

Prosjekt:

# Nytt klinikk- og protonbygg Radiumhospitalet

Tittel:

## Designdokument Strålevern Protonterapi



02	Designdokument Strålevern Protonterapi V3.0	17.04.20	KR	MN	PH	
02	Designdokument Strålevern Protonterapi V2.0	27.03.20	KR	MN	PH	
01	Designdokument Strålevern Protonterapi V1.0	14.02.20	KR	MN	PH	
Rev.	Beskrivelse	Rev. Dato	Utarbeidet	Kontroll	Godkjent	
Kontraktør/leverandørs logo:		Bygg nr:	Etasje nr.:	Systemgr.:	Antall sider: <b>Side 1 av 95</b>	
Prosjekt:	Utgivernr:	Fag:	Dok.type:	Løpenr:	Rev.nr.:	Status: <b>G</b>

# 1 Innholdsfortegnelse

1	Innholdsfortegnelse.....	2
2	Innledning.....	4
2.1	Avgrensning.....	5
2.2	Bakgrunn .....	6
2.3	Ansvarsmatrise .....	6
2.4	Lover og retningslinjer .....	8
2.5	Dimensjonerende retningslinjer for skjermingsberegning .....	11
3	Beskrivelse av bygg for protonanlegg.....	18
3.1	Beskrivelse av protonbygg, Bygg M1 .....	18
3.2	Beskrivelse av utstyret.....	19
4	Risikoanalyse.....	27
4.1	Metodikk og risikomatrise .....	28
4.2	Barrierer .....	28
4.3	Hovedpunkter ROS .....	29
4.4	Sammendrag av funn i ROS .....	30
5	Bygningsmessig skjerming.....	31
5.1	Underlag skjermingsberegninger .....	32
5.2	Pasientbehandling.....	36
5.3	Workload – totalproduksjon av protoner .....	38
5.4	Vekselvirkning protoner.....	39
5.5	Tap av protoner.....	39
5.6	Skjermingsberegninger.....	39
5.7	Oppsummering skjermingsberegninger .....	47
6	Aktivering av kjølevann .....	47
6.1	Oppsummering rapport aktivering av kjølevann .....	48
6.2	Design kjølevannsystem .....	51
6.3	Potensiell lekkasje av aktivert kjølevann.....	51
6.4	Målinger fra DCPT .....	52
7	Aktivering av grunn og grunnvann .....	53
7.1	Beskrivelse av grunnvannsnivå.....	54

7.2	Analyse grunnforhold .....	54
7.3	Oppsummering rapport aktivering av grunn og grunnvann .....	56
8	Aktivering av luft.....	61
8.1	Oppsummering rapport aktivering av luft .....	61
8.2	Vurderinger fra Institutt for Energiteknikk (IFE).....	62
8.3	CFD simuleringer.....	62
8.4	Design ventilasjonssystem.....	67
8.5	Målinger fra DCPT .....	71
9	Bygningsmessig utførelse .....	71
9.1	Krav til betong .....	72
9.2	Forhåndsdokumentasjon .....	72
9.3	Prøvetagning underveis i betongarbeidene.....	72
9.4	Krav til gjennomføring av støpeprosessen.....	73
9.5	Krav til armering.....	73
9.6	Staggiennomføring for forskaling .....	73
9.7	Kanaler, rør og trekkerør i betong.....	74
9.8	Aktivering av betong .....	78
9.9	Videre prosess og gjenstående avklaringer .....	80
10	Andre installasjoner .....	80
10.1	Sikkerhetssystemer som hindrer utilsiktet stråling .....	80
10.2	Andre sikkerhetssystemer .....	91
10.3	Elkraft.....	91
10.4	Brannslukkesystemer .....	91
10.5	Gass og trykkluft .....	92
10.6	Utendørsanlegg .....	92
11	Vedlegg og referanser .....	93
12	Videre prosess.....	93
13	Endringslogg.....	95

## 2 Innledning

Som en del av utviklingen av Oslo Universitetssykehus HF og nye Radiumhospitalet, skal det bygges et nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet. Protonbygget inneholder tre identiske strålebehandlingsrom, hvorav to skal brukes til pasientbehandling og ett til forskning. Vurderinger, barrierer og tiltak for strålevern og stråleskjerming for protonbygget må godkjennes av Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet før oppstart av bygging kan starte. Grunnarbeidene starter opp i februar 2020 og selve byggingen har planlagt oppstart medio september 2020, med støpning av bunnplate som første trinn. Prosjektet planlegges ferdig i slutten av 2023.

Ved design av bygg, prosjektering og planlegging av skjermingsbarrierer vil norsk strålevernlovgivning for maksimalt tillatte grenseverdier for doser til personal, pasienter og øvrig befolkning ligge til grunn for arbeidet.

Det er noen områder som krever særlig fokus med tanke på strålevern. Disse beskrives i dette designdokumentet som sammen med søknadsbrev er underlag for prosjektets søknad til Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet om oppstart bygging av protonbygg på Radiumhospitalet. Områdene er:

- Klassifisering av områder med beskrivelse av flyt av personell, pasienter og aktivert avfall
- Utforming av strålevernsbarrierer og utforming av bygningsmessige løsninger
- Aktivering av kjølevann
- Aktivering av luft
- Aktivering av grunnen og grunnvann
- Aktivering av betong og andre byggematerialer, samt en plan for fremtidig avhending av dette

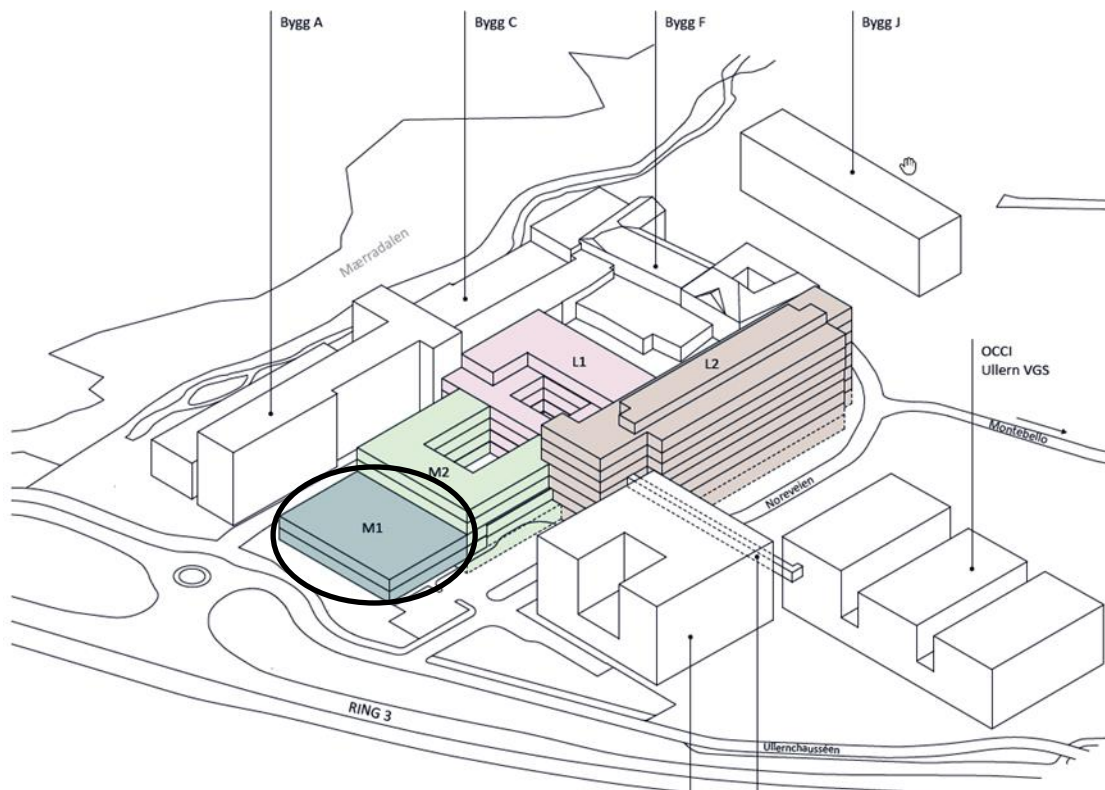
Som underlag for vurderinger av de ulike systemene ligger skjermingsberegninger som er utført av leverandør av protonutstyret. Det er tatt utgangspunkt i utstysleverandørens plantegninger for deres kompaktløsning for protonanlegg; ProBeam 360. Plantegninger er tilpasset prosjektet og den presenterte planløsning er steds spesifikk for anlegget ved Radiumhospitalet, Oslo universitetssykehus HF, Ullernchausseen 70, 0379 Oslo.

Arbeidet er utført som et samarbeid mellom Helse Sør- Øst HF (HSØ) sin prosjektorganisasjon for nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet (PRAD), Oslo Universitetssykehus HF (OUS), Haukeland Universitetssykehus HF (HUS)/ Helse Bergen HF (HB). Det ble i 2019 opprettet en samarbeidsavtale med Dansk Center for Partikelterapi (DCPT) i Århus for kompetanseoverføring og kvalitetssikring av skjermingsberegninger. Dette samarbeidet er tenkt som en kvalitetssikring av arbeidet, samt en arena for erfaringsoverføring mellom prosjektene i Norge og Danmark og en mekanisme for kompetanseoppbygging for personell fra OUS og HUS.

Skjermingsberegninger og foreliggende løsninger har fortløpende vært presentert for Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) i månedlige koordineringsmøter, dette for å sikre en god felles forståelse av prosessen ved å fremlegge den informasjon som er nødvendig for at DSA skal vurdere søknad om tillatelse til oppstart av byggarbeidene.



Arealene det nå søkes om godkjenning oppstart bygging for er den bygningsmasse som inneholder selve protonanlegget med støtterom, vist som bygg M1 i figur 1.



Figur 1: Oversiktsskisse over nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet. De nye byggene markert med farge og eksisterende bygningsmasse med hvitt. Protonanlegget er benevnt M1 (markert på figur) og inneholder protonanlegg med tekniske arealer samt støtterom for protonbehandling. M2 inneholder doseplan, poliklinikker og servicefunksjoner. L1 er et behandlingsbygg med blant annet bildediagnostikk, laboratorier og operasjonsavdeling. L2, sengebygget, inneholder sengeposter og poliklinikker.

## 2.1 Avgrensning

Vurdering av sikkerhet knyttet til arbeidsprosesser og nødvendige operasjonelle prosedyrer når protonanlegget er i drift omtales ikke i dette dokumentet, men vil knyttes til melding av strålekilder og søknad oppstart av klinisk protonbehandling på mennesker. Det vil være egne prosesser for dette senere i prosjektforløpet.

Ansvarlig virksomhet skal i samarbeid med prosjektorganisasjonen utarbeide en dekommisjoneringsplan for fremtidig avhending av byggematerialer så tidlig som mulig i planleggingsfasen, slik at det finnes en plan for å redusere fremtidige mengder av radioaktivt bygg-avfall. Dette dokumentet beskriver overordnede prinsipper for dekommisjonering, en mer utfyllende plan vil bli utarbeidet før det søkes om oppstart for klinisk protonbehandling.

Det vil være utstyr i bruk i bygg M1 som produserer ioniserende stråling. (Avbildningssystem inne på behandlingsrommene (140 kV)). Strålevern for disse installasjonene vil ikke bli omtalt i dette dokumentet, utover at arbeidsstasjonen inne i behandlingsrommet vil skjermes med 2 mmPb ekvivalent blyglass.

Søknad om tilsvarende godkjenning for protonterapiprosjektet i Bergen er en egen selvstendig prosess.

## 2.2 Bakgrunn

Strålebehandling med protoner er en behandlingsform som er vel etablert i mange land i verden. Ved Skandionklinikken i Uppsala Sverige har man behandlet pasienter siden 2015, og ved Dansk Center for protonterapi i Århus, Danmark, er det behandlet pasienter siden januar 2019. Innføring av protonterapi i Norge har vært utredet siden 2010, og ble vedtatt innført som ny flerregional behandlingsmetode med ett senter i Oslo og ett senter i Bergen etter en nasjonal konseptfaseutredning i 2016. Senteret i Oslo ble vedtatt samkjørt med prosjektet for nytt klinikkbygg på Radiumhospitalet, og hele prosjektet fikk godkjent forprosjektrapporten i styret i HSØ november 2019. Prosjektet i Bergen skal etter planen ferdigstille forprosjekt våren 2020.

For nærmere beskrivelse av tidligere utredninger og beslutninger henvises det til sluttrapport «Konseptrapport – etablering av protonbehandling» fra juni 2016 [1], og «Forprosjektrapport Nytt klinikk- og protobygg ved Radiumhospitalet», november 2019, tidligere oversendt.

Ved Radiumhospitalet er flere bygninger allerede revet og grunnarbeider og fundamentering er i gang på tomten. Arbeidet med bygget som huser protonterapianlegget (M1) vil lyses ut som en egen råbyggentreprise i mars 2020, entreprenør vil bli kontrahert sommeren 2020 og etter en innledende samspillsfase med informasjon om de spesielle forhold rundt strålevern for dette prosjektet, vil støpe- og betongarbeid starte i september 2020. Oppstart av råbygg i september 2020 er en viktig milepæl for å nå prosjektets planlagte ferdigstillellesdato innen utgangen av 2023. Det er derfor av stor viktighet for prosjektet at godkjenning foreligger i tide slik at arbeidet ikke forsinkes.

### 2.2.1 Tidligere myndighetsgodkjenninger

Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) gav 1. mai 2019 HSØ godkjenning for anskaffelse av utstyr til strålebehandling med protoner. Godkjenningen er hjemlet i forskrift av 16. desember 2016 nr. 1659 om strålevern og bruk av stråling (strålevernforskriften) § 9 bokstav f. Generelle krav er gitt i strålevernloven, strålevernforskriften og internkontrollforskriften. DSA stilte spesielle vilkår til denne godkjenningen, jf. Strålevernforskriftens §11. Dette designdokumentet er ment å oppfylle vilkår 1a – «*samtykke til bygging før støping kan starte.*» Designdokumentet har som formål å dokumentere at byggeplaner og skjermingstiltak er i samsvar med gjeldende lovgivning for strålevern, ivaretagelse av dosegrenser for stråledoser til mennesker og til omgivelsene samt er i tråd med etablert forvaltningspraksis.

## 2.3 Ansvarsmatrise

Prosjektet for nytt klinikk- og protonbygg, Nye Radiumhospitalet, eies av Helse Sør- Øst RHF frem til eierskifte av bygg og utstyr til Oslo Universitetssykehus HF foretas. Eierskiftet er planlagt i 2023/2024. Nødvendige myndighetsgodkjenninger i byggeprosessen, inkludert krav til strålevern ligger under prosjektorganisasjonen HSØ, Prosjekt nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet (PRAD).

Prosjekteringsgruppen for nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet er utførende for all prosjektering av løsninger for bygg og teknikk. Denne ledes av Norconsult AS med Momentum Arkitekter, Hennig Larsen Architects, AART Architects samt supplerende rådgivere.

Beregninger av skjerming bygg, aktivering av luft, kjølevann og grunnvann inngår i kontrakt med utstyrsleverandør, Varian Medical Systems, skjermingsberegningene og rapportene er utarbeidet av Meissner Consulting GmbH som er en underleverandør for utstyrsleverandøren.

Alt underlag for skjermingsberegninger er utarbeidet av Oslo Universitetssykehus HF og prosjektorganisasjonen i samarbeid med Haukeland Universitetssykehus.

Grunnanalyser er utført av Norges Geotekniske institutt.

Prosjektorganisasjonen er ansvarlig for å verifisere at alle utkast er korrekt og lover og regler tilstrekkelig beskrevet.

Protonbygget skal utformes i henhold til nasjonale lover og forskrifter for strålevern og stråleskjerming. Bygget skal skjermes på en slik måte at både personell, pasienter og allmenn befolkning skal, ved full drift av anlegget, ha så lave årlige stråledoser som mulig (ALARA-prinsipp).

Institutt for energiteknikk (IFE), har utført en vurdering av stråledoser til befolkningen fra utslipp av radionuklider fra anlegget. IFE har vurdert to bestrålingsveier, aktivering av luft i anlegget fra sekundære nøytroner og primære protoner, samt mulighet for aktivering av grunnvann av sekundære nøytroner.

Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) er myndighet og kompetanseorgan for bruk av stråling og for radioaktiv forurensing i miljøet. DSA skal i etableringsprosessen og ved senere drift av protonanlegget vurdere om virksomheten oppfyller gjeldende krav i strålevern- og forurensningsregelverkene. I planleggingsfasen har DSA gitt veiledning om regelverk og informasjon om nødvendige godkjenninger og tillatelser som virksomheten må innhente for å kunne tilby protonbehandling.

## 2.4 Lover og retningslinjer

Protonterapianlegg og ulike skjermingsberegninger skal reguleres etter følgende lover og retningslinjer:

Tabell 1: Lover, retningslinjer og veiledninger

ID	Dokument ID	Dokumentnavn	Utgiver	Leverandør
		<b>ARBEIDSMILJØ</b>		
A	LOV-2005-06-17-62	Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven)	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
B	FOR-2011-12-06-1355	Forskrift om organisering, ledelse og medvirkning	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
C	FOR-2011-12-06-1356	Forskrift om utforming og innretning av arbeidsplasser og arbeidslokaler (arbeidsplassforskriften)	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
D	FOR-2011-12-06-1357	Forskrift om utførelse av arbeid, bruk av arbeidsutstyr og tilhørende tekniske krav (forskrift om utførelse av arbeid)	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
E	FOR-2011-12-06-1358	Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer (forskrift om tiltaks- og grenseverdier)	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
		<b>STRÅLEVERN</b>		
F	LOV-2000-05-12 nr. 36	Strålevernloven	Helse- og omsorgsdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
G	FOR-2016-12-16-1659	Strålevernforskriften	Helse- og omsorgsdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
H		Veileder 6 – Veileder om Stråleterapi	Direktoratet for Strålevern og Atomberedskap	<a href="https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-6-veileder-om-straaleterapi-revidert-januar-2018.pdf">https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-6-veileder-om-straaleterapi-revidert-januar-2018.pdf</a>
I		Veileder 5 - Veileder om medisinsk bruk av røntgen – og MR-apparatur underlagt godkjenning	Direktoratet for Strålevern og Atomberedskap	<a href="https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-5-veileder-om-medisinsk-bruk-av-roentgen-og-mr-apparatur-underlagt-godkjenning.pdf">https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-5-veileder-om-medisinsk-bruk-av-roentgen-og-mr-apparatur-underlagt-godkjenning.pdf</a>
J		Veileder 10 – Veileder om nukleærmedisin	Direktoratet for Strålevern og Atomberedskap	<a href="https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-10-veileder-om-nukleaermedisin.pdf">https://www.dsa.no/publikasjon/veileder-10-veileder-om-nukleaermedisin.pdf</a>
K	No. GSG-8	IAEA Safety Standards - Radiation Protection of the Public and the Environment	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www.iaea.org/publications/11183/radiation-protection-of-the-public-and-the-environment">https://www.iaea.org/publications/11183/radiation-protection-of-the-public-and-the-environment</a>

ID	Dokument ID	Dokumentnavn	Utgiver	Leverandør
		<b>AVFALL</b>		
L	LOV 1981-03-13-6	Lov om vern mot forurensninger og om avfall (Forurensningsloven)		<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
M	FOR 2010-11-01-1394	Forskrift om forurensningslovens anvendelse på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall		<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
N	FOR-2004-06-01-931	Forskrift om begrensning av forurensning (Forurensningsforskriften)		<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
O	FOR-2004-05-01-930	Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (Avfallsforskriften)		<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
Æ	ISBN 82-7655-256-0	Veileder om bunn- og sidetetting av deponier	Statens Forurensningstilsyn	<a href="https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/avfall/2095/ta2095.pdf">https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/avfall/2095/ta2095.pdf</a>
		<b>BYGG</b>		
P	LOV-2008-06-27-71	Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven)	Kommunal- og moderniseringsdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
Q	FOR-2017-06-19-840	Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)	Kommunal- og moderniseringsdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
R	TEK17	Veiledning om tekniske krav til byggverk	Direktoratet for byggkvalitet	<a href="https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/">https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/</a>
		<b>HELSE-, MILJØ- OG SIKKERHETSARBEID</b>		
S	FOR-1996-12-06-1127	Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter (Internkontrollforskriften)	Arbeids- og sosialdepartementet	<a href="http://www.lovdatab.no">www.lovdatab.no</a>
		<b>INTERNASJONALE ANBEFALINGER</b>		
T	No. GSR Part 6	IAEA Safety Standards - Decommissioning of facilities No. GSR Part 6	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1652web-83896570.pdf">https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1652web-83896570.pdf</a>
U	No. GSG-10	IAEA Safety Standards - Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www.iaea.org/publications/12198/prospective-radiological-environmental-impact-assessment-for-facilities-and-activities">https://www.iaea.org/publications/12198/prospective-radiological-environmental-impact-assessment-for-facilities-and-activities</a>
V	No. SSG-49	IAEA Safety Standards - Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www.iaea.org/publications/12291/decommissioning-of-medical-industrial-and-research-facilities">https://www.iaea.org/publications/12291/decommissioning-of-medical-industrial-and-research-facilities</a>
W	No. SSG-DS434	IAEA Draft safety guide - Radiation safety of accelerator-based radioisotope production facilities	International Atomic Energy Agency, IAEA	

ID	Dokument ID	Dokumentnavn	Utgiver	Leverandør
X	No. TRS 283	Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/19/083/19083342.pdf">https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/19/083/19083342.pdf</a>
Y	No. GSR Part 3	Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standard	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf">https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf</a>
Z	No. TECDOC 1891	Regulatory control of the Safety og Ion Radiotherapy Facilities	International Atomic Energy Agency, IAEA	<a href="https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1891web.pdf">https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1891web.pdf</a>

## 2.5 Dimensjonerende retningslinjer for skjermingsberegning

Strålevernforskriftens krav til dosegrenser er benyttet som grunnlagsinformasjon for skjermingsberegningene. I Tabell 2 er Veileder 6 benyttet som referanse for en skjematisk oversikt over dimensjonerende dosegrenser ved nybygg.

