



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Rain-Erik Peterson

**RAUDBETOONKONSTRUKTSIOONIDE
MITTEPURUSTAVATE
MÕÕTESEADMETE VALIDEERIMINE
ETALON-KATSEKEHAL**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2024



Rain-Erik Peterson

**RAUDBETOONKONSTRUKTSIOONIDE
MITTEPURUSTAVATE MÕÕTESEADMETE
TULEMUSTE VALIDEERIMINE ETALON-
KATSEKEHAL**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehitus

Juhendajad: Karin Lellep, MSc

Martti Kiisa, PhD

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rain-Erik Peterson

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

Raudbetoonkonstruktsioonide mittepurustavate mõõteseadmete tulemuste valideerimine
etalon-katsekehal

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Rain-Erik Peterson

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Karin Lellep

Juhendaja Martti Kiisa

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1 LÜHIÜLEVAADE MITTEPURUSTAVATEST MEETODITEST JA VARASEMATEST UURINGUTEST	7
1.1 Mittepurustavad meetodid	7
1.1.1 Visuaalne vaatlus	7
1.1.2 Betooni tugevus Schmidt'i pörkevasaraga.....	8
1.1.3 Müüontomograafia.....	8
1.1.4 Termograafia.....	9
1.1.5 Ultraheli impulss	10
1.1.6 Elektrilise takistuse meetoodika	10
1.1.7 SonReb	11
1.1.8 Elektromagnetimpulss	11
1.1.9 Maaradar	12
1.2 Varasemad uuringud	13
1.2.1 Ravila silla tehnilise seisukorra hindamine.....	13
1.2.2 Ultrahelimeetodi kasutamine betoonis esineva prao sügavuse määramiseks 13	
1.2.3 Betooni survetugevuse määramine mittepurustaval meetodil	14
2 KÄESOLEVAS TÖÖS VAADELDAVAD MITTEPURUSTAVAD SEADMED	15
2.1 Elektromagnetimpulsi põhimõttel töötavad seadmed	15
2.1.1 Proceq Profoscope+	15
2.1.2 Proceq Profometer 600.....	16
2.1.3 Proceq PM8000 Pro.....	17
2.2 Radari põhimõttel töötavad seadmed	17
2.2.1 Hilti PS 1000 X-Scan	17
2.2.2 Proceq GP8000	18
2.3 Seadmete võrdlus	20
3 KATSESTENDI PROJEKTEERIMINE JA EHITAMINE.....	21
3.1 Projekteerimine	21
3.2 Ehitamine.....	22
4 MÕÕTESEADMETE VALIDEERIMINE	25
4.1 Terasvarraste asetuse tuvastamine ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine	25
4.2 Katsekeha paksuse mõõdistamine	28
4.3 3D mudeli loomine	28
4.4 Kaablihülsside ja tühimike tuvastamine	29
5 TULEMUSTE ANALÜÜS	30

5.1	Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Proceq Profoscope+.....	30
5.1.1	Ø 8 mm tulemused	30
5.1.2	Ø 12 mm tulemused	31
5.1.3	Ø 16 mm tulemused	32
5.2	Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Proceq Profometer 600.....	33
5.2.1	Ø 8 mm tulemused	34
5.2.2	Ø 12 mm tulemused	35
5.2.3	Ø 16 mm tulemused	36
5.3	Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan	37
5.3.1	Ø 8 mm tulemused	38
5.3.2	Ø 12 mm tulemused	38
5.3.3	Ø 16 mm tulemused	39
5.4	Katsekeha paksuse mõõdistamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan	40
5.5	3D mudeli loomine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan	41
5.6	Kaablihülsside ja tühimike tuvastamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan	42
	KOKKUVÕTE	43
	SUMMARY	45
	VIIDATUD ALLIKAD.....	47
	Lisa 1. Proceq Profoscope+ mõõtetulemused	51
	Lisa 2. Proceq Profometer 600 mõõtetulemused	55

SISSEJUHATUS

Betoonkonstruktsioonide puhul on tähtis osa nende uuringutel, kuna hooned ja rajatised meie ümber on suures osas betoonist. Seetõttu tuleb veenduda nende korrasolekus ja nõuetele vastavuses. Uuringuid viiakse läbi nende konstruktsioonide puhul, mille kohta soovitakse saada informatsiooni selle survetugevuse, selles asetsevate pragude, tühimike ja terasvarraste ning nende asetuse, diameetri ja kaitsekihi osas. Suures osas on uuritavad konstruktsioonid vanad ning projekt- ja teostusmaterjal nende kohta puudub, mistõttu ei saa infot konstruktsiooni ja selles sisalduva osas ning konstruktsiooni tuleb hatata uurima mittepurustavate ja purustavate meetodite abiga.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida terasvarda läbimõõdu ja asetuse, betoonist kaitsekihi, betoonis esinevate tühimike ning kaablihülsside mõõdistamist. Vajalike mõõtmiste teostamiseks ning seadmete valideerimiseks projekteeritakse ja ehitatakse lõputöö raames spetsiaalne katsekeha. Mõõtmiste teostamiseks kasutatakse elektromagnetimpulsi põhimõttel töötavaid seadmeid Proceq Profoscope+ ja Proceq Profometer 600 ning radari põhimõttel töötavat seadet Hilti PS 1000 X-Scan. Mõõtmiste tulemuste põhjal hinnatakse mõõteseadmete täpsust betoonist kaitsekihi paksuse määramise osas. Radari põhimõttel töötava seadmega luuakse katsekehast 3D mudel ja proovitakse tuvastada katsekehas asuvaid tühimikke.

Lõputöö esimeses osas antakse ülevaade mittepurustavatest meetoditest ja antud teemaga seonduvatest varasemalt koostatud lõputöödest. Järgmises osas tutvustatakse mõõtmiste jaoks kasutatavaid seadmeid. Kolmandas peatükis antakse ülevaade katsestendi projekteerimisest ja ehitamisest. Neljandas osas tutvustatakse lõputöö raames läbi viidavate katsete metoodikat. Viimases osas antakse ülevaade mõõtetulemustest ja analüüsitakse mõõtevigade põhjuseid.

1 LÜHIÜLEVAADE MITTEPURUSTAVATEST MEETODITEST JA VARASEMATEST UURINGUTEST

1.1 Mittepurustavad meetodid

Mittepurustavad meetodid võimaldavad tuvastada konstruktsioonisideseid ja -väliseid defekte ilma konstruktsioone avamata. Konstruktsioonide uurimist mittepurustaval meetodil eelistatakse sageli poolpurustavatele ja purustavatele uuringutele, kuna selle käigus ei tehta kahju konstruktsiooni pinnale ja ei nõrgestata uuritava objekti tugevusnäitajaid [1]. Defektide kaardistamise kõrval on mittepurustavad meetodid head terasvarraste avastamiseks konstruktsioonides, mis on vanad, millel puuduvad projektid, teostusjoonised või viited terasvarrastele ja nende asetusele. Uurimise käigus leitavate terasvardad, nende paiknemise ja kaitsekihi paksuste andmete tulemusena saavad projekteerijad teha vajalikud tugevusarvutused, et näha kas konstruktsioonid peavad uutele koormustele vastu [2].

Raudbetoonkonstruktsioonide puhul saab mittepurustavate meetodite abil uurida järgnevaid näitajaid [1]:

1. betooni tugevust;
2. betooni karboniseerituse taset;
3. betoonist kaitsekihi paksust;
4. defekte (tühimikke, pragusid);
5. terasvarda läbimõõtu;
6. elemendi kogupaksust.

1.1.1 Visuaalne vaatlus

Visuaalne vaatlus on iga mittepurustava uuringu esimene samm. Visuaalse vaatluse käigus saab ülevaate uuritavast objektist, defektidest ja nende esinemise kohtadest ning selle tulemina saab valida välja meetodid ja seadmed kõige tõhusamaks konstruktsiooni uurimiseks. Selle käigus saab avastada vaid silmale nähtavaid pinnal esinevaid pragusid ja deformatsioone. Konstruktsiooni pind võib aga olla korras kuid visuaalse vaatluse käigus ei suuda me sisemisi kahjustusi ja defekte näha, mistõttu ei saa seda metoodikat kasutada konstruktsiooni seisukorra lõpliku hinnangu andmiseks.[3]

1.1.2 Betooni tugevus Schmidti pörkevasaraga

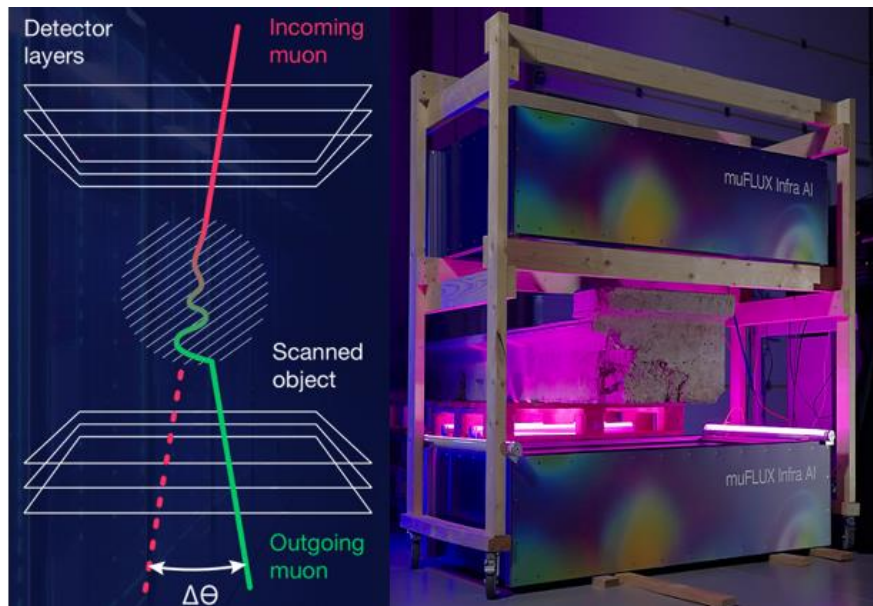
Schmidti pörkevasara (Joonis 1) katse leiab kasutust kõige laialdasemalt seadme kompaktsuse tõttu. Katse käigus pörkub pinnaga kokkupuutel vasar tagasi ja registreerib tagasilöögiarvu. Selle tulemusel saab hinnata betoonkonstruktsiooni tugevusomadusi ehk seda kasutatakse survetugevuse ja pinna kõvaduse seose leidmiseks. Pörkevasara testi ei ole soovitatav kasutada klassikalise survekatse asendajana, kuna võrreldes klassikalise survekatsega on pörkevasarat kasutades mõõdetav pind oluliselt väiksem ja võib juhtuda, et mõõdetakse pinda, mis on niiskem, kuivem, karedam või siledam kui seda ümbritsev pind. Sellest tulenevalt ei anna mõõtmine küllaldast ülevaadet konstruktsiooni terviklikust tugevusest. [4]



Joonis 1. Schmidti pörkevasar [5]

1.1.3 Müüontomograafia

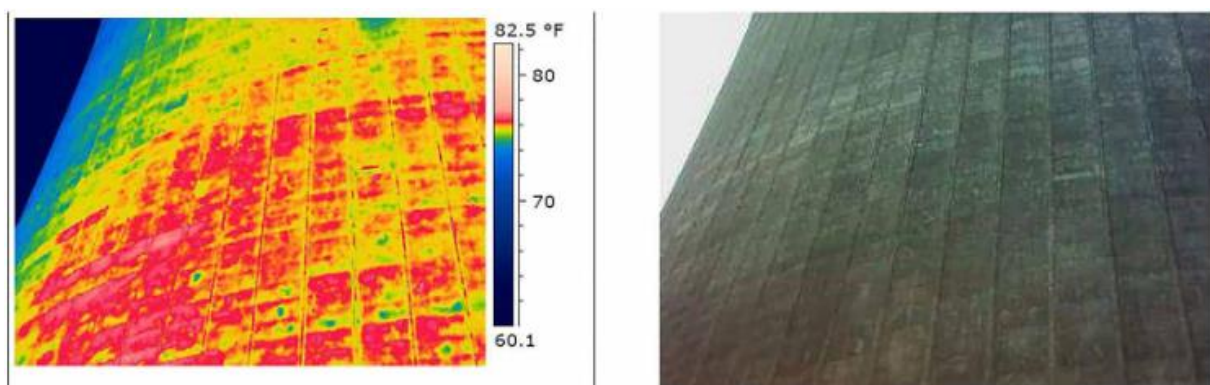
Müüontomograafia (Joonis 2) on samuti üheks mittepurustavaks meetodiks. Müüonid on 207 korda raskemad elementaariosakesed kui elektronid ning selle eeliseks teiste mittepurustavate meetodite ees on müüonite võime tungida tuhandeid kordi sügavamale uuritava objekti sisse ja saada võrreldes nendega rohkem infot. Müüontomograafia käigus mõõdetakse müüonite sisenemise ja väljumise trajektoori kehasse. Selle tulemusena saab luua kehast kolmemõõtmelise kujutise ja analüüsida terasvarraste paiknemist konstruktsioonis. Negatiivseks peetakse asjaolu, et täpsete mõõtetulemuste saavutamiseks on tarvis teostada mõõtmisi mitmeid päevi või nädalaid järjest, kuna kõrgekvaliteediliste piltide tegemiseks on vaja miljonite müüonite tungimist kehasse. [6]



Joonis 2. Müüontomograafia tööpõhimõtte ja mõõteseade [7]

1.1.4 Termograafia

Termograafiat (Joonis 3) kasutades on tänu betooni soojusjuhtivusele võimalik tuvastada betoonkonstruktsioonides esinevaid tühimikke ja pragusid, kus soojusjuhtivus on suurem ja kus esineb tõenäoliselt mõni konstruktsiooni viga [8]. Arvestada tuleb, et mõõtetulemusi võivad mõjutada ilmastikuolud, betooni värvus ja pinna orientatsioon [9]. Näiteks kui on olnud väga kuumad ilmad ja päike on konstruktsioonile peale paistnud, betooni pind on tumedamat värvi, mis tõmbab päikest ligi või pind on sellises asendis, et päike sellele otse peale paistab, võivad mõõtetulemused anda ebakorrektsed tulemusi, sest pinna temperatuur võib olla kõrgem kui tavaliselt. Sildade puhul mõjutavad tulemusi kasutuseintensiivsus, mis suurendab pinna temperatuuri ja teekattele joonistatud liikluskärgid, mis tõmbavad samuti soojust ligi [9]. Mõõtetulemuste õigsuses veendumiseks on soovitatud teha kestva protsessi fotosid, et välistada temperatuuri muutustest tekitatud ebaadekvaatsete mõõtetulemuste saamist [8].



