

Markus Rääli

**ÕÕNESPANEELIDE ÜLEMISTE
TROSSIDE NAKKETUGEVUSE
VÕRDLUS ALUMISTE
TROSSIDE TUGEVUSEGA**
Lõputöö

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut

Tööstustehnoloogia ja turundus

Juhendaja: Toomas Pihl

Tallinn 2022

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina Markus Rääli, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt. Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autoritele ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Toomas Pihl (allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud tehnoloogia ja ringmajanduse instituudi direktori korraldusega nr 1-14/59 (kuupäev digiallkirjas).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Markus Rääli

sünnikuupäev: 02.01.1997

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Õõnespaneelide ülemiste trosside nakketugevus võrreldes alumiste trossidega
(lõputöö pealkiri)

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	3
1. ÕÕNESPANEELIDE KASUTAMINE EHITUSES	5
2. JÕUDUDE PAIKNEMINE ÕÕNESPANEELIDES	6
3. KATSEKEHADE VALMISTAMINE.....	7
3.1 Katsekeha ettevalmistamine katseks	8
4. NAKKEETUGEVUSE ARVUTUSED	10
4.1 Betooni arvutuslik tõmbetugevus trosside vabastamise ajal	10
4.2 Nakketugevus ankurdusel kandepiirseisundis	10
4.3 Betooni normatiivne telgtõmbetugevus.....	11
4.4 Ülekandepikkuse baasväärtus	12
5. NAKKETUGEVUSE KATSETAMINE	14
5.1 Katse tulemused.....	15
KOKKUVÕTE.....	17
SUMMARY	18
VIIDATUD ALLIKAD.....	19
Lisa 1. Trossi karakteristikud	20

SISSEJUHATUS

Õõnespaneelid on ehituses laialdaselt levinud raudbetoonist elemendid. Mõõtmetega 1,2 meetrit lai ning pikkus vastavalt projektis nõutule. Õõnespaneele kasutatakse vahelagede ehitamiseks tänu madalale hinnale, kiirele valmistamisele ja paigaldamisele.

Käesolevas uurimistöös uuritakse, kui suur on õõnespaneelide ülemiste trosside nakketugevus võrreldes alumiste trossidega. Põhjuseks on ülemiste trosside suurem võnkumise amplituud ja erinev trosside pingestamise jõud. See info on õõnespaneelide projekteerijatele abiks nende töös.

Töös käsitletakse õõnespaneelide trosside nakkuvust betoonis. arvutusi, õõnespaneelide kasutamist ehituses, õõnespaneelide jõudude paiknemist, katsekeha ettevalmistamist, katsetamist, katsetulemusi ja kokkuvõtet.

Probleemiga seonduv hüpotees on järgmine. Ülemistel trossidel on madalam nakketugevus kui on alumistel trossidel, sest ülemistel trossidel on suurem võnkumise amplituud ning seetõttu tekivad trossi ümber õhutaskud, mis vähendavad nakkuvust ja betooni tugevust. Selle probleemi püstitus on vajalik selleks, et oleks võimalik toota õõnespaneele kus ülemistel trossidel on suurem eelpinge. Hetkel AS Frammis toodetud õõnespaneelidel on ülemiste trosside eelpingeks 510 MPa. Suurema eelpinge puhul tekivad praod piki paneeli. Projekteerijad saavad selle töö tulemustega projekteerida õõnespaneele, mis vastavad rohkematele nõuetele.

Käesoleva töö eesmärgiks on leida kinnitus hüpoteesile, et ülemistel trossidel on madalam nakketugevus kui alumistel trossidel. Põhjus hüpoteegiks on ülemiste trosside suurem võnke-amplituud, mis tekitab trossi ümber õhutaskuid. Õhutaskud vähendavad kontaktpinda trossi ja betooni vahel, mis vähendab nakketugevust. Selleks valmistakse katsekehad ning tõmmatakse trossid nendest välja, et teada saada, kas see hüpotees peab paika. Saadud tulemustest luuakse statistika, leitakse keskmised nakketugevused. Arvutatakse eelpingestusjõu ja nakketugevuse suhe. Ülemistel trossidel ja alumistel trossidel leitakse nakketugevus ja jõudude suhe eraldi . Selle töö eesmärgiks on aidata õõnespaneelide projekteerijatel edukamalt õõnespaneele projekteerida.