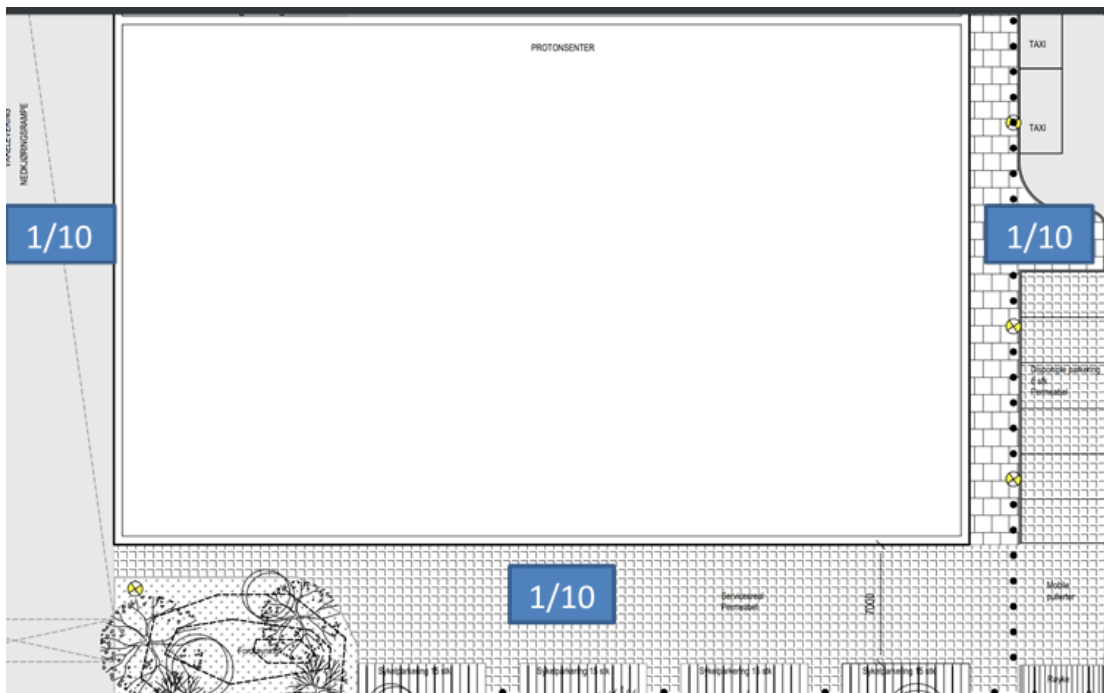
Tabell 2: Effektiv dosegrenser og dimensjonerende dosegrenser [H]

	Effektive dosegrense pr år	Dimensjonerende dosegrense (planlagt med)	Dosegrense pr time
Allmenhet	1 mSv/år	0,25 mSv/år	7,5 µSv/time
Yrkeseksponerte	20 mSv/år	1 mSv/år	

Med yrkeseksponerte menes utstyrleverandørens ansatte ved protonterapianlegget, personell som jobber med protonterapi slik som stråleterapeuter, fysikere og ingeniører. Annet personell, slik som vaskepersonell og lignede, vil følge OUS sine rutiner for opplæring og klassifisering av ansatte som jobber i områder med stråling.

Allmennhet og ikke-yrkeseksponerte arbeidstakere skal ikke eksponeres for en effektiv dose som overstiger 0,25 mSv/år, mens yrkeseksponerte ikke skal utsettes for mer enn 1 mSv/år. Skjermingstiltakene er utført på en slik måte at dette oppfylles. I tillegg gjelder doserategrensen på 7,5 µSv/time, forutsatt at en eventuell overskridelse av denne doseraten kun skjer i korte tidsrom.

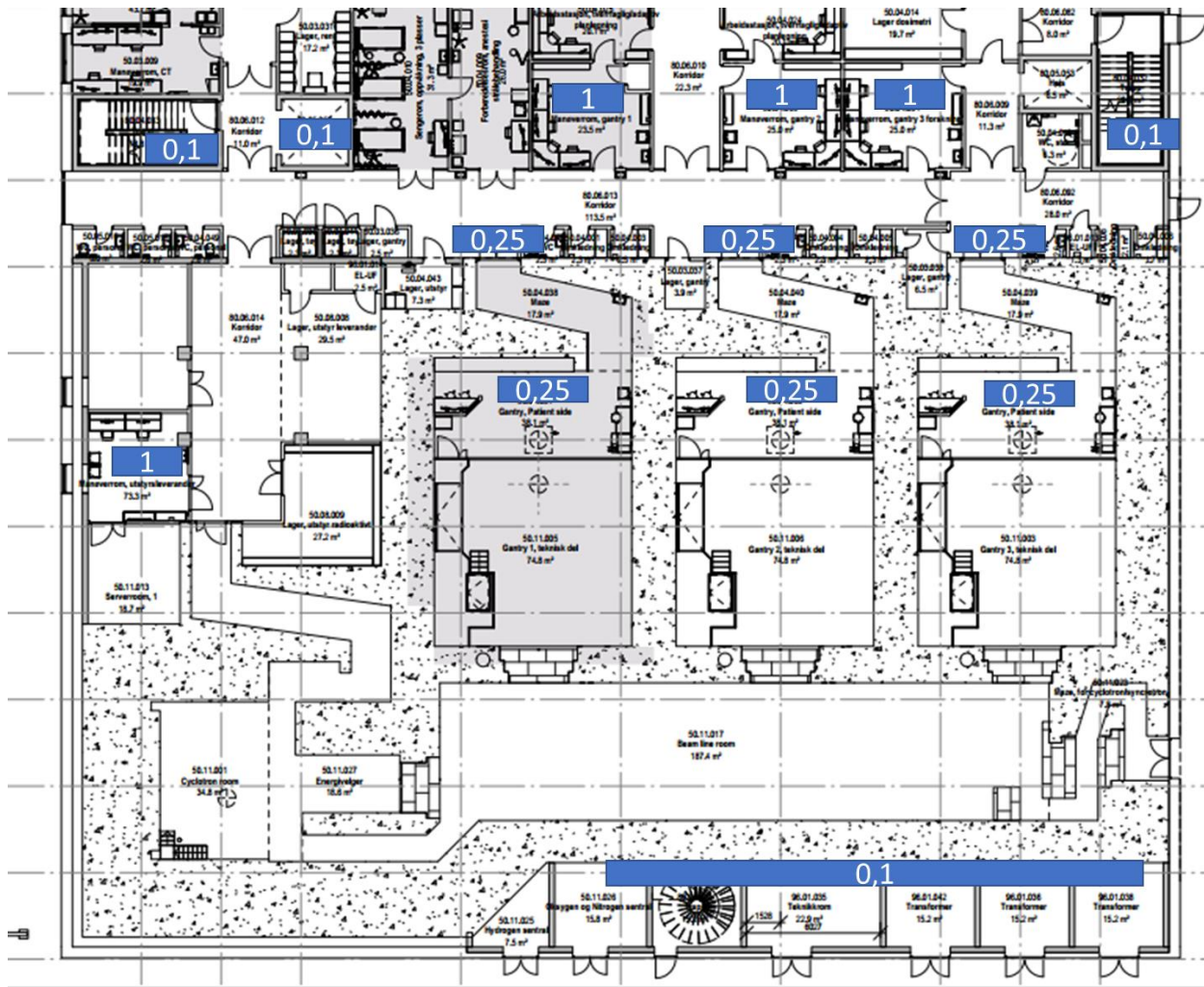
Oppholdsfaktor er definert som den antatte tiden en person oppholder seg i tilstøtende areal av der hvor strålingen pågår. Oppholdsfaktorer i og utenfor protonterapianlegget er skissert i Figur 2 og Figur 3.



Figur 2: Oppholdsfaktorer 1/10 gjelder for området på utsiden av protonterapisenteret. Her er det planlagt med fortau og korttidsparkering mot øst, sykkelparkering mot sør og nedkjøringsrampe til varemottak mot vest.



Oppholdsfaktor på 1/10 representerer 10 % av en arbeidsdag på 8 timer. Oppholdsfaktor på 1, som vist i Figur 3, tilsvarer en fast arbeidsplass, altså forventes det her at en ansatt kan oppholde seg 100 % av arbeidsdagen. Veileder 6 for Stråleterapi [H] er benyttet som referanse for disse oppholdsfaktorene. I tekniske areal, trapper, WC og tak etc. er oppholdsfaktor satt til 10 %, som dimensjonerende skjermingsfaktor. Sannsynligheten for at samme person oppholder seg 10 % av arbeidstiden i dette området er liten.



Figur 3: Oppholdsfaktorer inne i protonterapisenteret, plan U1

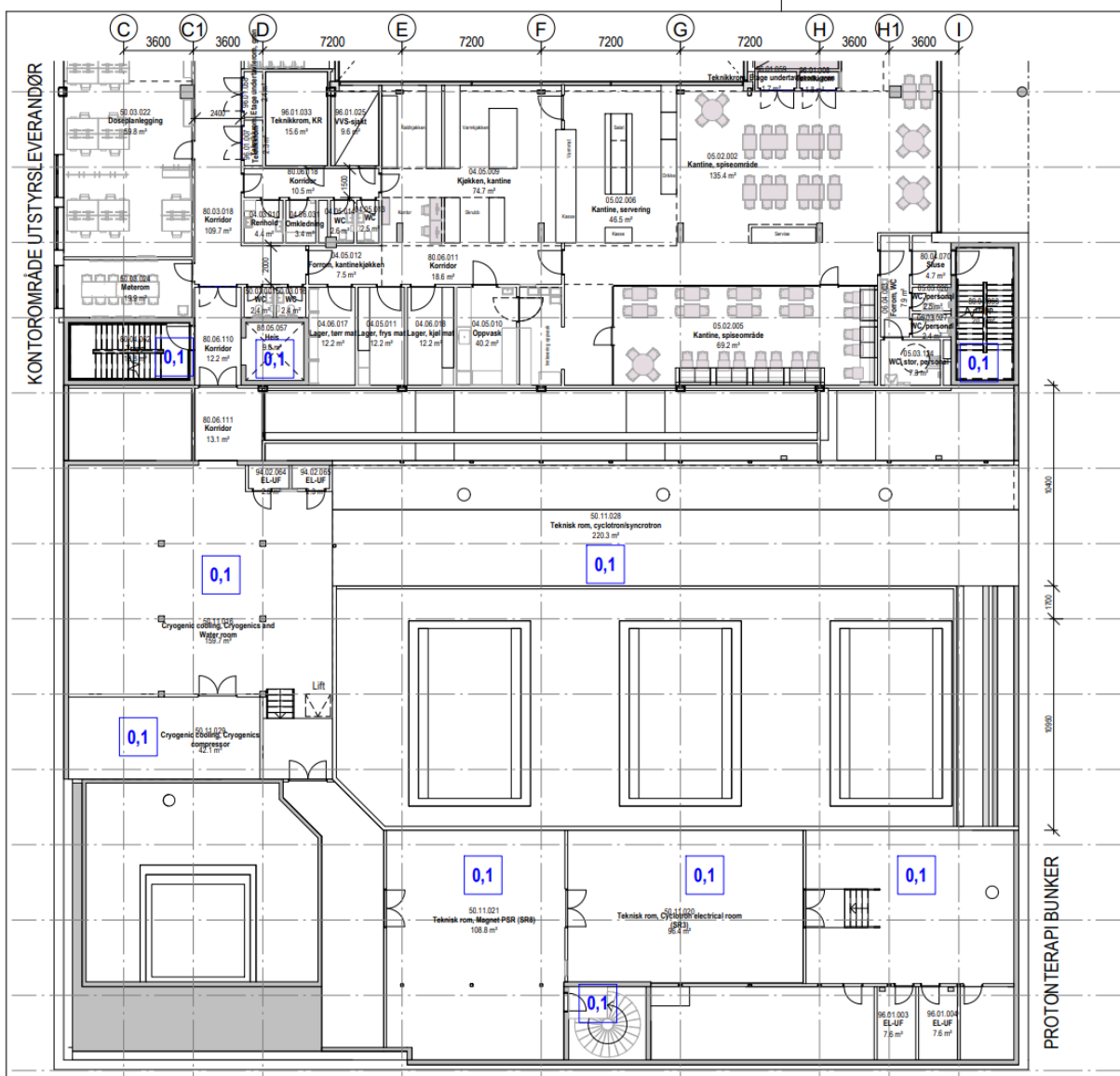
Oppholdsfaktorer i og utenfor protonterapianlegget er listet opp i Tabell 3.

Tabell 3: Oppholdsfaktorer i og utenfor protonterapianlegget

Type rom	Oppholdsfaktor	Oppholdsfaktor i % av en arbeidshverdag
Kontrollrom og kontorer	1	100
Behandlingsrom (ved siden av), inngang maze	0,25	25
Uteareal, toalett, heis, korridor og tekniske rom	0,1	10



Oppholdsfaktorer for plan 01, over behandlingsetasje er vist i Figur 4.



Figur 4: Oppholdsfaktor for plan 01, areal over behandlingsetasje U1

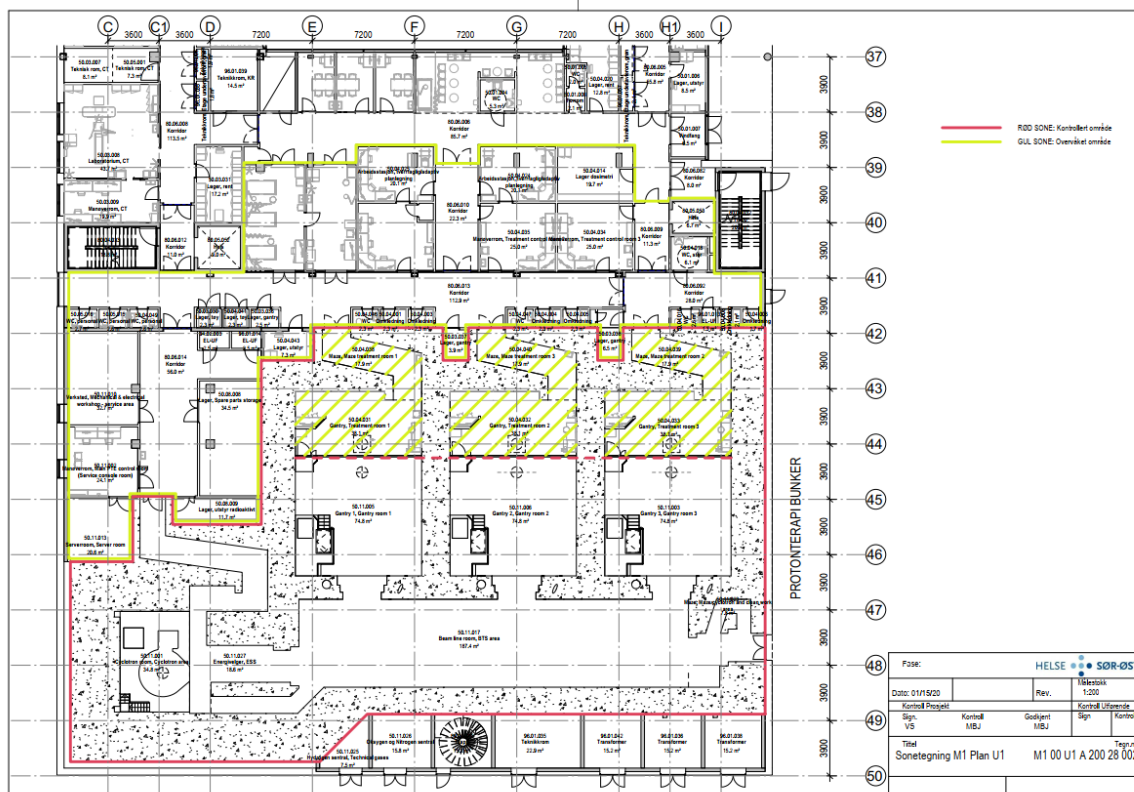
### 2.5.1 Klassifisering av overvåket og kontrollert område i henhold til Strålevernforskriften

Strålevernforskriften definerer kontrollert område som et areal der arbeidstakeren kan utsettes for mer enn 6 mSv per år og overvåket område som et areal der en arbeidstaker kan utsettes for mer enn 1 mSv per år.

For protonsentret vil de kontrollerte områdene omfatte behandlingsrommenes inngangssone (maze), hvert behandlingsrom med tilhørende tekniske bakre del av anlegget. For nærmere beskrivelse av disse områdene se kapittel 3.2.