Joonis 3. Termopilt jahutustornist võrreldes visuaalse pildiga [8]

1.1.5 Ultraheli impulss

Ultraheliimpulsi meetodiga (Joonis 4) mõõdetakse laine levimise kiirust materjalis lainet edastava ja vastuvõtva punkti vahel. Selle abiga on võimalik hinnata materjali poorsust ja pragusid. Kui on teada materjali paksus ja kiirus, mis kulub lainel materjali läbimiseks, on võimalik määrata keskmine impulsi kiirus, millest saab järeldada betooni kvaliteeti ja survetugevust. Mõõtetulemustele võivad mõjuda erinevad tegurid nagu katsekeha suurus, tsemendi tüüp, vesi-tsementtegur ja täitematerjali suurus, mis võivad survetugevuse puhul näidata tegelikest suuremaid või väiksemaid tulemusi. [10]



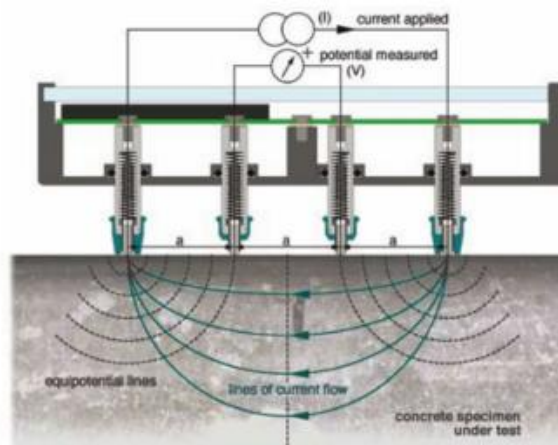
Joonis 4. Ultraheliimpulsi mõõteseade Proceq Pundit Lab (+) [11]

1.1.6 Elektrilise takistuse meetoodika

Resipod seadmega mõõdetakse keha elektrilist takistust. Resipod (Joonis 5) on mõõteseade, mis koosneb neljast Wenneri sondist ja mille kaks sisemist sondi mõõdavad omavahel kahe välimise sondi poolt rakendatavat potentsiaalset vooluerinevust. [12]

Meetodit rakendatakse järgnevatel juhtudel [12]:

- korrosiooni tõenäosuse hindamiseks;
- konstruktsiooni kõvenemise tõhususe hindamiseks;
- märgade ja kuivade alade tuvastamiseks betoonis;
- vesi-tsementteguri vahekorra kõikumist.



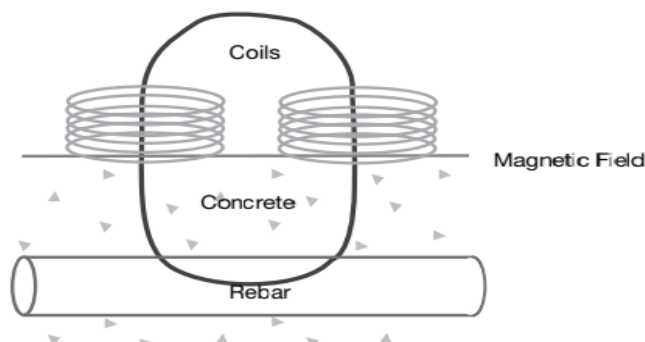
Joonis 5. Resipod seadme mõõtemetoodika [12]

1.1.7 SonReb

SonReb meetodit kasutatakse betoonkonstruktsioonide survetugevuse väärtuse hindamiseks. Meetod koosneb ultraheliimpulsi ja pörkevasara meetodite kombineerimisest. Kahe meetodi kombineerimise eeliseks on mõõtetulemuste võrdlemise võimalus, ehk mõlema katse kombineerimine võimaldab saada täpsemaid tulemusi. Sõltuvalt uuritava elemendi omadustest, näiteks täitematerjali suuruselt, võivad olla meetodite teel saadud tulemused tegelikust suuremad ja üksteisest erinevad. Pörkevasara meetodi puhul ei ole testitav pind küllalt suur ja testitava pinna alla jääv niiskus võib mõjutada pörkearvu väärtust ning sellel teel saadud survetugevus võib olla väiksem kui tegelik, teisalt aga suurendab niiskus ultraheliimpulsi kiirust. [13]

1.1.8 Elektromagnetimpulss

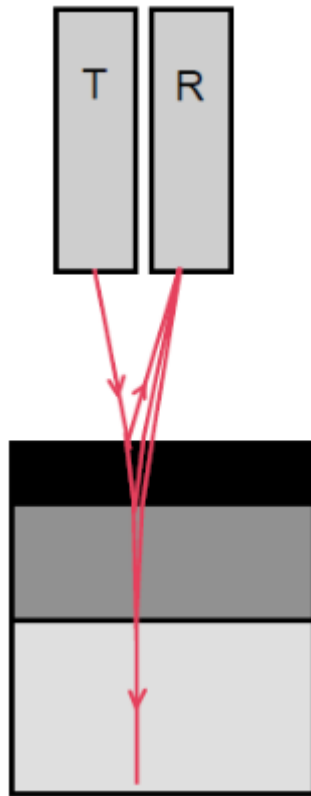
Elektromagnetimpulsi põhimõttel töötavate seadmete puhul saadab seade välja magnetvälja ning betoonkonstruktsiooni sees olev elektrit juhtiv materjal tekitab vastassuunalise magnetvälja ning saadud pingemuutust kasutatakse mõõtmiseks. Mõõteseadme tööpõhimõte on toodud joonisel (Joonis 6). [14]



Joonis 6. Elektromagnetimpulsi tööpõhimõte [14]

1.1.9 Maaradar

Maaradari põhimõttel töötava seadme puhul edastatakse antenni kaudu maapinda elektromagnetimpulsid ja uuritava konstruktsiooni sees olev materjal peegeldab tagasi osa selleni jõudnud impulsist [3]. Maaradari põhimõtte on toodud joonisel (Joonis 7).



Joonis 7. Maaradari tööpõhimõtte [15]

1.2 Varasemad uuringud

1.2.1 Ravila silla tehnilise seisukorra hindamine

M. Kruusi lõputöö eesmärgiks oli uurida mittepurustavate mõõteseadmega Ravila silla korrasolekut. Uurimisele eelnevalt töötati läbi projekt, mis oli ehitamisele eelnevalt koostatud. Visuaalse vaatluse käigus märgati, et konstruktsiooni on võrreldes olemasoleva projektiga oluliselt muudetud. Kõige suuremaks muudatuseks oli silla valmistamine monoliitse raudbetoonkonstruktsioonina, mitte monteeritavana nagu oli toodud projektis. Seadmega määrati terasvarda kaitsekihi paksust ning erinevatest mõõtepunktidest saadi tulemusteks kaitsekihi erinevad paksused. Sellest järeldati, et terasvarras esineb konstruktsioonis ebaühtlaselt. Lisaks avastati visuaalse vaatluse käigus paljandunud terasvardaid, pragusid, lagunemise jälgi ja veepiiril betoonikahjustusi. Talade tugiosad olid korrodeerunud. Silla vanust ja selle aja ehituskvaliteeti arvesse võttes hindas autor silla seisukorda rahuldavaks. [16]

Üheks seadmeks, millega terasvarda kaitsekihti määrata sooviti, on ka käesolevas töös kasutusel olev Proceq Profoscope+, mille puhul on kaitsekihi mõõdistamise jaoks tarvis teada selles asetseva terasvarda läbimõõtu. Kuna aga M.Kruusi töös seda kindlaks määrata ei olnud võimalik, võivad mõõtetulemused olla ebatäpsed, sest võib olla, et terasvarda diameeter konstruktsioonis erineb, kuid kaitsekiht on sama, või on konstruktsiooni lisatud lisaks terasvarrastele muid esemeid, mis mõjutavad mõõtetulemusi.

1.2.2 Ultrahelimeetodi kasutamine betoonis esineva prao sügavuse määramiseks

K. Aasa lõputöö eesmärgiks oli hinnata ultraheliseadme mõõtetulemuste täpsust. Selleks projekteeriti ja valmistati vigadega (pragudega) ja vigadeta katsekehad, millel teostati ultrahelimõõtmisi Proceq Pundit Lab+ mõõteseadmega, mis on kasutusel Tallinna Tehnikakõrgkooli ehitusinstituudil ehitise seisukorra hindamisel. Ultrahelimeetodiga, mis on laialdaselt kasutusel meditsiini valdkonnas, on ehitusvaldkonnas võimalik tuvastada betooni pinnalt algava prao sügavust. Ultrahelilaine levimise kiirus määrati andureid kasutades nii, et need asetseksid katsekeha vastaspindadel. Kokku mõõdeti heli leviku kiirust kolmel erineval meetodil ja kolme erineva valemi abil. Heli levimise kiiruse määramisel jõuti järelduseni, et kuna heli läbib materjali alati kõige lühemat teed pidi ja laine levimise kiirus on sellisel juhul suurim, on kõige õigem kasutada võrreldavate mõõtetulemuste maksimumväärtust. Prao sügavuse määramisel jõuti erinevate meetodite puhul järelduseni, milliste pragude sügavuste puhul on need meetodid kasutuskõlblikud. Sealjuures toodi välja, et juhtudel, kui prao sügavuse arvutamise valemid ei toiminud, oli

see põhjustatud laine levimise kiiruse mõõteveast ning andurite ebatäpsusest paigaldamisest. [17]

1.2.3 Betooni survetugevuse määramine mittepurustaval meetodil

R. Vahter andis lõputöös ülevaate betooni survetugevuse määramiseks kasutatavatest mittepurustavatest meetoditest, teostas mõõtmised ja võrdles saadud tulemusi purustava meetodi teel saadud tulemustega. Katseteks kasutati Maardu külje alt leitud katsekehasid, mille puhul ei olnud nende tehnilisi omadusi ja vanust võimalik kindlaks määrata. Mõõdeti katsekehade pörkearvu Proceq Silver Schmidti seadmega, laine levimise kiirust Proceq Pundit Lab+ seadmega ja karboniseeritust fenoolftaleeni lahusega, mille betoonpinnale kandmise puhul muutub mittekarboniseerunud betooni pind roosakas-lillaks ning karboniseerunud kiht jääb betooni värvi. Järgnevalt puuriti teemantpuurmasinaga puurkehad, et need Tallinna Tehnikakõrgkooli mehaaniliste katsetuste labori survepressil purustada. Võrreldes mittepurustavate meetoditega, saadi purustaval teel märkimisväärselt väiksem survetugevus. Kolme kõige konservatiivsema arvutusmeetodi keskmise tulemuse põhjal määratud survetugevus andis võrreldes purustava meetodiga keskmiselt -5% väiksema survetugevuse. [18]

2 KÄESOLEVAS TÖÖS VAADELDAVAD MITTEPURUSTAVAD SEADMED

Järgnevalt on kirjeldatud käesolevas töös uuritud seadmeid ja nende mõõtevõimalusi. Vastavalt nendele andmetele projekteeriti katsekeha. Seadmed Proceq PM8000 Pro ja Proceq GP8000 puuduvad Tallinna Tehnikakõrgkoolil, mistõttu ei saa antud lõputöö raames neid seadmeid kasutada, kuid ka nende seadmete mõõteparameetrid on võetud katsekeha projekteerimisel arvesse, et tulevikus sama katsekeha peal nende seadmete mõõtetulemusi valideerida.

2.1 Elektromagnetimpulsi põhimõttel töötavad seadmed

2.1.1 Proceq Profoscope+

Proceq Profoscope+ (Joonis 8) kasutab elektromagnetimpulssi (Joonis 6) terasvarda asukoha ja diameetri mõõdistamiseks.



Joonis 8. Proceq Profoscope+ [19]

Seadet saab kasutada [14]:

- terasvarda asukoha tuvastamiseks;
- terasvarda läbimõõdu hindamiseks;
- betoonist kaitsekihi mõõtmiseks.

Proceq Profoscope+ suudab mõõta terasvarda diameetrit ja asetust kuni 185 mm sügavusele. Seade suudab eristada kahte samas tasapinnas olevat terasvarrast. Samas on seadme kasutusjuhendis ette antud kindlad varraste vahelised piirväärtused ja diameetrid ning kaitsekihi paksus, alla mille ei ole võimalik neid eristada. Betoonkonstruktsiooni terasvarda kaitsekihi paksuse mõõtmiseks on tarvis teada konstruktsioonis asetseva

terasvarda läbimõõtu. Kaitsekihi paksuse korrektse mõõtetulemuse saavutamisel on oluline valida õige varda läbimõõt. Kui terasvarda läbimõõtu ei ole võimalik kindlaks teha, tuleks konstruktsioon avada ja varras mõõdistada. Mõõtetulemusi võivad mõjutada teised 400 mm raadiuses mõjualas asetsevad terasvardad ja elektrit juhtivad materjalid, elektrit mittejuhtivad materjalid mõõtetulemusi ei mõjuta. [14]

2.1.2 Proceq Profometer 600

Proceq profometer 600 (Joonis 9) töötab samuti elektromagnetimpulsi tööpõhimõttel nagu Proceq Profoscope+ (Joonis 6) [20]. Seadmel on võrreldes Proceq Profoscope+ seadmega sarnased mõõtevõimalused, kuid arenenum tehnoloogia, mis suudab lisaks terasvarda lokaliseerimisele tuvastada ka selle suunda. Lisaks on andmete töötlemiseks ekraan, mis kuvab mõõdetavad andmed ja hiljem on võimalik sealt tuvastada mõõdetud terasvarda läbimõõtu ning kaitsekihi paksust. Mugavamaks kasutamiseks on mõõteseadme all rattad. [21]



Joonis 9. Proceq Profometer 600 [22]

Seadet saab kasutada [20]:

- terasvarda asukoha tuvastamiseks;
- terasvarda läbimõõdu hindamiseks;
- betoonist kaitsekihi mõõtmiseks.

Proceq Profometer 600 on võimeline mõõtma kaitsekihi paksust samuti kuni 185 mm sügavuseni. Terasvarda kaitsekihi paksuse mõõtmistulemuste täpsuse saavutamiseks on vaja seadistada korrektne konstruktsiooni sees oleva terasvarda diameeter. Kui terasvarda diameeter ei ole teada, tuleks täpsete mõõtetulemuste saamiseks konstruktsioon avada ja

varda läbimõõd kindlaks teha. Terasvarda diameetri mõõdistamisele avaldavad mõju selle kaugus naabervarrastest ja kaitsekihi paksus. [20]

2.1.3 Proceq PM8000 Pro

Proceq PM8000 Pro (Joonis 10) on Proceq-i uusim elektromagnetimpulsi põhimõttel töötav seade (Joonis 6) [23]. Seadmega saab lokaliseerida terasvarraste asetuse ja selle tuua liitreaalsusesse ning läbi tahvelarvuti on võimalik projekteerida terasvarraste asetust päris konstruktsiooni peale ning seda hinnata. [24]



Joonis 10. Proceq PM8000 Pro [23]

Seadet kasutatakse [23]:

- terasvarda asukoha leidmiseks;
- terasvarda diameetri tuvastamiseks;
- konstruktsioonide kvaliteedi kontrolliks läbi liitreaalsuse.

