

Neutroniaktivaatio puun kosteuden mittauksessa

Suvi Päiviö

Lisensiaattitutkielma



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Fysiikan laitos
2009

Esipuhe

Työ on tehty ja on kiitoksen aika. Ensinnäkin tahdon kiittää ohjaajiani Ari Virtasta ja Taneli Kalvasta avusta ja tuesta tutkimuksen aikana. Tanelilta sain paljon apua MCNPX:n kiemuroihin ja hänen ansiotaan ovat myös hakemittausten valokuvat. Haluan kiittää myös Timo Riikilää, joka osallistui hakkeella tehtyihin mittauksiin ja piirsi CAD-kuvat käytetyistä mittaussasetelmista.

Kiitän lisensiaattityöni tarkastajia Antti Karia ja Jaana Kumpulaista. Arvostan aikaa, jota käytitte työn eri versioiden parissa. Panoksenne auttoi parantamaan työtä.

Kiitokset kuuluvat myös Pauli Peuralle, Steffen Ketelhutille ja Pete Jonesille germaniumilmaisimen lainaamisesta. Aika ja kärsivällisyys, jota Pauli ja Steffen käyttitte ilmaisimen oikean käytön ja kytkentöjen oikean suorittamisen opettamiseen, oli korvaamatonta.

Timo Järviselle kiitokset runkopuumittausten järjestämisestä. Mittaukset eivät olisi onnistuneet ilman mittaustilaa, jota järjestit VTT Jyväskylän tiloista. Myös apu nestetyypen täytössä mittausten aikana oli arvokasta. Kiitokset myös runkopuumittausten valokuvaamisesta.

Lisäksi haluan kiittää Antti Korpilahtea Metsäteho Oy:stä PUUNA-projektin organisoimisesta. Metsäteho Oy:n lisäksi myös VTT Jyväskylä ja Metso Paper Pori Oy osallistuivat projektin rahoittamiseen.

Kiitokset myös koko Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen henkilökunnalle yhteisistä työvuosista. Erityiskiitokset ystävälleni Lauralle päivittäisistä lounastunneista, joiden aikana sain tuulettaa tuntojani. Kiitokset myös muille ystävilleni ja perheelleni tuesta ja olkapäistä. Kiitän myös puolisoani Heikkiä kannustuksesta.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus	4
3	Neutroniaktivaatio	5
3.1	<i>Neutronien vuorovaikutukset</i>	5
3.2	<i>Neutroniaktivaatioanalyysi pienille ja suurille näytteille</i>	8
4	Neutronilähteet	11
4.1	<i>Isotooppilähteet</i>	11
4.2	<i>Neutronigeneraattorit</i>	12
5	Gammasäteilyn ilmaisimista	15
5.1	<i>Puolijohdeilmaisimet</i>	15
5.2	<i>Uudet tuikemateriaalit puolijohteiden haastajina</i>	17
6	Simulaatio-ohjelma MCNPX	20
6.1	<i>Datakirjastot</i>	21
6.2	<i>Geometrian luominen</i>	22
6.3	<i>Kerättävä informaatio</i>	24
6.4	<i>Simulaation luotettavuus</i>	26
7	Hakemittaukset	27
7.1	<i>Simulaatiot</i>	27
7.2	<i>Mittaukset</i>	33
7.2.1	<i>Ensimmäinen mittausgeometria</i>	33
7.2.2	<i>Toinen mittausgeometria</i>	35
7.2.3	<i>Kolmas mittausgeometria</i>	37
7.2.4	<i>Neljäs mittausgeometria</i>	38
7.3	<i>Tulokset ja niiden tarkastelu</i>	39
8	Puunippumittaukset	46
8.1	<i>Simulaatiot</i>	46
8.2	<i>Mittaukset</i>	49
8.3	<i>Tulokset ja niiden tarkastelu</i>	53
9	Johtopäätökset	57
10	Jatkotoimenpiteet	59
11	Yhteenvedo	62

1 Johdanto

Puun kosteuden online-mittaus on aiheuttanut ongelmia alan teollisuudelle jo vuosikymmeniä. Tarkkaa tietoa puun kosteudesta tarvitaan, jotta puu voidaan esimerkiksi käsitellä tai hinnoitella oikein. Esimerkiksi paperiteollisuudessa puun kosteus vaikuttaa jalostuksessa käytettävien kemikaalien suhteisiin, vaneriteollisuudessa kuivumisaikaan ja kuivatuslämpötilaan sekä energiateollisuudessa polton hyötysuhteeseen. Puun tuottajalle sekä käsitelijälle olisi edullista, mikäli puu voitaisiin hinnoitella ja varastoida kosteutensa perusteella jo sen saapuessa käsittelylaitokselle.

Luotettavaa ja tarkkaa kosteudenmittausta on etsitty monenlaisista menetelmistä. Näitä ovat esimerkiksi lämpökaappimenetelmä, kuumailmakuivaus, uuttamismenetelmä, vastusmittaus, tehohäviömenetelmä, mikroaaltomenetelmä ja infrapunamenetelmä [21]. Online-mittauksiin näistä soveltuvat vastusmittaus, tehohäviö-, mikroaalto- ja infrapunamenetelmät. Kuivatus-punnitusmenetelmät ovat tarkkoja, mutta niiden avulla kosteudenmääritys kestää useita tunteja, jopa vuorokausia.

Suomen oloissa kosteudenmittauksen ongelmiksi ovat muodostuneet erityisesti lumi ja jää. Nämä nostavat puun pintakosteutta, vaikka kokonaiskosteus ei olisikaan erityisen korkea. Mikäli kosteusmittaus perustuu menetelmään, joka tutkii puuta lähinnä vain pinnalta, saadaan helposti vääristyneitä tuloksia kosteudelle. Esimerkiksi infrapunasäteilyyn ja sähköjohtavuuteen perustuvat menetelmät tuottavat kosteusinformaation hyvin läheltä pintaa, jopa vain noin 1 mm syvyydeltä.

Röntgensäteilyn absorptioon perustuvia tekniikoita on käytetty varsin tuloksettaasti homogeenisen ja tasapaksun puumassan (esimerkiksi hake) kosteuspitoisuuden määrittämiseen online-mittauksena. Ongelmana näissä tekniikoissa on erottaa kosteus tiheyden vaihteluista. Riittävään tarkkuuteen pääsemiseksi on turvauduttava yhdistelmämittauksiin. Kokopuun mittaukseen röntgenmenetelmät eivät sovellu, sillä kokopuu on liian tiheätä. Katsaus erilaisiin kosteudenmittausmenetelmiin löytyy mm. Paperi ja Puu -lehden numerosta 3/2008. [15]

Tässä tutkimuksessa on käsitelty neutroniaktivaatiota [5]. Neutroniaktivaatiomenetelmä perustuu neutronien vuorovaikutuksiin aineessa. Neutronilähteestä emittoituvat neutronit etenevät tutkittavassa puussa ja menettävät energiansa elastisissa ja epäelastisissa törmäyksissä väliaineen ytimien kanssa, kunnes niiden nopeudet ovat keskimäärin termisiä (0,025 eV). Tällaisilla nopeuksilla neutronien absorboitumisen eli ns. neutronisieppauksen todennäköisyys on huomattava.

Neutronisieppauksessa väliaineen ydin $^A X$ absorboi neutronin ja muuttuu viritetyssä tilassa olevaksi naapuri-isotoopiksi $^{A+1} X^*$. Viritystila purkautuu välittömästi ytimen emittoimissa yhden tai useampia sille ominaisia gammakvantteja. Jos syntynyt isotooppi $^{A+1} X$ on radioaktiivinen, se hajotessaan emittoi mahdollisesti vielä lisää gammakvantteja ja/tai muita hiukkasia.

Neutronisieppauksen vaikutusala on kullekin isotoopille ominainen, esimerkiksi puun yleisimmille alkuaineille vedylle 0,3326 b, hiillelle 0,00353 b ja hapelle 0,00019 b ($b = \text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Koska vedyn vaikutusala on noin 100 kertaa hiiltä suurempi, voidaan vedyn määrää puussa määrittää myös mittaamalla termisten neutronien vuota. Tyypillisissä online-mittausjärjestelmissä puun kosteuden määrittäminen perustuu vedyn määrän mittaamiseen tällä tavalla.

Neutroniaktivaatiomenetelmällä voidaan mitata gammaspektroskopian keinoin eri aineiden ydinten suhteellista määrää näytteessä. Koska hiilen määrä puussa on lähes vakio ja vetypitoisuus taas kasvaa kosteuden kasvaessa, päästään kiinni kosteuspitoisuuteen tutkimalla vedyn ja hiilen suhdetta. Etuna aikaisempiin online-kosteudenmäärittämismenetelmiin on se, että neutroniaktivaatiolla saavutetut tulokset eivät ole riippuvaisia siitä, miten kosteus on puuhun jakautunut. Merkitystä ei siis ole sillä, onko kosteus puun pinnalla esimerkiksi lumena tai jäänä tai onko kosteus vapaata vettä vai kidevettä.

Suhteellisena mittauksena tulos riippuu vain vähän puun määrästä, laadusta, tiheydestä sekä veden olomuodosta. Näin ollen saadaan mitattua kattavasti keskimääräinen kosteus näytteessä. Neutroneiden avulla voidaan mitata myös kokopuuta, sillä neutronit läpäisevät hyvin materiaa. Poiketen monista muista kosteudenmittausmenetelmistä, neutroniaktivaatio soveltuu hyvin suurten näytteiden tutkimiseen.

Neutroniaktivaatio ratkaisee monta nykyisten kosteusmittausmenetelmien ongelmista. Sillä voidaan mitata suuria näytteitä ja kokopuuta sekä oikealla laitteistolla mittauksesta saadaan myös tarpeeksi nopea, jotta sitä voidaan käyttää online-mittauksena. Myös lumen ja jään aiheuttamat ongelmat poistuvat kun mitataan keskiarvoista kosteutta koko näytteessä.

Välittömiä neutroniaktivaatiogammoja ei ole aikaisemmin käytetty puun ominaisuuksien tutkimiseen. Myöskään suuria puunäytteitä ei olla tutkittu neutronimenetelmillä. Offline-mittauksia on tehty käyttäen hyväksi ydinreaktorissa tuotettua intensiivistä neutronivuota (vrt. VTT:n tutkimusreaktorisäteilytykset Otaniemessä). Näissä mittauksissa analysoitiin kuitenkin vain viivästyneitä neutroniaktivaatiogammoja yksittäisistä, kooltaan pienistä näytteistä reaktorin sijaintipaikalla [16].

Vaikka välittömien neutroniaktivaatiogammojen mittausta ei ole käytetty aikaisemmin puun tutkimiseen, on menetelmällä tutkittu monia muita aineita ja niiden ominaisuuksia. Esimerkiksi menetelmää on käytetty betonin [22], kotitalouksien likavesien [14] ja räjähteiden [8] analysointiin. Puun kosteuden mittaaminen välittömien gammakvanttien avulla omaa siten hyvät mahdollisuudet.

2 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko neutroniaktivaatiossa syntyviä vedyn ja hiilen välittömiä gammakvantteja mittaamalla määrittää puunäytteen kosteutta. Tavoitteena oli myös tutkia, soveltuuko mittaus online-mittaukseksi suurille puumäärille ja millä ehdoin kosteudenmittaus olisi mahdollista soveltaa teollisuusympäristöön. Alustavalla tasolla tutkittiin myös mittauksen säteilyturvallisuutta.

Tutkimus toteutettiin mittaamalla ensin kohtalaisen pieniä (noin 80 litraa) erikosteuksisia hakemääriä ja sitten suurempia määriä (noin 10 tonnia) kokopuuta. Näytteitä säteilytettiin ^{252}Cf -lähteellä tuotetuilla neutroneilla ja neutroniaktivaation myötä syntynyt gammasäteily kerättiin energiaspektriiksi. Saaduista spektreistä tutkittiin, voidaanko vedyn ja hiilen aiheuttamat välittömät neutroniaktivaatiogammat nähdä ja laskea kertyneestä spektristä.

Tavoitteena oli selvittää, onko vety/hiili-suhde mitattavissa ja nähdäänkö suhteessa muutosta kosteuden muuttuessa. Koska vetypitoisuus kasvaa kosteuden kasvaessa ja hiilipitoisuus pysyy vakiona, pitäisi vety/hiili-suhteessa näkyä kasvava trendi kosteuden kasvaessa. Tarkastelun kohteena olivat vedyn tuottama 2223 keV energian omaava aktivaatiogamma sekä hiilen tuottamat 1262 keV ja 3684 keV gammakvantit.

Mittausten tueksi suoritettiin simulaatioita MCNPX-ohjelmaa käyttäen. Kyseessä on simulaatiokoodi, jolla voidaan mallintaa neutronien, fotonien ja elektronien kulkeutumista väliaineessa ja vuorovaikutuksia aineessa. Kyseinen simulaatio-ohjelma on monipuolinen työkalu erilaisten neutronien sisältävien ongelmien simulointiin ja sen sovelluskohteet ovat lukemattomat.

Simulaatioiden avulla pyrittiin tässä tutkimuksessa optimoimaan ja suunnittelemaan käytännön mittauksissa tarvittavia mittaageometrioita. Simulaatioiden avulla pystyttiin myös tarkastelemaan, millaisella alueella näytteessä mitattavat aktivaatiogammakvantit syntyivät. Lisäksi suoritettiin arvioita mittauksen säteilyturvallisuudesta sekä tarkasteltiin online-mittauksiin vaadittavia reunaehtoja. Simuloiden saatuja tuloksia myös verrattiin mittaustuloksiin.

3 Neutroniaktivaatio

Neutroniaktivaatio perustuu neutronien ja aineen ytimien välisiin vuorovaikutuksiin. Neutronisieppausta seuraavat ytimen emittoimat karakteristiset gammakvantit mahdollistavat ytimen tunnistamisen gammaspektrin avulla. Neutroniaktivaatioanalyysi (NAA) voidaan suorittaa erilaisilla menetelmillä. Näillä on omat nimityksensä.

Tässä tutkimuksessa käsitellään välittömien aktivaatiogammakvanttien mitausta (PGNAA = Prompt Gamma Neutron Activation Analysis), jossa gammaspektriä kerätään samalla kun näytettä säteilytetään neutroneilla. On myös mahdollista tutkia viivästyneitä gammakvantteja (DGNAA = Delayed Gamma Neutron Activation Analysis), jolloin syntyvä gammasäteily mitataan vasta neutronisäteilytyksen jälkeen. Mikäli aktivointi tapahtuu nopeiden neutronien avulla, käytetään nimitystä FNAA (Fast Neutron Activation Analysis). Tässä menetelmässä alkuaineiden tunnistaminen tapahtuu neutronien epäelastisten sirontojen aiheuttamien gammakvanttien avulla. Muita analysointimenetelmiä ovat mm. INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) ja RNAA (Radiochemical Neutron Activation Analysis).

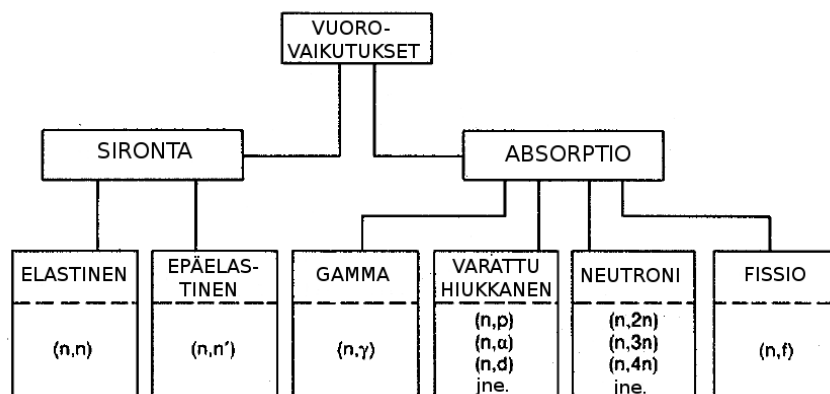
3.1 Neutronien vuorovaikutukset

Neutronit ovat neutraaleja hiukkasia joten ne eivät koe sähköisiä vuorovaikutuksia. Niiden suuren massan vuoksi vuorovaikutukset elektronien kanssa ovat merkityksettömiä. Näin ollen neutronit pääsevät tunkeutumaan atomin ytimen voimakenttään ja vuorovaikutukset tapahtuvat ydinten kanssa.

Neutronit vuorovaikuttavat aineen kanssa eri tavoin. Reaktiot voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, joita ovat sironta ja absorptio. Sironnat jakautuvat elastisiin ja epäelastisiin sirontoihin. Absorptioreaktioita taas luokitellaan lopputuloksen perusteella. Mahdollisia reaktiotuotteita ovat gammasäteily, varatut hiukkaset, neutronit ja kohdeytimen fissio. Joskus sieppauksen seurauksena voi olla useampia näistä. Kuvassa 1 on esitetty sirontojen ja absorptioreaktioiden tyypit. Kulloinkin vallitseva vuorovaikutustyyppi riippuu voimakkaasti neutronien energiasta.

Neutronit voidaan luokitella liike-energiansa perusteella erilaisiin luokkiin. Näitä jakoja on useita erilaisia, yksi esimerkki on esitetty taulukossa 1. Taulukkoon 1 on laskettu myös neutronien nopeudet kyseisillä energioilla. Näistä nähdään, että vaikka puhutaan esimerkiksi hitaista neutroneista, ovat neutronien nopeudet todellisuudessa vielä hyvin suuria.

Kun neutronin energia on suuri, ovat epäelastiset eli kimmottomat sironnat kaikkein yleisimpiä. Kimmottomassa sironnassa neutroni törmää ytimeen ja

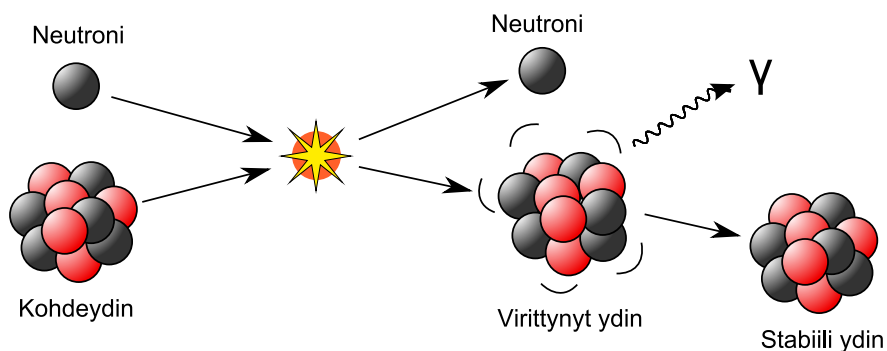


Kuva 1: Neutronin ja aineen väliset vuorovaikutukset. Yleisluokkia on kaksi, sironta ja absorptio. Nämä jakaantuvat useisiin erilaisiin vuorovaikutuksiin riippuen sirontan tyypistä tai absorptiossa emittoituvasta hiukkasesta tai fotonista. [27]

Taulukko 1: Neutronien luokittelu energian perusteella. [30]

Luokitus	Energia	Nopeus
erittäin nopeat neutronit	yli 10 MeV	43700 km/s
nopeat neutronit	0,2–10 MeV	6200–43700 km/s
keskinopeat neutronit	0,1–200 keV	140–6200 km/s
hitaat (epitermiset) neutronit	0,4–100 eV	8,7–140 km/s
termiset neutronit	0,003–0,4 eV	0,76–8,7 km/s
kylmät neutronit	alle 0,003 eV	alle 0,76 km/s

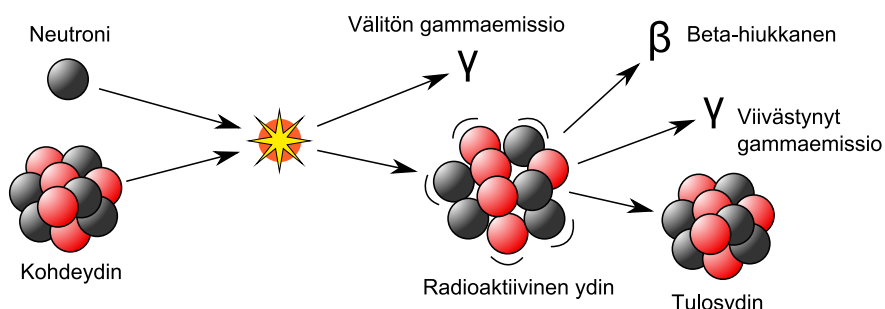
virittää sen luovuttaen osan energiastaan ytimen viritysenergiaksi. Ytimen viritystila purkautuu karakteristisena gammasäteilynä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Neutronin epäelastinen sironta ytimestä

Kun neutronin energia on pienempi kuin ytimen viritykseen tarvittava energia, ovat elastiset sironnat todennäköisin vuorovaikutusmuoto. Elastisessa sironnassa neutroni luovuttaa osan energiastaan ytimen liike-energiaksi. Usein ydin irtautuu molekyyllisidoksestaan ja kulkeutuu jonkin matkaa rekyyli-ionina.

Epäelastiset ja elastiset törmäykset ytimiin hidastavat neutroneja. Kun neutronien energia putoaa termiselle tasolle (0,025 eV), tulee neutronisieppaus mahdolliseksi. Neutronisieppauksessa ydin absorboi neutronin ja muuttuu viritystilassa olevaksi naapuri-isotoopikseen (kuva 3). Viritystila purkautuu ytimen emittoimissa karakteristisen välittömän gammakvantin. Tämän jälkeen ydin on usein edelleen radioaktiivinen ja voi emittoida viivästyneitä gammakvantteja ja/tai hiukkasia.



Kuva 3: Neutronisieppaus

Neutroniaktivaatioanalyysi perustuu neutronisieppauksessa syntyvien gammakvanttien analysointiin. Gammakvantit ovat karakteristisia isotoopeille, jo-

ten gamman energian avulla saadaan selville, mikä ydin neutronin sieppasi. Lisäksi gammakvanttien lukumäärä riippuu kyseisen alkuaineen määrästä näytteessä ja neutronisieppauksen vaikutusalasta. Neutroniaktivaatioanalyysi voi perustua joko välittömien gammojen (PGNAA) tai viivästyneiden gammojen (DGNAA) mittaukseen.

