

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Füüsika Instituut

Karl Kristjan Kaup

**KOSMILISE SEKUNDAARKIIRGUSE ELEKTRONIDE HAJUMISEL JA  
NEELDUMISEL PÕHINEVA MATERJALIDE TUVASTUSMEETODI UURIMINE  
SIMULATSIOONITARKVARAGA G4BEAMLIN**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Madis Kiisk, PhD

Tartu 2017

## **Kosmilise sekundaarkiirguse elektronide hajumisel ja neeldumisel põhineva materjalide tuvastusmeetodi uurimine simulatsioonitarkvaraga G4Beamline**

Lühikokkuvõte

Hetkel piirikontrollis kasutatavate gammakiirgusdetektoritega on raskendatud tuumamaterjali detekteerimine, kui seda ümbritsevad muud tihedad ja kõrge aatomnumbriga ained. Kosmilise sekundaarkiirguse müüonite abil saab tuvastada tuumamaterjali ning selline süsteem oleks praktikas rakendatav, kui ta suudaks eristada ka muid illegaalseid aineid. Käesolev töö uuribki, kas kosmilise sekundaarkiirguse elektronide abil on võimalik tuvastada erinevaid madala tiheduse ja aatomnumbriga materjale. Lihtsustatud simulatsioonide tulemused näitavad, et materjalid neelduvate ja hajuvate elektronide hulgas sõltuvad tugevalt materjalist, ning annavad võimaluse neid selle alusel eristada. Simulatsioonid on tehtud 10 erineva materjaliga erinevate monoenergeetiliste elektronihulkade jaoks. Hajumis- ja neeldumishulgad ning keskmise hajumisnurga jaotus sõltusid materjalidest märkimisväärselt. Lisaks leiti, et uuritavate materjalide paksus peab olema väga madala tiheduse ja keskmise aatomnumbriga materjalide jaoks kindlasti üle 10 cm, et neid detekteerida 50 MeV/c impulsi osakeste kaudu ainult neeldumist uurides. Simulatsioonide tulemused kinnitavad, et materjale on võimalik kosmilise sekundaarkiirguse elektronide neeldumise ja hajumise uurimise abil eristada.

Märksõnad: *kosmiline sekundaarkiirgus, materjalide tuvastamine, elektronide hajumine, elektronide neeldumine*

CERCS: P220 Tuumafüüsika

## **Analysis of a material identification method using stopping and scattering of secondary cosmic ray electrons by G4Beamline simulations**

Abstract

Nuclear materials are hard to detect by currently used gamma ray detectors, when the material is surrounded by other dense and high-Z materials. Cosmic ray muons can be employed to identify nuclear material and such a system would be highly practical, if it could also detect other illegal materials. This work will analyze if it is possible to identify low-Z materials using cosmic ray electrons. Results of simplified simulations show that the amounts of scattered and stopped electrons traversing an object are highly dependent on the material. Simulations are done with 10 different materials for monoenergetic electrons. Amounts of scattered and stopped electrons and the distributions of mean scattering angle were highly dependent on the material. To distinguish very low density and mean atomic number

materials based only on the attenuation of electrons requires the object's thickness to be at least 10 cm. Results of the simulations verify that materials are distinguishable by cosmic ray electron scattering and stopping.

Keywords: *secondary cosmic rays, material identification, electron scattering, electron absorption*

CERCS: P220 Nuclear Physics

## Sisukord

Lühikokkuvõte .....	2
Abstract .....	2
Sisukord .....	4
Sissejuhatus .....	5
Teoreetiline taust .....	7
Kosmiline kiirgus .....	7
Müüontomograafia .....	9
Elektrontomograafia .....	13
G4Beamline .....	14
Arvutused .....	15
1. Keskmise hajumisnurga leidmine .....	17
2. Kujutise leidmine erineva paksusega objektide jaoks .....	24
Kokkuvõte .....	26
Kasutatud kirjandus .....	27
Lisad .....	30
Lisa 1 .....	30
Lisa 2 .....	41
Lisa 3 .....	48

## Sissejuhatus

Tuumamaterjali ning  $\gamma$ -relvade detekteerimine on keskse tähtsusega tuumarelvade leviku takistamisel ja kindlustamisel, et sellised vahendid ei satuks terroristide kätte (Medalia, 2010). Praegu kasutatavaid röntgenradiograafia süsteeme ei saa kasutada sõidukite kontrollimiseks, kui nendes on inimesed sees. Lisaks neelduvad röntgenkiired aines juba väga lühikese läbitud distantsi järel, mistõttu ei saa neid kasutada isegi mõõduka suurusega konteinerite jaoks. (Morris et al, 2008)

Hetkel kasutatakse piiripunktides tuumamaterjali detekteerimiseks gammakiirgusel põhinevaid detektoreid. Kuna selle abil saadav kujutis on kahemõõtmeline, on raske kindlaks teha tuumamaterjali, mis on ümbritsetud näiteks terasest autoosadega. Lisaks peab selleks, et varjestatud tuumamaterjalist kujutist saada, kasutama väga suurt kiiritusdoosi. (Hogan et al, 2003) USAs kasutatakse veel erinevaid detekteerimissüsteeme, millel on kõigil oma puudused. Mõned töötavad vaid väga lühikese distantsi peal, mõned ei suuda teha kindlaks kiirgaja materjali, mõned on sõltuvad kasutaja osavusest ning mõned saab ära petta varjestamisega. (Medalia, 2010) Klassikaline radiograafia kasutab kujutiste saamiseks röntgen- või gammakiirgust. Selleks, et nende abil suure tihedusega ja paksusega esemetest kujutis saada, on vaja kasutada väga suuri kiirgusdoose, mis on kahjulikud elusolenditele ja kiirgustundlikele veostele.

Müüonid moodustavad osa Maa taustkiirgusest, mida on võimalik kasutada kõikjal meie planeedil. (Hogan et al, 2003) Müüonite abil tomograafiliste kujutiste saamine on laialdaselt kasutatav olukordades, kus on tarvis leida radiograafilisi kujutisi suure tihedusega esemetest lisanduva kiirgusdoosita: näiteks piirikontrollis, et leida tuumamaterjali (Borozdin et al, 2003). Piirikontrollis on aga tarvilik tuvastada ka muud illegaalset kaupa, mida müüonite abil detekteerida ei saa. Eelistatav oleks, kui selline tuvastamismeetod ei kasutaks lisanduvate kiirgusdoosi.

2015. aastal avaldatud artiklis avalikustasid G. Blanpied et al, et on leidnud viisi, kuidas eristada kosmilise sekundaarkiirguse elektronide abil madala aatomnumbriga materjale, toetudes materjalide pidurdusvõime erinevustele. (Blanpied et al, 2015) USA ettevõtte Decision Sciences pakub kosmilisel kiirgusel põhinevat piirikontrolli tomograafiasüsteemi, mis suudab lisaks tuumamaterjalile kindlaks teha ka madala aatomnumbriga materjale,

näiteks narkootikume, relvi, alkoholi, tubakat ja muud, kasutades elektronide neeldumist ja gammakiirguse ülitundlikku detekteerimist. Selline süsteem kasutab tomograafilise kujutise saamiseks vaid atmosfääri taustkiirgust, ning ei kujuta seetõttu inimestele mingit ohtu. (MMPDS for...)

Töö eesmärk on simulatsioonide abil kvalitatiivselt hinnata, kas kosmilise kiirguse elektronide hajumise ja neeldumise uurimise abil on võimalik detekteerida madala aatomnumbri ja tihedusega materjale ning neid eristada. See on oluline hindamaks. Antud töös uuritakse erinevate materjalide pidurdusvõimet ning keskmise hajumisnurga jaotusi elektronide jaoks ning millise paksusega erinevatest materjalidest esemeid on elektronide neeldumise abil võimalik eristada.

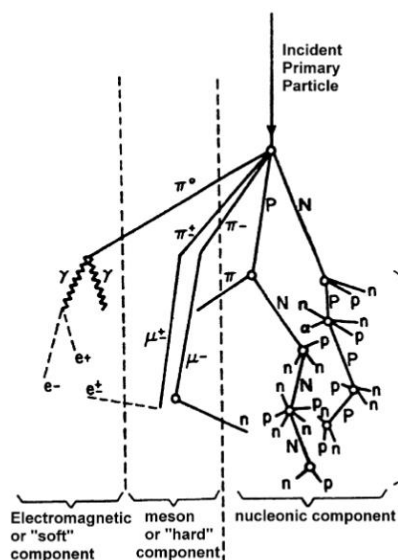
## Teoreetiline taust

### Kosmiline kiirgus

Kosmilise kiirguse avastamine sai alguse aastal 1900, mil Elster ja Geitel, ning Wilson, eraldiseisvalt, leidsid, et kinnises anumast olev õhk juhib vähesel määral elektrit. Järgneval aastal pakkus Wilson välja, et jääkionisatsiooni tekitab kuskilt universumist tulev ainet hästi läbiv kiirgus, aga ta suhtus sellesse kui vaid spekulatsioon. (Cremonesi, 2011)

1912. aastal mõõtis Victor F. Hess kuumaõhupalliga õhku tõustes elektroskoopide abil taustkiirguse poolt tekitatud ionisatsiooni hulka. Hess leidis, et 5 kilomeetri kõrgusel oli ionisatsioonihulk tõusnud mitu korda võrreldes väärtusega merepinnast. (Dazhuang, 2012: 51) Hess pakkus välja, et ionisatsioonihulga tõusu tekitab kosmosest tulev kiirgus. Algselt oldi aga selle teooria suhtes skeptilised, sest Saksa füüsik Werner Kolhöster uskus, et ionisatsioonihulga muutus tuleneb temperatuuri muutusest. (Cremonesi, 2011) 1925. aastal kinnitas ta aga Hessi teooriat, kellele anti 1936. aastal kosmilise kiirguse avastamise eest Nobeli preemia (Cremonesi, 2011; Cremonesi, 2011).

Kosmilise kiirguse saab jagada kaheks: primaarseks, mis koosneb osakestest, mis on kiirendatud astrofüüsikaliste allikate poolt, ja sekundaarseks, mis koosneb osakestest, mis tekivad primaarse kosmilise kiirguse interakteerumisel tähtedevahelise gaasiga (Beatty ja Matthews, 2011).

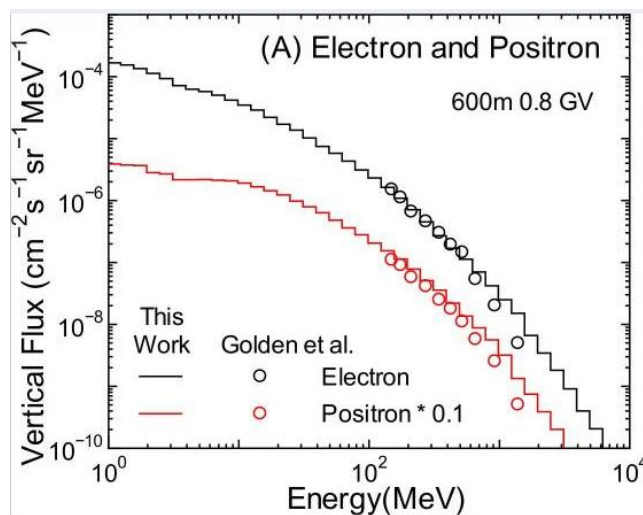


**Pilt 1. Primaarsete kosmilise kiirguse osakeste interakteerumisel atmosfääriosakestega tekkivat osakestejuga kirjeldav skeem. Suurtähtedega on märgitud kõrge energiaga**

**tuumaosakesed ning väiketähtedega tuumade lagunemistel tekkivad madalama energiaga nukleonid. (L'Annunziata, 2007)**

Primaarse kosmilise kiirguse moodustavad protonid, elektronid ning tähetekkeliste elementide tuumad peale liitiumi, berülliumi ja boori tuumade. Viimased kolm klassifitseeritakse sekundaarse kiirgusena, sest nende suhteline hulk kosmilises kiirguses on palju suurem kui nende relatiivne kogus universumis, mis viitab sellele, et nad on tekkinud primaarsete kiirgusosakeste omavahelistel kokkupõrgetel. (L'Annunziata, 2007)

Kui kosmilise kiirguse osake põrkub mingi atmosfääris oleva gaasi ( $N_2$ ,  $O_2$  jms) molekuliga, emiteeritakse tuumaosakesi ning laetud ja neutraalseid  $\pi$ -mesoneid (piioneid). Need sekundaarsed tuumaosakesed põrkuvad veel atmosfääriosakestega, tekitades osakestejoo, mis koosneb mesonitest, erinevatest tuumaosakestest, neutronitest ning erinevatest mesonite ja tuumade vaheliste interaktsioonide ja mesonite lagunemiste saadustest. (L'Annunziata, 2007)



**Joonis 1. Vertikaalsete elektronide ja positronide voogude jaotused sõltuvalt energiast (Sato, 2015).**

## Müüontomograafia

Müüonid on elementaarosakesed, mille laeng on  $-e$ , ning mass on umbes 207 korda suurem kui elektronil. Kuna nende mass on elektronide omast palju suurem, läbivad nad ka ainet palju paremini. Müüoneid klassifitseeritakse leptoniteks, mis jagunevad elektrilaengut omavateks leptoniteks ja neutraalseteks leptoniteks ehk neutriinodeks. Müüonid, koos elektronide ja tau-leptonitega, on elektrilaengut omavad leptonid. Müüonite poolestusaeg on  $2,2 \mu\text{s}$ , ning nad jõuavad merepinnale tänu oma kõrgele energiale ning relativistlikkule aja pikendamisele. (L'Annunziata, 2007)

Müüonid on merepinnal kõige arvukamad laetud osakesed, mis tekivad kosmiliste kiirte interaktsioonidel atmosfääriosakestega (L'Annunziata). Ühes minutis jõuab merepinnal asuvale ruutmeetrile umbes 8000 müüonit (Kiisk, 2017).

Esimesed radiograafilised kujutised müüonite abil saadi nende neeldumise kaudu (Cremonesi, 2011). Esmakordselt kasutas kosmilise kiirguse müüoneid radiograafilise kujutise saamiseks E. P. George, kes 1955. aastal määras müüonite neeldumise kaudu Guthega-Munyangi tunneli kohal oleva kihi paksuse (Guardincerri et al, 2016).

Järgnevalt kasutas kosmilise kiirguse müüoneid radiograafilise kujutise saamiseks Luis W. Alvarez 1968. aastal, et teha kindlaks, kas Chephreni püramiidi all on maa-aluseid käike. Ta paigaldas püramiidi all olevasse kambri müüonite detektorid, ning leidis teatud aja vältel detektoritesse jõudnud müüonite hulkade kaudu, kas on tühjasid käike püramiidi all. (Alvarez, 1969)

Müüonite neeldumist on lisaks veel kasutatud näiteks söekaevanduste pinnase ning suurte ehitiste või geograafiliste objektide sisemuse uurimiseks ja lisaks proovitakse selle meetodi abil leida viisi vulkaanipursete ennustamiseks (Darijani et al, 2016; Schultz et al, 2004).

2003. aastal avaldasid USA Los Alamos Riikliku Laboratooriumi teadlased, et on avastanud viisi, kuidas müüonite mitmekordse Coulombi hajumise kaudu on võimalik saada uuritava ruumala sisemusest kolmemõõtmeline kujutis (Borozdin, 2003)

Mitmete interaktsioonide tulemusena on osakeste hajumisnurga jaotus lähedane Gaussi jaotusele

$$\frac{dN}{d\theta_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\theta_0^2}}$$

**Valem 1.**

mille standardhälve  $\theta_0$  sõltub hajumist tekitava objekti materjali kiirguspikkusest (ing *k radiation length*),  $X_0$ .

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \frac{L}{X_0} \right]$$

**Valem 2.**

Valemis (2) on  $p$  osakese impulss ühikutes  $\frac{MeV}{c}$ ,  $\beta c$  osakese kiirus ning  $L$  läbitava objekti paksus. (Borozdin, 2003)

Kiirguspikkus sõltub materjali tihedusest  $\rho$  ning aatomnumbrist  $Z$  ja massiarvust  $A$  järgnevalt (Presente et al, 2009):

$$X_0 = \frac{716.4(g/cm^2)}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)}$$

**Valem 3.**

Kiirguspikkus väheneb kiiresti aatomnumbri kasvades, ning sellega kaasneb jaotuse laiuse suurenemine (Borozdin, 2003)

Seda sõltuvust aatomnumbrist kasutataksegi müüontomograafias, et eristada erinevaid materjale hajumisnurga jaotuse kaudu (Cremonesi, 2011).

