuid vaiagrupp, mille vaiatsentrite vahekauguseks oli 5 diameetrit, suutis vastu võtta umbes 5-10 kN suuremat koormust (5D puhul vastavalt 180-185 kN ja 2,5D puhul 175 kN), samuti olid ka vajumid väiksemad (Joonis 1.7).



Joonis 1.7. Vaiagruppide vajumite kõverad maksimaalsel koormamisel. Noolekestega on märgitud roomepiirid. Vertikaalteljel vajumid (mm) ja horisontaalteljel koormused (kN). [16]

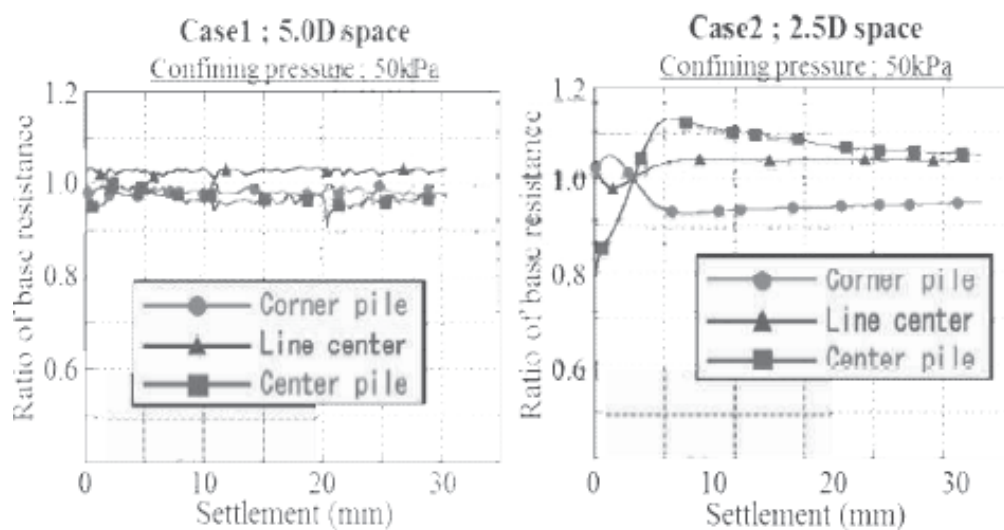
Tehti ka järeldus, et üksikvaia puhul vajum roomepunktil kasvab, kui suurendada vaia diameetrit. 5D vaiagrupi roomepiir oli sarnane üksikvaiale, kuid 2,5D vaiagrupi vajumid käitusid sarnaselt suure diameetrilise üksikvaia. Järeldati, et 2,5D vaiagrupp käitub ühtse grupina, aga 5D vaiagrupi vaiad käituvad iseseisvalt. [16]



Joonis 1.8. Keskmise vaiaotsa vastupanu ja vaia külghõõre. Horisontaalteljel vaiaotsa vastupanu/külghõõre (kN), vertikaalteljel vajumid (mm). Ringiga tähistatud nurgavaiad, kolmnurgaga välisperimeetri keskel asuvad vaiad ja ruuduga vaiagrupi keskel olev vai. [16]

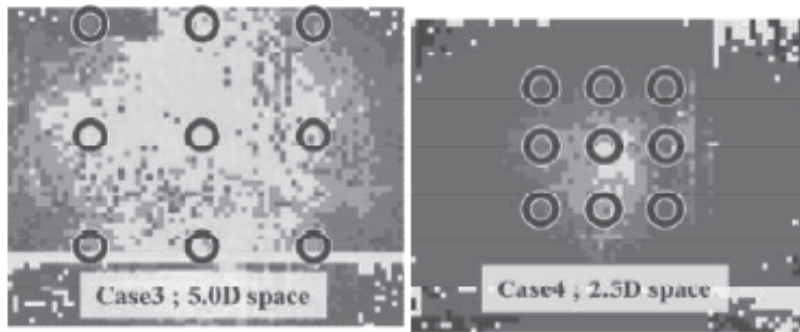
Graafikult (Joonis 1.8) saab järeldada, et kõige suurem külghõõre tekib vaiagrupi nurgas olevatel vaiadel ja kõige väiksem keskel asetseval vaial. Pinnast, mis asetseb keskmise vaia ümber mõjutavad koheselt ka välisperimeetril asuvad vaiad. Seetõttu väheneb keskvaia külghõõre ja suureneb välisperimeetril olevate, eriti nurgavaiade, külghõõre. Nurgavaiad on kontaktis vaiagrupist väljaspool oleva pinnasega, mida vajumid niivõrd ei mõjuta. [16]

Seevastu oli vaiaotsa vastupanu kõige suurem just vaiagrupi keskel asetseval vaial ja kõige väiksem nurgavaiadel. See on loogiline, kuna keskel asuva vaia alune pinnas tiheneb kõige rohkem. Huvitav on aga see, et sellised ilmingud toimusid vaid 2,5D vaiagrupi juures, kus vaiad mõjutasid üksteist. 5D vaiagrupi puhul olid pinged vaiaotste all enamvähem võrdsed. See näitab veelkord, et piisava vahekauguse puhul käituvad vaiagrupis olevad vaiad sarnaselt üksikvaiadele, ega mõjuta üksteist. 2.5D vaiagrupi puhul käituvad vaiad aga üksteist mõjutades. Nii kandub surve vaia all nurgavaiadelt vaiagrupi keskel asetsevale vaiale. Antud nähtust kirjeldab allolev graafik (Joonis 1.9). [16]



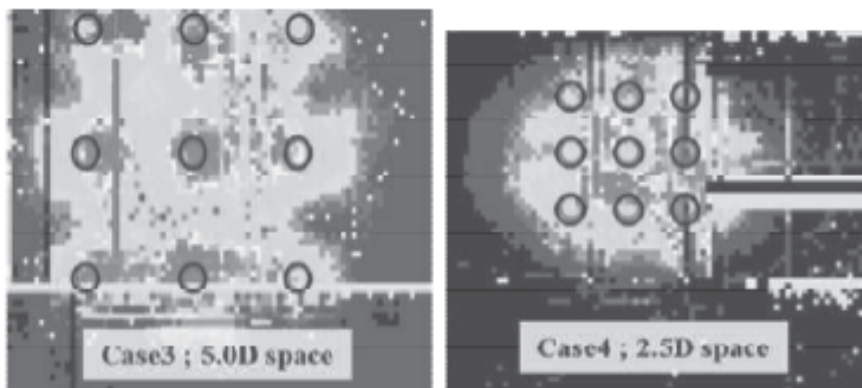
Joonis 1.9. Suhteline vaiaotsa vastupanu. Vasakul 5D, paremal 2,5D vaiagrupp. Vertikaaltejel vaiaotsa suhteline vastupanu, horisontaaltejel vajumid (mm). Ringiga tähistatud nurgavaiad, kolmnurgaga välisperimeetri keskel asuvad vaiad ja ruuduga vaiagrupi keskel olev vai. [16]

Liivakasti põhja paigaldatud surveandurid näitasid koormusjaotust vaiagrupi all (Joonis 1.10).



Joonis 1.10. Koormusjaotus vaiatoste kaugusel 290 mm põhjaanduritest. Mida heledam värv, seda suurem surve. [16]

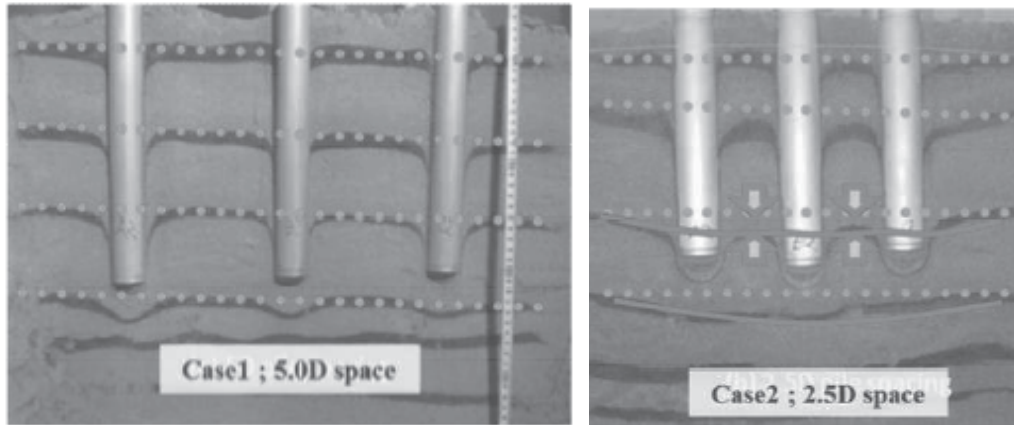
Vaiagruppide koormuste jaotumist vaadati, kui vaiatotsad olid jõudnud anduritest 290 mm ja 110 mm kaugusele. Nii 5D kui 2,5D vaiagrupi puhul ilmnis kõige suurem surve keskmise vaia all ja pinge vähenes ringikujuliselt välja poole. Kui aga vaadata koormusjaotust eraldi vaia otste juures, oli 5D vaiagrupi puhul suurem surve individuaalselt iga vaia all, kuid 2,5D grupi puhul oli maksimaalne surve pigem vaiade vahel. Suurema vaiatsentrite vahekauguse puhul joonistusid ümarad koormusalad ümber vaiade, kuid 2,5D vaiagrupi puhul tekkis üks suur ringikujuline koormusala (Joonis 1.11). Siit saab jällegi järeldada, et vaiad mõjusid koostöös. [16]



Joonis 1.11. Koormusjaotus vaiatoste kaugusel 110 mm põhjaanduritest. Mida heledam värv, seda suurem surve. [16]

Uuriti ka pinnasdeformatsioone. Värvilised liivad olid võrdsete intervallide paigaldatud kihtide kaupa. Kui vaiad oli sisse surutud 240 mm, kahanes vaiapeade all olev liivakiht kuni 20 korda, mis tähendab väga suurt tihenemist. Joonisel 1.12 on toodud pinnasekihtide deformatsioonid nii 2,5D kui ka 5D vaiagrupi puhul. Jällegi on näha erinevust vaiade

koostöös. 5D vaiagrupi puhul vajus pinnas iga vaia all eraldi, aga 2,5D vaiagrupi puhul deformeerus pinnas ühtselt ja ka vaiadevaheline pinnas vajus allapoole. See näitab, et vaiade vahel toimus ka suurem pinnasetihenemine. [16]



Joonis 1.12. Pinnasedeformatsioonid pärast koormamist. Vasakul 5D ja paremal 2,5D vaiagrupp. [16]

Kokkuvõttes käitusid 5D vaiagrupis olevad vaiad individuaalselt ja 2,5D grupis olevad vaiad sarnaselt ühele suurele üksikvaiale. Katsetest tehti neli suuremat järeldust [16]:

1. 2,5D vaiagrupi puhul olid roomepiir ja vajumid sarnased ühele suure diameetriga üksikvaiale. 5D vaiagrupi puhul oli vajum pigem sarnane samasuguse diameetriga üksikvaiale.
2. 2,5D vaiagrupi puhul oli vaiaotsa vastupanu kõige suurem alguses nurgavaiadel, kuid koormus kandus üle keskmisele vaiale. Samasugune koormuse ülekandumine toimus ühe suure diameetriga üksikvaia puhul, kus koormus kandus vaia äärest tsentrile.
3. 5D vaiagrupi puhul ilmnis suurem pinnasesurve iga vaiaotsa all eraldi. 2,5 D vaiagrupi puhul tekkis suur ühtne blokk ja ringikujuline koormusjaotus terve grupi all.
4. 5D vaiagrupi puhul deformeerus pinnas iga vaia all eraldi, 2,5D vaiagrupi puhul aga ühtse tervikuna.

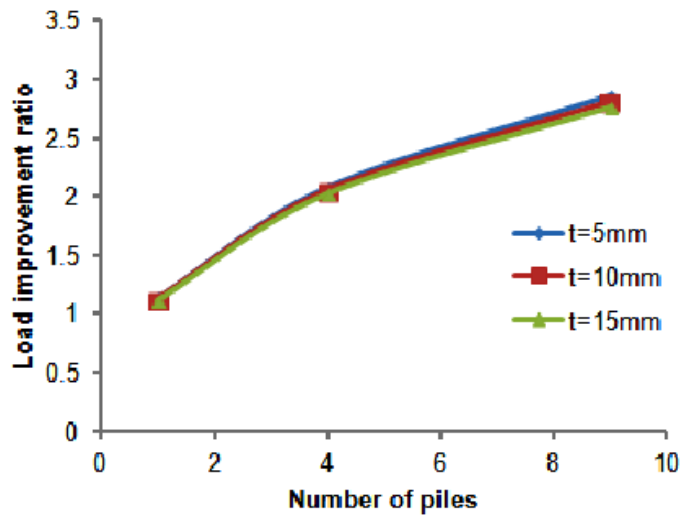
1.9 Plaadi ja vaia parameetrite mõju vaialuse koormusjaotusele

Koormusjaotust vaivundamendis mõjutavad mitmed erinevad faktorid, eelkõige plaadi ja vaia parameetrid, aga ka pinnase parameetrid nagu näiteks elastsusmoodul. Eeldatavasti kasvab rostvarkplaadi poolt vastu võetav koormuse osakaal, kui suurendada selle laiust või jäikust. Suurendades vaiade diameetrit, kasvab aga neile mõjuva surve osakaal kogu rakendatavast koormusest. Mida suurem on pinnase elastsusmoodul, seda suurem koormus jaotub plaadile. Samas ei sõltu vaiagrupi ja plaadi vaheline koormusjaotus pinnase tihedusest ja mahukaalust. [2],[3]

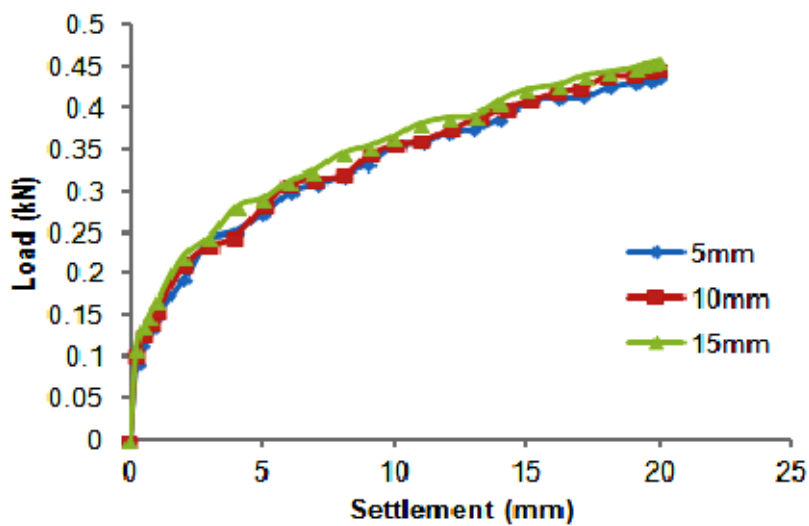
J. D. Patil, S. A. Sandeep ja C. H. Solanki uurisid 2014. aastal vaialuse ja üksiku plaadi käitumist kuivas liivas. Nende katsed nägid ette uurida rostvarkplaadi, plaadi koos üksiku vaia, plaadi koos 2 x 2 vaiagrupi ja plaadi koos 3 x 3 vaiagrupi käitumist. Vaiad olid 10 mm läbimõõduga ning 200 mm pikad terasvaiad. Rostvärgina kasutati terasplaati mõõtmetega 160 mm x 160 mm kolmes eripaksuses: 5 mm, 10 mm ja 15 mm. Koormamiskiiruseks oli 0,1 kN/min ning koormust rakendati kuni vajumini 20 mm. [17]

Katsetulemused näitasid, et mida suurem oli vaiade arv plaadi all, seda suurem oli kandevõime tõusu suhe ja vajumite vähenemise suhtarv, ning seda väiksem oli koormuse osakaal plaadile. Vajumite vähenemise suhtarvu näitas vaiadeta ja vaiadega plaadi vajumite vahet võrreldes vaiadeta plaadi vajumiga. Samuti tuli nähtavale seos plaadi paksuse ja vajumite ning kandevõime vahel. Plaadipaksuse suurendamine ei muutnud midagi koormusjaotuses ning plaat võttis vastu täpselt samasuure osa, kui enne, mis on ka loogiline, kuna selle kandevõime oleneb eelkõige pindalast. Ruumala suurendamine pindala samaks jäädes efekti ei anna. Efekt saavutati aga vajumite vähenemise näol. [17]

Jooniselt 1.13 on ilmekalt näha, kuidas nelja vaia rostvargile lisamine suurendab kandevõime 2 korda võrreldes ühe vaiaga rostvargiga ning rostvarkplaadile üheksa vaia lisamine suurendab kandevõimet 3 korda võrreldes ühe vaiaga rostvargiga. Samuti on näha, et plaadi paksusest midagi kandevõime juures ei sõltu. Joonis 1.14 näitab aga, et vajumite ja koormuse sõltuvuse erinevus plaadi paksusest ilma vaiadeta plaadi katse juures on olemas.

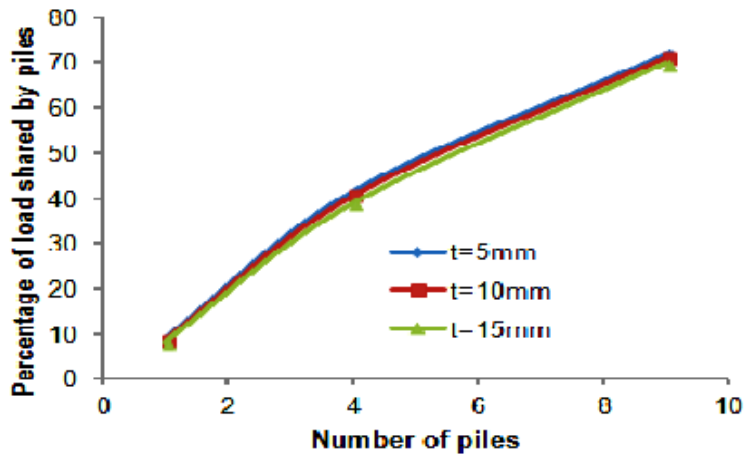


Joonis 1.13. Vaialuse kandevõime suhteline paremine sõltuvalt vaiade arvust. [17]



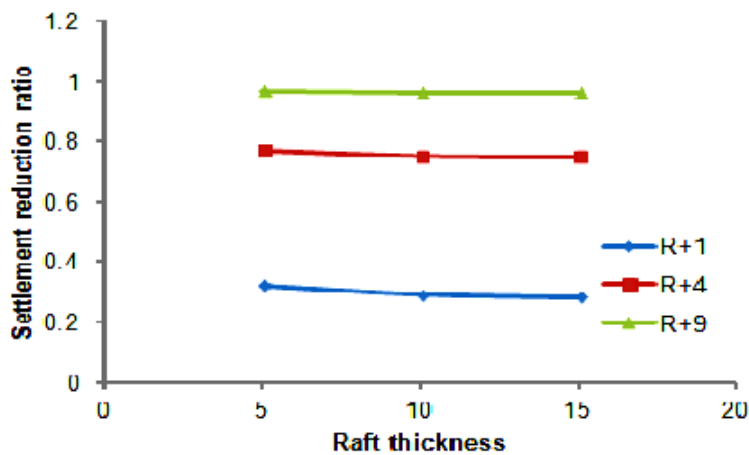
Joonis 1.14. Rostvärkplaadile rakendatava koormuse ja vajumite suhe eripaksusega plaatidel. [17]

Kahekümne millimeetrise vajumi puhul kutsus 5 mm plaadi vahetamine 10 mm paksuse plaadi vastu esile 5,9% koormuse tõusu ja 5 mm plaadi vahetamine 15 mm vastu 12% koormuse tõusu. [17]



Joonis 1.15. Vaiade arvu mõju vaialuse suhtelisele koormusjaotusele. [17]

Ülalolevalt graafikult (Joonis 1.15) on näha, et ühe vaiaga vaialus võtab vastu 10% kogu vaialusele rakenduvast koormusest ning seega 90% koormusest võtab vastu rostvärkplaat. Üheksa vaiaga plaadi puhul võtavad aga vaiad vastu üle 70% koormusest. Graafikult on samuti näha, et suhteline koormusjaotus plaadi paksusest ei olene. Küll aga on mõningast muutust näha plaadi ja vaialuse vajumite suhtes (Joonis 1.16).

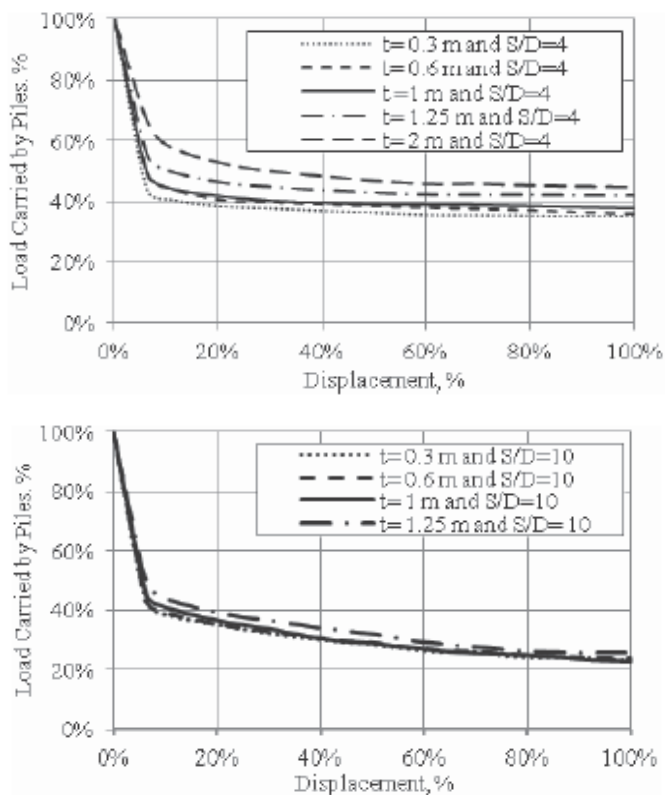


Joonis 1.16. Vajumite vähenemise suhtarvud sõltuvalt rostvärgi paksusest. [17]

Graafikult (Joonis 1.16) tuleb vajumite vähenemise suhtarvu muutus välja eelkõige ühe vaiaga rostvärgi puhul. Võib järeldada, et seal on plaadile rakenduv koormus suhteliselt kõige suurem, ligi 90%, seega tuleb seal kõige paremini välja plaadi paksuse mõju vajumitele.

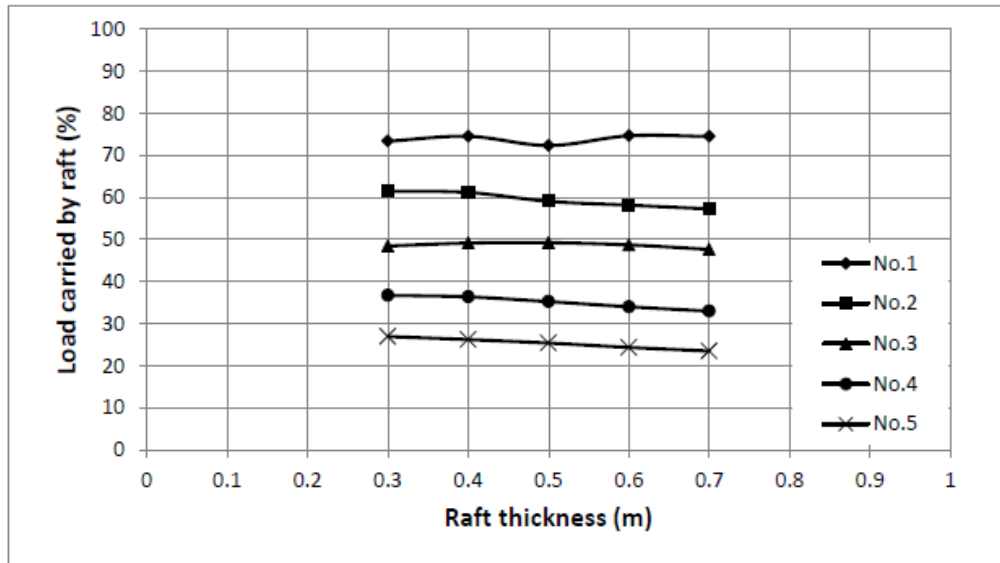
Erinevate plaadipaksuste ja vaiade paigutiste mõju vaiade kandevõimele võrdles ka Alnuiam, kes kasutas selleks lõplike elementide mudelit. Ta leidis, et esialgselt, kui deformatsioon oli veel madal, kandus enamik koormusest pinnasele läbi vaiade. Ilmselt oli see tingitud sellest, et plaat polnud aluspinnaga korralikku kontakti saavutanud. Paigutise tõusmisel 7 protsendini purunemispiirist, vähenes vaiade poolt ülekantud koormuse osakaal märgatvalt, pärast mida jäigi see vähenema järk-järgult. Umbes 80% vajumi juures saavutas vaiade kandevõime piirväärtuse ja muutus ligikaudu konstantseks. [3]

Kui vaiatsentrite vahekauguse ja diameetri suhe $d/D = 4$, siis plaadi paksusel 0,3 - 2 m oli vaiade poolt ülekantud jõu osakaal ligi 35 - 45%. Suhte $d/D = 10$ puhul ei eristu vaiade surved plaadi paksuse muutmisel. Võib öelda, et kõigi plaadi paksuste puhul (0,3 m - 2 m) võtavad vaiad vastu ligikaudu 25% kogu rakendatud koormusest (Joonis 1.17). [3]



Joonis 1.17. Vaiade kantava suhtelise koormuse ja paigutiste suhe erinevate plaadipaksuste ja vaiatsentrite vahekauguste ja diameetri suhte puhul. Vertikaalteljel toodud vaiade poolt ülekantude koormuse protsendile osa kogu rakendatud koormusest ja horisontaalteljel on toodud protsentuaalne paigutis. [3]

Võrdluseks võib tuua Omemani koostatud graafiku (Joonis 1.18), mis näitab suhtelist koormusjaotust rostvärgile sõltuvalt rostvärgi paksusest ja vaiade arvust rostvärgi all.