3.2 Neutroniaktivaatioanalyysi pienille ja suurille näytteille

INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) on neutroniaktivaatioon perustuva menetelmä, jossa säteilytetään hyvin pientä (luokkaa 100 mg) näytettä voimakkaalla termisten neutronien vuolla ja mitataan aktivaatiogammoja. Koska käytettävä näyte on pieni, saadaan koko näyte katettua homogeenisellä neutronivuolla ja aktivaatiogammojen määrä on suoraan verrannollinen kunkin aineen pitoisuuteen. [13] Syntyneet gammat on myös helppo mitata, sillä vaimentumista ei tapahdu ja pieni näyte on helppo ympäröidä ilmaisimilla. INAA-menetelmällä on mahdollista selvittää aineen absoluuttinen koostumus, ilman tarvetta suhteelliselle mittaukselle.

Mikäli näyte on niin pieni, että neutronien absorptio ja sironta voidaan jättää huomiotta, saadaan määritettyä halutun alkuaineen määrä näytteessä hyvin tarkasti. Mitattujen karakterististen aktivaatiogammojen lukumäärä on verrannollinen kyseisen aineen ydinten määrään näytteessä, neutronisieppauksen vaikutusalaan, käytettyyn säteilytysaikaan sekä neutronivuohon.

Jos käytössä on standardinäytteitä, joiden koostumus tunnetaan, verrataan mitattavaa näytettä standardinäytteeseen. Tällöin aineen pitoisuus näytteessä voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla

$$C_{\text{näyte}} = C_{\text{standardi}} \frac{W_{\text{standardi}}}{W_{\text{näyte}}} \frac{A_{\text{näyte}}}{A_{\text{standardi}}}, \quad (1)$$

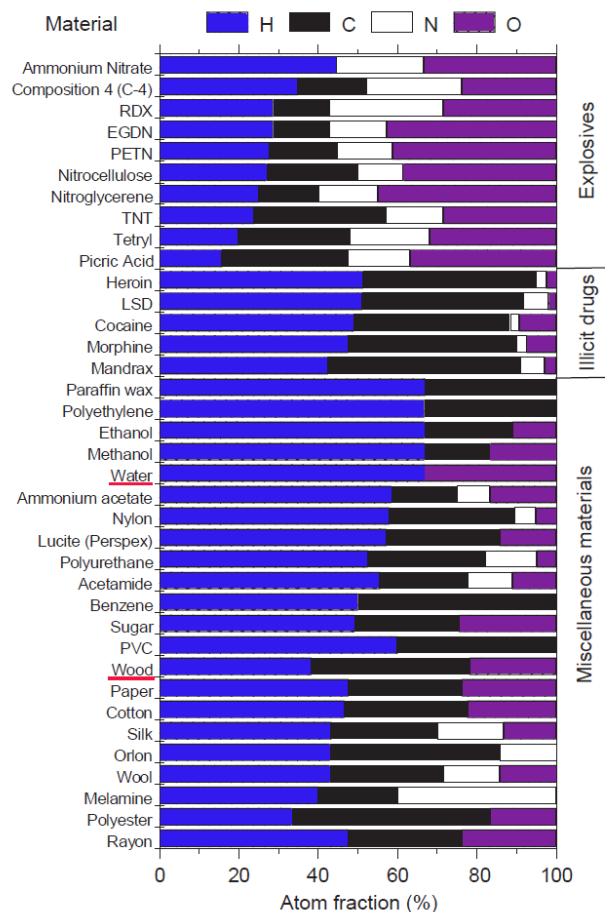
missä C on konsentraatio, W paino ja A on aktiivisuus [33].

INAA-menetelmä ei sovellu puun kosteuden mittaamiseen teollisuuden tarpeisiin. Kosteuden vaihdellessa eri osissa puuta, on tehokkaampaa mitata keskiarvoista kosteutta kuin monta kosteusnäytettä. Keskiarvoiseen mittaukseen ei alle 1 g kokoisilla näytteillä päästä.

Näyteeseen kasvaessa tilanne mutkistuu, sillä sekä neutronien että syntyneiden gammojen vaimentuminen pitää ottaa huomioon. Kun neutroniaktivaatiomenetelmää sovelletaan suuremmille näytteille, ei alkuainepitoisuuksien

absoluuttinen määrittäminen on enää mahdollista. Tällöin on turvaututtava suhteelliseen mittaukseen. Alkuaineiden pitoisuuksia suhteessa toisen alkuaineen pitoisuuteen on mahdollista määrittää suurestakin näytteestä. [1]

Neutroniaktivaatiomenetelmä on nykyisin laajasti käytössä myös suurten näytteiden tapauksessa. Sille on kehitetty monia sovelluksia, esimerkiksi öljy- ja kaivosteollisuuden käyttöön [35] [7]. Menetelmää käytetään myös räjähteiden ja huumeiden havaitsemiseen tavarakonteista [5]. Analyysi perustuu materiaalien erilaisiin alkuainekoostumuksiin ja niiden suhteellisiin osuuksiin näytteessä. Useimmiten kiinnostavat alkuaineet ovat esimerkiksi vety, hiili, typpi ja happi. Kuvassa 4 on esitetty useiden menetelmän kannalta kiinnostavien materiaalien alkuainejakaumaa. Kuvasta löytyvät myös puu ja vesi.



Kuva 4: Eri materiaalien vety-, hiili-, typpi- ja happijakaumat. [5]

Taulukossa 2 on esitetty suurimpia neutronisieppausvaikutusaloja yleisimmil-

le puun komponenteille. Tarkasteltaviksi neutroniaktivaatiogammoiksi tässä tutkimuksessa valikoituivat vedyn gammakvantti (2223 keV) ja hiilen kaksi alemman energian gammakvanttia (1262 keV ja 3684 keV). Hiilen 4945 keV:n aktivaatiogamma jää hapen epäelastisesta sironnasta johtuvan gammapiikin alle, joten se ei sovellu käyttöön, mikäli lähteestä tulevilla neutroneilla on energiaa yli 5 MeV. Mikäli neutronilähde tuottaa ainoastaan neutroneita, joiden energia on tätä pienempi, jää hapen epäelastinen sironta pois spektristä ja myös hiilen korkein gammaenergia vapautuu analyysiä varten. Esimerkiksi DD-reaktion (ks. luku 3.2) tuottamien neutronien energia (2,45 MeV) on sopiva.

Taulukko 2: Puussa esiintyvien alkuaineiden neutronisieppauksen vaikutusaloja ja näitä vastaavien vapautuneiden välittömien gammakvanttien energiat. [13]

Alkuaine	Gammaenergia [keV]	Vaikutusala [b]
^1H	2223.2	0.3326
^{12}C	1261.8	0.00124
^{12}C	3683.9	0.00122
^{12}C	4945.3	0.00261
^{16}O	870.7	0.000177
^{16}O	1087.8	0.000158
^{16}O	2184.4	0.000164

4 Neutronilähteet

Neutroneja voidaan tuottaa erilaisilla menetelmillä perinteisistä isotooppilähteistä aina täysimittaisiin ydinreaktoreihin. Parhaiten kuhunkin sovellukseen sopiva neutronilähde määräytyy vaadittavan neutronivuon ja neutronien energian perusteella. Myös lähteen hinnalla on merkitystä teollisissa sovelluksissa.

Isotooppilähteet ovat yksi edullisimmista tavoista tuottaa neutroneja. Niistä saatavat neutronivuot ovat kuitenkin kohtalaisen alhaisia. Ydinreaktorit tuottavat todella suuria neutronivoita, mutta ovat massiivisia ja kalliita. Reaktoreita ei käsitellä tässä tutkimuksessa tarkemmin. Ydinreaktoreiden ja isotooppilähteiden väliin, sekä neutronituotossa että laitteiston hinnassa, sijoittuvat nykyaikaiset neutronigeneraattorit.

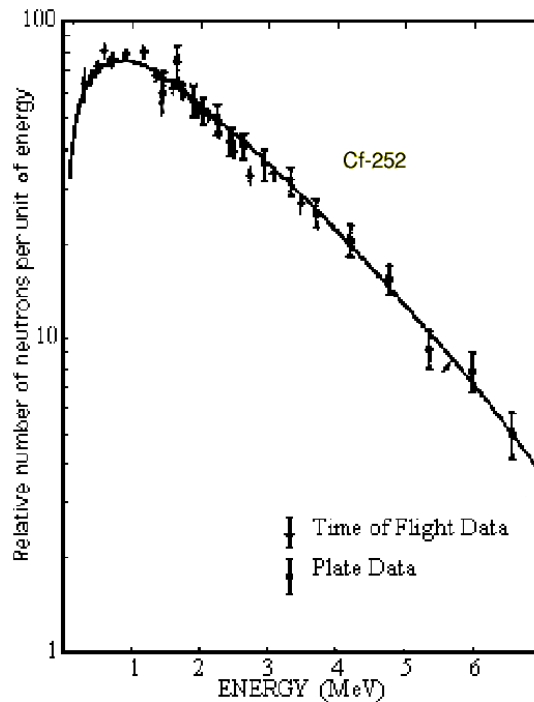
4.1 Isotooppilähteet

Online-mittauksissa on käytetty neutronilähteenä radioisotooppeihin perustuvia lähteitä, jotka tuottavat neutroneita joko spontaanilla fissiolla tai (γ, n) -ydinreaktiolla. Alfa-aktiivisiin radioisotooppeihin perustuvista neutronilähteistä yleisin on amerikumiumin isotooppi ^{241}Am , jota on sekoitettu berylliumiin $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ -reaktion aikaansaamiseksi (AmBe-lähde). Neutronien lisäksi reaktiossa vapautuu korkeaenergisiä gammoja, jotka voivat häiritä suoritettavaa mittausta.

Toinen yleinen radioisotooppi, jota käytetään neutronilähteenä, on kalifornium-252 (^{252}Cf). Se hajoaa 97 % alfahajoamisella ja 3 % spontaanilla fissiolla. Kaliforniumista vapautuu fissioytimien lisäksi keskimäärin 3,8 neutronia fissiota kohden. Kaliforniumlähteet tuottavat jopa 2000 kertaa enemmän neutroneita kuin AmBe-lähteet, eikä niistä emittoitu häiritsevää suurienergistä gammasäteilyä. Siksi niitä käytetään monissa herkissä sovelluksissa.

Kaliforniumin tuottamilla neutroneilla on jatkuva energiaspektri, jota on havainnollistettu kuvassa 5. Neutronien energia piikittyy arvoon 0,7 MeV ja keskimääräinen energia on 2,14 MeV. Noin 7% neutroneista saa suuremman energian kuin 5 MeV. [4]

Aktiivisimpien ^{252}Cf -lähteiden neutronituotto on $10^7 - 10^9$ neutronia sekunnissa. Tämä on kuitenkin liian vähän nopeaan online-mittaukseen etenkin, kun ^{252}Cf :n puoliintumisaika on vain 2,65 vuotta. Parhaassakin tapauksessa lähde joudutaan uusimaan kohtalaisen usein. Voimakkaasti radioaktiivisen lähteen käsittely, varastointi ja suojaaminen on lisäksi hyvin hankalaa ja aiheuttaa suuria haasteita säteilyturvallisuuden kannalta.



Kuva 5: Kalifornium-252 tuottama neutronispektri [4]

4.2 Neutronigeneraattorit

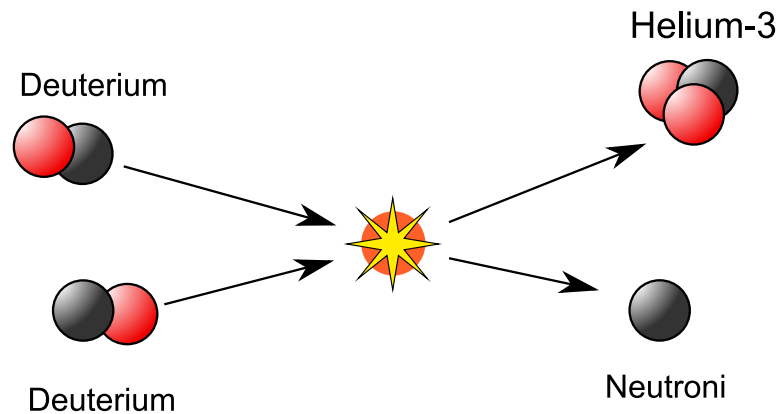
Neutroneja voidaan tuottaa myös pienillä hiukkaskiihdyttimillä, neutronigeneraattoreilla. Näissä neutronituotto perustuu useimmiten vedyn isotooppien ydinreaktioihin. Neutronien tuottoon vedyn isotooppien avulla on kolme mahdollista reaktiota: DD-, DT- ja TT-reaktiot. Reaktiot ja niiden tuottamien neutronien energiat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Neutronituottoreaktiot vedyn isotoopeille.

Reaktio	Neutronien energia
$d + {}^2\text{H} \longrightarrow n + {}^3\text{He}$ (DD)	2,5 MeV
$d + {}^3\text{H} \longrightarrow n + {}^4\text{He}$ (DT)	14,1 MeV
$t + {}^3\text{H} \longrightarrow 2n + {}^4\text{He}$ (TT)	0–9 MeV

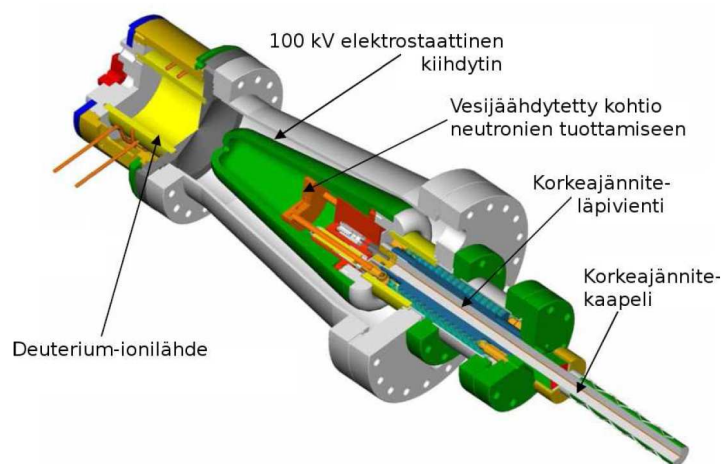
Kenttäkäyttöön soveltuvin reaktio on kahden deuterium-ytimen fuusio eli ns. DD-reaktio (deuterium D = vedyn isotooppi ${}^2\text{H}$), sillä radioaktiivisen tritiumin käyttö aiheuttaa lisävaatimuksia laitteistolle ja säteilyturvallisuuteen. DD-reaktio on esitetty kuvassa 6. Reaktio synnyttää lähes monoenergisiiä 2,45 MeV:n neutroneja sekä 3-heliumia. Mikäli sovellus vaatii jatkuvan ener-

gipsektrin neutroneita, käytetään TT-reaktioon perustuvaa generaattoria. [17]



Kuva 6: Kaaviokuva DD-reaktiosta

Neutronigeneraattorien etu isotooppilähteisiin verrattuna on suuri neutronituotto, jopa 10^{11} neutronia sekunnissa. Neutronien monoenergisyys voi myös olla sovellusta helpottava tekijä. Neutronigeneraattorin säteilyturvallisuutta isotooppilähteisiin verrattuna parantaa mahdollisuus kytkeä generaattori pois päältä, kun sitä ei käytetä. [9]



Kuva 7: Neutronigeneraattorin rakenne [18]

Neutronigeneraattori koostuu ionilähteestä, kiihdytysosasta ja kohtiosta. Esimerkki generaattorin rakenteesta on kuvassa 7. Ionilähde ionisoi deuteriumkaasua muodostaakseen intensiivisen tyypillisesti muutaman milliampeerin ionisuihkun, joka ekstraktoidaan ionilähteestä ja kiihdytetään 100–200 kV

jännitteellä titaanikohtioon. Osa ionisuihkun deuteriumista reagoi kohtioon implantoitujen deuterium-ytimien kanssa tuottaen neutroneita. Deuteriumionit, jotka eivät reagoi kohtion ydinten kanssa, jäävät kohtioon. Näin kohtiossa on aina riittävä määrä deuteriumia neutronituottoon. Tällaista ionisuihkulla latautuvaa kohtiota kutsutaan itselatautuvaksi kohtioksi. Itselatautuva kohtio pidentää neutronigeneraattorin käyttöikää moninkertaiseksi. [17]

Nykyiset neutronigeneraattorit ovat hyvin kompakteja laitteita ja vaativat vain vähän ulkopuolisia laitteita. Toimiakseen generaattori tarvitsee kuitenkin tyhjiöpumppauksen, korkeajännitelähteen ionisuihkun kiihdyttämiseksi, RF-teholähteen sekä impedanssimuuntimen ionilähdettä varten. [17]

5 Gammasäteilyn ilmaisimista

Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, eli luonteeltaan samanlaista aaltoliikettä kuin näkyvä valo. Säteilyn aallonpituus on kuitenkin huomattavasti pienempi ja energia siten moninkertaisesti suurempi kuin näkyvällä valolla. Gammasäteilyä syntyy virittyneen ytimen viritystilan purkautuessa. Ytimen viritystila voi syntyä esimerkiksi neutronisieppauksen seurauksena.

Gammasäteily vaimenee väliaineessa erilaisten vuorovaikutusmekanismien myötä. Tärkeimmät vuorovaikutusmuodot ovat valosähköinen ilmiö, Comptonin sironna ja parinmuodostus. Säteilyn vaimeneminen on eksponentiaalista ja noudattaa Beer-Lambertin yhtälöä

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 e^{-\mu \rho d}, \quad (2)$$

missä I_0 on fotonien alkuperäinen intensiteetti, d väliainekerroksen paksuus ja I fotonien intensiteetti väliainekerroksen läpäisemisen jälkeen, μ on lineaarinen vaimennuskerroin [m^{-1}], $\mu \rho$ on massavaimennuskerroin [m^2/kg] ja ρ on väliaineen tiheys [kg/m^3]. Puoliintumispaksuudeksi kutsutaan sitä väliainekerroksen paksuutta, jonka läpi kuljettuaan säteilyn intensiteetti puolittuu, eli

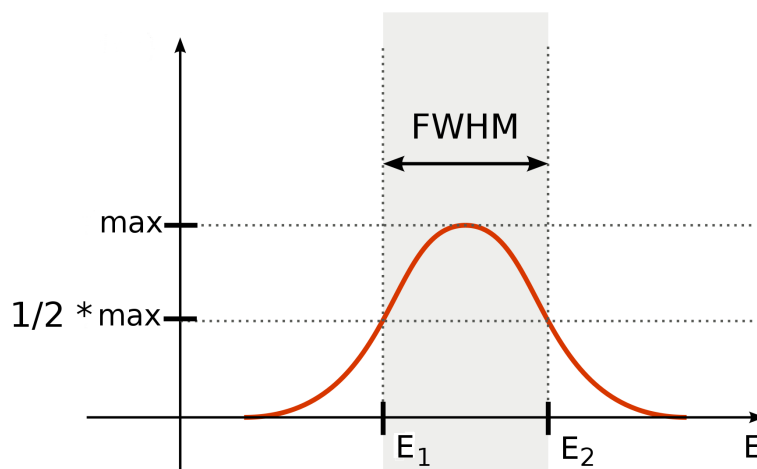
$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{\mu \rho}. \quad (3)$$

Gammasäteilyn puoliintumispaksuuksia ja vaimentumista puumateriaalissa, tarkemmin sanottuna hakkeessa, on tarkasteltu luvun 7.3 taulukossa 15. Puoliintumispaksuudet ovat kymmeniä senttimetrejä yli 1 MeV gammaenergioille, joten aktivaatiogammat pääsevät kohtalaisesti kulkeutumaan puun läpi.

5.1 Puolijohdeilmaisimet

Jotta neutroniaktivaatiossa syntynyt gammasäteily voidaan kokeellisesti havaita ja analysoida, tarvitaan säteilyn ilmaisimet. Tarkkaa energianerotuskykyä vaativiin sovelluksiin on käytännöllistä valita hyvän energioresoluution omaava puolijohdeilmaisimet.

Puoliarvoleveys (FWHM= Full Width at Half Maximum) on suure, jota käytetään kuvaamaan ilmaisimen energianerotuskykyä. Puoliarvoleveys määritellään piikin leveytenä kohdalla, jossa korkeus on puolet maksimista. Tätä on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8: Puoliarvoveveyden määrittäminen.

Gammasäteilyn ilmaisimien havaitsemistehokkuutta kuvataan yleisesti suurella suhteellinen tehokkuus. Se määritellään vertaamalla tehokkuutta standardin $76 \cdot 76 \text{ mm}^2$ ($3'' \times 3''$) NaI(Tl)-ilmaisimen tehokkuuteen 25 senttimetrin etäisyydellä olevan ^{60}Co -pistelähteen 1332,5 keV säteilylle. Tehokkaimpien germaniumilmaisimien suhteellinen tehokkuus on yli 150 prosenttia. [31]

Yleisimmät puolijohdeilmaisinmateriaalit ovat pii ja germanium. Taulukossa 4 on esitetty näiden ominaisuuksia. Järjestysluku, tiheys ja kidekoko vaikuttavat havaitsemistehokkuuteen, sillä mitä tiheämpää aine on ja mitä suurempia kiteitä siitä voidaan valmistaa, sitä tehokkaammin se pysäyttää myös suurienergisiiä gammoja. Kun kehitetään sovellusta, jossa havaittavan gammasäteilyn energia on useita megaelektronivolteja, korostuu ilmaisimen hyvä havaitsemistehokkuus. Pii-ilmaisimet eivät pienen kidekokonsa vuoksi ole hyödyllisiä MeV-luokan gammaspektroskopiassa.

Taulukko 4: Puolijohdemateriaalien tärkeimpiä ominaisuuksia gammaspektrometriassa.

