

Revisjon av dosimetri i stråleterapi ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim

ReferansePublisert
SiderNovember 2023
19

Danielsen T, Frengen J, Hansen EL, Hetland PO, Pylypchenko, Y. Revisjon av dosimetri i stråleterapi St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim. Teknisk dokument nr. 28. Østerås: Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet, 2023.

DSA,
Postboks 329 Skøyen
No-0213 Oslo
Norge.

EmneordTelefon
Faks
Email

Stråleterapi. Revisjon. Referansedosimetri.

67 16 25 00
67 14 74 07
dsa@dsa.no
dsa.no**Resymé**

Revisjonen undersøker samsvaret mellom målt dose og planlagt dose i et vannfantom (IVAR). Bestrålingen er utført ved energi R6 (6 MV) på en Elekta Versa HD lineærakselerator (linac). Revisjonen utføres ved flere norske sykehus og omfatter også sjekk av referansedosimetrien i henhold til IAEA TRS-398.

ISSN 2387-5240

Reference

Danielsen T, Frengen J, Hansen EL, Hetland PO, Pylypchenko, Y. Dosimetry audit at St. Olavs hospital HF, Trondheim University Hospital. Technical Document no. 28. Østerås: Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority, 2023. Language: Norwegian.

Key words

Radiotherapy. Audit. Reference dosimetry.

Abstract

This dosimetry audit examines the correspondence between the measured dose and planned dose during irradiation of a water phantom (IVAR). The irradiation was performed at energy R6 (6 MV) on a Elekta Versa HD linear accelerator (linac). The audit is performed at several Norwegian hospitals and includes checks of the reference dosimetry in accordance with IAEA TRS-398.

Prosjektleder: Hansen EL og Danielsen T.

Godkjent:



Astrid Liland, avdelingsdirektør, avdeling beredskap

Revisjon av dosimetri i stråleterapi ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim

Kontroll av referansedosimetri og aktuelle doseplaner basert på
CT-opptak av vannfantomet IVAR.

Fra Universitetssykehuset i Trondheim: Jomar Frengen
(St. Olavs hospital HF).

Fra Oslo universitetssykehus HF: Yuriy Pylypchenko
(Radiumhospitalet).

Fra DSAs Dosimetrilaboratorium: Elisabeth Lindbo
Hansen og Per Otto Hetland.

Fra KVIST, DSA: Turi Danielsen.

fra Direktoratet for strålevern
og atomsikkerhet (DSA)

Østerås, 2023,
Norway

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	5
1.1	Om prosjektet	5
2	Oppsummering	6
3	Metoder	7
3.1	Referansedosimetri med Bjerkefantomet	7
3.2	Bestråling av IVAR	7
3.3	Utstyr og usikkerhetsbudsjetter	8
4	Resultater	9
4.1	Referansedosimetri med Bjerkefantomet	9
4.2	Bestråling av IVAR	9
5	Vurdering av resultatene	11
5.1	Referansedosimetri	11
5.2	Bestråling av IVAR	11
6	Referanser	12
7	Vedlegg 1: Fremgangsprotokoll for bruk av IVAR-fantomet	13
7.1	Doseplanlegging	13
8	Vedlegg 2: Usikkerhetsbudsjetter	15
8.1	Usikkerhetsbudsjett for referansedosimetri med Bjerkefantomet	16
8.2	Usikkerhetsbudsjett for bestråling av IVAR: konvensjonelle planer	17
8.3	Usikkerheten i relative avvik mellom to doser	18

1 Innledning

Stråleterapi er en prosess som består av en rekke handlinger, fra det er tatt beslutning om at behandlingen skal gis og til den siste behandlingsfraksjonen er levert. For at pasienten skal få en rett dose til rett område til rett tid kreves det nøyaktighet og presisjon i hvert ledd [1]. I dette prosjektet er det benyttet et vannfantom (EMRP-fantom laget ved STUK, heretter omtalt som IVAR) med innsats for dosemåling med Farmer-kammer, for å undersøke samsvaret mellom målt dose og planlagt dose ifølge doseplan ved ulike lineærakseleratorer (linac'er). Revisjonen utføres ved flere norske sykehus og omfatter også sjekk av referansedosimetrien i henhold til IAEA TRS-398 [2].

Her rapporter vi resultater fra målinger som ble utført ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim 20.02.2023. Ifølge fremgangsprotokollen for revisjonen (Vedlegg 1) hadde sykehuset på forhånd laget tre konvensjonelle doseplaner samt en VMAT-plan (Volumetric Modulated Arc Therapy), basert på CT-opptak av IVAR utført ved OUS HF, Radiumhospitalet i 2017 samt et struktursett. Bestrålingene ble utført ved energi R6 (6 MV) på en Elekta Versa HD. Doseplanleggingssystemet som ble brukt var RayStation 12A.

