

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie

Masterthesis

***Karakterisering van de intrinsieke hogedosisrespons van
thermoluminescentiedetectoren op basis van lithiumfluoride met toepassing op
secundaire kosmische straling in atmosferische omstandigheden***

Britt Vandezande

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie,
afstudeerrichting nucleair en medisch

PROMOTOR :

Prof. dr. Wouter SCHROEYERS

PROMOTOR :

dr. Olivier VAN HOEY

dr. Marijke DE SAINT-HUBERT

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie

Masterthesis

***Karakterisering van de intrinsieke hogedosisrespons van
thermoluminiscentiedetectoren op basis van lithiumfluoride met toepassing op
secundaire kosmische straling in atmosferische omstandigheden***

Britt Vandezande

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie,
afstudeerrichting nucleair en medisch

PROMOTOR :

Prof. dr. Wouter SCHROEYERS

PROMOTOR :

dr. Olivier VAN HOEY

dr. Marijke DE SAINT-HUBERT



KU LEUVEN

Woord vooraf

Terwijl ik hier sta aan het einde van mijn academische reis, terugblikkend op de weg die ik heb afgelegd, realiseer ik me de complexiteit van dit moment. In de duizenden woorden en een honderdtal pagina's die mijn scriptie vormen, wil ik even pauzeren om te bedanken. Want achter elk hoofdstuk, elke paragraaf, schuilt een verhaal van steun en samenwerking.

Ik wil als eerste mijn oprechte dankbaarheid uiten aan mijn mentor bij SCK CEN, Dr. Olivier Van Hoey. Zijn voortdurende begeleiding, kennis, steun en vertrouwen tijdens mijn tijd bij SCK CEN heeft een onschatbare betekenis gehad voor mij. Het was bijzonder inspirerend om te kunnen leren van de uitgebreide kennis die hij met mij heeft gedeeld. Zijn schat aan expertise opende deuren naar nieuwe inzichten en perspectieven, waardoor mijn begrip van complexe concepten werd verdiept en verrijkt. Ik ben enorm dankbaar voor de kansen die hij mij geboden heeft.

Daarnaast wil ik ook mijn dank uitspreken aan Dr. Marijke De Saint-Hubert voor de verdere opvolging van mijn thesis na de afwezigheid van Dr. Olivier Van Hoey, voor haar hulp bij het afronden en nakijken van mijn thesis, evenals voor haar assistentie bij de voorbereiding van mijn verdediging. Haar betrokkenheid en deskundige begeleiding waren van groot belang tijdens de laatste fase van mijn academische reis.

Ook wil ik graag mijn oprechte dank betuigen aan Prof. Dr. Wouter Schoeyers, mijn interne promotor. Zijn toewijding en deskundige begeleiding hebben een essentiële rol gespeeld in het succesvol afronden van mijn thesis. Zijn waardevolle lessen gedurende de academische reis hebben mijn kennis en begrip verrijkt, en zijn begeleiding heeft mij geholpen om te groeien als onderzoeker.

Ik wil mijn diepste waardering uiten voor mijn ouders. Hun onvoorwaardelijke steun, liefde en opofferingen gedurende mijn academische reis hebben een onschatbare bijdrage geleverd. Hun voortdurende aanmoediging, begrip en geloof in mij hebben me aangemoedigd om door te zetten. Ik ben dankbaar voor hun eindeloze steun en ik ben bevoorrecht om zulke geweldige ouders te hebben.

Tot slot wil ik ook Stig bedanken voor de vele waardevolle en gezellige bibsessies die het leerproces en het schrijven van deze thesis aanzienlijk hebben vergemakkelijkt. Zijn gezelschap en ondersteuning hebben een positieve invloed gehad op mijn academische reis.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract in het Nederlands	11
Abstract in English	13
Hoofdstuk 1: Inleiding	15
1.1 Situering	16
1.2 Probleemstelling.....	17
1.3 Doelstellingen.....	18
1.4 Algemene methode.....	19
Hoofdstuk 2: Bronnenstudie	21
2.1 Dosimetrie en dosimetrische eenheden	22
2.1.1 Geabsorbeerde dosis.....	23
2.1.2 Kerma	25
2.2 Thermoluminescente detectoren	26
2.2.1 Type detectoren	26
2.2.2 Principe.....	27
2.2.3 Gloeicurven SCK CEN	28
2.3 Dosisrespons thermoluminescente detectoren	34
2.3.1 Methode en materialen van de onderzoeksgroepen	34
2.3.2 Resultaten literatuurstudie dosisrespons	36

2.4	Microdosimetrische model	38
2.4.1	Zwaar geladen deeltjes	39
2.4.2	Fotonen.....	42
2.5	Omgevingsdosimetrie.....	44
2.5.1	Kosmische straling	44
2.5.2	TLD's in omgeving en ruimte	47
Hoofdstuk 3: Correctieprotocol voor de intrinsieke dosisresponsdata		49
3.1	Methode.....	50
3.1.1	Niet-lineariteiten reader.....	50
3.1.2	Heranalyse met GlowFit.....	52
3.1.3	Heranalyse met hoofdpijkmaximum	54
3.2	Resultaten en discussie.....	55
3.2.1	Niet-lineariteiten reader.....	55
3.2.2	Heranalyse met GlowFit.....	57
3.2.3	Heranalyse met hoofdpijkmaximum	67
3.3	Conclusie.....	72
Hoofdstuk 4: Dosisvoorspelling bij omgevingsdosimetrie		75
4.1	Methode.....	76
4.1.1	TLD's	76
4.1.2	Modellering van de TLD-respons	78
4.2	Resultaten en discussie.....	86
4.2.1	Simulaties via EXPACS	86
4.2.2	Experimentele data.....	97
4.3	Conclusie.....	101
Bronnenlijst.....		103

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1: Deconvolutieparameters MCP-N</i>	<i>30</i>
<i>Tabel 2: Deconvolutie parameters MTT-7 en MTS-N</i>	<i>31</i>
<i>Tabel 3: Methode IFJ</i>	<i>35</i>
<i>Tabel 4: Methode SCK CEN</i>	<i>35</i>
<i>Tabel 5: Dosissen per set</i>	<i>36</i>
<i>Tabel 6: TLD-typen ÚFJ</i>	<i>76</i>
<i>Tabel 7: Dosisbijdragen secundaire kosmische straling MCP- en MTS-detectoren op vliegniveau</i>	<i>86</i>
<i>Tabel 8: Experimentele warden vliegniveau</i>	<i>97</i>

Lijst van figuren

<i>Figuur 1: Geabsorbeerde dosis</i>	24
<i>Figuur 2: Kerma</i>	25
<i>Figuur 3: Microscopisch niveau van TLD-bestraling en -uitlezing</i>	27
<i>Figuur 4: Gloeicurven MCP-N</i>	29
<i>Figuur 5: Deconvolutie MCP-N gloeicurve</i>	30
<i>Figuur 6: Gloeicurven MTT-7</i>	31
<i>Figuur 7: Deconvolutie MTT-7 gloeicurve</i>	32
<i>Figuur 8: Gloeicurven MTS-N</i>	33
<i>Figuur 9: Dosisrespons IFJ en SCK CEN</i>	37
<i>Figuur 10: Relatieve luminescentie-efficiëntie MTS</i>	39
<i>Figuur 11: Relatieve luminescentie-efficiëntie MCP</i>	40
<i>Figuur 12: Relatieve luminescentie-efficiëntie MTT</i>	41
<i>Figuur 13: Relatieve air kerma-respons van LiF:Mg,Ti (MTS)-detectoren als functie van de fotonenergie</i>	42
<i>Figuur 14: Relatieve luchtkerma-respons van LiF:Mg,Cu,P (MCP)-detectoren als functie van de fotonenergie</i>	43
<i>Figuur 15: Van Allen Belts</i>	46
<i>Figuur 16: Lineariteitsindex MCP-N bij 1°C/s</i>	50
<i>Figuur 17: Lineariteitsindex MCP-N bij 10°C/s</i>	50
<i>Figuur 18: Lineariteitsindex MTT-7 bij 1°C/s</i>	50
<i>Figuur 19: Lineariteitsindex MTT-7 bij 10°C/s</i>	50
<i>Figuur 20: Lineariteitsindex MTS-N bij 1°C/s</i>	51
<i>Figuur 21: Lineariteitsindex MTS-N bij 10°C/s</i>	51
<i>Figuur 22: Gemiddelde gloeicurve voor MCP-N 1°C/s en 1 Gy</i>	51
<i>Figuur 23: Instellingen GlowFit</i>	53
<i>Figuur 24: Lineariteitsindexen in functie van de piekwaarde voor MCP-N, MTT-7 en MTS-N voor uitleessnelheden 1°C/s en 10°C/s</i>	55
<i>Figuur 25: Piekwaarde in functie van de dosis voor MCP-N</i>	56
<i>Figuur 26: Piekwaarde in functie van de dosis voor MTT-7</i>	56
<i>Figuur 27: Piekwaarde in functie van de dosis voor MTS-N</i>	57
<i>Figuur 28: Reguliere analyse met GlowFit voor MCP-N</i>	58
<i>Figuur 29: Reguliere analyse met GlowFit voor MTT-7</i>	59
<i>Figuur 30: Reguliere analyse met GlowFit voor MTS-N</i>	60
<i>Figuur 31: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van ROI en GlowFit</i>	61

<i>Figuur 32: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN</i>	61
<i>Figuur 33: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTT-7 op basis van ROI en GlowFit</i>	62
<i>Figuur 34: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTT-7 op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN</i>	63
<i>Figuur 35: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS-N op basis van ROI en GlowFit</i>	64
<i>Figuur 36: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS-N op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN</i>	65
<i>Figuur 37: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata IFJ GlowFit</i>	66
<i>Figuur 38: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata SCK CEN GlowFit</i>	66
<i>Figuur 39: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata SCK CEN ROI</i>	67
<i>Figuur 40: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van ROI en hoofdpijkmaximum</i>	68
<i>Figuur 41: Intrinsieke dosisresponsdata MCP-N op basis van hoofdpijkmaximum voor IFJ en SCK CEN</i>	68
<i>Figuur 42: Intrinsieke dosisresponsdata MTT-7 op basis van ROI en hoofdpijkmaximum</i>	69
<i>Figuur 43: Intrinsieke dosisresponsdata MTS-N op basis van ROI en hoofdpijkmaximum</i>	70
<i>Figuur 44: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS op basis van hoofdpijkmaximum voor IFJ en SCK CEN</i>	71
<i>Figuur 45: Ingegeven parameters vliegniveau in Praag</i>	80
<i>Figuur 46: Fluentie-energiespectra op vliegniveau</i>	80
<i>Figuur 47: Ingegeven parameters omgevingsdosimetrie SCK CEN</i>	81
<i>Figuur 48: Fluentie-energiespectra op grondniveau</i>	82
<i>Figuur 49: Fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF conversiefactoren voor neutronen, fotonen, protonen, elektronen en positronen, muonen en pionen</i>	83
<i>Figuur 50: Relatieve luminescentie-efficiënties voor neutronen, fotonen, protonen, elektronen en positronen, muonen en pionen</i>	85
<i>Figuur 51: Gemeten dosistempo's op verschillende vlieghoogten</i>	87
<i>Figuur 52: Gemeten dosistempo's op verschillende breedtegraden</i>	88
<i>Figuur 53: Relatieve dosisverdeling secundaire kosmische straling MCP- en MTS-detectoren vliegniveau</i>	90
<i>Figuur 54: Relatieve dosisverdeling secundaire kosmische straling MCP-N-detectoren grondniveau</i>	92
<i>Figuur 55: Totale dosistempo's secundaire kosmische straling op grondniveau doorheen de jaren</i>	93
<i>Figuur 56: Elfjarige zonnecyclus op basis van het aantal zonnevlekken</i>	94
<i>Figuur 57: Effectieve dosistempo's in functie van de hoogte</i>	95
<i>Figuur 58: Effectieve-dosistempo's als gevolg van kosmische straling als functie van de hoogte (berekend met de CARI-6-code voor de regio São José dos Campos, SP, voor januari 2008)</i>	96
<i>Figuur 59: Vergelijking gesimuleerde dosis met EXPACS en experimentele dosis</i>	98
<i>Figuur 60: Vergelijking experimentele dosistempo's en gesimuleerde dosistempo's via EXPACS</i>	99

Verklarende woordenlijst

Cu	Koper
EXPACS	EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum
FOM	Figure of merit
GCR	Galactic cosmic ray
ICRP	Internationale Commissie voor Stralingsbescherming
IFJ	Instituut voor Kernfysica in Krakau, Polen
ISS	International Space Station
Kerma	Kinetic Energy Released per unit off Mass
LET	Linear energy transfer
Li-6	Lithium-6 abundantie
Li-7	Lithium-7 abundantie
Li-N	Natuurlijk lithium
LiF TLD's	Lithiumfluoride thermoluminescente detectoren
MCP	Lithiumfluoride thermoluminescente detectoren met LiF:Mg,Cu,P dopering
Mg	Magnesium
MTS	Lithiumfluoride thermoluminescente detectoren met gesinterde LiF:Mg,Ti dopering
MTT	Lithiumfluoride thermoluminescente detectoren met niet gesinterde LiF:Mg,Ti dopering
P	Fosfor
PHITS	Particle and Heavy Ion Transport Code System
PM-buis	Photomultiplier-buis
ROI	Region of intrest
SCK CEN	Studiecentrum voor Kernenergie in Mol, België
SPE	Solar particle events
Ti	Titanium
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Abstract in het Nederlands

Lithiumfluoride thermoluminescente detectoren (LiF TLD's) worden vaak toegepast in metingen voor gemengde hoogenergetische stralingsvelden zoals de ruimte en hadrontherapie. De resultaten van deze metingen zijn echter lastig te interpreteren, omdat LiF TLD's een verminderde efficiëntie hebben voor straling met hogere ionisatiedichtheid. Dit onderzoek modelleert de TLD-respons van zeven typen LiF TLD's voor secundaire kosmische straling in de aardatmosfeer op diverse hoogtes.

Op vliegniveau worden zes TLD-typen geanalyseerd, namelijk LiF:Mg,Ti (MTS) en LiF:Mg,Cu,P (MCP) met variërende Li-abundanties, terwijl op grondniveau MCP met natuurlijke Li-abundantie (MCP-N) wordt onderzocht. Eerst worden gloeicurven van MCP-N-, MTT-7- en MTS-N-detectoren na blootstelling aan Co-60-gammastraling geanalyseerd met GlowFit om de intrinsieke dosisresponsdata te verkrijgen, die vervolgens gebruikt worden voor de bepaling van relatieve luminescentie-efficiënties. EXPACS, een Exceltool gebaseerd op PHITS-Monte Carlo-stralingstransportsimulaties, voorspelt nadien de fluentie-energiespectra van secundaire kosmische straling op diverse hoogtes en datums. Via conversiefactoren voor fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF en relatieve luminescentie-efficiënties wordt tot slot de TLD-respons verkregen.

Op vlieghoogte komt 89% van de dosis van elektronen, positronen en protonen, terwijl muonen op grondniveau de grootste bijdrage leveren. Dit onderzoek bevestigt dat de respons van LiF-detectoren goed kan worden voorspeld via EXPACS.

Abstract in English

Lithium fluoride thermoluminescent detectors (LiF TLDs) are often used in measurements for mixed high-energy radiation fields such as space and hadron therapy. However, the results of these measurements are difficult to interpret because LiF TLDs have reduced efficiency for radiation with higher ionization densities. This study models the TLD response of seven types of LiF TLDs to secondary cosmic rays in the Earth's atmosphere at various altitudes.

At flight level, six TLD types are analyzed, namely LiF:Mg,Ti (MTS) and LiF:Mg,Cu,P (MCP) with varying Li abundances, while at ground level MCP with natural Li abundance (MCP-N) is investigated. First, glow curves from MCP-N, MTT-7 and MTS-N detectors after exposure to Co-60 gamma radiation are analyzed with GlowFit to obtain intrinsic dose response data, which are then used to determine relative luminescence efficiencies. EXPACS, an Excel tool based on PHITS-Monte Carlo radiation transport simulations, then predicts the fluence energy spectra of secondary cosmic rays at various altitudes and dates. Finally, via conversion factors for fluence to absorbed dose in LiF and relative luminescence efficiencies, the TLD response is obtained.

At flight altitude, 89% of the dose comes from electrons, positrons and protons, while muons are the largest contributors at ground level. This study confirms that the response of LiF detectors can be well predicted via EXPACS.

Hoofdstuk 1
Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de context geschetst waarin dit onderzoek naar dosimetrie en het gebruik van thermoluminescentiedetectoren (TLD's) plaatsvindt. Vervolgens wordt de probleemstelling van het onderzoek uiteengezet, waarbij de uitdagingen en beperkingen van het gebruik van LiF TLD's in dosimetrische metingen worden besproken.

Daarnaast worden de doelstellingen van het onderzoek gepresenteerd, die gericht zijn op het verbeteren van het begrip en de toepassing van LiF TLD's, vooral in het kader van hoge dosissen fotonen en omgevingsstralingsmonitoring. Tot slot wordt de algemene methodologie van het onderzoek beschreven, inclusief de stappen die zullen worden ondernomen om de gestelde doelstellingen te bereiken, zoals de ontwikkeling van een correctieprotocol voor hoge fotondosissen en de validatie van luminescentie-efficiëntiemodellen.

Kortom, dit hoofdstuk biedt een overzicht van de achtergrond, probleemstelling, doelstellingen en methodologie van het onderzoek, waarmee de basis wordt gelegd voor de verdere gedetailleerde bespreking en analyse in de volgende hoofdstukken.

1.1 Situering

Het SCK CEN is een innovatief onderzoekscentrum rond de vreedzame toepassingen van kernenergie en ioniserende straling in België. Het speelt een belangrijke rol in verschillende activiteiten gaande van de productie van nieuwe radiofarmaceutica voor kankertherapieën, inclusief eigen kankeronderzoekslijnen, tot onderzoek naar de berging van radioactief afval. Het onderzoeksdomein waarin deze thesis zich situeert is dosimetrie. Dosimetrie is een breed onderwerp en omvat een verscheidenheid aan toepassingen [1]. Dit onderzoek richt zich uitsluitend op thermoluminescentiedetectoren (TLD's) op basis van lithiumfluoride (LiF). In dit onderzoek worden drie typen LiF TLD's gebruikt: hooggevoelige LiF:Mg,Cu,P (MCP-N), standaard LiF:Mg,Ti (MTS-N) en een andere versie van LiF:Mg,Ti (MTT-7) die een gewijzigde activatorsamenstelling heeft en een verhoogde hoge-LET-respons [2].

LiF TLD's zijn waardevolle instrumenten voor het controleren en documenteren van stralingsdosissen ontvangen door werknemers op afdelingen radiotherapie, medische beeldvorming, interventionele radiologie en nucleaire geneeskunde, waar medisch personeel is toegewezen aan stralingsbescherming. Werknemers in de gezondheidszorg die LiF TLD-badges dragen, kunnen hun blootstellingsniveaus controleren en ervoor zorgen dat de dosis onder de veilige limieten blijft die door de regelgeving zijn vastgesteld. Proactieve stralingscontrole vermindert potentiële gezondheidsrisico's door langdurige of overmatige blootstelling aan ioniserende straling. Om dezelfde reden zijn TLD's ook belangrijk bij het monitoren van kosmische omgevingsstraling [3].

Daarnaast worden LiF TLD's gebruikt in omgevingsdosimetrie, een belangrijk veld dat de blootstelling aan straling in de leefomgeving nauwkeurig meet en analyseert. In dit domein worden LiF TLD's ingezet om de stralingsdosissen te monitoren die voortkomen uit natuurlijke en kunstmatige bronnen, zoals kosmische straling en radioactieve isotopen. Deze metingen zijn essentieel om te zorgen voor de veiligheid van mensen die zich in gebieden met verhoogde stralingsniveaus bevinden, zoals luchthavens, hooggebergten, en bepaalde industriële locaties. LiF TLD's worden gekenmerkt door hun hoge gevoeligheid en nauwkeurigheid, waardoor ze effectief zijn in het detecteren van zowel lage als hoge LET (linear energy transfer) straling. Dit maakt ze bijzonder geschikt voor omgevingsdosimetrie, waar ze helpen bij het evalueren van de variabiliteit van stralingsniveaus onder verschillende omgevingsomstandigheden. Door de stralingsdosissen continu te monitoren, kunnen potentiële risico's tijdig worden geïdentificeerd en kunnen beschermende maatregelen worden genomen om de blootstelling te minimaliseren.

Het nauwkeurig meten van de stralingsdosissen die mensen ontvangen in verschillende omgevingen is cruciaal om de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling te begrijpen en te beheersen. LiF TLD's spelen een kritieke rol in deze context door betrouwbare en reproduceerbare dosismetingen te leveren. Hiermee wordt de veiligheid van werknemers, reizigers, en de algemene bevolking verbeterd door ervoor te zorgen dat de blootstelling aan straling binnen aanvaardbare grenzen blijft. Dit onderzoek richt zich ten eerste op het gebruik van LiF TLD's in omgevingsdosimetrie.

1.2 Probleemstelling

LiF TLD's worden vaak gebruikt voor dosimetrische metingen in medische toepassingen omdat ze passief, compact, goedkoop, gebruiksvriendelijk, gevoelig en weefselequivalent zijn. Voor sommige toepassingen kan de interpretatie van LiF TLD-metingen echter een uitdaging zijn. Voor zeer hoge dosissen (boven 1 Gy) kan de respons van het dosimetrische systeem niet-lineair worden door de intrinsieke dosisrespons van de LiF TLD's en door niet-lineariteiten van de TLD-lezer [4].

Eerder onderzoek heeft de intrinsieke dosisrespons van LiF TLD's al onderzocht op basis van een gegeven *region of interest* (ROI) [5]. Voor de bepaling van de intrinsieke dosisrespons verschenen er meer pieken in de gloeicurve naarmate de dosis op de detectoren toenam. In de aanwezigheid van een toenemende bijdrage van de andere pieken bleek integratie over een gegeven ROI niet langer voldoende nauwkeurig maar dienden verschillende correcties te worden toegepast voor een nauwkeuriger resultaat. Daarnaast is er al onderzoek gedaan naar de niet-lineariteit van het uitleesapparaat. Hierop moeten ook correcties worden toegepast voor een nauwkeuriger resultaat [4].

Ook hebben LiF TLD's een verminderde efficiëntie voor fotonen met lage energie en straling met een hogere ionisatiedichtheid zoals protonen en zwaardere ionen. Dit effect is vooral belangrijk bij omgevingsdosimetrie. Voor het interpreteren van de metingen is nauwkeurige kennis nodig over de luminescentie-efficiëntie van LiF TLD's voor protonen en zwaardere ionen vanwege de complexe stralingsvelden die optreden bij omgevingsdosimetrie [3]. Deze efficiëntie wordt berekend met behulp van het Microdosimetrische $d(z)$ -model dat de macroscopische dosisrespons van de TLD's als invoer gebruikt [3]. Daarom is nauwkeurige kennis van de intrinsieke macroscopische dosisrespons van LiF TLD's vereist. Er zijn echter slechts beperkte gegevens beschikbaar voor sommige LiF TLD-typen, maar niet voor alle TLD-typen. Bovendien is bevestiging en uitbreiding van bestaande gegevens belangrijk om de nauwkeurigheid van de metingen te vergroten. De resultaten van deze studie zullen ook toepasbaar zijn op andere complexe stralingsvelden zoals kosmische achtergrondstraling die belangrijk is voor het monitoren van omgevingsstraling.

1.3 Doelstellingen

Het overkoepelende doel van het project is om het begrip en gebruik van LiF TLD's in dosimetrie te verbeteren, in het bijzonder met betrekking tot blootstelling aan hoge dosissen fotonen en omgevingsstralingsmonitoring. Door de uitgebreide beoordeling van de intrinsieke dosisrespons, de ontwikkeling van voorspellende luminescentie-efficiëntiemodellen, validatie via experimenten en de ontwikkeling van een correctieprotocol voor hoge fotondosissen, beoogt het onderzoek de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van stralingsdosismetingen met LiF TLD's over een spectrum van praktische scenario's te verbeteren.

De doelstellingen van het project omvatten een veelzijdige benadering om het begrip en de toepassing van LiF TLD's in dosimetrie te bevorderen. Voordat de doelstellingen bereikt worden zal *Hoofdstuk 2: Bronnenstudie* een diepgaande verkenning van dosimetrie en dosimetrische eenheden bespreken, gevolgd door de werking van thermoluminescente detectoren en een analyse de dosisrespons. Het gaat ook in op microdosimetrische modellen en omgevingsdosimetrie, met speciale aandacht voor kosmische straling en het gebruik van TLD's voor omgevingsmonitoring. Over het algemeen geeft dit hoofdstuk een samenvatting van alle begrippen om *Hoofdstuk 3: Correctieprotocol voor de intrinsieke dosisresponsdata* en *Hoofdstuk 4: Dosisvoorspelling bij omgevingsdosimetrie* te ondersteunen.

Een van de doelstellingen is het ontwikkelen van een correctieprotocol voor LiF TLD-metingen van hoge fotondosissen om zo correcte intrinsieke dosisresponsdata te verkrijgen. *Hoofdstuk 3: Correctieprotocol voor de intrinsieke dosisresponsdata* bespreekt de systematische procedure die wordt ontwikkeld om te corrigeren voor niet-lineariteiten of onnauwkeurigheden in LiF TLD-metingen bij blootstelling aan hoge fotondosissen. Het correctieprotocol zal ontworpen worden om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van dosismetingen te verbeteren, vooral in scenario's waar hoge fotondosissen voorkomen.

De volgende doelstelling is het voorspellen van de luminescentie-efficiëntie van LiF TLD's voor protonen, zwaardere ionen en fotonen met lage energie op basis van de intrinsieke dosisresponsdata. Deze stap valt buiten het werk van de thesis, maar duidt het belang aan waarom het correctieprotocol opgesteld dient te worden. Met behulp van deze verkregen relatieve luminescentie-efficiëntie kunnen de resultaten van TLD-metingen bij blootstelling aan verschillende soorten straling worden voorspeld.

Tot slot richt de laatste doelstelling zich op het valideren van de voorspelde luminescentie-efficiëntie door metingen en simulaties in complexe gemengde stralingsvelden zoals kosmische achtergrondstraling. *Hoofdstuk 4: Dosisvoorspelling bij omgevingsdosimetrie* valideert dus de toepasbaarheid via simulaties in complexe stralingsomgevingen zoals kosmische achtergrondstraling, met speciale nadruk op stralingsmonitoring in het milieu.

1.4 Algemene methode

Het eerste werkpakket omvat de ontwikkeling van het correctieprotocol. Om het correctieprotocol te ontwikkelen werden reeds experimenten uitgevoerd om het dosisresponsgedrag van LiF TLD's te karakteriseren, met een specifieke focus op hoge dosissen fotonen. Hierbij werden enerzijds de experimentele gegevens omtrent de intrinsieke niet-lineariteiten van de drie types LiF TLD's verkregen en anderzijds werden de niet-lineariteiten van de TLD-reader verkregen [4], [5]. Het doel in dit werkpakket is deze experimentele data nauwkeurig te analyseren. Deze doelstelling omvat verschillende stappen.

In de eerste stap van de analyse van het correctieprotocol wordt de relatie tussen de lineariteitsindexen en de piekwaarde in de gloeicurve in nanoampère onderzocht. De lineariteitsindexen werden in eerder onderzoek bepaald [4]. Als deze verkregen curven er onstabiel uitzien en de lineaire relatie niet wordt gehandhaafd, kan dit duiden op niet-lineaire effecten die worden gegenereerd door de Harshaw-lezer bij lagere dosisniveaus. Als deze niet-lineaire effecten worden waargenomen onder 1 Gy, wordt aanbevolen om het experiment te herhalen met meer dosimeters en meer tussenliggende meetpunten. Op deze manier kunnen onderzoekers de niet-lineariteit beter karakteriseren en begrijpen vanaf welke dosisniveaus de Harshaw-lezer niet-lineaire effecten begint te produceren. Dit proces is essentieel om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de dosimetrie te waarborgen, vooral bij toepassingen waarbij stralingsdosering kritisch is.

Na het vaststellen van deze respons wordt verder onderzocht of er intrinsieke niet-lineariteitseffecten optreden. In de tweede stap van de analyse van het correctieprotocol zullen de gloeicurves opnieuw worden onderzocht om op deze manier de structurele veranderingen als gevolg van de mate van bestraling te identificeren. De gloeicurve zullen worden opgesplitst in verschillende pieken om de bijdrage van elke piek afzonderlijk te onderzoeken. De deconvolutie van de gloeicurves zal gedaan worden door de software GlowFit. Op deze manier wordt een correcte intrinsieke respons van elk type LiF TLD vastgesteld, rekening houdend met factoren zoals lineariteit en verzadigingseffecten.

Het volgende werkpakket valt buiten deze thesis, maar is wel belangrijk om kort vernoemd te hebben. Dit werkpakket omvat het voorspellen van de luminescentie-efficiëntie van LiF TLD's voor protonen, zwaardere ionen en fotonen met lage energie. Om dit te bereiken werden reeds voorspellende modellen ontwikkeld die gebaseerd zijn op microdosimetrische principes. Deze modellen schatten de luminescentie-efficiëntie van LiF TLD's voor een reeks stralingstypes die voorkomen bij omgevingsdosimetrie. De geanalyseerde macroscopische dosisresponsgegevens van LiF TLD's, die werden verkregen uit het eerste werkpakket, zullen geïntegreerd worden in het microscopische model om rekening te houden met intrinsieke eigenschappen die de luminescentie-efficiëntie beïnvloeden [3]. Hieruit wordt een nieuwe relatieve luminescentie-efficiëntie verkregen die vervolgens toegepast kan worden om de resultaten van de TLD-metingen te voorspellen bij blootstelling aan verschillende soorten straling.

Het laatste werkpakket omvat de toepassing op omgevingsdosimetrie. Hiervoor zijn reeds simulatiedata van het fluentie-energiespectrum ter beschikking voor verschillende types straling. Deze simulatiedata kunnen dan geconvolueerd worden met fluentie naar dosisconversiefactoren van simulaties en de relatieve luminescentie-efficiëntie om de TLD-resultaten te voorspellen. De resultaten van deze voorspelling worden dan vergeleken met de experimentele metingen die reeds zijn uitgevoerd.

Hoofdstuk 2
Bronnenstudie

Hoofdstuk 2 biedt een diepgaande verkenning van verschillende aspecten van dosimetrie en dosimetrische eenheden. Het begint met het uitleggen van de basisbegrippen, zoals geabsorbeerde dosis en kerma, om een solide basis te leggen voor het begrijpen van stralingsinteracties en energieoverdracht.

Vervolgens wordt de focus verlegd naar thermoluminescente detectoren, waarbij verschillende typen detectoren, hun werkingsprincipes en de belangrijke gloeicurven worden besproken die in dit onderzoek gebruikt zullen worden. Dit wordt gevolgd door een analyse van dosisrespons, waarbij verschillende onderzoeksmethoden en literatuurresultaten worden verkend. Het hoofdstuk gaat verder met het bespreken van geavanceerdere concepten, zoals microdosimetrische modellen en omgevingsdosimetrie, met speciale aandacht voor kosmische straling en het gebruik van TLD's voor omgevingsmonitoring.

2.1 Dosimetrie en dosimetrische eenheden

Dosimetrie is de wetenschap van het kwantitatief vaststellen van de stralingsdosis die een organisme of een object absorbeert. In eenvoudige bewoordingen vertegenwoordigt dit de hoeveelheid energie die per massa-eenheid wordt ontvangen door een organisme of voorwerp na blootstelling aan ioniserende straling [6]. De belangrijkste grootheden in dosimetrie zijn effectieve dosis en orgaan equivalente dosis omdat die rechtstreeks de risico's op gezondheidseffecten kwantificeren. Die grootheden bevatten naast energie per massa ook nog wegingsfactoren. Deze thesis beperkt zich tot geabsorbeerde dosis en kerma omdat deze grootheden van belang zijn voor metingen met losse TLD's wat van toepassing is in deze thesis. Het doel van dosimetrie is om het gezondheidseffect van straling te schatten, voorspellen of beperken.

Dit effect moet worden gemeten omdat ioniserende straling chemische bindingen kan breken, vrije radicalen kan maken en biologische structuren zoals DNA kan beschadigen. Biologische gevolgen van deze fysieke gebeurtenissen zijn onder meer een grotere kans op het ontwikkelen van kanker, celdood, weefselschade, orgaanfalen en dood. In elektronica kan een elektronische component falen als gevolg van straling of chemische degradatie. Deze effecten kunnen paradoxaal genoeg ook voordelig zijn. Radiotherapie is bijvoorbeeld gebaseerd op celdood die wordt veroorzaakt door straling in een tumor [7].

Dosimetrie is een belangrijk proces in de radioprotectie dat gericht is op het meten en beoordelen van stralingsdosissen in verscheidene toepassingen. Op deze manier kan het gezondheidsrisico dat gepaard gaat met blootstelling aan straling gekwantificeerd worden. Het Wetenschappelijk Comité van de Verenigde Naties over de effecten van atomaire straling benadrukte dat het kwantificeren van deze risico's essentieel is om de gezondheid van mensen te beschermen en passende maatregelen te nemen om hen tegen stralingsgerelateerde gevaren te beschermen [8].

Het monitoren en beheersen van blootstelling aan straling is afhankelijk van dosimetrie. Professionals in de gezondheidszorg, de nucleaire industrie en andere sectoren die met straling worden geconfronteerd, kunnen met behulp van dosimetrie naleving van dosislimieten aantonen en voldoen aan wettelijke eisen en de stralingsdosis zo laag mogelijk proberen houden volgens het ALARA-principe door het nauwkeurig meten van stralingsdosissen [9]. Dit is van cruciaal belang om het milieu, het publiek en de werknemers te beschermen tegen de schadelijke effecten van straling. De Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) stelt dat dosimetrie een belangrijk instrument is om veiligheidsregels en -normen na te leven [10]. Nauwkeurige metingen en analyse van stralingsdosissen helpen beleidsmakers en regelgevende instanties om stralingsrisico's te verminderen en mensen en gemeenschappen te beschermen.

Samenvattend, dosimetrie is een belangrijk onderdeel van radioprotectie omdat het niet alleen helpt bij het begrijpen en beheersen van stralingsrisico's, maar ook helpt bij het naleven van wetgeving en het beschermen van de gezondheid en veiligheid van mensen en de samenleving als geheel.