2.2 Radari põhimõttel töötavad seadmed

2.2.1 Hilti PS 1000 X-Scan

Hilti PS 1000 X-Scan (Joonis 11) võimaldab tänu maaradari põhimõttele (Joonis 7) lokaliseerida seinasiseseid detaile mitmes kihis ja analüüsida tulemusi otse objektil ning luua kahe- ja kolmemõõtmelisi mudeleid [25].



Joonis 11. Hilti PS 1000 X-Scan [26]

Seadet rakendatakse [25]:

- konstruktsiooni paksuse määramiseks;
- terasvarraste asukoha määramiseks;
- tühimike avastamiseks;
- plastik või metallitorude ja elektrikaablite avastamiseks;
- betoonist kaitsekihi määramiseks.

Seadmega ei saa aga mõõta terasvarda diameetrit. Konstruktsioonis asetsevate objektide lokaliseerimiseks on suurim tuvastussügavus 300 mm. Et tuvastada kahte naaberobjekti, peab olema nende omavaheline kaugus vähemalt 40 mm. Objektid, mille omavaheline kaugus on piirväärtusest väiksem, ei pruugi olla eristatavad. [26]

2.2.2 Proceq GP8000

Proceq GP8000 (Joonis 12) töötab maaradari põhimõttel (Joonis 7). Seadmega saab maapinda uurida ja andmeid salvestada sadade meetrite pikkuse ala ulatuses ja kuni 85 cm sügavusele [27].



Joonis 12. Proceq GP8000 [27]

Seadet saab kasutada [3]:

- konstruktsiooni defektide avastamiseks;
- tühimike avastamiseks;
- terasvarda asukoha tuvastamiseks;
- elektrikaablite tuvastamiseks.

Võrreldes teiste käesolevas töös välja toodud seadmetega, on see seade sarnaste mõõtevõimalustega Hilti PS 1000 X-Scan-ile. Kõrvutades neid kahte seadet, on Proceq GP8000 miinuseks väiksem mõõtesügavus.

2.3 Seadmete võrdlus

Alljärgnevas tabelis on toodud lõputöös kasutatavate seadmete võrdlus.

Tabel 1. Töös käsitletavate mittepurustavate mõõteseadmete võrdlus

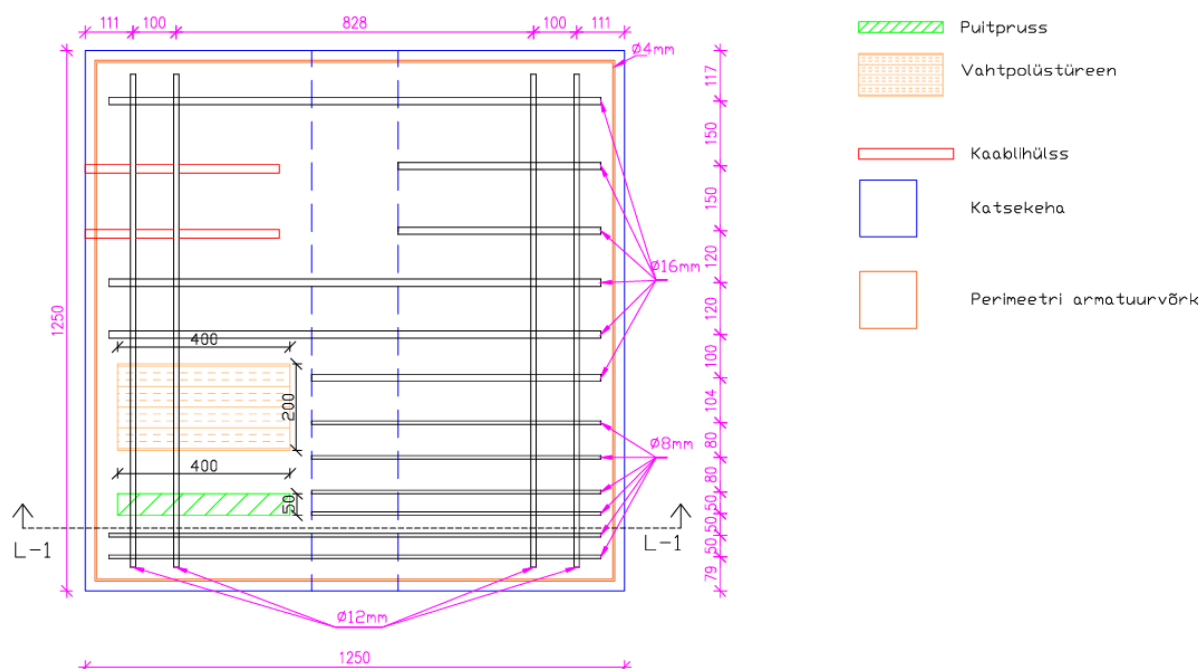
	Proceq Profoscope+	Proceq Profometer 600	Proceq PM8000 Pro	Hilti PS 1000 X- Scan	Proceq GP8000
Terasvarda asukoha määramine	+	+	+	+	+
Terasvarda diameetri määramine	+	+	+	-	-
Betoonist kaitsekihi paksuse mõõtmine	+	+	+	-	
Tühimike tuvastamine	-	-	+	+	+
Konstruktsiooni paksuse mõõdistamine	-	-	-	+	-
Konstruktsioonisest metall- ja plastiktorude ning kaablite asetuste määramine	-	-	+	+	+
Konstruktsiooni kvaliteedi kontroll	-	-	+	-	+
Tuvastussügavus, mm	185	185	185	450	0
Tuvastatav terasvarda läbimõõt, mm	5-60	6-60	5-63	-	-
Minimaalne terasvarda samm kahe eraldiseisva varda tuvastamiseks, mm	≥30	≥30	≥30	≥40	-

3 KATSESTENDI PROJEKTEERIMINE JA EHTAMINE

3.1 Projekteerimine

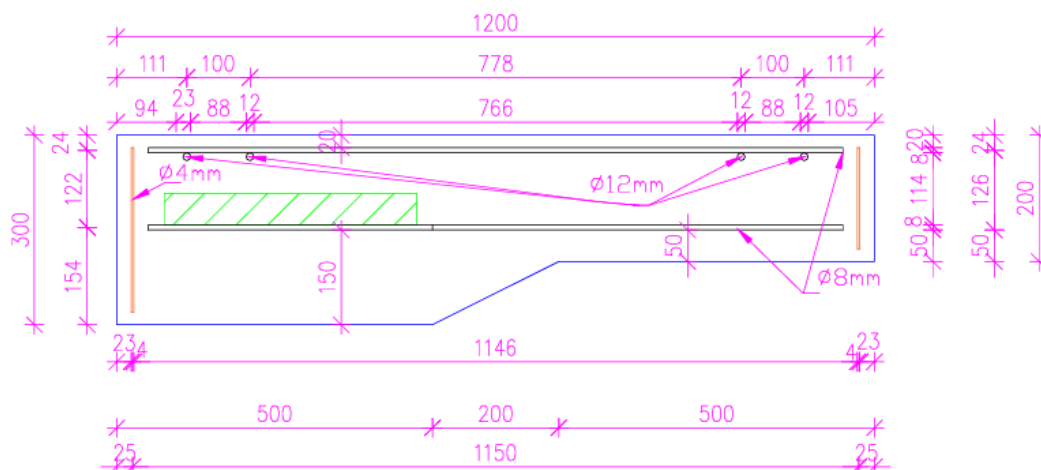
Betoonist katsekeha projekteerimise eesmärgiks oli tabelis (Tabel 1) välja toodud mõõteseadmete piirväärtuste kontroll. Raudbetoonkonstruktsioonide uuringutel on oluline, et mõõtetulemused oleksid võimalikud täpsed ja neid saaks tõlgendada üheselt, mistõttu oli katsekeha valmistamise ja mõõdistamise eesmärgiks mõõteseadmete mõõtetulemuste valideerimine. Seadmete mõõtetulemuste täpsus on oluline nende konstruktsioonide puhul, mida ei ole võimalik purustaval meetodil avada, kuid mille kohta soovitakse infot koguda või seisukorda hinnata.

Konstruktsioon (Joonis 13) (Joonis 14) oli projekteeritud mõõtmetega 1200×1200 mm ning mõõdistamiseks projekteeriti katsekeha selliselt, et tekiks kolm erineva kaitsekihiga pinda: 25 mm, 100 mm ja 150 mm. Lisaks projekteeriti katsekeha sisse erineva pikkuse (1200 mm, 500 mm, 700 mm) diameetri (8 mm, 12 mm, 16 mm) ja sammuga (50 mm, 80 mm, 100 mm, 110 mm, 120 mm, 150 mm) terasvardad ning puitprussi, vahtpolüstüreeni ja kaks kaablihülssi, et näha, kuidas reageerivad seadmed tühimikele ja elektrit mitte juhtivatele materjalidele. Ühele kaablihülssile lisati sisse terasvarras, et näha, kas Profoscope+ ja Profometer 600 tuvastavad selle sees olevat varrast.



Joonis 13. Lähteülesandena projekteeritud katsekeha pealtvaade

Lõige L-1



Joonis 14. Lähteülesandena projekteeritud katsekeha lõige

3.2 Ehitamine

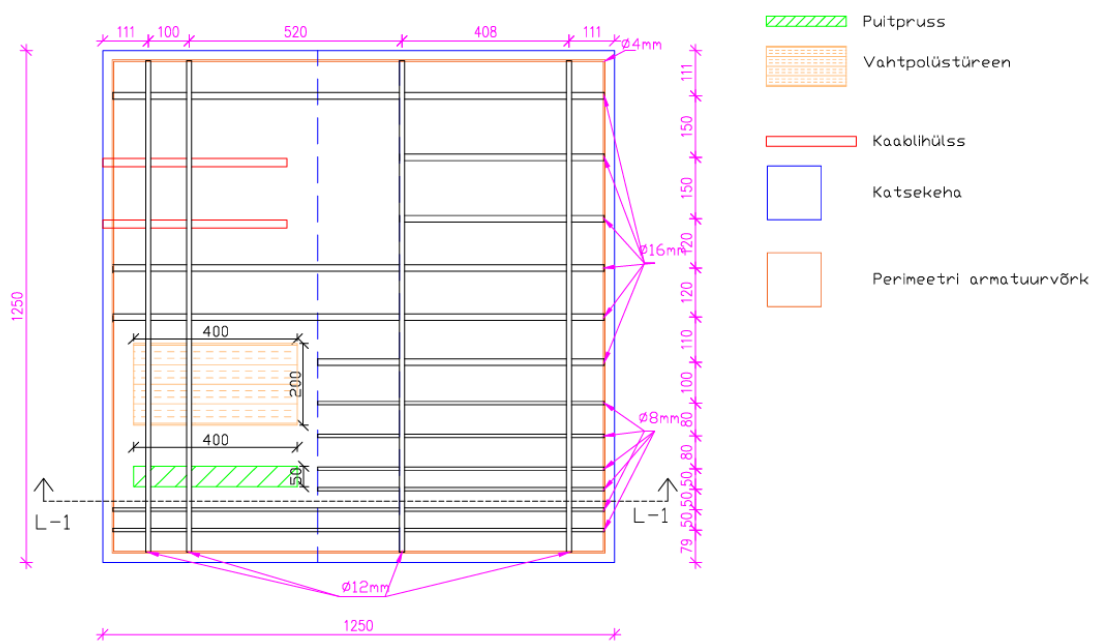
Ehitamisele eelnevalt arvutati välja vajalikud materjalid, mida katsekeha tegemiseks vaja läks. Kasutati järgnevaid materjale:

- 3-meetrine terasvarras läbimõõduga 8 mm, 4 tk;
- 3-meetrine terasvarras läbimõõduga 12 mm, 4 tk;
- 3-meetrine terasvarras läbimõõduga 16 mm, 4 tk;
- 1500×3000 mm 5 mm armatuurvõrk;
- vahtpolüstüreen EPS100 50 mm;
- 50×45×400 puitpruss;
- 450 mm kaablihülsid läbimõõduga 20 mm, 4 tk;
- sidumistraat;
- armatuuri kandurid 45/50 mm.

Tallinna Tehnikakõrgkooli laboris ehitati valmis fotol (Foto 1) näha olev katsekeha. Esmalt valmistati 1250×1250 siseavamõõduga raketis. Kaks erineva kogupaksusega pinda, mille tulemusena saadi erinevad kaitsekihid, saadi keskel oleva kaldpinna ehitamise tulemusena. Seejärel armeeriti alumine kiht ning armeeringut korrati peegelpildis ülemises kihis. Võrreldes lähteülesandes projekteeritud katsekehaga lisati 12 mm terasvardad alumisse kihti, muudeti nende asetust ja liigutati lühemate varraste lõppkohta, et need fikseerida. Lisaks muudeti katsekeha mõõtmeid (1250×1250 mm), kaitsekihtide paksuseid (25 mm, 57 mm ja 107 mm), puitprusside ja vahtpolüstüreenide asukohta ning kõikide varraste pikkust, et need saaks fikseerida perimeetris asetseva armatuurvõrgu külge (Joonis 15) (Joonis 16).

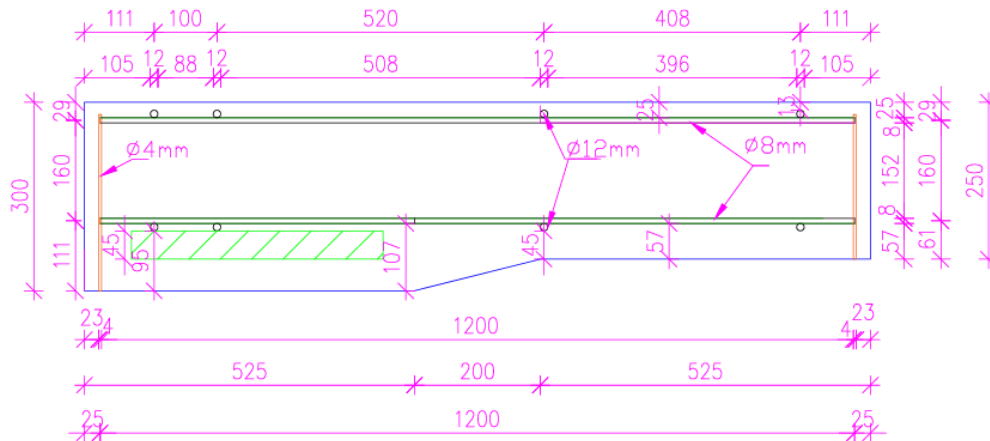


Foto 1. Armeeritud katsekeha



Joonis 15. Muudetud katsekeha pealtvaade

Lõige L-1



Joonis 16. Muudetud katsekeha lõige L-1

Katsekeha transporditi Rudus AS Lagedi betoonitehasesse ja valmistati C30/37 betoonist, mille täitematerjali terasuuruse suurim nimimõõde on 8 mm.

