

Kiirgust neelav kiudbetoon

Tartu Ülikooli teadusrühm teadur Volodymyr Guliku juhtimisel on välja arendanud kiudbetooni, mis sobib suurepäraselt kasutamiseks tuumaelektrijaamades, tuumajäätmete hoidlates ja ka alles ehitatavates tulevikuenergiaallikates – termotuumareaktorites.

ANTS VILL

Eurofusiooni DEMO fusioonreaktor, kus neutronkiirguse tõkestamiseks kavatakse konstrueerida kasutada Volodymyr Guliku uurimisrühma välja töötatud baalt-boor-kiudu sisaldavat betooni.

ILLUSTRATSIOON: EUROFUSION

Tartu Ülikooli teadlased on juba pikemat aega osalenud Lõuna-Prantsusmaal Cadarache'is arendatavas hiiglaslikus rahvusvahelises termotuumaeenergeetika projektis, mille eesmärk on ehitada valmis esimene toimiv fusioonreaktor ja nii näidata, et fusioonreaktorit saab kasutada pideva ning võimsa energiaallikana. Järgmine samm on näidistermotuumajaam DEMO (*Demonstration Power Plant*), mis peaks olema valmides esimene termotuumajaam, mis annab elektrit elektrivõrku.

Selle, Cadarache'is arendata-



va, maailma ajaloos suurima ja ka kalleima rahvusvahelise projekti-ga loodetakse astuda suur samm kaubanduslike fusioonreaktorite laialdase kasutuselevõtu suunas, märgib Tartu ülikooli teadur **Volodymyr Gulik**, kes on sellega seotud juba aastaid. Ta lisab, et põhjust on oodata ajaloolist pööret paremusele ja efektiivsusele energeetikas, tuumaeenergeetikat ilma kasvuhoonegaaside ning pika-
ealiste radioaktiivsete jäätmeteta.

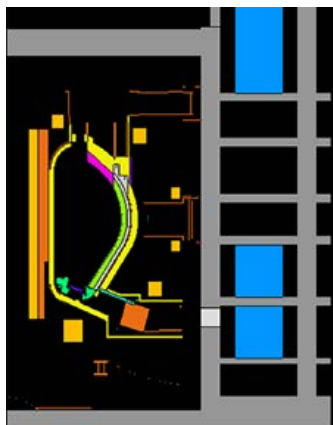
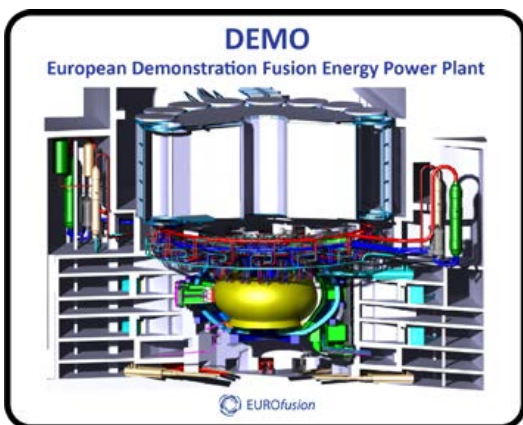
Eesti ja Ukraina teadlasrühm, kes viis Tšornobõlis läbi katsetused reaalse neutronkiirguse allikaga. Vasakult: Valeri Trofimov (Eesti), Volodymyr Gulik (Eesti, Hennadii Odynokin (Ukraina) ja Vitalii Pastuk (Eesti).

FOTO: ERAKOGU

Eesti osa projektis on betoon

Üks osa Tartu teadlaste tööst on olnud täiustada fusioonreaktori ehitamiseks ja varjestamiseks kasutatavat betooni, et see neelaks paremini reaktsiooni käigus tekkinud suure energiaga neutronite voogu ja oleks sellele ka ise piisavalt pika perioodi jooksul vastu pidav. Selles projektis on osalenud juba aastaid edukalt Tartu Ülikooli füüsika instituudi professorid **Indrek Jõgi** ja **Madis Kiisk**.

Modelleerimisprogrammi Monte Carlo mudel DEMO reaktorist: vasakul reaktori toroidi ehk sünteesiruumi läbilõige, paremal kujutatud reaktori betoonkar-kass koos jahutuselementidega. Kujutis: Volodymyr Guliku loo-
dud simulatsiooni kuvatõmmis





Basaltkiu tootmine: jahtunud kiu poolimine Ukraina tehases.

Basaltkiud on kasutusvalmis.