Selleks, et standardhälbes saada lahti materjali läbimise teepikkusest võetakse kasutusele hajumistihedus  $\lambda$  ehk konkreetse impulsi (enamasti 3 GeV) müüonite ruutkeskmine hajumine ühikpaksuse kohta (Schultz et al, 2004):

$$\lambda = \left(\frac{13.6}{p_0}\right)^2 \frac{1}{X_0}$$

**Valem 4.**

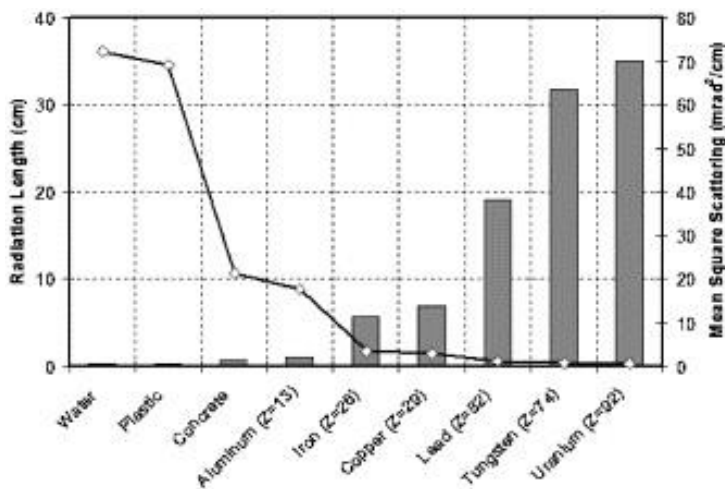
Uuritava objekti materjali hindamiseks leitakse hajumistihedus  $N$  müüoni hajumisel impulsi normaliseeritud ruutkeskmine hajumine. Kui hajumine on mõõdetud  $x$ - ja  $y$ -

telgede suhtes ning on teada iga müüoni läbitav teepikkus,  $L_i$ , materjalis ja impulss,  $p_i$ , avaldub mõõdetav hajumistihedus järgnevalt:

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_i^2 \theta_{xi}^2 + \theta_{yi}^2}{p_0^2 2L_i} \right)$$

**Valem 5.**

Joonisel 1 on toodud kiirguspikkused ning ruutkeskmine hajumine erinevate materjalide jaoks.



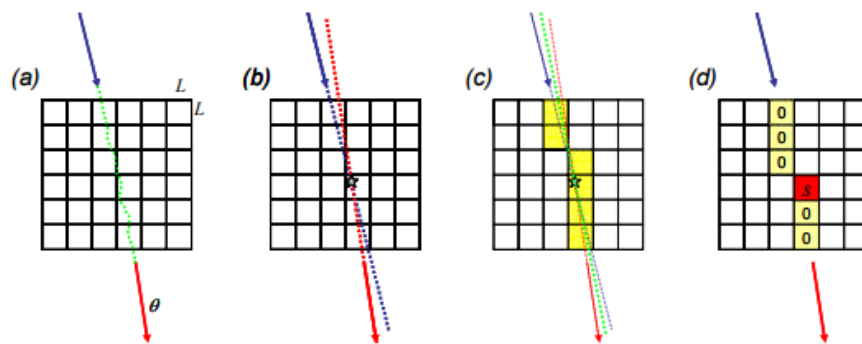
**Joonis 2. Erinevate materjalide kiirguspikkused ning ruutkeskmine hajumine ühikpaksuse kohta 3 GeV müüonite jaoks (Schultz et al, 2004).**

Hajumise abil kujutise saamiseks kasutatakse uuritava ruumala jaoks kahte detektormatriksit uuritava ruumala kohal ja uuritava ruumala all. Kahe detektormatriksi abil saab hinnata osakese trajektoori. Uuritava ruumala kohal oleva detektormatriksi abil leitakse osakese asukoht ja liikumissuund enne ruumala läbimist ning alumise detektormatriksi abil pärast ruumala läbimist. (Schultz et al, 2004)

Kui ruumala läbiva osakese trajektoori muutuks ainult ühes punktis, määraks algne ja pärastine liikumissuund punkti, kus osakese trajektoori muutus (kõrvalekaldepunkt) ning trajektoori muutuse nurga (kõrvalekaldenurk). Kõrvalekaldepunkt määrab vokslis (kolmedimensionaalse piksli) ja kõrvalekaldenurk määrab hajumistiheduse, mis sõltub antud vokslis asuva materjali aatomarvust ja tihedusest. (Medalia, 2010) Seda kutsutakse POCA (*Point Of Closest Approach*) meetodiks. Seda meetodit on lihtne rakendada ja selle abil saab kiireid tulemusi, kuid see arvestab, et hajumine toimus vaid ühes punktis. (Riggi et al, 2013)

Tegelikuses interakteerub osake materiaga kogu ruumala läbimise vältel, mis kallutab tema liikumissuunda veelgi (Medalia, 2010). Selle tõttu on POCA algoritmiga saadud kujutistel kehv resolutsioon ja sellega on raskendatud uuritava ruumala ääres asuvate materjalide lokaliseerimine ning ülalt või alt varjestatud tuumamaterjali täpse asukoha määramine (Riggi et al, 2013).

Kujutise kvaliteeti saab parandada erinevate algoritmidega: autokorrelatsiooni- ja klasteralgoritmidega ning maksimaalse tõenäosuse meetodiga (Riggi et al, 2013).



**Pilt 2. POCA meetodil materjali asukoha määramine (Schultz, 2003).**

## Elektrontomograafia

Kosmilise sekundaarkiirguse elektrone langeb meretasandil asuvale ruutmeetrisele pinnale Tartus ühe minuti jooksul umbes 2000 (Kiiski, 2017). Sekundaarkiirguse elektronid tekivad laenguta piionite lagunemisel tekkivate gammakiirte interakteerumisel atmosfäärिमolekulidega (L'Annunziata, 2007).

Müüontomograafia abil saab detekteerida kõrge aatomnumbriga materjale. Sellisel meetodil põhineva detektori kasutamine piirikontrolliks on kasulik tuumarelvade leviku piiramiseks. Parem oleks aga kui detektor suudaks piirikontrollis kindlaks teha ka muud illegaalset kaupa. Kosmilise sekundaarkiirguse elektronide ja müüonite liikumise üheaegsel uurimisel on võimalik tuvastada lisaks kõrge aatomnumbri ja tihedusega materjalidele ka madalamate vastavate karakteristikutega materjale. (Blanpied et al, 2015)

Tähtis parameeter lõpliku kujutise loomisel on vaadeldava materjali pidurdusvõime. See on võetud kasutusele, et vähendada vaadeldava objekti kuju ja asukoha mõju. Detektori äärealal olevate vokslite jaoks on nendes peatuvate osakeste arv ülehinnatud, sest loetakse peatatuks ka need osakesed, mis hajutatakse detektorist eemale. Samas jäävad need osakesed ka hajutatud osakeste arvestusest välja. Selleks jagatakse peatatud osakeste arv hajutatud osakeste arvuga, et normaliseerida peatamist kirjeldav suurus geomeetriast tekkiva variatsiooni suhtes. (Blanpied et al, 2015)

$$Pidurdusvõime = \frac{(\#peatatudosakesed) \times \langle p \rangle}{(\#hajutatudosakesed) \times materjalipaksus}$$

### Valem 6.

$\langle p \rangle$  tähistab osakeste keskmist impulssi. Hajumistihedus leitakse elektronide puhul samuti valemi 5 järgi.

Selleks, et detektori abil uuritavas ruumalas asetsevat materjali identifitseerida, leitakse ruumalas neeldunud ja hajunud elektronide hulk ja läbinud elektronide hajumistihedus. Saadud tulemust võrreldakse varasemalt kindlaks tehtud suurustega teatud materjalide jaoks ning selle kaudu on võimalik määrata materjali. (Blanpied et al, 2014)

Materjalide leidmiseks ja identifitseerimiseks jaotatakse uuritav ruumala voksliteks, konstrueeritakse osakese liikumistrajektor ja see annab infot kõikide vokslite jaoks, mille see osake läbis. (Blanpied et al, 2015)

## **G4Beamline**

G4Beamline on Geant4-l baseeruv vabavaraline simulatsiooniprogramm osakeste liikumistrajektooride jälgimiseks. Programm on eriti kasulik simulatsioonide puhul, kus lagunemised või interaktsioonid materiaga on olulised. Programm on peamiselt mõeldud osakesekiirendite simuleerimiseks, aga teda on kasutatud ka muudeks otstarveteks, seal hulgas ka kosmilisel kiirusel põhinevate tomograafiasüsteemide uurimiseks. Programmi peamine eelis on see, et sisendfaili defineerimine pole märkimisväärselt keerulisem kui füüsikalise probleemi püstitamine. G4Beamline'il on sisseehitatud visualiseerimistarkvara OpenInventor. (G4Beamline)

Geant4 on tarkvarapakett osakeste liikumise simuleerimiseks läbi aine. Osakeste käitumise kirjeldamiseks on võimalik kasutada põhjalikku füüsikaliste protsesside mudelite valikut (Agostinelli et al, 2003).

Enamus G4Beamlines rakendatavaid füüsikaprotsesse on võetud otse Geant4st. (Roberts, 2012)

Käesolevas töös tehtavate simulatsioonide seisukohalt on tähtsaim, et materjalide pidurdusvõime ning mitmikhajumisel tekkiv kõrvalekaldenurgajaotus elektronide jaoks oleksid reaalsusega kooskõlas. Geant4 validatsioonitestides on toodud madala energiaga elektronide hajumisnurga jaotus pärast õhukese kullakihi läbimist, mis on katsetulemustega väga heas kooskõlas. Lisaks on leitud vee ja raua pidurdusvõime müüonite jaoks, mille erinevus energiatel enam kui 1 MeV puhul on maksimaalselt 2%. (Roberts, 2012; Results of ...)

## Arvutused

Eraldi simulatsioonid on tehtud hajumisnurga ja kujutise leidmiseks. Mõlemad arvutused on läbi viidud 10 erineva materjali jaoks : kahe lõhkeaine RDXi (tsükloniit) ja ANi (ammooniumnitraat), laiatarbematerjalide PETi (polüetüleentereftalaadi), nailoni, paberi, kartongi ja klaasi ning alumiiniumi, liiva ja betooni jaoks. Materjalid on defineeritud elementide massiprotsendi ning tiheduse kaudu. Nailon, alumiinium, klaas ja betoon on võetud tarkvarapaketi G4Beamline sisseehitatud materjalikogumikust, mis defineerib materjalid vastavalt USA Riikliku Standardite ja Tehnoloogia Instituudi (NIST) andmebaasile. (Roberts, 2016) Paberi ja kartongi elementkoostisel (MSW Learning ...; Density of Paper ...; Densities of Solids; Cardboard density) on mineraalide osa jäetud arvestamata, sest nende koostis on väga suurel määral varieeruv ja ei mängi antud arvutustes olulist rolli. Liiv on defineeritud ränidioksiidina tihedusega  $1,538 \text{ g/cm}^3$ . (Densities of Solids; Sand, Silica density; Microsoft Word ...)

Lõhkeained AN ja RDX ning PET on defineeritud vastavalt kosmilisel kiirgusel põhineva turvakontrolli detekteerimissüsteemi teostatavuse uuringule (Kiisk, 2017).

Defineeritud materjalide elementkoostised on toodud tabelis 1 ning G4Beamline's olemasolevate materjalide elementkoostised on toodud lisas 3.

	H	C	O	N	S	Tihedus ( $\text{g/cm}^3$ )
AN	0,05037	-	0,599652	0,349978	-	1,72
Kartong	0,0621	0,4631	0,4695	0,0032	0,0021	0,689
Paber	0,0638	0,4628	0,4681	0,0032	0,0021	0,72
PET	0,04196	0,625016	0,333024	-	-	1,38
RDX	0,0272	0,1622	0,4322	0,3784	-	1,82

**Tabel 1. Defineeritud materjalide elementkoostised ja tihedused. Elementkoostised on esitatud massisuhtarvudena.**

Lihtsustusena on jäetud materjali väline ruum ja detektor vaakumiks. Katsed on läbi viidud konkreetsete energiatega elektronide jaoks.

G4Beamline väljastab iga osakese detailse liikumise nagu on toodud pildil 3.

```

===== EventID 48 TrackID 1 e- ParentID 0 KE=499.489MeV CreatorProcess=Beam =====
Step X(mm) Y(mm) Z(mm) T(ns) CL: X Y Z dxdz dydz KE(MeV) StepLen This Volume Process
1 -499.9 -338.7 100.0 0.33 -499.9 -338.7 100.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
2 -499.9 -338.7 200.0 0.67 -499.9 -338.7 200.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
3 -499.9 -338.7 300.0 1.00 -499.9 -338.7 300.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
4 -499.9 -338.7 400.0 1.33 -499.9 -338.7 400.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
5 -499.9 -338.7 500.0 1.67 -499.9 -338.7 500.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
6 -499.9 -338.7 600.0 2.00 -499.9 -338.7 600.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
7 -499.9 -338.7 700.0 2.33 -499.9 -338.7 700.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
8 -499.9 -338.7 800.0 2.67 -499.9 -338.7 800.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
9 -499.9 -338.7 900.0 3.00 -499.9 -338.7 900.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
10 -499.9 -338.7 1000.0 3.34 -499.9 -338.7 1000.0 0.0000 0.0000 499.5 100.00 World StepLimiter
11 -499.9 -338.7 1000.0 3.34 -499.9 -338.7 1000.0 0.0000 0.0000 499.5 0.00 World Transportation
12 -499.9 -338.7 1008.6 3.36 -499.9 -338.7 1008.6 -0.0055 0.0076 494.0 8.59 Target eIoni
13 -499.9 -338.7 1008.8 3.37 -499.9 -338.7 1008.8 -0.0049 0.0082 485.7 0.22 Target eBrem
14 -499.9 -338.7 1015.7 3.39 -499.9 -338.7 1015.7 -0.0002 0.0028 481.4 6.86 Target eIoni
15 -499.9 -338.7 1026.9 3.43 -499.9 -338.7 1026.9 -0.0053 -0.0042 476.7 11.26 Target eIoni
16 -500.0 -338.7 1030.9 3.44 -500.0 -338.7 1030.9 -0.0094 -0.0042 474.9 4.02 Target eBrem
17 -500.1 -338.7 1039.1 3.47 -500.1 -338.7 1039.1 -0.0200 0.0064 233.2 8.12 Target eBrem
18 -500.4 -338.7 1053.3 3.51 -500.4 -338.7 1053.3 -0.0230 -0.0078 228.7 14.22 Target eBrem
19 -500.6 -338.7 1062.2 3.54 -500.6 -338.7 1062.2 -0.0252 0.0074 221.8 8.89 Target eBrem
20 -500.8 -338.6 1070.8 3.57 -500.8 -338.6 1070.8 -0.0218 0.0154 213.6 8.58 Target eBrem
21 -501.0 -338.4 1078.5 3.60 -501.0 -338.4 1078.5 -0.0409 0.0367 207.4 7.75 Target eIoni
22 -501.5 -338.1 1088.7 3.63 -501.5 -338.1 1088.7 -0.0475 0.0196 204.4 10.23 Target eBrem
23 -502.0 -337.8 1100.0 3.67 -502.0 -337.8 1100.0 -0.0486 0.0101 201.5 11.31 Target Transportation
24 -506.9 -336.8 1199.9 4.00 -506.9 -336.8 1199.9 -0.0486 0.0101 201.5 100.00 World StepLimiter
25 -506.9 -336.8 1200.0 4.00 -506.9 -336.8 1200.0 -0.0486 0.0101 201.5 0.12 World Transportation
26 -507.0 -336.8 1201.0 4.01 -507.0 -336.8 1201.0 -0.0486 0.0101 201.5 1.00 Det Transportation
27 -511.8 -335.8 1300.9 4.34 -511.8 -335.8 1300.9 -0.0486 0.0101 201.5 100.00 World StepLimiter
28 -516.7 -334.8 1400.8 4.67 -516.7 -334.8 1400.8 -0.0486 0.0101 201.5 100.00 World StepLimiter
29 -521.5 -333.8 1500.6 5.01 -521.5 -333.8 1500.6 -0.0486 0.0101 201.5 100.00 World StepLimiter
30 -521.6 -333.8 1501.7 5.01 -521.6 -333.8 1501.7 -0.0486 0.0101 201.5 1.05 World Killed:Transportation

```

**Pilt 3. G4Beamline poolt väljastatavad andmed ühe sündmuse (elektroni) jaoks.**

## 1. Keskmise hajumisnurga leidmine

Hajumisnurga leidmisel on läbitav materjal defineeritud silindrina, mille 200 sentimeetrine läbimõõt on suurem kui kiirtekimbul. Silindri paksus on 10 cm. Kiirtekimp on defineeritud ellipsina, mille pooltelgede pikkused on 50 cm. Simulatsiooni geometria on toodud pildil 4. Kõik simulatsioonid on läbi viidud 10000 elektroniga ning kolmel erineval elektronide algimpulsi väärtusel. Algimpulsid 50, 200 ja 500 MeV/c on valitud arvestades merepinnale jõudvate vertikaalse liikumissuunaga elektronide energiaspektrit (Sato, 2015; Golden et al, 1995) ning seda, et liiga väikese impulsi korral neelduvad elektronid uuritavas ruumalas juba suure tõenäosusega isegi lühikest distantsi läbides.