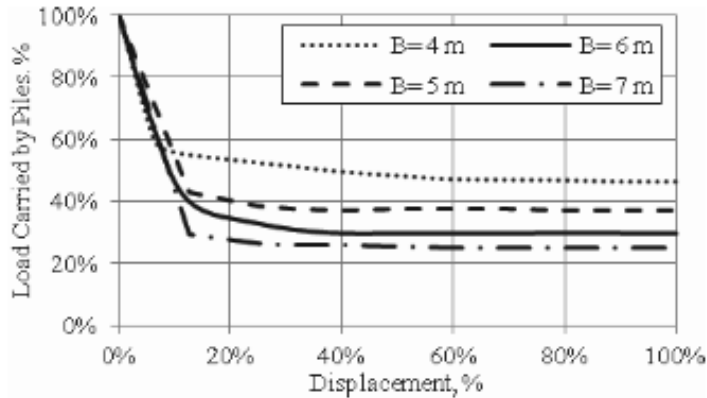
Joonis 1.18. Plaadi paksuse mõju vaialuse koormusjaotusele. Vertikaalteljel protsentuaalne plaadile jaotuv koormus, horisontaalteljel plaadi paksus. No.1, No.2, No.3, No.4 ja No.5 tähistavad üksikut, 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 ja 5 x 5 vaiagruppe. [2]

Üksiku vaia puhul, seda nähtust ei esine, kuid plaadiga koos töötavate erinevate vaiagrupidest tuleb esile seos, mida paksem on plaat, seda vähem koormust ta protsentuaalselt tervele vaialusele rakenduvast koormusest vastu võtab. [2]

Omeman tegi katseid ümarvaiadega, viie erineva vaia diameetriga: 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m ja 0,7 m. Plaadi mõõtmed, vaiade vahekaugused ja vaiapikkused olid määratud suhtega vaia diameetrisse. Ta katsetas nii üksikvaia koos rostvargiga, kui ka 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 ja 5 x 5 vaiagruppe koostööd rostvargiga. Vaiad olid plaadi alla paigutatud nelinurkselt. Peamiselt keskendus uurimus koormuse ja vajumite vaheliste seoste leidmisele ja vaiade ning rostvargi koormusjaotuse jagunemisele. Katsed viidi läbi arvutusmudelil ning selleks kasutati tarkvara PLAXIS 2D. [2]

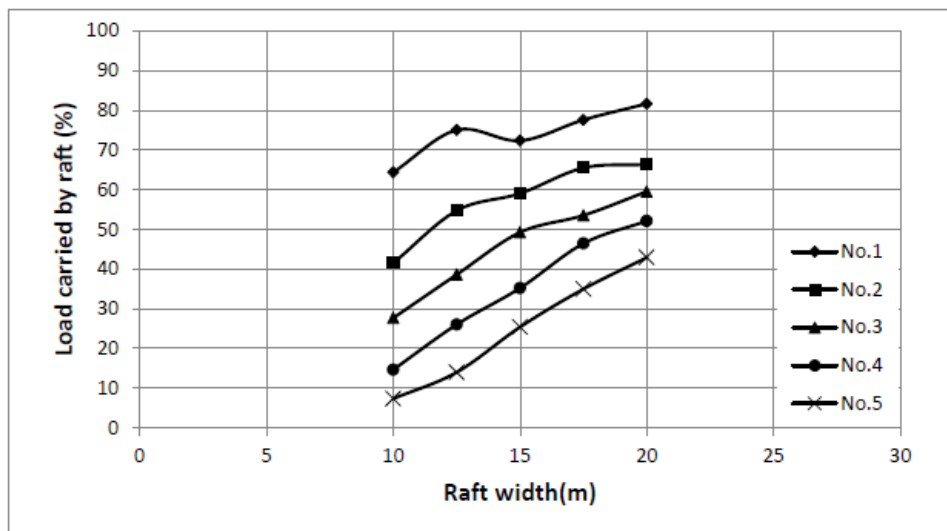
Alnuiam leidis, et plaadi laiuse suurendamisel kasvab plaadi ja pinnase vaheline kontaktpind, survepinged vähenevad ning kasvab plaadi kandevõime. Plaadi laiuse mõju uurimisel kasutas ta plaati paksusega 1,25 m ja vaiu diameetriga 0,5 m, mis paigutati omavahelisele kaugusel $d/D = 4$. Vaatlusele võeti plaadid küljepikkusega 4-7 m. Plaadi laiuse suurendamine vähendas vaiadele mõjuva koormuse osakaalu. Plaadi küljepikkuse suurendamisel 4 meetrist 7 meetrini vähenes vaiadele rakendunud osakoormuse hulk 22% ehk surve kandus üha enam üle plaadile (Joonis 1.19). Jälgida tuleb aga koguvajumeid ja

suhteliselt eristuvaid vajumeid, kuna kasutades plaati põhiliseks surve ülekandmiseks võiv vajumite kontrollimine osutada võimatuks, kuna surved jaotuvad plaadi all erinevalt ja eripunktide vajumid võivad oluliselt erineda üksteisest. [3]



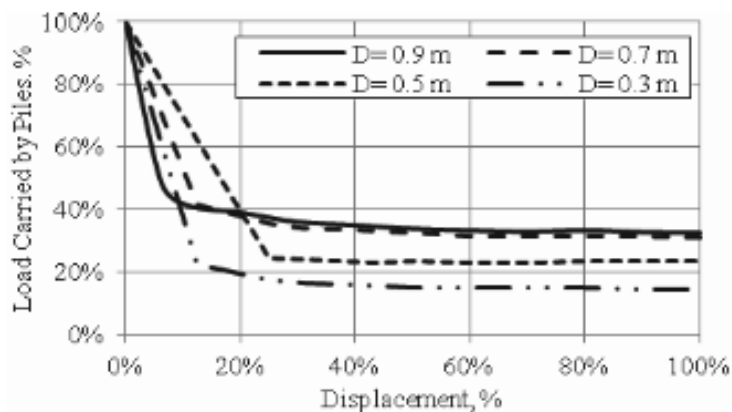
Joonis 1.19. Vaialuses vaiadele mõjuva osakoormuse sõltumine rostvärgi laiusest. Horisontaalteljel paigutatised ja vertikaalteljel vaiadele mõjuv protsentuaalne koormus kogukoormusest. [3]

Lisaks Patile ja Alnuiamile on plaadi küljepikkuse mõju vaialause koormusjaotusele uurinud varsemalt ka Omeman. Joonis 1.20 näitab, et plaadi laiuse suurendamine kasvatab oluliselt koormusjaotust plaadile. Vaialuse puhul, mille all on 5 x 5 vaiagrupp, kasvab koormusjaotus plaadile 30% võrra, kui plaadi külge suurendati kaks korda. [2]



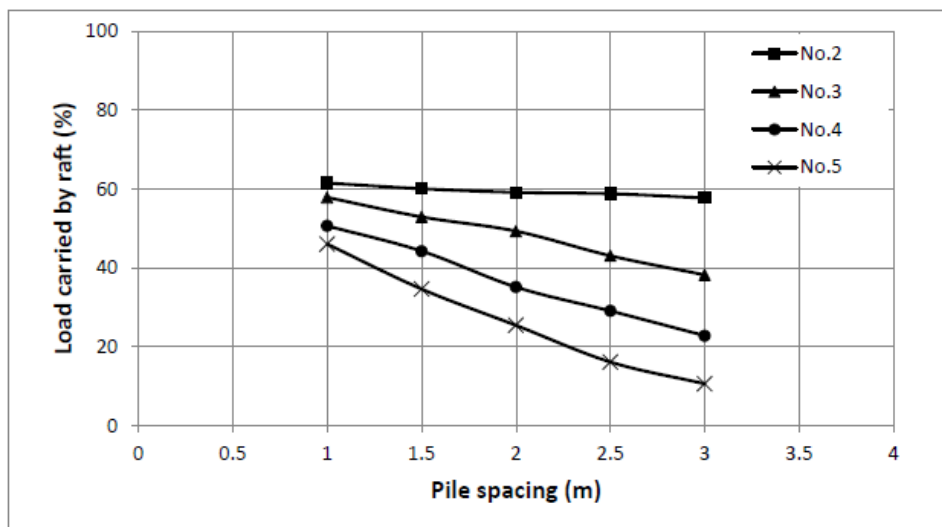
Joonis 1.20. Plaadi laiuse mõju vaialuse koormusjaotusele. Vertikaalteljel protsentuaalne plaadile jaotuv koormus, horisontaalteljel plaadi laius. No.1, No.2, No.3, No.4 ja No.5 tähistavad üksikut vaia, 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 ja 5 x 5 vaiagruppe. [2]

Viimaks uuriti ka vaia diameetrite mõju vaialuse kandevõimele. Mudelkatsest selgus, et vaia diameetri suurus mõjutab oluliselt tema kandevõimet ja stabiilsust. Mudelkatse puhul kasutati plaati laiusega $B = 7,2$ m ja vaiade vahekauguseks võeti $d/D = 4$. Vaia diameetrit suurendati 0,3 meetrist kuni 0,9 meetrini, mille tulemusel kasvas vaiade poolt ülekantud koormuse osakaal 18% - 33%. Vaiade kontaktpind pinnasega kasvas diameetri suurenedes ning see võimaldas neil suuremat survet vastu võtta (Joonis 1.21). [3]

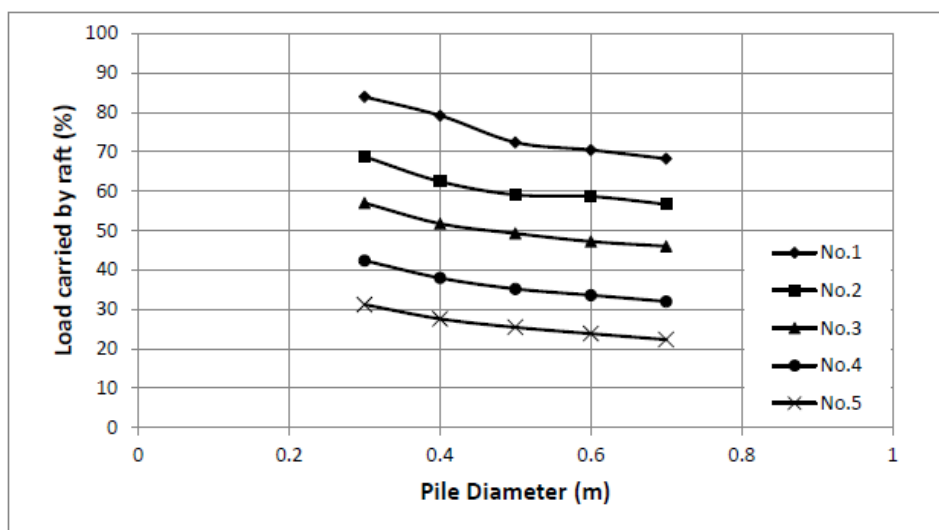


Joonis 1.21. Vaiade poolt ülekantud osakoormuse sõltuvus vaiadiameetrist. Vertikaalteljel on toodud vaiade poolt ülekantud koormuse protsentuaalne osa kogu rakendatud koormusest ja horisontaalteljel paigutiste protsentuaalne osa kogupaigutisest. [3]

Vaiatsentrite vahekauguse ja vaiadiameetri mõju koormusjaotusele uuris ka Omeman. Ta kasutas oma uurimuses vaiagruppe 2×2 , 3×3 , 4×4 ja 5×5 koos rostvõrgiga, viies katsed läbi erinevatel vaiavahekaugustel alates 1 meetrist kuni 3 meetrini, liikudes poole meetrise sammuga ja kasutas vaiu diameetriga 0,3 m kuni 0,7 m. Joonis 1.22 näitab, et 2×2 vaiagrupi puhul vaiade vahekaugus koormusjaotusele mingit mõju ei avaldanud, kuid 3×3 , 4×4 ja 5×5 vaiagrupid mõjutas vaiade vahekaugus koormusjaotust rostvõrgi ja vaiagrupi vahel tugevasti. Mida suuremaks muutus vaiade vaheline kaugus, seda suurem osakaal koormusest tuli vastu võtta vaiadel endil ning plaadi osakaal vähenes. Mida lähemal olid vaiad üksteisele, seda suuremat koormust pidi vastu võtma rostvõrk. Kui vaiade vahekaugus on suur, on ka vaiagrupi jäikus suur, kuna vaiade omavaheline koostöö ei toimi nii nagu lähedalasetsevate vaiade puhul. Samuti leidis ta, et mida suurem oli vaia diameeter, seda väiksem oli plaadi kantav koormus. Efekt tekib eelkõige vaia otsa vastupanuvõime suurenemisest, kuna otsa pindala suureneb vaia diameetrit suurendades. Tulemused on toodud joonisel 1.23. [2]



Joonis 1.22. Vaiade vahekauguste mõju vaialuse koormusjaotusele. Vertikaalteljel protsentuaalne koormusjaotus rostvargile ja horisontaalteljel vaiade vahekaugus vaialuses, meetrites. No.2, No.3, No.4 ja No.5 tähistavad vastavalt 2 x 3, 3 x 3, 4 x 4 ja 5 x 5 vaiagrupidega vaialuseid. [2]



Joonis 1.23. Vaiadiameetri mõju vaialuse koormusjaotusele. Vertikaalteljel protsentuaalne koormusjaotus rostvargile ja horisontaalteljel vaiade diameetrid, meetrites. No.1, No.2, No.3, No.4 ja No.5 tähistavad vastavalt üksikvaia, 2 x 3, 3 x 3, 4 x 4 ja 5 x 5 vaiagrupidega vaialuseid. [2]

Vaialus on keerukas süsteem, kus ühe parameetri muutumine võib muuta koheselt koormusjaotust vaiade ja plaadi vahel. Õige koormusjaotuse puhul saab leida parima tasakaalu kandevõime ja vajumite jaoks. Vaialuse koormusjaotus oleneb eelkõige plaadi laiusest, pikkusest ja paksusest, vaiade omavahelisest kaugusest, diameetrist, vaiapikkusest ja vaiade arvust plaadi all. Nendele lisaks tuleb arvestada ka pinnasefaktoritega.

2. Töö eesmärk ja ülesanded

Antud magistritöö on uurimusliku suunitlusega ning selle eesmärgiks on laboris läbiviidud katsete tulemustele tuginedes selgitada välja rostvärkplaadi ja kiilvaialuse kandevõime ning nende erinevused ja võrrelda erinevate vaiakombinatsioonidega vaialuste kandevõimeid. Sealhulgas pööratakse tähelepanu ka vaia ja vaiagrupi ligikaudsele kandevõimele. Siirdeandurite abil jälgitakse vaiaaluse paigutisi pinnases ja elastset deformatsiooni pärast pinget alt vabanemist. Katsed viiakse läbi Eesti Maaülikooli konstruktsioonide labori liivakastis. Liivanalüüs teostati Eesti Keskkonnauuringute Keskuses (EKUK). Koormuste rakendamiseks kasutati hüdraulilist survekatseseadet Lukas LZM 25/200, millega avaldati vundamendile koormust astmete kaupa kümne minutiliste tsüklitena.

Lähtuvalt magistritöö eesmärgist püstitati järgmised ülesanded:

- Liivakasti ettevalmistamine.
- Liiva koostise analüüsimine, lõimise määramine ja pinnase liigitus. Laboritulemuste analüüsimine.
- Vähendatud kiilvaimudelite ja rostvärkplaadi valmistamine.
- Katseprogrammide väljatöötamine.
- Katseseadmete ettevalmistamine.
- Katsekehadega laborikatsete läbiviimine.
- Tulemuste ülesmärkimine ja analüüsimine.

Katsete meetodika ja katseplaani täpsem kirjeldus on toodud punktis 3.4.

Magistritöö koosneb varasema kirjanduse ja katseandmete analüüsist. Lisades on esitatud katsete protokollid ja pinnase purunemispildid.

3. Materjal ja meetodika

3.1 Katsetel kasutatud pinnas

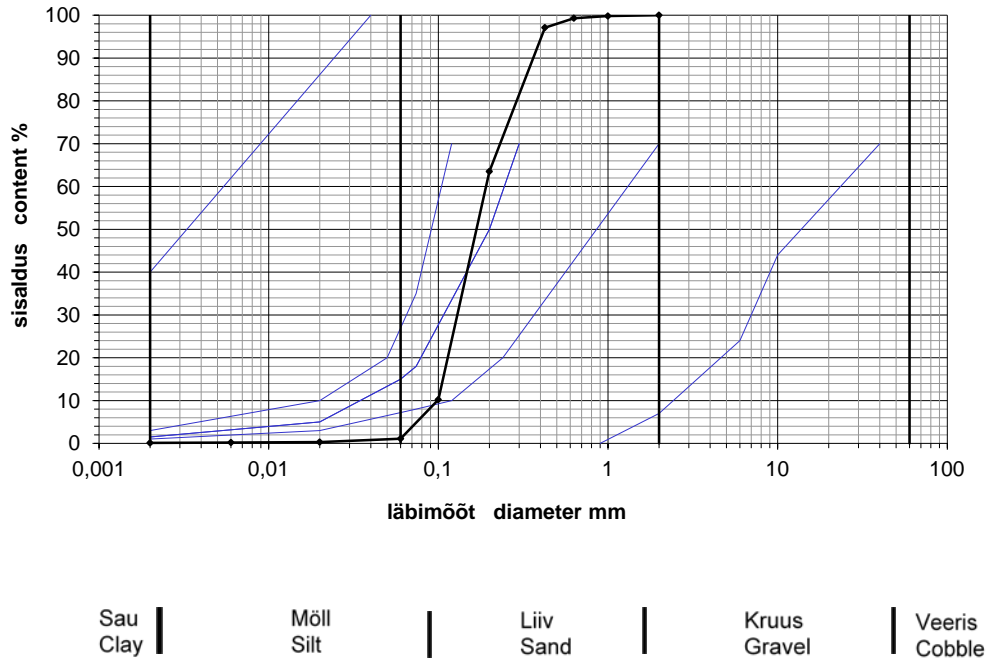
Katsetamisel kasutati Aardlapalu karjääris kaevandatud, pestud ja sõelutud peenliiva. Liivanalüüs teostati Eesti Keskkonnauuringute keskuses. Liiva peensusmoodul $Q_u = 1,5 - 2,0$ MPa, liiva suhteline tihedus 0,6 ja lõikerõngastega saadud mahumass $1,53 \text{ g/cm}^3$, mölli sisaldus peenliivas umbes 1%. Liiv kaevandati hüdrokaevandamise teel ja peened savi- ning huumuseosakesed on tehnoloogiliste protsesside tulemusel välja uhitud. Eesti Keskkonnauuringute keskuse geotehnikalaboris läbiviidud pinnaseuuringud koosnesid pinnaseomaduste määramisest, lõimisegraafiku koostamisest ja nihketeimist. Pinnase tihedus määrati nii Terzaghi kui ka Proctor-teimiga. Kokku tehti kaks erinevat katset. Terzaghi katse järgi saadi maksimaalseks kuivmahumassiks $\rho_{d,\max} = 1,64 \text{ g/cm}^3$ ja minimaalseks $\rho_{d,\min} = 1,38 \text{ g/cm}^3$. Proctor-teimiga saadi maksimaalseks kuivmahumassiks väiksem tihedus - esimesel katsel $1,58 \text{ g/cm}^3$ ja teisel $1,60 \text{ g/cm}^3$. Terzaghi tiheduse järgi võib pinnase kuivmahumassiks võtta $1,42 \text{ g/cm}^3$. Nihketeim viidi läbi aparaadiga TSNIIS. Eeltihendus toimus astmetel 25, 50, 100, 200, 400 ja 600 kPa 1 tund. Nihketugevus pinnase purunemisel oli esimese katse puhul $\tau_f = 360 \text{ kPa}$ ja teise katse puhul $\tau_f = 390 \text{ kPa}$. Konsolidatsiooni käigus tihenes pinnas kuni 5 g/cm^3 võrra. Nihketeimi teimimismeetod vastab EVS standardile CEN-ISO/TS 17892-10-2004, mis on kehtiv dokument käsitlemaks laboratoorseid pinnase ja geotehnilise testimismeetodeid. Proctor-teim viidi läbi teimimismeetodi DIN 18127 järgi, saksa standardi, mis käsitleb Proctor-testi läbiviimist, kasutades 2,5 kg raskust. Pinnaseomaduste ja lõimismääramisel lähtuti CEN-ISO/TS 17892-1,4-2004, DIN 18127 ja GTL-07 standarditest.

Lõimisetegur $C_u=1,9$ näitab, et tegemist on väga ühtlase pinnasega. (Joonis 3.1)

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,19}{0,099} = 1,9 \quad (3.1)$$

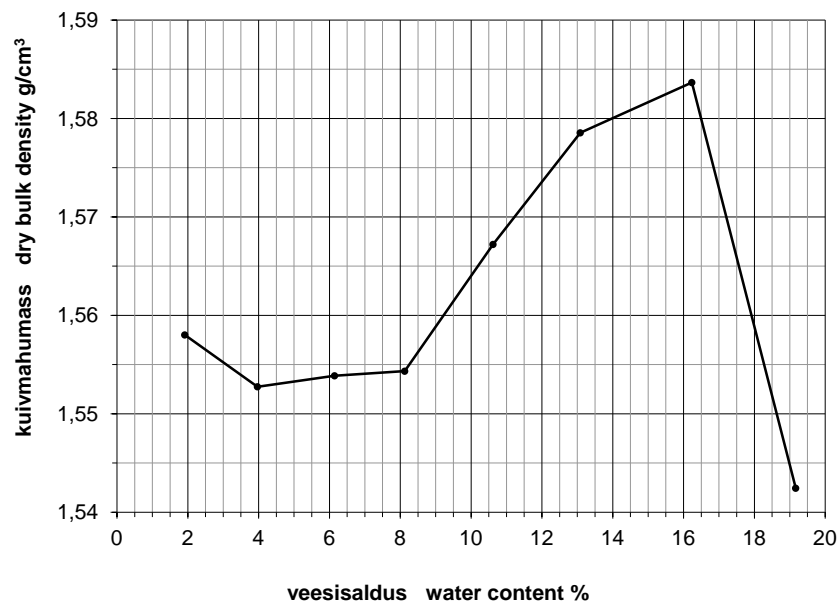
kus

d_{60} - kvantiil, pinnaseosakeste läbimõõt, millest väiksemaid osakesi on pinnases 60%.
 d_{10} - kvantiil, pinnaseosakeste läbimõõt, millest väiksemaid osakesi on pinnases 10%.

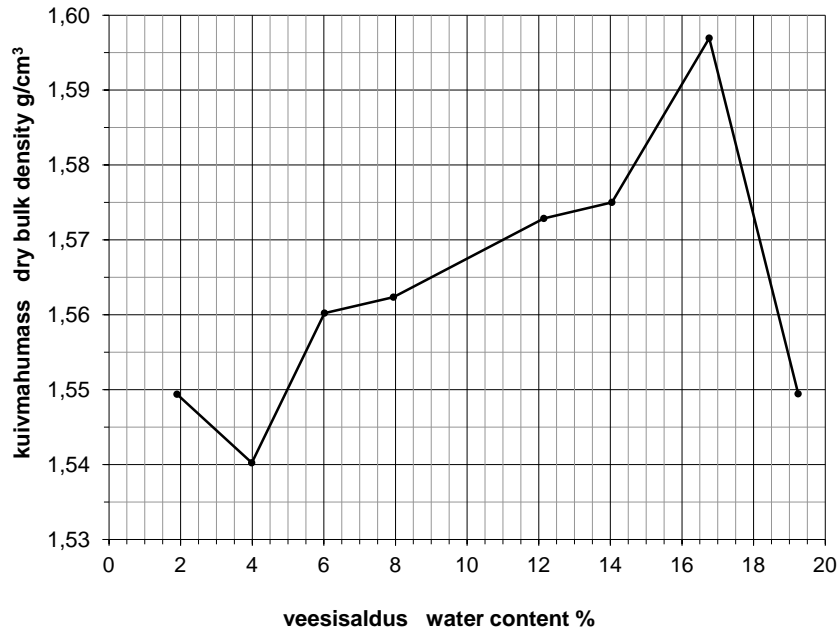


Joonis 3.1. Lõimisekõver

Pinnase optimaalne veesisaldus W_{opt} oli keskmiselt 16,5%, olles esimese katse puhul 16,2% ja teise katse puhul vastavalt 16,8%. (Joonis 3.2 ja 3.3)



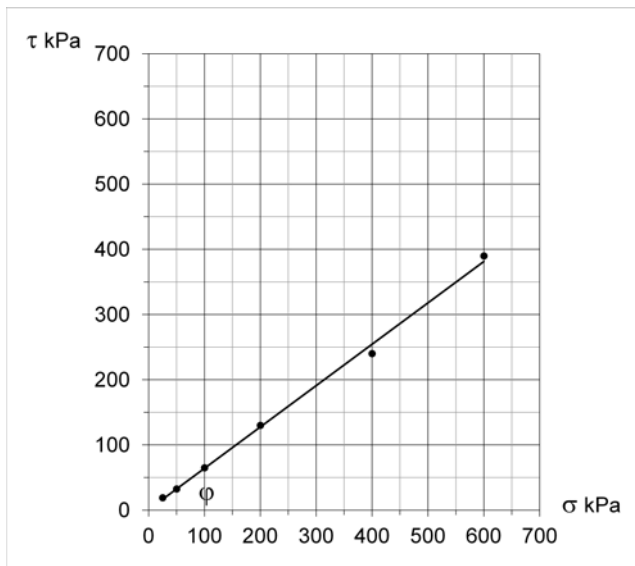
Graafik 3.2. Kuivmahumassi ja veesisalduse suhe 1. katsel.



Graafik 3.3. Kuivmahumassi ja veesisalduse suhe 2. katsel.

Optimaalse veesisalduse puhul on pinnase kuivmahumass kõige suurem ehk pinnas on kõige tihedam.

Pinnase sisehõõrdenurk $\varphi = 32^\circ$, mille puhul nidusus $C = 0$ kPa. (Graafik 3.4)

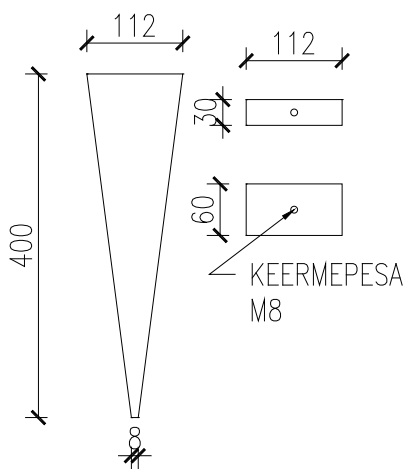


Joonis 3.4. Nihketeimi graafik (nihketugevus purunemisel). Vertikaalteljel nihkepinged, horisontaalteljel survepinged eeltihendusel.

3.2 Katsemudelite kirjeldus

3.2.1 Kiilvaiade mudelid

Kiilvaia mudelitena kasutati kahe mõõduga mudeleid. Vaiade pikkus on 40 cm ning need on paksusega 30mm ja 60mm (Joonis 3.5). Vaia ülemise otsa keskel asub sisekeermehülss M8. Mudelid on valatud Uninax valubetoniga Graniitbetoon M500 survetugevusklassiga C45/50, mille tera suurus on 4-8 mm. Betoonest kiilvaiamudelid armeeriti ehitusmaterjalide poes müüdavast aiavõrgust keeratud karkassiga. Aiavõrk on 1 mm traadist valmistatud keevisvõrk, mille võrgusilm on mõõtudega 13x13mm.



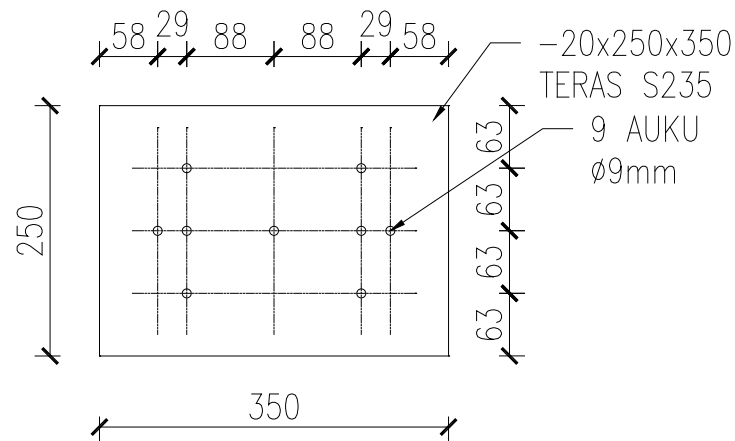
Joonis 3.5. Viiekordselt vähendatud proportsioonidega kahemeetrine kiilvai.