Erineva koostisega basalt-boorkiu näidised Tšornobõlis läbi viidud katsetuste tarvis.

FOTO: VOLODYMYR GULIK



Basalt-boorkiudbetooni katsetused Tšornobõlis 2018. aastal tegeliku neutronkiirguse plutonium-berülliumallikaga.

FOTO: VOLODYMYR GULIK

Euroopa Liidu fusioonialaseid uuringuid toetab ja finantseerib euroliidu vastavaid uurimisasutusi liitev Euroopa Komisjoni konsortsium EUROfusion. Praegu tegutseb kiirgust taluva ja varjestava betooni teemaga reaktori DEMO jaoks Tartu ülikooli füüsika instituudi materjaliteaduse teadur, Kiievi Tuumauuringute Instituutis 2012. aastal doktorikraadi kaitsnud Volodymyr Gulik (45), kes juhib ning juhendab ühtlasi ka valdkonna uurimisega tegelevaid üliõpilasi.

“Professor Indrek Jõgi on ka praegu sel alal tegev, ta on EUROfusioni programmi Eesti koordinaator ja osutanud meie uurimisprogrammile ulatusliku toetust. Professor Madis Kiisk on üheks meie arendatava uurimissuuna – reaktorites kasutada sobiva betooni arendamise ja uurimise asutajatest, ta korraldab

Tartu ülikooli osalemist Euroopa uurimisprojektides, mis tegelevad basalt-boorkiudbetooni uurimisega ning praktikas testimisega,” tutvustab Gulik selle – miks mitte öelda – ajaloolise projekti Eesti-poolsete eestvedajate rolli.

Nüüdseks on tootmiseks ja reaktorites ning tuumahoidlates kasutamiseks valmis boorilisan-diga basaltkiudbetoon, lisaks tehnoloogiad basaltkiu kasutamiseks tavaehitistes kasutatava betooni koosseisus. Peale selle käivad arendustööd betooni armeerimiseks sobiva basaltkiu tootmistehnoloogia alal, räägib Gulik oma uurimisrühma töödest.

Kuidas te betooni kiirguskindluse suurendamise teemani jõudsite?

Lõpetasin 2003. aastal Kiievi Tehnikaülikooli tuumaenergeetika erialal. Seejärel töötasin perspektiivsete tuumareaktorite uurimise ja väljatöötamise alal. Reaktoreid, mida uurisime-arendasime, oli mitut tüüpi: ohutud

Basaltkiu tootmine on tehnoloogiliselt sarnane klaaskiu tootmisega.

Betooni segamiseks peenestatud basaltkiud lähivaates.

FOTO: VOLODYMYR GULIK

Kiirgus-kindel betoon: basalt-boorkiu lõikmed enne betooni segamist Tšornobõlis läbi viidud katsetuste tarvis.

FOTO: VOLODYMYR GULIK

subkriitilised, ADS-reaktorid, tuumakütuse jäätmetega töötavate nn laineotsessidega reaktorid (TWR) – võib öelda, et väga uued arendussuunad. 2012. aastal kaitsesin kandidaadikraadi ehk siinses skaalas PhD ehk doktori-kraadi. Edasi astusin postdoktorantuuri Tartu ülikoolis.

Siis aga kohtusin oma kodumaal elava sõbraga, kes tegeleb samuti teadusliku uurimistööga. Tema tegeles tollal betooni loo-

duslikku päritolu, basaltidest toodetavate kiud- ehk fiiberlisandite uurimise ja arendamisega.

Selgituseks: looduses rikkalikult leiduvat basalti on võimalik sulatada, sulamassist aga tõmmata peeneid niite. Seda niiti saab tükeldatult lisada betooni – nii saab toota kiud- ehk fiiberbetooni. Sellise betooni omaduseks on suur vastupidavus pragude tekkele ja nende tekkimisel ka materjali vastupidavuse säilitamine. Nii on kiulises betoonis tavalisest tunduvalt vähem pragusid, ka mitmed muud omadused – painde- ja survetugevus paranevad.

Jah, naljakas, aga mu sõber rääkis sellest arendussuunast, millega tema tegeleb, kui istusime õllelauas. Siis tuligi mulle pähe mõte: kuidas betooni selliseid omadusi saaks kasutada tuumaenergeetikas. Mõte hakkas liikuma seepärast, et teaduses on tihti olukord, kus mingi valdkond on justkui läbi uuritud – näiteks tuumaenergeetikas on kõik juba läbi uuritud. Mina tegelesin teemadega, mis olid küll huvitavad minu teaduslikule juhendajale, kuid ma ise hindasin, et väljaspool sellist kitsamat ringi need teemad eriti huvi ei paku, sest nende ellu rakendamiseni kulub ilmselt 20–30 aastat. Teaduse mõttes huvitav ala, aga praktikas mitte.