Pärast valamist tihendati katsekeha tihendamisvardaga ning tasandati tasandamislaticaga. Raketise laialivalgumise vältimiseks lasti raketise külge lisatoed. 28 päeva möödudes rakestati katsekeha lahti (Foto 2) ning Hilti PS 1000 X-Scan mõõteseadme jaoks tehti külgedele vineerist pikendused. See on oluline seetõttu, et saaks kaardistada kogu konstruktsiooni, sest Hilti PS 1000 X-Scan seadme puhul asetseb radar seadme keskel ja konstruktsiooni täielikuks skaneerimiseks on vaja mõõteseadmega sõita veidi üle katsekeha.



Foto 2. Lahtirakestatud katsekeha

4 MÕÕTESEADMETE VALIDEERIMINE

4.1 Terasvarraste asetuse tuvastamine ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine

Betoonist kaitsekihi paksuse täpseks mõõdistamiseks on vaja teada Proceq Profoscope+ ja Proceq Profometer 600 puhul selles asetseva terasvarda läbimõõtu. Eesmärgiks oli näha, millise terasvarda läbimõõdu sisestamisel mõõteseadmesse annab mõõteseadme kõige lähedama tulemuse teada olevale kaitsekihile. Selle tulemusel saab mõõtetulemustest järeldada, millise läbimõõdu valimisel on kaitsekihi väärtus kõige täpsem teada olevale kaitsekihile. Mõõtetulemused on toodud välja lisades (Lisa 1) (Lisa 2) Lisaks oli mõõtmiste eesmärgiks tuvastada terasvarraste asukohad. Kaitsekihi paksust, terasvarda läbimõõtu ja asetust mõõdeti Proceq Profoscope+ (Foto 3) ja Proceq Profometer 600 (Foto 4) seadmetega. Mõõdistamise käigus sooviti näha, milliseid tulemusi näitavad mõõteseadmed, kui valida vale terasvarda läbimõõt ja mis on sellisel juhul erinevate läbimõõttude puhul esinev veaprotsent. Veaprotsendi arvutamiseks tehti mõõtmisi erinevatest punktidest, mille tulemusena arvutati välja mõõtmistulemuste keskmine kaitsekihi väärtus.

Veaprotsent arvutati järgmise valemiga (1):

$$A = 1 - \frac{B_{keskm\grave{ine}}}{B_{tegelik}}, \quad (1)$$

kus A – veaprotsent;

$B_{keskm\grave{ine}}$ – kaitsekihi mõõtmistulemuste arvutatud keskmine tulemus;

$B_{tegelik}$ – tegelik kaitsekihi väärtus.

Katsekeha mõõdeti kolmest erineva kaitsekihiga piirkonnast. Pindadel, kus sai valida rohkem mõõtepunkte, teostati iga terasvarda läbimõõdu sisestamisel 11 mõõtmist ja pindadel, kus oli võimalik mõõta terasvarraste vähesuse tõttu vähem mõõtepunkte, teostati 8 mõõtmist.

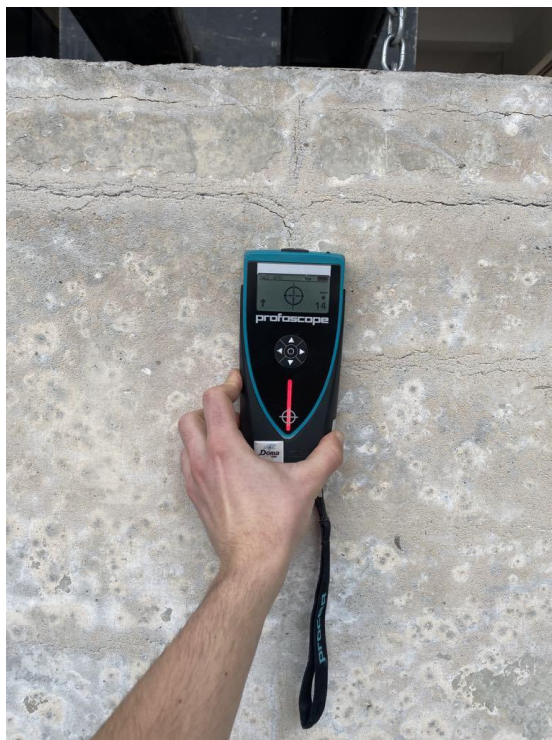
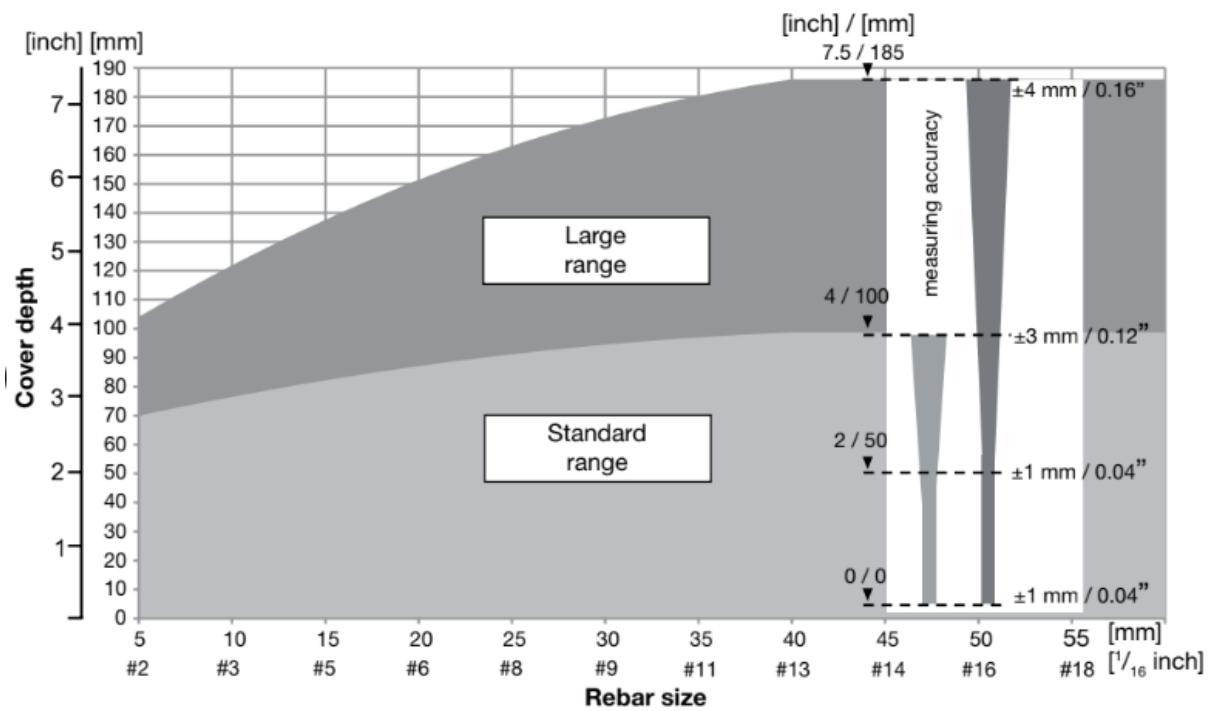


Foto 3. Mõõtmise Proceq Profoscope+ seadmega

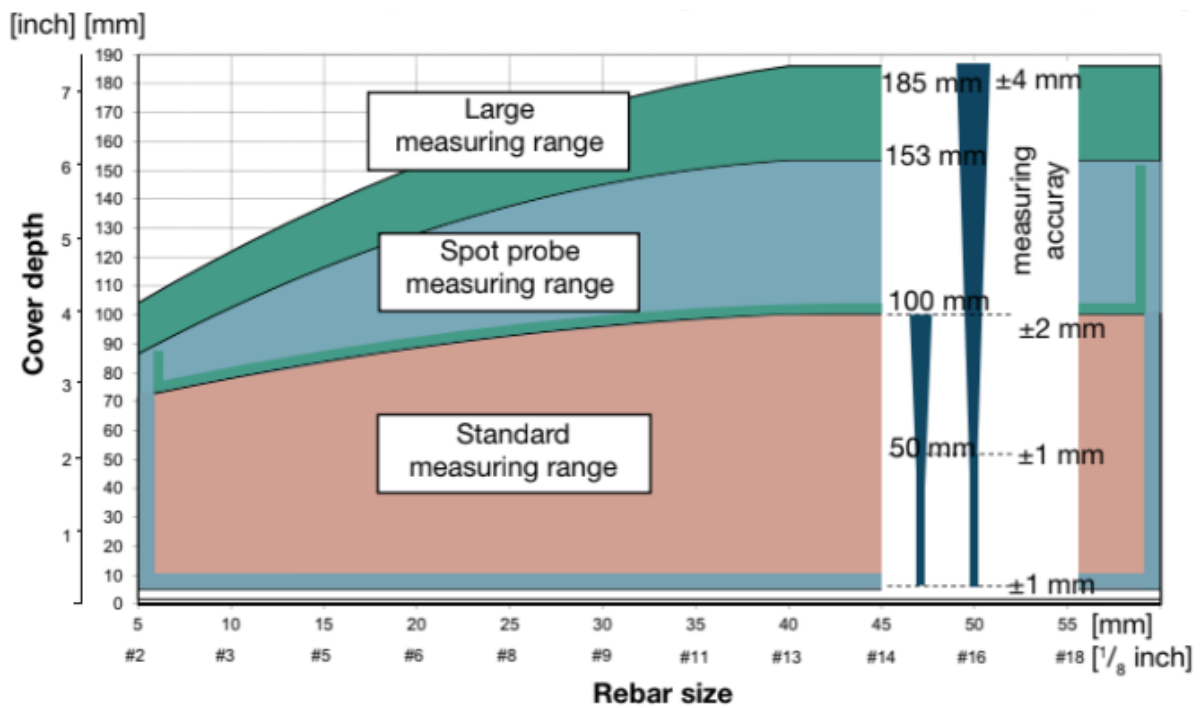


Foto 4. Mõõtmise Proceq Profometer 600 seadmega

Järgnevalt on toodud välja joonisel (Joonis 17) Proceq Profoscope+ mõõtetäpsus ja joonisel (Joonis 18) Proceq Profometer 600 mõõtetäpsus.



Joonis 17. Proceq Profoscope+ mõõtetäpsus [14]



Joonis 18. Proceq Profometer 600 mõõtetäpsus [20]

4.2 Katsekeha paksuse mõõdistamine

Katsekeha paksust oli võimalik saadaolevatest seadmetest mõõta seadmega Hilti PS 1000 X-Scan. Selle jaoks projekteeriti kahe erineva paksusega pinda – 250 mm ja 300 mm – et näha, kas seade suudab need tuvastada. Mõõtmiste tulemustena peaks seade näitama ehitatud katsekeha kujutist 3D mudelis.

4.3 3D mudeli loomine

Hilti PS 1000 X-Scan seadmega on võimalik mõõtetulemustest luua 3D mudel, millel on näha terasvarraste asetus. Selleks kleebiti betooni pinnale võrdlusraster (Foto 5), mida mööda radariga sõita sai (Foto 6). Antud mõõdistamist teostati 25 mm kaitsekihiga pinnalt. Skaneerimise tulemusena on võimalik saada objektist 3D mudel, mille saab viia Autodesk AutoCadi.



Foto 5. Katsekeha ettevalmistus Hilti PS 1000 X-Scani jaoks



Foto 6. 3D Scan mõõdistamine Hilti PD 1000 X-Scan seadmega

4.4 Kaablihülsside ja tühimike tuvastamine

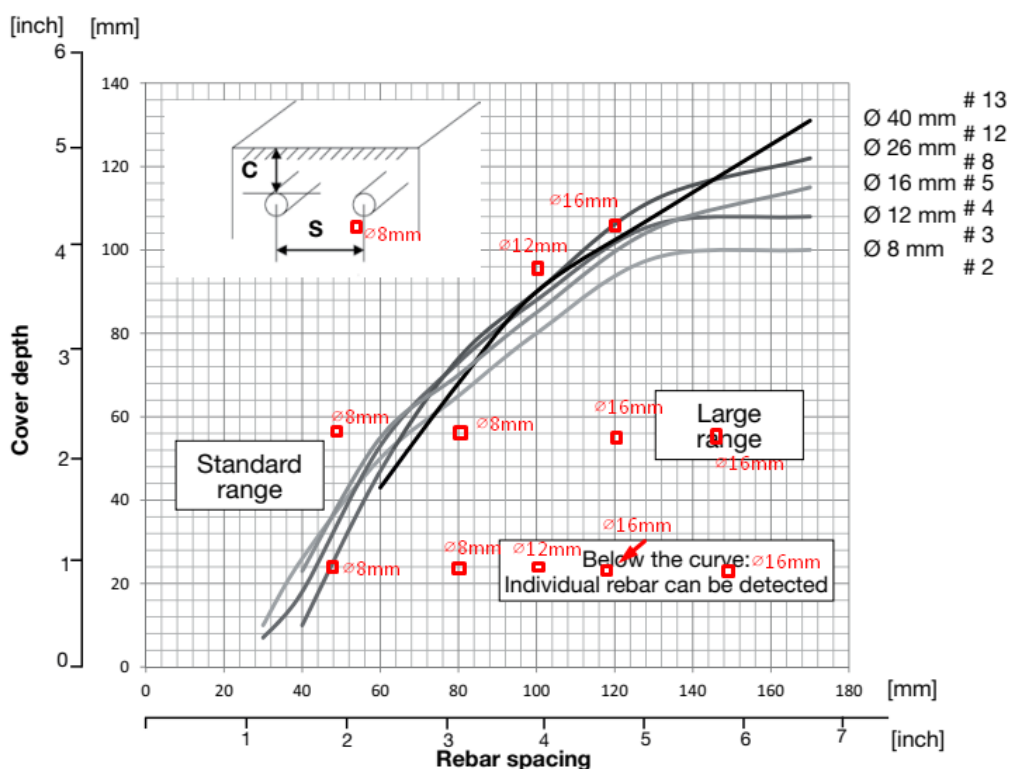
Skaneerides Hilti PS 1000 X-Scan seadmega üles katsekeha, on võimalik 2D vaates uurida konstruktsiooni sisemust ja lõike tasapinna liigutamisega koguda infot konstruktsioonis sisalduva kohta. Selle tulemusena saab tuvastada sees olevad tühimikud ja kaablihülssid.

5 TULEMUSTE ANALÜÜS

5.1 Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Proceq Profoscope+

Proceq Profoscope+ puhul on kasutusjuhendis toodud välja terasvarraste läbimõõdud ja omavaheline samm ning kaitsekiht, üle mille ei ole võimalik tuvastada üksikuid vardaid [14]. Mõõtmise eesmärgiks oli mõõta terasvarda kaitsekihti ja näha, millised on tulemused erinevate läbimõõtude sisestamisel seadmesse. Seadmesse sisestati terasvarda läbimõõdud 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm ja 20 mm.