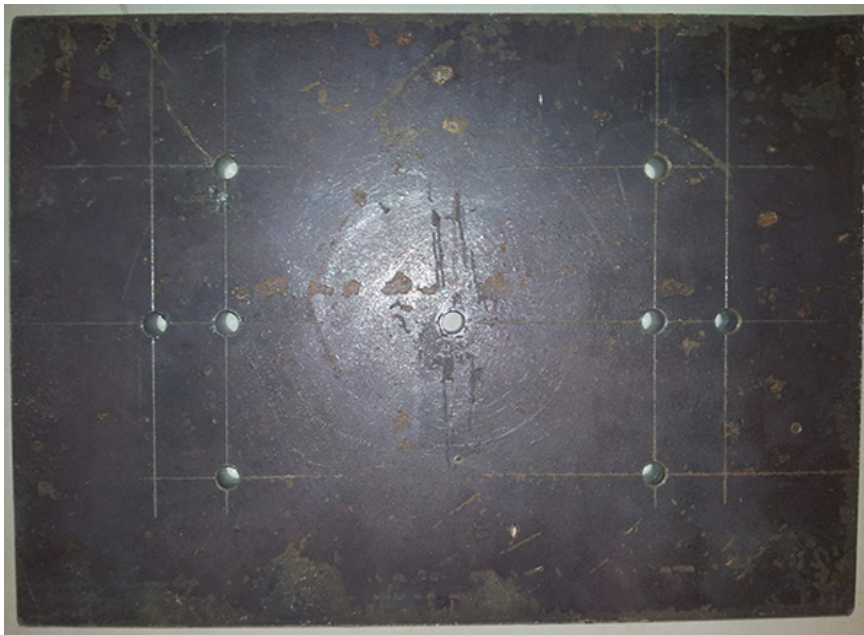
Joonis 3.6. Kiilvaiade mudelid. Vasakul 60 mm paksune mudel ja paremal kolm 30 mm paksust mudelit.

3.2.2 Plaadi mudel

Katsetes kasutati terasest rostvärkplaati, mille pikem külg oli 350 mm, lühem külg 250 mm ning plaadi paksus 20 mm. Plaadi sisse on puuritud vaiade kinnitamiseks avad diameetriga 9 mm. Plaadi skeem on esitatud joonisel 3.7 ja foto plaadist joonisel 3.8.



Joonis 3.7. Terasest rostvärkplaat koos mõõtudega.



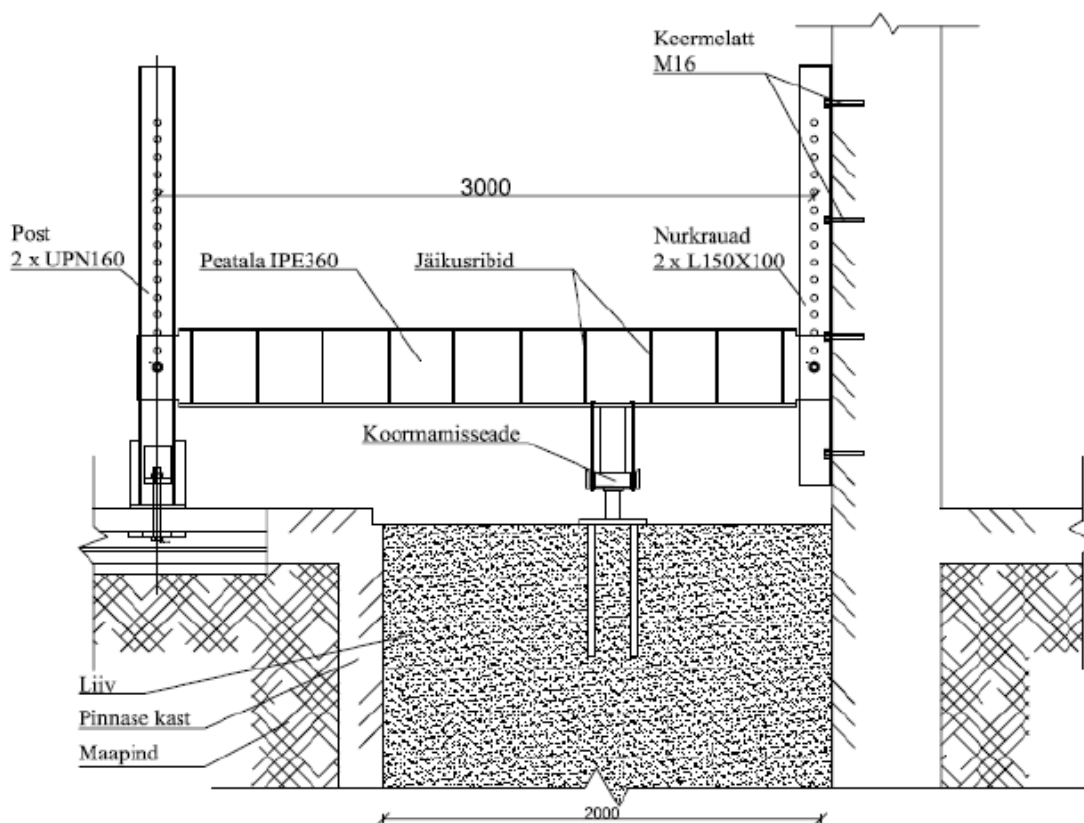
Joonis 3.8. Terasest rostvärkplaat mõõtudega 20x250x350 mm.

Augud rostvärgi plaadis olid valitud selliselt, et oleks võimalik katseplaanis toodud katseid läbi viia. Lähtuti vaiade arvust ja vahekaugustest. Vaiad valikul lähtuti ka põhimõttest, et kasti põhja vastupanu ei avaldaks mõju katsetamisel tekkivale pinnasedeformatsioonile.

3.3 Katseseadmete kirjeldus

3.3.1 Raudbetoonist pinnasekast ja teraspostid ning -tala.

Katsed viidi läbi raudbetoonist pinnase kastis, mille pikema külje mõõt oli 3,5 meetrit ja lühem külg 2 meetrit. Mudelile koormuse avaldamiseks konstrueeriti pinnase kasti kohale talastik. Talastik koosnes ühest peatalast, kahest seinale kinnitatud L-kujulisest nurkrauast ja olemasolevast postist, mis kinnitati poltide abil raudbetoonist põranda külge. Peatalana kasutati IPE360 terastala, põranda külge kinnitatud post koosnes kahest UPN160 talast ja seinale kinnitatud talatugi kahest L-profiilist 150 x 100 mm. Abitalade seinale paigaldamiseks kasutati M16 suuruses keermelatte, mis kinnitati seinla puuritud aukudesse ESSVE ECM kahekomponendilise ankrumassiga. Katsekast ja talastik on näidatud joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Katsekasti skeem.

3.3.2 Koormamisseade

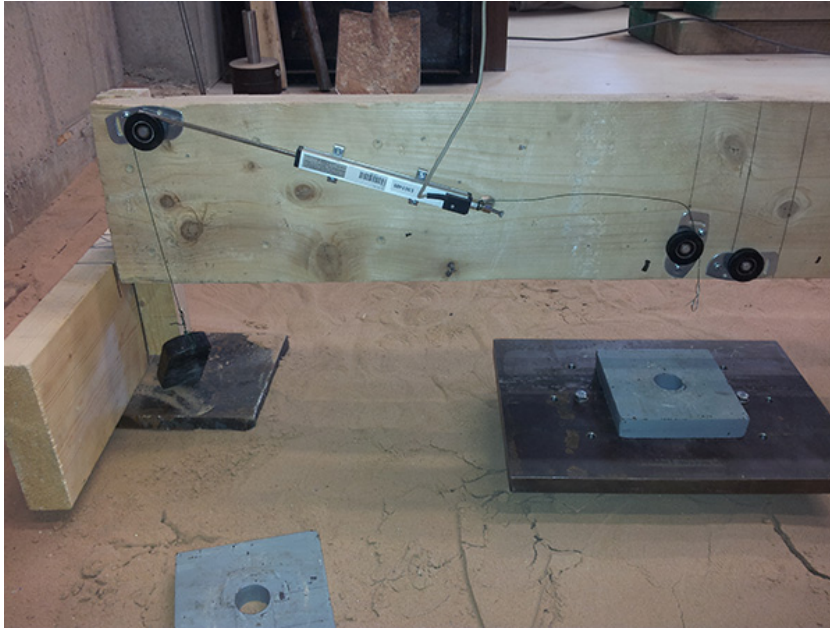
Koormuskatsete läbiviimiseks kasutati hüdraulilisel õlisurvel töötavat survekatseseadet Lukas LZM 25/200, mille maksimaalne võimsus on 250 kN ja silindri käik 200 mm. Silindrikäiku pikendati terasest silindertoru abil. Pressi koormust mõõdeti ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestussüsteemiga, mille mõõtmistäpsus on 0,1 bar (Joonis 3.10.).



Joonis 3.10. Andmesalvestussüsteem ALMEMO 5690-2 AHLBORN.

3.3.3 Mõõtmisseadmed

Siirete ja rõhu mõõtmiseks kasutati ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestussüsteemi (Joonis 3.10), mis oli ühenduses nii hüdraulilise koormamisseadme käsipumbaga, kui ka siirdeanduriga, mis oli kinnitatud vaialuse või plaadi külge. Vajumise mõõtmiseks kasutati siirdeandurit ALMEMO FWA100T AHLBORN, mille mõõtmistäpsuseks on 0,01 mm. Andur ise kinnitati eraldiseisvale puidust konstruktsioonile (Joonis 3.11). Anduri liikuva otsa külge kinnitati peenike traat, mille teine ots paigaldati enne koormammist rostvärkplaadi külge. Eraldiseisva mõõtmiskonstruktsiooni kasutamine tagab siirdeandurite mõõtmistäpsuse, kuna on kuna on koormamisest sõltumatu ning ei liigu pressi poolt tekitatud jõu toimetel. Puidust raam paigaldati kiilvaiale võimalikult lähedale, et traat oleks võimalikult vertikaalselt.



Joonis 3.11. Puitraamile kinnitatud siirdeandur ALMEMO FWA100T AHLBORN.

3.4 Katseteetodika ja katseplaani kirjeldus

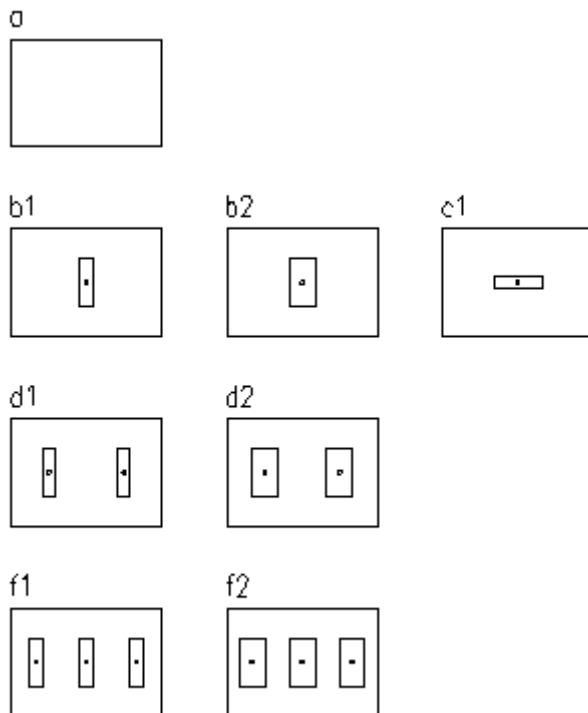
3.4.1 Katseteetodika

Modelleeritud katsete läbiviimisel lähtuti kirjanduse analüüsimisel kokku kogutud andmetest eriliiki vundamentide kandevõimete määramise kohta. Hinnati plaat-, vai- ja vaialusvundamenti piirkandevõimet ja vajumit. Katse algas liivakasti läbikaevamisega ning tihendamisega. Enne katsetamise algust tihendati liiv paarikümnesentimeetriste kihtide kaupa plaatvibraatoriga. Mudelite süvistamisel ekstsentrilisuse vältimiseks kasutati vesiloodi, millega kontrolliti vaialuse paigutust kahes horisontaalsuunas, mis tagas ka plaadiga risti olevate vaiade vertikaalsuse (vt Lisa 3). Vaialus süvistati üheaegselt survekatseteetodiga Lukas LZM 25-200 nii, et rostvärkplaadi alumine pind jäi pinnasest 4 cm kõrgusele. Kuna silindri käik polnud piisav, lisati pressi ja mudeli vahele terastoru. Enne koormuse rakendamist paigaldati plaadi ja terastoru vahele ALMEMO FWA100T AHLBORN siirdeanduritega puidust raam. Pressi silindrit langetati aeglaselt, kuni andurid andsid esimesed vastused ja vaialus oli koormatud. Teostati vaialuse koormuskatse, hoides koormusastmeid peal 10 minuti vältel ning märkides tulemeid 3, 5 ja 10 minuti möödudes. Kiilvaiade töötamisel rakendati koormusastmeid 2,5 või 5 kN kaupa. Koormuse plaadile ülekandumisel tõsteti koormusastme suurust ning rakendati koormust 7,5 kN kaupa. Kiilvaiade puhul koguti katseandmeid, kuni plaadi alumise pinna pinnaseni jõudmiseni,

mis tähistas ühtlasi ka 4 cm vajumit. Seejärel jätkus sujuvalt vaialuse katse, mis vältas kuni vajumini 40 mm, mis on umbes 10% plaadi küljepikkusest. Kirjanduse kokkuvõtte alusel võib väita, et selleks hetkeks on ammendunud kõik vaialuse kandvad omadused.

3.4.2 Katseplaani kirjeldus

1. Katse käigus tehakse joonisel 3.12 toodud variatsioonid. Rostvärgi plaadiga (a) tehakse kolm katset. Vaialuse katseid ühe, kahe ja kolme kiilvaiaga (b1,d1 ja f1) viiakse läbi kolm korda iga variatsiooni kohta. Lisaks tehakse üks katse 60 mm paksuste kiilvaiadega (b2,d2 ja f2) ning 30 mm paksuse kiilvaiaga vaialusega, kus kiilvai on võrreldes b1 variatsiooniga keeratud 90 kraadi plaadi suhtes. Kokku viiakse läbi 16 laboratoorset katset.



Joonis 3.12. Vaialuste katsevariatsioonid.



Joonis 3.13. Penetromeeter.

2. Pinnase ettevalmistus. Enne katseprogrammi alustamist tihendatakse pinnast plaatvibraatoriga ning presseadmega, samuti kasteti pinnast ning tihendati trampimise teel.
3. Rostvärgi plaadi staatiline koormuskatse

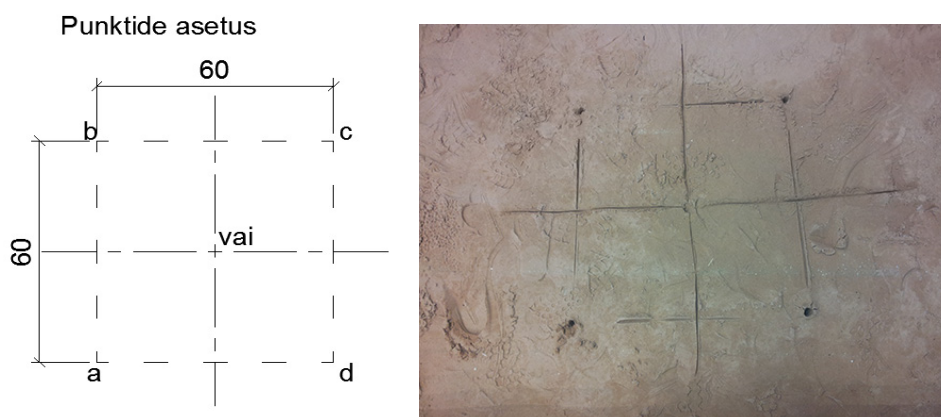
- a. Enne katse tegemist mõõdetakse pika vardaga penetromeetriga (Joonis 3.13) pinnase tihedus 10 cm kaupa kuni sügavuseni 60 cm. Mõõtmiskoht võib jääda plaadi alla või vahetusse lähedusse.
 - b. Pinnas silutakse lati abil tasaseks ning plaat asetatakse katsekohta.
 - c. Tungraud asetatakse plaadi kohale ja paigaldatakse ning seadistatakse vajumise mõõtmise andur.
 - d. Plaadile tehakse staatilise koormamise katsetus. Koormusastmeks võetakse plaadi puhul 7,5 kN ning üht koormusastet hoitakse 10 min jooksul. Vajumi lugemid võetakse 3, 5 ja 10 min järel. Pinnase purunemiseks loetakse vajum 4 cm.
4. Vaialuse staatiline koormuskatse
- a. Pinnas kobestatakse ja tihendatakse. Enne katse tegemist mõõdetakse pika vardaga penetromeetriga pinnase tihedus 10 cm kaupa kuni sügavuseni 60 cm. Mõõtmiskoht võib jääda plaadi alla või vahetusse lähedusse.
 - b. Plats silutakse tasaseks.
 - c. Vai(ad) kinnitatakse poldiga rostvärki külge. Vaiapea ning plaadi vahele paigaldatakse koormuse ühtlasemaks jaotamiseks neopreenriba ümber poldi.
 - d. Katsekeha asetatakse katsekohta ja vaiad surutakse käsitsi pinnasesse ning katsekeha horisontaalsust ja tsentrilisust kontrollitakse loodiga.
 - e. Tungraud asetatakse katsekehale ning kinnitatakse ka vajumi mõõtmiseks siirdeandur.
 - f. Tungrauaga surutakse vai pinnasesse kuni rostvärk jääb pinnasest ca 4-5 cm kõrgemale. Surumise ajal mõõdetakse koormust ja vajumist. Koormusastmeid suurendatakse konstantse kiirusega.
 - g. Vaiale või vaiagrupile tehakse staatilise koormamise katse. Kiilvaiade koormamisel kasutatakse koormusastmeks 2,5 kN või 5 kN ning plaadi koormamisel 7,5 kN. Koormusastet hoitakse 10 min mähtel, näidud märgitakse 3, 5 ja 10 min järgi, pinnase purunemiseks loetakse vajum 4 cm juures.
 - h. Edasi surutakse rostvärki plaat tihedasti vastu pinnast. Surumisel jälgitakse koormuse suurenemisel paigutisi ning üritatakse leida hetk, kus on tunda, et kogu rostvärki plaat on hakanud tööle.

Katse jälgitakse ka pinnase käitumist vaia ja rostvärki ümber. Konkreetseid mõõtmisi ette ei nähta.

4. Katsetulemused

4.1 Pinnase tiheduse määramine

Antud katseprogrammi puhul oli pinnaseks ühtlase fraktsiooniga peenliiv. Katseväljale märgiti neli punkti, mis asetsesid ruudukujuliselt ümber kiilvaia tsentri. Ruudu külje pikkuseks võeti 60 cm (Joonis 4.1). Enne ja peale igat katset mõõdeti pinnasetihedust pika penetromeetriga 10 cm kihtide kaupa, kuni 60 cm sügavuseni, et jälgida kiilvaialuse mõju pinnase tihenemisele. Kuna pinnas avaldas nii pikale ja saledale vardale külghõõrdega liiga suurt mõju ja korrelatsiooni ei tekkinud, ei olnud võimalik määrata pinnase tihedusastet penetromeetri abil (Tabel 4.1).



Joonis 4.1. Mõõtmispunktide paigutus penetromeetrikatsete jaoks.

sügavus, cm	Punktis a		punktis b	
	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm ³	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm ³
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 ³	lööke penetromeetriga	lõikerõngaproovi tihedus, g/cm ³
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

Tabel 4.1. Korrelatsiooni puudumine penetromeetri löökide ja pinnasetiheduse vahel.

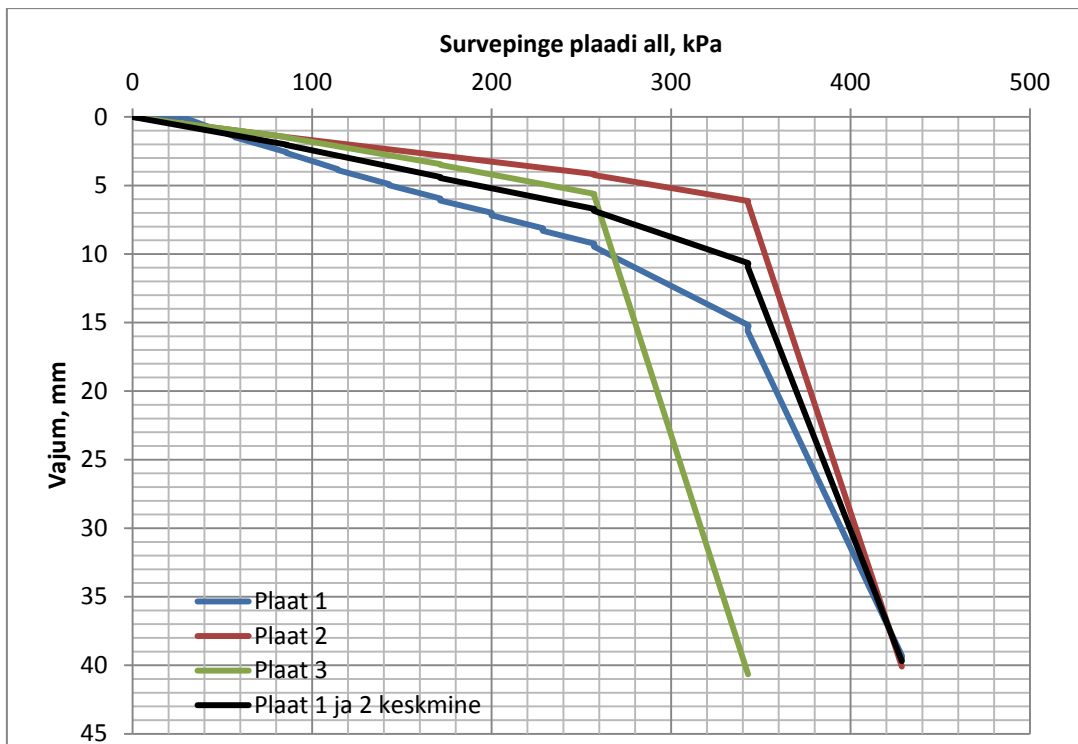
Pinnase kuivmahumass määrati Terzaghi-teimi abil, mis on kõige sobivam viis määramaks liivpinnaste tihedust. Terzaghi kuivmahumass $\rho_d = 1,41...1,42 \text{ g/cm}^3$. Liiva tihedus määrati silinderkatsetega enne igat algavat katsepäeva ning see oli vahemikus $1,44...1,50 \text{ g/cm}^3$, mis näitab, et liiv oli katsete ajal suhteliselt kuiv.

Penetromeetriga mõõdetud löökide arv on toodud katseprotokollides (Lisa 1) suhtelise võrdluse jaoks. Samuti näitab see, kuidas kiilvaia maasse surumisel pealmised pinnasekihid kohenevad ning alumised tihenevad.

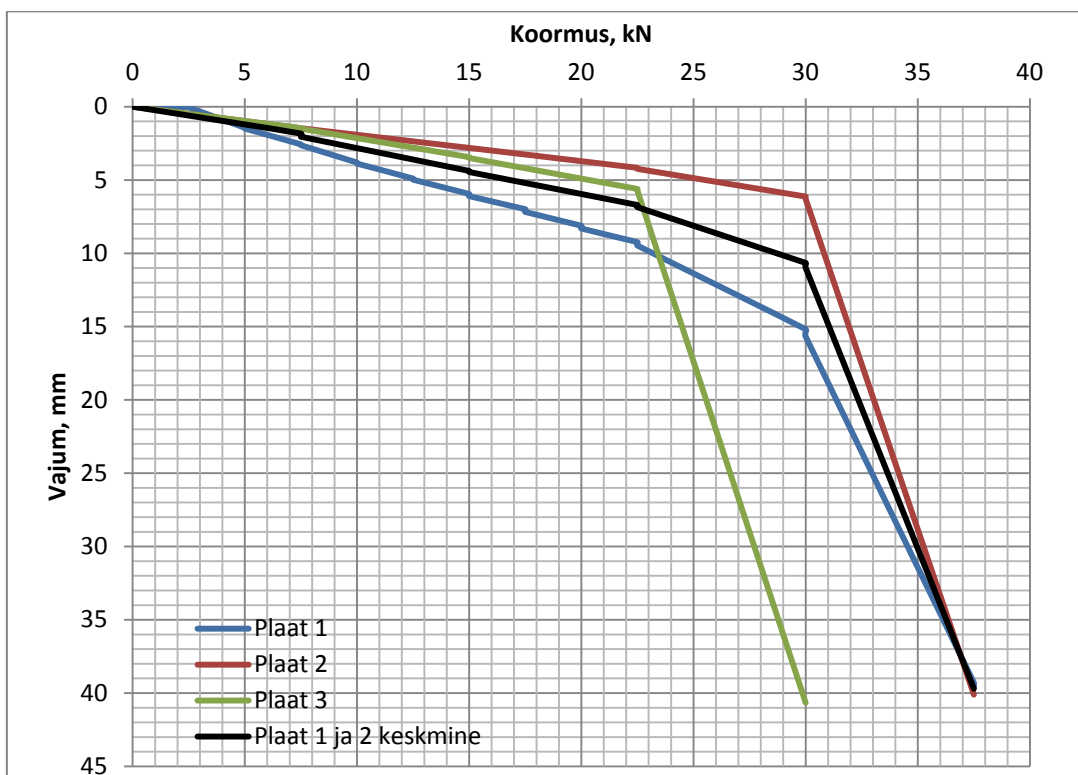
4.2 Plaat

Rostvärkplaadiga sooritati neli katset. Väiksemate koormusastmete kaupa liikumine andis nii täpsema graafiku kui ka mitmekesisemad tulemused, kuid aja kokkuhoiu mõttes liiguti rostvargi puhul 7,5 kN koormusastmete kaupa. Koormusaste valiti toetudes käesoleva magistritöö juhendaja ja õppejõu Mait Metsa pikaajastele kogemustele ning kirjanduses leiduvale. Plaadi survekatsete puhul võib võtta suurusjärguks umbes 1 kg/cm^2 . Antud koormusastmeks on $750 \text{ kg}/875 \text{ cm}^2$ ehk $0,86 \text{ kg/cm}^2$. Plaat 1 katse sooritati kasutades 2,5 kN koormusastmeid. Ülejäänud plaatkatsete puhul liiguti 7,5 kN koormusastmete kaupa. Kahe katse puhul, kus pinnas oli tihedam (plaat 1 ja 2), saavutas pinnas plaadi all purunemiskiiriks 37,5 kN. Kolmanda katse puhul, kus pinnas oli kohevam (plaat 3), saadi purunemiskiiriks 30 kN (Joonis 4.3). Plaadi pindala oli 875 cm^2 . Seega avaldas 30 kN suuruse koormuse rakendamine plaadile 342,86 kPa suurust survet ja 37,5 kN suuruse koormuse rakendamine vastavalt 428,57 kPa suurust survet (Joonis 4.2).

