

Litiumformat som strålingsdosimeter for ESR- dosimetri

Stabilisering av radikaler ved hjelp av bindemiddel.

Marie Ersnes Gjøvik



Masteroppgave i Biofysikk og Medisinsk fysikk

Fysisk Institutt

UNIVERSITETET I OSLO

November 2009

Forord

Denne masteroppgaven er utført ved gruppen for Biofysikk og medisinsk fysikk ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo. Mine veiledere har vært Eli Olaus Hole, Einar Sagstuen og Eirik Malinen, og jeg vil takke dem for all hjelp og støtte de har gitt meg i løpet av mitt masterstudie. Eli fortjener en spesielt stor takk for å ha gitt meg all den oppmuntringen og tålmodigheten jeg har trengt. Jeg setter stor pris på at hun alltid har bevilget meg tid, både faglig sett, men også til ivrige diskusjoner av livets små og store mysterium. Jeg vil også takke Einar Waldeland for uvurderlig hjelp med bestrålingene ved Radiumhospitalet, og for gode råd og tips i forbindelse med oppgaven.

En stor takk til mine medstudenter og andre gruppe-medlemmer, de har alle bidratt til hyggelige studiehverdager fylt med varm kaffe, gode kaker og diskusjoner om alt mellom himmel og jord. Spesielt vil jeg takke Siv, som har tatt seg tid til å lese og rette viktige deler i min masteroppgave.

Jeg vil dessuten takke pappa og mamma som alltid støtter meg og har tro på meg.

Sist men ikke minst, min nydelige Nina: tusen takk for at du forstår meg, tar vare på meg, og for at du er den du er.

Oslo, november 2009

Marie Gjøvik

Sammendrag

Litiumformat (LiFo) ser ut til å være et lovende dosimetermateriale ved ESR-spektroskopi. LiFo kan måle stråledoser under 1 Gy med høy presisjon, og viser ellers gode dosimeregenskaper på lik linje med alanin, som i dag er det rådende ESR-dosimetermaterialet. For at LiFo skal kunne benyttes som dosimeter må man ha oversikt over stabiliteten til de strålingsinduserte radikalene i materialet, og disse bør være stabile over lengre tid. Undersøkelser av stabiliteten har så langt vist varierende resultater, og det ser ut til at blant annet luftfuktighet har innflytelse på stabiliteten. I et pilotprosjekt utført ved BMF-gruppa ble det funnet at ved bruk av bindemiddelet parafin økte stabiliteten til radikalene i LiFo-dosimetre. Dette masterprosjektet er en fortsettelse av dette pilotstudiet.

Dosimetre med varierende andeler LiFo og parafin er blitt produsert. Forskjellige former for produksjonsmetoder ble undersøkt, og det ble konkludert med å produsere dosimetrene hvor både LiFo og parafin ble preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$. I tillegg ble dosimetre produsert hvor LiFo og parafin ble preparert ved romtemperatur. Dosimetre ble bestrålt med tre forskjellige strålekvaliteter: 15 MV, 6 MV og 60 kV fotonenergier, og gitt doser på 1, 10 eller 100 Gy. Bestrålingene ble dels utført ved Radiumhospitalet og dels med BMF-gruppas røntgenapparat. Dosimetrene ble oppbevart enten ved 34 % eller ved 61 % luftfuktighet.

Parafin ble funnet å ha en stabiliserende effekt ved bestråling med 6 MV og 15 MV fotonstråling. Ved bestråling med 60 kV røntgenstråling, og for dosimetrene lagret ved 61 % luftfuktighet, hadde parafin en stabiliserende effekt kun når både LiFo og parafin ble nedkjølt med $N_2(lq)$. Hos dosimetre lagret ved 34 % luftfuktighet og bestrålt med samme strålekvalitet hadde parafin en stabiliserende effekt kun i de tilfellene hvor LiFo var preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$. Det kunne utover dette ikke påvises at parafin hadde en stabiliserende effekt ved strålingsenergi 60 kV.

Å produsere dosimetrene under nedkjøling med $N_2(lq)$ viste seg å ha en stabiliserende effekt når dosimetrene ble bestrålt med 6 MV fotonstråling. Den samme stabiliserende effekten ble ikke funnet ved bestråling med 60 kV røntgenstråling.

Dosimetre lagret ved 34 % luftfuktighet hadde generelt sett ingen eller svært liten fading, sett bort i fra en markant reduksjon i signalintensitet hos samtlige dosimetre i perioden juni/juli. Dosimetre lagret ved 61 % luftfuktighet hadde derimot kontinuerlig fading utover hele måleperioden.

Ordliste

Eksikator

Lufttett glassbeholder hvor luftfuktigheten kan holdes konstant ved hjelp av uorganiske saltløsninger.

Fritt radikal

Molekyl med et eller flere uparede elektroner.

Nulldosesignal

ESR-signalet til ubestrålte dosimetre.

Radikalutbytte

Signalintensiteten (SI) til et dosimeter normert med den mengden litiumformat dosimeteret inneholder. Benevning SI/mg.

Radikalstabilitet

Signalintensiteten (SI) til et dosimeter som funksjon av antall dager etter bestråling, normert med SI dosimeteret hadde samme dag som det ble bestrålt.

Vevsekvivalent

Materiale med absorpsjonsevne for fotoner nær den for vev. Karakteriseres ofte ved det effektive atomnummeret Z for materialet som er 7,51 for vann. Ifølge ICRU benyttes nå alltid vann som referanse for dosimetri.

Innhold

FORORD	1
SAMMENDRAG	3
ORDLISTE	5
INNHOOLD	7
1. INNLEDNING	11
2. BAKGRUNN	15
2.1 STRÅLINGSDOSIMETRI	15
2.2 ESR-DOSIMETRI.....	17
2.3 ALANIN SOM ESR-DOSIMETER.....	22
2.4 LITIUMFORMAT SOM ESR-DOSIMETER.....	22
2.5 OPPGAVENS HENSIKT	23
3. TEORI	25
3.1 IONISERENDE STRÅLING	25
3.2 FOTONERS VEKSELVIRKNING I MATERIALE	26
3.3 BESKRIVELSE AV STRÅLEFELT OG DOSIMETRI.....	28
3.4 RØNTGENSTRÅLING	30
3.5 ESR-TEORI.....	32
3.6 ESR-PARAMETRE.....	35
4. METODE	39
4.1 DOSIMETERPRODUKSJON	39
4.2 OPPBEVARING AV DOSIMETRE.....	40
4.3 BESTRÅLING	40
4.4 ESR-SPEKTROSKOPI.....	44
4.5 AVLESNING AV SPEKTER OG BEARBEIDELSE AV DATA	45

4.6	REFERANSESIGNALET.....	48
4.7	OVERSIKT OVER DOSIMETRE.....	50
5.	RESULTAT OG ANALYSE.....	51
5.1	SERIE 1: 1 GY, 15 MV, 34 % LUFTFUKTIGHET.....	54
5.2	SERIE 2: 10 GY, 15 MV, 34 % LUFTFUKTIGHET.....	57
5.3	SERIE 3: 100 GY, 15 MV, 34 % LUFTFUKTIGHET.....	59
5.4	SERIE 4: 10 GY, 6 MV, 61 % LUFTFUKTIGHET.....	61
5.5	SERIE 5: 10 GY, 60 kV, 34 % LUFTFUKTIGHET.....	63
5.6	SERIE 6: 10 GY, 60 kV, 61 % LUFTFUKTIGHET.....	66
5.7	SERIE 7: LAVEST DETEKTERBARE DOSE.....	68
6.	DISKUSJON.....	71
6.1	DISKUSJON AV PARAFIN SOM BINDEMIDDEL.....	72
6.1.1	<i>Betydning av parafinandel og dose, 15 MV fotoner.....</i>	<i>72</i>
6.1.2	<i>Betydning av parafin, bestråling med 6 MV fotoner.....</i>	<i>75</i>
6.1.3	<i>Betydning av parafin, bestråling med 60 kV røntgenstråling.....</i>	<i>75</i>
6.1.4	<i>Oppsummering betydning av parafin.....</i>	<i>76</i>
6.2	DISKUSJON AV ANDRE PARAMETRE.....	77
6.2.1	<i>Produksjonsmetode.....</i>	<i>77</i>
6.2.2	<i>Luftfuktighet.....</i>	<i>78</i>
6.2.3	<i>Stråle kvalitet.....</i>	<i>78</i>
6.3	LAVEST DETEKTERBARE DOSE.....	81
7.	KONKLUSJON.....	83
8.	TANKER OM VIDERE ARBEID.....	85
	KILDELISTE.....	87

APPENDIX.....	91
A: RADIKALSTABILITET TIL HVERT ENKELT DOSIMETER	91
B: MÅLEDATA	97
C: UTDRAK FRA PROGRAMKODEN I MATLAB	103

1. Innledning

Stråling omgir oss hele tiden, men selv om vi har levd med stråling til alle tider har vi mennesker ingen sanser som kan detektere denne direkte. Dermed ble stråling heller ikke oppdaget før ved en tilfeldighet av W. C. Röntgen sent i 1895. Året etter ble radioaktivitet oppdaget av H. Becquerel, mens ekteparet Curie oppdaget radium i 1898. Funnene ble raskt tatt i bruk innen medisinsk diagnostikk og til behandling av kreft, og brukes fortsatt til disse formålene i dag. Stråling og radioaktivitet har også etter hvert fått en rekke andre og nye anvendelser innenfor medisin, industri, forskning og teknologi.

Ioniserende stråling er stråling som innehar nok energi til å kunne løsrive elektroner fra atomer eller molekyler i det stoffet som utsettes for bestrålingen. Eksempler på ioniserende stråling er høyenergetisk elektromagnetisk stråling (røntgen- og gammastråling), elektroner, nøytroner, protoner, α -partikler (heliumkjerner) og tyngre ladde partikler.

Når et stoff blir eksponert for ioniserende stråling, vil strålingen vekselvirke med materialet. Dette innebærer at strålingsenergien absorberes i materialet, transmitteres gjennom materialet og spres i materialet. Sannsynligheten for de forskjellige prosessene, og forholdet mellom dem, avhenger av strålekvalitet (det vil si hvilken strålingstype som er brukt, og energien til strålingen) og av hvilket materiale som ble bestrålt.

Ved kjennskap til stråling kom også økt eksponering for stråling, og det viste seg at stråling kunne være både nyttig, helsebringende og skadelig. På den ene siden kunne man redde livet til pasienter med kreft, mens store mengder stråling kunne være fatale. Det oppstod dermed et behov for å kunne si noe om ”mengden” av stråling, og begrepet absorbert dose, eller bare dose, ble etter hvert innført. Dose beskriver hvor mye energi strålingen avsetter per masse i et volum, og metoder for å måle denne, direkte eller indirekte, kalles dosimetri. Utstyr som brukes til dette formålet kalles et dosimeter, og eksempler på slike dosimetre er ionisasjonskamre, kalorimetre, film,

kjemiske metoder som Frickedosimetri, dioder, termolumeniscens dosimetri (TLD) og ESR-dosimetri.

Felles for dosimetrene er at de har en detektor, en tilgjengelig avlesningsmetode og et referansesystem som kan relatere de målte endringene i detektoren til dose. De ulike dosimetertypene har både fordeler og ulemper, og valg av dosimeter avhenger blant annet av formål og krav til nøyaktighet. I klinisk sammenheng kan det for eksempel være høyt krav til nøyaktighet, spesielt innenfor stråleterapi hvor relativt små forskjeller i absolutt dose kan gi store forskjeller i stråleeffekt. Ved stråleterapi er det også viktig å kunne vite sammenhengen mellom dosen målt med dosimeteret og dosene som tumor og vev mottar.

Ved ESR-dosimetri benytter man seg av ESR-spektroskopi hvor det som detekteres er strålingsinduserte frie radikaler. I et molekylært system er normalt alle elektroner ordnet i par, men ved bestråling kan ett av elektronene fjernes fra systemet. Dermed har molekylet et elektron uten partner, og dette molekylet kalles da for ett fritt radikal. Mengden av slike enslige elektroner i et materiale er ofte proporsjonal med den absorberte dosen. Det er nettopp mengden av slike uparede elektroner som kan detekteres ved ESR-spektroskopi. Således gir størrelsen av et ESR-signal informasjon om absorbert dose i et materiale. Noen fordeler med ESR-dosimetri er at metoden er ikke-destruktiv, det vil si at avlesningen ikke påvirker dosimeteret, og at dosene kan adderes slik at akkumulert dose leses av.

Ved ESR-dosimetri er det vanlig å bruke aminosyren alanin som dosimetermateriale. ESR/Alanin-dosimetri har flere fordeler som dosimetermetode. Sammensetningen av alanin er svært vevsekvivalent, hvilket gjør forbindelsen hensiktsmessig for kliniske studier. De strålingsinduserte radikalene er svært stabile over lengre tid, og dette gir mulighet for meget presise dosebestemmelser, særlig for høye doser. For doser under 4-5 Gy har alanin imidlertid for lav sensitivitet til å gi presise dosebestemmelser. I kliniske sammenhenger benyttes det ofte lave doser med krav om høy presisjon. Mye forskning er derfor blitt gjort for å finne et dosimetermateriale som har høyere sensitivitet enn alanin, men som ellers innehar de positive egenskapene til alanin.

Det har vist seg at litiumformat (fra nå av kalt LiFo) kan være et slikt materiale. LiFo er i likhet med alanin svært vevsekvivalent, og har i tillegg vist seg å være mer sensitiv enn alanin med en faktor 6-7. Det foreligger imidlertid varierende resultater for stabiliteten til de strålingsinduserte radikalene i LiFo. En studie har vist at luftfuktighet har stor påvirkning på stabiliteten til radikalene, og på bakgrunn av en hypotese om at et hydrofobt bindemiddel kan stabilisere radikalene i LiFo, er det blitt gjennomført et pilotprosjekt hvor parafin har blitt testet som bindemiddel. Prosjektet kunne vise til lovende resultater, og dette masterprosjektet er en videreføring av dette pilotstudiet. Hovedfokuset i dette masterprosjektet vil således være å vurdere hvorvidt parafin har en stabiliserende effekt på de strålingsinduserte radikalene i LiFo.

2. Bakgrunn

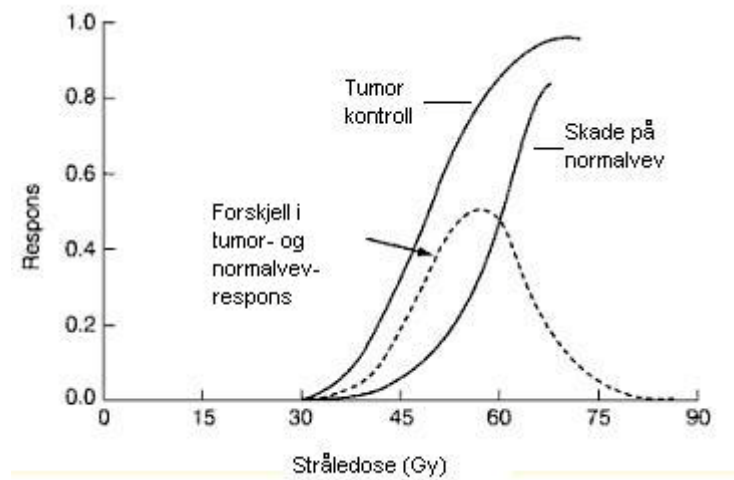
2.1 Strålingsdosimetri

Absorbert dose, eller bare dose, er definert som all energi overført fra ioniserende stråling til et materiale, dividert med massen til materialet (Nahum, 2007):

$$D = \frac{d\epsilon}{dm}$$

Absorbert dose har enheten Gy (gray) hvor $Gy = J/kg$. Metoder for å måle og beregne en gitt dose kalles dosimetri, mens et utstyr som brukes til å måle en dose kalles et dosimeter. Absorbert dose dekker all energi avsatt i et volum, og tar ikke hensyn til hva som er bestrålt eller hvilken type stråling som er benyttet.

Det finnes mange forskjellige typer dosimetre, avhengig av formål og hvor nøyaktig vi ønsker å måle dosen. Felles for dosimetrene er at de må ha en detektor av et materiale hvor målbare endringer oppstår når detektoren blir utsatt for bestråling. Disse endringene kan være av fysisk, kjemisk eller biologisk art, eller kombinasjoner av disse. I tillegg må man kjenne til en metode for å kunne lese av de strålingsinduserte endringene, og man må ha kjennskap til sammenhengen mellom den avleste verdien og dosen detektoren ble gitt. I noen sammenhenger kan poenget være å detektere om noe er bestrålt med store stråledoser eller ikke, og kravet til nøyaktig dosebestemmelse kan i slike tilfeller ha mindre betydning. I for eksempel klinisk sammenheng kan det derimot være nødvendig med usikkerheter ned i noen få prosent. Dette gjelder spesielt ved stråleterapi, hvor ønsket virkning av strålingen er å uskadeliggjøre en kreftsvulst, uten å gjøre betydelig skade på det omkringliggende friske vevet. Figur 2.1 viser stråleresponsen til tumor og til normalvev som funksjon av stråledose. Dosevinduet hvor tumor tar stor skade av stråling samtidig som normalvev tar liten skade av stråling er lite, og kravet til nøyaktig absoluttdose blir dermed stort.



Figur 2.1: Dosevinduet for stråleterapi. Modifisert fra Steel (Steel, 2007).

Ofte er det ikke hvilken dose detektoren selv mottar man er ute etter, men hvilken dose som blir gitt til et annet materiale (som ikke selv kan brukes som dosimeter). Ulike materialer absorberer ulik mengde energi, og vil således motta ulik stråledose. Dette er svært relevant i kliniske sammenhenger hvor man blant annet ønsker å beregne dose gitt til vev. For at et dosimeter skal kunne benyttes til dette bør detektormaterialet derfor optimalt sett ha absorpsjonsegenskaper lik eller nær vev (være vevsekvivalent). Ulike vevstyper har i tillegg, på grunn av ulik massetetthet, ulike absorpsjonsegenskaper. Dette gjelder spesielt forskjeller mellom bløtvev og bein, og forskjellen i stråledose mellom de ulike vevstypene bør derfor være kjent og kunne korrigeres for.

Med ionometri måles mengden av ioner i en gass, da antall ionisasjoner er proporsjonal med dosen. Til dette brukes et ionekammer som består av et gassvolum med en indre og en ytre elektrode. Når gassen ioniseres samler de frigjorte elektronene seg ved den positive elektroden, og medfører en strøm som kan måles med et elektrometer. Ionometri har høy presisjon og brukes ofte til kalibrering av utstyr ved sykehus. I termoluminescensdosimetre (TLD) benyttes en krystall hvor stråling induserer eksiterte tilstander. Krystallen avleses ved at den varmes opp, hvorved lys emitteres og detekteres. TLD-krystaller har høy sensitivitet og absorpsjonsevne nær den for vev. TLD egner seg derfor godt til persondosimetri og

til å overvåke hvilken dose en pasient faktisk har fått. Avlesningsmetoden gjør at en dose kun kan leses av en gang. Andre eksempler på dosimetre er ESR-dosimetre, kalorimetre, dioder og kjemiske dosimetre som for eksempel Frickedosimetri. Dersom ytterligere informasjon om dosimetre ønskes kan læreboken til Attix konsulteres (Attix, 1986).

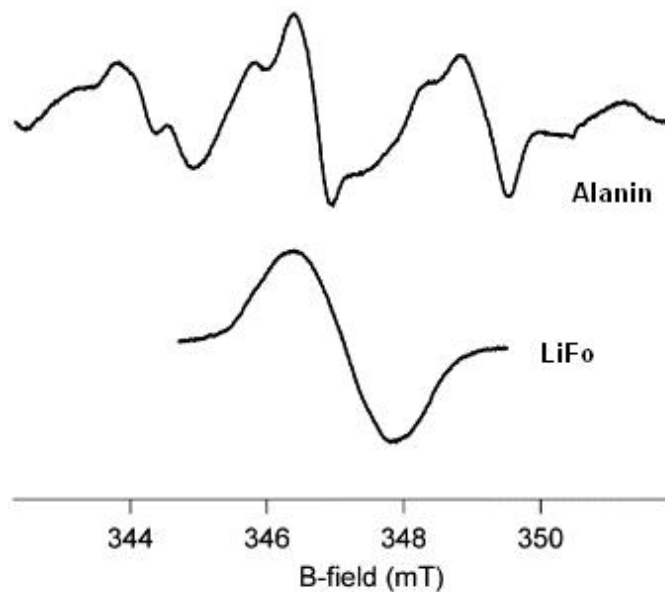
2.2 ESR-dosimetri

Når en prøve blir utsatt for ioniserende stråling induseres frie radikaler i prøven. De fleste stråleinduserte radikaler er svært ustabile og vil etter kort tid (ned i 10^{-13} sekunder) gjennomgå prosesser hvor de enten ender som sekundære radikaler eller som ikke-radikal-molekyler (ofte med endret struktur). De sekundære radikalene vil også reagere videre inntil molekylstrukturen har stabilisert seg. I noen tilfeller vil alle radikalene henfalle, mens i andre tilfeller kan radikalene fanges i sine omgivelser, og forbli stabile over lengre tid. Dette gjelder spesielt for tørre og krystalliske stoffer hvor radikalene kan holde seg stabile over flere år. Antallet primærradikaler som induseres i dosimetret vil være proporsjonal med den dosen prøven er blitt gitt. Dersom også mengden av de stabile radikalene er proporsjonal med dosen vil prøven kunne brukes som et ESR-dosimeter.

Ved ESR-spektroskopi detekteres altså radikaler, og teorien bak ESR-spektroskopi vil bli gjennomgått i kapittel 3.5. Metoden ble utviklet av E. K. Zavoisky i 1944 (Zavoiski, 1945), og ble lenge brukt til kun kvalitative undersøkelser av stoffer. To typiske førstederiverte ESR-spektre, her for alanin og LiFo, er vist i Figur 2.2.

Det som karakteriserer et ESR-spektrum er blant annet:

- Posisjonen til absorpsjonslinjen(e)
- Antall linjer i spekteret, og avstanden mellom linjene
- Relativ intensitet innbyrdes mellom linjene (dersom flere)
- Integralet av spekteret (dobbelintegralet ved førstederiverte signaler)
- Bredden og formen til linjen(e)



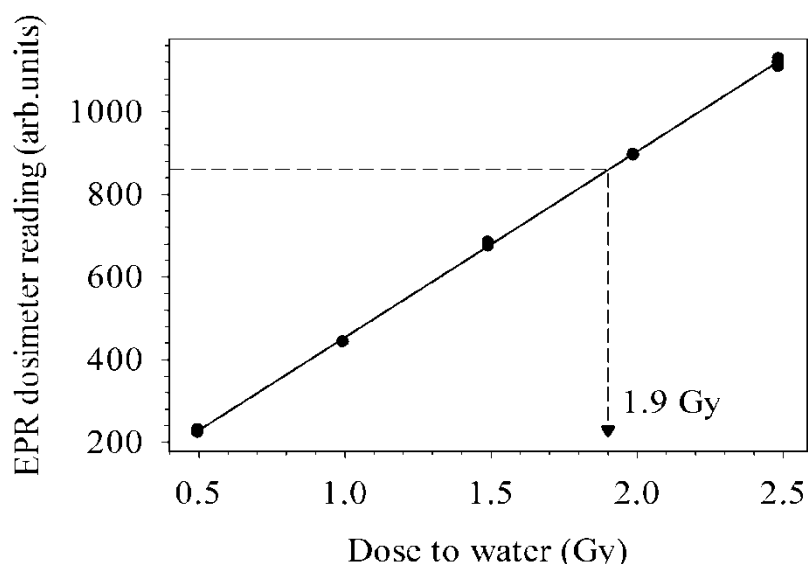
Figur 2.2: Førstederivert ESR-spekteret fra alanin og LiFo (ved X-bånd). Spektrene er skalert til samme størrelsesorden og reflekterer derfor ikke samme dose. Revidert figur fra (Lund, et al., 2005).

De tre første punktene er karakteristiske for radikalene som er dannet i prøven, mens integralet av spekteret gir et mål på antall radikaler i prøven, og dermed på dosen dersom sammenhengen mellom dose og antall radikaler er gitt. I enkelte materialer kan også intensiteten til en eller flere av linjene brukes til å angi dosen i stedet for integralet.

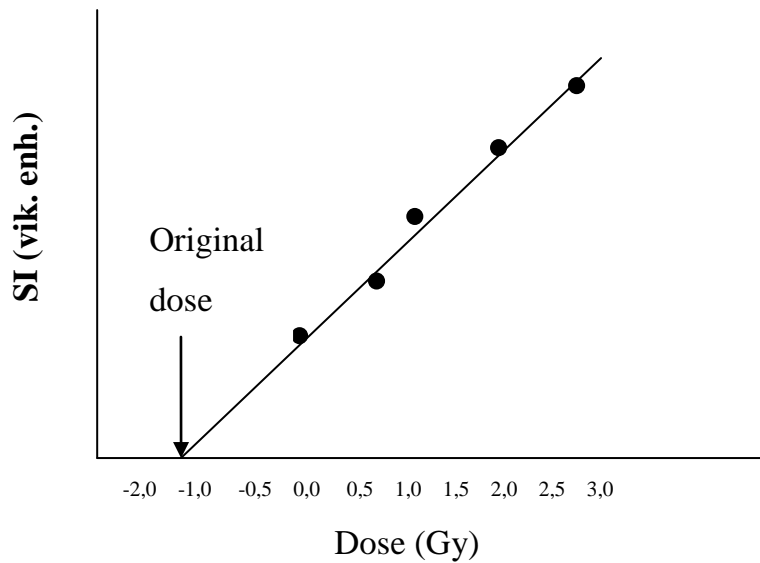
Den første til å bruke ESR-spektroskopi innenfor dosimetri var Bradshaw *et al.* (Bradshaw, 1962), som undersøkte alanin som et potensielt dosimetermateriale. I dag brukes ESR-dosimetri til mange formål (Regulla, 2005). Bestråling av matvarer er i mange land en vanlig metode for å blant annet desinfisere og sterilisere mat, og ESR-dosimetri har vist seg å kunne brukes i kontroll av tre matvaregrupper: mat som inneholder bein, cellulose eller krystallinsk sukker (Sagstuen, 2009). ESR-dosimetri har også blitt anvendt innenfor arkeologisk og geologisk datering av blant annet skjell, koraller, krystaller og fossile ben og tenner (Sagstuen, 2009). Ved biologisk og retrospektiv dosimetri er ESR-dosimetri et viktig verktøy for å gjøre en doserekonstruksjon etter at mennesker har blitt overeksponert for bestråling (Sagstuen, et al., 1983). Overeksponeringen kan være som følge av ulykker og

katastrofer i forbindelse med kjernekraftverk eller medisinsk strålingsutstyr. ESR-dosimetri er også i bruk som referansedosimeter og for rutinedosimetri, og det brukes da alanin som er godkjent av IAEA som en sekundærstandard ved høye doser (10-15kGy) (Metha, et al., 2000).

For å finne nøyaktig dose brukes en kalibreringskuve, som vist i Figur 2.3. Identiske dosimetre blir bestrålt med kjente doser, og signalintensiteten plottes som funksjon av dose. Regresjonskurven til målingene kan brukes til å bestemme ukjente stråledoser, ved å benytte signalintensiteten til et dosimeter som bestråles med en ukjent dose i regresjonskurvelikningen eller ved å benytte grafiske metoder (se Figur 2.3). Dersom identiske dosimetre ikke er tilgjengelige, slik som ved for eksempel biologisk og retrospektiv dosimetri, kan man bruke en additiv dose-metode som skissert i Figur 2.4. En avlesning av dosimeteret blir da foretatt, før dosimeteret selv blir bestrålt med kjente doser. For hver addering av dose måles signalintensiteten, og en doseresponskurve kan lages. Ved å ekstrapolere regresjonslinjen tilbake til nullsignal, vil den dosen dosimeteret opprinnelig hadde være der hvor regresjonslinjen krysser x-aksen.



Figur 2.3: Kalibreringskurve for dosebestemmelse. Modifisert fra doktoravhandlingen til Vestad (Vestad, 2005).



Figur 2.4: Prinsippet for additiv dosebestemmelse. Forklaring til figuren er gitt i teksten. Modifisert fra (Sagstuen, 2009).

En fordel med ESR-dosimetri i forhold til mange andre dosimetrityper er at den er ikke-destruktiv, det vil si at dosimeteravlesningen ikke påvirker dosimeteret. Dette betyr at man kan foreta en doseavlesning flere ganger på samme dosimeter, og man kan addere doser gitt til forskjellige tidspunkt forutsatt at de strålingsinduserte radikalene er stabile. Pasienter som blir behandlet med stråleterapi får ofte stråledosen gitt som fraksjoner over dager og uker. Ved bruk av ESR-dosimetre kan man i teorien overvåke stråledosen pasienten faktisk får både underveis i behandlingen, og akkumulert gjennom behandlingsregimet. ESR-dosimetre til bruk som referanse- og rutinedosimetre blir produsert både i tablettform og som filmdosimetre. Dosimetrene er små og relativt robuste, og i tillegg ledningsløse slik at de ikke krever bruk av elektronikk eller annet utstyr under bestråling.

Et ideelt ESR-dosimetermateriale ville hatt en doserespons som var uavhengig av faktorer som strålekvalitet, doserate, bestrålingstemperatur, dosenivå og strålingsenergi. For hver faktor doseresponsen er avhengig av må det innføres en korreksjonsfaktor. Siden hver korreksjonsfaktor har en usikkerhet, introduserer de et bidrag til den totale usikkerheten. Det er en fordel om ESR-spekteret har få og smale

absorpsjonslinjer, optimalt sett kun en linje, da signalintensiteten fordeler seg utover linjene. I tillegg er det en fordel at dosimeteret ikke viser et nulldosesignal, da nulldosesignaler også medfører en korreksjonsfaktor. De strålingsinduserte radikalene må være stabile nok til at målingene gir gode doseestimat med lav usikkerhet, og dersom radikalene henfaller i tiden mellom bestråling og avlesning må henfallsraten være kjent og kunne korrigeres for. Det er gunstig om radikalstabiliteten er høy under normale lagringsforhold også over lengre tid, slik at dosimetrene kan lagres og brukes som dokumentasjon. Høyt radikalutbytte er en bra egenskap da det gir økt signalintensitet og derved økt signal/støyforhold og sensitivitet. Det er ønskelig at signalet ikke mettes ved høy mikrobølgeeffekt da høy mikrobølgeeffekt øker sensitiviteten til materialet. Dosimetrene bør også være robuste nok til å kunne håndteres og avleses uten problemer. I klinisk sammenheng er det også en fordel om dosimeteret har den samme strålingsresponsen som vev og vann, slik at den avleste dosen fra dosimeteret gir et godt doseestimat for den dosen vev eller vann har fått uten at ulike responsfaktorer behøves å korrigeres for.