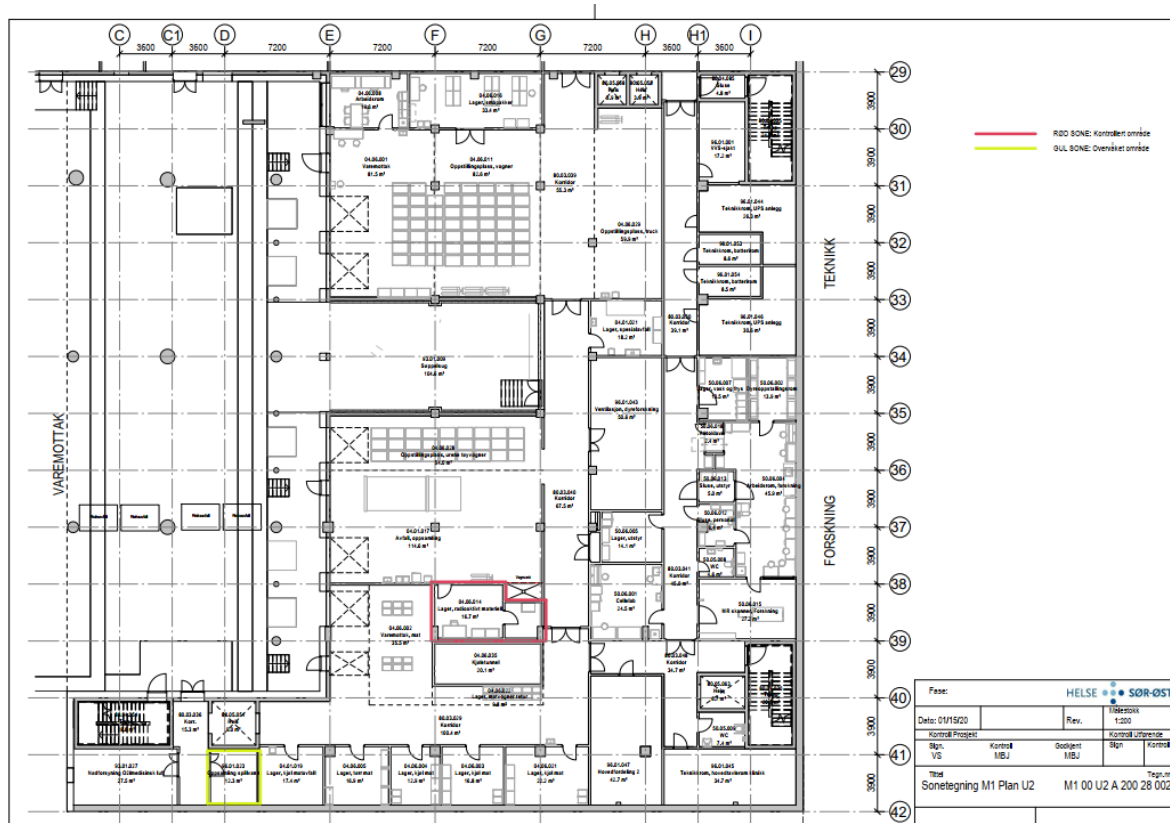
For de tekniske delene som inneholder det stråleproduserende utstyret vil det være en strengere adgangskontroll enn det vil være for behandlingsrom på grunn av det høye strålenivået ved operasjon av syklotron.

Overvåket område er områdene utenfor pasientbehandlingsrom og forskningsrom, korridor med støtterom foran behandlingsrom og kontrollrommene, markert med gult på Figur 5. Det vil ikke være mulig å gå inn i pasientbehandlingsrommet når stråling pågår, og det skal utenfor hvert behandlingsrom monteres et lyssignal med opplysende tekst «Stråling på» når bestråling pågår i de respektive behandlingsrommene. Behandlingsrommene er skravert gule i figuren under, dette fordi når stråle er på regnes de som kontrollerte områder, mens når stråle ikke er på vil det være overvåket område.

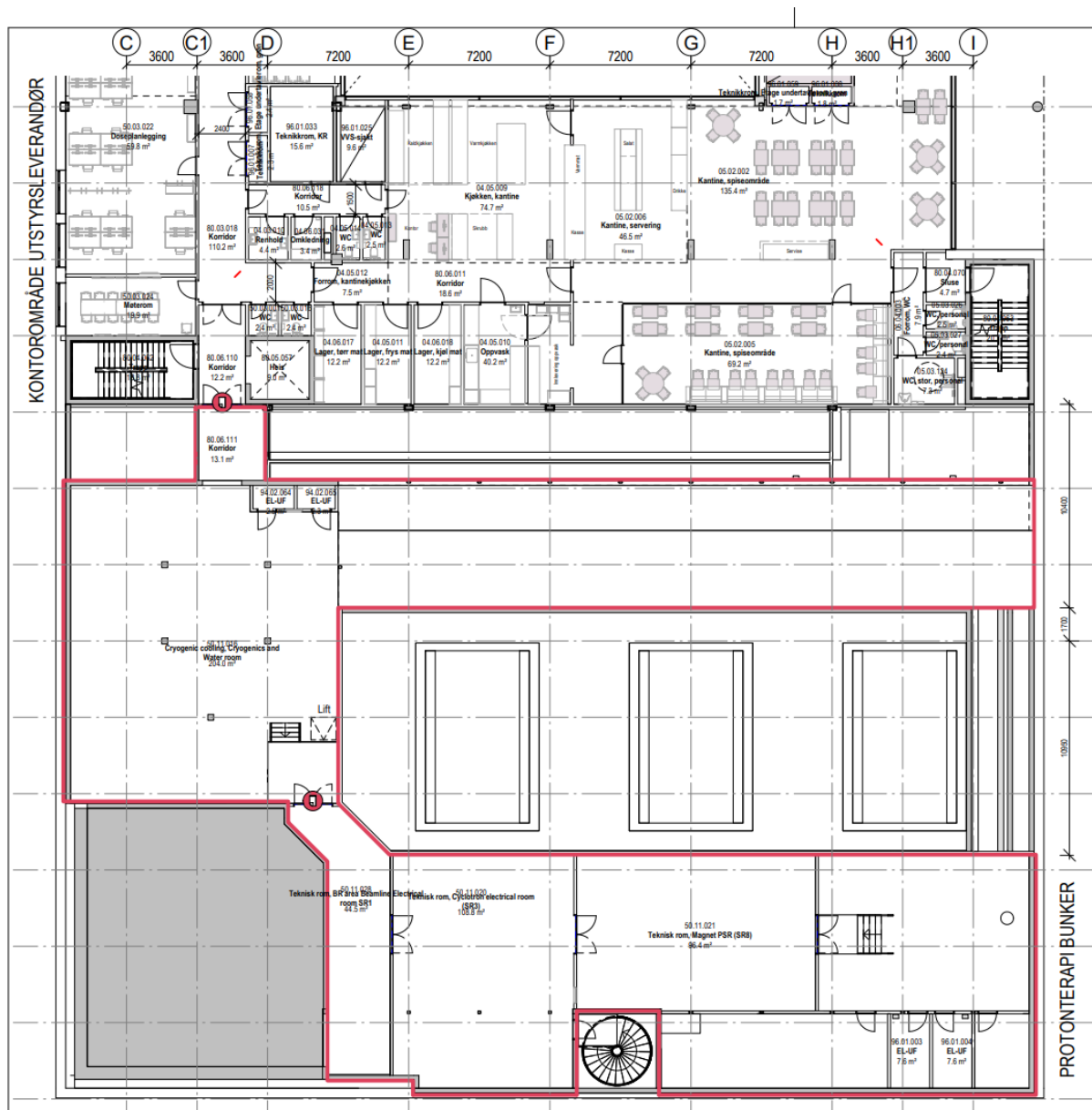


Figur 5: Sonetegning Bygg M1, plan U1, behandlingsområdet - kontrollert område markert med rødt og overvåket område markert med gult

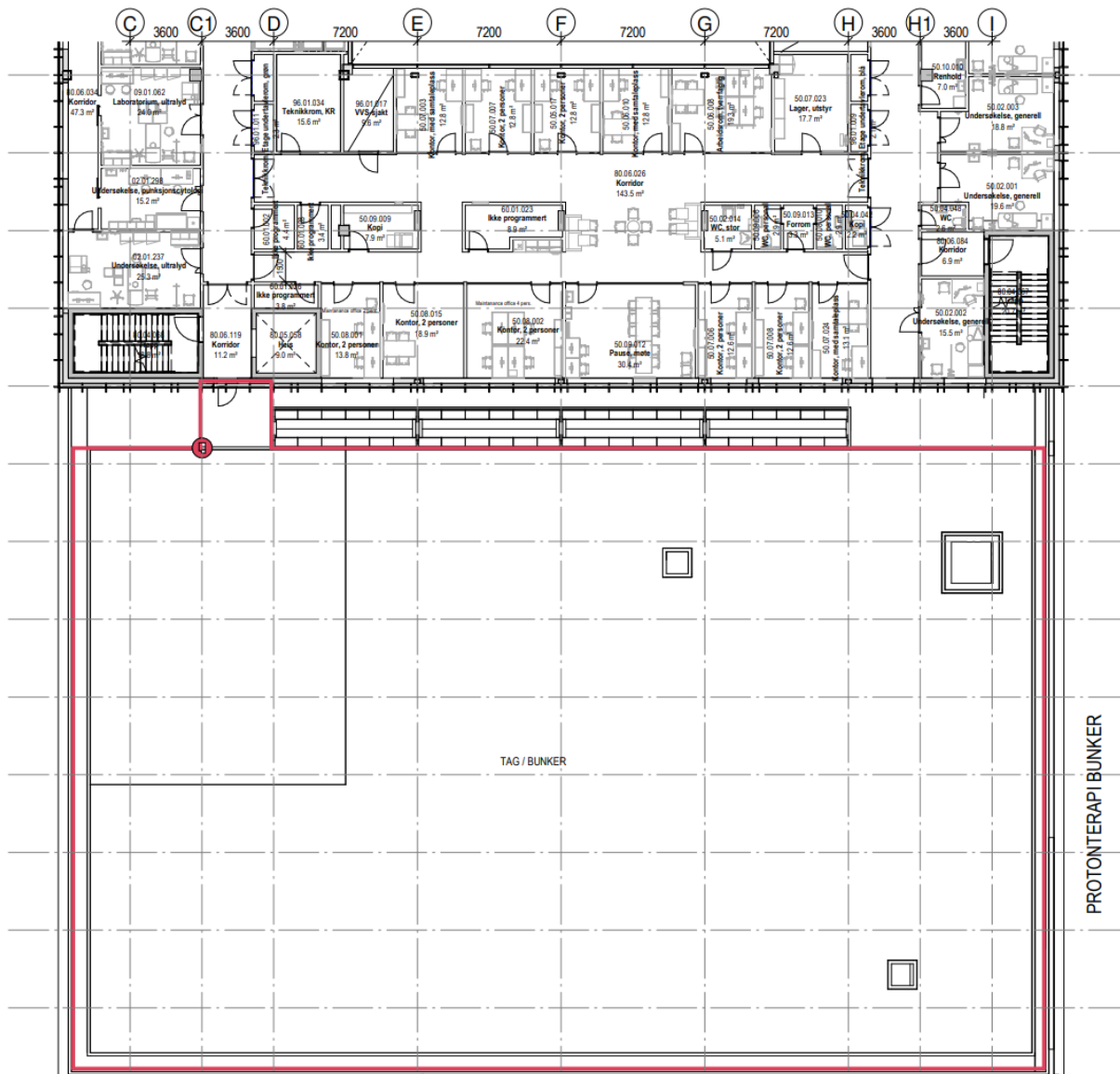
Tekniske arealer tilknyttet kjølevann (for oppsamlingstank i plan U2, se Figur 6) og ventilasjon i plan 01 er betegnet som kontrollerte områder, da dette ligger rett over strålekildene; energiseleksjonssystem, stråletransportsystem og gantry. Ferdslen i dette området vil begrenses til et nivå som tilsvarer en oppholdsfaktor på 0,1. Soneinndeling for plan 01 og tak over dette, plan 02, vises i Figur 7 og Figur 8.



Figur 6: Sonetegning Bygg M1, plan U2, varemottak - kontrollert område (lager for stråleterapi) markert med rødt og overvåket område (opsamlingsanlegg aktivert kjøleevann) markert med gult



Figur 7: Sonetegning Bygg M1, plan 01, teknisk arealer og kontorområder - kontrollert område markert med rødt



Figur 8: Sonetegning kontrollert område i rødt for Bygg M1, plan 02, tilsvarer tak over plan 01

## 2.5.2 Vurdering av stråledoser til teknisk personell

Adgang til de mest strålebelastede områdene, arealet rundt syklotron, energiseleksjons-system, stråletransportsystem, teknisk bakside av gantry og tekniske rom i plan 01, vil kun være for sertifisert teknisk personell fra utstyrsleverandøren. For en oversikt over hvilken dose disse kan få er det vedlagt en rapport som viser oversikt over avlesninger persondosimetri i perioden januar til september i 2019. Her er det inkludert 202 personer som arbeider på 10 ulike protonanlegg samt ved fabrikken i Troisdorf. Personene er ansatte som arbeider med installasjon, kommisjonering, daglig drift, vedlikehold og service av tilsvarende utstyr som skal installeres ved Radiumhospitalet. På disse 9 månedene indikerer funnene at 93 % av personellet mottar mindre enn 1 mSv og at 97 % av staben mottar mindre enn 2 mSv. Serviceingeniørene mottar i snitt 0,31 mSv på 9 måneder, noe som tilsvarer 0,41 mSv/år [10].

Når det gjelder annet personell utover utstysleverandørens ansatte som skal inn i disse arealene så skal disse ha opplæring, bære persondosimeter, følge samme prosedyrer som utstysleverandøren og eventuelt følges av disse. Dette er snakk om personell som for eksempel skal utføre service på byggets tekniske anlegg, bytte lyspærer eller brannmenn ved eventuell brann. I de fleste tilfeller planlagte og sjeldne besøk.

### 3 Beskrivelse av bygg for protonanlegg

Bygg for protonanlegg, M1, er en del av nytt klinikk- og protonbygg ved Radiumhospitalet – Nye Radiumhospitalet. Nytt klinikk- og protonbygg er direkte koblet på eksisterende sykehus flere steder og arealer for protonbehandling er en innlemmet del av sykehuset. Et viktig prinsipp for prosjektet at hele sykehuset med alle funksjoner fremstår som en helhet.

#### 3.1 Beskrivelse av protonbygg, Bygg M1



Figur 9: Utsnitt modell, protonbygg M1 lengst mot sør i bildet, med klinikkdel M2 og adkomstplass og hovedinngang for Nye Radiumhospitalet i vest

Bygg M1 er et selvstendig bygg over to etasjer; plan U1 er behandlingsetasjen og Plan 01 inneholder tekniske arealer. Ettersom utstyret for protonbehandling (gantry) går over 3 etasjer, er det i bunnplaten under plan U1 forsenkninger til dette utstyret. På taket av M1 er det plassert tekniske installasjoner, eksempelvis avkast for ventilasjon. Bygg M1 har et fotavtrykk på 1746 m<sup>2</sup>. Bygg M1 knytter seg til bygg M2 ved en korridor med overlys. Bygg M2 går over 4 etasjer og inneholder klinisk areal for protonterapi samt en rekke støtterom. Bygg M1 grenser mot adkomstplass og sykehusets hovedinngang i øst og nedkjøringsrampe til sykehusets varemottak i vest. Sør for M1-bygget, mot Ringveien, er det utearealer med blant annet sykkelparkering.

Bygg M1 og M2 vil i skjermingssammenheng inneholde tre hovedområder basert på utstyret for protonbehandling;

- Syklotronbunker med protonakselerator, energimoduleringsystem («Degrader»), energiutvelgelsessystem (ESS), stråletransportområde med fokuserings- og



bøymagneter (BTS) og teknisk bakre halvdel av roterende gantry. Dette området vil være omsluttet av tykke betongvegger og være strengt adgangsregulert.

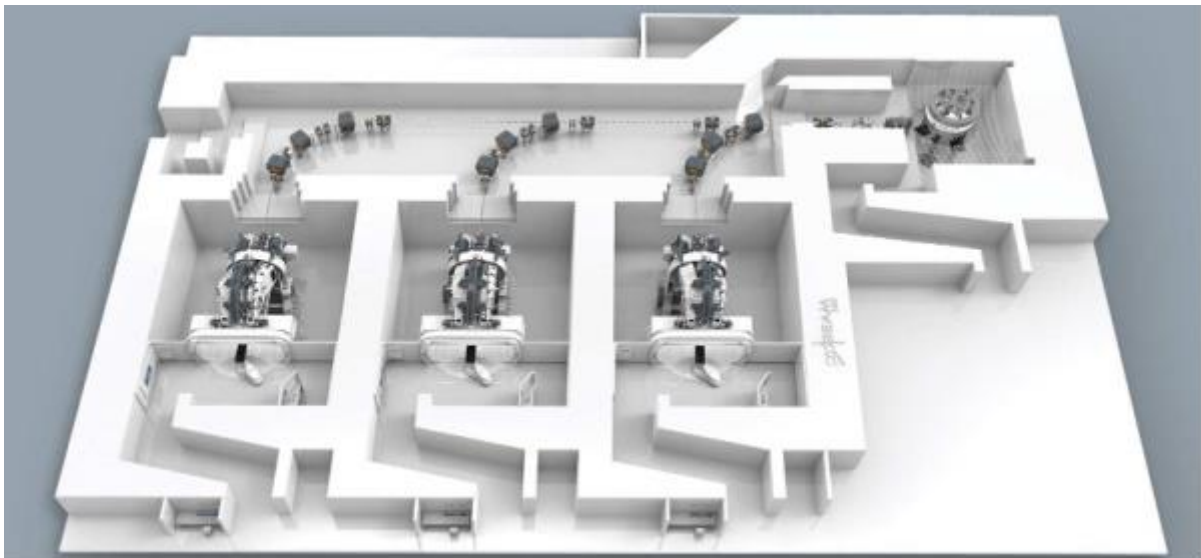
- Behandlingsrom og maze inn til dette; ved Radiumhospitalet er det 3 identiske rom, alle utstyrt med 360° roterende gantry
- Pasientområde; venteområde, anestesi, diagnostikkområde, omkleddingsarealer, tekniske rom og kontrollrom

### 3.2 Beskrivelse av utstyret

Anlegget ved Radiumhospitalet består av tre likt utformede strålebehandlingsrom. To rom er dedikert til pasientbehandling og ett til forskning. De tre rommene er identiske, noe som muliggjør benytte forskningsrom til pasientbehandling i fremtiden hvis dette skulle bli aktuelt. Protonanlegget består av en syklotron som akselererer protoner opp til 226 MeV og kan levere en protonstråleintensitet opp mot 800 nA. På vei fra syklotron til pasient i behandlingsrom styres protonene gjennom et energiseleksjonssystem som modulerer de nødvendige protonenergier for hvert behandlingsfelt ved at protonene traverserer materiale med varierende tykkelse, avhengig av pasientens doseplan, og protoner med riktig energi styres og fokuseres herfra.

Stråletransportsystemet (BTS) transporterer protonene med valgt energi videre inn til det aktuelle behandlingsrommet. Hvert behandlingsrom er utstyrt med et 360 graders roterende gantry som leverer protonstrålen til pasient som skarpt avgrensede stråleknipper med noen millimeters transversal utstrekning, såkalt *Pencil beam scanning*. Det er ikke mulig å sende protonstrålen til flere behandlingsrom samtidig.

Både i Oslo og Bergen er det utstyrsleverandørens kompakte system som skal installeres, ProBeam 360. En illustrasjon av et ProBeam 360-anlegg vises i Figur 10.

