

Müüonsilm näeb läbi raudbetooni

Taevast tulevat kiirgust kasutades saab Eesti firma **GScan** oma välja töötatud müüondetektoriga edukalt läbi valgustada kõike: alates autodest kuni betoonsildadeni, kaubakonteinereist ja linnavalitsuse hoonetest tuumareaktoriteni.

KRISTJAN KÜÜTER

2018. aastast tegutsev Eesti teadusfirma GScan tegelebki müüöntehnoloogia arendamisega, läbivalgustusseadmete tootmise ja selleks vajaliku tarkvara arendamisega. Nende eesmärk on tuua turule universaalne meetodika, millega saab kahjustamata-purustamata uurida kõikvõimalikke, igasugusest materjalist, sealhulgas terasest ja raudbetoonist valmistatud objektide konstruktsioone ning avastada neis ka võimalikke, inimpilgu ja teiste tehnoloogiate eest seni varjatud rikkeid. Kui alustati tolli jaoks vajalike seadmetega, siis nüüd on saanud üheks arenduste peasuunaks ehitiste läbivalgustamine ehk mittepurustav katsetamine.

“Selleks on seni olnud väga vähe tehnilisi lahendusi. Aga vajadus on suur, eelkõige raudbetooni osas, kuna seda materjali kasutatakse väga suurtes kogustes. Raudbetooni üldistele kasutusvõtetele, samuti arvutuspõhimõtetele pandi ju esimesed, suures osas siiani normiks peetavad alused aastal 1907 paika Saksa ehitusinseneri ning Stuttgarti ülikooli professori **Emil Mörschi** raamatus “Raudbetoonehitised. Teooria ning konstrueerimine”. Sellel põhinevad paljud edasised konstruktsioonilahendused ja kestvusarvutused, aga – mis veel olulisem – ka riiklikud standardid.

Raudbetoon on väga hea ehitusmaterjal, kuid seda kahjustavad kasutusaja jooksul mitmed tegurid – näiteks betooni karboniseerumine kui loomulik, betoo-

nile omane protsess korrodeerib sarrust, see võib viia tõsiste purustuste tekkimiseni, samuti ohustavad näiteks sildu kloriidid, mis samuti kahjustavad sarrust,” rääkis GScani tootejuht **Sander Sein**.

“Samas aga on neid kahjustusi avastada, eriti aga nende ulatust uurida või tõsidusastet mõõta väga keeruline. Nii ongi tihti märksa kergem otsustada lammutamise kasuks, kui mõnel raudbetoonist rajatisel on täitunud normijärgne 50 kasutusaastat või see näeb liht-