De ønskelige egenskapene for et ESR-dosimeter er oppsummert som følger:

- Doserrespons som er uavhengig av faktorer som strålekvalitet, doserate, bestrålingstemperatur, dosenivå og strålingsenergi.
- ESR-spektrum med få og smale linjer (ideelt sett kun en linje), uten nulldosesignal.
- Stabile radikaler under normale lagringsforhold over lengre tid.
- Høyt radikalutbytte og signal som ikke mettes ved høy mikrobølgeeffekt.
- Robuste dosimetre.
- Vevsekvivalent materiale (i klinisk sammenheng).

2.3 Alanin som ESR-dosimeter

Alanin er et godt dosimetermateriale ved intermediære og høye strålingsdoser, som oppfyller de fleste av de ønskelige egenskapene for et ESR-dosimeter (Regulla, et al., 1982). ESR-dosimetri med alanin er godkjent av IAEA som en sekundærstandard ved høye doser (10-15kGy) (Metha, et al., 2000). Alanin har et effektivt atomnummer nær vann ($Z = 6,78$ mot $Z = 7,51$ for vann), har høy presisjon og relativt stabile radikaler (Sleptchonok, et al., 2000). I tillegg viser alanin liten variasjon i doserespons med hensyn på strålingsenergi (Bergstrand, 2003; Bergstrand, et al., 2005), strålingstype, doserate (Kudoh, et al., 1997; Desrosiers, et al., 2008) og ytre faktorer som temperatur, luftfuktighet og lys (Ciesielski, et al., 2004). Ved doser i området få Gy og nedover har alanin et ikke-lineært bakgrunnssignal som varierer fra dosimeter til dosimeter. Dette gjør alanin lite egnet til bruk ved lave doser.

2.4 Litiumformat som ESR-dosimeter

Siden sensitiviteten til alanin er for lav til praktisk bruk i stråleterapi, hvor dosene ofte er nede i noen få gray, har det vært gjort mye forskning for å finne andre dosimetermaterialer med høyere sensitivitet, men som ellers har de andre positive egenskapene til alanin (Ikeya, et al., 2000; Lund, 2002). Det har vist seg at litiumformat (LiF_0 , $\text{HCO}_2\text{Li}\cdot\text{H}_2\text{O}$,) er et lovende dosimetermateriale (Vestad, 2003; Lund, et al., 2005). Det førstederiverte ESR-spekteret til LiF_0 er vist i Figur 2.2 sammen med det førstederiverte ESR-spekteret til alanin. Spektrene er i figuren skalert til samme størrelsesorden og reflekterer ikke samme dose. Sammenlignet med alanin er LiF_0 mer sensitiv med en faktor 6-7 (Vestad, 2003). LiF_0 har vist seg å gi presise doseestimat for doser over 200 mGy, og har en lineær doserespons i området cGy til kGy (Vestad, 2003). Det effektive atomnummeret til LiF_0 ligger nær vann, det vil si 7.31 for LiF_0 mot 7.51 for vann (Vestad, 2003). LiF_0 har liten avhengighet av strålingsenergi ved foton- og elektronstråling (Vestad, 2004; Malinen, 2007). Det er så langt funnet to radikaler i bestrålt LiF_0 (Vestad, et al., 2004).

Det foreligger varierende resultater for stabiliteten til de strålingsinduserte radikalene i LiFo. For eksempel observerte Vestad ingen tap av signalintensitet i løpet av 12 dager etter bestråling (Vestad, 2003), mens Komaguchi observerte et signaltap på 20 % i løpet av 8 dager (Lund, et al., 2005). Fetene undersøkte i sitt masterprosjekt stabiliteten til radikalene i LiFo med hensyn på luftfuktigheten dosimetrene var lagret i før og etter bestråling. Det ble her funnet at radikalene var betydelig mer stabile ved en luftfuktighet på 26 % og 35 %, enn ved lavere og høyere luftfuktigheter (Fetene, 2007). Med bakgrunn i en hypotese om at å bruke et hydrofobt materiale som bindemateriale kan beskytte strålingsinduserte radikaler mot luftfuktighet, er det blitt gjennomført et pilotprosjekt ved ESR-laboratoriet ved Universitetet i Oslo, hvor det ble sett på stabiliteten til radikaler i LiFo med parafin som bindemiddel over en periode på 44 dager. I prosjektet ble dosimetre bestående av LiFo og henholdsvis 0, 16 og 39 % parafin bestrålt med 6 MV, gitt en dose på 10 Gy og lagret ved 33 % luftfuktighet (Gjøvik, et al., 2007). Det ble funnet en betydelig økning i stabiliteten til radikalene hos dosimetre med parafin enn hos dosimetre uten parafin, og det ble i tillegg funnet å være dosimetre med lavest andel parafin som hadde de mest stabile radikalene (Gjøvik, et al., 2007). Dette masterprosjektet er en videreføring av dette pilotstudiet.

2.5 Oppgavens hensikt

Det ble i pilotprosjektet undersøkt stabiliteten til radikaler i LiFo med kun to forskjellige andeler parafin, og med kun ett sett parametre. I dette masterprosjektet er det vurdert hvorvidt tilsetning av parafin som bindemiddel kan virke stabiliserende på de strålingsinduserte radikalene ved flere forskjellige parametre. Parametrene som er variert er luftfuktighet ved lagring, strålekvalitet, dose og produksjonsmetode. I tillegg er det blitt gjort forsøk på å finne ut hvilken parafinandel som gir optimal stabilisering (dersom stabilisering finner sted), i tillegg til hvor langt ned i dose en kan utføre målinger med lav usikkerhet.

3. Teori

3.1 Ioniserende stråling

Ioniserende stråling er stråling som medfører at det dannes ioner i det materialet hvor strålingsenergien absorberes. (For enkelhets skyld blir ioniserende stråling heretter bare kalt stråling, og det er underforstått at den er ioniserende om ikke annet er spesifisert). For at en ionisering skal finne sted må energien til strålingen overgå energien som trengs for at et valenselektron skal unnsnippe et atom, som er i størrelsesorden 4 til 25 eV (Attix, 1986). Elektronet som løsrives kan slå løs elektroner fra andre atomer eller molekyler, eller fanges inn av disse etter at det har mistet nok energi. Dermed dannes både positive og negative ioner. ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) skiller mellom direkte ioniserende stråling og indirekte ioniserende stråling. Direkte stråling avgir energi til materialet det passerer direkte gjennom mange Coulomb-vekselvirkninger. Eksempler på direkte stråling er elektroner og positroner, tyngre ladde partikler (for eksempel protoner og alfa-partikler) og nøytroner fra kjernereaksjoner. Indirekte stråling overfører energi til ladde partikler (som regel elektroner) i materialet, og gjennomgår få vekselvirkninger hvor mye energi overføres hver gang. Elektronene vil så vekselvirke videre i materialet. Eksempler på indirekte stråling er elektromagnetisk stråling og nøytroner.

Av elektromagnetisk stråling er det primært γ -stråling og røntgenstråling som har høy nok energi til å være ioniserende. Siden både γ -stråling og røntgenstråling består av fotoner har de ved lik energi identiske egenskaper, og adskiller seg kun i hvordan de ble produsert. γ -stråling er enten stråling emittert fra atomkjerner i radioaktive kilder, eller stråling fra annihilasjon av et partikkel-antipartikkelpar. Røntgenstråling inkluderer karakteristisk stråling fra eksiterte atomer og bremsestråling fra akselererte elektroner.

3.2 Fotoners vekselvirkning i materiale

Fotoner som treffer et materiale vil enten vekselvirke med materialet, eller passere gjennom materialet uten å vekselvirke. Antall fotoner ved en gitt dybde x inne i materialet vil være gitt som $N=N_0e^{-\mu x}$ hvor N_0 er antall fotoner som treffer materialet (ved $x=0$). *Attenueringskoeffisienten* (μ) gir sannsynligheten for vekselvirkning per lengdeenhet, og er avhengig av energien til fotonene og atomnummeret til materialet. Ofte brukes *masseattenueringskoeffisienten* (μ/ρ), siden denne er uavhengig av tettheten til absorbatormaterialet. *Energioverføringskoeffisienten* ($\mu_{tr} = \mu \frac{\epsilon_{tr}}{h\nu}$) gir sannsynligheten for vekselvirkning per lengdeenhet multiplisert med andel energi overført til ladd partikkel. ϵ_{tr} er total energi overført fra fotoner til elektroner. I *energiabsorpsjonskoeffisienten* (μ_{en}) inkluderes at noe av energien overført til elektroner tapes i form av bremsestråling. Energiabsorpsjonskoeffisienten er gitt ved:

$$\mu_{en} = \mu_{tr}(1 - g)$$

hvor g er den andelen av kinetisk energi som tapes i form av bremsestråling (Dance, et al., 2007).

Fotoner kan avgi energi til et materiale gjennom forskjellige typer vekselvirkninger, hvor fotoelektrisk effekt, Comptonspredning og pardannelse er de viktigste vekselvirkningsprosessene. Ved fotoelektrisk effekt vekselvirker det innkomne fotonet med et elektron i indre skall. Hele fotonets energi går med til å løsrive elektronet. I tillegg vil elektroner i utenforliggende skall falle inn til den ledige posisjonen, samtidig som karakteristisk stråling sendes ut. μ/ρ for fotoelektrisk effekt er proporsjonal med det effektive atomnummeret i tredje potens (Z^3) og omvendt proporsjonal med energien til fotonstrålingen i tredje potens (E^3).

Ved Comptonspredning vekselvirker fotonet med et elektron i ytre skall som løsrives, samtidig som fotonet spres med en lavere energi. μ/ρ for Comptonspredning er uavhengig av materialets atomnummer, men øker ved økt elektrontetthet per gram i materialet. Ved pardannelse vekselvirker fotonet med feltet til atomkjernen hvor det blir absorbert. Dette gir opphav til et elektron og et positron, dersom fotonenergien er

på minst 1.022 MeV (samlet hvileenergi til positron og elektron). Positronet vil så vekselvirke med et tilfeldig elektron, og dermed dannes to fotoner med motsatt retning og energi lik 0,51 MeV. μ/ρ for pardannelse er proporsjonal med Z^2 og øker med økt fotonenergi. For gitt energi og materiale (med gitt effektivt atomnummer Z) er attenuasjonskoeffisienten μ , masseattenueringskoeffisienten μ/ρ og masse-energioverføringskoeffisienten μ_{tr} gitt som summen av koeffisienten for de individuelle vekselvirkningene:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

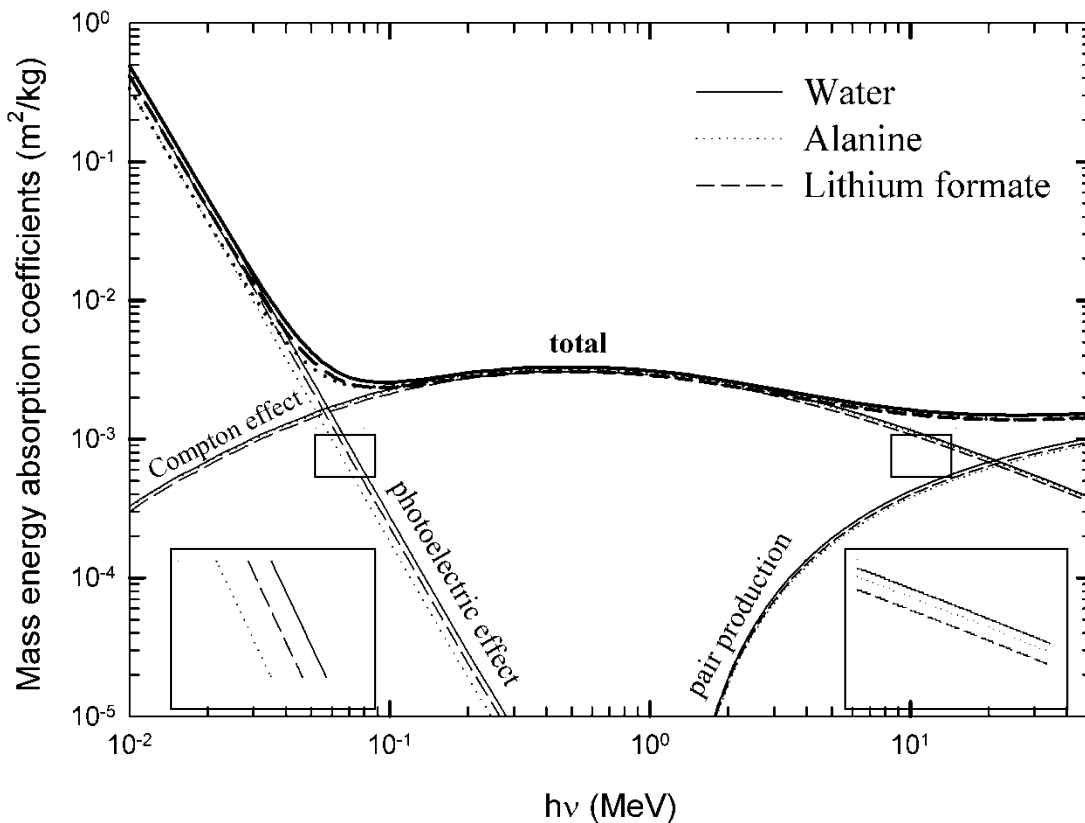
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_{tr}}{\rho} + \frac{\sigma_{tr}}{\rho} + \frac{\kappa_{tr}}{\rho}$$

hvor τ er bidraget fra fotoelektrisk effekt, σ er bidraget fra Comptonspredning og κ er bidraget fra pardannelse.

Masse-energioverføringskoeffisienten (μ_{tr}) for henholdsvis vann, alanin og LiFo er vist i Figur 3.1 som funksjon av fotonenergi i området 10 keV til 50 MeV. Figuren, og også informasjonen i dette avsnittet er hentet fra doktorgradsavhandlingen til Vestad (Vestad, 2005). De individuelle bidragene fra fotoelektrisk effekt, Compton og pardannelse er også vist i figuren. Det effektive atomnummeret for vann, alanin og LiFo er henholdsvis 7,51, 6,78 og 7,31. Siden fotoelektrisk effekt er sterkt knyttet til effektivt atomnummer er μ_{tr}/ρ for vann og LiFo svært like ved lave energier¹. Ved høyere energier overtar Comptonspredning som hovedbidragsyter til μ_{tr}/ρ . Siden Comptonspredning ikke er avhengig av Z , men til elektrontettheten i materialet, er alanin her nærmere vann enn LiFo da alanin har en elektrontetthet nærmere vann.

¹ Vev har et effektivt atomnummer enda nærmere LiFo enn hva vann har.



Figur 3.1: Masse-energioverføringskoeffisienten til vann, alanin og LiFo som funksjon av fotonenergi. Figuren er hentet fra doktorgradsavhandlingen til Vestad (Vestad, 2005), mens data som ligger til grunn for figuren er hentet fra Nowotny (Nowotny, 1998).

3.3 Beskrivelse av strålefelt og dosimetri

For å beskrive antall partikler per arealenheter, brukes i strålesammenheng fluens Φ .

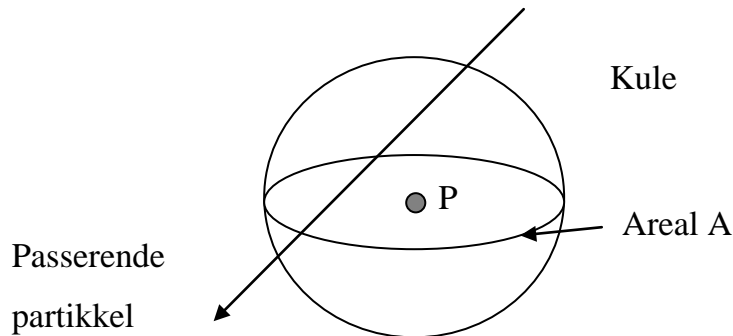
Denne er gitt ved

$$\Phi = \frac{dN}{dA}$$

hvor N er forventningsverdien til antall partikler som treffer en kule med areal dA omkring et punkt P , dersom kula reduseres til et infinitesimal rundt P (se Figur 3.2). Fluens oppgis som regel med benevnning m^{-2} eller cm^{-2} . Fluensen kan variere i tid, og det brukes da fluensraten gitt ved

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dN}{dA} \right)$$

For å beskrive hvor mye energi som treffer kula brukes energifluens som er gitt ved $\Psi = E\Phi$ for et felt med kun en energi til stede.



Figur 3.2: Beskrivelse av strålefeltet i et punkt P. Modifisert fra Attix (Attix, 1986).

Kerma er forventningsverdien til energi overført fra fotoner² til elektroner (ϵ_{tr}) per masseenheter i et volum:

$$K = \frac{d\epsilon_{tr}}{dm}$$

Kerma har benevnning gray (Gy=J/kg), og inkluderer all energi overført til sekundære elektroner uavhengig av hva elektronet benytter den mottatte energien til. De sekundære elektronene kan overføre den kinetiske energien videre på to måter: enten via Coulomb-vekselvirkninger med andre elektroner i absorbatormaterialet hvor energien går med til ionisasjoner og eksitasjoner i eller i nærheten av det sekundære elektronets bane. Alternativt kan de sekundære elektronene bremses ned på grunn av vekselvirkninger med Coulomb-feltet til en atomkjerne, og fotoner emitteres i form av bremsestråling. Fotonene har stor penetreringsevne sammenlignet med elektroner,

² Egentlig alle indirekte ioniserende partikler, det vil si at nøytroner er inkludert, men i praksis bare fotoner.

og energien blir derfor fraktet bort fra sekundærelektronets bane. Det er derfor vanlig å dele Kerma inn i henholdsvis kollisjonskerma K_c og strålingskerma K_r , hvor kollisjonskerma er gitt ved $K_c = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho}$

Absorbert dose i et hvilket som helst punkt P i et volum V er all energi (ϵ) overført fra stråling per masseenheter i volumet, i løpet av en tid t: $D = d\epsilon/dm$. Også absolutt dose har enheten gray, og kan approksimeres med K_c ved CPE (charged particle equilibrium).³

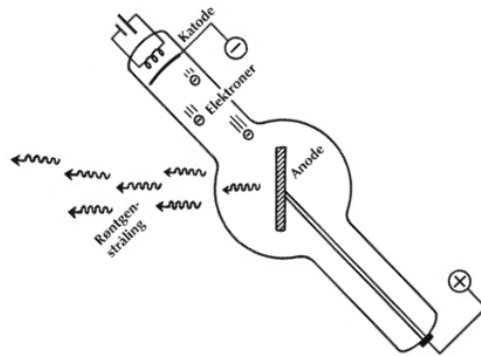
3.4 Røntgenstråling

For en mer utfyllende informasjon om røntgenapparater henvises det til Greener (Greener, 2007), mens for utfyllende informasjon om lineærakseleratoren henvises det til Loverock (Loverock, 2007). Røntgenstråling er en fellesbetegnelse for bremsestråling (og karakteristisk stråling) uavhengig av energinivå. Utrykket røntgenapparater blir normalt brukt om maskiner som genererer energier mellom 10kV og 400 kV (Greener, 2007), mens lineærakseleratoren produserer røntgenstråling i MV-området (Loverock, 2007).

Prinsippet for et røntgenrør er vist i Figur 3.2. Elektroner frigjøres fra et filament nær katoden, akselereres gjennom vakuumrøret og treffer anoden. Når elektronene bremses ned ved anoden genereres bremsestråling, med et kontinuerlig energispekter. Strålingen fra et røntgenrør inneholder dermed mye lavenergetisk stråling som har lav penetreringsevne. De lave energiene filtreres derfor bort for å forhindre skade på friskt vev i forkant av tumor i klinisk sammenheng, og for å forhindre inhomogen dosefordeling i dosimetrisammenheng. Ved lave energier er fotoelektrisk effekt dominerende, og siden masseattenueringskoeffisienten ved fotoelektrisk effekt er

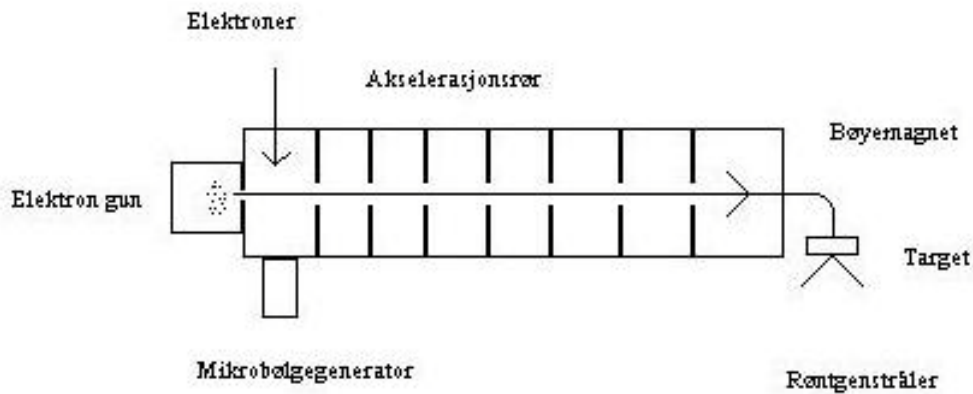
³ CPE er når hver ladde partikkel ved gitt energi som går inn i et volum erstattes med en identisk partikkel med samme energi.

proporsjonal med $(Z/E)^3$, vil filtre med høy Z (for eksempel aluminium) attenuere de lave energiene.



Figur 3.3: Skisse for et røntgenrør, hentet fra laborienteringen i faget FYS3180, ved gruppa Biofysikk og medisinsk fysikk, UiO, høsten 2007

Lineærakseleratoren, populært kalt en linac, er i dag et av de viktigste instrumentene innen stråleterapi. Med en linac kan man generere foton- og elektronstråling med energier i størrelsesorden MV. En skjematisk fremstilling av prinsippet for en linac innstilt til å bestråle med fotoner er vist i Figur 3.4. Elektroner fra en elektronkanon sendes inn i et akselerasjonsrør hvor et mikrobølgefelt akselererer elektronene opp til svært høye hastigheter. Ved utgangen av akselerasjonsrøret avbøyes elektronstrålen 270° for å oppnå en skarpere elektronfordeling, før elektronene går gjennom en spredefolie som øker feltstørrelsen. Elektronstråler brukes i behandling av tumorer ned til 70 mm dyp (Loverock, 2007), men for dypereleggende tumorer er fotonstråling et bedre alternativ. Elektronstrålen sendes da mot et target hvor høyenergetisk bremsstråling genereres.



Figur 3.4: Skjematisk diagram for en lineærakselerator. Modifisert fra (Mayles, et al., 2007).

3.5 ESR-teori

For utfyllende informasjon om ESR-spektroskopi henvises det til (Corvaja, 2009).

Magnetisk dipolmoment til et fritt elektron er gitt ved

$$\boldsymbol{\mu}_e = g|\mu_B|\mathbf{S}$$

hvor g er en faktor som for fritt elektron er gitt ved $g = 2,002319$, μ_B er Bohr magnetonet gitt ved $\mu_B = -|e|\hbar/2m_e = -9,27410^{-24} \text{ JT}^{-1}$ og \mathbf{S} er elektronets kvantemekaniske spinn. For elektroner bundet til molekyler vil g variere avhengig av omgivelsene til elektronet. Verdien til \mathbf{S} kan kun bestemmes i én retning, som i et kartesisk koordinatsystem ofte velges til å være z -retningen. Forventningsverdien m_s av S_z kan ha en av to verdier, $m_s = \pm 1/2$ (i enheter av Plancks konstant), hvor $m_s = 1/2$ betegnes som α -tilstanden og $m_s = -1/2$ betegnes som β -tilstanden. S_x og S_y har udefinerte verdier.

Dersom elektronet utsettes for et konstant magnetfelt \mathbf{B} vil fra en klassisk betraktning den magnetiske potensielle energien assosiert med elektronspinnnet være gitt ved

$$E = -\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{B}$$

Retningen til \mathbf{B} kan legges langs z -aksen. Siden elektronspinn er en kvantemekanisk størrelse må en benytte Hamiltonoperatoren

$$H = -\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{B} = g|\mu_B|\mathbf{S} \cdot \mathbf{B} = g|\mu_B|B_0S_z$$

E er gitt ved forventningsverdien til H :

$$E = \langle \xi | H | \xi \rangle$$

der ξ er spinntilstanden til elektronet, karakterisert med verdien

$$m_s = \langle \xi | S_z | \xi \rangle = \langle S_z \rangle = \pm 1/2$$

og uttrykket reduseres da til:

$$E = \pm \frac{1}{2} g|\mu_B|B_0$$

hvor B_0 er intensiteten til magnetfeltet. Elektronspinnenergien splittes altså i to nivåer når elektronet utsettes for et konstant magnetfelt, noe som kalles Zeemaneffekten. De to energinivåene er assosiert med α -tilstanden og β -tilstanden, hvor β -tilstanden er den som har lavest energi. Dersom elektromagnetisk stråling assosiert med et oscillerende magnetisk felt \mathbf{B}_1 settes loddrett på \mathbf{B}_0 , induseres overganger mellom tilstandene. Et elektron i β -tilstanden kan absorbere elektromagnetisk strålingsenergi dersom frekvensen (ν) til strålingen multiplisert med Plancks konstant sammenfaller med energiforskjellen mellom α - og β -tilstanden. Dette beskrives av resonansligningen som er gitt på formen:

$$h\nu = E_\alpha - E_\beta = g|\mu_B|B_0$$

Det kan også induseres overganger fra α -tilstanden til β -tilstanden ved at elektroner i α -tilstanden under innflytelse av det samme oscillerende magnetfeltet taper energi og emitterer stråling med frekvens gitt ved resonansligningen.

For elektroner plassert i et konstant magnetfelt \mathbf{B}_0 , med et oscillerende magnetfelt \mathbf{B}_1 til stede, vil det altså induseres overganger mellom α -tilstanden og β -tilstanden dersom resonansbetingelsen er oppfylt. Sannsynligheten for de induserte overgangene er lik i begge retninger, og stråling vil da både absorberes og emitteres med en

nettoeffekt som er avhengig av populasjonene i de to tilstandene. I et makroskopisk system, som i et bestrålt dosimeter, er det et stort antall elektroner til stede. Disse fordeler seg mellom α -tilstanden og β -tilstanden gitt ved Boltzmanns distribusjonslov:

$$\frac{N_\alpha}{N_\beta} = \exp\left(\frac{-g|\mu_B|B_0}{k_B T}\right) \approx 1 - \frac{g|\mu_B|B_0}{k_B T}$$

hvor k_B er Boltzmanns konstant og T er temperaturen til omgivelsene. Boltzmanns distribusjonslov gir ved romtemperatur og ved $B_0 \approx 340 \text{ mT}$ ⁴ et overskudd av elektroner i β -tilstanden i forhold til α -tilstanden på 10^{-4} . Denne populasjonsforskjellen opprettholdes på grunn av spontane overganger. Siden sannsynligheten for induerte overganger er like stor begge veier, vil det på grunn av populasjonsforskjellen oppstå en nettoabsorpsjon av mikrobølge-energi. Størrelsen til nettoabsorpsjonen er proporsjonal med antall radikaler til stede, noe som benyttes ved ESR-dosimetri. Antall primære strålingsinduserte radikaler i et dosimeter er proporsjonalt med energien absorbert av dosimeteret. Disse primærradikalene kan gjennomgå en rekke reaksjoner hvor de kan henfalle, men også ha overganger til sekundære radikaler. I noen stoffer vil sluttproduktet av reaksjonene være stabile radikaler som i likhet med primærradikalene også kan foreligge i en mengde som er proporsjonal med dosen. Disse stoffene kan da brukes som dosimetre. Størrelsen til absorpsjonssignalet er således proporsjonal med dosen gitt til dosimeteret. Av praktiske årsaker detekteres det førstederiverte absorpsjonssignalet, og ikke absorpsjonssignalet selv.

Resonansbetingelsene for at det skal kunne indueres overganger mellom tilstandene til et elektron er som sagt gitt ved $h\nu = E_\alpha - E_\beta = g|\mu_B|B_0$. Ved ESR-spektroskopi holdes ν konstant, samtidig som B_0 varieres over et valgt område. I det B_0 sveiper over verdien for resonans vil nettoabsorpsjon oppstå, og signalet vil da kunne

⁴ I denne oppgaven er det benyttet et såkalt X-bånd ESR-spektrometer som opererer ved om lag 340 mT og ved en sammenhørende frekvens ν i resonansligningen som typisk vil være cirka 9800 MHz. Denne er i mikrobølgeområdet.

detekteres. I resonansbetingelsene inngår g -faktoren, som avhenger av omgivelsene til elektronet. Dersom elektronet er knyttet til en kjerne med kjernespin I , vil elektronets spinn kunne vekselvirke med kjernespinnet. Dette kan føre til at absorpsjonslinjen splittes i flere linjer, og den totale signalintensiteten vil da fordele seg ut over linjene.

Som beskrevet tidligere er det ved likevekt en populasjonsforskjell mellom α - og β -tilstanden. Under resonansbetingelsene forstyrres denne likevekten ved at det induseres flere overganger fra β -tilstanden til α -tilstanden enn motsatt.

