

Opinnäytetyö (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

2023

Jussi Tirkkonen

Nestetuikelaskimen suorituskyvyn verifiointi



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Bio- ja kemiantekniikka

2023 | 38+2 sivua

Jussi Tirkkonen

Nestetuikelaskimen suorituskyvyn verifiointi

Työn tarkoituksena oli verifioida toimeksiantajan uuden kehitysvaiheessa olevan nestetuikelaskimen suorituskyky. Toimeksiantaja on tuomassa markkinoille keväällä 2023 uuden matalataustaisen nestetuikelaskimen, josta käytetään tässä opinnäytetyössä työnimikettä ULLA (Ultra Low Level Analyzer). Tässä työssä varmistetaan laitteen täyttävän sille asiakastiedustelujen perusteella asetetut suorituskykyvaatimukset.

Työn käytännön osuus suoritettiin normaaleissa laboratorio-olosuhteissa toimeksiantajan tiloissa. Suorituskyvyn verifiointi suoritettiin osana tuotekehitysprosessia ja hyväksyty verifiointi on edellytys laitteen julkaisulle ja tuotantoprosessin aloitukselle.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin spesifikaatioihin verrattavia tuloksia, joiden perusteella voitiin todeta laitteen täyttävän sille suorituskyvyn osalta asetetut vaatimukset. Mikäli jokin spesifikaatio täyttyi vain osittain, pystyttiin täyttymättömyys perustelemaan hyväksytysti vaihtoehtoisten näytteiden tai fysikaalisten lainalaisuuksien avulla.

Asiasanat:

Radioaktiivisuus, Laboratoriotekniikka, Ionisoiva säteily, Säteilyturvallisuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Biotechnology and Chemical Engineering

2023 | 38+2 pages

Jussi Tirkkonen

Performance verification of liquid scintillation counter

The aim of this thesis project was to verify the performance of an instrument, currently under product development. The company commissioning this thesis is bringing a new low-background liquid scintillation counter to the market in the spring of 2023. In this thesis the instrument is referred to as ULLA (Ultra Low-Level Analyzer). This thesis project ensures that the instrument fulfills the set performance requirements. The performance requirements are constructed on the basis of customer inquiries.

The practical section of this thesis project was carried out on site, under normal laboratory conditions. The performance verification was conducted as a part of the product development process. Acceptance of the performance verification is a prerequisite for releasing the instrument and starting the production phase.

As a result of this thesis project, measurement data comparable to specifications was obtained. Based on this data it was possible to state that the instrument fulfills the requirements regarding performance. Where the limit values of a specification were only partially met, it was possible to justify the partial fulfillment based on sample variations or scientific laws.

Keywords:

Radioactivity, Laboratory technology, Ionizing radiation, Radiation safety

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	5
1 Johdanto	6
2 Nestetuikelaskenta analyysimenetelmänä	9
2.1 Fysikaalinen toimintaperiaate	9
2.2 Analyysilaitteiston rakenne	12
2.3 Nestetuikelaskennan terminologia	13
2.3.1 Puoliintumisaika	13
2.3.2 TDCR	13
2.3.3 CPM & DPM	16
2.3.4 Tausta	17
3 Työn suoritus	18
3.1 Verifiointi	18
3.2 Beetamittaus ja tehokkuus	19
3.3 Alfa/beeta-erottelu	21
3.4 Taustamittaus	26
3.5 Kuolleenajan korjaus ja lineaarialue	30
4 Tulosten tarkastelu	33
5 Loppupäätelmät	36
Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Kuolleenajan korjauksen tarkistus

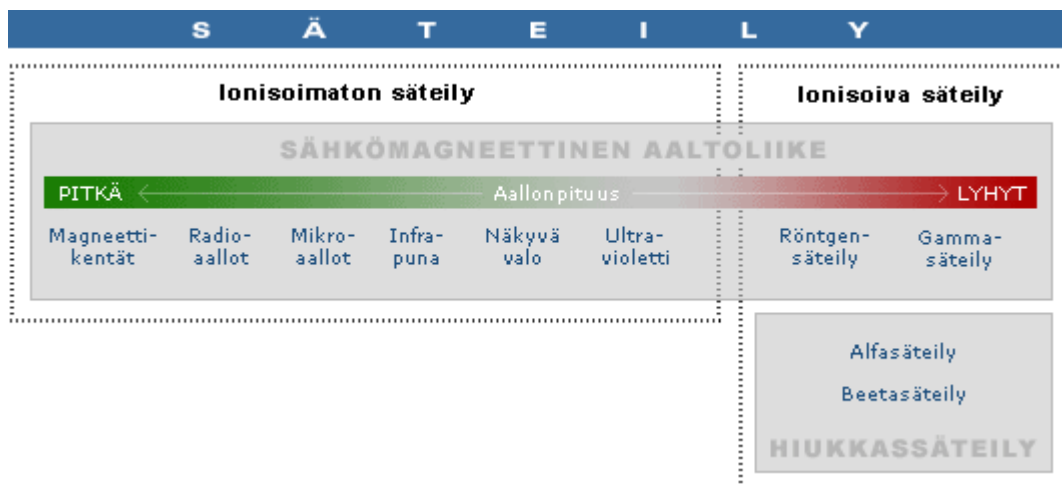
Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Alfa	Alfasäteilyä hajoamistuotteenaan emittoiva radioaktiivinen aine, kuten radium-226 (STUK 2015).
Beeta	Beetasäteilyä hajoamistuotteenaan emittoiva radioaktiivinen aine, kuten cesium-137 (STUK 2015).
CF	Lyhenne sanoista Core Function, tehokkuuteen liittyvä matemaattinen korjauskerroin (Haaslahti ym. 2017).
CPM	Lyhenne sanoista Counts Per Minute, käytetään kuvaamaan laitteiston havaitsemia hajoamistapahtumia yhden minuutin aikana (Knoll 2000).
DPM	Lyhenne sanoista Disintegrations Per Minute, käytetään kuvaamaan hajoamisreaktioiden todellista määrää yhden minuutin aikana (Knoll 2000).
NIST	Lyhenne sanoista National Institute of Standards and Technology, yhdysvaltalainen virasto, joka kehittää ja ylläpitää standardeja ja mittaustekniikoita (NIST 2022).
TDCR	Lyhenne sanoista Triple to Double Coincidence Ratio, käytetään kuvaamaan kaksois-, ja kolmoishavaintojen välistä suhdetta (Haaslahti ym. 2017).

1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi vuonna 1993 perustettu turkulainen perheomisteinen teknologiayritys Hidex Oy, jonka päätoimialana ovat mittaus, ja tutkimuslaitteet. Toimeksiantajan merkittävin tuoteryhmä ovat nestetuikelaskimet ja niiden oheistuotteet. Yritys työllistää suoranaisesti noin 30 työntekijää, joiden osaamisalue painottuu teknologian ja luonnontieteiden erikoisasiantuntijuuteen. Alihankkijoina yritys työllistää toimijoita muun muassa kokoonpanon ja ohjelmistokehityksen osalta. Hidex Oy on kansainvälisesti yksi merkittävimpiä toimijoita radionuklidimäärityksen saralla.

Säteilyä on ympärillämme monissa eri muodoissa (kuva 1.), jotka voidaan karkeasti jakaa kahteen eri pääluokkaan. Ionisoimaton säteily, eli pitkän aallonpituuden säteily on selkeämmin läsnä päivittäisessä toiminnassamme, kun käytämme esimerkiksi matkapuhelinta tai mikroaaltouunia. Ionisoiva säteily puolestaan on aaltoliikkeeltään lyhyempää ja siitä useimmille tunnetuin esimerkki on röntgensäteily. Ionisoivaan säteilyyn sisältyy myös hiukkassäteily, jota syntyy radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. (Säteilyturvakeskus 2019.)



Kuva 1. Säteilylajit – (Säteilyturvakeskus 2019)

Radioaktiivisia aineita on kehossamme luonnostaan ja niitä kulkeutuu ihmisen elimistöön juomaveden, ruuan, hengitysilman ja ympäristön mukana.

Intensiteetistä riippuen ionisoiva säteily aiheuttaa kudoksiin imeytyessään soluvaurioita ja lisää syöpäriskiä. Ionisoivan säteilyn määrä jolle ihmiset normaalioloissa altistuvat on kuitenkin verrattain pieni. Säteilyturvallisuutta ylläpitävät elimet valvovat juomaveden, ruuan ja ympäristön turvallisuutta mittaamalla niiden radioaktiivisuutta. (Säteilyturvakeskus 2021.)

Nestetuikelaskenta on radioaktiivisuuden mittaamenetelmä. Tunnetuista mittaamenetelmistä nestetuikelaskenta on yksi herkimpiä ja sillä pystytään havaitsemaan pienimpiä pitoisuuksia radioaktiivisuutta. Nestetuikelaskentaa käytetään tyypillisesti mitattaessa β -isotooppien, kuten ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{129}I tai ^{90}Sr aktiivisuutta. Laitteistoilla on mahdollista mitata myös α -isotooppien kuten ^{222}Rn tai ^{226}Ra aktiivisuutta. Käyttökohteita nestetuikelaskennalle ovat esimerkiksi biopolttoaineiden radiohiiliajoitus ja pohjavesi-, tai maaperämittaukset, joiden luotettavaan mittaamiseen tarvitaan matalataustainen nestetuikelaskin. (L'Annunziata & Kessler 2012.)

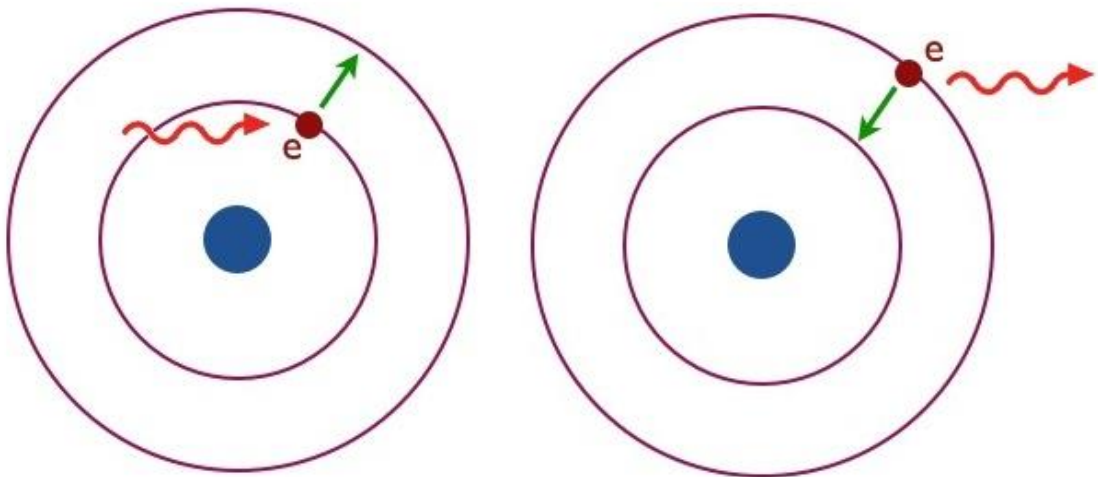


Kuva 2. Ultra Low Level Analyzer nestetuikelaskin

Tässä opinnäytetyössä esitellään nestetuikelaskenta analyysimenetelmänä ja perehdytään laitteistojen suorituskykyyn. Työssä esitellään verifiointi toimeksiantajan vakioidun toimintaohjeen mukaisena todentamismenetelmänä ja suoritetaan toimeksiantajan kehitysvaiheessa olevalle laitteelle verifiointi sen suorituskyvyn osalta.