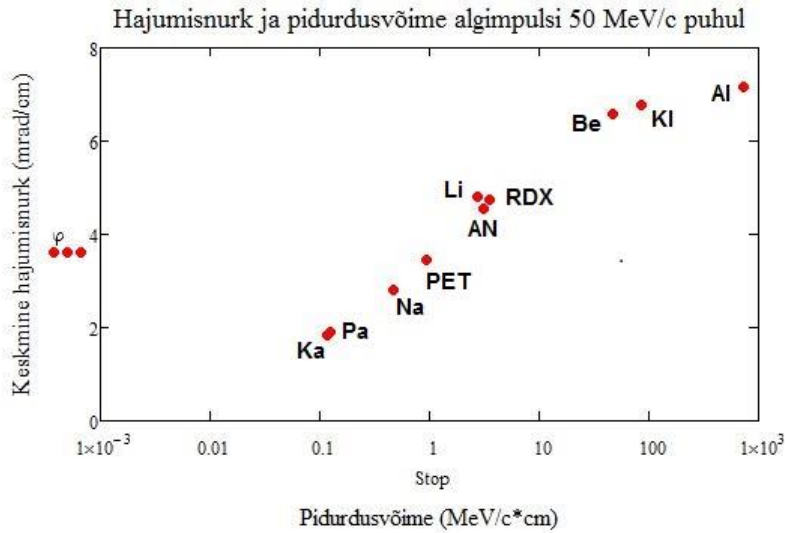


**Pilt 4. Hajumisnurga simulatsioonidel kasutatav geometria. Valge silinder on uuritavast materjalist ning suurem sinakasroheline silinder on virtuaalne detektor.**

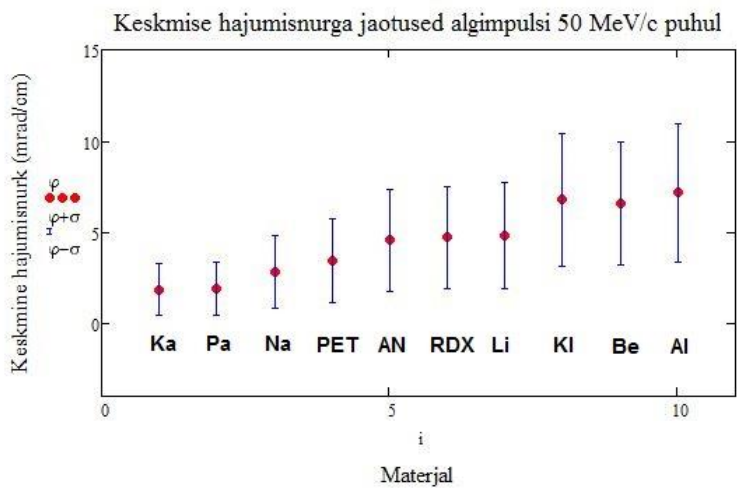
Selleks, et leida hajumisnurka ühe osakese jaoks, on võetud pildil 3 olevast andmetabelist osakese  $dxdz$  ja  $dudz$  väärtused, mis kirjeldavad vastavalt osakese asukoha muutust  $x$ - ja  $y$ -telgede suhtes ühikulise  $z$ -telje suunalise muutuse kohta. Need on vastavate telgede suunaliste hajumisnurkade tangensid. Leitud on kõikide elektronide hajumisnurkade aritmeetilised keskmised ning standardhälbed.

Lisaks on hinnatud ka erinevate materjalide pidurdusvõimet. Selleks on leitud detektorini jõudvate ja mittejõudvate elektronide hulgad ning kasutatud valemit 6. Joonistel on toodud keskmised hajumisnurgad sentimeetri kohta ning pidurdusvõime kartongi (Ka), paberi (Pa), nailoni (Na), polüetüleentereftalaadi (PET), ammooniumnitraadi (AN), tsükloniidi (RDX),

liiva (Li), betooni (Be), klaasi (Kl), ja alumiiniumi (Al) jaoks. Keskmise hajumisnurka jaotuse olen välja toonud eraldi graafikutel. Tabelis 2 on toodud peatatud ja hajunud osakeste arvud kõikidel simulatsioonidel.



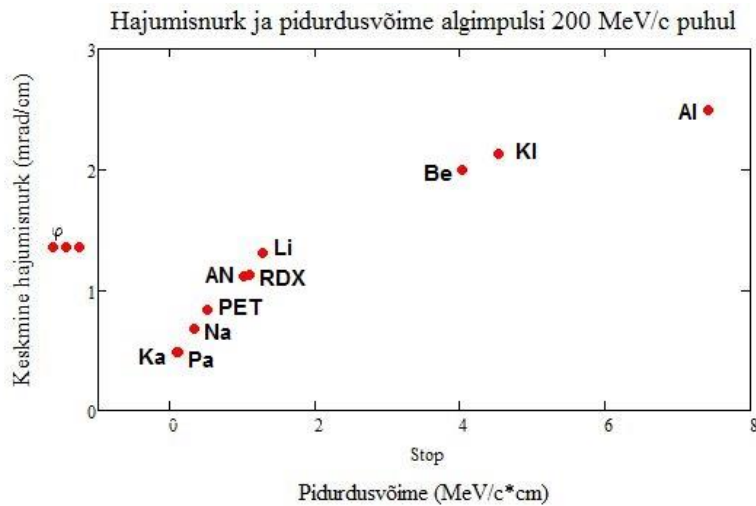
**Joonis 3. Elektronide keskmine hajumisnurk sentimeetri materjali paksuse kohta ning pidurdusvõime 50 MeV/c algimpulsi puhul logaritmilisel skaalal.**



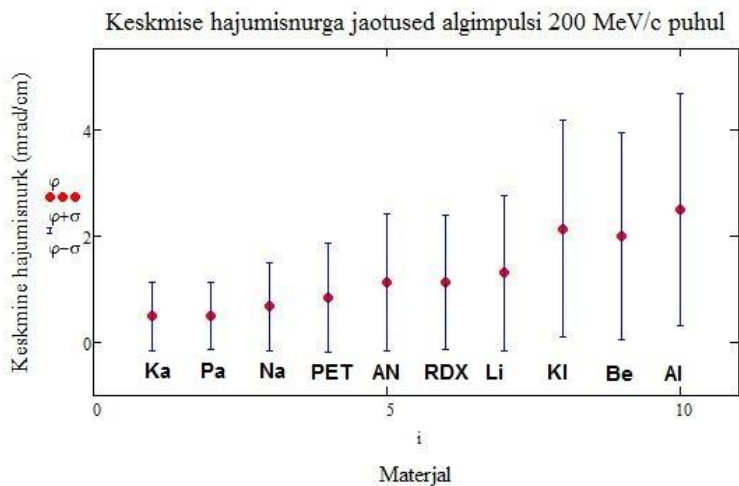
**Joonis 4. Keskmise hajumisnurka jaotused erinevate materjalide jaoks algimpulsi 50 MeV/c puhul.**

Joonistel 50 MeV/c algimpulsiga elektronide jaoks nähtub, et alumiiniumi, betooni ja klaasi pidurdusvõimed on teistest palju suuremad. Teiste puhul tuleb välja, et pidurdusvõime vahed erinevate materjalide jaoks sellel energial on märkimisväärsed. Liiva, ammooniumnitraadi, ning tsükloniidi pidurdusvõimed on vastavalt 2,765 MeV/c\*cm, 3,125 MeV/c\*cm ja 3,49

MeV/c\*cm ning nende materjalide puhul jõudis 10000 läbinud osakesest detektorisse vastavalt 6439, 6154 ja 5889 elektroni. Ainult kartongi ja paberi omavaheline erinevus on väga väike, aga nad on sarnase ehitusega materjalid. Lisaks on näha, et keskmine hajumisnurk ning selle standardhälve on suuremad kõrgema tihedusega ja aatomnumbriga materjalide jaoks.



**Joonis 5. Elektronide keskmine hajumisnurk sentimeetri materjali paksuse kohta ning pidurdusvõime 200 MeV/c algimpulsi puhul.**

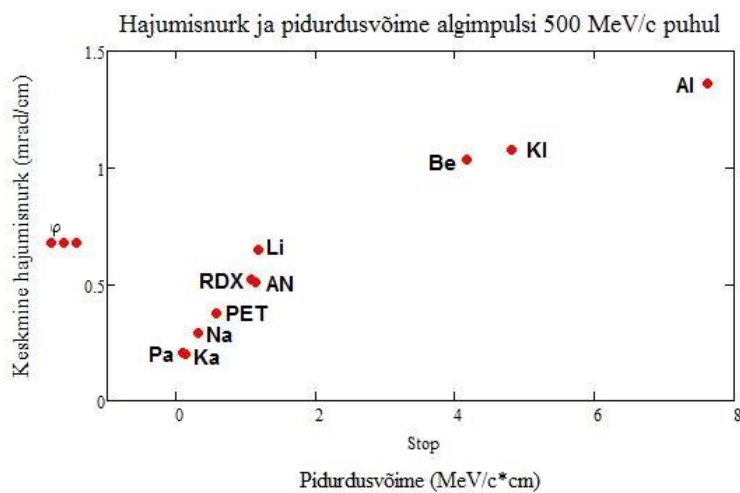


**Joonis 6. Keskmise hajumisnurga jaotused erinevate materjalide jaoks algimpulsi 200 MeV/c puhul.**

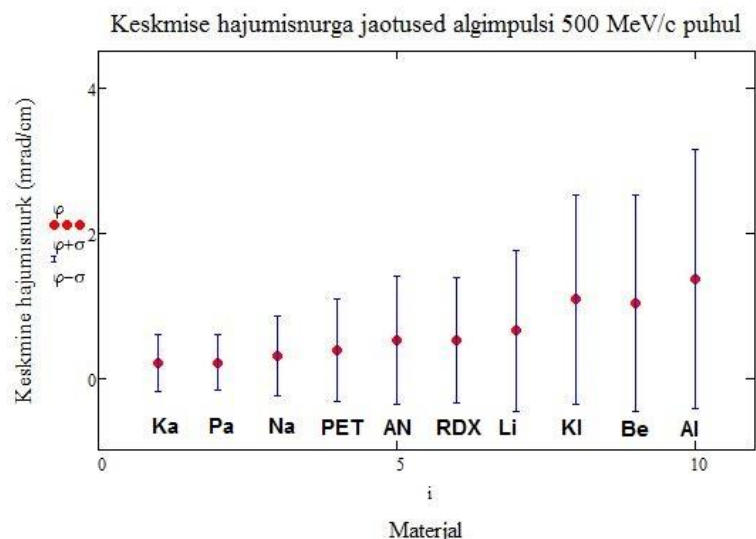
Võrreldes 50 MeV/c algimpulsiga on 200 MeV/c puhul kõikide materjalide pidurdusvõime ja keskmine hajumisnurk langenud ning keskmise hajumisnurga standardhälve (68%) on

vähenenud kõikidel juhtudel. Alumiiniumi pidurdusvõime teoreetilist graafikut (joonis 8) vaadates peaks tema pidurdusvõime aga kasvama, kuid see teeb hoopis suure languse. See on tingitud asjaolust, et antud simulatsiooni puhul valitud objekti paksus on sarnases suurusjärgus antud energiaga elektroni teepikkusega selles materjalis, mille jooksul ta kaotab kogu oma energia. Sama asjaolu mõjutab ka betooni ja klaasi pidurdusvõimet.

Ka sel juhul on pidurdusvõime materjalide jaoks heal määral erinev. Ammooniumnitraadi ja tsükloniidi puhul on antud juhul peatatud elektronide hulkade erinevuseks 36 osakest, mis on piisavalt väike, et need kaks ainet võiksid anda mõõteriista kasutades sama tulemuse. Sama nähtub ka nende ainete keskmisest hajumisnurgast. Algimpulsi 50 MeV/c oleksid need kaks ainet eristatavad, aga 200 MeV/c puhul enam mitte. Sellegipoolest on nende kahe lõhkeaine leitud pidurdusvõime suhteliselt suurel määral erinev polüetüleentereftalaadi või liiva pidurdusvõimest ja annab aluse nende eristamiseks.



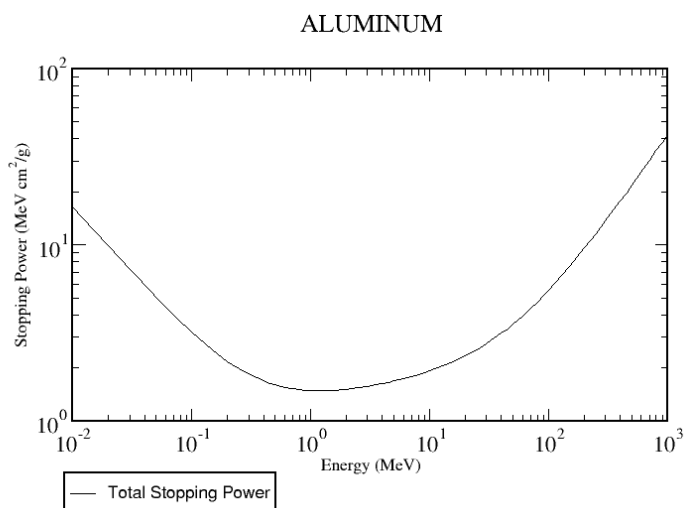
**Joonis 7. Elektronide keskmine hajumisnurk sentimeetri materjali paksuse kohta ning pidurdusvõime 500 MeV/c algimpulsi puhul.**



**Joonis 8. Keskmine hajumisnurk jaotused erinevate materjalide jaoks algimpulsi 500 MeV/c puhul.**

Kõikide materjalide jaoks on keskmine hajumisnurk ja selle standardhälve langenud. Kartongi, polüetüleentereftalaadi, ammooniumnitraadi, betooni, klaasi ning alumiiniumi jaoks on pidurdusvõime tõusnud. See on kooskõlas teoreetiliselt leitud pidurdusvõime kõveraga. Joonisel 8 on toodud pidurdusvõime kõver alumiiniumi jaoks. Teoreetilised pidurdusvõime kõverad on kõikide uuritavate materjalide jaoks uuritavas energiavahemikus sarnased. (Estar – stopping-power ...) Põhjus, miks see kõikide materjalide puhul ei kehti, on tingitud osakeste neeldumise juhuslikkusest ning sellest, et kui hajunud ja peatatud osakeste suhe on väga suur, mõjutab ühe osakese neeldumine või hajumine seda jagatist palju suuremal määral.

Pidurdusvõimete erinevused materjalide vahel on ilmsed ka algimpulsi 500 MeV/c jaoks ning erinevuste suurusjärgud on sarnased 200 MeV/c algimpulsiga juhu puhul.



**Joonis 9. Alumiiniumi pidurdusvõime kõver elektroni energia suhtes. (Stopping power and ...)**

50 MeV	ALUMIINIUM	AN	BETON	KARTONG	KLAAS	LIIV	NAILON	PABER	PET	RDX
Peatatud elektrone	68	6154	966	9773	553	6439	9150	9756	8436	5889
Hajunud elektrone	9932	3846	9034	227	9447	3561	850	244	1564	4111
200 MeV										
Peatatud elektrone	7297	9516	8326	9959	8153	9404	9835	9945	9757	9480
Hajunud elektrone	2703	484	1674	41	1847	596	165	55	243	520
500 MeV										
Peatatud elektrone	8678	9781	9230	9976	9124	9771	9941	9984	9887	9791
Hajunud elektrone	1322	219	770	24	876	229	59	16	113	209

**Tabel 2. Peatatud ja hajunud elektronide arvud.**

Graafikutelt on näha, et pidurdusvõime ning keskmise hajumisnurga jaotus sõltuvad materjalist seda suuremal määral, mida madalam on osakese energia. Selleks, et eristada materjale pidurdusvõime kaudu, ei saa kasutada liiga kõrge energiaga elektrone, sest siis peaks kasutama väga pikka kogumisaega, et saada infot materjalide kohta. Antud töös kasutatud energiad on sobilikud materjalide eristamiseks.

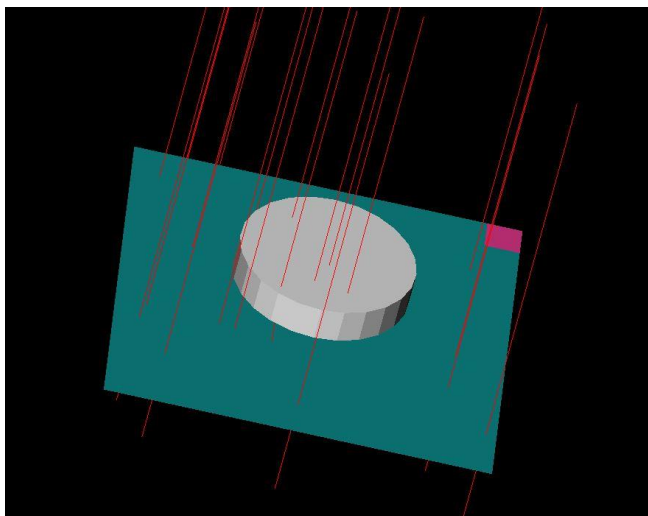
Sellise lihtsustatud ülesehituse puhul on võimalik materjale eristada kasutades materjalist hajunud ning neeldunud osakeste suhet. Ainsad materjalid, mida oleks üksteisest sellise elektronide hulga puhul keeruline eristada, olid paber ja kartong. Ülejäänud ainete puhul on hajunud ja neeldunud osakeste hulgad märkimisväärselt erinevad. Lisaks sõltub ka detektorisse jõudnud osakeste hajumisnurk materjalist, kuigi erineb sarnaste materjalide jaoks vähe.

Edasisteks uuringuteks oleks tarvilik uurida samu parameetreid ka simulatsioonides, kus langevate osakeste algimpulsid on erinevad ja suvalised. 10000 elektroni jaoks tehtud arvutused vastavad reaalsuses 5-minutisele kogumisajale (Kiisk, 2017) ning antud simulatsiooni puhul on enamus materjale üksteisest eristatavad.