Pinnase kandevõimeks loetakse roomepiiri. Antud graafikute puhul kujunes roomepiiriks ehk pinnase kandevõimeks plaadi 1 ja 2 puhul 343 kPa suurune surve ja koormusaste 30 kN. Plaadi 3 puhul olid vastavad näitajad 257 kPa ja 22,5 kN. Plaatide katseprotokollid on toodud Lisa 1 all. Graafikutel on võetud plaadi 1 ja 2 käitumise keskmist arvesse, kuna plaat 3 ei suutnud kohevama pinnase tõttu vastu võtta järgmist koormusastet ning saavutas ka oma roomepiiri tunduvalt varem. Edasises võrdluses ja analüüsis vaadeldakse plaadi roome- ja purunemiskiiri kõige nõrgema katse järgi. Kui katsetulemused on ühtlased, vaadeldakse keskmist.



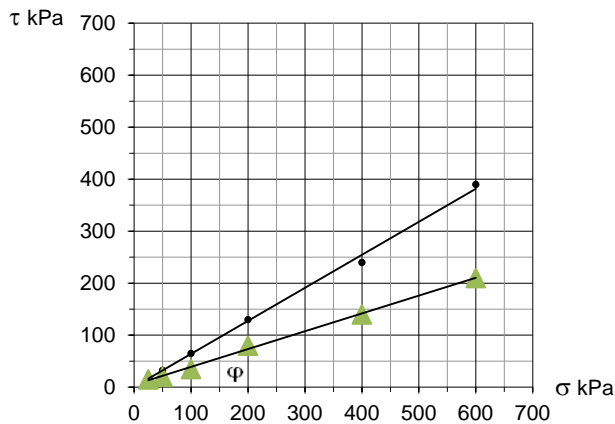
Joonis 4.2. Rostvärkplaadi vajumite sõltuvus survest plaadi all.



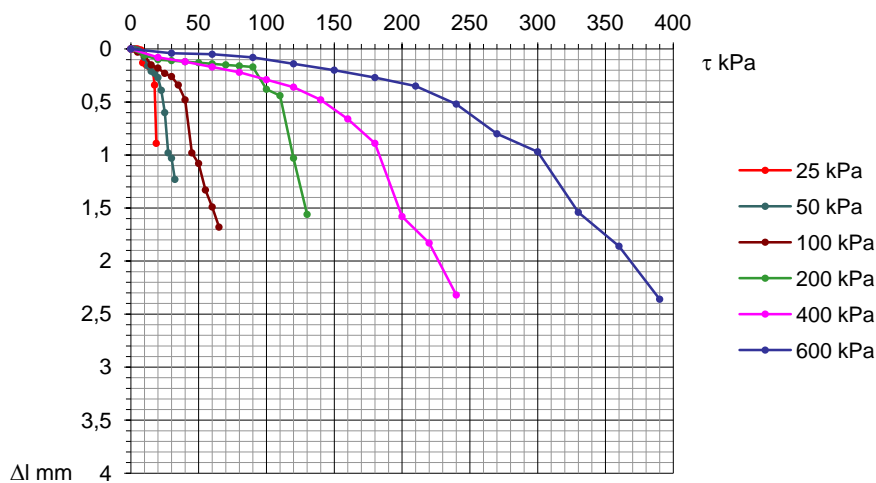
Joonis 4.3. Rostvärki plaadi koormuskatsete tulemused. Vajumi sõltuvus plaadile rakendatavast koormusest.

4.2.1 Arvutusliku survepinge võrdlus katselisega

EKUK geotehnikalabori poolt läbi viidud nihketeimi andmeid saab kasutada võrdluseks katseliselt saadud survepingetega. Nihketeim viidi läbi aparaadiga TSNIIS. Liiva prooviks märgiti õhkuiv, $\rho_{d=}$ 1,53 g/cm³, $I_D = 0,6$. Eeltihendusastmed olid 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ja 600 kPa. Koormusastmeid lisati 1 tunni tagant. Joonis 4.4 on toodud kaks lineaarset joont. Ülemine joon, mille punktid on tähistatud täppidega, näitab nihketugevuse sõltuvust eeltihendusastmetest pinnase purunemiskiiril. Alumine joon, mille punktid on tähistatud kolmnurkadega, näitab nihketugevuse sõltuvust eeltihendusastmetest roomepiiril. Eelmainitud väärtused saab välja lugeda nihkedeformatsiooni graafikult (Joonis 4.5).



Joonis 4.4. Nihketugevuse sõltuvus eeltihendusest.



Joonis 4.5. Nihkedeformatsiooni graafik.

Analüüsidest joonist 4.4 saab leida pinnase sisehõõrdenurga φ ja nidususe c . Allolevas tabelis (Tabel 4.2) on toodud nihketugevuse väärtused roome- ja purunemiskiiril sõltuvalt eeltihendusastmest.

σ kPa	τ_y kPa	τ_f kPa
25	15	19
50	20	33
100	35	65
200	80	130
400	140	240
600	210	390

Tabel 4.2. Nihketugevus roomepiiril ja purunemisel sõltuvalt eeltihendusastmest.

Kasutades trigonomeetrist funktsiooni tangens, on võimalik leida kahe kaateti (nihketugevus τ ja eeltihendus σ) vaheline nurk (sisehõõrdenurk φ). Samuti on võimalik määrata pinnase nidusus c . Selleks tuleb rakendada lineaarset interpoleerimist. Valitud punktid ei asu tegelikult ühel lineaarsel sirgel, vaid see sirge näitab nende punktide trendi ehk keskmist.

Purunemiskiiril on φ ligikaudne väärtus 33°

$$\arctan\left(\frac{390}{600}\right) = 33^\circ$$

Interpoleerimiseks valisin kaks punkti, mis asuvad kõige lähemal lineaarsele joonele. Tihendusastme 200 kPa puhul on purunemiskiiri väärtuseks 130 kPa, 100 kPa puhul 65 kPa. Siinkohal on lineaarne seos piisavalt selgesti näha, et järeldada, et tihendusastme 0 kPa juures on ka nihketugevus purunemisel 0 kPa ehk nidusus $c = 0$ kPa.

Roomepiiril on φ ligikaudne väärtus 19°

$$\arctan\left(\frac{210}{600}\right) = 19^\circ$$

Nidususe leidmiseks toimin sarnaselt purunemiskiirile:

Kõige paremini kirjeldavad lineaarset sirget tihendusaste 50 kPa, mille puhul nihketugevus roomepiiril on 20 kPa ja 600 kPa, mille puhul nihketugevus roomepiiril on 210 kPa.

Lineaarne interpolatsioon:

$$y = y_a + (y_b - y_a) \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \quad (4.1)$$

$$y = 20 + (210 - 20) \frac{0 - 50}{600 - 50} = 2,73 \text{ kPa}$$

Nidusus $c = 3 \text{ kPa}$.

Rakendades Meyerhofi valemit saab arvutada survepinge roome- ja purunemiskiirile.

$$\sigma = 0,5 \times \gamma \times N_\gamma \times B + N_c \times c + N_q \times q \quad (4.2)$$

kus

N_γ , N_c ja N_q on kandevõimetegurid

B on plaadi (lühem) külg

c on pinnase nidusus

q on pinnase omakaalust tingitud efektiivpinge talle tasapinnas

Purunemiskiirile vastavad sisehõordenurk $\varphi = 33^\circ$ ja nidusus $c = 0 \text{ kPa}$.

Andmed:

$$\gamma = 1,5 \text{ g/cm}^3 = 15 \text{ kN/m}^3$$

$$B = 0,25 \text{ m}$$

$$L = 0,35 \text{ m}$$

$$N_\gamma = 32,59 (\varphi = 33^\circ)$$

Meyerhofi valem:

$$Q_u = 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma$$

$$Q_u = 0,5 \times 15 \times 0,25 \times 32,59 = 61,1 \text{ kPa}$$

Roomepiirile vastavad sisehõõrdenurk $\varphi = 19^\circ$ ja nidusus $c = 3 \text{ kPa}$

Andmed:

$$\gamma = 1,53 \text{ g/cm}^3 = 15 \text{ kN/m}^3$$

$$B = 0,25 \text{ m}$$

$$L = 0,35 \text{ m}$$

$$N_\gamma = 3,30 (\varphi=19^\circ)$$

$$N_c = 13,93 (\varphi=19^\circ)$$

$$c = 3 \text{ kPa}$$

Meyerhofi valem:

$$Q_u = 0,5 \times \gamma \times B \times N_\gamma + c \times N_c$$

$$Q_u = 0,5 \times 15 \times 0,25 \times 3,30 + 3 \times 13,93 = 48,0 \text{ kPa}$$

Kandevõime tegurid on võetud konstruktori käsiraamatust [8]

Antud tingimuste puhul alahindab Meyerhofi valem plaadi vastuvõetavat koormust nii roome- kui ka purunemisperiiril viiekordselt. Põhjuseks on ilmselt, et plaadil puudub sügavus ja sellise koheva liiva puhul ei anna valem õiget tulemust, kuna tavaliselt on vundament ikkagi maa all kindlal sügavusel ja pinnas selle ümber on tihendatud.

4.3 Vaiagrupid

Vaiagruppide katsetamine toimus samaaegselt vaialuse koormuskatsega. Vaiagrupist kui sellisest räägitakse antud lõputöös kui kiilvaiade grupist, mis on omavahel ühenduses plaadiga ja vaiad töötavad koostöös, kuid plaat pinnasega kontaktis ei ole. Üks põhilisi eesmärke vaiagruppide katsetamise puhul oli kontrollida, kas kiilvaia kandevõime vaiagrupis on võrdne üksiku kiilvaia kandevõimega. Seda kirjeldab allolev tabel 4.3. Oluline on siinkohal märkida, et antud roome- ja purunemisiirid ei ole võrdsed tegeliku üksikvaia näitajatega, kuna katse käigus ei rammitud vaia sisse, kuni see jääb maapinnaga tasa ning ei hakatud siis edasi koormama. Vaia rammimine tihendab pinnast ja tagab suurema kandevõime kui vaia lihtne sisse surumine. Reaalses kasutatakse kiilvaiade puhul ka eelkõige rammimist ja vibrosüstamist, mis viiakse läbi spetsiaalse vaiarammiga. Samuti jäi vaiapea koos sellele toetuva rostvärkplaadiga pinnasest 4-5 cm välja, mis tähendab, et pigem on antud roomepiirid võrreldavad umbes 36 cm pikkuse sarnase vaiaga. Kiilvaiade puhul sõltub kandevõime eelkõige kaldpindade külghõõrdest ning kuna vaia ots oli katsetamise alguses pinnasest 4-5 cm väljas, vähendas see kiilvaia külgede kontaktpinda pinnasega ning läbi selle ka kandevõimet ja purunemisiiri. Kuna kõik katsed viidi läbi samamoodi, on andmed selle lõputöö raames võrreldavad.

Katse nimetus	Roomepiir, kN	Roomepiir ühe kiilvaia kohta, kN	Purunemisiir, kN	Purunemisiir ühe vaia kohta, kN
Üksik kiilvai	3,8	3,8	7,5	7,5
Kahene kiilvaiagrupp	9	4,5	15	7,5
Kolmene kiilvaiagrupp	13,5	4,5	20	6,7

Tabel 4.3. Üksikvaia roome- ja purunemisiiri võrdlemine vaiagrupis olevate vaiadega.

Ühe 30 mm paksuse kiilvaia betoonmaht on 816 cm^3 . Vaiagruppide puhul arvestatakse olukorda, kus plaat ei oma kontakti pinnasega. Graafik 4.3.1 annab alust arvata, et vaiade lisamine rostvärele kasvatab üksikvaiadega proportsionaalselt vaiagrupi kandevõimet, kuid kahe vaia mõju kandevõimele suureneb, kuna süsteem on paremini fikseeritud ja vaiad toetavad üksteist. Samuti tiheneb pinnas kiilvaiade vahel ning vaiaotsa all. Ka kolme vaia puhul on märgata mõningat kandevõime suurenemist võrreldes ühe vaiaga, kuid see pole samal tasemel kahese vaiagrupiga. Põhjuseks võib olla kiilvaiade tsentrite omavaheline kaugus. Kolmese vaiagrupi puhul oli tsentrite kauguseks 117 mm ning kahese vaiagrupi puhul 176 mm. On võimalik, et 117 mm puhul olid vaiad üksteisele liiga lähedal

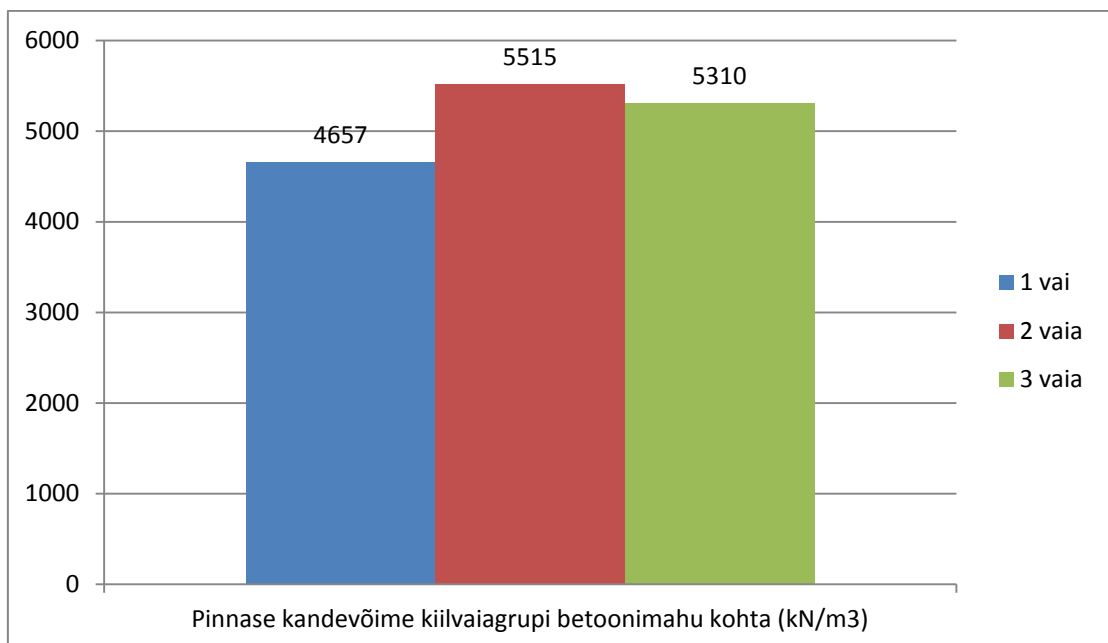
ning nende kandevõimepotentsiaal ei rakendunud täielikult. Erinevad allikad väidavad [14],[18], et vaiade vahekauguse ja vaia diameetri suhe peaks olema vähemalt võrdne kahega. Antud juhul kolmese kiilvaiagrupi puhul:

$$d = 117 \text{ mm}$$

$$D = \frac{112 + 8}{2} = 60 \text{ mm}$$

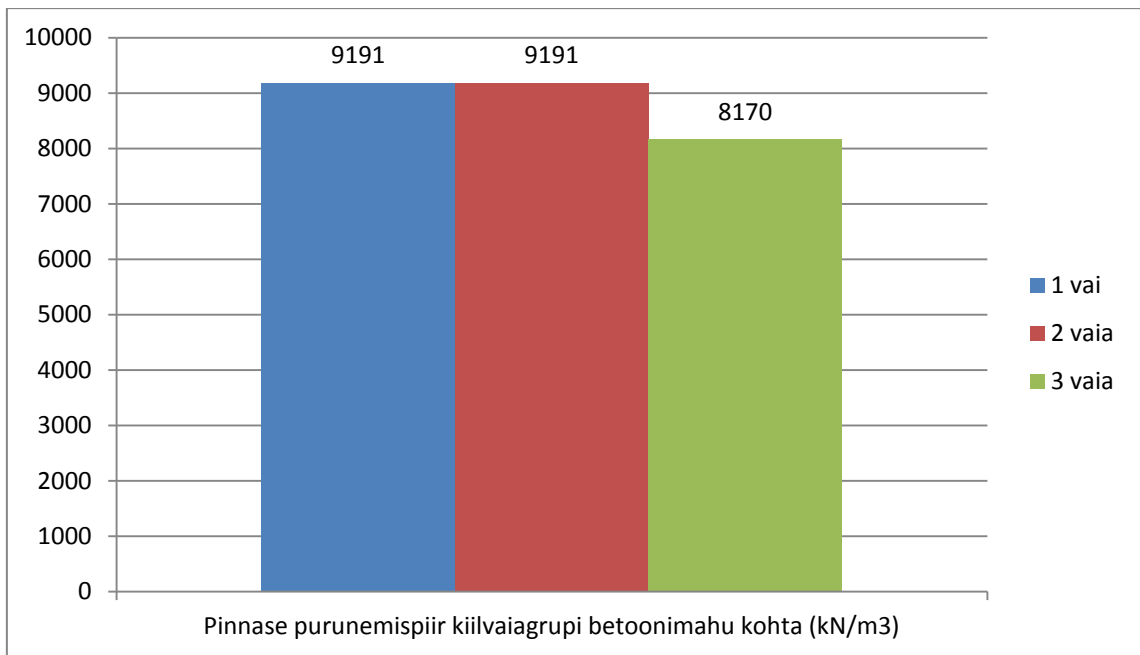
$$\frac{d}{D} = \frac{117}{60} = 1,95 < 2$$

Kahjuks pole kiilvaiade puhul veel uuritud minimaalseid vaiatsentrite vahekauguseid ning seda tuleks kindlasti tulevikus teha. Antud arvutuskäik kehtib pigem ümara ristlõikega vaiade kohta, kuid on tõenäoline, et see kirjeldab kasvõi kaudselt ka kiilvaiade olukorda. Lähestikku paiknevad vaiad töötavad ühtselt ning jagavad omavahel koormust. Kui vaiad on üksteise mõjualast väljas, töötavad nad individuaalsemalt ja ühele vaiale jaguneb suurem koormus.



Joonis 4.6. Pinnase kandevõime kiilvaiagruppi betoonimahu kohta.

Jooniselt 4.6 on näha, et kõige ökonoomsem on kahene kiilvaiagrupp.



Joonis 4.7. Pinnase purunemiskiir kiilvaiagrupi betoonimahu kohta.

Kuigi roomepiiri väärtus betoonimahu kohta oli ühe kiilvaia puhul väiksem kui kahese või kolmese vaiagrupi puhul, oli ühe vaiaga katsel purunemiskiir betoonimahu kohta võrdne kahese vaiagrupi vastava näitajaga (Joonis 4.7). See tähendab, et kandevõime kaotamisest kuni pinnase purunemiseni suutis üksik vai võtta koormust vastu paremini, kui kahene või kolmene kiilvaiagrupp.

4.4 Vaialused

Vaialuste katsed viidi läbi kolmes variatsioonis: üks, kaks ja kolm kiilvaia rostvõrgi all. Peamiselt keskenduti 40 cm pikkusele ja 3 cm laiusele vaiamudelile, kuid üks katse iga variatsiooni kohta viidi läbi ka 40 cm pikkuste ja 6 cm paksuste vaiadega. Ühe vaia puhul asetati kiilvai täpselt rostvõrgi tsentrisse nii, et vai jäi risti plaadiga. Kahe vaia puhul asetati samuti vaiad risti plaadiga ning vaiade vahekaugus tsentrist tsentrisse oli 176 mm. Kolme kiilvaia vaialuse puhul oli vaiade tsentrite kauguseks 117 mm. Vaiade asetusi erivariatsioonide puhul näeb jooniselt 3.12. Ühe vaiaga vaialuse puhul katsetati ka variatsiooni, kus vai pöörati plaadi all 90 kraadi risti võrreldes tavakatsega. Selline teguviis võib anda erineva tulemuse, kui rostvõrkplaat on väga piklik ja peenike. Ühel juhul takistaks plaat vaia kaldpindade juurest pinnasetõusu ning kandevõime suureneks. Teisel juhul saaks pinnas vabalt peenikese rostvõrgi külgede pealt üles kerkida. Antud juhul

käitus aga vaialus mõlema katse puhul sarnaselt, kuna nii pikkuses kui laiuses oli piisavalt varu. Allolevas koondtabelis 4.4 on toodud vaialuste roome- ja purunemiskiirid ehk koormusastmed mille rakendamiseni jõuti, enne kui pinnas jõudis roomepiirini, kus kandevõime ammendub, või purunemiseni. Nagu näha, kasvas kandevõime nii vaiade lisamisel kui ka vaiapaksuse suurendamisel, mis oli igati ootuspärane tulemus, kuna paksema vaia puhul on ka hõõrdele töötav külj suurema pindalaga.

KATSE	N_y (kN)	N_f (kN)
Rostvärk	22,5	30
Rostvärk +1 x 40/3 kiilvai	28	37,5
Rostvärk +1 x 40/6 kiilvai	30	40
Rostvärk + 2 x 40/3 kiilvai	35	45
Rostvärk + 2 x 40/6 kiilvai	41	50
Rostvärk + 3 x 40/3 kiilvai	42,5	55
Rostvärk + 3 x 40/6 kiilvai	47	57,5

N_y - roomepiir

N_f - purunemiskiir

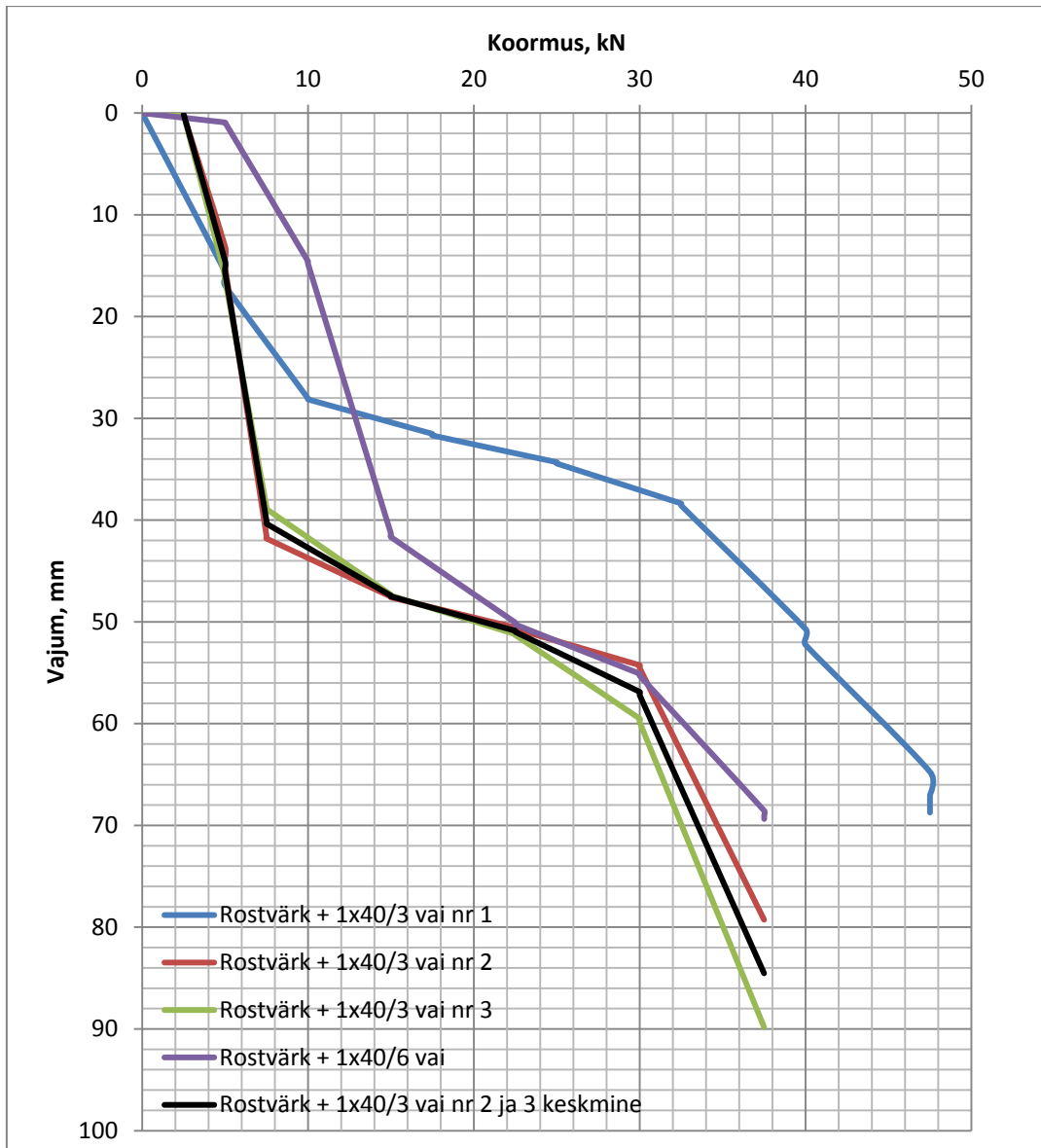
Koondtabel 4.4. Vaialuste ja rostvärgi roome- ja purunemiskiiride väärtused (kN).

Katse lõppedes koormuse eemaldamisel jälgiti ka pinnase elastset deformatsiooni, mis jäi vahemikku 1,3 kuni 3 mm. Elastne deformatsioon oli küllaltki otseses sõltuvuses pinnasele rakendatud maksimaalsest koormusest. Elastsed deformatsioonid on toodud tabelis 4.5.

KATSE	e. def
Rostvärk	1,5 mm
Rostvärk +1 x 40/3 kiilvai	2,1 mm
Rostvärk + 2 x 40/3 kiilvai	2,4 mm
Rostvärk + 3 x 40/3 kiilvai	2,7 mm

Tabel 4.5. Keskmised pinnase elastsed deformatsioonid koormuse alt vabastamisel.