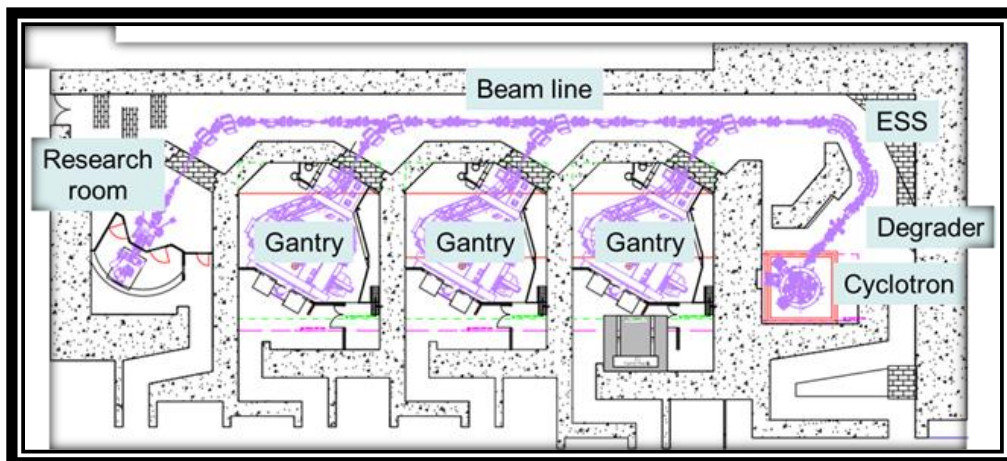


Figur 10: Illustrasjon oversikt protonanlegg ProBeam 360 med syklotron, strålelinje og gantry tilsvarende løsning ved Nye Radiumhospitalet syklotron sees øverst til høyre i illustrasjonen

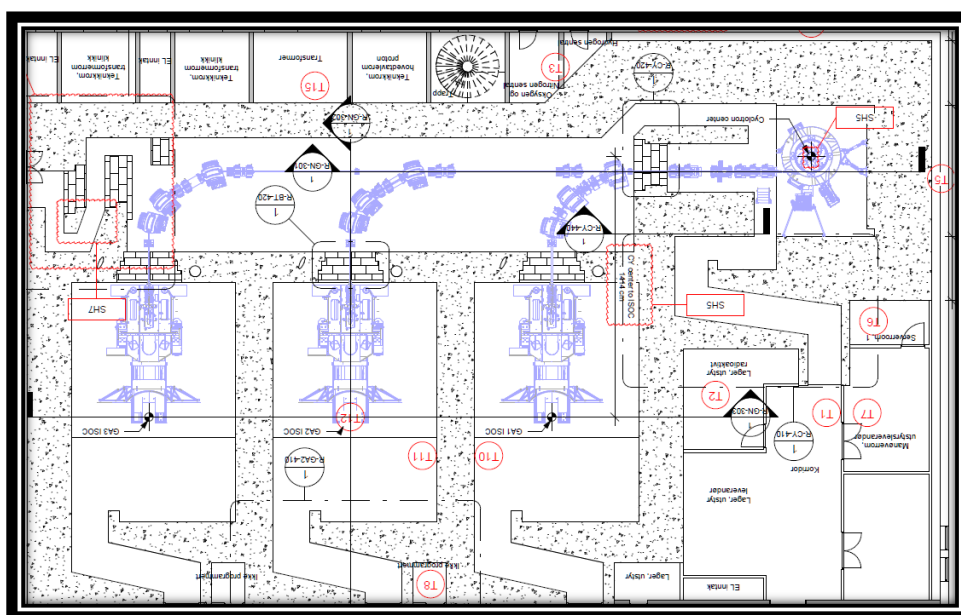
### 3.2.1 Forskjeller mellom ProBeam og ProBeam 360

DCPT i Århus benyttet som referanseprosjekt både i planleggingsfase og prosjektering for både prosjektet i Oslo og prosjektet i Bergen. Imidlertid er det ved DCPT installert et noe annerledes system enn det som skal installeres i Oslo og Bergen. Ved DCPT er ProBeam system installert, i Oslo og Bergen skal det installeres en mer kompakt løsning, ProBeam 360. Dette betyr at anlegget ved DCPT har noen vesentlige forskjeller i konstruksjon, layout, omgang og plassering av protonterapiutstyret, inkludert endret maksimums- og minimumsenergi ut fra degrader og ESS, sammenlignet med de planlagte anleggene i Norge.

I Figur 11 og Figur 12 vises et snitt av betongkonstruksjonen og utstyret for ProBeam og ProBeam 360 (disse er ikke vist i samme målestokk, og tegningen fra Oslo er rotert for å vises med samme orientering av anlegget som det ved DCPT). ProBeam 360 systemet krever mindre plass enn de anlegg utstyrsleverandør har levert tidligere. Det har også enklere og lettere komponenter, for eksempel er vekten av hvert gantry redusert med 150 tonn. I tillegg kreves mindre areal for de tekniske støttesystemene enn tidligere løsning.



Figur 11: ProBeam - figur hentet fra Radiation Safety Assessment – Loss of Proton Beam – fra DCPT 2016



Figur 12: ProBeam 360 - figur hentet fra Oslo ProBeam 360 3 Gantry Shielding Report 2019



Som det vises av figurene, er det ulik orientering av syklotron, endringer i området for energiseleksjon og en annen innretning av stråletransportsystem og gantryene er plassert i en annen vinkel. Dette medfører at skjermingsberegninger og påfølgende betongkonstruksjon vil være unik for ProBeam 360 systemet, da det er få resultater fra tilsvarende beregninger ved DCPT som har ProBeam systemet, annet enn metodikken, som er direkte overførbart. Når det gjelder komponentene i utstyret, er syklotronen tilnærmet den samme ved DCPT og i Norge, noe som gir overførbart for forhold omkring for eksempel aktivering av luft og kjølevann. En viktig forskjell mellom syklotron ved DCPT og de kommende syklotroner i Norge, er at maksimal energi ut fra syklotronen ved DCPT er 250 MeV, mens syklotronene som installeres i Norge leverer maksimalenergi 226 MeV, og tilsvarende er minimumsenergien 60 MeV i ProBeam 360 mot 69 MeV for ProBeam. Dette gjør at resultater av luftaktivering målt ved DCPT vil trygt kunne anvendes i Norge.

### 3.2.2 Pasientbehandling og forskning

Strålebehandlingsrommene innredes med bordrobotsystem og bordtopp, kV avbildningssystem er påhengt den roterende delen av gantry. Rommene har avbildningsstasjon og lagerplass for pasientspesifikt fikseringsutstyr. Det er mulighet for å gi pasienter generell anestesi. Det skal ikke være personell inne på rommet under stråling, og pasienter i anestesi overvåkes med medisinsk teknisk utstyr mens bestråling pågår. Pasienter og ansatte kommer inn i strålebehandlingsrommet via maze, og det vil være varslingssystemer som viser når stråling er på, samt sikkerhetsdører slik at uvedkommende ikke kommer inn under pasientbestråling. For nærmere beskrivelse av sikkerhetssystemer se kapittel 10.1. Støtterom som manøverrom, omkledding, fiksering, innledning anestesi, oppvåkning og ventearealer er plassert i direkte nærhet til strålebehandlingsrommene med adkomst fra indre korridor. Indre korridor er overvåket område med kontrollert adkomst på grunn av strålingssikkerhet, se kapittel 2.5.1.

Protonbehandling er en avansert teknologisk behandling, og det er mye arealer avsatt til utstyr og teknikk, støttesystemer og lagerbehov. Det etableres kontorer for teknisk og klinisk driftspersonell, samt arealer for utstyrsleverandør som skal drifte utstyret i henhold til inngåtte avtaler og som er ansvarlig for å opprettholde oppetidsgarantien for utstyret.

I forbindelse med innføring av protonbehandling i Norge har det vært lagt vekt på at det skal legges til rette for vesentlig forskningsaktivitet. Ett av de tre behandlingsrommene skal tilrettelegges som forskningsrom og skal benyttes til basalforskning innen fysikk og utvikling av teknologi i tillegg til preklinisk forskning som inkluderer forskning på forsøksdyr. Rommet er utformet likt pasientbehandlingsrommene og kan omgjøres til ordinært behandlingsrom uten ombygging.

I tillegg til forskningsrommet er det etablert støttearealer som inkluderer arbeidsplasser for forskere, samt arealer for oppstalling, forberedelse og behandling av forsøksdyr. For å holde forsøksdyr adskilt fra pasienter og ansatte er det etablert en avskjermet sone utenfor forskningsrommet.

Det anslås at ca. 80 % av de norske pasientene skal innlemmes i kontrollerte, kliniske studier for å kartlegge effekt og nytteverdi. Disse pasientene vil følge ordinært behandlingsforløp og

kliniske forskningsaktiviteter vil foregå i behandlingsrommene samt før og etter selve strålebehandlingen.



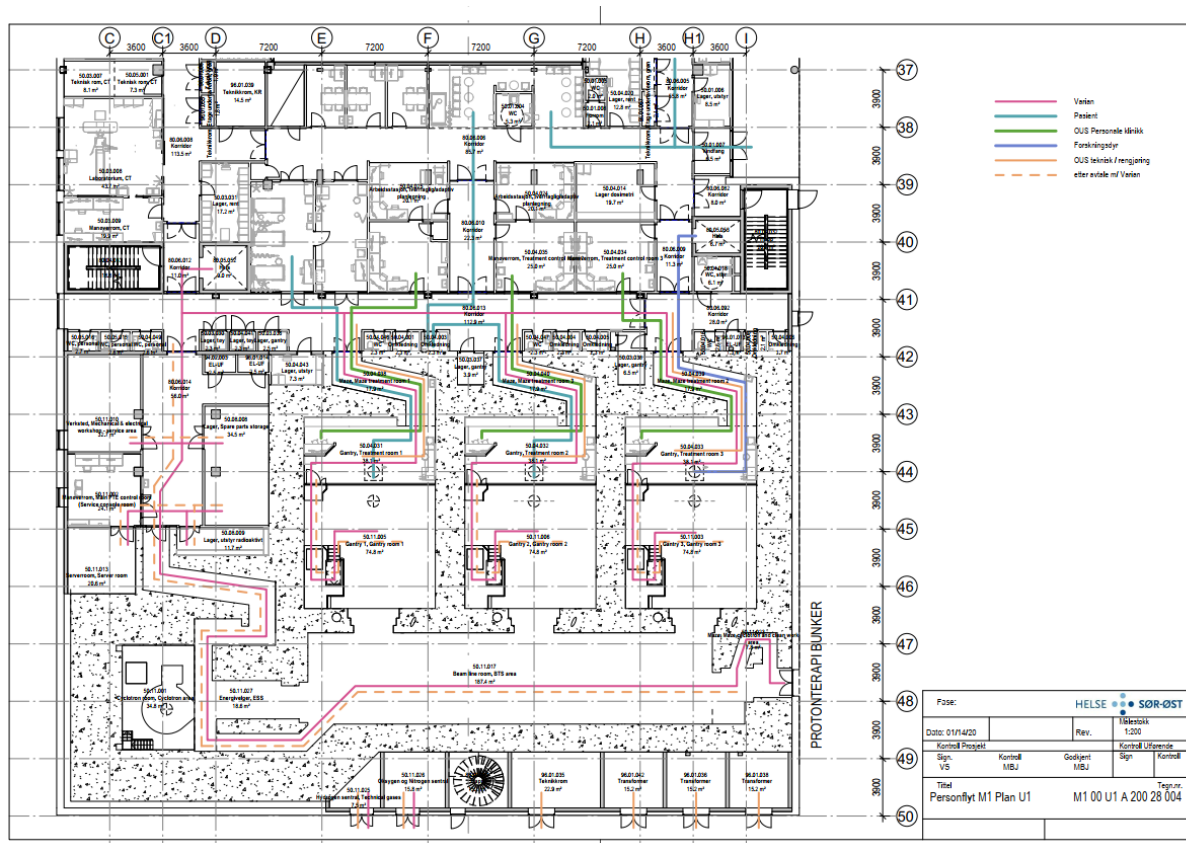
Figur 13: Illustrasjon innredning typisk pasientbehandlingsrom for protonterapi

### 3.2.3 Person- og vareflyt

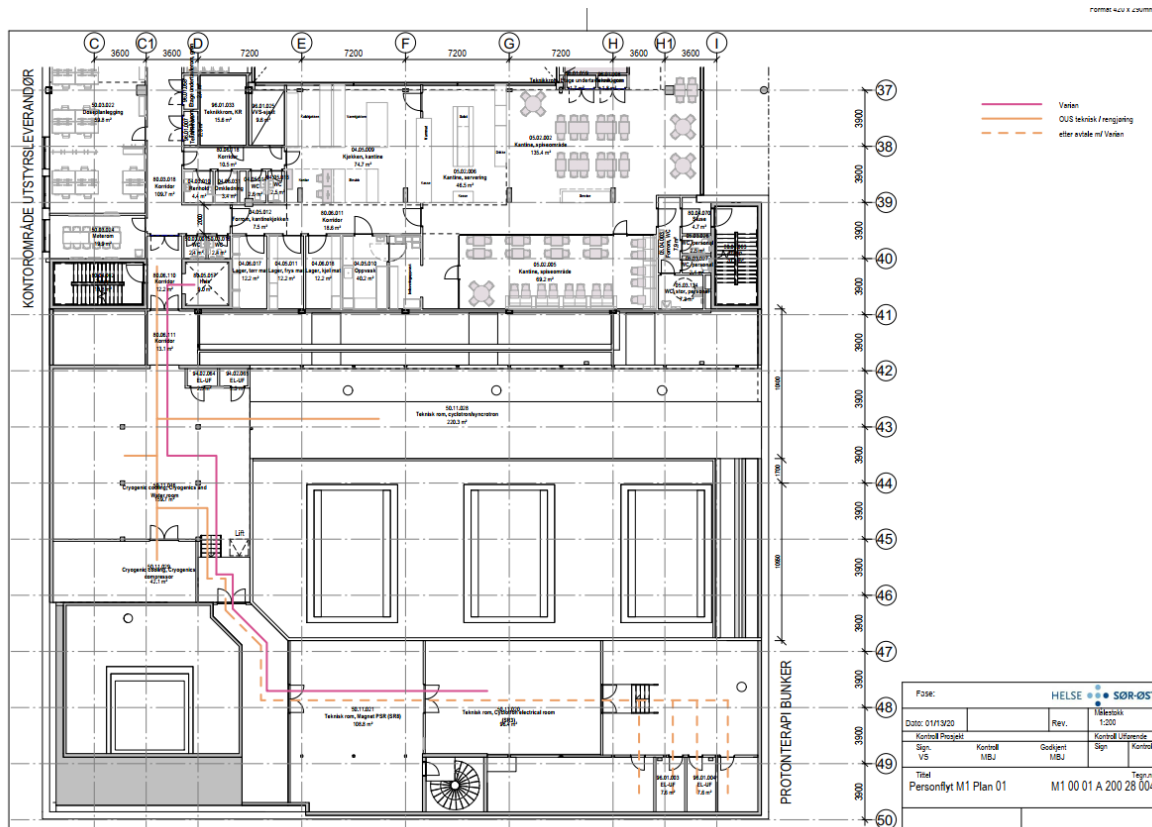
Pasienter og besøkende kommer til protonbehandling enten fra sykehusets hovedinngang i klinikkbyggets plan U1 eller bi-inngang for Helseekspress på klinikkbyggets plan O1. Begge innganger leder direkte inn til hovedgaten som binder alle bygningsdeler sammen, og her ligger sykehusets hovedresepsjon. Barn og andre pasienter som skal direkte til protonbehandling, kan komme via egen inngang direkte fra adkomstplassen.

Vareflyt følger de løsninger valgt for hele sykehuset og vil ikke omtales videre her. Forsøksdyr fra Forskningsbygget fraktes i spesialbur/transportbur enten via gangbro i plan 3 eller kjøres med bil rundt til varemottaket. Egen heis for dyr installeres fra plan U2 til U1 i protonbygget til forskningsrom.

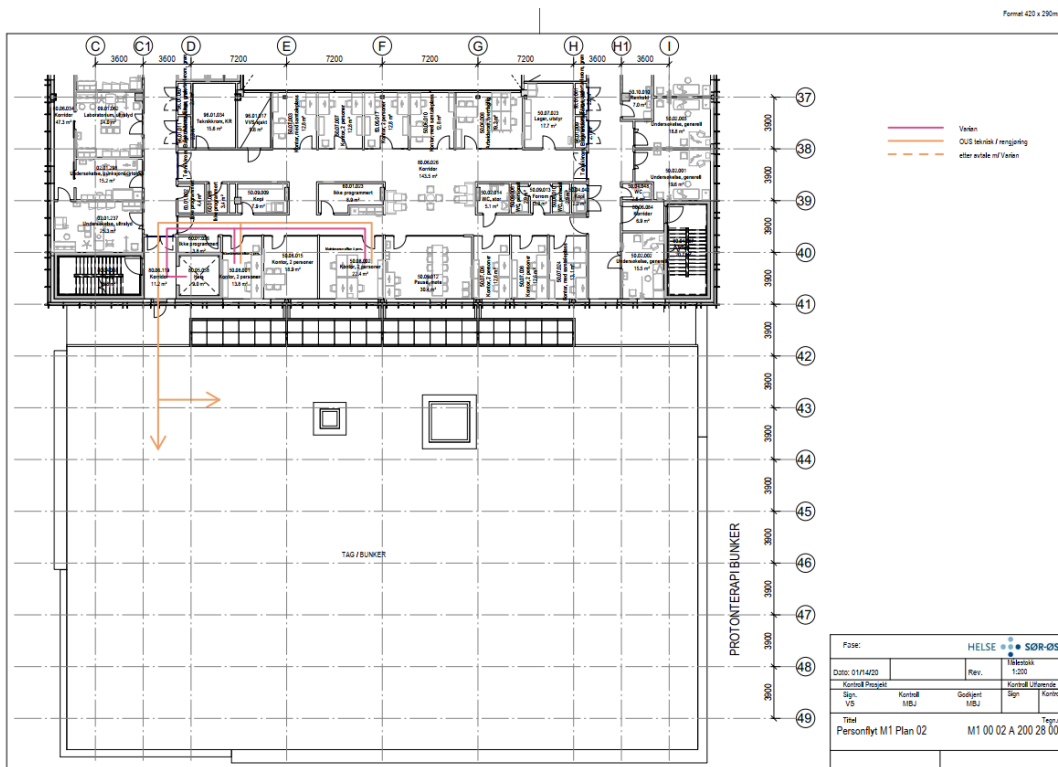
I noen sjeldne tilfeller vil leverandør av protonutstyret ha behov for å transportere inn større komponenter og deler i enden av stråletransportsystemet. Det tilrettelegges med adkomst herfra fra adkomstplassen til dette formålet. Flyt av pasienter, personell og forsøksdyr illustreres i Figur 14, Figur 15 og Figur 16.