Alkuaine	Järjestysluku (Z)	Tiheys [g/cm^3]	Yleinen kidekoko
Si	14	2,33	< 1 cm
Ge	32	5,323	5-10 cm

Puolijohdeilmaisimien käytännössä estosuuntaan kytketty diodi, jossa p- ja n-tyyppien puolijohde on kytketty yhteen tyhjennysalueen saavuttamiseksi. Kun liitoksen yli kytketään estosuuntainen korkeajännite, kasvaa tyhjennysalue

massiiviseksi, jopa koko kiteen kokoiseksi. Kun tälle tyhjennysalueelle osuu gammakvantti, se synnyttää elektroni-aukkopareja. Syntyneiden varauksenkuljettajien määrä on verrannollinen tyhjennysalueelle osuneen fotonin energiaan. Nämä varauksenkuljettajat keräytyvät diodin kentässä elektrodeille ja näin saadaan kerättyä virtapulssi.

Puolijohdeilmaisimesta saatava pulssi on heikko, joten se vaatii vahvistuksen esivahvistimella ja lineaarivahvistimella. Esivahvistin on usein kytketty ilmaisimeen kiinteästi. Vahvistuksen jälkeen pulssit analysoidaan tarkoituksenmukaisesti. Useimmiten muodostetaan energispektri, jota voidaan analysoida tietokoneohjelmilla.

Luonnollisesta lämpöliikkeestä aiheutuvat termiset varauksenkuljettajat aiheuttavat kohinaa puolijohdeita käytettäessä. Tätä voidaan eliminoida jäähdyttämällä ilmaisinta esimerkiksi nestetyypellä. Nestetyypen käytössä on kuitenkin omat vaaransa ja ongelmansa. Teollisiin sovelluksiin onkin nykypäivänä tarjolla myös sähköisiä jäähdytysjärjestelmiä.

Neutronisovelluksissa on tärkeää muistaa suojata puolijohdeilmaisinta liialta nopeiden neutronien kuormalta, sillä nopeat neutronit aiheuttavat vaurioita puolijohdekiteessä. Vauriot näkyvät gammaspektrissä piikkeihin muodostuvana häntänä. Piikit siis levenevät eli ilmaisimen energioresoluutio huononee neutronivaurioiden myötä.

Neutronivauriot on mahdollista poistaa ilmaisinkiteestä lämmittämällä kideitä noin 100° C lämpötilaan. Aika, joka kide tulee olla lämmitettynä, riippuu ilmaisintyyppin lisäksi neutronivaurioiden laajuudesta ja vaihtelee tunteista useisiin vuorokausiin. [24] Neutronit alkavat huonontaa ilmaisimen energioresoluutiota, kun nopeiden neutronien kokonaisuus on luokkaa 10^9 – 10^{10} neutronia/cm² [20]. Ilmaisimet eivät yleensä kärsi lämmityksestä, joten neutronivauriot voidaan poistaa useita kertoja ilmaisimen eliniän aikana.

5.2 Uudet tuikemateriaalit puolijohdeiden haastajina

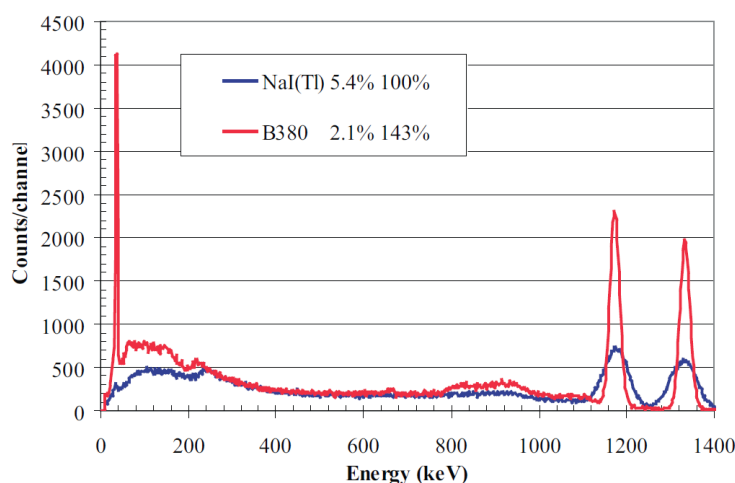
Perinteiset tuikemateriaalit (NaI, BGO) eivät ole pystyneet kilpailemaan puolijohdeiden kanssa energioresoluution puolesta. Sitä vastoin useiden tuikemateriaalien suuri tiheys ja kiteiden suuri koko tuovat mukanaan suuremman havaitsemistehokkuuden. Erityisesti korkeilla gammaenergioilla tämä ero korostuu.

Viime vuosina tuikemateriaalit ovat kehittyneet merkittävästi. Uudenlaisilla materiaaleilla, kuten LaBr₃(Ce), voidaan päästä tuikemateriaaleille ennennäkemättömän hyvään energioresoluution. Suhteellinen energioresoluutio myös paranee energian kasvaessa.

Taulukossa 5 on esitelty uusien ja vanhojen tuikeaineiden ominaisuuksia [11]. Valontuotto tulisi olla mahdollisimman suuri, jotta signaali saadaan talteen. Tuikahduksen sammumisaika taas tulisi olla mahdollisimman lyhyt, jotta ilmaisain voisi vastaanottaa mahdollisimman paljon fotoneja menemättä tukkoon.

Taulukko 5: Tuikeaineiden ominaisuuksia. BrillanCe[®] on Saint Gobain Crystalsin tuotemerkki (LaBr₃(Ce))-tuikeaineelle. [11] [28]

Tuikeaine	Tiheys [g/cm ³]	Valontuotto [γ /keV]	Sammumisaika (ns)
NaI(Tl)	3,67	41	230
BGO	7,1	9	300
LSO	7,4	26	40
BrillanCe [®] 380	5,29	63	16
LaCl ₃ (Ce)	5,07	70	16
LaI ₃ (Ce)	5,6	90	6–140



Kuva 9: Koboltti-60 spektri mitattuna 3'' × 3'' NaI(Tl)-ilmaisimella ja 3'' × 3'' BrillanCe[®] 380 (LaBr₃(Ce)) -ilmaisimella. Ilmaisimien suhteelliset tehokkuudet ovat 100 % natriumjodidille ja 143 % BrillanCelle. Piikkien puoliarvoleveys on natriumjodidilla mitattuna 5,4 % ja BrillanCen 2,1 %. [28]

Tuikemateriaalien valttina on myös edullisuus. Ne ovat huomattavasti puolijohdeilmaisimia edullisempia, eivätkä ne myöskään kaipaa jäähdytystä. Energiarésoluution parantuessa uusien materiaalien myötä, alkavat tuikeilmaisimet olla varteenotettavia kilpailijoita puolijohdeilmaisimille myös energiaherkissä sovelluksissa. Kuvassa 9 on esitetty ⁶⁰Co-lähteen gammaspektri mitattu-

na NaI(Tl)-ilmaisimella ja uudella LaBr₃(Ce)-ilmaisimella. Uuden ilmaisimen energianerotuskyky on huomattavasti parempi.

LaBr₃(Ce)-ilmaisimien ei kuitenkaan tuo merkittävää parannusta havaitsemistehokkuuteen verrattuna puolijohdeilmaisimeen, sillä sen tiheys on lähes sama kuin germaniumin. Uusi ilmaisimateriaali voittaa kuitenkin natriumjodidin tiheydessä ja tehokkuudessa. Kidekokoa kasvattamalla voidaan tehokkuutta lisätä. BrillanCe[®]-ilmaisimia ei kuitenkaan ole toistaiseksi saatavissa suurempaa kidekokoa kuin 3" × 3".

6 Simulaatio-ohjelma MCNPX

Tämän luvun pääasiallisena kirjallisuuslähteenä on D. Pelowitzin MCNPX User's Manual [25]. Muut lähde-tekstet on merkitty erikseen.

Tutkimuksessa tehtiin käytännön mittausten tueksi ja suunnittelun avuksi simulaatioita MCNPX-koodilla. MCNPX (Monte Carlo N-Particle transport code, versio X) on Monte Carlo -menetelmään perustuva ohjelmakoodi, jolla voidaan simuloida neutronien, fotonien ja elektronien kulkeutumista väliaineessa ja vuorovaikutuksia aineen kanssa. Monte Carlo on satunnaislukuihin perustuva menetelmä, joka hyödyntää todennäköisyyslaskentaa ja tilastotiedettä. Ohjelma on kehitetty Los Alamos National Laboratoryssa ja se on käytössä maailmanlaajuisesti.

Ohjelma toimii siten, että se ottaa neutronin ja arpoo sille satunnaisen lähtösuunnan. Käyttäen tunnettuja fysiikan lakeja ja ohjelman sisältämien datakirjastojen todennäköisyyksiä eri väliaineiden vuorovaikutuksille, ohjelma "arpoo" missä ja millainen vuorovaikutus tapahtuu. Neutronia seurataan niin kauan, kunnes se katoaa esimerkiksi sieppauksen seurauksena. Katoamiseen voivat johtaa myös neutronin kulkeutuminen epäkiinnostavalle alueelle geometriassa tai sen energian putoaminen alle leikkausrajan.

Kun alkuperäinen neutroni on kadonnut, seuraa ohjelma vuorovaikutuksissa syntyneiden hiukkasten ja fotonien kulkua aloittaen viimeisimmästä syntyneestä hiukkasesta tai fotonista. Kun nämä sekundäärihiukkaset katoavat, on kierros suoritettu ja siirrytään seuraavaan neutroniin. Vaiheita toistamalla saadaan hiukkasten ja fotonien keskimääräiset elinkaaret selvitettyä. Tallentamalla haluttu data simulaatiosta päästään tarkastelemaan näitä ilmiöitä.

Koodi voidaan asettaa laskemaan kulkeutumista useilla eri tavoilla: pelkät neutronit, fotonit tai elektronit, yhdistetty neutronien ja fotonien kulkeutuminen, jossa fotonit ovat syntyneet neutronien ja aineen välisissä vuorovaikutuksissa, fotonien synnyttämien elektronien kulkeutuminen, elektronien synnyttämien fotonien kulkeutuminen tai neutroneiden synnyttämien fotonien kulkeutuminen ja näiden fotonien aiheuttamien elektronien kulkeutuminen.

Simulaatiot ovat mahdollisia laajalla energia-alueella. Neutroneja voidaan simuloida energiavälillä 10^{-11} –20 MeV kaikille isotoopeille ja jopa 150 MeV asti osalle isotoopeista. Fotonien energia voi olla 1 keV – 100 GeV ja elektronien energia välillä 1 keV – 1 GeV. Laajat energiaskaalat mahdollistavat koodin hyödyntämisen moniin erilaisiin tarkoituksiin. MCNP-koodia on hyödynnetty esimerkiksi ydinreaktoreiden suunnittelussa [12] ja monien lääketieteellisten sovellusten suunnittelussa, kuten sädehoitoon kuuluvat boorineutronikaappaushoito (BNCT) [19][6], protoniterapia [32] ja tyköhoito [10]. Myös ydinvoii-

malaitosten turvallisuutta ja poikkeustilanteita voidaan simuloida ohjelmalla.

Ohjelmaa käytetään luomalla input-tiedosto, johon kirjataan ohjelman vaatimassa muodossa kaikki oleellinen tieto simulaation suorittamiseksi. Tiedosto ajetaan sitten ohjelman läpi. Input-tiedostossa määritellään esimerkiksi simulaatiogeometria, käytetyt materiaalit, lähteen (neutroni-, fotoni- tai elektronilähde) sijainti sekä lähteen laatu. Input-tiedostossa määritellään myös, mitä tietoja simulaatiosta halutaan kerätä (tally) ja kuinka monta hiukkasta simuloidaan. Liittessä A on esitetty esimerkki simulaatioissa käytetyistä input-tiedostoista.

6.1 Datakirjastot

MCNP-koodi käyttää vaikutusaloille ja muille tarvittaville parametreille laajoja datakirjastoja. Pääasiallisesti ohjelman tiedot ovat peräisin seuraavista lähteistä: Evaluated Nuclear Data File (ENDF), Advanced Computational Technology Initiative (ACTI), Evaluated Nuclear Data Library (ENDL), Evaluated Photon Data Library (EPDL), Activation Library (ACTL) sekä Nuclear Physics (T-16) Group.

MCNP-koodin sisältämät datataulukot voidaan jakaa yhdeksään luokkaan. Nämä ovat: 1) jatkuvaenergiset neutronien vuorovaikutukset, 2) diskreetit neutronivuorovaikutukset, 3) jatkuvaenergiset fotoatomaariset vuorovaikutukset, 4) jatkuvaenergiset fotodydinvuorovaikutukset, 5) neutronien dosimetriset vaikutusalat, 6) neutroneiden $S(\alpha, \beta)$ terminen data, 7) moniryhmäiset neutronit, pariutuneet neutroni/fotoni ja varatut hiukkaset, jotka vaikuttavat neutroneilta, 8) moniryhmäiset fotonit ja 9) elektronien vuorovaikutukset.

Fotoatomaarisille vuorovaikutuksille ja elektroneille tarvitaan yksi alkuaine-
taulukko, joka pätee saman alkuaineen kaikille isotoopeille. Neutronien vuorovaikutukset ja fotodydinreaktiot taas ovat riippuvaisia ytimen tarkasta koostumuksesta, joten jokaiselle isotoopille on oma taulukkonsa. Datataulukot kattavat ydinreaktiot, jotka aiheutuvat neutronien vuorovaikutuksista, neutronien indusoimista fotoneista, fotonien vuorovaikutuksista, neutroniaktivaatiosta sekä termisestä hiukkassironnasta.

Neutronivuorovaikutustaulukoita on tarjolla yhteensä yli 836 kappaletta noin sadalle eri isotoopille ja alkuaineelle. Yhtä isotooppia varten on olemassa useampia taulukoita, sillä taulukoiden tiedot ovat tuloksia erilaisista arvionneista tai arvot ovat määritetty esimerkiksi tietylle lämpötilavälille. Käyttäjä pystyy itse määrittelemään, minkä taulukon arvoja haluaa simulaatiossaan käyttää. Taulukoita päivitetään ohjelmaan, kun uutta tutkimustietoa ilmestyy, joten niiden määrä kasvaa.

Fotonien vuorovaikutustaulukot kattavat kaikki alkuaineet järjestyslukuvälillä $Z = 1-100$. Vuorovaikutustaulukkojen avulla MCNP pystyy ottamaan laskuissa huomioon koherentin sekä epäkoherentin sironnan, parinmuodosituksen sekä valosähköisen absorption, johon liittyy mahdollisesti fluoresoiva emissio. Elektronit eivät olleet oleellisia tässä tutkimuksessa, joten niiden tarkempi käsittely jätetään tässä huomiotta. Datakirjastot sisältävät myös paljon informaatiota fissiosta, mutta nämäkään tiedot eivät ole oleellisia tämän tutkimuksen kannalta.

Käytetyt datakirjastot määritellään esimerkiksi materiaalivalintojen kautta. Simulaatiossa käytettävät materiaalit merkitään input-tiedostoon ns. *ZAID*-koodin avulla. *ZAID*-koodi sisältää informaation aineen järjestysluvusta Z , massaluvusta A sekä *ID*-tunnisteen, jolla määritellään kyseisen aineen simuloinnissa käytettävä datakirjasto.

Ohjelmalla on mahdollista simuloida myös asioita, joihin ei ole taulukoitua mittaustietoa olemassa. Tällöin ohjelma käyttää fysikaalisia malleja asioiden laskemisessa.

6.2 Geometrian luominen

Simulaatiogeometria on käyttäjän määrittämä 3-ulotteinen kokoonpano eri materiaaleista geometrisissä soluissa, joita rajoittavat pinnat. Solut määritellään leikkausten, yhdisteiden ja komplementtien avulla alueista, joita pinnat rajaavat. Pinnat määritellään antamalla ohjelmalle kertoimet pintayhtälöihin. MCNPX sisältää myös "macrobody"-toiminnon, jonka avulla on mahdollista mallintaa peruskappaleita, kuten palloja, laatikoita ja sylintereitä. Näitä voidaan yhdistellä samoin kuin yksittäisiä pintojakin käyttäen joukko-opin operaattoreita.

MCNP-ohjelman geometrian mallinnus on yleisempää kuin monissa muissa mallinnusohjelmissa. Sen lisäksi, että käyttäjä voi yhdistellä monia valmiiksi määritettyjä kappaleita, on mahdollista myös luoda itse halutunmuodoisia alueita. Ohjelmalla voidaan siis simuloida hyvin monenmuotoisia kappaleita.

Simulaatiogeometrian luominen alkaa origon valinnalla. Tämä valinta kannattaa tehdä huolella, jotta kappaleiden sijoittelu olisi mahdollisimman yksinkertaista. Ohjelma käyttää karteesisista koordinaatistoa. Käyttäjä voi määrittää koordinaattiakselit haluamallaan tavalla, mutta suositeltavaa olisi käyttää oikeakätistä koordinaatistoa.

MCNP seuraa hiukkasia geometrian lävitse laskien käyttäjän määrittämien rajoittavien pintojen ja seurattavan hiukkasen radan leikkauspisteitä ja määrittää

näin lyhimmän etäisyyden leikkauspisteeseen. Mikäli hiukkasen vapaa matka, eli etäisyys seuraavaan törmäykseen, on suurempi kuin etäisyys seuraavaan pintaan, siirtyy hiukkanen seuraavaan soluun, jossa hiukkasen seuraaminen jatkuu.

Input-tiedosto aloitetaan määrittelemällä solut simuloitavista kappaleista. Jokainen solu kuvataan solunumerolla, materiaalinumerolla sekä materiaalin tiheydellä. Materiaalien määrittely tapahtuu input-tiedoston loppuvaiheessa ZAID-koodien avulla. Solu on leikkaus, yhdiste tai komplementti tiedostossa määriteltävistä pinnoista.

Pintoja toteutettaessa tulee päättää, halutaanko luoda kappaleet pintojen vai "macrobodyjen" avulla. Simulaatioita toteutettiin aluksi pintojen avulla, mutta kun luodut geometriat muuttuivat monimutkaisemmiksi, siirryttiin macrobodyjen käyttöön. Pintoja käytettäessä esimerkiksi kuution simuloimiseksi tulee input-tiedostoon luoda kuusi pintaa (kuusi riviä koodia) ja kuutio muodostetaan näiden pintojen sopivalla leikkauksella. Macrobodyn luominen on yksinkertaisempaa ja kuution luominen onnistuu yhdellä rivillä, jossa annetaan ohjelmalle kappaleen muoto (kuution tapauksessa koodi rpp) sekä jokaisen sivun alkamis- ja päättymiskoordinaatit.

Kappaleiden luomisen jälkeen ohjelmalle kerrotaan, mitkä ovat merkityksellisiä hiukkasia kyseisessä simulaatioissa. Kaikissa tehdyissä simulaatioissa tarkasteltiin sekä neutroneja että fotoneja. Simulaatiomoodin valitsemisen jälkeen annetaan jokaiselle solulle erikseen simuloitavien hiukkasten tärkeys solussa. Tärkeys 1 mahdollistaa hiukkasten seuraamisen, kun taas tärkeys 0 kadottaa hiukkaset niiden saapuessa kyseiseen soluun.

Ohjelma tarkastaa geometrian virheitä automaattisesti, eikä simulaation käynnistys onnistu puutteellisella geometrialla. Geometria on syytä aina luoda ja tarkastaa huolella, jotta simulaatiolla mitattaisiin haluttua suuretta. Geometrian tarkastamisen avuksi voi käyttää esimerkiksi ohjelman piirtotoimintoa, jolla voidaan tarkastella tuotettua geometriaa eri suunnista.

Input-tiedostoon tulee antaa informaatio lähteen tyypistä (neutroni-/fotoni-/elektronilähde), tuottamasta energiasta ja lähteen sijainnista. Yksinkertaisinta on käyttää pistemäistä lähdettä, mutta lähde on myös esimerkiksi mahdollista laajentaa jonkin simulaatioissa olevan pinnan kokoiseksi. Tehdyissä simulaatioissa käytettiin pistemäistä lähdettä, sillä todellinen säteilylähde on hyvin pieni verrattuna näytteen kokoon.

Ohjelmalla on mahdollista muokata myös lähteestä emittoituvien hiukkasten/fotonien kulmajakaumaa. Tämän tutkimuksen simulaatioissa käytettiin isotrooppista jakaumaa, eli lähde lähettää neutronit tasaisesti koko avaruus-

kulmaan. Tämä oli tilanne myös todellisen lähteen tapauksessa.

Tässä tutkimuksessa lähde oli aina neutronilähde. Simulaatioita tehtiin pääasiallisesti ^{252}Cf -lähteellä, jolloin lähteellä oli luvussa 4.1 olevan kuvan 5 kaltainen energiaspektri. Joitakin simulaatioita tehtiin myös käyttäen DD-generaattorin tuottamia neutroneja, jolloin lähteestä emittoituvat neutronit olivat monoenergisiä (2,45 MeV).

6.3 Kerättävä informaatio

Käyttäjä voi määrittää MCNP-ohjelman laskemaan eri asioita erilaisilla laskureilla (tally). Mitattavia suureita ovat esimerkiksi hiukkasvirta ja hiukkasvuo sekä energiajättö. Mitatut suureet on normitettu lähtöhiukasta kohden, mikäli käyttäjä ei toisin määrittele. Ohjelma on hyvin monipuolinen ja laaja mahdollistaen jälleen hyödyntämisen hyvinkin erilaisiin sovelluksiin.

Taulukko 6: MCNP-koodin standardilaskurit ja niiden merkitys

Laskurin numero	Laskettava suure	Yksikkö
F1	virta pinnan yli	hiukkasta
F2	vuo pinnan yli	hiukkasta/cm ²
F4	vuo solun yli	hiukkasta/cm ²
F5	vuo piste- tai rengasilmäimessä	hiukkasta/cm ²
F6	energiajättö	MeV/g
F7	fissioenergiajättö	MeV/g
F8	pulssin korkeus	pulssia

Ohjelmassa on standardina seitsemän erilaista laskuria. Näihin sisältyy seitsemän neutroni-, kuusi ftoni- ja neljä elektronilaskuria. Näitä on käyttäjän vielä mahdollista modifioida eri tavoin. Taulukossa 6 on esitetty standardilaskurien merkitys. Näiden fysikaalinen merkitys ja yksiköt on esitetty taulukossa 7 ja käytettyjen symbolien selitykset taulukossa 8. Standardilaskurien lisäksi MCNP-koodi sisältää yhden erityisen laskurityypin ”verkkolaskurin” (mesh tally). Tämä laskuri mahdollistaa laskennan myös simulaatiogeometriasta riippumattomassa verkossa, eli käytännössä missä tahansa pisteessä geometriaa riippumatta geometrian pinnoista ja soluista.