Järgneval joonisel (Joonis 19) on toodud Proceq Profoscope+ kasutusjuhendi joonise peal välja katsekehas asetsevate terasvarraste samm ja kaitsekiht. Tabeli järgi asub neli varrast mõõteulatusest väljas, mida ei tohiks seade suuta tuvastada.



Joonis 19. Terasvarraste asetuse läbimõõdu, kaitsekihi ja sammu suhtes [14]

5.1.1 Ø 8 mm tulemused

Mõõdistades 25 mm paksuse kaitsekihiga pinnalt 8 mm läbimõõduga terasvarrast, saadi erinevate läbimõõtude sisestamisel mõõtetulemusteks adekvaatsed kaitsekihi väärtused. Mõõteseadmesse korrektse katsekehas asetseva terasvarda läbimõõdu sisestamisel ja

sellega mõõdistamisel erines kaitsekihi väärtus reaalsest 3% võrra. Veaprotsent oli kõige madalam 10 mm läbimõõdu valimisel (1%). Sisestades mõõteseadmesse terasvarda diameetriks 8 mm, saadi kaitsekihi keskmiseks väärtuseks 24 mm, mis joonisel (Joonis 17) toodud mõõtetäpsusega (± 1) võrreldes on täpne.

57 mm kaitsekihi puhul saadi 8 mm läbimõõduga terasvarrast mõõdistades tuvastada ainult 80 mm sammuga terasvarraste asukohad ja nende kaitsekihid. Väiksema sammuga (50 mm) varraste puhul üksikuid vardaid ja kaitsekihte tuvastada ei olnud võimalik. Kõige täpsemad kaitsekihi väärtused saadi 6 mm läbimõõdu valimisel. Mõõteseadmesse terasvarda diameetriks 8 mm sisestamisel saadi tuvastatavate varraste keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 57,5 mm. Joonisel (Joonis 17) on toodud antud mõõtmete puhul mõõtetäpsuseks ± 1 mm, mõõtmiste puhul on täpsus aga +0,5 mm.

107 mm kaitsekihiga 8 mm terasvarda mõõdistamisel terasvardaid ja nende kaitsekihte tuvastada ei olnud võimalik. Selle põhjuseks on ilmselt suur kaitsekiht. Juhendi järgi ei ole joonisel (Joonis 19) samuti võimalik nii suure kaitsekihi puhul terasvardaid tuvastada.

8 mm läbimõõduga terasvarda mõõtetulemused on toodud järgnevas tabelis (Tabel 2).

Tabel 2. Proceq Profoscope+ 8 mm läbimõõduga terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	25	57	107
	Veaprotsent, %		
5	16	66	100
6	10	65	100
8	3	63	100
10	1	61	100
12	-5	60	100
14	-9	59	100
16	-13	57	100
18	-19	57	100
20	-23	55	100

5.1.2 Ø 12 mm tulemused

Mõõdistades saadi 13 mm paksuse kaitsekihi puhul kõige täpsemad tulemused, kui mõõteseadmesse sisestati terasvarda läbimõõduks 10 mm. Sellisel juhul saadi keskmiseks kaitsekihi paksuse tulemuseks 13 mm ja esinev veaprotsent oli -1%. 12 mm terasvarda mõõdistamisel on joonise (Joonis 17) järgi võimalik esinev viga ± 1 mm. Mõõtmiste puhul

oli 12 mm diameetriga mõõdistamisel keskmine kaitsekihi väärtus 14 mm, mis on 1 mm võrra erinev juhendis lubatust.

45 mm kaitsekihi puhul saadi 12 mm terasvarda mõõdistamisel samuti kõige täpsemad kaitsekihi väärtused, kui mõõteseadmesse valiti terasvarda läbimõõt 8 mm ja 10 mm. Mõlemal puhul oli keskmine tulemus 2 mm võrra erinev ning veaprotsendid vastavalt 2% ja -2%. 12 mm terasvarda diameetri sisestamisel mõõteseadmesse saadi kaitsekihti mõõdistades keskmiseks väärtuseks 47 mm, mis on 2 mm tegelikust suurem. Joonise (Joonis 17) järgi on võimalik erinevus ± 1 mm.

95 mm paksuse kaitsekihi pinnalt 12 mm terasvardaid mõõdistades ei suudetud mõningaid terasvardaid tuvastada suure kaitsekihi tõttu. Mõnel juhul registreeris mõõteseadme kaks terasvarrast ühena. Kõige täpsemad tulemused saadi aga 20 mm terasvarda läbimõõdu valimisel. 12 mm sisestamisel mõõteseadmesse ei suutnud mõõteseadme tuvastada varrast neljast mõõtepunktist. Nende mõõtepunktide puhul, kust terasvarrast oli võimalik tuvastada, saadi keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 76,6 mm. See on joonisel (Joonis 17) toodud täpsusega võrreldes 15,5 mm suurem erinevus. Lisaks ei tohiks suuta seade joonise (Joonis 19) põhjal tuvastada 95 mm kaitsekihi puhul terasvardaid.

12 mm läbimõõduga terasvarda mõõtetulemused on toodud järgnevas tabelis (Tabel 3).

Tabel 3. Proceq Profoscope+ 12 mm läbimõõduga terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	13	45	95
	Veaprotsent, %		
5	-4	11	68
6	16	7	48
8	10	2	49
10	-1	-2	31
12	-5	-3	49
14	-14	-6	30
16	-20	-11	34
18	-32	-19	4
20	-38	-22	1

5.1.3 Ø 16 mm tulemused

16 mm läbimõõduga terasvarda mõõdistamisel 25 mm kaitsekihi pinnalt saadi kõige täpsem tulemus, kui mõõteseadmesse sisestati terasvarda läbimõõduks 12 mm. Mõõtmiste käigus saadud veaprotsent oli sellisel juhul 1%. Diameetri 16 mm sisestamisel

mõõteseadmesse saadi keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 27 mm, mis on joonisel (Joonis 17) toodud mõõtetäpsusest (± 1 mm) 1 mm suurem.

Mõõdistades 57 mm kaitsekihiga pinda, saadi kõige täpsem tulemus, kui terasvarda läbimõõduks valida mõõteseadmesse 14 mm, sellisel juhul oli veaprotsent 1%. 16 mm terasvarda diameetri sisestamisel saadi keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 59 mm. Joonisel (Joonis 17) on mõõtetäpsuseks toodud ± 1 mm, mis erineb mõõtmiste käigus saadud tulemusest 1 mm võrra.

107 mm kaitsekihiga pinnalt ei olnud võimalik terasvardaid tuvastada ja seetõttu tuli selles alas mõõdistades veaprotsendiks 100%. Ka joonise (Joonis 19) põhjal ei ole võimalik Proceq Profoscope+ seadmega antud andmete puhul terasvardaid tuvastada.

Mõõtetulemused on näha tabelis (Tabel 4).

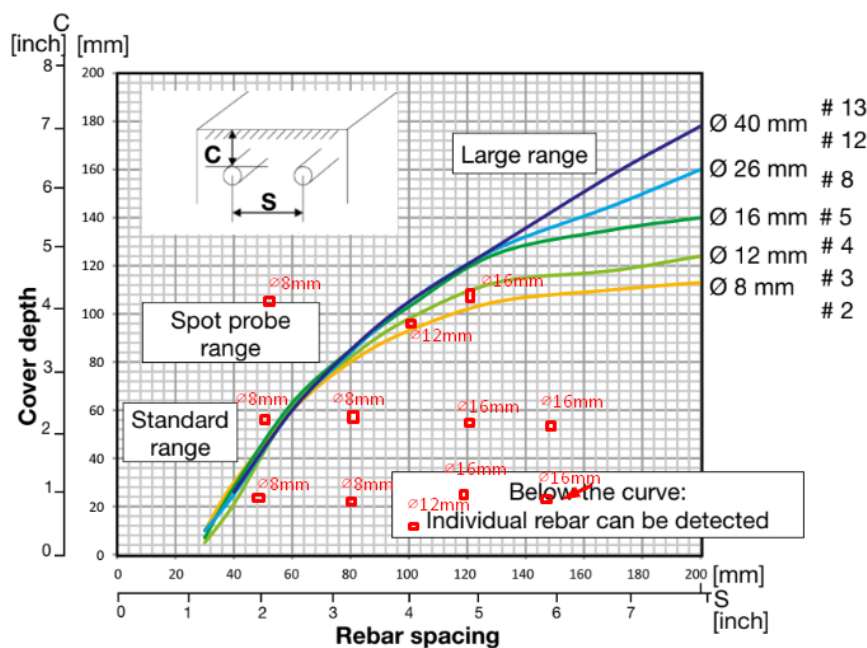
Tabel 4. Proceq Profoscope+ 16 mm terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	25	57	107
	Veaprotsent, mm		
5	22	18	100
6	16	12	100
8	10	8	100
10	5	5	100
12	1	2	100
14	-3	1	100
16	-7	-4	100
18	-12	-7	100
20	-16	-11	73

5.2 Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Proceq Profometer 600

Proceq Profometer 600 puhul on kasutusjuhendis toodud välja terasvarraste läbimõõdud ja omavaheline samm ning kaitsekiht, üle mille ei ole võimalik tuvastada üksikuid vardaid [17]. Mõõtmise eesmärgiks oli mõõta terasvarda kaitsekihti ja näha, millised on tulemused erinevate läbimõõtude sisestamisel seadmesse. Seadmesse sisestati terasvarda läbimõõdud 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm ja 20 mm.

Järgnevalt on Proceq Profoscope+ kasutusjuhendi joonisel (Joonis 20) toodud välja katsekehas asetsevate terasvarraste läbimõõt, samm ja kaitsekiht, mille põhjal asub mõõteulatusest väljas kaks varrast ning mida mõõteseade ei tohiks tuvastada.



Joonis 20. Terasvarraste asetus läbimõõdu, kaitsekihi ja sammu suhtes [20]

5.2.1 Ø 8 mm tulemused

8 mm läbimõõduga terasvarda mõõdistamisel pinnalt, mille kaitsekiht oli 25 mm, saadi reaalsusele kõige lähedasema tulemuse, kui mõõteseadmesse sisestati terasvarda läbimõõduks 8 mm. Kaitsekihi keskmine tulemus oli sellel juhul 24 mm, mis teeb veaprotsendiks 3%. Võrreldes joonisel (Joonis 18) toodud mõõtetäpsusega on ± 1 mm erinevus lubatud.

Mõõdistades 8 mm läbimõõduga terasvarrast 57 mm kaitsekihiga pinnalt, tuvastas Proceq Profometer 600 ära rohkem terasvardaid kui Proceq Profoscope+. 57 mm paksuse kaitsekihiga pinnal tekkis nähtus, kus mõõdistades saadi 8 mm läbimõõdu sisestamisel täpsed kaitsekihi paksused, kuid samasid vardaid veidi eemal mõõdistades saadi kaitsekihi paksuseks ~15-20 mm suurem (70 mm) tulemus. Selle põhjuseks on ilmselt lähedal asuvate varraste asetsemine, mis mõõtetulemusi segasid. Lisaks ei suutnud seade tuvastada ühest mõõtepunktist 8 mm terasvarrast.

57 mm kaitsekihi puhul on 8 mm terasvarda mõõtmistäpsuseks lubatud joonise (Joonis 18) järgi ± 1 mm. Kui arvata välja ühe mõõtepunkti tulemus, kust terasvarrast tuvastada ei suudetud, saadi 8 mm diameetriga terasvarda mõõdistamisel keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 59,6 mm, mis on 1,6 mm võrra suurem juhendi poolt lubatud erinevusest.

107 mm kaitsekihi puhul ei suutnud Proceq Profometer 600 tuvastada ühtegi terasvarrast. Joonise (Joonis 20) põhjal ei suuda seade selliste andmete puhul terasvardaid tuvastada, sest see on häiritud suurest kaitsekihist.

Mõõtetulemused on toodud järgnevas tabelis (Tabel 5).

Tabel 5. Proceq Profometer 600 8 mm läbimõõduga terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	25	57	107
	Veaprotsent, %		
6	11	-1	100
8	3	5	100
10	-4	11	100
12	-11	8	100
14	-3	22	100
16	-5	35	100
18	-13	21	100
20	-20	-4	100

5.2.2 Ø 12 mm tulemused

12 mm läbimõõduga terasvarda mõõdistamisel pinnalt, mille kaitsekiht oli 13 mm, saadi tegelikkusele kõige sarnasem tulemus, kui mõõteseadmesse sisestati terasvarda läbimõõduks 10 mm. Sellisel juhul oli keskmiseks kaitsekihi tulemuseks 13 mm ja esinev veaprotsent 0%. 12 mm terasvarda diameetri sisestamisel saadi keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 14 mm, mis on 1 mm võrra suurem ja on toodud ka kasutusjuhendi joonisel (Joonis 18).

45 mm kaitsekihiga pinnalt mõõdistades saadi kõige täpsemad kaitsekihi väärtused läbimõõdude 6 mm ja 8 mm sisestamisel mõõteseadmesse. Esimese mõõtepunkti puhul andis mõõteseadme iga terasvarda läbimõõdu sisestamisel tulemuseks kaitsekihi väärtuse suurusjärgus 14-28 mm, mis on tingitud asjaolust, et antud mõõtepunkt asus armatuuri kanduri peal, mis segas mõõtetulemusi. 12 mm diameetri sisestamisel mõõteseadmesse saadi kaitsekihi väärtuseks keskmiselt 50 mm, mis on kasutusjuhendi joonise (Joonis 18) järgi lubatud ± 1 millimeetrist 4 mm võrra suurem.

95 mm kaitsekihi puhul ei olnud võimalik terasvardaid tuvastada, mida aga joonise (Joonis 20) järgi peaks olema võimalik tuvastada. Ühes mõõtepunktis õnnestus saada signaal ja mõõteseadme andis märku terasvarda asetusest, kuid ei tuvastanud kahte eraldiseisvat terasvarrast (Foto 7).

Mõõtetulemused on toodud tabelis (Tabel 6).