2 Nestetuikelaskenta analyysimenetelmänä

1940-luvulla saksalainen fyysikko Hartmut Kallman huomasi kiinteiden ja nestemäisten orgaanisten yhdisteiden fluoresoivan, kun ne altistettiin ionisoivalle säteilylle. Nestetuikelaskennan perusperiaate on säteilyenergian absorboituminen tuikeaineeseen, joka aiheuttaa siinä esiintyville elektroneille hetkellisen eksitaatio-tilan, eli siirtymisen korkeammalle energiatasolle (kuva 3). Elektronien palatessa perustilaan vapautuu energiaa, joka on ilmiönä huomattavissa valonvälähdyksinä Tämä säteilyenergian absorboitumisen ja purkautumisen tuottama valoilmio tunnetaan nimellä tuikehdinta (*Eng. Scintillation*). Emittedun valon määrä on suhteellinen säteilyenergiaan ja tätä valoa voidaan havaita nestetuikelaskimella. (Hogg & Cook 2021, 1.–4.)



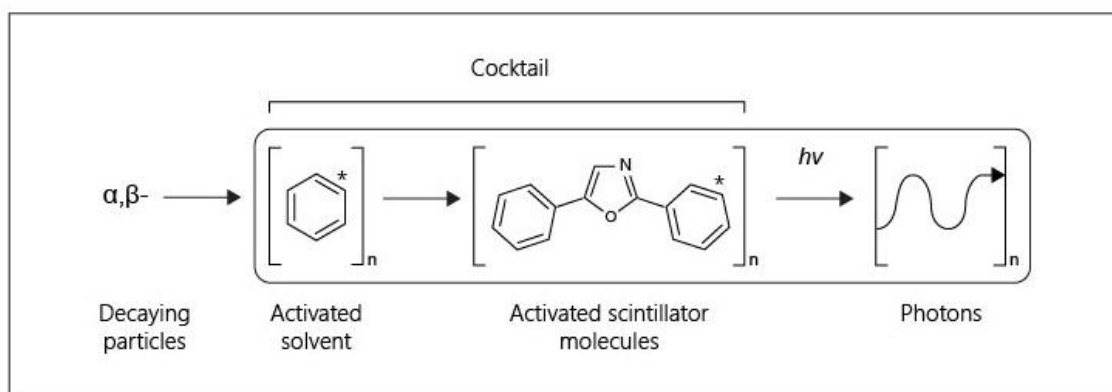
Kuva 3. Absorptio (vas.) ja emissio - (Eracleous 2012)

2.1 Fysikaalinen toimintaperiaate

Nestetuikelaskennassa näytteet liuotetaan tai suspensoidaan ns. cocktailiin, eli nestetuikeaineeseen, jotka ovat useimmiten tolueenipohjaisia orgaanisia

liuottimia. Nestetuikeaineissa on myös läsnä jokin tuikemolekyyli kuten fluoridi-ioni (University of Wisconsin 2012).

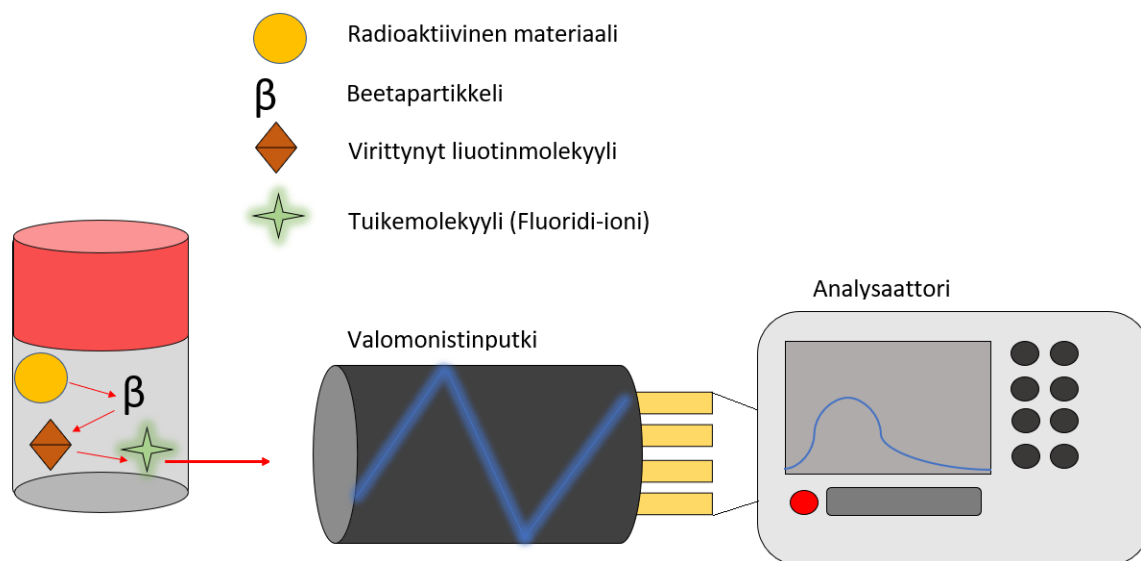
Radioaktiivinen näyte luovuttaa hajotessaan energiaa. Beetahajoaminen on hyvin nopea prosessi ja näyte purkaa energiansa tyypillisesti muutamassa nanosekunnissa. Osa tästä beetahajoamisesta syntyvästä energiasta absorboituu liuotinmolekyyliin, jotka saavuttavat eksitaatiotilan (kuva 4). Eksitaatiotilassa olevat liuotinmolekyyliin voivat siirtää energiaa toisilleen, tai nestetuikeaineen sisältämille tuikemolekyyleille. Kun liuotinmolekyylien energia siirtyy tuikemolekyyleille, se aiheuttaa puolestaan epävakautta niiden elektronikuorella nostamalla sen eksitaatiotilaan. Tuikemolekyylien eksitaatiotilan purkautuessa ne emittoivat fotoneja. (DGFS 20218.)



Kuva 4. Energian siirtyminen nestetuikelaskennassa - (DGFS 2018)

Näytteessä syntyvä valo voidaan havaita valomonistinputkilla, jotka muuttavat havaitut fotonit sähköimpulsseiksi, jolloin impulssit ovat suhteessa havaittuihin välähdyksiin. Valomonistinputken tuottamat sähköimpulssit muutetaan digitaaliseksi arvoksi eli countseiksi, jolla kuvataan aktiivisuutta. (University of Wisconsin - Milwaukee 2012.)

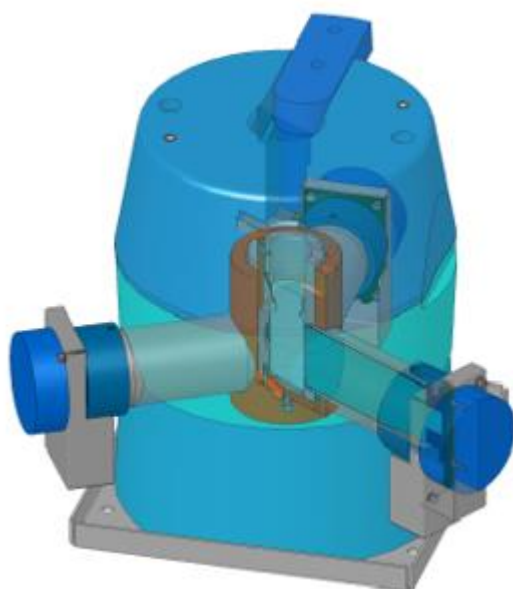
Jokaiselle arvolle on analyysilaitteistossa oma kanavansa. Kanavat muodostavat mitta-asteikon, jolle kukin arvo sijoittuu ja tämän syklin jatkuessa analyysilaitteisto tuottaa graafisen esityksen eli spektrin (kuva 5). Spektristä voidaan tulkita energiaa, säteilyn intensiteettiä tai näytteeseen liuenneen radioaktiivisen materiaalin määrää. (University of Wisconsin - Milwaukee 2012.)



Kuva 5. Nestetuikelaskenta

2.2 Analyysilaitteiston rakenne

Nestetuikelaskimissa näytteet mitataan läpinäkyvässä tilavuudeltaan 5 ml – 20 ml lasi-, tai muoviseospulloissa. Näytteet siirretään mittakammioon joko manuaalisesti tai automaattisesti, instrumentista riippuen. Mittakammio on sylinteri, joka on pinnoitettu kirkkaalla valkoisella maalilla ja siinä on läpiviennit näytteeseen kohdistetuille valomonistinputkille. Itse mittakammiota ja instrumentista riippuen myös valomonistinputkia ympäröi lyijyrakenne, jonka tehtävänä on estää laitteen ulkopuolelta tulevaa säteilyä pääsemästä mittakammioon (Kuva 6). (DGFS 2018, 17.)



Kuva 6. TDCR nestetuikelaskimen detektoriyksikön rakenne. (DGFS 2018, 17)

Instrumenttien rakenne vaihtelee valmistajien ja mallien välillä. Detektoriyksikön eristämiseen käytetyn lyijyn määrä ja laatu vaihtelevat laitteiden käyttötarkoitusten perusteella. Suurempi lyijymäärä estää tehokkaammin taustasäteilyn vaikutuksia, mutta vähentää laitteen liikuteltavuutta ja vaikeuttaa huoltotoimenpiteitä (Passo & Cook 1994). Eri valmistajien malleissa myös valomonistinputkien määrä ja sitä kautta sijainti muuttuvat (ks. TDCR Luku 2.3.2).