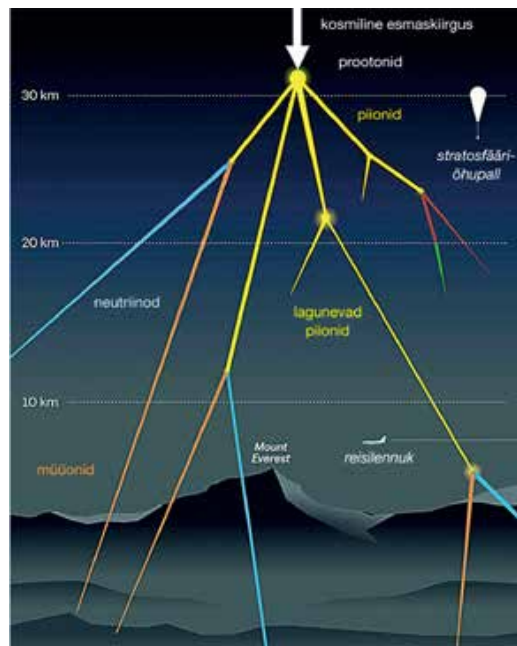


Müüöntehnoloogiat kasutava teadusfirma GScan tootejuht Sander Sein.
FOTO: GSCAN

salt kehv välja, sest selle seisundi uurimine on keeruline ja usaldusväärsete tulemuste saamine pea võimatu. Senised uurimismetodid, ka puurkehade võtmine, on küll vägagi head, aga nendest tegelikult tihti ei piisa. Keegi ei taha võtta vastutust mitteusaldusväärsete andmete põhjal ja nii lähebki igaks juhuks lammutamisele küllaltki palju rajatisi, mis võiksid meid veel pikka aega teenida, kasvõi sajandi-kaks. Kui otsustatakse lammutada, võib elementidele leida kasutuse ka muul kujul ringmajanduse kaudu. See, kui saaksime ehitiste seisundit kindlalt hinnata, hoiaks kokku kulusid ja säästaks loodust. Müüöntehnoloogia sellise, teadusliku, objektiivsetel mõõtmistel põhineva kindluse ka annab,” kinnitas Sein. Tema ettekanne pälvis betooni- ja ehitusspetsialistide tähelepanu ka Eesti Betooniühingu viimasel tehnoloogiapäeval.

Müüonid on väga ohutud

Sekundaarne müüonkiirgus pole kiirgus selles mõttes, mida olemas harjunud selleks pidama, kui on juttu kiirtega läbivalgustamisest – röntgenkiirgus, ka mitte gamma-kiirgus. Esiteks: need tungivad tihedamatest materjalidest läbi vaid mõnekümne sentimeetri



Veidike osakeste füüsikat: kuidas esmane kosmiline kiirgus tekitab Maa atmosfääris astmeliselt hulga sekundaarseid osakesi, sealhulgas müüonkiirguse.

SKEEM: GSCAN, ALLIKAS HORISONT 6/2022 (A. HEKTOR, K. KANNIKE)

ulatuses, teiseks: need kiirgused on inimeste tervisele kahjulikud, suuremas koguses lausa ohtlikud.

“Müüonkiirgust ei tekitata meie seadmes, meie detektor lihtsalt registreerib selle igal pool esineva, loodusliku päritoluga kiirguse osakeste liikumised, rekonstrueerib nende varasema trajektoori, sumbuvuse, nende omaduste muutused oma maatriks-elementide abil. Müüonid tekivad pidevalt, kui ilmaruumis leviv kosmiline kiirgus tungib Maa atmosfääri. Suure energiaga kosmilise kiirguse põrkunud ja lõhustunud osakesed tekitavadki müüoneid, nendel teisese tekkega osakestel on vägagi suur läbimisvõime. Meie detektor jäädvustab nende osakeste trajektoori muutused, mis tekivad uuritava materjali läbimisel ja tehisisintellekti (või õigemini masinõppe programmvara) kasutatarkvara aitab neid pilte tõlkida inimsilmale arusaadavasse vormi,” rääkis kiirguste asjus sissejuhatusseks tootejuht Sander Sein.

Algselt tegeleti teemaga GoSwifti-nimelise ettevõtte alt, uurides meie tolliameti üleskutsuga leida võimalusi autode läbivalgustamiseks, ilma et reisijad peaksid sõidukist lahkuma, võimalike illegaalide ja salakauba otsimist ajal, kui piiril dokumente kontrollitakse. GScanil tekkis idee selleks otstarbeks kasutada müüoneid, see oli ettevõtte ühe asutaja ja tehnoloogiajuhi **Märt Mägi** õnnelik ideevälgatus aastal 2016. Põhjus oli lihtne: looduslikku päritolu müüonid ei kahjusta kuidagi inimesi ega ka muid uurimiseks võetavaid objekte. Tartu ülikooli füüsikute tehtud nn tehtavusuuring kinnitas: tõepoolest, müüonid on sel eesmärgil kasutatavad. Esimene katseseade valmis 2020. aastal, esimene valmistoodo GScani Tõrvandi tehases Tartu külje all aga 2023. aasta kevadel – see tehnoloogia on siiski tuliusus, kuid juba läbinud tõsised tuleristsed.

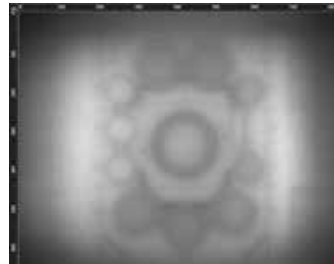
Paldiski tuumaeksam

Esimene töö, tellijaks Eesti riik, oli Paldiskis asuvate tuumaobjektide läbivalgustamine. Seal on kunagises nõukogudeaegses õppekeskuses lahingallveelaevade õppeotstarbeks kasutatud, kuid päriselt toiminud tuumareaktorite õppesektsioonid pikkusega 15 ja 12



Paldiski tuumareaktori kaardistamine tuumaohutuse firma AS A.L.A.R.A. tellimusele: ülemine on reaktor, selle all poolemeetrises vahes on müüondetektor ning Andres Nurme operaa-tori rollis. Juuni 2023.