2.1.1 Geabsorbeerde dosis

De geabsorbeerde dosis is een fundamentele grootheid in stralingsdosimetrie en is van toepassing op zowel indirecte als directe ioniserende stralingstypes. Indirecte ioniserende straling betekent dat de energie in twee stappen aan materie wordt overgedragen. In de eerste stap geeft de indirecte ioniserende straling (ongeladen deeltjes) energie door als kinetische energie aan secundaire geladen deeltjes. Dit resulteert in kerma en wordt uitgelegd in alinea 1.2. In de tweede stap geven deze geladen deeltjes een groot deel van hun kinetische energie over aan het medium door continue excitatie en ionisatie, wat uiteindelijk resulteert in de geabsorbeerde dosis [6].

Directe ioniserende straling betekent dat geladen deeltjes een groot deel van hun kinetische energie rechtstreeks aan het medium overdragen, wat resulteert in geabsorbeerde dosis. In tegenstelling tot indirecte ioniserende straling, waarbij tussenstappen met secundaire geladen deeltjes betrokken zijn, deponeren directe ioniserende straling hun energie rechtstreeks in het medium, wat leidt tot geabsorbeerde dosis [6].

De geabsorbeerde dosis D wordt gedefinieerd als de gemiddelde *energy imparted* $d\varepsilon$ naar een microscopische massa dm , welke is gemeten in joules per kilogram, wat equivalent is aan de eenheid Gray [6]. Vergelijking (1) toont dit in formule vorm. De geabsorbeerde dosis beschrijft dus de hoeveelheid energie die daadwerkelijk wordt geabsorbeerd door het materiaal per massa-eenheid als gevolg van ioniserende straling.

$$D = \frac{\overline{d\varepsilon}}{dm} \quad (1)$$

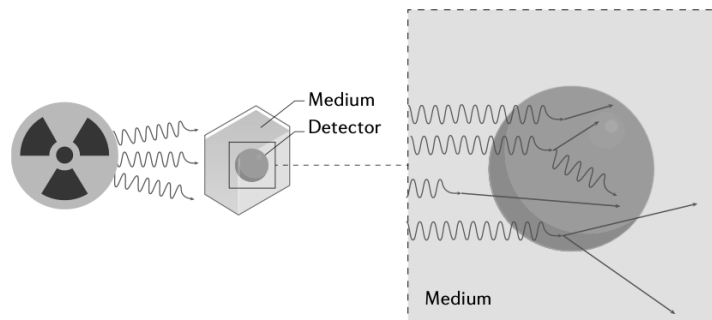
De term *energy imparted* ε verwijst naar de totale energie die in een klein volume met massa dm wordt afgezet. Deze *energy imparted*, verkregen via diverse interactieprocessen, vormt de som van de energieafzettingen van alle interacties binnen het volume gedurende een bepaald tijdsinterval, zoals weergegeven in Vergelijking (2) [6].

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i \quad (2)$$

De term "energieafzetting" verwijst naar één enkel interactieproces waarbij energie wordt overgedragen. Deze energieafzetting, aangeduid als ε_i , vertegenwoordigt de hoeveelheid energie die wordt afgezet in een enkele interactie. Deze energie bestaat uit verschillende componenten: ε_{in} , de energie van het invallende ioniserende deeltje (exclusief de rustenergie); ε_{out} , de som van de energieën van alle ioniserende deeltjes die de interactie verlaten (met uitzondering van de rustenergie); en Q , de verandering in de rustenergie van de kern en van alle deeltjes die betrokken zijn bij de interactie. De eenheid van energieafzetting is joules (J), wat aangeeft hoeveel energie er in een enkele interactie wordt overgedragen. Vergelijking (3) toont dit in formule vorm.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q \quad (3)$$

Figuur 1 weergeeft de geabsorbeerde dosis in een detector. In het geïllustreerde scenario interageert een fotonenbundel (weergegeven als wiebelende pijlen) met een detector in een bepaald medium. Deze interacties omvatten het foto-elektrisch effect, Compton-verstrooiing of paarproductie. Hierdoor worden secundaire elektronen (weergegeven als rechte pijlen) en fotonen gegenereerd die vervolgens hun energie dissiperen, wat resulteert in excitaties en ionisaties en ook verwarming van het medium.



Figuur 1: Geabsorbeerde dosis [7]

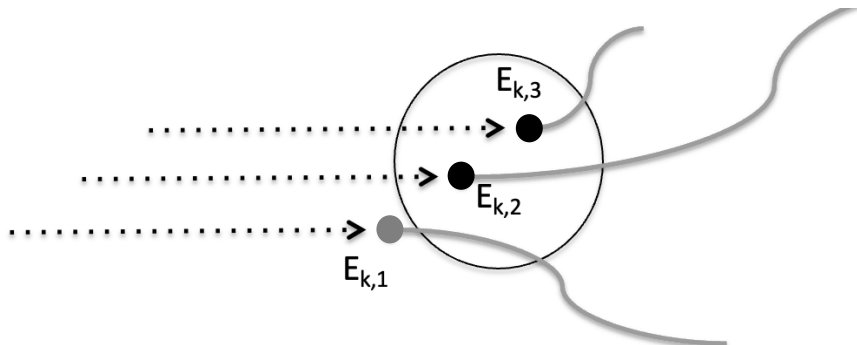
Verwarmings- en ionisatie effecten zijn essentieel voor dosimetrie. Terwijl ionisatiekamers en Geiger-Müller-tellers de ionisatie volgen, gebruiken calorimeters verwarming als meetprincipe. Bovendien zijn de ionisatie effecten belangrijke gebeurtenissen die worden gezien in (thermo)luminescerende detectoren.

2.1.2 Kerma

Kerma K is een acroniem voor *Kinetic Energy Released per unit off MA*ss. Kerma kwantificeert de gemiddelde hoeveelheid energie die wordt overgedragen $d\bar{E}_{tr}$ in een klein volume met massa dm van indirect ioniserende straling naar direct ioniserende straling, zonder rekening te houden met wat er na deze overdracht gebeurt [6]. Ook kerma is uitgedrukt in joules per kilogram of Gray. Vergelijking (4) toont dit in formule vorm.

$$K = \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm} \quad (4)$$

Kerma is een grootheid die van toepassing is op indirect ioniserende stralingen, zoals fotonen en neutronen. Echter, in geval van medische toepassingen wordt de term *air kerma* gebruikt om de overdracht van energie van ioniserende straling naar de lucht te beschrijven. *Air kerma* verwijst naar dezelfde energieoverdracht als kerma, maar richt zich op de lucht als het medium waarin straling wordt geabsorbeerd. Het wordt gemeten in eenheden die vergelijkbaar zijn met kerma, zoals grays (Gy) of milligrays (mGy), waarbij 1 Gy gelijk is aan 1 joule per kilogram. Figuur 2 geeft een voorbeeld van kerma, met E_k als de initiële kinetische energie van de secundaire elektronen. Het is belangrijk op te merken dat de definitie van kerma de initiële kinetische energie van deze elektronen buiten het volume, $E_{k,1}$, niet bevat.



Figuur 2: Kerma [6]

2.2 Thermoluminescente detectoren

Thermoluminescentiedetectoren (TLD's) zijn een cruciaal hulpmiddel voor tal van toepassingen in de stralingsdosimetrie. Deze detectoren zijn essentieel voor het meten van stralingsdosissen in verschillende omgevingen, zoals in archeologie, medische toepassingen en meer. Het idee van thermoluminescentie is gebaseerd op het feit dat bepaalde materialen het vermogen hebben om energie van ioniserende straling op te slaan door energietransities van elektronen en die vrij te geven in de vorm van zichtbaar licht bij verhitting [11]. In deze paragraaf worden de basisprincipes van thermoluminescentiedetectoren en de types detectoren besproken.

De TLD's die in de volgende paragraaf worden besproken, zullen in hoofdstuk 3 gebruikt worden voor de bepaling van de intrinsieke dosisresponsdata. Vervolgens zullen deze TLD's in hoofdstuk 4 gebruikt worden om de kosmische straling in omgevingsdosimetrie te voorspellen.

2.2.1 Type detectoren

Drie van de meest frequent gebruikte TLD's zijn gebaseerd op lithiumfluoride (LiF). De oorspronkelijke LiF TLD was de MTS-N, die op magnesium (Mg) en titanium (Ti) is gebaseerd. Deze detector wordt vaak gebruikt als referentiedetector in dosimetrische toepassingen vanwege zijn reproduceerbare eigenschappen. Echter, met de ontwikkeling van de MCP-N detector, die magnesium (Mg), koper (Cu) en fosfor (P) als activatoren gebruikt, is een verbetering in gevoeligheid bereikt. Deze detector geeft ongeveer 25 keer meer lichtsignaal voor dezelfde dosis vergeleken met MTS-N. Zowel MTS-N als MCP-N vertonen echter een afname in licht per eenheid van geabsorbeerde dosis met toenemende LET [2]. Voor MCP-N is deze afname groter dan voor MTS-N. De meest recente ontwikkeling is de MTT-7 detector, die minder gevoeligheidsverlies heeft voor hoge-LET-straling door aanpassing van de dopantenconcentraties van MTS-N. Dus, terwijl MTS-N wordt gebruikt voor standaard toepassingen, wordt MCP-N gebruikt wanneer een zeer hoge gevoeligheid vereist is en MTT-7 wordt ingezet wanneer straling met een zeer hoge LET moet worden gemeten [12].

In tegenstelling tot MTS-N, waarbij natuurlijk lithium (Li-N) wordt gebruikt, gebruikt MTT-7 lithiumfluoride verrijkt met lithium-7 (Li-7). Deze verrijking is bedoeld om de invloed van neutronenstraling, die voornamelijk met Li-6 interageert, te minimaliseren. MTT-7 is bijzonder geschikt voor toepassingen waarbij blootstelling aan hoge-LET straling essentieel is vanwege zijn verhoogde respons op deze straling. De afkortingen MTT-7 en MTS-N gebruiken respectievelijk de aanduidingen "7" voor verrijkt lithium-7 en "N" voor natuurlijk lithium.

2.2.2 Principe

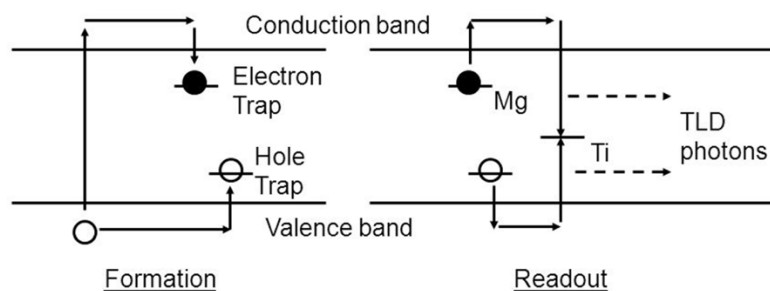
De werking van een TLD is gebaseerd op het principe van thermoluminescentie, waarbij bepaalde materialen licht uitstralen na blootstelling aan ioniserende straling en bij verhitting. Een kristallijn materiaal dat gevoelig is voor straling, zoals lithiumfluoride, wordt doorgaans gebruikt in een thermoluminescentiedetector. Het LiF-kristal heeft een groot oppervlak om stralingsenergie te absorberen, omdat het in de vorm van kleine poeders of pellets wordt gebruikt.

Bestraling

Indien het LiF-kristal wordt blootgesteld aan ioniserende straling, zoals gamma- of röntgenstraling, zullen elektronen op microscopisch niveau worden geëxciteerd en in een aangeslagen toestand komen waarbij ze een gat nalaten. Deze geëxciteerde elektronen en gaten blijven gevangen in zogenaamde *electron traps* en *hole traps* die worden gecreëerd door doperingen toe te voegen aan het LiF-kristal. Figuur 3 toont dit proces. Wanneer het kristal aan ioniserende straling wordt blootgesteld, helpen de doperingen zoals magnesium bij het creëren van valcentra in het kristal, waar geëxciteerde elektronen en gaten kunnen worden gevangen [13].

Uitlezing

Wanneer het TLD-kristal wordt verhit gedurende de uitlezing, worden de *hole traps* gecontroleerd gelegegd waardoor de elektronen en gaten zullen recombineren op een luminescentiesite die wordt voorzien door een andere soort doping zoals titanium. De opgeslagen energie wordt dus 'gefotobleekt'. Hierbij wordt de opgeslagen energie als licht uitgestraald en worden de gevangen elektronen teruggebracht naar hun grondtoestand. Dit uitgestraalde licht wordt gemeten met behulp van een fotodetector. Figuur 3 toont dit proces. De hoeveelheid uitgestraald licht is in eerste benadering recht evenredig met de bestraalde dosis.



Figuur 3: Microscopisch niveau van TLD-bestraling en -uitlezing [6]

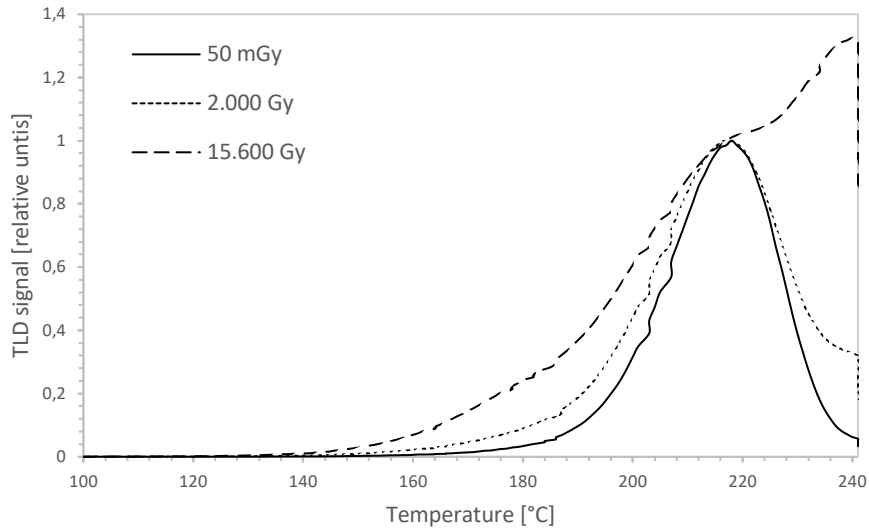
2.2.3 Gloeicurven SCK CEN

De uitlezing van de thermoluminescentie detectoren resulteert in een gloeicurve die de ogenblikkelijke lichtintensiteit weergeeft, typisch in nanoampère, als functie van de temperatuur. Daarnaast kan de gloeicurve ook geïntegreerd worden om een geïntegreerde lichtintensiteitswaarde te bekomen, typisch in nanocoulomb. De geïntegreerde lichtintensiteitswaarde is de integraal onder de gloeicurve voor een gegeven ROI. De MTS-gloeicurve wordt gekenmerkt door verschillende hoge temperatuurpieken met een dosis- en LET-respons die verschilt van die van de hoofdpijk, terwijl dit veel minder uitgesproken is voor de MCP-gloeicurve. Daarom werd de kwantificering van het signaal uitgevoerd door de tellingen te integreren over het gebied van de hoofdpijk van 150 °C tot 248 °C voor MTS-N en MTT-7 TLD's en over het hele gebied voor MCP-N TLD's [5].

De verkregen gloeicurve geeft informatie over de thermoluminescentie-eigenschappen van de materialen die zijn gebruikt. De detectoren worden verwarmd tijdens de uitlezing, waardoor licht wordt vrijgegeven als gevolg van de eerder geabsorbeerde stralingsenergie. Dit proces vindt plaats bij verschillende temperaturen, waardoor de detector een uniek patroon van lichtemissie vastlegt. De gloeicurve kan worden geanalyseerd om de aard en de hoeveelheid straling te bepalen door de intensiteit van het uitgestraalde licht te meten bij verschillende temperaturen. Dit levert nuttige gegevens om dosisniveaus te bepalen en de stralingsomgeving van de detectoren te karakteriseren. Daarom is de gloeicurve een cruciaal hulpmiddel om de resultaten van de dosimetrie van thermoluminescentie te interpreteren.

MCP-N

Figuur 4 toont een vergelijking van de gloeicurven voor MCP-N bij 50 mGy, 2.000 Gy en 15.600 Gy bij een uitleessnelheid van 1°C per seconde. Door de normalisatie van de gloeicurves wordt de relatieve toename van de verschillende pieken gevisualiseerd. De gloeicurve van 50 mGy dient als referentie. De vorm van de gloeicurven tussen 50 mGy en 1.000 Gy blijkt onveranderd te zijn. Vanaf dosissen hoger dan 1.000 Gy treedt een verbreding van de piek op [5]. Een ander gelijkaardig onderzoek [2] leverde hetzelfde resultaat op.



Figuur 4: Gloeicurven MCP-N [5]

De gloeicurve kan opgesplitst worden in meerdere pieken. Eerder onderzoek [3] onderzocht het aantal pieken in de deconvolutie van de gloeicurves van MCP-N, MTT-7 en MTS-N. Tegelijkertijd werd in deze studie onderzocht welke waarden de optimale activeringsenergie en temperatuur bedragen voor elke deconvolutiepiek voor de verschillende soorten detectoren. Deze deconvolutie werd uitgevoerd in Glowfit, ontwikkeld door het Instituut voor Kernfysica (IFJ) in Krakau, Polen [14]. In het geval van MCP-N-detectoren zou de gloeicurve in vier subpieken kunnen worden opgesplitst.

De pieken worden bepaald via de deconvolutie met behulp van een theoretische functie, zoals weergegeven in Vergelijking (5).

$$I(T) = I_{max} \exp\left(\frac{E}{kT_m} - \frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E}{kT_{max}^2} \int_{T_{max}}^T \exp\left(\frac{E}{kT_{max}} - \frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (5)$$

Hierbij is E de activeringsenergie, k de constante van Boltzmann, T en T_{max} respectievelijk de temperatuur en de temperatuur op piekmaximum zijn en I_{max} de lichtintensiteit op piekmaximum is. Deze functie wordt gebruikt om de thermoluminescerende intensiteit I van één gloeicurvepiek te modelleren.

Tijdens de deconvolutie in Glowfit dienen er drie vrije parameters ingevuld te worden. De eerste twee parameters, temperatuur T en activatie-energie E , worden verondersteld vast te zijn voor een bepaalde piek van een bepaald materiaal, gebaseerd op de fysische eigenschappen van dat materiaal. De derde parameter geeft de intensiteit I van de piek aan [14].

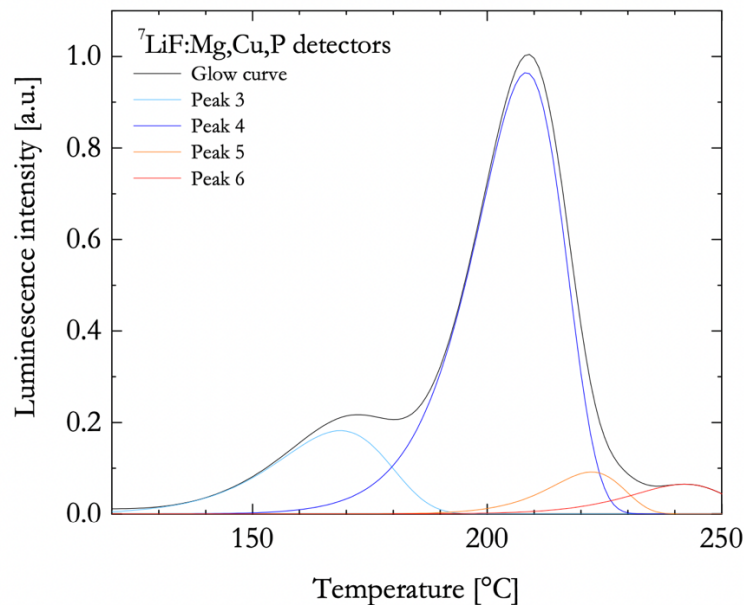
Door deze deconvolutiemethode kunnen onderzoekers de pieken nauwkeurig identificeren en analyseren, wat essentieel is voor het begrijpen van de eigenschappen en gedragingen van materialen onder verschillende omstandigheden. De waarden van activeringsenergie en temperatuur van de pieken worden weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Deconvolutieparameters MCP-N [3]

Parameter	Piek 3	Piek 4	Piek 5	Piek 6
T_{\max} [°C]	$T_{\max} - 41$	T_{\max}	$T_{\max} + 15$	$T_{\max} + 34$
T [°C]	168,4	208,4	222,3	241,7
E [eV]	1,37	2,09	2,66	2,11

Zoals weergegeven in Tabel 1 worden vier pieken weergegeven in de gloeicurve van MCP-N, waarbij piek 4 de hoofdpijk is. De verbreding van de gloeicurve bij een dosis van 2.000 Gy vergeleken met 50 mGy geeft aan dat pieken 3, 5 en 6, die respectievelijk verschijnen bij een temperatuur van 168,4°C, 222,3°C en 241,7°C, relatief verhoogd zijn. Deze toename van de pieken is duidelijker bij de dosis van 15.600 Gy. De algemene trend is dat hoe hoger de dosis, hoe sterker de temperatuurpieken verhogen ten opzichte van de hoofdpijk [5].

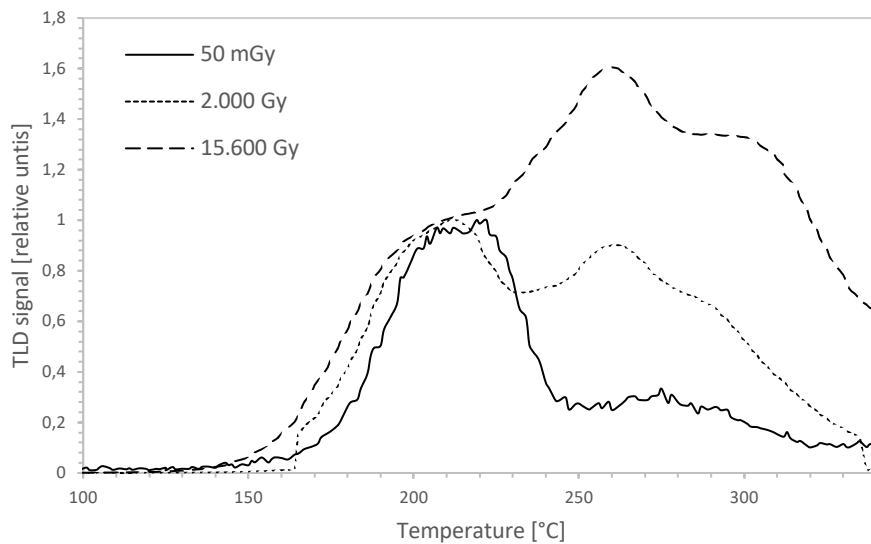
Indien deze parameters worden gebruikt om de gloeicurven te deconvolueren, wordt Figuur 5 verkregen. Deze toont de deconvolutie van de MCP-N gloeicurve in Glowfit [3].



Figuur 5: Deconvolutie MCP-N gloeicurve [3]

MTT-7

Een overeenkomstige tendens zoals in Figuur 4 is zichtbaar in Figuur 6, waar een vergelijking wordt gegeven van gloeicurves voor MTT-7 met dosissen van 50 mGy, 2.000 Gy en 15.600 Gy. Ook in dit geval dient de gloeicurve van 50 mGy als referentie [5].



Figuur 6: Gloeicurves MTT-7 [5]

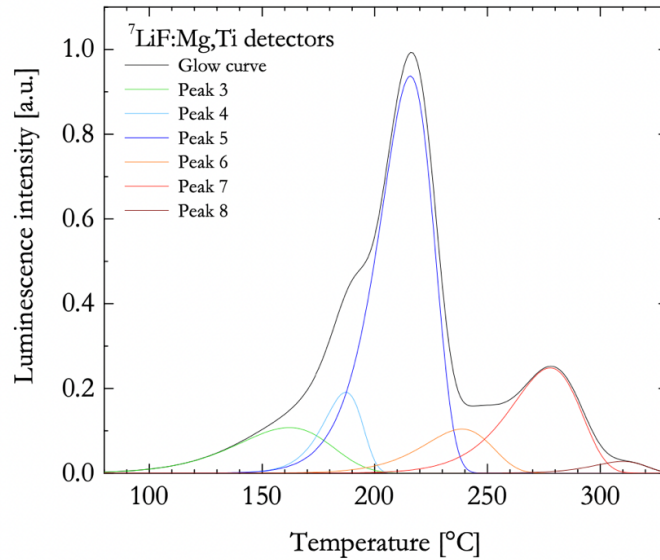
Ook heeft het onderzoek [3] de parameters voor de deconvolutie van de MTT-7 TLD's bepaald. Deze zijn dezelfde voor MTS-N. Tabel 2 geeft aan dat de uitgloeicurve van MTT-7 en MTS-N uit zes pieken bestaat.

Tabel 2: Deconvolutie parameters MTT-7 en MTS-N [3]

Parameter	Piek 3	Piek 4	Piek 5	Piek 6	Piek 7	Piek 8
T_{\max} [°C]	$T_{\max} - 41$	$T_{\max} - 27$	T_{\max}	$T_{\max} + 32$	$T_{\max} + 62$	$T_{\max} + 93$
T [°C]	163,2	190,5	219,4	249,0	282,9	315,3
E [eV]	0,77	2,18	1,70	1,48	1,62	2,71

De hoofdpijk is piek 5 en bevindt zich op een temperatuur van 219,4°C. Deze piek beschrijft de hoogste lichtintensiteit op de gloeicurve van 50 mGy en heeft daarom de waarde 1 op Figuur 6. Als dezelfde temperatuur op de gloeicurve van 2.000 Gy wordt beschouwd, is deze lichtintensiteit niet langer maximaal. De maximale lichtintensiteit wordt verkregen bij een lagere temperatuur. De hoogte van de hoofdpijk (piek 5) is kleiner dan die van piek 4.

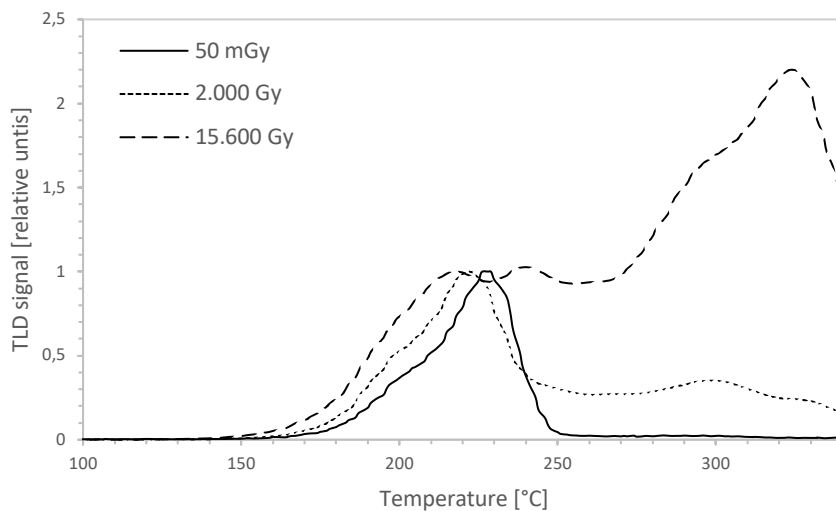
Een gelijkaardig onderzoek leverde een vergelijkbaar resultaat op [2]. Tegelijkertijd worden de pieken 3, 6, 7 en 8, respectievelijk gelegen bij temperaturen van 163,2°C, 249,0°C, 282,9°C en 315,3°C, ook in omvang vergroot vergeleken met de hoofdpijk bij de gloeicurve van 50 mGy. Indien de parameters uit Tabel 2 worden toegepast voor de deconvolutie van de gloeicurven, wordt Figuur 7 verkregen. Deze toont de deconvolutie van de MTT-7 gloeicurve in Glowfit [3].



Figuur 7: Deconvolutie MTT-7 gloeicurve [3]

MTS-N

Een opvallende observatie van de verandering in de gloeicurve (Figuur 8) voor MTS-N is dat de hoofdpijk naar lagere temperaturen verschuift naarmate de dosis toeneemt. In tegenstelling tot MTT-7 wordt de hoogte van piek 3 niet kleiner dan die van piek 2. Voor MTS-detectoren zijn de verkregen vormen vergelijkbaar met die van MTT-7, met groei van verschillende hoge temperatuurpieken voor hoge dosissen. Pieken 1, 4, 5 en 6, gelegen bij temperaturen van respectievelijk 163,2 °C, 249,0 °C, 282,9 °C en 315,3 °C, nemen in omvang toe vergeleken met de hoofdpijk van de gloeicurve van 50 mGy. In het geval van MTT-7 zijn de hoge temperatuurpieken allemaal prominenter dan bij MTS-N [5]. Een ander gelijkaardig onderzoek leverde vergelijkbare resultaten op [2]. De deconvolutie van de MTS-N curven is identiek aan deze van MTT-7 en wordt weergegeven in Figuur 7 en Tabel 2.



Figuur 8: Gloeicurven MTS-N [5]

2.3 Dosisrespons thermoluminescente detectoren

De dosisrespons van thermoluminescentie detectoren is essentieel voor verschillende toepassingen van stralingsdosimetrie. Het begrip van de dosisrespons van TLD's is aanzienlijk verbeterd door eerder onderzoek van verschillende onderzoeksgroepen, zoals het IFJ in Polen en het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK CEN) in België. Beide onderzoeksgroepen hebben een gelijkaardig onderzoek uitgevoerd in 2007 en zijn beide tot conclusies gekomen die in de volgende paragraaf worden uitgelegd. Ook de uitgevoerde methode van de beide onderzoeksgroepen wordt beschreven.

De dosisresponsdata uit deze onderzoeken zal vergeleken worden met de nieuw geanalyseerde dosisresponsdata via GlowFit. De analyse van het SCK CEN in volgende paragraaf wordt gebruikt als basisdata voor de analyse met GlowFit in hoofdstuk 3.

2.3.1 Methode en materialen van de onderzoeksgroepen

IFJ

De Poolse onderzoeksgroep IFJ gebruikte TLD's met een consistente cilindrische vorm met een diameter van 4,5 mm en dikte van 0,6 mm. De uitlezing werd uitgevoerd met een RAD'94 handmatige lezer met een platina verwarmingssysteem [2].

Voordat de detectoren werden bestraald, werden ze uitgedooid. De MTS en MTT-detectoren gloeiden een uur lang uit op 400°C, gevolgd door een twee uur durende uitdooiing op 100°C. De MCP-detectoren werden voor 10 minuten uitgedooid op 240°C. Beide uitdooiingen werden gevolgd door een afkoeling op kamertemperatuur op een metalen plaat om snel af te koelen. Ook na de bestraling en voor de uitlezing werden alle detectoren uitgedooid voor 10 min bij 100°C. De bestralingen werden uitgevoerd met een ^{60}Co γ -bron [2].

De temperatuurstijging tijdens uitlezing was 2°C/s. Om de intensiteit van het TL-licht te verminderen, werd een diafragma met een diameter van 0,5 mm gebruikt om de photomultiplier-buis (PM-buis) van de lezer te beschermen. Tabel 3 toont een overzicht van deze gegevens [2]. De dosisresponsgegevens werden bepaald met behulp van een Glowfit analyse. Voor MCP-N werd er gebruik gemaakt van 6 pieken en voor MTT-7 en MTS-N van 9 subpieken.

Tabel 3: Methode IFJ [2]

TLD type	Grootte	Doperingen	Voorgloeijing	Nagloeijing	Uitleessnelheid
MCP	Cylindrisch Dikte: 0,6 mm	Mg, Cu, P	10 min 240°C	10 min 100°C	2°C/s
MTT MTS	Diameter: 4,5 mm	Mg, Ti	1 u 400°C 2 u 100°C		

SCK CEN

Het SCK CEN gebruikte TLD's die werden vervaardigd door RADCARD en hadden een consistente cilindrische vorm met een diameter van 4,5 mm en een dikte van 0,9 mm. Ook het SCK CEN maakt gebruik van een uitgloeijing voor de bestraling. De MTT-7- en MTS-N-detectoren hadden een uur nodig bij 400°C, gevolgd door een uitgloeijing van twee uur bij 100°C. Het laatste deel van het gloeiproces voor MTT-7 en MTS-N omvatte langzaam afkoelen bij kamertemperatuur. In tegenstelling tot MTT-7 en MT-N moesten de MCP-N-detectoren tien minuten worden uitgelooid bij 240°C, gevolgd door een snelle afkoeling tot -10°C in een vriezer [5].

De bestraling werd uitgevoerd met een ^{60}Co γ -bron en werd uitgevoerd met een 3 mm dikke PMMA-opbouwplaat zodat de geabsorbeerde dosis in de detectoren gelijk is aan de geleverde *air kerma*. Na de bestraling werden de TLD's opnieuw uitgelooid. Voor alle TLD-types was verwarming op 120°C gedurende een half uur nodig. Daarna koelden de TLD's geleidelijk af tot kamertemperatuur [5]. Het uitlezen van de bestraalde detectoren gebeurde met behulp van de Thermo Fisher Scientific Harshaw 5500-lezer. Het apparaat kon elke detector één voor één optillen met behulp van een naald die een vacuüm creëerde. Vanaf het moment dat de detector omhoog werd gebracht, werd deze verwarmd door een gasvormige stikstofstroom. De MTT's en MTS's werden verwarmd tot 340°C, terwijl de MCP's werden verwarmd tot 255°C. De temperatuurstijging bij uitlezing bedroeg 1°C/s. Tabel 4 geeft een overzicht van de methode van het SCK CEN.

Tabel 4: Methode SCK CEN [5]

TLD type	Grootte	Doperingen	Voorgloeijing	Nagloeijing	Uitleessnelheid
MCP	Cylindrisch Dikte: 0,9 mm Diameter: 4,5 mm	Mg, Cu, P	10 min 240°C Cooling -10°C	30 min 120°C	1°C/s
MTT MTS		Mg, Ti	1 u 400°C 2 u 100°C Cooling 21°C		

Het SCK CEN gebruikte verschillende diafragma's om de niet-lineariteitseffecten van de lezer te elimineren. Daarom werden de dosissen verdeeld in twee verschillende sets waarbij een onderscheid werd gemaakt in de manier van uitlezen. Set A werd uitgelezen met een diafragma met een diameter van 5 mm. Set B daarentegen gebruikte een diafragma van 0,4 mm voor MCP-N detectoren en een diafragma van 1,2 mm voor de MTT-7 en MTS-N detectoren.

Tabel 5 toont de dosissen van de twee sets. De overlappende dosissen tussen set A en B waren om de berekening van de herschalingsfactor tussen metingen met twee diafragmaformaten mogelijk te maken om dosisresponsgegevens van 0,05 Gy tot 15,6 kGy te krijgen [5].

De dosisresponsgegevens werden in het geval van het SCK CEN niet bepaald met de deconvolutie via Glowfit, maar door gebruik te maken van de ROI die in paragraaf 2.3 is beschreven.