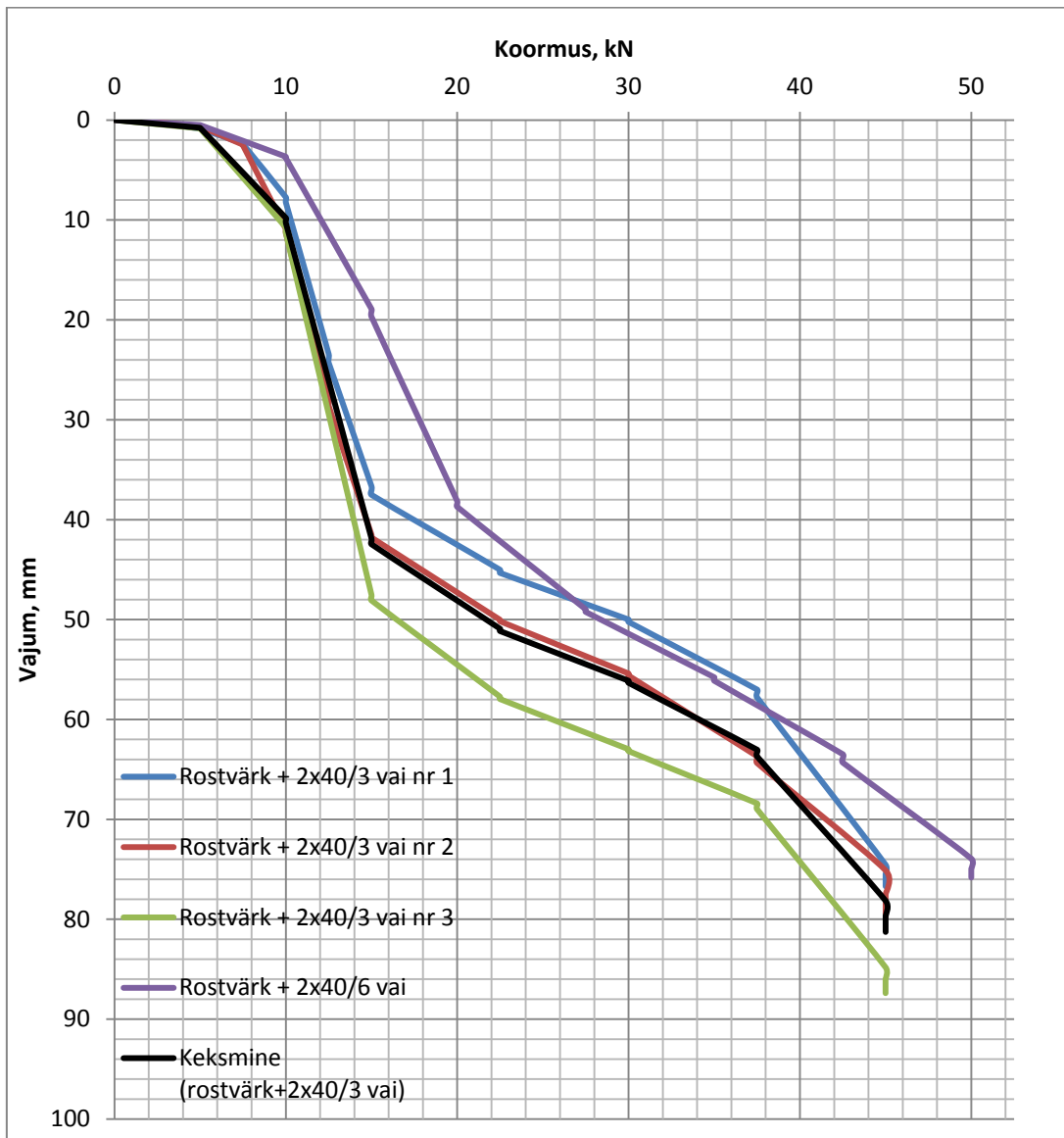
Järgnevalt on toodud ühe, kahe ja kolme kiilvaiaga vaialuste kandevõimekoondgraafikud. Iga katse koht on koostatud ka eraldi protokollid, mis leiduvad Lisas 1. Horisontaalteljel on vaialusele rakendatud koormus ja vertikaalteljel vundamendisüsteemi vajumid. Jooniselt 4.8 on näha, et ühe 3 cm paksuse vaia puhul saabub vaia roomepiir võrdlemisi kiiresti - 3,8 kN rakendatava koormuse juures.



Joonis 4.8. Ühe vaiaga rostvärkplaadi koormuskatsete tulemused. Vajumi sõltuvus vaialusele rakendatavast koormusest.

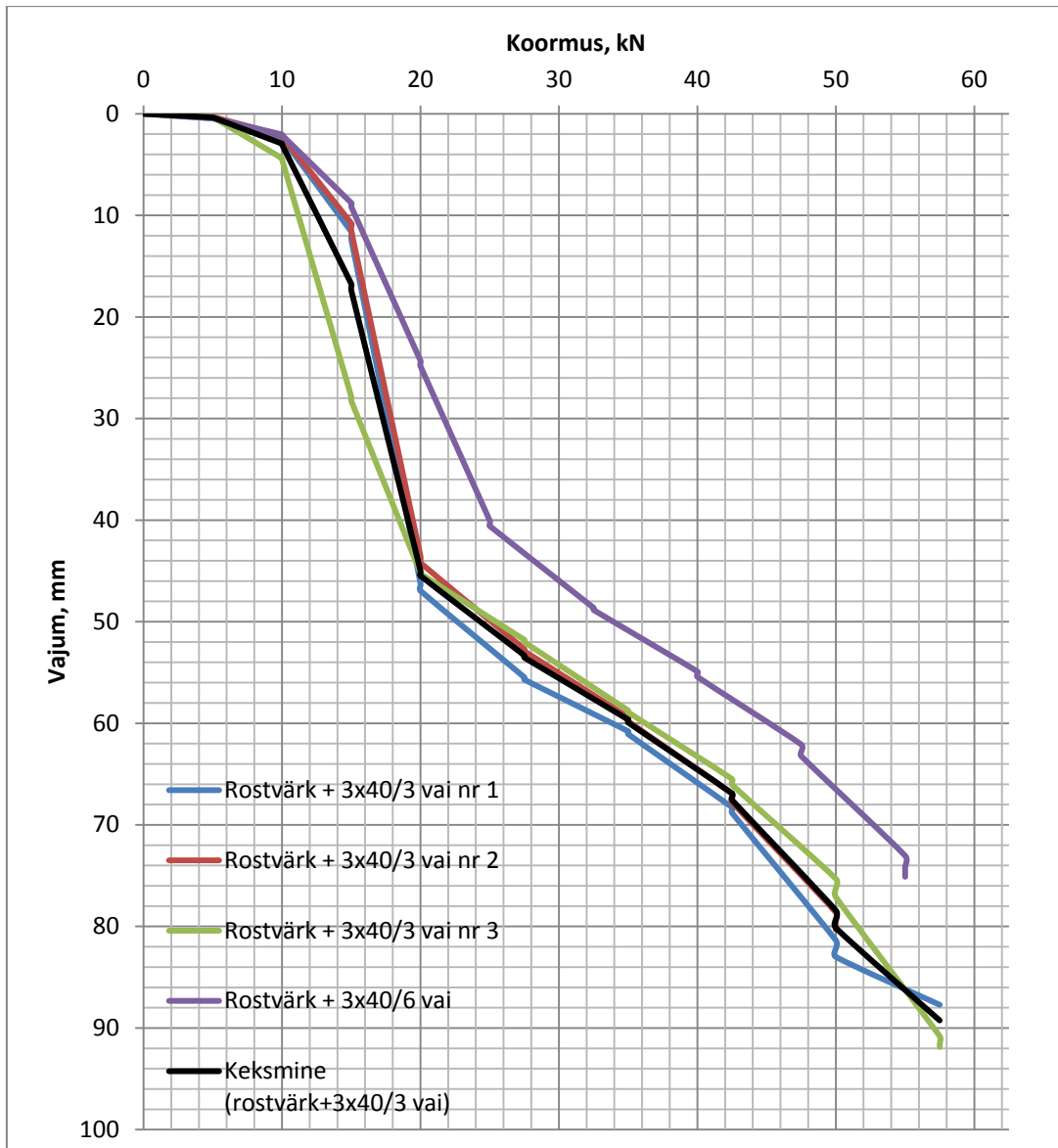
Roomepiirini jõudes hakkavad paigutised vajumite näol järsult suurenema, kuni kätte jõuab pinnase purunemisperiir. Sel hetkel jaotub koormus pinnaseni jõudnud plaadi ja vaia vahel ning tööle hakkab vaialus. Vajumid vähenevad ning süsteem suudab võtta uuesti vastu koormust. Koos töötava vaia ja rostvärgi roomepiiri saabub 30 kN koormusastme juures ning pärast roomepiiri algab taas lineaarne langus kuni pinnase purunemisperiirini 37,5 kN juures. Katse nr 1 on tehtud selgelt tihedamas liivas ning seetõttu võttis vaialus vastu kõrgemat koormust ning vajumid olid väiksemad. Kahekordse paksusega vaia ehk 6 cm paksuse vaia puhul on vaia roome- ja purunemisperiir kõrgema koormuse juures, kuid

vajumite osas on pilt peenema vaiaga üsna sarnane. Vaialuse kandevõime aga kasvab eeldatavasti ligilähedaselt üks ühele 3 ja 6 cm vaia kandevõime vahe arvelt.



Joonis 4.9. Kahe vaiaga rostvärkplaadi koormuskatsete tulemused. Vajumi sõltuvus vaialusele rakendatavast koormusest.

Joonis 4.9 on kujutatud kahe kiilvaiaga vaialuse kandevõimekõverad. Kahese 3 cm paksuste kiilvaiadega vaiagrupi kandevõime on 9 kN (roomepiir) ja purunemisiir 15 kN. Seejärel rakendub rostvärk ning toimub koormuste ümberjaotumine vaiadelt plaadile. Kandevõime paraneb märgatavalt. Vaialuse roomepiir jõuab kätte umbes 35 kN rakendatava koormuse juures ja purunemisiir 45 kN juures. Topelpaksusega vaia vastavad näitajad on mõlemad ligi 5 kN kõrgemal.

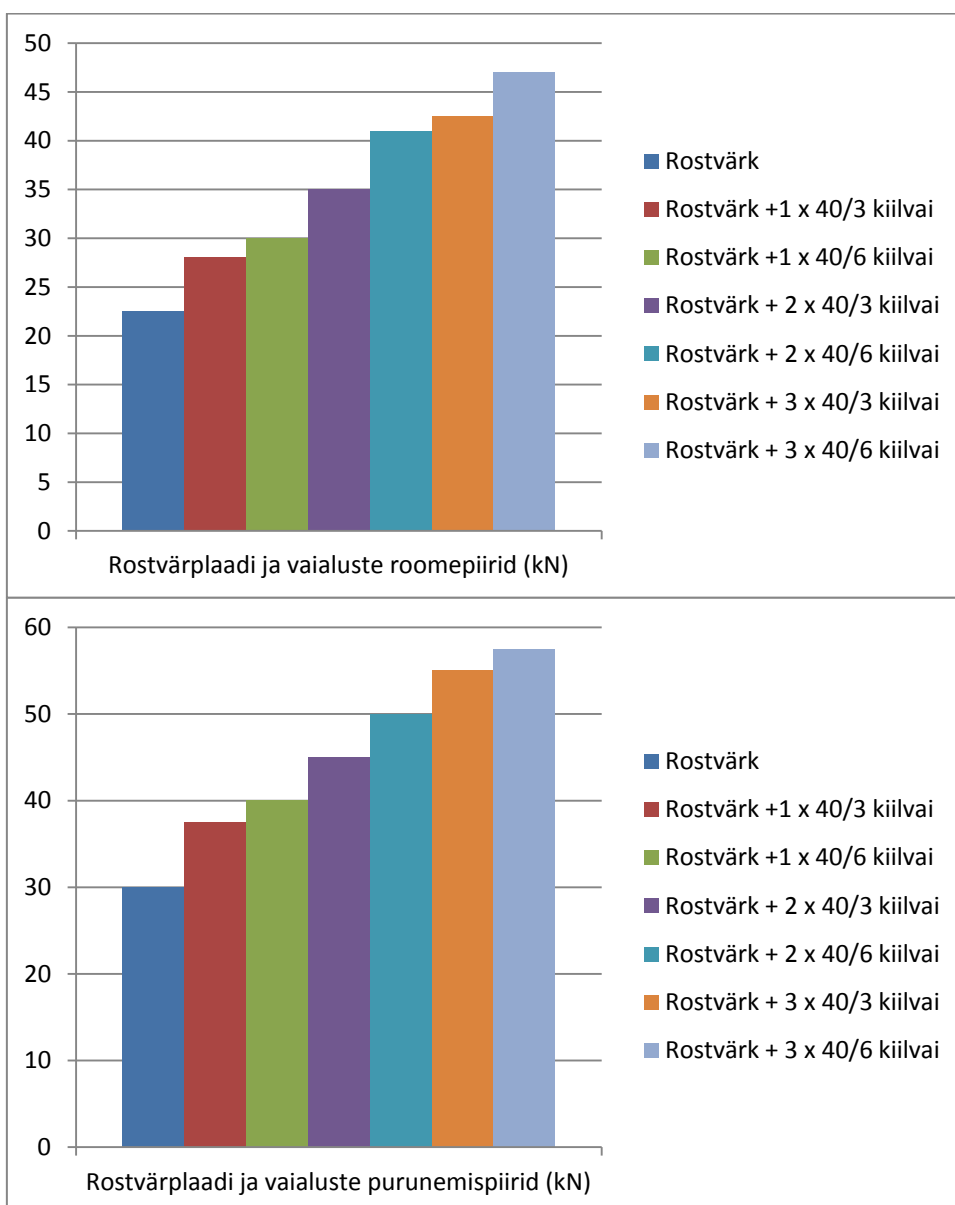


Joonis 4.10. Kolme vaiaga roostvärkplaadi koormuskatsete tulemused. Vajumi sõltuvus vaialusele rakendatavast koormusest.

Joonis 4.10 on toodud kolme kiilvaiaga vaialuse koormuskatsete tulemused. Kolme kiilvaiaga vaialuste puhul tulid katsed kõige ühtlasemate tulemustega ja 3 cm paksuste kiilvaiadega vaiagrupi roomepiir tuli vastu 13,5 kN koormuse juures ja pinnas purunes 20 kN juures. Seejärel toimus jällegi jõudude ümberkandumine roostvärgile, kuna plaadil tekkis kontaktpind pinnasega ning ta hakkas survet vastu võtma. Vaialuse roomepiiriks kujunes 42,5 kN ja purunemiskiiriks 55 kN. Kuue sentimeetri paksuste vaiade puhul jõudis vaiagrupi roomepiir kätte samal koormusel, kuid vajum oli väiksem. Vaiagrupi purunemiskiir saabus 25 kN koormuse juures. Vaialuse roomepiir oli 47 kN juures ja purunemiskiir 57,5 kN juures.

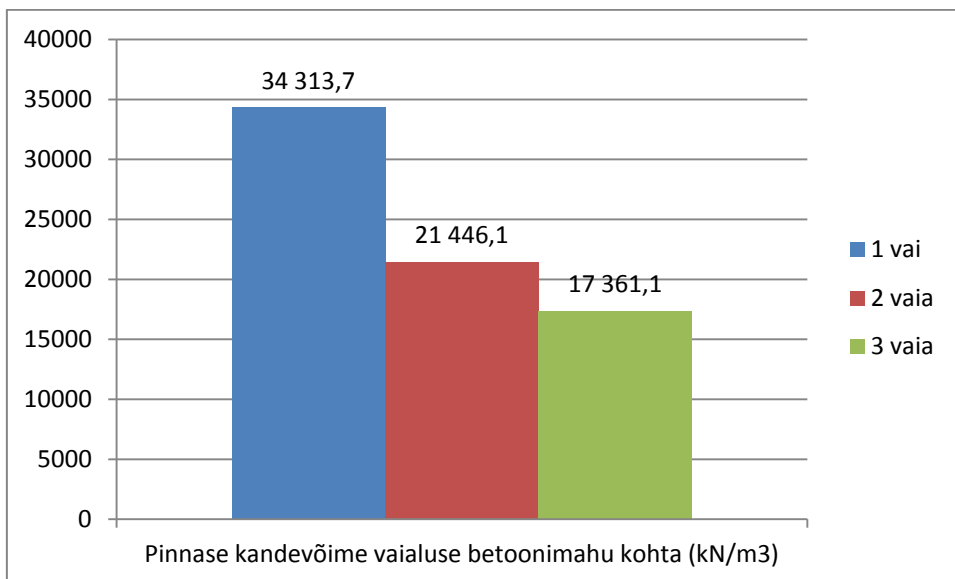
5. Järeldused, arutelu

Rostvärgi ja vaialuste roome- ja purunemiskiirid on toodud tulpdiaagrammidena joonisel 5.1. Võib teha järelduse, et erineva kiilvaiade arvuga vaialuste roome- ja purunemiskiirid on omavahel proportsioonis. Samuti saab väita, et vaialuse kandevõime suureneb vaiade arvu lisamisel ja vaia paksuse suurenemisel, mis on ka loogiline kuna kiilvaia kandevõime tuleneb põhiliselt tema külghõõrdest, mitte otsa vastupanust. Seega külje pindala suurendamine aitab oluliselt tõsta vaia kandevõimet ja seeläbi ka vaialuse kandevõimet.



Joonis 5.1 Rostvärgi ja vaialuste roome- ja purunemiskiirid.

Analüüsil keskendutakse peamiselt 40 cm pikkustele ja 3 cm laiustele kiilvaiadele. Joonisel 5.2 on näha tulpdiagramm, mis kirjeldab erinevate variatsioonidega vaialuste pinnase kandevõimet vaialuse betoonimahu kohta.



Joonis 5.2. Tulpdiagramm. Pinnase kandevõime vaialuse betoonimahu kohta.

Graafikult on näha, et väga suure panuse kandevõimesse lisab terasplaat ehk rostvärk ise. Iga vaia lisamisel suureneb betoonimaht, kuid kandevõime betoonimahu kohta väheneb, kuna plaadi kandevõime oli suurusjärgus 22,5 kN. Ühe kiilvaia lisamisel plaadile kasvab vaialuse kandevõime umbes veerandi võrra, kahe kiilvaia lisamisel üle 55% ja kolmese vaialuse puhul ligi 90%. Allolev tabel kirjeldab pinnase kandevõime kasvu kiilvaiade lisamisel vaialusesse 40 cm pikkuste ja 3 cm laiuste kiilvaiamudelite puhul (Tabel 5.1).

KATSE	N_y (kN)	Δ (kN)
Rostvärk	22,5	-
Rostvärk + 1 x 40/3 kiilvai	28	5,5
Rostvärk + 2 x 40/3 kiilvai	35	7
Rostvärk + 3 x 40/3 kiilvai	42,5	7,5

N_y - roomepiir, kN
 Δ - kandevõime muutus, kN

Tabel 5.1 Pinnase kandevõime kasv 40/3 cm kiilvaiade lisamisel vaialusele.

Ühe vaia lisamine rostvärgile kasvatab kandevõimet 5,5 kN võrra. Kuna üksiku vaia puhul mingit vaiadevahelist koosmõju ei teki, võib väita, et ühe kiilvaiaga vaialuse kandevõime

on võrdne plaadi ja vaia summaarse kandevõimega. Väite kinnitamiseks tuleks uurida täpsemalt sarnase üksikvaimudeli kandevõimet.

Lisades ühe vaiaga vaialusele veel ühe kiilvaia, saame kahe vaiaga vaialuse, mille kandevõime kasvab võrreldes ühe vaiaga vaialusega 7 kN võrra. Arvatavasti on kasv siin jõudsam, kuna vaiade koosmõjul tugevneb vaialuse all olev vaiadevaheline pinnas, mis annab mõningase kandevõime suurenemise. Võrreldes tavalise rostvärgiga kannab selline kahevaialine vaialus juba 12,5 kN suuremat koormust.

Kui lisada kahevaialisele vaialusele veel ühe kiilvaia, kasvab vaialuse kandevõime veel 7,5 kN võrra. Kahe ja kolme vaiaga vaialuse puhul on alus paremini fikseeritud ning vaiadevaheline pinnas tiheneb rohkem. See tagab suurema kandevõime kasvu. Vaiatsentrite vahele peaks jääma aga ka mingi konkreetne minimaalne vahekaugus. Kui vaiad on üksteisele liiga lähedal, ei hakka nad ühtselt tööle ja kandevõime kasv väheneb. Seda tuleks eraldi uurida. Kolme vaiaga vaialus kannab seega pea kaks korda suuremat koormust kui plaat üksi.

Kui vaadelda sama nähtust 6 cm laiuste vaiade puhul, kinnitab see antud teooriat ja seos tuleb tugevamalt esile.

KATSE	N_y (kN)	Δ (kN)
Rostvärk	22,5	-
Rostvärk +1 x 40/6 kiilvai	30	7,5
Rostvärk + 2 x 40/6 kiilvai	41	11
Rostvärk + 3 x 40/6 kiilvai	47	6

N_y - roomepiir, kN

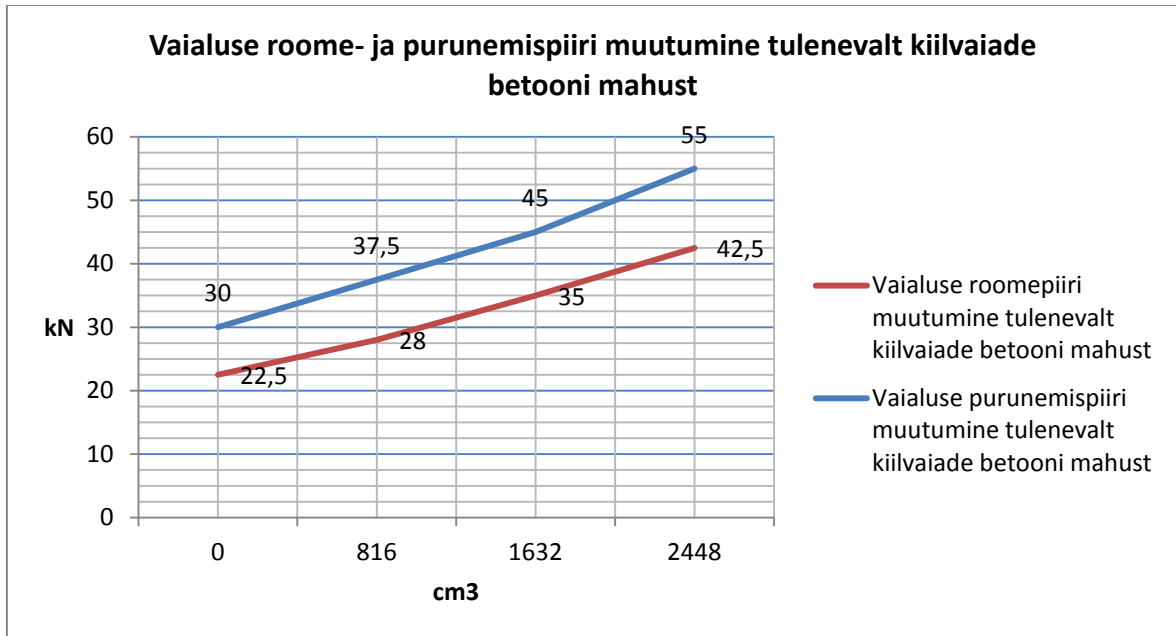
Δ - kandevõime muutus, kN

Tabel 5.2 Pinnase kandevõime kasv 40/6 cm kiilvaiade lisamisel vaialusele.

Lisades rostvärgile ühe 6 cm paksuse kiilvaia, kasvab kandevõime 7,5 kN ehk kolmandiku võrra. Ilmselt on tegu 6 cm laiuse ja 40 cm pikkuse vaimudeli kandevõimega.

Lisades rostvärgile kaks vaia, kasvab vaialuse kandevõime võrreldes rostvärgi kandevõimega 82% ja võrreldes ühe vaiaga vaialusega tervelt 11 kN. Kui 3 cm paksuste vaimudelitel puhul tõi kahe kiilvaiaga vaialus endaga kaasa 27% kasvu võrreldes ühe vaia lisamisel rostvärgile täheldatud kasvuga, siis 6 cm paksuse vaia puhul on vastav näitaja 37%.

Kolme kiilvaiaga vaialuse puhul on aga hästi näha, kuidas kandevõime kasv langeb. Kolmene vaialus kannab küll 15% võrra suuremat koormust kui kahene vaialus, kuid kasv on märgatavalt vähenenud. Ilmselt on vaiatsentrite vahekaugused liiga väikesed ning vaiad ei hakka eraldi tööle.



Joonis 5.3. Vaialuse roome- ja purunemiskiiri muutumine tulenevalt 40/3 cm kiilvaiade betooni mahust.

Joonis 5.3 näitab, et pinnase kandevõime vaialuse all muutub küllaltki lineaarselt betoonimahu suurenedes. Kandevõime tõusu hääbumine toimub ilmselt siis, kui vaiad üksteisele liiga lähedale paigutada. Sel juhul ei pruugi tuua täiendav betoonikulu soovitud kandevõime suurenemist.

Huvitav tähelepanek on, et purunemiskiiri ja roomepiiri vahe suureneb betoonimahu kasvades. Seega suudavad vaiad vaialust kui süsteemi piisavalt stabiliseerida, et pärast kandevõime kaotamist purunemiskiiri järjest kauem vältida. Kui plaadi puhul on roome- ja purunemiskiiri suhe 0,75, siis ühe vaia puhul on suhtarv 0,74 ja kahe ning kolme vaia puhul 0,77. See tähendab, et vaia roomepiir ja purunemiskiir on omavahel pidevalt proportsioonis ning ka vahe roome- ja purunemiskiiri vahel kasvab pidevalt proportsionaalselt.

KOKKUVÕTE

Vaialus aitab kontrollida vajumeid paremini kui plaatvundamendi puhul ning on ökonoomsem kui vaivundament. Kiilvaiad sobivad hästi vajumeid vähendavateks vaiadeks, mis aitavad vundamenti stabiliseerida, kuna on lühikesed ja mahult väikesed, kuid piisava kandevõimega. Selline vundamendisüsteem aitab rahuldada nii kande- kui ka kasutuspiirseisundi nõuded. Vaialusena suudab vundament võtta vastu veelgi suuremaid koormuseid, kui plaat- või vaivundamendi puhul.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli võrrelda plaadi, kiilvaiade ja erineva vaiarvuga vaialuste kandevõimeid. Püstitatud eesmärgi jaoks teostati järgmised tööd:

- Liivakasti ettevalmistamine.
- Liiva koostise analüüsimine, lõimise määramine ja pinnase liigitus. Laboritulemuste analüüsimine.
- Vähendatud kiilvaimudelite ja rostvarkplaadi valmistamine.
- Katseprogrammide väljatöötamine.
- Katseseadmete ettevalmistamine, mõõteseadmete paigaldamine.
- Katsekehadega koormuskatsete läbiviimine.
- Tulemuste ülesmärkimine ja analüüsimine.

Kokku teostati kuusteist laboratoorset katset, millest kolme puhul uuriti vaid plaadi kandevõimet, kaheteistkümne puhul vaiagrupi ligikaudset kandevõimet ja vaialuse kandevõimet ühe, kahe ja kolme vaia lisamisel rostvarkplaadile, ja üks katse tehti 90 kraadi keeratud kiilvaiaga plaadi all. Kaheteistkümnest vaialuse katsest üheksa tehti 30 mm paksuste kiilvaia mudelitega ja kolm katset 60 mm paksuste mudelitega. Uuriti vaiade lisamise mõju kandevõimele ja vajumitele ning vaialuse ja plaadi ning vaiagrupi kandevõime erinevuseid. Katsed viidi läbi suurendades koormusastmeid iga 10 minuti järel.