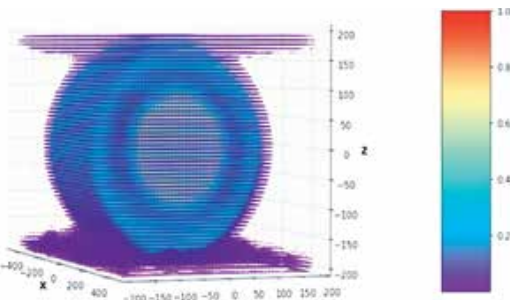
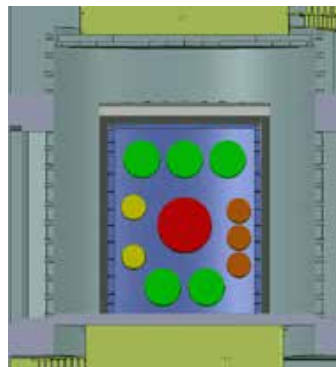
FOTO: GSCAN



Paldiskis asuva uuema reaktori 346B müüonitega läbivalgustamisel saadud esialgne kujutis 3 m kaugusel allveelaeva kere põhjast. November 2023.

Avastus: Paldiskis asuva uuema reaktori 346B sisu enne müüonitega läbivalgustamist. Nagu näha, siis tegelikkus ei vastanud esialgsetele joonistele – reaktori sisu oli 180 kraadi pööratud.

FOTO: GSCAN



Tuumaallveelaeva reaktorisektsiooni läbivalgustamise andmete alusel arvutiga loodud 3D-kujutis, mis näitab, et tarkvara arendusruumi veel jagub.

FOTO: GSCAN

meetrit, läbimõõduga vastavalt 9 ning 7 meetrit. Need sektsioonid konserveerisid pärast Vene mereväe lahkumist Vene spetsialistid nende ümber betoonsarkofaagide ning nende sisse betooni valamise teel.

Nüüd soovis keskkonnaministerium teada saada, mis on betooni täis valatud reaktorite sees, kus on näiteks vaheseinad ja kas seal on säilinud ka radioaktiivset ainet. Seda teadmist on vaja selleks, kui asutakse neid seadmeid 2040. aasta eel tükeldamaks, et radioaktiivne materjal, nagu plaanid ette näevad, ladustada siis Paldiski poolsaarel valmivasse jäätmete lõpladustamise jaama.

“Me olime saanud oma Tõrvandi tehases valmis esimesed kaks detektorit ja asusime kohe neid kasutama. Kui neid sektsiooni haldava ettevõtte Alara sihik oli, et uurimises osalevad ettevõtted saavutaksid läbivalgustamisel eraldusvõimeks vähemalt 30 cm, siis meie seadmetega kogutud andmete põhjal saavutasime 1 cm eraldusvõime. Nii edestasime tugevalt ka näiteks Prantsuse teadlasi, kelle müüonseadmetega saavutati 25sentimeetrine eraldusvõime,” rääkis Sein.

“Igasuguste suuremate objektide, eriti aga metallist või ka raudbetoonist objektide läbivalgustamisel on proovitud mitmeid meetodeid, sealhulgas helilaineid, gammakiiri, röntgeniaparate, georadareid – valik on suur. Aga nende järgemisulatus on parimatelgi juhtudel komposiitmaterjalides vaid kümnekond sentimeetrit või veidi rohkem – maksimaalselt üks meeter. Ja kui näiteks õhukegi metallileht ette tuleb, siis sealt edasi ei näe enam midagi. Müüonitega saab aga läbi valgustada praktiliselt kõike – vajadusel ka kahe-sajameetrist raudbetoonrajatist. Ja müüonitel on erinevus kõigist teistest meetoditest – uurida saab ka kaetud või varjatud metalli, näiteks isegi tankide soomuskatte kvaliteeti, otsida selle seest võimalikke pragusid või muid rikkeid.”