Niisiis, sõber rääkis, mina aga hakkasin kohemaid aru pidama, kuidas sellist betooni saaks tuumaenergeetikas kasutada. Tuumaenergeetikas, nagu teada, vajatakse betooni suurtes kogustes – tuumajaamade ehitamisel ja tuumajäätmete, kasutatud tuumakütuse hoidlate ehitamisel.

Ehkki fiiberbetoon pole uus leiutus, siis sõbraga teemat arutades pärsin: kas sellele kiu toorainele saaks sulatamise ajal mingeid materjale lisada. Ta vastas: jah, muidugi. Kõike, mille sulamistemperatuur on kiu toormaterjali omast madalam. Siis tekkiski mul mõte – kiumaterjalile on vaja lisada booroksiidi. Booroksiid on aine, mis eriti siis, kui seda on rikastatud isotoop boor-10-ga (^{10}B),



neelab eriti hästi neutrone, neutraliseerib need.

Töötasin sel ajal juba Tartu ülikoolis, ja me hakkasimegi seal seda mõtet arendama. Ega see lihtne olnud, sest katseteks oli vaja rajada massiivne katseseade. Selliseid pole eriti palju – üks asub Ukrainas, teine Saksamaal Aacheni ülikooli tekstiilitehnoloogia instituudi juures – instituut osaleb aktiivselt basaltkiu tootmise uurimistöös. Seadet on vaja boorilisandiga sulabasaldist niidi tõmbamiseks.

Kõigepealt hakkasime boorilisandiga basaltkiudbetooni kiirguskaitse omadusi uurima, kasutades Monte Carlo meetodil tahketes kehades kiirguste mõju modelleerimise tarkvara.

Muutujaid varieerides modeldasime, kuidas erinevad boorilisandi kogused ja reaktorite erinevad seinapaksused mõjutavad neutronite neelamist. Modelleerimine andis paljulubavaid tulemusi – selline lahendus peaks hästi töötama. Publitseerisime uurimistulemuste kohta ka mitu teadusartiklit.

Millised olid efektiivsusnäitajad?

Muutujaid on üsna mitu. Palju sõltub sellest, milline on kiirgusallikas. On tugevaid radiatsiooni-allikaid, mis emiteerivad rohkelt neutrone, on väiksema emissiooniga allikaid. Tekkivad neutronid on erineva energiaga. Palju sõltub betoonikihi paksusest.

Mudel näitas, et kui väga lihtsustatult öelda, siis keskmise paksusega betoonikihi puhul suureneb selle neutronite neelamise võime 30–40 protsenti. Lisaks modelleerimisele oleme selliseid tulemusi saavutanud ka neutroniallika ja betooniga läbi viidud vahetutes, reaalses katsetes. Efektiivsus on tõesti päris suur.

Millised on kulutused?