Katsetulemused näitasid, et vaialus võtab vastu rohkem koormust kui vaiad või plaat eraldi. Vaiade kandevõime ammendus roomeläve saavutamisel, peale mida vajus vundament, kuni rostvarki pinnaseni jõudmiseni. Seejärel rakendub tööle rostvarkplaat, mis saavutab kontaktpinna pinnasega ja võtab vastu oluliselt suuremat koormust ning

koormus vaialuses jaotus ühtlaselt vaiade ja plaadi vahel. Kokkuvõttes võib järeldada, et kiilvaialuse kandevõime on suurem, kui analoogsel kiilvaivundamendil, kus rostvärk ei võta survet vastu. Samuti annab vaia või vaiagrupi lisamine rostvärgi alla tulemuseks kandevõime ja vajumite paranemise võrreldes vaid plaatvundamendiga.

Antud teema väärrib põhjalikumaid katsetusi paljude erinevate variatsioonidega. Muuta tuleks põhilisi parameetreid, millest koormusjaotus vaialuses oleneb: vaiade arv vaiagrupis, vaiagruppide asetus, vaiatsentrite vahekaugus, vaiade mõõtmed, plaadi küljepikkus ja paksus. Suure hulga variatsioonide ja tulemuste põhjal saaks välja pakkuda empiirilise valemi kiilvaialuse kandevõime arvutamiseks. Samuti tuleks teha katseid erinevates pinnastes ja uurida veel lähemalt kiilvaiu, mille kasutamine ehituses üha populaarsemaks muutub, kuid mille kohta on suhteliselt vähe uuringuid läbi viidud. Kiilvaiade perspektiivikamad uurimuvõimalused on toodud välja peatükis 1.6.

TÄNUAVALDUSED

Töö autor soovib tänada juhendajaid Mait Metsa ja Villu Leppikut meeldiva koostöö eest. Samuti tänab autor ettevõtet AS Kurmik ning selle esindajat Roomelt Needot laboratoorsete katsete rahastamise ning katsemudelite valmistamise eest.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Needo R. Kiilvaivundamendid - Mis oli, on ja mis võiks olla. Doktorikursuse essee teadusfilosoofias. Tallinna Tehnikaülikool. 2008.
- [2] Omeman Z. M. Load sharing of piled-raft foundations in sand subjected to vertical loads. A Ph.D thesis in the department of civil and environmental engineering. Concordia University. 2012.
- [3] Alnuiam A.M., El Naggar H. ja El Naggar M.H. Performance of piled-raft system under axial load - *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* . lk 2663-2666. 2013.
- [4] T. Kull. Vaialuse kandevõime. Magistritöö Maaehituse erialal. Eesti Maaülikool. 2014.
- [5] de Sanctis L., Mandolini A. Bearing capacity of piled raft on soft clay soils - *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. volume 132, issue 12. 2006.
- [6] Mandolini A., Di Laora R., Mascarucci Y. Rational design of piled raft - *ScienceDirect, Procedia Engineering*, volume 57. lk 45-52. 2013.
- [7] Bureau M.B.. Foundation for high rise buildings - *The Masterbuilder*. lk 110-116. 2012.
- [8] Reddy. K. S. N. Piles as settlement reducers in raft. Ph.D thesis. Nanyang Technological University, School of Civil and Environmental Engineering. 2010.
- [9] T. Masso. Ehituskonstruktori käsiraamat. lk 212-250. 2012
- [10] V. Jaanisoo. TTÜ pinnasemehaanika kursuse konspekt, peatükk 5: Vaivundamendid.
- [11] M. Mets. EMÜ pinnasemehaanika kursuse konspekt.

- [12] Nguyen D. D. C., Jo S.-B., Kim D.-S. Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects - *ScienceDirect, Computer and Geotechnics. volume 47*. lk 16-27. 2013.
- [13] Soonurm E. ja Vilo A. Ehitusgeoloogia kogumik V. Lk 42-61 ja 138- 156. 1991.
- [14] ENSV Ehituskomitee. Kiilvaivundamentide arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioon VEN 57-86. 1986.
- [15] Mets M. Kiilvaiade normatiivse kandevõime graafik. 1983.
- [16] Goto S., Aoyama S., Liu B., Towhata I., Takita A., Renzo A. A. Model loading tests in large soil tank on group behavior of piles - *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*. lk 2371-2374. 2013.
- [17] Patil J. D., Vasanwala S. A., Solanki C. H.. An experimental investigation on behavior of piled raft foundation - *International Journal of geomatics and geosciences. volume 5. issue no 2*. lk 300-311. 2014.
- [18] Bajad S. P. ja Sahu R.B. An experimental study on the behaviour of vertically loaded piled raft on soft clay - *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India*. lk 85-91. 2008.

LISAD

Lisa 1. Katsete protokollid. Kandevõimegraafikud

Staatilise koormuskatse nr	Nimetus
1	Plaat 1
2	Plaat 2
3	Plaat 3
4	Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 1
5	Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 2
6	Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 3
7	Rostvärk + 2 40/3 cm vai nr 1
8	Rostvärk + 2 40/3 cm vai nr 2
9	Rostvärk + 2 40/3 cm vai nr 3
10	Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 1
11	Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 2
12	Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 3
13	Rostvärk + 1 40/6 cm vai
14	Rostvärk + 2 40/6 cm vai
15	Rostvärk + 3 40/6 cm vai
16	Rostvärk + 1 40/3 cm vai 90 kraadi keeratud

Staatiline koormuskatse nr 1 Plaat 1

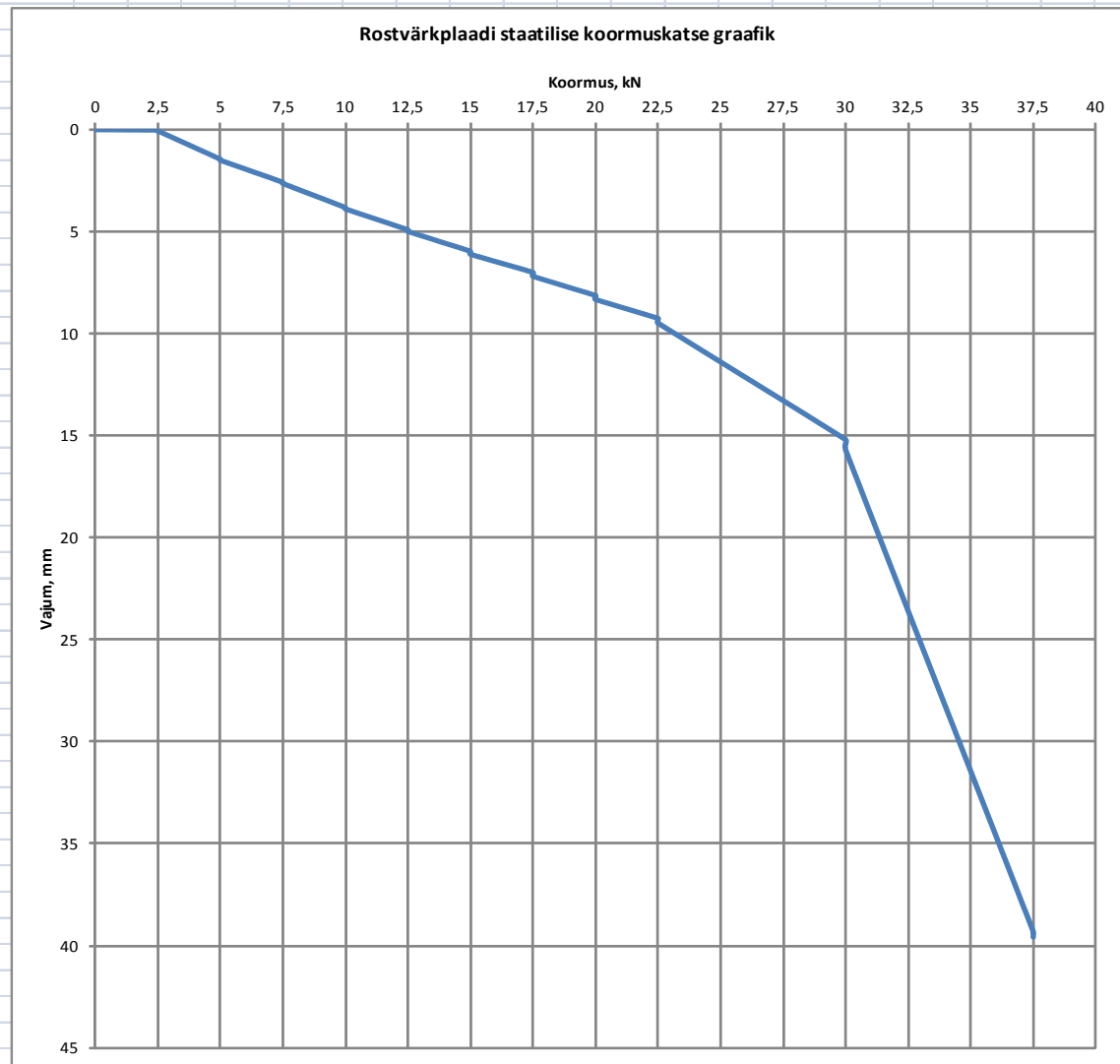
algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar			25 bar			30 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN			12,5 kN			15 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
48,34	48,36	48,39	48,39	49,78	49,81	49,83	50,91	50,95	50,97	52,15	52,22	52,22	53,24	53,27	53,32	54,29	54,35	54,44
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5	15	15	15
0	0,02	0,05	0,05	1,44	1,47	1,49	2,57	2,61	2,63	3,81	3,88	3,88	4,9	4,93	4,98	5,95	6,01	6,1

35 bar			40 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
17,5 kN			20 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
55,33	55,43	55,52	56,46	56,54	56,65	57,58	57,67	57,81	63,52	63,71	64,02	87,64	87,73	87,9
17,5	17,5	17,5	20	20	20	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5	37,5	37,5
6,99	7,09	7,18	8,12	8,2	8,31	9,24	9,33	9,47	15,18	15,37	15,68	39,3	39,39	39,56

Elastne deformatsioon 1,5 mm

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	2
20-30	5	5,5
30-40	10	11
40-50	16	16
50-60	22	22



Staatiline koormuskatse nr 2

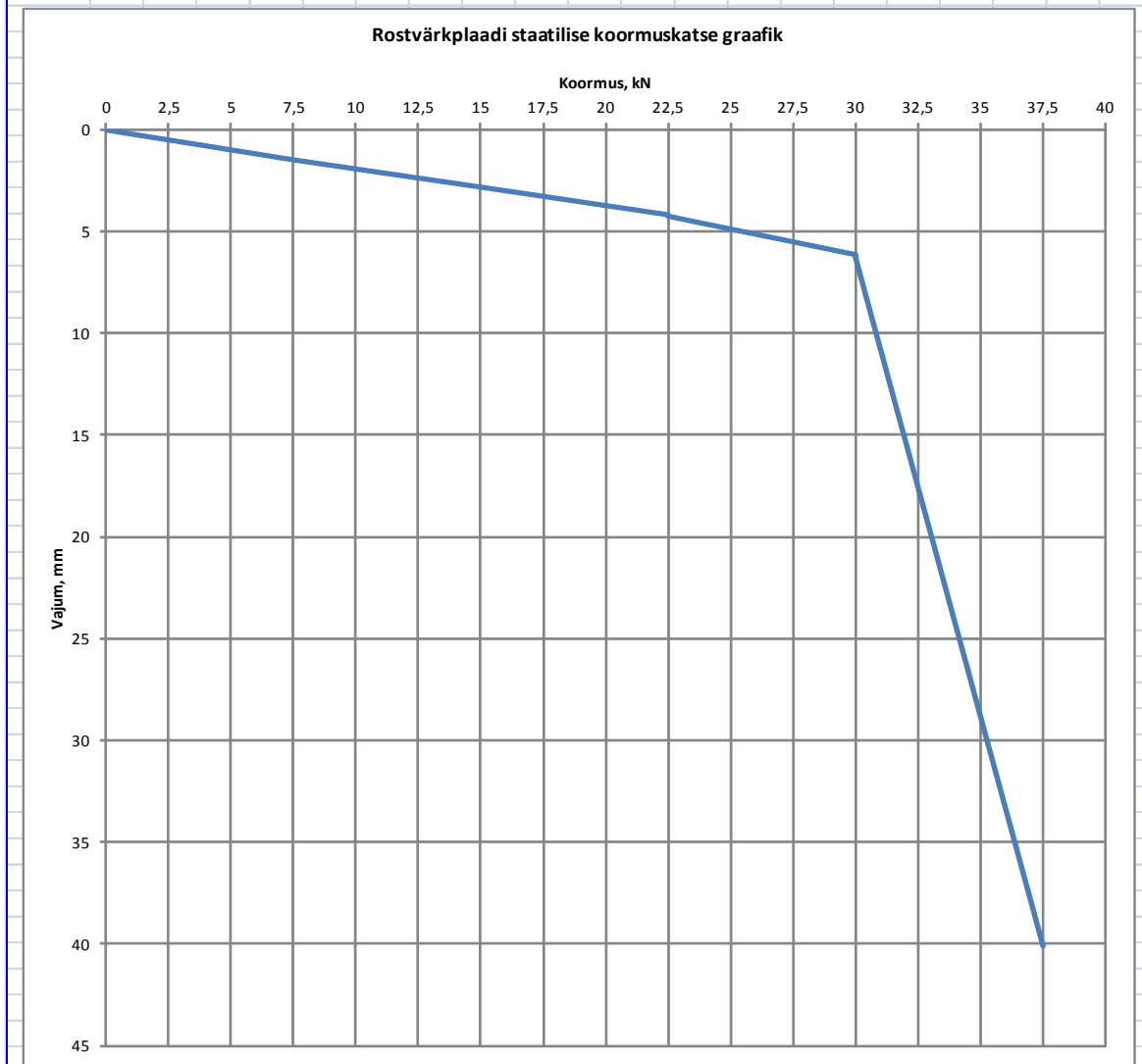
Plaat 2

algnäit mm	15 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
	7,5 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
14,93	16,4	16,4	16,4	17,74	17,74	17,74	19,1	19,13	19,17	21,06	21,1	21,22	55,03		
0	7,5	7,5	7,5	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5		
0	1,47	1,47	1,47	2,81	2,81	2,81	4,17	4,2	4,24	6,13	6,17	6,29	40,1		

Elastne deformatsioon 1,5 mm

Penetromeetri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	1
20-30	3	3
30-40	4	6
40-50	14,5	15
50-60	21	20



Staatiline koormuskatse nr 3

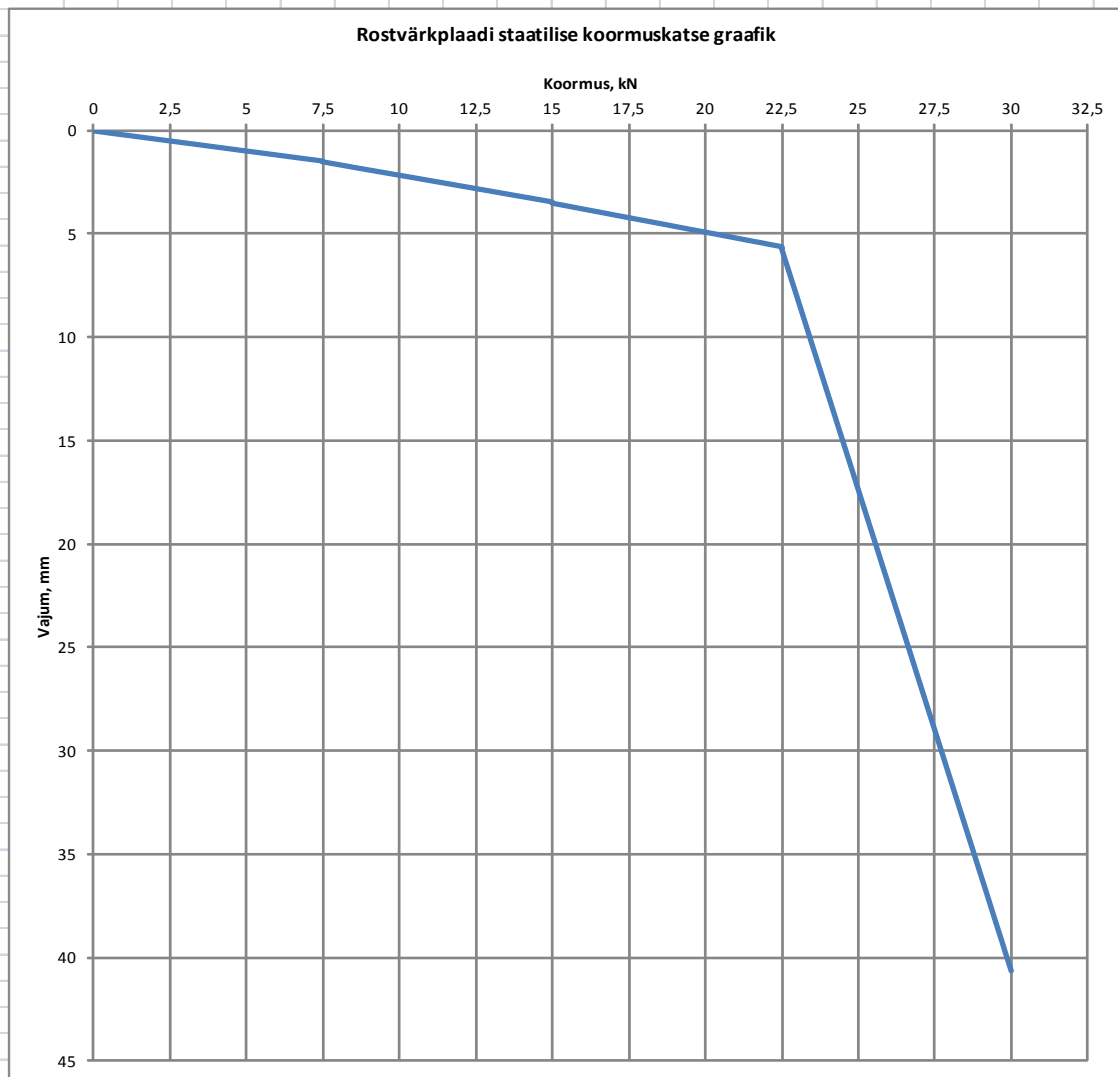
Plaat 3

algnäit mm	15 bar			30 bar			45 bar			60 bar		
	7,5 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
68,34	69,8	69,8	69,84	71,78	71,84	71,84	73,95	74,01	74,07	109		
0	7,5	7,5	7,5	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30		
0	1,46	1,46	1,5	3,44	3,5	3,5	5,61	5,67	5,73	40,66		

Elastne deformatsioon 1,5 mm

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	2
20-30	4,5	6
30-40	8	9
40-50	13	15
50-60	19	23



Staatiline koormuskatse nr 4

Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 1

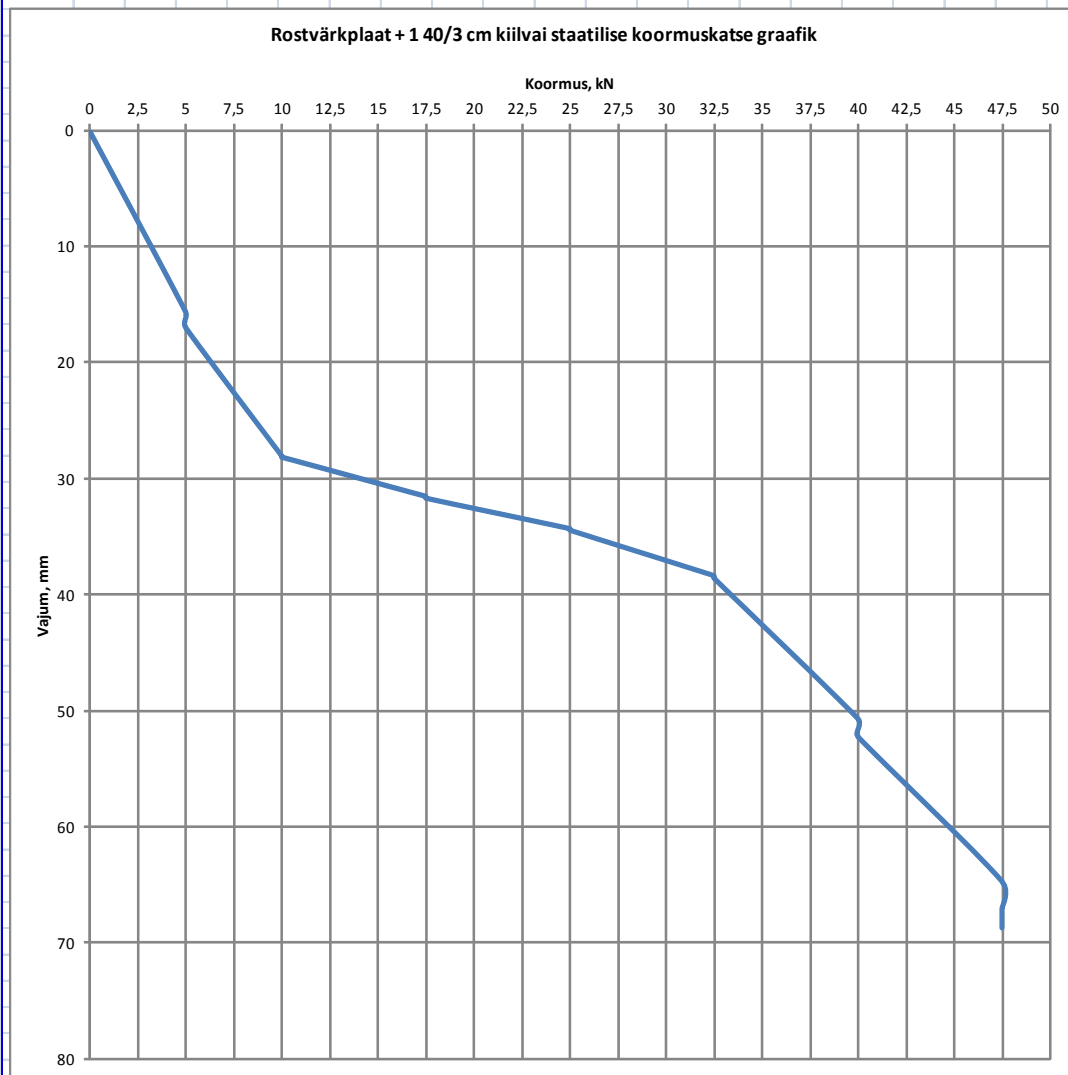
algnäit mm	10 bar			20 bar			35 bar			50 bar			65 bar			80 bar			95 bar		
	5 kN			10 kN			17,5 kN			25 kN			32,5 kN			40 kN			47,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
37,26	52,86	53,42	54,22	65,3	65,36	65,4	68,78	68,82	68,94	71,57	71,65	71,7	75,62	75,72	75,83	87,96	88,89	89,52	102	104,3	106
0	5	5	5	10	10	10	17,5	17,5	17,5	25	25	25	32,5	32,5	32,5	40	40	40	47,5	47,5	47,5
0	15,6	16,16	16,96	28,04	28,1	28,14	31,52	31,56	31,68	34,31	34,39	34,44	38,36	38,46	38,57	50,7	51,63	52,26	64,74	67,07	68,74

Elastne deformatsioon 2mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeetri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	2
20-30	3,5	5
30-40	7	8
40-50	14	16
50-60	21	23



Staatiline koormuskatse nr 5 Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 2

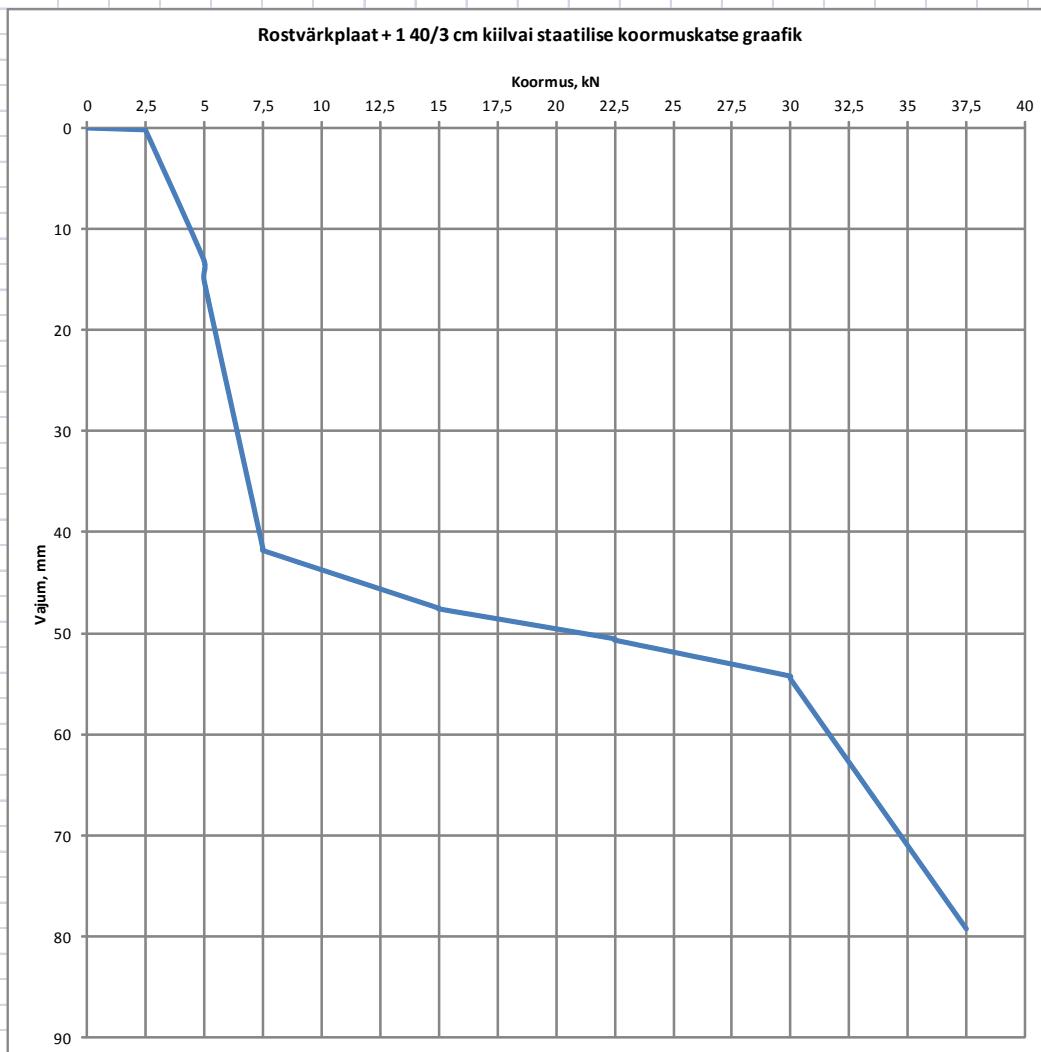
algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
51,18	51,36	51,36	51,36	64,29	65,48	66,29	92,73	92,87	92,99	98,7	98,73	98,77	101,7	101,8	101,9	105,4	105,6	105,7	130,4	-	
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5		
0	0,18	0,18	0,18	13,11	14,3	15,11	41,55	41,69	41,81	47,52	47,55	47,59	50,55	50,61	50,68	54,25	54,38	54,53	79,26		