## 2. Kujutise leidmine erineva paksusega objektide jaoks

Kujutise leidmise jaoks on defineeritud ruudukujuline kiirtekimp, mille külje pikkus on 125 cm ning vaadeldava esemena silinder, mille põhja pindala raadius on 25 cm. Lisaks on defineeritud 11x11 detektormatriks, mille iga detektor on ruut külje pikkusega 10 cm. Arvutused on läbi viidud silindri paksustel 1, 10 ja 50 cm elektronide algimpulsi 100 MeV/c jaoks ning kahel silindri paksusel 1 ja 10 cm algimpulsi 50 MeV/c jaoks.

Leidsin igasse osadetektorisse jõudvate elektronide arvu. Arvestades pildil 5 toodud simulatsiooni geometriat, on näha, et silindri all olevatesse detektoritesse jõuab vähem osakesi, sest osa uuritavatest elektronidest neeldub või hajub silindrit läbides. Kujutise leidmiseks lahutasin sellest ilma silindrita tehtud simulatsiooni puhul saadud osadetektoritesse jõudvate elektronide arvud. Esemega ja esemeta tehtud simulatsioonide puhul on osakestekimbud üksteisest sõltumatud. Arvutuste eesmärk on hinnata, millise paksusega materjale on võimalik kosmilise sekundaarkiirguse elektronide neeldumise abil eristada.

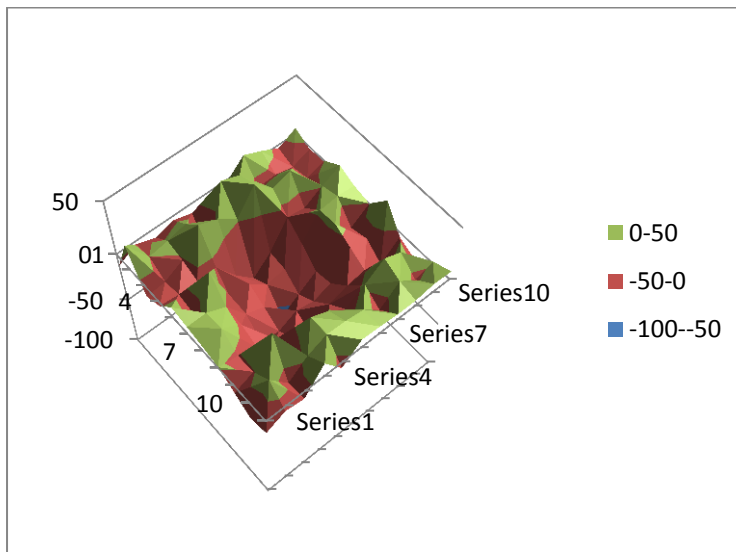


**Pilt 5. Kujutise leidmisel kasutatud geometria. Roosaga on näitlikustatud ühe osadetektori suurus.**

Simulatsioonide tulemused algimpulsi 100 MeV/c jaoks on toodud lisas 1, ning algimpulsi 50 MeV/c jaoks lisas 2.

Algimpulsi 100 MeV/c puhul tuleb kujutistelt välja, et 1 cm paksust eset pole võimalik kindlaks teha ühegi materjali jaoks. 10 cm paksune objekt on nähtav, kui ta on alumiiniumist,

betoonist või klaasist. 50 cm paksune ese on igal juhul tuvastatav. Pildil 6 on toodud kujutis 10 cm paksuse alumiiniumsilindri puhul.



**Pilt 6. Kujutis 10 cm paksusest alumiiniumsilindrist elektronide algimpulsi 100 MeV/c jaoks. Värvskaalaga on näidatud osakeste hulkade erinevus objektiga ja objektita tehtud simulatsioonide jaoks.**

Algimpulsiga 50 MeV/c pole samuti võimalik tuvastada ühe sentimeetri paksust silindrit ühegi materjali jaoks. 10 cm paksuse korral on tuvastatavad alumiiniumist, betoonist, klaasist, tsükloniidist ja ammooniumnitraadist silindrid.

Simulatsioonitulemustest johtub, et esemeid, mille paksus on 1 cm, on antud viisil raske tuvastada. Simulatsioonidel läbib umbes 0,2 ruutmeetrise silindri pinda umbkaudu 1000 osakest. Reaalselt jõuab samale pindalale meretasemel umbes 400 osakest minutis (Kiisk, 2017). Seega vastavad simulatsioonid kogumisajale umbes kolm minutit.

Võrreldes neid tulemusi hajumise ja neeldumise koos uurimisel saadud tulemustega on ilmne, et hajumist ja neeldumist koos uurides saab materjale eristada paremini. Algimpulsiga 50 MeV/c puhul olid pidurdusvõimed erinevate materjalide jaoks heal määral eristatavad. Uurides aga ainult neeldumist on aga madalama keskmise aatomnumbri ja tihedusega materjalide eristamine raskendatud.

## **Kokkuvõte**

### **Kosmilise sekundaarkiirguse elektronide hajumise ja neeldumise abil materjalide identifitseerimise uurimine G4Beamline simulatsioonitarkvara abil**

Hetkel piirikontrollis kasutatavate gammakiirgusdetektoritega on raskendatud tuumamaterjali detekteerimine, kui seda ümbritsevad muud tihedad ja kõrge aatomnumbriga ained. Kosmilise sekundaarkiirguse müüonite abil saab tuvastada tuumamaterjali ning selline süsteem oleks praktikas rakendatav, kui ta suudaks eristada ka muid illegaalseid aineid. Käesolev töö uuribki, kas kosmilise sekundaarkiirguse elektronide abil on võimalik tuvastada erinevaid madala tiheduse ja aatomnumbriga materjale. Lihtsustatud simulatsioonide tulemused näitavad, et materjalid neelduvate ja hajuvate elektronide hulgad sõltuvad tugevalt materjalist, ning annavad võimaluse neid selle alusel eristada. Simulatsioonid on tehtud 10 erineva materjaliga erinevate monoenergeetiliste elektronihulkade jaoks. Hajumis- ja neeldumishulgad ning keskmise hajumisnurga jaotus sõltusid materjalidest märkimisväärselt. Lisaks leiti, et uuritavate materjalide paksus peab olema väga madala tiheduse ja keskmise aatomnumbriga materjalide jaoks kindlasti üle 10 cm, et neid detekteerida 50 MeV/c impulsi osakeste kaudu ainult neeldumist uurides. Simulatsioonide tulemused kinnitavad, et materjale on võimalik kosmilise sekundaarkiirguse elektronide neeldumise ja hajumise uurimise abil eristada.

## Kasutatud kirjandus

1. Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Brogolia, L et al. (2003). Geant4 – a stimulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (506), 250-303.
2. Alvarez, L. W., Anderson, J. A., Bedwei, F. El., Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A. Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Mohammed-Sharkawi ja Yazoliono, L. (1969). Search for hidden chambers in the pyramids. Science (167), 832-839.
3. Blanpied, G., Kumar, S., Dorroh, D., Morgan, C., Blanpied, I., Sossong, M., McKenney, S. ja Nelson, B. (2015). Material discrimination using scattering and stopping of cosmic ray muons and electrons: differentiating heavier from lighter metals as well as low-atomic weight materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (784), 352-358.
4. Blanpied, G., Kumar, S., Dorroh, D., Morgan, C, loojad; Lee, Hwa C., agent (2014). (WO2016025409) Material discrimination using scattering and stopping of muons and electrons. USA patendiaplikatsioon nr 62/036,034. August 11, 2014.
5. Beatty, J. J. ja Matthews, J. (2011). Cosmic rays.
6. Borozdin, K. N., Hogan, G. E., Morris, C., Priedhorsky, W. C., Saunders, A., Schultz, L. J. ja Teasdale, M. E. (2003). Surveillance: Radiographic imaging with cosmic-ray muons. Nature (422),
7. Cardboard density. URL: <http://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/cardboard> (külastatud 13. mai 2017)
8. Cremonesi, L. (2011). Cosmic-ray muon tomography for anti-terrorism applications.
9. Darijani, R., Negarestani, A., Rezaie, M. R., Fatemi, S. J. ja Akhond, A. (2016) A new approach in coal mine exploration using cosmic ray muons. DE GRUYTER (64), 1034-1050.
10. Dazhuang, Z. (2012). CR-39 plastic nuclear track detectors in physics research. Nova Science Publishers.
11. Densities of Solids. URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d\\_1265.html](http://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html) (külastatud 13. mai 2017)

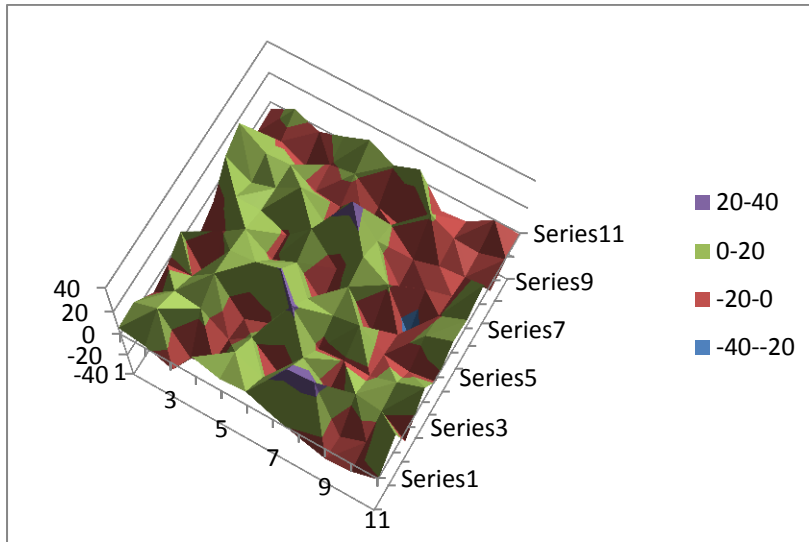
12. Density of Paper and Paperboard. URL: <http://www.paperonweb.com/density.htm> (külastatud 13. mai 2017)
13. Estar – stopping-power and range tables for electrons. URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (külastatud 21. mai 2017)
14. G4Beamline. URL: <http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline> (külastatud 15. mai 2017)
15. Golden, R. L., Stephens, S. A., Stochaj, S. J., Webber, W. R., Brunetti, M. T., Codino, A., Grimani, C., Menichelli, M., Salvatori, I., De Pascale, M. P., Morselli, A., Picozza, P., Basini, G., Bongiorno, F., Brancaccio, F., M., Ricci, M., Ormes, J. F., Streitmatter, R., E., Papini, P., Piccardi, S. ja Spillantini, P. (1995). Measurement of the energy spectra of cosmic ray electron component and protons at ground level. *Journal of Geophysical Research* (100), 23,515-23,522.
16. Guardincerri, E., Durham, J. M., Morris, C., Bacon, J. D., Daughton, T. M., Fellows, S, Morley, D. J., Johnson, O. R., Plaud-Ramos, K., Poulson, D. C. ja Wang, Z. (2016). Imaging the inside of thick structures using cosmic rays. *AIP Advances* (6).
17. Hogan, G. E., Borozdin, K. N., Comez, J., Morris, C., Friedhorsky, W. C., Saunders, A., Schultz, L. L. ja Teasdale, M. E. (2003). Detection of high-z objects using multiple scattering of cosmic ray muons.
18. Kiisk, M. (2017). Kosmilisel kiirgusel põhineva turvakontrolli detekteerimissüsteemi teostatavuse uuring.
19. L'Annunziata, M. F. (2007). *Radioactivity: introduction and history*. Elsevier Science.
20. Medalia, J. (2010). *Detection of nuclear weapons and materials: science, technologies, observations*.
21. Microsoft Word – silica sand 1.doc. URL: <http://www.shoshani-weinstein.co.il/Uploads/dbsAttachedFiles/silicasand1.pdf> (külastatud 13. mai 2017)
22. MMPDS for Cargo Scanning – Decision Sciences. URL: <https://www.decisionsciences.com/ourproduct/marketing-materials/mmpds-for-cargo-scanning/> (külastatud 13. mai 2017).
23. MSW Learning Tool: Lesson #3: Characteristics and Quantity of MSW. URL: <http://msw.cecs.ucf.edu/lesson2new.html> (külastatud 13. mai 2017)
24. Morris, C. L., Alexander, C. C., Bacon, J. D., Borozdin, K. N., Clark, D. J., Chartrand, R., Espinoza, C. J., Fraser, A. M., Galassi, M. C., Green, J. A., Gonzales, J. S., Comez, J. J., Hengartner, N. W., Hogan, G. E., Klimenki, A. V., Makela, M. F.,

- McGaughey, P., Medina, J. J., Pazuchanics, F. E., Priedhorsky, W. C., Ramsey, J. C., Saunders, A., Schirato, R. C., Schultz, L. J., Sossong, M. J. ja Blanpied, S. (2008). Tomographic imaging with cosmic ray muons. *Science and Global Security* (16), lk 37-53.
25. Presente, S., Vanini, S., Benettoni, M., Bonimi, G., Calvini, P., Checchia, P., Conti, E., Gonella, F., Nebbia, G., Squarcia, S., Viesti, G., Zenoni, A. ja Zumerle, G. (2009). First result on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (604), 738-746.
26. Schultz, L. J. (2003). Cosmic ray muon radiography.
27. Schultz, L. J., Borozdin, K. N., Gomez, J. J., McGill, J. A., Morris, C. L., Priedhorsky, W. C., Saunders, A. ja Teasdale, M. E. (2004). Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (519), 687-694.
28. Riggi, S., Antonuccio-Delogu, V., Bandieramonte, M., Becciani, U., Costa, A., La Rocca, P., Massimino, P., Petta, C., Pistagna, C., Riggi, F., Sciacca, E. ja Vitello, F. (2013). Muon tomography imaging algorithms for nuclear threat detection inside large volume containers with the muon portal detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (728), 59-68.
29. Roberts, T. (2012). G4beamline validation.
30. Roberts, T. (2016). G4beamline user's guide.
31. Sand, Silica density. URL: <http://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/sand-coma-and-blank-silica> (külastatud 13. mai 2017)
32. Sato, T. (2015). Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: extension of PARMA/EXPACS. *PLoS ONE* 10 (12).
33. Stopping Power and Range Tables for Electrons. URL: [http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/e\\_table.pl](http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/e_table.pl) (külastatud 21. mai 2017)

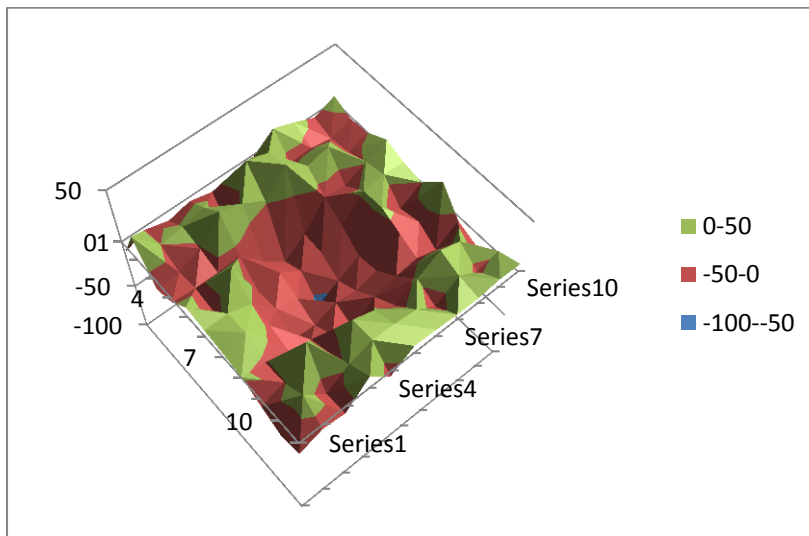
Lisad

Lisa 1.

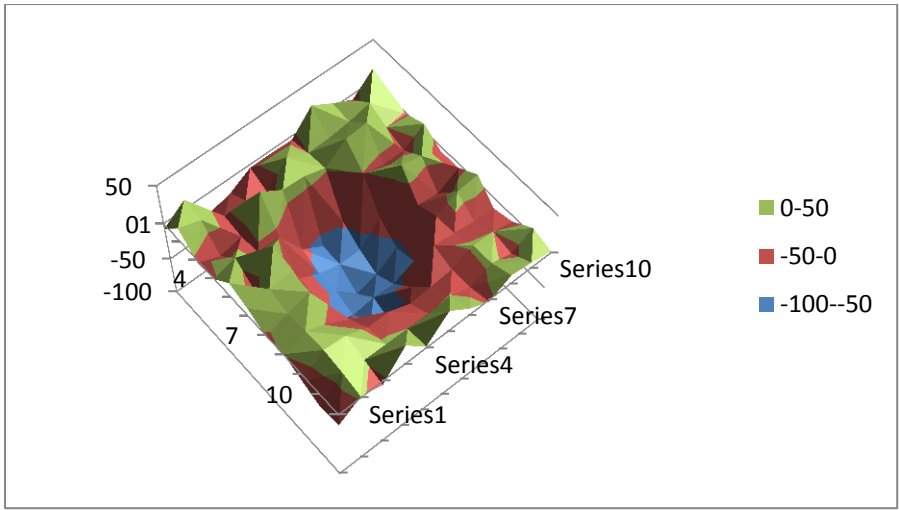
Vaadeldava eseme kujutised erinevate paksuste jaoks elektronide algimpulsiga 100 MeV/c.