2.3 Nestetuikelaskennan terminologia

Jotta voidaan muodostaa yleiskuva laitteiston suorituskyvystä, on olennaista ymmärtää siihen vaikuttavat tekijät ja suorituskyvyn määritelmä puhuttaessa nestetuikelaskennasta. Nestetuikelaskennan ympärille on kehittynyt vakiintunut terminologia, jota käytetään kansainvälisesti kaikkien huomattavien tuotevalmistajien kesken. Tässä kappaleessa käsitellään suoranaisesti laitteiston suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ja avataan niiden kuvaamiseen käytettyjä termejä. Laitespesifikaation perusteella laaditut minimivaatimukset esitellään yksityiskohtaisesti kappaleessa 3 ”Työn suoritus”.

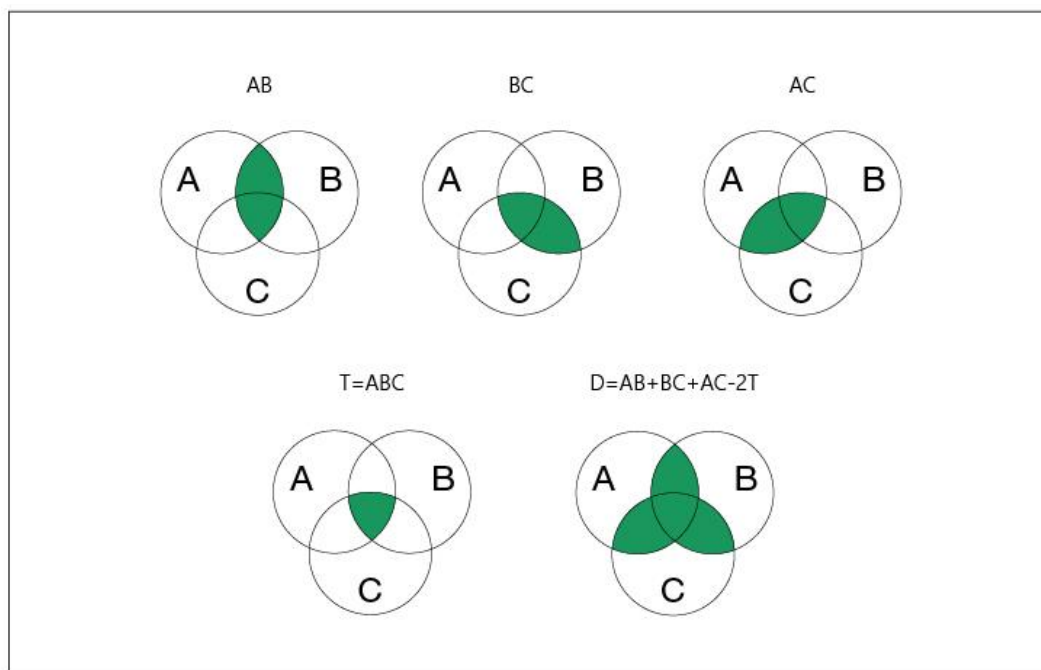
2.3.1 Puoliintumisaika

Radionuklidien määrittämisessä on otettava huomioon näytteen puoliintumisaika. Puhuttaessa radioaktiivisuudesta puoliintumisaika määritellään vaadittuna aikavälinä, jolla puolet tunnetun radioaktiivisen näytteen atomiytimistä eli nuklideista hajoavat muiksi nuklideiksi. Hajoamisella tarkoitetaan spontaania koostumuksen muutosta, joka tapahtuu emittoimalla hiukkasia ja energiaa. Radioaktiivisten aineiden puoliintumisajat vaihtelevat miljardeista vuosista sekunnin murto-osiin. Etenkin lyhyen puoliintumisajan isotooppien luotettavan mittauksen kannalta on olennaista tuntea kunkin näytteen tarkka puoliintumisaika. (Encyclopedia Britannica 2018.)

2.3.2 TDCR

TDCR nestetuikelaskennan yhteydessä on vakiintunut metodi radionuklidien määrittämisessä. Metodia on aiemmin käytetty kuvaamaan suoranaisesti laitteen laskutehoa (*Eng. Counting efficiency*), mutta nykyisin laitteiston tehokkuutta on mahdollista kuvata tarkemmin joko tunnettuun arvoon vertaamalla, tai matemaattisen korjauskertoimen ja TDCR-arvon yhdistelmällä. (Haaslahti ym. 2017.)

TDCR nestetuikelaskimissa on kolme valomonistinputkea, jotka sijaitsevat mittakammion ympärillä tasossa 120° suhteessa toisiinsa. Kaikki valomonistinputket (A, B ja C) mittaavat näytteen emittoimaa valoa:



Kuva 7. Valomonistinputkien yhtäaikaisuusmittaus (Hidex 2023)

Mikäli kaikki valomonistinputket havaitsevat impulssin, puhutaan kolmoishavainnosta (T). Jos putkista kaksi havaitsevat impulssin, käytetään vuorostaan termiä kaksoishavainto (D). Yksittäisten putkien havaitsemat impulssit poissuljetaan ulkoisena häiriönä. TDCR on täten verrannollinen näiden kolmen putken yhtenäishavaintoihin eli tehokkuuteen (ϵ) seuraavasti:

$$TDCR = \frac{T}{\sum D + T} \approx \epsilon$$

Tehokkuutta on mahdollista kuvata tarkemmin yhdistämällä TDCR arvoon jokin matemaattinen korjauskerroin. Esimerkki tästä on tehokkuus CF mukaisesti:

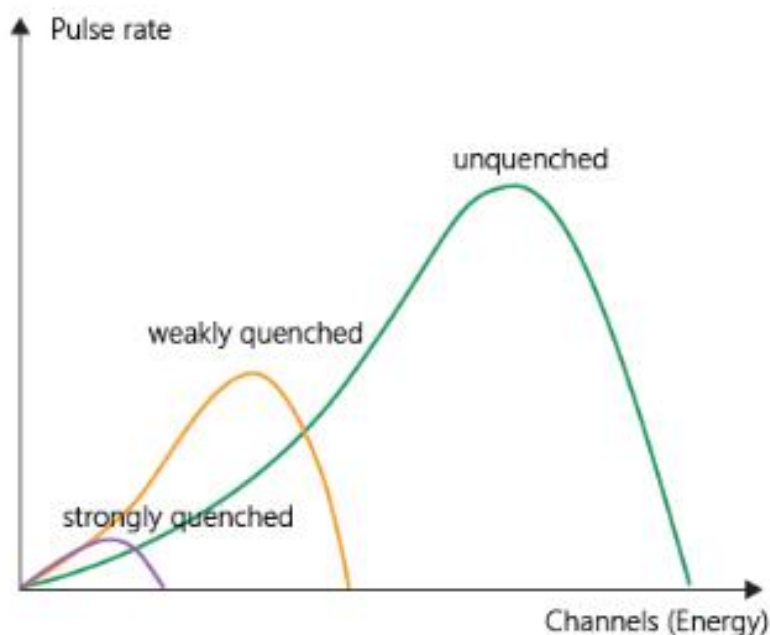
$$\varepsilon_{by\ CF} = \left[TDCR + a(1 - TDCR)^b \left(\frac{9TDCR^2}{(1 + 2TDCR)^2} - TDCR \right) \right]^c$$

Jossa a , b ja c ovat käytetystä nestetuikeaineesta ja radioisotoopista riippuvia kertoimia. (Haaslahti ym. 2017.)

$\varepsilon_{by\ CF}$ on validoitu ranskan metrologian instituutin LNHB:n (Laboratoire National Henri Becquerel) absoluuttisen aktiivisuuden määrittämiseen käytetyn metodin mukaisesti.

Laitteiston TDCR-arvoon vaikuttaa nestetuikelaskennassa yleisesti esiintyvä negatiivinen ilmiö, eli näytteen sammutustaso (*Eng. Quench*). Tämä määrittellään hajoamisenergian tai fotonien palautumattomana absorptiona energiansiirron aikana. Korkea sammutustaso voi johtua joko näytteen sisältämistä yhdisteistä, jotka absorboivat liuottimen eksitaatioenergian tuikemolekyyliden sijasta, tai näytteen värjäytymisestä, joka estää tuikemolekyyliden emittoimien fotonien pääsyn valomonistinputkille. (Moebius & Moebius 2012.)

Näytteen korkea sammutustaso näkyy käytännössä matalaenergisenä pulsseina, joka vaikuttaa suoranaisesti laitteiston kykyyn havaita hajoamistapahtumia (kuva 8).



Kuva 8. Eri sammutustasoisten näytteiden pulssikorkeus (Moebius & Moebius 2012)

2.3.3 CPM & DPM

CPM on radioaktiivisuuden mittayksikkö. CPM kuvaa annetussa radioaktiivisen materiaalin määrässä atomeja, jotka on havaittu hajonneeksi yhden minuutin aikaikkunassa. Hajoamisreaktiot tapahtuvat hyvin nopeasti ja samanaikaisesti, jolloin on kohtuutonta olettaa, että laitteisto havaitsisi tai ehtisi prosessoida kaikki näytteessä tapahtuvat hajoamisreaktiot. Tähän käytetään kuolleeseen ajan korjausta, joka on matemaattinen korjauskerroin laitteiston prosessointiajalle. CPM on kuolleella ajalla korjattu arvo, mutta hajoamistapahtumien todellista määrää mitattaessa on huomioitava tehokkuus ja näytteen sammutustaso. (Knoll 2000.)

Hajonneiden atomien todellista määrää yhden minuutin aikana kuvaa DPM-arvo. DPM saadaan jakamalla CPM tehokkuudella (Knoll 2000). DPM voidaan muuttaa SI-järjestelmän mukaiseksi (säteilyn) aktiivisuuden yksiköksi Becquerel (Bq), joka kuvaa ainemäärässä hajoavia atomeja per sekunti. Tällöin:

$$1Bq = 60 DPM$$

2.3.4 Tausta

Mitattaessa näytteen radioaktiivisuutta on tulosten tulkinnassa aina otettava huomioon näytteen ulkopuolinen taustasäteily. Esimerkki taustasäteilyn lähteestä on kosminen säteily ja sen yhteisvaikutus ympäristön ja materiaalien kanssa. Toinen merkittävä lähde taustasäteilylle on ympäristössä itsessään esiintyvät radioaktiiviset aineet, kuten uraani tai radon. Muita taustaa nostavia tekijöitä ovat laitteiston mittauselektroniiikan häiriöt, pimeät virrat, mittapullossa esiintyvä staattinen sähkö, näytteen tai nestetuikeaineen radionuklidikontaminaatio sekä luminesenssi. Kaikki taustalähteet tuottavat itsessään tai vuorovaikutuksessa kosmisen säteilyn kanssa joko Tšerenkovin säteilyä, sekundäärielektroneja ja/tai gammasäteitä, jotka nostavat tuloksena saatavaa CPM-arvoa. (Passo & Cook 1994, 1.)