1.1 Om prosjektet

Prosjektet er initiert av fagmiljøet ved sjeffysikermøtet. Revisjonsgruppen består av representanter fra fire av universitetssykehusene i Norge, samt representanter fra Dosimetrilaboratoriet og fra KVIST ved Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA):

Aniko Balazs (til 2019), Karin Eklund (fra 2019 til 2022), Jomar Frengen, Hans Bjerke (til 2019), Turi Danielsen, Linda Holth Djupvik (til 2020), Elisabeth Lindbo Hansen, Per Otto Hetland, Lukas Hirschi, Nina Iren Hoven (til 2022), Camilla Hægeland (i 2018), Brede Dille Pedersen (fra 2019), Veronika Tømmerås (til 2018), og Harald Johan Valen (i 2018).

Under målingene ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim 20.02.2023 deltok:

Fra Universitetssykehuset i Trondheim: Jomar Frengen (St. Olavs hospital HF).

Fra Oslo universitetssykehus HF: Yuriy Pylypchenko (Radiumhospitalet).

Fra DSAs Dosimetrilaboratorium: Elisabeth Lindbo Hansen og Per Otto Hetland.

Fra KVIST, DSA: Turi Danielsen.

2 Oppsummering

På revisjonsdagen ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim 20.02.2023 var det relative avviket mellom målt dose under referansedosimetrien og sykehusets planlagte dose på -0.7%. De relative avvikene under bestråling med de konvensjonelle planene var på respektivt -0.9%, -1.1% og -1.0%. For revisjonens planlagte VMAT-bestrålinger lå de relative avvikene mellom målte doser og punktdoser ifra planene innenfor et intervall ifra -1.1% til 1.3%. Under en VMAT-bestråling kan dynamiske og små felt påvirke responsen til detektoren [3]. Det anbefales at fremtidige revisjoner bruker minst to ulike kammer til å måle på VMAT-bestrålinger.

3 Metoder

CT-opptak av vannfantomet IVAR ble utført på OUS HF, Radiumhospitalet i 2017. Representanter fra sykehusene og KVIST samarbeidet deretter igjennom vårhalvåret 2018 med å etablere en felles protokoll for revisjonen. Protokollen beskriver hvilke doseplaner sykehuset som revideres skal utarbeide, basert på bildegrunnet fra CT-opptaket for IVAR og et tilsendt DICOM struktursett (RT structure set). Den endelige fremgangsprotokollen (Vedlegg 1) inkluderer følgende doseplaner ved energi R6 (6 MV):

- Ett felt
- To motgående felt
- Fire-felts boks
- VMAT-plan

Det ble bestemt at revisjonen også skulle omfatte sjekk av referansedosimetrien.

3.1 Referansedosimetri med Bjerkefantomet

På revisjonsdagen ble Bjerkefantomet [4] satt opp for referansedosimetri i henhold til IAEA TRS-398 [2]. Det ble satt 10x10 cm² strålefelt i 100 cm avstand (SAD-type oppsett, kammer i isosenter), og målingene ble gjort ved et dyp på 10 g/cm² vann med en nasjonal arbeidsnormal (Farmer-kammer, Tabell 1) med sporbarhet til BIPM (Bureau International de Poids et Mesures). Resultatene ble fylt inn i et IAEA Excel-ark for beregning av absorbert dose til vann under referanseforhold for høyenergetiske fotoner. Sykehusets egen angivelse av strålekvaliteten ble benyttet, $TPR_{20,10} = 0.682$.

3.2 Bestråling av IVAR

IVAR ble plassert som beskrevet i protokollen (Vedlegg 1) og bestrålt i henhold til de respektive doseplanene. Målingene ble gjort med nasjonal arbeidsnormal (Farmer-kammer, Tabell 1) plassert i innsatsen på IVAR (Figur 1). Under bestrålingene med de konvensjonelle doseplanene, var IVAR posisjonert slik at Farmer-kammeret var i isosenter. Det ble deretter kjørt tre bestrålinger med VMAT-planen. Ved den første bestrålingen var IVAR posisjonert som for de konvensjonelle planene slik at Farmer-kammeret mottok strålingen som var planlagt for volumet DOSE 1. Ved den andre og tredje bestrålingen var bordet og IVAR flyttet respektivt 40 mm mot maskinen eller 20 mm bort fra maskinen relativt til isosenter, slik at Farmer-kammeret mottok strålingen som var planlagt respektivt for volumene DOSE 2 og DOSE 3. Hver måling ble gjentatt tre ganger, og resultatene ble fylt inn i en tilpasset versjon av IAEA sitt ovennevnte Excel-ark.