Yleistettynä voidaan sanoa, että MCNP-koodilla on mahdollista kerätä informaatiota mistä tahansa ominaisuuksista, jotka on mahdollista esittää muodossa

$$C = \int \phi(E)f(E)dE. \quad (4)$$

Taulukko 7: MCNP-koodin laskurien fysikaaliset merkitykset

Fysikaalinen merkitys		
F1	W	$J = \int dE \int dt \int dA \int d\Omega \hat{\Omega} \cdot \hat{n} \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F2	$\frac{W}{ \mu A}$	$\bar{\phi}_S = \frac{1}{A} \int dE \int dt \int dA \int d\Omega \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F4	$W \frac{T_l}{V}$	$\bar{\phi}_V = \frac{1}{V} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F5	$\frac{W \cdot p(\hat{\Omega}_p) e^{-\lambda}}{R^2}$	$\phi_P = \int dE \int dt \int d\Omega \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F6	$WT_l \sigma_t(E) H(E) \frac{\rho_a}{m}$	$H_t = \frac{\rho_a}{m} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \sigma_t(E) H(E) \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F7	$WT_l \sigma_f(E) Q \frac{\rho_a}{m}$	$H_f = \frac{\rho_a}{m} Q \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \sigma_f(E) \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$
F8	W_C biniin E_D	pulssia

Taulukko 8: Taulukossa 7 käytettyjen symbolien selitykset

W	hiukkasen paino
W_C	kollektiivinen paino
$\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t$	hiukkasen paikka- ja suuntavektorit [cm], energia [MeV], aika [10^8 s]
μ	$\Omega \cdot \hat{n}$
A, V	pinta-ala [cm^2] ja tilavuus [cm^3]
T_l	polun pituus [cm]
$p(\hat{\Omega}_p)$	todenäköisyystiheysfunktio sironnalle Ω_p suunnassa kohti pisteilmaisinta
λ	vapaiden matkojen lukumäärä hiukkasen sijainnista ilmaisimeen
R	lähteen etäisyys ilmaisimesta
$\sigma_t(E)$	mikroskooppinen kokonaisvaikutusala [barn]
$\sigma_f(E)$	mikroskooppinen fissiovaikutusala [barn]
$H(E)$	törmäyslämmitys [MeV/törmäys]
E_D	kokonaisenergiajättö ilmaisimeen
ρ_a	atomitiheys [atomia/barn-cm]
ρ_g	massatiheys [g/cm^3]
m	solun massa [g]
Q	fission Q-arvo [MeV]
ψ	kulmavuo [hiukkasta/ $\text{cm}^2/\text{sh}/\text{MeV}/\text{sterad}$]
J	kokonaisvirta pinnan yli
$\bar{\phi}_S$	keskimääräinen vuo pinnalla
$\bar{\phi}_V$	keskimääräinen vuo solussa
ϕ_P	vuo pisteessä
\vec{r}_P	piste, jossa \vec{r}_P on määritelty
H_t	kokonaisenergiajättö soluun [MeV/g]
H_f	kokonaisfissioenergiajättö soluun [MeV/g]

Tässä $\phi(E)$ on energiasta riippuva vuo ja $f(E)$ on summa tai tulo vaikutusala-kirjastoista löytyvistä ominaisuuksista tai vastefunktio, jonka käyttäjä määrit-telee.

Suoritetuissa simulaatioissa mitattiin neutronien ja fotonien vuota pinto-jen tai ilmaisinsolun läpi, fotonien energiajättöä ilmaisinkiteeseen ja (n,γ) -reaktioiden esiintymistiheyttä geometrian eri osissa.

6.4 Simulaation luotettavuus

Ohjelma antaa kerätylle informaatiolle suhteellisen virheen R . Jokaiselle las-ketulle spektrin energiavälille annetaan oma virheensä. Suhteellinen virhe ker-too simulaation luotettavuudesta taulukon 9 mukaisesti. Suhteellinen virhe oli suoritetuissa simulaatioissa luokkaa 0,001–0,12. Jokaisessa simulaatiospektris-sä oli energiavälejä, joiden virhe oli tätä suurempi, mutta tarkasteltujen piik-kien virheet olivat kuitenkin luotettavalla tasolla.

Taulukko 9: Suhteellisen virheen R suuruuden vaikutus simulaation luotetta-vuuteen

R	Luotettavuus
0,5–1,0	ei luotettava
0,2–0,5	kyseenalainen
0,1–0,2	suuntaa-antava
< 0,10	yleensä luotettava
< 0,05	yleensä luotettava pistedetektoreille

Hiukkasmäärän kasvattaminen pienentää yleensä energiavälin virhettä kerät-tävän statistiikan kasvaessa ja parantaa näin simulaation tulosten luotetta-vuutta. Samalla kuitenkin kasvaa myös simulaation kesto. Tässä tutkimuk-sessa tehtiin simulaatioita, joissa simuloitujen hiukkasten määrä vaihteli välil-lä $(1-200) \cdot 10^6$. Hiukkasmäärää varioitiin kussakin tilanteessa tarpeeksi suu-reksi, jotta simulaation tulokset saatiin luotettavalle tasolle. Simulaation kes-to riippuu paitsi hiukkasmäärästä, myös simuloitavasta geometriasta ja sen koosta, sekä tietysti käytössä olevan tietokoneen laskentatehosta. Tässä tutki-muksessa yhden simulaation kesto vaihteli muutamasta tunnista noin 10 päi-vään, riippuen mitä tarkasteltiin ja kuinka tarkkoja tuloksia haluttiin.

7 Hakemittaukset

Kesällä 2008 tehtiin ensimmäiset mittaukset neutroniaktivaatiomenetelmää hyödyntäen. Tarkastelun kohteena oli pieniä määriä (n. 80 l) erikosteuksisia selluhakenäytteitä. Mittauksia suunniteltiin ja optimoitiin simulaatioin sekä simulaatioiden ja mittausten tuloksia verrattiin toisiinsa.

7.1 Simulaatiot

Simulaatioita tehtiin sekä ennen kokeellisia mittauksia, että kokeellisten mittausten jälkeen tulosten yhtenevyyden tarkistamiseksi. Ennen mittauksia tehtyjen simulaatioiden tarkoituksena oli suunnitella mittausasetelmaa ja ennakoita, saadaanko halutut vety- ja hiilipiikit näkyviin. Näissä alustavissa simulaatioissa käytettiin suurta kosteuden vaihteluväliä, jotta nähtäisiin, onko kosteusero havaittavissa spektreistä. Simuloidut kosteussuhteet olivat 0 % ja 100 %. Mittausten suorittamisen jälkeen tehtiin uudet simulaatiot, joissa korjattiin geometria ja näytteiden kosteudet käytetyn kaltaisiksi ja tarkistettiin saatiinko toistettua mittausten tulokset. Kosteussuhteet olivat näissä simulaatioissa 5,95 % ja 81,7 %. Tuloksia verrattiin mittaamalla saatuihin.

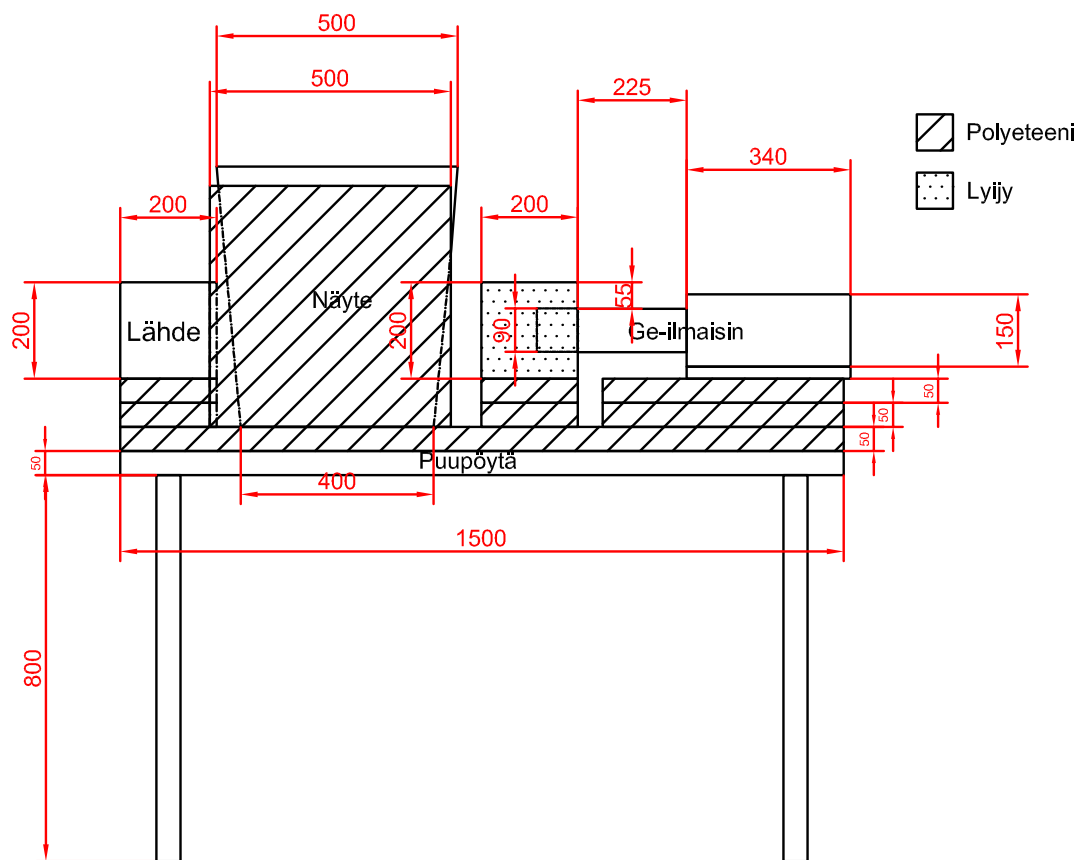
Simulaatioissa käytetyt puuaineksen alkuainepitoisuudet oli laskettu käyttäen Alakankaan teoksesta [3] löytyviä kuivan puumassan keskiarvoja. Muille aineille koostumuksen määrittämiseen on käytetty MCNP-koodia varten kehitettyä taulukkoteosta [34]. Puun koostumus simulaatioissa on esitetty taulukossa 10. Tiheydet on arvioitu Alakankaan teoksen [3] tietoja käyttäen täysin kuivalle hakkeelle. Suurempien kosteuksien tiheydet laskettiin veden lisäyksen mukaan.

Ensimmäisessä geometriassa (kuva 10) simulaatio oli rakennettu 5 cm paksuisen polyeteenilevyn päälle. Levyn leveys oli 75 cm ja pituus 150 cm. Levyn päällä oli 2 kappaletta $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$ polyeteenilevyjä, joiden päällä oli polyeteenisylinteri. Neutronilähde ^{252}Cf oli keskellä säteeltään 10 cm olevaa sylinteriä. Sylinterin korkeus oli 20 cm. Lähde oli siten ympäröity joka puolelta vähintään 10 cm paksuisella polyeteenillä.

Selluhake oli pakattu 80 litran muovisaaviin. Ympyräpohjaisen saavin alahalkaisija oli 40 cm ja ylähalkaisija 50 cm. Korkeus oli 54 cm. Hakesaavin edessä ja takana oli $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$ kokoiset polyeteenilevyt. Germaniumilmaisina oli sijoitettu puun oikealle puolelle 5 cm paksun ja 20 cm pitkän lyijykollimaattorin sisään. Kollimaattorin sisään jäi $10 \times 10 \text{ cm}^2$ kokoinen tila ilmaisimelle. Lyijyjen alla oli 11 cm polyeteeniä, jotta ilmaisimien nousisi sopivalle korkeudelle lähteeseen nähden. Germaniumkide oli ympyräpohjainen lieriö, jonka halkaisija oli 7,2 cm ja pituus 7,9 cm. Kiteen etäisyys puusta oli 12 cm.

Taulukko 10: Simulaatiossa käytetyn puuhakemallin alkuainekoostumukset eri kosteuksille. Kosteussuhteen ollessa 0 %, oli tiheys 170 kg/m^3 ja kosteussuhteelle 5,95 % tiheys oli 180 kg/m^3 . Kosteussuhteelle 81,7 % tiheys oli 309 kg/m^3 sekä suhteelle 100 % tiheys 340 kg/m^3 . Tiheydet on ilmoitettu hakekuutiota kohden. Alkuainepitoisuudet ovat massaprosentteja.

Alkuaine	0 % $\rho = 170 \text{ kg/m}^3$	5,95 % $\rho = 180 \text{ kg/m}^3$	81,7 % $\rho = 309 \text{ kg/m}^3$	100 % $\rho = 340 \text{ kg/m}^3$
C	52,5	49,5	23,9	26,2
H	6,1	6,3	8,4	8,6
O	40,5	43,2	62,2	64,7
N	0,4	0,38	0,22	0,2
S	0,02	0,019	0,011	0,01
Cl	0,0095	0,0090	0,0052	0,0048
P	0,03	0,028	0,017	0,015
K	0,15	0,14	0,08	0,075
Ca	0,28	0,26	0,15	0,14
Mg	0,05	0,047	0,028	0,025
Mn	0,030	0,028	0,016	0,015
Fe	0,0085	0,0080	0,0047	0,0043
Zn	0,003	0,0028	0,0017	0,0015
B	0,0006	0,00057	0,00033	0,0003
Cu	0,0004	0,00038	0,00022	0,0002



Kuva 10: Ensimmäinen mittausgeometria sivusta kuvattuna.

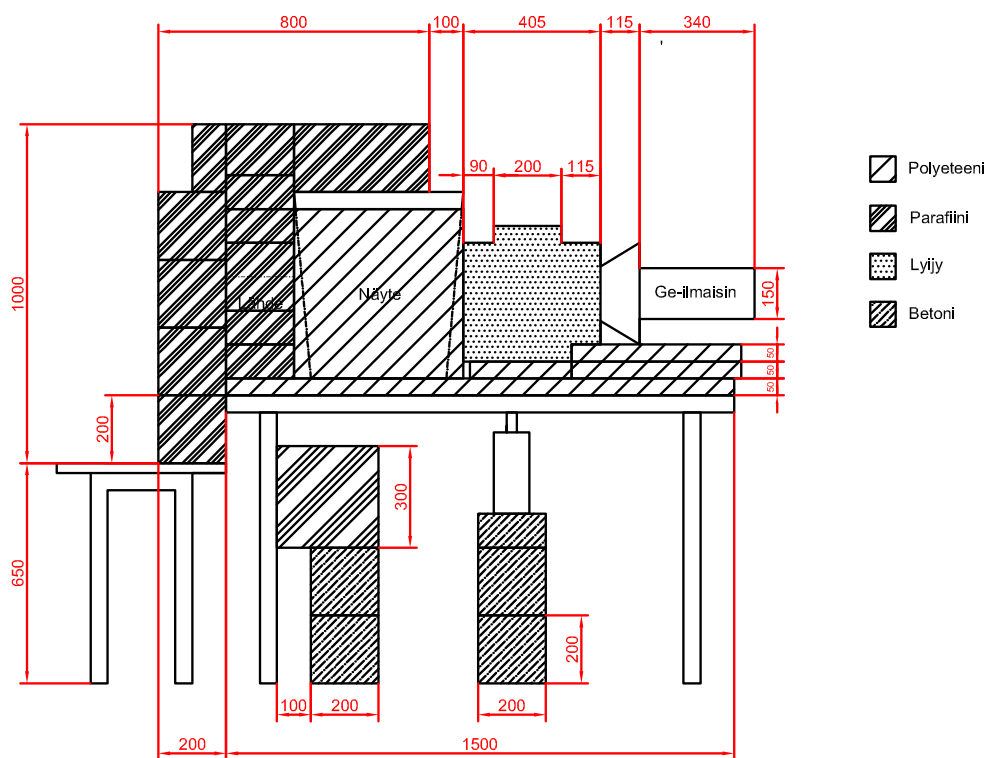
Kolmas geometria oli identtinen ensimmäisen kanssa muilta osin, paitsi ilmaisimena oli germaniumin sijasta NaI. NaI-kiteen säde oli 5,08 cm ja pituus 10,16 cm.

Toisessa geometriassa hakesaavi oli ympäröity parafiinilla, joka sisältää booraksia 20 %. Ilmaisimena oli BGO-kiteillä anticomptonsuojattu germanium (kts. kappale 7.2.2). Geometrian 2 simulaatioissa käytetyt koostumukset BGO:lle ja booratulle parafiinille on esitetty taulukossa 11. Parafiiniä oli 20 cm paksu, 70 cm korkea kerros puun vasemmalla puolella ja puun takana. Mittauspöydän alla oli myös betoniharkkoja ja parafiiniä. Kuvissa 11 ja 12 on havainnollistettu geometriaa. Puun etupuolella oli $50 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$ polyeteenilevy. Saavin päällä oli myös $40 \times 40 \times 20 \text{ cm}^3$ verran parafiiniä. Germaniumilmaisimen lisäksi simulaatiossa oli 10 kpl BGO-kiteitä. Nämä olivat halkaisijaltaan 1,6 cm ja pituudeltaan 15 cm. BGO-kiteet oli sijoitettu germaniumkiteen ympärille. Lyijykollimaattori oli tässä simulaatiossa suurempi kuin muissa, paksuutta sillä oli 10 cm ja pituutta 40 cm. Kollimaattorin sisälle jäi $20 \times 20 \text{ cm}^2$ kokoinen aukko, jossa ilmaisimet olivat. Simulaatiossa mitattiin gammojen energiajätöä germaniumiin ja BGO-kiteisiin.

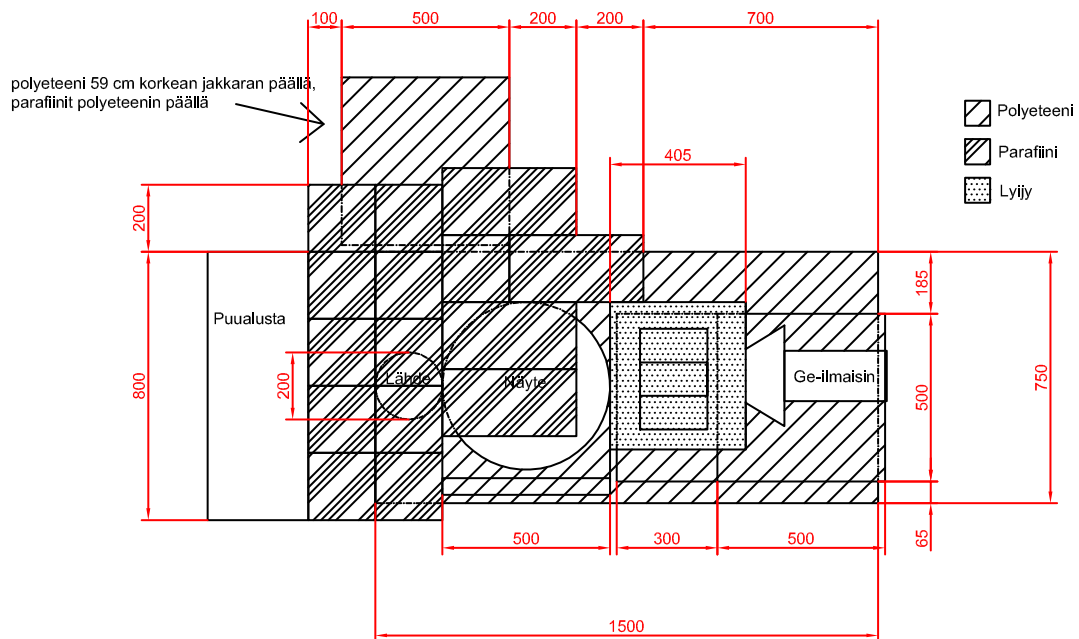
Taulukko 11: Simulaatioissa käytetyt booratun parafiinin ja BGO:n koostumukset atomiprosentteina

Alkuaine	Parafiini	BGO
^1H	63,4	
^{12}C	26,0	
^{16}O	7,91	63,2
^{11}B	1,86	
^{23}Na	0,93	
^{70}Ge		3,24
^{72}Ge		4,33
^{73}Ge		1,23
^{74}Ge		5,76
^{76}Ge		1,23
^{83}Bi		21,1

MCNPX:llä pystyy myös laskemaan tietyn reaktion lukumääriä suhteessa lähetettyyn neutroniin jossain geometrian solussa. Tulosten ja koodin toimivuuden varmistamiseksi tehtiin tällaiset simulaatiot eri kosteuksille ja katsottiin onko neutronisieppausmäärissä eroja. Tarkasteltavana reaktiona oli neutronisieppaus sekä vedylle että hiilelle. Oletuksena oli, että neutronisieppauksen määrä vedylle kasvaa, kun kosteuspitoisuus kasvaa. Tulokset (Taulukko 12) osoittivat koodin toimivan oikein.



Kuva 11: Toinen mittausgeometria kuvattuna sivusta.



Kuva 12: Toinen mittausgeometria kuvattuna ylhäältä.

Saaduista tuloksista laskettiin hiilen ja vedyn suhde sekä kuivassa että märässä puussa. Näitä verrattiin hiilen ja vedyn atomimäärillä painotettuihin vaikutusalsuhteisiin ja todettiin, että reaktiomäärissä on todella ero. Vedyn reaktiomäärät kasvavat suhteessa hiilen määriin kosteuden kasvaessa. Koska lukuarvot eivät vastaa toisiaan simuloitujen ja laskettujen H/C-suhteiden kohdalla, laskettiin vielä märemmän puun H/C-suhteen suhde kuivemman puun H/C-suhteeseen. Näin nähdään, että simuloiden saadut suhteet korreloivat hyvin laskettujen arvojen kanssa.

Taulukko 12: MCNPX:n avulla saadut tulokset hiilen ja vedyn reaktiomääristä eri kosteuksille. Taulukossa on myös laskettu reaktiomäärien suhteet.