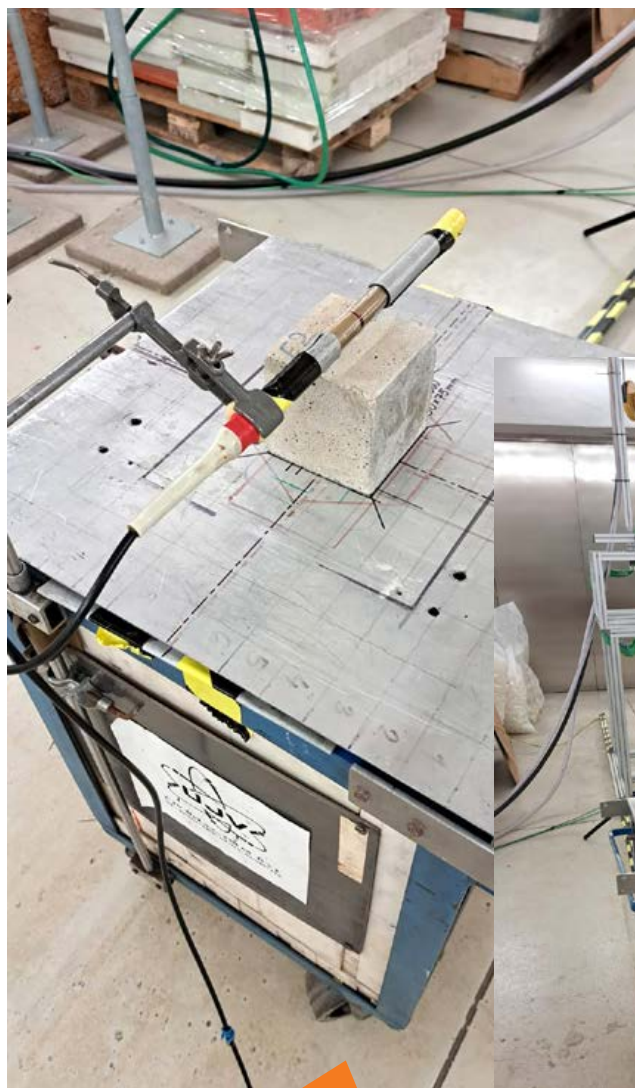
Basaltfiiber on suhteliselt odav: selle kilohind võiks olla nelja euro ringis, kui booriga modifitseerida, siis veidi üle kuue euro. See hind on muidugi hinnanguline ja põhineb meie ootustel toodangu potentsiaalse hinna osas. Hetkel ei ole boorbasaltkiu tööstuslikku tootmist veel alustatud.

Basaltkiudu sisaldav betooninäidis Eesti tootmises. Kühvli serval on märgitud mõned nähtavad kiud.

Erineva koostisega basaltboorikiudbetooni näidised kivistumas Tšornobõlis läbi viidud katsetuste tarvis.

Ukraina uurimislaboris toodetud basaltboorkiu näidis.

FOTOD:
VOLODYMYR GULIK



"Basaltkiud jaguneb betoonis väga ühtlaselt – seda oleme näinud ja näidanud siin Eestis paljude objektide puhul."

Seis tööstusliku tootmise arendamiseks on järgmine: praeguseks on tuumareaktorite ja tuumajäätmete hoidlate jaoks boorilisandiga kiudbetooni arendamise raamprojekti "Development of boron-infused basalt fiber concrete for nuclear and radioactive waste management applications (Boron-Basalt fibers)" käigus demonstreeritud selle kiu tööstusliku tootmise võimalikkust Ukrainas Tšernivtšis asuva tehase baasil. USA firma RockFiber Inc. rajab praegu Texa-

ses boorbasaltkiu tootmise pooltööstuslikku tehist.

Basaltkiu tootmine on tehnoloogiliselt sarnane klaaskiu tootmisega, sellest mõneti isegi lihtsam, ainult sulatamistemperatuuri tuleb täpsemalt hoida. Potentsiaalselt suurtootmises on basaltkiut ka odavam ja tugevam kui klaaskiud. Ja veel detail teadmiseks: kiutükkide sobiv pikkus on betoonis 5–12 mm.

Me korraldasime siin Eestis tavalise, ilma boorilisandita basaltkiu lisamist betooni – ligi üks kilo kuupmeetri kohta. Betoonitootjad nentisid, et ka selle koguse puhul oli juba suur vahe näha: betoonis on vähem mikropragusid, segu ise on aga tunduvalt elastsem.

Nad rääkisid, et lisavad osale betoonist metallkiudu, see aga vajub betooni objektile transportimise käigus segumasina põhja. Basaltkiu puhul seda ei ilmne, kiud jaguneb betoonis väga ühtlaselt – seda oleme näinud ja näidanud siin Eestis paljude objektide puhul.

Selliseid hinnanguid edastas meie uurimisalase koostöö part-

Betooni neutronkiirguse neelamisvõime mõõtmise Tšehhi ÚJV tuumauuringute keskuses, kiirgusallikaks on ameriitsium-berülliumelement.

Volodymyr Gulik seadmas Tšehhi tuumauuringute keskuses ÚJV üles katseseadet, et mõõta boorbetooni näidise neutronkiirguse neelamisvõimet, kasutades ameriitsium-berülliumelementi.

FOTOD: TARTU TEADUSRÜHMA ICONDE PROJEKT

ner, Eestis betoonialal tegutsev firma Laiers Grupp OÜ. Firma juht **Sergei Kovaljov** osaleb ka meie uurimistöodes, ta on meie mitmete selleteemaliste artiklite kaasautor ja Eestis palju basaltkiu populariseerimiseks teinud. Selliseid, praktiliselt põhinevaid hinnanguid oleme saanud mitteametlikult ka teistelt tootjatelt.