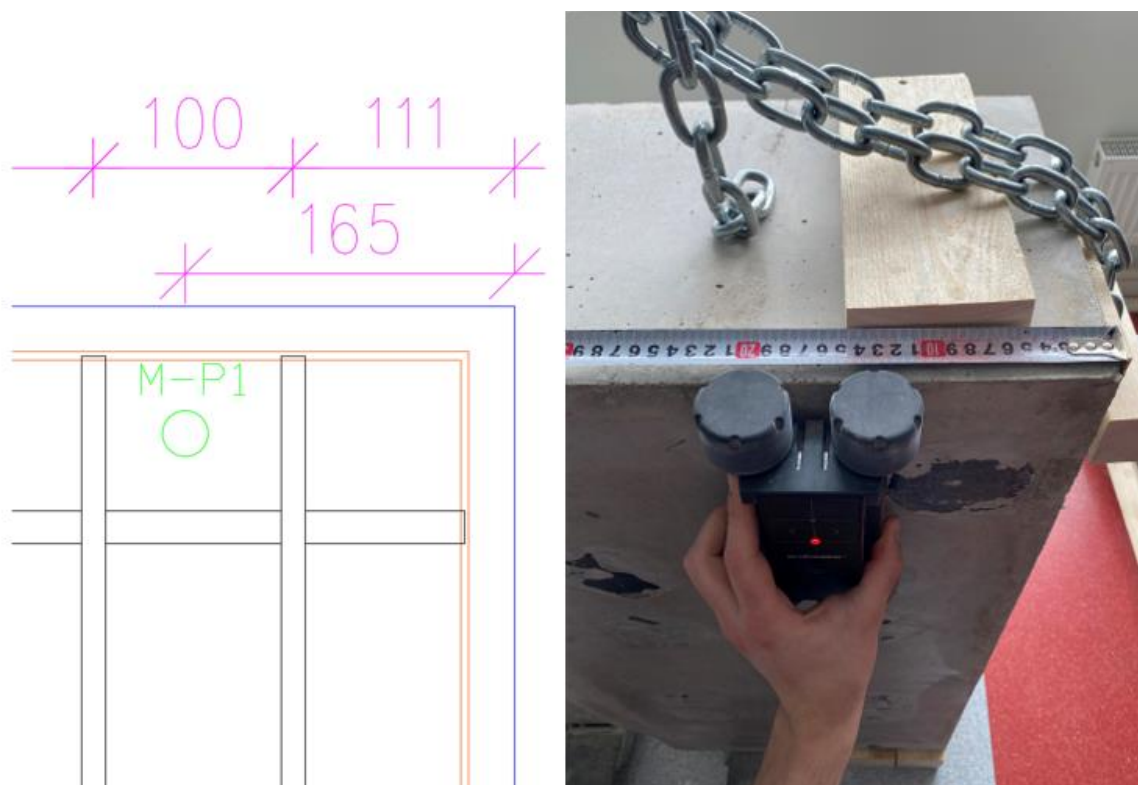


Foto 7. Mõõtepunkti asetus joonisel võrreldes katsekehaga, kus seade tuvastas terasvarda

Tabel 6. Proceq Profometer 600 12 mm läbimõõduga terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	13	45	95
	Veaprotsent, %		
6	24	1	100
8	13	-1	100
10	0	-4	100
12	-6	-11	100
14	-10	-18	100
16	-15	-22	100
18	-22	-25	100
20	-32	-29	100

5.2.3 Ø 16 mm tulemused

25 mm kaitsekihi puhul olid kaitsekihi mõõtmistulemused erinevate terasvarda läbimõõdude sisestamise puhul adekvaatsed. Kõige lähedasem tulemus reaalsele

kaitsekihile saadi 10 mm terasvarda diameetri sisestamisel mõõteseadmesse. Antud läbimõõdu sisestamise puhul saadi kaitsekihi paksuseks 23 mm ja veaprotsendiks 7%. Mõõdistades katsekeha ja sisestades terasvarda diameetriks 16 mm saadi keskmiseks kaitsekihi väärtuseks 29 mm, mis erineb õigest väärtusest 4 mm võrra ja kasutusjuhendis lubatud ± 1 mm täpsusest 3 mm võrra.

57 mm kaitsekihi puhul saadi kõige täpsem kaitsekihi väärtus 6 mm terasvarda läbimõõdu valimisel mõõteseadmesse. Keskmine kaitsekihi väärtus oli sellisel juhul 57 ja veaprotsent 0%. 16 mm diameetri valimisel saadi kaitsekihi väärtuseks 71 mm, mis on kasutusjuhendi joonises (Joonis 18) toodud täpsusest (± 1 mm) suurem 13 mm võrra.

107 mm kaitsekihiga pinnalt 16 mm läbimõõduga terasvardaid suure kaitsekihi tõttu tuvastada ei olnud võimalik, kuigi tuginedes joonisele (Joonis 20), peaks see olema võimalik.

Mõõtetulemused on toodud järgnevas tabelis (Tabel 7).

Tabel 7. Proceq Profometer 600 16 mm läbimõõduga terasvarda kaitsekihi mõõtetulemused

Mõõteseadmesse sisestatud kaitsekihi väärtus, mm	Kaitsekiht, mm		
	25	57	107
	Veaprotsent, %		
6	15	0	100
8	12	-4	100
10	7	-8	100
12	-8	-14	100
14	-11	-20	100
16	-15	-24	100
18	-19	-27	100
20	-20	0	100

5.3 Terasvarraste asetuse ja betoonist kaitsekihi mõõdistamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan

Kaitsekihi kohta andmete kogumiseks tuleb seadistada, kui sügavalt soovitakse saada konstruktsioonist lõiget. Samuti tuleb määrata, millise vahemiku kohta soovitakse saada infot (0..5 mm; 0..10 mm) või soovitakse saada infot ainult kohtlõike kohta. Sellisel juhul tuleks vaadeldavaks sügavuseks valida 0 mm ja lõike sügavusega liikuda sügavamale konstruktsiooni sisse, kuni lõikele tekivad terasvarraste kontuurid. Lugeses näitu ekraanilt,

tuleb pidada meeles, et seade näitab ekraanil terasvarrast, kuid varda diameetrit tuvastada ei ole võimalik.

5.3.1 Ø 8 mm tulemused

8 mm läbimõõduga ja 25 mm paksuse kaitsekihi puhul näitas Hilti PS 1000 X-Scan kaitsekihti kõige täpsemalt, kui lõike sügavus oli seadistatud 17 mm peale (Foto 8). Tulemused võivad olla mõjutatud terasvarraste omavahelistest väikestest sammudest. Mõõtetulemuste käigus saadud lõikel on samuti näha, et 8 mm vardad on ülevamal pool.

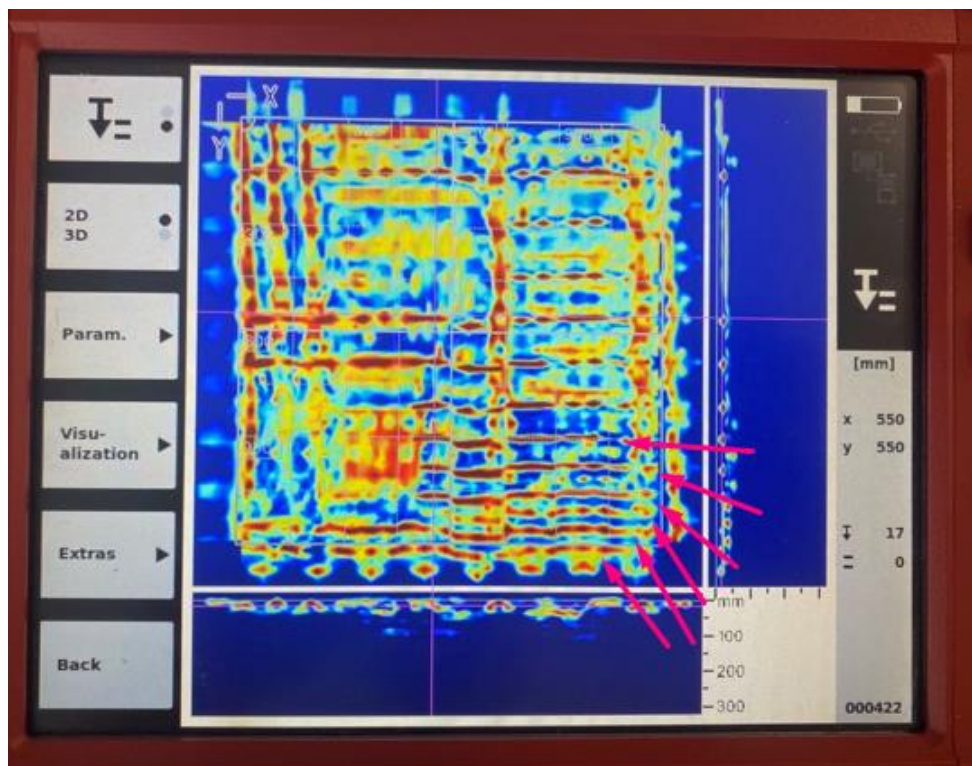


Foto 8. 8 mm läbimõõduga terasvardad lõikes 17 mm peal

5.3.2 Ø 12 mm tulemused

12 mm läbimõõduga terasvarraste puhul, millele projekteeriti kaitsekiht 13 mm, näitas seade kaitsekihti õige täpsemalt, kui seadistati lõike sügavuseks 12-13 mm, mis oli antud varraste puhul ka selliselt projekteeritud ja ehitatud (Foto 9).

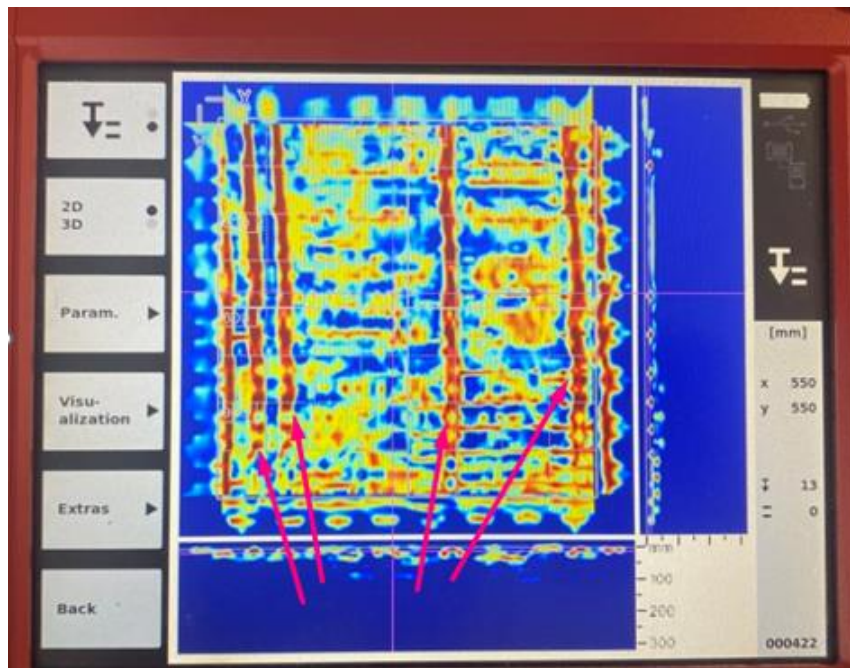


Foto 9. 12 mm läbimõõduga terasvardad lõikes 13 mm peal

5.3.3 Ø 16 mm tulemused

16 mm varrastel, mille kaitsekiht oli 25 mm, näitas seade kaitsekihti kõige täpsemalt 25 mm sügavuse lõike puhul (Foto 10). Antud mõõtmised annavad aimdust, et Proceq Profoscope+ ja Proceq Profometer 600 seadmetega teostatud mõõtmiste tulemused on kaitsekihi paksuse osas ligilähedased tegelikkusele. Pealtvaate puhul ei õnnestu lõikel näha alumises kihis ühtegi varrast. Muud tähelepanekud antud mõõtmiste kohta puuduvad.

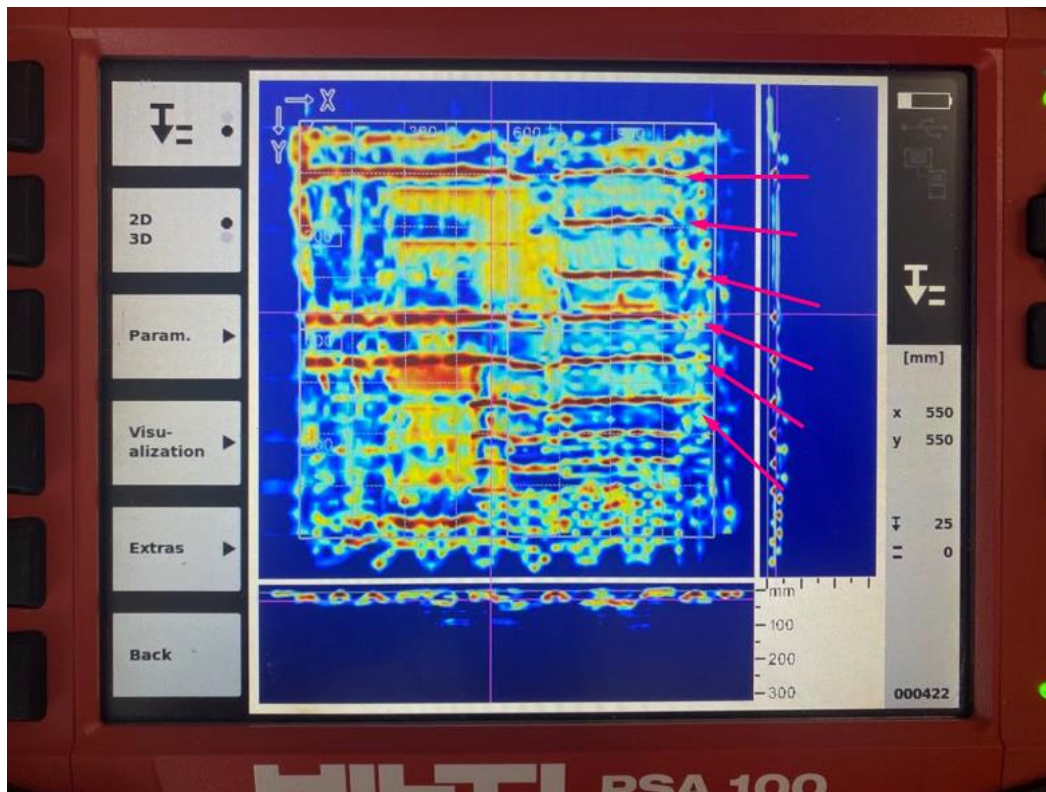


Foto 10. 16 mm läbimõõduga terasvardad lõikes 25 mm peal

5.4 Katsekeha paksuse mõõdistamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan

Konstruktsiooni paksust seadmega Hilti PS 1000 X-Scan tuvastada ei olnud võimalik (Foto 11). Selle põhjuseks on tõenäoliselt sagedaselt asetsevad terasvardad, mis varjestavad alumise osa ära.