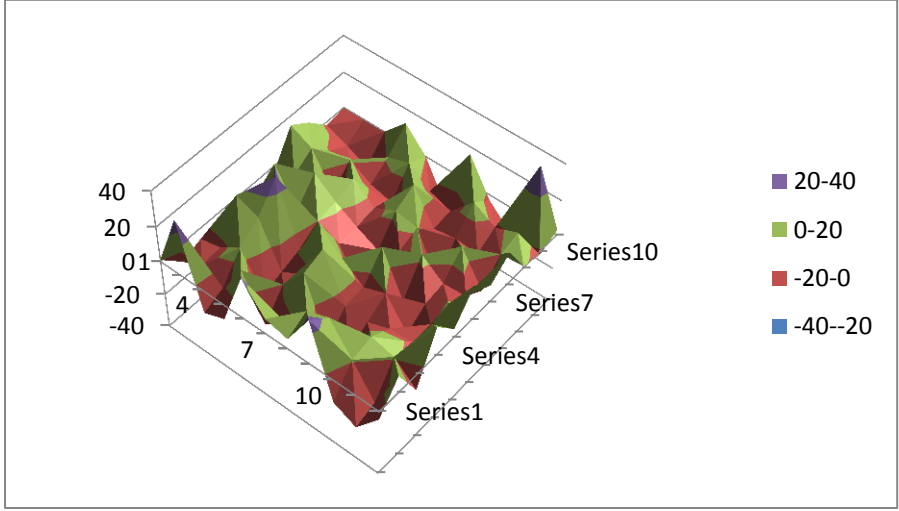
Kujutis 1. Alumiinium 1cm.



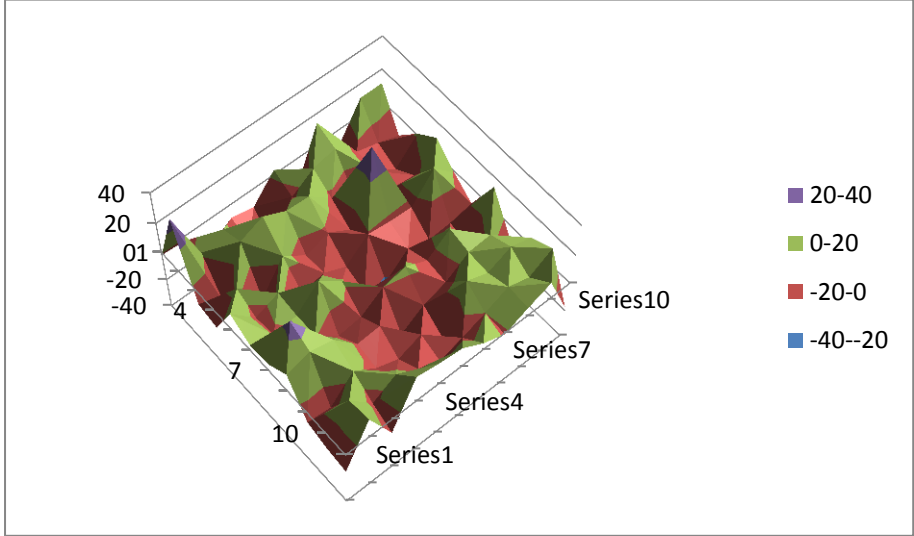
Kujutis 2. Alumiinium 10 cm.