	H/C (MCNPX)	H/C (teoreettinen lasku)
5,95%	149	100
81,7%	339	227
Märän ja kuivan suhde	MCNPX 2,275	Teoria 2,270

7.2 Mittaukset

Kokeelliset mittaukset suoritettiin Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen kiihdytinlaboratorion tiloissa ajalla 20.-30.5.2008, 11.-14.6.2008, 19.-25.6.2008 ja 10.-12.8.2008. Jokainen mittaussarja tehtiin hiukan erilaisella geometrialla ja osittain erilaisella laitteistolla.

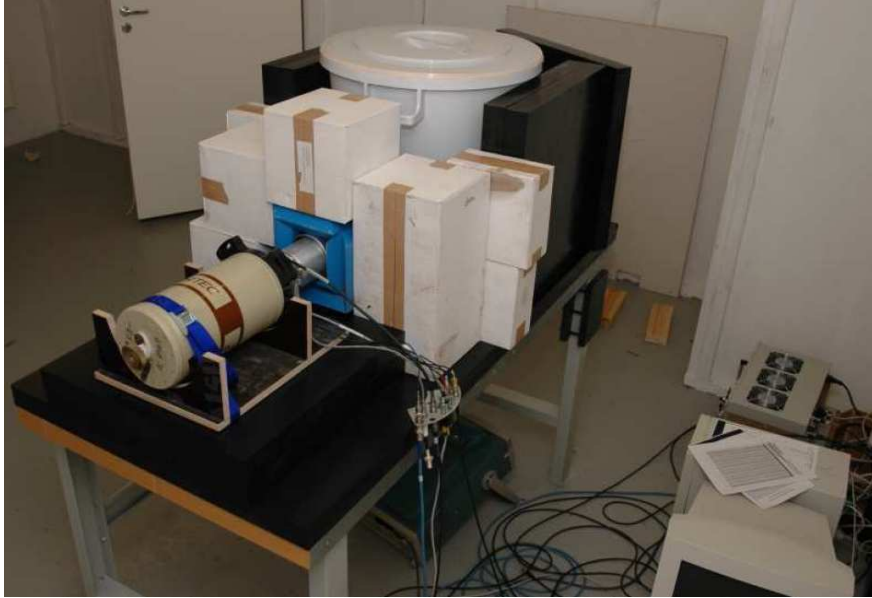
Mitattavana puuaineksena toimi selluhake, joka oli pakattu 80 litran muovisaaveihin. Haketta saatiin VTT:ltä kahta eri kosteutta, joista sitten tehtiin laajempi mittaussarja lisäämällä vettä osaan hakkeista. Näin saatiin neljä mitattavaa näytettä kosteusvälille 5 – 80 %. Alkuperäiset hakkeen kosteussuhteet olivat $(6 \pm 1) \%$ ja $(56,4 \pm 0,3) \%$. Nämä kosteudet oli määritetty kuivausmenetelmällä. Lisäämällä kuivempaan hakkeeseen vettä tuotettiin seos, jonka kosteussuhde oli $(29 \pm 3) \%$ ja vastaavasti lisäämällä vettä kostempaan hakkeeseen tuotettiin $(82 \pm 4) \%$ kostea hake. Haketta sisältävät muovisaavit peitettiin kansilla ja kannet tiivistettiin silikonilla, jotta kosteus ei päässyt haihtumaan.

7.2.1 Ensimmäinen mittausgeometria

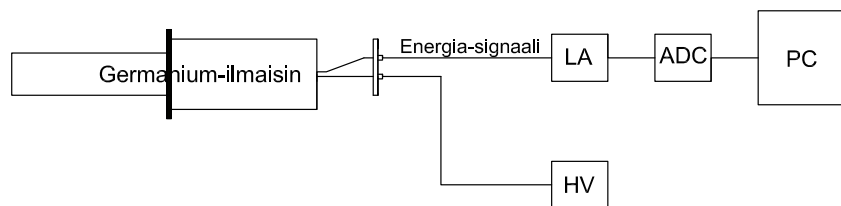
Mittauslaitteisto koottiin kiihdytinlaboratorion kellariin, huoneeseen, jonka keskelle asetettiin pöytä. Pöydän päälle oli kiinnitetty 5 cm paksuinen polyeteenilevy. Levyn tarkoituksena oli estää neutronien päätymistä lattialle, jotta lattiasta tulevat aktivaatiogammat eivät häiritsisi mittausta. Mittausgeometria on esitetty kaavamaisesti kuvassa 10 ja valokuvana kuvassa 13.

Pöydälle nostettiin hakkeen sisältävä saavi ja germaniumilmaisoin. Ilmaisoin oli HPGe-ilmaisoin (HP = high purity), jonka sylinterin-muotoisen kiteen pituus oli 7,9 cm ja halkaisija 7,6 cm. Ilmaisimen suhteellinen tehokkuus oli noin 80 %. Ilmaisimen suojattiin lyijykollimaattorilla, jotta se havaitsisi vain puun suunnasta tulevia gammoja, eikä esimerkiksi katosta tai seiniltä tulevia. Ilmaisimen toimintaan ja spektrinkeräykseen tarvittava elektroniikka koostui korkeajännitelähteestä, esivahvistimesta, lineaarivahvistimesta, AD-muuntimesta ja mitaustietokoneesta. Tietokoneessa oli GRAIN-spektrianalyysiohjelma. Käytetyn elektroniikan kaavio on esitetty kuvassa 14.

Neutronilähde ^{252}Cf sijoitettiin puuhakkeen viereen polyeteenistä valmistetussa säteilysuojassaan. Lähde tuotti $2 \cdot 10^6$ neutronia sekunnissa. Lähdettä ympäröi suojassa joka suunnalta 10 cm polyeteeniä, jotta neutronit termalisoituisivat ja säteilyvaara huoneessa pienenisi. Lähde ja sen suoja ovat kuvassa 15. Lähde on teräskapselin sisällä ja kapseliin on liitetty ruuvikierteellä muovitanko, jotta lähdettä voidaan käsitellä sormien altistumatta tarpeettoman suurelle säteilyannokselle. Lähde ja puuhaketta sisältävä saavi ympäröi-



Kuva 13: Ensimmäinen mittausgeometria hakkeelle tehdyssä mittausarjassa. Kuvassa etualalla germaniumilmaisain nestetyyppisäiliöineen. Siniset tiilet muodostavat lyijykollimaattorin ja valkoiset laatikot ovat boorattua parafiinia. Mustat levyt ovat polyeteeniä ja harmaa saavi on täytetty mitattavalla sel-luhakkeella. Neutronilähde on hakesaavin takana polyeteenisuojassaan.



Kuva 14: Ensimmäisessä mittauksessa käytetyn kytkennän kaavio. (LA = lineaarivahvistin, HV = korkeajännitelähde, ADC = analogidigitaalimuunnin ja PC = mittaustietokone)

tiin 5 cm paksuisilla polyeteenilevyillä neutronien termalisoitumisen tehostamiseksi.



Kuva 15: Mittauksissa käytetty ^{252}Cf -lähde vasemmalla. Lähde on suljettu teräskapseliin ja kapseliin on kiinnitetty muovitanko käsittelyn helpottamiseksi. Oikealla lähteen polyeteenistä valmistettu säteilysuoja.

Mittaukset aloitettiin 20.5.2008 energia- ja tehokkuuskalibraatioilla ^{60}Co -, Eu/Ba - ja ^{228}Th -lähteitä käyttäen. Tilassa tehtiin myös taustamittaus ilman säteilylähteitä. Näiden jälkeen mitattiin jokaista neljää erikosteuksista puunäytettä noin puoli vuorokautta.

7.2.2 Toinen mittausgeometria

Jo ensimmäisellä mittauskonfiguraatiolla saatiin vedyn ja hiilen piikit näkyviin spektreihin. Spektreissä oli myös häiritseviä piikkejä, joiden oletettiin johtuvan ilmaisimen germaniumista ja seinien kaliumista. Oletettiin, että neutronia karkaa liikaa seinille ja pääsee ilmaisimeen aiheuttaen näissä materiaaleissa aktivaatiota. Ilmiötä pyrittiin eliminoimaan lisäämällä enemmän lyijyä ilmaisimen ympärille. Samoin lisättiin myös parafiinia näytteen ja lähteen ympärille.

Lisäksi otettiin käyttöön germaniumilmaisimen kanssa käytettävä anticomptonsuoja, jonka tehtävä oli pienentää muualta, kuin puunäytteestä tulevaa taustaa merkittävästi. Anticomptonsuoja koostui kymmenestä BGO-kiteestä ja valomonistinputkesta. Kuvissa 11 ja 12 on näkyvissä toisen mittausgeometrian

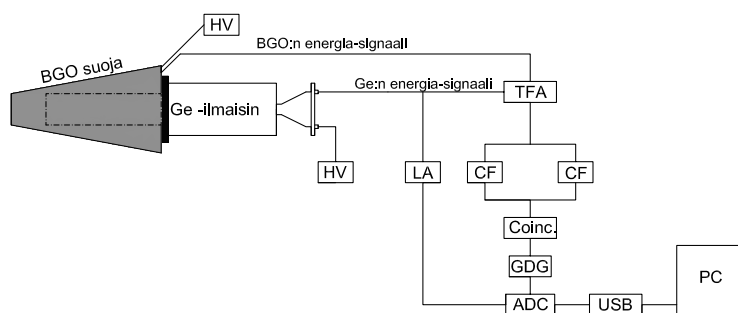


Kuva 16: Toinen mittausgeometria selluhakenäytteille. Laitteisto on kasattu pöydän päälle. Mustat levyt ovat polyeteeniä, siniset tiilet lyijyä ja valkoiset laatikot boorattua parafiinia. Hake on harmaassa muovisaavissa ja ilmaisim oikealla puolella lyijykollimaattorin sisällä. Mittausasetelma painoi niin paljon, että pöytää piti tukea alta päin tunkilla ja sementtitiilillä.

kaavakuva sivusta ja ylhäältä kuvattuna. Kuvassa 16 on valokuva mittauksesta.

Anticomptonsuojan lisääminen monimutkaisti käytettyä elektroniikkaa jonkin verran. Aikaisempien laitteiden lisäksi tarvittiin valomonistinputkien korkeajännitelähde, TFA-yksikkö (time fast amplifier), CF-yksikkö (constant fraction discriminator), koinsidenssiyksikkö ja viiveporttigeneraattori. TFA muutti ilmaisimista saadun signaalin nopeammaksi ja CF muodosti signaaleista kanttipulssseja. Tämän jälkeen kanttipulssit analysoitiin koinsidenssiyksikössä siten, että päällekkäin tulevat pulssit hylättiin ja vain eriaikaiset tapahtumat päästettiin eteenpäin. Säilyneet pulssit vietiin viiveportin kautta analogidigitaalimuuntimelle ja sieltä tietokoneeseen. Kytkentää on havainnollistettu kuvassa 17. Mittaukset aloitettiin 11.6.2008 kalibraatiolla.

Tämän jälkeen mitattiin äärikosteuksisten (6 % ja 82 %) hakkeiden neutroniaktiivatiogammoja noin vuorokauden ajan molempia.



Kuva 17: Kaavio toisessa mittausgeometriassa käytetyn elektroniikan kytkennöistä.

7.2.3 Kolmas mittausgeometria

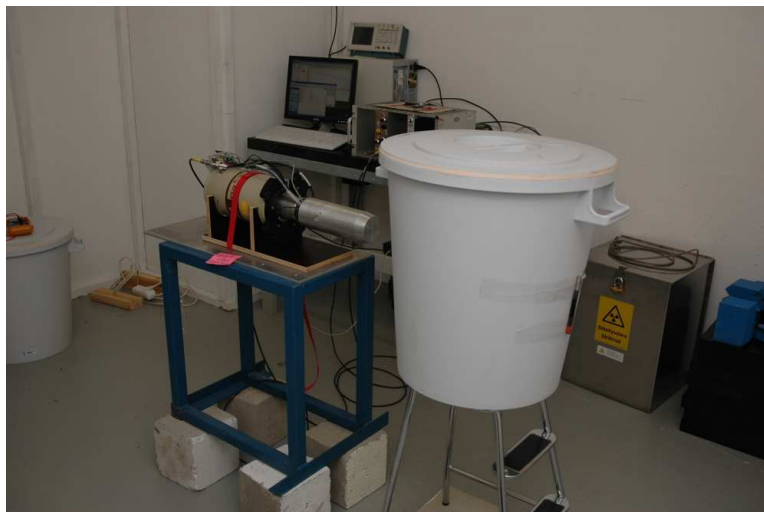
Kolmannessa mittauskonfiguraatiossa vaihdettiin Ge-ilmaisim NaI-tuiketilmaisimeen. Tarkoituksena oli testata, riittäisikö tavallisen NaI-kiteen energiareoluutio tämän sovelluksen tarpeisiin. Käytetyn natriumjodidin kidekoko oli 2" × 2". Asetelma oli hyvin samankaltainen, kuin ensimmäisessä mittausgeometriassa, vain ilmaisim vaihdettiin. Elektroniset kytkennät olivat myös vastaavat kuin mittausgeometriassa 1.

Energiakalibraatio tehtiin ^{60}Co - ja ^{137}Cs -lähteillä. Tämän lisäksi kalibraatioon otettiin mukaan vedyn neutroniaktiivatiopiikki. Tuiketilmaisimella mittasimme vain äärikosteudet, eli kosteussuhteet 6 % ja 82 %. Molempia kosteuksia mitattiin noin 3 vuorokautta riittävän tilastiatikan kerryttämiseksi.

7.2.4 Neljäs mittausgeometria

Neljäs mittausgeometria oli pelkistetty. Kaikki ylimääräiset muovit ja materiaalit oli poistettu tuottamasta ylimääräisiä pulsseja spektriin. Hakesaavi oli nostettu penkin päälle ja ilmaisin oli korokkeella lattiasta tulevan säteilyn pienentämiseksi. Lyijykollimaattoria ei käytetty ilmaisimen ympärillä, jotta vältettäisiin lyijyn tuottamat neutroniaktivaatiogammat. Kaliforniumlähde teipattiin kiinni hakesaavin kylkeen. Lähde oli siten ensimmäistä kertaa mittauksissa ilman polyeteenistä valmistettua säteilysuojaa.

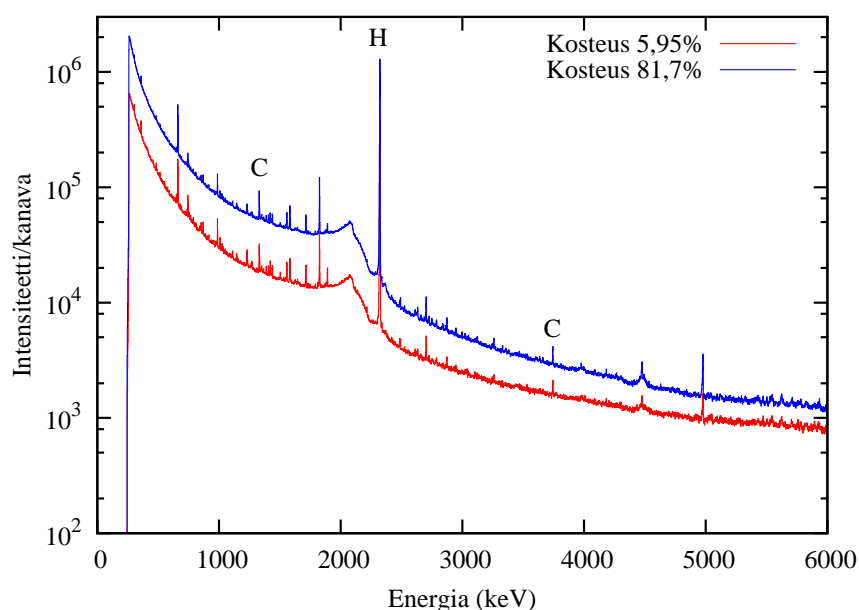
Ilmaisimen ja puusaavin välinen etäisyys oli noin 15 cm. Käytetty geometria on näkyvässä kuvassa 18. Ilmaisimena mittauksessa toimi germaniumilmaisimien samoilla oheislaitteilla ja kytkennöillä kuin ensimmäisissä mittauksissa. Yksinkertaistetussa geometriassa mitattiin vain äärikosteudet, kumpaakin noin vuorokausi.



Kuva 18: Neljännessä mittausgeometriasta oli poistettu kaikki ylimääräinen aines ja jätetty vain ilmaisin, puusaavi ja lähde. Lähde näkyy teipattuna kiinni puusaavin kylkeen.

7.3 Tulokset ja niiden tarkastelu

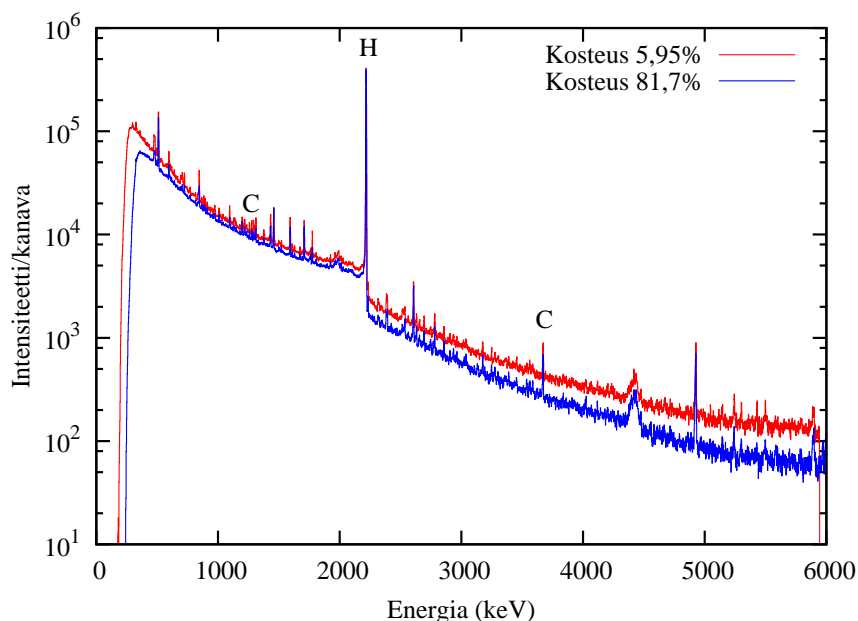
Kuvissa 19,20 ja 21 on esitetty geometrioiden 1–3 mittauksista saadut spektrit eri kosteussuhteille. Saatuja spektrejä vertaamalla näkee hyvin germaniumilmaisimen ja NaI-ilmaisimen väliset erot. Germaniumilmaisimella mitatuissa spektreissä on hyvä energiaresoluutio ja gammapiikit noudattavat hyvin Gaussista jakaumaa. Tuikeilmaisimella mitatusta spektristä ei voida havaita kuin vedyn aiheuttama piikki kunnolla, muuten spektrin muodot ovat hyvin laakeita.



Kuva 19: Germaniumilmaisimella mitatut gammaspektrit selluhakenäytteistä, kun näytteen kosteussuhteet olivat 6 % ja 82 %.

Germaniumilmaisimella mitattuihin vedyn ja hiilen neutroniaktivaatiopiikkeihin sovitettiin Gaussin jakauman mukaiset käyrät. Sovitus onnistui hyvin. Haastellisinta oli hiilen 3684 keV piikin sovittaminen, sillä kohdassa oli suhteellisen vähän statistiikkaa ja kohina oli suurta. Vähäinen statistiikka johtui siitä, että kyseinen gammaenergia on suuri käytettyyn ilmaisinkiteen kokoon nähden. Näin ollen kaikkia ilmaisimeen saapuvia hiilen neutroniaktivaatio-gammoja ei saatu pysäytettyä ilmaisimeen ja ne jättivät vain osan energiastaan ilmaisimeen aiheuttaen taustakohinaa.

Germanium- ja BGO-ilmaisimilla mitatussa spektrissä (kuva 20) huomataan antikoinssidenssikytkenän vaikutus spektriin verrattuna pelkällä germaniumilmaisimella saatuihin (kuva 19) tuloksiin. Vaikka antikoinssidenssikytken-



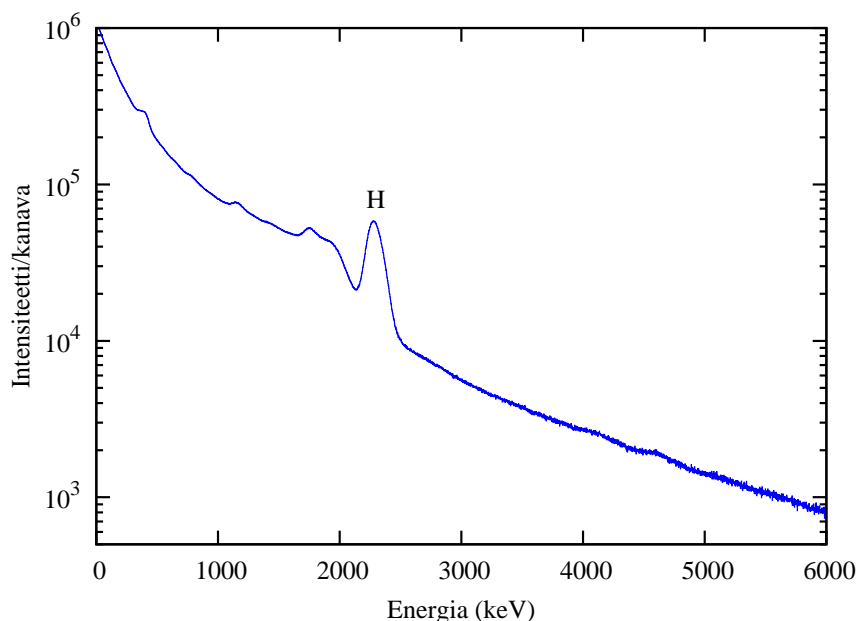
Kuva 20: Germaniumilmaisimella ja BGO-ilmaisimilla mitatut antikoincidensivähennetyt spektrit 6 % ja 82 % kosteille selluhakkeille.

nän mittausaika oli noin kaksi kertaa pitempi kuin ensimmäisen mittausgeometrian tapauksessa, on mitattujen pulssien lukumäärä pienempi. Pääasiallisesti kytkentä vähentää taustapulsseja, jolloin tarkasteltavat neutroniaktivaatiopiikit erottuvat paremmin spektristä.