Taustasäteily on mahdollista poissulkea tuloksesta mittaamalla aktiivisen näytteen lisäksi niin sanottu tyhjä näyte (*Eng. Blank*), joka on ominaisuudeltaan muuten samankaltainen kuin aktiivinen näyte, mutta ei tiedettävästi sisällä radioaktiivisuutta. Tämän tyhjän näytteen antama tulos vähennetään aktiivisesta näytteestä, jolloin saadaan taustakorjattu tulos varsinaisesta näytteestä. Mitä vähemmän laite mittaa taustasäteilyn aiheuttamaa häiriötä, sitä pienempi on taustan vaikutus varsinaisen näytteen mittaamiseen. Parempi taustasäteilyn vaikutusten poisto vuorostaan mahdollistaa matala-aktiivisempien näytteen luotettavan mittaamisen. Matala-aktiivisten näytteen mittaamiseen tarkoitettujen laitteiden tuotekehityksessä hyvin merkittävä suorituskykyparametri on matala taustasäteilyn aiheuttama häiriö. (Mäkinen 2001.)

3 Työn suoritus

Työn suoritukseen sisältyy tässä opinnäytetyössä verifiointin esittely toimeksiantajan käyttämänä menetelmänä, sekä verifioitavalle laitteelle käytännössä suoritettavat testit. Jokainen verifikaatioon sisältyvä mittaus on esitelty omana kappaleenaan siten, että kappale sisältää kunkin testin vaatimukset, mittaparametrit ja tulokset.

3.1 Verifiointi

Verifiointi on objektiiviseen näyttöön perustuva todentamismenetelmä. Tässä osiossa suoritetaan toimeksiantajan vakioidun toimintaohjeen mukainen verifiointi instrumentin suorituskyvylle. Toimintaohjeessa määritellään verifiointi seuraavasti:

Tarkoitus – Verifiointin tarkoituksena on varmistaa mittaamalla tai muilla objektiivisilla keinoilla, että vaatimukset verifioitavan asian kannalta täyttyvät. Tällöin voidaan varmistaa tuotteen turvallisuus ja soveltuvuus sille määriteltyyn käyttötarkoitukseen.

Käytäntö – Tuotekehityksessä verifiointi tapahtuu siten, että hyväksymiskriteerit verifioitavan asian kannalta on dokumentoitava ennen käytännön täytäntöönpanoa. Saatuja tuloksia verrataan aiemmin määriteltyihin hyväksymiskriteereihin, joiden perusteella tehdään johtopäätökset hyväksynnän tai hylkäämisen kannalta.

Suorituskyvyn spesifikaatiot – Kaikki suunnitteluvaiheessa tapahtuvat muutokset on verifioitava. Mikäli jonkin spesifikaation hyväksymiskriteerit eivät täyty tai täyttyvät osittain, on esitettävä perusteet laitteen tuotekehitysprosessin jatkamisesta. Instrumenttien välisestä vaihtelusta ei voida tehdä johtopäätöksiä ennen useampien instrumenttien sarjatuotantoa. Tuotekehitysvaiheessa verifiointi voidaan suorittaa yksittäisen laitteen tulosten perusteella.

3.2 Beetamittaus ja tehokkuus

Tässä osiossa verifioitiin seuraavien tuotevaatimusten täytyminen:

Taulukko 1. Beetamittaus ja tehokkuus vaatimukset

Tunnus	Vaatus	Prioriteetti
PR-1.01	Sammuttamattoman tritiumin (^3H) tehokkuus oltava yli 70 %	Korkea
PR-1.03	Sammuttamattoman hiilen (^{14}C) tehokkuus oltava yli 96 %	Korkea
PR-2.07	TDCR arvon noudatettava teoriaa	Korkea

Tuotevaatimukset oli mahdollista verifioida suorittamalla täyden mitta-asteikon mittaustaulukon 2 mukaisilla parametreilla:

Taulukko 2. Beetamittaus ja tehokkuus mittaparametrit

Mittausparametrit	
Measurement time	60 sec
Maximum counts	0
Activity type	Standard
Coincidence time	35 ns
Vial repeats	10
Range repeats	1

Mittauksessa käytettiin Hidex Oy:n kaupallisia NIST sertifioituja standardeja:
Sammuttamaton ^3H #120205 ja sammuttamaton ^{14}C #120220

Kohdassa 3.4 tehtävää taustamittausta varten valmistettiin myös $^3\text{H} + \text{H}_2\text{O}$ näyte suhteessa 8 ml + 12 ml

Näytteet ladattiin laitteistoon järjestyksessä:

A01- ^3H

A02- ^{14}C

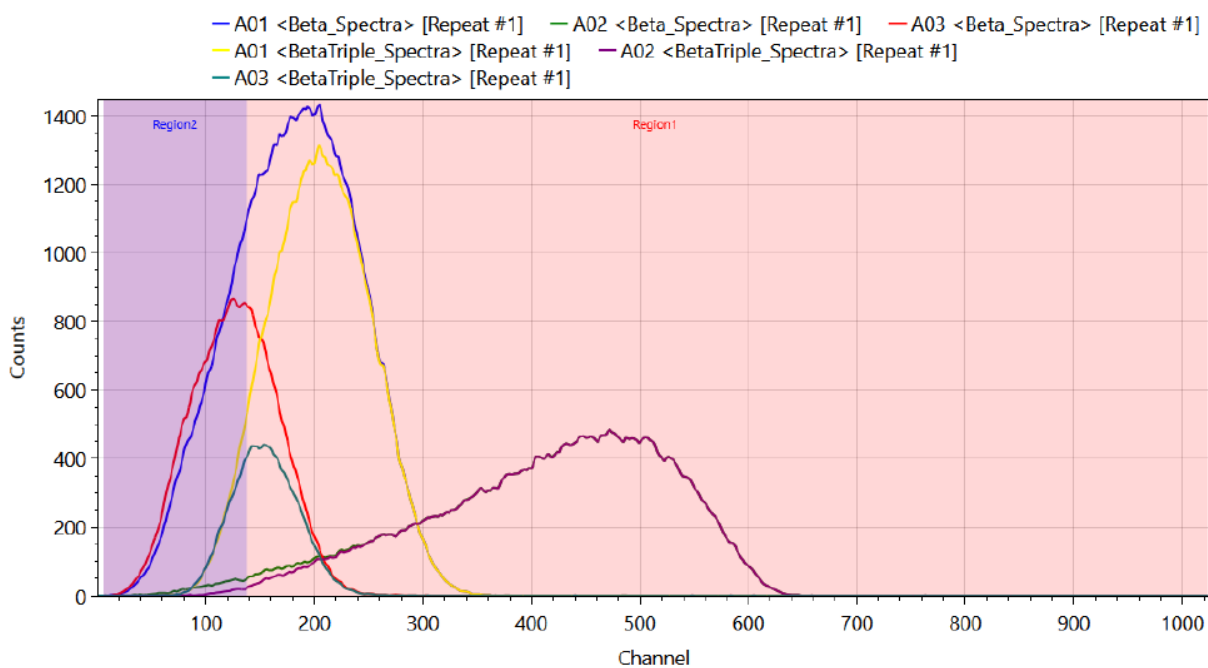
A03- $^3\text{H} + \text{H}_2\text{O}$

Tuloksena saatiin kuvan 9 mukaiset arvot ja näytteiden spektrit:

SheetData

Pos	SampleType	Eff	TDCR	DPMbyCF	DPM_difference
A01	H-3	0.717	0.708	159983.874	-2.045
A02	C-14	0.976	0.974	67636.239	-0.065
A03	H-3_Water	0.406	0.379	110477.802	-1.223

Graphics



Kuva 9. Beetamittauksen spektri ja mitatut arvot

3.3 Alfa/beeta-erottelu

Tässä osiossa verifioitiin seuraavan tuotevaatimuksen täyttyminen:

Taulukko 3. Alfa/beeta-erottelu vaatimus

Tunnus	Vaatus	Prioriteetti
PR-1.06	Alfa-näytteen (^{226}Ra) tehokkuus oltava yli 95 %	Korkea

Tuotevaatimus oli mahdollista verifioida suorittamalla täyden mitta-asteikon mittaus taulukon 4 mukaisilla parametreilla:

Taulukko 4. Alfa/beeta-erottelun mittaparametrit

Mittausparametrit	
Measurement time	600 sec
Maximum counts	0
Activity type	Alpha
Coincidence time	35 ns
Vial repeats	1
Range repeats	1
Alfaspesifit parametrit	
Alpha mode	counting
Delay time	55
Y Offset	55
Y Gain	38
PLI Limit	35
Gate Time	600
Show PLI	No
Spill to Beta	No

Varsinaisten tuotevaatimusten lisäksi alfa/beeta-erottelun suorituskyvyn kannalta on hyvin tärkeää, että laitteisto pystyy tuottamaan selkeästi luettavan spektrin, jossa alfa-, ja beetapulssit ovat erillään toisistaan riippumatta näytteen sammutustasosta. Laitteiston pitää olla kalibroitu siten, että spektrin alaosassa näkyvät beetapulssit mahtuvat esitysalueelle, kuten myös spektrin yläosassa sijaitsevat alfapulssit. Spektrin sovituksen kannalta on kuitenkin myös olennaista välttää pulssikeskittymien päällekkäisyyksiä.

Spektrin sovituksen oikeellisuus oli mahdollista verifioida mittaamalla kaksi erilaista ^{222}Rn näytettä, joista toinen ei sisällä lainkaan sammutusaineena toimivaa vettä, ja tuottaa spektriin korkealle sijoittuvan alfakeskittymän (MaxiLight+) ja toinen sisältää vettä, eli tuottaa matalan alfakeskittymän (AquaLight+).

Mittausta varten valmistettiin ^{222}Rn -isotooppia sisältävästä vedestä, ja AquaLight+ nestetuikeaineesta näyte suhteessa 5 ml + 15 ml

Sekä ^{222}Rn -isotooppia sisältävästä MaxiLight+ nestetuikeaineesta ja puhtaasta MaxiLight+ nestetuikeaineesta näyte suhteessa 5 ml + 15 ml

Mittauksessa käytettiin myös Hidex Oy:n kaupallista NIST sertifioitua ^{226}Ra standardia.