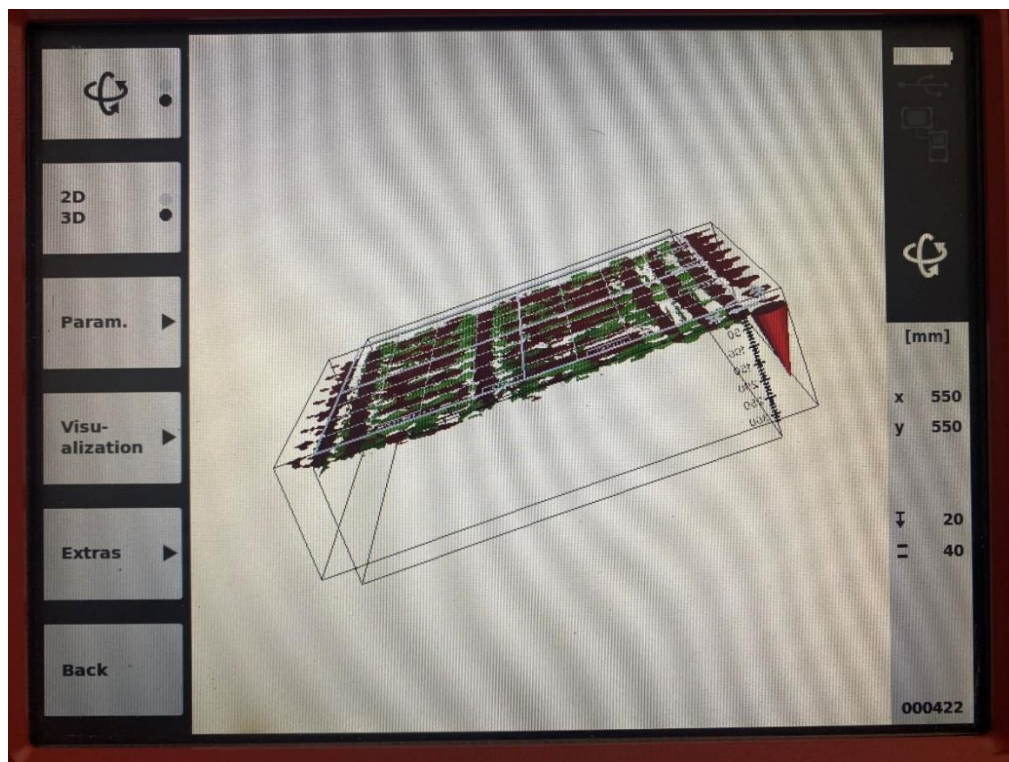
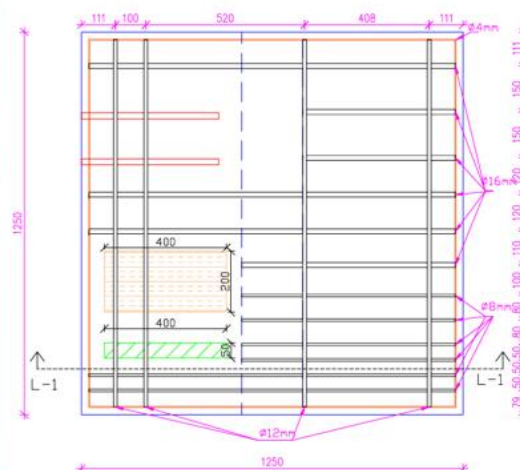
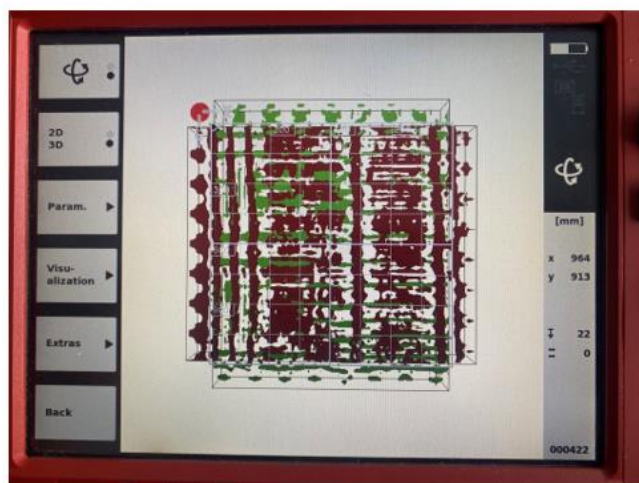


Foto 11. 3D mudel

5.5 3D mudeli loomine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan

Hilti PS 1000 X-Scan puhul on joonisel (Joonis 21) näha 25 mm kaitsekihiga pinda ja seal asetsevaid terasvardaid. 3D mudelis ei olnud võimalik näha sügavamal asuvaid kihte. Siiski tundis seade ära kõik pealmises kihis olevad vardad.



Joonis 21. 3D pealtvaade ja katsekeha võrdlus

5.6 Kaablihülsside ja tühimike tuvastamine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan

Teatud kihilt on võimalik tuvastada ka osa kaablihülssidest, puidust ja vahtpolüstüreenist (Foto 12). Näha on seda osa, mis ei asu terasvarraste all. Kuigi kaablihülssid asuvad katsekehas mõõdetavast pinnast 235 mm sügavusel ning puit ja vahtpolüstüreen algavad alates 200 mm sügavusest näitab Hilti PS 1000 X-Scan nende materjalide asukohas nende sarnanevaid kontuurjooni 26 mm sügavusel.

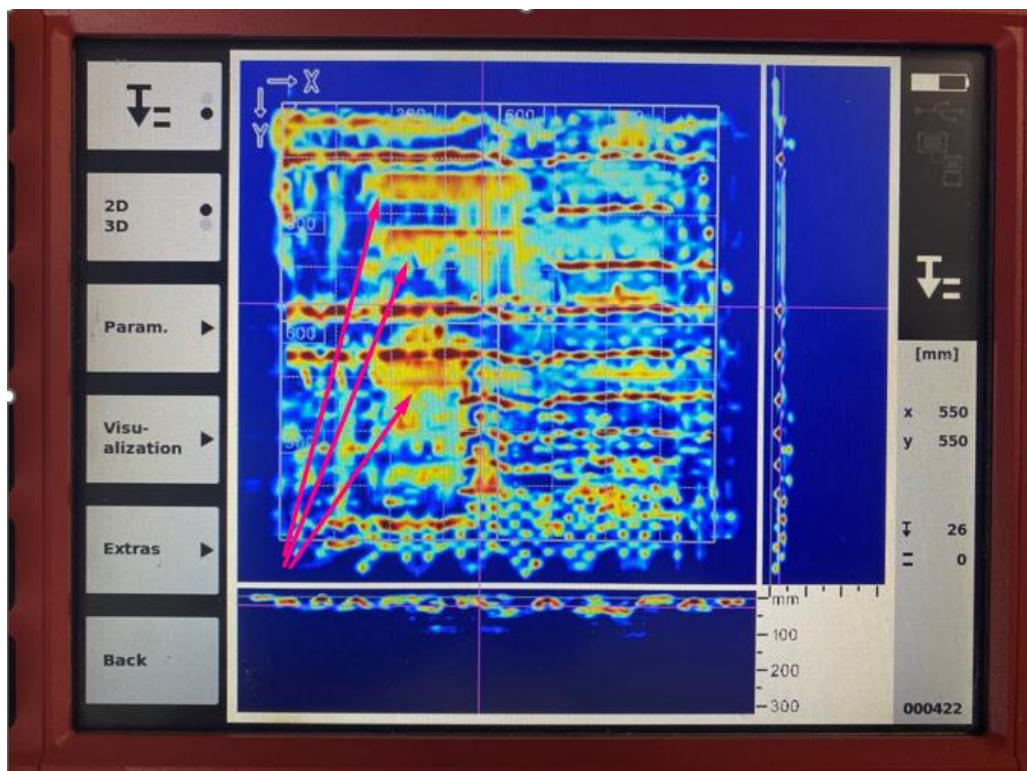


Foto 12. Kaablihülssid, puit ja vahtpolüstüreen 26 mm sügavusel lõikel

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö raames uuriti mittepurustavaid meetodeid ja valmistati katsekeha, millega uuriti mittepurustavate mõõteseadmete Proceq Profoscope+, Proceq Profometer 600 ja Hilti PS 1000 X-Scan mõõtetulemusi.

Lõputöös on antud erialakirjanduse abiga ülevaade erinevatest mittepurustavatest meetoditest raudbetoonkonstruktsioonide uuringuteks. Kirjeldati mittepurustatavaid meetodeid nagu pörkevasara, müüontomograafia, termograafia ultraheliimpulsi, elektromagnetimpulsi, SonReb-i, elektrilise takistuse ja radari meetoditele.

Elektromagnetimpulsi meetodil töötavate seadmetega Proceq Profoscope+ ja Proceq Profometer 600 katsetati mõõteseadmete usaldusväärsust betoonist kaitsekihi mõõdistamisel ja katseseeria lõpuks arvutati välja veaprotsent, mis tekib erinevate varda läbimõõdudega mõõdistades. Mõõtetulemused olid järgmised:

- Mõõteseadmetega oli võimalik tuvastada terasvardaid ja mõõdistada nende kaitsekihte kasutusjuhendites toodud piirväärtuste ulatuses.
- Korrektse terasvarda läbimõõdu sisestamisel mõõteseadmesse ei suutnud mõõteseadmed anda õiget kaitsekihi paksuse väärtust. Korrektne tulemus saadi reaalsest katsekehas asetsevast terasvarda läbimõõdust 2 mm suurema või väiksema valimisel. Selle põhjuseks on ilmselt varda ribid, mille puhul mõõteseadme võib armatuurvarrast tuvastada suurema või väiksemana.
- Vastavalt kasutusjuhendile ei suuda Proceq Profoscope+ 57 mm kaitsekihiga pinnalt tuvastada väikese sammuga terasvardaid, mida kinnitab ka läbiviidud katse.
- Kummagi mõõteseadme puhul ei olnud võimalik tuvastada terasvardaid 107 mm kaitsekihiga pinnalt tõenäoliselt liiga suure kaitsekihi paksuse tõttu.
- Suuremate läbimõõdude sisestamisel mõõteseadmesse häirisid mõõtetulemusi seadme magnetväljas asetsevad teised terasvardad, mis asusid mõõdistatava varda läheduses või risti üle selle.

Radari põhimõttel töötava Hilti PS 1000 X-Scan seadmega loodi kehast 3D mudel ja seda analüüsides oli nende tegelikku asukohta teades võimalik tuvastada katsekeha sisse paigutatud kaablihülslid, puitprussi ja vahtpolüstüreeni. Radari põhimõttel töötava seadmega jõuti järgmiste tulemusteni:

- Hilti PS 1000 X-Scan seadmega loodud 3D mudelis suutis seade ülemises kihis tuvastada kõik terasvardad. Pealmises kihis asetsevad terasvardad varjestasid ära mudeli alumised kihid, mistõttu alumisi kihte 3D mudelis näha ei olnud.
- Konstruktsiooni paksust seade tuvastada ei suutnud.

Suurel määral mõjutasid elektromagnetimpulsi meetodil töötavaid seadmeid mõõtetulemusi naabervaraste samm ning betoonkaitsekihi paksus, mille suurenedes sattus mõõteseadme elektromagnetvälja naabervardaid, mis hakkasid mõõtetulemusi häirima. Täpsete mõõtetulemuste saamiseks tuleb järgida mõõteseadmete kasutusjuhendites toodud piirväärtusi. Antud lõputöös käsitleti kolme mõõteseadet, kuid tulevikus saaks valideerida katsekeha peal ka teiste töös välja toodud seadmete mõõtetäpsust.

SUMMARY

Validation of the Results of Non-Destructive Measuring Devices for Reinforced Concrete Structures on a Reference Test Specimen

In this thesis, the limit values of measuring devices were investigated using non-destructive methods tested on a reference test specimen. In addition, the thesis provides an overview of non-destructive methods for measuring reinforcement position, diameter, concrete cover and structure thickness. The tests were carried out with Proceq Profoscope+ and Hilti PS 1000 X-Scan equipment, which is used at TTK University of Applied Sciences and used by its Institute of Civil Engineering for building condition assessments, and Proceq Profometer 600, which was borrowed from Teede Tehnokeskus. In the future, it will also be possible to test the measurement capabilities of the Proceq PM8000 Pro and the Proceq GP8000 on the test specimen.

For the measurement, a test specimen with dimensions of 1250×1250 mm and three different concrete covers was assembled. The experimental set-up was reinforced and a wooden beam, polystyrene foam and cable sleeves were added to determine how the equipment reacts to them. For the Hilti PS 1000 X-Scan, which operates on the principle of radar, a grid was stuck to the surface of the test specimen to localise the reinforcement, a 2D view and 3D model were created and an attempt was made to measure the total thickness of the test specimen. The Profoscope+ and Profometer 600, which operate on the eddy current principle, were used to measure the diameter and concrete covering of the reinforcement by moving them along the surface of the test specimen.

The measurements taken using the eddy current equipment gave the following results:

- When measuring with Profoscope+, the table in the instruction manual indicates the reinforcement spacing and the protective covering below which it is not possible to distinguish between the two rebars. In this test, the reinforcement spacing was 50 mm and the concrete cover 57 mm, in which case the device should detect two separate 8 mm thick rebars; instead, it detected the two rebars as one.
- It was not possible to determine the correct value of the concrete covering when the exact diameter of the reinforcement was entered in the device. The correct result was mostly obtained by entering a diameter value 2 mm lower or higher than the actual value.
- For thicker layers, the Profoscope+ was unable to detect rebars with a small spacing (50 mm), while the Profometer 600 detected most such rebars.
- For both measuring devices, it was not possible to detect defects in the area with a 107 mm thick concrete cover.

The radar-based device gave the following results:

- The Hilti PS 1000 X-Scan created a 3D model, but the rebars in the measuring surface shielded the part below. The device was not able to detect the greatest thickness of the test specimen.
- The position of the reinforcements was accurately indicated for the 16 mm and 12 mm rebars. In the case of the 8 mm rebars, the measurement results were probably affected by the small spacing between the reinforcements.