Näiden mittaustulosten perusteella ei kuitenkaan voida varmasti sanoa, parantaisiko antikoincidenssikytkennän käyttö merkittävästi mittaustarkkuutta. Nyt tehdyissä mittauksissa mittausaika ei ollut molemmilla kytkennöillä sama, vaan BGO-avustettu mittaus kesti kaksi kertaa kauemmin kuin pelkällä germaniumilmaisimella. Tarkasteltavat neutroniaktivaatiopiikit olisivat siten saattaneet erottua yhtä hyvin pelkällä germaniumilmaisimella tehdyssä samanmittaisessa mittauksessa.

Koska merkittävää parannusta ei antikoincidenssikytkennästä havaittu, jätettiin sen soveltaminen jatkomittauksissa pois. Laitteisto on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempi kuin pelkän germaniumilmaisimen käyttö ja kun suunnitellaan teollista sovellusta, pyrkimys yksinkertaiseen laitteistoon on tarpeen.

NaI-ilmaisimella (kuva 21) mitatusta spektristä ei voida erottaa piikiksi kutsuttavia muotoja vetypiikin lisäksi. Pientä kaareutumista on nähtävissä vetypiikkiä korkeammilla energioilla, mutta gaussisen jakauman sovitus ei onnis-



Kuva 21: NaI-ilmaisimella saatu gammaspektri 6 % kosteasta selluhakkeesta.

tu näin laakeisiin muotoihin. Spektreistä ei näin ollen onnistuttu määrittämään hiilen piikkien pinta-aloja, joten varsinaista analyysiä ei voitu tehdä.

Käytössä ollut NaI-kide osoittautui liian pieneksi ja liian huonoksi energiare-soluutioltaan soveltuakseen tällaiseen mittaukseen. Suuremmalla kiteellä ha-vaitsemistehokkuus olisi suurempi, jonka ansiosta korkeamman energian pii-akit erottuisivat taustasta paremmin. Myös tuikemateriaalin vaihto uudempaan materiaaliin, esimerkiksi $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, parantaisi energiare-soluutiota merkittä-västi. Saattaa olla mahdollista, että tuikeilmaisinta voitaisiin käyttää lopulli-
sessa sovelluksessa puun ominaisuuksien mittaamiseen, vaikka tässä tapauk-
sessa se ei soveltunutkaan käyttöön.

Germaniumilmaisimella mitatuista spektreistä analysoitiin hiilen ja vedyn pii-
kit, tehtiin niihin sovitukset ja määritettiin pinta-alat. Koska mittaukset oli teh-
ty samalla ilmaisimella, jätettiin ilmaisimen tehokkuus huomioimatta ja las-
kettiin intensiteettien sijaan piikkien pinta-alat. Sitten pinta-aloja verrattiin toi-
siinsa, eli H/C-suhde määritettiin laskemalla

$$\frac{H}{C} = \frac{A_{\text{vetypiikki}}}{A_{\text{hiilipiikki}}}. \quad (5)$$

Germaniumilmaisimella tehdyistä mittauksista määritetyt vety-hiili-suhteet

on esitetty taulukossa 13. Tuloksista nähdään, että H/C-suhde kasvaa kosteuden kasvaessa, kun tarkastellaan hiilen 1262 keV aktivaatiogammaa, mutta suhde pienenee kun tarkasteltavana on hiilen 3684 keV gammaemissio.

Taulukko 13: Germaniumilmaisimella mitatuista gammaspektreistä analysoidut vety/hiili-suhteet erikosteuksisille selluhakkeille.

	6 %	29 %	56 %	82 %
H/C _{1262 keV}	157	174	200	233
H/C _{3684 keV}	675	756	652	599

Simulaatioiden tuloksille tehtiin vastaavanlainen tarkastelu piikkien pintaalojen suhteen. Taulukossa 14 on vertailtu simulaatioista saatuja H/C-suhteita kokeellisesti mitattuihin. Tässä taulukossa on käytetty vain hiilen 3684 keV aktivaatiogammaa, sillä simulaatioissa ei saatu hiilen 1262 keV piikkiä näkyviin taustasta.

Taulukko 14: Simulaatioista ja germaniumilmaisimella mitatuista saadut vety/hiili-suhteet äärikosteussuhteille.

	Kosteus 6 %		Kosteus 82 %	
	Simulaatio	Mittaus	Simulaatio	Mittaus
H/C _{3684 keV}	1190	675	907	599

Lukuarvot eivät täsmää simuloituissa ja mitatuissa H/C-suhteissa, sillä simulaation ilmainen on ideaalinen eikä todellisen ilmaisimen tehokkuutta ei ole huomioitu. Trendi on kuitenkin molemmissa sama: Vety/hiili-suhde pienenee kosteuden kasvaessa. Tämä oli yllättävä tulos, suhteen kun tulisi kasvaa kosteuden kasvaessa. Syytä käytökselle lähdettiin selvittämään.

Kun kosteuspitoisuus kasvaa, kasvaa puun tiheys ja näin ollen myös gammojen absorptio puuhun. Erityisesti pienillä gammaenergioilla tämä absorption kasvu on merkittävää. Taulukossa 4 on esitetty lineaariset vaimennuskertoimet puussa gammaenergian funktiona kosteuden ollessa 5,95 % ja 81,7 %. Puun koostumus on tässä tarkastelussa yksinkertaistettu käsittäen vain hiilen (52,7 m-%), hapen (40,8 m-%), vedyn (6,1 m-%) ja typen (0,4 m-%) komponentit. Absorptiokertoimet on laskettu National Institute of Standard and Technology:n taulukoiden perusteella. [23]

Jotta saadaan selville, kuinka paljon absorption kasvu vaikuttaa hiilen eri piikkeihin, lasketaan suhteellinen absorptio näille energioille puumassan paksuuden funktiona, eli määritetään säteilyn puoliintumispaksuudet. Tulokset on

esitetty taulukossa 15. Kiinnostava energia-alue on 1,25-3,5 MeV, jolla hiilen ja vedyn välittömien neutroniaktivaatiogammojen energiat sijaitsevat.

Taulukko 15: Vaimennuskertoimet ja puoliintumispaksuudet eri gammaenergioille kahdessa erikosteuksisessa puussa.

E [MeV]	Kosteussuhde 6 % $\rho = 180 \text{ kg/hake-m}^3$		Kosteussuhde 82 % $\rho = 309 \text{ kg/hake-m}^3$	
	μ/ρ [cm ² /g]	$d_{1/2}$ [cm]	μ/ρ [cm ² /g]	$d_{1/2}$ [cm]
1	0,06766	56,9	0,06894	32,6
1,25	0,06050	63,6	0,06164	36,4
1,5	0,05507	69,9	0,05610	40,0
2	0,04726	81,4	0,04816	46,6
3	0,03792	101,5	0,03866	58,0
4	0,03246	118,5	0,03312	67,8
5	0,02888	133,3	0,02948	76,1

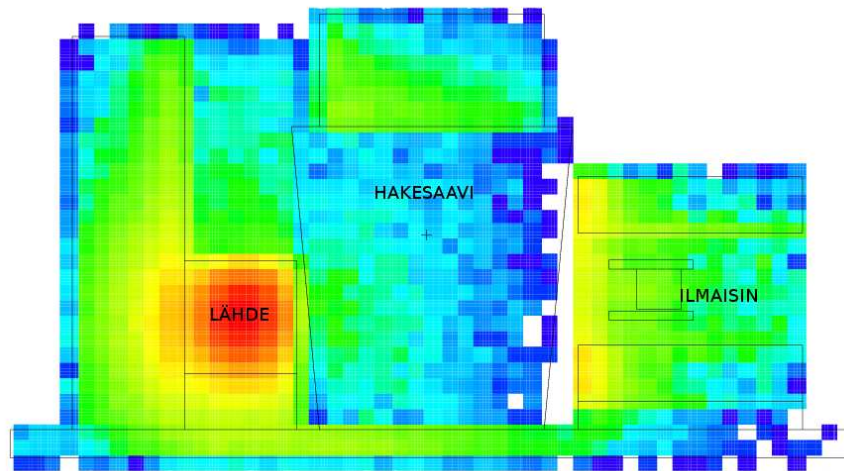
Hakenäytteen halkaisija oli maksimissaan 50 cm. Kuivemman hakkeen tapauksessa tarkasteltavien aktivaatiogammojen puoliintumispaksuus on yli 60 cm, joten yli puolet gammakvanteista pääsee näytteen läpi. Absorptio ei siten ole suuressa roolissa. Kosteammassa hakkeessa puoliintumispaksuus on kuitenkin pienempi (40 cm) kuin näytekoko ja ainakin yksi puoliintuminen voi tapahtua.

Ei mittausten eikä simulaatioiden tuloksissa nähty vety/hiili-suhteessa kasvavaa trendiä oletetun mukaisesti. Hiilen matalamman energian suhteessa oli havaittavissa hienoista kasvua kosteuden myötä, mutta korkeamman energian suhde ei vaikuttanut kasvavan. Syy löytyi lähteen suojana käytetystä polyeteenistä.

Virheen jäljille päästiin, kun tehtiin simulaatio, joka kartoitti missä osassa geometriaa gammat syntyvät. Tätä on havainnollistettu kuvassa 22. Havaittiin, että 95 % kaikista gammakvanteista syntyi jo lähteen polyeteenisuojassa ja vain hyvin pieni osa puussa. Mittauksen kohteena eivät siten olleet hakenäytteen tuottamat neutroniaktivaatiogammat, vaan polyeteenin tuottamat.

Lähteen suojassa syntyneet neutroniaktivaatiogammat syntyivät ilmaisimesta katsoen puunäytteen takana. Syntyneet gammakvantit kulkivat puunäytteen läpi ilmaisimeen ja ehtivät vaimentua sitä enemmän, mitä kostempaa puu oli ennen saapumistaan ilmaisimelle.

Matalamman energian gammat vaimentuvat voimakkaammin kuin korkeamman kosteuden kasvaessa. Siten hiilen 1262 keV aktivaatiogamma absorboituu



Kuva 22: Simulaatio gammojen synnystä mittausgeometriassa. Punaisessa ja keltaisessa alueessa syntyy yhteensä noin 95% kaikista gammoista. Mitä sinisempi alue, sitä vähemmän gammoja syntyy.

hakkeeseen enemmän kuin vedyn 2223 keV, ja H/C-suhde kasvaa. Korkeamman energian hiilen piikin kohdalla tilanne on päinvastainen vedyn gamma-kvanttien vaimentuessa enemmän kuin hiilen 3684 keV gammat. Tällöin hiilen aktivaatiogammoja pääsee enemmän ilmaisimeen kuin vedyn ja H/C-suhde pienenee.

Tämän vuoksi tehtiin vielä mittaus geometrialla 4. Geometriassa oli pyritty minimoimaan kaikki ylimääräinen vetyä ja hiiltä sisältävä materiaali, jotta ei tarkoituksellisesti tuotettaisi tutkittavia aktivaatiogammoja muualla kuin hakemateriaalissa. Mittauksessa kuitenkin havaittiin, että käytetty määrä puuainesta (80 l) ei ole tarpeeksi suuri hidastamaan riittävästi neutroneja termisiksi.

Suurin osa nopeista neutroneista vain läpäisee hakemassan absorboitumatta siihen. Näin aktivaatiogammoja syntyy hakkeessa vain vähän ja suurin osa mitatuista gammakvanteista oli peräisin jälleen muualta kuin näytteestä eli seinistä, katosta, lattiasta ja ilmaisimen materiaaleista. Puumassan täytyisi olla noin sadasta tuhanteen kertaa suurempi, jotta mittaus toimisi suunnitellusti. Tämä oli positiivinen suuntaus, sillä projektin tarkoituksena olikin suunnitella suuren kokoluokan puumassan kosteudenmittaukseen soveltuva laitteisto.

Kesän mittaukset olivat hyvin opettavaisia. Monien vaiheiden kautta löydettiin selitys järjestelmän käyttäytymiselle. Aluksi ongelmana oli neutronilähteen säteilysuoja ja termalisointiin käytetty muovi. Kun tämä korjattiin, huomattiin, että käytössä oleva puumassa ei riitä odotettujen tulosten saavutta-

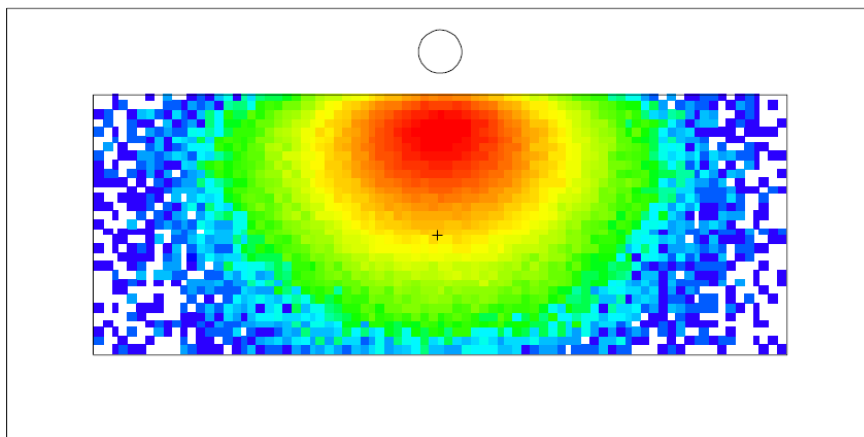
miseen. Tehdyistä mittauksista opittiin kuitenkin merkittäviä asioita jatko-
mittauksien suunnittelua varten. Myös MCNPX-koodin tuomia mahdollisuuksia
opittiin laajemmin hyödyntämään.

8 Puunippumittaukset

8.1 Simulaatiot

Kun havaittiin, että aiemmissa simulaatioissa ja mittauksissa käyttämämme puumassan suuruusluokka oli aivan liian pieni, ryhdyttiin suunnittelemaan suuremman kokoluokan mittauksia. Mittauksien suunnittelun tueksi tehtiin simulaatioita MCNPX-koodilla. Simulaatioiden avulla selvitettiin neutronien kulkeutumista näytteissä, simuloitiin gammaspektrit ja määritettiin mille etäisyydelle lähteestä ilmaisin on turvallista sijoittaa.

Neutronit kulkeutuvat puussa laajalle alueelle, mutta aktiivinen alue, jossa syntyy suurin osa aktivaatiogammoista, on vajaan puolentoista metrin säteinen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 23, jossa on simuloitu aktivaatiogammojen tuotto $8 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ kokoisessa puukasassa. Mikäli ilmaisin on sijoitettu sopivasti, pääsee suurin osa aktiivisella alueella syntyneistä aktivaatiogammoista ilmaisimeen vaimentumatta merkittävästi matkalla.



Kuva 23: Simuloitu neutroniaktivaatiogammatuotto $8 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ kokoisessa puukasassa. Puun yläpuolella oleva ympyrä on ilmaisin. Lähde on puunäytteen päällä.

Lähtökohtana mittausten suunnittelulle oli noin rekkakuormaskaalan puunippu. Kosteuspitoisuuksina käytettiin simulaatioissa 40 % ja 60 %. Näiden arveltiin olevan lähellä kokonaisen runkokuun kosteuksia niiden tullessa käsitteilylaitokselle. Runkokuun tiheytenä käytettiin arvoa 560 kg/m^3 pienemmälle kosteudelle ja 640 kg/m^3 suuremmalle. Puun koostumus näillä kosteusarvoilla on esitetty taulukossa 16.

Simulaatiogeometria koostui $3 \times 3 \times 2,5 \text{ m}^3$ yhtenäisestä runkokuunipusta. Runkojen väliin jäävää ilmaosuutta ei otettu huomioon tässä vaiheessa. Puu-

Taulukko 16: Suuren kokoluokan simulaatioissa käytetyn puun koostumus.

Alkuaine	Pitoisuus m-%	
	Kosteus 40 %	Kosteus 60 %
C	37,5	32,8
H	7,5	8,0
O	54,3	58,6
N	0,29	0,25
S	0,014	0,013
Cl	0,0068	0,0059
P	0,021	0,019
K	0,11	0,09
Ca	0,20	0,18
Mg	0,036	0,031
Mn	0,021	0,019
Fe	0,0061	0,0053
Zn	0,0021	0,0019
B	0,00043	0,00038
Cu	0,00029	0,00025

nippu oli sijoitettu pinta-alansa kokoisen 20 cm paksun betonikerroksen päälle ja betonin alla oli 30 cm hiekkaa. Tässä oli arvioitu mittausten tapahtuvan hallissa, jonka lattia on paksua betonia. Yli puolen metrin syvyyteen maahan joutuneiden neutronien aiheuttamat gammat eivät enää ole merkityksellisiä ilmaisimessa, joten tämän syvemmälle ei simulaatiota ulotettu.

Simulaatiot tehtiin 100 miljoonalle neutronille ja mitattiin neutronien aiheuttama gammasäteily ilmaisimessa. Lisäksi mitattiin neutronivuo ilmaisimessa, jotta nähtäisiin onko neutroneista haittaa todelliselle germaniumilmaisimelle.

Ensiksi luotiin geometria, jossa neutronilähde oli keskellä puukasaa ja ilmaisimia oli kasan pinnalla. Tämä geometria ei kuitenkaan osoittautunut toimivaksi, sillä ilmaisimen ja lähteen välissä oli liian suuri massa puuta. Tällöin pääosin lähteen läheisyydestä emittoituvat gammat ehtivät vaimentua voimakkaasti ennen ilmaisimeen saapumistaan. Ja kun kosteus kasvaa, kasvaa myös absorptiovoimakkuus. Tämä nähtiin tuloksissa H/C-suhteen pienenemisenä kosteuden kasvaessa. Myöskään käytännön kannalta tällainen geometria ei olisi optimaalinen, sillä lähteen sijoittaminen puukasan sisälle on haasteellista ja epäkäytännöllistä.

Tämän jälkeen siirryttiin geometriaan, jossa ^{252}Cf -lähde sijoitettiin puupinon päälle ilmaisimen kanssa. Tällöin maasta aiheutuva gammasäteily putoaa mättömän pieneksi ja mitataan yksinomaan puusta tulevaa säteilyä. Lisäksi ab-

sorption vaikutus saadaan poistettua, kun emittoituvat gammat eivät kulje pitkää matkaa puun lävitse. Ongelmaksi tässä geometriassa muodostuu mahdollisesti liian suuri neutronivuo ilmaisimeen. Tätä voitiin tarkastella ennen mittauksia simuloimalla.

Kun oltiin saatu selville, että sekä ilmaisimella että lähde kannattaa sijoittaa puukan päälle, ryhdyttiin simuloimaan ilmaisimen ja lähteen turvallista etäisyyttä. Etäisyyden olisi hyvä olla mahdollisimman pieni, jotta gammat eivät vaimentuisi tarpeettoman paljon ennen pääsyään ilmaisimeen. Samalla kuitenkin etäisyyden on oltava riittävän suuri, jotta neutronit eivät aiheuta tarpeetonta vahinkoa kalliille germaniumilmaisimelle.

Simuloitaviksi etäisyyksiksi valittiin 0,5 m, 1 m ja 1,5 m. 1,5 m etäisyydellä oleva ilmaisimella ei ollut aivan kasan päällä, vaan 5 cm kasan yläreunasta alaspäin eli ikäänkuin kulman takana. Käytetyn neutronilähteen aktiivisuus oli 2 MBq. Tulokset neutronivuolle ilmaisimessa on esitetty taulukossa 17. Tuloksia verrattiin kokonaisannokseen, jonka germaniumilmaisimet kestävät ilman merkittäviä neutronivaurioita.

Taulukko 17: Neutronivuot ilmaisimessa eri etäisyyksillä. Taulukossa on annettu kokonaisneutronivuo sekunnissa, nopeiden neutronien vuo sekunnissa ja nopeiden neutronien kuorma ilmaisimeen 10 vuorokauden mittauksen aikana.

Etäisyys	Kokonaisvuo	Nopeat neutronit	Nopeat 10 päivässä
0,5 m	39,2 n/(s cm ²)	29 n/(s cm ²)	2,5 · 10 ⁷ n/cm ²
1,0 m	10,4 n/(s cm ²)	8,5 n/(s cm ²)	7,3 · 10 ⁶ n/cm ²
1,5 m	0,0002 n/(s cm ²)	0,00009 n/(s cm ²)	78 n/cm ²

Tuloksista nähdään, että ilmaisimella olisi turvallista sijoittaa jo puolen metrin etäisyydelle lähteestä. Metrin etäisyydellä mittausta voitaisiin jatkaa jo useita vuosia ennen kuin ilmaisimeen osuisi nopeita neutroneja niin paljon, että merkittävää enenergiarésoluution huononemista tapahtuisi. Mikäli ilmaisimella sijoitettaisiin 1,5 m päähän, ei siihen tulisi juuri lainkaan neutroneita. Tällä etäisyydellä gammojakaan ei enää tule riittävästi.

Tulosten perusteella ilmaisimella päätettiin sijoittaa 75 cm päähän lähteestä. Näin saataisiin mahdollisimman suuri määrä gammasäteilyä kerättyä ilmaisimen kärsimättä neutronivahingoista.

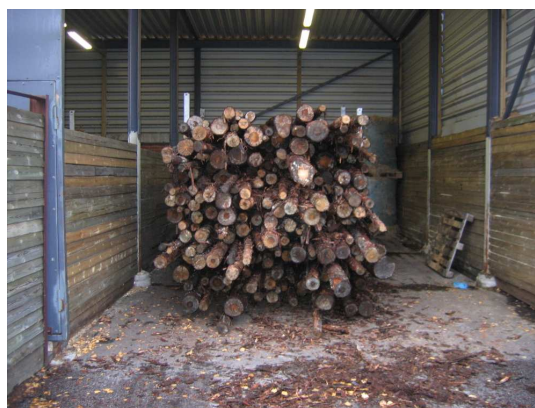
8.2 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin 17.–27.10.2008 VTT Jyväskylän tiloissa. Mitattavana kohteena käytössä oli ylivuotista (kuivaa) ja tuoretta (märkää) puuta. Puiden kosteuspitoisuudet olivat noin 30 % ja 55 %. Tällaisella kosteusvälillä menetelmän tulisi toimia lopullisessa käytännön sovelluksessaakin.