Populasjonsforskjellen vil likevel kunne opprettholdes på grunn av spontane overganger, som skyldes relaksasjonsprosesser. Relaksasjon skyldes to mekanismer. Spinn-gitter relaksasjon benevnes T_1 og er et mål for midlere levetid for et spinn i en tilstand. Dette er en mekanisme hvor det foreligger en energiutveksling mellom spinnsystemet og dets omgivelser ("gitter"). At spinnene har en endelig levetid i en gitt tilstand gjør at energiforskjellen til de to tilstandene har en bredde (på grunn av Heisenbergs uskarphetsrelasjon). Dette gjør at det ikke er én frekvens som gir resonans, men en bredde av frekvenser. Den andre relaksasjonsmekanismen kalles spinn-spinn relaksasjon, benevnes T_2 , og skyldes at magnetiske dipoler i omgivelsene til elektroner har et fluktuerende felt. For denne mekanismen foreligger det ingen energiutveksling mellom spinnsystemet og omgivelsene, men også denne relaksasjonsmekanismen bidrar til totale bredden av resonanslinjen.

3.6 ESR-parametre

For å få nøyaktige målinger fra et ESR-spektrum, må signal-til-støy-forholdet (S/N) være høyt. S/N er avhengig av flere parametre, blant annet opptakstid (t), båndbredde (BW), mikrobølgeeffekt (P) og modulasjonsamplitude (B_{mod}) (Höfer, 2009). S/N er i tillegg avhengig av antall radikaler i prøven, slik at man ved lave doser må stille strengere krav til parametrene. Båndbredden kontrolleres normalt med et lavpassfilter med tidskonstant τ , hvor $BW \propto 1/\tau$.

$$\frac{S}{N} \propto \sqrt{t} \times \sqrt{\tau} \times \sqrt{P} \times B_{mod}$$

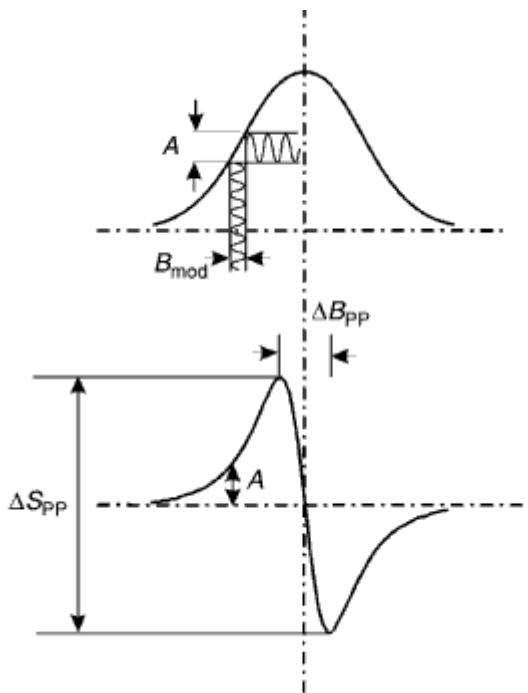
Dersom opptakstiden øker, akkumuleres signalamplituden som dermed øker lineært. Støyen i signalet er tilfeldig, og støyamplituden er derfor proporsjonal med \sqrt{t} . S/N vil dermed øke som \sqrt{t} . For å doble S/N må man altså øke opptakstiden med 4 ganger. Opptakstiden er naturlig nok begrenset av hvor lang tid man har til rådighet.

Høyfrekvent støy kan fjernes ved å la signalet passere et lavpassfilter, med en tidskonstant τ . En høy τ fjerner mye støy, men kan også deformere signalet. Ofte brukes tommelfingerregelen at τ skal være mindre enn 1/10 av tiden det tar for magnetfeltet å sveipe fra toppen til bunnen i et førstederivert signal (Hole, 2009).

Som nevnt tidligere kan absorpsjonssignalet avleses grunnet en populasjonsforskjell av spinn i α - og β -tilstanden, mens relaksasjonsprosesser opprettholder populasjonsforskjellen. Ved å øke mikrobølgeeffekten øker også antall overganger mellom tilstandene, noe som igjen øker signalintensiteten. Relaksasjonsprosessene blir derimot ikke påvirket av størrelsen på mikrobølgeeffekten. Dersom mikrobølgeeffekten økes for mye, vil relaksasjonsprosessene ikke lenger kunne opprettholde populasjonsforskjellen, og signalet vil dermed gå i metning.

For å redusere mengden lavfrekvent støy i det detekterte ESR-signalet brukes feltmodulasjon hvor et oscillerende magnetfelt med en fast amplitude B_{mod} overlages hovedmagnetfeltet B_0 (Weil, et al., 2007). Effekten til feltmoduleringen er vist i Figur 3.5. Det oscillerende magnetfeltet har en typisk frekvens på 100 kHz, og ligger parallelt med hovedmagnetfeltet. Dersom B_{mod} er liten i forhold til størrelsen på absorpsjonslinjen vil responsen være et oscillerende signal med amplitude A , hvor A avhenger av helningsgraden på absorbasjonskurven (Höfer, 2009). Det detekterte signalet er dermed den deriverte linjeformen av absorpsjonslinjen. Fordeler med feltmoduleringer er økt S/N og stabilisering av baselinjen (nullinjen) (Weil, et al., 2007). Dersom B_{mod} øker vil signalamplituden til det deriverte signalet øke lineært,

inntil det når et maksimum (Höfer, 2009). Ved økning av B_{mod} utover dette vil signalintensiteten synke og signalet kan forvrenges.



Figur 3.5: Skisse over prinsippet for feltmodulering. Den førstederiverte linjen har en peak-to-peak-amplitude (ΔS_{pp}) og en linjebredde (ΔB_{pp}) Modifisert fra (Höfer, 2009).

4. Metode

4.1 Dosimeterproduksjon

Dosimetre bestående av varierende andeler polykrystallisk litiumformat monohydrat, 98% (LiFo) og parafinvoks ble produsert. Begge stoffene ble kjøpt fra Aldrich Chemical Company, Inc. Parafinvoksen kom i form av flak, og hadde smeltetemperatur på minimum 65 °C. Stoffene ble veid opp med en Mettler Toledo AG245 vekt, med måleusikkerhet $\pm 0,1$ mg.

Ulike former for for-preparering av LiFo og parafin ble utprøvd i et forprosjekt for å sikre mest mulig homogene dosimetre. Det ble prøvd ut metoder som å blande stoffene ved hjelp av en mekanisk mikser, ved å smelte parafinen før LiFo ble blandet inn, ved hjelp av en morter ved romtemperatur og ved hjelp av en morter når stoffene var nedkjølt med $N_2(lq)$. Da nedkjøling med $N_2(lq)$ tilsynelatende resulterte i meget finkornete partikler av både LiFo og parafin, ble denne metoden valgt. Det ble også produsert dosimetre hvor kun ett eller ingen av stoffene ble nedkjølt med $N_2(lq)$, men ellers laget med samme fremgangsmåte.

De pulveriserte stoffene ble blandet sammen i en beholder med lokk, ved at beholderen ble kontinuerlig snudd i to minutter. Dosimetre ble deretter presset i en manuell Weber-presse ved en kraft på 10kN i ett minutt, til sylindriske tabletter med en diameter på 5 mm og en typisk masse på 100 mg \pm 15 mg. Samtlige dosimetre ble veid både rett etter bestråling og etter siste måling, og ingen av dosimetrene hadde masseendring større enn vektpresisjonen (0,1 mg). Til sammen ble cirka 200 dosimetre laget, mens rundt 150 av disse ble brukt i eksperimentene.

For å enklere kunne henviser til dem, er dosimetrene nummerert i serier hvor nummeret på serien henviser til nummeret på delkapittelet i kapittel 5, hvor resultatene fra de forskjellige seriene er vist. Informasjon om LiFo- og parafinandeler til dosimetre benyttet i de forskjellige seriene er gitt i Tabell 4.2.

Tabellen gir også en oversikt over andre parametre som er brukt for forskjellige serier. Parametre som varierer innad i en serie er uthevet. Under kolonnen "N₂(lq)" er det oppført om dosimetrene er laget av stoffer som er preparert under nedkjøling med N₂(lq) eller ikke, med indikasjonen "ja" eller "nei". Stort sett er både LiFo og parafin preparert med N₂(lq), og det står i disse tilfellene ett "ja" som gjelder for begge stoffene. I serie 5 og 6 er det imidlertid tilfeller hvor LiFo og parafin er preparert på forskjellige måter. Disse seriene har derfor fått notasjonen "Ja/Nei", hvor indikasjonen foran skråstreken henviser til om LiFo er preparert med N₂(lq), mens indikasjonen etter skråstreken henviser til prepareringen til parafin.

4.2 Oppbevaring av dosimetre

Dosimetrene ble oppbevart i eksikatorer både før og etter bestråling. En nærmere beskrivelse av oppbevaringsmetoden kan finnes i masteroppgaven til Fetene (Fetene, 2007). I en eksikator kan luftfuktigheten holdes konstant på et ønsket nivå ved hjelp av salter som reagerer lite på temperaturen i rommet. MgCl holder luftfuktigheten i en lukket eksikator på cirka 33 % ved romtemperatur, mens NaBr holder luftfuktigheten på cirka 57 % (Rockland, 1960). Det ble tatt jevnlig målinger av luftfuktighetene, og disse viste en luftfuktighet på henholdsvis 34 % og 61 % i snitt i de to eksikatorene. De fleste dosimetre ble oppbevart ved 34 % luftfuktighet, mens noen ble oppbevart ved 61 % luftfuktighet. Dosimetrene er oppbevart ved romtemperatur og rombelysning (ikke i direkte sollys).

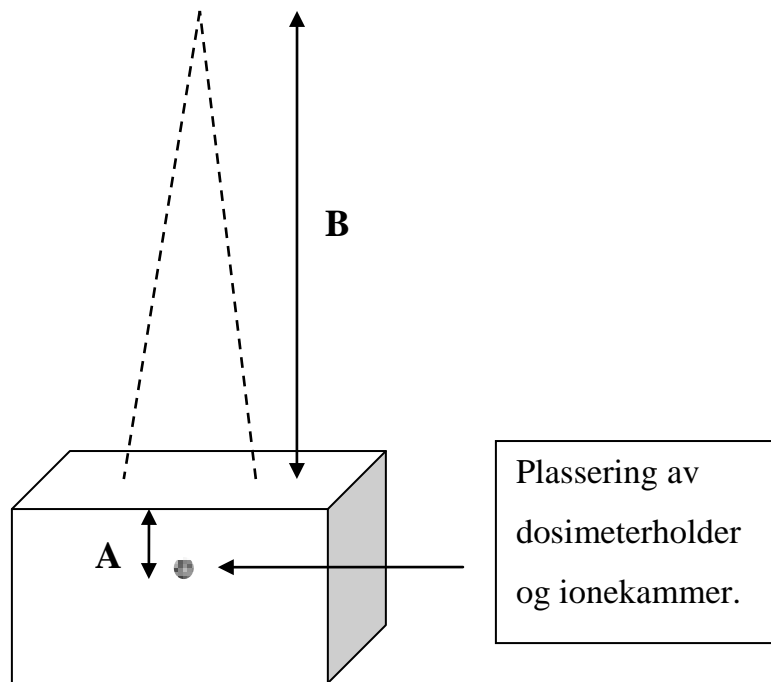
4.3 Bestråling

Dosimetrene fra serie 1, 2 og 3 (se Tabell 4.2) ble bestrålt ved romtemperatur med en lineærakselerator av typen Siemens Artistè, ved Radiumhospitalet⁵. Det ble brukt et bestrålingsoppsett som vist i Figur 4.1, hvor dosimetrene ble bestrålt i 10 cm dyp i et

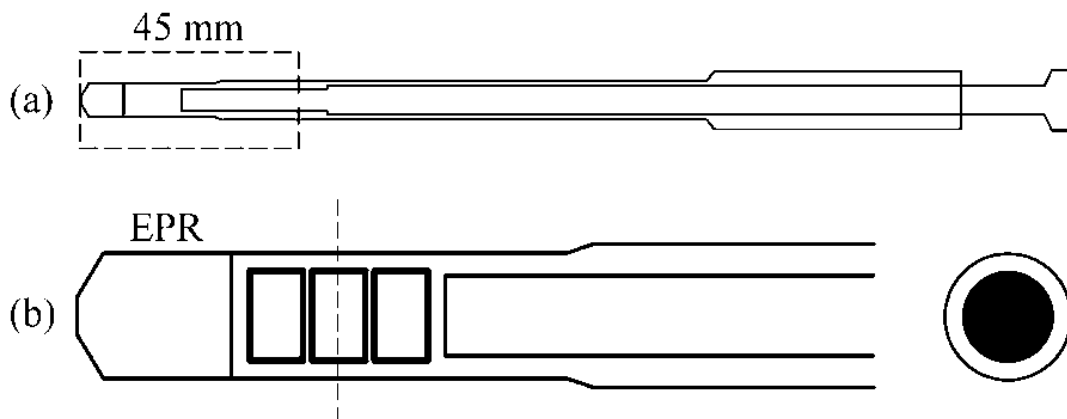
⁵ Under veiledning av Einar Waldeland

standard kalibreringsvannfantom. Vannfantomet har ved denne dybden et hulrom som sikrer identisk plassering mellom bestrålingene. Før bestråling ble et sylindrisk Farmer-ionekammer brukt til kalibrering av oppsettet, hvor ionekammeret var plassert i hulrommet til vannfantomet. Fire parallelle dosimetre ble bestrålt samtidig, og det ble da brukt en dosimeterholder av polymethylmethacrylate (PMMA) som vist i Figur 4.2. Dosimetrene ble bestrålt med 15MV fotonstråling og gitt doser på 1Gy, 10 Gy og 100 Gy for henholdsvis serie 1, 2 og 3.

Dosimetrene fra serie 4 og 7 ble bestrålt ved romtemperatur med en lineærakselerator av typen Electa Synergy Platform, også denne ved Radiumhospitalet. Oppsett var det samme som ved bestrålingen av serie 1, 2 og 3 (Figur 4.1), og ble også kalibrert med et sylindrisk Farmer-ionekammer. Ved serie 4 og 7 ble det brukt 6 MV fotonstråling. I serie 4 ble fire parallelle dosimetre bestrålt samtidig, og alle dosimetrene fikk en dose på 10 Gy. Serie 7 bestod av 24 dosimetre, hvor tre parallelle dosimetre ble bestrålt samtidig. Det ble gitt totalt 8 forskjellige doser: 1- 0,5- 0,1- 0,08- 0,06- 0,045- 0,03 og 0,01 Gy.

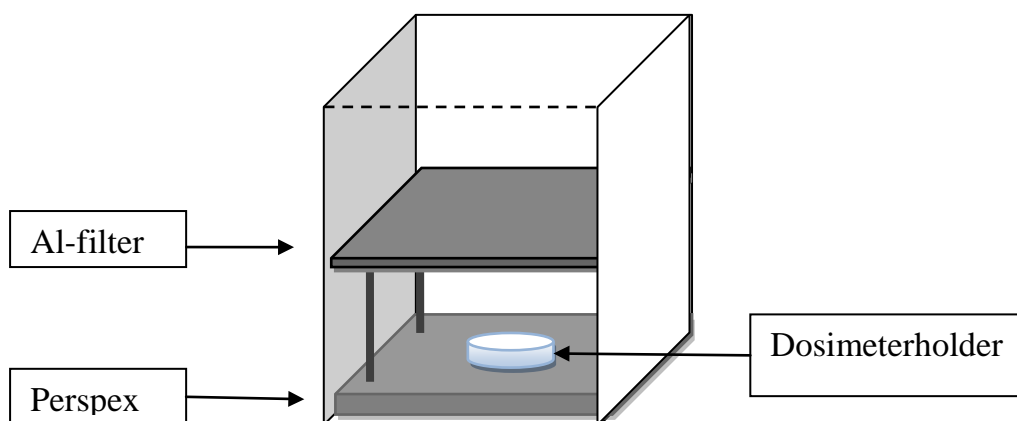


Figur 4.1: Bestrålingsoppsett for dosimetre bestrålt med lineærakselerator. Dosimetrene ble bestrålt i 10 cm dyp (markert som A) i et vannfat, med en kilde-overflateavstand (markert som B) på 90 cm.



Figur 4.2: Dosimeterholder av polymethylmethacrylate (PMMA) brukt ved bestråling med lineærakselerator. (a) Hele dosimeterholderen. (b) Utheving av den stiplede delen i a, viser delen hvor dosimetre er plassert. Figur modifisert fra (Vestad, 2004).

Dosimetrene i serie 5 og 6 (se Tabell 4.2) ble bestrålt ved romtemperatur med et Philips PW 2188/00 røntgenrør med en singel anode av krom. Bestrålingsoppsettet er vist i Figur 4.3. Dosimetrene innenfor en måleserie ble bestrålt samtidig. Disse ble sentrert i en petriskål, innenfor et område med cirka 4 cm utstrekning i bunnen av et bestrålingskammer. Strålefeltet var oppgitt til å være homogent innenfor et område på 10 cm, og det kunne derfor forventes at samtlige dosimetre innenfor en måleserie fikk samme dose. Det ble brukt et oppsett med 20 mm perspex under dosimetrene og et 1,5 mm aluminiumsfilter. Bestrålingen ble foretatt med 60 kV spenning, 10 mA strømstyrke og varte i cirka 15 minutter. Det er tidligere bestemt ved alanindosimetri at dette oppsettet og parametre gir en doserate på 0,69 Gy/min, og dosimetrene fikk dermed en dose på cirka 10 Gy⁶.



Figur 4.3: Bestrålingsoppsett for dosimetre bestrålt med 60 kV røntgenstråling. Røntgenrøret (ikke vist her) er montert til høyre i figuren, med strålingsvinduet plassert inne i kassen, pekende nedover mot dosimetrene.

⁶ Innstillingene på røntgenapparatet er manuelle, både spenningen og strømstyrken vises manuelt opp fra null til gitt verdi (og tilbake igjen når røntgenapparatet skrues av). Den eksakte dosen har derfor stor unøyaktighet.

4.4 ESR-spektroskopi

Målingene ble utført med et Bruker Eleksys E 500 X-bånd spektrometer ved romtemperatur. Det ble brukt en standard rektangulær kavitet TE_{102} , med en referanseprøve av mangan (Mn^{2+}). For å sikre best mulig reproducerbare forhold ble referanseprøven satt i toppen av en teflonpropp, som så ble montert fast i bunnen av kaviteten. Et kort glassrør ble så plassert over teflonproppen slik at et dosimeter plassert rett over glassrøret ville ha optimal plassering i magnetfeltet. Ved avlesning av dosimetrene ble disse ført inn i et kvartsrør, som så ble senket ned i kaviteten og plassert over glassrøret. Ved avlesning av dosimetrene ble det alltid sørget for at dosimetrene vendte samme side ”opp” ved hver måling. Det ble derimot ikke tatt hensyn til dosimeterets orientering om symmetriaksen, og det ble heller ikke tatt hensyn til kvartsrørets orientering om symmetriaksen. Kaviteten hang fast i spektrometeret de to første månedene med målinger, og forholdene kan i denne perioden forventes å være helt like. I den resterende måletiden ble kaviteten tatt ut etter hver måledag og ble oppbevart i et lukket skap. Dette kan ha introdusert små variasjoner i kavitets plassering,

For å redusere drift ble spektrometeret alltid påslått og satt i ”operate” minimum to timer før første måling av dosimetrene. Målerrekkefølgen til typene av dosimetre ble randomisert mellom hver måledag, mens identiske dosimetre alltid ble målt i samme rekkefølge. Målingene ble utført over en periode på 191 dager, 155 dager og 135 dager, for henholdsvis dosimetre bestrålt med 15 MV, 6 MV og 60 kV. Nærmere detaljer for hvilke dosimetre dette innebærer er gitt i Tabell 4.2.

Spektrometerparametre brukt i eksperimentene er gitt i Tabell 4.1 og er de samme for alle eksperiment hvor dosimetre er gitt 10 Gy. For dosimetre gitt 1 Gy og 100 Gy er forsterkningen blitt tilpasset slik at skaleringen til signalet er størst mulig uten at det går i metning. Dosimetrene gitt 1 Gy ble i tillegg målt med en større tidskonstant og opptakstid for å forbedre signal/støy forholdet. I enkelte tilfeller ble det tatt opp 2 scan av dosimetre med 1 Gy, og den avleste signalintensiteten ble i disse tilfellene halvert ved plotting av resultatene.

Tabell 4.1: ESR-parametre benyttet for dosimetre bestrålt med henholdsvis 1, 10 og 100 Gy. De fleste parametrene er like for de tre dosene, med unntak av forsterkning som varierer mellom dosene og tidskonstanten og opptakstiden som er høyere ved doser på 1 Gy. Det er i tillegg blitt tatt opp 2 scan i tilfeller med mye støy hos enkelte dosimetre med en dose på 1 Gy.

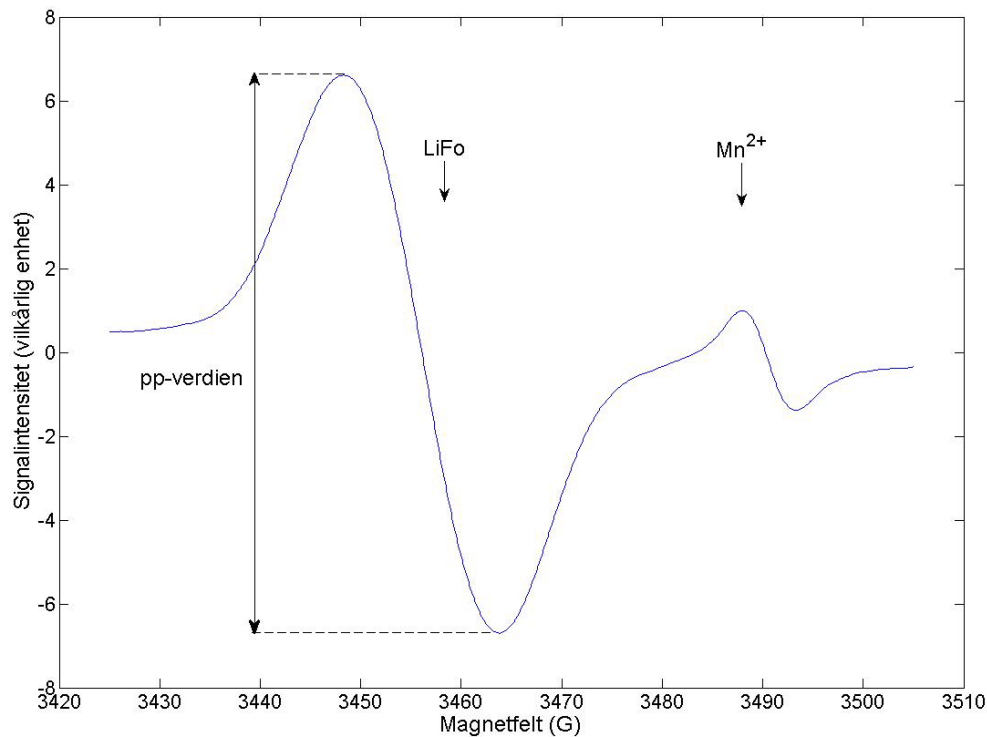
	1 Gy	10 Gy	100 Gy
Mikrobølgeeffekt (mW)	12,57	12,57	12,57
Modulasjonsamplitude (G)	6	6	6
Forsterkning (dB)	96	83	60
Opptakstid (s)	167,77	83,89	83,89
Tidskonstant (ms)	2621,44	1310,72	1310,72
Opptaksbredde (G)	80	80	80
Antall scan	1-2	1	1

I eksperimentet hvor det ble forsøkt å finne den lavest detekterbare dosen ble det tatt utgangspunkt i parametrene brukt ved 1 Gy. Parametrene ble deretter variert i ulik grad for å optimalisere signal/støy forholdet. Spesielt er modulasjonsamplituden blitt variert i området 6 G til 12 G og mikrobølgeeffekten er variert i område 12,57 mW til 20 mW. Også tidskonstanten og antall scan ble variert, med en øvre grense for opptakstiden på 5 minutt.

4.5 Avlesning av spekter og bearbeidelse av data

Et typisk førstederivert spekter fra et LiFo-dosimeter gitt en dose på 10 Gy med parametre fra Tabell 4.1, er vist i Figur 4.4. Ved ESR-dosimetri er det dobbeltintegralet av absorpsjonskurva til et dosimeter som er proporsjonal med dosen. I praksis brukes svært ofte peak-to-peak-verdier (pp-verdier) til de mest intense linjene til dosebestemmelse da også denne ofte er proporsjonal med dosen. pp-verdier er lettere å måle og man unngår eller reduserer integrasjonsproblemer relatert til bakgrunnssignalet til dosimeteret (Sagstuen, 2009). Med uttrykket signalintensitet er det derfor i denne oppgaven pp-verdien til LiFo-signalet det er snakk om, slik som vist i Figur 4.4. For å finne pp-verdien til spektrene ble programmet XEprview brukt, hvor pp-verdien ble avlest ved hjelp av en Gausskurve

til å tilpasse linjeformen. Alle data ble deretter matet inn i Matlab, hvor radikalstabiliteten og radikalutbyttet til dosimetrene og usikkerhetsestimater ble beregnet.



Figur 4.4: Førstederivert ESR-spektrum fra et LiFo-dosimeter gitt en dose på 10 Gy med instrument-parametre fra Tabell 4.1. Linjen fra LiFo er vist til venstre, mens en av linjene fra referansesignalet (Mn^{2+}) er vist til høyere.

Radikalstabilitet illustrerer hvordan signalintensiteten til et dosimeter varierer som funksjon av antall dager etter bestråling, og er, om ikke annet er oppgitt, normert med signalintensiteten dosimeteret hadde samme dag som den ble bestrålt. I hver serie er det enten tre eller fire identiske dosimetre for hver type dosimeter. Figurene i resultat og analyse kapitlet viser i hvert punkt den gjennomsnittlige signalintensiteten til de identiske dosimetrene, i tillegg til spredningen til dosimetrene. Punktverdien er altså beregnet som følger:

$$\text{Punktverdi} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \frac{SI_{i,k}}{SI_{i=0,k}}$$

hvor n er antall identiske dosimetre, k refererer til dosimeternummer, i er en gitt dag etter bestråling, og $SI_{i=0}$ er signalintensiteten samme dag som bestråling.

Radikalstabiliteten er dermed gitt som funksjonen av punktverdier med hensyn på antall dager etter bestråling: Radikalstabilitet = punktverdi(i).

I appendiks A er radikalstabiliteten for hvert enkelt dosimeter vist, og signalintensiteten i hvert punkt er derfor kun normert med signalintensiteten samme dag som bestråling: Punktverdi = $SI_i/SI_{i=0}$.

Radikalutbytte brukes om signalintensiteten til et dosimeter ved en gitt måledag (som regel samme dag som bestråling), per masse LiFo dosimeteret inneholder. Figurene viser et gjennomsnitt av de identiske dosimetrene. For å lettere kunne sammenligne radikalutbyttet til de forskjellige typene dosimetre er radikalutbytte til samtlige dosimetre normert med det gjennomsnittlige radikalutbyttet til dosimetrene av LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin⁷. Radikalutbytte er altså definert som:

$$\text{Radikalutbytte} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \frac{SI_{j,k}}{R \times m_j}$$

hvor j er en gitt måledag og R er gjennomsnittlig radikalutbytte til dosimetrene av LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin.

I samtlige figurer er usikkerheten gitt som spredningen til identiske dosimetre. Det ble også foretatt tre typer usikkerhetsmålinger hvor det ble sett på følgende:

- Rotasjonsavhengighet til dosimetrene selv.
- Rotasjonsavhengighet til kvartsrøret
- Usikkerheter knyttet til målingene selv. Fire tilfeldige dosimetre (av forskjellige typer) ble her avlest fem ganger, hvorpå dosimetrene ble ført ut og inn av kvartsrøret mellom hver avlesning.

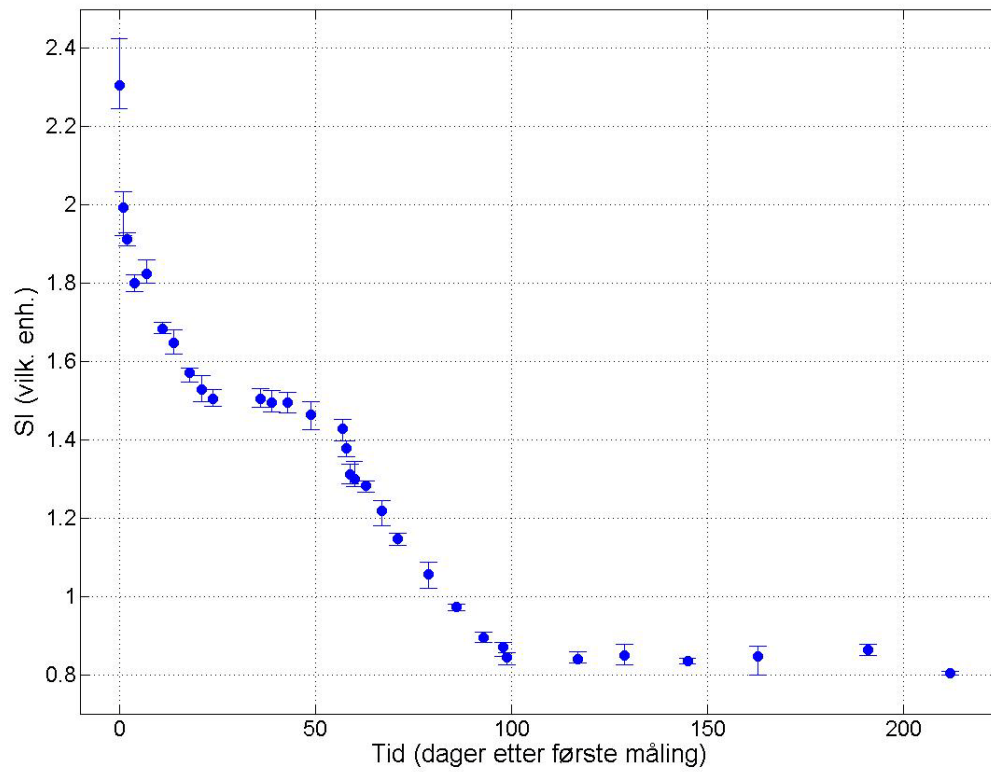
⁷ Dosimetrene av LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin er den ene av de to typene dosimetre som går igjen i alle serier.