Katsetamise tsükkel :

- Kuni 10% eelpingestamise jõust minutis.
- Järgnev koormuse suurendamine kiirusega mitte üle 10% eelpingestamise jõust minutis.

Töö sisuline osa koosneb õõnespaneelide jõudude põhimõtte kirjeldusest, katsekeha kirjeldusest, läbiviidava katse kirjeldusest, katsetulemustest ja analüüsist. Õõnespaneelide vajalikkusest ehituses. Hüpoteesi kirjeldusest ja põhjusest. Töö eesmärgi kirjeldusest. Katsekeha ümber toetuse valmistamisest.

1. ÕÕNESPANEELIDE KASUTAMINE EHTUSES

Õõnespaneele kasutatakse ehituses vahelagede ehitamiseks. Õõnespaneelid on eelpingestatud betoonelemendid mida saab toota vastavalt tellija soovile. Maksimaalne paneeli pikkus saab olla kuni 16 meetrit, sest sealt suuremaid on äärmiselt keerukas transportida ja ei oleks lihtsalt otstarbekas. [1] Sõltuvalt hoone tellija projektile saab õõnespaneele toota paksustega 200 mm, 220 mm, 265 mm, 320 mm ja 400 mm. Sõltuvalt koormusele, varieerub ka trosside skeem ja kogus. Sõltuvalt koormusele mida paneel kandma peab tuleneb ka paneeli paksus. [2]

Õõnespaneele tõstetakse traaversiga, mis on spetsiaalne vahend õõnespaneelide tõstmiseks. Traavers kinnitatakse õõnespaneeli külge ning paigutatakse ka turvaketid. Turvakette on tarvis selleks, et kui tõstmise käigus peaks paneel purunema, siis ei satuks kellegi elu ohtu. [3]

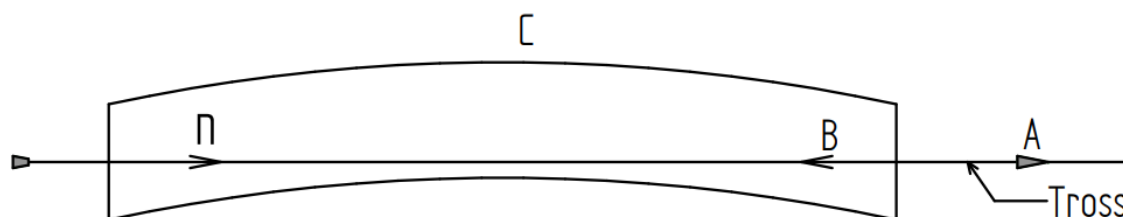
Traaversit tõstetakse kraana abil, mis aitab paigutada õõnespaneeli soovitud asukohta.



Joonis 1. Õõnespaneelid

2. JÕUDUDE PAIKNEMINE ÕÕNE SPANEELIDES

Enne õõnespaneeli valamist eel pingestatakse tross liinil vastavalt trossi paiknemisele. Ülemisi trosse pingestatakse jõuga 48 kN ja alumisi trosse pingestatakse jõuga 95 kN. Ülemine tross pikeneb 26 cm ja alumine tross pikeneb 66 cm. (Joonis 2). Punkt A.



Joonis 2. Jõudude paiknemine õõnespaneelides

Trossi pikenemise kohta info (Lisa 1).

Kui trossid on pingestatud, valatakse õõnespaneel trosside ümber ning jäetakse kividema 18 tunniks.

Kui õõnespaneel on kivinenud siis lõigatakse õõnespaneeli otstest trossid lahti ja jõud hakkavad paneeli sees tööle (Joonis 2). Punkt n ja B. Eelpingestatud tross paneeli sees tahab oma algupärast kuju võtta ning tekitab seetõttu kaarduvuse paneelis.