Figur 14: Flyt personell, pasienter og forskningsdyr, bygg M1 plan U1 (behandlingsplan)



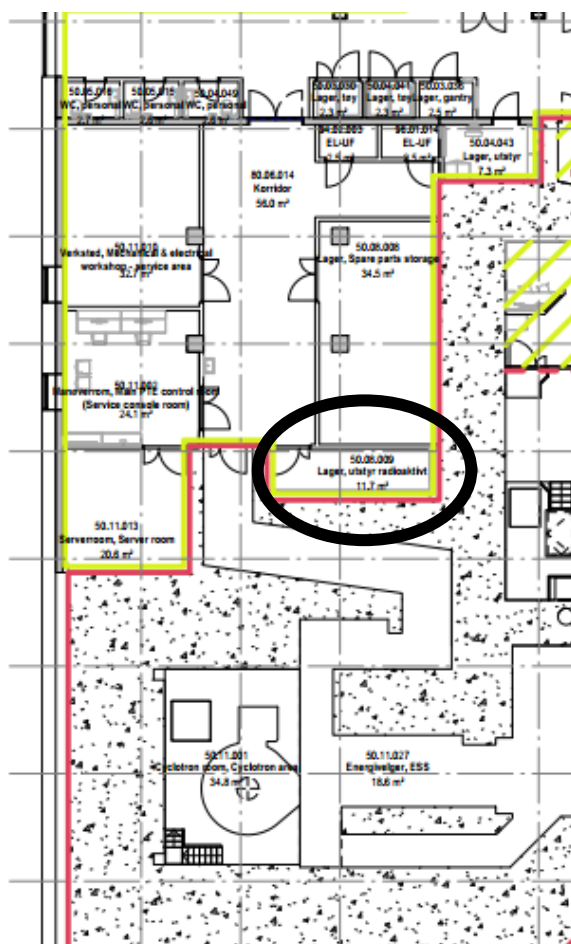
Figur 15: Flyt personell, bygg M1 plan 01 (teknisk areal)



Figur 16: Flyt personell bygg M1 plan 02 (tak og kontorområder)

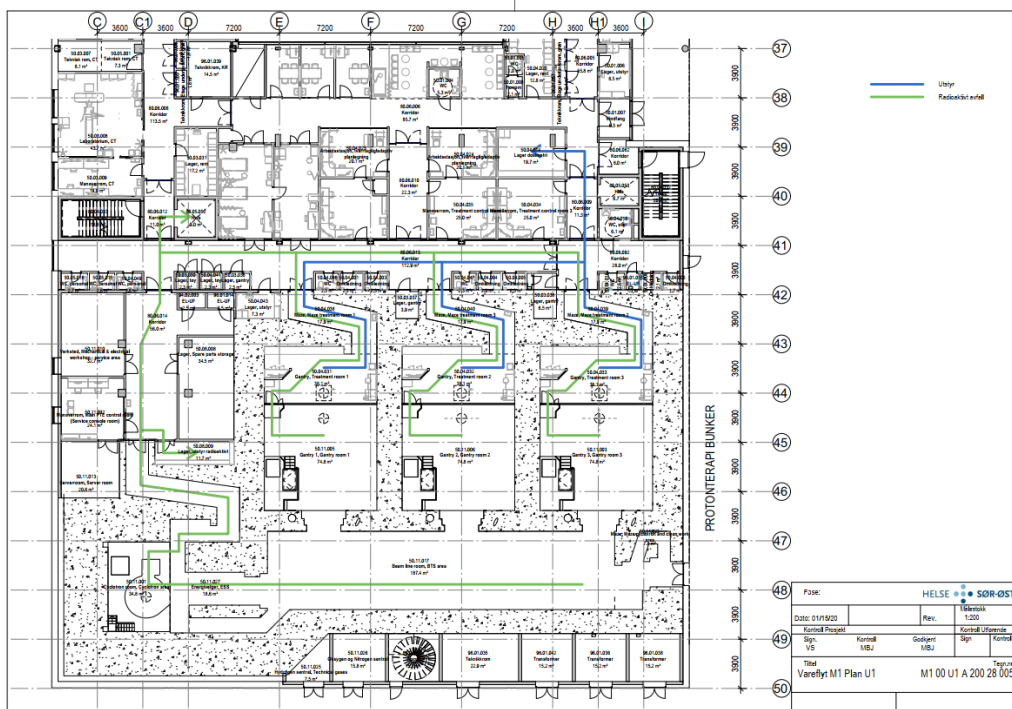
## Radioaktive deler

Når det gjelder utstyr og deler fra det strålebelastede område (dette gjelder rommene for syklotron, energiseleksjonssystem, stråletransportsystem og gantry), så skal disse kontrolleres om hvorvidt de er aktivert før de tas ut av området. Hvis de er aktiverte, skal de plasseres i eget lager for dette. For oversikt graden av aktivering se liste fra utstyrsleverandør vedlagt [14]. Dette lageret er et eget avskjermet rom i området like utenfor maze inn til syklotron, se Figur 17. Eventuelt radioaktivt avfall skal også oppbevares i dette rommet. Rommet skal være låsbart etter gjeldende regelverk. De radioaktive delene skal overvåkes og håndteres som avtalt med utstyrsleverandør som er ansvarlig for disse, og det skal etableres rutiner for oppbevaring og inn og uttransport av dette. Aktiverte deler eller avfall fra dette rommet skal transporteres videre ut av huset i lukket, stråleskjermet beholder via heis til varemottak i U2.

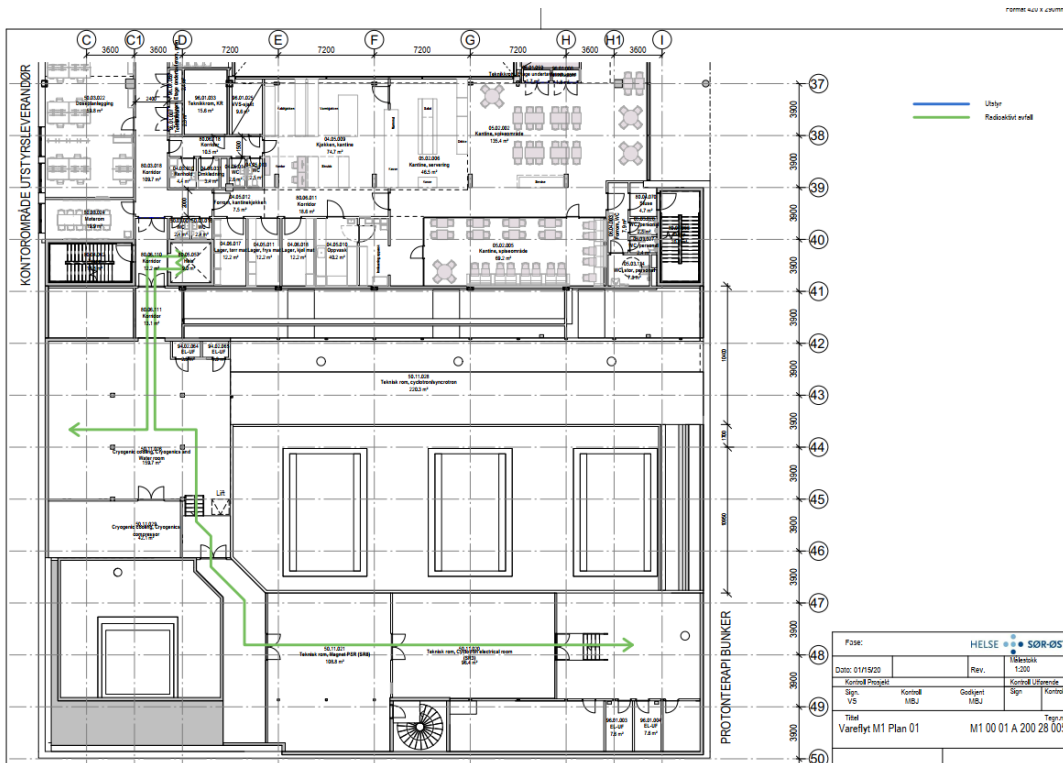


Figur 17: Plassering lager for svakt aktiverte deler, Bygg M1, plan U1

Figurene under illustrerer transport av aktiverte deler ut fra protonanlegg og lager i plan U1 og fra tekniske arealer i plan 01, videre til heis som går til varemottak i U2, med mulighet for videre transport av dette rett ut i ventende bil.



Figur 18: Flyt varer og aktiverte deler bygg M1 plan U1



Figur 19: Flyt aktiverte deler bygg M1 plan 01

## 4 Risikoanalyse

I forbindelse med etablering av protonanlegg ved Radiumhospitalet er det utført en risikovurdering. Denne vurderingen har tatt for seg aktiviteter, arbeidsprosesser og hendelser som kan føre til utilsiktet bestråling av pasienter, yrkeseksponerte og øvrige ansatte, allmennhet og omgivelser, og det er utført en grundig analyse av risiko og konsekvenser av disse hendelsene og situasjonene. Dette er i tråd med IAEAs anbefalinger om at det ved planlegging av protonterapianlegg skal tas nødvendige forhold for å forebygge utilsiktet stråling både i ordinær drift og ved eventuelle uønskede hendelser [Z]. Det forventes også at det iverksettes tiltak for å minimere konsekvens hvis uønskede hendelser skulle oppstå.

IAEA viser til at en viktig del av arbeidet med å identifisere risikoer er å skape bevissthet og god sikkerhetskultur i organisasjonen [Y].

For den aktuelle ROS analysen utført for dette prosjektet er det valgt en metodikk som legger vekt på å i på en systematisk metode analysere det planlagte anlegget, bygget og prosessene for svakheter, risiko for svikt i systemer med korresponderende uønskete effekter. Dette henvises til som «failure mode analysis» i IAEA-TECDOC-1891 [Z] kapittel 2.4, Tabell 1. Analysen har inkludert selve protonanlegget, bygget og de tekniske systemene med tanke på effekt og beskyttelse av personell, pasienter, miljø og allmennhet. Kompleksiteten rundt det å etablere et protonanlegg krever at tilsvarende og mer utdypende analyser utføres etter hvert som prosjektet skrider frem. Analysen dekker de risikoer og scenarier som kan forutses på nåværende tidspunkt, men det vil alltid være scenarier som er avhengig av menneskelige faktorer og faktorer som ligger utenfor det som kan forutses. Det er i foreliggende analyse sett på brann, eksplosjon, sabotasje, naturkatastrofer som jordskjelv, skred og flom, svikt i strømforsyning, lekkasje av aktivert luft og kjølevann. Resterende scenarier som svikt i prosedyrer for drift, svikt i datasystemer og feil bruk av utstyret vil bli vurdert i senere analyser.

Risikovurderingen er bygd opp rundt ulike situasjoner og årsaker som kan føre til utilsiktet stråling:

- Selve protonanlegget – altså stråling fra utstyret
- Bygget – utforming og konstruksjon av bygg i henhold til skjermingsbehov
- Aktivering av luft og kjølevann
- Ulykker og sabotasje
- Radioaktivt avfall og aktiverte komponenter generert av drift av protonanlegget

Målet med risikoanalysen er å sikre at alle risikoer er identifisert og at det utarbeides barrierer og tiltak for å ha kontroll på de identifiserte risikoene. Det er i hovedsak gjennom prosjektering og bygging av løsninger samt prosedyrer for driftssituasjonen man får kontroll på disse. Løsninger for bygg og teknikk, samt prosedyreverk vil fungere som iboende barrierer mot utilsiktet stråling.



## 4.1 Metodikk og risikomatrixe

### 4.1.1 Metodikk

Ros-analysen er gjennomført i 2 omganger Q4 2019, med et tverrfaglig forum bestående av fysikere og ingeniører både fra OUS, HUS og prosjektorganisasjonen med prosjekteringsgruppe. Innspill fra utstyrsleverandør og DCPT er også inkludert.

Forut for Ros-analysen ble det i mai 2019 gjennomført en miljøkonsekvensanalyse av prosjektet jamfør [U] i Tabell 1. Dette for å forsikre at miljøet i og rundt protonsentret ikke blir påvirket ved bruk av utstyret. Her ble det kartlagt hvilke risikoelementer med tilhørende tiltak som skal hensyntas i en eller flere av prosjektets faser. Punktene fra miljøkonsekvensanalysen ble inkludert i Ros-analysen. Representant fra IFE deltok i denne konsekvensanalysen. Miljøkonsekvensanalysen legges ved som vedlegg [2]. Det bemerkes at analysen ble gjennomført i tidlig fase av prosjektet og vil videreføres videre i prosjektet.

### 4.1.2 Risikomatrixe

Risikomatrixen som er benyttet er en 5x5 matrixe med aksene sannsynlighet og konsekvens, der 1 er usannsynlig (kjenner ikke til noen tilfeller) og 5 er svært sannsynlig (må forventes å inntreffe). I vurderingen av konsekvens er det benyttet 3 ulike matrixer, én for allmenn befolkning, én for yrkeseksponert og én for ytre miljø. Alle tre har en skala fra 1 (lav konsekvens) til 5 (stor konsekvens).

Tabell 4: Matrixe benyttet for konsekvens i risikoanalysen for henholdsvis miljø, allmennhet og yrkeseksponerte

Ytre miljø	5	Omfattende irreversibel miljøskade. Stor opprydding etter utslipp. Beredskap, evakuering?	Personikkerhet allmenn befolkning	5	Stråledoser > 250 mSv	Personikkerhet yrkeseksponert	5	Stråledoser > 250 mSv
	4	Mulig irreversibel miljøskade. Store brudd på lov og forskrift. Stor opprydding etter utslipp. Utstrakt misnøye. Beredskap.		4	Stråledoser 20 – 250 mSv		4	Stråledoser 20 – 250 mSv
	3	Langvarig reversibel miljøskade. Gjentatte brudd på lov og forskrift. Gjentatte utslipp. Mange klager.		3	Stråledoser 1 – 20 mSv		3	Stråledoser 6 – 20 mSv
	2	Kortvarig reversibel miljøskade. Enkeltbrudd på lov og forskrift. Enkeltutslipp. Klage.		2	Stråledoser 0.25 – 1 mSv		2	Stråledoser 0.25 – 6 mSv
	1	Ubetydelig ytre miljøskader.		1	Stråledoser < 0.25 mSv		1	Stråledoser < 0.25 mSv

## 4.2 Barrierer

Alle de vurderinger som er gjort for å forhindre utilsiktet stråling fra protonanlegget har basert seg på diverse analyser og beregninger. Vurderingene ligger til grunn for å kunne planlegge, prosjektere og bygge protonbygget slik at strålevernshensyn både for ansatte, allmennhet og omgivelsene er ivaretatt.

Følgende barrierer er ivaretatt gjennom prosjektering og skal videre ivaretas gjennom prosedyrer for opplæring og drift:



- Erfaringsoverføring fra tilsvarende prosjekter
- Kvalitetssikring av analyser/beregninger/forutsetninger
- Kontrollmåling og verifisering av skjerming og strålingsnivå ved oppstart
- Sikkerhetsfunksjoner, se kapittel 10.1
- Prosedyrer
- Hensiktsmessig utforming med tanke på rombeliggenhet, transportetapper, soneinndelinger osv.
- Kvalitetssikring av prosjekteringsunderlag
- Oppfølging på byggeplass
- Tverrfaglig funksjonstest før ferdigstillelse
- Kraftleveranse via UPS eller reservekraft på kritiske komponenter
- Kontrollert luftretning for aktivert luft -> ut av område med opphold og eget avtrekk for aktivert luft, trykktesting av kanaler, sikkerhetszone quench (ikke aktivert, men iskald luft) og tilkomstbegrensning avkast
- Funksjonsbeskrivelse for betong (oppskrift og behandling)
  - Prøvetakning og kvalitetskontroll av betong
  - Kontroll av at prinsippet om maze lignendeutforming av gjennomføringer i betongen etterleveres. Ingen fri siktlinje mot strålekilde ved gjennomføringer (2 x 90 grader)
- Datablad for kritisk utstyr
- Oppsamlingstank for potensielt aktivert spillvann fra syklotronkjølesystemet ved eventuelle lekkasjer
- Preaction-anlegg for brannslukking (ikke vann i rørene)

## 4.3 Hovedpunkter ROS

### 4.3.1 Bygget – utforming og konstruksjon av bygg i henhold til skjermingsbehov

Strålingen fra protonanlegget er i hovedsak ivaretatt gjennom bygningsmessig skjerming i form av betong i vegger, gulv og tak. For å ivareta tetthet, gjennomføringer og utførelse av betong er det utarbeidet et eget dokument som beskriver krav til betongen som skal anvendes, se kapittel 9 Bygningsmessig utførelse. Videre vil det bli gjennomført analyser av aktivitetsberegninger og resultater av dette vil danne grunnlag for kravspesifikasjon til betongen. Skjermingsberegningene beskrives i kapittel 5 Bygningsmessig skjerming.

### 4.3.2 Protonanlegget

Det vil som tidligere beskrevet produseres stråling i syklotron og alle steder der protonstrålen vekselvirker med materialer i stråletransportområde, i gantry, behandlingsrom og til slutt i pasienten. Det vil foreligge prosedyrer for hvor og hvor lenge personale kan oppholde seg på de ulike stedene i bygget, og det vil være krav om å bære persondosimeter for alle yrkeseksponerte ansatte til enhver tid. Siden protonstrålen er avhengig av strøm, vil det ikke være strålingsfare med direkte bestråling fra protonstrålen ved strøbrudd. Sikkerhetssystemene er sikret med avbruddsfri strøm. Syklotronen er ellers avhengig av

kjøling, den har superledende magneter, og ulike gasser, og om det er svikt i forsyning av disse vil syklotronen slutte å produsere stråling.

### **4.3.3 Aktivering av luft og kjølevann**

Det vil være liten aktivering av luft og avkast. Dette er nærmere presentert i de respektive rapporter som omhandler aktivering av luft og av grunn. Det gjøres likevel tiltak for å begrense adgang til der avkastet er montert.

Kjølevann går i lukkede sløyfer og er aktivert i liten grad. Det er utført strålingsmålinger av kjølevann på den lukkede kjølevannsløyfen ved anlegget i Århus. Disse viser at aktiviteten avtar raskt. Rørføringen er ikke tilgjengelig der det er allmenn ferdsel og ved en eventuell lekkasje vil spillvann samles opp i en egen tank. Vannet i tanken måles med tanke på radioaktivitet og det verifiseres at det ikke utgjør strålingsrisiko før det slippes ut til avløpsvann.

### **4.3.4 Radioaktivt avfall og komponenter produsert av protonanlegget**

Det vil være en viss mengde aktiverte deler fra de ulike utstyrskomponentene i protonanlegget. Disse vil iblant flyttes ut av syklotronbunker og stråletransportområde for service og vedlikehold. Aktivitetsnivået vil variere alt etter i hvilken grad komponentene har vært utsatt for stråling. Det er mottatt en liste på aktuelle deler fra utstyrsleverandør. De aktiverte delene vil oppbevares på egnet adgangsbegrenset rom like utenfor syklotron- maze inntil aktiveringsnivået er på et slikt nivå at det er trygt å kaste det eller det vil returneres til leverandør/avfall etter gjeldende lovgivning og inngåtte avtaler med utstyrsleverandør.

### **4.3.5 Ulykker og sabotasje**

Bygg M1 inngår i skallsikring for hele sykehuset, dette skal forhindre uønsket adkomst i de ulike rom og arealer. For å forhindre at uvedkommende kommer inn via dør fra sykehusets adkomstplass til stråletransportsystemet, vil det monteres påkjørselsikring ved denne døren.

Ved brann vil vann som kommer fra sprinkelanlegg ikke bli aktivert siden det ikke er vann i anlegget før brann er detektert (pre-action anlegg) Vannet som eventuelt kommer ut fra sprinkleranlegget vil derfor ikke utgjøre noen strålingsrisiko.

Bygget er sikret mot jordskjelv på en slik måte at hovedstrukturer vil være intakt. Når det gjelder flom og ras så utgjør slike hendelser ingen fare for utilsiktet stråling til omgivelsene, fordi når strømmen brytes eller innebygde sikringsmekanismer utløses så produseres det ikke lenger stråling fra systemet.

Det vil ikke være hensiktsmessig i terror- øyemed og benytte de aktiverte delene som trusler da aktiveringen er av et så begrenset omfang at det ikke vil utgjøre en fare for omgivelsene.

## **4.4 Sammendrag av funn i ROS**

Protonbehandling er en etablert behandlingsform utover Norges grenser og utstyrsleverandør har god erfaring og er svært fokusert på sikkerhet i prosjektet. Funn i risikoanalysen er håndterbare i planleggingen, prosjektering og byggefase samt gjennom prosedyrer for bruk

av utstyret. Det skal etableres kontrollpunkter utover i prosjektet som avdekker eventuelle feil og mangler, og disse vil løses fortløpende.

Ved hjelp av prosedyrer og rutiner vil de risikoene som er belyst kunne ivaretas på en trygg og forsvarlig måte av driftsorganisasjonen etter at anlegget er overtatt og satt i drift.