4.6 Referansesignalet

En fastmontert referanseprøve av mangan (Mn^{2+}) ble brukt, hvor signalintensiteten til den fjerde linjen i Mn^{2+} -spekteret ble målt og avlest. I Figur 4.5 er signalintensiteten til Mn^{2+} ved parametre brukt for dosimetre gitt 10 Gy, vist som funksjon av tid etter første måledag (for serie 1, 2 og 3). I løpet av måleperioden synker referansesignalet mye, og følger i tillegg ikke et enkelt forløp som en lett kan korrigere for. Dette kan komme av at referanseprøven ved montering i kaviteten ble satt inn feil vei.

Referanseprøven bestod av et tynt rør med Mn^{2+} , hvor Mn^{2+} ikke fylte hele røret. Dersom referanseprøven altså har blitt satt inn ”opp-ned”, har Mn^{2+} hatt mulighet for å sige nedover i røret, og dermed bort fra sentrum av kaviteten, i løpet av måleperioden. Dette stemmer overens med at SI for Mn^{2+} synker i løpet av måletiden, og dosimetrene har derfor ikke kunnet korrigeres med referansesignalet.

Etter de 100 første dagene ser referansesignalet ut til å variere lite, muligens som følger av at det meste av Mn^{2+} har samlet seg i bunnen av glassrøret ved denne tiden. Referansesignalet har dermed kunnet bli brukt til å detektere eventuelle måledager med unormale forhold i spektrometeret i løpet av måledagene etter dag 100. De unormale forholdene kan enten være fravær av at referansen synker når dosimetrene brått synker, eller økning i signalintensitet hos referanse/dosimetre. Bortsett fra første måledag er spredningen i referansesignalet innad i hver dag svært liten, noe som tyder på at spektrometeret oppfører seg relativt stabilt i løpet av en måledag. Tidligere forsøk har også vist at ESR-dosimetri med LiFo gir høy presisjon i målinger også uten referanse (Malinen, 2007; Vestad, 2004).



Figur 4.5: Signalintensiteten fra referanseprøven som funksjon av tid. Punktet for dag 0 representerer dag 0 for serie 1, 2 og 3, dag 57 for serie 4 og dag 78 for serie 5 og 6. ESR-parametrene er de samme som for dosimetre gitt 10 Gy. Hvert punkt er et gjennomsnitt av fem målinger i tillegg til spredningen i målingene.

4.7 Oversikt over dosimetre

Tabell 4.2: Oversikt over dosimetre og parametre brukt i oppgaven. For å enklere kunne henviser til dem er dosimetrene nummerert i serier, hvor nummeret på serien henviser til nummeret på delkapittelet hvor resultatet for serien er vist i kapittel 5. Parametre som varierer innad i en serie er uthevet. Forklaring til tabellen er beksrevet i slutten av delkapittel 4.1.

Serie	Strålekvalitet	N ₂ (lq)	Dose(Gy)	LiFo/parafin	Luftfuktighet(%)
1	15 MV	Ja	1	100/0	34
1	15 MV	Ja	1	95/5	34
1	15 MV	Ja	1	90/10	34
1	15 MV	Ja	1	85/15	34
1	15 MV	Ja	1	80/20	34
2	15 MV	Ja	10	100/0	34
2	15 MV	Ja	10	95/5	34
2	15 MV	Ja	10	90/10	34
2	15 MV	Ja	10	85/15	34
2	15 MV	Ja	10	80/20	34
3	15 MV	Ja	100	100/0	34
3	15 MV	Ja	100	95/5	34
3	15 MV	Ja	100	90/10	34
3	15 MV	Ja	100	85/15	34
3	15 MV	Ja	100	80/20	34
4	6 MV	Ja	10	100/0	61
4	6 MV	Ja	10	80/20	61
4	6 MV	Nei	10	100/0	61
5	60 kV	Ja	10	100/0	34
5	60 kV	Ja/Ja	10	80/20	34
5	60 kV	Ja/Nei	10	80/20	34
5	60 kV	Nei	10	100/0	34
5	60 kV	Nei/Ja	10	80/20	34
5	60 kV	Nei/Nei	10	80/20	34
6	60 kV	Ja	10	100/0	61
6	60 kV	Ja/Ja	10	80/20	61
6	60 kV	Ja/Nei	10	80/20	61
6	60 kV	Nei	10	100/0	61
6	60 kV	Nei/Ja	10	80/20	61
6	60 kV	Nei/Nei	10	80/20	61
7	6 MV	Ja	1	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,5	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,1	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,08	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,06	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,045	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,03	100/0	34
7	6 MV	Ja	0,01	100/0	34

5. Resultat og analyse

I denne masteroppgaven er stabiliteten til strålingsinduserte radikaler i LiFo med hensyn på flere variable parametre blitt undersøkt. De variable parametrene er:

- Bindemiddelmengde: Dosimetrene i serie 1, 2 og 3 ble produsert av LiFo og henholdsvis 0, 5, 10, 15 og 20 % parafin.
- Dose: I de fleste måleseriene er dosimetre blitt gitt en dose på 10 Gy, med unntakene av serie 1, hvor dosimetrene ble gitt en dose på 1 Gy, og serie 3 hvor dosimetrene ble gitt en dose på 100 Gy. I tillegg er dosimetre i serie 7 gitt 8 forskjellige doser på 1 Gy og nedover.
- Produksjonsmetode: Samtlige dosimetre i serie 1, 2, 3 og 7 er produsert av LiFo og parafin hvor begge stoffer er preparert med nedkjøling med $N_2(lq)$. I serie 4, 5 og 6 er dosimetrene produsert av LiFo og parafin preparert både med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$.
- Strålekvalitet: Dosimetre i serie 1, 2 og 3 ble bestrålt med 15 MV fotoner, dosimetrene i serie 4 ble bestrålt med 6 MV fotoner og dosimetrene ble bestrålt med 60 kV fotoner.
- Luftfuktighet ved lagring: Dosimetrene i serie 1, 2, 3, 5 og 7 ble lagret ved 34 %, mens dosimetrene i serie 4 og 6 ble lagret ved 61 % luftfuktighet.

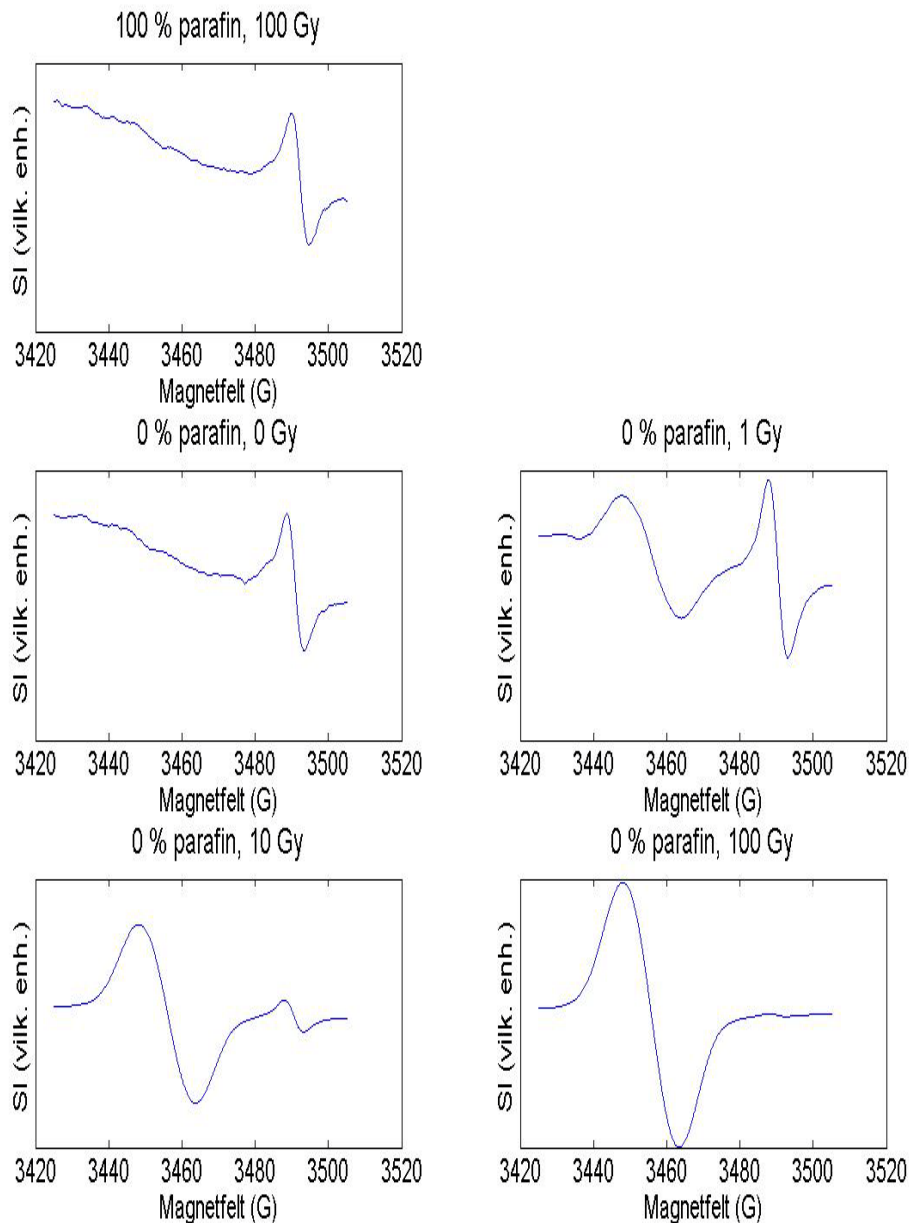
Samtlige dosimetre er lagret i romtemperatur, ved typiske temperaturer på cirka 23 - 25 °C med unntak av en periode i juni/juli hvor temperaturene lå på over 30 °C.

Oversikt over dosimetrene og de forskjellige parametrene som er brukt i forskjellige serier er vist i Tabell 4.2. Seriene er nummerert og henviser til nummeret til delkapittelet hvor resultatene er presentert i dette kapittelet.

Typiske spektre for dosimetre av ren LiFo (0 % parafin) gitt en dose på henholdsvis 0 (det vil si ubestrålt), 1, 10 og 100 Gy, i tillegg til dosimetre av 100 % parafin gitt en dose på 100 Gy, er vist i Figur 5.1. Instrumentelle parametrene brukt for dosimetrene gitt 0 Gy og 1 Gy, i tillegg til dosimetrene av ren parafin, er de samme, mens det er

brukt andre parametre for dosimetre gitt 10 Gy og 100 Gy (se Tabell 4.1).

Signalintensiteten kan dermed ikke sammenlignes direkte og størrelsesangivelsen på y-aksen er derfor fjernet for å unngå forvirring. I hvert spekter er signalet til LiFo vist til venstre, mens signalet til høyre er signalet fra referanseprøven (Mn^{2+}).



Figur 5.1: Typiske førstederiverte ESR-spektre fra LiFo-dosimetre gitt en dose på henholdsvis 0, 1, 10 og 100 Gy. ESR-parametrene er gitt i Tabell 4.1. Lavfeltlinjen (cirka 3459 G) er assosiert til LiFo, høvfeltlinjen (cirka 3490 G) er assosiert til Mn^{2+} . (Mikrobølgefrequens $\nu=9,67$)

Som vist i Figur 5.1 ble det ved avlesning av de bestrålte parafindosimetre (dosimetre uten LiFo) ikke observert andre signaler enn fra Mn^{2+} . Også ved avlesning av de ubestrålte dosimetrene ble det ikke observert noen signal. Det kan dermed forventes at det observerte signalet fra LiFo-dosimetrene med og uten parafin kommer fra strålingsinduserte radikaler i LiFo alene.

Usikkerhetene i figurene i dette kapittelet er gitt som spredning i signalintensiteten (SI) fra parallelle ("identiske") dosimetre. I de fleste tilfellene er det brukt 4 parallelle dosimetre, mens det i enkelte tilfeller er brukt 3 parallelle dosimetre. Dette kan enten være for dosimetertyper hvor det opprinnelig er 4 parallelle dosimetre, men at det i figuren hvor hvert enkelt dosimeter er vist ble observert at 1 av de 4 parallelle dosimetrene skilte seg betraktelig fra de andre 3. Det er i disse tilfellene valgt å fjerne dosimeteret i figuren hvor gjennomsnitt og spredning til dosimetertyper er vist. I appendiks A hvor radikalstabiliteten til hvert enkelt dosimeter vist, er alle 4 dosimetre tatt med i alle tilfeller. Det andre tilfelle hvor det kun er vist spredning fra 3 parallelle dosimetre er i serie 7. Forsøket i serie 7 ble gjennomført svært sent i masterprosjektet, og på grunn av tidsbegrensninger ble det valgt å bruke kun 3 parallelle dosimetre.

I dette kapittelet er usikkerheten som sagt gitt som spredning til parallelle dosimetre. Det ble i tillegg foretatt usikkerhetsmålinger hvor det ble sett på følgende:

- Rotasjonsavhengighet til dosimetrene selv.
- Rotasjonsavhengighet til kvartsrøret
- Usikkerheter knyttet til målingene selv. Fire tilfeldige dosimetre (av forskjellige typer) ble her avlest fem ganger, hvorpå dosimetrene ble ført ut og inn av kvartsrøret mellom hver avlesning.

Alle målingene ble foretatt både for rene LiFo-dosimetre, og for dosimetre som inneholdt parafin. I tillegg ble de utført for både dosimetre bestrålt med 1 og 10 Gy. Spredningene i målingene hvor samme dosimeter ble målt fem ganger var i alle tilfellene svært små, og alltid godt innenfor spredningen til de respektive dosimetertypene. Det ble ikke observert noen form for rotasjonsavhengighet, da

spredningen i rotasjonsmålingene i alle tilfellene var mindre enn spredningen observert i målingene hvor samme dosimeter ble tatt ut og inn av ESR-apparatet.

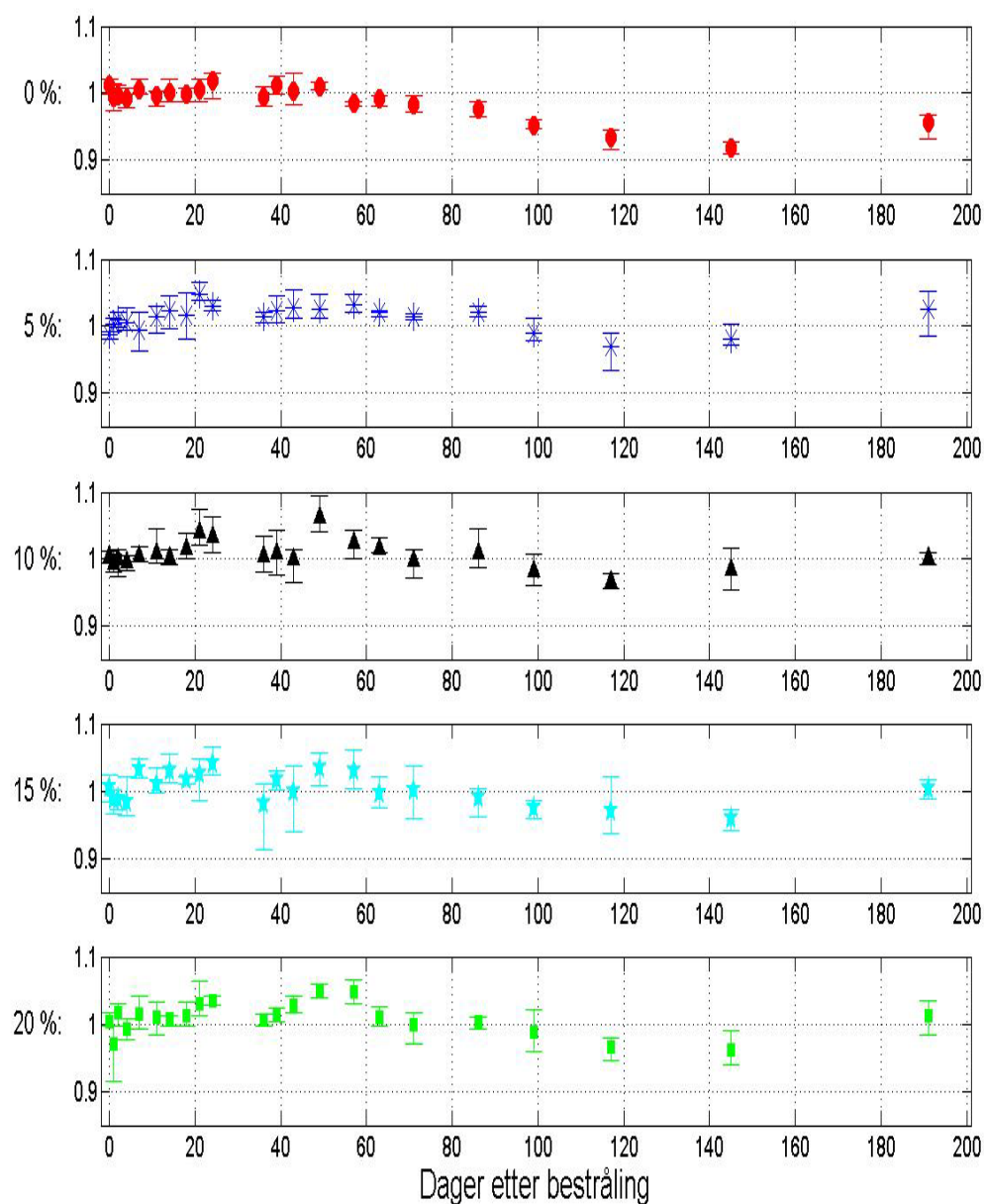
5.1 Serie 1: 1 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

Figur 5.2 viser radikalstabiliteten til dosimetre med henholdsvis 0, 5, 10, 15 og 20 % parafin, over en måleperiode på 191 dager. Dag 0 i figuren tilsvarer også dag 0 for referanseprøven i Figur 4.5. Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.1, samt gitt i Tabell B.1 i appendiks. Som beskrevet i kapittel 4 er radikalstabiliteten illustrert ved SI som funksjon av tid i forhold til SI samme dag som bestråling. Hos dosimetre gitt en dose på 1 Gy varierte SI mye de første dagene uten at det ble observert fading i denne perioden. De gjennomsnittlige verdiene så ut til å variere om et felles nivå som lå systematisk over eller under 1-linjen. Det kunne dermed virke tilfeldig om SI samme dag som bestråling var i "øvre" eller "nedre" sjikt av verdiene SI varierte rundt. Dosimetrene gitt 1 Gy er derfor valgt å normeres med gjennomsnittet av de fem første dagene, og ikke kun den første dagen.

I følge Figur 5.2 kan det se ut til at dosimetre med 0 % parafin holder seg svært stabile en god stund etter bestråling: det er ikke antydning til fading i løpet av de første 85 dagene etter bestråling. Deretter observeres en reduksjon i SI i de påfølgende målingene. Ved siste måling har 0 %-dosimetrene en markant økning i SI. Dosimetrene har svært liten spredning.

Dosimetrene med 5 % parafin har ikke antydning til fading i løpet av måleperioden, men SI har noe høye verdier i perioden mellom dag 20 og dag 85 i forhold til bestrålingsdagen. Også for 5 %-dosimetrene observeres en markant økning i SI ved siste måledag. SI er noe lavere ved dag 117. Dosimetrene med 10, 15 og 20 % parafin ser ut til å ha samme mønster. Ingen av dosimetrene har fading i løpet av måleperioden frem til 100 dager etter bestråling. Både størrelsen på spredningen til dosimetrene og SI varierer en del mellom måledagene, særlig for dosimetrene med 15 % fading. Noen måledager har særlig stor spredning, hvilket skyldes stor dag- til-dag-variasjon for enkelte dosimetre (Figur A.1 i appendiks A viser fadingforløp for hvert

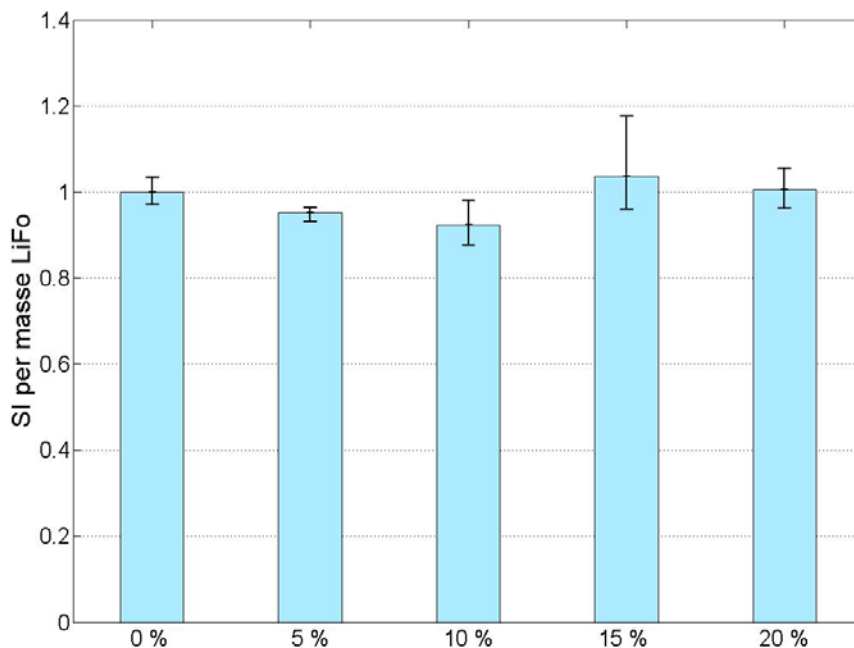
enkelt dosimeter). 117 dager etter bestråling er SI noe redusert hos dosimetrene med 10 og 20 % parafin.



Figur 5.2: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 1 (15 MV, 1 Gy, 34 % luftfuktighet) bestående av varierende andeler LiFo og parafin, normert til gjennomsnittet av 5 første måledager. Dag 0 tilsvarer dag 0 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).

Figur 5.3 viser radikalutbyttet til dosimetrene i begynnelsen av måleperioden. Som beskrevet tidligere har dosimetrene gitt 1 Gy høy spredning rundt middelverdiene av

de fire parallelle dosimetrene, og radikalutbyttet er derfor her valgt å beregnes som et gjennomsnitt av de fem første måledagene (dosimetrene har ikke antydning til fading i denne perioden). Dosimetrene med 0 % parafin representerer et radikalutbytte på 1,0. Både dosimetre med 5 % og 10 % parafin har snittverdier og spredning som ligger under 1-linjen, og ut fra figuren kan det synes som om dosimetre med 10 % parafin har et noe lavere radikalutbytte enn dosimetre med 5 % parafin. Spredningen er noe mindre for 5 % enn for 10 %. Ettersom begge disse intervallene overlapper med spredningen til dosimetre med 0 % parafin er det ikke grunnlag for å si at det er signifikant forskjell i radikalutbytter. Det kan synes som om dosimetre med 10, 15 og 20 % parafin har tilsynelatende samme radikalutbytte som dosimetre med 0 % parafin da usikkerhetsintervallene overlapper. Spredningen til dosimetre med 15 % parafin synes å være svært stor.



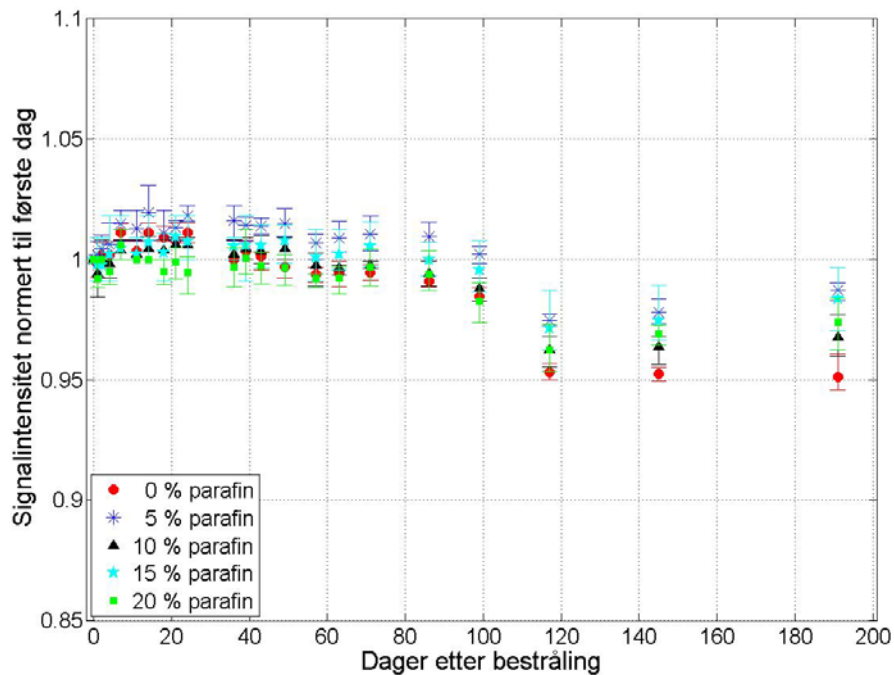
Figur 5.3: Gjennomsnitt av radikalutbyttet i løpet av de første 5 dagene etter bestråling, til dosimetre fra serie 1 (15 MV, 1 Gy, 34 % luftfuktighet) med varierende andeler LiFo og parafin. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene uten parafin).

5.2 Serie 2: 10 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

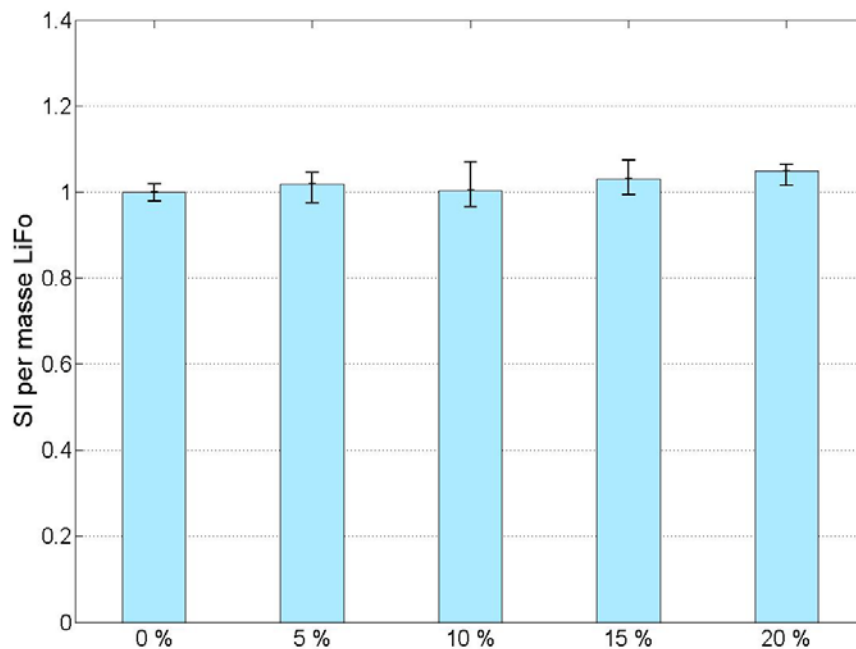
Figur 5.4 viser radikalstabiliteten til dosimetre med 0, 5, 10, 15 og 20 % parafin, over en måleperiode på 191 dager. (For å lettere kunne sammenligne har figuren samme skalering som Figur 5.2 og Figur 5.6). Dag 0 i figuren tilsvarer også dag 0 for referanseprøven i Figur 4.5. Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.2, samt gitt i Tabell B.2 i appendiks. Ingen av dosimetrene synes å ha merkbar reduksjon i SI før rundt 100 dager etter bestråling. Dosimetre med 5 % parafin ser ut til å ligge over normeringslinja i hele denne perioden, mens de resterende dosimetrene inkluderer normeringslinja i spredningen. Ved cirka 90 dager kan det ikke påvises en endring i SI større enn spredningen, men alle dosimetrene har redusert SI i forhold til forrige måledag. Ved dag 117 observeres et signifikant fall i SI hos samtlige dosimetre, før SI synes å flate ut i resten av måleperioden. Det brå fallet er ikke funnet igjen ved dag 117 hos referanseprøven, som ved denne tiden ser ut til å ha stabilisert seg (Figur 4.5).

Dosimetrene ser altså ut til å ha to platå. Det første platået varer ganske lenge og innebærer ikke fading. Etter cirka 100 dager synker SI brått, før den stabiliserer seg på et lavere platå. Endringene i gjennomsnittlig SI mellom platå 1 og 2 er tilsynelatende størst for dosimetre bestående av ren LiFo (0 % parafin), og disse har på platå 2 en gjennomsnittlig SI som er cirka 5 % lavere enn 1-linja. Dosimetre med 5 % parafin ser ut til å ha et platå 1,3 % lavere enn 1-linja, og er dosimetrene med minst reduksjon i forhold til 1-linja. Selv om dosimetre med 5 % parafin har et platå 1 som har en høyere SI enn platå 1 for dosimetre med 0 % parafin, er reduksjonen i SI mellom platå 1 og 2 fremdeles størst for dosimetre med 0 % parafin. De resterende dosimetrene ligger altså spredt mellom 0 % og 5 % dosimetrene. Spredningen til dosimetrene er generelt sett svært små.

Radikalutbyttet til dosimetrene samme dag som bestråling er vist i Figur 5.5. Gjennomsnittsverdier til radikalutbyttet ved første dag er generelt sett litt høyere for dosimetrene med parafin enn for dosimetre uten parafin, men forskjellene i radikalutbytte ligger i alle tilfellene innenfor spredningen til dosimetrene.



Figur 5.4: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 2 (15 MV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet), bestående av varierende andeler LiFo og parafin. Dag 0 tilsvarer dag 0 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning)



Figur 5.5: Radikalutbyttet samme dag som bestråling til dosimetre fra serie 2 (15 MV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet), med varierende andeler LiFo og parafin. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene uten parafin).