Mida suurem on eelpingestamise jõud trossis, seda suurema kaare tekitab paneel (Joonis 2). punkt C.

[2]

Paneelis olev jõud peab olema suurem kui jõud mis surub paneeli alla. Paneeli alla suruvad jõud võivad olla lisaks gravitatsioonile ka paneeli peal olev tehnika, inimesed, lisa konstruktsioonid.

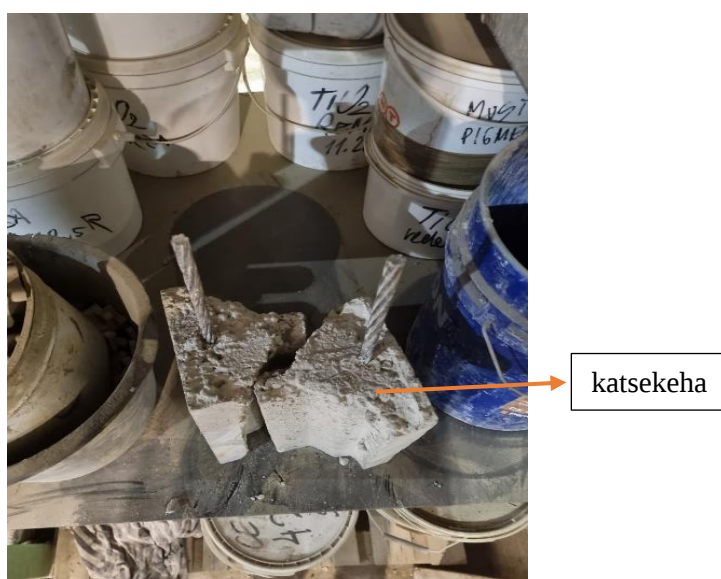
3. KATSEKEHADE VALMISTAMINE

Katsekehad valmistatakse betooniga mille tugevuseks C50/60 (Joonis 3). AS-s Framm on õõnespaneelides kasutatava betooni retseptiks 265. Katsekehades kasutatavad trossid on seitsme traadiga ja sileda pinnalised. Trosside eelpingestusjõud sõltub vastavat paiknemisele. Alumisi trosse tugevusega 95 kN ja ülemisi trosse tugevusega 48 kN.

Pärast õõnespaneelide liini valamist eemaldatakse suvalisest kohast 200 mm pikkune osa betoonist selliselt, et trossid oleksid betoonist puhtad. Seejärel lastakse õõnespaneelidel kivineda 18 tundi kile all. Pärast kivinemist saetakse valatud liinist välja tükk mille betoonkeha pikkus on 300 mm, kõrgus 265 mm ja laius 1200 mm.

Kui see tükk on välja saetud, siis tõstetakse sildkraana abil katsekeha tootmisliinilt maha ja lõigatakse ketaslõikuriga väikemateks osadeks kasutades selleks kiviketast. Lõigata tuleb iga õõne keskelt selliselt, et jääksid tükid, kus oleks üks ülemine tross ja üks alumine tross. Neid komplekte tuleb kokku neli tükki. Kui on neli komplekti saetud, siis tuleb need uuesti keskelt pooleks saagida selliselt, et jääks ainult üks tross katsekeha kohta. Katsekeha on 180 mm lai, 160 mm kõrge ja 300 mm pikk. Katsekehad tuleb märgistada, et oleks aru saada, milline on ülemine tross ja milline on alumine tross. Kokku tuleb kaheksa katsekeha. Neli tükki ülemiste trossidega ja neli tükki alumiste trossidega.

Kui kõik on saetud ja ettevalmistatud, siis viiakse katsekehad kivinema 28. päevaks. Kivinemise keskkond peab olema $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. [4]



Joonis 3. Katsekehad

3.1 Katsekeha ettevalmistamine katseks

Katsekeha ümber valmistatakse 15 mm paksusest kasevineerist toetus (Joonis 4). See on vajalik selleks, et vältida purunenud betooni laiali kukkumine ja tagada metallplaadi horisontaalne paigutus.