Näytteet ladattiin laitteistoon järjestyksessä:

A06-Radon ML+

A07-Radon AL+

A08-Radium

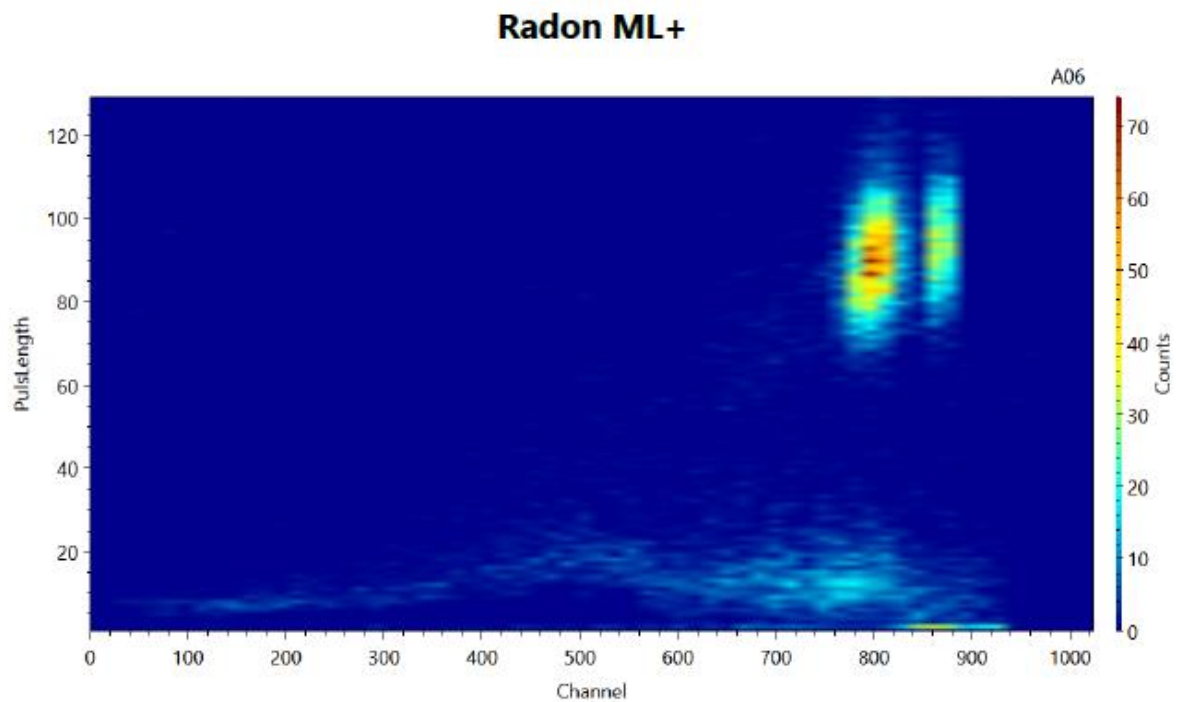
Tuloksena saatiin kuvan 10. mukaiset arvot:

SheetData

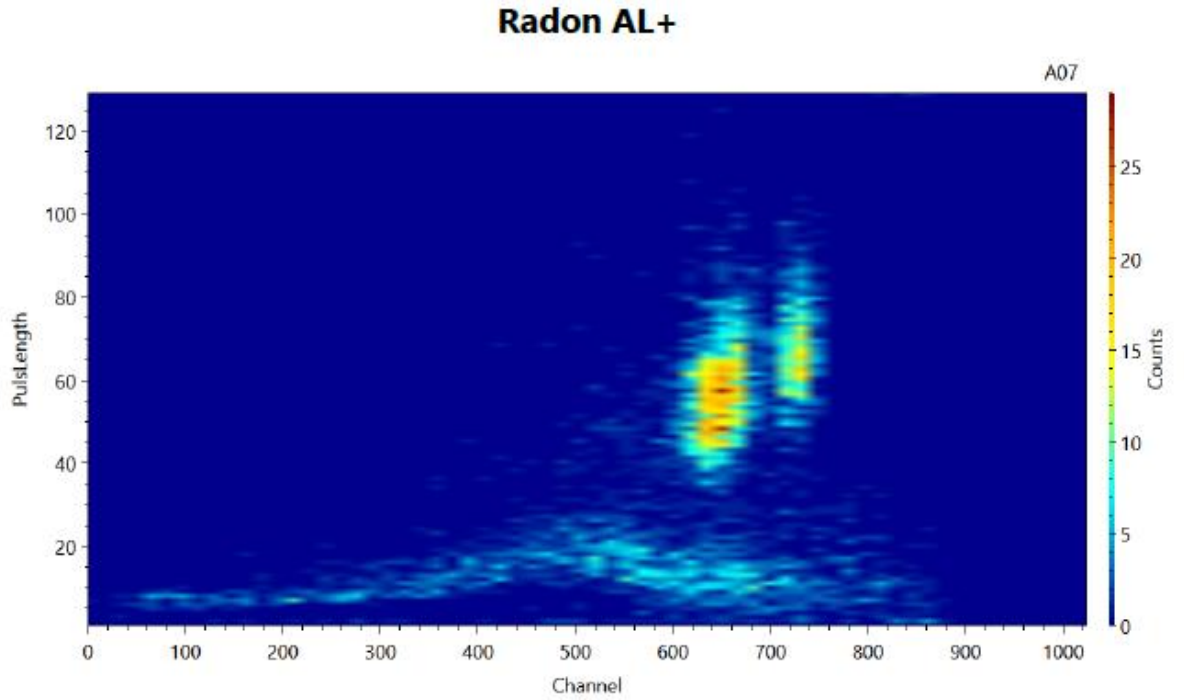
Pos	SampleType	Temp	Time	CPM_Beta	CPM_Alpha	TDCR
A06	Sample	18.3	600	186.6	505.395	1.000
A07	Sample	18.3	600	80.4	277.101	1.000
A08	Sample	18.3	600	152.8	450.450	1.000

Kuva 10. A/B erottelun tulokset

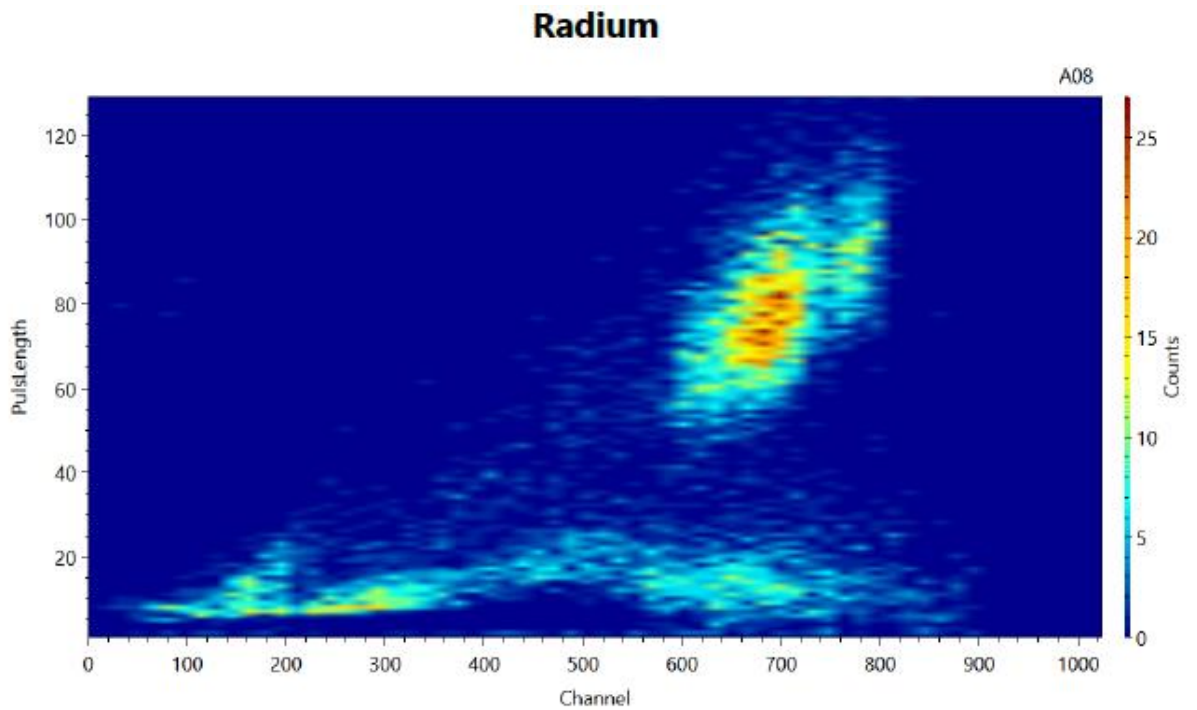
Sekä kaikille näytteille oma 2D-spektrinsä:



Kuva 11. Radon ML+ 2D-spektri, jossa alfakeskittymä kuvaajan yläaidassa ja beetavyö alla

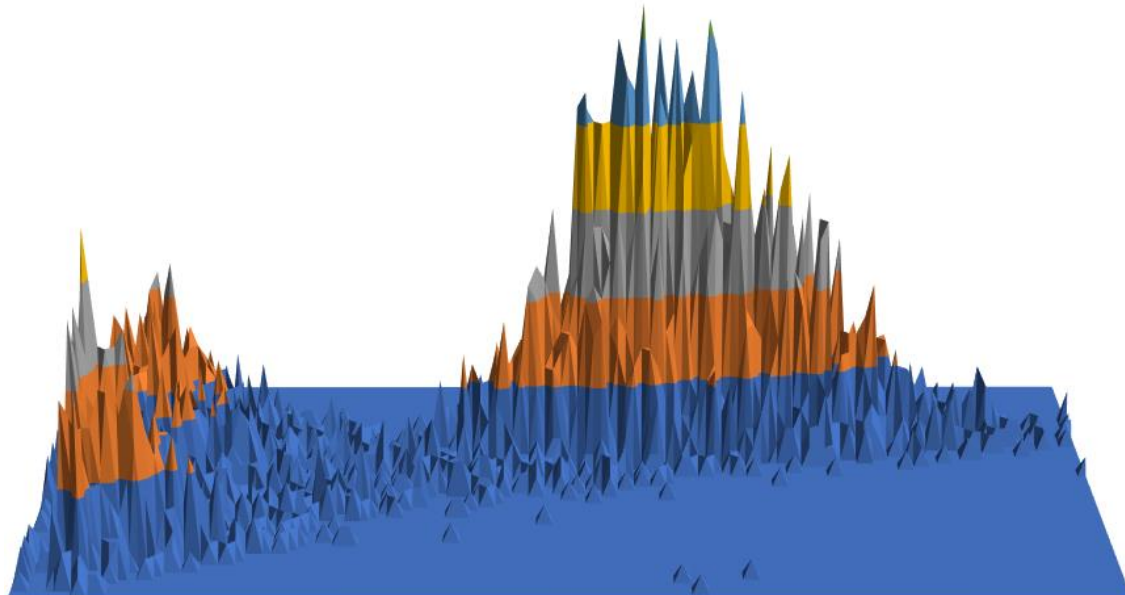


Kuva 12. Radon AL+ 2D-spektri, jossa alfakeskittymä kuvaajan ylälaidassa ja beetavyö alla



Kuva 13. ^{226}Ra 2D-spektri, jossa alfakeskittymä kuvaajan ylälaidassa ja beetavyö alla

2D-spektrien lisäksi ^{226}Ra näytteen raakadata syötettiin Microsoft Exceliin, jossa siitä tuotettiin 3D-spektri (kuva 14), jota tarkastelemalla saadaan käsitys alfa-, ja beetapulssien päällekkäisyydestä.