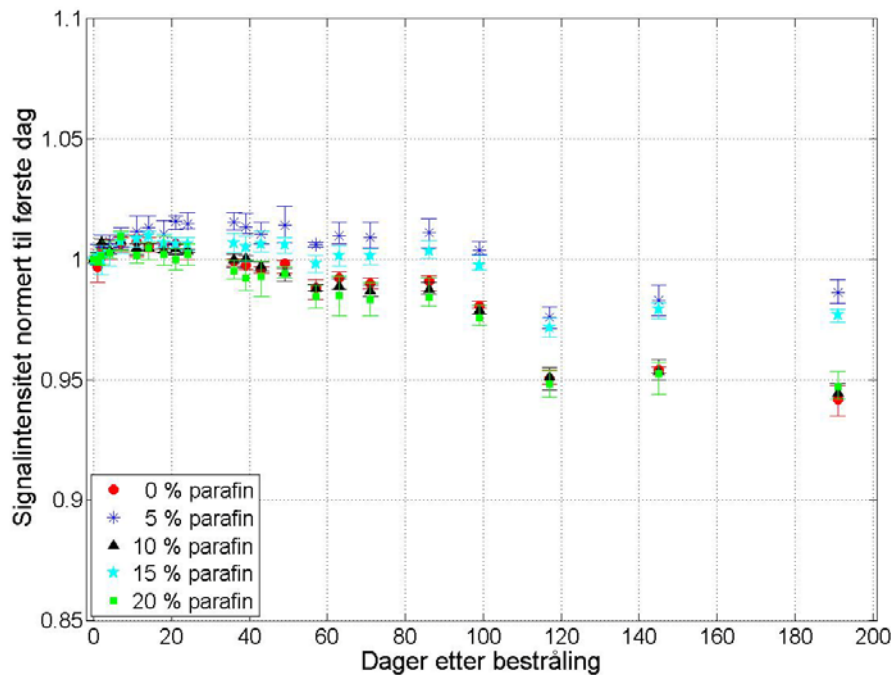
5.3 Serie 3: 100 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

Figur 5.6 viser radikalstabiliteten til dosimetre med 0, 5, 10, 15 og 20 % parafin, over en måleperiode på 191 dager. Dag 0 i figuren tilsvarer også dag 0 for referanseprøven i Figur 4.5. Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.3, samt gitt i Tabell B.3 i appendiks. Målepunktene for dosimetre med 0 %, 10 % og 20 % parafin overlapper innenfor usikkerheten hver eneste måledag gjennom hele måleserien. Dosimetrene med disse parafinandelene ser ikke ut til å ha fading i løpet av de første 50 dagene etter bestråling, mens en svak fading deretter kan registreres frem til ca 100 dager etter bestråling. Etter cirka 100 dager observeres en markant reduksjon i signalintensitet (SI) hos samtlige dosimetre, før kurven flater ut og holder seg stabil i den resterende måleperioden. SI ligger da cirka 5-6 % lavere enn SI samme dag som bestråling, og det er dosimetre av ren LiFo (0 % parafin) som ligger aller lavest.

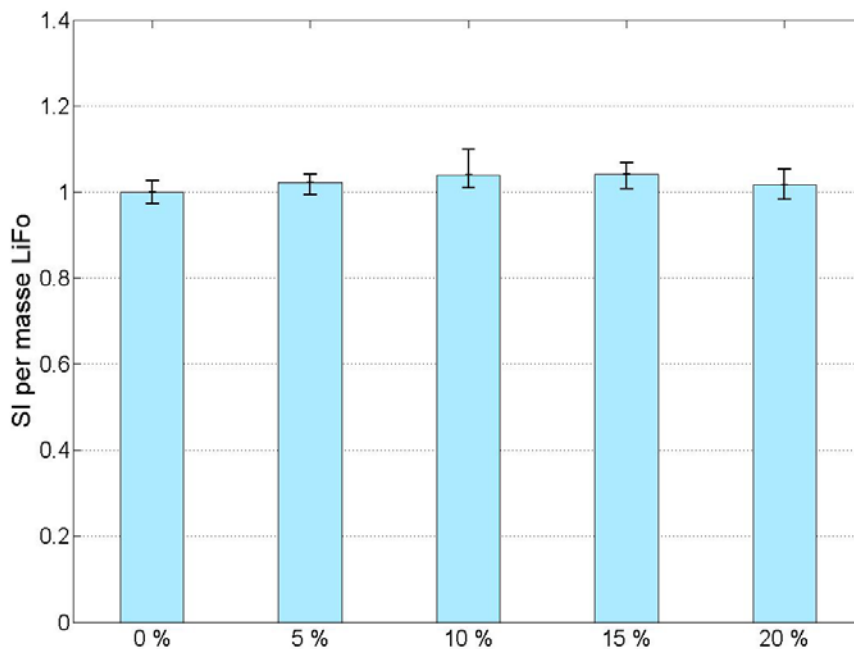
Dosimetrene med 5 % og 15 % parafin overlapper innenfor usikkerheten gjennom hele måleperioden (sett bort fra siste måledag hvor de så vidt ikke overlapper), og har ikke fading før måledag 100. Derimot ligger dosimetre med 5 % parafin gjennomsnittlig 1 % over normeringslinjen i måleperioden 10 dager til 85 dager etter bestråling, og dosimetre med 15 % parafin ligger gjennomsnittlig 0-0,5 % over normeringslinjen i samme periode. Ved måledag 100 har disse dosimetrene en tendens til svak fading, men dette er innenfor usikkerheten. Ved dag 117 har også 5 % og 15 % -dosimetrene en markant reduksjon i SI, for så og ha en stabil SI i den resterende måleperioden. Gjennomsnittlig har disse da cirka 1,4 og 2,3 % lavere SI for henholdsvis 5 % og 15 % parafin enn hva de hadde samme dag som bestråling.

Radikalutbyttet til dosimetrene samme dag som bestråling er vist i Figur 5.7.

Dosimetre med parafin ser ved første dag i snitt ut til å ha et litt høyere radikalutbytte enn dosimetre uten parafin. Forskjellen i radikalutbytte er svært liten, og ligger innenfor usikkerheten til dosimetrene.



Figur 5.6: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 3 (15 MV, 100 Gy, 34 % luftfuktighet) bestående av varierende andeler LiFo og parafin. Dag 0 tilsvarer dag 0 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning)



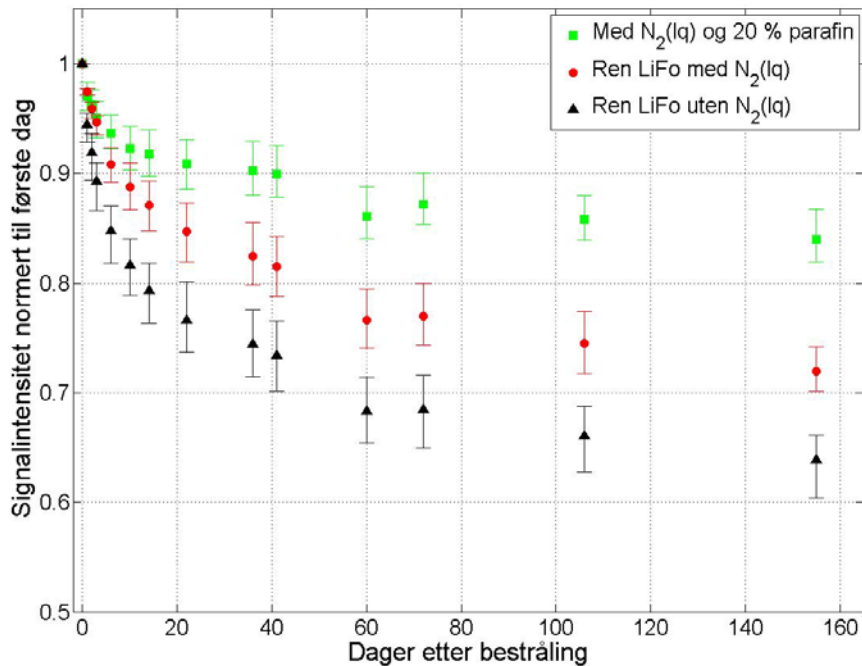
Figur 5.7: Radikalutbyttet til dosimetre samme dag som bestråling fra serie 3 (15 MV, 100 Gy, 34 % luftfuktighet), med varierende andeler LiFo og parafin. Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene uten parafin.

5.4 Serie 4: 10 Gy, 6 MV, 61 % luftfuktighet

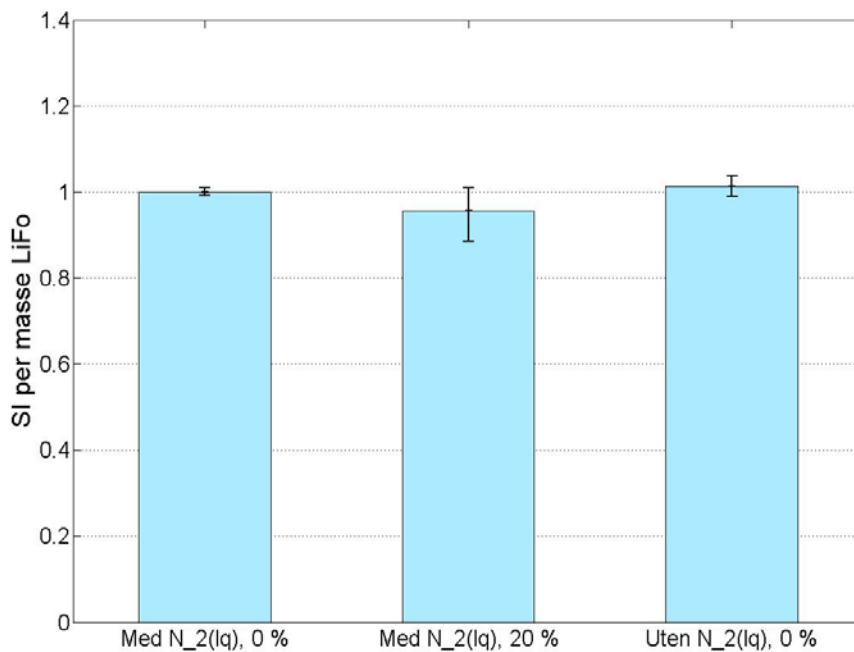
Radikalstabiliteten til dosimetrene med 0 % parafin laget med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$, i tillegg til dosimetre med 20 % parafin med $N_2(lq)$, er vist i Figur 5.8. Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.4, samt gitt i Tabell B.4 i appendiks. I tillegg til at samtlige dosimetre har en merkbar reduksjon i signalintensitet (SI) kan det observeres en betydelig forskjell mellom typene av dosimetre. Samtlige dosimetre ser ut til å følge samme fadingmønster, men dosimetrene med parafin har en lavere fadingrate enn dosimetrene uten parafin. Hos dosimetrene uten parafin er det de som er produsert av LiFo preparert med $N_2(lq)$ som fader minst, mens dosimetre produsert av LiFo preparert uten $N_2(lq)$ fader mest.

Forskjellen mellom typene av dosimetre er store. Dosimetrene med 20 % parafin har en gjennomsnittlig reduksjon i SI (fading) på 16 % i løpet av 155 dager, dosimetrene uten parafin produsert av LiFo preparert med $N_2(lq)$ har en gjennomsnittlig reduksjon på 28 %, mens dosimetre uten parafin produsert av LiFo preparert uten $N_2(lq)$ har en gjennomsnittlig reduksjon på 36 % ved denne tiden.

Radikalutbyttet til dosimetrene samme dag som bestråling er vist i Figur 5.9. Ut fra figuren synes det som om radikalutbyttet til begge blandingene med 0 % parafin er det samme. Spredningen hos dosimetre med 20 % parafin er svært stor og inkluderer normeringslinjen, slik at et lavere radikalutbytte hos disse i forhold til dosimetre med 0 % parafin ikke kan fastslås. Dosimetre med 0 % parafin har betydelig lavere spredning enn dem med parafin.



Figur 5.8: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 4 (6 MV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet). Dag 0 tilsvarer dag 57 for referansen. Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning.



Figur 5.9: Radikalutbyttet ved første måledag til dosimetre fra serie 4 (6 MV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet). Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene av LiFo preparert med N₂(lq) og 0 % parafin.

5.5 Serie 5: 10 Gy, 60 kV, 34 % luftfuktighet

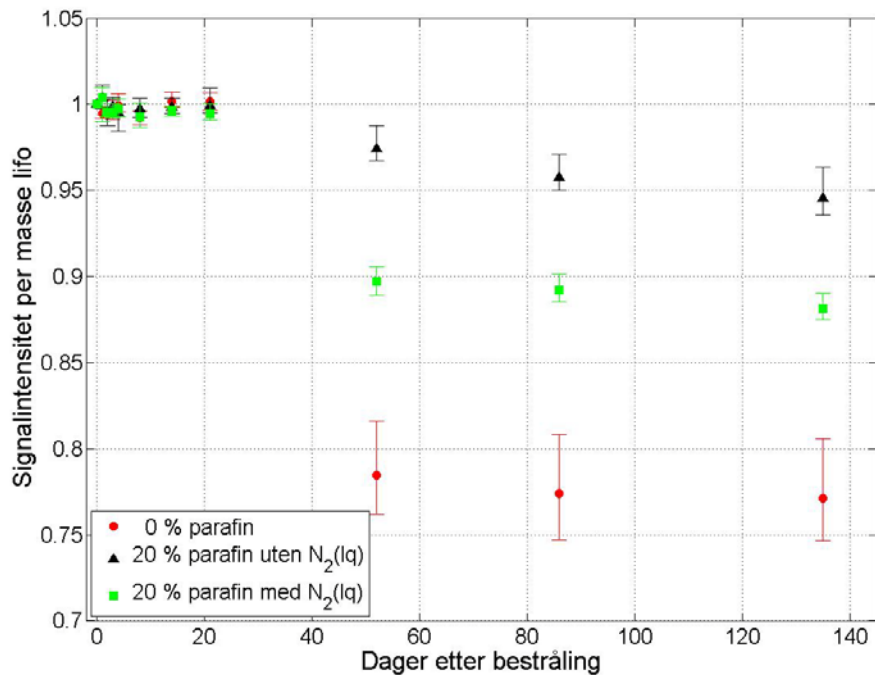
LiFo-dosimetre med 0 % og 20 % parafin ble produsert med forskjellige kombinasjoner av LiFo og parafin med to ulike former for for-preparering: preparert med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$. En oversikt over de forskjellige kombinasjonene er vist i Tabell 5.1. Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.5 og A.6, samt gitt i Tabell B.5 i appendiks.

Tabell 5.1: Oversikt over dosimetrene. Dosimetre hvor LiFo er blitt preparert med nedkjøling med $N_2(lq)$ er samlet til venstre, mens dosimetre hvor LiFo er blitt preparert uten nedkjøling med $N_2(lq)$ er vist til høyre.

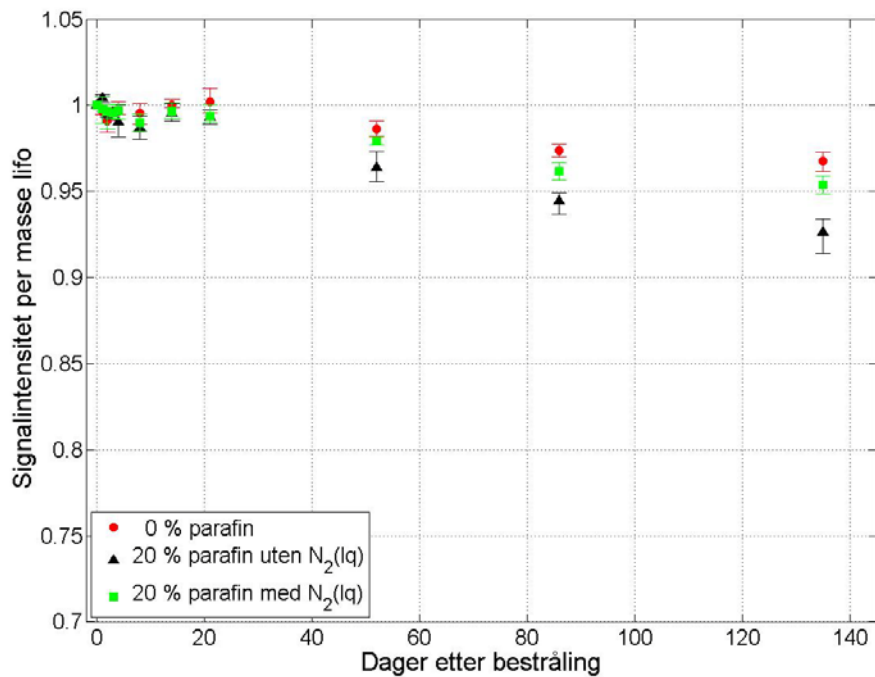
100 % LiFo <u>med</u> $N_2(lq)$, 0 % parafin	100 % LiFo <u>uten</u> $N_2(lq)$, 0 % parafin
80 % LiFo <u>med</u> $N_2(lq)$, 20 % parafin <u>med</u> $N_2(lq)$	80 % LiFo <u>uten</u> $N_2(lq)$, 20 % parafin <u>med</u> $N_2(lq)$
80 % LiFo <u>med</u> $N_2(lq)$, 20 % parafin <u>uten</u> $N_2(lq)$	80 % LiFo <u>uten</u> $N_2(lq)$, 20 % parafin <u>uten</u> $N_2(lq)$

Radikalstabiliteten til dosimetrene laget med LiFo preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$ er vist i Figur 5.10. Det observeres at signalintensiteten (SI) til dosimetrene holder seg stabil de første tre ukene etter bestråling. Cirka 50 dager etter bestråling har samtlige kurver en kraftig reduksjon i SI, men det er imidlertid store variasjoner i hvor mye SI reduseres hos de forskjellige dosimetrene. De rene LiFo-dosimetrene ser ut til å stabilisere seg på et nivå med en gjennomsnittlig SI på cirka 22 % lavere enn SI ved bestråling, mens dosimetre med 20 % parafin i gjennomsnitt ser ut til å ha en nedgang i SI på 10 % og 2,5 % for henholdsvis parafin med og uten preparering med $N_2(lq)$. Dosimetrene med parafin ser deretter ut til å ha en svak fading resten av måleperioden. (Denne trenden kommer tydeligere frem i Figur A.5 i appendiks).

Figur 5.11 viser radikalstabiliteten til dosimetrene laget med LiFo preparert uten nedkjøling med $N_2(lq)$. For å tydeliggjøre forskjellene har Figur 5.10 og Figur 5.11 samme skala på aksene. Også her observeres det at dosimetrene holder seg stabile i løpet av de tre første ukene etter bestråling, og at SI har sunket en del ved målingen



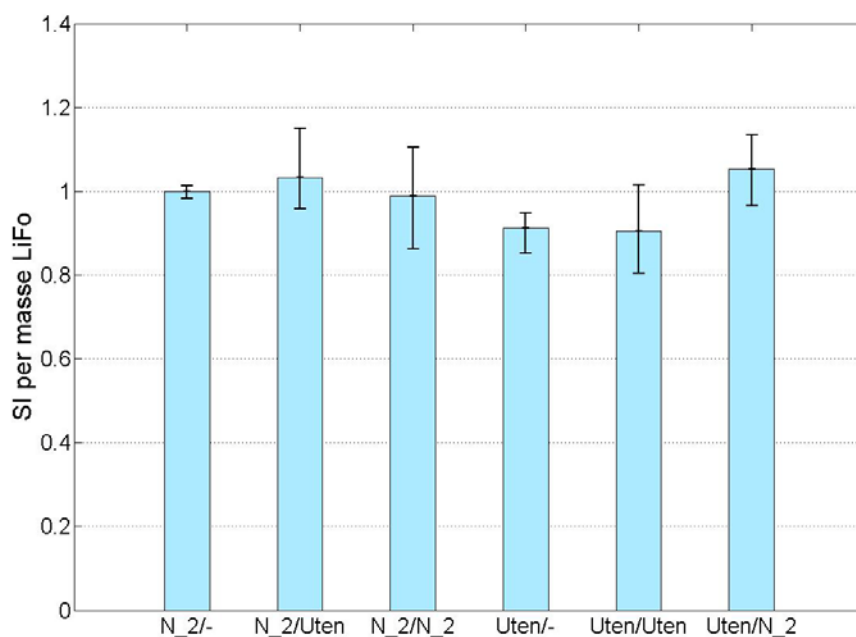
Figur 5.10: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 5 (60 kV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert med nedkjøling av N₂(lq). Dag 0 tilsvarer dag 78 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).



Figur 5.11: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 5 (60 kV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert uten N₂(lq). Dag 0 tilsvarer dag 78 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).

etter (50 dager etter bestråling). Dosimetrene har deretter en svak fading i den resterende måleperioden, hvor dosimetre med 0 % parafin er de med minst fading og dosimetre med 20 % parafin preparert uten $N_2(lq)$ er de med mest fading. Det lange oppholdet mellom måledagene 20 dager og 50 dager, og det faktum at SI fortsetter å reduseres i den resterende måleperioden, gjør det vanskelig å si om dosimetrene har et brått fall, eller en mer gradvis fading i perioden 20 - 50 dager etter bestråling.

Radikalutbyttet til dosimetrene samme dag som bestråling er vist i Figur 5.12. Figuren viser at dosimetre med 0 % parafin, preparert uten $N_2(lq)$ har et lavere radikalutbytte enn dosimetre med 0 % parafin, preparert med $N_2(lq)$. Samtlige dosimetre med 20 % parafin (uavhengig av produksjonsmetode) har svært store spredninger slik at de ikke skiller seg signifikant fra dosimetrene uten parafin.



Figur 5.12: Radikalutbyttet ved første måledag til dosimetre fra serie 5 (60 kV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet). Benevnningen angir om dosimetertypen har LiFo/parafin preparert med eller uten $N_2(lq)$. Figuren viser et gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene av LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin.

5.6 Serie 6: 10 Gy, 60 kV, 61 % luftfuktighet

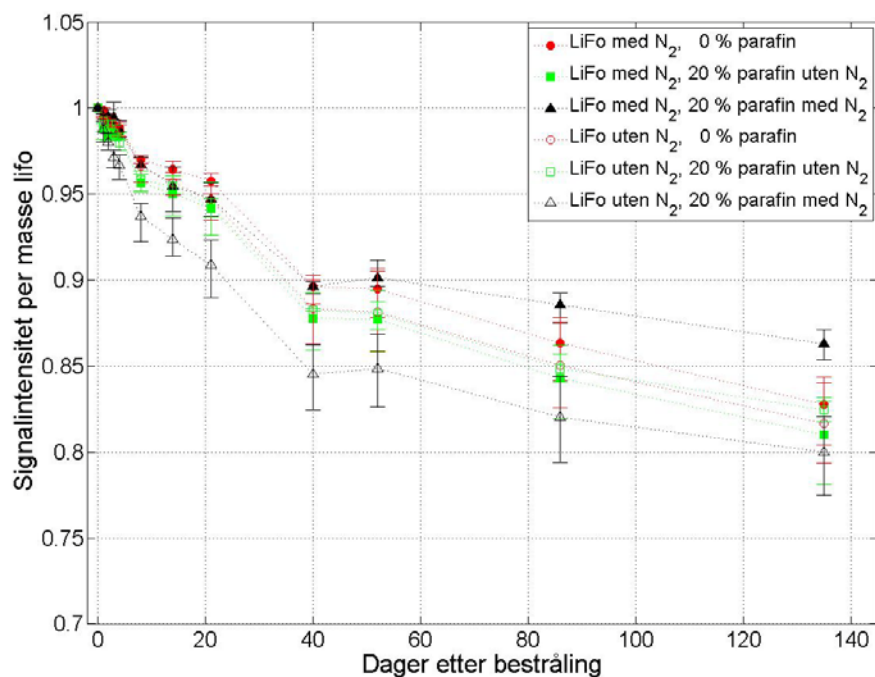
LiFo-dosimetre av samme typer som dem beskrevet i kapittel 5.5, og vist i Tabell 5.1, ble i dette tilfellet oppbevart ved 61 % luftfuktighet både før og etter bestråling.

Måledata for hvert enkelt dosimeter er vist i Figur A.7 og A.8, samt gitt i Tabell B.6 i appendiks. Radikalstabiliteten til dosimetrene er vist i Figur 5.13, over en måleperiode på 135 dager. Det observeres liten forskjell mellom dosimetre produsert av LiFo preparert med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$, og de er derfor vist i samme graf for å lettere kunne sammenligne dem. Dosimetrene ser ut til å ha betydelig fading i løpet av måleperioden, og de forskjellige dosimetrene virker som å ha relativ likt fadingmønster. De første tre ukene ser det ut til å være dosimetre av LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin som har minst fadingrate, mens det i den resterende perioden ser ut til å være dosimetrene produsert av LiFo og 20 % parafin, hvor begge er preparert med $N_2(lq)$, som har lavest fadingrate. Sett bort i fra siste måledag synes det som om dosimetrene produsert av LiFo preparert uten $N_2(lq)$ og 20 % parafin preparert med $N_2(lq)$ har høyest fadingrate.

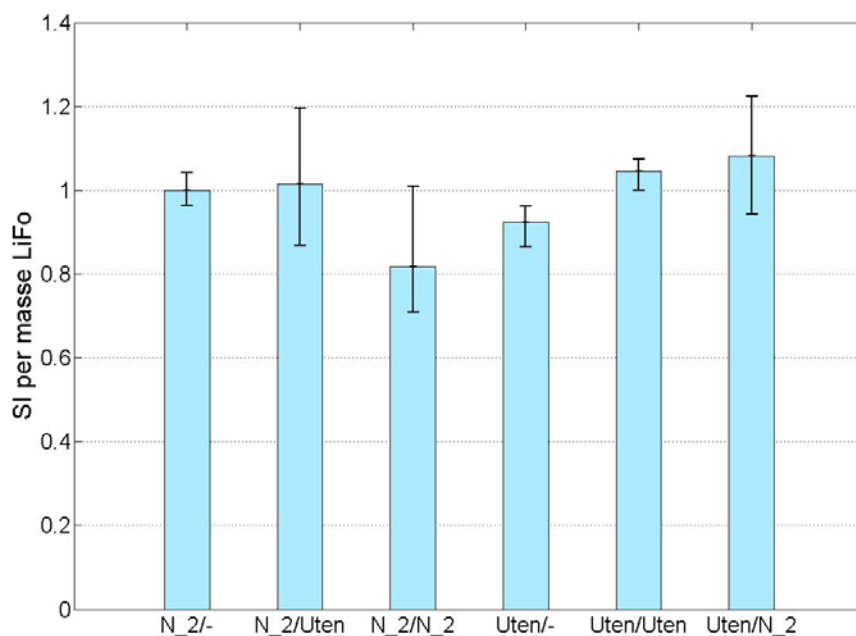
Samtlige dosimetre ser ut til å ha følgende fadingmønster: Den første uken etter bestråling har dosimetrene en relativt høy fadingrate, som avtar de neste to ukene. Etter 40 dager har samtlige dosimetre et brått fall før dosimetrene gjenopptar en tilsynelatende stabil fading.

Dosimetrene har varierende størrelse på spredningen, og spredningen ser ut til å øke etter hvert som tiden går. Dosimetrene med minst fading hadde også minst spredning, det vil si at dosimetrene tilsatt 20 % parafin, med både LiFo og parafin preparert med $N_2(lq)$, hadde en spredning på 2 %. Dosimetrene med mest fading hadde i dette tilfelle størst spredning: Dosimetrene produsert av LiFo preparert uten $N_2(lq)$ og 20 % parafin preparert med $N_2(lq)$ en spredning på 5 %.

Radikalstabiliteten til samtlige dosimetre innenfor hver type (og ikke gjennomsnittet) er vist i Figur A.7 og A.8 i appendiks. Da radikalstabiliteten til samtlige dosimetre ble plottet, viste det seg at en av de fire dosimetrene med LiFo preparert med $N_2(lq)$



Figur 5.13: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 6 (60 kV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet). Både dosimetre produsert av LiFo preparert med og uten N₂(lq) er tatt med. Dag 0 tilsvarer dag 78 for referansen. (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).



Figur 5.14: Radikalutbyttet ved første måledag til dosimetre fra serie 6 (60 kV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet). Figuren viser et gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning, normert med radikalutbyttet til dosimetrene av LiFo preparert med N₂(lq) og 0 % parafin.

og 0 % parafin hadde betydelig mer fading enn de tilsvarende parallelle dosimetrene. Dette dosimeteret hadde dermed en stor betydning på den gjennomsnittlige SI til dosimetrene med LiFo preparert med $N_2(lq)$ og 0 % parafin, og dette dosimeteret er derfor ikke tatt med i Figur 5.13.

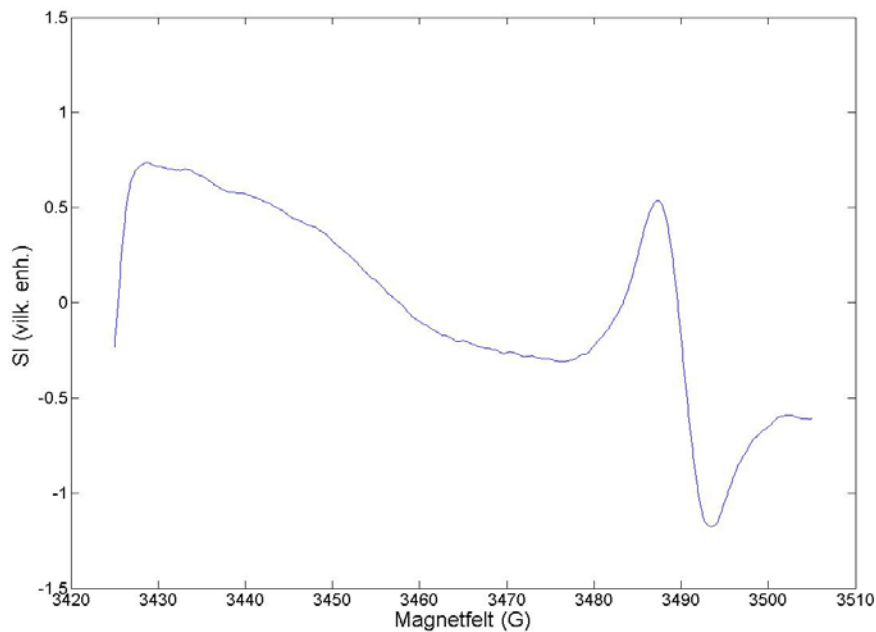
Radikalutbyttet til dosimetrene samme dag som bestråling er vist i Figur 5.14. Det observeres at dosimetrene med 20 % parafin, hvor både LiFo og parafin er preparert med $N_2(lq)$ har et gjennomsnittlig radikalutbyttet som er svært lavt i forhold til de resterende dosimetrene. Spredningen er for disse svært stor (hele 30 %) og inkluderer 1-linja. En forskjell i radikalutbytte kan dermed ikke bestemmes. Også dosimetre med 20 % parafin hvor kun LiFo er preparert med $N_2(lq)$, og hvor kun parafin er preparert med $N_2(lq)$ har svært høye spredninger på cirka 30 %. Også for dosimetrene lagret ved 61 % luftfuktighet har de rene LiFo-dosimetrene preparert med $N_2(lq)$ et høyere radikalutbytte enn rene LiFo-dosimetre preparert uten $N_2(lq)$.