Vineerplaadist detaile tuleb neli tükki, mõõtmetega 19 cm x 33 cm. Plaatide servad ühendatakse kruvidega, et moodustada ümbris katsekehale.



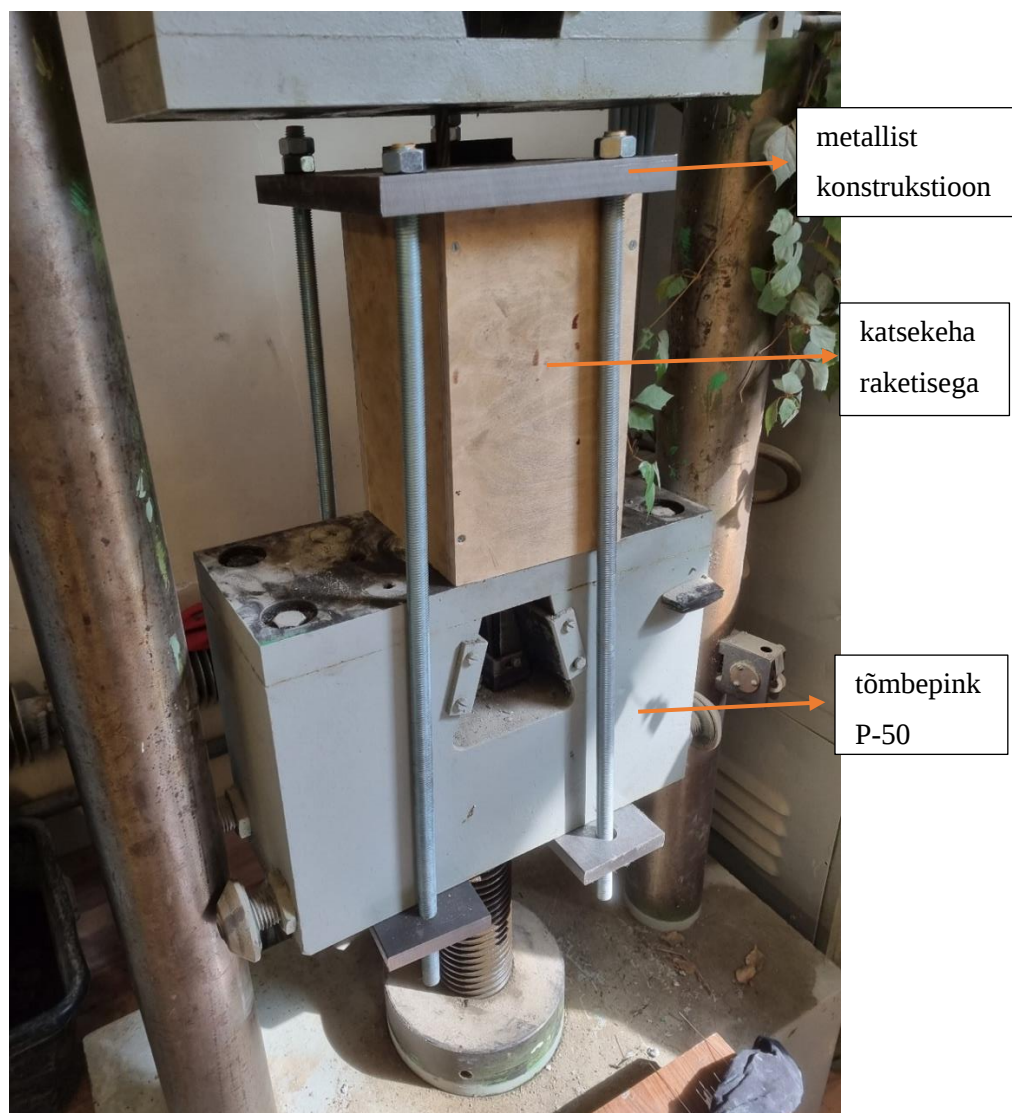
Joonis 4. Katsekeha peale tõmbamist

Trossipoolsesse otsa paigaldatakse metallist plaat paksusega 25 mm Metallist plaadile puuritakse viis ava läbimõõduga 16 mm. Üks ava tuleb plaadi keskele ja üks ava igasse plaadi nurka.