Millised on olnud tööstuslikumas mahus katsed?

2018. aastal saime siin Tartu ülikoolis projektile esimese eurorahastuse – viisime seda ellu koos Madis Kiisaga. Selle projekti käigus tegime koostööd ühe Ukraina laboriga, kes siis tootis päriselt esimest korda maailmas seda basalt-boorikiudu, algul laboritingimustes.

Aga juba aasta pärast valmis selle labori eestvedamisel Ukrainas Tšernivtšis asuvas tehases esimene tööstuslikus mastaabis partii. Meil õnnestus tõestada, et selle materjali, boorilisandiga basaltkiu tootmine on võimalik nii laboritingimustes kui ka tööstuslikes mastaapides.

Ühtlasi saime eksperimendi käigus näidata, et selle lisandiga betoon on efektiivne kiirguskaitse. Selline, tegelikku neutronkiirguse tekitamiseks plutoonium-berülliumiallikat kasutanud eksperiment viidi läbi ka Ukrainas Tšornobõlis. Paraku mõni aeg hiljem, 2022. aastal hävitasid selle labori Vene okupandid.

Millised on praktilised rakendused reaktorites?

Praegu on käsil rahvusvaheline projekt EUROfusion, mis tegeleb termotuumareaktori ehk fusioonreaktori arendamisega. Selle projekti esimest, demoreaktori ITER ehitatakse Lõuna-Prantsusmaal Cadarache'is. Eesmärk on näidata, et fusioonreaktori idee ka tegelikkuses töötab. Selle hiigelprojekti järgmine etapp, DEMO, näeb ette juba elektrit tootva katseraktori ehitamist. Selles projektis on kavas kasutada meie uut, kiirgust neelavat basalt-boorikiudu sisaldavat betooni.

Reaktorite puhul, ka praeguste puhul, on inimesi ja aparatuuri ohustavale toimele lisaks tõsine probleem, et radiatsiooni, eelkõige neutronite voo tõttu betoon degradeerub. Selleks kulub küll aastaid, praegustes reaktorites kuni 40 aastat, aga see toimub vältimatult. Kuna aga reaktorid kavandatakse töötama pikaks ajaperioodiks, kerkib see probleem reaktoris varem või hiljem vältimatult esile.

Sealjuures ei degradeeru aga lagune mitte betoon ise, vaid selles sisalduv killustik. See ränirohke materjal hakkab neutronkiirguse pideval mõjul betooni esimese komponendina turduma ja rikub betooni ära: tekivad suured praod, järgneb betooni lagunemine. Nii on see tuumaelektrijaamades praegu.

Aga termotuumareaktoris algab see protsess varem, sest neutronid on kiiremad ja neid on tunduvalt enam kui veega täidetud praegustes, tavalises reaktoris, kus energia vabaneb raskete elementide lagunemisel kergemateks elementideks. Uutes reaktorites toimub betooni degradeerumine sel puhul märksa kiiremini, vaid aastatega. Meie boorfiberbetoon neelab neutroneid hästi, nii on nende purustav toime oluliselt väiksem. Ja ka inimestel on kiirgusohutum loomulikult.

Kes teie uurimisrühma kuuluvad?

Kaasan oma rühma ka üliõpilasi, enamasti Ukrainast. Neid on keskmiselt kuus, arv muutub aastate lõikes. Osa töid on suunatud EUROfusioni jaoks, osa tegeleb kasutatud tuumakütuse hoidlate probleemidega, mis on Ukrainas praegu eriti päevakorras.

Varem tegeles tuumakütusega varustamise ja hilisema jäätmete hoiustamise ning ümbertöötlemisega Venemaa, aga praegu on sõda. Juba 2014. aastal, kui sõda tegelikult algas, lõpetas Ukraina tuumamaterjalide Venemaale saatmise. Kohe aga tekkis probleem: kuhu ladustada Ukraina tuumaelektrijaamade kasutatud tuumakütus?

Tuumajaamade läheduses on selleks ruumi napilt, nii ehitas

Ukraina Tšornobõli regiooni USA tehnoloogiat kasutades suured maapealsed, betoonväljakule paigaldatud kõrged betoonmahutid, kuhu need jäägid ladustatakse. Nende mahutite valamisel saaks kasutada boorfiberbetooni, neid võimalusi uuribki osa minu uurimisrühmast.