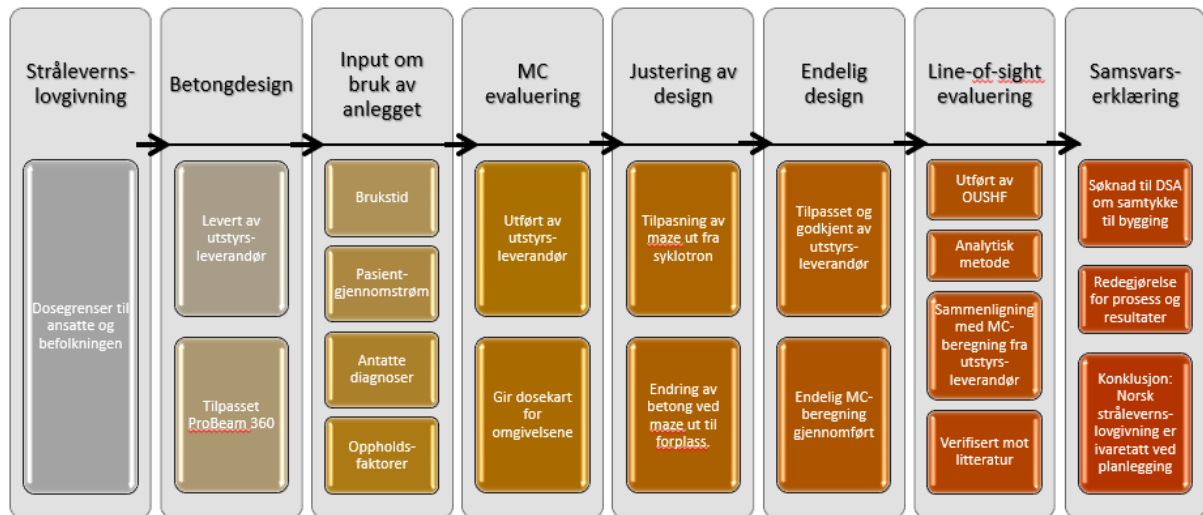
Hovedfunn i miljøkonsekvensanalysen understøtter også funnene i ROS analysen.

## **5 Bygningsmessig skjerming**

I dette kapitlet følger en beskrivelse av de ulike vurderinger og analyser som har vært nødvendig som underlag for stråleskjermingsberegningene. Selve skjermingsberegningene er gjort av utstysleverandøren, og det gis her en oppsummering av dette arbeidet. Det gis også en oppsummering av den uavhengige vurderingen som er gjort av disse. En egen arbeidsgruppe for skjermingsberegninger med deltagelse fra prosjektorganisasjonen, OUS og HUS har vært i dialog med utstysleverandør både før, underveis og etter at skjermingsrapporter ble utarbeidet. Leveranser og underlag er underveis i arbeidet diskutert med fysikere fra DCPT og kunnskapsutveksling med er benyttet for å kvalitetssikre blant annet forutsetningene for anleggets produksjon av protoner per år. Skjermingsberegningene er presentert for DSA underveis i prosessen.

## 5.1 Underlag skjermingsberegninger

I det følgende beskrives de ulike vurderinger og analyser utført og som ligger til grunn for simulering av stråleskjerming for prosjektet. Prosessen i arbeidet er vist i flytdiagram, se Figur 20.

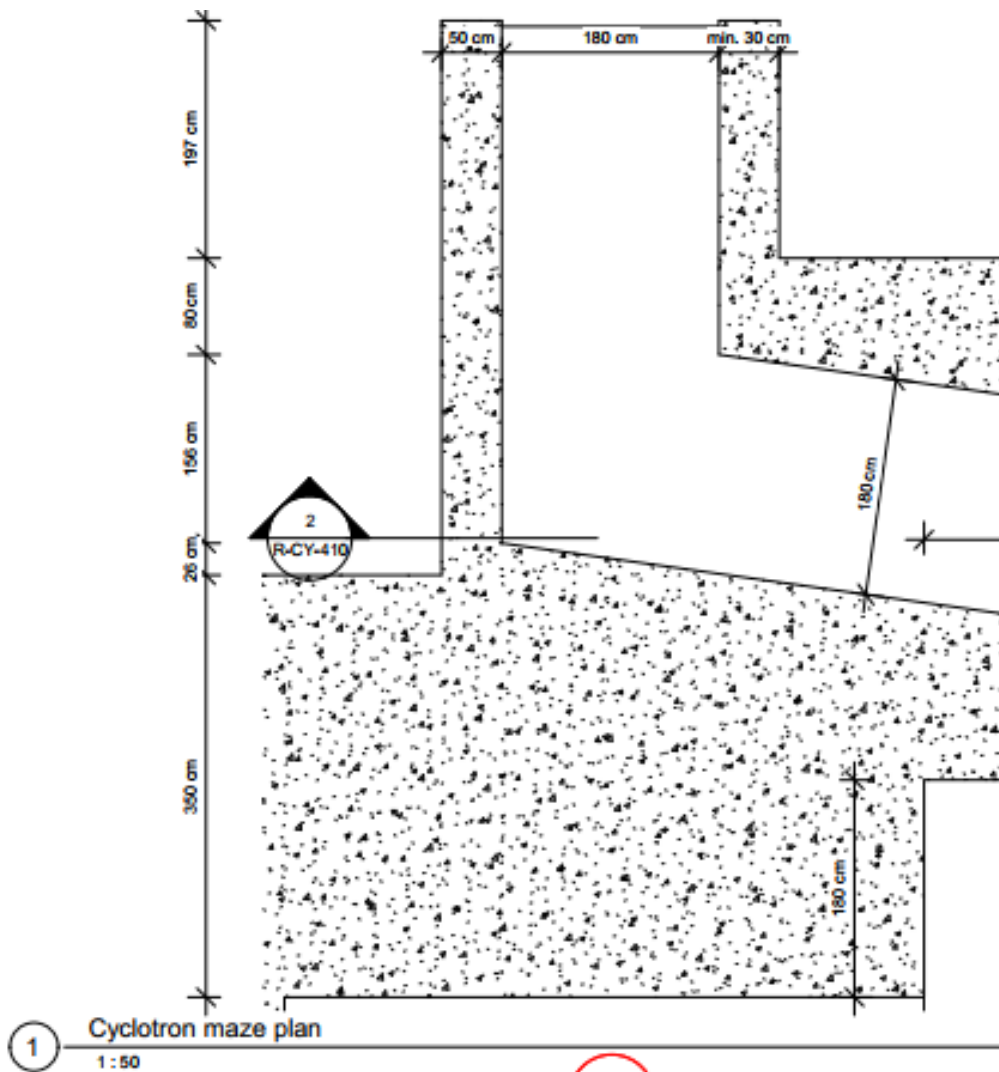


Figur 20: Flytdiagram – Strålevernlovgivning og input for bruk av anlegget, sammen med utstyrsleverandørens utforming av anlegget var grunnlag for MC-simuleringene for protonterapianlegget. Etter MC-simulering ble design justert for å imøtekomme alle krav, før endelig design ble fastsatt. Uavhengig kontroll av design ble verifisert med Line-of-sight-evaluering.

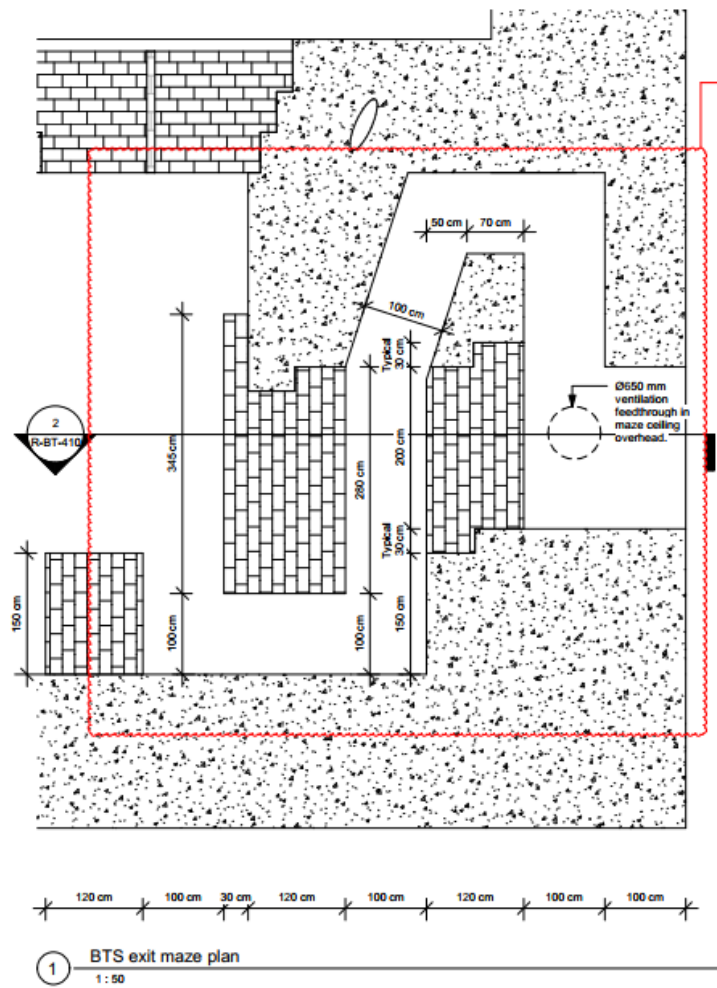
Det er utarbeidet en tverrfaglig 3D modell (Revit) for hele prosjektet. Utstyrsleverandørens tegninger over syklotronbunker, stråletransportområdet frem til behandlingsrom og forskningsrom samt tekniske rom for protonterapiutstyr er implementert i modellen. Tegninger og modell utgjør en del av underlaget for Monte Carlo simulering utført av utstyrsleverandøren. I dette arbeidet er stråleproduksjon i 3D-modellen simulert ut fra det totale antallet protoner som leveres i isosenter når anlegget er i drift (workload). Primærstrålens vekselvirkning med materialet den traverserer gjennom vil generere sekundærstråling som igjen vil aktivere materiale i bygg og utstyr. Denne simuleringen danner utgangspunkt for produksjon av dosekart som i 3D viser strålefordeling i hele den geometriske modellen (bygget og omgivelsene).

Simuleringene som er utført i samarbeid mellom utstyrsleverandør, prosjektorganisasjon og sykehus har medført noen endringer i byggets utforming for å sikre at norsk strålevernlovgivning ivaretas. Disse endringene er:

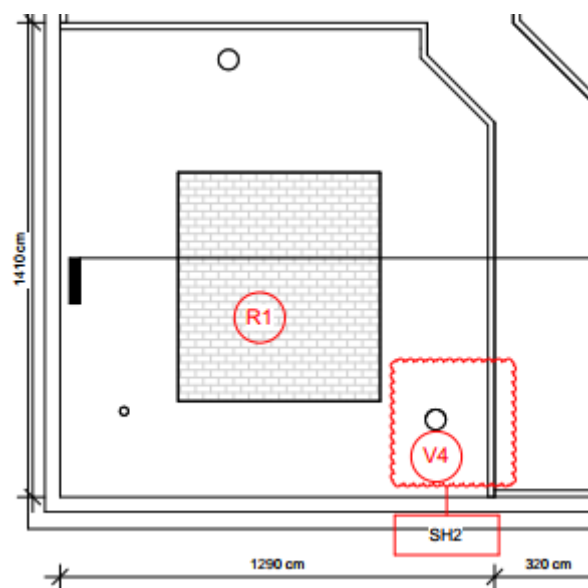
- Endring av veggengde for maze inn til syklotron, se Figur 21
- Endring av maze inn til stråletransportsystem (BTS) fra utsiden, se Figur 22
- Flytting av ventilasjonskanal inne i syklotronområdet, se Figur 23



Figur 21: Layout etter endring av veggengde ved inngang maze til syklotron

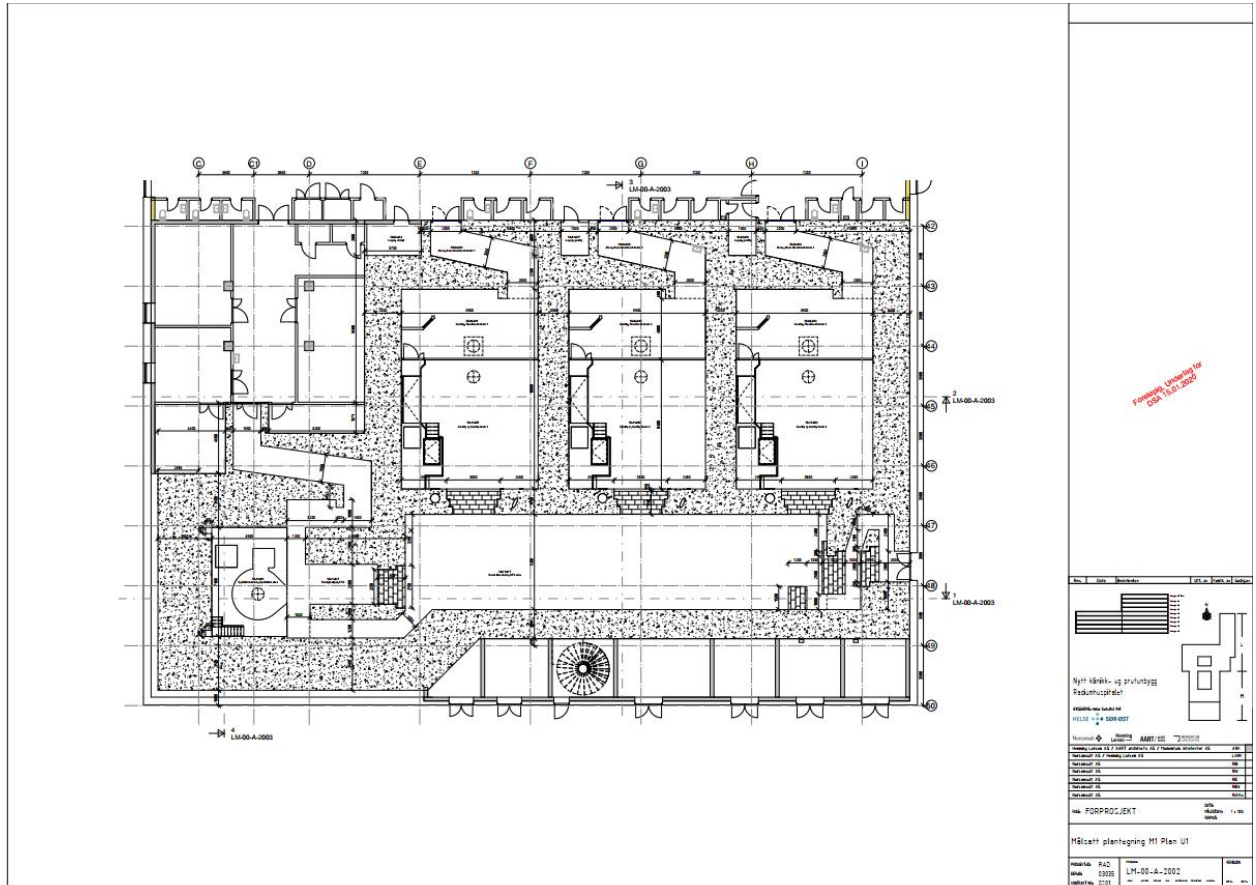


Figur 22: Layout etter endring av utgangsmaze ved stråletransportsystem

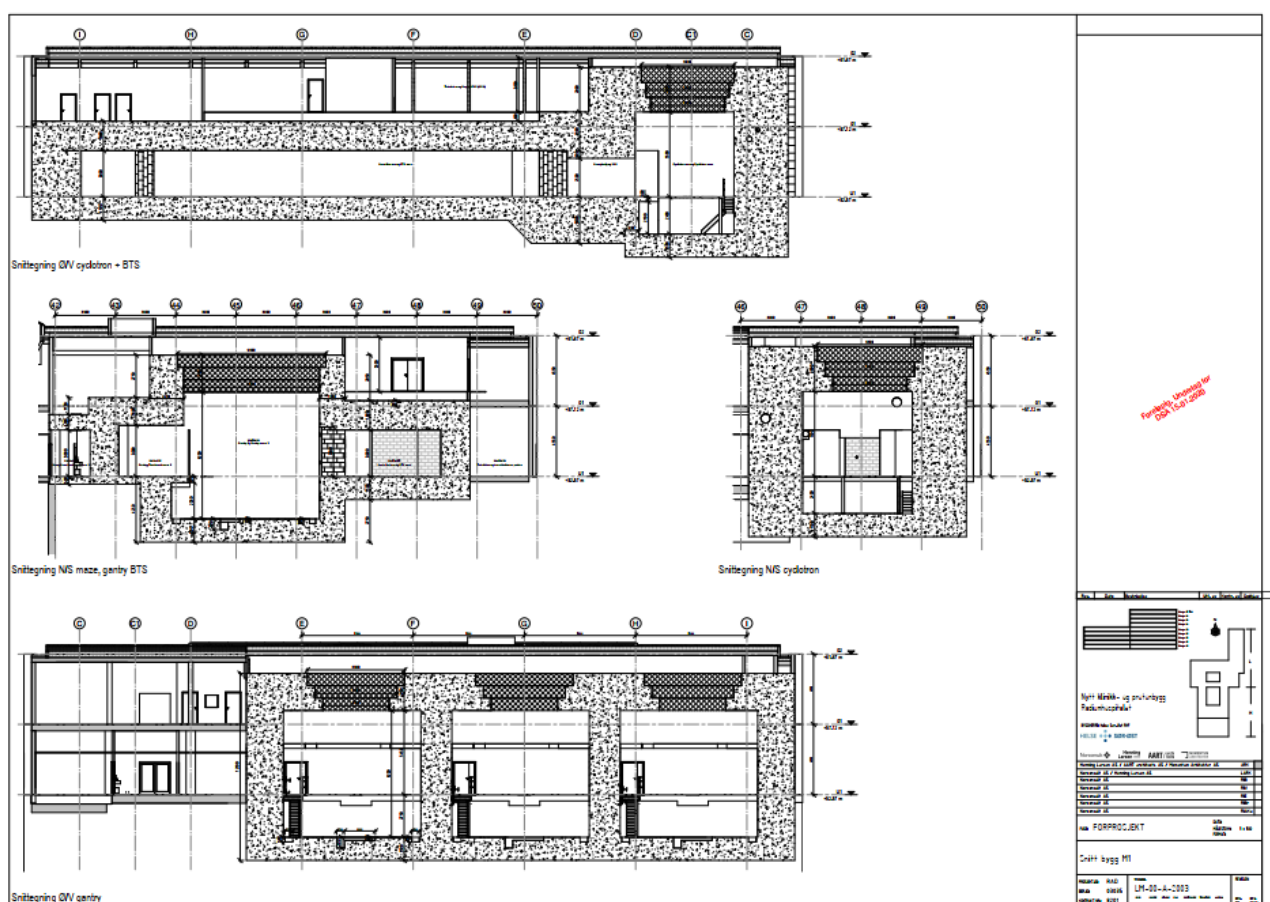


Figur 23: Posisjon på ventilasjonskanal etter endring (V4), flyttet mot yttervegg

Etter disse endringene ble det gjort en avsluttende Monte Carlo simulering hvor byggets endelige utforming og skjermingsoppbygging med betong ble verifisert. Figur 24 og Figur 25 viser utforming av selve protonanlegget med dimensjoner av betongkonstruksjonen slik det vil bli bygget. Målsatte skisser følger som vedlegg til designdokumentet.



Figur 24: Layout bygg M1 plan U1, protonanlegg, målsatt



Figur 25: Plantegning bygg M1, snitt, målsatt

## 5.2 Pasientbehandling

Beskrivelsen av klinisk modell for pasientbehandling er gjort i samarbeid mellom Oslo Universitetssykehus HF, Haukeland Universitetssykehus HF og prosjektorganisasjonen. Denne modellen beskriver pasientantall per rom per år og pasientsammensetningen fordelt på diagnoser.

### 5.2.1 Pasientantall

All aktivitet som er nødvendig for å opprettholde full klinisk behandlingsskapasitet i en normaldriftsituasjon er grunnlaget for å kunne estimere den årlige totale protonproduksjonen ved protonanlegget. I forbindelse med sluttrapporten «Etablering av protonbehandling» fra konseptfasen fra 2016 [1] ble det gjort analyser av hvor mange pasienter som er mulig å behandle pr behandlingsrom.