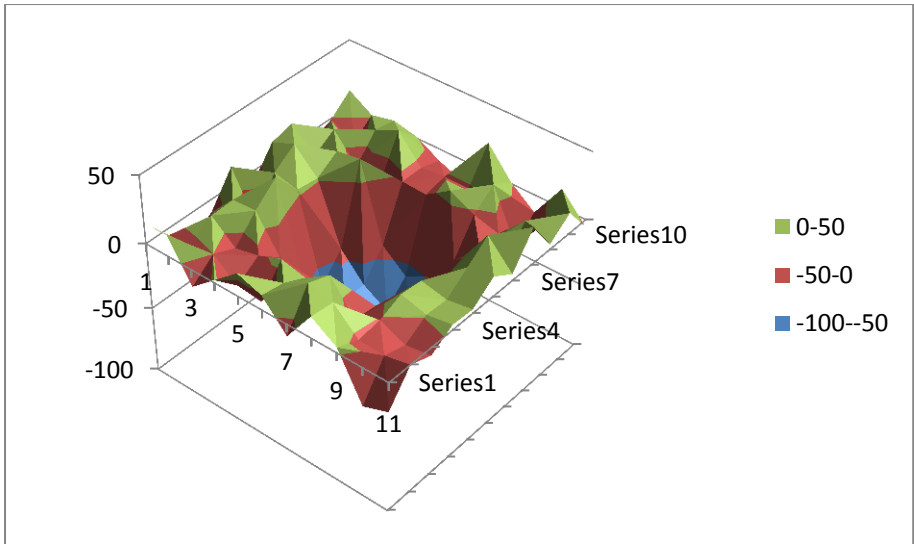
**Kujutis 3. Alumiinium 50 cm.**



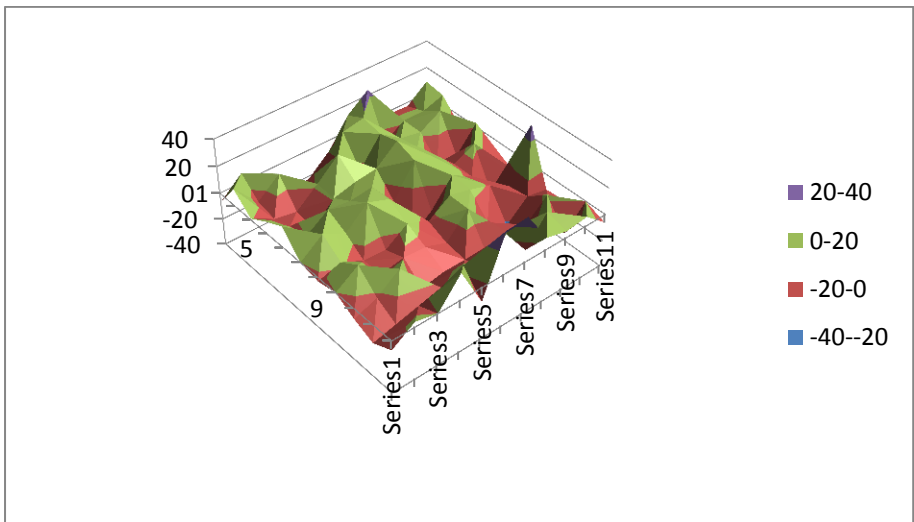
**Kujutis 4. AN 1 cm.**



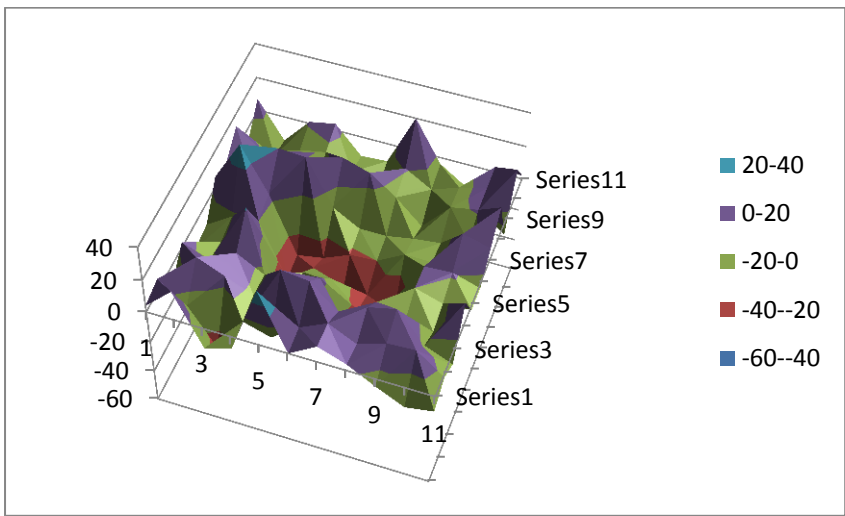
**Kujutis 5. AN 10 cm.**



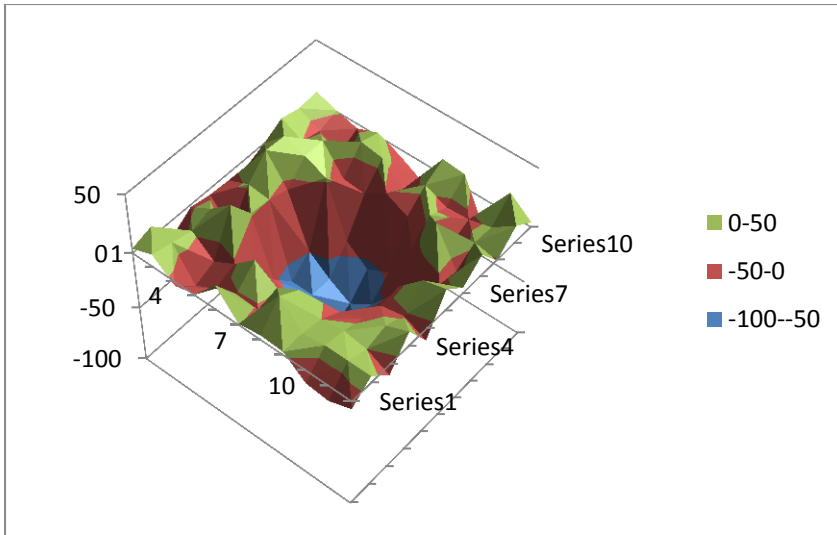
**Kujutis 6. AN 50 cm.**



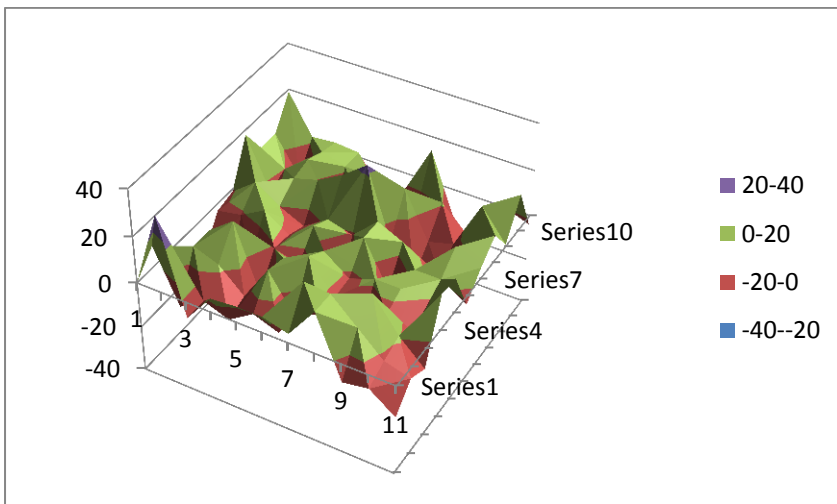
**Kujutis 7. Beton 1 cm.**



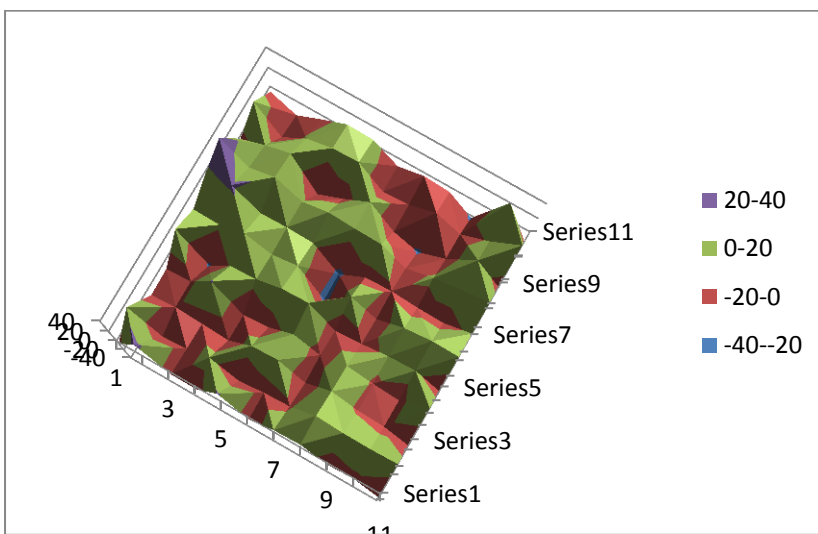
**Kujutis 8. Beton 10 cm.**



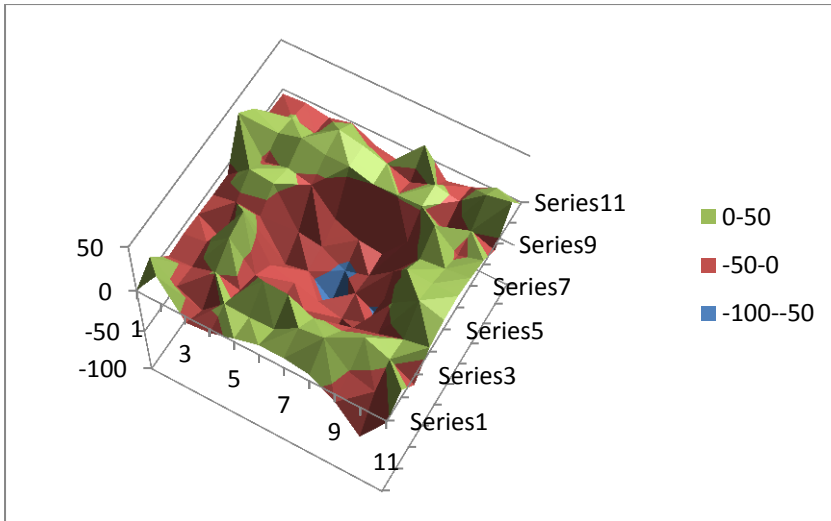
**Kujutis 9. Beton 50 cm.**



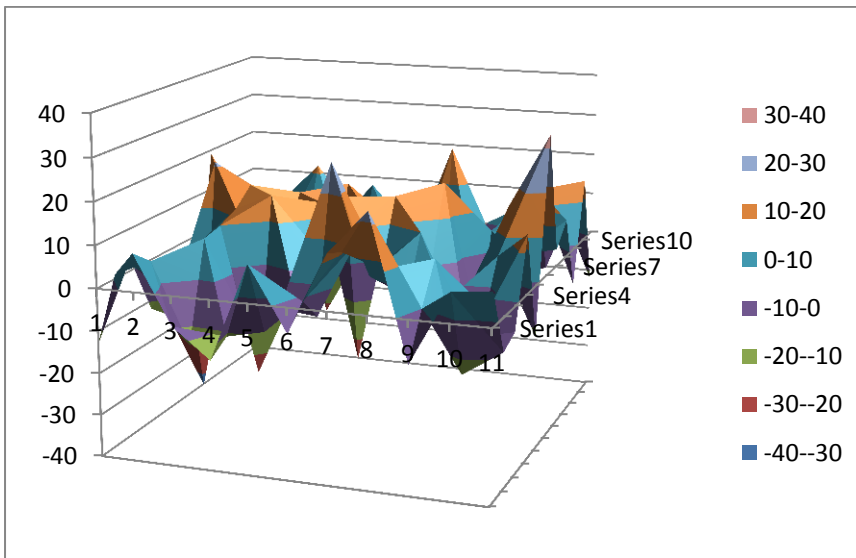
**Kujutis 10. Kartong 1 cm.**



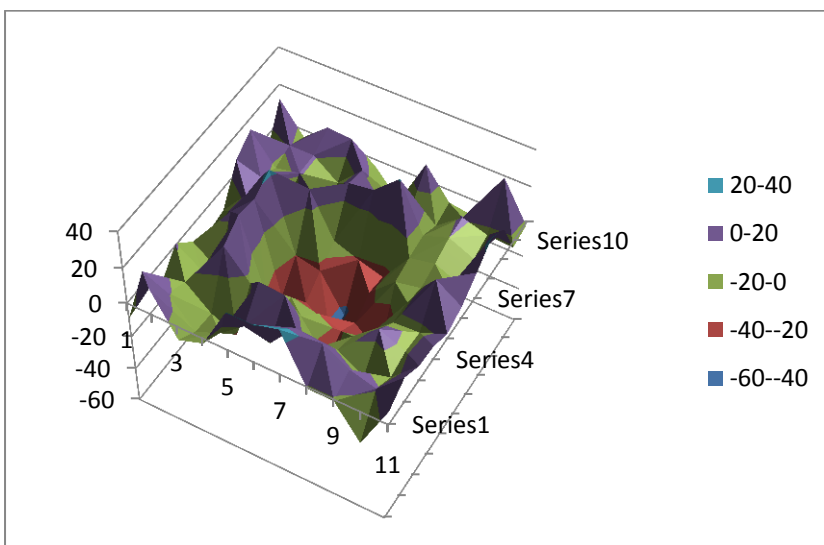
**Kujutis 11. Kartong 10 cm.**



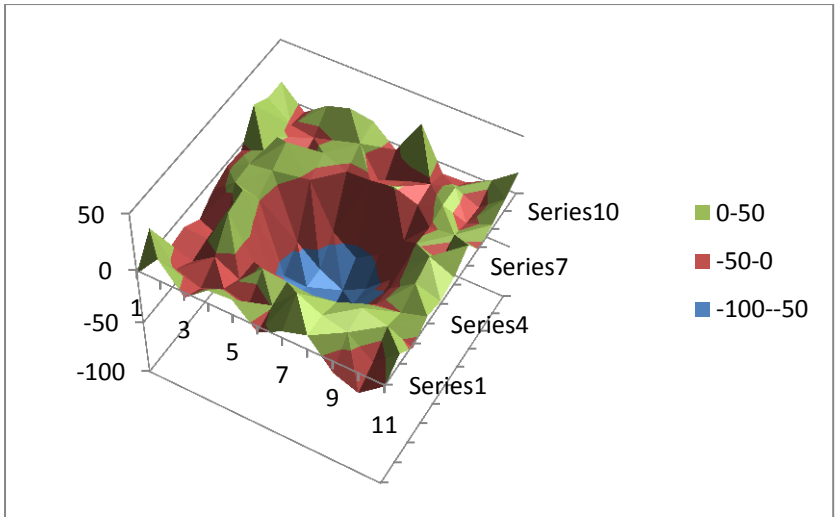
**Kujutis 12. Kartong 50 cm.**



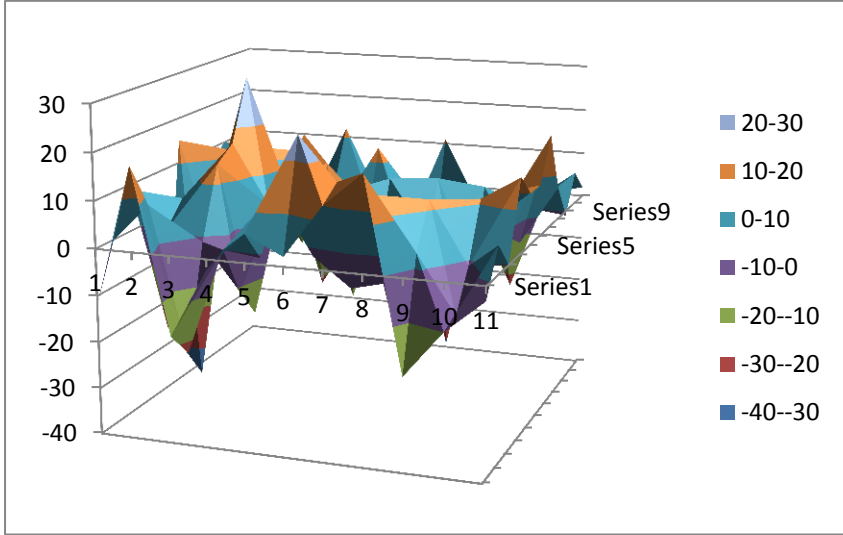
**Kujutis 13. Klaas 1 cm.**



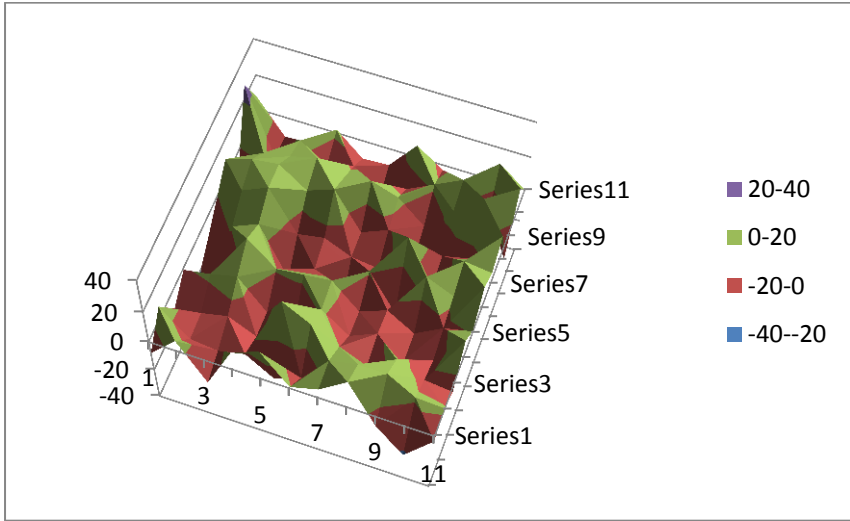
**Kujutis 14. Klaas 10 cm.**



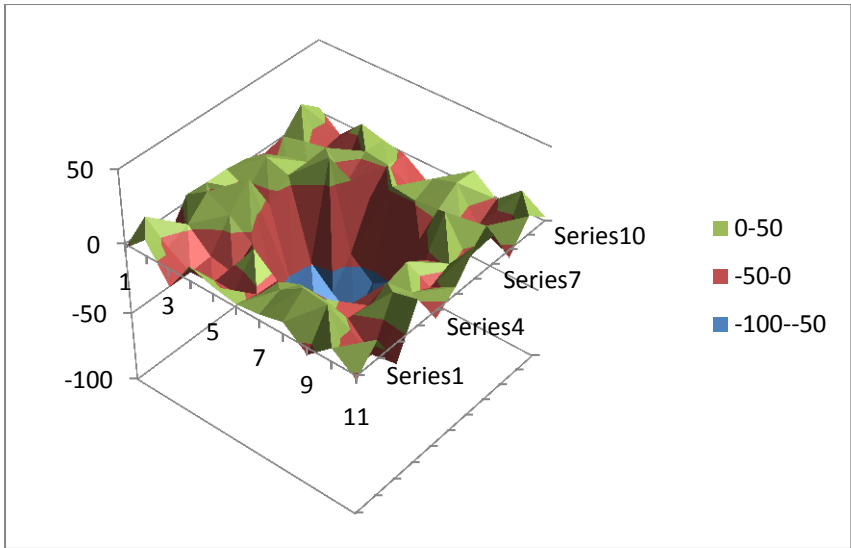
**Kujutis 15. Klaas 50 cm.**



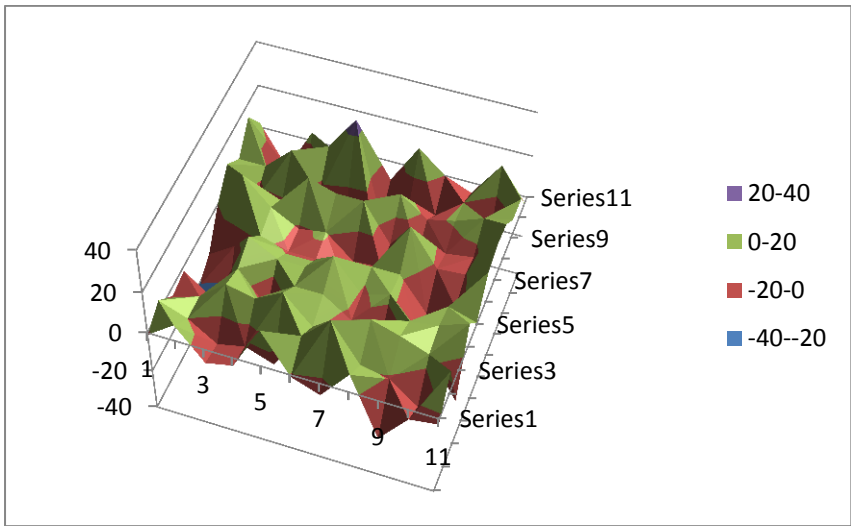
**Kujutis 16. Liiv 1 cm.**



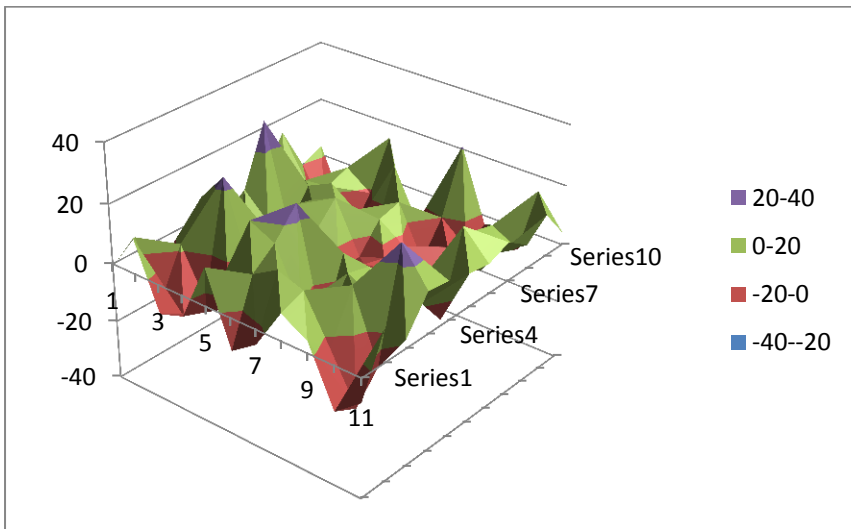