Metallist ülemise plaadi mõõtmed on 34 cm x 40 cm.

Valmistatakse ka kaks 25 mm paksust metall plaati, mõõtudega 40 cm x 10 cm. Neid on vaja selleks, et katsekeha fikseerida tõmbepressi külge (Joonis 5Joonis 4). Nendele plaatidele puuritakse mõlemasse otsa 16 mm läbimõõduga avad.

Ülemine plaat ja kaks alumist plaati ühendatakse nelja keermelatiga, mille pikkusteks on üks meeter ja läbimõõduks 15 mm. Keermelatide mõlemasse otsa läheb üks mutter, mille abil kogu konstruktsioon ühendatakse.



Joonis 5. Tõmbepress P-50

4. NAKKEETUGEVUSE ARVUTUSED

4.1 Betooni arvutuslik tõmbetugevus trosside vabastamise ajal

Järgnevalt leitakse betooni tõmbetugevus (1) trosside vabastamise ajal [4]:

$$f_{ctd}(t) = \frac{a_{ct} \times 0,7 \times f_{ctm}(t)}{\gamma_c}, \quad (1)$$

Valemiga leitakse tõmbetugevuseks (1):

$$f_{ctd}(t) = \frac{1 \times 0,7 \times 4,1 MP_a}{1,15}$$

Valemit (1) kasutades saadakse $f_{ctd}(t) = 2,5 MP_a$

4.2 Nakketugevus ankurdusel kandepiirseisundis

Kandepiirseisundi nakketugevus leitakse valemiga (2):

$$f_{bpt} = \eta_{p2} \times \eta_1 \times f_{ctd}(t), \quad (2)$$

kus η_{p2} – tegur, mis võtab arvesse pingearmatuuri liiki ja nakketingimusi ankurdamisel. Kuna kasutatakse 7- traadilist trossi, siis on väärtuseks 3,5;

η_1 – 1,0;

$f_{ctd}(t)$ – 2,5 MP_a.

Valemit kasutades saadakse nakketugevuse kandepiiriseisundiks (2):

$$f_{bpt} = 3,5 \times 1,0 \times 2,5 MP_a = 8,75 MP_a.$$

4.3 Betooni normatiivne telgtõmbetugevus

Tõmbetugevuse keskmise väärtuse leidmiseks on vaja kasutada valemit (3):

$$f_{ctm}(t) = ((\beta_{cc}(t))^a f_{ctm}, \quad (3)$$

- kus f_{ctm} – C50 betooni puhul on väärtus $4,1 MP_a$ (Tabel 1);
 $\beta_{cc}(t)$ – betooni vanusest tulenev tegur, saadakse valemit kasutades (4);
 A –1, kuna katsetatakse 28 päevaselt.

Tabel 1. Betooni tugevusklassid ja omadused

Concrete strength classes and properties

	Strength classes for concrete													
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (Gpa)	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Saadakse tulemuseks $f_{ctm}(28) = 4,1 MP_a$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (4)$$

kus S – tsemendi liigist tulenev tegur. Kasutatakse CEM 42.5R tsementi, siis võetakse väärtuseks 0,20;
 T – katsekeha vanus päevades. Katsetatakse 28 päeva vanuselt, siis T väärtuseks tuleb 28;
 $\beta_{cc}(t)$ – 1,0.

4.4 Ülekandepikkuse baasväärtus

l_{pt} – pikkus mille jooksul kantakse eelpingestus jõud üle betoonile [4], leitakse ülemiste trosside puhul (5):

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \times \alpha_2 \times \sigma_{pm0} \times \phi}{f_{bpt}}, \quad (5)$$

kus α_1 – 1,25;
 α_2 – 0,19;
 ϕ – 12,5 mm;
 σ_{pm0} – 48 kN = 511 MP_a;
 f_{bpt} – 8,75 MP_a.