Kuva 14. Radium 3D-spektri, jossa korkeampi huippu edustaa alfakeskittymää ja matalampi huippu beetakeskittymää

3.4 Taustamittaus

Tässä osiossa verifioitiin seuraavien tuotevaatimusten täytyminen:

Taulukko 5. Taustamittauksen vaatimukset

Tunnus	Vaatus	Prioriteetti
PR-1.02	Taustan oltava alle 1 CPM ³ H 25 % tehokkuuden mitta-alueen ikkunassa	Korkea
PR-1.02.1	Taustan oltava alle 10 CPM täyden tehokkuuden mitta-asteikon ikkunassa	Korkea
PR-1.02.2	Sammuttamattoman taustan oltava alle 6 CPM täyden tehokkuuden mitta-asteikon ikkunassa	Korkea

Mitattaessa nestetuikelaskimien taustaa ilmoitetaan täyden mitta-alueen (kanavat 5–1024) CPM-arvo, sekä ³H 25 % arvo. Jälkimmäisellä arvolla tarkoitetaan taustan CPM-arvoa alueella, jolla saavutetaan ³H+H₂O näytteelle 25 % tehokkuus. Mitta-alueen koko määritettiin suorittamalla täyden mitta-asteikon mittaus ³H+H₂O näytteelle kohdassa 3.2 ja alueen suuruudeksi saatiin kanavat 5–136. Niin sanottu 25 % tausta ilmoitetaan, jotta Hidex ULLA:n taustatulosta olisi helpompi verrata kahden valomonistinputken nestetuikelaskimiin, joilla voidaan saavuttaa noin 25 % tehokkuus vastaavalla näytteellä.

Mittausta varten valmistettiin kohdassa 3.2 esitettyä ³H + H₂O näytettä vastaava taustanäyte ilman tritioitua vettä.

Sammuttamaton taustanäyte valmistettiin asetonipohjaisesta liuottimesta ja MaxiLight+ nestetuikeaineesta suhteessa 8 ml + 12 ml
Sammuttamatonta taustanäytettä vastaava aktiivinen näyte valmistettiin

lisäämällä vastaavaan näytteeseen liukeneva tritiumlähde:
(Perkin Elmer, Lot: 1210–120, Exp: 01/2020)

Taulukossa 5 esitetyt tuotevaatimukset oli mahdollista verifioida suorittamalla kahden mitta-alueen (5–1024 ja 5–136) mittaus seuraavilla parametreilla:

Taulukko 6. Taustamittauksen parametrit

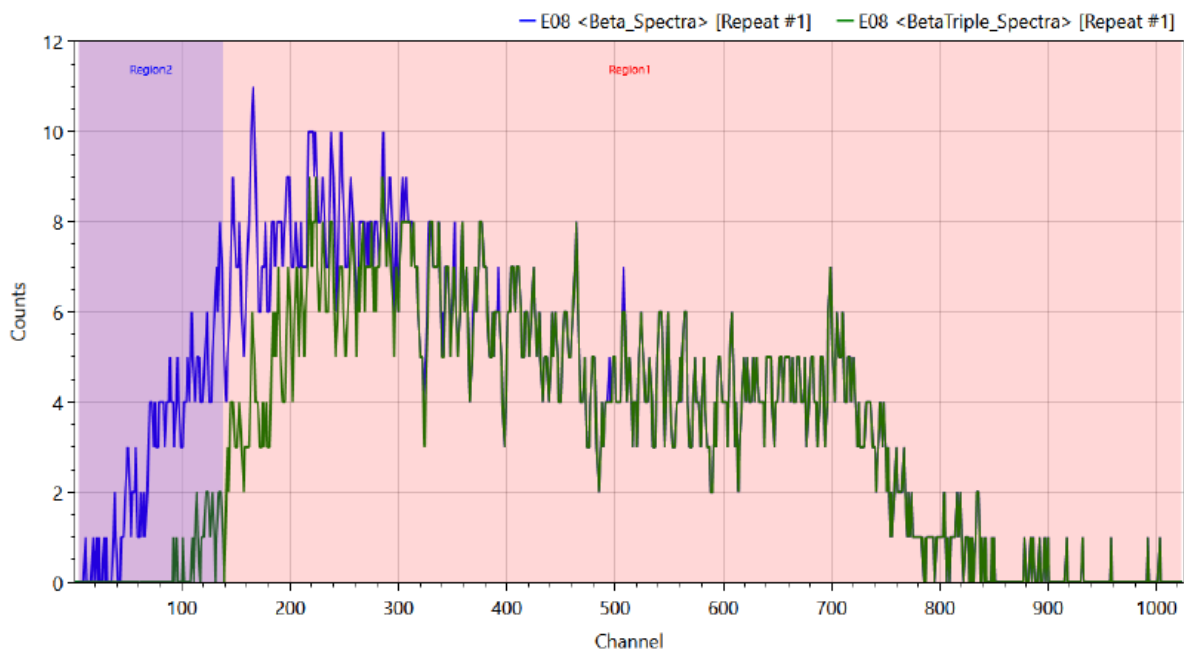
Mittaparametrit	
Measurement time	21600 sec
Maximum counts	0
Activity type	Standard
Coincidence time	35 ns
Vial repeats	1
Range repeats	1

Tuloksena saatiin kuvan 15 mukaiset arvot ja näytteen spektri:

SheetData

SampleType	Temp	Counts	Time	CPM	CPM2
Sample	17.2	3876	21600	10.7	0.969

Graphics



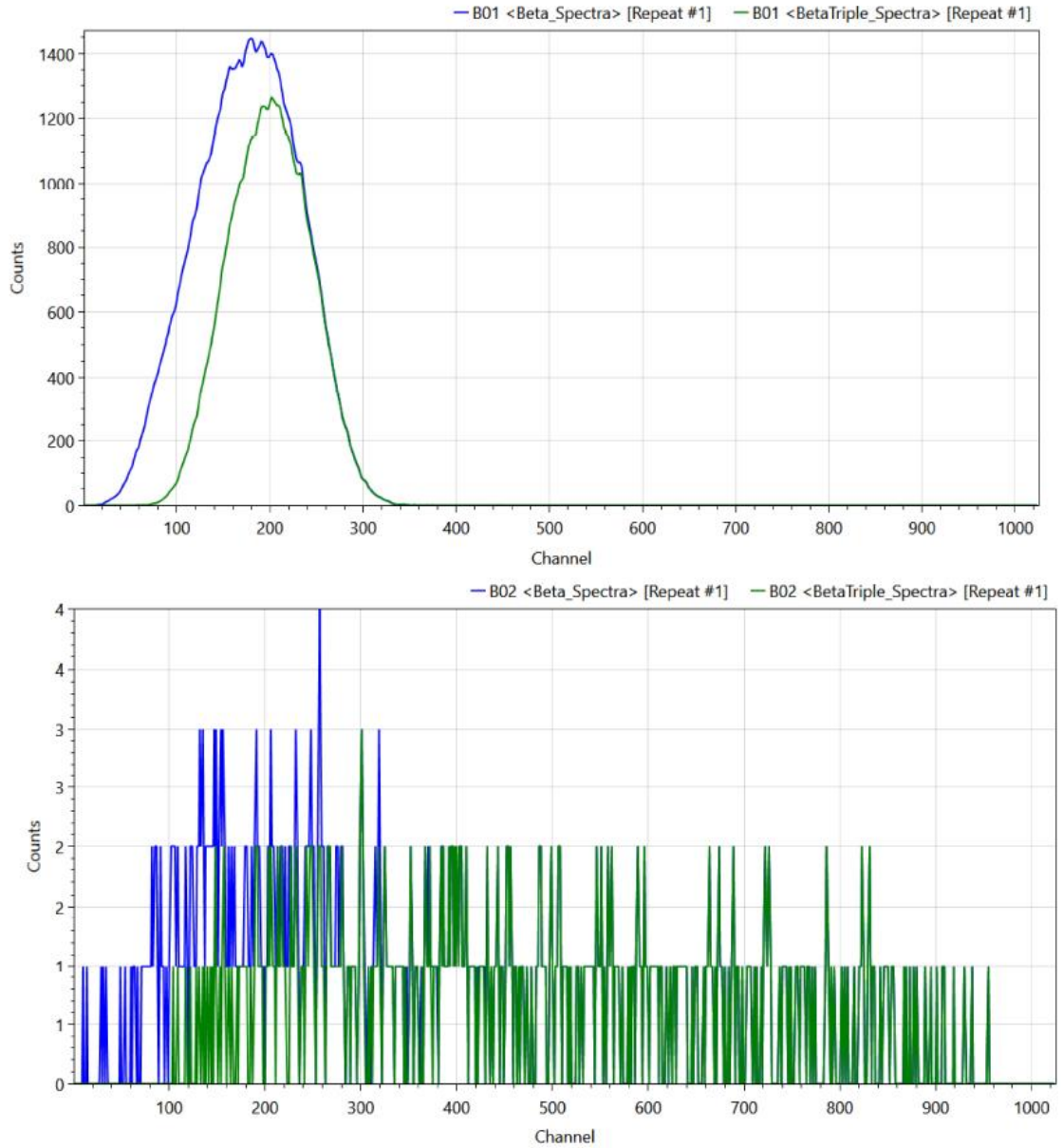
Kuva 15. Taustamittauksen spektri ja saadut arvot

Yllä esitetyn taustamittauksen lisäksi suoritettiin myös täyden mitta-alueen mittaus sammuttamattomalle MaxiLight+ nestetuikeaineesta valmistetulle näytteelle taulukossa 6. esitettyjen mittaparametrien mukaisesti positiossa B02 ja vastaavalle aktiiviselle näytteelle positiossa B01. Tuloksena saatiin kuvan 16 mukaiset arvot ja näytteiden spektrit:

SheetData

Pos	SampleType	Counts	CPM	TDCR	QPE	CPM_FullROI	CPM_65ROI	TheorDev_FullROI	TheorDev_65ROI
B01	H-3	211989.000	96026.5	0.675	289.064				
B02	Background	812.200				4.467	1.569	0.158	0.094