Figur 1: IVAR med Farmer-kammer under posisjonering med laser og lysfelt.

3.3 Utstyr og usikkerhetsbudsjetter

Utstyret som ble brukt ved målingene på St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim 20.02.2023 tilhørte enten sykehuset (linac og doseplanleggingssystem) eller Dosimetrlaboratoriet (øvrig utstyr, Tabell 1). Usikkerhetsbudsjetter for målingene er vedlagt (Vedlegg 2). En vurdering av usikkerheten i beregningen av de planlagte dosene fra doseplanleggingssystemet vil fremgå av sluttrapporten fra prosjektet.

Tabell 1: Utstyr og normaler som ble benyttet ved målingene på St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim 20.02.2023.

Utstyr	Modell	Serienummer
Linac	Elekta Versa HD	
Doseplanleggingssystem, beregningsalgoritme	RayStation 12A	
Fantom for referansemålinger	Bjerkefantomet	
Fantom for bestrålinger i henhold til doseplaner	IVAR	
Nasjonal arbeidsnormal, Farmer-type ionekammer	IBA FC65-G	446
Elektrometer	Keithley 35040	59176
Barometer	Druck DPI 705	4310/99-09
Termometer	QUARTZ digi-thermo	
Kabelsnelle		

4 Resultater

4.1 Referansedosimetri med Bjerkefantomet

Referansedosimetrien ble utført ved energi R6 (6 MV) med 10x10 cm² strålefelt i 100 cm avstand (SAD-type oppsett, kammer i isosenter) ved et dyp på 10 g/cm² vann i Bjerkefantomet. Bestråling til 200 MU (monitor units) gav et resultat på 0.993 Gy/100 MU.

St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim utfører referansedosimetri ved energi R6 (6 MV) slik at bestråling med 100 MU gir 1 Gy ved et dyp på 10 g/cm² vann. Sykehusets planlagte dose ved dette dypet var derfor 1.00 Gy/100 MU.

Det relative avviket mellom målt dose på revisjonsdagen og sykehusets planlagte dose, var på -0.7%.

4.2 Bestråling av IVAR

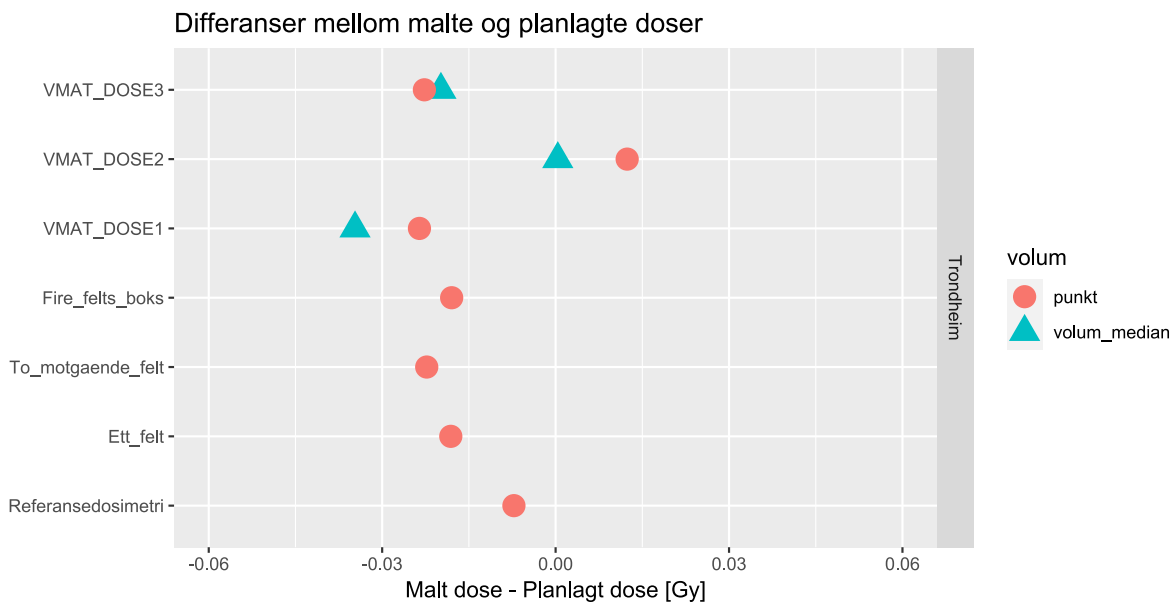
Bestrålingen av IVAR ble utført i henhold til de tre konvensjonelle doseplanene samt VMAT-planen beskrevet i fremgangsprotokollen (Vedlegg 1).