Ülemiste trosside baasväärtus (Joonis 6) (5):

$$l_{pt} = \frac{1,25 \times 0,19 \times 511 \text{ MP}_a \times 12,5 \text{ mm}}{8,75 \text{ MP}_a} = 173,375 \text{ mm} = 0,173375 \text{ m}.$$

Alumiste trosside puhul lähtutakse samast valemist nagu ülemiste trosside puhulgi, kuid muudetakse lähteandmeid (5):

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \times \alpha_2 \times \phi \times \sigma_{pm0}}{f_{bpt}}, \quad (5)$$

kus

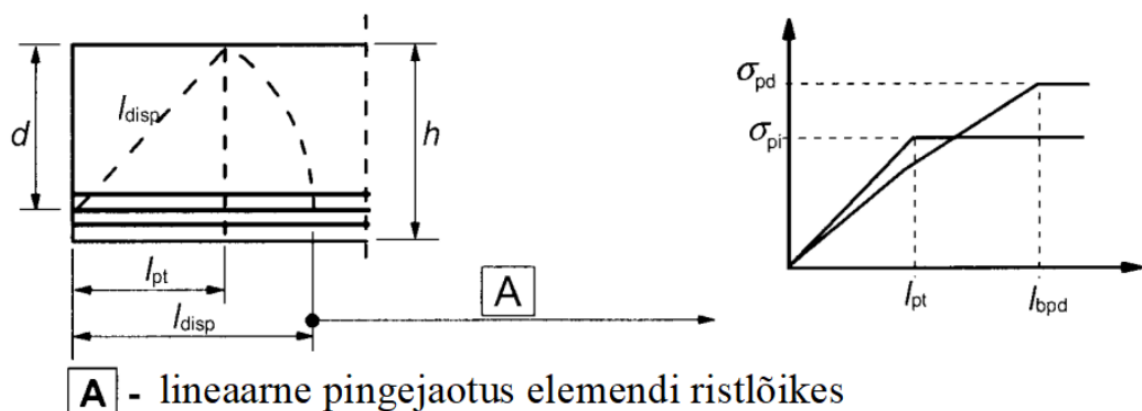
α_1	– 1,25;
α_2	– 0,19;
ϕ	– 12,5 mm;
σ_{pm0}	– 95 kN = 1011,4 MP _a ;
f_{bpt}	– 8,75 MP _a .

Leitakse σ_{pm0} (6):

$$95 \text{ kN} = \frac{95000 \text{ N/mm}^2}{93,93 \text{ mm}^2} = 1011,4 \text{ MP}_a \quad (6)$$

Alumiste trosside baasväärtuseks saadakse (5):

$$\frac{1,25 \times 0,19 \times 12,5 \text{ mm} \times 1011,4 \text{ MP}_a}{8,75 \text{ MP}_a} = 343,154 \text{ mm} = 0,343154 \text{ m}.$$



Joonis 6. Eelpingestuse ülekandmine eeltõmmatud armatuuriga elemendis [4]

5. NAKKETUGEVUSE KATSETAMINE

Katsetamiseks kasutatakse armatuuri tõmbepinki P-50, mille maksimum tõmbejõud on 50 tonni. Tõmbepingile paigutatakse katsekeha koos kasevineerist toetuse ja metallist konstruktsiooniga. Pingutatakse mutritest, et kogu konstruktsioon oleks ühtlaselt kinni

Seejärel kinnitatakse tõmbepingi haarats trossi külge ning hakatakse tõmbama järgneva tempoga. 10 protsenti pingestamise jõust minutis. Seejärel lisatakse 10 % pingestamise jõudu juurde ning oodatakse minut. Seda protsessi korratakse kuni trossi vabanemiseni betoonist või trossi purunemiseni.

Lõplik koormus fikseeritakse ja kantakse tabelisse (Tabel 2).

Katset tehakse iga katsekehaga, et leida keskmine nakketugevus nii ülemiste trosside puhul, kui ka alumiste trosside puhul.