Tabel 5: Dosissen per set

Set	Dosissen
A	0.05 Gy, 0.1 Gy, 0.2 Gy, 0.5 Gy, 1 Gy, 2 Gy, 5 Gy, 10 Gy
B	1 Gy, 2 Gy, 5 Gy, 10 Gy, 20 Gy, 50 Gy, 100 Gy, 200 Gy, 500 Gy, 1 kGy, 2 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 15.6 kGy

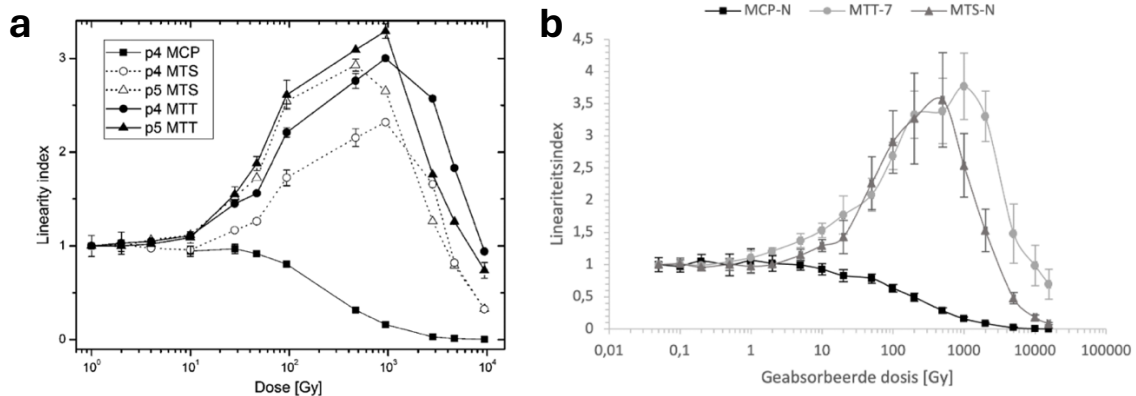
2.3.2 Resultaten literatuurstudie dosisrespons

De lineariteitsindexen van de respons bij verschillende dosisniveaus en de verzadigingskenmerken van de detectoren bij hoge dosisniveaus zijn enkele van de verschillende componenten van de dosisrespons van TLD's die in deze eerdere onderzoeken zijn onderzocht. De lineariteitsindexen werden bepaald met behulp van Vergelijking (6).

$$\text{Linearity index} = \frac{(S/IF)_{av,dose x}/dose x}{(S/IF)_{av,dose 50mGy}/50 mGy} \quad (6)$$

In deze vergelijking, $(S/IF)_{av,dose x}$ is het gemiddelde individueel-sensitiviteit-gecorrigeerd signaal voor de beschouwde dosis x . Hierbij is S de lichtwaarde in nanoampère die werd verkregen tijdens de uitlezing en IF de individuele sensitiviteitsfactor van de detector [5].

De typische dosisresponsdata van MCP-N, MTT-7 en MTS-N detectoren worden besproken in de volgende paragrafen. Figuur 9a en 9b tonen de lineariteitsindex als functie van de geabsorbeerde dosis voor de MCP-N, MTT-7 en MTS-N detectoren van respectievelijk de onderzoeksgroep IFJ na deconvolutie met GlowFit en SCK CEN voor deconvolutie met Glowfit. Aangezien beide onderzoeksgroepen een andere methode gebruikten, kunnen de resultaten afwijken.



Figuur 9: Dosisrespons IFJ [2] en SCK CEN [5]

De MCP-N detectoren vertonen een sublineariteit na een dosis van 10 Gy voor IFJ en 5 Gy voor SCK CEN, wat aangeeft dat de detectoren verzadigd raken. De detectoren verzadigen onmiddellijk zonder supralineariteit te bereiken [2], [5].

Een compleet tegenovergestelde curve wordt verkregen voor MTT-7. De curve van het SCK CEN weergeeft de hoofdpijken in de gloeicurven van de hoofdpijk. De hoofdpijk voor MTT-7 in Figuur 9a is piek 5. Indien enkel de hoofdpijk in rekening wordt genomen, tonen de curven een lineair gedrag tot 5 Gy voor IFJ en 0,5 Gy voor SCK CEN. Hierna vertonen beide curves supralineariteit. Verzadiging treedt op bij 1,000 Gy voor zowel de resultaten van het IFJ als het SCK CEN. De lineariteitsindex neemt vervolgens af en verliest een sterke gevoeligheid om sublineair te worden vanaf 10 kGy [2], [5].

Een vergelijkbare trend wordt getoond voor de lineariteitsindices voor de MTS-N detectoren. Het waargenomen verschil tussen de MTT-7 detectoren is dat de lineariteitsindex 1 blijft tot een dosis van 2 Gy voor het SCK CEN en 3 Gy voor het IFJ. Vanaf deze dosis wordt de curve supralineair tot verzadiging optreedt bij 500 Gy bij beide onderzoeken. Hierna zal de curve afnemen en zelfs sublineair worden vanaf een dosis van 5,000 Gy voor beide onderzoeksinstellingen [2], [15]. Op basis van de gegevens van het SCK CEN zijn de MTT-7-detectoren meer supralineair dan de MTS-N-detectoren. Het onderzoek uitgevoerd in het IFJ toont hetzelfde resultaat.

2.4 Microdosimetrische model

In dit deel wordt het microdosimetrische $d(z)$ -model besproken. Het model heeft als functie om de relatieve efficiëntie van TLD's te bepalen voor het meten van verschillende stralingskwaliteiten. Dit gebeurt door de gesimuleerde dosiswaarschijnlijkheidsverdeling van de specifieke energie in nanometrische doelwitten te koppelen aan een experimenteel bepaalde responsfunctie. Eerder onderzoek [3] heeft dit model geëvalueerd voor LiF:Mg,Ti (MTS) en LiF:Mg,Cu,P (MCP).

Dit model is geschikt voor het beoordelen van de efficiëntie van detectoren bij het detecteren van exotische deeltjes, stralingskwaliteiten en energieën die niet beschikbaar zijn bij versnellers op grondniveau, complexe gemengde velden, of andere soorten detectoren [3].

Het microdosimetrische model dat in dit onderzoek wordt gebruikt, sluit aan bij het model van Olko en stelt dat de macroscopische dosisresponsfunctie $R(D)$ in goede benadering gelijkgesteld kan worden aan de microdosimetrische specifieke energieresponsfunctie $r(z)$. De energie is bijna gelijkmatig over de site verdeeld voor microscopische volumes en een groot aantal gebeurtenissen. Dit geldt vooral voor indirect ioniserende straling, zoals fotonen met hoge energie [3]. De macroscopische dosisresponsfunctie $R(D)$ wordt doorgaans experimenteel geëvalueerd met relatief hoge dosiswaarden van indirect ioniserende straling. Dit geeft aan dat een groot aantal gebeurtenissen plaatsvindt op de microscopische site. De macroscopische dosisresponsfunctie die werd gebruikt om de relatieve efficiëntie van de TLD's te bepalen, is de dosisresponsdata van IFJ, die in voorgaande paragraaf is besproken.

Vergelijking (7) werd gebruikt in het onderzoek [3] om de relatieve luminescentie-efficiëntie van de detectoren te onderzoeken.

$$\eta_{rel} = \frac{\left[\int_0^{+\infty} d(z)r(z)dz \right]_{radiation}}{\left[\int_0^{+\infty} d(z)r(z)dz \right]_{reference\ radiation}} \quad (7)$$

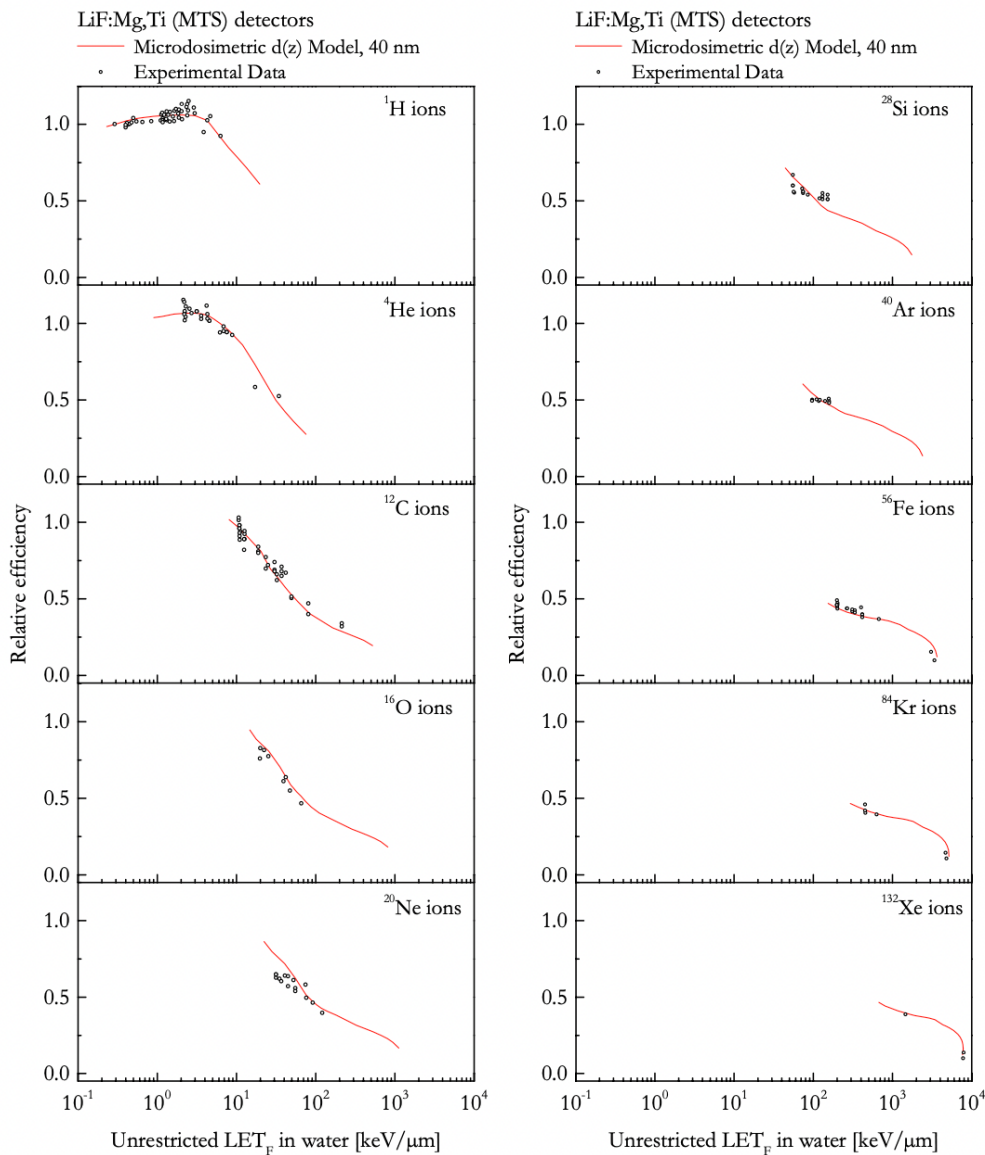
In deze vergelijking is $d(z)$ de dosiswaarschijnlijkheidsverdeling van de specifieke energie van de soort straling en $r(z)$ de specifieke dosisresponsfunctie [3]. De dosisresponsfuncties worden getoond in Figuur 9a. De Monte Carlo Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) versie 2.82 werd gebruikt om computersimulaties van stralingstransport uit te voeren om de specifieke energie dosiswaarschijnlijkheidsverdeling $d(z)$ te evalueren.

Het model vereist dus een begrip van twee componenten: de dosisrespons van de detectoren en de specifieke microdosimetrische sitegrootte waar de microscopische energiedepositiesimulaties moeten worden uitgevoerd.

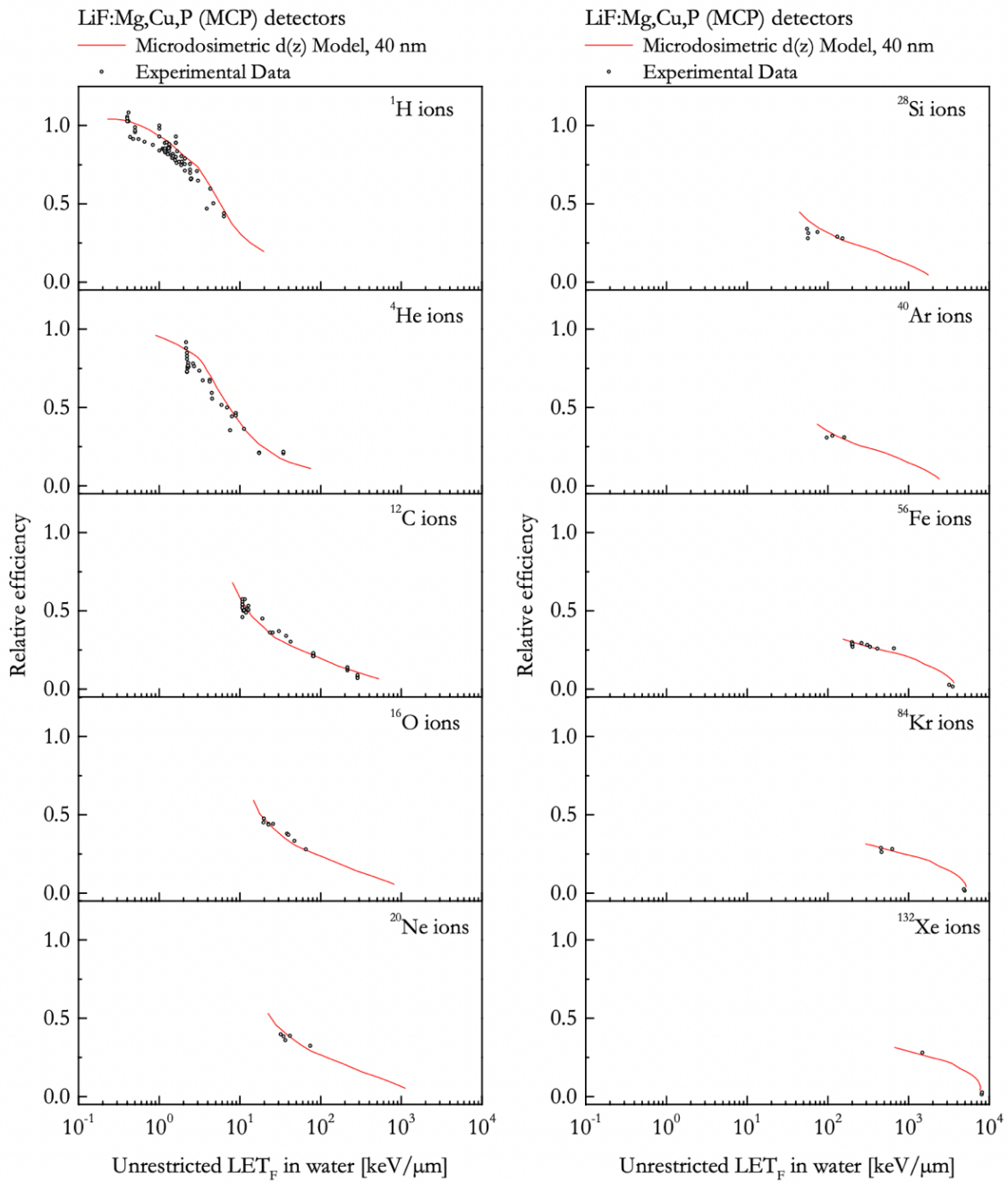
2.4.1 Zwaar geladen deeltjes

De relatieve efficiëntie van LiF:Mg,Ti (MTS) en LiF:Mg,Cu,P (MCP) detectoren werd beoordeeld als functie van de microdosimetrische site grootte. Dit werd gedaan voor het meten van geladen deeltjes tot ^{132}Xe met een maximale energie van 1000 MeV/u. De simulaties werden uitgevoerd met mono-energetische bundels geladen deeltjes van ^1H , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{28}Si , ^{40}Ar , ^{56}Fe , ^{84}Kr en ^{132}Xe ionen. De site groottes waarin de Monte Carlo-simulaties werden uitgevoerd varieerden van 10 nm tot 50 nm [3].

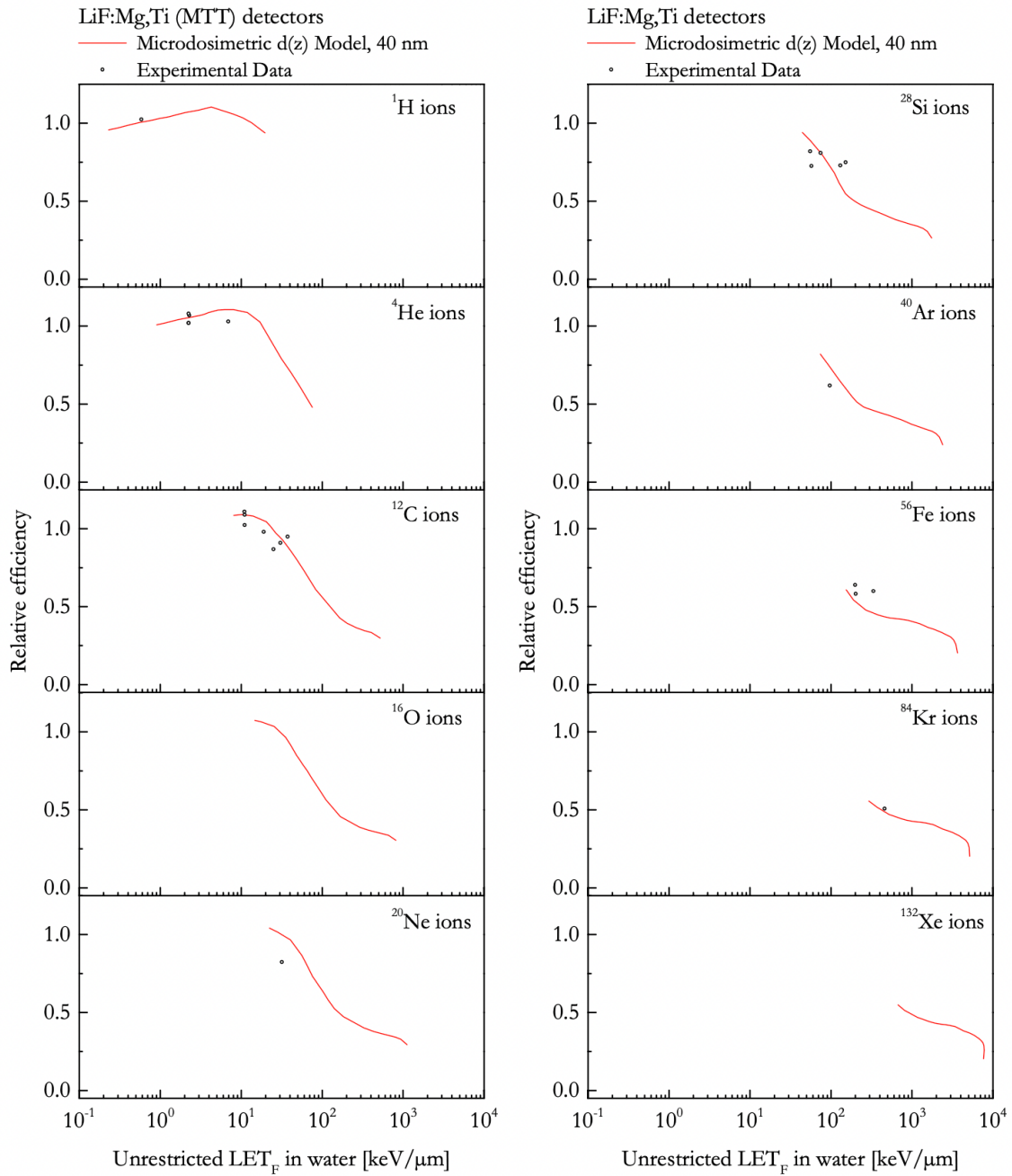
Uit de resultaten bleek dat de beste overeenkomst tussen de resultaten van het microdosimetrische $d(z)$ -model en experimentele gegevens werd gevonden bij een sitegrootte van 40 nm [3]. Figuur 10, 11 en 12 tonen respectievelijk de relatieve luminescentie-efficiëntie voor MTS, MCP en MTT.



Figuur 10: Relatieve luminescentie-efficiëntie MTS [3]



Figuur 11: Relatieve luminescentie-efficiëntie MCP [3]

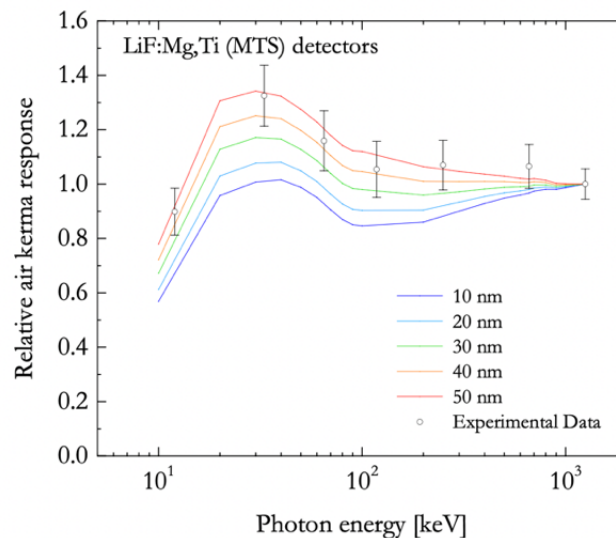


Figuur 12: Relatieve luminescentie-efficiëntie MTT [3]

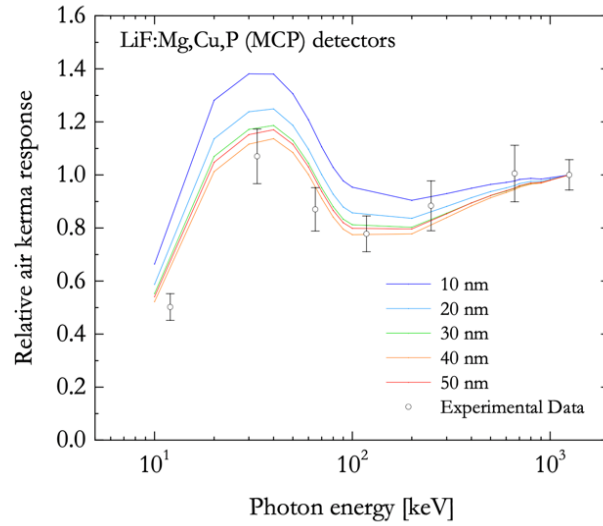
2.4.2 Fotonen

De relatieve efficiëntie van LiF:Mg,Ti (MTS) en LiF:Mg,Cu,P (MCP) detectoren voor het meten van fotonen werd beoordeeld. Deze relatieve efficiëntie werd geëvalueerd door simulaties uit te voeren met zowel mono-energetische bundels als twee-energetische fotonenbundels, die de referentie ^{60}Co gamma-stralingsbron vertegenwoordigen. De Monte Carlo-simulaties werkten met site groottes van 10 nm tot 50 nm [3].

De berekende relatieve luminescentie-efficiëntie van de twee soorten detectoren wordt op verschillende manieren beïnvloed door veranderingen in de sitegrootte. Toename van de grootte van de site verhoogt de berekende relatieve efficiëntie bij LiF:Mg,Ti (MTS) detectoren, vooral voor fotonen met een lage energie. De LiF:Mg,Cu,P (MCP) detectoren vertonen echter het tegenovergestelde effect. Bovendien zijn de veranderingen die het meest relevant zijn voor fotonen met lage energie. Het bleek dat het model de efficiëntie van zowel LiF:Mg,Ti (MTS) als LiF:Mg,Cu,P (MCP) detectoren kan voorspellen in zeer goede overeenstemming met de experimentele gegevens, als een site grootte van 40 nm wordt gebruikt voor de berekeningen [3]. Figuur 13 en 14 tonen het resultaat voor respectievelijk MTS en MCP-detectoren.



Figuur 13: Relatieve air kerma-respons van LiF:Mg,Ti (MTS)-detectoren als functie van de fotonenergie [3]



Figuur 14: Relatieve luchtkerma-respons van LiF:Mg,Cu,P (MCP)-detectoren als functie van de fotonenergie [3]

2.5 Omgevingsdosimetrie

Twee belangrijke bronnen van achtergrondstraling die voortdurend op onze planeet aanwezig zijn, zijn terrestrische straling en kosmische straling. De aardatmosfeer reageert met een zonnestraling van binnen en galactische kosmische straling van buiten het zonnestelsel de atmosfeer binnekomt. Omgevingsstraling omvat echter ook straling afkomstig van menselijke activiteiten, zoals medische procedures en nucleaire installaties, en van natuurlijke bronnen op aarde, zoals uranium en thorium in gesteenten en bodems [9].

Meten en begrijpen van de blootstelling aan omgevingsstraling en kosmische straling is essentieel voor tal van toepassingen, zoals stralingsbescherming en dosimetrie, beoordeling van gezondheidsrisico's en monitoring van milieuvervuiling. Een van de meest gebruikte methoden voor het meten en volgen van deze stralingsniveaus is het gebruik van TLD's [9].

Deze paragraaf geeft een samenvatting van de verschillende soorten kosmische stralingen die in hoofdstuk 4 gesimuleerd zullen worden op grondniveau en zeeniveau.

2.5.1 Kosmische straling

Kosmische straling, afkomstig uit diepe ruimte, omvat een breed scala aan hoogenergetische deeltjes, waaronder protonen. Wanneer deze protonen de bovenste atmosfeer van de aarde bereiken, veroorzaken ze interacties die leiden tot de productie van secundaire deeltjes, zoals neutronen. Hoewel zuurstof grotendeels ondoorzichtig is voor deze neutronen, vertoont stikstof een hogere waarschijnlijkheid op interacties [9].

Op grondniveau bestaat de blootstelling voornamelijk uit secundaire neutronen en muonen. Deze deeltjes ontstaan als gevolg van interacties tussen kosmische straling en de atmosfeer van de aarde. Hoewel secundaire neutronen en muonen minder penetrerend vermogen hebben dan sommige andere deeltjes in kosmische straling, kunnen ze nog steeds significante effecten hebben op biologische systemen en elektronica, vooral bij langdurige blootstelling [9].

Op vlieghoogte, zoals in de luchtvaart, worden protonen en elektronen ook belangrijke componenten van kosmische straling. Deze deeltjes hebben hogere energieniveaus en kunnen dieper doordringen in materie, waardoor ze potentiële gezondheidsrisico's vormen voor zowel bemanning als passagiers van vliegtuigen. Daarom is het begrijpen van de aard en effecten van kosmische straling op verschillende hoogtes essentieel voor het ontwikkelen van effectieve beschermings- en mitigatiestrategieën voor mens en technologie die aan dergelijke omgevingen worden blootgesteld. [9].

Solar particle events (SPE)

Natuurlijke gebeurtenissen op de zon, zoals zonnevlammen en coronale massa-ejecties (CME's), kunnen de plotselinge vrijlating van geladen deeltjes in de ruimte veroorzaken. Deze gebeurtenissen worden "zonnedeeltjesgebeurtenissen" genoemd en worden gekenmerkt door de term "zonnedeeltjesgebeurtenissen". Deze geladen deeltjes, waarvan de meeste protonen en elektronen zijn, worden vanaf het oppervlak van de zon uitgestoten. Ze hebben vaak een klein aantal kernen en een redelijk laag energetisch niveau, meestal ongeveer 100 MeV [9].

Enorme hoeveelheden geladen deeltjes, voornamelijk protonen en elektronen, worden de ruimte in geslingerd tijdens een zonnevlam of een CME. Deze geladen deeltjes kunnen de aarde bereiken als ze met hoge snelheden bewegen, afhankelijk van hun energie en richting [9]. Wanneer de geladen deeltjes van een SPE de aarde bereiken, komen ze in aanraking met het magnetische veld van de aarde en worden ze naar de polaire gebieden gestuurd, waar ze het sterkste magnetische veld vinden. Dit kan leiden tot hogere stralingsniveaus in de hogere atmosfeer van de aarde en effecten op de ionosfeer zoals het poollicht.

SPE's kunnen potentieel leiden tot deterministische effecten voor astronauten in deep space, op de maan of op mars met geen adequate bescherming [3], [9]. Het identificeren en begrijpen van deze deterministische effecten is van cruciaal belang om passende maatregelen te nemen ter bescherming van zowel ruimtevaartuigen als mensen tijdens ruimtemissies.

Galactic cosmic rays (GCR's)

GCR's zijn geladen deeltjes die afkomstig zijn van buiten ons zonnestelsel, voornamelijk versneld door overblijfselen van supernova's. Deze deeltjes bestaan meestal uit protonen en heliumkernen, maar er kan ook een beperkte hoeveelheid zwaardere kernen, elektronen en positronen aanwezig zijn. Ze hebben zeer hoge energieën, tot wel 10^{12} MeV, met een piek rond 1 GeV [9].

Een kenmerk van GCR's is hun continue flux in alle richtingen. Deze flux is omgekeerd evenredig met de zonneactiviteit, wat betekent dat deze deeltjes gemakkelijker de aarde bereiken tijdens perioden van verminderde zonneactiviteit. Dit komt door de afscherming door het magnetische veld dat wordt gecreëerd door de zonnwind [9].

Hoewel de meeste galactische kosmische stralen worden afgebogen door het magnetische veld van de aarde en dus niet direct op het aardoppervlak aankomen, kunnen ze toch van invloed zijn op de menselijke gezondheid en technologische systemen, vooral in situaties waarbij mensen zich buiten de beschermende atmosfeer van de aarde bevinden, zoals in de ruimtevaart.

GCR's vormen een aanzienlijk deel van de stralingsdosis in de ruimte, met ongeveer 75% van de totale stralingsdosis in het International Space Station (ISS) [9]. Daarom is het begrijpen en monitoren van galactische kosmische stralen van groot belang voor ruimteverkenning en astronautische veiligheid.

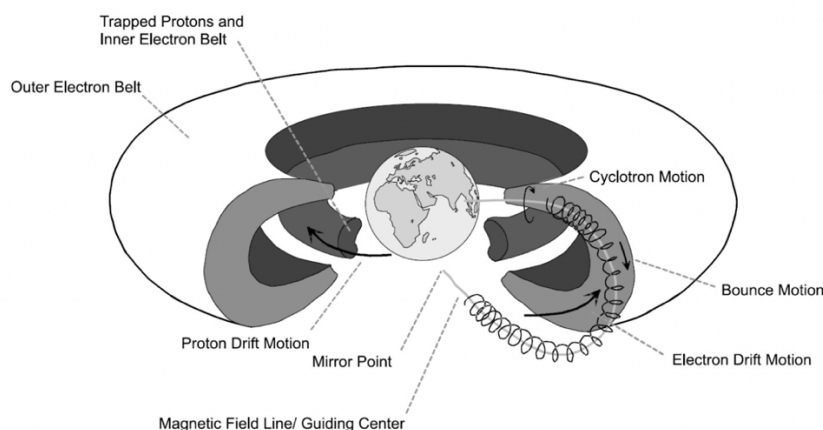
Van Allen Belts

De twee gebieden rond de aarde waar geladen deeltjes worden vastgehouden door het magnetische veld van onze planeet worden de Van Allen-gordels genoemd. Van Allen heeft twee belangrijke gordels: de binnen- en buitengordels. Figuur 15 toont deze twee Van Allen Belts. De dichtst bij de aarde gelegen binnenste gordel ligt ongeveer 3000 kilometer boven het aardoppervlak. Deze gordel bevat voornamelijk elektronen met energie onder 5 MeV en protonen met energie onder 700 MeV [9].

De buitenste gordel ligt ongeveer 22.000 kilometer boven het aardoppervlak en ligt verder van de aarde. Het magnetische veld van de Van Allen Belt houdt geladen deeltjes, voornamelijk elektronen (met een energie van minder dan 7 MeV), in deze gordel vast [9].

De Van Allen-gordels beschermen zowel de atmosfeer als de aarde tegen kosmische straling. De meest energierijke deeltjes komen in de aardatmosfeer terecht, waar ze met elkaar kunnen interageren en secundaire deeltjes kunnen produceren.

Voor ruimtevaart is het essentieel om de Van Allen-gordels te begrijpen, omdat astronauten en satellieten kunnen worden beïnvloed door de geladen deeltjes die in deze gebieden worden vastgehouden. Hoewel de gordels geladen deeltjes uit de ruimte beschermen, kunnen ze ook schade aanrichten aan systemen en elektronische apparatuur aan boord van satellieten [9]. Als gevolg hiervan is het essentieel voor ruimtemissies om deze barrières te begrijpen en strategieën te ontwikkelen om de blootstelling aan straling in deze gebieden te verminderen.



Figuur 15: Van Allen Belts [3]

2.5.2 TLD's in omgeving en ruimte

Stralingsdetectoren die zijn gebaseerd op de thermoluminescentietechniek (TLD) zijn essentieel voor zowel ruimtevaart als omgevingsdosimetrie. Omdat ze veilig zijn, compact zijn en passief zijn, worden deze detectoren vaak gebruikt [3].

Het in kaart brengen van de stralingsdosis in de ruimte is een van de belangrijkste toepassingen van TLD's in de ruimtevaart. Dit omvat persoonlijke dosimetrie voor astronauten tijdens ruimtemissies, waarbij TLD's worden gebruikt om de stralingsniveaus waaraan astronauten worden blootgesteld te meten. Deze metingen zijn cruciaal om de gezondheid van de astronauten te beschermen en de risico's van langdurige blootstelling aan ruimtestraling te beoordelen [9]. Wetenschappers kunnen de impact van ruimtestraling op het menselijk lichaam beter begrijpen door de dosis te meten waaraan astronauten worden blootgesteld. Ze kunnen ook maatregelen nemen om de gezondheid van astronauten tijdens lange missies te beschermen.

Bovendien worden TLD's gebruikt bij ruimtedosimetrie voor biologische experimenten in de ruimte. TLD's worden gebruikt om de stralingsniveaus te meten waaraan biologische materialen, zoals dierlijke of plantencellen, tijdens ruimtevluchten worden blootgesteld [3]. Dit helpt wetenschappers bij het onderzoeken van de effecten van straling op levende organismen in de ruimte en zorgt voor de veiligheid van toekomstige bemande missies.

Daarnaast is omgevingsdosimetrie, vooral rond nucleaire sites, van vitaal belang om eventuele afwijkingen van de normale natuurlijke achtergrondstraling op te sporen. In België wordt dit bijzonder zorgvuldig gedaan, waar detectiesystemen worden ingezet om de stralingsniveaus in de omgeving te monitoren [15]. Deze monitoring is essentieel om de veiligheid van zowel de werknemers op deze sites als de omwonenden te waarborgen. Het begrijpen van de natuurlijke achtergrond is hierbij van cruciaal belang, gezien de variaties die worden veroorzaakt door fenomenen zoals de zonnecyclus, die een direct effect hebben op de secundaire kosmische straling.