Elastne deformatsioon 2mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	2
20-30	3,5	4
30-40	5	7
40-50	14	15
50-60	20	24



Staatiline koormuskatse nr 6

Rostvärk + 1 40/3 cm vai nr 3

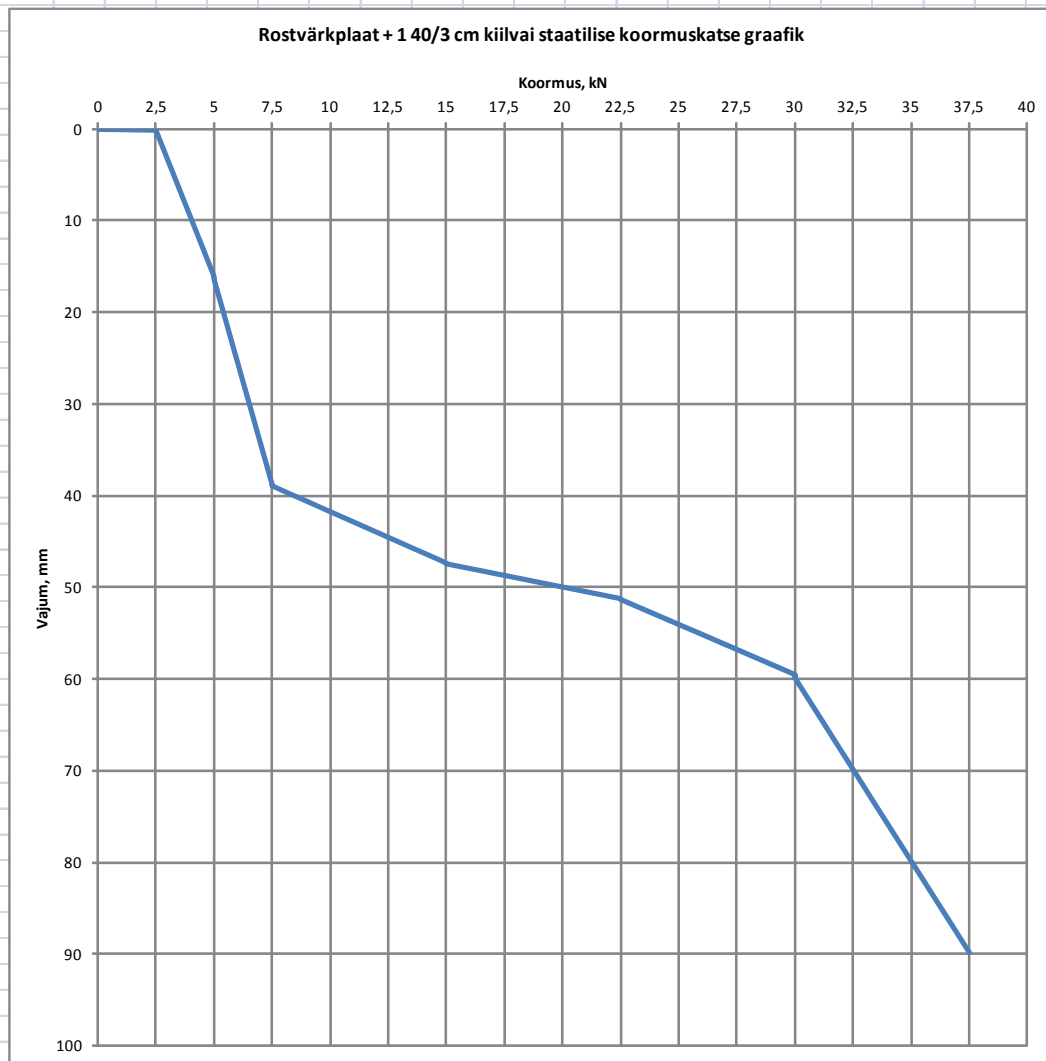
algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
41,73	41,82	41,82	41,82	57,75	57,86	58,05	80,47	80,56	80,64	89,06	89,1	89,14	92,94	92,99	93,03	101,2	101,4	101,6	131,5		
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5		
0	0,09	0,09	0,09	16,02	16,13	16,32	38,74	38,83	38,91	47,33	47,37	47,41	51,21	51,26	51,3	59,5	59,7	59,86	89,81		

Elastne deformatsioon 2,2mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3	2
20-30	4	4
30-40	8	9
40-50	11	13
50-60	17	19



Staatiline koormuskatse nr 7

Rostvärk + 2 40/3 cm vai nr 1

algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar			25 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN			12,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
43,46	43,72	43,72	43,72	44,32	44,32	44,32	45,81	45,85	45,87	51,18	51,5	51,7	66,87	67,35	67,75
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5
0	0,26	0,26	0,26	0,86	0,86	0,86	2,35	2,39	2,41	7,72	8,04	8,24	23,41	23,89	24,29

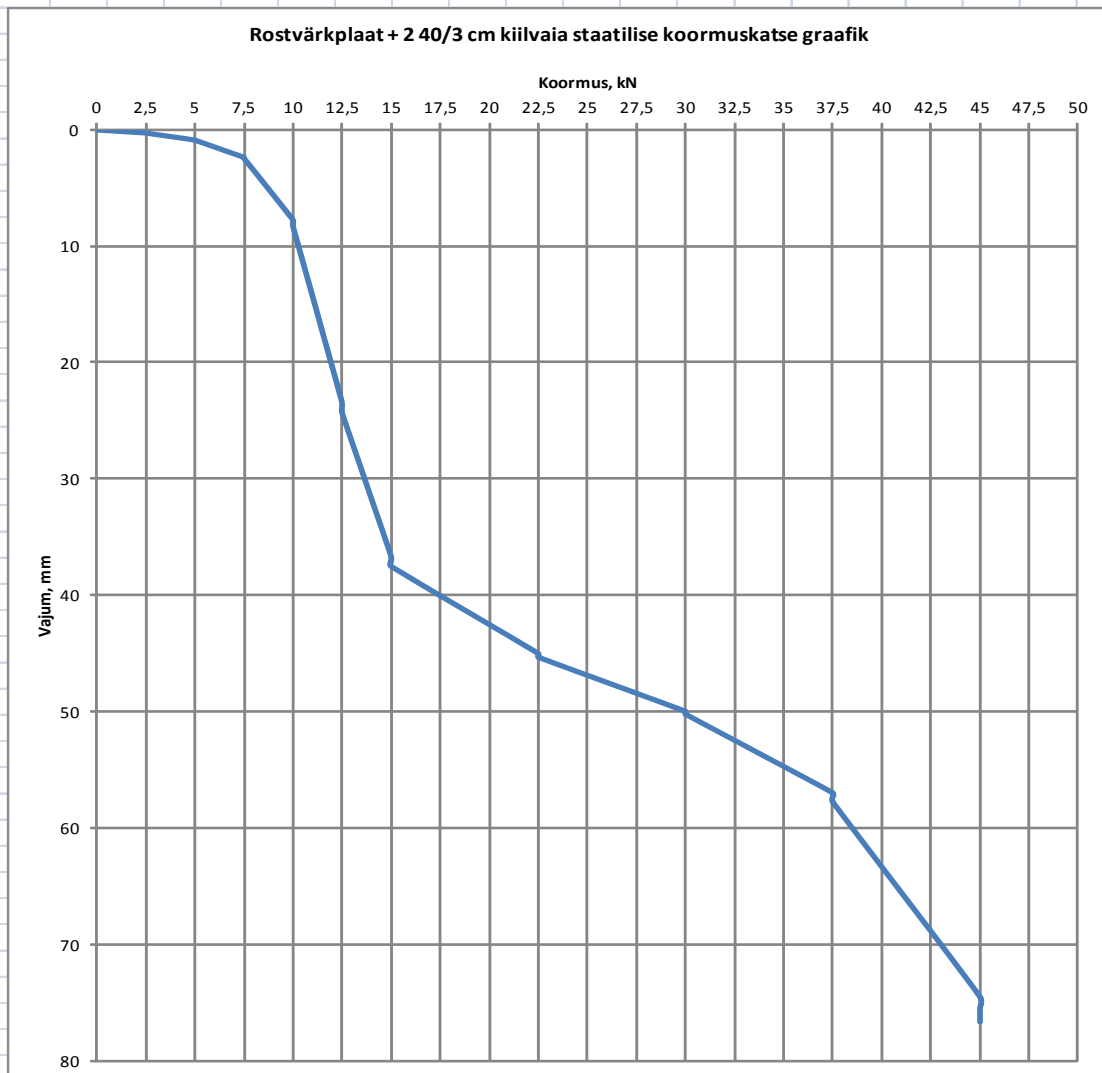
30 bar			45 bar			60 bar			75 bar			90 bar		
15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN			45 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
80,11	80,55	80,98	88,48	88,67	88,8	93,46	93,58	93,7	100,5	100,8	101,3	118	118,9	120,2
15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5	37,5	37,5	45	45	45
36,65	37,09	37,52	45,02	45,21	45,34	50	50,12	50,24	57,01	57,34	57,8	74,55	75,47	76,71

Elastne deformatsioon 2,7mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	3
20-30	4,5	4
30-40	6	7
40-50	14	15
50-60	20	24



algnäit mm	5 bar			10 bar			15 bar			20 bar			25 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			10 kN			12,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
49,89	50,1	50,1	50,1	50,51	50,52	50,52	52,36	52,4	52,43	60,79	60,93	61,19	77,97	78,27	78,5
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	10	10	10	12,5	12,5	12,5
0	0,21	0,21	0,21	0,62	0,63	0,63	2,47	2,51	2,54	10,9	11,04	11,3	28,08	28,38	28,61

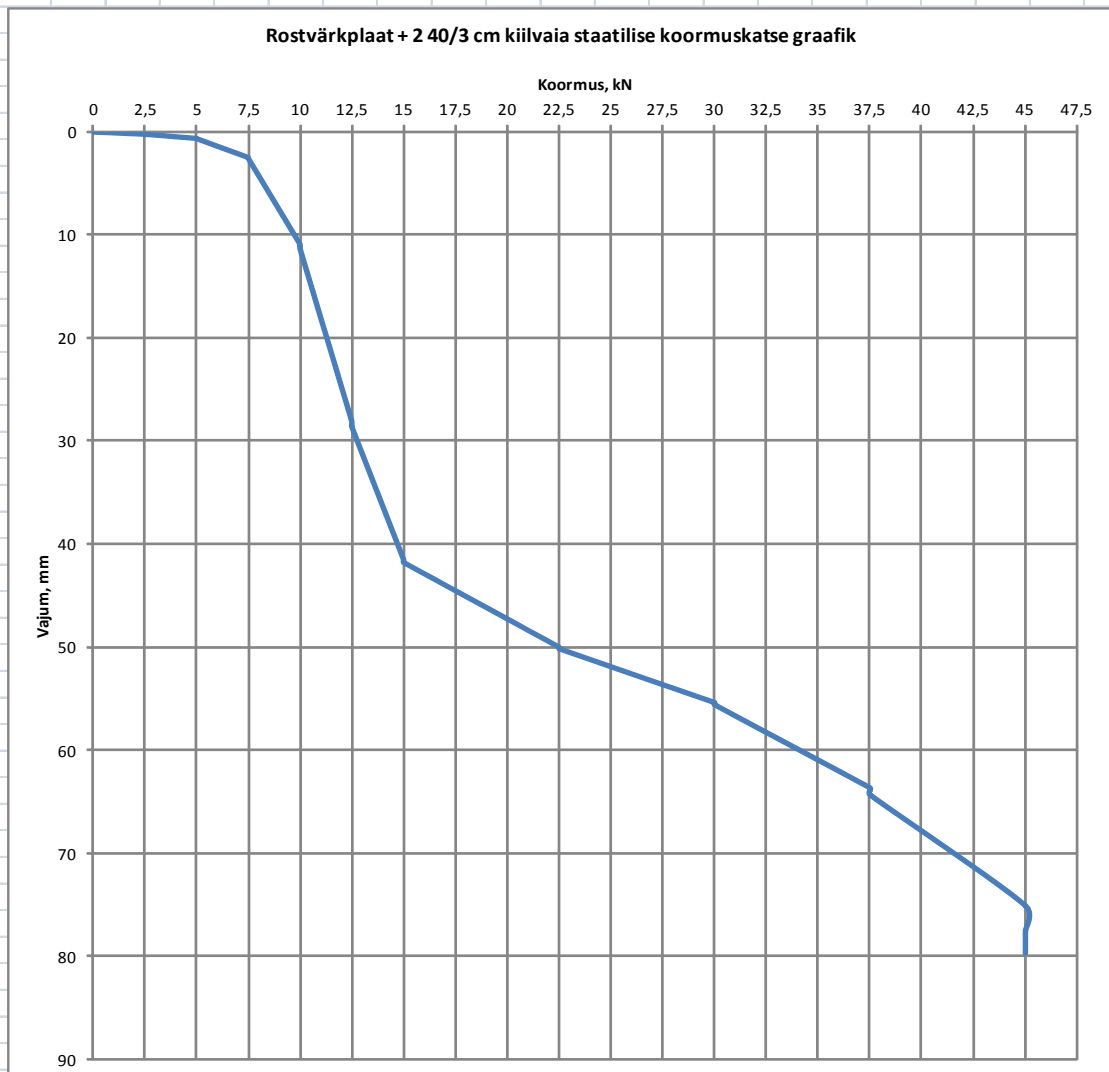
30 bar			45 bar			60 bar			75 bar			90 bar		
15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN			45 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
91,41	91,53	91,68	99,91	99,97	100,1	105,3	105,4	105,5	113,6	113,8	114,3	125	127,4	129,6
15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5	37,5	37,5	45	45	45
41,52	41,64	41,79	50,02	50,08	50,17	55,4	55,47	55,61	63,68	63,9	64,36	75,11	77,53	79,73

Elastne deformatsioon 2,4mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3,5	3,5
20-30	5	5,5
30-40	7	11
40-50	15	20
50-60	27	30



Staatiline koormuskatse nr 9

Rostvärk + 2 40/3 cm vai nr 3

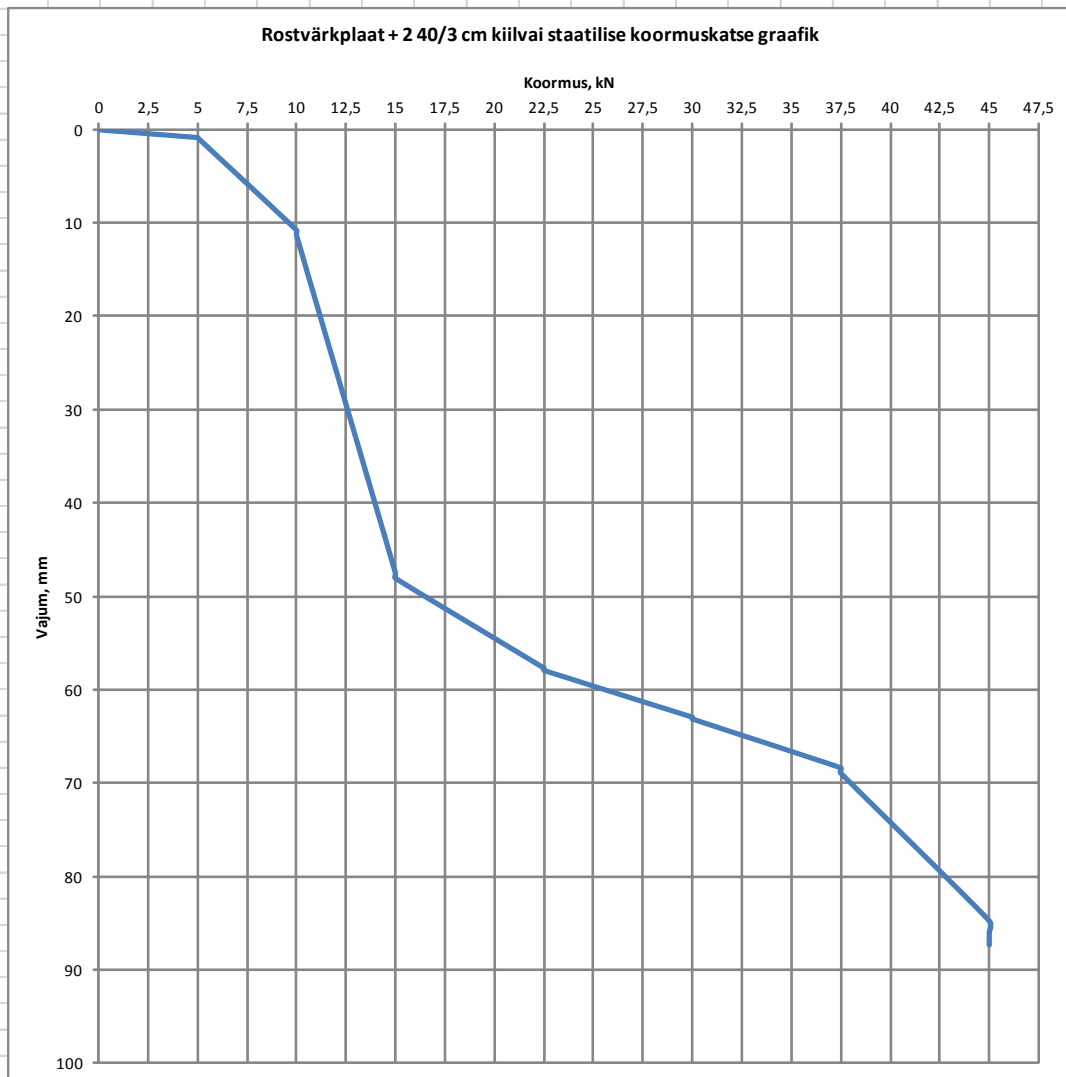
algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar			90 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN			45 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
60,6	61,43	61,43	61,44	71,35	71,67	71,9	108,1	108,3	108,7	118,3	118,4	118,6	123,6	123,6	123,8	129	129,3	129,6	145,4	146,6	148
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5	37,5	37,5	45	45	45
0	0,83	0,83	0,84	10,75	11,07	11,3	47,52	47,72	48,09	57,72	57,83	57,96	62,98	63,04	63,17	68,4	68,65	68,98	84,81	85,98	87,4

Elastne deformatsioon 2,2mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2,5	2
20-30	5	5
30-40	7	7
40-50	7	8
50-60	7	8



Staatiline koormuskatse nr 10

Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 1

algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			40 bar			55 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			20 kN			27,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
63,39	63,85	63,85	63,85	65,71	65,77	65,78	75	75,34	75,76	109,6	109,9	110,4	118,9	119	119,1
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20	27,5	27,5	27,5
0	0,46	0,46	0,46	2,32	2,38	2,39	11,61	11,95	12,37	46,21	46,46	46,96	55,47	55,6	55,71

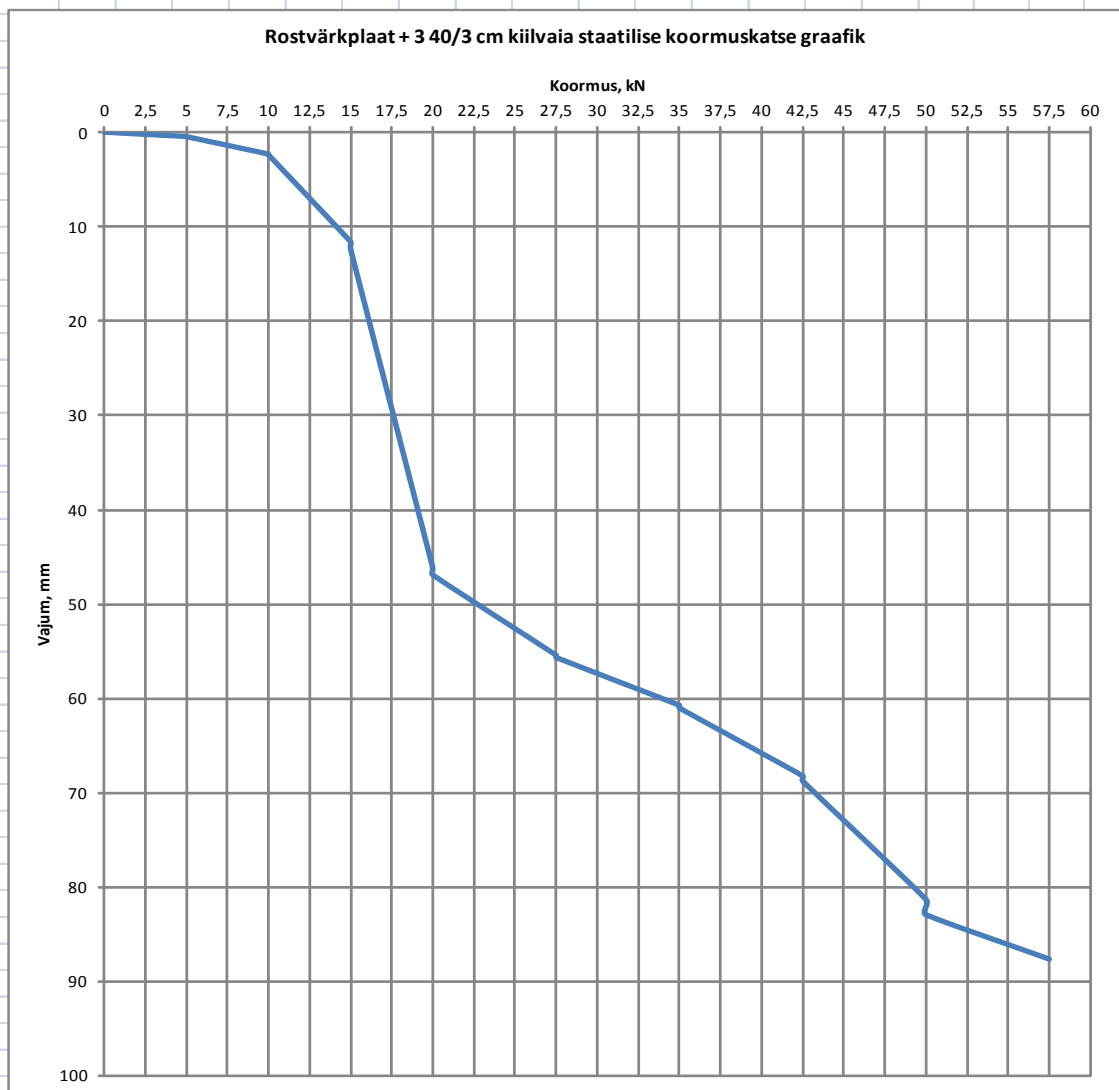
70 bar			85 bar			100 bar			115 bar		
35 kN			42,5 kN			50 kN			57,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
124,2	124,3	124,5	131,7	131,9	132,2	144,8	145,6	146,39	151,1		
35	35	35	42,5	42,5	42,5	50	50	50	57,5		
60,78	60,94	61,07	68,27	68,54	68,82	81,36	82,17	83,00	87,71		

Elastne deformatsioon 3mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeetri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2,5	2
20-30	5	5
30-40	10	11
40-50	13	15
50-60	20	23



Staatiline koormuskatse nr 11 Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 2

algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			40 bar			55 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			20 kN			27,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
51,23	51,53	51,53	51,53	53,36	53,4	53,46	62,01	62,35	62,77	94,8	95,13	95,44	103,9	104	104,1
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20	27,5	27,5	27,5
0	0,3	0,3	0,3	2,13	2,17	2,23	10,78	11,12	11,54	43,57	43,9	44,21	52,7	52,8	52,9

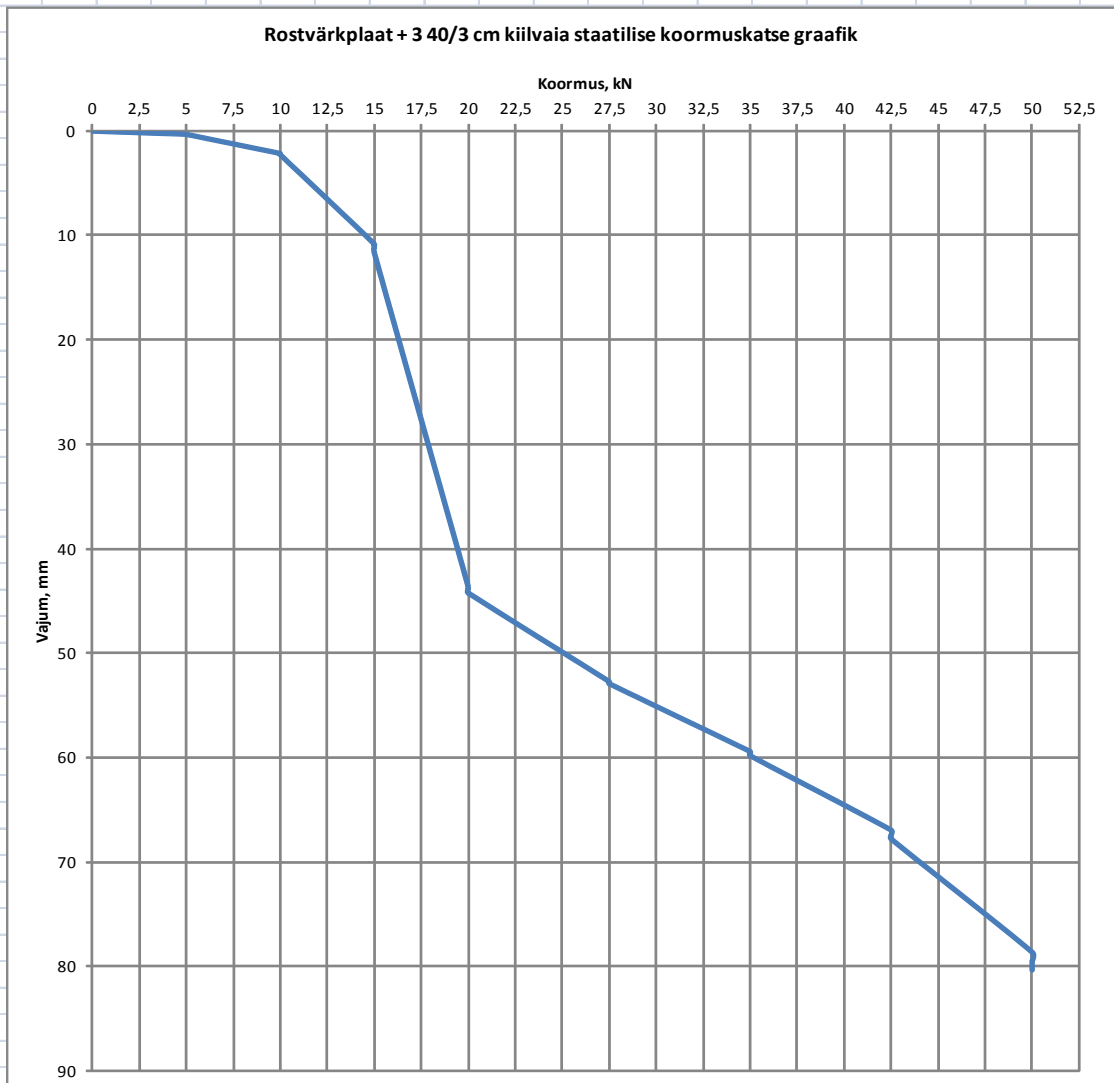
70 bar			85 bar			100 bar			115 bar		
35 kN			42,5 kN			50 kN			57,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
110,6	110,8	111	118,2	118,6	119	129,9	130,7	131,6	-	-	-
35	35	35	42,5	42,5	42,5	50	50	50	-	-	-
59,4	59,53	59,8	66,93	67,39	67,78	78,62	79,47	80,33	-	-	-