Tabel 2. Katsete käigus saadud tulemused

Katsekeha number	Trossi paiknemine	Purunemise jõud	Katsekeha seisukord
1	Ülemine	5300 kg = 51,99 kN	Purunenud
2	Ülemine	4150 kg = 40,71 kN	Purunenud
3	Ülemine	1550 kg = 15,20 kN	Raketis purunenud
4	Ülemine	5500 kg = 53,96 kN	Purunenud
5	Alumine	400kg = 3,92 kN	Tross libises
6	Alumine	2600 kg = 25,50 kN	Purunenud
7	Alumine	2200 kg = 21,58 kN	Purunenud
8	Alumine	2350 kg = 23,05 kN	Purunenud

5.1 Katse tulemused

Tulemustest jäetakse välja katsekeha number kolm, sest raketis, mis pidi katsekeha kinni hoidma, tuli lahti ning väänas katsekeha katki (Joonis 7). Tulemusest jääb välja ka katsekeha number viis, kuna trossil oli ebapiisav nake ning libises korduvalt välja.

Ülemiste trosside keskmine nakketugevus on 48,88 kN.

Alumiste trosside keskmine nakketugevus on 23,37 kN.

$$1 \text{ kg} = 9,81 \text{ N}$$

$$1 \text{ N} = 0,001 \text{ kN}$$

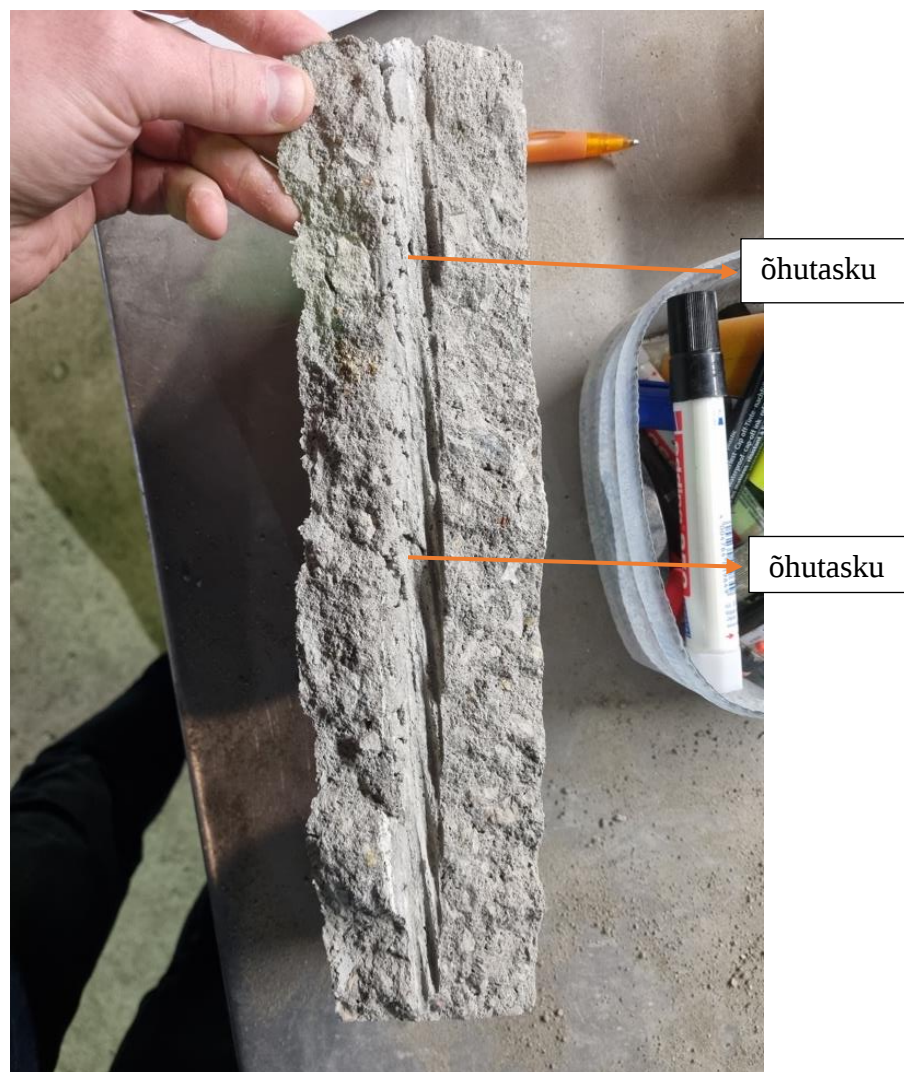
Alumiste trosside suhe leitakse valemiga (7):