Correctieprotocol voor de intrinsieke dosisresponsdata

Voor specifieke toepassingen kan de interpretatie van LiF TLD-metingen een uitdagende taak vormen. Bij dosissen vanaf ongeveer 1 Gy kan het dosimetrische systeem niet-lineair reageren vanwege de niet-lineariteiten van zowel de LiF TLD's als de TLD-lezer.

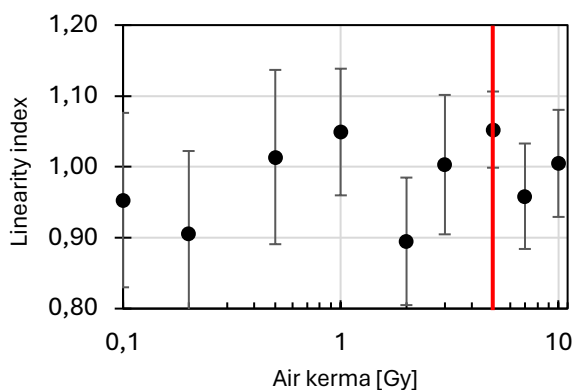
Het behalen van de eerste doelstelling, namelijk het vaststellen van de intrinsieke dosisrespons van MCP-N, MTT-7 en MTS-N detectoren als input voor het berekenen van de relatieve luminescentie-efficiëntie, vereist correcties op eerder uitgevoerde onderzoeken. Om het correctieprotocol te ontwikkelen, zijn reeds experimenten uitgevoerd om de dosisrespons van LiF TLD's te karakteriseren, met specifieke aandacht voor hoge dosissen fotonen. Deze experimenten hebben geleid tot het verkrijgen van experimentele gegevens met betrekking tot de intrinsieke niet-lineariteiten van de drie soorten LiF TLD's, evenals de niet-lineariteiten van de TLD-lezer [4], [5].

3.1 Methode

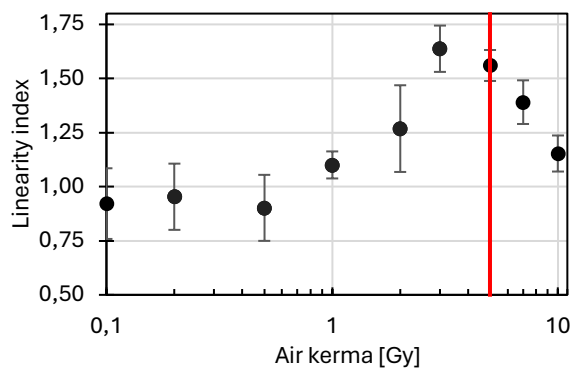
3.1.1 Niet-lineariteiten reader

Het opstellen van het correctieprotocol omvatte eerst een analyse van de omstandigheden waarbij de uitleesapparatuur niet-lineaire responsen vertoonde. Dit werd bereikt door een aanvullende analyse uit te voeren op een eerder uitgevoerde studie [4]. In deze studie werden standaard TLD-uitlezingen uitgevoerd voor de MCP-N, MTT-7 en MTS-N detectoren met uitleessnelheden van respectievelijk 1°C/s en 10°C/s in het Harshaw 5500 uitleestoestel. Op basis van deze uitlezingen werden de lineariteitsindexen bepaald in relatie tot de dosis.

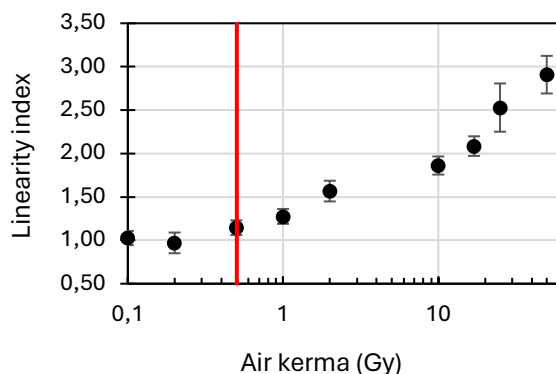
Een ander onderzoek [5] had reeds vastgesteld bij welke dosis intrinsieke niet-lineariteiten optraden: 5 Gy voor MCP-N, 0,5 Gy voor MTT-7 en 2 Gy voor MTS-N. Aangezien er na deze drempeldosissen zekerheid bestaat over het optreden van niet-lineariteiten van de TLD zelf, heeft dit invloed gehad op het onderzoek naar de niet-lineariteiten van de uitleesapparatuur. Daarom werden alleen de lineariteitsindexen van dosissen in [4] onderzocht die lager zijn dan de drempeldosissen waarbij intrinsieke niet-lineariteiten optraden. Figuren 16 tot 21 tonen respectievelijk de resultaten uit [4] voor MCP-N, MTT-7 en MTS-N bij uitleessnelheid 1°C/s en 10°C/s . De rode verticale lijn toont de drempeldosis voor intrinsieke niet-lineariteiten die werd bepaald met onderzoek [5].



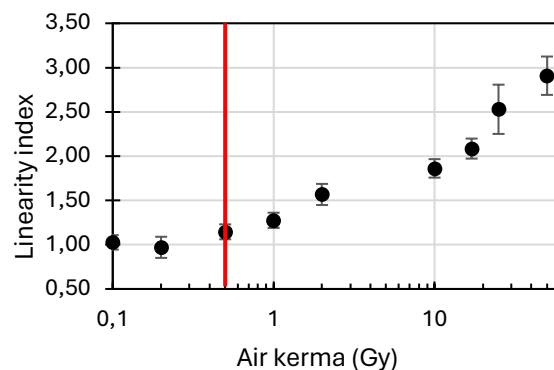
Figuur 16: Lineariteitsindex MCP-N bij 1°C/s [4]



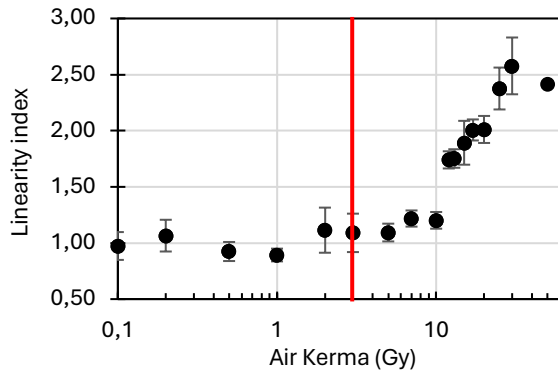
Figuur 17: Lineariteitsindex MCP-N bij 10°C/s [4]



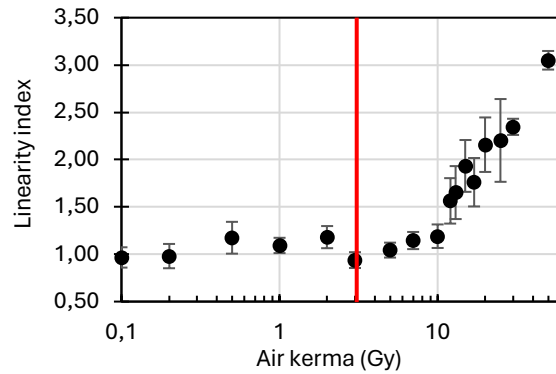
Figuur 18: Lineariteitsindex MTT-7 bij 1°C/s [4]



Figuur 19: Lineariteitsindex MTT-7 bij 10°C/s [4]



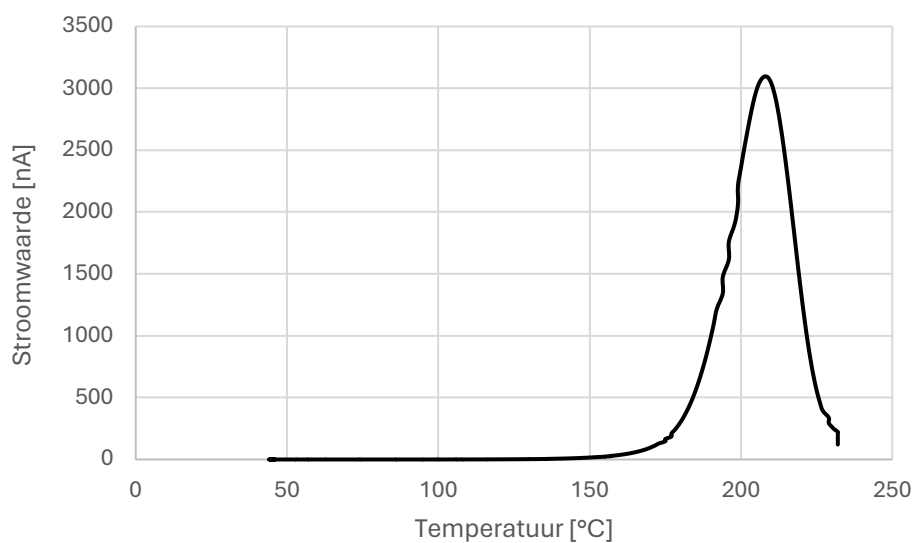
Figuur 20: Lineariteitsindex MTS-N bij 1°C/s [4]



Figuur 21: Lineariteitsindex MTS-N bij 10°C/s [4]

Om de niet-lineariteiten van de uitleesapparatuur te bepalen, diende deze reeks lineariteitsindexen onder de drempeldosis te worden geplot in relatie tot de piekwaarde. Met deze curve kon er gericht onderzocht worden bij welke stroomwaarden de niet-lineariteit van de reader optrad, wat essentieel was voor het ontwikkelen van een effectief correctieprotocol. De piekwaarde, die de maximale lichtintensiteit in nanoampère vertegenwoordigt, werd afgeleid uit de gloeicurven. In het voorafgaande onderzoek [4] werd de lineariteitsindex vastgesteld als het gemiddelde van drie TLD-uitlezingen met dezelfde dosis. Daarom moet de piekwaarde ook het gemiddelde zijn van de drie piekwaarden van de individuele gloeicurven. Een voorbeeld wordt in volgende paragraaf weergegeven.

Voor MCP-N detectoren met een uitleessnelheid van 1°C/s, wordt bijvoorbeeld uit Figuur 16 duidelijk dat een dosis van 1 Gy een lineariteitsindex van 1,05 oplevert. In Figuur 22 hieronder, die de gemiddelde gloeicurve voor deze drie MCP-N detectoren toont bij 1 Gy en een uitleessnelheid van 1°C/s, blijkt dat de piekwaarde 3096 nA bedraagt.



Figuur 22: Gemiddelde gloeicurve voor MCP-N 1°C/s en 1 Gy

Eenzelfde analyse werd uitgevoerd voor alle lineariteitsindexen lager dan de drempeldosis en de overeenkomstige gemiddelde gloeicurven. Uit de resulterende curve kon de stroomwaarde worden afgeleid vanaf wanneer niet-lineariteiten optraden.

In onderzoek [5] werd een diafragma gebruikt om ervoor te zorgen dat deze maximale stroomwaarde niet werd overschreden, waardoor invloeden van niet-lineariteiten van de uitleesapparatuur werden vermeden. Desalniettemin diende te worden gecontroleerd of deze maximale stroomwaarde zeker niet werd overschreden. Dit werd bereikt door te verifiëren of elke maximale piekwaarde van de gloeicurven uit [5] kleiner was dan de stroomwaarde waarbij niet-lineariteiten van de uitleesapparatuur optraden. Er werd een curve opgesteld waarbij de maximale stroomwaarden van de gloeicurven werden weergegeven in functie van de dosis.

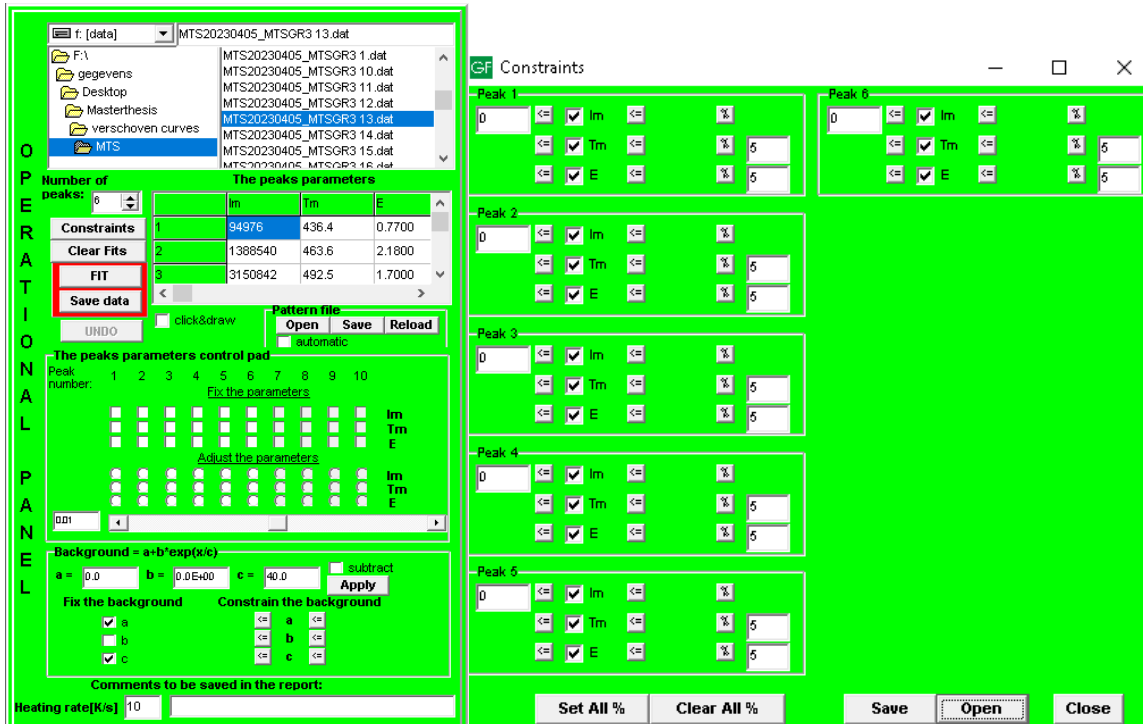
3.1.2 Heranalyse met GlowFit

De tweede stap van het vormen van het correctieprotocol omvatte het opnieuw analyseren van de data uit het onderzoek [5]. Deze heranalyse vereiste een deconvolutie-analyse om een nauwkeuriger resultaat te verkrijgen van de intrinsieke dosisresponsdata. De deconvolutie van deze gloeicurves werd uitgevoerd met behulp van de software GlowFit, ontwikkeld door het IFJ in Krakau, Polen. GlowFit maakt gebruik van deconvolutie en richt zich uitsluitend op de oppervlakte onder de hoofdpijk, waardoor de invloed van andere pieken wordt uitgesloten.

De GlowFit-analyse vindt plaats volgens de methode besproken in hoofdstuk 2, de bronnenstudie, meer specifiek paragraaf '2.2.3 Gloeicurven SCK CEN'. De ROI-analyse van het SCK CEN uit [5] wordt gebruikt als basis van de heranalyse met GlowFit.

Reguliere analyse

De standaard deconvolutie met Glowfit, zoals voorgeschreven door het SCK CEN, werd uitgevoerd met behulp van de parameters vermeld in Tabel 1 voor MCP-N en Tabel 2 voor MTS-N en MTT-7. De temperatuur en activeringsenergie van de subpieken werden toegestaan om tot 5% te variëren tijdens één fit. Om het intrinsieke achtergrondsignaal van de blootgestelde detectoren te elimineren, werd parameter a vastgesteld op 0, werd parameter b toegestaan om vrij te variëren, en werd parameter c ingesteld op 40 K [3]. Figuur 23 toont de instellingen voor de analyse in GlowFit. Het doel van deze methode was om na één enkele fit een goede pasvorm te verkrijgen met een *figure of merit* (FOM) die minder dan 2% bedraagt.



Figuur 23: Instellingen GlowFit

Aangezien drie TLD's aan dezelfde dosis werden blootgesteld, werd een gemiddelde genomen van de resulterende lichtintensiteiten van de hoofdpiek na de deconvolutie. De gemiddelde lichtintensiteit van de hoofdpiek (piek 4 voor MCP-N en piek 5 voor MTS-N en MTT-7) werd vastgelegd en vervolgens gebruikt om de lineariteitsindex te berekenen met behulp van Vergelijking (6). Deze lineariteitsindex werd vervolgens geplotted als functie van de dosis.

Aangepaste analyse

Voordat de aangepaste analyse met GlowFit werd uitgevoerd, werden alle gloeicurven uit [5] verschoven zodat het hoofdpiekmaxima op de temperatuur van het hoofdpiekmaxima lag. Afwijkingen van de positie van de hoofdpiek van de normale temperatuur, vermoedelijk omwille van problemen met de stabiliteit van de temperatuurscontrole van het uitleestoestel. Deze temperatuurwaarden zijn terug te vinden in Tabel 1 voor MCP-N (208,4°C) en Tabel 2 voor MTS-N / MTT-7 (2019,4°C).

De aangepaste analyse volgde gedeeltelijk het protocol van het SCK CEN. Voor MCP-N werden de parameters uit Tabel 1 gebruikt, en voor MTS-N / MTT-7 werden die uit Tabel 2 gehanteerd. Bovendien werd een variatie van de activeringsenergie en temperatuur tot 5% toegestaan. De achtergrondparameters werden eveneens op dezelfde wijze ingevuld. Het onderscheid met de standaardanalyse lag in het feit dat er niet slechts één keer werd gefit, maar dat er herhaaldelijk werd gefit totdat een correcte pasvorm met een FOM van minder dan 2% werd bereikt. Bij elke fit werd consequent een variatie van 5% toegestaan, waardoor er uiteindelijk een afwijking van meer dan 5% mogelijk was ten opzichte van de oorspronkelijke parameters.

Omdat de reader vermoedelijk niet de volledige gloeicurve heeft kunnen genereren, is het moeilijk om de deconvolutie correct uit te voeren, ook met de aangepaste analyse. Aangezien er drie TLD's van elk type per dosis werden gedeconvolueerd en er meermaals op fit werd gedrukt om tot een FOM van minder dan 2% te verkrijgen, is er een grote spreiding opgetreden in de verkregen resultaten. Deze grote spreiding resulteert in een grote onzekerheid.

3.1.3 Heranalyse met hoofdpiekmaximum

SCK CEN

Naast de heranalyse met GlowFit op basis van deconvolutie, werd een alternatieve analyse uitgevoerd op basis van het piekmaximum van de hoofdpiek. Ook in deze heranalyse werden de gloeicurven uit [5] verschoven. De methode die gebruikmaakt van het maximum van de hoofdpiek is doeltreffend wanneer de bijdrage van andere pieken niet significant is rond het piekmaximum van de hoofdpiek. Echter, indien de andere subpieken staarten hebben die bijdragen tot aan de temperatuur van het piekmaximum van de hoofdpiek, dan is de methode met het piekmaximum van de hoofdpiek niet adequaat en is deconvolutie meer geschikt.

De analyse startte met het onderzoeken van de hoofdpiekmaxima van alle gloeicurven uit het onderzoek [5]. In [5] werden drie TLD's van elk type blootgesteld aan dezelfde dosis. Daarom werd het gemiddelde genomen van de drie hoofdpiekmaxima voor elke dosis. Met behulp van Vergelijking (6) werd vervolgens de lineariteitsindex berekend met deze gemiddelde hoofdpiekmaximawaarde. Deze lineariteitsindex werd vervolgens geplot als functie van de dosis.

IFJ

In Polen werd gelijktijdig met het SCK CEN een vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd, waarbij detectoren van het IFJ samen met die van het SCK CEN werden blootgesteld aan straling [16]. De analyse omvatte zowel MCP-N- als MTS-N-detectoren.

Voor de MCP-detectoren werd uitgelezen binnen een temperatuurbereik van 100°C tot 270°C, met een uitleessnelheid van 2°C/s, voor dosissen variërend van 0,05 Gy tot 0,5 kGy. Voor hogere dosissen tot 15.600 Gy werd uitgelezen binnen een temperatuurbereik van 100°C tot 450°C, met dezelfde uitleessnelheid.

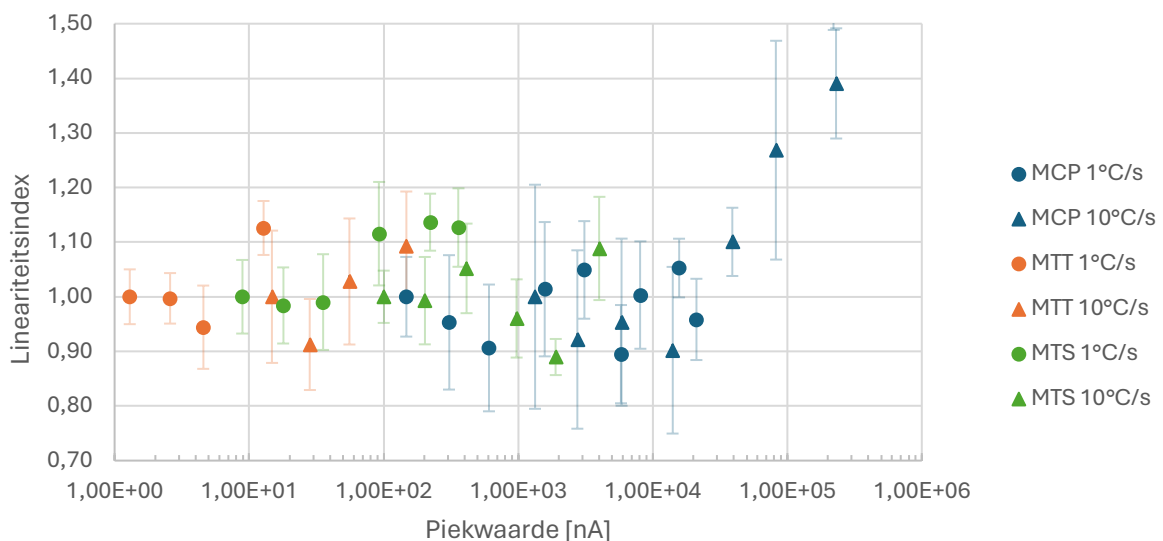
De MTS-detectoren ondergingen uitlezing binnen het temperatuurbereik van 100°C tot 350°C, voor alle dosisniveaus. Het is opmerkelijk dat zowel voor MTS als MCP de uitleestemperaturen hoger waren dan die bij het SCK CEN werden toegepast. Ook deze analyse maakte gebruik van de methode van het hoofdpiekmaximum om de lineariteitsindexen te bepalen.

3.2 Resultaten en discussie

3.2.1 Niet-lineariteiten reader

Figuur 24 illustreert de lineariteitsindexen in relatie tot de piekwaarde in nanoampère. Tussen de piekwaarden van 1 nA en 1.000 nA liggen de lineariteitsindexen relatief dichtbij 1 zonder systematische afwijkingen, indien er rekening wordt gehouden met de onzekerheden. Eerder onderzoek, zoals beschreven in [4], onthulde deze aanzienlijke variabiliteit al eerder in de resultaten. Indien de onzekerheden in acht worden genomen, kan er besloten worden dat deze lineariteitsindexen niet significant van 1 afwijken en dat er geen niet-lineariteiten van de reader optreden. Met andere woorden vertoont de reader een lineair gedrag in uitlezingen.

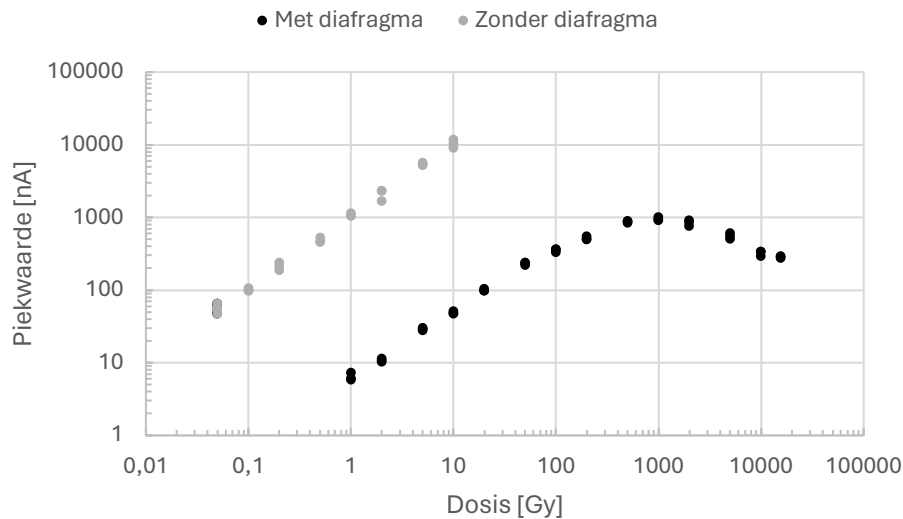
Tussen de piekwaarden van 1 nA en 1.000 nA zijn de uitlezingen van MTT-7 en MTS-N met uitleessnelheid 1°C/s en 10°C/s gelegen. Ook voor MCP-N met een uitleessnelheid van 1°C/s is dit van toepassing. Figuur 24 toont dat er geen niet-lineariteiten van de reader optreden voordat er intrinsieke niet-lineariteiten optreden in geval van deze detectoren. In geval van de MCP-N detectoren met uitleessnelheid 10°C/s is er een superlineariteit waarneembaar vanaf een piekwaarde van 10.000 nA. Dit wijst op niet-lineariteiten van de lezer.



Figuur 24: Lineariteitsindexen in functie van de piekwaarde voor MCP-N, MTT-7 en MTS-N voor uitleessnelheden 1°C/s en 10°C/s

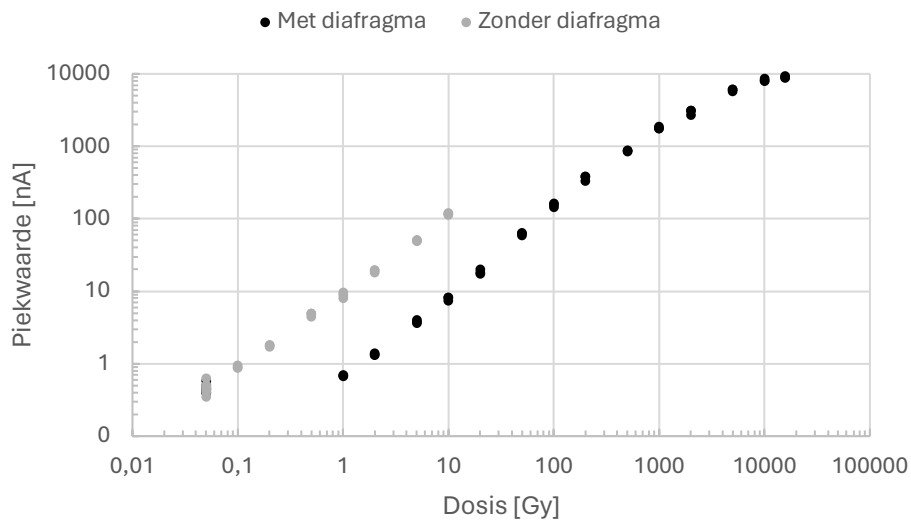
Uit Figuur 24 blijkt dat de niet-lineariteit van de reader optreedt vanaf een waarde van 10.000 nA. De volgende stap in het proces was om te controleren of deze piekwaarde van 10.000 nA niet werd overschreden in de intrinsieke dosisresponsdata [5].

Figuur 25 presenteert de gemeten piekwaarden in relatie tot de dosis voor zowel de uitlezingen zonder diafragma als die met diafragma van de MCP-N detectoren. De piekwaarden die zijn uitgelezen met diafragma blijven onder de stroomwaarde van 10.000 nA. Bij de uitlezing zonder diafragma is een waarde van 10.445 nA waargenomen bij een dosis van 10 Gy. Aangezien deze overschrijding beperkt is, wordt de dataset niet verworpen, en wordt geconcludeerd dat deze dataset uit [5] geldig is als een set intrinsieke dosisresponsgegevens voor de MCP-N-detectoren.



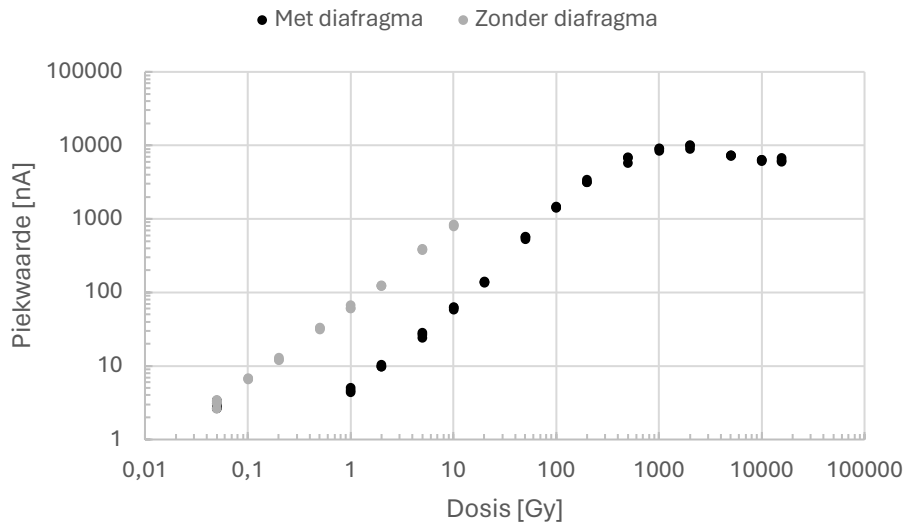
Figuur 25: Piekwaarde in functie van de dosis voor MCP-N

Figuur 26 toont de gemeten piekwaarden in relatie tot de dosis voor zowel de uitlezingen zonder diafragma als die met diafragma van de MTT-7 detectoren. Hieruit volgt dat de grens van 10.000 nA niet werd overschreden. Dit impliceert dat de gegevens uit [5] voor de MTT-7-detectoren uitsluitend de intrinsieke dosisrespons weergeven.



Figuur 26: Piekwaarde in functie van de dosis voor MTT-7

Figuur 27 toont de gemeten piekwaarden in relatie tot de dosis voor zowel de uitlezingen zonder diafragma als die met diafragma van de MTS-N detectoren. De piekwaarden die zijn verkregen zonder diafragma blijven onder de kritieke stroomwaarde van 10.000 nA. Bij de uitlezingen met diafragma is bij een dosis van 2.000 Gy een stroomwaarde van 10.189 nA waargenomen. Ook hier is de overschrijding slechts beperkt, waardoor wordt aangenomen dat er geen invloed is van de uitleesapparatuur.

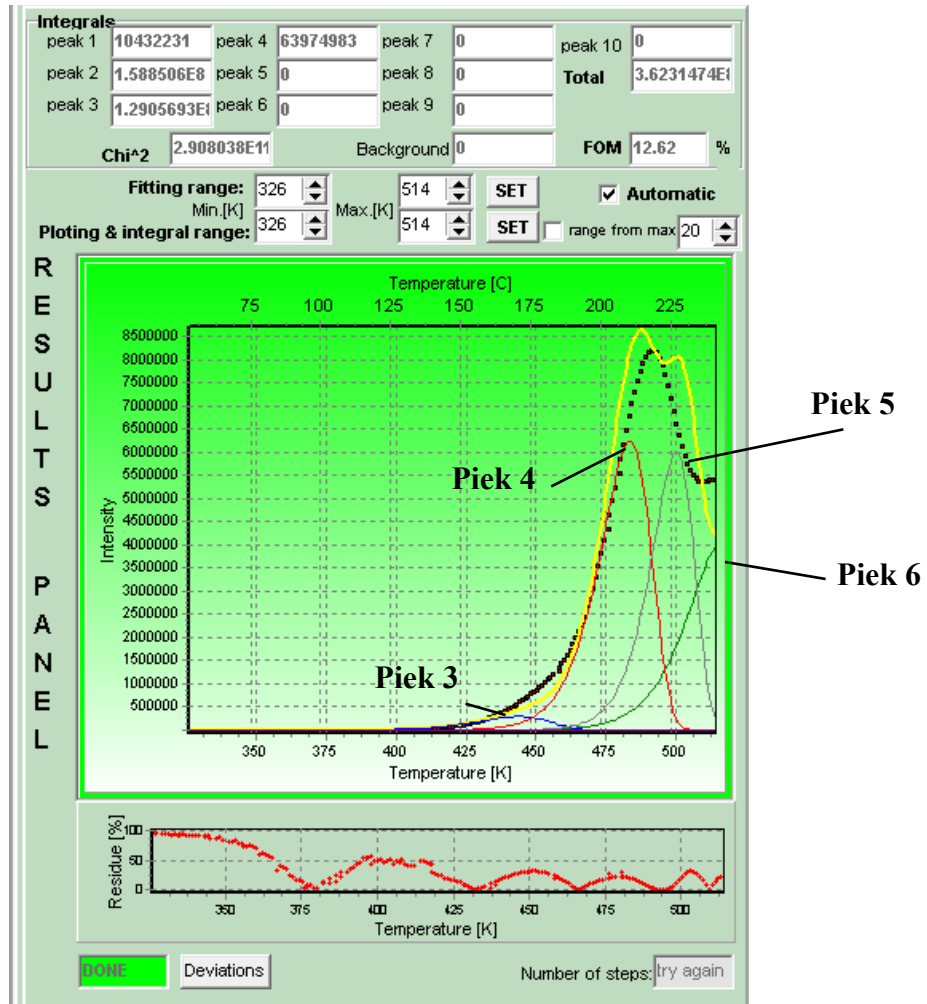


Figuur 27: Piekwaarde in functie van de dosis voor MTS-N

3.2.2 Heranalyse met GlowFit

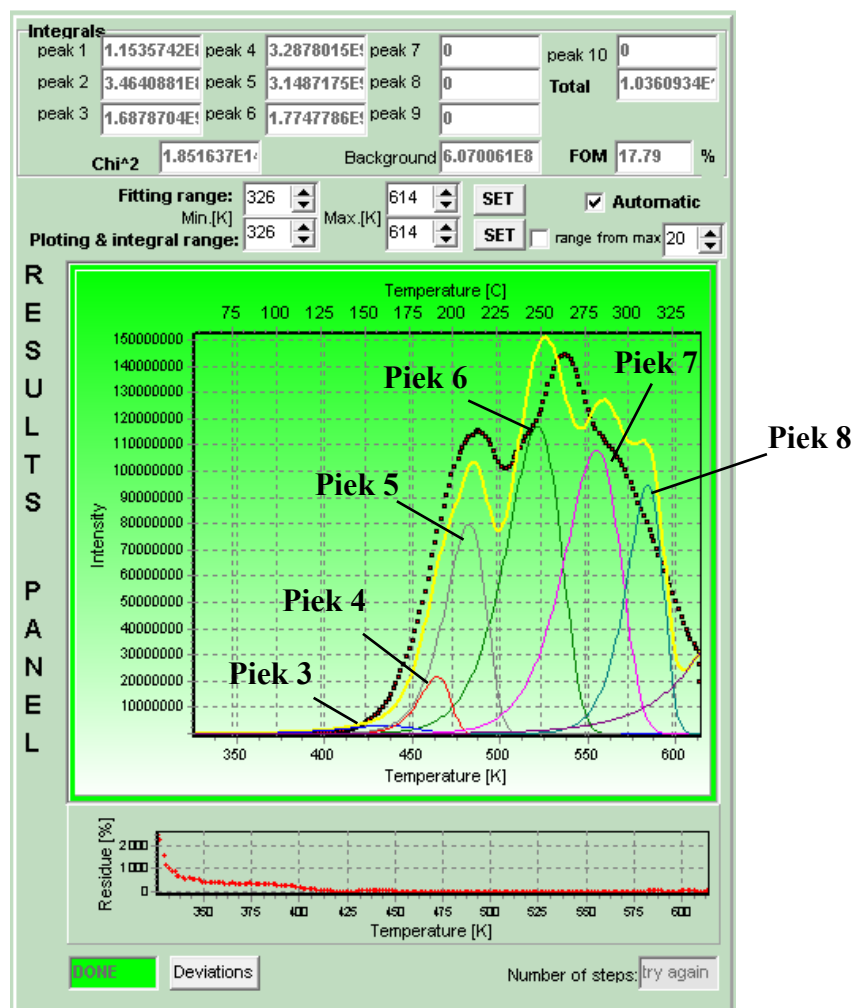
Reguliere analyse

Indien de voorgeschreven analyse wordt toegepast, resulteert dit in Figuur 28 voor de MCP-N-detectoren. De gele curve representeert de som van alle subpieken, die zou moeten overeenkomen met de effectieve gloeicurve weergegeven als de zwarte puntlijn. Uit deze analyse blijkt dat de effectieve gloeicurve tijdens de uitlezing naar rechts is verschoven, waardoor de subpieken niet op de juiste temperaturen liggen. Het is waarschijnlijk dat de temperatuursensor een hogere temperatuur heeft geregistreerd dan de werkelijke temperatuur, waardoor de ingestelde maximale uitleestemperatuur van 255°C niet is bereikt in de reader. Hierdoor is niet de volledige gloeicurve uitgelezen. Bovendien toont Figuur 28 aan dat de subpieken te smal zijn, wat resulteert in scherpe pieken in de gele totale deconvolutiecurve. Concluderend werd vastgesteld dat de parameters uit Tabel 1 niet geschikt zijn voor de uitlezingen in deze dataset.