5.7 Serie 7: Lavest detekterbare dose

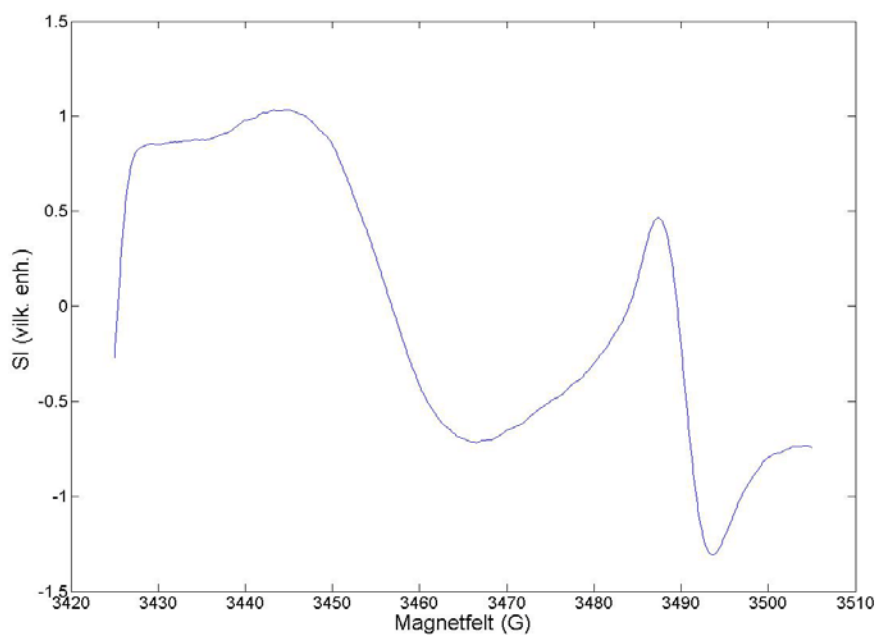
LiFo-dosimetre med 0 % parafin ble bestrålt med 6MV fotonstråling, og gitt doser på henholdsvis 1 – 0,5 – 0,1 – 0,08 – 0,06 – 0,045 – 0,03 og 0,01 Gy. Dosimetrene ble oppbevart ved 34 % luftfuktighet både før og etter bestråling, og det ble her brukt tre dosimetre av hvert blandingsforhold for hver av dosene. De instrumentelle parametrene benyttet i denne serien tok utgangspunkt i parametrene benyttet for dosimetre gitt 1 Gy (vist i Tabell 4.1), før de ble variert i ulik grad for å optimalisere signal/støy forholdet. Modulasjonsamplituden ble variert i området 6 G til 12 G og mikrobølgeeffekten ble variert i område 12,57 mW til 20 mW. Også tidskonstanten og antall scan ble variert, med en øvre grense for opptakstiden på 5 minutter.

Det ble ikke funnet et lesbart signal fra noen av dosimetrene gitt en dose på 0,1 Gy og nedover. Figur 5.15 og Figur 5.16 viser eksempler på førstederiverte ESR-spektrumet fra LiFo-dosimetre gitt doser på henholdsvis 100 mGy og 500 mGy. Spektrene i disse figurene er tatt opp med følgende instrument-parametre:

Mikrobølgeeffekt 20 mW, modulasjonsamplitude 12 G, forsterkning 96 dB, tidskonstant 655 ms, 7 scan, total opptakstid 5 minutt.



Figur 5.15: Førstederivert ESR-spektrum fra et LiFo-dosimeter gitt en dose på 100 mGy med instrument-parametre gitt i teksten. Linjen fra LiFo er vist til venstre, mens en av linjene fra Mn^{2+} er vist til høyere.



Figur 5.16: Førstederivert ESR-spektrum fra et LiFo-dosimeter gitt en dose på 500 mGy med instrument-parametre gitt i teksten. Linjen fra LiFo er vist til venstre, mens en av linjene fra Mn^{2+} er vist til høyere.

6. Diskusjon

I et tidligere pilotstudium ble det vist at det å bruke parafin som bindemiddel kan stabilisere de strålingsinduserte radikalene i LiFo. I dette studiet ble samtlige dosimetre bestrålt med 6 MV fotoner, gitt en dose på 10 Gy og lagret ved 33 % luftfuktighet (Gjøvik, et al., 2007). I det foreliggende masterprosjektet er stabiliseringseffekten av parafin studert under varierende forhold. Parametrene som er variert er luftfuktighet ved lagring, strålekvalitet (fotonenergi), stråledose og dosimeter-produksjonsmetode. I tillegg til å undersøke i hvilken grad parafin har en stabiliserende effekt, er det også gjort forsøk på å finne ut hvilken parafinandel som i så fall gir optimal stabilisering.

Felles for samtlige dosimetre oppbevart ved 34 % luftfuktighet er at signalintensiteten (SI) tilsynelatende holder seg stabil en periode før den faller brått. De aller fleste dosimetrene stabiliserer seg deretter ved en lavere SI, selv om enkelte dosimetre fortsetter å vise en svak reduksjon i SI. Hvor mye SI faller varierer dog mye mellom hver dosimeterserie. For dosimetre oppbevart ved 61 % luftfuktighet er det først observert en periode med kontinuerlig reduksjon i SI. Denne perioden er etterfulgt av en signifikant reduksjon i SI og deretter en tilsynelatende lineær fading (Figur 5.13). Det markante fallet i SI inntreffer ikke etter samme antall dager etter bestråling for dosimetre bestrålt ved forskjellig tidspunkt, men oppstår i samme måleperiode. Denne måleperioden var i løpet av månedsskiftet juni/juli måned, som i 2009 var svært varm med temperaturer over 30 °C. Referansesignalet har ikke et tilsvarende fall i denne perioden (Figur 4.5). Dette tyder på at årsaken til fallet i SI ikke skyldes variasjon i ESR-spektrometerets sensitivitet, men at den signifikante reduksjonen i SI kan skyldes ytre årsaker. Dosimetrene ble ikke lagret ved konstant temperatur, men lå i eksikatorer oppbevart i romtemperatur. Romtemperaturen lå stort sett på 23-25 °C, med unntak av de varme ukene i juni/juli. Det er velkjent at romtemperaturen på ESR-laboratoriet på sommeren ofte er flere grader varmere enn utetemperaturen (på grunn av solinnstråling og dårlig ventilasjon). At fallet i SI sammenfaller med denne varme perioden indikerer at den økte temperaturen kan være en mulig årsak. (Økt

temperatur gir generelt sett økt reaksjonshastighet). Denne hypotesen støttes også av at den relative størrelsen på fallet i SI varierer betydelig mellom de forskjellige dosimeterseriene, mens at SI til parallelle dosimetre faller like mye.

Et fall i SI ble også observert i det tidligere nevnte pilotstudiet. Her hadde samtlige dosimetre en reduksjon i SI mellom to målinger foretatt 34 og 40 dager etter bestråling, hvor den relative størrelsen på reduksjonen varierte mellom dosimeterseriene (Gjøvik, et al., 2007). Dosimetre med ren LiFo hadde størst reduksjon, mens dosimetre med parafin hadde noe mindre reduksjon i SI.

6.1 Diskusjon av parafin som bindemiddel

Hovedmålet for denne oppgaven er som sagt å vurdere i hvilken grad tilsetning av parafin som bindemiddel kan virke stabiliserende på strålingsinduserte radikaler i LiFo. I dette delkapittelet diskuteres betydningen av å bruke parafin når de øvrige parametrene varierer, i tillegg til betydningen av parafinandel. I senere del kapitler vil observerte forskjeller som følger av parametrene selv bli diskutert.

6.1.1 Betydning av parafinandel og dose, 15 MV fotoner

Radikalstabiliteten til dosimetre med 0, 5, 10, 15 og 20 % parafin ble undersøkt i tre grupper bestående av dosimetre gitt doser på henholdsvis 1, 10 og 100 Gy. I Figur 6.1 er radikalstabiliteten til utvalgte dosimeterserier sammenlignet. Det er valgt å sammenligne dosimetre med 0 % og 5 % parafin, da disse tilsynelatende hadde henholdsvis størst og minst fading for både 10 og 100 Gy -dosimetrene (Figur 5.4 og Figur 5.6). Dosimetrene med 0 % parafin hadde også tilsynelatende størst fading hos 1 Gy -dosimetrene (Figur 5.2). I henhold til Figur 6.1 har dosimetrene gitt 10 og 100 Gy svært like fadingmønstre, hvor dosimetrene med 0 % parafin sammenfaller og dosimetrene med 5 % parafin sammenfaller. 1 Gy-dosimetrene skiller seg signifikant fra 10 og 100 Gy-dosimetrene. Sett bort fra siste måledag hadde 1 Gy, 0 % - dosimetrene tilsynelatende mer fading enn tilsvarende 10 Gy og 100 Gy-dosimetre. 1 Gy, 5 % -dosimetrene viste ikke signifikant fading i løpet av måleperioden

(spredningen i måleverdier var enten over eller dekket 1-linjen). Spredningen til 1 Gy, 5 % -dosimetrene var relativt stor, og overlappet med både 10 Gy, 5 % -dosimetrene og 100 Gy, 5 % -dosimetrene i periodene før 20 dager og etter 85 dager. I perioden mellom 20 og 85 dager var SI for 1 Gy, 5 % -dosimetrene svært høy. Ved siste måledag, 191 dager etter bestråling, hadde 1 Gy –dosimetrene (både 0 % og 5 % parafin) en markant økning i SI.

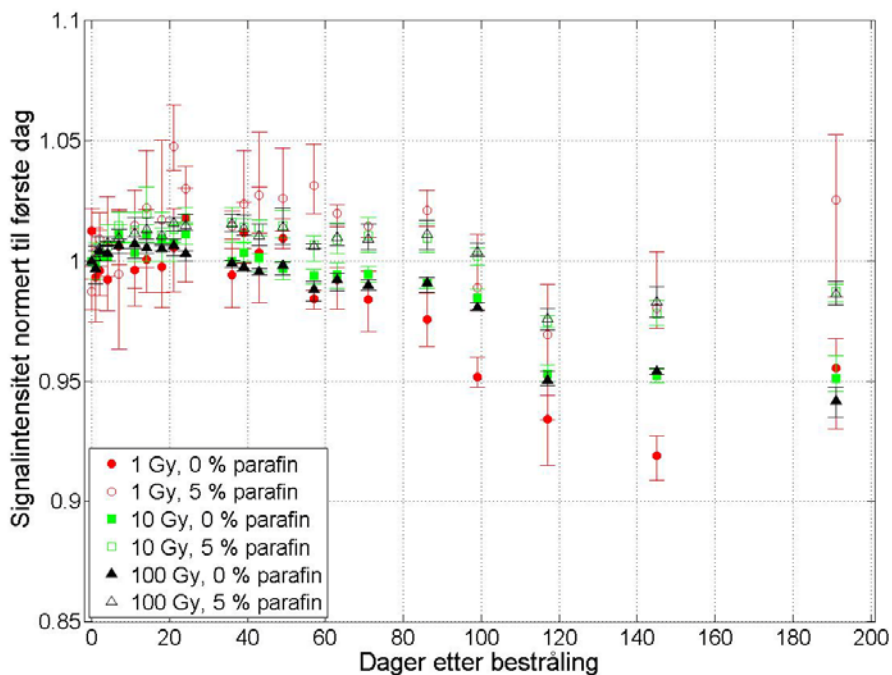
I løpet av den 191 dager lange måleperioden falt SI til dosimetrene bestående av ren LiFo (0 % parafin) mer enn SI til dosimetrene som inneholdt parafin. Dette gikk igjen for alle tre dosenivåene. For 10 og 100 Gy-dosimetrene synes SI å stabilisere seg etter cirka 120 dager, og forble på cirka 95 % av SI ved første måledag ut den resterende måleperioden. 1 Gy –dosimetrene bestående av ren LiFo viste derimot ingen klare tegn på stabilisering. Sett bort fra siste måledag sank SI jevnt etter måledag 65 og hadde en verdi på cirka 92 % av startverdien drøyt 140 dager etter bestråling.

Ved siste måledag økte SI i forhold til forrige måledag hos samtlige 1 Gy -dosimetre. Denne økningen har ikke blitt funnet igjen hos referansesignalet, og kan ikke forklares.

Hvilke dosimetre (10-, 15- eller 20 % parafin) som hadde SI nærmest 0- og 5 % -dosimetrene varierte for de tre dosenivåene, men 10-, 15- eller 20 % parafin-dosimetrene lå alltid mellom 5 % og 0 % parafin verdiene. At dosimetre med 0 % parafin tilsynelatende hadde mer fading enn dosimetrene tilsatt parafin tyder på at parafin har en stabiliserende effekt hos radikalene i LiFo. For 10 og 100 Gy-dosimetrene var SI størst hos dosimetrene med 5 % parafin, hvilket tyder på at selv små mengder parafin er tilstrekkelig for å oppnå den stabiliserende effekten. For 10 Gy –dosimetrene kunne dosimetre med 10 % parafin ikke skilles signifikant fra 0 % -dosimetrene, mens for 100 Gy –dosimetrene kunne ikke 10 % og 20 % parafin –dosimetre skilles signifikant fra 0 % -dosimetrene.

Spredningen i SI for parallelle dosimetre var betydelig større for 1 Gy -dosimetrene enn for 10 og 100 Gy –dosimetrene. Dette skyldes sannsynligvis et merkbart

dårligere signal/støy forhold for 1 Gy –dosimetrene. For 1 Gy –dosimetrene var det større spredning for dosimetre med 5 % parafin enn for de rene LiFo-dosimetrene, hvilket muligens kan henge sammen med inhomogen distribusjon av parafinen. Eventuelle inhomogeniteter syntes imidlertid ikke å påvirke spredningen til dosimetrene eksponert for høyere stråledoser, i det spredningen til 10 og 100 Gy – dosimetrene var omlag like store for ren LiFo og 5 % parafin-dosimetrene.



Figur 6.1: Sammenligning av dosimetre gitt doser på 1, 10 og 100 Gy. Radikalstabilitet til dosimetre bestående av LiFo og parafin, (0 % og 5 % parafinandel, 15 MV, 34 % luftfuktighet). (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).

Radikalutbyttet for de ulike dosimetrene kunne ikke sammenlignes direkte med hensyn på dose, da forskjellige ESR-parametre ble benyttet ved de forskjellige dosenivåene. Radikalutbytte kunne imidlertid sammenlignes med hensyn på parafinandel innad for hvert av de tre dosenivåene. Siden radikalutbyttet for dosimetrene med parafin er normert med radikalutbyttet for dosimetrene uten parafin for de tre dosenivåene kunne også tendensene innad i dosenivåene sammenlignes med hverandre.

1 Gy -dosimetrene viste ingen signifikant variasjon mellom radikalutbytte og parafinandel. Førr 10 Gy –dosimetrene var det en tendens til at det gjennomsnittlige radikalutbyttet for samtlige dosimetre med parafin var høgere enn det gjennomsnittlige radikalutbyttet til dosimetre uten parafin. Samme trend ble observert for 100 Gy –dosimetrene. Forskjellene i radikalutbytte for dosimetrene bestående av ren LiFo og dosimetrene tilsatt parafin var imidlertid små, og innenfor spredningen i observasjonene for både 10 Gy –dosimetrene og 100 Gy –dosimetrene. Det er således ikke statistisk grunnlag for å hevde at tilsetning av parafin endrer radikalutbyttet i bestrålt LiFo.

6.1.2 Betydning av parafin, bestråling med 6 MV fotoner

Radikalstabiliteten til dosimetrene tilsatt 20 % parafin ble sammenlignet med radikalstabiliteten til rene LiFo -dosimetre (0 % parafin), hvor LiFo preparert både med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$ ble brukt. Dosimetrene ble lagret ved en luftfuktighet på 61 %. Samtlige dosimetre viste fading under hele måleperioden, men fadingen var langt lavere for dosimetre tilsatt parafin enn for de bestående av ren LiFo. Det å bruke parafin i dosimetrene kunne dermed synes å ha en klart stabiliserende effekt ved 6 MV fotonstråling og 61 % luftfuktighet ved lagring. Ved starten av dette forsøket var ikke ”optimal” andel parafin (med hensyn på stabilisering) kjent. Det ble derfor valgt å bruke 20 % parafin, som er en typisk mengde bindemiddel å bruke i alanin-dosimetre (Sagstuen, 2009). (Det observeres også stor forskjell mellom preparert med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$, dette diskuteres senere).

6.1.3 Betydning av parafin, bestråling med 60 kV røntgenstråling

Dosimetre med 20 % parafin ble igjen sammenlignet med dosimetre med 0 % parafin. I dette tilfellet ble det brukt parafin preparert både med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$ i tillegg til LiFo preparert med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$. Halvparten av dosimetrene ble lagret ved 34 % luftfuktighet, mens den resterende halvparten ble lagret ved 61 % luftfuktighet. Samtlige dosimetre som ble lagret ved samme

luftfuktighet ble også bestrålt samtidig, og alle dosimetre ble bestrålt med 60 kV røntgenstråling. Betydningen av å tilsette parafin så her ut til å varierte mye fra forsøk til forsøk. Hos dosimetre produsert av LiFo preparert under nedkjøling og lagret ved 34 % luftfuktighet syntes parafin å ha en sterkt stabiliserende effekt. Denne stabiliserende effekten ble derimot ikke observert når LiFo ikke var preparert med $N_2(lq)$. Tvert imot, ved 34 % luftfuktighet ble det registrert mer fading hos dosimetrene med parafin enn hos de rene LiFo-dosimetrene når LiFo *ikke* hadde vært nedkjølt med $N_2(lq)$. For dosimetrene lagret ved 61 % luftfuktighet syntes tilsetningen av parafin kun å ha stabiliserende effekt når dosimeterproduksjonen involverte nedkjøling av både LiFo og parafin med $N_2(lq)$. De resterende LiFo-parafinkombinasjonene hadde alle lavere SI i forhold til bestrålingsdagen enn hva rene LiFo-dosimetre hadde. Særlig kombinasjonen LiFo uten $N_2(lq)$ og parafin med $N_2(lq)$ hadde liten stabilitet og lå desidert nederst i radikalstabilitetfiguren (Figur 5.13). Det kunne dermed ikke konkluderes med at parafin hadde en stabiliserende effekt hos dosimetre bestrålt med 60 kV røntgenstråling.

6.1.4 Oppsummering betydning av parafin

Ved bestråling med fotonenergier i MV-området (6 og 15 MV) så parafin ut til å ha en stabiliserende effekt på radikalene i LiFo. Dette stemmer også overens med tidligere forsøk hvor det ble brukt 6 MV fotonstråling, og hvor parafin ble funnet å ha en stabiliserende effekt (Gjøvik, et al., 2007). Det forelå ikke en klar sammenheng mellom parafinandel og optimal stabilisering, men forsøkene tydet på at selv svært lave andeler parafin har en stabiliserende effekt. Ved bestråling med 60 kV røntgenstråling var resultatene derimot varierende. Hos dosimetre produsert av LiFo og parafin hvor begge materialene var preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$ syntes parafin å ha en stabiliserende effekt både når dosimetrene var lagret ved 34 og 61 % luftfuktighet. Utover dette så det ikke ut til at parafin har noen stabiliserende effekt på generelt grunnlag. Det ble ikke påvist signifikant forskjell i radikalutbytte mellom dosimetre med og uten parafin.

6.2 Diskusjon av andre parametre

6.2.1 Produksjonsmetode

Ved dosimeterproduksjonen i denne oppgaven ble det valgt å produsere dosimetre av LiFo og parafin som hadde blitt preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$. Det kunne ikke utelukkes at nedkjøling av LiFo kunne påvirke radikaldannelsen, og det ble derfor også produsert dosimetre av ren LiFo uten nedkjøling med $N_2(lq)$. Disse dosimetrene ble så sammenlignet med dosimetre med ren LiFo produsert med nedkjøling med $N_2(lq)$.

Etter bestråling med 6 MV fotoner var signalintensiteten mer stabil for dosimetrene produsert av nedkjølt LiFo enn for dosimetrene produsert av LiFo uten nedkjøling med $N_2(lq)$ (Figur 5.8). Forskjellene var signifikante og viser at nedkjøling med $N_2(lq)$ har en klart stabiliserende effekt ved bestråling med 6 MV. Nedkjølingen med $N_2(lq)$ påvirket ikke radikalutbyttet til LiFo (Figur 5.9).

Etter bestråling med 60 kV varierte SI for dosimetre oppbevart ved 34 % luftfuktighet betydelig mellom dosimetre produsert med og uten $N_2(lq)$. Dosimetrene produsert med $N_2(lq)$ har en betydelig reduksjon i SI etter cirka 55 dager, men har ellers liten variasjon i SI Figur 5.10. Hos dosimetrene produsert uten nedkjøling med $N_2(lq)$ observeres derimot ikke et betydelig fall i SI, men en tilsynelatende kontinuerlig fading opptrer etter cirka 55 dager og ut den resterende måletiden Figur 5.11. Det kan dermed virke som om nedkjøling av LiFo har en stabiliserende effekt med hensyn på fading hos dosimetre bestrålt med 60 kV og oppbevart ved 34 % luftfuktighet, men at nedkjølingen også har gjort dosimetrene mer utsatt for høye temperaturer ved oppbevaring.

Etter bestråling med 60 kV overlappet SI innenfor usikkerheten hver eneste måledag for dosimetre produsert med og uten nedkjølt LiFo, når dosimetrene var oppbevart ved 61 % luftfuktighet Figur 5.13. Nedkjøling med $N_2(lq)$ kunne dermed ikke påses å ha en stabiliserende effekt på radikalene i LiFo i denne serien (serie 6).

6.2.2 Luftfuktighet

Dosimetrene ble lagret i eksikatorer ved to forskjellige luftfuktigheter, 34 % og 61 % luftfuktighet. Dosimetre lagret ved samme luftfuktighet så ut til å følge samme mønster og, som allerede beskrevet og omtalt innledningsvis, faller signalintensitetene nesten helt parallelt ved omtrent samme dato. Detaljene i fadingmønsteret og mulige årsaker til fallet i SI, vil ikke bli diskutert på nytt her. Generelt sett var SI til dosimetrene lagret ved 34 % luftfuktighet preget av lange perioder uten signifikant fading, med enkelte unntak hvor svak fading kunne observeres på slutten av måleperioden, (ser altså her bort i fra signalfallet i juni/juli). SI til dosimetrene lagret ved 61 % luftfuktighet syntes å ha en kontinuerlig fading av varierende grad gjennom hele måleperioden. Dette stemmer overens med tidligere forsøk hvor det er vist at LiFo har betydelig mer fading når det lagres ved en luftfuktighet på rundt 60 %, enn ved lagring i en luftfuktighet på 34 % (Fetene, 2007).

6.2.3 Strålekvalitet

LiFo-dosimetre med varierende mengder parafin har blitt bestrålt med tre forskjellige strålekvaliteter, det vil si fotonstråling med energier på henholdsvis 15MV, 6 MV og 60 kV. Det har ikke blitt gjort forsøk hvor kun strålekvaliteten har variert, slik at i forsøk med ulik strålekvalitet har også andre parametre blitt variert. De fleste dosimetrene kan dermed ikke sammenlignes direkte med hensyn på strålekvalitet. Noen av dosimetrene går imidlertid igjen i flere av eksperimentene, og der de i tillegg er oppbevart sammen kan de sammenlignes direkte.

I Figur 6.2 har radikalstabiliteten til dosimetre bestrålt med 15 MV fotonstråling blitt sammenlignet med radikalstabiliteten til tilsvarende dosimetre bestrålt med 60 kV fotonstråling. Alle dosimetrene var oppbevart ved 34 % luftfuktighet. Seriene ble ikke startet ved samme dato, og x-aksen viser antall dager etter bestråling for den respektive serien. Samtlige dosimetre så ut til å følge mønsteret for dosimetre lagret ved 34 % luftfuktighet, som er blitt beskrevet tidligere: en stabil periode, før signalintensiteten faller brått, for så og stabilisere seg i den resterende måleperioden.

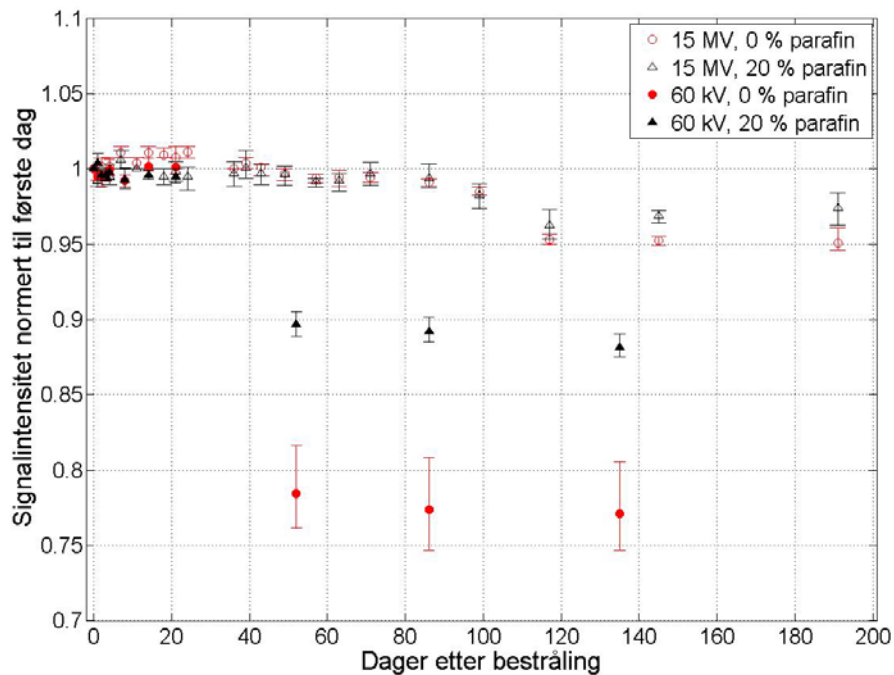
Det var imidlertid store forskjeller mellom dosimetrene bestrålt med de to strålekvalitetene i hvor mye signalintensiteten til dosimetrene falt. Dosimetrene bestrålt med 60 kV røntgen hadde et betydelig større signalintensitetsfall enn hva dosimetrene bestrålt med 15 MV fotoner hadde. Etter drøyt 130 dager var SI til 60 kV, 0 % -dosimetrene redusert til cirka 0,77, mens SI til 60 kV, 20 % -dosimetrene var på cirka 0,88. SI til 15 MV, 0 % -dosimetrene var på denne tiden redusert til cirka 0,95, mens SI til 15 MV, 20 % -dosimetrene var på cirka 0,98.

Denne observasjonen stemmer overens med at det her observeres et overflatefenomen. 60 kV røntgenstråling har en lavere gjennomtregelighet og et bredere energispektrum enn 15 MV fotonstråling. 60 kV har derfor høyere radikaltetthet nær overflaten av dosimetrene, mens 15 MV fotonstråling har en tilnærmet homogen radikalfordeling i dosimetrene. Temperaturvariasjoner vil ha størst effekt på radikaler i overflaten såfremt ikke temperaturendringen fører til at nye likevekter innstilles.

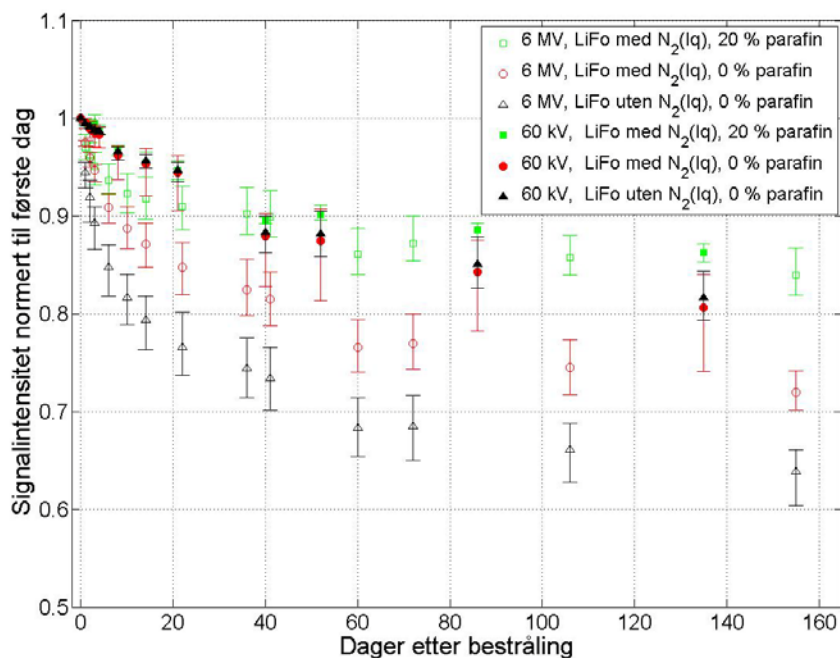
I Figur 6.3 har radikalstabiliteten til dosimetre bestrålt med 6 MV fotonstråling blitt sammenlignet med radikalstabiliteten til tilsvarende dosimetre bestrålt ved 60 kV fotonstråling. Disse dosimetrene ble lagret ved 61 % luftfuktighet, og fulgte mønsteret som beskrevet for dosimetre lagret ved denne luftfuktigheten. Figuren viser at det i begynnelsen av måleperioden (de tre første ukene etter bestråling) er en betydelig sterkere grad av fading for dosimetrene bestrålt med 6 MV enn for dosimetrene bestrålt med 60 kV. Etter 55 dager kan det derimot synes som om fadingen hos 6 MV-dosimetrene avtar, mens fadingen hos 60 kV-dosimetrene øker.