$$\frac{95 \text{ kN}}{48,88 \text{ kN}} = 1,94 \quad (7)$$

Ülemiste trosside suhe leitakse valemiga (7):

$$\frac{48 \text{ kN}}{23,37 \text{ kN}} = 2,05 \quad (7)$$

Katsetest selgus, et ülemistel trossidel on kõrgem jõudude suhe. Mida kõrgem on jõudude suhe seda väiksem osa eelpingestusjõust kantakse üle elemendile. Betoonis olevad õhutaskud vähendavad tugevust ja seeläbi ka armatuuri ankurdustugevust.



Joonis 7. Purunenud katsekeha

KOKKUVÕTE

Lõputööga suudeti kontrollida hüpoteesi, et ülemiste trosside nakketugevus on madalam kui alumiste trosside oma. Uurimustöös leiti, et ülemiste trosside eelpingestusjõu ja trossi väljatõmbamiseks vajamineva jõu suheteks 1,94 ja ülemiste trosside jõudude suhteks 2.05. Millest võib omakorda järeldada, et ülemistel trosside ümber tekkinud õhutaskud vähendavad kontaktpinda betooni ja trossi vahel.

Selle probleemi lahendamiseks on vajalik õõnespaneeli masinale lisada stabilisaatorid, mis vähendaks ülemiste trosside võnkumise amplituudi masina ees vahetult enne valamist.

Lisaks tuleks korrigeerida betoonisegu, et betoon tiheneks paremini ja esineks vähem õhutaskuid. Lahendades need probleemid on võimalik tõsta ülemiste trosside tugevust 700 MPa- ni, ilma et õõnespaneelis tekiksid praod piki paneeli.

SUMMARY

The thesis was able to confirm the hypothesis that the adhesive strength of the upper cables is lower than that of the lower cables. The study found that the ratio of the prestressing force of the upper cables to the force required to pull the cable was 1.94 and the ratio of the forces of the upper ropes was 2.05. From this, it can be concluded that the air pockets formed around the upper cables reduce the contact area between the concrete and the cable.

To solve this problem, it is necessary to add stabilizers to the hollow-core panel machine to reduce the amplitude of oscillation of the upper cables in front of the machine just before casting.

In addition, the concrete mix should be adjusted to improve the compaction of the concrete and the presence of fewer air pockets.

By solving these problems, it is possible to increase the strength of the upper cables to 700 MPa without cracks in the hollow-core panel along the slab.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Paneelivabrik, „Õõnespaneelid,“ 03. märts, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <http://paneelivabrik.ee/catalog/laepaneelid.html>.
- [2] T. Element, „Eelpingestatud õõnespaneelid,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.tmbelement.ee/wp-content/uploads/2015/06/TAM_07-2020-1.pdf. [Kasutatud 03. märts, 2022].
- [3] Paneelivabrik, „Õõnespaneelide paigaldus- ja kasutusjuhend,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://paneelivabrik.ee/pages/img/kas5.pdf>. [Kasutatud 03. märts, 2022].
- [4] E. S.-. j. Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 206:2014+A2:2021,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-206-2014+a2-2021>. [Kasutatud 08. märts, 2022].
- [5] Delft, „Eurocode 2: Design of concrete structures EN1992-1-1,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1992_1_Walraven.pdf. [Kasutatud 10. märts, 2022].

Lisa 1. Trossi karakteristikud