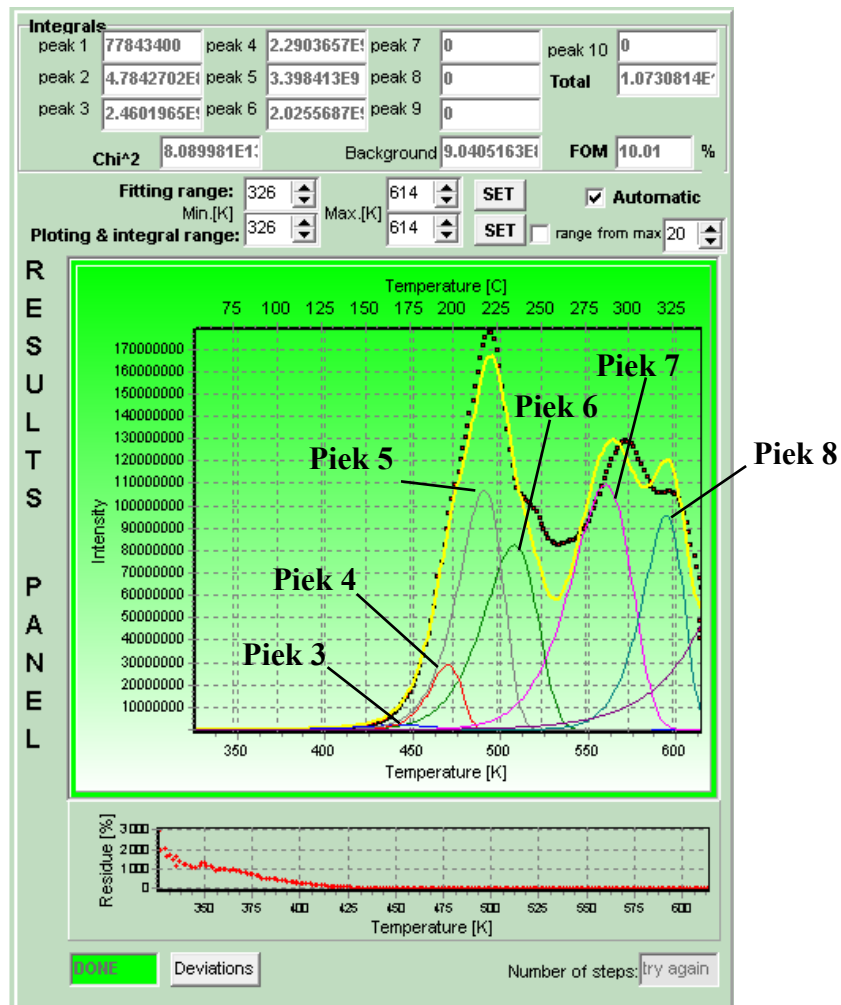


Figuur 28: Reguliere analyse met GlowFit voor MCP-N

Figuur 29 en 30 presenteren de deconvolutiecurve verkregen door de reguliere analyse respectievelijk voor MTT-7 en MTS-N. Deze analyse resulteerde eveneens in een curve met een FOM die groter is dan 2%. De subpieken bij hogere temperaturen (piek 6, 7 en 8) liggen niet op de juiste posities. Er lijkt een verschuiving naar rechts te zijn opgetreden in het tweede deel van de curve (vanaf een temperatuur van 225°C). Het vermoeden bestaat dat de ingestelde uitleestemperatuur niet werd bereikt in de reader, wat resulteerde in het niet bereiken van de maximale uitleestemperatuur van 340°C. Als gevolg hiervan is niet de volledige gloeicurve uitgelezen. Bovendien zijn de subpieken te smal, wat resulteert in scherpe pieken in de gele curve. Ook in het geval van MTT-7 blijken de parameters uit Tabel 2 niet geschikt te zijn voor een correcte analyse.



Figuur 29: Reguliere analyse met GlowFit voor MTT-7

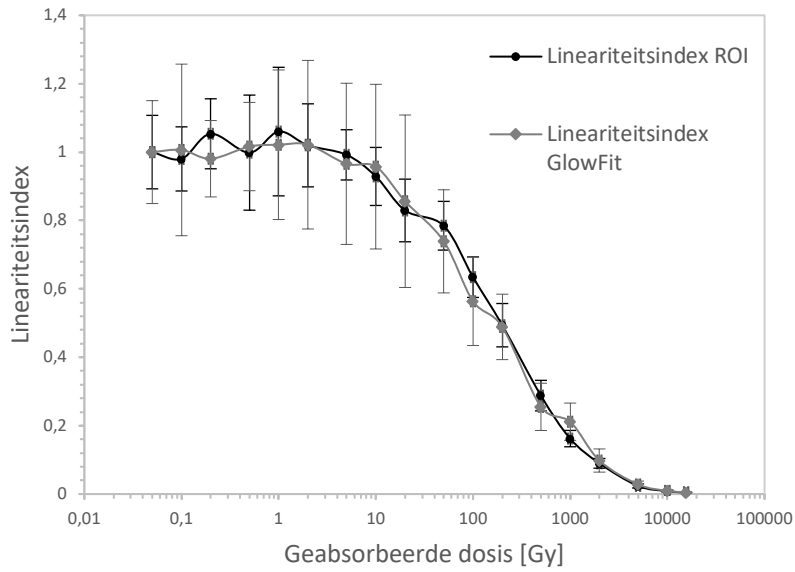


Figuur 30: Reguliere analyse met GlowFit voor MTS-N

Aangepaste analyse

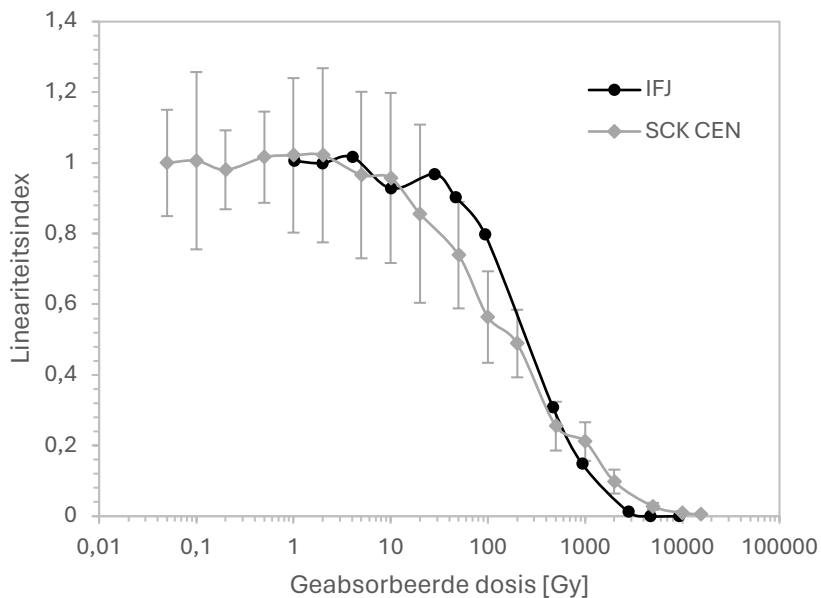
MCP-N

Figuur 31 presenteert zowel de intrinsieke dosisrespons voor MCP-N op basis van de ROI, zoals gevonden in de eerdere studie [5] die besproken is in de bronnenstudie (zie paragraaf 2.3.2 Resultaten literatuurstudie dosisrespons), als de intrinsieke dosisrespons voor MCP-N verkregen door middel van de aangepaste analyse met GlowFit. Beide sets van dosisresponsdata tonen een vergelijkbare trend en zijn binnen de onzekerheden consistent met elkaar. Tot een dosis van 5 Gy vertonen beide curven een lineair gedrag. Na deze drempel vertonen de detectoren verzadigingsverschijnselen, resulterend in een sublineair gedrag van de curve.



Figuur 31: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van ROI en GlowFit

In Figuur 32 wordt een vergelijking gegeven tussen de intrinsieke dosisresponsdata van het IFJ [2] (zie paragraaf 2.3.2) en van het SCK CEN voor de MCP-N-detectoren. Hierbij is een soortgelijke analyse uitgevoerd met behulp van GlowFit. De curve van het IFJ vertoont eveneens een vergelijkbare trend. In geval van het IFJ treedt de sublineariteit op vanaf een dosis van 10 Gy. Dit verschil kan toe te schrijven zijn aan variaties in de uitleesmethodiek of aan verschillen in de parameters die zijn toegepast in GlowFit. Tabel 3 en 4 tonen respectievelijk de toegepaste methode voor het IFJ en het SCK CEN.



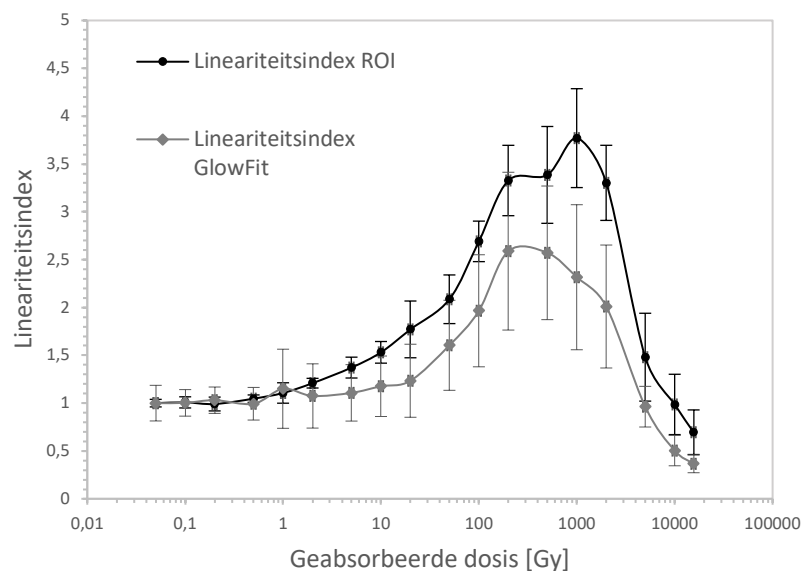
Figuur 32: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN [2]

MTT-7

Figuur 33 toont de intrinsieke dosisrespons voor de MTT-7-detectoren enerzijds op basis van de ROI, zoals gevonden in de eerdere studie [5] die besproken is in de bronnenstudie (zie paragraaf 2.3.2), en anderzijds op basis van GlowFit. De curve van de ROI is lineair tot een dosis van 2 Gy, indien er rekening wordt gehouden met de onzekerheden. Hierna vertoont de curve supralineariteit. Verzadiging treedt op bij 1.000 Gy. Hierbij bedraagt de lineariteitsindex 3,77. De lineariteitsindex neemt vervolgens af en verliest vervolgens een sterke gevoeligheid om vanaf 10 kGy sublineair te worden.

De responscurve van GlowFit vertoont een gelijkaardige tendens als de responscurve van de ROI. De GlowFit-curve vertoont een lineaire relatie tot een dosis van 20 Gy als de onzekerheden in rekening worden gebracht. Daarna treedt supralineariteit op tot een dosis van 200 Gy. Bij een dosis van 200 Gy bedraagt de lineariteitsindex 2,59. Na deze drempel treedt verzadiging op en vanaf een dosis van 5 kGy wordt de curve sublineair.

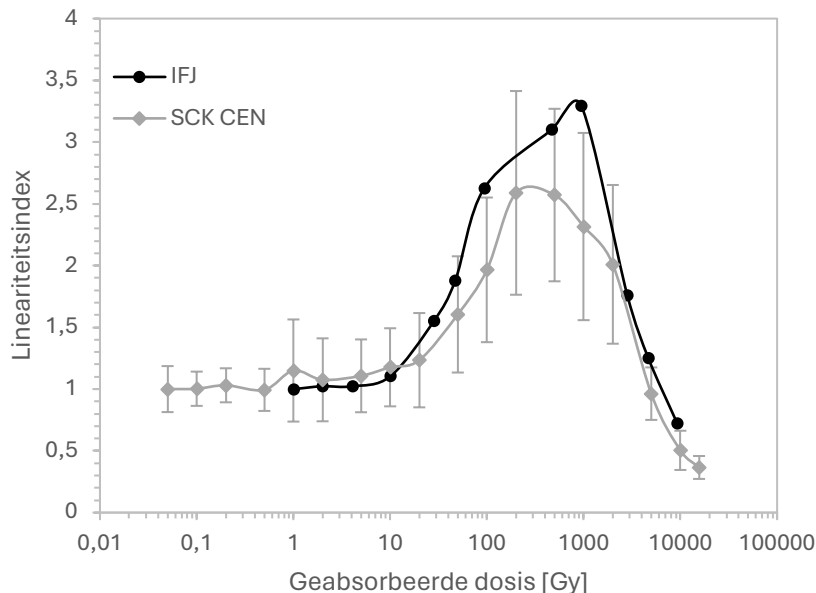
Er is een significante afwijking tussen de curven van de ROI en GlowFit. Bij lagere dosissen zijn deze vergelijkbaar omdat de pieken bij hoge temperaturen nog niet zo uitgesproken zijn. Vanaf 1 Gy zijn alle waarden van de lineariteitsindex op basis van GlowFit lager dan de waarden op basis van de ROI. Dit geeft aan dat de hoge temperatuurpieken de hoofdpiek verstoren. GlowFit houdt rekening met verschillende pieken en houdt alleen rekening met het gebied onder de hoofdpiek nadat deconvolutie heeft plaatsgevonden. De ROI neemt alleen de integraal tussen twee temperaturen. Dit is de reden dat de waarden van GlowFit lager zijn.



Figuur 33: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTT-7 op basis van ROI en GlowFit

Figuur 34 presenteert een vergelijkende analyse tussen de GlowFit-resultaten van twee verschillende onderzoeksinstellingen, namelijk het onderzoeksinstituut IFJ [2] (zie paragraaf 2.3.2) en het SCK CEN. Beide instellingen hebben een soortgelijke analyse uitgevoerd met behulp van GlowFit. Hoewel de curven een gelijkaardige vorm vertonen, is de intrinsieke dosisrespons die door het SCK CEN is waargenomen lager dan die van het IFJ. Het is echter belangrijk om op te merken dat er aanzienlijke onzekerheid bestaat met betrekking tot de gegevens van het SCK CEN, vanwege de grote variabiliteit tussen de resultaten.

Voor het IFJ blijft de responscurve lineair tot een dosis van 4 Gy, terwijl voor het SCK CEN deze lineariteit wordt waargenomen tot een dosis van 20 Gy indien er rekening wordt gehouden met de onzekerheden. Na deze drempel treedt supralineariteit op, resulterend in verzadiging bij respectievelijk 950 Gy voor het IFJ en 200 Gy voor het SCK CEN. De lineariteitsindex voor het IFJ bedraagt hierbij 3,30, terwijl deze voor het SCK CEN 2,59 is. Beide curven vertonen sublineariteit vanaf een dosis van 5 kGy.

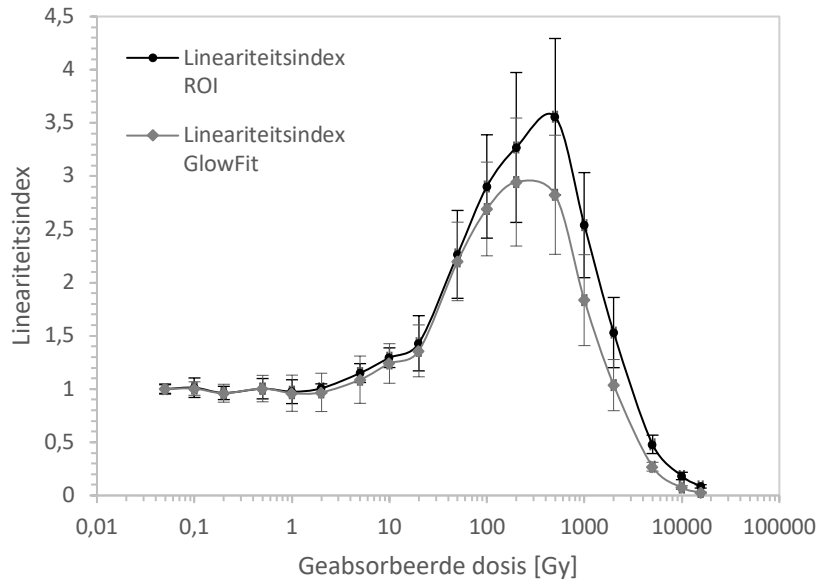


Figuur 34: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTT-7 op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN [2]

MTS-N

Figuur 35 presenteert de intrinsieke dosisresponsdata voor de MTS-N detectoren, verkregen via zowel de ROI-analyse, zoals gevonden in de eerdere studie [5] die besproken is in de bronnenstudie (zie paragraaf 2.3.2), als de GlowFit-analyse. In beide analyses blijft de lineariteitsindex constant op 1 tot een dosis van 2 Gy. Na deze dosis vertoont de curve een supralineaire trend tot verzadiging optreedt. Op de ROI-curve wordt deze verzadiging waargenomen bij 500 Gy, met een bijbehorende lineariteitsindex van 3,55. Voor de GlowFit-curve treedt verzadiging eerder op, namelijk bij 200 Gy, met een lineariteitsindex van 2,94. Subsequent zal de curve afnemen en zich zelfs sublineair ontwikkelen, vanaf respectievelijk 5.000 Gy voor de ROI-curve en 2.000 Gy voor de GlowFit-curve.

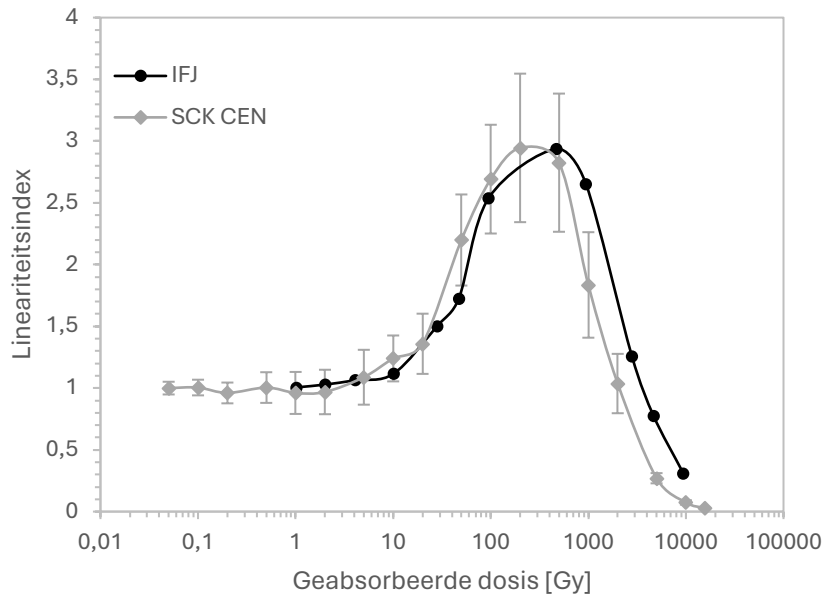
Net zoals bij de MTT-7 detectoren, is de ROI-curve lager voor MTS-N dan voor GlowFit vanwege hetzelfde fenomeen, namelijk de effecten van hoge temperatuurpieken. Dit benadrukt opnieuw het belang van dit aspect bij de interpretatie van de resultaten.



Figuur 35: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS-N op basis van ROI en GlowFit

Figuur 36 illustreert de GlowFit-analyses voor MTS-N-detectoren uitgevoerd door het IFJ [2] (zie paragraaf 2.3.2) en het SCK CEN. De curves vertonen een vergelijkbare trend, waarbij beide een initiële lineariteit vertonen tot een dosis van 2 Gy, gevolgd door een supralineaire respons tot respectievelijk 470 Gy voor het IFJ en 200 Gy voor het SCK CEN. Op deze dosisniveaus bereiken beide curves een lineariteitsindex van 2,94. Na dit maximum dalen de curves en vertonen ze een sublineaire respons, vanaf respectievelijk 2 kGy voor het SCK CEN en 4 kGy voor het IFJ.

Het is opmerkelijk dat de curves zeer gelijkaardige resultaten tonen, hoewel de waarden van het IFJ over het algemeen iets meer naar rechts gepositioneerd zijn. Deze variatie kan mogelijk worden toegeschreven aan verschillen in de uitlees- of voorbehandelingsprocessen van de TLD's tussen de twee instellingen.



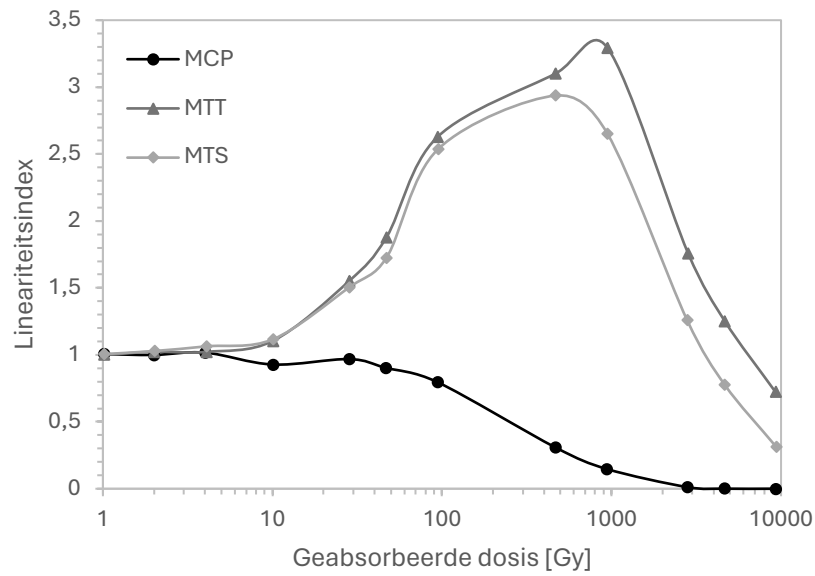
Figuur 36: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS-N op basis van Glowfit voor IFJ en SCK CEN [2]

Overzicht

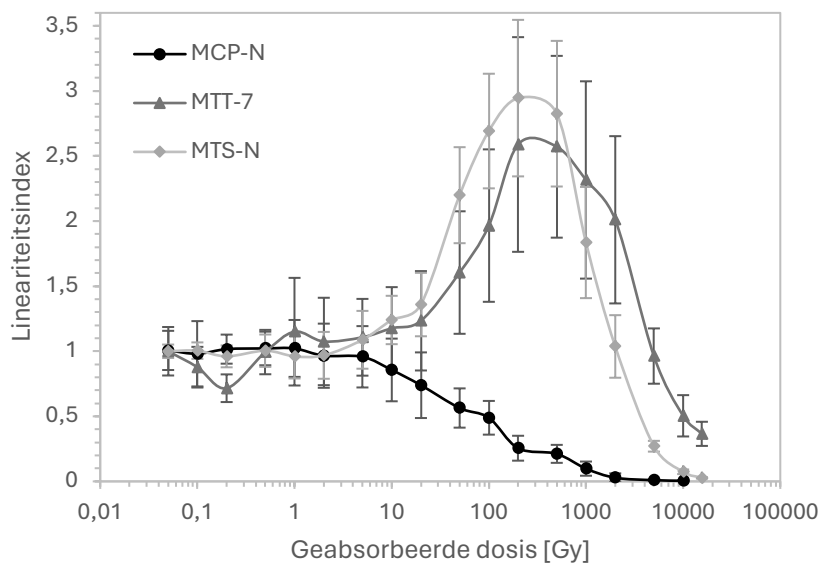
Figuur 37, 38 en 39 bieden respectievelijk een overzicht van de gevonden intrinsieke dosisresponsdata van het IFJ [2], het SCK CEN op basis van GlowFit, en het SCK CEN op basis van de ROI [5]. Alle drie de figuren tonen een vergelijkbare trend voor de corresponderende detectoren.

De MCP-detectoren vertonen vanaf het begin sublineariteit en bereiken snel verzadiging na de lineaire fase. Daarentegen vertonen de MTT- en MTS-detectoren eerst een periode van supralineariteit na een initiële lineaire fase. Vervolgens bereiken deze detectoren verzadiging, wat resulteert in een afname van de responscurve als gevolg van een verlies aan gevoeligheid, gevolgd door sublineariteit.

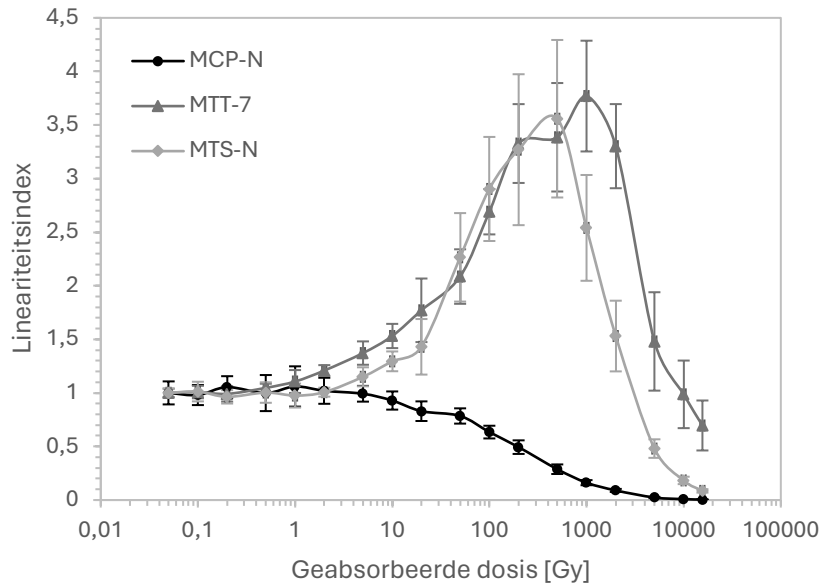
Bij de analyse van zowel het IFJ als het SCK CEN op basis van de ROI, vertoont de MTT-curve een hogere mate van supralineariteit dan de MTS-curve, zoals verwacht wordt. Echter, bij de GlowFit-analyse van het SCK CEN, vertonen de MTS-detectoren meer supralineariteit. Niettemin dient te worden opgemerkt dat er aanzienlijke onzekerheid bestaat met betrekking tot de GlowFit-analyse van het SCK CEN.



Figuur 37: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata IFJ GlowFit [2]



Figuur 38: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata SCK CEN GlowFit



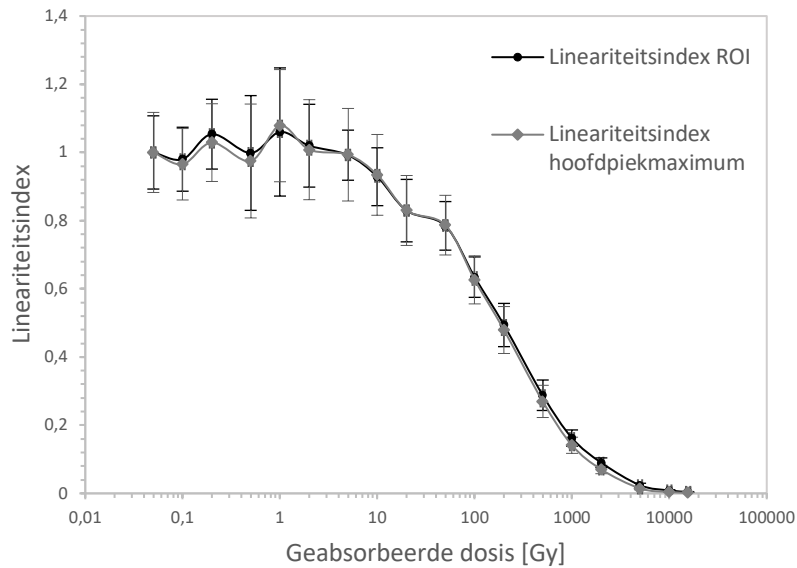
Figuur 39: Overzicht intrinsieke dosisresponsdata SCK CEN ROI

3.2.3 Heranalyse met hoofdpijkmaximum

MCP-N

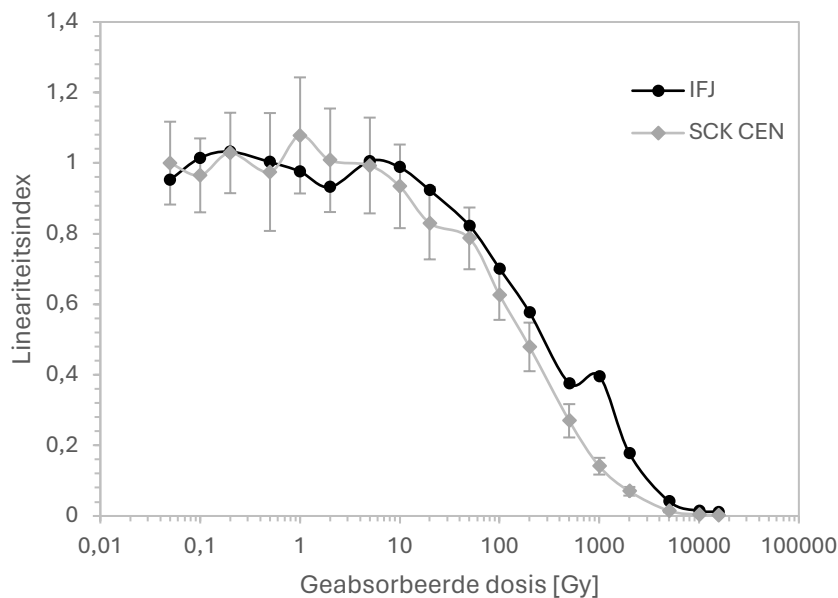
Figuur 40 presenteert een vergelijking tussen twee analysemethoden: de ROI-analyse [5] en de analyse op basis van het hoofdpijkmaximum. De ROI-analyse richt zich op specifieke regio's van belang binnen de detectoren, terwijl de analyse op basis van het hoofdpijkmaximum zich concentreert op het hoogste piekniveau in de verkregen gegevens. Ondanks deze methodologische verschillen tonen beide benaderingen vergelijkbare resultaten. Dit impliceert dat zowel de ROI-analyse als de analyse op basis van het hoofdpijkmaximum nauwkeurig zijn en consistentie bieden in de interpretatie van de dosisrespons van de MCP-detectoren.

De methode met het maximum van de hoofdpijk verkrijgt correcte resultaten als de andere pieken niet significant bijdragen ter hoogte van het maximum van de hoofdpijk. Vanwege de overeenkomst tussen de ROI-curve en GlowFit-curve kan er besloten worden dat er voldaan is aan deze voorwaarde.



Figuur 40: Intrinsieke dosisresponsdata voor MCP-N op basis van ROI en hoofdpijkmaximum

Figuur 41 vergelijkt de resultaten van de Poolse onderzoeksgroep IFJ [16] met die van het SCK CEN voor MCP-N-detectoren, waarbij gebruik wordt gemaakt van de methode van het hoofdpijkmaximum. Ondanks dat de onderzoeksgroepen mogelijk verschillende experimentele opstellingen en methodologieën hebben gebruikt, vertonen de resultaten een identieke algemene trend.

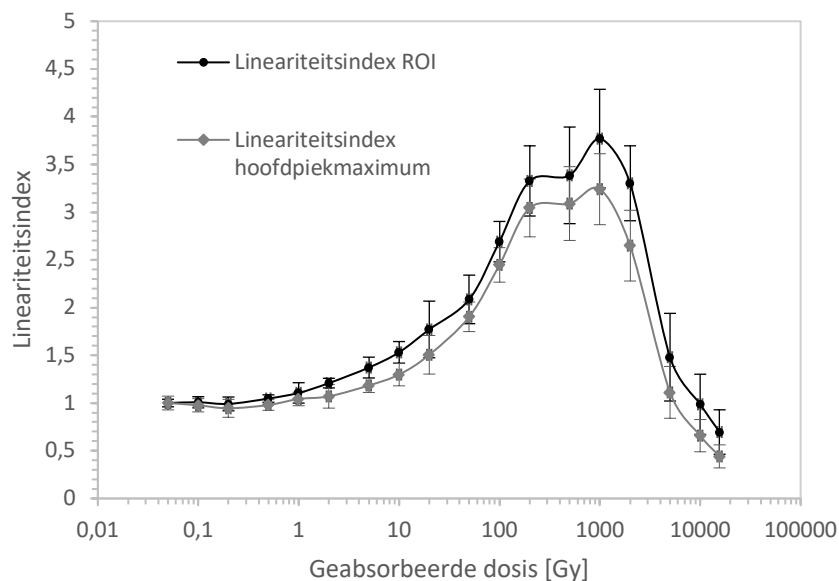


Figuur 41: Intrinsieke dosisresponsdata MCP-N op basis van hoofdpijkmaximum voor IFJ en SCK CEN [16]

MTT-7

Figuur 42 presenteert een vergelijking tussen de curve van het SCK CEN, verkregen via de ROI-analyse [5] en de analyse van het hoofdpijkmaximum. De methode van het hoofdpijkmaximum vertoont vergelijkbare resultaten als de eerdergenoemde GlowFit-analyse, waarbij de curve van het hoofdpijkmaximum zeker binnen de onzekerheden ligt van de GlowFit-curve.