UQ H-3



Kuva 16. Sammuttamattomien näytteiden spektrit ja tulosarvot

3.5 Kuolleenajan korjaus ja lineaarialue

Kohdassa 2.3.3 mainittiin, että laitteiston on mahdotonta prosessoida samanaikaisia hajoamistapahtumia. Jos kaikki valomonistinputket ovat havainneet tapahtuman ja käsittelevät sitä, vallitsee laitteistossa ns. kuollut aika (*Eng. Dead time*), jonka aikana tapahtuvia hajoamisreaktioita ei rekisteröidä. Laitteisto korjaa automaattisesti tätä kuollutta aikaa korjauskertoimella, joka otetaan huomioon lopullisia tuloksia tulkitessa. Tässä osiossa verifioitiin korjauskertoimen oikeellisuus ja tuotevaatimus PR-1.12, joka käsittelee lineaarialuetta, jolla korjauskerroin toimii luotettavasti:

Taulukko 7. Kuolleenajan korjaus ja lineaarialue vaatimukset

Tunnus	Vaatus	Prioriteetti
PR-1.12	Lineaarialueen ulotuttava 3 Milj. CPM asti	Korkea

Kun laitteisto saavuttaa lineaarialueen huipun sen rekisteröimät hajoamistapahtumat tasaantuvat ensin ja putoavat sitten nolnaan. Vaikka aktiivisuus lisääntyy countsit pysyvät vakiona. Todellisuudessa näytteen aktiivisuus on niin suuri, ettei laitteisto pysty rekisteröimään niin suuria määriä yhdenaikaisia hajoamisreaktiota. Aktiivisuustason nousu voidaan nähdä kuolleenajan korjauskertoimen noususta. Etenkin matalataustaisissa nestetuikelaskimissa on poikkeuksellista mitata usean miljoonan CPM-arvon omaavia näytteitä, mutta laitespesifikaatioiden kannalta on hyvin olennaista tuntea kunkin instrumentin aktiivisuusalue, jolla analyyseja voidaan tehdä luotettavasti.

Todennäköisimmin samanaikaisia hajoamistapahtumia saadaan aikaiseksi mittaamalla jokin korkeaenerginen isotooppi, jonka tarkka puoliintumisaika tunnetaan. Tässä osiossa mitattiin ^{18}F -isotooppia sisältävä näyte, jonka puoliintumisaika on 109,7 minuuttia (L'Annunziata. 2016, 7). Korjauskerroin on mahdollista tarkistaa kirjallisuusarvoihin vertaamalla, kun tunnetaan näytteen antama CPM ajan hetkellä, josta voidaan määrittää laitteiston tuottama puoliintumisaika ($t_{1/2}$) seuraavasti:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A}$$

$$\rightarrow t_{1/2} = \frac{\lambda \ln 2}{\ln \left(\frac{A_0}{A} \right)}$$

Jossa,

A = mitatun radionuklidin aktiivisuus mittaushetkellä (CPM)

A_0 = mitatun radionuklidin aktiivisuus ajanhetkellä 0 (CPM)

λ = radioaktiivisen hajoamisen nopeusvakio

e = luonnollisen logaritmin kantaluku

(L'Annunziata 2016, 621.)

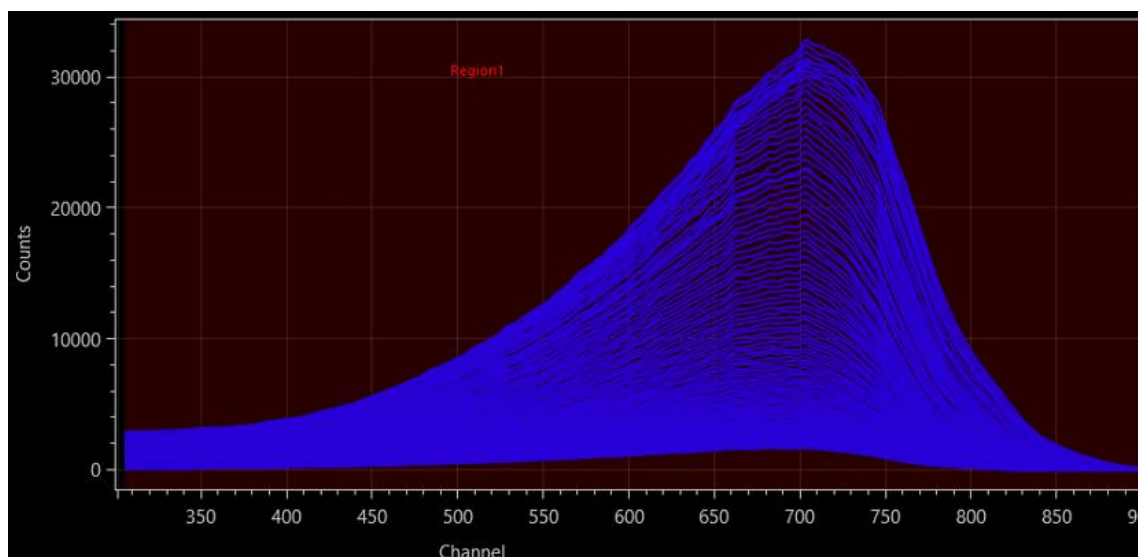
Kuolleenajan korjaus oli mahdollista verifioida suorittamalla täyden mitta-asteikon mittaus taulukon 8 mukaisilla parametreilla:

Taulukko 8. Kuolleenajan korjaus mittaparametrit

Mittaparametrit	
Measurement time	300 sec
Maximum counts	0
Activity type	Standard
Coincidence time	35 ns
Vial repeats	50
Range repeats	1

Tulokset siirrettiin Microsoft Exceliin, jossa suoritettiin kuolleenajan korjauksen tarkistus täyden mitta-asteikon tulosten perusteella kohdassa 3.5 esitetyllä kaavalla. (ks. liite 1)

Tuloksena saatiin myös ^{18}F -isotooppia sisältävän näytteen spektrit, joista voidaan tulkita kuolleenajan korjauksen lineaarialuetta:



Kuva 17. Puoliintuvan ^{18}F -isotooppia sisältävän näytteen spektrit

4 Tulosten tarkastelu

Tarkastellessa tuloksia osion 3.2 osalta voidaan huomata, että molempien näytteiden ^{14}C sekä ^3H tehokkuus ylittää vaatimuksissa asetetun rajan. Mittauksen tuottama spektri on myös kullekin isotoopille tyypillinen ja countsit sijoittuvat oletetuille kanaville.

Verrattaessa mittauksessa saatua "DPMbyCF"-arvoa NIST-sertifioitujen näytteiden ilmoitettuun todelliseen DPM-arvoon, huomataan vaihtelun (DPM_difference) olevan hyvin vähäistä. Tämän vähäisen vaihtelun perusteella todetaan laitteiston soveltavan TDCR-arvon ja korjauskertoimen yhdistelmää oikein, jolloin vaatimus PR-2.07 voidaan tulkita täyttyneeksi.

Osion 3.3 vaatimuksissa oleva PR-1.06 voidaan tulkita täyttyneeksi TDCR arvon ollessa 1,0. ^{226}Ra näytteen tasoisilla energiatasoilla voidaan todeta, että TDCR on hyvin lähellä tehokkuutta ja näin ollen päätellä, että tehokkuus on yli 95 %. ^{226}Ra ja sen tytär isotootit tuottavat hajoamistuotteenaan myös beetahiukkasia, jotka ovat osallisena tuloksena saatuun TDCR-arvoon. Todellinen tehokkuus voitaisiin määrittää mittaamalla jokin puhdas alfanäyte, jonka tarkka pitoisuus ja hajoamisvakio tunnetaan.

Alfa/beeta-erottelun numeeristen tulosten kanssa vähintään yhtä olennainen osa on visuaalinen esitys erottelusta. Kun tarkastellaan kuvia 11, 12 ja 13 voidaan huomata erottelun tuottavan selkeälukuisen spektrin kullekin näytteelle. Mitattaessa eri sammutustason, tai isotoopin sisältäviä näytteitä todetaan myös koko spektrin mahtuvan esitysalueelle. Spektreissä korkeimmat määrät countseja sijaitsevat alfa-alueiden keskellä, kuten on jokaiselle näytteelle ominaista.

Tarkastellessa ^{226}Ra isotoopin 3D-spektriä (kuva 14), voidaan muodostaa käsitys pulssien päällekkäisyyksistä ja alfa-alueen pulssikorkeuksista suhteessa beeta-alueeseen. Pulssikeskittymien sekoittumiselle ei ole mahdollista luotettavasti selvittää numeerista arvoa ^{226}Ra standardilla, mutta kuvasta 14 saadaan visuaalinen käsitys pulssien suhteesta toisiinsa.

Taustamittauksen tulosten perusteella voidaan sanoa vaatimuksen PR-1.02 täyttyvän saadun CPM-arvon ollessa 0,969. Vaatimus PR-1.02.1 ei kuitenkaan ole täyttynyt tämän mittauksen perusteella CPM-arvon ollessa 0,7 yksikköä vaatimuksessa esitetyn rajan yli. Mitattaessa sammuttamaton MaxiLight+ tausta, PR-1.02.2 täyttyy CPM-arvon ollessa 4,467.

Vaatimuksen täyttymättömyys H₂O taustan osalta voidaan siis perustella näytteen avulla. Joko nestetuikeaine tai näytteessä käytetty vesi sisältää todennäköisesti pienen määrän tritiumia, jonka laite havaitsee. On myös mahdollista, että kun näytteessä ei ole sammutusaineena toimivaa vettä, niin täyden mitta-asteikon tausta laskee. Tällöin instrumentin voidaan todeta täyttävän tuotevaatimuksen, sillä CPM-arvo on näyteriippuvainen.

Lisäksi lieventävänä tekijänä raja-arvon ylittäneelle taustamittaukselle voidaan esittää Suomen maantieteellisen sijainnin vaikutusta. Maapallon magneettinen suoja on kaikkein heikoin napa-alueilla, jolloin kosminen taustasäteily on analyysitasolla merkittävästi voimakkaampaa Pohjois-Euroopassa kuin esimerkiksi päiväntasaajalla. (USEA 2022) Suomen pinta-alasta kolmasosa kuuluu napapiiriin, jonka vuoksi Suomi luokitellaan napa-alueeksi. Tällöin on kohtuullista olettaa taustasäteilyn olevan Suomessa korkeampi muihin maihin verrattuna. Ottaen huomioon toimeksiantajan viennin keskittyvän pääosin ulkomaille koetaan mittauksen maantieteellinen sijainti lieventävänä tekijänä.