Tabell 2: Planlagte og målte doser for de fire doseplanene samt referansedosimetrien. Planlagt dose leses ut av doseplanleggingssystemet. Kombinert relativ usikkerhet på målingene i Bjerkefantomet er på rundt 1.2% og i IVAR på rundt 1.3%.

Doseplan	Posisjonering av Farmer-kammer	Planlagt dose (volum, median)	Planlagt dose (punkt)	Målt dose
		Gy	Gy	Gy
Referansedosimetri revisjon	Isosenter		1.000	0.993
Ett felt	Isosenter		1.982	1.964
To motgående felt	Isosenter		2.044	2.022
Fire-felts boks	Isosenter		1.844	1.826
VMAT	Isosenter, i DOSE 1	2.210	2.199	2.176
VMAT	Punkt 2, i DOSE 2	0.944	0.932	0.944
VMAT	Punkt 3, i DOSE 3	2.203	2.206	2.184

Tabell 3: Relative avvik mellom målte doser og planlagte doser for de fire doseplanene samt referansedosimetrien. Planlagt dose leses ut av doseplanleggingssystemet.

Doseplan	Posisjonering av Farmer-kammer	Relativt avvik mellom målt dose og planlagt dose (volum, median)	Relativt avvik mellom målt dose og planlagt dose (punkt)
		%	%
Referansedosimetri revisjon	Isosenter		-0.7 %
Ett felt	Isosenter		-0.9 %
To motgående felt	Isosenter		-1.1 %
Fire-felts boks	Isosenter		-1.0 %
VMAT ± 3%	Isosenter, i DOSE 1	-1.6 %	-1.1 %
VMAT ± 3%	Punkt 2, i DOSE 2	0.0 %	1.3 %
VMAT ± 3%	Punkt 3, i DOSE 3	-0.9 %	-1.0 %



Figur 2: Differanser mellom målte doser og planlagte doser for de fire doseplanene samt referansedosimetrien. Planlagt dose leses ut av doseplanleggingssystemet.

5 Vurdering av resultatene

IAEA [1] anbefaler bruk av aksjonsgrenser i stråleterapi. Dersom måling av en størrelse overskrider aksjonsgrensen for målingen, skal tiltak settes inn. En arbeidsgruppe nedsatt av KVIST har tidligere uttalt at aksjonsgrensen kan settes til to standardavvik for den aktuelle målingen [5]. Det vil si at dersom måling av en størrelse gir et resultat som avviker med mer enn to standardavvik ifra referanseverdien for målingen, så skal gyldigheten til referanseverdien revurderes og eventuelle nødvendige innjusteringer foretas.

5.1 Referansedosimetri

Den kombinerte relative usikkerheten i målt dose på revisjonsdagen i Bjerkefantomet var på rundt 1.2% (Vedlegg 2). Det relative avviket mellom målt dose på revisjonsdagen ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim og sykehusets planlagte dose, var på -0.7%. Den kombinerte relative usikkerheten i det relative avviket, under forutsetning om at sykehusets relative usikkerhet i egne målinger var på 1.2%, var på rundt 1.4% (Vedlegg 2). Det vil si at målt dose lå innenfor ett standardavvik fra planlagt dose.

5.2 Bestråling av IVAR

Under målingene ved St. Olavs hospital HF, Universitetssykehuset i Trondheim oppga sykehuset planlagte punktdoser for samtlige planer samt medianverdien av de planlagte dosene over respektive volumene DOSE 1, DOSE 2 og DOSE 3.

Den kombinerte relative usikkerheten i målt dose ved bestråling av IVAR med de tre konvensjonelle planene var på rundt 1.3% (Vedlegg 2). De relative avvikene mellom målte doser på revisjonsdagen og sykehusets planlagte punktdoser, var på respektive -0.9%, -1.1% og -1.0%. Den kombinerte relative usikkerheten i det relative avviket, under forutsetning om at sykehusets relative usikkerhet i egne målinger var på 1.2%, var på rundt 1.5% (Vedlegg 2). Det vil si at samtlige målte doser for de konvensjonelle planene lå innenfor ett standardavvik fra planlagt dose.