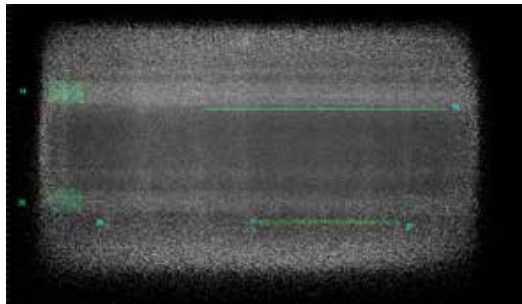
Paldiski objektide uurimisel oli peamine probleem see, et need sisaldavad võimalikke ohte: “Uurimisel saime väga hea pildi sellest, kus asuvad näiteks sektsioonide vaheseinad ja nii edasi. Ühtlasi saime vastuse peamisele küsimu-



Järelpingestatud raudbetoonist silla elemendi läbivalgustamine Suurbritannia uurimisprojekti "Structures Moonshot" raames. September 2023.

FOTO: GSCAN

Otse silla all: GScani müüonidetektor koos tugimooduliga, mõõdistuse käivitamine septembris 2023. FOTO: GSCAN



Rekonstrueeritud toorandmetepõhine vaade järelpingestatud sillatala sisse. Selgitus vilumatule inimpilgule: vasakul on rohelisega tähistatud kahe järelpingestatud terastrosside kanali algused. Ülemisel on joonega tähistatud koht, kus trossikimp on keskele koondunud (heledam ala, tumedam ala tähistab mörti). Alumises kanalis on märgistatud koht, kus on kanalis mörti puudu, mistõttu hajuvus väiksem ja ala tumedam. Detsember 2023. FOTO: GSCAN

sele: jah, ühes sektsioonis oligi sinna betoneerimise eel ladustatud kiirgavaid radioaktiivseid jäämeid," rääkis GScani ühest esimest suuremast edust Sander Sein.

Eripäraks on erilisel hea tarkvara

"Kui küsida, miks müüoneid seni ja juba laialt ei kasutata, siis selleks on vähemalt kaks põhjust. Esiteks: sobiva täpsusega tehnoloogia on olnud kallis ja raskesti kättesaadav ning kuna müüoneid pole liikvel väga tihedalt (ruutmeetrit läbib tunnis vaid u 10 000 osakest), siis tuleb neid maksimaalselt kätte saada. Halva kvaliteediga sead-

metega võtab läbivalgustamine ka palju aega (Prantsuse uuringu näitel keskmiselt 40 päeva ühes kohas vs. meie 48 tundi ühes kohas). Ja teiseks: tekkiva kujutise analüüs on keeruline. Meie kasutame selleks arvuti masinõppe tarkvara. Meie lahendus on ainulaadne, võimaldab luua objektist ka detailse 3D-mudeli. See lahendus on meie edu alus, see on patenditud," selgitas Sein.

"Mõõtmiseks on põhimõtteliselt kaks teed. Üks: atmosfääri ülakihtides tekkinud, materjale läbindavate müüonite tekitatava pildi püüdmine pärast uurimisobjekti läbimist. Teine: üks detektor on kiirte ja objekti vahel ehk "peal", teine aga objekti taga ehk "all," sõnas ta.

Kahepoolne meetod annab täpsema pildi kiiremini, aga väga hästi töötab ka teine, n-õ ühepoolne meetod. Muide, kuna müüonid on liikvel kogu maapinnalt nähtava tähistaeva ulatuses, saab neid püüda nii objekti all, nagu oli näiteks Paldiskis, aga ka näiteks horisontaalseid kiiri kinni püüdes, detektori töösuund näiteks horisondile suunatud. "Müüonid on liikvel kõigis suundades, nii ei pea maja läbi valgustamiseks sugugi mitte selle alla süvendit kaevama, nagu tihti arvama kiputakse. Muide, kõige tugevam on müüonite voog horisondist 53 kraadi kõrgusest suunast," tutvustas väga kasulikuks osutunud sekundaarsete kosmiliste osakeste eripärasid Sander Sein.