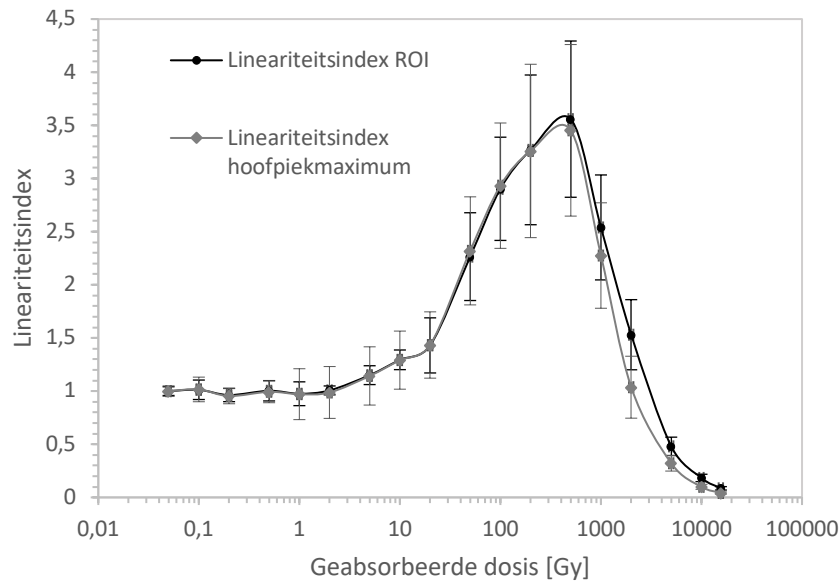
Toch ligt de curve van het hoofdpijkmaximum lager dan de ROI-curve. Dit impliceert dat er niet helemaal voldaan is aan de voorwaarde dat de andere pieken niet significant bijdragen ter hoogte van het maximum van de hoofdpijk. De methode van het hoofdpijkmaximum is dus niet zo nauwkeurig voor de MTT-7-detectoren als voor de MCP-N-detectoren. Aangezien de curve van het hoofdpijkmaximum binnen de onzekerheden ligt van zowel de GlowFit-curve en de ROI-curve, kan er besloten worden dat de methode van het hoofdpijkmaximum een relatief nauwkeurige benadering biedt voor het vaststellen van de dosisrespons van MTT-detectoren.



Figuur 42: Intrinsieke dosisresponsdata MTT-7 op basis van ROI en hoofdpijkmaximum

MTS-N

Figuur 43 toont een vergelijking tussen de intrinsieke dosisrespons van de MTS-N-detectoren, verkregen via twee verschillende analysemethoden: de ROI-analyse [5] en de analyse van het hoofdpijkmaximum. Uit de resultaten blijkt dat zowel de ROI-analyse als de analyse van het hoofdpijkmaximum vergelijkbare trends in de dosisrespons vertonen. Er is dus voldaan aan de voorwaarde dat de andere pieken niet significant bijdragen ter hoogte van het maximum van de hoofdpijk. Voor de MTS-N-detectoren is de analyse via het hoofdpijkmaximum, net zoals de MCP-N-detectoren, een betrouwbare methode.

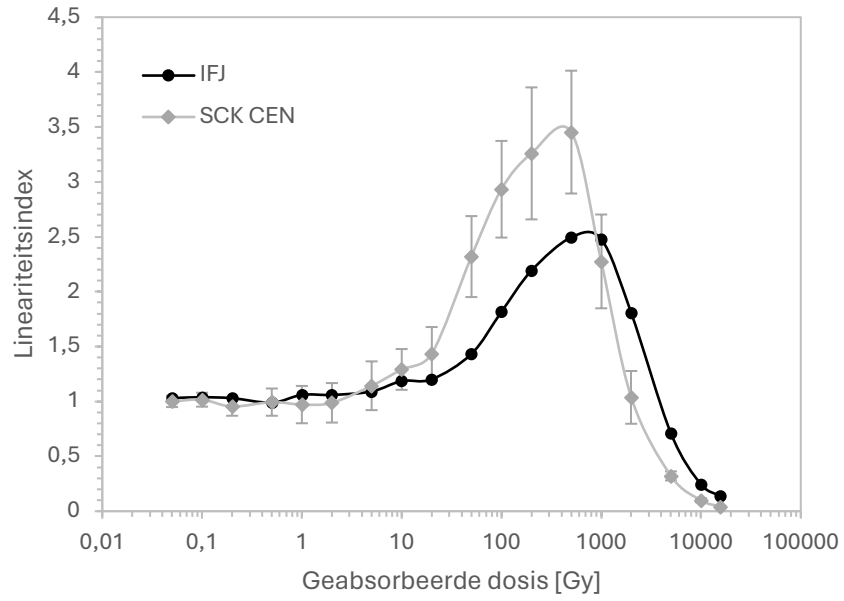


Figuur 43: Intrinsieke dosisresponsdata MTS-N op basis van ROI en hoofpiekmaximum

In Figuur 44 wordt een vergelijking gepresenteerd tussen de analyse van het hoofdpiekmaximum uitgevoerd door het IFJ en het SCK CEN. Deze vergelijking biedt inzicht in mogelijke variaties in de respons van de detectoren tussen de twee onderzoeksinstituten.

De curven tonen opvallend verschillende resultaten. De curve van het IFJ vertoont een lagere lineariteitsindex tot een dosis van 1000 Gy. Na deze dosis vertoont de curve van het IFJ een hogere lineariteitsindex in vergelijking met die van het SCK CEN. Bovendien valt op dat de curve van het IFJ buiten de onzekerheden van de curve van het SCK CEN ligt.

Een mogelijke verklaring voor deze verschillen kan liggen in de experimentele omstandigheden en methodologieën die door beide instituten zijn toegepast. Specifiek kan het verschil in uitleessnelheid een rol spelen, waarbij het SCK CEN heeft uitgelezen op 1°C/s en het IFJ op 2°C/s. Deze variatie in uitleessnelheid kan verschillen in de respons van de detectoren veroorzaken en daarmee de waargenomen dosisresponscurven beïnvloeden. Deze bevindingen benadrukken het belang van het begrijpen van experimentele parameters en methodologieën bij het interpreteren van dosisresponscurven van detectoren.



Figuur 44: Intrinsieke dosisresponsdata voor MTS op basis van hoofdpijkmaximum voor IFJ en SCK CEN [16]

3.3 Conclusie

In dit hoofdstuk werden verschillende analysemethoden toegepast om de intrinsieke dosisrespons van verschillende detectoren te onderzoeken. Eerst werd de lineariteit van de reader geëvalueerd, waarbij werd vastgesteld dat deze over het algemeen lineair gedrag vertoont, met uitzondering van detectoren met hogere piekwaarden die superlineariteit kunnen vertonen. Vervolgens werden de dosisresponscurven geanalyseerd met behulp van verschillende technieken, waaronder ROI-analyse, GlowFit en analyse van het hoofdpijkmaximum.

Voor de MCP-N-detectoren werd vastgesteld dat zowel de ROI-analyse, de GlowFit-analyse en de analyse van het hoofdpijkmaximum van het SCK CEN vergelijkbare resultaten opleverden, wat wijst op nauwkeurigheid en consistentie tussen deze benaderingen. De algemene trend van de intrinsieke dosisrespons voor de MCP-N-detectoren is een lineair gedeelte dat gevolgd wordt door een sublineair gedeelte.

Voor de MTT-7-detectoren blijkt uit de vergelijking tussen de ROI-analyse en GlowFit-analyse dat beide methoden vergelijkbare vorm laten zien in de dosisrespons. De dosisrespons onthult eerst een fase van lineariteit, gevolgd door een overgang naar een supralineaire respons voordat verzadiging plaatsvindt. Echter, er is een duidelijk verschil in de lineariteitsindexen tussen de twee methoden, vooral bij hogere dosisniveaus. De curve van de GlowFit-analyse ligt onder die van de ROI-analyse. Dit suggereert dat de aanwezigheid van hoge temperatuurpieken de interpretatie van de dosisrespons beïnvloedt en dat GlowFit mogelijk beter in staat is om deze effecten te corrigeren. De analyse van de dosisresponscurven met behulp van de methode van het hoofdpijkmaximum biedt een alternatieve benadering die relatief nauwkeurig blijkt te zijn voor het vaststellen van de dosisrespons van MTT-7-detectoren. Hoewel er enige discrepantie is tussen de resultaten van de ROI-analyse en de analyse van het hoofdpijkmaximum, liggen de curven binnen de onzekerheden van elkaar, wat aangeeft dat beide methoden betrouwbaar zijn.

Ook tonen de methoden met de ROI en met GlowFit vergelijkbare trends in de dosisrespons voor de MTS-N-detectoren, waarbij een initiële lineariteit wordt waargenomen tot een bepaalde dosis, gevolgd door een supralineaire respons tot verzadiging optreedt. Het verschil in verzadigingsdosis en bijbehorende lineariteitsindex tussen ROI en GlowFit benadrukt de impact van hoge temperatuurpieken op de interpretatie van de respons, waardoor GlowFit mogelijk beter in staat is om deze effecten te corrigeren. Verder bevestigt de vergelijking tussen ROI-analyse en analyse van het hoofdpijkmaximum dat beide methoden vergelijkbare trends vertonen, waardoor de laatste een betrouwbare benadering blijkt te zijn voor het vaststellen van de dosisrespons van MTS-N detectoren. Het opvallende verschil tussen de responscurven van het IFJ en het SCK CEN in de analyse van het hoofdpijkmaximum benadrukt echter de invloed van experimentele omstandigheden en methodologieën op de waargenomen resultaten.

De vergelijking tussen de resultaten van het IFJ en het SCK CEN toont gelijkaardige trends in de dosisrespons, zij het met kleine variaties in waargenomen dosisniveaus en lineariteitsindexen. Deze variabiliteit kan worden toegeschreven aan verschillen in experimentele procedures, zoals uitleessnelheid, en benadrukt het belang van consistentie in experimentele omstandigheden voor reproduceerbaarheid.

In conclusie tonen de resultaten van dit onderzoek aan dat verschillende analysemethoden nauwkeurige en consistente dosisresponscurven kunnen opleveren voor verschillende types detectoren. Echter, variaties tussen instituten benadrukken het belang van standaardisatie en begrip van experimentele parameters bij het interpreteren van dosisresponsgegevens.

Met behulp van de intrinsieke dosis-responsgegevens die zijn verkregen in deze fase, kan de nieuwe relatieve luminescentie-efficiëntie worden vastgesteld. Deze analyse wordt uitgevoerd aan de hand van het Microdosimetriscche $d(z)$ -model, zoals besproken in paragraaf 2.4. De concrete uitvoering van deze analyse valt buiten het kader van deze thesis. Voor verdere analyses wordt gebruik gemaakt van de eerder vastgestelde relatieve luminescentie-efficiëntie zoals beschreven in onderzoek [3].

Dosisvoorspelling bij omgevingsdosimetrie

Blootstelling aan aardse kosmische straling, zoals besproken in hoofdstuk 2 (zie paragraaf 2.5), is een van de vele soorten natuurlijke straling die mensen worden blootgesteld. Deze blootstelling vormt ongeveer 20% van de totale blootstelling van mensen aan natuurlijke straling [17]. Maar de dosissnelheden van kosmische straling zijn sterk afhankelijk van een aantal factoren, waaronder de hoogte van de zon en haar elfjarige cyclus.

Het voornaamste doel in dit hoofdstuk is het valideren van de relatieve luminescentie-efficiënties. Dit wordt bereikt door gedetailleerde simulaties uit te voeren met EXPACS en de resultaten hiervan te vergelijken met experimentele data. Door deze vergelijking kunnen we bepalen of de simulaties op basis van de relatieve luminescentie-efficiënties betrouwbare en correcte resultaten opleveren.

Daarnaast wordt er onderzocht of simulatie-tools in staat zijn om kosmische straling op een accurate en betrouwbare manier te simuleren, zowel op grondniveau als op vlieghoogte. Dit onderzoek is cruciaal voor het valideren van de nauwkeurigheid van deze simulatie-tools in verschillende omgevingen.

4.1 Methode

4.1.1 TLD's

ÚFJ

Tijdens dit werk werden zes verschillende LiF TLD-typen bestraald en gemodelleerd op vliegniveau. Tabel 6 geeft een overzicht van de verschillende TLD-typen met hun grootte, doteermiddelen en ${}^6\text{Li}$ -atoomconcentratie.

Tabel 6: TLD-typen ÚFJ

TLD type	Grootte	Doperingen	${}^6\text{Li}$ (at%)
MCP-N			7,5
MCP-7		Mg, Cu, P	0,05
MCP-6	Cylindrisch Dikte: 0,6 mm		95
MTS-N	Diameter: 4,5 mm		7,5
MTS-7		Mg, Ti	0,05
MTS-6			95

Voor de bestraling op vliegniveau werden de TLD's voorbereid en gereset voor de bestraling volgens een bepaald protocol. Aangezien dit binnen de Praagse onderzoeksgroep is gebeurd, is deze methode onbekend. Er is geweten dat in maart 2022 zowel de vlucht- als de achtergrondstralingsdetectoren werden voorbereid. Een ander belangrijk aspect van deze methode is de onbekende methode van uitlezing van de TLD-gegevens. Dit omvatte het proces van het verzamelen van gegevens uit de TLD's en het omzetten ervan naar een dosis voor verdere analyse en voorspelling. De analyse van deze detectoren vond plaats in januari 2023.

Ten tweede werd de blootstelling aan straling als onbekend beschouwd vanwege de aard van de vluchten op vliegniveau. De vliegtuigen volgden een patroon van regelmatig opstijgen naar specifieke hoogtes en vervolgens landen op verschillende plaatsen, waardoor het exacte aantal vliegreizen en locatie waarin de vliegtuigen aan straling zijn blootgesteld onbekend was. Er werd geschat dat de detectoren 2000 vliegreizen hebben ondervonden. Van maart tot oktober 2022 werden de vluchtdetectoren aan boord van een vliegtuig geplaatst. Gedurende deze periode werden meer dan 800 individuele vluchten uitgevoerd, voornamelijk binnen Europa, wat resulteerde in bijna 2000 vliegreizen.

Bovendien hadden de vliegtuigen langere perioden op de grond doorgebracht, wat kon leiden tot een accumulatie van achtergrondstraling en de complexiteit van het bepalen van de werkelijke blootstelling aan straling vergroot.

SCK CEN

Voor de analyse van de omgevingsdosimetrie werd specifiek het MCP-N-type TLD gebruikt. Deze TLD's hadden allemaal een cilindrische vorm met een diameter van 4,5 mm en een dikte van 0,9 mm, vervaardigd door RADCARD (voorheen TLD Poland). Eenzelfde methode als in [18] werd gebruikt.

Vóór blootstelling aan straling werden de TLD's gereset door ze te onderwerpen aan een gloeiproces volgens de protocollen van het SCK CEN. Dit omvatte een behandeling van 10 minuten bij 240 °C, gevolgd door snelle afkoeling in een vriezer van -10 °C voor de MCP TLD's. De bestraling van de TLD's vond plaats op het SCK CEN met behulp van speciale meetstations met dosimeters, waarmee de impact van kosmische straling op de omgeving werd gecontroleerd. Het uitlezen van de TLD's werd uitgevoerd met behulp van een Thermo Scientific Harshaw 5500 lezer. Deze lezer pakte de TLD's één voor één op met een dunne naald, verwarmde ze met hete stikstofgas en verzamelde het uitgezonden licht met een PMT-buis. De TLD's werden verwarmd met een snelheid van 10 °C/s tot 255 °C voor de TLD's [18].

Aangezien de resulterende gloeicurve niet gekenmerkt werd door verschillende pieken bij hoge temperaturen werd de kwantificatie van het signaal S uitgevoerd door het integreren van de tellingen over het volledige bereik voor de MCP TLD's. Daarnaast heeft elke TLD zijn eigen gevoeligheid. De individuele gevoeligheidsfactoren van de TLD's werden vastgesteld door zowel de TLD's die in de metingen werden gebruikt als de referentie-TLD's te bestralen met een ^{137}Cs -gammabron bij het SCK CEN [18].

In dit experiment werd het signaal S altijd gedeeld door de individuele gevoeligheidsfactor IF om eventuele verschillen in individuele gevoeligheid van de detectoren te corrigeren. Uiteindelijk werd de gemeten dosis gekwantificeerd in termen van ^{60}Co gamma-equivalente luchtkerma $K_{air, 60\text{Co} eq}$ volgens Vergelijking (8).

$$K_{air,60\text{Co} eq} = \frac{\left(\frac{S}{IF}\right)_{exp} - \langle \frac{S}{IF} \rangle_{bg,exp}}{\langle \frac{S}{IF} \rangle_{cal} - \langle \frac{S}{IF} \rangle_{bg,cal}} K_{air,cal} \quad (8)$$

Hierin is $(S/IF)_{exp}$ het individuele-gevoeligheid-gecorrigeerde-signaal van de bestraalde TLD's tijdens het experiment, $\langle S/IF \rangle_{bg,exp}$ het gemiddelde voor het individuele-gevoeligheid-gecorrigeerde-signaal van de achtergrond-TLD's tijdens het experiment, $\langle S/IF \rangle_{cal}$ het gemiddelde voor de individuele-gevoeligheid-gecorrigeerde-signaal van de kalibratie-TLD's, $\langle S/IF \rangle_{bg,cal}$ het gemiddelde voor het individuele-gevoeligheid-gecorrigeerde-signaal van de kalibratieachtergrond-TLD's en $K_{air,cal}$ de referentiekalibratiedosis in termen van luchtkerma [18].

De ^{60}Co gamma-equivalent luchtkerma $K_{air, 60\text{Co} eq}$ kon worden omgezet in ^{60}Co gamma-equivalent geabsorbeerde dosis in LiF $D_{LiF, 60\text{Co} eq}$ door vermenigvuldiging met de verhouding van de massa-energie-absorptiecoëfficiënt van LiF voor de gemiddelde 1,25 MeV gamma-energie voor ^{60}Co . Deze massa-energie-absorptiecoëfficiënten werden verkregen uit [19]. De resulterende conversiefactoren zijn 0,93 voor LiF.

De term ^{60}Co gamma-equivalent luchtkerma $K_{air, 60\text{Co} eq}$ verwijst naar de fictieve dosis ^{60}Co -gammastraling in termen van air kerma waaraan de LiF-detector moet worden blootgesteld om hetzelfde detectorsignaal te verkrijgen als het detectorsignaal dat wordt veroorzaakt door de werkelijke blootstelling aan het stralingsveld van belang [18]. Dit concept biedt een gestandaardiseerde manier om de respons van de detector te karakteriseren en te vergelijken tussen verschillende stralingsbronnen. Door de respons van de detector uit te drukken in termen van een referentiebron van ^{60}Co -gammastraling, kunnen onderzoekers de metingen van de detector interpreteren en extrapoleren naar andere stralingsbronnen. Dit vergemakkelijkt het begrip van de stralingsniveaus en hun effecten, en biedt een consistente methode voor het analyseren van stralingsmetingen.

4.1.2 Modelling van de TLD-respons

De LiF-detectoren zetten niet alle geabsorbeerde dosis om in luminescentiesignalen die worden gemeten door het uitleesapparaat. De efficiëntie van de omzetting van de neergeslagen energie in LiF naar uitgezonden luminescentielicht tijdens het uitlezen hangt af van het stralingstype i en de energie E , en wordt uitgedrukt door het relatieve luminescentierendement $\eta_{60\text{Co},i}(E)$, ten opzichte van de gammadosis ^{60}Co . Daarom moeten de fluentie-energiespectra uit EXPACS worden aangevuld met de gesimuleerde fluentie naar dosisomrekeningsfactoren $(D_{LiF}/\Phi)_i(E)$ en de relatieve luminescentie-efficiëntie $\eta_{60\text{Co},i}(E)$ om uiteindelijk de voorspelde TLD-respons te verkrijgen in termen van ^{60}Co gamma-equivalente geabsorbeerde dosis in LiF, $D_{LiF, 60\text{Co} eq}$.

Om dus de TLD-respons in het te modelleren, werd dezelfde benadering gebruikt als in een eerdere studie [18]. De TLD-respons in termen van ^{60}Co gamma-equivalent geabsorbeerde dosis in LiF $D_{LiF, 60\text{Co}}$ werd verkregen door convolutie van de fluentie-energiespectra $\Phi_{E,i}(E)$ in EXPACS, de gesimuleerde fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF-conversiefactoren $(D_{LiF}/\Phi)_i(E)$ en de relatieve luminescentie-efficiënties met betrekking tot ^{60}Co -gammastraling $\eta_{60\text{Co},i}(E)$ voor stralingstype i . Vergelijking (9) toont deze integraal. Deze integraal werd afzonderlijk berekend voor elk stralingstype i aanwezig in kosmische straling en vervolgens werden deze bijdragen volgens de vergelijking bij elkaar opgeteld. De stralingstypes die werden onderzocht zijn: neutronen, protonen, heliumionen, positieve en negatieve ionen, elektronen, positronen en fotonen.

$$D_{LiF, 60\text{Co} eq} = \sum_i \int_0^{+\infty} \Phi_{E,i}(E) * \left(\frac{D_{LiF}}{\Phi} \right)_i(E) * \eta_{60\text{Co},i}(E) dE \quad (9)$$

Fluentie-energiespectra

EXPACS, afgekort voor *EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum* maakte het mogelijk om direct de terrestrische kosmische fluentie-energiespectra te berekenen voor verschillende deeltjes, waaronder neutronen, protonen, elektronen, positronen, ionen tot Ni, muonen en fotonen. Dit programma maakte het mogelijk om de blootstelling aan kosmische straling vrijwel overal binnen de atmosfeer van de aarde te beoordelen op verschillende datums en hoogtes [17].

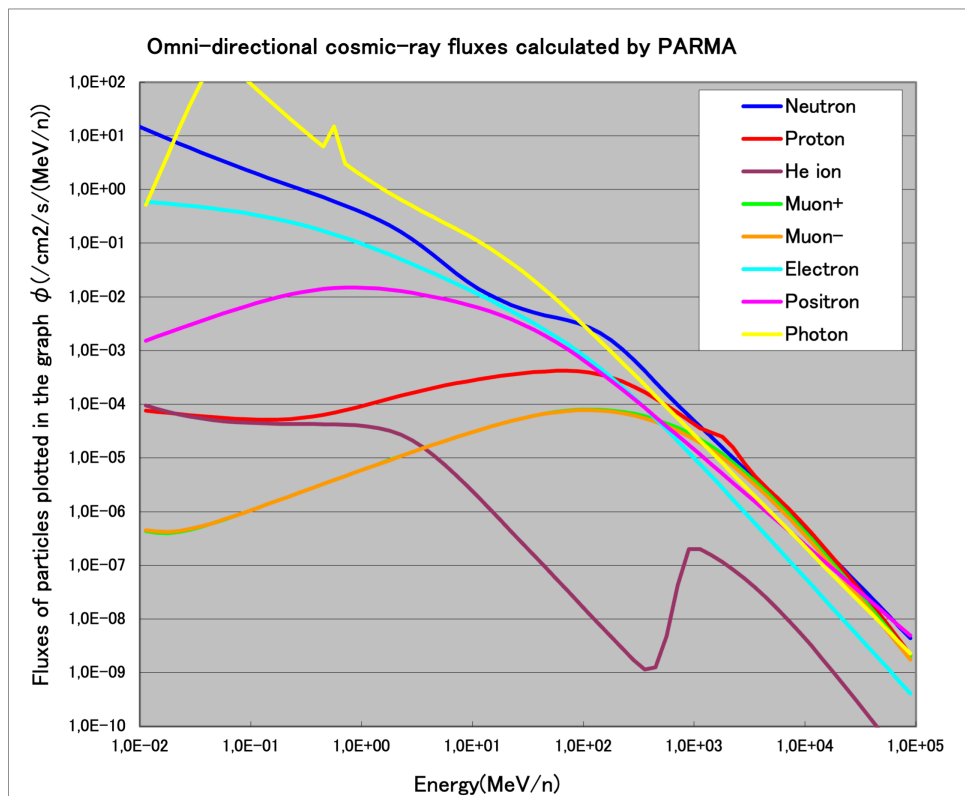
EXPACS functioneert op basis van het PARMA-model, een analytisch stralingsmodel in de atmosfeer, gebouwd op basis van het *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). Het PARMA-model integreert verschillende analytische functies die allemaal zijn geparametriseerd om de resultaten van uitgebreide airshower-simulaties uitgevoerd door PHITS nauwkeurig te reproduceren. Doordat de analytische kracht van PARMA werd gebruikt, kon EXPACS snelle en nauwkeurige berekeningen van kosmische stralingsdosissen uitvoeren die vergelijkbaar zijn met Monte-Carlo-simulaties, die traditioneel veel tijd en rekenkracht vereisen [17].

Voor dit onderzoek werden fluentie-energiespectra berekend voor twee specifieke situaties. In beide situaties werden de fluentie-energiespectra berekend voor neutronen, protonen, heliumionen, positieve en negatieve ionen, elektronen, positronen en fotonen. Ten eerste werd een analyse uitgevoerd voor de Praagse onderzoeksgroep ÚFJ op vliegniveau. Hierbij werden de fluentie-energiespectra berekend op een hoogte van 11 km in de cabine van het vliegtuig. De datum en locatie werden nauwkeurig bepaald volgens de richtlijnen van het Praagse instituut. Deze zouden overeenkomen met de plaats van bestraling. Om de lokale effecten te modelleren, werd de *local effect parameter* vastgesteld op 0,2, wat de waterstofconcentratie in het omliggende milieu beschrijft. Deze parameter heeft met name invloed op het neutronenenergiespectrum. Figuur 45 toont de ingestelde parameters voor deze analyse in EXPACS.

Het fluentie-energiespectra dat overeenkomt met deze gegevens wordt gepresenteerd in Figuur 46. De grafiek toont de omni-directionele kosmische stralingsfluxen, berekend door PARMA, voor verschillende deeltjes als functie van energie. Een omni-directionele flux verwijst naar de flux van deeltjes die vanuit alle richtingen wordt gemeten of beschouwd. In de context van kosmische straling betekent dit dat de gemodelleerde flux de som is van de deeltjes die vanuit elke mogelijke richting de detector bereiken. Uit de grafiek blijkt dat fotonen de hoogste flux hebben bij lage energieën. Neutronen volgen daarna met een relatief hoge flux over een breed energiegebied. Protonen hebben ook een aanzienlijke flux die geleidelijk afneemt. Muonen+, muonen-, elektronen en positronen vertonen lagere, maar stabiele fluxen over een breed scala aan energieën. He-ionen hebben de laagste flux, die tamelijk constant blijft voordat deze sterk afneemt bij zeer hoge energieën.

Input conditions in the white columns		
Altitude or Atmospheric depth	11	(km)
Location or	50,1	Lat. (de)
Cut-off rigidity	14,3	Long. (deg)
Solar activity, Time, or	2022	Year
Count rate of neutron monitor (cps)	7	Month
	1	Day
Surrounding Environment	Cabin-Location	
Local Effect Parameter	0,2	Mass(100ton)
Definition of dose	Effective Dose	
Output flux unit	ϕ (/cm ² /s/(MeV/n)	
Output dose unit	(uSv/h)	

Figuur 45: Ingegeven parameters vliegniveau in Praag

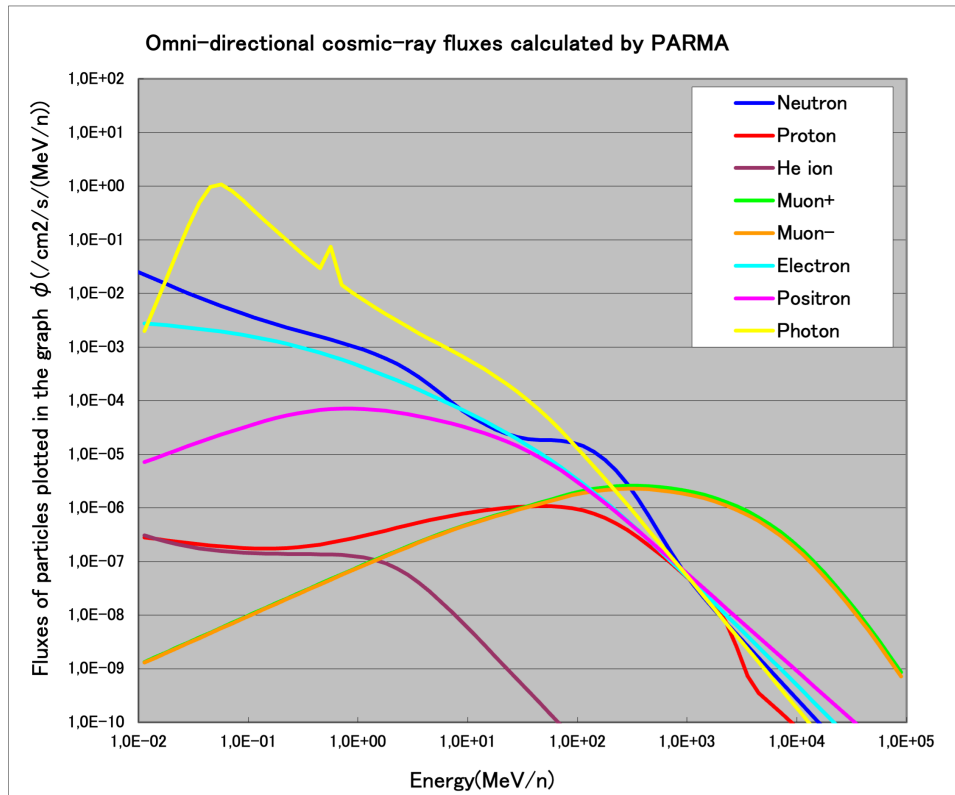


Figuur 46: Fluentie-energiespectra op vliegniveau

Daarnaast werd een simulatie uitgevoerd voor omgevingsdosimetrie op het SCK CEN. De geografische coördinaten werden ingesteld op de exacte locatie van de omgevingsdosimetrie. Dit was op de site van het SCK CEN. Aangezien deze metingen vrijwel op de grond worden uitgevoerd, werd de hoogte op 0 km ingesteld. Evenals bij de vlieganalyse bleef de local effect parameter gehandhaafd op 0,2 om de lokale omgevingsfactoren te modelleren. In tegenstelling tot de analyse op vliegniveau, bestrijkt deze meerdere datums, variërend van 1 januari 1997 tot en met 1 januari 2022, om zo veranderingen in blootstelling gedurende deze periode te onderzoeken. Elke initiële dag van het jaar binnen deze tijdsbestek werd afzonderlijk geanalyseerd. Figuur 47 illustreert de ingevoerde parameters in EXPACS voor de omgevingsdosimetrie op het SCK CEN. Het fluentie-energiespectra dat overeenkomt met deze gegevens wordt gepresenteerd in Figuur 48. Figuur 48 (grondniveau) toont een vergelijkbare vorm met Figuur 46 (vliegniveau). Op vliegniveau zijn de fluxen echter meestal hoger dan op lagere niveaus, wat aangeeft dat de intensiteit van kosmische straling toeneemt met hoogte.

Input conditions in the white columns	
Altitude or Atmospheric depth	0 (km)
Location or	51 Lat. (de
Cut-off rigidity	5 Long. (deg)
Solar activity, Time, or	2021 Year
Count rate of neutron monitor (cps)	1 Month 1 Day
Surrounding Environment	Ground
Local Effect Parameter	0,2 Water Frac.
Definition of dose	Effective Dose
Output flux unit	φ (/cm ² /s/(MeV/1
Output dose unit	(uSv/h)

Figuur 47: Ingegeven parameters omgevingsdosimetrie SCK CEN



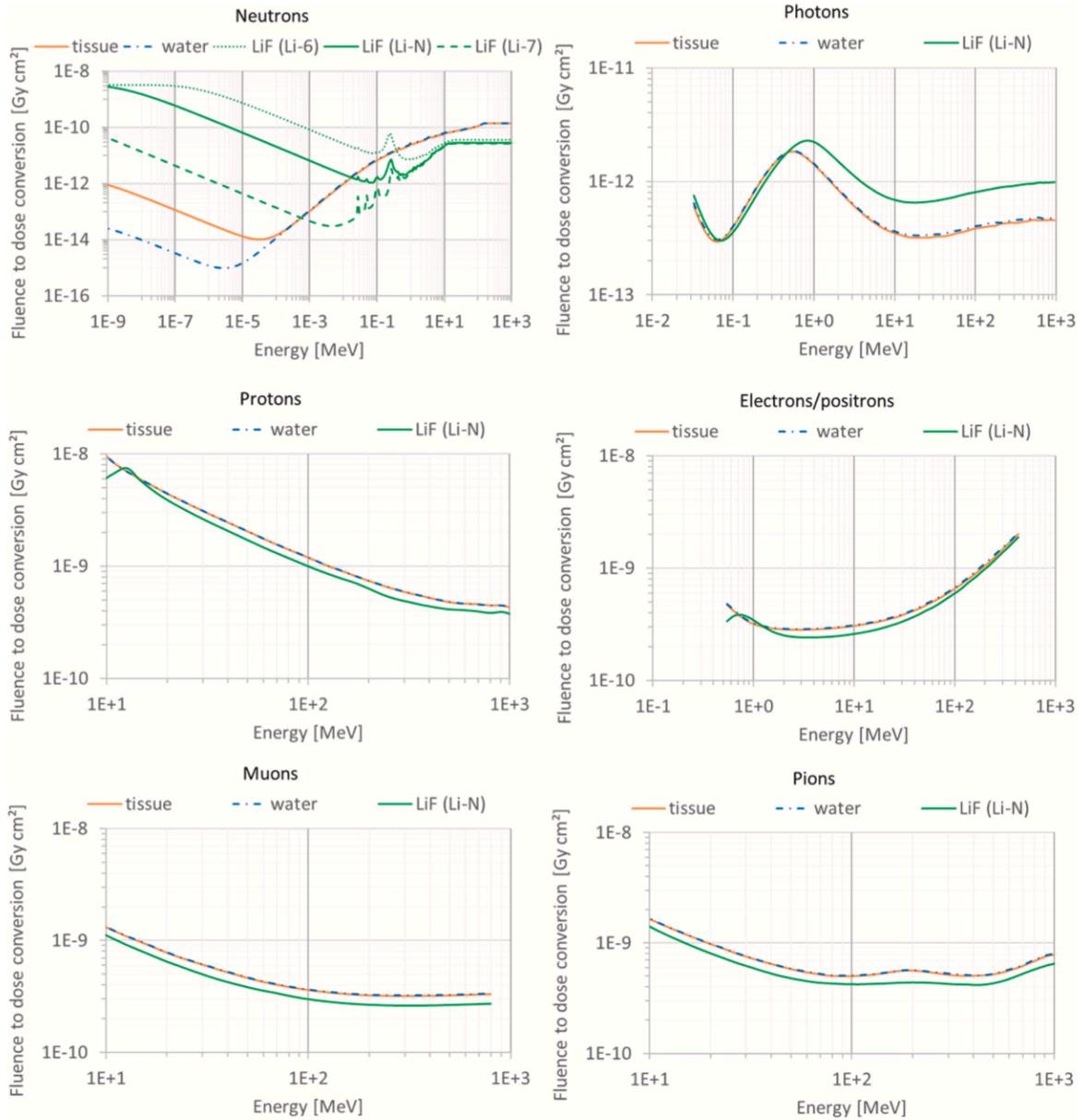
Figuur 48: Fluentie-energiespectra op grondniveau

Fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF conversiefactoren

Het fluentie-energiespectrum $\Phi_{E,i}(E)$ kan worden geconjugeerd met de fluentie naar dosis conversiefactor $(D_{LiF}/\Phi)_i(E)$ voor zowel het stralingstype i als het materiaal j om de fluentie Φ_i van een stralingstype i naar de geabsorbeerde dosis D_j te verzetten. Er werd gebruik gemaakt van de eerder bepaalde fluentie-naar-geabsorbeerde dosis in LiF conversiefactoren uit onderzoek [18]. In dit onderzoek werd de MCNP 6.2-Monte Carlo-stralingstransportcode gebruikt om de fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF conversiefactoren te simuleren [20].