For VMAT-bestrålingene er usikkerheten ikke kvantifisert i inneværende rapport. En VMAT-plan realiseres ved at primærstrålefeltet formes dynamisk mens linac-hodet roteres rundt pasienten. Behandlingen kan benytte seg av små felt. Bestråling med dynamiske og små felt kan påvirke responsen til en detektor både ved at dosen blir ujevn over det sensitive volumet til detektoren (volum averaging) og ved at konvensjonelle kammerkorreksjoner oppnådd ved referanseforhold ikke lenger er gyldige [3]. Målingene med Farmer-kammer under VMAT-bestrålingen av IVAR er derfor beheftet med en usikkerhet som avhenger av hvordan dosen ble levert. De relative avvikene mellom målte doser på revisjonsdagen og sykehusets planlagte punktdoser samt middelveien og medianverdien av de planlagte dosene, lå alle innenfor et intervall ifra -1.6% til 1.3%.

Det anbefales at fremtidige revisjoner bruker minst to ulike kammer til å måle på VMAT-bestrålinger. Ett kammer bør ha et sensitivt volum som er signifikant mindre enn volumet til et klassisk Farmer-kammer.

6 Referanser

[1] IAEA. 2016. [Accuracy Requirements and Uncertainties in Radiotherapy](#). IAEA Human Health Series No. 31. Vienna: International Atomic Energy Agency.

[2] IAEA. 2000. [Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water](#). IAEA Technical Reports Series No. 398 (TRS-398). Version 12 (05 June 2006). Vienna: International Atomic Energy Agency.

[3] IAEA. 2017. [Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination](#). IAEA Technical Reports Series No. 483 (TRS-483). Vienna: International Atomic Energy Agency.

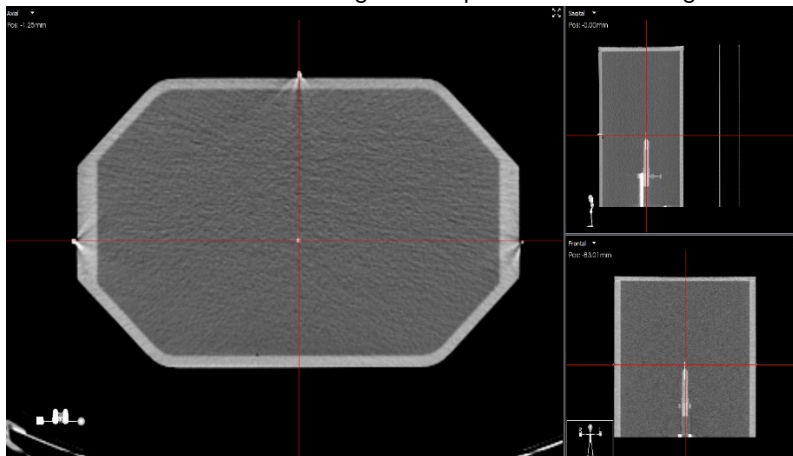
[4] Bjerke H, Hult EA. 2002. *A water phantom for cross calibration and reference dose determination in high electron and photon beams*. IAEA-96-34P. In: International Symposium on Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry, Vienna 25-28 November 2002. Book of extended synopsis. IAEA-CN-96. Vienna: International Atomic Energy Agency.

[5] Bjerke H. Om kvalitetskontroll av linac. StrålevernRapport 2010:3. Østerås: Statens strålevern, 2010.