Disse observasjonene kan tyde på at radikalene i LiFo har to komponenter, hvor strålekvaliteten (stråleenergien) har betydning for fordelingen til radikalene mellom de to komponentene. Ved 34 % luftfuktighet har dosimetre bestrålt med 60 kV noe fading etter cirka 55 dager⁸, mens dosimetre bestrålt med 15 MV holder seg stabile

⁸ Dette kommer ikke frem av Figur 6.2 da nedkjølt LiFo har stor spredning og er de eneste uten signifikant fading



Figur 6.2: Sammenligning av dosimetre bestrålt med 15 MV og 60 kV. Radikalstabilitet til dosimetre bestående av LiFo og parafin, (0 % og 20 % parafinandel, 10 Gy, 34 % luftfuktighet). (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).



Figur 6.3: Sammenligning av dosimetre bestrålt med 6 MV og 60 kV. Radikalstabilitet til dosimetre bestående av LiFo preparert med og uten N₂(lq), parafin preparert med N₂(lq), (0 % og 20 % parafinandel, 10 Gy, 61 % luftfuktighet). (Gjennomsnitt av fire dosimetre med spredning).

også etter 55 dager. Ved 61 % luftfuktighet er det de første ukene etter bestråling 6 MV-dosimetrene som har mest fading, mens 60 kV-dosimetrene har mindre fading i denne perioden. Disse observasjonene kan bety at radikalkomponentene har forskjell i fading, og at radikalkomponenten med minst fading ved 34 % luftfuktighet, er den som blir mest påvirket av høy luftfuktighet.

6.3 Lavest detekterbare dose

Det ble gjort forsøk på å finne den laveste detekterbare dosen under et sett gitte forutsetninger. Dosimetre bestående av 100 % LiFo preparert med $N_2(lq)$ ble bestrålt med 6 MV fotoner og lagret ved 34 % luftfuktighet for å minimalisere radikalfading. I blant annet en artikkel av Vestad (Vestad, 2004) er det blitt antydnet at LiFo skal kunne måle doser i doseområdet under 0,1 Gy, og det ble derfor valgt å undersøke om dosebestemmelser i dette doseområdet var mulig. Dosimetrene ble gitt doser på henholdsvis 1 – 0,5 – 0,1 – 0,08 – 0,06 – 0,045 – 0,03 og 0,01 Gy. Det ble også satt en øvre grense for doseavlesning på 5 minutter, da det i klinisk sammenheng er relevant å kunne foreta nøyaktige doseavlesninger uten lange opptakstider.

Det kunne ikke observeres noe signifikant signal fra noen av dosimetrene gitt en dose på 0,1 Gy og mindre under de forutsetningene som var satt. Da denne delen av masterprosjektet ble gjennomført svært sent i den tiden som var til rådighet, ble det heller ikke gjort noen forsøk hvor kravene ble redusert.

7. Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven var å undersøke hvorvidt tilsetning av parafin som bindemiddel kan virke stabiliserende på de strålingsinduserte radikalene i LiFo. Det ble kommet frem til følgende observasjoner:

- Ved bestråling med 6 og 15 MV fotonstråling hadde parafin en stabiliserende effekt på radikalene i LiFo, og 5 % parafin var tilstrekkelig for å oppnå en stabiliserende effekt.
- For dosimetrene bestrålt med 60 kV røntgenstråling, og lagret ved 61 % luftfuktighet, hadde parafin en stabiliserende effekt kun når både LiFo og parafin ble nedkjølt med $N_2(lq)$.
- Hos dosimetrene bestrålt med 60 kV røntgenstråling, lagret ved 34 % luftfuktighet, hadde både nedkjølt og ikke-nedkjølt parafin en stabiliserende effekt kun når LiFo var preparert under nedkjøling med $N_2(lq)$.
- Alle dosimetrene lagret ved 34 % luftfuktighet (60 kV og 15 MV) hadde generelt sett ingen eller svært liten fading, sett bort fra en markant reduksjon i signalintensitet hos samtlige dosimetre i perioden juni/juli.
- Dosimetre lagret ved 61 % luftfuktighet (60 kV og 6 MV) hadde kontinuerlig fading i hele måleperioden. Dosimetrene av ren LiFo bestrålt med 6 MV hadde en signalintensitet på henholdsvis 72 % og 64 % (med og uten nedkjøling med $N_2(lq)$) etter 155 dager. Tilsetning av parafin økte signalintensiteten til 84 %.
- Å produsere dosimetrene under nedkjøling med $N_2(lq)$ viste seg å ha en stabiliserende effekt kun for dosimetrene bestrålt med 6 MV fotonstråling.

8. Tanker om videre arbeid

Eksperimentene i denne oppgaven har vist at parafin har en stabiliserende effekt ved bestråling med 6 MV og 15 MV fotonstråling. Ved 6 MV fotonstråling var fadingen fremdeles signifikant, men det ble her kun prøvd 20 % parafinandel. Ved 15 MV kunne det se ut til at lavere mengder parafin har en mer stabiliserende effekt enn 20 % parafin. Det bør derfor utprøves lavere parafinandeler (i området rundt 5 % parafin) også ved 61 % luftfuktighet.

Ved bestrålingene med 60 kV røntgenstråling var resultatene varierende. Her kan det se ut til at LiFo ikke er uproblematisk som dosimetermateriale, og det bør gjennomføres studier hvor strålingsegenskapene til LiFo ved lave strålingsenergier undersøkes.

I perioden juni/juli hadde samtlige dosimetre en reduksjon i SI som kan komme fra de høye temperaturene i denne tidsperioden. Det bør derfor gjøres forsøk for å kartlegge hvilken påvirkning høye temperaturer har på LiFo.

I oppgaven ble det forsøkt å finne en lavest detekterbar dose under et sett forutsetninger. Det er i tidligere studier antatt at doser under 0,1 skal kunne detekteres med LiFo, og det ble derfor valgt å undersøke doseområdet under 0,1 Gy. Det ble også valgt å ha en maksimal total opptakstid på 5 minutt, men det kunne ikke observeres noe signifikant signal fra noen av dosimetrene gitt en dose på 0,1 Gy. Det kan likevel tenkes at doser under 0,1 Gy kan kunne måles om man øker den totale opptakstiden betraktelig, og bruker med tid på få frem et signal. Det bør derfor gjennomføres videre studier for å finne den lavest detekterbare dosen.

Kildeliste

- Attix, F. H. 1986.** *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- Bergstrand, E. S., Bjerke, H. og Hole, E. O. 2005.** An experimental investigation of the electron energy dependence of the EPR alanine dosimetry system. *Radiation Measurements*. 2005, Vol. 39, ss. 21-28.
- Bergstrand, E. S., Shortt, K. R., Ross, C. K., Hole, E. O. 2003.** An investigation of the photon energy dependence of the EPR alanine dosimetry system. *Physics in Medicine and Biology*. 2003, Vol. 48, ss. 1753-1771.
- Bradshaw, W. W., Cadena, D. G., Crawford, G. W., Spetzler, H. A. W. 1962.** The use of alanine as a solid dosimeter. *Radiat. Res.* 1962, Vol. 17, ss. 11-21.
- Ciesielski, B., et al. 2004.** EPR study of light illumination effects on radicals in gamma-irradiated L-alanine. *Spectrochimica Acta Part A*. 2004, Vol. 60, ss. 1327-1333.
- Corvaja, C. 2009.** Introduction to Electron Paramagnetic Resonance. [bokforf.] M. Brustolon og E. Giamello. *Electron Paramagnetic Resonance, a practitioner's tollkit*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- Dance, D. og Carlsson, G. A. 2007.** Interactions of photons with matter. [bokforf.] P., Nahum, A., Rosenwald, J. C. Mayles. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practice*. s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- Desrosiers, M. F., Puhl, J. M. og Cooper, S. L. 2008.** An absorbed-dose/dose-rate dependence for the alanine-EPR dosimetry system and its implications in high-dose ionizing radiation metrology. *Journal of research of the national institute of standards and technology*. 2008, Vol. 113, ss. 79-95.

Fetene, D. A. 2007. *Solid state EPR dosimetry using lithium formate: Effects of sample preparation, environmental conditions and radiation quality on the radiation induced radical stability.* s.l. : Masteroppgave, Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo, 2007.

Gjøvik, M. E., Grøvik, E. og Paulsen, K. 2007. Strålingsdosimetri for kliniske anvendelser. Universitetet i Oslo : Labprosjekt, 2007.

Greener, T., 2007. Kilovoltage X-Ray Units. [bokforf.] P., Nahum, A., Rosenwald, J. c. Mayles. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practice.* s.l. : Taylor & Francis, LLC, 2007.

Hole, E. O. 2009. *Personlig kommunikasjon.* Universitetet i Oslo : s.n., 2009.

Höfer, P. 2009. Basic Experimental Methods in Continuous Wave Electron Paramagnetic Resonance. [bokforf.] M. Brustolon og E. Giamello. *Electron Paramagnetic Resonance: A practitioner's toolkit.* Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2009.

Ikeya, M. and Hassan, G. M., Sasaoka, H., Kinoshita, Y., Takaki, S., Yamanaka, C. 2000. Strategy for finding new materials for ESR dosimetry. *Appl. Radiat. Isot.* 2000, Vol. 52, pp. 1209-1215.

Kudoh, H., et al. 1997. Response of alanine dosimeters at very high dose rate. *Appl. Radiat. Isot.* 1997, Vol. 48, ss. 497-499.

Loverock, L., 2007. Linear Accelerators. [bokforf.] P., Nahum, A., Rosenwald, J. C. Mayles. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practice.* s.l. : Taylor & Francis, LLC, 2007.

Lund, A., Olsson, S., Bonora, M., Lund, E., Gustafsson, H. 2002. New materials for ESR dosimetry. *Spectrochimica Acta Part A.* 2002, Vol. 58, ss. 1301-1311.

Lund, E., Gustafsson, H., Danilczuk, M., Sastry, M. D., Lund, A., og Vestad, T. A., Malinen, E., Hole, E. O., Sagstuen, E. 2005. Formates and dithionates: sensitive

EPR-dosimeter materials for radiation therapy. *Appl. Radiat. Isot.* 2005, Vol. 62, ss. 317-324.

Malinen, E., Waldeland, E., Hole, E.O., Sagstuen, E. 2007. The energy dependence of lithium formate EPR dosimeters for clinical electron beams. *Physics in Medicine and Biology.* 2007, Vol. 52, 4361-4369.

Mayles, P., Nahum, A. og Rosenwald, J. C. 2007. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practise.* s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

Metha, K. og Girzikowsky, R. 2000. IAEA high-dose intercomparison in ^{60}Co field. *Appl. Radiat. Isot.* 2000, Vol. 52, ss. 1179-1184.

Nahum, A. 2007. Principles and basic concepts in radiation dosimetry. [bokforf.] P. Mayles, A. Nahum og J. C. Rosenwald. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practice.* s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

Nowotny, R. 1998. *XMuDAt: photon Attenuation Data (v.1.0.1).* s.l. : University of Vienna, Austria, 1998.

Regulla, D. F. 2005. ESR spectrometry: a future-oriented tool for dosimetry and dating. *Appl. Radiat. Isot.* 2005, Vol. 62, ss. 117-127.

Regulla, D. F. og Deffner, U. 1982. Dosimetry by ESR Spectroscopy of Alanine. *Appl. Radiat. Isot.* 1982, Vol. 33, ss. 1101-1114.

Rockland, L. B. 1960. Saturated Salt Solutions for Static Control of Relative Humidity between 5 degree and 40 degree C. *Anal. Chem.* 1960, Vol. 32, ss. 1375-1376.

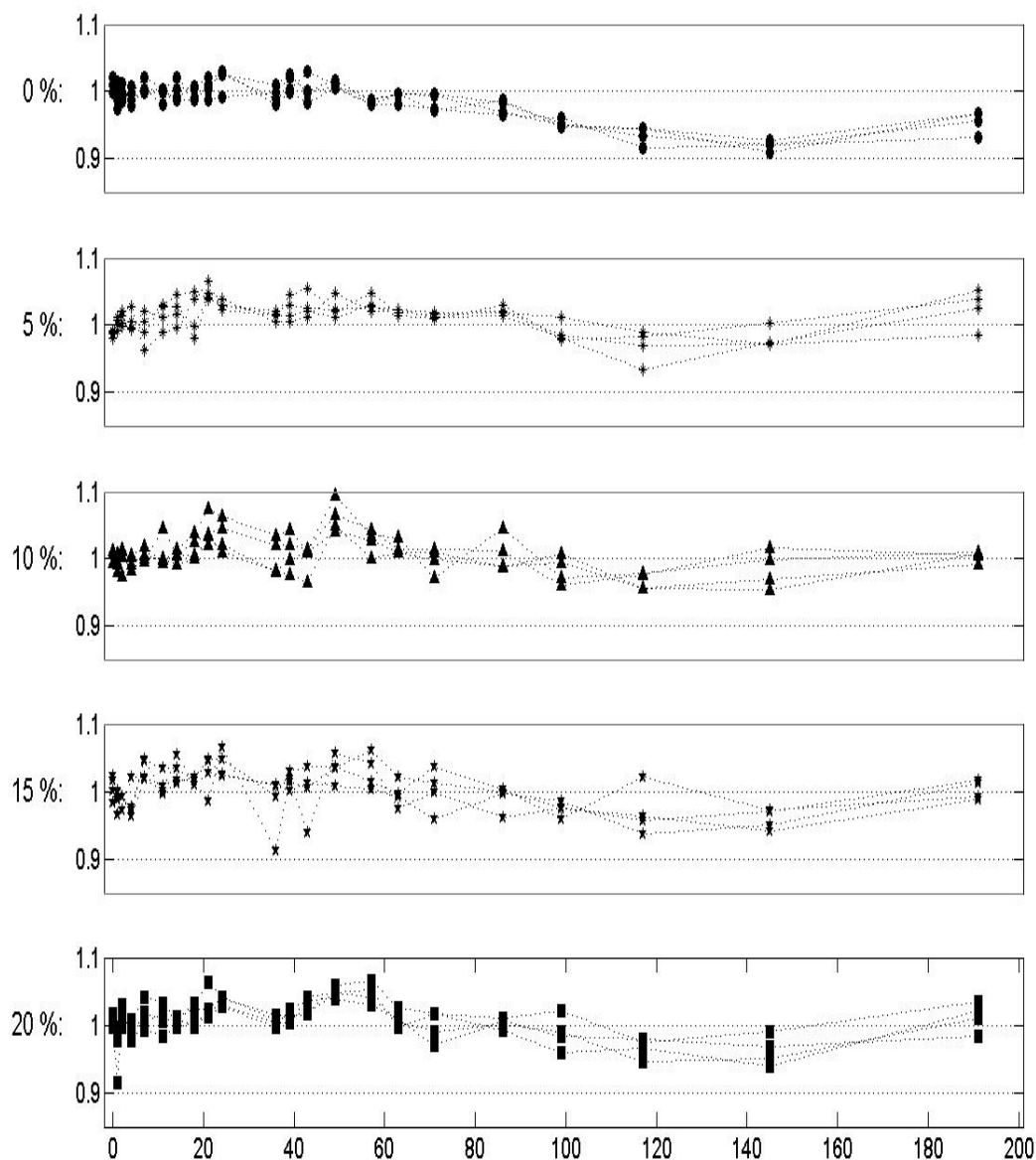
Sagstuen, E., Hole, E. O. 2009. Radiation produced radicals. [bokforf.] M., Giamello, E. Brustolon. *Electron paramagnetic resonance, a practitioner's toolkit.* Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2009.

-
- Sagstuen, E., Theisen, H. og Henriksen, T. 1983.** Dosimetry by ESR spectroscopy following a radiation accident. *Health Phys.* 1983, Vol. 45, ss. 961-968.
- Sleptchonok, O. F., Nagy, V. og Desrosiers, M. F. 2000.** Advancements in accuracy of the alanine dosimetry system. Part 1. The effects of environmental humidity. *Radiation Physics and Chemistry.* 2000, Vol. 57, ss. 115-133.
- Steel, G. 2007.** Radiobiology of normal tissues. [bokforf.] P., Nahum, A., Rosenwald, J. C. Mayles. *Handbook of radiotherapy physics, theory and practise.* s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- Vestad, T. A. 2005.** *On the development of a solid-state, low dose EPR dosimeter for radiotherapy.* s.l. : Doktorgradsavhandling, matematisk naturvitenskapelig fakultet, Universitetet i Oslo, 2005.
- Vestad, T. A., et al. 2004.** Radiation-induced radicals in lithium formate monohydrate (LiHCO₂H₂O). EPR and ENDOR studies of x-irradiated crystal and polycrystalline samples. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2004, Vol. 6, ss. 3017-3022.
- Vestad, T. A., Malinen, E., Lund, A., Hole, E. O., Sagstuen, E. 2003.** EPR dosimetric properties of formates. *Appl. Radiat. Isot.* 2003, Vol. 59, ss. 181-188.
- Vestad, T.A., Malinen, E., Olsen, D.R., Hole, E.O., Sagstuen, E. 2004.** Electron paramagnetic resonance (EPR) dosimetry using lithium formate in radiotherapy: comparison with thermoluminescence (TL) dosimetry using lithium fluoride rods. *Physics in Medicine and Biology.* 2004, Vol. 49, 4701-4715.
- Weil, J. A. og Bolton, J. R. 2007.** Instrumentation and technical performance. *Electron Paramagnetic Resonance.* 2. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Zavoiski, E. 1945.** Paramagnetic relaxation of liquid solutions for perpendicular fields. *J. Phys. USSR.* 1945, Vol. 9, ss. 211-217.

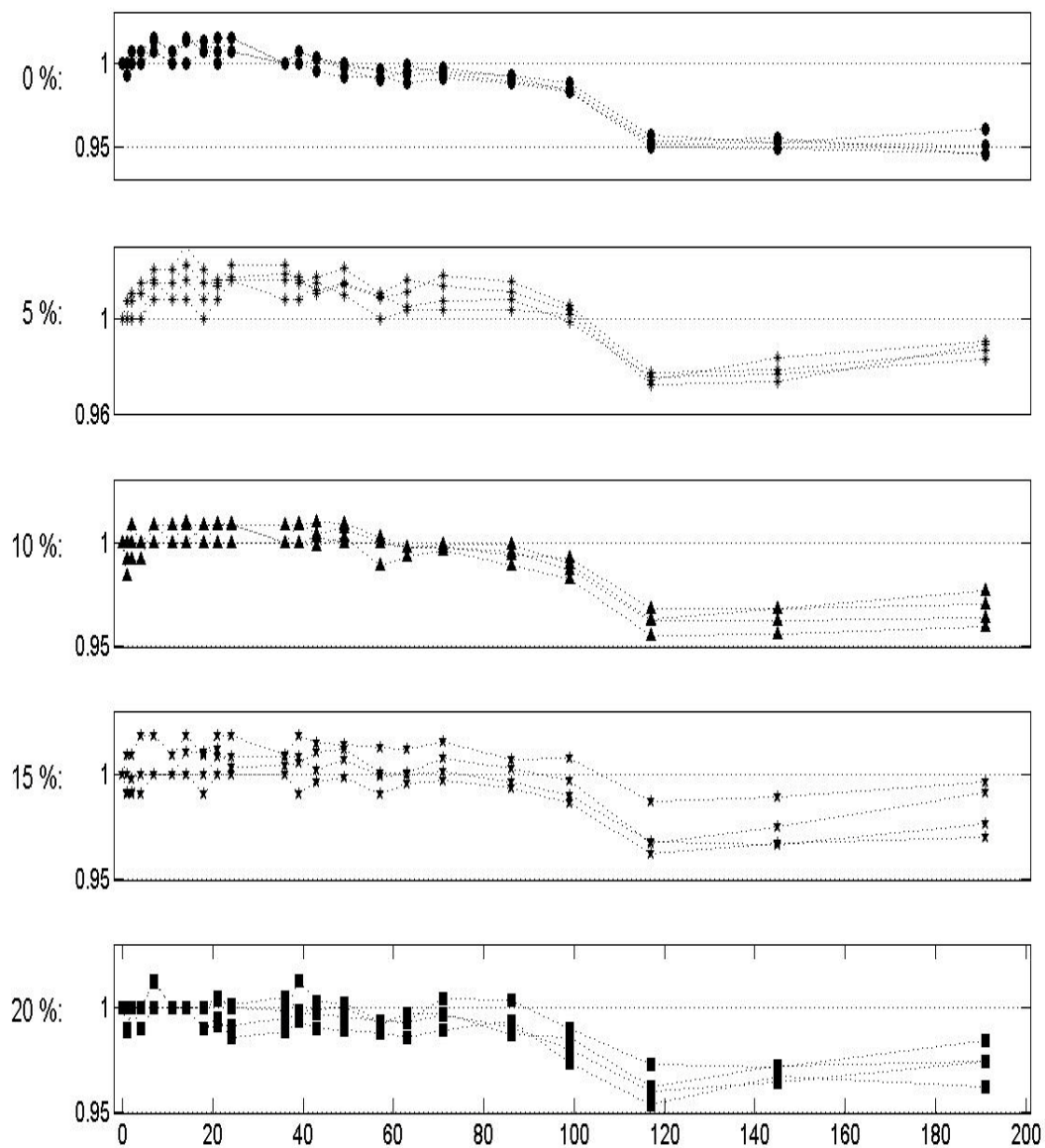
Appendix

A: Radikalstabilitet til hvert enkelt dosimeter

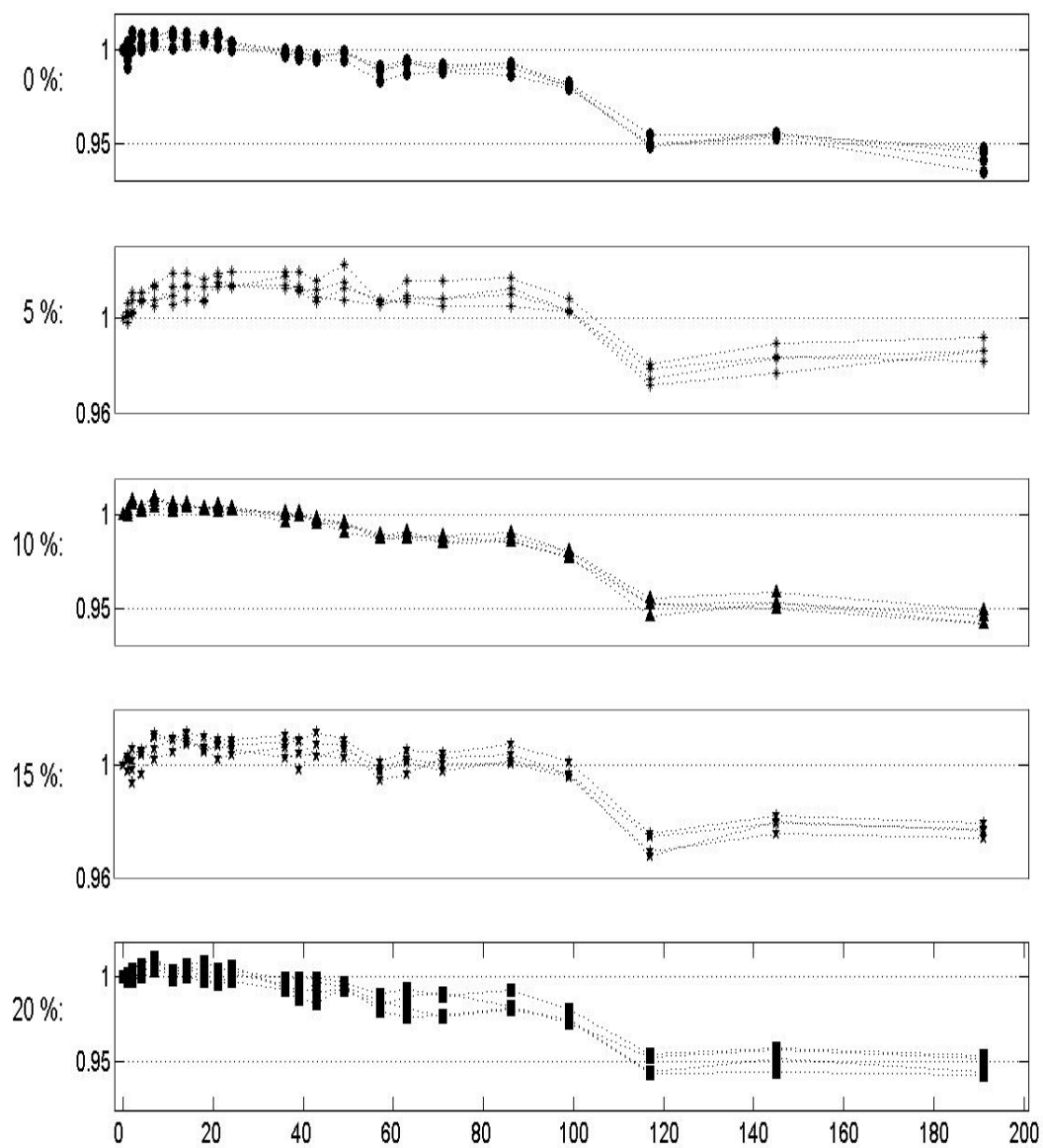
Serie 1: 1 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet



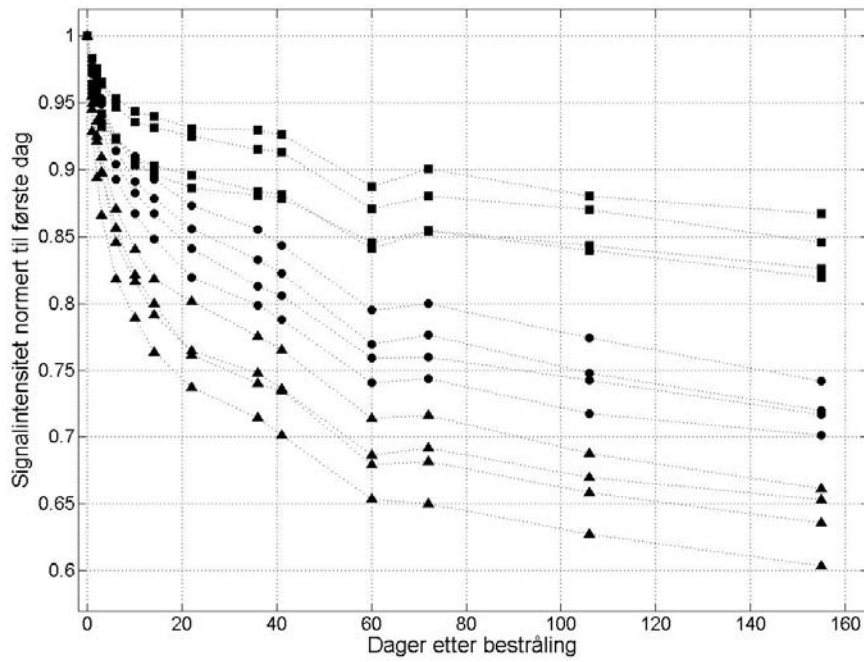
Figur A.1: Radikalstabilitet til samtlige dosimetre fra serie 1 (15 MV, 1 Gy, 34 % luftfuktighet) bestående av varierende andeler LiFo og parafin.

Serie 2: 10 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

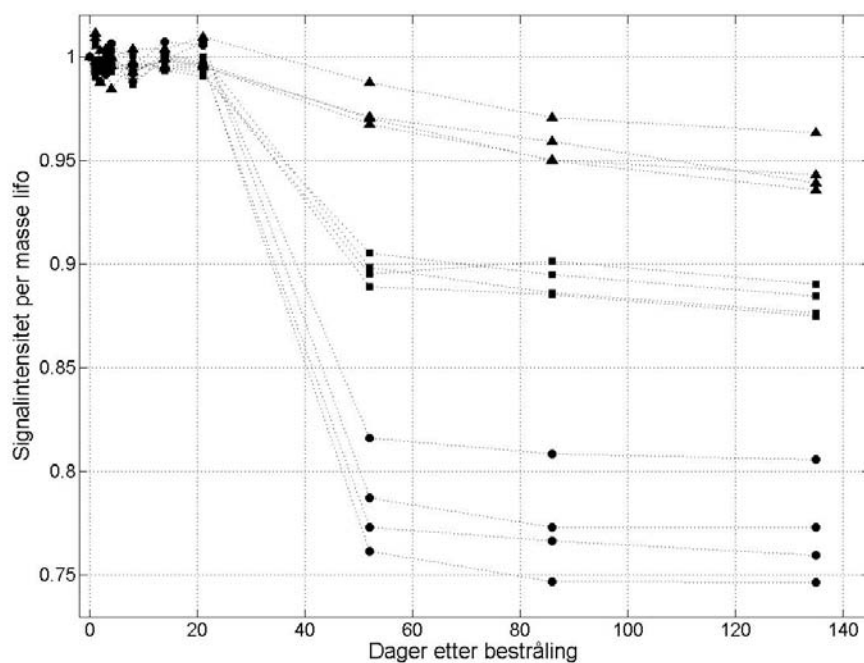
Figur A.2: Radikalstabilitet til samtlige dosimetre fra serie 2 (15 MV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet) bestående av varierende andeler LiFo og parafin.