Tutkittaessa kohdassa 3.5 saatuja tuloksia on kiinnitettävä huomiota eritoten mitatun ja todellisen puoliintumisajan prosentuaaliseen erotukseen. Tulosten vaihteluväli on -1,5 % - 4,1 %. Mitä pidemmälle mittausdataa katsotaan, voidaan todeta vaihteluvälin pienentyvän. Mittauksessa käytetty ¹⁸F-isotoopista valmistettu näyte on myös nestetuikelaskennan kannalta poikkeuksellisen aktiivinen näyte sen CPM-arvon ollessa korkeimmillaan yli 3 miljoonaa. Mikäli mitattaisiin matala-aktiivisempia isotooppeja, olisi tulosten vaihteluväli huomattavasti pienempi. Tulosten perusteella voidaan päätellä kuolleenajan korjauksen toimivan oikein, sillä vaihteluväli on hyvin matala jopa poikkeuksellisen aktiivisella näytteellä. Tuotevaatimus PR-1.12 voidaan tulkita täyttyneeksi spektrin huippukohdan ylittäessä 3 miljoonaa.

Liitteenä esitetyssä Excel taulukossa ei esitetä CPM-arvoja ensimmäiselle neljälle mittaukselle, vaan tulossarakkeessa on tuloksena "Overflow". Tämä on käyttöliittymästä johtuva kokonaislukujen ylivuoto, joka johtuu puutteellisesta lähdekoodista. Lähdekoodin täydentäminen on nopea toimenpide ja kuvasta 17 voidaan siitä huolimatta todeta laitteen rekisteröivän yli kolmen miljoonan suuruisia CPM-arvoja.

5 Loppupäätelmät

Tämän opinnäytetyön lopullinen tavoite saavutettiin lähes poikkeuksetta. Toimeksiantajan tuotekehitysvaiheessa olevalle instrumentille suoritettiin onnistuneesti verifiointi sen suorituskyvyn osalta ja tuote voidaan julkaista. Sekä tuotevaatimukset, että niiden ulkopuoliset ominaisuudet täyttyivät, lukuun ottamatta täyden mitta-asteikon taustamittausta, mutta tämän vaatimuksen täyttymättömyys pystyttiin perustelemaan näytteistä riippuvaisena.

Laitteiston parissa tehdään jatkuvaa kehitystyötä ja osa tämän opinnäytetyön suoritushetkellä esiintyvistä ominaisuuksista, kuten käyttöliittymä tai laitteen ulkonäkö eivät ole välttämättä verrattavissa markkinoille julkaistavan laitteen ominaisuuksiin. Laitteiden välillä on myös vaihtelua ja nämä testit tullaan toistamaan tulevaisuudessa muilla laiteyksilöillä, jotka tuottavat mahdollisesti tässä opinnäytetyössä käytetystä laitteesta poikkeavia tuloksia.

Verifiointi suoritettiin osana tuotekehitysprosessia ja siihen valittiin työn suoritushetkellä kriittisimmät tuotevaatimukset. ULLA-nestetuikelaskimen varsinaisen julkaisun yhdessä tuotetaan kattavampi raportti koskien laitteen suorituskykyä ja tässä raportissa esitellään myös tämän opinnäytetyön ulkopuolisia suorituskykyyn liittyviä ominaisuuksia. Opinnäytetyön ulkopuolisia suorituskyvyn kannalta olennaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi alfa/beeta-erottelun prosentuaalinen väärinluokittelu, laitteen mahdollisuudet gammaisotooppimäärityksessä tai laitteen kyky mitata Tšerenkovin säteilyä.

Lähteet

DGFS e.V & Karlsruhe Institute of Technology 2018. Liquid scintillation, Measuring procedures, new developments. 2. laajennettu painos, Karlsruhe

Encyclopedia Britannica 2018. Half-life. Viitattu 27.2.2023

<https://www.britannica.com/science/half-life-radioactivity>

Eracleous, M. 2012. Introduction to astronomy – lecture 9, Penn State University.

Haaslahti, V.; Lahdenranta, M.; Raitanen, S.; Juvonen, R. & Oikari, T. 2017. Improved counting efficiency determination by core function modeling in triple to double coincidence ratio counter. LSC2017. Kööpenhamina 1.5.-5.5.2017.

Hidex E-books 2023. Liquid Scintillation Measuring Procedures - Triple Coincidence Applications. Viitattu 5.1.2023 <https://hidex.com/ebooks/liquid-scintillation-measuring-procedures/introduction/triple-coincidence-applications/>

Hogg, A. & Cook, G. 2021. Liquid scintillation counting – Past Present and Future, Cambridge university press.

Knoll, G. 2000 Radiation Detection and Measurement 3. painos. John Wiley & Sons, Inc.

L'Annunziata, M & Kessler, M. 2012 Handbook of radioactivity analysis 3. painos, luku 7 Liquid scintillation analysis: Principles and practice, Academic press.

L'Annunziata M. 2016 Radioactivity 2. painos - Introduction and history, from the Quantum to Quarks, Elsevier.

Moebius, S. & Moebius, T. 2012 Handbook of Liquid Scintillation Spectrometry, DGFS e.V & Karlsruhe institute of technology, Karlsruhe

Mäkinen, P. 2001. Handbook of Liquid Scintillation Counting. Versio 3. Turku institute of Technology, Department of Telecommunications

National Institute of Standards and Technology 2022. About NIST. Viitattu 13.2.2023 <https://www.nist.gov/about-nist>

Passo, C. & Cook, G. 1994. Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry – A Compilation of Theory and Methods, Packard Instrument Company.

Säteilyturvakeskus 2019. Mitä säteily on? Viitattu 20.12.2022 <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on>

Säteilyturvakeskus 2021. Säteilyn terveysvaikutukset. Viitattu 20.12.2022 <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/sateilyn-terveysvaikutukset>

United States Environmental Protection Agency (USEA) 2022. Cosmic radiation. Viitattu 25.1.2023 <https://www.epa.gov/radtown/cosmic-radiation#:~:text=to%20learn%20more-.About%20Cosmic%20Radiation,and%20weakest%20near%20the%20poles.>

University of Wisconsin – Milwaukee 2012. Environmental health, safety and risk management radiation safety program, Liquid scintillation counting. University of Wisconsin.

Kuolleenajan korjauksen tarkistus

SheetData							
Pos	Rpt	Time	Counts	CPM_fullROI	EndTime_seconds		
A01	1	ParserError	7429708	Overflow	ParserError	F-18	
A01	2	ParserError	7320796	Overflow	ParserError	109,7	
A01	3	ParserError	7202637	Overflow	ParserError	Half life	
A01	4	ParserError	7092434	Overflow	ParserError	fullROI	error%
A01	5	300	7621843	2854837,5	1666105192		
A01	6	300	7488365	2751375,1	1666105559		
A01	7	300	7352134	2645591,9	1666105922		
A01	8	300	7219473	2542120,8	1666106287		
A01	9	300	7085726	2448260	1666106654		
A01	10	300	6953117	2357802	1666107018		
A01	11	300	6807896	2268118,6	1666107386		
A01	12	300	6667118	2181614,4	1666107750		
A01	13	300	6522458	2096970,2	1666108116		
A01	14	300	6374028	2014192,8	1666108481	108,9	-0,7
A01	15	300	6232860	1938170,1	1666108847	108,4	-1,2
A01	16	300	6092127	1864434,5	1666109215	108,7	-0,9
A01	17	300	5957561	1794059,9	1666109580	109,1	-0,5
A01	18	300	5813603	1724198,4	1666109946	108,5	-1,1
A01	19	300	5670139	1659309,5	1666110312	108,3	-1,3
A01	20	300	5529494	1596364,9	1666110676	108,2	-1,4
A01	21	300	5388159	1534116,6	1666111042	108,0	-1,5
A01	22	300	5253922	1476036,8	1666111410	108,4	-1,2
A01	23	300	5115440	1417795,4	1666111772	108,3	-1,3
A01	24	300	5062028	1379301,4	1666112137	111,7	1,8
A01	25	300	4940032	1332721,8	1666112503	113,1	3,1
A01	26	300	4808696	1281998,4	1666112867	113,0	3,0
A01	27	300	4677280	1233492,3	1666113234	113,4	3,4
A01	28	300	4550529	1186960	1666113600	113,4	3,3
A01	29	300	4422276	1141301	1666113965	113,2	3,2
A01	30	300	4296953	1096754,3	1666114330	113,2	3,2
A01	31	300	4176211	1057500,1	1666114695	113,8	3,8
A01	32	300	4054944	1016655,6	1666115061	114,2	4,1
A01	33	300	3933821	977082,5	1666115427	110,3	0,5
A01	34	300	3816419	939755	1666115793	108,8	-0,8
A01	35	300	3702679	904860,7	1666116159	109,1	-0,5
A01	36	300	3589890	869758,5	1666116524	108,8	-0,8
A01	37	300	3481713	837212,7	1666116891	108,9	-0,7
A01	38	300	3372187	804266,6	1666117257	108,7	-0,9
A01	39	300	3266612	773925,7	1666117626	109,2	-0,4
A01	40	300	3165799	744595,9	1666117989	108,5	-1,1
A01	41	300	3066740	716881,1	1666118356	108,9	-0,7
A01	42	300	2970164	689850,3	1666118720	109,3	-0,4
A01	43	300	2872866	663172,4	1666119086	109,1	-0,5
A01	44	300	2780956	638285	1666119452	109,0	-0,6
A01	45	300	2694131	614423,5	1666119817	109,4	-0,2
A01	46	300	2603155	590551,7	1666120181	108,9	-0,7
A01	47	300	2518401	568604,6	1666120549	109,7	0,0
A01	48	300	2436313	547049,7	1666120911	109,4	-0,3
A01	49	300	2356295	526679,1	1666121277	109,7	0,0
A01	50	300	2275846	506057,1	1666121643	109,1	-0,6

Reagenssiluettelo

NIST-sertifioidut standardit				
Näyte	kBq	DPM	Exp	Valmistaja
³ H #120205	2,9	173500	09/2026	Hidex Oy
¹⁴ C #120220	1,1	67680	09/2026	Hidex Oy
²²⁶ Ra #116872	0,003133	188	08/2023	Hidex Oy

Reagenssit			
Reagenssi	Lot	Exp	Valmistaja
AquaLight+	210901	08/2025	Hidex Oy
MaxiLight+	221002	10/2025	Hidex Oy
Steriili vesi	13QBP122	09/2023	Fresenius Kabi
Tritioitu vesi	6004052	08/2025	PerkinElmer