The measuring results of the devices operating with the eddy current method were affected by the reinforcement spacing and the thickness of the concrete cover. As the thickness of the concrete cover increased, the neighboring reinforcements entered the electromagnetic field of the measuring device, which started to disturb the measurement results. In order to obtain accurate measurement results, the limit values given in the user manuals of the measuring devices must be followed. In this thesis, three measuring devices were discussed, but in the future, the measurement accuracy of other devices presented in the work could be validated on the test object.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] P. K. Frankowski and T. Chady, "Multisensory Spatial Analysis and NDT Active Magnetic Method for Quick Area Testing of Reinforced Concrete Structures," *Materials* (1996-1944), vol. 16, no. 23, p. 7296, Dec. 2023, doi: 10.3390/ma16237296.
- [2] "Betooni seisukorra uurimine ja katsetamine - EhitusEST." Accessed: Apr. 22, 2024. [Online]. Available: <https://ehitusest.ee/uudis/2019/02/28/betooni-seisukorra-uurimine-ja-katsetamine/>
- [3] A. Hussain and S. Akhtar, "Review of Non-Destructive Tests for Evaluation of Historic Masonry and Concrete Structures: Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V.)," *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V.)*, vol. 42, no. 3, pp. 925–940, Mar. 2017, doi: 10.1007/s13369-017-2437-y.
- [4] J. Helal, M. Sofi, and P. Mendis, "Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2015, doi: 10.56748/ejse.141931.
- [5] "Silver Schmidt hammer." Accessed: Feb. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.matest.com/en/product/c383-10-silver-schmidt-hammer-digital>
- [6] E. Niederleithinger *et al.*, "Muon Tomography of the Interior of a Reinforced Concrete Block: First Experimental Proof of Concept: Journal of Nondestructive Evaluation," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 40, no. 3, pp. 1–14, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10921-021-00797-3.
- [7] "Solutions," GScan. Accessed: May 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.gscan.eu/solutions>
- [8] G. F. SIRCA Jr. and H. Adeli, "Infrared Thermography for Detecting Defects in Concrete Structures: Journal of Civil Engineering & Management," *Journal of Civil Engineering & Management*, vol. 24, no. 7, pp. 508–515, Nov. 2018, doi: 10.3846/jcem.2018.6186.
- [9] "J. Imaging | Free Full-Text | Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete." Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-433X/2/2/11>
- [10] A. Lorenzi and F. T. Tisbieriek, "Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens".
- [11] "Pundit Lab Plus Ultrasonic Tester with compressive strength & time stamp | Impact - civil engineering materials testing equipment." Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.impact-test.co.uk/products/6029-pundit-lab-plus-ultrasonic-tester-with-compressive-strength-and-time-stamp/>

- [12] "ResiPod-BrochureV2.pdf." Accessed: Apr. 25, 2024. [Online]. Available: <http://www.pcte.com.au/images/pdf/Resipod%20-%20Resistivity%20Meter/ResiPod-BrochureV2.pdf>
- [13] C. Chingălată, M. Budescu, and R. Lupășteanu, "Accuracy in Predicting the Compressive Strength of Concrete Using Sonreb Method: Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi - Construction & Architecture Section," *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi - Construction & Architecture Section*, vol. 67, no. 3, pp. 97–106, Jul. 2017.
- [14] "Profoscope_Operating Instructions_English_high.pdf." Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Profoscope_Operating%20Instructions_English_high.pdf
- [15] AS Teede Tehnokeskus, "Asfaltkatteid mittepurustava vastuvõtusüsteemi väljatöötamine." 2014.
- [16] M. Kruus, "Ravila silla tehnilise seisukorra hindamine," Tallinna Tehnikakõrgkool, 2020. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ttkk.ee/handle/20.500.12863/2835>
- [17] K. Aas, "Ultrahelimeetodi kasutamine betoonis esineva prao sügavuse määramiseks," Tallinna Tehnikakõrgkool, 2017. Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ttkk.ee/handle/20.500.12863/1835>
- [18] R. Vahter, "Betooni survetugevuse määramine mittepurustaval meetodil," Tallinna Tehnikakõrgkool, 2020. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ttkk.ee/handle/20.500.12863/2877>
- [19] "Proceq Profoscope Rebar Detector and Covermeter – Pine Environmental." Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.pine-environmental.com/products/proceq_profoscope_rebar_detector_and_covermeter
- [20] "Profometer_Operating Instructions_English_high.pdf." Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Profometer_Operating%20Instructions_English_high.pdf
- [21] "Profometer Sales Flyer_English_high.pdf." Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Profometer%20Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [22] "Proceq Profometer 600 - Rebar detectors and corrosion measurement devices | Elintos MS." Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.elintosms.lt/en/products/concrete-testing-devices-35/rebar-detectors-and-corrosion-measurement-devices-202/proceq-profometer-600-3107>

- [23] "Profometer PM8000 Pro." Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.screeningeagle.com/en/products/profometer-pm8000-pro>
- [24] *Heat map & augmented reality | Profometer PM8000*, (Feb. 08, 2023). Accessed: Mar. 29, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=5Ra-XUoEZ6o>
- [25] X.-S. Ps and F. Ps, "INNOVATIVE SOLUTIONS FOR CONCRETE SCANNING".
- [26] Hilti, "Betoniskanner PS 1000 X-Scan - Betoniskannerid - Hilti Eesti." Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.hilti.ee>
- [27] "Proceq GP8000 | Portable Ground Penetrating Radar." Accessed: Mar. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.screeningeagle.com/en/products/proceq-gp8000>

LISAD

Lisa 1. Proceq Profoscope+ mõõtetulemused

Lisa 2. Proceq Profometer 600 mõõtetulemused

Lisa 1. Proceq Profoscope+ mõõtetulemused

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm												Keskmine, mm	Veaprotsent, %
8	25	5	18	19	20	22	22	23	21	20	21	23	22	21	16	
8	25	6	19	20	21	22	25	25	22	22	23	24	24	22	10	
8	25	8	21	22	23	24	26	27	24	23	25	26	26	24	3	
8	25	10	23	22	23	24	25	27	25	24	26	27	27	25	1	
8	25	12	23	25	25	26	27	29	26	25	26	29	29	26	-5	
8	25	14	23	24	25	26	29	30	27	26	28	32	31	27	-9	
8	25	16	25	26	27	28	30	31	28	27	29	31	30	28	-13	
8	25	18	26	28	29	30	31	32	29	28	30	33	32	30	-19	
8	25	20	27	28	29	30	32	34	30	31	32	31	33	31	-23	
8	57	5	52	53	0	0	0	0	54	54	0	0	0	19	66	
8	57	6	57	57	0	0	0	0	52	55	0	0	0	20	65	
8	57	8	54	60	0	0	0	0	58	58	0	0	0	21	63	
8	57	10	62	62	0	0	0	0	60	60	0	0	0	22	61	
8	57	12	63	64	0	0	0	0	61	60	0	0	0	23	60	
8	57	14	66	66	0	0	0	0	63	60	0	0	0	23	59	
8	57	16	68	69	0	0	0	0	65	65	0	0	0	24	57	
8	57	18	70	70	0	0	0	0	66	66	0	0	0	25	57	
8	57	20	70	70	0	0	0	0	72	73	0	0	0	26	55	

TEGELIK LÄBIMÕÖT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÖT, mm	KAITSEKIHID, mm								Keskmine, mm	Veaprotsent, %
8	107	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

TEGELIK LÄBIMÕÖT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÖT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
12	13	5	15	14	17	17	15	14	15	15	9	9	9	14	-4
12	13	6	12	12	14	14	11	12	12	12	7	7	7	11	16
12	13	8	13	12	16	16	14	11	14	12	7	7	6	12	10
12	13	10	13	14	17	17	14	13	15	12	9	10	11	13	-1
12	13	12	14	15	17	17	14	15	15	13	9	10	11	14	-5
12	13	14	16	17	18	18	15	15	15	14	11	12	12	15	-14
12	13	16	16	17	20	20	17	16	17	15	11	11	11	16	-20
12	13	18	17	18	21	21	17	17	17	15	16	14	16	17	-32
12	13	20	18	19	22	22	18	18	18	16	16	14	16	18	-38
12	45	5	42	41	42	41	39	40	36	40	38	43	38	40	11
12	45	6	45	43	44	43	41	42	38	42	40	44	39	42	7
12	45	8	47	45	46	46	43	44	41	44	42	46	41	44	2

TEGELIK LÄBIMÕÖT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÖT, mm	Kaitsekihid, mm												Keskmine, mm	Veaprotsent, %
12	45	10	48	47	48	47	44	46	45	46	41	48	45	46	-2	
12	45	12	49	48	48	48	46	47	43	47	43	48	45	47	-3	
12	45	14	51	50	49	49	46	49	45	48	43	51	46	48	-6	
12	45	16	53	51	51	51	47	50	47	50	47	52	48	50	-11	
12	45	18	57	55	55	55	52	54	49	54	50	57	51	54	-19	
12	45	20	59	57	56	57	52	56	51	55	51	57	52	55	-22	
12	95	5	54	54	0	51	53	0	0	0	61	60	0	30	68	
12	95	6	60	60	55	55	57	59	68	0	67	67	0	50	48	
12	95	8	66	67	61	62	62	63	0	0	74	74	0	48	49	
12	95	10	69	71	66	67	67	67	77	77	78	80	0	65	31	
12	95	12	76	78	70	71	0	0	0	0	82	82	77	49	49	
12	95	14	82	82	74	75	0	0	88	87	88	89	67	67	30	
12	95	16	87	88	79	80	0	82	93	0	0	94	90	63	34	
12	95	18	92	92	84	84	85	88	98	98	97	99	90	92	4	
12	95	20	93	95	87	88	90	92	101	101	100	100	88	94	1	
16	25	5	18	20	20	19	20	19	20	19	19	21	19	19	22	
16	25	6	19	21	22	20	21	21	21	21	20	23	21	21	16	
16	25	8	20	23	23	22	23	23	23	22	22	25	22	23	10	
16	25	10	22	24	24	23	24	24	24	23	23	26	24	24	5	
16	25	12	22	25	25	24	25	25	25	24	24	27	25	25	1	
16	25	14	24	26	26	25	26	26	26	25	25	28	26	26	-3	
16	25	16	24	27	27	26	27	27	27	26	26	29	27	27	-7	
16	25	18	26	28	30	27	28	28	28	27	27	30	28	28	-12	
16	25	20	27	29	30	28	29	29	29	29	29	31	29	29	-16	
16	57	5	38	50	48	47	46	46	48	48	48	47	47	47	18	
16	57	6	52	52	50	50	49	49	50	50	54	50	48	50	12	

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
16	57	8	55	55	53	52	52	51	51	52	51	52	52	52	8
16	57	10	53	57	55	54	53	53	55	55	55	54	54	54	5
16	57	12	53	59	57	56	55	55	56	55	56	55	55	56	2
16	57	14	52	60	59	57	56	56	57	57	57	56	56	57	1
16	57	16	55	63	61	60	58	58	60	60	59	59	59	59	-4
16	57	18	62	65	63	62	60	60	60	60	60	61	60	61	-7
16	57	20	61	67	65	63	62	62	64	65	63	61	61	63	-11

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm						Keskmine, mm	Veaprotsent, %
16	107	5	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	6	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	8	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	10	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	12	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	14	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	16	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	18	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	20	0	0	0	0	87	88	29	73

Lisa 2. Proceq Profometer 600 mõõtetulemused

TEGELIK LÄBIMÕÖT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÖT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
8	25	6	20	22	24	23	22	20	20	23	23	23	25	22	11
8	25	8	22	23	24	24	26	27	23	24	24	23	26	24	3
8	25	10	25	26	26	26	28	29	24	25	26	25	27	26	-4
8	25	12	25	27	27	28	30	31	26	27	27	28	29	28	-11
8	25	14	23	25	25	26	28	29	23	25	25	25	28	26	-3
8	25	16	23	25	26	27	29	30	24	26	26	25	27	26	-5
8	25	18	25	28	28	29	31	32	26	27	28	27	30	28	-13
8	25	20	26	30	29	30	32	34	29	29	30	29	31	30	-20
8	57	6	55	56	56	56	55	46	63	62	59	61	61	58	-1
8	57	8	51	51	51	52	0	53	70	71	66	66	65	54	5
8	57	10	56	57	58	0	53	0	67	67	69	69	64	51	11
8	57	12	54	47	55	0	0	52	76	76	73	72	71	52	8
8	57	14	58	50	0	0	0	0	79	78	74	74	74	44	22
8	57	16	60	60	61	0	0	0	75	76	73	0	0	37	35
8	57	18	65	65	66	0	66	0	79	80	76	0	0	45	21
8	57	20	64	64	65	0	67	0	81	81	78	77	76	59	-4

TEGELIK LÄBIMÕÖT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÖTU, mm	Kaitsekihid, mm								Keskmine, mm	Veaprotsent, %
8	107	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕTU, mm	Kaitsekihid, mm								Keskmine, mm	Veaprotsent, %
8	107	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	107	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
12	13	6	8	9	11	12	11	11	11	9	10	8	9	10	24
12	13	8	10	10	14	15	14	13	11	10	10	7	10	11	13
12	13	10	11	13	16	16	13	14	13	12	12	11	12	13	0
12	13	12	13	15	19	18	15	14	15	14	10	7	12	14	-6
12	13	14	13	14	18	18	15	15	15	13	14	10	12	14	-10
12	13	16	14	16	19	20	16	16	15	14	12	9	13	15	-15
12	13	18	15	17	20	20	16	16	17	13	15	10	16	16	-22
12	13	20	16	18	21	21	17	17	19	17	16	11	16	17	-32
12	45	6	19	48	49	48	46	47	43	47	42	50	49	44	1
12	45	8	14	47	51	51	48	49	45	49	47	51	46	45	-1
12	45	10	18	52	52	52	50	50	47	50	46	53	47	47	-4
12	45	12	20	51	56	56	53	54	50	54	50	57	50	50	-11
12	45	14	19	55	60	60	56	58	53	58	53	60	53	53	-18
12	45	16	16	57	61	61	57	59	56	59	60	60	56	55	-22
12	45	18	19	61	63	62	59	61	56	60	56	63	58	56	-25

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
			28	63	64	63	61	61	57	61	58	65	58		
12	45	20	28	63	64	63	61	61	57	61	58	65	58	58	-29
12	95	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12	95	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	25	6	19	21	22	21	22	21	21	21	21	23	21	21	15
16	25	8	21	22	23	22	22	22	22	21	22	23	22	22	12
16	25	10	22	23	24	23	24	23	25	22	23	25	23	23	7
16	25	12	26	28	28	27	27	27	27	27	27	28	26	27	-8
16	25	14	26	28	29	27	29	28	28	27	27	30	27	28	-11
16	25	16	25	29	32	28	29	29	29	28	28	31	28	29	-15
16	25	18	28	30	31	29	31	30	30	29	29	31	29	30	-19
16	25	20	27	30	31	30	31	30	31	30	29	32	30	30	-20
16	57	6	60	60	58	56	55	55	57	58	56	55	55	57	0
16	57	8	62	63	60	59	58	57	60	60	58	58	59	59	-4
16	57	10	63	65	62	60	60	59	62	63	61	60	60	61	-8
16	57	12	68	68	65	64	63	63	65	66	65	64	63	65	-14
16	57	14	72	72	69	68	67	66	68	68	68	67	66	68	-20
16	57	16	75	75	71	70	68	68	71	72	69	69	68	71	-24
16	57	18	77	75	73	71	70	70	71	72	70	69	81	73	-27
16	57	20	77	76	73	73	72	71	71	71	70	70	69	72	-26
16	107	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

TEGELIK LÄBIMÕÕT, mm	TEGELIK KAITSEKIHT, mm	SISESTATUD LÄBIMÕÕT, mm	Kaitsekihid, mm											Keskmine, mm	Veaprotsent, %
16	107	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
16	107	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100