Serie 3: 100 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

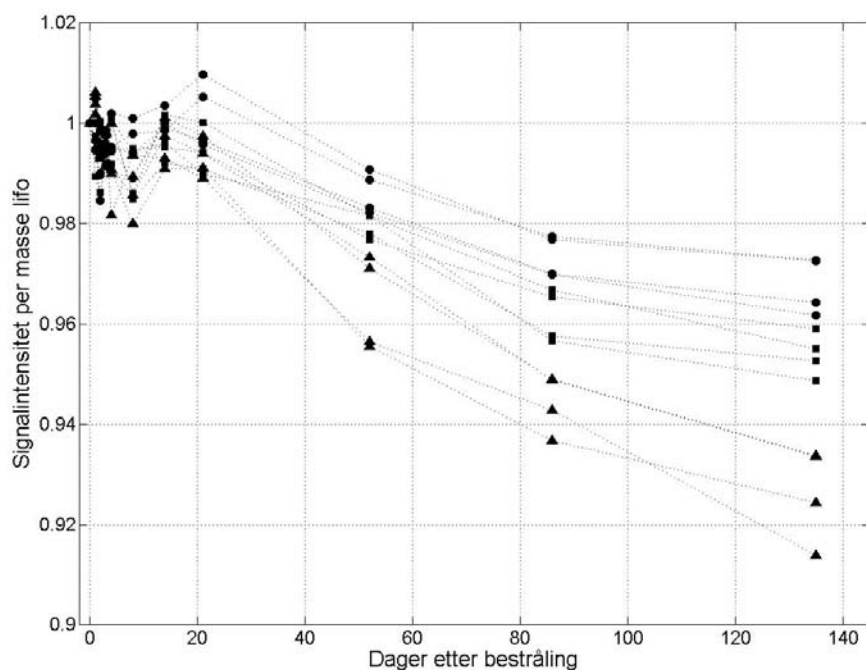
Figur A.3: Radikalstabilitet til samtlige dosimetre fra serie 3 (15 MV, 100 Gy, 34 % luftfuktighet) bestående av varierende andeler LiFo og parafin.

Serie 4: 10 Gy, 6 MV, 61 % luftfuktighet

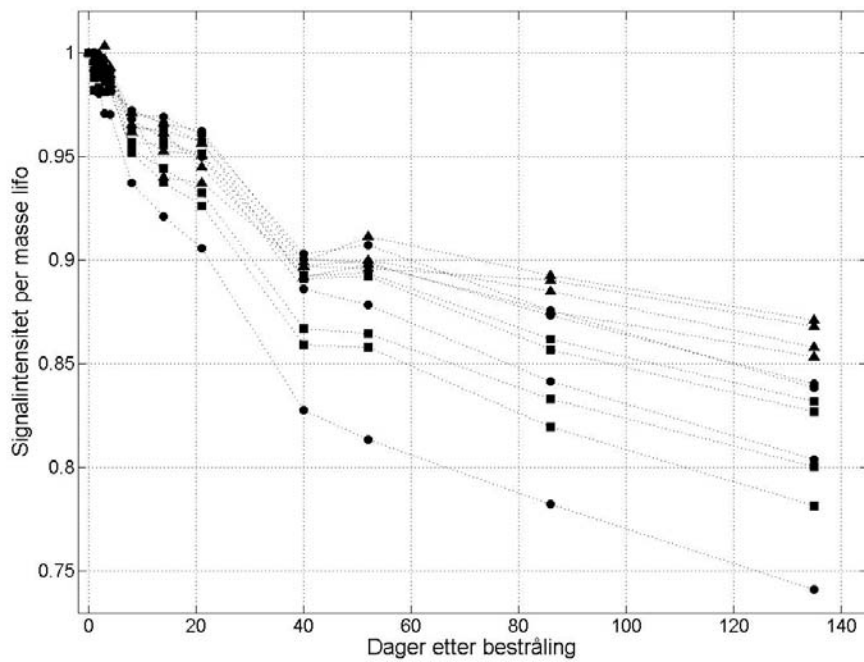
Figur A.4: Radikalstabilitet til samtlige dosimetre fra serie 4 (6 MV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet).

Serie 5: 10 Gy, 60 kV, 34 % luftfuktighet

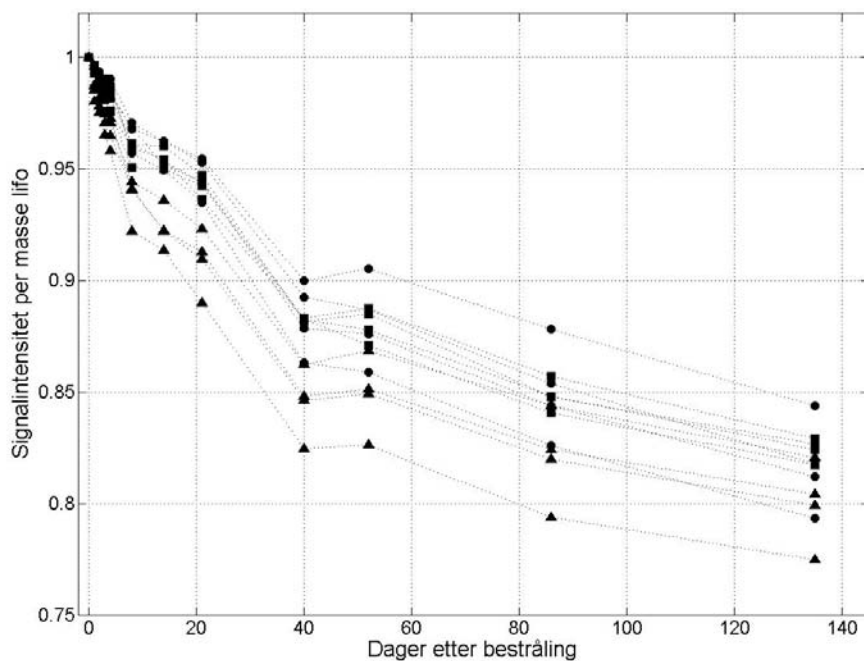
Figur A.5: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 5 (60 kV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert med nedkjøling med N₂(lq).



Figur A.6: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 5 (60 kV, 10 Gy, 34 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert uten nedkjøling med N₂(lq).

Serie 6: 10 Gy, 60 kV, 61 % luftfuktighet

Figur A.7: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 6 (60 kV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert med nedkjøling med N₂(lq).



Figur A.8: Radikalstabilitet til dosimetre fra serie 6 (60 kV, 10 Gy, 61 % luftfuktighet) produsert av LiFo preparert med nedkjøling med N₂(lq).

B: Måldata

Serie 1: 1 Gy, 15 MV, 34 % Luftfuktighet

	0	1	2	4	7	11	14	18	21	24	36	39	43	49	57	63	71	86	99	117	145	191
0%-1	1,395	1,331	1,383	1,348	1,370	1,340	1,370	1,375	1,395	1,400	1,330	1,370	1,407	1,378	1,349	1,360	1,357	1,324	1,295	1,289	1,241	1,321
0%-2	1,109	1,107	1,091	1,106	1,135	1,115	1,135	1,082	1,115	1,145	1,090	1,110	1,092	1,117	1,089	1,089	1,083	1,072	1,067	1,017	1,022	1,034
0%-3	1,347	1,356	1,332	1,310	1,337	1,342	1,320	1,320	1,330	1,370	1,330	1,366	1,337	1,346	1,313	1,334	1,332	1,314	1,273	1,230	1,231	1,279
0%-4	1,356	1,316	1,312	1,341	1,330	1,330	1,323	1,337	1,315	1,324	1,330	1,360	1,334	1,355	1,316	1,326	1,293	1,314	1,262	1,257	1,235	1,289
5%-1	1,235	1,235	1,241	1,239	1,272	1,259	1,265	1,220	1,295	1,280	1,272	1,277	1,275	1,273	1,277	1,273	1,260	1,262	1,219	1,162	1,211	1,276
5%-2	1,182	1,214	1,222	1,197	1,211	1,240	1,280	1,265	1,248	1,235	1,225	1,260	1,269	1,230	1,263	1,227	1,225	1,228	1,218	1,193	1,171	1,268
5%-3	1,173	1,185	1,207	1,215	1,143	1,172	1,176	1,226	1,257	1,213	1,204	1,201	1,207	1,198	1,219	1,200	1,195	1,218	1,159	1,164	1,188	1,228
5%-4	1,307	1,340	1,328	1,330	1,312	1,360	1,360	1,322	1,385	1,375	1,333	1,330	1,338	1,385	1,349	1,354	1,347	1,351	1,304	1,283	1,286	1,303
10%-1	1,235	1,201	1,239	1,232	1,220	1,280	1,230	1,255	1,270	1,281	1,254	1,250	1,241	1,304	1,279	1,243	1,243	1,239	1,176	1,196	1,244	1,230
10%-2	1,017	0,998	0,980	1,008	1,025	1,000	1,021	1,045	1,080	1,071	1,037	1,052	1,017	1,102	1,040	1,039	0,977	1,052	0,977	0,985	1,004	1,016
10%-3	1,207	1,209	1,202	1,179	1,204	1,203	1,190	1,201	1,240	1,210	1,180	1,170	1,158	1,259	1,199	1,211	1,210	1,185	1,207	1,146	1,163	1,189
10%-4	1,246	1,246	1,270	1,244	1,263	1,254	1,238	1,239	1,275	1,276	1,234	1,245	1,265	1,303	1,288	1,265	1,252	1,241	1,247	1,198	1,196	1,262
15%-1	0,830	0,789	0,795	0,834	0,835	0,823	0,834	0,833	0,805	0,866	0,745	0,832	0,768	0,863	0,851	0,795	0,815	0,785	0,796	0,787	0,769	0,808
15%-2	1,098	1,116	1,111	1,091	1,170	1,115	1,130	1,141	1,170	1,173	1,113	1,150	1,159	1,159	1,134	1,115	1,158	1,120	1,073	1,140	1,087	1,108
15%-3	1,126	1,101	1,092	1,062	1,123	1,100	1,164	1,111	1,130	1,125	1,110	1,101	1,113	1,107	1,103	1,092	1,055	1,095	1,084	1,031	1,045	1,113
15%-4	0,976	0,964	0,969	0,953	1,018	1,012	1,011	0,993	1,020	1,001	0,985	0,991	0,981	1,011	1,035	0,996	0,989	0,976	0,953	0,933	0,946	0,993
20%-1	1,168	1,064	1,196	1,173	1,214	1,200	1,170	1,200	1,235	1,210	1,182	1,181	1,181	1,230	1,239	1,191	1,182	1,174	1,187	1,132	1,150	1,203
20%-2	1,064	1,063	1,098	1,050	1,062	1,050	1,065	1,070	1,083	1,100	1,072	1,074	1,112	1,118	1,124	1,064	1,086	1,059	1,024	1,031	1,002	1,090
20%-3	1,103	1,061	1,083	1,085	1,088	1,105	1,100	1,111	1,113	1,132	1,095	1,100	1,104	1,137	1,131	1,093	1,074	1,088	1,075	1,026	1,033	1,096
20%-4	1,114	1,108	1,124	1,090	1,135	1,122	1,125	1,110	1,144	1,145	1,110	1,144	1,155	1,158	1,149	1,124	1,081	1,121	1,095	1,091	1,079	1,096

Serie 2: 10 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

	0	1	2	4	7	11	14	18	21	24	36	39	43	49	57	63	71	86	99	117	145	191	
0%-1	1,37	1,36	1,37	1,37	1,38	1,37	1,37	1,38	1,37	1,38	1,37	1,37	1,36	1,36	1,36	1,35	1,36	1,35	1,35	1,30	1,30	1,30	1,30
0%-2	1,33	1,33	1,33	1,34	1,35	1,34	1,35	1,34	1,34	1,35	1,33	1,33	1,33	1,33	1,32	1,33	1,32	1,32	1,31	1,27	1,27	1,26	1,26
0%-3	1,44	1,44	1,45	1,44	1,46	1,45	1,46	1,45	1,45	1,45	1,44	1,45	1,44	1,44	1,44	1,43	1,43	1,43	1,42	1,38	1,37	1,37	1,37
0%-4	1,33	1,33	1,33	1,33	1,34	1,33	1,35	1,34	1,35	1,33	1,33	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,33	1,32	1,31	1,27	1,27	1,27	1,28
5%-1	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	0,96	0,96	0,96	0,97
5%-2	1,24	1,24	1,24	1,24	1,26	1,25	1,26	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26	1,25	1,26	1,25	1,25	1,25	1,25	1,24	1,21	1,21	1,21	1,22
5%-3	1,34	1,35	1,35	1,36	1,36	1,36	1,37	1,36	1,36	1,37	1,37	1,36	1,36	1,37	1,35	1,36	1,36	1,35	1,34	1,31	1,32	1,32	1,33
5%-4	1,27	1,27	1,27	1,27	1,28	1,28	1,28	1,27	1,28	1,29	1,28	1,28	1,29	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,24	1,24	1,24	1,26
10%-1	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,06	1,05	1,02	1,02	1,02	1,03
10%-2	1,25	1,24	1,26	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,25	1,25	1,25	1,24	1,24	1,21	1,21	1,21	1,21
10%-3	0,27	1,25	1,26	1,26	1,28	1,27	1,27	1,28	1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,25	1,22	1,22	1,22	1,22
10%-4	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,08	1,09	1,08	1,09	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,04	1,04	1,04	1,06
15%-1	1,11	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,10	1,11	1,11	1,11	1,10	1,11	1,11	1,10	1,11	1,11	1,10	1,10	1,07	1,07	1,07	1,08
15%-2	1,20	1,19	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,21	1,21	1,20	1,21	1,20	1,20	1,20	1,20	1,19	1,16	1,16	1,16	1,17
15%-3	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,94	0,93	0,93	0,90	0,91	0,91	0,92
15%-4	1,10	1,11	1,11	1,12	1,11	1,11	1,12	1,11	1,12	1,12	1,11	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,12	1,11	1,11	1,09	1,09	1,09	1,10
20%-1	0,81	0,81	0,81	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,81	0,81	0,80	0,79	0,79	0,79	0,80
20%-2	0,86	0,85	0,86	0,86	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,86	0,86	0,85	0,85	0,83	0,84	0,84	0,84
20%-3	0,97	0,96	0,97	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,95	0,93	0,94	0,94	0,95
20%-4	0,97	0,96	0,97	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,92	0,94	0,94	0,93

Serie 3: 100 Gy, 15 MV, 34 % luftfuktighet

	0	1	2	4	7	11	14	18	21	24	36	39	43	49	57	63	71	86	99	117	145	191	
0%-1	1,070	1,060	1,070	1,070	1,079	1,080	1,075	1,076	1,077	1,074	1,067	1,069	1,067	1,069	1,058	1,064	1,058	1,060	1,060	1,030	1,016	1,022	1,011
0%-2	0,929	0,927	0,935	0,932	0,934	0,936	0,934	0,933	0,936	0,933	0,929	0,926	0,924	0,929	0,919	0,923	0,920	0,922	0,911	0,881	0,887	0,874	0,874
0%-3	1,000	1,004	1,010	1,008	1,009	1,010	1,009	1,007	1,009	1,004	1,000	0,998	0,996	0,999	0,992	0,995	0,992	0,993	0,982	0,954	0,955	0,947	0,947
0%-4	0,986	0,981	0,986	0,987	0,989	0,987	0,989	0,990	0,988	0,986	0,985	0,982	0,980	0,980	0,970	0,974	0,974	0,973	0,966	0,937	0,939	0,922	0,922
5%-1	0,900	0,900	0,901	0,906	0,906	0,908	0,912	0,911	0,911	0,912	0,912	0,912	0,911	0,907	0,906	0,904	0,908	0,907	0,911	0,902	0,880	0,885	0,883
5%-2	1,003	1,005	1,010	1,010	1,008	1,016	1,016	1,010	1,018	1,016	1,015	1,015	1,014	1,018	1,008	1,011	1,011	1,013	1,006	0,977	0,986	0,989	0,989
5%-3	0,948	0,946	0,950	0,954	0,960	0,953	0,955	0,954	0,964	0,960	0,964	0,958	0,954	0,960	0,955	0,954	0,952	0,953	0,930	0,921	0,926	0,935	0,935
5%-4	0,989	0,995	0,999	0,999	1,002	1,007	1,007	1,005	1,007	1,008	1,008	1,008	1,004	1,011	0,996	1,004	1,004	1,004	1,006	0,996	0,970	0,978	0,981
10%-1	0,852	0,851	0,857	0,856	0,860	0,855	0,857	0,854	0,856	0,854	0,852	0,853	0,848	0,848	0,841	0,842	0,842	0,844	0,835	0,811	0,812	0,805	0,805
10%-2	0,802	0,804	0,808	0,804	0,808	0,807	0,805	0,805	0,805	0,805	0,802	0,801	0,800	0,799	0,792	0,795	0,789	0,790	0,784	0,763	0,761	0,755	0,755
10%-3	0,833	0,832	0,840	0,835	0,836	0,834	0,836	0,834	0,834	0,835	0,834	0,832	0,831	0,829	0,824	0,823	0,823	0,821	0,814	0,787	0,793	0,784	0,784
10%-4	0,836	0,837	0,841	0,840	0,844	0,841	0,840	0,839	0,841	0,839	0,833	0,837	0,833	0,828	0,825	0,826	0,824	0,826	0,820	0,798	0,801	0,793	0,793
15%-1	0,815	0,813	0,820	0,818	0,824	0,823	0,824	0,819	0,821	0,821	0,821	0,822	0,818	0,817	0,813	0,816	0,813	0,816	0,812	0,789	0,799	0,796	0,796
15%-2	0,781	0,782	0,780	0,785	0,783	0,785	0,787	0,786	0,783	0,784	0,786	0,780	0,787	0,787	0,777	0,779	0,783	0,784	0,779	0,761	0,765	0,763	0,763
15%-3	0,817	0,818	0,818	0,821	0,825	0,824	0,826	0,825	0,824	0,824	0,825	0,824	0,826	0,824	0,818	0,821	0,820	0,823	0,818	0,797	0,802	0,800	0,800
15%-4	0,754	0,756	0,749	0,752	0,758	0,761	0,760	0,758	0,759	0,758	0,756	0,757	0,756	0,755	0,753	0,755	0,754	0,754	0,730	0,731	0,735	0,734	0,734
20%-1	0,810	0,812	0,814	0,817	0,820	0,813	0,816	0,818	0,814	0,813	0,810	0,810	0,810	0,808	0,802	0,805	0,801	0,804	0,795	0,773	0,776	0,773	0,773
20%-2	0,747	0,747	0,748	0,748	0,756	0,746	0,752	0,749	0,750	0,752	0,742	0,742	0,741	0,741	0,734	0,739	0,740	0,734	0,727	0,712	0,715	0,711	0,711
20%-3	0,750	0,749	0,749	0,751	0,758	0,752	0,755	0,750	0,747	0,752	0,747	0,742	0,748	0,746	0,740	0,736	0,733	0,736	0,731	0,708	0,708	0,707	0,707
20%-4	0,758	0,756	0,760	0,758	0,761	0,760	0,758	0,756	0,755	0,756	0,752	0,748	0,746	0,753	0,742	0,740	0,741	0,744	0,739	0,715	0,721	0,715	0,715

Serie 4: 10 Gy, 6 MV, 61 % luftfuktighet

LiFo/Parafin (N = Med N₂(lq), U=Uten N₂(lq)) – Andel parafin.

	0	1	2	3	6	10	14	22	36	41	60	72	106	155
N/- 0% 1	1,257	1,229	1,206	1,193	1,137	1,109	1,090	1,057	1,022	1,013	0,954	0,955	0,933	0,901
N/- 0% 2	1,338	1,300	1,272	1,252	1,194	1,160	1,134	1,097	1,068	1,054	0,991	0,995	0,960	0,938
N/- 0% 3	1,231	1,199	1,189	1,173	1,125	1,097	1,081	1,054	1,025	1,013	0,948	0,956	0,921	0,887
N/- 0% 4	1,248	1,218	1,201	1,188	1,153	1,136	1,114	1,090	1,068	1,052	0,992	0,999	0,966	0,926
N/N 20% 1	1,089	1,043	1,039	1,016	1,006	0,984	0,977	0,965	0,959	0,957	0,921	0,931	0,918	0,900
N/N 20% 2	1,172	1,130	1,114	1,104	1,081	1,065	1,059	1,050	1,036	1,033	0,986	1,001	0,984	0,960
N/N 20% 3	0,942	0,920	0,919	0,910	0,898	0,889	0,886	0,877	0,876	0,873	0,836	0,848	0,829	0,817
N/N 20% 4	1,131	1,112	1,098	1,090	1,071	1,059	1,054	1,046	1,036	1,033	0,985	0,996	0,985	0,957
U/- 0% 1	0,998	0,948	0,923	0,896	0,844	0,815	0,790	0,763	0,747	0,735	0,686	0,690	0,669	0,652
U/- 0% 2	1,124	1,062	1,035	1,009	0,962	0,923	0,899	0,856	0,832	0,826	0,764	0,766	0,740	0,715
U/- 0% 3	1,179	1,095	1,054	1,021	0,965	0,930	0,900	0,869	0,842	0,827	0,771	0,766	0,740	0,712
U/- 0% 4	1,354	1,293	1,268	1,232	1,179	1,138	1,108	1,086	1,050	1,037	0,967	0,970	0,931	0,896

Serie 5: 10 Gy, 60 kV, 34 % luftfuktighet

LiFo/Parafin (N = Med N₂(lq), U=Uten N₂(lq)) – Andel parafin.

	0	1	2	3	4	8	14	21	52	86	135
N/- 0% 1	1,432	1,421	1,415	1,420	1,427	1,415	1,432	1,427	1,108	1,098	1,088
N/- 0% 2	1,487	1,477	1,483	1,481	1,480	1,477	1,485	1,497	1,171	1,150	1,150
N/- 0% 3	1,468	1,461	1,465	1,472	1,477	1,462	1,479	1,476	1,199	1,187	1,183
N/- 0% 4	1,579	1,576	1,572	1,571	1,578	1,566	1,581	1,574	1,203	1,180	1,179
N/U 20% 1	1,137	1,134	1,133	1,131	1,132	1,133	1,132	1,133	1,103	1,080	1,064
N/U 20% 2	1,201	1,198	1,186	1,200	1,201	1,192	1,200	1,195	1,166	1,152	1,128
N/U 20% 3	0,859	0,867	0,855	0,862	0,859	0,862	0,862	0,867	0,848	0,834	0,828
N/U 20% 4	1,067	1,079	1,070	1,064	1,050	1,064	1,061	1,062	1,032	1,014	1,006
N/N 20% 1	0,880	0,888	0,879	0,880	0,879	0,868	0,879	0,880	0,790	0,780	0,771
N/N 20% 2	1,034	1,040	1,027	1,026	1,027	1,022	1,032	1,030	0,920	0,916	0,905
N/N 20% 3	0,831	0,839	0,826	0,826	0,833	0,831	0,825	0,823	0,752	0,744	0,735
N/N 20% 4	0,979	0,970	0,977	0,975	0,974	0,974	0,974	0,972	0,877	0,883	0,872
U/- 0% 1	1,361	1,354	1,347	1,349	1,353	1,346	1,361	1,355	1,337	1,320	1,309
U/- 0% 2	1,427	1,422	1,405	1,418	1,420	1,419	1,426	1,422	1,403	1,384	1,376
U/- 0% 3	1,425	1,425	1,423	1,423	1,428	1,426	1,430	1,439	1,412	1,392	1,386
U/- 0% 4	1,505	1,497	1,490	1,501	1,498	1,502	1,503	1,513	1,488	1,471	1,464
U/U 20% 1	0,866	0,871	0,860	0,858	0,866	0,853	0,863	0,861	0,843	0,821	0,808
U/U 20% 2	0,982	0,985	0,976	0,980	0,964	0,975	0,975	0,971	0,939	0,926	0,897
U/U 20% 3	1,034	1,039	1,027	1,032	1,024	1,023	1,035	1,031	1,004	0,981	0,965
U/U 20% 4	0,977	0,979	0,974	0,973	0,969	0,958	0,969	0,969	0,934	0,916	0,904
U/N 20% 1	0,951	0,951	0,951	0,947	0,952	0,946	0,947	0,942	0,934	0,910	0,902
U/N 20% 2	0,941	0,931	0,928	0,936	0,933	0,926	0,933	0,932	0,920	0,901	0,896
U/N 20% 3	0,875	0,880	0,876	0,869	0,876	0,863	0,877	0,876	0,859	0,846	0,836
U/N 20% 4	0,913	0,910	0,911	0,911	0,908	0,908	0,908	0,907	0,891	0,881	0,875

Serie 6: 10 Gy, 60 kV, 61 % luftfuktighet

LiFo/Parafin (N = Med N₂(lq), U=Uten N₂(lq)) – Andel parafin.

	0	1	2	3	4	8	14	21	40	52	86	135
N/- 0% 1	1,186	1,174	1,163	1,151	1,151	1,112	1,092	1,074	0,982	0,965	0,928	0,879
N/- 0% 2	1,474	1,474	1,470	1,458	1,460	1,427	1,413	1,400	1,306	1,295	1,241	1,185
N/- 0% 3	1,296	1,295	1,282	1,281	1,274	1,260	1,252	1,247	1,167	1,165	1,132	1,089
N/- 0% 4	1,351	1,346	1,339	1,342	1,340	1,311	1,310	1,297	1,220	1,226	1,183	1,133
N/U 20% 1	1,184	1,171	1,164	1,162	1,164	1,127	1,110	1,097	1,018	1,016	0,970	0,925
N/U 20% 2	0,963	0,945	0,947	0,951	0,950	0,928	0,927	0,921	0,858	0,859	0,825	0,796
N/U 20% 3	1,200	1,186	1,177	1,177	1,178	1,144	1,133	1,119	1,041	1,037	1,000	0,961
N/U 20% 4	1,238	1,227	1,224	1,224	1,220	1,185	1,183	1,178	1,105	1,107	1,067	1,030
N/N 20% 1	0,764	0,758	0,758	0,766	0,752	0,741	0,718	0,716	0,685	0,684	0,680	0,663
N/N 20% 2	1,033	1,030	1,029	1,030	1,022	0,997	0,993	0,976	0,922	0,928	0,904	0,882
N/N 20% 3	1,032	1,027	1,023	1,017	1,024	0,992	0,983	0,981	0,926	0,928	0,913	0,885
N/N 20% 4	0,905	0,901	0,904	0,898	0,890	0,879	0,874	0,866	0,814	0,825	0,808	0,788
U/- 0% 1	1,356	1,348	1,348	1,341	1,340	1,298	1,288	1,268	1,170	1,165	1,120	1,076
U/- 0% 2	1,435	1,428	1,421	1,414	1,411	1,390	1,366	1,355	1,261	1,257	1,211	1,165
U/- 0% 3	1,374	1,366	1,361	1,358	1,353	1,330	1,323	1,310	1,227	1,219	1,174	1,124
U/- 0% 4	1,414	1,407	1,403	1,399	1,401	1,373	1,361	1,350	1,273	1,280	1,242	1,193
U/U 20% 1	1,126	1,118	1,112	1,105	1,099	1,071	1,070	1,061	0,994	0,981	0,947	0,920
U/U 20% 2	0,938	0,935	0,931	0,929	0,925	0,901	0,901	0,889	0,827	0,830	0,795	0,776
U/U 20% 3	1,072	1,065	1,061	1,059	1,046	1,029	1,023	1,004	0,946	0,941	0,909	0,884
U/U 20% 4	1,175	1,159	1,166	1,154	1,154	1,130	1,121	1,109	1,038	1,043	1,007	0,975
U/N 20% 1	1,226	1,202	1,196	1,184	1,175	1,131	1,120	1,091	1,011	1,013	0,973	0,950
U/N 20% 2	1,103	1,099	1,087	1,075	1,073	1,038	1,017	1,003	0,934	0,937	0,904	0,881
U/N 20% 3	1,030	1,015	1,008	1,000	0,994	0,969	0,950	0,940	0,874	0,877	0,849	0,828
U/N 20% 4	1,071	1,058	1,052	1,045	1,040	1,012	1,003	0,989	0,924	0,930	0,904	0,879

C: Utdrag fra programkoden i Matlab

%Viser her programkoden for dosimetre gitt en dose på 1 Gy bestående av LiFo med 0 % parafin, andre dosimetre har tilsvarende kode.

```
function esr1
format short

%Dager etter bestråling:

Dag = [0 1 2 4 7 11 14 18 21 24 36 39 43 49 57 63 71 86 99 117 145 191];

%Måledata fra hver type dosimeter er lagret i matriser, med dager bortover og
%de fire dosimetrene nedover:

t_0 = [ dosimeter 1
dosimeter 2
dosimeter 3
dosimeter 4];

%1 Gy normeres til gjennomsnittet av fem første dager

i=1;
j=1;

for i= 1:4
    for j =1:5

        A_0(i,j) = t_0(i,j);

        j= j+1;
    end

    i = i+1;
end

%Finner gjennomsnittet av de fem første verdiene:

A_0=A_0';
n_0 = mean(A_0);
n_0=n_0';

%Normerer:

i=1;
j=1;

for j= 1:4
    for i= 1:22
```

```
m_0(j,i)=t_0(j,i)/n_0(j);

    end
end

%Beregner gjennomsnitt, maksimal og minimal Verdi for hver dag:

gj_0 = mean(m_0);
min_0 = min(m_0);
max_0 = max(m_0);

%Finner spredning:

i=1;
while i <= length(gj_0)
    Min_0(i) = gj_0(i) - min_0(i);
    Max_0(i) = max_0(i) - gj_0(i);

    i=i+1;
end

D = max(Dag)+10;

%Lager figur med gjennomsnittet fra hver type med spredning som usikkerhet:

figure(1)

errorbar(Dag,gj_0, Min_0, Max_0)
hold on
%Plotter tilsvarende for dosimetre med 5, 10, 15 og 20 % parafin
hold off
xlabel('Dager etter bestråling','FontSize',18,'FontName','Arial')
ylabel('Signalintensitet normert til første dag',
'FontSize',18,'FontName','Arial')
axis([-2 D 0.85 1.1])
grid on
legend(' Uten parafin',' 5 % parafin', '10 % parafin','15 % parafin','20 %
parafin','Location','SouthWest')

%Lager figur med alle dosimetrene:

plot(Dag,m_0_1, 'ro:','MarkerSize',10,'MarkerFaceColor','r');
hold on
%Plotter tilsvarende for dosimetre med 5, 10, 15 og 20 % parafin
hold off
xlabel('Dager etter bestråling','FontSize',18,'FontName','Arial')
ylabel('Signalintensitet normert til første
dag','FontSize',18,'FontName','Arial')
axis([-2 D 0.85 1.1])
grid on
```