**Kujutis 17. Liiv 10 cm.**



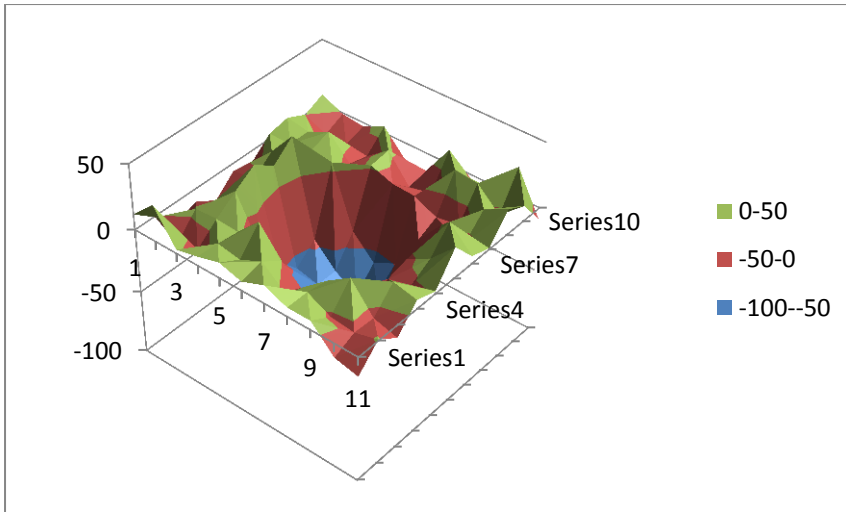
**Kujutis 18. Liiv 50 cm.**



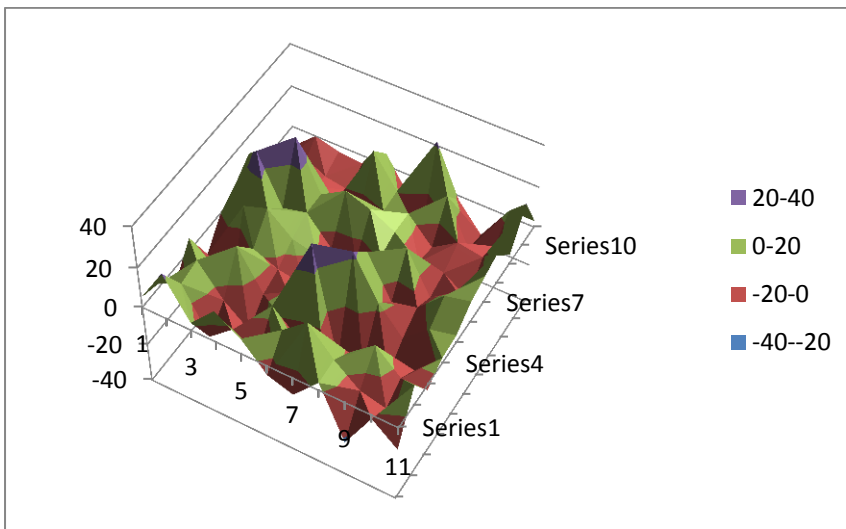
**Kujutis 19. Nailon 1 cm.**



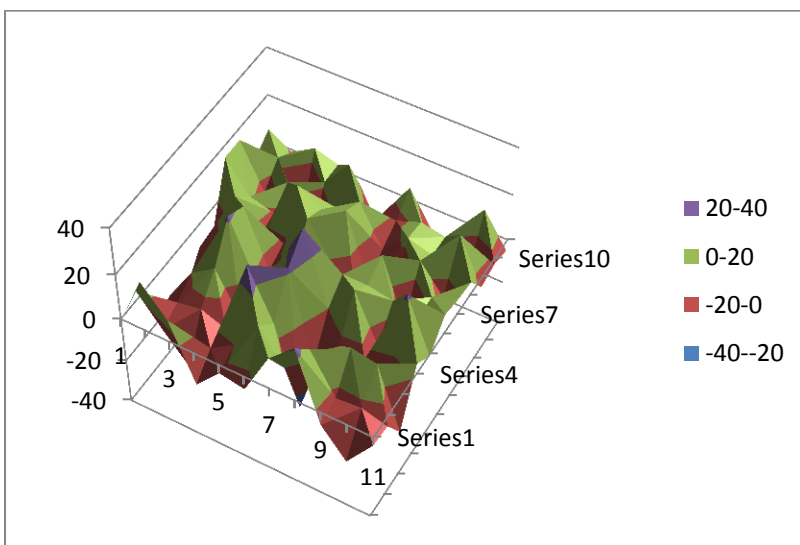
**Kujutis 20. Nailon 10 cm.**



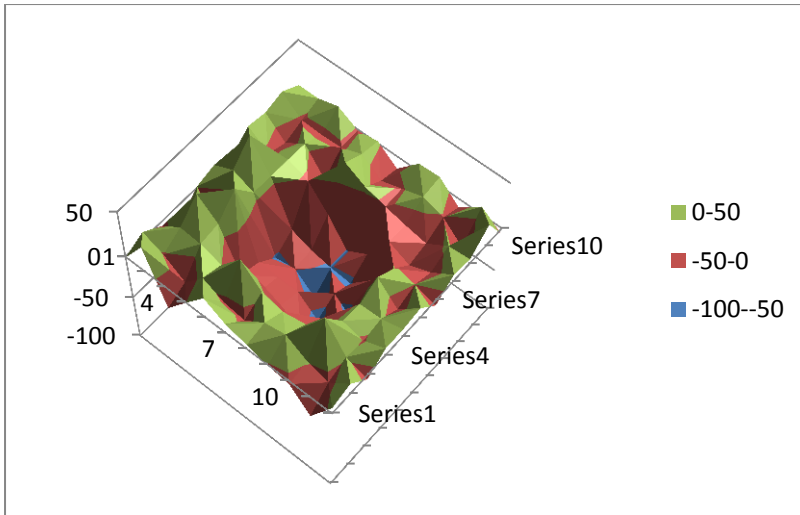
**Kujutis 21. Nailon 50 cm.**



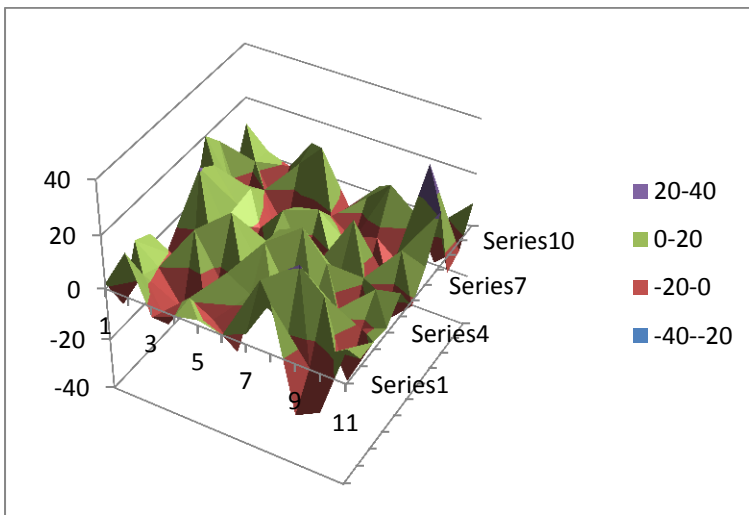
**Kujutis 22. Paber 1 cm.**



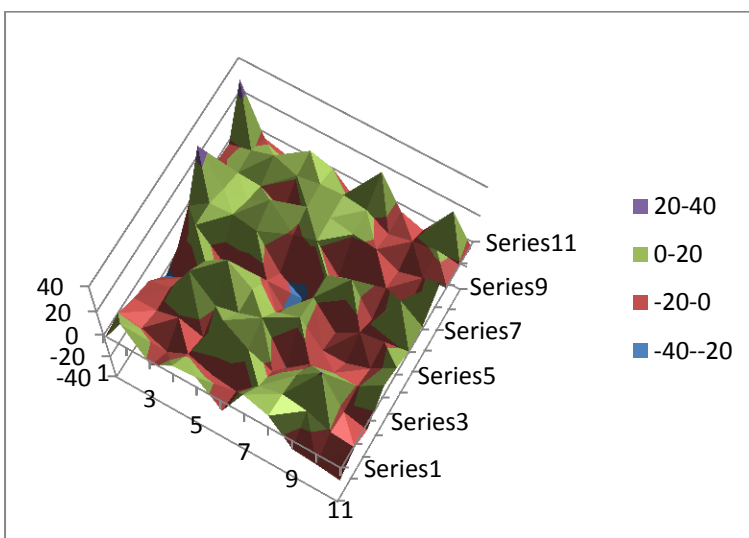
**Kujutis 23. Paber 10 cm.**



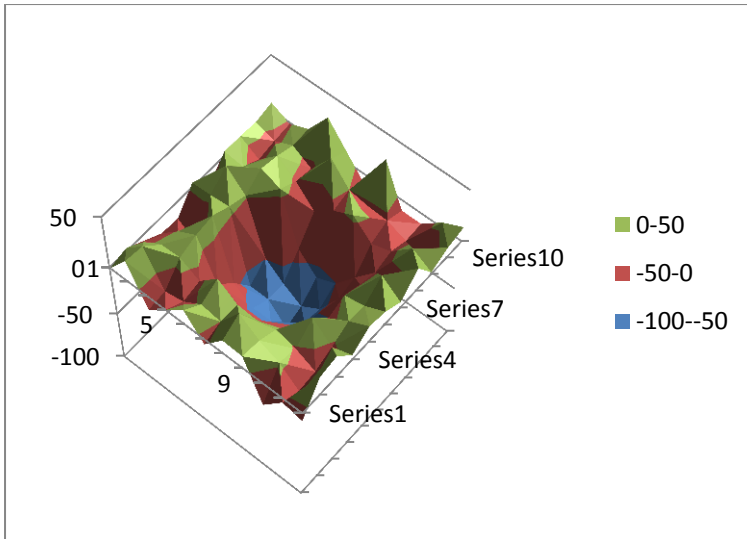
**Kujutis 24. Paber 50 cm.**



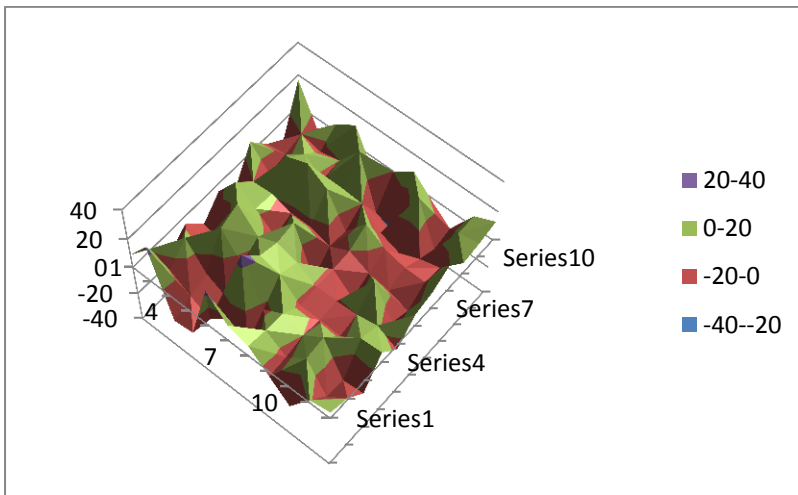
**Kujutis 25. PET 1 cm.**



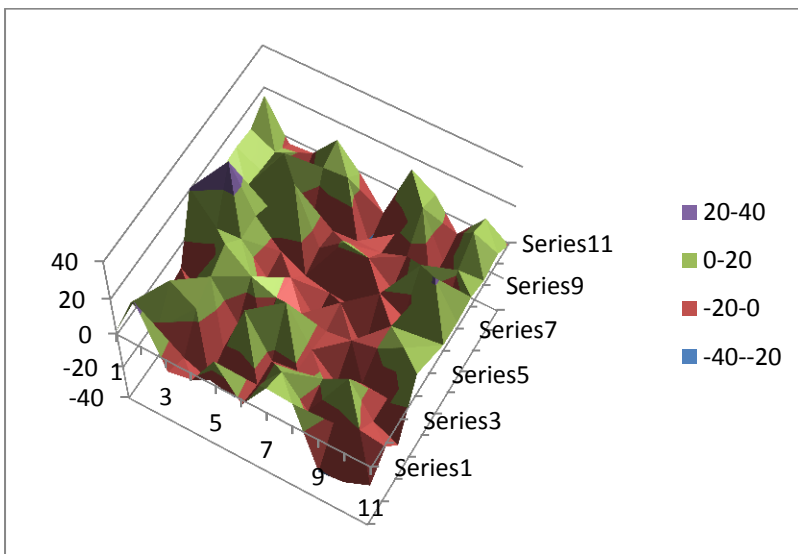
**Kujutis 26. PET 10 cm.**



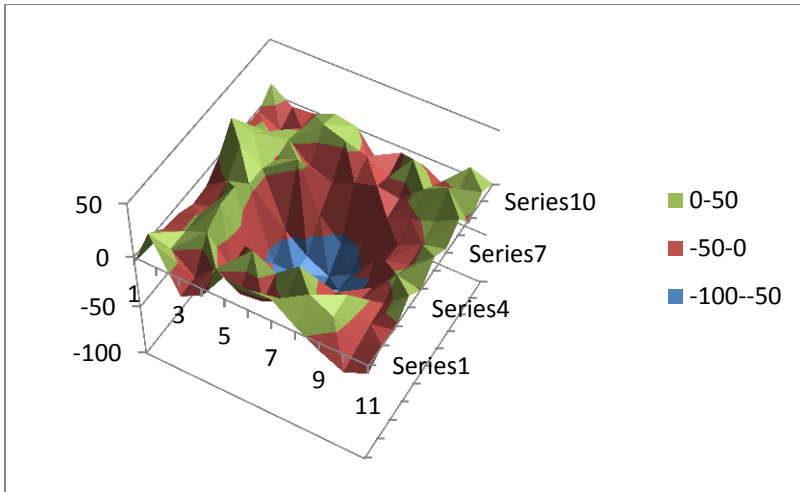
**Kujutis 27. PET 50 cm.**



**Kujutis 28. RDX 1 cm.**



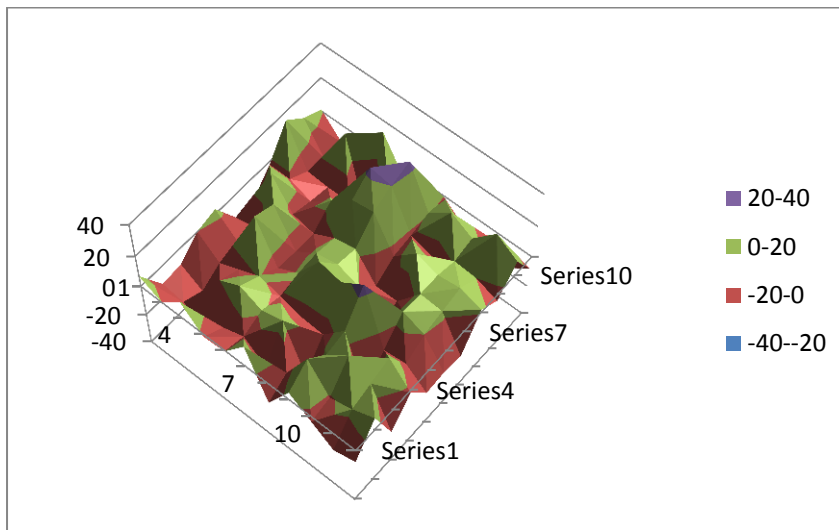
**Kujutis 29. RDX 10 cm.**



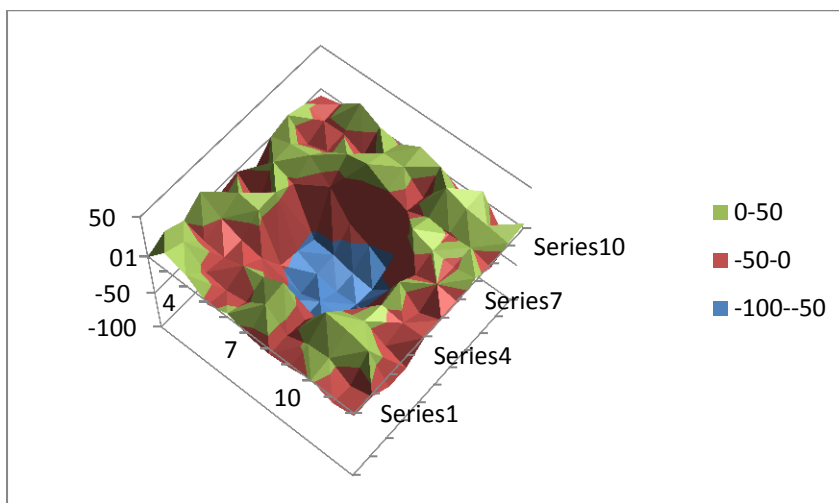
**Kujutis 30. RDX 50 cm.**

**Lisa 2.**

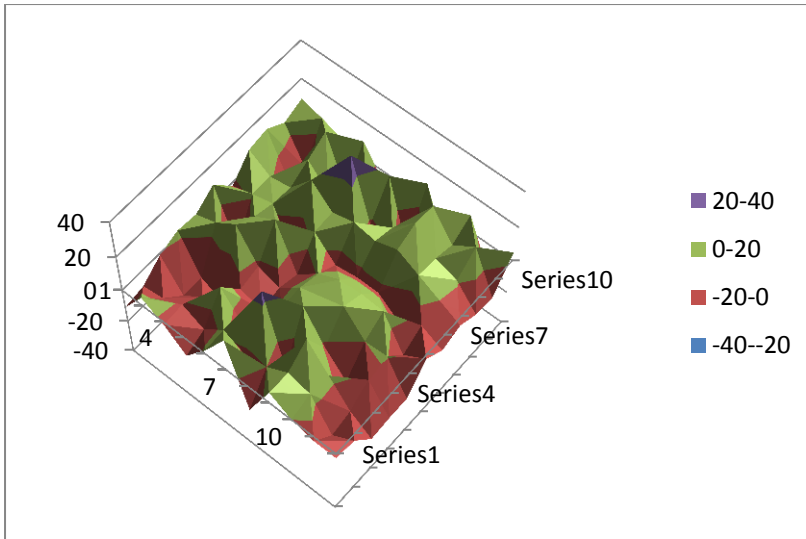
Vaadeldava eseme kujutised erinevate paksuste jaoks elektronide algimpulsiga 50 MeV/c.