Kuigi algselt pakkide ja autode skaneerimise seadmed on need, mille jaoks Tõrvandis asuvat robot-tooteliini kasutatakse, siis pärast edukat avangut Paldiskis on võetud peamine siht kõikvõimalike ehitiste ning rajatiste läbivalgustamisele. GScan ja firma edu on mõlemad üsna noored – Paldiski täpsemad tulemusedki saadi esitusvalmis alles äsja. Aga juba enne esmast edu mindi edasi: Inglismaale sildu uurima.

Vaadata sildade sisse ...

Tallinna Tehnikaülikooli ja Portugali Minho ülikooli doktori-kraadiga Sander Sein valgustas järgmist GSani ees seisnud põnevat väljakutset: "Suurbritannia kuulutas pärast üht tõsisemat järelpingestatud sillaga seotud ohusituatsiooni ja selle põhjustatud, väidetavalt riigi ajaloo üht suure-

mat liiklusummikut välja uuringu, et kokkuvõttes teada saada, millises seisundis on nende ligi 1200 järelpingestatud maantee-silda." Ta selgitas, et asja tegi eriliseks ja nende jaoks, nagu ilmnas, lausa GScani peasihti muutvaks, see, et probleemsed on eelkõige suurte liiklusmagistraalide sillad, mida on aastakümnete jooksul ehitatud, kasutades üht konkreetset elementi – see on järelpingestussüsteem koos ümbrise ja sisuga. "Sarnast lahendust kasutati ka sillal, mis varises 2018. aastal kokku Itaalias. See oli Morandi sild Genovas, mille varingu käigus hukkus 43 inimest," rääkis ekspert.

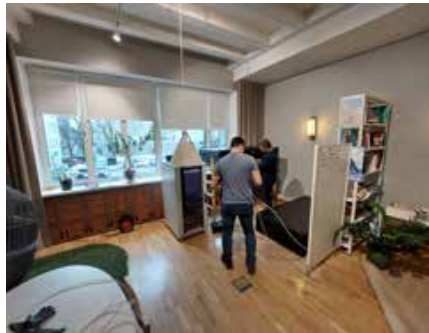
"Selle lahenduse eripära on, et pingestatud trossid kulgevad betoonivalu sees pikuti olevates, plastist või ka metallist torudes, mis on trosside korrosiooni vältimiseks täidetud betooniseguga. Lühidalt: pole ühtki tõsiseltvõetavat meetodit, millega saaks sinna torude sisse vaadata ja piisava objektiivsusega trosside seisundit hinnata." Hankes, mille käigus anti uurimiseks konkreetne, kuue meetri pikkune järelpingestatud raudbetoonist sillatala, osales hulganisti igasuguseid tehnoloogiaid kasutavaid ja arendavaid firmasid – peamiselt Suurbritanniast, kuid ka mitmest muust riigist. "Meie oma müüontehnoloogiaga olime omalaadsetest ainus, kes käis kohal reaalseid mõõtmisi tegemas ja tulemusi andis, rõhutaksin isegi, et arvestades meie arengufaasi, siis üle igasuguste ootuste häid tulemusi. Meie seade näeb läbi trossikanalite ja neid täitva segu ning juba praegu saab hinnata, kas trossid on terved. Nüüd töötame suunas, et saaksime määrata, milline on trosside korrosioonikahjustuste ulatus või sellest tingitud seisukord." Uuring pole veel lõppenud, aga GScanil on ilmselt suuri šansse sealtkaudu pälvida suurt ja teenitud rahvusvahelist tähelepanu.

Värskeim projekt linnavalitsuse majas

Äsja lõppes GScanil projekt, mille käigus uuriti läbi Tallinna linnavalitsuse ja Tehnopolit koostöös välja kuulutatud projekti "Tallinnovation" raames nende Vabaduse väljaku ääres asuva peamaja kvartalisisene tiib, mille joonised pole meie aegadeni säilinud. Eesmärk



GSCani esimesed, 2023. aastal valminud skannerid on mõõtudega 1800 × 1000 × 380 mm ja kaaluga u 100 kg. Fotol on firma tootejuht Sander Sein uue, alternatiivse suurusega skanneriga µFLUX Infra Small AI, mis on ligi kolm korda väiksemate mõõtudega: 650 × 650 × 350 mm. FOTO: GSCAN