7 Vedlegg 1: Fremgangsprotokoll for bruk av IVAR-fantomet

7.1 Doseplanlegging

1. Isosenter settes ut fra markeringskulene på fantomet slik angitt i bildet: (CT-snitt/z=0)



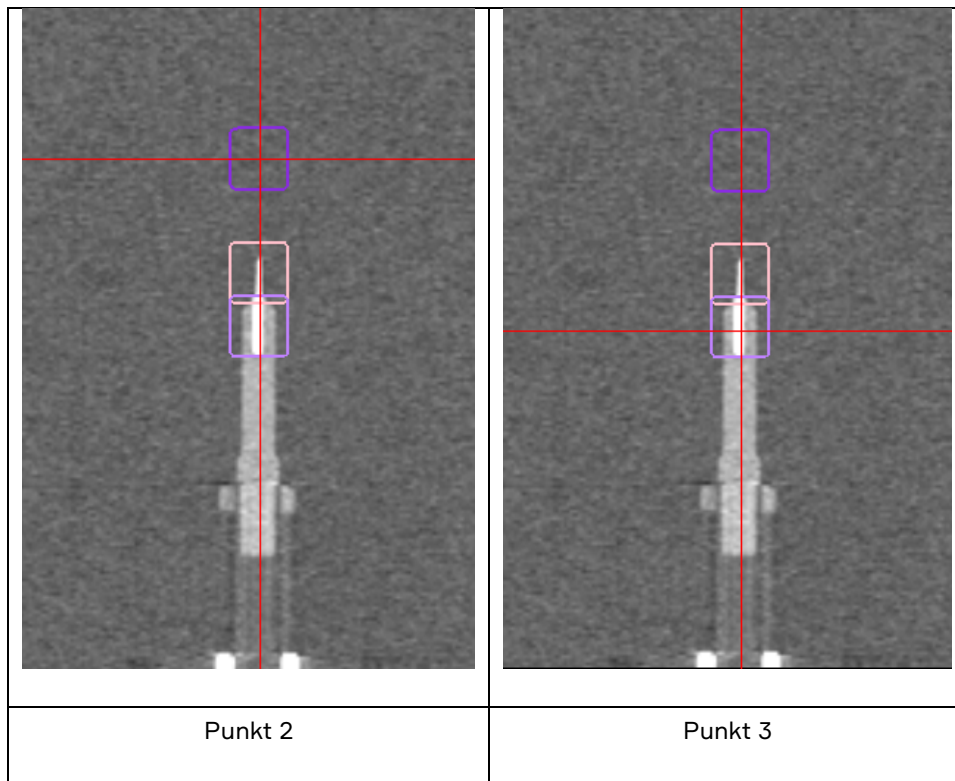
2. Tetthetsmatrise/oppløsning for doseberegning: 2.5mm
3. Behandlingsbord: bruk samme korreksjon som dere ville gjort klinisk
4. Energi: R6 (for alle planene)
5. Kontroller ytterkonturen. Generer en ny hvis behov.
6. Struktur Kammer: tettheten til denne strukturen settes til vann
7. Lag følgende konvensjonelle planer:
 - Ett felt på dyp
 - i. Gantryvinkel: 0°
 - ii. Feltstørrelse: 10cm x 10cm
 - To motgående felt
 - i. Gantryvinkel: 0° og 180°
 - ii. Feltstørrelse: 10cm x 10cm
 - iii. Benytt lik vektning for feltene
 - 4-felts boks
 - i. Gantryvinkel: 0°, 90°, 180° og 270°
 - ii. Feltstørrelse: Form feltet til PTV77 med MLC.
 - iii. Benytt lik vektning for alle fire feltene

Normering: Mediandose i volumet DOSE1 (alternativt mean)

Dose: 2Gy

Registrer følgende doser for de konvensjonelle planene

- Punktdosen i isosenter
 - Gjennomsnittsdosen med standardavvik i volumet DOSE1
8. Lag en VMAT-plan
 - Fraksjonering: 2.2Gy x 35 til totaldose 77Gy
 - Normering: Mediandose i volumet DOSE1 (alternativt mean)
 - Homogenitetskrav (homogen dose rundt målepunktene for å få pålitelige målinger):
 - i. $\pm 3\%$ av gjennomsnittsdosen for aktuelt volum DOSE1, DOSE2 og DOSE3
 - Hjelpestrukturer kan lages for optimalisering
 - Definer følgende punkter:
 - i. Punkt 2: 40 mm «kranialt» for isosenter (ligger i volum DOSE2) (snitt: +40)
 - ii. Punkt 3: 20 mm «kaudalt» for isosenter (ligger i volum DOSE3) (snitt: -20)



- Optimaliseringsmål:

Priority	Dose	ROI/POI	Clinical goal	Value	Result	% outside grid
	Plan dose: SIB KVIST (...)	CTV56	At least 54.00 Gy dose at 98.00 % volume	54.53 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	CTV56	At most 60.00 Gy dose at 3.00 % volume	59.65 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	CTV77	At least 75.00 Gy dose at 98.00 % volume	75.04 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR1	At most 40.00 Gy dose at 40.00 % volume	39.61 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR1	At most 63.00 Gy dose at 10.00 % volume	62.14 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR2	At most 40.00 Gy dose at 45.00 % volume	38.90 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR2	At most 63.00 Gy dose at 15.00 % volume	61.97 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR3	At most 24.00 Gy average dose	23.10 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	OR3	At most 50.00 Gy dose at 5.00 % volume	49.56 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	PTV56	At least 98.00 % volume at 53.20 Gy dose	98.48 %	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	PTV77	At least 95.00 % volume at 73.15 Gy dose	95.00 %	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	Ytterkontur	At most 50.00 Gy dose at 11.00 % volume	49.71 Gy	✓	0 %
	Plan dose: SIB KVIST (...)	Ytterkontur	At most 80.85 Gy dose at 2.0 cm ³ volume	80.58 Gy	✓	0 %