Het simulatiemodel dat is gebruikt, bestaat uit een rechthoekig leeg simulatievolume dat een enkele cilindrische TLD-cel bevat met de afmetingen van een TLD en een samenstelling LiF zoals bepaald door het ICRP. De simulaties werden uitgevoerd voor de drie verschillende Li-concentraties van natuurlijke, ^6Li -verrijkte en ^7Li -verrijkte TLD's in het geval van neutronen. Omdat er geen significante verschillen in stralingsinteractie mechanismen tussen ^6Li en ^7Li worden verwacht voor andere stralingstypen dan neutronen, werd alleen de natuurlijke Li-abundantie gebruikt voor de overige stralingstypen [18].

Figuur 49 toont de fluentie naar geabsorbeerde dosis conversiefactoren in weefsel, water en LiF. In dit onderzoek werd enkel de fluentie-naar-geabsorbeerde dosis in LiF-conversiefactoren gebruikt.



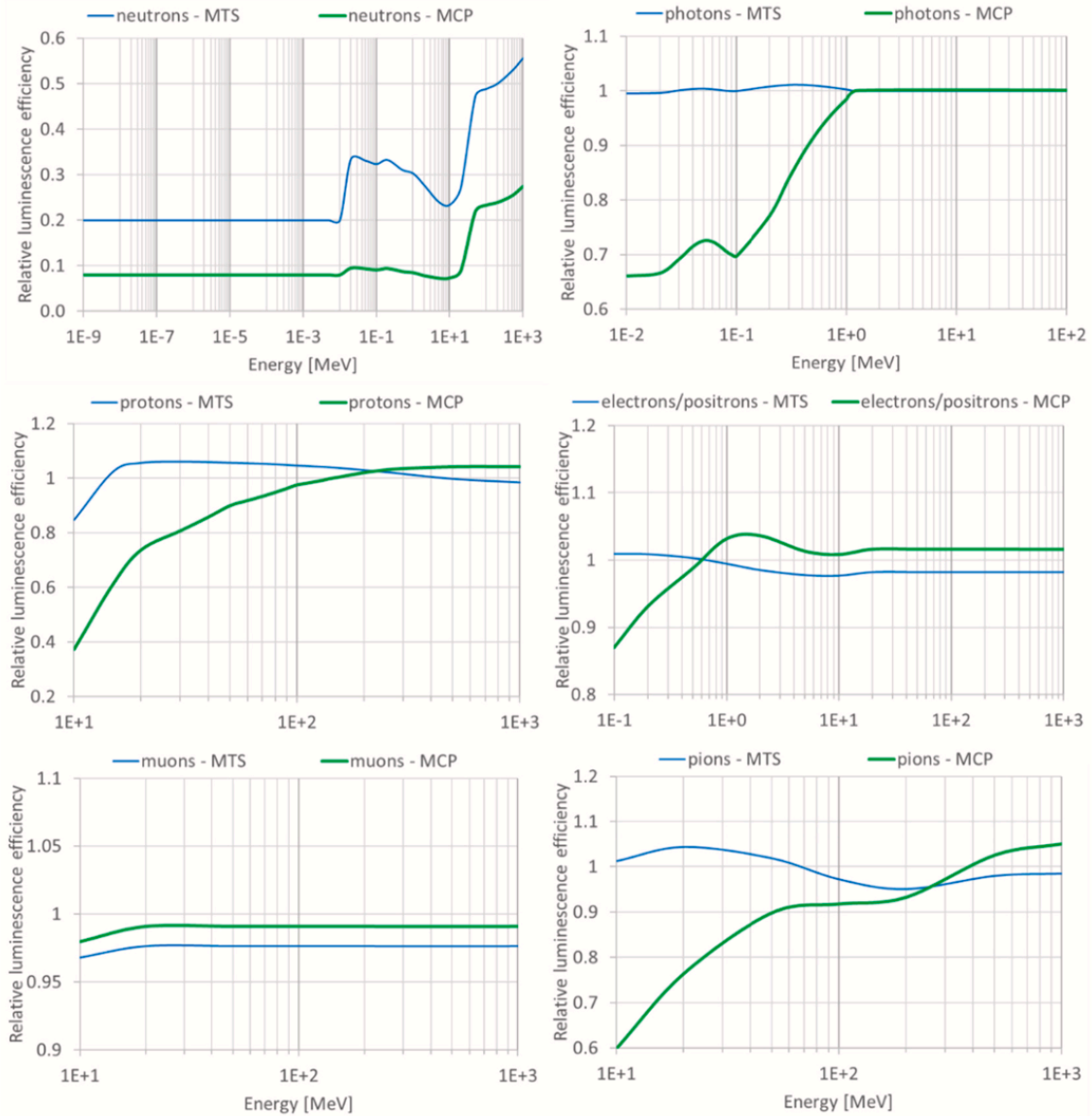
Figuur 49: Fluentie naar geabsorbeerde dosis in LiF conversiefactoren voor neutronen, fotonen, protonen, elektronen en positronen, muonen en pionen [18]

Relatieve luminescentie-efficiëntie

De relatieve luminescentie-efficiëntiewaarden werden afgeleid uit eerder gepubliceerde studies met het Microdosimetrische $d(z)$ -model voor protonen [21], fotonen [22], elektronen en positronen [23], muonen en pionen [24] en neutronen tot 0,01 MeV [25]. De methode van het Microdosimetrische $d(z)$ -model en de bepaling van de relatieve luminescentie-efficiënties zijn eerder besproken in hoofdstuk 2 (zie paragraaf 2.4). Deze waarden werden aangevuld met nieuwe berekeningen voor neutronen tot 1 GeV. Er waren enkel fotonrendementsgegevens beschikbaar tot 1,25 MeV. Indien zeldzame fotonucleaire reacties buiten beschouwing werden gelaten, werd aangenomen dat de TLD-efficiënties rond eenheid blijven voor hogere energieën. Bovendien zetten fotonen hun energie bijna uitsluitend af door secundaire elektronen, waarvoor de relatieve luminescentie-efficiëntie van zowel MTS- als MCP-TLD's binnen 2% van eenheid ligt tussen 1 MeV en 1 GeV [22]. Daarom kon een vaste relatieve luminescentie-efficiëntie van 1 redelijkerwijs worden gebruikt voor fotonen boven 1,25 MeV [18].

Voor neutronen werden de relatieve luminescentie-efficiënties van het Microdosimetrische $d(z)$ -model aangepast naar constante waarden van 0,2 voor MTS TLD's en 0,08 voor MCP TLD's [1], ongeacht de Li-abundantie, voor neutronenergieën onder 0,01 MeV om overeen te komen met experimentele waarden voor thermische en epithermische neutronen, zoals besproken en aanbevolen in [25].

Figuur 50 toont de gebruikte relatieve luminescentie-efficiënties voor neutronen [25], fotonen [22], protonen [21], elektronen en positronen [23], muonen en pionen [24]. Figuur 46 presenteerde aanzienlijke eenheidsafwijkingen met belangrijke afhankelijkheden van het type straling, energie en TLD-type. Om deze reden was het noodzakelijk om correcties aan te brengen voor de relatieve luminescentie-efficiëntie. Opgemerkt moet worden dat deze relatieve luminescentie-efficiënties alleen van toepassing waren op het lineaire dosisgebied van de TLD-dosisrespons, dat aanzienlijk onder de verzadigingsniveaus ligt. De maximale dosis van het lineaire bereik is afhankelijk van het TLD-type, het TLD-afleesapparaat en de protocollen die worden gebruikt. Het is bekend uit hoofdstuk 2 dat voor de TLD-typen, -lezers en -protocollen die in dit onderzoek werden gebruikt, geen niet-lineariteiten onder 1 Gy werden verwacht.



Figuur 50: Relatieve luminescentie-efficiënties voor neutronen [24], fotonen [21], protonen [20], elektronen en positronen [22], muonen en pionen [23]

4.2 Resultaten en discussie

4.2.1 Simulaties via EXPACS

ÚFJ: TLD-respons op vliegniveau

De resultaten van de gesimuleerde ^{60}Co gamma-equivalent geabsorbeerde dosistempo's in LiF op vliegniveau voor verschillende MCP- en MTS-detectoren worden gepresenteerd in termen van de dosisbijdragen door verschillende soorten straling, uitgedrukt in nanogray per uur (nGy/h). De gemeten componenten omvatten muonen (positief en negatief), protonen, elektronen, positronen, fotonen, alfadelen en neutronen. Het totale, absolute gemodelleerde dosistempo voor elke component is getoond in tabel 7.

Tabel 7: Dosisbijdragen secundaire kosmische straling MCP- en MTS-detectoren op vliegniveau

Component	MCP-N (nGy/h)	MCP-6 (nGy/h)	MCP-7 (nGy/h)	MTS-N (nGy/h)	MTS-6 (nGy/h)	MTS-7 (nGy/h)
Muonen+	7,84E+01	7,84E+01	7,84E+01	7,73E+01	7,73E+01	7,73E+01
Muonen-	7,10E+01	7,10E+01	7,10E+01	7,00E+01	7,00E+01	7,00E+01
Protonen	5,09E+02	5,09E+02	5,09E+02	5,83E+02	5,83E+02	5,83E+02
Elektronen	1,05E+03	1,05E+03	1,05E+03	1,06E+03	1,06E+03	1,06E+03
Positronen	6,85E+02	6,85E+02	6,85E+02	7,08E+02	7,08E+02	7,08E+02
Fotonen	6,23E+01	6,23E+01	6,23E+01	7,23E+01	7,23E+01	7,23E+01
Alfa	7,51E+00	7,51E+00	7,51E+00	8,92E+00	8,92E+00	8,92E+00
Neutronen	4,93E+01	2,49E+02	1,73E+01	1,18E+02	6,15E+02	3,86E+01
Totaal	2,51E+03	2,71E+03	2,48E+03	2,70E+03	3,20E+03	2,62E+03

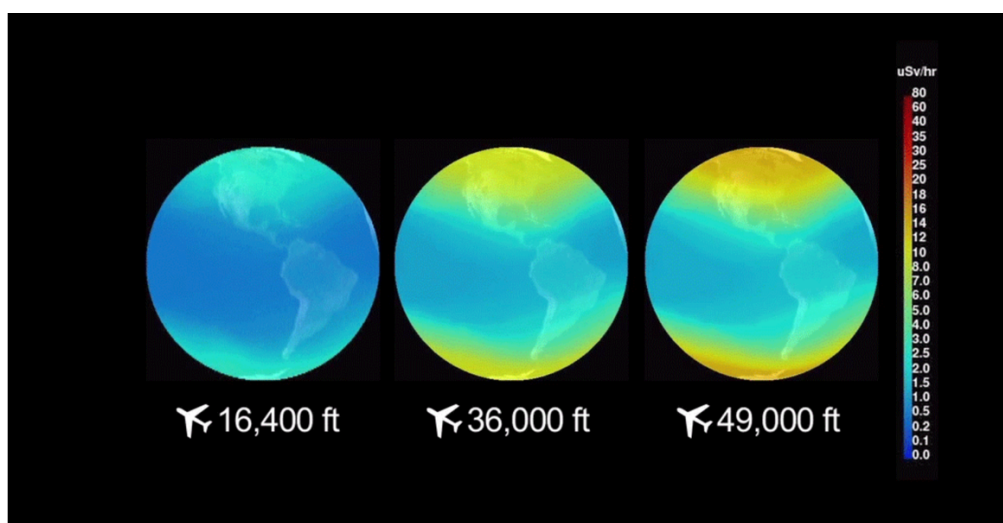
De analyse van deze stralingscomponenten toont dat de absolute waarden voor muonen (zowel positief als negatief), protonen, elektronen, positronen, fotonen en alfadelen consistent blijven over de drie MCP-types. Ook de dosisbijdragen van diezelfde deeltjes blijven hetzelfde voor alle MTS-N detectoren. Dit suggereert dat de invloed van deze deeltjes weinig varieert met de lithiumabundanties. De neutronen vertonen echter aanzienlijke variaties, met MCP-6 die een veel hogere waarde presenteert dan MCP-N en MCP-7. Naarmate de hoeveelheid ^6Li toeneemt, vertoont de detector een hogere dosisbijdrage voor neutronen. Per detectorsoort (MCP of MTS) is het hoogste dosistempo verkregen bij de detectoren met lithium-6 vanwege de neutronenbijdrage. Het tweede hoogste dosistempo is verkregen bij de detectoren met natuurlijke lithium-abundantie. Het laagste dosistempo is verkregen bij de detectoren met lithium-7.

De hogere dosisbijdrage van de neutronen in de detectoren met ${}^6\text{Li}$ is te verklaren als volgt. In het veld van kosmische straling is de dikte van het geladen deeltjesbereik in LiF twee keer de TLD bij lage energieën, tientallen keren de TLD bij gemiddelde energieën en nog groter bij hoge energieën. Fotonen verzwakken met minder dan 3% als gevolg van de TLD-dikte. Alleen thermische neutronen worden aanzienlijk verzwakt door de dikte van TLD's die verrijkt zijn met ${}^6\text{Li}$. Als gevolg hiervan wordt meer energie geconcentreerd afgegeven in de bovenste lagen van de TLD, wat resulteert in een hoger gemeten dosistempo [18].

De ${}^{60}\text{Co}$ gamma-equivalente geabsorbeerde dosis in LiF, gemeten met MCP-TLD's, zijn doorgaans lager dan die gemeten met MTS-TLD's. Dit komt doordat de relatieve luminescentie-efficiënties voor MCP-TLD's lager zijn dan die voor MTS-TLD's voor de meeste stralingstypen en -energieën. Eerder onderzoek bij CERF heeft een vergelijkbaar verschil tussen MTS- en MCP-TLD's aangetoond, waarbij 18% hogere dosissen werden gemeten met MTS-7-TLD's in vergelijking met MCP-7-TLD's [26]. Een ander onderzoek bij CERF bevestigt deze bevindingen en voorspelde een hoger dosistempo van 19% en 17% op twee verschillende posities voor MTS-7-TLD's in vergelijking met MCP-7-TLD's [18]. In dit onderzoek via EXPACS werd eveneens een verschil tussen MTS-7- en MCP-7-TLD's waargenomen, met 5,65% hogere dosissen gemeten met MTS-7-TLD's ten opzichte van MCP-7-TLD's. Aangezien er een andere meettool werd gebruikt, kunnen er verschillen optreden tussen de onderzoeken die gebeurd zijn in CERF. Voor de MTS-N- en de MTS-6 detectoren werd een hoger dosistempo van respectievelijk 7,60% en 18,08% gemeten dan voor MCP-N- en MCP-6-detectoren.

Het verschil tussen de gemodelleerde dosistempo's van MCP- en MTS-TLD's is het meest uitgesproken voor de neutronbijdrage, vanwege de ongeveer twee keer lagere relatieve luminescentie-efficiëntie van MCP TLD's in vergelijking met MTS TLD's voor neutronen.

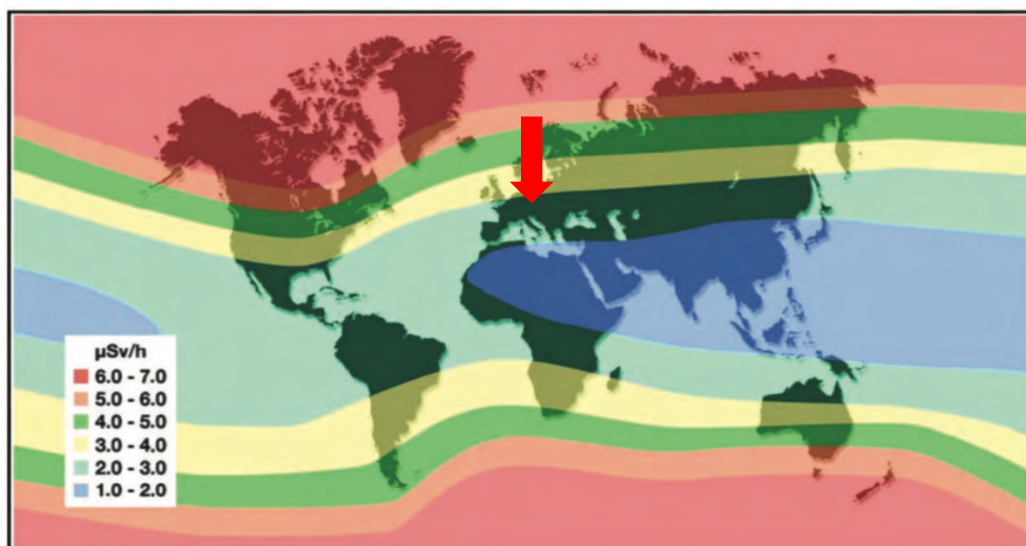
Figuur 51 toont het stralingsdosistempo (in $\mu\text{Sv/h}$) op drie verschillende vlieghoogtes: 16.400 voet (ongeveer 5 km), 36.000 voet (ongeveer 11 km), en 49.000 voet (ongeveer 15 km). De kleuren in de figuur geven de stralingsintensiteit aan, waarbij geel en rood hogere dosissen vertegenwoordigen en blauw lagere dosissen.



Figuur 51: Gemeten dosistempo's op verschillende vlieghoogten [27]

Hieruit blijkt dat het stralingsdosistempo aanzienlijk toeneemt naarmate de hoogte toeneemt, met de hoogste dosistempo's op 49.000 voet. De hoogte die in dit werkstuk is aangenomen is 11 km. Het gesimuleerde stralingsdosistempo in Praag op vliegniveau verkregen via EXPACS varieert tussen 2,48 $\mu\text{Sv/h}$ en 3,20 $\mu\text{Sv/h}$, afhankelijk van de gebruikte detector. Volgens het onderzoek in [27] bedraagt het stralingsdosistempo op deze hoogte 10 $\mu\text{Sv/h}$ aan de polen en rond de 2,5 à 3 $\mu\text{Sv/h}$ aan de evenaar. Afhankelijk van de breedtegraad worden de invallende deeltjes anders afgebogen door het magnetische veld van de aarde. Kosmische straling wordt minder afgezwakt aan de polen omdat de magnetische afscherming van de aarde hier minder effectief is. Het dosistempo van kosmische straling is bijvoorbeeld twee tot drie keer hoger in gebieden in de buurt van de polen dan in equatoriale gebieden [28].

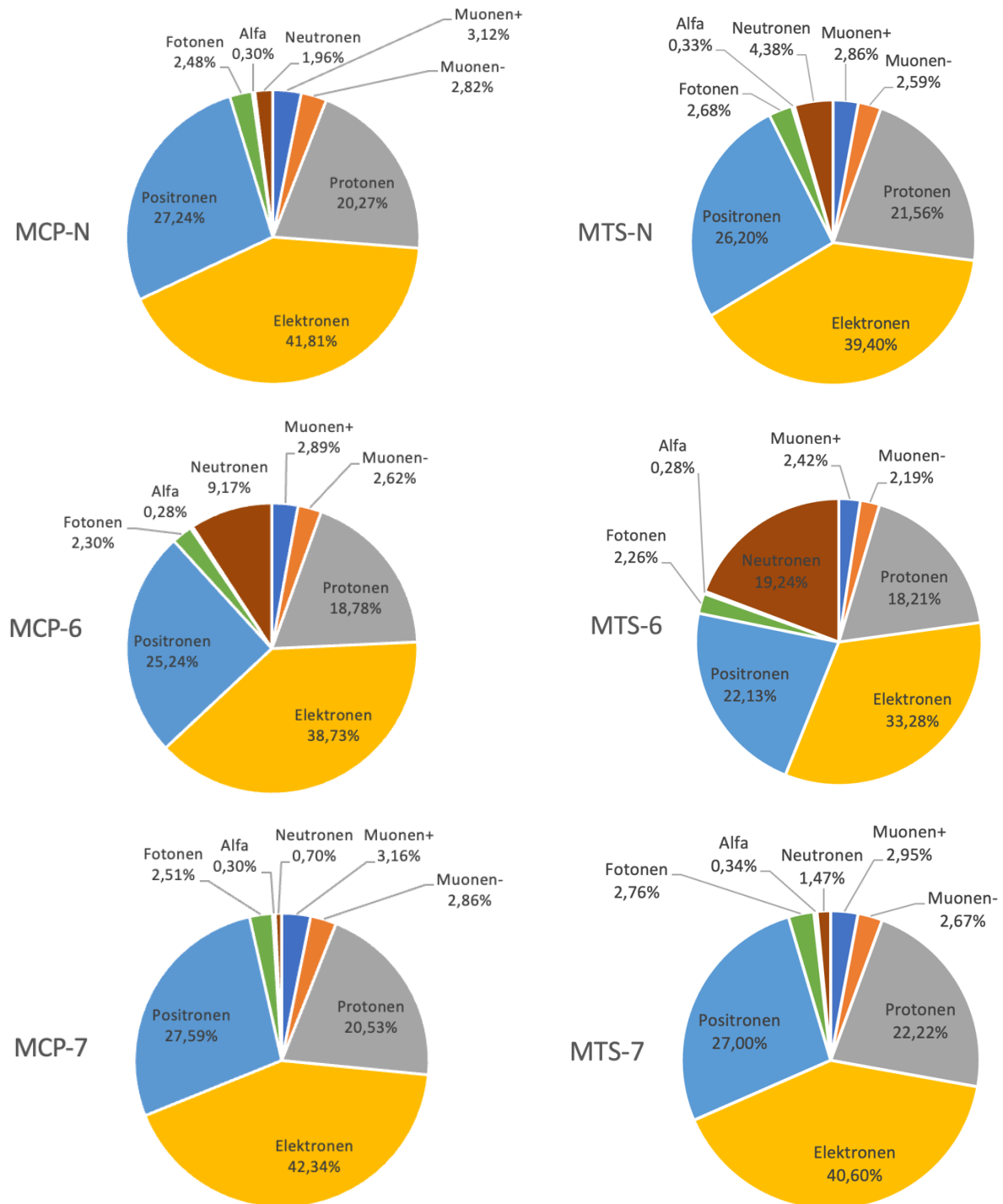
Figuur 52 toont ook de afhankelijkheid van het stralingsdosistempo van de breedtegraad, op een vlieghoogte van 11 km in december 2022. De kleuren op de kaart representeren verschillende dosissnelheden. Rood (6.0 - 7.0 $\mu\text{Sv/h}$) domineert de poolgebieden, zowel in het noorden als in het zuiden, en duidt op de hoogste stralingsdosistempo's die optreden in de gebieden het dichtst bij de polen. Donkeroranje (5.0 - 6.0 $\mu\text{Sv/h}$) omringt de rode gebieden en is te zien in de nabijheid van de poolgebieden, maar iets verder van de polen verwijderd. Oranje (4.0 - 5.0 $\mu\text{Sv/h}$) bevindt zich iets verder van de polen en beslaat een bredere zone dan de donkeroranje gebieden. Geel (3.0 - 4.0 $\mu\text{Sv/h}$) is te vinden in de zones verder van de polen en strekt zich uit naar de gematigde breedtegraden. Lichtgroen (2.0 - 3.0 $\mu\text{Sv/h}$) bevindt zich in de overgangszones tussen de gematigde en tropische breedtegraden. Donkergroen (1.0 - 2.0 $\mu\text{Sv/h}$) bevindt zich rond de tropische breedtegraden en representeert de laagste stralingsdosistempo's op de kaart. Ook deze figuur representeert dat de magnetische afscherming van de aarde aan de polen minder effectief is.



Figuur 52: Gemeten dosistempo's op verschillende breedtegraden [29]

De gesimuleerde waarden via EXPACS op vliegniveau zijn gesimuleerd voor een breedtegraad van $50,1^\circ$, wat overeenkomt met de rode pijl op Figuur 52. Figuur 52 representeert op deze breedtegraad een stralingsdosistempo van $2,0 \mu\text{Sv/h}$ tot $3,0 \mu\text{Sv/h}$ [29]. Deze waarden komen overeen met de werkelijk gemeten data ($2,5 \mu\text{Sv/h}$ - $3 \mu\text{Sv/h}$) in [27] op dezelfde breedtegraad en de gesimuleerde data via EXPACS ($2,48 \mu\text{Sv/h}$ - $3,20 \mu\text{Sv/h}$). Het is belangrijk op te merken dat de stralingsdosis in de tijd kan variëren. De gesimuleerde data via EXPACS is berekend voor 1 juli 2022, terwijl de data in Figuur 52 betrekking heeft op december 2022. Omdat deze tijdsperiodes relatief dicht bij elkaar liggen in vergelijking met de elfjarige zonnecyclus (zie sectie ‘elfjarige zonnecyclus’), kan worden aangenomen dat de vergelijking tussen de datasets acceptabel is.

Figuur 53 toont dezelfde dosisbijdragen verkregen via EXPACS van de verschillende componenten in relatieve hoeveelheden voor verschillende TLD-types.



Figuur 53: Relatieve dosisverdeling secundaire kosmische straling MCP- en MTS-detectoren vliegniveau

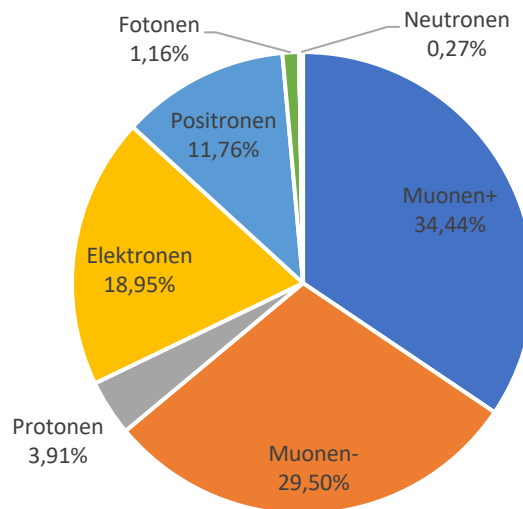
De relatieve resultaten tonen aan dat de stralingsdosis op vliegniveau voornamelijk wordt gedomineerd door elektronen, met significante bijdragen van protonen en positronen. Elektronen dragen het meest bij aan de totale dosis, variërend van 38,73% tot 42,34% voor de MCP-detectoren. Voor de MTS-detectoren is deze variatie van 33,28% tot 40,60%. Protonen en positronen volgen, met bijdragen van respectievelijk ongeveer 18,78% tot 20,53% en 25,24% tot 27,59% voor de MCP-detectoren, terwijl dit voor de MTS-detectoren respectievelijk 18,21% tot 22,22% en 22,13% tot 27,00% bedraagt. Muonen (zowel positief als negatief) en fotonen dragen minder bij, met elk minder dan 4% van de totale stralingsdosis. Alfadeeltjes dragen het minst bij, wat consistent is met hun lage fluentie in secundaire kosmische straling op vliegniveau. Neutronen vertonen de meeste variatie tussen de MCP-niveaus, met een opvallend hoge bijdrage in MCP-6 (9,17%) vergeleken met MCP-N (1,96%) en MCP-7 (0,70%). Eenzelfde trend is zichtbaar bij de MTS-detectoren. Neutronen vertegenwoordigen hierbij een dosisbijdrage van 19,24% voor de MTS-6 detectoren, 4,38% voor de MTS-N detectoren en 1,47% voor de MTS-7 detectoren. Dit komt omdat thermische neutronen aanzienlijk verzwakt worden door de dikte van TLD's die verrijkt zijn met ${}^6\text{Li}$. Als gevolg hiervan wordt meer energie geconcentreerd afgegeven in de bovenste lagen van de TLD, wat resulteert in een hogere gemeten dosis [18].

Daarnaast tonen de taartdiagrammen voor de dosisbijdragen in Figuur 53 een heel ander beeld dan de fluentiebijdragen in Figuur 46. Op een hoogte van 35.000 voet (10,67 km) in gematigde breedtegraden bestaat de omgevingsstraling typisch uit neutronen (55%), elektronen en positronen (20%), protonen (15%), fotonen (5%) en muonen (5%) [30]. Figuur 46 toont deze gelijkaardige fluenties. Deze fluenties kunnen afwijken omdat de balans van deze verhoudingen afhangt van de breedtegraad en de positie in de zonnecyclus. Toch tonen de relatieve dosisverdelingen in Figuur 53 dat fotonen en neutronen veel minder belangrijk zijn in termen van dosis dan in termen van fluentie. Dit komt door hun lagere fluentie-naar-dosis-conversiecoëfficiënten.

SCK CEN: TLD-respons op grondniveau

Dosisbijdragen

De resultaten van de gesimuleerde ^{60}Co gamma-equivalent geabsorbeerde dosis in LiF op grondniveau voor de MCP-N-detectoren op 1/01/1997 worden gepresenteerd in relatieve termen van de dosisbijdragen door verschillende soorten straling. Figuur 54 toont de relatieve dosisbijdragen van verschillende soorten straling afkomstig van secundaire kosmische straling op grondniveau.



Figuur 54: Relatieve dosisverdeling secundaire kosmische straling MCP-N-detectoren grondniveau

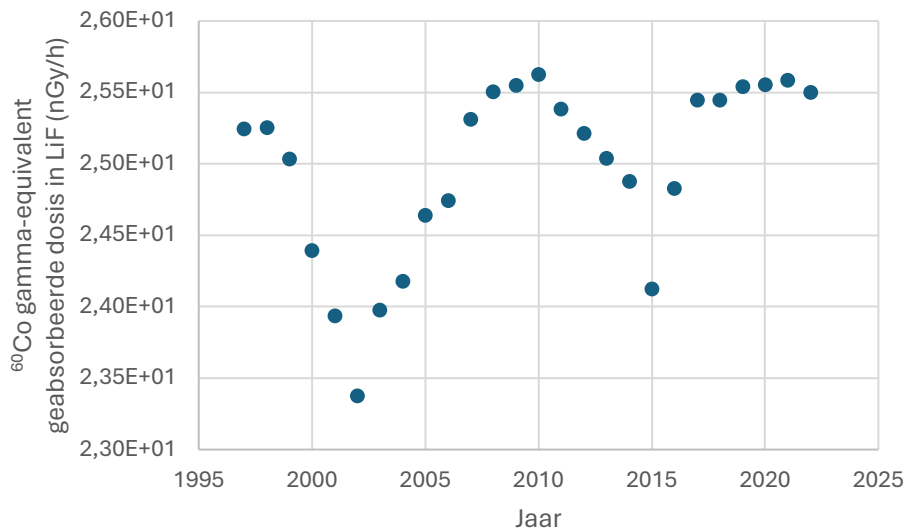
Uit de gegevens blijkt dat muonen, zowel positief als negatief, de grootste bijdrage leveren aan de totale stralingsdosis. Specifiek dragen positieve muonen (Muonen+) bij met 34,44%, terwijl negatieve muonen (Muonen-) 29,50% bijdragen. Dit betekent dat muonen in totaal meer dan 60% van de totale stralingsdosis uitmaken. Elektronen leveren de derde grootste bijdrage met 18,95%, gevolgd door positronen met 11,76%. Protonen dragen een relatief kleine 3,91% bij aan de totale dosis, terwijl fotonen slechts 1,16% bijdragen. Neutronen hebben de kleinste bijdrage met slechts 0,27%.

De dominante component van het kosmische stralingsveld op zeeniveau zijn muonen. Dit wordt bevestigd door het rapport van UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) uit 2008 [31]. Muonen worden voornamelijk geproduceerd wanneer primaire kosmische stralen, zoals protonen en andere kerndeeltjes, botsen met atomen in de bovenste atmosfeer, waarbij pionen en andere secundaire deeltjes ontstaan. Deze pionen vervallen snel in muonen, die een lange levensduur hebben en gemakkelijk de grond bereiken vanwege hun hoge energie en relatieve ongevoeligheid voor de atmosfeer [32].

Daarnaast dringt slechts een zeer klein percentage van de primaire kosmische stralen, zoals protonen, door tot zeeniveau. Slechts ongeveer 0,05% van de primaire protonen bereikt zeeniveau. Dit lage percentage is te wijten aan de interacties die deze protonen ondergaan in de atmosfeer, waar ze botsen met atmosferische atomen en secundaire deeltjes produceren voordat ze de grond bereiken [32].