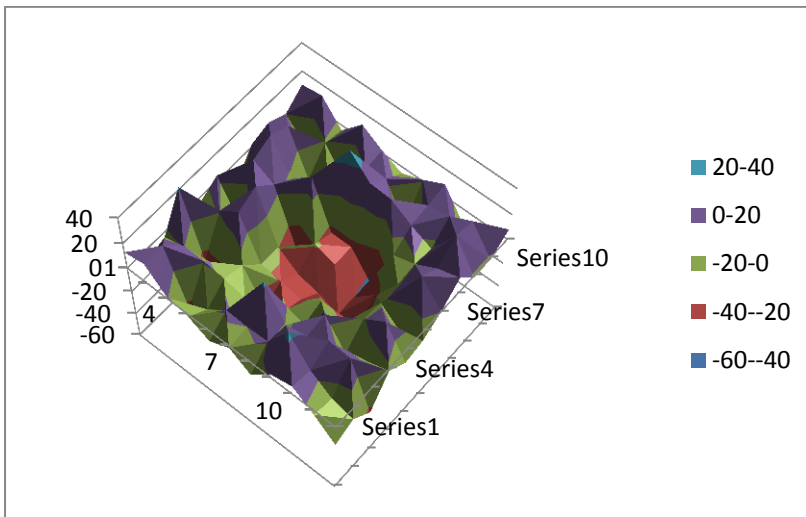
**Kujutis 31. Alumiinium 1 cm.**



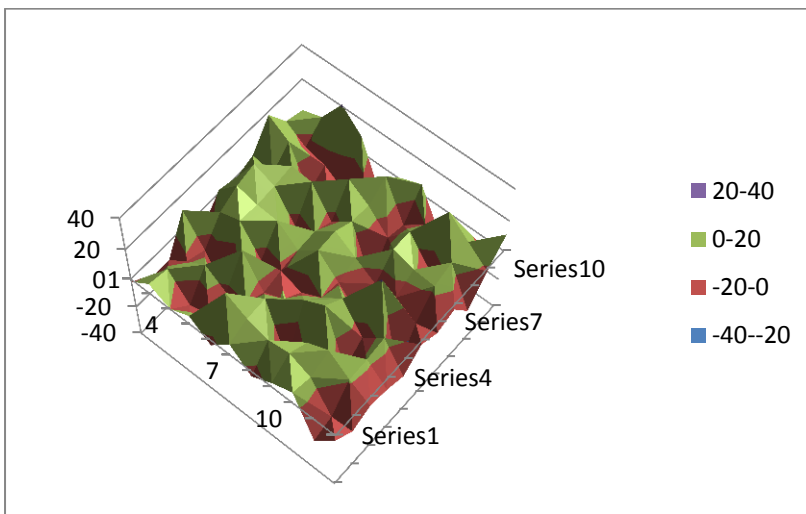
**Kujutis 32. Alumiinium 10 cm.**



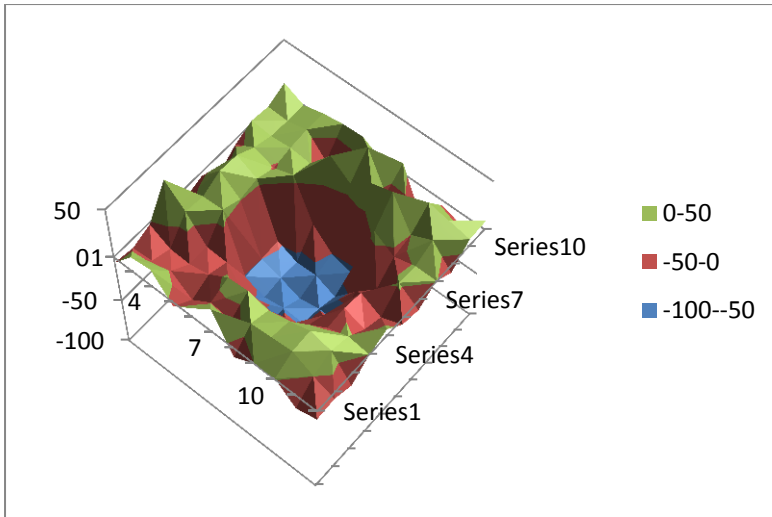
**Kujutis 33. AN 1 cm.**



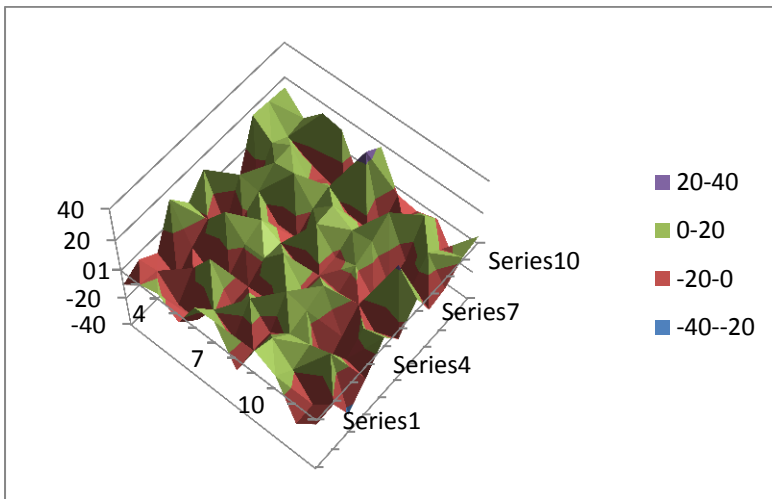
**Kujutis 34. AN 10 cm.**



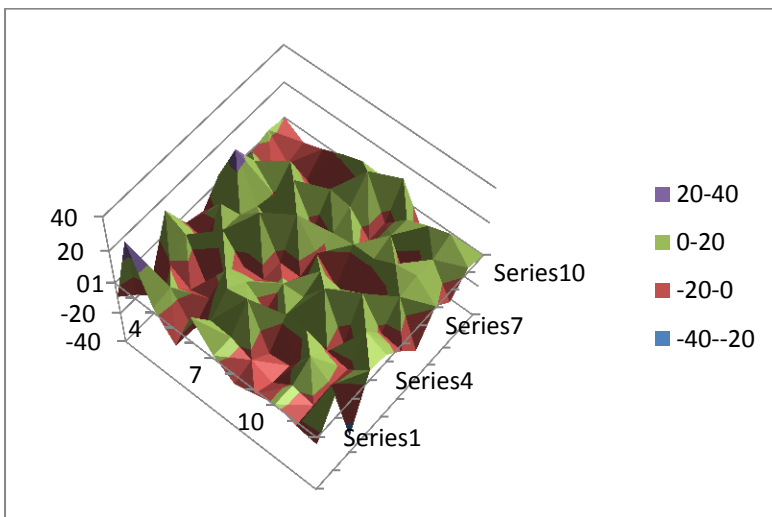
**Kujutis 35. Beton 1 cm.**



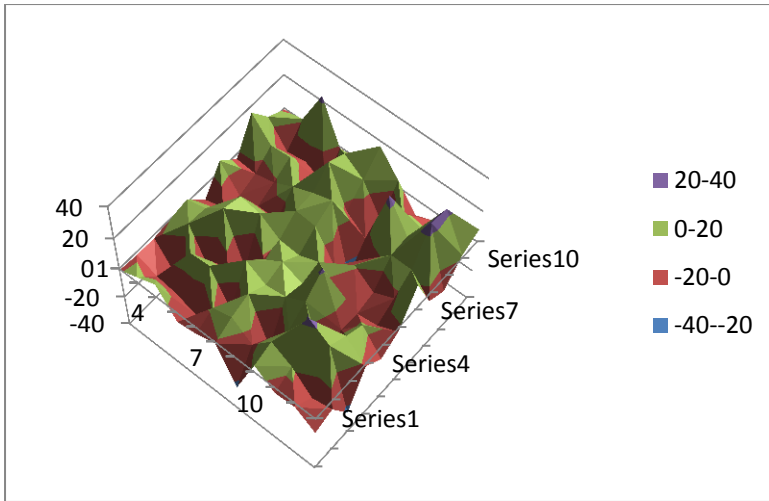
**Kujutis 36. Beton 10 cm.**



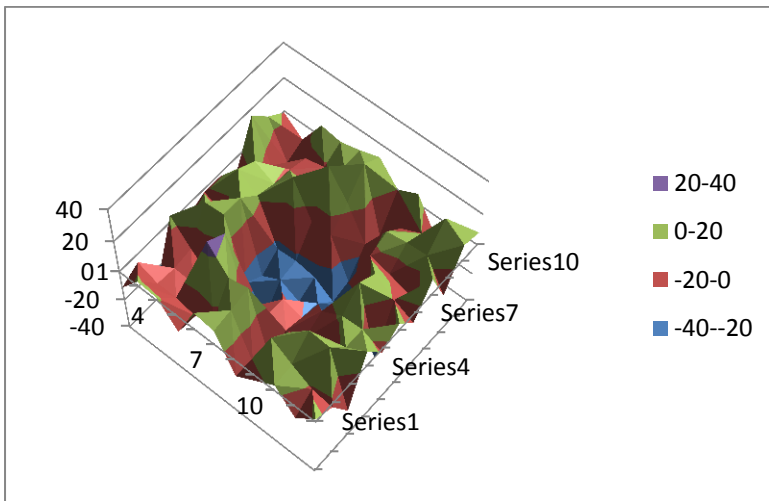
**Kujutis 37. Kartong 1 cm.**



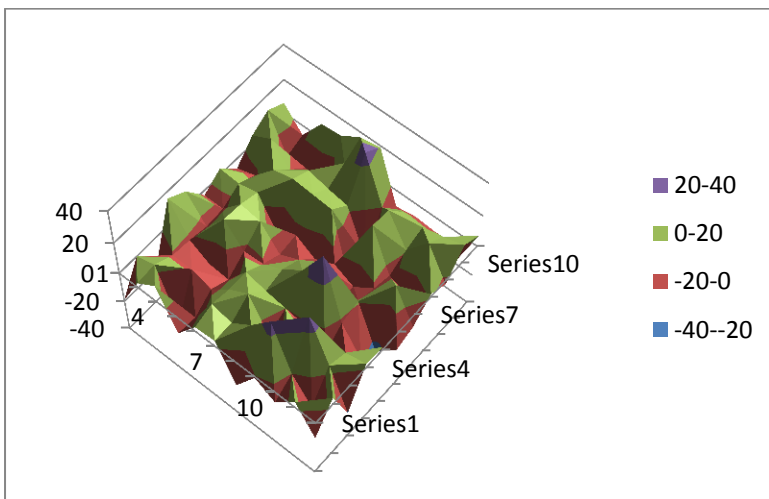
**Kujutis 38. Kartong 10 cm.**



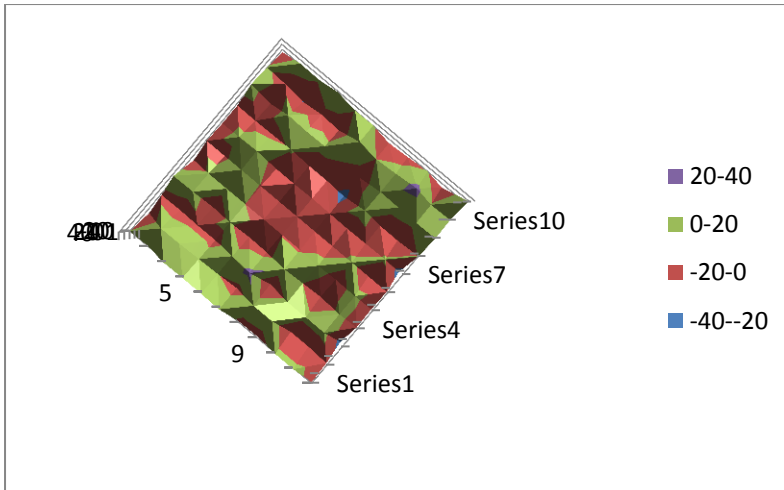
**Kujutis 39. Klaas 1 cm.**



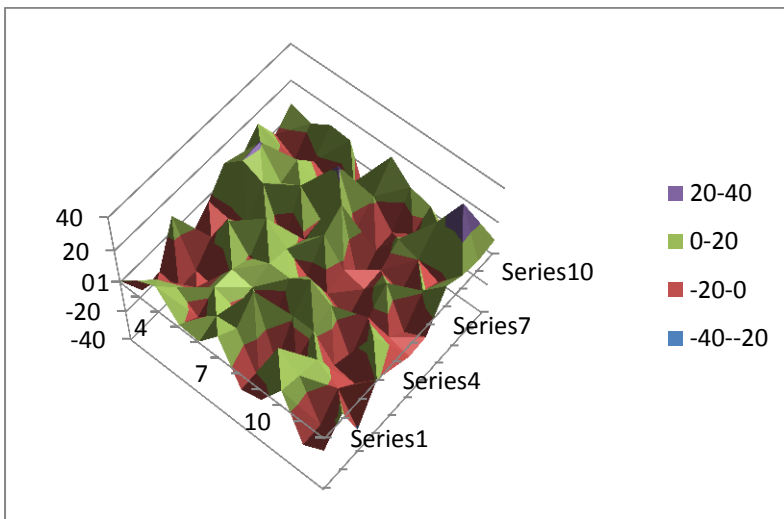
**Kujutis 40. Klaas 10 cm.**



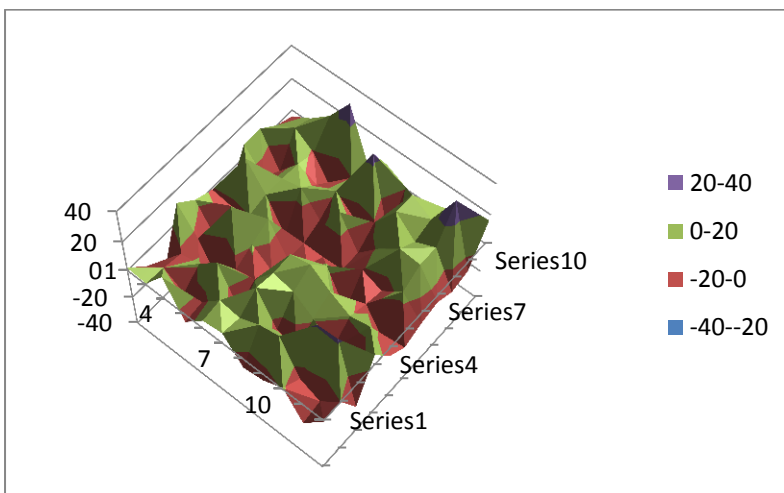
**Kujutis 41. Liiv 1 cm.**



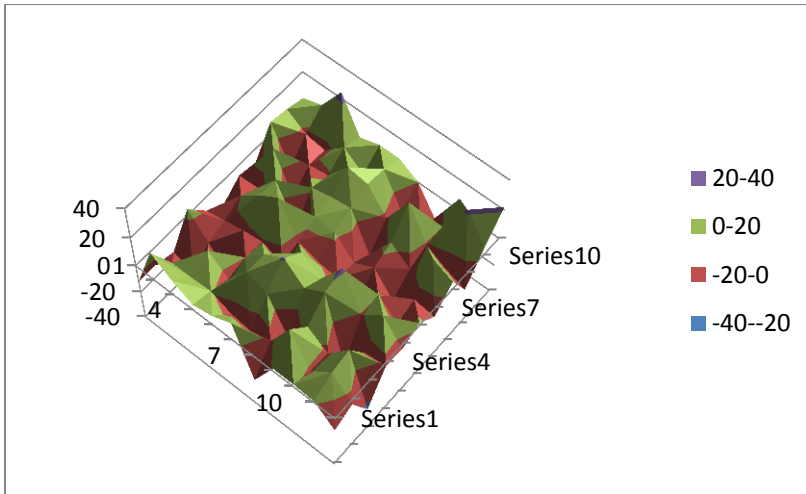
**Kujutis 42. Liiv 10 cm.**



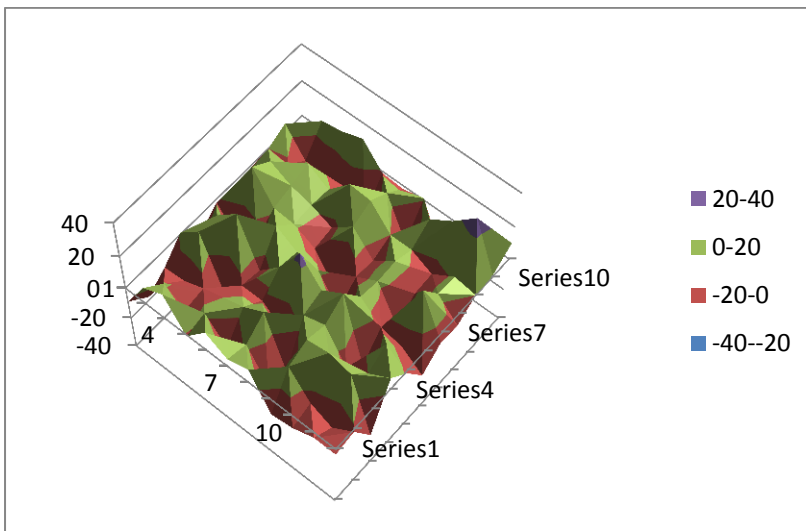
**Kujutis 43. Nailon 1 cm.**



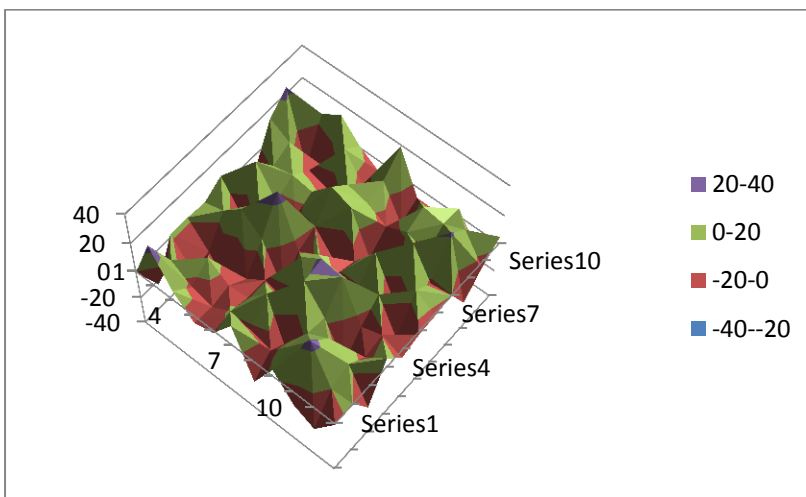
**Kujutis 44. Nailon 10 cm.**



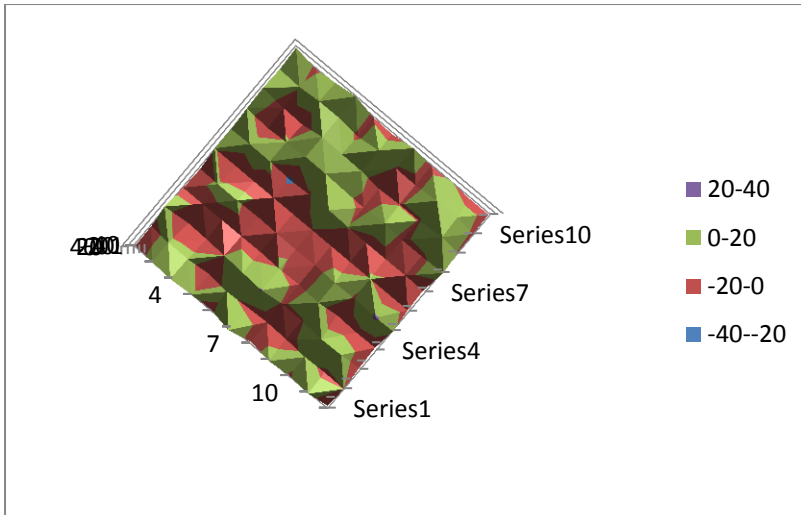
**Kujutis 45. Paber 1 cm.**



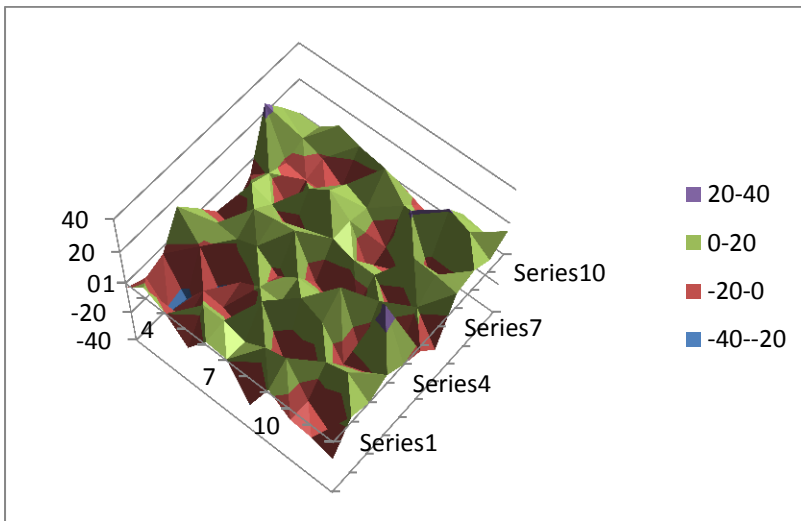
**Kujutis 46. Paber 10 cm.**



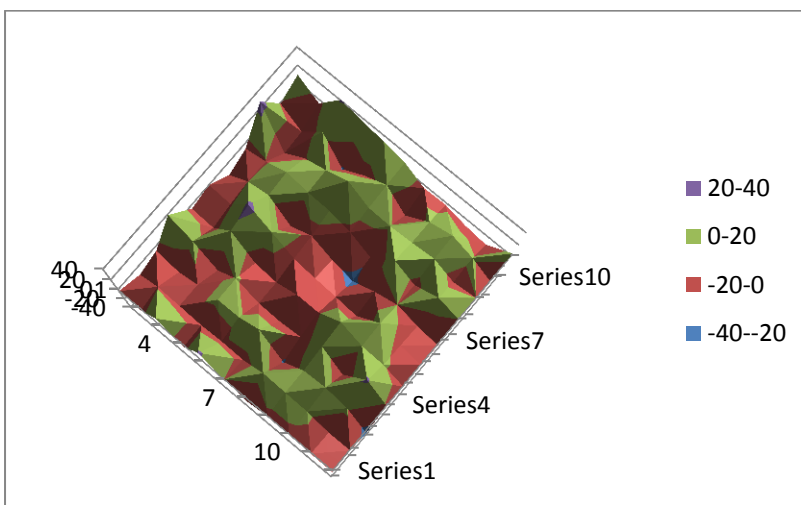
**Kujutis 47. PET 1 cm.**



**Kujutis 48. PET 10 cm.**



**Kujutis 49. RDX 1 cm.**



**Kujutis 50. RDX 10 cm.**

### Lisa 3.

Tarkvarapaketi G4Beamline olemasolevate materjalide elementkoostised.

Alumiiniumi tihedus on  $2,699 \text{ g/cm}^3$ . Järgnevas tabelites on toodud materjalide elementkoostised massisuhtarvudena ning materjalide tihedused.

	H	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Tihedus ( $\text{g/cm}^3$ )
Betoon	0,01	0,001	0,5291	0,016	0,002	0,0339	0,337	0,013	0,044	0,014	2,3

**Tabel 3. Betooni elementkoostis ning tihedus,**

	O	Na	Si	Ca	Tihedus ( $\text{g/cm}^3$ )
Klaas	0,4598	0,0964	0,3366	0,1072	2,4

**Tabel 4. Klaasi elementkoostis ning tihedus.**

	O	Si	Tihedus ( $\text{g/cm}^3$ )
Liiv	0,5326	0,4674	1,538

**Tabel 5. Liiva elementkoostis ja tihedus.**

	H	C	O	N	Tihedus ( $\text{g/cm}^3$ )
Nailon 6,6	0,098	0,6368	0,1414	0,1238	1,14

**Tabel 6. Nailoni elementkoostis ja tihedus.**

## **Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Karl Kristjan Kaup,  
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose

Kosmilise sekundaarkiirguse elektronide hajumise ja neeldumise abil materjalide tuvastamise  
uurimine G4Beamline simulatsioonitarkvara abil

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Madis Kiisk,  
(*juhendaja nimi*)

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **26.05.2017**