- Hvis det er vanskelig å oppfylle optimaliseringsmålene bør homogenitetskravene til DOSE1, DOSE2 og DOSE3 prioriteres (for å få pålitelige målinger).
9. Registrer følgende doser for VMAT-planen
 - Gjennomsnittsdose med standardavvik for:
 - i. DOSE1
 - ii. DOSE2
 - iii. DOSE3
 - Punktdose for:
 - i. Isosenter
 - ii. Punkt 2
 - iii. Punkt 3
 10. Lag kontrollbilder (2D kV og/eller CBCT) for å verifisere innstillingen av fantomet. Kontrollbildene trenger kun lages til en av planene da alle har samme isosenter.
 11. Overfør planene til behandlingsmaskinen.

8 Vedlegg 2: Usikkerhetsbudsjetter

Målingene under revisjonen ble utført med et Farmer-kammer (IBA FC65-G #446) kalibrert for absorbert dose til vann i Co-60 felt ved Dosimetrlaboratoriet. Sykehusets egen angivelse av strålekvaliteten ble benyttet. Resultatene ble fylt inn i et IAEA Excel-ark for beregning av absorbert dose til vann under referanseforhold for høyenergetiske fotoner. Målefunksjonen for absorbert dose til vann $D_{w,Q}$ er:

$$D_{w,Q} = MQ_{corr} \times ND_{w} \times kQ \times k_{other} \quad (1)$$

Her er MQ_{corr} den korrigerte, akkumulerte ladningsmålingen fra kammeret, ND_{w} kalibreringskoeffisienten for absorbert dose til vann i Co-60 felt for kammeret, kQ en korreksjonsfaktor for strålekvaliteten, som relaterer måling med det aktuelle kammeret i linac feltet til måling med kammeret i Co-60 felt, og k_{other} ytterlige korreksjonsfaktorer relatert spesielt til etableringen av referanseforhold. Den korrigerte ladningsmålingen kan uttrykkes som:

$$MQ_{corr} = (MQ_{raw} - MQ_{leak}) \times k_{stab} \times k_{TP} \times k_h \times k_s \times k_{pol} \times k_{elec} \times k_{lin} \quad (2)$$

Her er MQ_{raw} målt akkumulert ladning under bestråling og MQ_{leak} målt bakgrunn, mens k_{stab} er en korreksjonsfaktor for stabiliteten til kammeret. Korreksjonsfaktoren for temperatur og trykk k_{TP} korrigerer for forskjellen i lufttetthet relativt til referanseforholdene for kalibreringskoeffisienten:

$$k_{TP} = (T/T_0) \times (P_0/P) \quad (3)$$

Videre er k_h en korreksjonsfaktor for avvik i luftfuktighet fra referanseforhold, k_s en korreksjonsfaktor for rekombinasjon, k_{pol} en korreksjonsfaktor for avvik i polariteten ifra polariteten under kalibrering, k_{elec} kalibreringsfaktoren for elektrometeret og k_{lin} en korreksjonsfaktor for avvik fra linearitet i sensitiviteten til målesystemet.

Ytterligere korreksjonsfaktorer relatert spesielt til etableringen av referanseforhold er:

$$k_{other} = k_{dist} \times k_{depth} \times k_{fs} \times k_{hom} \times k_{rot} \quad (4)$$

Her tar k_{dist} , k_{depth} og k_{fs} høyde for respektivt avvik i posisjoneringen av kammeret relativt til kildefokus, for avvik i vanddybden kammeret er plassert i relativt til referanseforhold, og for avvik i feltstørrelsen ifra referanseforhold. Videre er k_{hom} en korreksjonsfaktor for radiell inhomogenitet i strålefeltet og k_{rot} en korreksjonsfaktor for rotasjon eller tilt på kammeret.

8.1 Usikkerhetsbudsjett for referansedosimetri med Bjerkefantomet

Usikkerhetsbudsjettene er hentet fra Dosimetrilaboratoriet sitt kvalitetssystem, dokument ID 336-1, som forklarer bakgrunnen for størrelsen på de ulike bidragene.

Tabell V21: Usikkerhetsbudsjett for korrigert, akkumulert ladningsmåling MQ,corr i henhold til ligning (2).