Elastne deformatsioon 2,3mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3	2
20-30	4	4
30-40	5	5,5
40-50	7	10
50-60	19	23



Staatiline koormuskatse nr 12

Rostvärk + 3 40/3 cm vai nr 3

algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			40 bar			55 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			20 kN			27,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
58,98	59,31	59,31	59,31	63,37	63,44	63,5	86,84	87	87,25	104,2	104,3	110,8	110,9	111	
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20	27,5	27,5	27,5
0	0,33	0,33	0,33	4,39	4,46	4,52	27,86	28,02	28,27	45,2	45,24	45,29	51,78	51,91	52,01

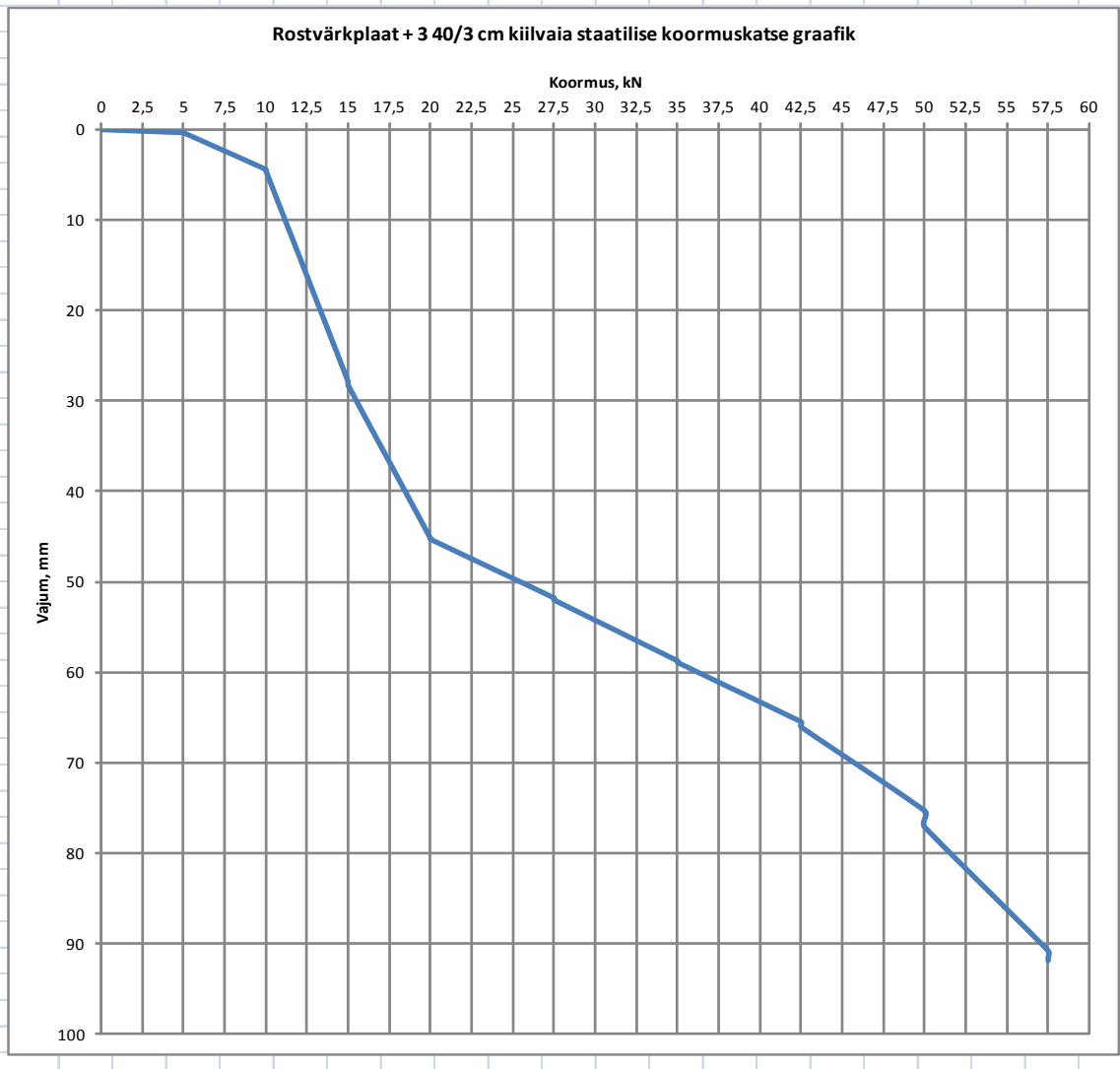
70 bar			85 bar			100 bar			115 bar		
35 kN			42,5 kN			50 kN			57,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
117,7	117,8	117,9	124,5	124,8	125	134,3	135,2	136,1	149,8	150,5	150,9
35	35	35	42,5	42,5	42,5	50	50	50	57,5	57,5	57,5
58,74	58,84	58,92	65,48	65,78	66,06	75,31	76,22	77,12	90,8	91,47	91,87

Elastne deformatsioon 2,9mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3	3
20-30	5	6
30-40	8	11
40-50	12	19
50-60	20	25



Staatiline koormuskatse nr 13 Rostvärk + 1 40/6 cm vai

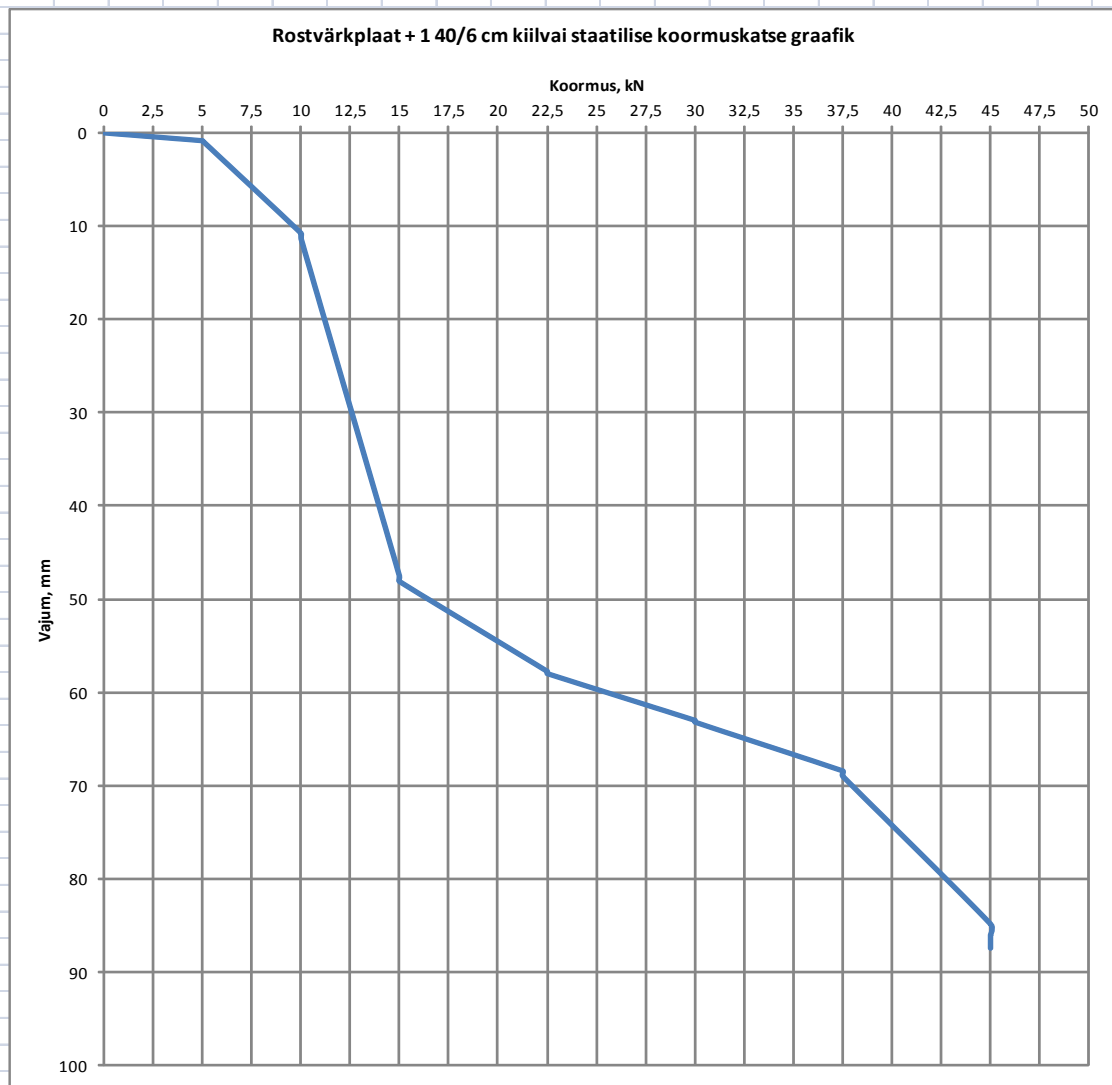
algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
67,51	68,43	68,44	68,44	82,08	82,15	82,33	108,8	108,9	109,2	117,6	117,6	117,8	122,6	122,7	122,8	136,1	136,5	136,9
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5	37,5	37,5
0	0,92	0,93	0,93	14,57	14,64	14,82	41,33	41,41	41,67	50,07	50,12	50,26	55,1	55,2	55,31	68,56	68,98	69,37

Elastne deformatsioon 2,1mm

 Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	2	2
20-30	2,5	2,5
30-40	4,5	7
40-50	6	10
50-60	16	22



Staatiline koormuskatse nr 14 Rostvärk + 2 40/6 cm vai

algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			40 bar			55 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			20 kN			27,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
59,52	60,02	60,02	60,02	63,18	63,26	63,32	78,43	78,69	79,21	97,66	97,94	98,24	108,5	108,6	108,8
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20	27,5	27,5	27,5
0	0,5	0,5	0,5	3,66	3,74	3,8	18,91	19,17	19,69	38,14	38,42	38,72	48,98	49,1	49,24

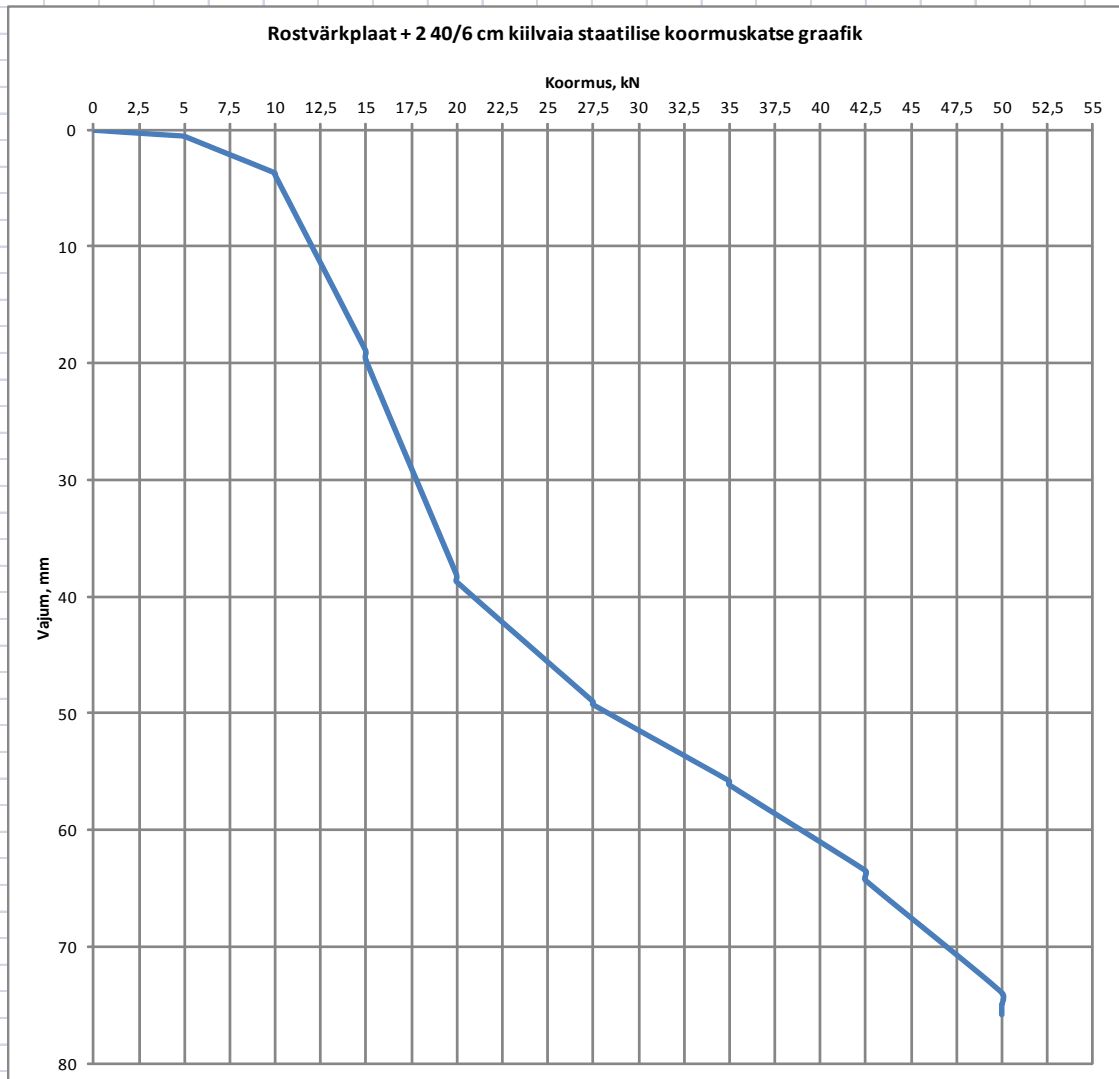
70 bar			85 bar			100 bar			115 bar		
35 kN			42,5 kN			50 kN			57,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
115,3	115,4	115,7	123	123,4	123,8	133,5	134,5	135,4	-	-	-
35	35	35	42,5	42,5	42,5	50	50	50	-	-	-
55,78	55,92	56,13	63,48	63,9	64,32	73,94	74,95	75,83	-	-	-

Elastne deformatsioon 2,1mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3	1
20-30	4	2
30-40	7	8
40-50	10	14
50-60	21	29



Staatiline koormuskatse nr 15 Rostvärk + 3 40/6 cm vai

algnäit mm	10 bar			20 bar			30 bar			40 bar			50 bar		
	5 kN			10 kN			15 kN			20 kN			25 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
67,26	67,7	67,7	67,7	69,3	69,34	69,37	76,04	76,24	76,42	91,58	91,79	92,12	107,3	107,7	107,9
0	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	20	25	25	25
0	0,44	0,44	0,44	2,04	2,08	2,11	8,78	8,98	9,16	24,32	24,53	24,86	40,05	40,39	40,59

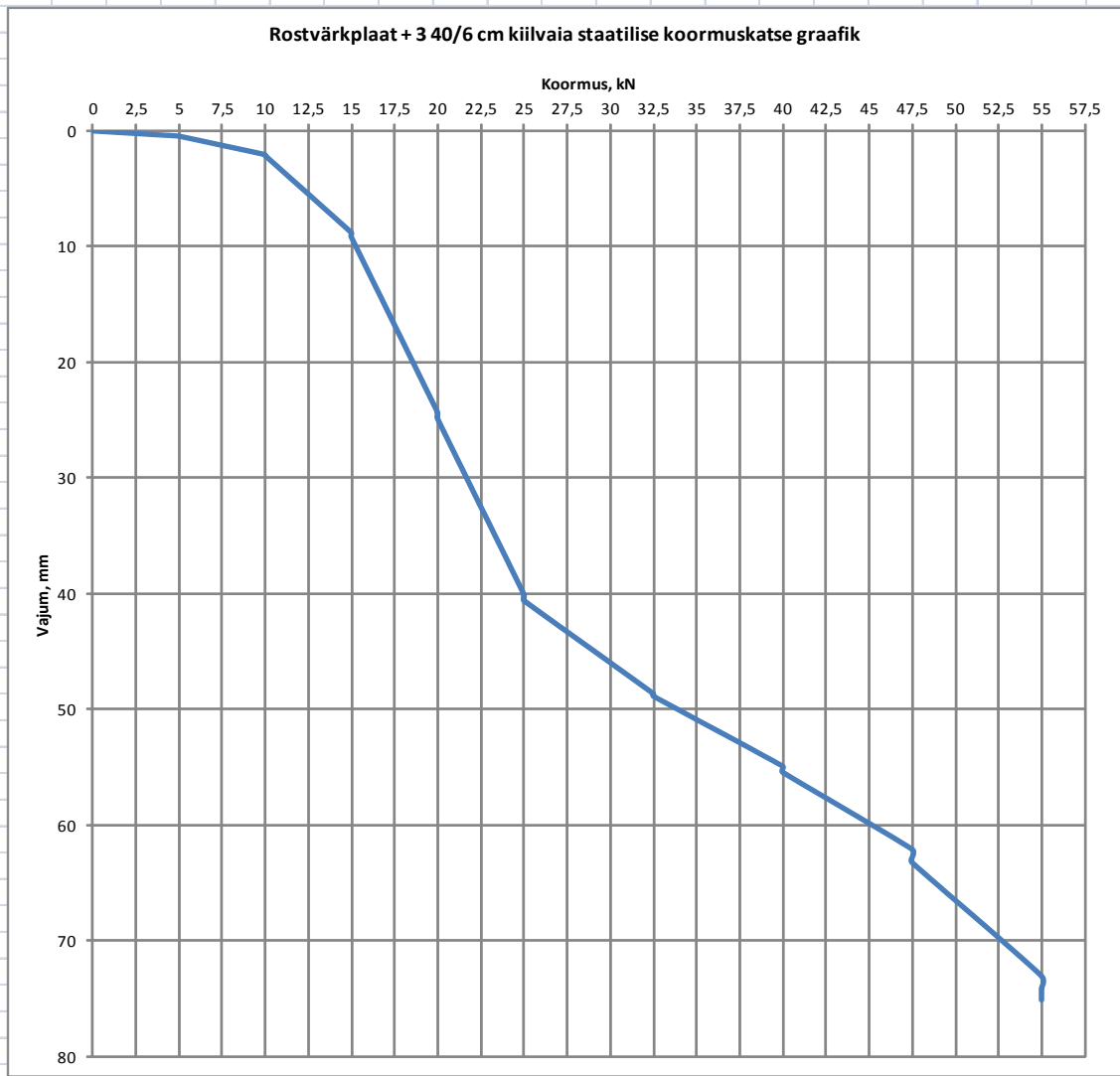
65 bar			80 bar			95 bar			110 bar			125 bar		
32,5 kN			40 kN			47,5 kN			55 kN			62,5 kN		
3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
115,9	116	116,1	122,2	122,4	122,7	129,4	130,1	130,5	140,3	141,4	142,4	-		
32,5	32,5	32,5	40	40	40	47,5	47,5	47,5	55	55	55			
48,63	48,75	48,85	54,9	55,14	55,43	62,09	62,79	63,24	73,04	74,1	75,11			

Elastne deformatsioon 2,2mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeeteri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	3	3
20-30	4	5
30-40	5,5	9
40-50	10	14
50-60	20	26



Staatiline koormuskatse nr 16 Rostvärk + 1 40/3 cm vai 90 kraadi keeratud

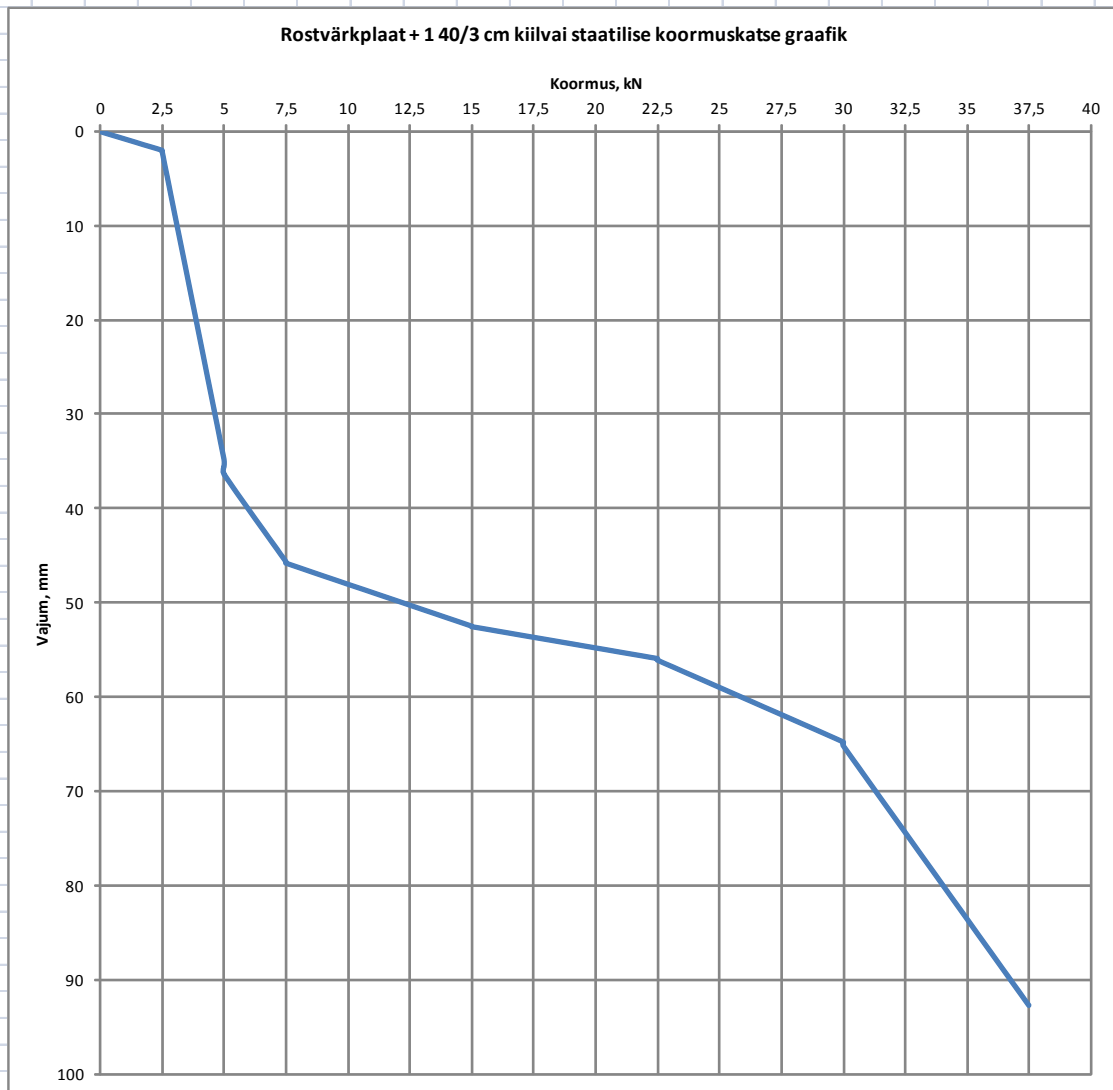
algnä it mm	5 bar			10 bar			15 bar			30 bar			45 bar			60 bar			75 bar		
	2,5 kN			5 kN			7,5 kN			15 kN			22,5 kN			30 kN			37,5 kN		
	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m	3m	5m	10m
39,34	41,33	41,38	41,42	74,1	74,87	75,67	84,94	84,99	85,1	91,78	91,82	91,84	95,22	95,29	95,39	104,1	104,3	104,4	132		
0	2,5	2,5	2,5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	15	15	15	22,5	22,5	22,5	30	30	30	37,5		
0	1,99	2,04	2,08	34,76	35,53	36,33	45,6	45,65	45,76	52,44	52,48	52,5	55,88	55,95	56,05	64,72	64,91	65,1	92,66		

Elastne deformatsioon 1,9mm

Plaat hakkab tööle

Penetromeetri löökide arv

Kiht, cm	Enne	Pärast
10-20	1	1
20-30	3	2,5
30-40	6	6
40-50	15	16
50-60	20	20



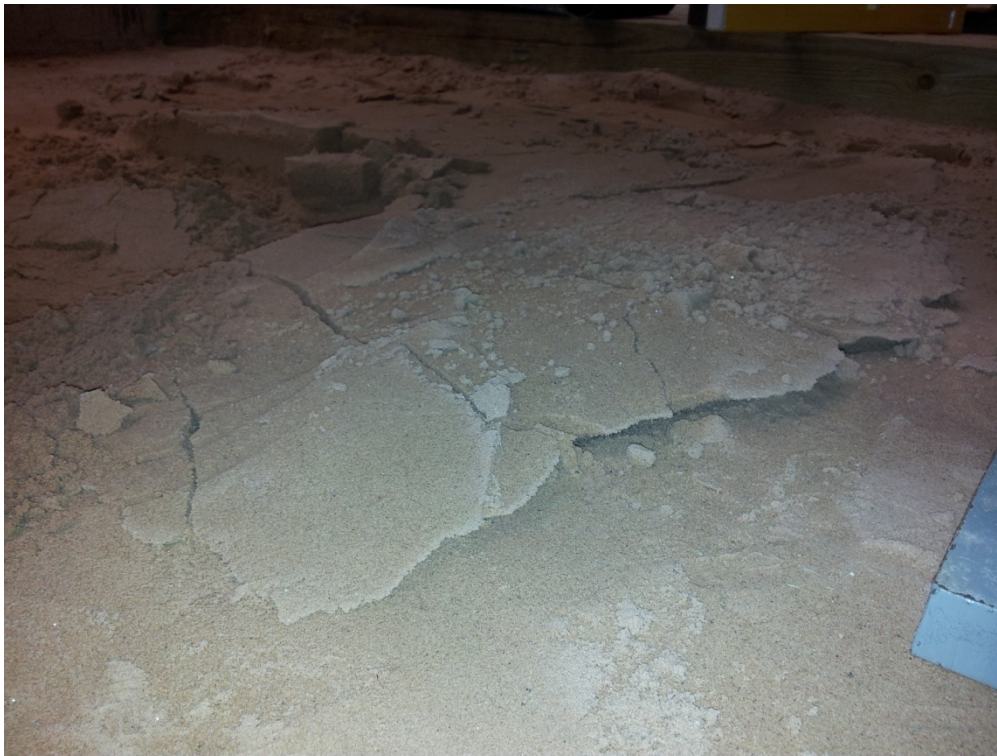
Lisa 2. Pinnase purunemispildid



Joonis 1. Pikipraad pinnases.



Joonis 2. Pikipraad pinnases.



Joonis 3. Pinnase kihistumine.



Joonis 4. Pikipraad pinnases ja kihistumine.

Lisa 3. Vaialuse rihtimine



Joonis 5. Vaialuse rihtimine vesiloodiga.



Joonis 6. Vaialuse rihtimine vesiloodiga.