Puut toimitettiin Metsäliiton toimesta VTT Jyväskylän pihalle 14.10.2008 ja ne aseteltiin katettuun ulkovarastoon pankkojen päälle kouranosturilla. Kuvassa 24 näkyvät valmiit puupinot mittaushallissa. Halli oli jaettu keskeltä puusella väliseinällä, joka ei ylettynyt kattoon saakka. Molemmille puolille varastoa rakennettiin puupino metallisten pankkojen väliin. Puukasojen leveys oli 2,30 m. Pinojen korkeudet olivat 1,90 m (ylivuotinen) ja 2,10 m (tuore). Puiden pituus oli 4–5 metriä, mutta koko puumassa ei ollut yhtenäisesti näin pitkä pinoamistavasta ja puiden erimittaisuudesta johtuen. Molemmissa mittauksissa kaikki puut olivat kuitenkin samassa tasossa yli 3 m matkalta.



Kuva 24: Tuoreen puun pino mittaushallissa.



Kuva 25: Ylivuotisen puun pino mittaushallissa.

Puumassat olivat suoritettussa mittauksessa suuria verrattuna hakemittauksiin. Tuoretta puuta oli 13200 kg ja ylivuotista 9580 kg. Toimitetut tilavuudet olivat lähes yhtenevät, joten massaero selittyy kosteuserolla. Puiden irtotiheydet olivat saapuessa: tuorempi puu 577 kg/m^3 ja kuivempi 379 kg/m^3 .

Ylivuotista puuta kuivattiin lisää lämminilmapuhalluksella noin vuorokauden ajan. Lisäkuivauksen jälkeen ylivuotisen puun tiheys voi olla lähempänä 350 kg/m^3 . Kuvassa 26 näkyy kuivauksessa käytetty asetelma. Kuivausta olisi jatkettu muuten pitempäänkin, mutta se aiheutti veden kondensoitumista mittaushalliin. Mittauksessa käytetty elektroniikka olisi saattanut vaurioitua kondensoituvasta vedestä, joten kuivaus lopetettiin ennen varsinaisten mittausten alkua.



Kuva 26: Ylivuotista puuta kuivattiin lisää lämpöpuhaltimen avulla. Kasa peitettiin pressulla ja puhaltimella puhallettiin lämmintä ilmaa pinoon.

Käytetty mittausrakenteisto koostui germaniumilmaisimesta, kalifornium-252 neutronilähteestä (aktiivisuus 2 MBq), esivahvistimen jännitelähteestä, lineaarivahvistimesta, analogi-digitaalimuuntimesta, monikanava-analysointilaitteesta, tarvittavista kaapeleista, sekä tietokoneesta, jossa oli Grain-spektrinkeräysohjelma. Elektroniikka ja ilmaisimet olivat samat kuin kesän mittauksissa ensimmäisessä geometriassa. Mittaukseen tarvittava elektroniikka koottiin kuvan 27 mukaisesti pöydälle, joka katettiin pressulla.

Mittausasetelma koottiin siten, että ilmaisimet ja lähde sijoitettiin puukasan päälle. Ilmaisin oli HPGe. Germaniumilmaisimen alle laitettiin puulaveri, jotta saatiin aikaiseksi mahdollisimman tasainen alusta ja ilmaisimet kiinnitettiin tukevasti kiinni. Ilmaisin oli omalla puisella alustallaan kiinni hihnoilla ja alusta oli kiinnitetty laverin päälle hihnoilla kuten kuvassa 28. Lopuksi ilmaisimet peitettiin pressulla, jotta katosta mahdollisesti tippuva kondenssivesi ei kastelisi ilmaisinta.

Lähde asetettiin puupinon päälle ja teipattiin kiinni pieneen oksaan, jotta se ei putoaisi runkojen väliin. Lähteen sijainti määrättiin tehtyjen simulaatioiden perusteella, sen etäisyys ilmaisimesta oli molemmissa mittauksissa 76 cm. Kuvassa 29 on esitetty ilmaisimet ja lähde ylivuotisen puun mittauksessa. Tuoreen puun mittauksessa asetelma oli identtinen.

Laitteisto koottiin 17.10.2008. Kaikki kytkennät tehtiin valmiiksi ja ilmaisimet



Kuva 27: Käytetty mittauselektronikka. Ylemmällä pöytätasolla tietokone, oskilloskooppi, ylijännitesuoja ja yleismittari. Alemmalla tasolla varsinainen ilmaisinelektronikka.



Kuva 28: Ilmaisimien alustallaan tuoreen puukasan päällä. Kuvassa näkyvät myös ilmaisimen tyypitetyössä käytetty letku ja suppilo.



Kuva 29: Kuvassa etualalla ilmaisain pressulla peitettynä. Puiden päällä näkyy lähde teipattuna pieneen oksaan.

täytettiin nestetypellä. Koska ilmaisain oli kuljetettu mittausta paikalle huoneenlämpöisenä, piti odottaa sen jäähtymistä nestetypen lämpötilaan ennen kuin ilmaisimen käyttöjännitteet voitiin kytkeä ja mittaus aloittaa. Jännitteet saatiin kytkettyä päälle seuraavana päivänä 18.10. kello 8.

Aluksi tarkastettiin karkeasti lineaarivahvistimen oikea asetus käyttämällä koboltti-60 -lähdettä. Mittausalue ulotettiin noin 4,1 MeV asti, jotta hiilen korkeampi piikki saataisiin varmasti näkyviin. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen mittaus. Ensimmäiseksi mitattiin kosteampaa puuta. Mittaus aloitettiin 18.10.2008 kello 8:42 ja lopetettiin 22.10.2008 9:41.

Mittauksen ollessa käynnissä tiloissa ei tarvinnut oleskella muuten kuin nestetypen täytön ajan. Ilmaisimeen tuli lisätä nestetyppeä 8 tunnin välein, jotta se pysyi kylmänä. Täytöt tehtiin aina kello 8, 16 ja 24.

Mittauksen päätyttyä 22.10. tehtiin energiakalibraatio käyttäen ^{137}Cs ja ^{60}Co -lähteitä. Lähteet asetettiin ilmaisimen välittömään läheisyyteen niiden heikon aktiivisuuden vuoksi. Kalibroinnin ajaksi ^{252}Cf vietiin ulos hallista, jotta neutronien aiheuttamat gammat eivät häiritse mittauksia. Kalibraatiomittaus oli noin 10 minuutin mittainen. Kalibroinnin jälkeen vietiin kaikki säteilylähteet pois mittausta paikalta ja mitattiin hallissa vallitsevaa taustasäteilyä noin 3,5 tunnin ajan.

Tämän jälkeen aloitettiin mittausta laitteiston siirto kuivan puun mittausta var-

ten. Elektroniikkaa ei tarvinnut siirtää toiselle puolelle mittaushallia, sillä käytössä olevat kaapelit olivat tarpeeksi pitkiä. Siirron kohteena olivat siten oleellisesti ilmaisin ja neutronilähde. Kun ilmaisin oli saatu siirrettyä ja virrat kytkettyä päälle, tehtiin uusi energiakalibraatio. Uusintakalibraatio oli tarpeellinen, koska on mahdollista, että vahvistus muuttuu hiukan, kun ilmaisimen korkeajännite kytketään pois ja takaisin päälle.

Kalibraation jälkeen vietiin neutronilähde paikalleen puupinon päälle ja aloitettiin kuivemman puun mittaus. Mittaus tapahtui ajalla 22.10.2008 15:10 (kesäaika) - 27.10.2008 7:41 (talviaika). Molempia puukasoja mitattiin siis noin 4 vuorokautta.

8.3 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tulosten analysoiminen aloitettiin energiakalibraatiosta. Kalibraatiospektri on esitetty kuvassa 30. Kalibrointiin käytettiin ^{137}Cs :n 662 keV piikkiä sekä ^{60}Co :n kahta piikkiä energioilla 1173 keV ja 1332 keV. Lisäksi käytettiin koboltin summapiikkiä, joka muodostuu, kun ^{60}Co :n emittoimat molemmat gammakvantit absorboituvat ilmaisimeen yhtä aikaa. Tämän energia on 2506 keV.

Piikkien energiat ja kanavaluvut, joilla ne spektreissä esiintyvät, ovat taulukossa 18. Puun kosteudella ei ole kalibraation kannalta merkitystä, vaan puut on merkitty sen vuoksi, jotta tiedetään, kumman mittausasetelman kalibraatiosta on kyse. Taulukosta 18 nähdään, että kalibraatio oli oleellisesti sama molemmissa mittauksissa. Vahvistus ei siten ollut muuttunut mittausasetelman vaihdossa.

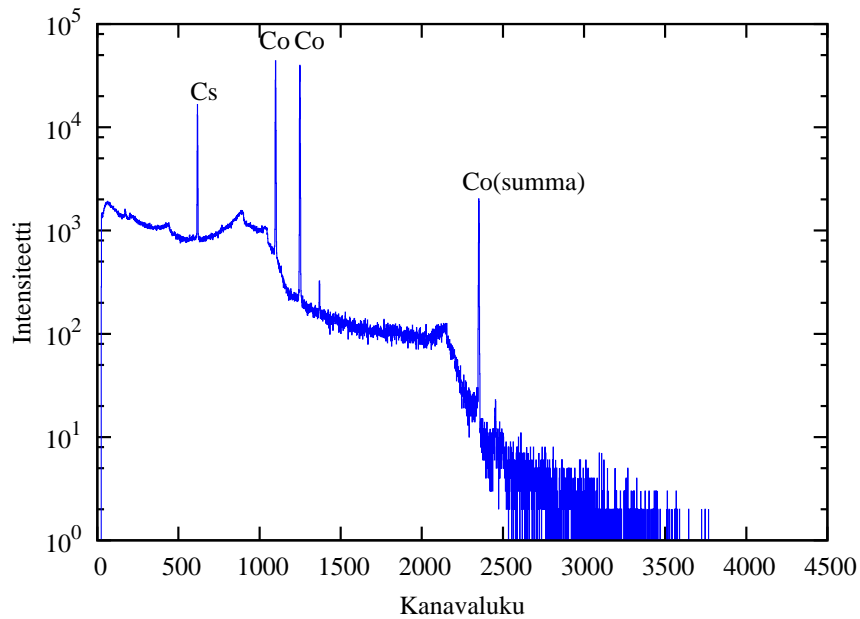
Taulukko 18: Tuoreen ja ylivuotisen puun energiakalibraatiossa käytettyjen piikkien energiat ja kanavaluvut.

Energia (isotooppi)	Kanava	
	Ylivuotinen puu	Tuore puu
661.657 keV (^{137}Cs)	617,5	617
1173.228 keV (^{60}Co)	1099	1098
1332.490 keV (^{60}Co)	1249	1248
2505.718 keV (^{60}Co)	2352	2351

Tuloksista muodostettiin kalibraatioyhtälöt, jotka ovat muotoa

$$E(x) = A + Bx + Cx^2, \quad (6)$$

missä x on kanavaluku, $E(x)$ antaa energian kiloelektronivolteina ja kertoimet A , B ja C ovat sovitettavia parametreja. Parametreiksi saatiin ylivuotiselle



Kuva 30: Ylivuotisen puun mittausasetelmassa tehty energiakalibraatio. Spektriin on merkitty kalibraatiossa käytetyt piikit.

puulle

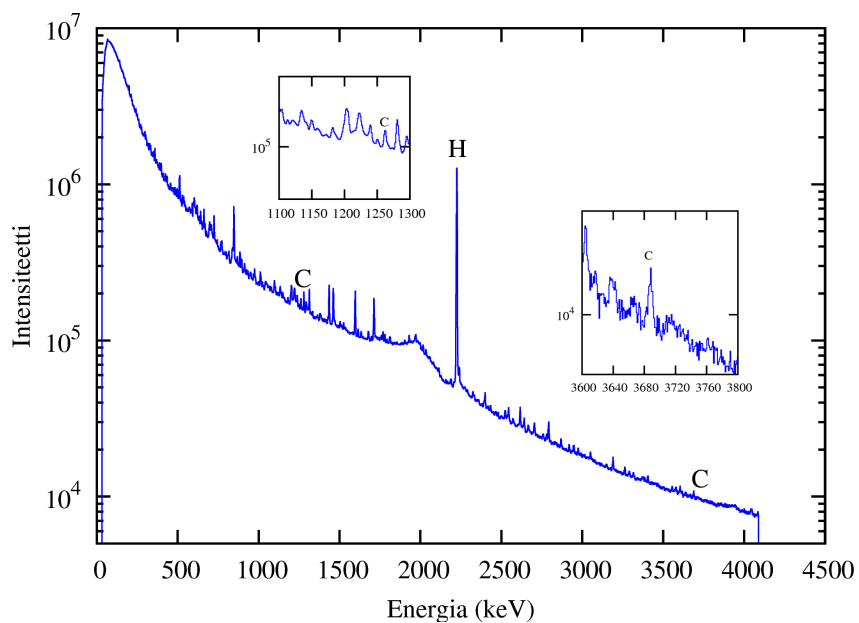
$$\begin{aligned}
 A &= 6,02604 \\
 B &= 1,06104 \\
 C &= 7,12479 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Ja tuorelle puulle vastaavasti

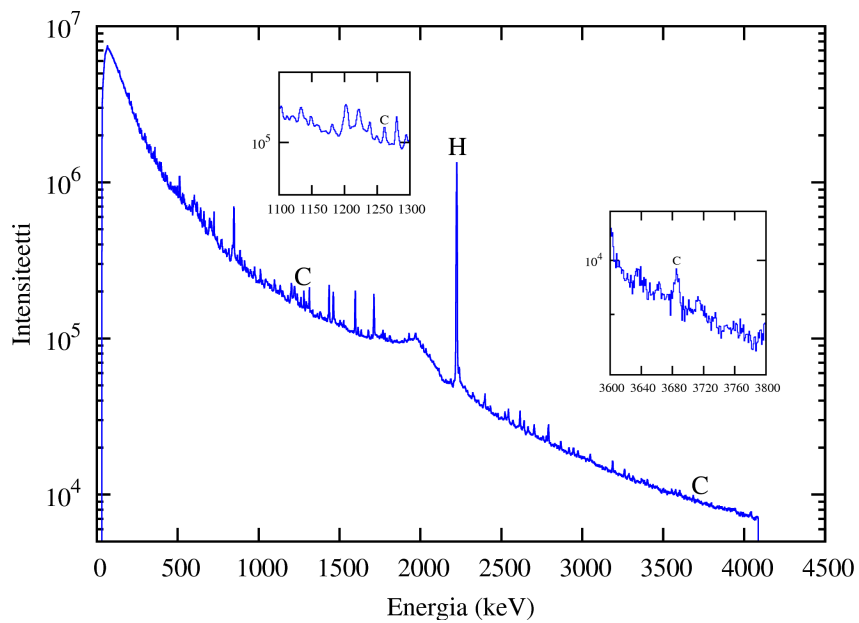
$$\begin{aligned}
 A &= 5,77372 \\
 B &= 1,06295 \\
 C &= 1,7054 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Nämä yhtälöt sovitettiin mittausspektrien x-akselille kanavaluvun sijaan. Kuviissa 31 ja 32 ovat saadut spektrit ylivuotiselle ja tuorelle puulle. Kuviin on suurennettu hiilen piikit ja niiden ympäristöä.

Mitatut spektrit analysoitiin etsimällä hiilen 1262 keV ja 3684 keV piikit sekä vedyn 2223 keV piikki. Piikkeihin sovitettiin Gaussin käyrät Gnuplot-ohjelmalla ja saatiin selville piikin keskikohta, pinta-ala ja puoliarvoleveys. Taulukossa 19 ovat saadut piikkien pinta-alat.



Kuva 31: Ylivuotisen puun gammaspektri. Kuvaan on merkitty tarkastellut vedyn ja hiilen piikit sekä suurennettu hiilen piikkien ympäristöä.



Kuva 32: Tuoreen puun gammaspektri. Kuvaan on merkitty tarkastellut vedyn ja hiilen piikit sekä suurennettu hiilen piikkien ympäristöä.

Hiilipiikkien pinta-aloja verrattiin sitten vetypiikin pinta-alaan, lasketut H/C-suhteet on esitetty taulukossa 20. Pinta-aloissa on melko suuri virhe erityisesti korkeamman energian hiilipiikin kohdalla johtuen germaniumilmaisimen huonosta havaitsemistehokkuudesta näin korkeille energioille. Tästä syystä myös H/C-suhteen virhe on suurehko. Tulokset eri kosteuksille ovat kuitenkin toistensa virherajojen ulkopuolella, joten voidaan luotettavasti sanoa, että H/C-suhde kasvaa kosteuden kasvaessa. Mittauksella on siten mahdollista määrittää puunäytteen kosteutta.

Taulukko 19: Suurista puukuormista mitatuista gammaspektreistä määritetyt hiilen ja vedyn piikkien pinta-alat.

	Piikin pinta-ala [$\cdot 10^4$]	
	30%	55%
C (1262 keV)	$13,2 \pm 0,3$	$11,4 \pm 0,4$
H (2223 keV)	700 ± 5	730 ± 5
C (3684 keV)	$0,73 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,02$

Taulukko 20: Tuoreen ja ylivuotisen puun vety-hiilipiikkien pinta-alasuhteet.

	Ylivuotinen puu	Tuore puu
H/C _{1262 keV}	53 ± 2	64 ± 3
H/C _{3684 keV}	960 ± 100	1300 ± 100

Tällä mittauksella saatiin tulokseksi hiilen ja vedyn kokonaismäärien suhteet. Sillä, onko puun sisältämä vesi sidottua, vapaata vai kidevettä, ei ole merkitystä tuloksien kannalta. Ei myöskään veden olomuodolla. Absoluuttisiin kosteuksiin ei vielä päästä näiden kahden erikosteuksisen puun tuloksen avulla. Aktivaatiomenetelmä mittaa kuitenkin puun kokonaiskosteutta, kuten on tilanne myös standardin mukaisessa kuivatusmenetelmässä. Näiden kahden menetelmän välille on lisämittausten avulla mahdollista luoda kalibraatio.

9 Johtopäätökset

Hakkeella tehdyt mittaukset osoittivat, että on syytä pohtia huolellisesti läpi kaikki mittaukseen vaikuttavat seikat sekä etukäteen että mittausten aikana. Muuten tulokset voivat yllättää. Aluksi ajateltiin, että olisi tärkeää termalisoida neutroneja mahdollisimman paljon, jotta ne reagoisivat puussa. Termalisointi-idea oli hyvä, mutta termalisointiin käytettiin polyeteeniä, joka muodostuu hiilestä ja vedystä, eli juuri niistä aineista joiden pitoisuutta mitattiin. Kun termalisointiin käytettäviä muoveja oli massiivisesti mittauserästä ympäristössä, ei puussa kosteuden nousun myötä lisääntynyt vety näkynyt tuloksissa.

Osin polyeteenin käyttö selittyi myös säteilyturvallisuuden maksimoinnilla ja aikaisemmista tutkimuksista otetulla mallilla [2]. Kun lähdettä ei tarvinnut poistaa suojuksesta lainkaan, oli sen käsittely turvallisempaa ja helpompaa. Mutta koska mittauksen aikana ei muutenkaan oleskeltu mittaustilassa, paitsi nestetyypin täytön ajan, ei säteilyannoksista tullut mittauskynnyksen ylittävää kuormaa mittaajille, vaikka lähde olikin paljaana.

Ensimmäisten hakemittausten jälkeen huomattiin tuloksista H/C-suhteen yllättävä käytös, mutta se tulkittiin ensiksi väärin. Sen vuoksi seuraavissa mittauksissa lisättiin entisestään neutroneja termalisoivaa materiaalia. Vasta gammasäteilyn alkuperän simulointi paljasti virheen mittauserästä. MCNPX-koodilla suoritettavat simulaatiot olivat tältä osin ratkaisevassa asemassa. Simulaatioita käytettiin myös mittauseräsuunnittelun ja optimointiin sekä säteilyturvallisuuden arviointiin.

Neljäs mittauserä hakkeelle olisi periaatteessa voinut olla toimiva, mikäli mittausta olisi voitu jatkaa muutama viikko. Pieni puumäärä tuotti kuitenkin niin vähän gammakvantteja, että vuorokaudessa ei kertynyt tarpeeksi statistiikkaa, jotta pienet piikit olisivat erottuneet taustasta. Koska viikkojen mittaisiin mittauksiin ei ollut mahdollisuutta, siirryttiin suosiolla suunnittelemaan suuremman puumassan mittauksia.

Mittaustulokset runkopuun osalta osoittavat, että vety/hiili-suhde kasvaa kosteuden kasvaessa. Neutroniaktivaatiomenetelmää käyttäen voidaan siten havaita kosteudesta johtuvia eroja alkuaineiden suhteellisissa osuuksissa. Tämä on mahdollista jopa kohtalaisen pienen aktiivisuuden omaavalla ^{252}Cf -lähteellä, kun puumassa on tarpeeksi suuri. Välittömien neutroniaktivaatiogammojen analysointiin perustuva menetelmä soveltuu näin ollen kosteusmittauksen työvälineeksi.

Jotta menetelmästä olisi hyötyä teolliseen käyttöön valjastettuna, tulisi sen pystyä mittaamaan absoluuttisia kosteuspitoisuuksia. Suoritetuilla mittauksil-

la ja laitteistoilla ei tähän vielä päästy. Absoluuttisiin kosteuksiin on kuitenkin mahdollista päästä lisämittausten ja mittausjärjestelmän kehittämisen avulla. Mittausjärjestelmän mahdollisia kehityskohteita ja menetelmän jatkotestaukseksi tarvittavia toimenpiteitä on eritelty tarkemmin seuraavassa luvussa.

10 Jatkotoimenpiteet

Lisämittauksina tulisi tehdä laaja mittaussarja erikosteuksisille näytteille, joiden kosteudet määritettäisiin myös kuivatusmenetelmällä. Tulosten välille voitaisiin sitten luoda kalibraatio, joka kiinnittäisi tietyn H/C-suhteen tiettyyn kosteuteen. Käytössä olleella laitteistolla kalibraatiomittaussarjaa ei kuitenkaan pystyittäisi luotettavasti suorittamaan. Rajoittaviksi tekijöiksi nousevat huomattavan pitkä mittausaika sekä suuri taustasäteilyn osuus spektrissä, joka heikentää piikkien erottuvuutta. Molemmat ongelmat olisi poistettavissa korvaamalla ^{252}Cf -lähde DD-neutronigeneraattorilla.