Det ble vurdert at 290 pasienter kunne behandles per behandlingsrom per år når protonsender var i full drift. Antall fraksjoner per pasient ble vurdert til 26, med 13 timer behandlingstid per dag, 240 dager i året. Dette er lagt til grunn for utstyrsleverandørs skjermingsberegninger. For å ta høyde for fremtidig utvikling i teknologi og behandlingsmetoder er i foreliggende utforming tatt høyde for 400 pasienter per behandlingsrom per år med 16 timers arbeidsdag (2 skift). Dette sikrer et robust anlegg som er i stand til å øke kapasitet ved behov. Inkludert i



disse 400 pasientene årlig er en margin på 15 % for tid til service- og kvalitetskontrollarbeid. Dette anses å være en veldig konservativ tilnærming.

## 5.2.2 Pasientsammensetning

For å anslå hvor mye stråling som vil leveres i de ulike delene av protonsenderet, er det gjort anslag over hvilken pasientsammensetning protonsenderet vil ha. Følgende behandlingsregioner benyttet som kategorisering for dette prosjektet:

- Hjerne
- Hode/nakke
- Det sentral nervesystem (CNS)/Lunge/Bryst
- Thoraks
- Bekken/GI/rektum/GYN
- Prostata

I overgangen fra norsk fordeling til disse kategoriene er det valgt at sarkomer omfattes i pelvis og lymfomer omfattes i thoraks. Rebestråling i den norske oversikten er ikke tatt med i grupperingen, da de vil kunne fordele seg jevnt over alle regioner.

Tabellen under viser en oversikt fra Norge og omsatte tall fra Danmark. I tillegg er tall fra et amerikansk protonterapianlegg inkludert for sammenligning.

*Tabell 5: Sammenligning andel pasientsammensetning basert på Norsk vurdering, Dansk vurdering og eksempel fra et protonterapianlegg i USA. Det gjøres oppmerksom på at absolutt-tallene fra Norge er basert på rapport fra 2012, og er ikke gjeldende ut fra utbygd kapasitet.*

	Norge 2012	Andel Norge	Danmark	Andel Danmark	Site i USA
Brain	125	10 %	98	10 %	25 %
H&N	120	10 %	100	10 %	10 %
CNS/Lung/Breast	310	25 %	222	25 %	30 %
Thorax	70	5 %	230	25 %	10 %
Pelvic/GI/rectum/GYN	450	35 %	250	25 %	20 %
Prostate	200	15 %	80	5 %	5 %
<b>Sum</b>	<b>1275</b>	<b>100 %</b>	<b>980</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Hovedforskjellen mellom Norge og Danmark er at GI-kreft er dominerende i Norge, mens thoraks- og abdomengruppen er tilsvarende større i Danmark.

Det er arbeidet med to ulike pasientfordelinger, basert på hvilket område for skjerming som kalkuleres; for protonbehandlingsrommene anses den norske fordelingen i Tabell 5 som den mest konservative (størst andel bekkenbehandlinger som krever høy energi, og mest energi som stoppes i pasienten), mens for ESS-området anses eksempelet fra USA som det mest konservative (størst andel behandlinger som krever lavere energi, og altså mest energi som stoppes i ESS).

I etterkant har skjermingsberegningene tatt utgangspunkt i den norske pasientsammensetningen, og gjort konservative betraktninger som skal ivareta alle de angitte scenariene i Tabell 5.

For de ulike regioner og tumortyper er det identifisert hvilke behandlingsenergier som vil bli benyttet. Hver pasientkategori har en tilhørende diagnosespesifikk energifordeling i doseplanen og antallet protoner levert i isosenter er avhengig av volumstørrelse og beliggenhet av behandlingsvolum. Informasjonen om antallet protoner per energi for de ulike tumorkategoriene er levert av utstyrsleverandør.

Pasientfordeling og behandlingsmetoder kan endre seg i fremtiden. Flash er en ny teknologi der protonbehandling leveres med ultrahøy dose rate. Utstyret som installeres vil potensielt ha muligheten til å implementere dette, men dette er ikke et bruksområde som søknaden omfatter. Det opplyses at det er antatt at det totale årlige antallet protoner i isosenter vil være dekket også ved bruk av FLASH.

Skjermingsberegningene som er gjort i dette prosjektet benytter seg av de angitte forutsetningene omtalt, og skulle det komme vesentlige endringer må det forutsettes at det gjøres nye beregninger.

### 5.3 Workload – totalproduksjon av protoner

Strålingsmengden, «workloaden», for anlegget er den totale dose eller antall protoner som en funksjon av energi som vil bli levert når senteret er i planlagt drift. Dette inkluderer ikke bare strålingsdosene for selve pasientbehandlingen, men også ved kommisjonering, daglige rutiner og kvalitetskontrollarbeid, service og vedlikehold og forskning etc. Den bygningsmessige skjermingen og målene for strålebeskyttelse skal ta hensyn til alle disse forholdene. Workload for anlegget er et estimert tall, siden det kliniske bildet, arbeidsprosesser og teknologi vil kunne endre seg med tiden. Protonanlegget ved Radiumhospitalet planlegges med tre identiske rom, hvorav to skal brukes til pasientbehandling og ett til forskning. I skjermingsberegningene er alle rommene vurdert likt ut fra full pasientbehandling, dette for å sikre fremtidig fleksibilitet dersom forskningsrommet i fremtiden skal omgjøres til behandlingsrom.

I strålevernsberegningene er midlertidige operasjoner, slik som installasjon ikke tatt høyde for i workload-betraktningen, og det kan i disse tilfellene være nødvendig å ta forholdsregler og benytte mobilt stråleovervåkningsutstyr [4].

Nedenfor vises antall protoner for en ønsket dose som skal leveres til pasienten, i et typisk tumorvolum. Dette antallet benyttes for å evaluere protontapet i anlegget, noe som danner bakgrunnen for strålingsberegningene.

Indication group	Patients / year	Fraction	Sessions per treatment	Dose / treatment	Typical treatment volume, cm <sup>3</sup>	$N_p$
Brain	40	10%	30	60 Gy	300	$7.26 \times 13$
H&N	40	10%	35	70 Gy	1500	$3.15 \times 14$
CNS/Lung/Breast	100	25%	30	60 Gy	2000	$9.68 \times 14$
Thorax	20	5%	30	60 Gy	2000	$7.55 \times 14$
Pelvic/GI/rectum/GYN	140	35%	35	70 Gy	2500	$1.73 \times 14$
Prostate	60	15%	35	70 Gy	200	$7.46 \times 14$
Sum	400	100%				$3.03 \times 15$

Figur 26: Pasientsammensetning for protonseneteret inkludert fraksjoner, dose til pasient, typisk volum og antall protoner.

## 5.4 Vekselvirkning protoner

For de protonenergiene som blir tilgjengelig ved protonanlegget vil protonene som tapes på veien mellom strålingskilde og behandlingsrom vekselvirke via intranukleære kaskader. Fra sekundærstrålingen som produseres vil kun de høyenergetiske nøytronene ha mulighet til å trenge gjennom den tykke betongen. Detaljert beskrivelse av de fysiske prosessene som knyttes til dannelse og transport av høyenergetiske nøytroner er gjengitt i IAEA's TRS-283 [X], lenke oppgitt i Tabell 1.

Utenfor betongveggene vil et typisk energispektrum av nøytroner bestå av to topper; en ved noen få MeV fra fordampningsnøytroner («evaporation neutrons») som ble skapt i det ytterste sjiktet av skjermingskonstruksjonen, og en ved ~100 MeV som kommer direkte fra de primære protonvekselvirkningene.

## 5.5 Tap av protoner

Produksjon og transport av protoner til to behandlingsrom og ett forskningsrom vil danne signifikante mengder sekundærstråling. Dette skjer fordi primære protoner treffer komponenter i strålelinjen, og samtidig pasientene som behandles. Strålingsfeltet rundt syklotronen og i behandlingsrommene er komplekst og vil avhenge av pasientantallet og sammensetning av tumortyper som beskrevet i kapittel 5.2. Det er også avhengig av lokalisering av områder der protoner tapes, spredningsvinkel av sekundærstråling sett i forhold til den innkommende protonstrålen, materialer og layout for hele anlegget. Dosenivåer på utsiden av veggene skal være kontrollert og holdt så lave som mulig. For protonanlegget ved Radiumhospitalet vil det være i de områdene der det produseres protoner og der protonene stoppes at det vil være størst behov for skjerming. Dette er i hovedsak følgende lokalisasjoner:

- Rundt syklotronen
- Rundt energiseleksjonssystemet
- Ved stråletransportsystemet
- I gantryrom (bakrommet til behandlingsrommet)
- I behandlingsrommet

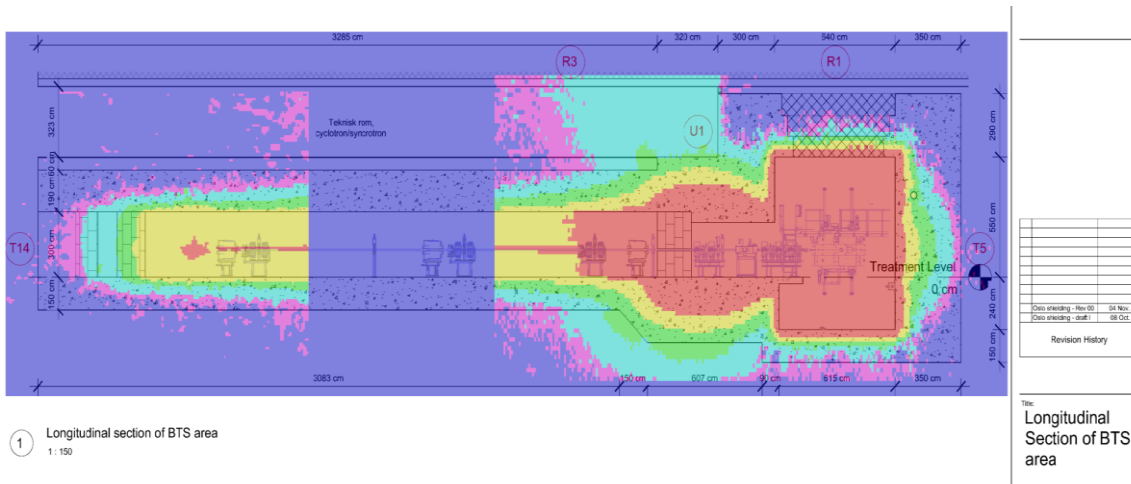
## 5.6 Skjermingsberegninger

### 5.6.1 Beregning fra utstyrsleverandør

Utstyrsleverandør har utført Monte Carlo simulering for å kontrollere sitt underlag for betongkonstruksjonen. I figur 22 og 23 vises fargekart over betongkonstruksjonen med simulerte dosenivåer for årlig stråleintensitet ved protonanlegget. I fargekartet vises doser for 4000 timer i året – og ikke hensyntatt oppholdsfaktorer. Skjermingsrapporten er vedlagt i sin helhet; *Oslo\_Shielding Report R-14.11.001\_1* [4].

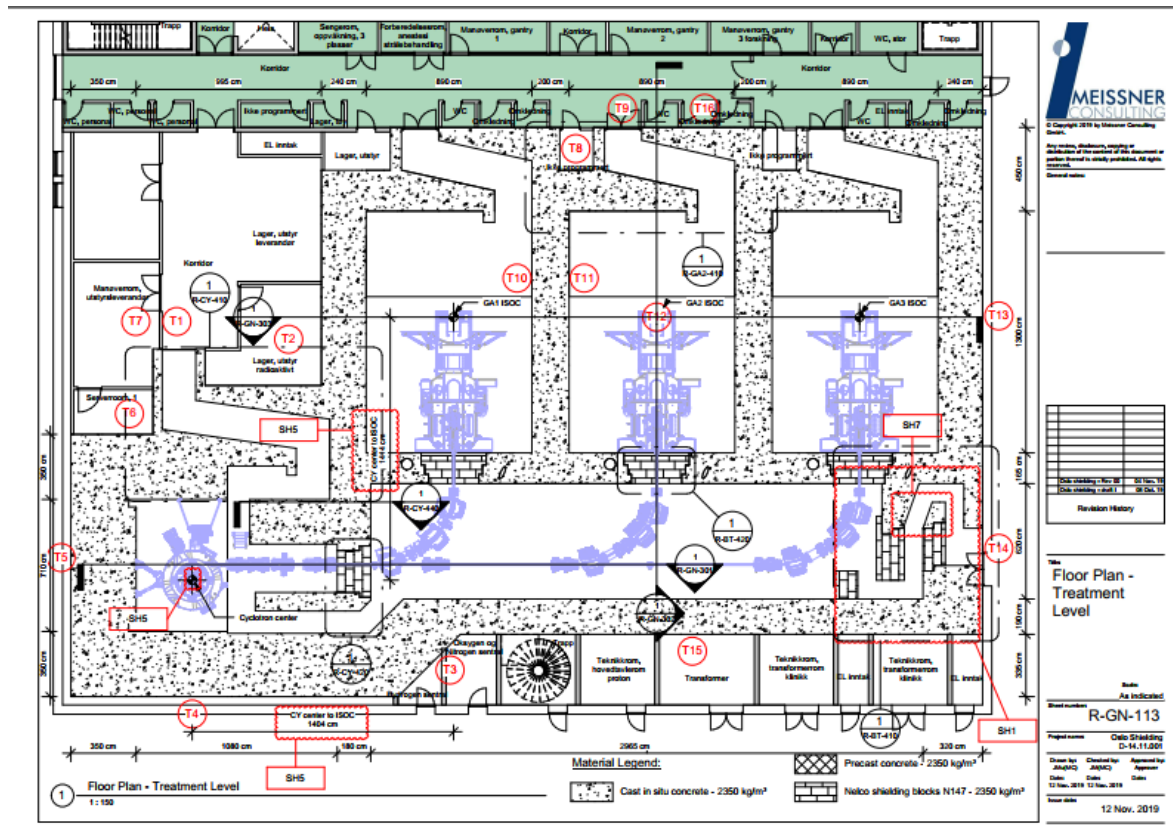


Figur 27: Oversikt over stråleintensitet ved protonterapianlegget sett ovenfra Monte Carlo-simulering

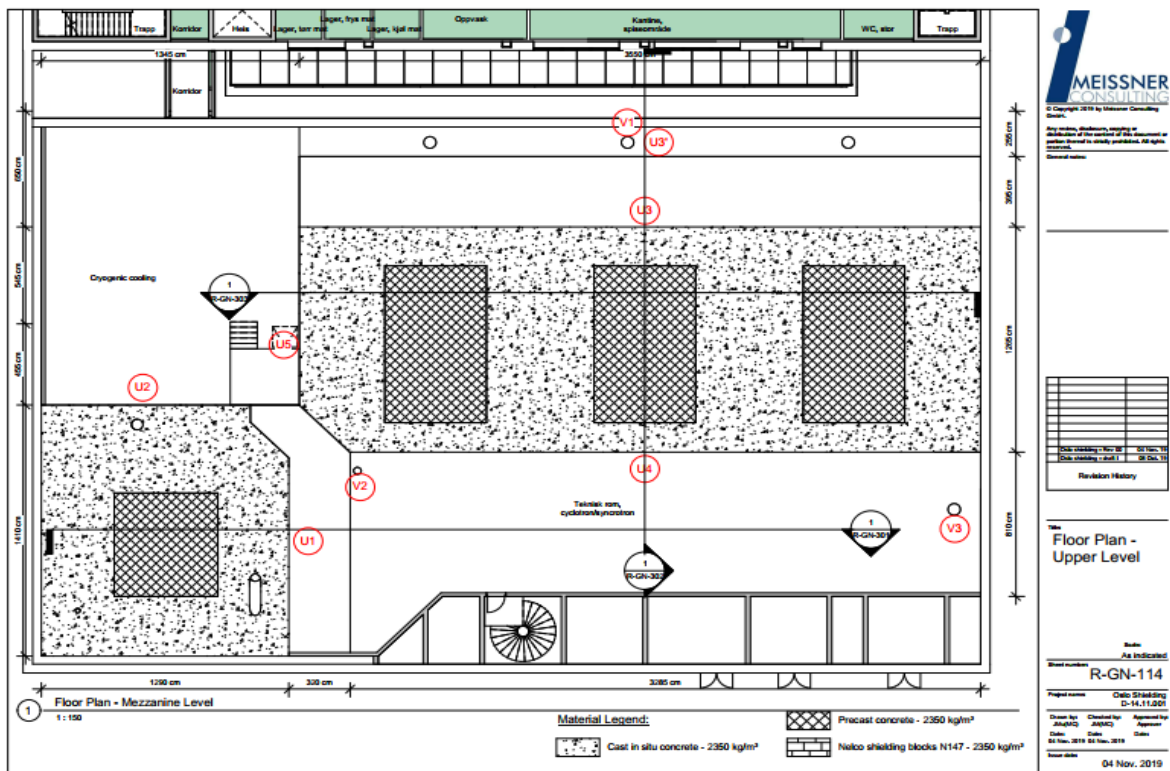


Figur 28: Oversikt over stråleintensitet ved protonterapianlegget, longitudinalt snitt

I Figur 29, Figur 30 og Figur 31 vises utvalgte posisjoner i anlegget som stråledosen er simulert til. Dette er oppsummert i tabell 7.

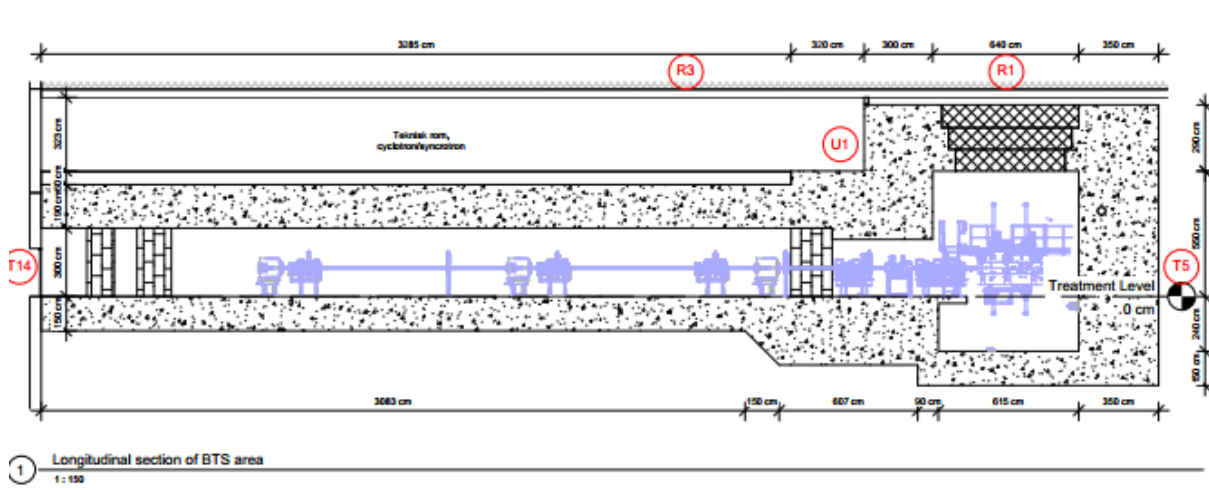


Figur 29: Oversikt over målepunkter for bygg M1 plan U1, behandlingsareal – målepunkter markert med rød ring



Figur 30: Oversikt over målepunkter Bygg M1, plan 01, tekniske arealer – målepunkter angitt i rødt. Målepunkt U1, V2 og V3 omtales nedenfor.





Figur 31: Oversikt over målepunkter Bygg M1 – snitt i bygget inkludert tak og bunnplate – målepunkter angitt i rød

I Figur 32 vises de simulerte stråledosene for de gitte punktene i Figur 29, Figur 30 og Figur 31.