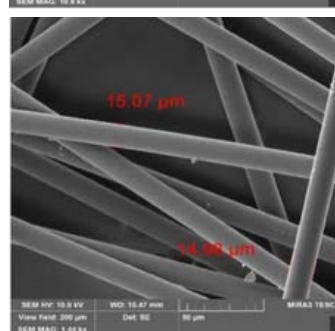
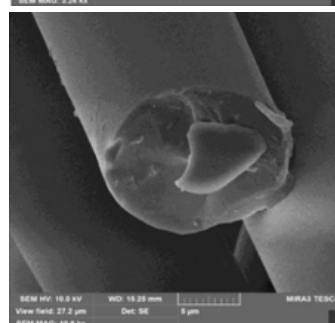
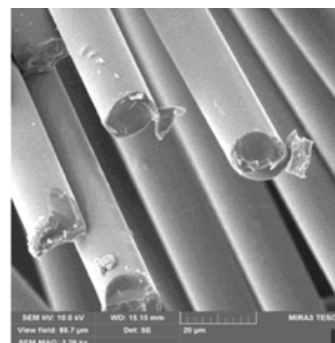
Toode on valmis, kuidas edasi?

Meil on tõepoolest tooted valmis. Aga mina ei ole ärimees – selle toote turule toomine peab jääma ärimeestele. Betoonile tavalise, boorilisandita basaltkiu lisamine tundub osale tellijaist liigse kuluna (10–12 eurot kuupmeetri kohta), sest mikropragude hulga kahandamine pole nende hinnangul oluline. Jah, see turg on ka Eestis konservatiivne. Ja senine kogemus näiteks turul oleva plastkiuga pole eriti hea – nii on mulle ehitajad rääkinud.

Boorilisandiga kiul aga pole Eestis seni turgu, kuni siia tuumajaama ehitama ei hakata. Aga see ei pruugi kauaks nii jääda, näiteks Eesti firma Fermi Energia tegeleb aktiivselt uue põlvkonna väikese moodulreaktoriga tuumajaama ehitamisega Eestisse.

Eesti praegu suurimal tuumaobjektil – Paldiski jäätmehoiul pole neutronite probleem eriti päevakorral, sest Venemaa poolt siia jäetud jäätmed on teistsugused. Enamasti on tegu gammakiirguse allikatega. Väheste, tuumaallveelaeva reaktoris ahelreaktsiooni käivitamiseks kasutatud neutronkiirguste allikate jaoks piisab väiksemast hoidlast. Selleks sobib muidugi meie boorbetoon suurepäraselt.

Kokkuvõttes rõhutan: ehkki paljud arvavad, et meie toode on mingi eribetoon, on see arvamus ekslik. Meie boor-basaltkiudu võib lisada igasse tavalisse betooni, raskebetooni ja spetsiaalbetoonidesse. Nii saavutatakse kiirguskaitse ette nähtud tulemus. Praktikas saab seda lisada komponentide kuivalt segamise faasis, enne vee lisamist, nii seguneb kiud väga hästi, näitavad tööstuses-tootmises kasutamised. Muide, boorba-



Basalt-boorkiud lähivaates: keskmine läbimõõt 15 mikromeetri ringis. Uuringud Tartu Ülikooli elektronmikroskoobiga.

FOTO: TARTU ÜLIKOOL

saltkiudu saab samal kiirguskaitse eesmärgil segada ka mitmete poliimeermaterjalide koostisse. Sellest kiust saab toota ka vattmaterjale. Aga kahjuks nende ideede uurimiseks mul tudengeid napib.

Edasiseks arendamiseks oleks vaja basaltfiibri tootmise tehast, mis kasutaks uuemaid kiutootmise tehnoloogiaid. Nagu öeldud, ehitab USAs Texases firma Rock Fibre uut ja suurt basaltkiu tootmise tehast. Selle baasil saaks siin Eestis arendada oma tehase, mis varustaks basaltkiuga kasvõi kogu Euroopa betoonitootjate vajadusi.

Arendustöö ei lõpe, valdkondi, kus uudseid materjale kasutada, on palju. Üldse: kulude vähenemiseks on üha enam asutud väiksema koormusega betoonkonstruktsiooni elementides kasutama armeerimise asemel fiiberbetooni. Selles vallas on basaltfiibril muude kiududega võrreldes väga suur potentsiaal, nagu enne kõnelesin. Üks suur valdkond oleks ka betooniteede ehitamine, kuna basaltkiud ei ole soolakartlik. **E**