Neutronigeneraattorilla päästään vähintään 1000-kertaisiin neutroni-intensiteetteihin mittauksissa käytettyyn ^{252}Cf -lähteeseen verrattuna, joten mittausaika lyhenisi samassa suhteessa. Neljän vuorokauden mittausten sijasta riittäisi muutaman minuutin mittausaika. Myös mittausajan lyhentäminen vähentää häiritsevää taustaa spektreistä, sillä koko mittauksen ajan mitataan myös luonnon taustasäteilyä. Luonnollinen taustasäteily ei ole kovin suurta, mutta pitkässä mittauksessa siitä kuitenkin kertyy häiritsevää taustaa.

Suurin osa korkeasta gammataustasta koostuu korkeaenergisistä, neutronien epäelastisista sironnoista aiheutuvista gammoista. Osa näistä jättää koko energiansa ilmaisimeen näkyen piikkinä spektrissä. Kaikki näistä korkeaenergisistä gammasäteistä eivät kuitenkaan pysähdy ilmaisimeen, vaan jättävät siihen vain osan energiastaan. Näin ei synny piikkiä spektriin, vaan voimakas tasainen tausta.

DD-neutronigeneraattori auttaa eliminoimaan myös näitä epäelastisia gammakvantteja, sillä generaattorista saatavien neutronien energia on vain 2,45 MeV. Epäelastisia sironnoita ei voi syntyä suuremmalla energialla kuin mikä neutroneilla on. Kalifornium-252-lähde tuottaa jopa 10 MeV neutroneita, vaikka sen lähettämien neutronien keskiarvoenergia onkin noin 2 MeV. Kun korkeaenergiset neutronit poistuvat, häviävät myös korkeaenergiset epäelastisten sironnojen aiheuttamat fotonit. Samalla myös säästetään ilmaisinta hyvin nopeilta neutroneilta ja säteilyturvallisuuskin paranee korkeaenergistien neutronien ja gammasäteilyn vähentyessä.

Neutronigeneraattorin käyttö tuo muiden etujen lisäksi myös yhden hiilen neutronisieppauspiikin lisää käytettäväksi analyysiin. Kuten taulukosta 2 nähdään, hiilen intensiivisimmän neutronisieppauksen seurauksena emittoituu fotoni energialla 4945 keV. Käytettäessä ^{252}Cf -lähdettä samaan kohtaan spektrissä nousee myös hapen epäelastisen sironnan aiheuttama piikki. Hiilen piikkiä ei ole voitu käyttää tehdyissä mittauksissa tämän päällekkäisyyden vuoksi.

Uuden hiilen piikin käyttö analyysiä varten ei kuitenkaan ole välttämättä yksioikoista. Vaikka kyseessä on hiilen intensiivisin neutronisieppaus, voi sen havaitseminen olla ongelmallista ainakin käytettäessä suhteellisen pienen tehokkuuden omaavaa ilmaisinta. Lähes 5 MeV energian omaava gammasäde absorboituu melko epätodennäköisesti kokonaan ilmaisinkiteeseen, mikäli kyseessä ei ole hyvin suurikokoinen tai suuren tiheyden omaava kide. Mutta mikäli piikki saataisiin erottumaan taustasta, tulisi siitä kolmas kiintopiste mittauksiin.

Vaikka mittaussjärjestelmän kehitystyö vaatii tällä hetkellä hyvän energiareoluution omaavan Ge-ilmaisimen käyttämistä, ei ole poissuljettua, että valmiiseen sovellukseen voitaisiin silti käyttää tuikeilmaisinta. Tuikeilmaisimet ovat noin 10 kertaa edullisempia kuin germaniumilmaisimet, eikä niitä tarvitse jäähdyttää. Niiden heikkoutena on huono energiareoluutio, kuten NaI-ilmaisimella tehty mittauksemme osoitti. Riittävän suurella tuikeilmaisimella parempi tehokkuus voi kuitenkin kompensoida puutteellisen energiareoluution. Myös uudet tuikeainemateriaalit tuovat parannusta tuikeilmaisimien energiareoluutioon. Olisikin mielekäästä kokeilla uuden sukupolven tuikeilmaisinta tähän sovellukseen käytännössä.

Menetelmän käyttö ei myöskään ole rajoitettua vain kokopuun mittaukseen. Yhtä hyvin voidaan mitata esimerkiksi haketta tai muuta puutuotetta. Olenaisinta on mitattavan kohteen suurehko koko, jotta neutronit termalisoituvat näytteessä, eikä muuta termalisoivaa materiaalia tarvitse käyttää.

Siirtymällä neutronigeneraattorin käyttöön on ehkä mahdollista tinkiä myös näytteen suuresta koosta, sillä generaattorin synnyttämien neutronien energiaa on jonkin verran mahdollista moderoida termisempään suuntaan. Tässä prosessissa menetetään osa neutroneista. Generaattorin tuottama neutroni-intensiteetti on kuitenkin niin suuri, että osa neutroneista on myös varaa menettää mittauksen tehokkuuden kärsimättä. Mikäli neutronien energia olisi valmiiksi jo pienempi, ei näytekoosta tarvitsisi olla niin suuri neutronien termalisoimiseksi. Yksittäisen tukin mittaukseen on vielä pitkä matka, mutta poissuljettua ei sekään ole.

Alustavana sovellusideana pidettiin runkopuun mittausta rekasta sen saapuessa laitokselle. Näin saataisiin kosteudenmittaus sijoitettua tarpeelliseen kohtaan prosessointiketjussa. Kosteuden mittaus puukuorman tullessa laitokselle mahdollistaisi puukuorman oikean käsittelyn, esimerkiksi sijoittelun varastoon kosteuden mukaan tai oikean kemikaalisuhteen käyttämisen prosesseissa. Puukuorma saataisiin myös hinnoiteltua sen kosteuden perusteella.

Sovellusideassa mitattaisiin koko rekan mitta läpi joko liikutettavalla ilmaisinalähde –konstruktiolla tai siten, että rekka ajaisi kiinteän laitteiston lävitse. Mit-

tausaika tulisi neutronigeneraattorin käytön myötä olemaan maksimissaan muutaman minuutin mittainen, joten se ei aiheuttaisi tarpeetonta viivästystä tuotantoketjuun.

Sovellusta varten tehtiin alustavia simulaatioita, joissa kartoitettiin kuljettajan saamaa säteilyannosta mittauksessa, mikäli kuljettaja olisi rekassa mittauksen aikana. Simulaatiot osoittivat, että 2 m etäisyys lähteen ja kuljettajan välille pudottaisi säteilyannokset vähäisiksi (luokkaa muutama $\mu\text{Sv}/\text{h}$). Mikäli laitteisto rakennettaisiin hyviä varoetäisyyksiä käyttäen, olisi mittaus ehkä mahdollista toteuttaa kuljettajan läsnäollessa. Tämä vaatii kuitenkin tarkempia simulaatioita ja myös todellisia mittauksia säteilyannoksista.

Mikäli kuljettaja voisi olla rekassa ja ajaa rekan läpi kiinteän mittauspisteen, putoaisivat laitteen rakennuskustannukset huomattavasti. Liikkuvan lähdeilmaisien –konstruktion rakentaminen olisi moninkertaisesti kalliimpaa kuin staattisen konstruktion rakentaminen.

Sovellusratkaisu voi kuitenkin olla myös jotain muuta kuin runkopuukuorman mittaaminen rekasta. Esimerkiksi neutroniaktivaatiomenetelmää voitaisiin soveltaa erilaisten energiateollisuuden raaka-aineiden, kuten hakkeen, kosteudenmittaukseen. Neutroniaktivaatiomenetelmä on mahdollisesti sovellettavissa muidenkin puun ominaisuuksien kuin kosteuden mittaamiseen. Esimerkiksi tuhkapitoisuuden mittaaminen tai muiden epäpuhtauksien määrittäminen voi tulla kyseeseen.

11 Yhteenveto

Kyseessä oli alustava tutkimus, jossa selvitettiin, onko neutroniaktivaation avulla mahdollista mitata puun kosteutta. Tarkasteltavana menetelmänä oli välittömien neutroniaktivaatiogammojen mittaaminen (PGNAA). Menetelmällä voidaan mitata alkuaineiden isotooppien suhteellisia osuuksia näytteissä.

Menetelmää ei ole aikaisemmin käytetty puun kosteuden määrittämiseen, mutta se ratkaisisi monta kosteudenmittaukseen liittyvää ongelmaa. Ensinnäkin veden olomuodolla ei ole merkitystä, joten lumi ja jää eivät tuota ongelmia. Lisäksi mittauksesta on mahdollista tehdä nopea soveltuen online-mittauksiin. Myös suurien näytteiden ja kokopuun mittaus onnistuu neutronien hyvän materianläpäisykyvyn ansiosta.

Kuivan puun vetypitoisuus (H) on lähes vakio ja vetypitoisuus nousee kosteuden kasvaessa veden sisältämän vedyn vuoksi. Puun hiilipitoisuus (C) on kohtalaisen hyvin vakio myös eri puulajien välillä. Näin ollen tarkastelemalla vedyn ja hiilen suhteellisia osuuksia puunäytteessä välittömien neutroniaktivaatiogammojen avulla voidaan saada indikaatiota puunäytteen kosteudesta.

Mittauksia suunniteltiin ja optimoitiin simulaatioilla. Simulaatiot suoritettiin MCNPX-koodin avulla. Simulaatiot olivat mittausten tukena sekä suunnitteluvaiheessa että tulosten analysoinnissa. Mittaussarjoja tehtiin kaksi. Molemmissa käytettiin neutronilähteenä ^{252}Cf -lähdettä ja ilmaisimena HPGe-ilmaisinta. Ensimmäisessä mittaussarjassa käytettiin myös HPGe-ilmaisinta antikoincidenssikytkettynä ja NaI-ilmaisinta.

Ensimmäisessä mittaussarjassa mitattiin erilaisilla konfiguraatioilla erikosteuksisia selluhakenäytteitä. Näytekokoko oli noin 80 l. Mitatuista spektreistä analysoitiin vedyn ja hiilen muodostamat neutroniaktivaatiopiikit ja laskettiin näiden pinta-alojen suhde (H/C-suhde). Tulokset osoittivat, että näytekokoko oli liian pieni tuottaakseen tarpeeksi mitattavia gammakvantteja kohtalaisessa mittausajassa.

Toinen mittaussarja tehtiin erikosteuksisille mäntykuitupuunipuille. Näytekokoko oli noin 10000 kg. Saaduista gammaspektreistä määritettiin H/C-suhteet ja huomattiin, että suhde kasvaa kosteuden kasvaessa kuten oli oletettu. Menetelmä soveltuu siten kosteuden mittaukseen.

Koska kyseessä oli alustava tutkimus, on menetelmässä vielä paljon kehittämisen varaa, vaikka jälkimmäisen mittaussarjan tulokset olivatkin lupaavia. Ensinnäkin absoluuttista kosteuspitoisuutta ei vielä saatu mitattua, ainoastaan näytteiden keskinäinen kosteusjärjestys kuivasta kosteaan. Toiseksi mitaukset olivat vuorokausien mittaisia, kun teolliseen ympäristöön soveltuva

online-mittaus saisi kestää korkeintaan pari minuuttia. Mittausaikaa ja myös spektreissä näkyvää analyysiä vaikeuttavaa korkeaa gammataustaa voitaisiin pienentää vaihtamalla isotooppineutronilähde neutronigeneraattoriin.

Isotooppilähde on edullinen, mutta sen aktiivisuus on kohtalaisen pieni (2 MBq). Yli tuhatkertaisiin neutroni-intensiteetteihin olisi mahdollista päästä käyttämällä DD-reaktioon perustuvaa neutronigeneraattoria. Intensiteetin kasvaessa mittausaika lyhenisi samassa suhteessa. DD-generaattorin synnyttämä neutronien energiaspektri olisi myös tarkoituksenmukaisempi sovellukseen kuin ²⁵²-kaliforniumin.

Neutronigeneraattorin ja kattavan kalibraatiomittaussarjan avulla kosteusmenetelmä on mahdollista laajentaa mittaamaan absoluuttisia kosteuspitoisuuksia. Tällöin menetelmää voitaisiin soveltaa teollisessa ympäristössä luotettavaan kosteudenmittaukseen esimerkiksi suoraan rekasta puuerän saapuessa laitokselle.

Viitteet

- [1] H. Akkurt, J.P. Holloway, L.E. Smith, *The fixed point formulation for large sample PGNAA — Part 2: experimental demonstration*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 522 545-557, 2004.
- [2] H. Akkurt, *Composition Analysis of Large Samples with PGNAA Using a Fixed Point Iteration*, Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2002.
- [3] E. Alakangas, *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*, VTT Energia, Espoo, 2000.
- [4] K. Anderson, J. Pilcher, H. Wu, E. van der Bij, Z. Meggyesi, J. Adams, *Neutron Irradiation Tests of an S-LINK-over-G-link System*, 1999. http://hep.uchicago.edu/atlas/tilecal/rad/Glink_radtest.pdf, viitattu 15.10.2009.
- [5] A. Buffler, *Contraband detection with fast neutrons*, Rad. Phys. and Chem 71 852-861, 2004.
- [6] C. Ceballos, J. Esposito, *The BSA modeling for the accelerator-based BNCT facility at INFN LNL for treating shallow skin melanoma*, Applied Radiation and Isotopes 67 S274–S277, 2009.
- [7] J. Charbucinski, O. Duran, R. Freraut, N. Heresi, I. Pineyro, *The application of PGNAA borehole logging for copper grade estimation at Chuquicamata mine*, Applied Radiation and Isotopes 60 771–777, 2004.
- [8] D.L. Chichester, J.D. Simpson *Compact accelerator neutron generators*, American Institute of Physics, <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-9/iss-6/p22.html>, viitattu 1.10.2009.
- [9] J. Csikai, *CRC Handbook of fast neutron generators*, CRC Press, 1987.
- [10] J.J. DeMarco, J.B. Smathers, C.M. Burnison, Q.K. Ncube, T.D. Solberg, *CT-based dosimetry calculations for ¹²⁵I prostate implants*, Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 45, No. 5, pp. 1347–1353, 1999.
- [11] C.W.E. van Eijk, *Inorganic Scintillator Research Principles and New Materials*, Workshop on Use of Monte Carlo Techniques for Design and Analysis of Radiation Detectors, 2006.
- [12] T. Guung, W. Tsai, W. Kuo, J. Chen, *MCNP simulation of TRR-II cold neutron source design*, Physica B 311 158–163, 2002.
- [13] International Atomic Energy Agency, *Database of Prompt Gamma Rays from Slow Neutron Capture for Elemental Analysis*, Vienna, 2007.

- [14] Z. Idiri, H. Mazrou, A. Amokrane, S. Bedek, *Characterization of an Am-Be PGNA: set-up developed for in-situ liquid analysis: application to domestic waste water and industrial liquid effluents analysis*, Accepted Manuscript to appear in Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, Algeria, 2009.
- [15] T. Järvinen, T. Kalvas, J. Malinen, P. Teppola, M. Tiitta, A. Virtanen, *Puun kosteuden jatkuvatoiminen mittaus*, Paperi ja Puu 3/2008.
- [16] T. Järvinen, *PUUNA- Perusteet puun ominaisuuksien mittaamiseksi neutronimenetelmällä*, VTT:n osaraportti, 2008.
- [17] T. Järvinen, J. Malinen, M. Tiitta, P. Teppola, *State of art — selvitys puun kosteusmittauksesta*, Tutkimusraportti, VTT-R-01325-07, VTT, 2006.
- [18] T. Kalvas, J. Reijonen *Neutron Generators*, Berkeley Lab, Plasma and Ion Source Technology Group, 2005, http://www-ibt.lbl.gov/PIS/ng_research.html, viitattu 2.11.2009.
- [19] P. Kotiluoto, I. Auterinen, *MCNP study for epithermal neutron irradiation of an isolated liver at the Finnish BNCT facility*, Applied Radiation and Isotopes 61 781–785, 2004.
- [20] H.W. Kraner, *Radiation damage in semiconductor detectors*, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-29, No. 3, 1982.
- [21] Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Puuteknologia, *Puun kosteus*, <http://www2.kyamk.fi/ääayl/KOSTEUS1.htm> viitattu 26.11.2009.
- [22] A.A. Naqvi, M.M. Nagadi, O.S.B. Al-Amoudi, *Measurement of lime/silica ratio in concrete using PGNA technique*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 554 540–545, 2005.
- [23] National Institute of Standard and Technology, *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients*, <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>, viitattu 15.9.2008.
- [24] Ortec, *Neutron Radiation Damage in HpGe Detectors*, <http://www.ortec-online.com/detectors/photon/pdf/A8%20-%20Neutron%20Radiation%20Damage.pdf>, viitattu 19.10.2009.
- [25] D. Pelowitz, *MCNPX User's Manual Version 2.5.0*, Los Alamos National Laboratory report LA-CP-05-0369, 2005.
- [26] S. Päiviö, T. Kalvas, T. Riikilä, A. Virtanen, *Perusteet puun ominaisuuksien mittaamiseksi neutronimenetelmällä*, Metsätehon raportti 205 ISSN 1796-2374, Metsäteho Oy, 2009.

- [27] P. Rinard, *Neutron Interactions with Matter*, <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326407.pdf>, viitattu 3.11.2009.
- [28] Saint Gobain Crystals, *BrilLanCe Scintillators Performance Summary*, http://www.detectors.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGdetectors/Documents/Technical_Information_Notes/BrilLanCe-Scintillators-Performance-Summary.pdf, viitattu 16.10.2009.
- [29] R.C. Smith, C.H. Bush, J.W. Reichardt, *Small accelerators as neutron generators for the borehole environment*, IEEE Transactions on Vol. 35, Issue 1, 859–862, 1988.
- [30] Säteilyturvakeskus, *Säteily ja sen havaitseminen, Luku 1, Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet*, http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja1/_files/71211804227606255/default/kirja1_1.pdf, viitattu 30.6.2009.
- [31] Säteilyturvakeskus, *Säteily ja sen havaitseminen, Luku 5, Aktiivisuuden määrittäminen*, http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja1/_files/1222632510020948/default/kirja1_5.pdf, viitattu 30.10.2009.
- [32] M.W. Swanepoel, D.T.L. Jones, *Use of Monte Carlo software to aid design of a proton therapy nozzle*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 145–148, 2007.
- [33] University of Missouri, Archaeometry Laboratory, *Overview of Neutron Activation Analysis*, http://archaeometry.missouri.edu/naa_overview.html, viitattu 1.12.2009.
- [34] R.G. Williams III, C.J. Gesh, R.T Pagh, *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 2006.
- [35] B. Zemel, *Tracers in the oil field*, Developments in petroleum science 43, Elsevier Science B.V., The Netherlands, 1995.

Liite A Simulaatioissa käytetty input-tiedosto

```

Neutron capture on 3x3x2.5 m sized 40% moist wood using Ge-detector
c -----
c Cells
c cell_no mat_no density bounding_surfaces
1 1 -0.560 -1 $ wood box
2 2 -2.300 -2 $ Concrete box
3 3 -2.200 -3 $ Sand box
4 4 -5.323 -5 $ Detector
5 4 -5.323 -6 $ Detector
6 0 -4 1 2 3 5 6 $ Air
7 0 4 $ outside
c -----
c Surface Cards
1 rpp -150 150 -150 150 -125 125 $ Box of wood
2 rpp -250 250 -250 250 -145 -125 $ Concrete below wood
3 rpp -250 250 -250 250 -175 -145 $ Sand below concrete
4 rpp -250 250 -250 250 -175 200 $ Box simulation space
5 rcc 0 150 0 0 7.9 0 3.6 $ Germanium detector on y-axis
6 rcc 0 0 125 0 0 7.9 3.6 $ Germanium detector on z-axis
c -----
MODE N P
IMP:N 1 1 1 1 1 1 0
IMP:P 1 1 1 1 1 1 0
C CUT:N 10000 0 0 0
SDEF ERG=d1 x=0 y=0 z=0
SP1 -3 1.025 2.926
c -----
c Tallies
F8:P 4
FC8 Pulse height tally on detector at y-axis
E8 0 1e-5 1e-3 6998I 7.0
c
F18:P 5
FC18 Pulse height tally on detector at z-axis
E18 0 1e-5 1e-3 6998I 7.0
c -----
c Materials
c
c Wood
M1
6000 -37.47742857
1001 -7.518571429
8016 -54.30285714
7014 -0.285714286
16000 -0.014285714
17000 -0.006785714
15031 -0.021428571
19000 -0.107142857
20000 -0.2
12000 -0.035714286
25055 -0.021142857
26000 -0.006071429
30000 -0.002142857
5010 -0.000084000
5011 -0.000344571
29000 -0.000285714
c
c Concrete
M2
1001 0.304245
6012 0.002870
8016 0.498628
11023 0.009179
12000 0.000717
13027 0.010261
14000 0.150505
19000 0.007114
20000 0.014882
26000 0.001599
c
c sand (SiO2)
M3
8016 1
14000 2
c
c Germanium
M4
32070 -20.5
32072 -27.4
32073 -7.8
32074 -36.5
32076 -7.8
c
dbcn 12j 52917
nps 200e6
mplot freq 1e5 tal 18
print

```

Solujen määrittely,
Materiaalien tiheys
annetaan myös tässä.

Kappaleiden koon,
muodon ja sijainnin
määrittely.

Simulaatiomoodi: neutronit ja fotonit
Niiden tärkeydet kussakin simuloitavassa
solussa.

Lähteen sijainnin ja energian määrittelyt.

Mitataan fotonien
energiajättöä
simuloituihin
ilmaisinkiteisiin
energiaaväillä
10 eV-7 MeV.

Materiaalien määrittely
ZAID-koodien ja kunkin
alkuaineen osuuksien avulla.
Negatiiviset luvut ovat
massaprosentteja ja
positiiviset atomiprosentteja.

Simuloitavien hiukkasten lukumäärä.
Simulaation aikana näytetään 10
000 lasketun hiukkasen välein
päivitysvä energiajättöspektri.

Kuva 33: Esimerkki MCNPX-simulaatioissa käytetystä input-tiedostosta.