Elfjarige zonnecyclus

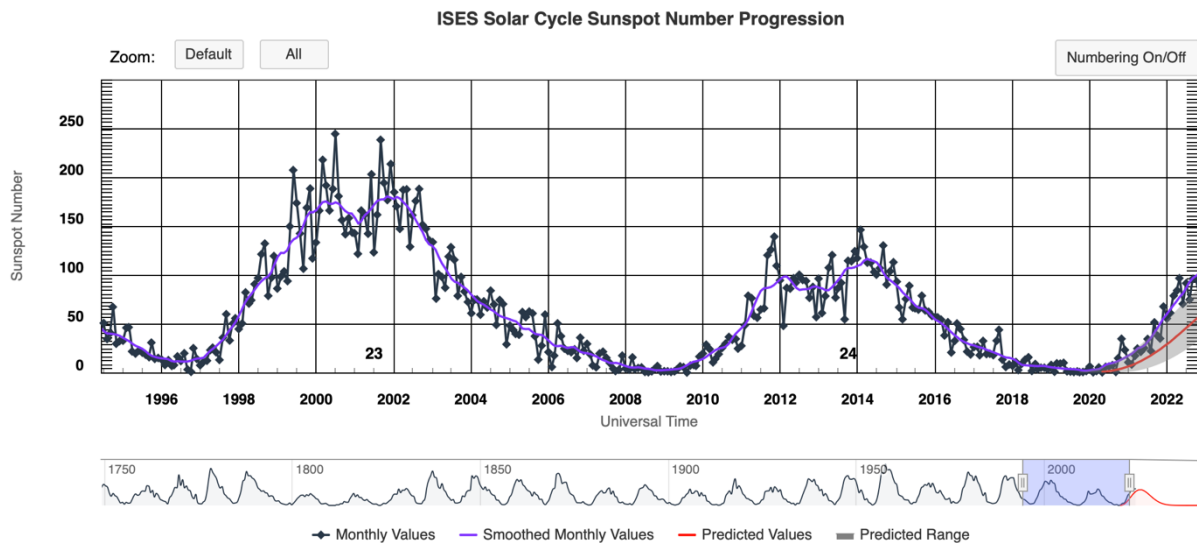
Naast de dosisbijdragen op één bepaald tijdstip te bekijken op grondniveau, is er ook een andere analyse uitgevoerd die de totale dosistempo's van alle secundaire kosmische straling op grondniveau doorheen de jaren met elkaar vergelijkt. De gesimuleerde ^{60}Co gamma-equivalente geabsorbeerde dosistempo's in LiF worden weergegeven in Figuur 55 voor de periode van 1997 tot 2022.



Figuur 55: Totale dosistempo's secundaire kosmische straling op grondniveau doorheen de jaren

De waarden variëren van ongeveer 23,4 nGy/h in 2002 tot 25,6 nGy/h in 2010. Deze variaties kunnen in verband worden gebracht met de elfjarige zonnecyclus, waarbij periodes van hogere zonneactiviteit (zonnevlekmaxima) worden gevolgd door periodes van lagere zonneactiviteit (zonnevlekminima).

Figuur 56 illustreert het aantal zonnevlekken in de loop van de tijd. Het "zonnevlekkengetal" is een maatstaf voor de zonneactiviteit en wordt berekend door de zichtbare zonnevlekken op het zonoppervlak te tellen. Zonnevlekken zijn donkere gebieden die ontstaan door intense magnetische activiteit. Het aantal zonnevlekken varieert volgens een cyclus van ongeveer 11 jaar, bekend als de zonnevlekken-cyclus of zonnecyclus [33]. Hoge zonnevlekkengetallen duiden op verhoogde zonneactiviteit, waaronder zonnevlammen en coronale massa-ejecties. Deze verschijnselen sturen krachtige stromen van geladen deeltjes de ruimte in.



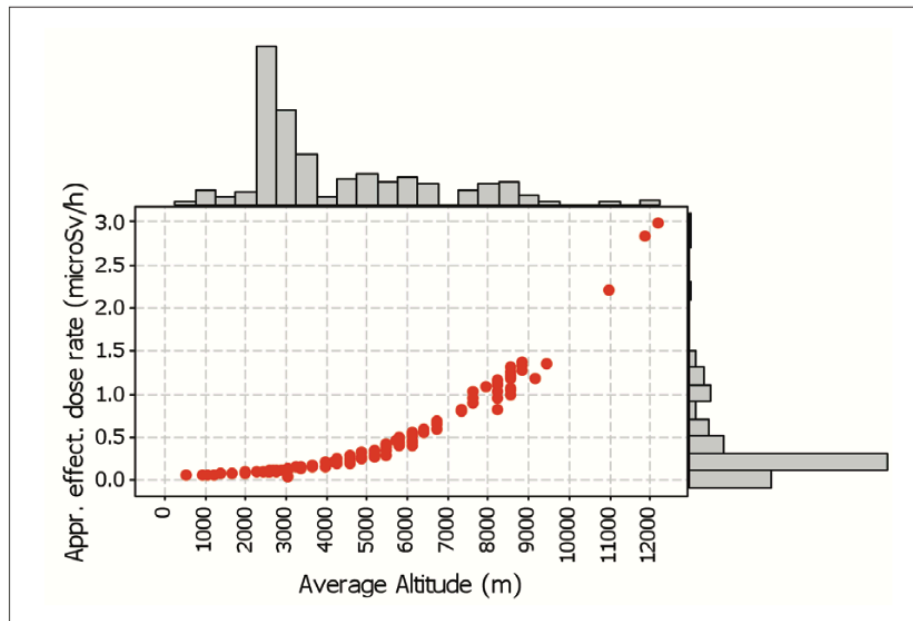
Figuur 56: Elfjarige zonnecyclus op basis van het aantal zonnevlekken [33]

In perioden van verhoogde zonneactiviteit vertonen zich meer zonnevlekken, wat gepaard gaat met een toename van zonnewind en kosmische straling. Deze toegenomen activiteit kan leiden tot een afname van de hoeveelheid kosmische straling die de aarde bereikt, vanwege een versterkte magnetische bescherming. Tijdens het zonnemaximum vormt het krachtige magnetische veld van de zon een beschermende cocon rond ons zonnestelsel, waardoor het binnendringen van kosmische stralen bemoeilijkt wordt. Dit resulteert in verminderde niveaus van secundaire kosmische straling die onze planeet bereiken. Op de grafiek zijn lagere dosistempowaarden te zien rond de jaren 2001 en 2013 [33].

Tijdens zonnecyclusminima, wanneer de zonneactiviteit op zijn laagst is, neemt de bescherming tegen kosmische straling door de zonnewind af, wat resulteert in hogere niveaus van secundaire kosmische straling op aarde. Dit wordt geïllustreerd door de hogere dosistempowaarden rond de jaren 2008 en 2020 op de grafiek. In periodes van verminderde zonneactiviteit neemt dus het aantal kosmische stralen in ons zonnestelsel toe, doordat meer van deze deeltjes ongehinderd langs de rustige zon kunnen doordringen [33].

Vergelijking vliegniveau en grondniveau

Figuur 57 toont de effectieve dosissnelheid ten opzichte van de hoogte. Deze gegevens zijn verzameld tijdens een periode van twee jaar door piloten en bemanningen van de Flight Test Special Group (GEEV) van het DCTA, waarbij in totaal 218 vluchten werden geëvalueerd [34].

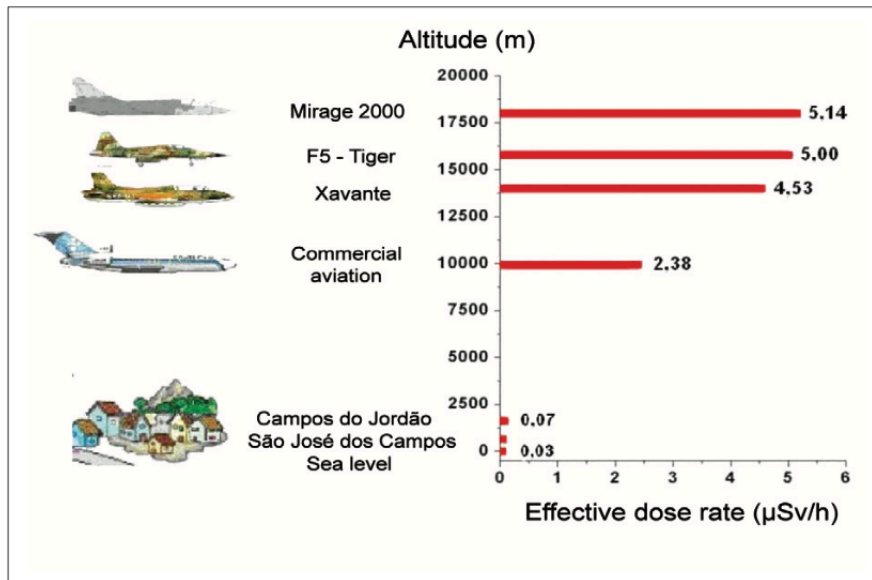


Figuur 57: Effectieve dosistempo's in functie van de hoogte [34]

De grafiek toont een duidelijke trend waarbij de stralingsdosistempo's exponentieel toenemen met de hoogte. Op grondniveau is het stralingsdosistempo bijna verwaarloosbaar ($0,05 \mu\text{Sv/h}$), maar naarmate de hoogte toeneemt, neemt de dosissnelheid geleidelijk toe, met een steilere stijging vanaf ongeveer 8000 meter. Boven de 10.000 meter bereikt het stralingsdosistempo meer dan $2,5 \mu\text{Sv/h}$.

Vergelijking met de gesimuleerde waarden van EXPACS toont aan dat de gemeten stralingsdosistempo's over het algemeen in lijn zijn met de gesimuleerde data. EXPACS-simulaties geven stralingsdosistempo's variërend van $2,48 \mu\text{Sv/h}$ tot $3,20 \mu\text{Sv/h}$ op een breedtegraad van $50,1^\circ$ en hoogte van 11 km, wat vergelijkbaar is met de in de grafiek getoonde waarden voor hoogtes rond 10.000 meter en hoger. Op grondniveau bedragen de dosistempo's verkregen via EXPACS tussen $0,0234 \mu\text{Gy/h}$ en $0,0256 \mu\text{Gy/h}$ afhankelijk van de elfjarige zonnecyclus. Ook deze waarden komen overeen met de gegevens uit Figuur 57. Beide gegevensbronnen bevestigen dat de stralingsdosistempo's aanzienlijk toenemen met de hoogte, met hogere dosistempo's op grotere hoogtes, zoals verwacht wordt.

Ook Figuur 58 vergelijkt de effectieve dosissnelheid (in $\mu\text{Sv/h}$) op verschillende hoogtes en voor verschillende vliegtuigen, evenals enkele grondlocaties. Deze dosissnelheden zijn berekend met de CARI-6 code. Deze code maakt geen gebruik van Monte Carlo-simulaties. In plaats daarvan is het gebaseerd op deterministische modellen om de kosmische stralingsdosistempo's te berekenen [34].



Figuur 58: Effectieve-dosistempo's als gevolg van kosmische straling als functie van de hoogte (berekend met de CARI-6-code voor de regio São José dos Campos, SP, voor januari 2008) [34]

De grafiek vertoont eenzelfde trend als Figuur 57 en de simulaties via EXPACS op grond- en vliegniveau. Op grondniveau zijn de dosistempo's veel lager: Campos do Jordão heeft een dosistempo van $0,07 \mu\text{Sv/h}$ en São José dos Campos een dosissnelheid van $0,03 \mu\text{Sv/h}$. Deze waarden komen overeen met de simulatie via EXPACS, waar muonen de grootste bijdrage leveren aan de stralingsdosis op grondniveau (totale dosistempo van ongeveer $23,4 \text{ nGy/h}$ tot $25,6 \text{ nGy/h}$, wat overeenkomt met $0,0234 \mu\text{Sv/h}$ en $0,0256 \mu\text{Sv/h}$). Ook hier dient in acht genomen te worden dat de breedtegraad invloed heeft op de gemeten en gesimuleerde dosistempo's. Toch is deze variatie van breedtegraad op grondniveau beperkter dan op vliegniveau. Onderzoek [35] toont aan dat naarmate de hoogte toeneemt, de invloed van de breedtegraad belangrijker wordt en dat de invloed van breedtegraad verwaarloosbaar is op grondniveau.

Figuur 58 toont ook aan dat op vliegniveau het stralingsdosistempo aanzienlijk hoger is dan op grondniveau. Deze bedraagt $2,38 \mu\text{Sv/h}$ op 10 km hoogte. Ook deze waarden komen overeen met de EXPACS-simulaties op vliegniveau ($2,48 \mu\text{Sv/h}$ tot $3,20 \mu\text{Sv/h}$).

Dit betekent dat de gesimuleerde waarden van EXPACS betrouwbaar zijn en consistent met de andere simulaties. Het verschil in specifieke meetwaarden kan worden verklaard door variabiliteit in timing van de metingen, breedtegraad en hoogte.

4.2.2 Experimentele data

ÚFJ: TLD-respons op vliegniveau

Tabel 8 toont de resultaten van de dosismetingen van verschillende detectoren, zowel inclusief als exclusief achtergrondstraling op vliegniveau. Zoals aangegeven in de methode, gaat het om dosissen gemeten gedurende een lange periode over meerdere vluchten. De detectoren waren dus ook een deel van de tijd op zeeniveau. Er zijn dus resultaten verkregen waarbij de dosis van achtergronddetectoren van op zeeniveau zijn afgetrokken. Zowel de bruto als nettoresultaten zijn eigenlijk niet correct aangezien de detectoren een deel van de tijd op vlieghoogte waren en een deel van de tijd op zeeniveau. De onzekerheden zijn hierbij ook vrij groot zijn. De vergelijking van de totale dosissen met de EXPACS-simulaties moeten dus eerder kwalitatief bekeken worden en niet kwantitatief.

Tabel 8: Experimentele waarden vliegniveau

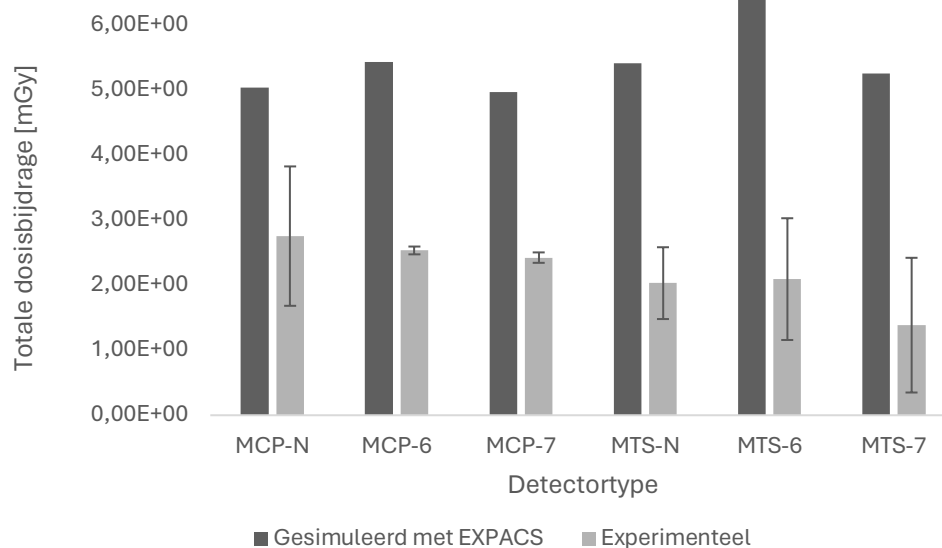
Detector	Inclusief achtergrond		Exclusief achtergrond	
	Dosis (mGy)	Onzekerheid (mGy)	Dosis (mGy)	Onzekerheid (mGy)
MTS-6	4,24	0,87	2,09	0,93
MTS-N	4,82	0,41	2,03	0,55
MTS-7	4,53	0,88	1,38	1,03
MCP-6	3,43	0,05	2,53	0,06
MCP-N	3,64	1,05	2,75	1,07
MCP-7	3,37	0,08	2,42	0,08

De experimentele waarden voor de MTS-detectoren tonen dat de MTS-6-detectoren de hoogste gemeten dosis hebben (2,09 mGy), gevolgd door de MTS-N-detectoren (2,03 mGy). De MTS-7-detectoren vertonen de laagste dosis (1,38 mGy). Voor de MCP-detectoren vertonen de detectoren met natuurlijke lithium abundantie de hoogste dosis (2,75 mGy), gevolgd door de detectoren met lithium-6 (2,53 mGy). De MCP-7-detectoren vertonen de laagste dosis (2,42 mGy). Normaal wordt verwacht dat de MCP-detectoren met lithium-6 de hoogste waarde geven, omdat alleen thermische neutronen aanzienlijk worden verzwakt door de dikte van TLD's die verrijkt zijn met ^6Li . Hierdoor wordt meer energie geconcentreerd afgegeven in de bovenste lagen van de TLD, wat resulteert in een hogere gemeten dosis [18].

Over het algemeen geven de MCP-detectoren een hogere dosis dan de MTS-detectoren. Dit resultaat is onverwacht, aangezien de relatieve luminescentie-efficiënties van MCP-TLD's doorgaans lager zijn dan die van MTS-TLD's voor de meeste stralingstypen en -energieën. Er wordt daarom verwacht dat de gemeten dosis met de MTS-detectoren hoger zou zijn dan met de MCP-detectoren. Echter, wanneer de onzekerheden in aanmerking worden genomen, kan deze waarneming alsnog consistent zijn.

Wanneer de resultaten toch kwantitatief worden geanalyseerd, wordt uitgegaan van 2000 vlieguren. De totale dosis kan dan worden berekend door de gemodelleerde dosistempo's van EXPACS te vermenigvuldigen met 2000 uur. Figuur 59 toont de vergelijking tussen de gemodelleerde data via EXPACS en de experimentele vliegdata. De gemodelleerde data tonen aanzienlijk hogere dosissen dan de experimentele data. Dit verschil is te verklaren doordat in het experiment voornamelijk Europese vluchten zijn meegenomen. Deze vluchten zijn relatief kort en omvatten een klimperiode en daalperiode van elk 15 minuten tot 30 minuten, waardoor vliegtuigen slechts een beperkte tijd op 11 km hoogte blijven [36]. In de simulatie daarentegen is aangenomen dat het vliegtuig onmiddellijk op kruishoogte is en gedurende de gehele vlucht op 11 km blijft, wat in de werkelijkheid niet het geval is. De dosissen op lagere hoogten zijn lager, wat resulteert in lagere dosissen in het experiment vergeleken met de gesimuleerde waarden.

Daarnaast is in de simulatie slechts één locatie in aanmerking genomen, namelijk die van het instituut in Praag, terwijl er in werkelijkheid naar verschillende bestemmingen wordt gevlogen. Aangezien de dosisbijdragen ook afhangen van de breedtegraad, is het lastig om dit nauwkeurig te simuleren. Tijdens het experiment zou er dan ook nauwkeurig moeten worden bijgehouden welke vluchten er op welk moment worden uitgevoerd. Figuur 52 illustreert dat een vlucht van Praag naar Zuid-Europa een lagere dosis oplevert dan een even lange vlucht naar Noord-Europa. Dit komt doordat het dosistempo in Noord-Europa hoger is dan in Zuid-Europa.

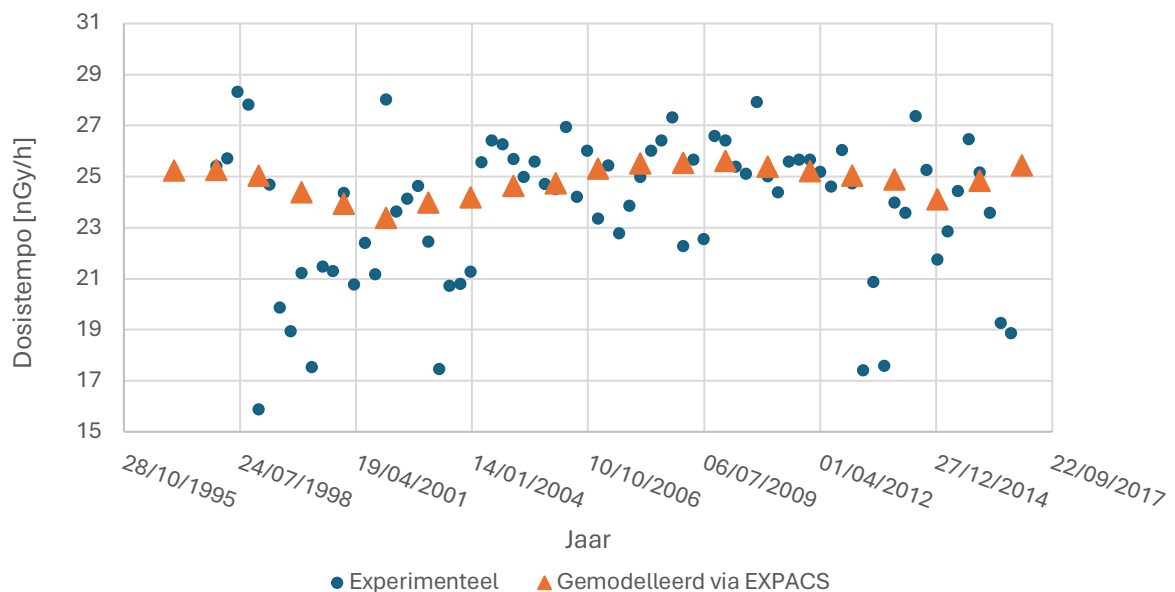


Figuur 59: Vergelijking gesimuleerde dosis met EXPACS en experimentele dosis

SCK CEN: TLD-respons op grondniveau

Figuur 60 toont de dosistempo's in nanogray per uur (nGy/h) over een periode van meerdere jaren, waarbij zowel experimentele gegevens als gemodelleerde gegevens via EXPACS worden weergegeven. De experimentele waarden zijn aangegeven met blauwe stippen, terwijl de gemodelleerde waarden via EXPACS zijn weergegeven met oranje driehoeken. Het is belangrijk op te merken dat deze dosistempo's niet voor vliegniveau, maar voor grondniveau zijn verkregen door enkel kosmische straling op één positie te meten, zonder invloed van kunstmatige radioactiviteit.

Tijdens de omgevingsdosimetrie zijn zowel terrestrische als kosmische straling gemeten. Om een nauwkeuriger beeld te krijgen van de kosmische straling, is de terrestrische straling geëlimineerd. Dit is gedaan door gebruik te maken van een kaart die de terrestrische gamma-dosistempo's in Europa weergeeft. De terrestrische straling werd als constant aangenomen voor de hele meetperiode en bedroeg (50 nGy/h), waardoor de variaties in de gemeten dosistempo's volledig konden worden toegeschreven aan veranderingen in kosmische straling [37].



Figuur 60: Vergelijking experimentele dosistempo's en gesimuleerde dosistempo's via EXPACS

De experimentele gegevens tonen aanzienlijke variabiliteit over de jaren. Dit kan worden veroorzaakt door factoren zoals veranderingen in zonneactiviteit, seizoensgebonden variaties en atmosferische condities die de kosmische straling beïnvloeden. De waarden variëren van ongeveer 17 nGy/h tot 29 nGy/h.

De elfjarige zonnecyclus, ook wel de zonnecyclus genoemd, heeft een significante invloed op de kosmische straling die de aarde bereikt, en daarmee op de stralingsdosis op grondniveau. De elfjarige zonnecyclus is de voornaamste reden voor de variabiliteit over de jaren. De zonnecyclus bestaat uit periodes van hogere zonneactiviteit (zonne-maxima) en lagere zonneactiviteit (zonne-minima). Tijdens periodes van hoge zonneactiviteit, wordt de aarde beter beschermd tegen kosmische straling door het versterkte magnetische veld van de zon. Dit resulteert in lagere stralingsniveaus op grondniveau. Tijdens zonne-minima, wanneer de zonneactiviteit laag is, is er minder bescherming tegen kosmische straling, wat leidt tot hogere stralingsniveaus [33]. Dit patroon is duidelijk zichtbaar in de experimentele data: lagere dosiswaarden zijn te zien rond de jaren 2001 en 2013, terwijl hogere dosiswaarden zichtbaar zijn rond het jaar 2008.

Daarnaast is er een duidelijke discrepantie tussen de gemodelleerde en experimentele gegevens. De gemodelleerde waarden liggen tijdens de zonne-minima vaak hoger dan de experimentele waarden. Voor de zonne-maxima liggen de experimentele waarden juist lager dan de gesimuleerde. Dit kan te wijten zijn aan de aannames en simplificaties in het EXPACS-model, zoals het parameteriseren van de analytische functies. Een andere factor die bijdraagt aan de afwijking tussen gemodelleerde en experimentele gegevens is dat tijdens de experimentele meting op grondniveau zowel terrestrische als kosmische straling is gemeten. De terrestrische straling diende verwijderd te worden en werd als constant beschouwd met een waarde van 50 nGy/h. Het is echter waarschijnlijk dat er door de jaren heen nog steeds kleine variaties in de terrestrische straling hebben plaatsgevonden die niet zijn meegenomen door deze als constante waarde te beschouwen. Dit kan resulteren in onnauwkeurigheden in de uiteindelijke data van de kosmische straling.

4.3 Conclusie

De resultaten en discussie van het onderzoek naar de stralingsdosis op vliegniveau en op grondniveau bieden belangrijke inzichten. De stralingsbijdragen van muonen, protonen, elektronen, positronen, fotonen en alfadelen zijn consistent over verschillende detectoren, wat suggereert dat de lithium-abundanties in de detectoren weinig invloed hebben op de gemeten dosissen van deze deeltjes. Neutronen vertonen echter aanzienlijke variaties tussen de detectoren, met hogere bijdragen bij detectoren verrijkt met lithium-6, vanwege de verhoogde gevoeligheid van ${}^6\text{Li}$ voor neutronen.

De gemeten dosistempo's zijn hoger voor de MTS-detectoren dan voor de MCP-detectoren, voornamelijk door de hogere luminescentie-efficiënties van MTS-TLD's voor verschillende soorten straling. Dit verschil is het meest uitgesproken voor neutronenbijdragen. Deze bevindingen bevestigen eerdere onderzoeken waarin MTS-detectoren hogere dosistempo's meten dan MCP-detectoren [26].

Het stralingsdosistempo neemt significant toe met de hoogte. De breedtegraad speelt ook een belangrijke rol, met hogere dosistempo's nabij de polen vanwege de minder effectieve magnetische afscherming van de aarde. Simulaties via EXPACS tonen vergelijkbare stralingsdosistempo's als de gemeten, experimentele data, wat de betrouwbaarheid van deze simulaties bevestigt.

Op grondniveau dragen muonen de grootste bijdrage aan de totale stralingsdosis, waarbij positieve en negatieve muonen samen meer dan 60% van de dosis uitmaken. Op vliegniveau wordt 89% van de dosis geleverd door elektronen, positronen en protonen. Dit komt overeen met de literatuur, die aantoont dat muonen vanwege hun hoge energie en lange levensduur de grond gemakkelijk bereiken [32].

Ook variëren de totale dosistempo's door de elfjarige zonnecyclus, waarbij periodes van verhoogde zonneactiviteit lagere dosistempo's laten zien vanwege een sterkere magnetische bescherming van de zon.

Samenvattend tonen deze resultaten aan dat zowel de hoogte als de breedtegraad cruciale factoren zijn in de blootstelling aan kosmische straling tijdens vluchten. De keuze van detectoren en hun samenstelling speelt een belangrijke rol bij het accuraat meten van deze straling, met name voor neutronenbijdragen. De bevindingen zijn consistent met eerdere studies en bevestigen het belang van continue monitoring en simulatie om de stralingsblootstelling in de luchtvaartsector te begrijpen en te beheersen.

Bronnenlijst

- [1] SCK CEN, “Over SCK CEN,” 2024. [Online]. Beschikbaar: <https://www.sckcen.be/nl/over-sck-cen>. [Geraadpleegd op 23 februari 2024].
- [2] P. Bilski et al., “High-dose characterization of different LiF phosphors,” *Radiation Measurements*, vol. 42, nr. 4-5, pp. 582-585, 2007.
- [3] A. Parisi, *Space and Hadron Therapy Dosimetry with Luminescent Detectors: Microdosimetric Modeling and Experimental Measurements* [eindwerk], Mons: Doctor in Engineering Sciences and Technology UMons, 2018.
- [4] S. Gielen, *Characterization of Lithium Fluoride thermoluminescent detector dose response in the Harshaw 5500 reader for high gamma dose* [eindwerk], Hasselt: Gemeenschappelijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen UHasselt & KULeuven, 2023.
- [5] B. Vandezande, *Characterisation of the intrinsic dose response of lithium fluoride based thermoluminescent detectors* [eindwerk], Hasselt: Gemeenschappelijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen UHasselt & KULeuven, 2023.
- [6] B. Reniers, *Radiotherapy and dosimetry* [cursus], Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, 2023.
- [7] E.G. Yukihiro et al., “Luminescence dosimetry,” *Nature Reviews Methods Primers*, vol. 2, nr. 1, 2022.
- [8] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, “Unscar 2017 Report,” 2017. [Online]. Beschikbaar op: https://www.unscar.org/unscar/uploads/documents/unscar-reports/UNSCEAR_2017_Report-CORR.pdf. [Geraadpleegd op 10 maart 2024].
- [9] W. Schroeyers, *Stralingsbescherming en dosimetrie* [cursus], Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, 2023.

- [10] International Commission on Radiological Protection, “ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” 2007. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. [Geraadpleegd op 10 maart 2024].
- [11] T. Kron, “Thermoluminescence dosimetry and its applications in medicine--Part 1: Physics, materials and equipment,” *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, vol. 17, no. 4, pp. 175–199, Dec. 1994.
- [12] P. Bilski, “Lithium Fluoride: From LiF:Mg,Ti to LiF:Mg,Cu,P,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 100, no. 1, pp. 199–205, Jul. 2002.
- [13] J.P. David, *Contrôles non destructifs de nouvelles préparations de borate de lithium. Application à la dosimétrie par thermoluminescence* [eindwerk], Paris : Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 1985.
- [14] M. Puchalska et al., “Glowfit, a new tool for thermoluminescence glow-curve deconvolution,” *Radiation Measurements*, vol. 41, nr. 6, pp.659-664, 2006.
- [15] FANC, “Het TELERAD-netwerk: continu radiologisch toezicht op het grondgebied | FANC - Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle,” 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://fanc.fgov.be/nl/dossiers/radioactiviteit-het-leefmilieu/filosofie/het-telerad-netwerk-continu-radiologisch-toezicht>. [Geraadpleegd op 11 April 2024].
- [16] IFJ (2023). Preliminary results of the MTS and MCP linearity index f(D) [PowerPoint-slides]. Ongepubliceerd.
- [17] EXPACS, “What is EXPACS?,” 2014. [Online]. Beschikbaar op: <https://phits.jaea.go.jp/expacs/>. [Geraadpleegd op 14 mei 2024].
- [18] O. Van Hoey et al., “Evaluation and modelling of the lithium fluoride based thermoluminescent detector response at the CERN-EU high-energy reference field (CERF),” *Radiation Measurements*, vol. 162, p. 106923, Mar. 2023.
- [19] J.H. Hubbell et al., “NIST standard reference database 126, tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest,” 2004. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>. [Geraadpleegd op 20 mei 2024].
- [20] C. Werner et al., “Title: MCNP Version 6.2 Release Notes Intended for,” 2018. [Online]. Beschikbaar op: https://web.archive.org/web/20220330000747id_/https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-18-20808. [Geraadpleegd op 24 mei 2024].

- [21] A. Parisi, et al., “Microdosimetric specific energy probability distribution in nanometric targets and its correlation with the efficiency of thermoluminescent detectors exposed to charged particles,” *Radiation Measurements*, vol. 123, pp. 1–12, Apr. 2019.
- [22] A. Parisi et al., “Photon energy response of LiF:Mg,Ti (MTS) and LiF:Mg,Cu,P (MCP) thermoluminescent detectors: Experimental measurements and microdosimetric modeling,” *Radiation physics and chemistry*, vol. 163, pp. 67–73, Oct. 2019.
- [23] A. Parisi et al., “Nanoscale calculation of the relative efficiency of $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (MTS-7) and $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ (MCP-7) thermoluminescent detectors for measuring electrons and positrons,” *Journal of physics. Conference series*, vol. 1662, no. 1, pp. 012025–012025, Oct. 2020.
- [24] A. Parisi et al., “The relative efficiency of $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ (MTS-7) and $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ (MCP-7) thermoluminescent detectors for muons, pions and kaons over a broad energy range (2 keV–1 GeV): theoretical calculations using the Microdosimetric d(z) Model,” *Radiation physics and chemistry*, vol. 177, pp. 109096–109096, Dec. 2020.
- [25] O. Van Hoey et al., “Development and validation of a model for assessing neutron fluence with lithium fluoride thermoluminescent detectors,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 188, p. 109688, Nov. 2021.
- [26] P. Bilski et al., “Response of TL Dosimeters to Cosmic Radiation On Board Passenger Aircraft,” *Radiation protection dosimetry*, vol. 100, no. 1, pp. 549–552, Jul. 2002.
- [27] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, “Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center,” 2024. [Online]. Beschikbaar op: www.swpc.noaa.gov. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression#:~:text=The%20Prediction%20Panel%20predicted%20Cycle>. [Geraadpleegd op 28 mei 2024].
- [28] B. J. Lewis et al., “Aircrew dosimetry using the predictive code for aircrew radiation exposure (PCAIRE),” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 116, no. 1–4, pp. 320–326, Dec. 2005.
- [29] G. Frasch et al., “Radiation Exposure of German Aircraft Crews under the Impact of Solar Cycle 23 and Airline Business Factors,” *Health Physics*, vol. 107, no. 6, pp. 542–554, Dec. 2014.
- [30] SKYBRARY, “Cosmic Radiation,” 2017. [Online]. Beschikbaar op: skybrary.aero. <https://skybrary.aero/articles/cosmic-radiation#:~:text=For%20a%2035000%20ft%20altitude>. [Geraadpleegd op 28 mei 2024].

- [31] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, “Unsear 2008 Report,” 2008. [Online]. Beschikbaar op: https://www.unsear.org/unsear/en/publications/2008_1.html. [Geraadpleegd op 28 mei 2024].
- [32] Cinelli, G. et al., European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.
- [33] V. Thomas, “How Scientists Around the World Track the Solar Cycle - NASA,” 2020. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-scientists-around-the-world-track-the-solar-cycle/#:~:text=During%20solar%20maximum%2C%20the%20Sun>. [Geraadpleegd op 28 mei 2024].
- [34] C. A. Federico et al., “Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of DCTA’s flight test special group,” *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 2, no. 2, pp. 137–144, 2010.
- [35] D. T. Phillips, “Global Cosmic Radiation Measurements,” 2018. [Online]. Beschikbaar op: <https://spaceweatherarchive.com/2018/06/10/global-cosmic-radiation-measurements/>. [Geraadpleegd op 28 mei 2024].
- [36] International Civil Aviation Organization, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Aircraft Operations - Volume II Construction Of Visual and Instrument Flight Procedures – sixth edition, Montreal: International Civil Aviation Organization, 2014.
- [37] Joint Research Centre, “Radiological Maps - European Commission,” 2024. [Online]. Beschikbaar op: remap.jrc.ec.europa.eu. <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx#>. [Geraadpleegd op 2 juni 2024].