Projekti "Tallinnovation" raames Vabaduse väljak 7 Tallinna linnavalitsuse hoone lagede mõõtmise ettevalmistus jaanuaris 2024. FOTO: GSCAN



oli saada teada, kas ja kuidas saab sinna teha ümberehitusi – näiteks, kus kulgevad ventilatsioonišahtid, milline on müüride-seinte seisukord. "Mõned inimesed algul pelgasid, kui kuulsid, et need suured mustad kastid kasutavad seinte uurimiseks kiirgust. Seda kartust oleme varemgi kogunud. Pärast selgitamist aga mured kadusid, töötajad jõudsid nende seadmetega uurimisaja ehk nädalaga ära harjuda. Mõõtmiste käigus põikasime uurima ka ligi 15. sajandist pärit maja Raekoja platsil, kus asub linnaplaneerimisameti muinuskaitseosakond. Eesmärk oli uurida, kas seinad on korras ja kas seal asub šahte või torusid," rääkis Sander Sein. "Veidi riskisime ka – paigutasime detektorid keldrisse lootuses, et selle pilk küünib ehk kolmanda korruseni. Küündiski, kuid täpse ülevaate saamiseks andmete töötlus veel jätkub," sõnas Sein.

"Muidugi meie uurimistöö jätkub, nii riist- kui ka tarkvara on võimalik edasi arendada. Meil on näiteks sihiks praeguse, juba tootmises oleva sada kilo kaaluva detektori kõrvale arendada ka

Uus ja vana andmekogumine kõrvuti. Tallinnas Raekoja plats 12 asuva iidse hoone läbivalgustamine. Keldrisse paigutati müüondetektor (must kast pildil), millega mõõdeti hoonet kuni kolmanda korruseni. Veebruar 2024. FOTO: GSCAN

Skannerite kokkupanek Tõrvandis. Siin valmivad robotliini abil ainulaadsed müüondetektorid. FOTO: GSCAN

väiksem ja kergem, ligi 30kilone variant. Ja tarkvara vallas jätkub täis tuuril masinõppe tarkvara arendamine, õpetamine ning treenimine, et saada veelgi parema eraldusvõimega ning ka asjatundmatule pilgule kergesti loetavaid 3D-kujutisi. Üldiselt saab siiski öelda, et põhimõtteliselt on toode valmis, nüüd seisab, nagu idufirmal ikka, ees selle kommertskasutuseks sobivaks tootestamine, võimaluste loomine selle laiaks turustamiseks ning ulatuslikuks kasutuselevõtuks, kogu maailmas. Sellist ehituselt väga keerulist ja valmistamisel suurt täpsust ning töömahtu nõudvat detektorit juba mõned firmad toodavad. Meie

tehnoloogiale pole praegu võrdset, meie tugevus ongi just tarkvara. Praeguseks oleme saavutanud maksimaalseks eraldusvõimeks fantastilise tunduva 1,25 mm, aga ka see pole veel kaugeltki piir," ütles Sein.

Teine, seni vähe kasutatud suund on materjalide koostise analüüs, valgustas ta lisavõimalusi müüonite rakendamiseks. "Kui praegu, näiteks silda uurides, saame näha, kas seal on ikka trossid ühes tükis, siis üsna pea saame juba mõõdetavaks teha, kui suures osas on seni veel ühes tükis oleva trossi korrosioonimäär või kas betooni kaitsekiht on kloriididest küllastunud või mitte. Edaspidi on võimalik isegi müüonite abil teha kindlaks pildile jäänud ainete keemiline koostis, isegi näiteks terase retsept. Samuti saab näiteks tolipiiril rauast kaubakonteinerist apelsinide vahelt heroiniipakendeid otsida. Ja seda kõike isegi ilma konteinerit avamata. Selliste tulemuste saavutamiseks on meil veel tükk maad minna, sest – vajalik eristusvõime on küll juba praegu olemas, aga edasi on eelkõige vaja õpetada tehistaipu materjale ära tundma. Sel protsessil on mõningane sarnasus spektraalanalüüsiga, kui kellelegi see veidi tuttav tundub," tutvustas detaile ja tehnoloogia tulevikusuundi Sein. E