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
(MQ,raw–MQ,leak)	40.89 nC/260 MU	Measurement statistics	0.06%	
kstab	1	Chamber history	0.1%	
kTP	1.03	Combined uncertainty	0.03%	
kh	1	ICRU Report 90	0.06%	
ks	1.0029	Measurement statistics	0.06%	
kpol	1		-	
kelec x klin	0.9990	Calibration	0.08%	
MQ,corr				0.2%

Tabell V22: Usikkerhetsbudsjett for korreksjonsfaktorer kother relatert til etableringen av referanseforhold i henhold til ligning (4) i Bjerkefantomet.

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
kdist x kdepth	1	BJR 25 and TRS-398	0.4%	
kfs x khom	1		-	
krot	1		-	
kother	1			0.4%

Tabell V23: Usikkerhetsbudsjett for absorbert dose til vann Dw,Q i henhold til ligning (1) i Bjerkefantomet under referanseforhold.

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
MQ,corr			0.2%	
ND,w	48.08 Gy/μC	Calibration	0.5%	
kQ	0.9946	TRS-398 Tabell 6.III and 6.IV	1.0%	
Kother			0.4%	
Dw,Q				1.2%

8.2 Usikkerhetsbudsjett for bestråling av IVAR: konvensjonelle planer

Usikkerhetsbudsjettene er hentet fra Dosimetrilaboratoriet sitt kvalitetssystem, dokument ID 337-1, som forklarer bakgrunnen for størrelsen på de ulike bidragene. I Tabell V25 er det ikke tatt hensyn til at usikkerheten i posisjoneringen kan gi et redusert bidrag ved bestrålinger med to motgående felt eller fire-felts boks relativt til med ett felt.

Tabell V24: Usikkerhetsbudsjett for korrigert, akkumulert ladningsmåling MQ_{corr} i henhold til ligning (2).

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
$(MQ_{raw} - MQ_{leak})$	40.89 nC/260 MU	Measurement statistics	0.06%	
kstab	1	Chamber history	0.1%	
kTP	1.03	Combined uncertainty	0.1%	
kh	1	ICRU Report 90	0.06%	
ks	1.0029	Measurement statistics	0.06%	
kpol	1		-	
kelec x klin	0.9990	Calibration	0.08%	
MQ_{corr}				0.2%

Tabell V25: Usikkerhetsbudsjett for korreksjonsfaktorer k_{other} i henhold til ligning (4) i IVAR.

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
kdist x kdepth	1	BJR 25 and TRS-398	0.4%	
kfs x khom	1		0.5%	
krot	1		-	
kother	1			0.6%

Tabell V26: Usikkerhetsbudsjett for absorbert dose til vann $D_{w,Q}$ i henhold til ligning (1) i IVAR under bestråling med de konvensjonelle planene.

Quantity	Value	Source of uncertainty estimate	Relative standard uncertainty	Relative combined standard uncertainty
MQ_{corr}			0.2%	
ND_w	48.08 Gy/ μ C	Calibration	0.5%	
kQ	0.9946	TRS-398 Tabell 6.III and 6.IV	1.0%	
kother			0.6%	
D_{w,Q}				1.3%

8.3 Usikkerheten i relative avvik mellom to doser

Det relative avviket mellom to doser $D_{1w,Q}$ og $D_{2w,Q}$ uttrykkes som

$$(D_{2w,Q} - D_{1w,Q}) / D_{1w,Q} = D_{2w,Q} / D_{1w,Q} - 1 \quad (5)$$

Dersom $D_{2w,Q}$ og $D_{1w,Q}$ er uavhengige, så er relativ kombinert usikkerhet i det relative avviket $D_{2w,Q} / D_{1w,Q} - 1$ gitt som

$$u(D_{2w,Q} / D_{1w,Q} - 1) / (D_{2w,Q} / D_{1w,Q} - 1) = [(u(D_{2w,Q}) / D_{2w,Q})^2 + (u(D_{1w,Q}) / D_{1w,Q})^2]^{1/2} \quad (6)$$

Hvis de to dosene er målte doser, så er imidlertid gjerne $D_{2w,Q}$ og $D_{1w,Q}$ korrelerte. Dersom målingene utføres med to målesystem som begge er sporbare via Dosimetrlaboratoriet til den samme kalibreringen av samme sekundærstandard mot en primærstandard, så er kalibreringskoeffisienten $N_{2D,w}$ korrelert med $N_{1D,w}$, spesielt via den underliggende kalibreringskoeffisienten på Dosimetrlaboratoriets sekundærstandard. Denne oppgis fra BIPM med en relativ standard usikkerhet på 0.3%. Relativ kombinert usikkerhet i det relative avviket mellom to doser oppnådd på denne måten reduseres derfor med minst 0.3%. Dette estimatet benyttes i inneværende rapport.