ID	Location	Dose limit mSv/a	Occupancy T	Contribution to Annual Ambient Dose for 400 patients per treatment room H*(10)					Annual Ambient Dose H*(10) Uw25% for each cardinal	Annual Ambient Dose H*(10) Uw25% for each cardinal in 2000h	Equivalent Full body Dose in 2000h	
				100% mSv/a	100% mSv/a	100% mSv/a	100% mSv/a	cyc/ESS mSv/a			Uw25% for each cardinal angle	% of annual limit
T1	cyclotron maze exit	1	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.72	0.36	0.09	9.0%
T2	Storage	1	0.1	0.00	0.09	0.00	0.25	0.21	0.30	0.15	0.02	1.5%
T3	Tech gas room	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.30	0.15	0.02	6.1%
T4	cyclotron outside wall	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.23	0.11	0.01	4.6%
T5	cyclotron outside wall (ramp side)	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.26	0.13	0.01	5.1%
T6	Server Room	1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.06	0.06	6.1%
T7	Control room (SCR)	1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.09	0.09	8.6%
T8	T8 niche room next to gantry maze	1	0.1	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0%
T9	gantry maze access	1	0.25	0.30	0.31	0.14	0.33	0.00	0.27	0.13	0.03	3.4%
T10	Treatment room (working position 1)	1	0.25	0.01	0.28	0.01	0.68	0.00	0.24	0.12	0.03	3.1%
T11	Treatment room (working position 2)	1	0.25	0.01	0.77	0.01	0.35	0.00	0.29	0.14	0.04	3.6%
T12_G2	ISOC G2 with beam in G1	1	0.25	0.01	0.41	0.01	0.13	0.00	0.14	0.07	0.02	1.7%
T12_G1	ISOC G1 with beam in G2	1	0.25	0.00	0.13	0.00	0.32	0.30	0.42	0.21	0.05	5.2%
T13	Gantry Wall - Parking	0.25	0.1	0.00	0.28	0.00	0.11	0.00	0.10	0.05	0.00	2.0%
T14	BTS exit - Parking	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.10	0.01	4.0%
T14a	BTS exit - Parking	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15	0.08	0.01	3.1%
T15	BTS wall - Tech Rooms	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.07	0.01	2.7%
T16	changing rooms	1	0.25	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.2%
U1	Varian Support Room (SR1 and SR3); 30cm AFF	1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	12.22	12.22	6.11	0.61	61.1%
U2	Cryogenic Area in Water room	1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.00	0.2%
U3	Ventilation room - above gantry maze	1	0.1	0.04	0.02	0.09	0.02	0.00	0.04	0.02	0.00	0.2%
U3'	Ventilation room - above gantry maze	1	0.1	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0%
U4	Varian Support Room (SR8)	1	0.1	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.1%
U5	Water room (SR4) upper level	1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.1%
V1	Ventilation room - above gantry maze	1	0.1	0.03	0.03	0.02	0.04	0.00	0.03	0.02	0.00	0.2%
V2	RF-transmission line exit in SR3	1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	2.56	2.56	1.28	0.13	12.8%
V3	BTS ventilation exhaust	1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.10	0.01	1.0%
R1	Cyclotron roof	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.2%
R2	Gantry roof	0.25	0.1	0.10	0.00	0.27	0.00	0.00	0.09	0.05	0.00	1.9%
R3	SR3 roof	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.94	1.94	0.97	0.10	38.8%
V4	cyc ventilation exhaust	0.25	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.00	0.8%

Table 6. Annual ambient dose and equivalent full body dose at each selected location for 400 patients per year

Figur 32: Viser lokasjon, dosegrense pr/år, oppholdsfaktor, dosebidrag for forskjellige posisjoner av gantry per behandlingsrom samt syklotron og ESS, årlig dose til omgivelsene og årlig dose for 2000 timer og helkroppsdose justert i forhold til oppholdsfaktor. Beregningen gjelder 400 pr behandlingsrom pr år.

Resultatene viser at ved de aller fleste beregningsposisjonene vil betongkonstruksjonen være tilstrekkelig i forhold til oppgitte dosenivå og oppholdsfaktorer. Dosenivåene markert med gult indikerer posisjoner som overgår en årlig dosegrense på 1 mSv. Her må det gjøres videre administrative tiltak for å imøtekomme oppgitte krav til stråleskjerming i forhold til dosenivå, arbeidstid og oppholdsfaktor. Det påpekes at for alle disse tre posisjonene vil resultatet være under 1 mSv/år hvis oppholdsfaktor og arbeidstid hensyntas (2000 timer i året). Ulike tiltak vil

kunne iverksettes for disse posisjonene ved behov. For vurdering av utstyrsleverandørens stråledoser for teknisk personell, se kapittel 2.5.2. Posisjonene omtales nedenfor i detalj.

Posisjon «U1», Figur 30, Varians tekniske rom, SR1 og SR3: Dette området er planlagt med streng adgangskontroll og er definert som kontrollert område i henhold til strålevernforskriften. Området består av tekniske skap tilhørende syklotron. Det er bare de ansatte fra utstyrleverandør som vil utføre arbeid i disse skapene. Her vil det etableres prosedyrer som hindrer at personell befinner seg i området mens syklotronen er i drift. Dersom teknisk personell må oppholde seg i området når syklotronen er i drift, skal tiden man oppholder seg i området logges. I tillegg vil det være krav om at alle som skal ha rutinemessig tilgang til dette området bærer dosimeter til enhver tid. Det skal installeres nøytronovervåkning med avlesning og signallys med grønt, gult og rødt lys som tilsvarer henholdsvis lav, middels og høy stråledeteksjon. Se for øvrig detaljert beskrivelse i kapittel 10.1.

Posisjon «V3», teknisk rom; Innerst i lokalet befinner det seg ventilasjonsaggregater med filter som kan være aktiverte. Utstyret her har behov for service og servicene skal planlegges slik at en servicetekniker ikke utsettes for forhøyet stråledose i forhold til sitt definerte nivå (ansatt eller yrkeseksponert). For serviceteknikeren vil man da bare passere forbi punkt U1 på vei til ventilasjonsaggregatene, slik at oppholdsfaktoren for dette området er  $\ll 1/10$ .

Planlagt arbeid i teknisk rom, posisjon V3, skal fortrinnsvis utføres utenom tiden da det er stråling i behandlingrom eller forskningsrom. For en yrkeseksponert ansatt som må utføre arbeid i posisjon U1, må det forsikres at den ansatte ikke vil overgå sin årlige tillatte dosebelastning i sum. Ved akutt behov for arbeid i dette området må administrative prosedyrer for hvordan dette løses foreligge slik at ingen yrkeseksponerte overstiger sin årlige tillatte dosebelastning.

Posisjon «V2», Figur 30, RF transmisionslinje utgang i SR3: Dette punktet representerer utgangen av en gjennomføring opp i plan 01, også i kontrollert område. Det vil ikke være behov for arbeid akkurat ved denne gjennomføringen, men i tekniske skap i nærheten, slik som ved U1. De samme sikkerhetstiltakene/retningslinjene gjelder som for posisjon U1.

Posisjon «R3», Figur 30, oppe på tak over syklotron (SR3): Dette området er ute på tak over plan 01. Dette området skal være et strengt adgangsregulert og overvåket areal, med de tiltakene dette krever. Administrative tiltak som sikrer at opphold på taket utføres når strålenivå er på et minimum skal utarbeides.

For å simulere dosegrensen på  $7,5 \mu\text{Sv/h}$  i de ulike lokasjonene, ble det antatt en kvalitetskontrolltest hvert femte minutt i løpet av en time. Resultatene av denne simuleringen er vist i Figur 33.



ID	Location	Occupancy T	Dose Rate during QA [ $\mu\text{Sv/h}$ at 1 nA in the ISOC]					Maximum Dose Rate during QA	1nA, 1min, max every 5min
			Gantry 0°	Gantry 90°	Gantry 180°	Gantry 270°	cyc/ESS		
			100%	100%	100%	100%			
			$\mu\text{Sv/h per nA}$					$\mu\text{Sv/h per nA}$	$\mu\text{Sv in any one hour}$
T1	cyclotron maze exit	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	3.72	3.72	0.74
T2	Storage	0.1	0.03	0.77	0.03	4.78	1.38	6.16	1.23
T3	Tech gas room	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73	1.73	0.35
T4	cyclotron outside wall	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.29	1.29	0.26
T5	cyclotron outside wall (ramp side)	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	1.16	0.23
T6	Server Room	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.79	0.16
T7	Control room (SCR)	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	1.04	0.21
T8	T8 niche room next to gantry maze	0.1	0.10	0.20	0.02	0.15	0.00	0.20	0.04
T9	gantry maze access	0.25	2.48	2.47	1.40	2.86	0.00	2.86	0.57
T10	Treatment room (working position 1)	0.25	0.11	2.52	0.10	12.79	0.00	12.79	2.56
T11	Treatment room (working position 2)	0.25	0.13	14.39	0.12	3.09	0.00	14.39	2.88
T12_G2	ISOC G2 with beam in G1	0.25	0.09	7.76	0.09	1.11	0.00	7.76	1.55
T12_G1	ISOC G1 with beam in G2	0.25	0.05	1.19	0.05	6.03	1.74	7.77	1.55
T13	Gantry Wall - Parking	0.1	0.04	5.54	0.03	0.92	0.00	5.54	1.11
T14	BTS exit - Parking	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.15	0.23
T14a	BTS exit - Parking	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.83	0.17
T15	BTS wall - Tech Rooms	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.16
T16	changing rooms	0.25	0.13	0.14	0.02	0.62	0.00	0.62	0.12
U1	Varian Support Room (SR1 and SR3); 30cm AFF	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	61.71	61.71	12.34
U2	Cryogenic Area in Water room	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.41	0.08
U3	Ventilation room - above gantry maze	0.1	0.36	0.31	1.68	0.31	0.00	1.68	0.34
U3'	Ventilation room - above gantry maze	0.1	0.04	0.17	0.06	0.08	0.00	0.17	0.03
U4	Varian Support Room (SR8)	0.1	0.03	0.19	0.47	0.20	0.00	0.47	0.09
U5	Water room (SR4) upper level	0.1	0.02	0.03	0.09	0.64	0.00	0.64	0.13
V1	Ventilation room - above gantry maze	0.1	0.29	0.29	0.17	0.39	0.00	0.39	0.08
V2	RF-transmission line exit in SR3	0.1	0.00	0.00	0.00	0.19	12.73	12.92	2.58
V3	BTS ventilation exhaust	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.15	0.23
R1	Cyclotron roof	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.01
R2	Gantry roof	0.1	0.89	0.10	5.20	0.03	0.00	5.20	1.04
R3	SR3 roof	0.1	0.00	0.01	0.06	0.01	11.35	11.41	2.28
V4	cyc ventilation exhaust	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.24	0.05

Table 7. Dose rate with gantry rotation angles and maximum dose rate during QA at each location

Figur 33: Doserate ved ulike gantryvinkler under kvalitetskontroll og tilsvarende doserate ved syklotron vises i kolonne 4. Maksimal doserate under kvalitetskontroll og doserate i en time vises i henholdsvis kolonne 5 og 6. Kolonne 1 viser de ulike lokasjonene.

Resultatene baserer seg på erfaring fra kvalitetskontroll fra andre protonsentre. Det er også her lokasjon U1 som kan få doserate over  $7,5 \mu\text{Sv/time}$ , men dette er akseptabelt med de tiltak som er nevnt ovenfor.

## 5.6.2 Uavhengig vurdering

Det er parallelt med utstyrsleverandørens skjermingsberegninger utført en uavhengig vurdering av resultatene. Dette arbeidet er utført av fysiker ved OUS. Et sammendrag av dette arbeidet beskrives i dette kapitlet. Rapporten «Bulk Shielding Analysis of OUS Proton Therapy Facility» [5] er vedlagt i sin helhet.

### Metode

En forenklet metode basert på den analytiske «point-source line of sight»-teknikken er brukt til å utføre verifiseringsberegninger av betongskjermingen. Hovedmålet for beregningene var å vurdere dosenivåene bak den tykke betongskjermingen på en rask og effektiv måte, og ikke å finne nøyaktige doseestimer.

Metoden baserer seg på at doseavgivelse ved utgang av betongveggen domineres av gjennomstrømming av høyenerginøytroner produsert i primærvekselvirkninger der det er tap av protoner, sammen med buildupnøytroner skapt i det ytterste sjiktet av skjermings-

konstruksjonen. Formen på energispekteret dypt inne i betongveggen blir da uavhengig av betongdybden. Dette danner grunnlag for å benytte følgende to-parameterformel:

$$H(E_p, \theta, d/\lambda) = \frac{H_o(E_p, \theta)}{r^2} \exp\left(-\frac{d}{\lambda(E_p, \theta)}\right)$$

Her er  $E_p$  energien fra innfallende proton,  $r$  avstanden mellom estimeringspunkt og punktet der innfallende proton går tapt («kilde»),  $\theta$  er vinkelen i forhold til retningen av protonstrålen,  $H_o(E_p, \theta)$  er doseparameter for «kilde», beregnet per innfallende proton ( $\text{Sv m}^2$ ),  $d$  er tetthetsvektet skjermingstykkelse langs rett linje mellom «kilde» og evalueringspunktet, og  $\lambda$  er attenuasjonslengden ( $\text{g/cm}^2$ ). Modellparametrene  $H_o$  og  $\lambda$  er hentet fra publiserte data. Resten av parametrene som brukes i formelen ble regnet ut fra betongtegninger.

Doseberegninger ble utført med bruk av 46 virtuelle «kilder» plassert i syklotron, ESS, BTS og isosenter for 8 energier som tilsvarer pasientsammensetning definert i Figur 26. Energifordeling, tilknyttede vektfactorer, samt antall protoner for hver energi, som tilsvarer workload definert i Kapittel 5.3, er oppsummert i Tabell 6.

Tabell 6: Energifordeling for ulike pasientsammensetninger samt protoner for hver energi

Ep (MeV)	$f_{weight}^{E_{bin}}$	Antall proton/år
70	0.1372	$4.16 \times 10^{14}$
100	0.0167	$5.07 \times 10^{13}$
120	0.0036	$1.08 \times 10^{13}$
140	0.1904	$5.77 \times 10^{14}$
160	0.2719	$8.24 \times 10^{14}$
180	0.0822	$2.49 \times 10^{14}$
200	0.0861	$2.61 \times 10^{14}$
220	0.2119	$6.42 \times 10^{14}$
Total	1	$3.03 \times 10^{15}$

Antall protoner/år, siste kolonne i Tabell 6, sammen med transmisjonsdata levert av utstyrsleverandør ble brukt til å estimere gjennomsnittlig protontap for ett år i syklotron, langs strålebanen fra syklotron til behandlingsrom, samt absorberte protoner under behandling.

#### Resultat

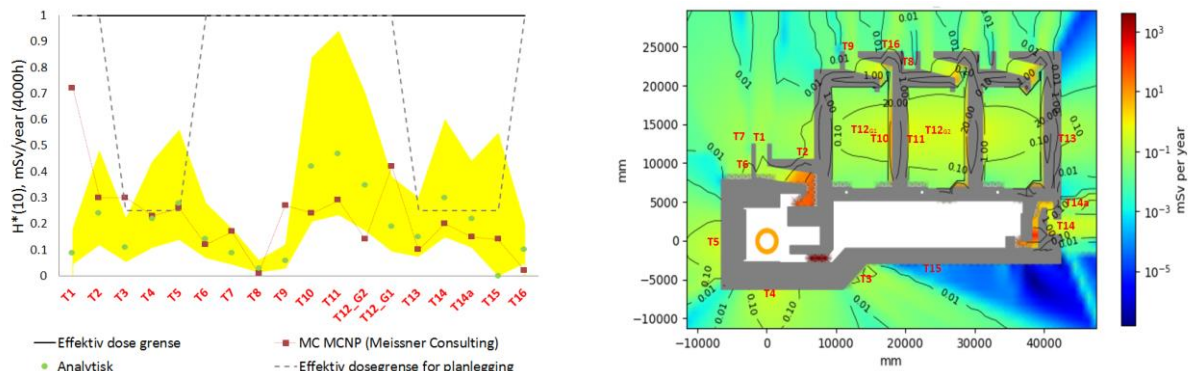
Resultatet fra den analytiske beregningen utført for et horisontalsnitt av protonterapien er oppsummert i Tabell 7 og Figur 34.

Tabell 7: Årlig ambient dose for utvalg av punkter i protonanlegget

1	2	3	4
ID	Dosegrense, mSv/år	H*(10), mSv/år (utstyrsleverandør)	H*(10), mSv/år
T1	1	0.72	0.09
T2	1	0.30	0.24
T3	0.25	0.30	0.11
T4	0.25	0.23	0.22
T5	0.25	0.26	0.28
T6	1	0.12	0.14
T7	1	0.17	0.09
T8	1	0.01	0.03
T9	1	0.27	0.06
T10	1	0.24	0.42
T11	1	0.29	0.47
T12_G2	1	0.14	0.35
T12_G1	1	0.42	0.19
T13	0.25	0.10	0.15
T14	0.25	0.20	0.3
T14a	0.25	0.15	0.22
T15	0.25	0.14	0.00
T16	1	0.02	0.10

Kolonne 1 viser navn på målepunkt, kolonne 2 viser tillat dosegrense som gjelder for målepunktet, kolonne 3 viser årlig ambient dose for målepunktet beregnet med MNCP Monte Carlo. Kolonne 4 viser årlig ambient dose for målepunktet beregnet med den nevnte analytiske metoden. De presenterte doseverdier er ikke skalert med oppholdsfaktorer.

Beregnete doseverdier viser fornuftig samsvar med resultatene fra utstyrsleverandør. Den betydelige forskjellen i estimert verdier ved T1 og T9 avslører svakheter i den analytiske tilnærmingen ved tilfeller når skjermingsgeometrien er betydelig mer komplisert sammenlignet med antakelsen. T1 og T9 ligger henholdsvis ved utgangen av maze for syklotronen og maze for behandlingsrommet. Her er nøytronenergispiktrer betydelig forskjellig fra det som antas i modellen, på grunn av tallrike termiske spredningsnøytroner.



Figur 34: Doseekvivalent som tilsvarer til 1 år anleggsdrift (4000 h) i henhold til workload definert tidligere. Det venstre bildet viser sammenligning av beregnet resultat fra den analytiske modellen og Monte Carlo simuleringer utført av utstyrsleverandør for utvalgt plasseringer. Veiledende dosegrenser er også vist. Det gule båndet viser  $\pm 100\%$  usikkerhetsnivåer for de analytiske beregningene. Det høyre bildet viser 2D-projisering av dosefordeling lagt over skissen av betongskjerming, samt plasseringer av målepunktene T1 – T16. Presenterte doseverdier er ikke skalert med oppholdsfaktor.

### Oppsummering

Betongskjermingen for det planlagte protonterapianlegget i Oslo ble analysert ved hjelp av en analytisk siktanalysemetode og ganske konservative anslag for bruk av anlegget for å maksimere doseestimatene. Tallene fra analytisk beregninger ligger nær (og på samme nivå som) resultatene fra Monte Carlo simulering utført av utstyrsleverandør.

Beregningsresultat viser også at den årlige doseekvivalenten utenfor betongskjermingen er godt innenfor norske regulatoriske dosegrenser, selv om de beregnede verdiene ikke er vektet med oppholds faktorer. Dette indikerer at det finnes god margin i henhold til mulige fremtidige endringer i workload. Samtidig, betongskjerming alene bør ikke tenkes som tilstrekkelig tiltak for ubegrenset bruk av protonterapianlegget. Administrativ kontroll av protonstrålingsbruken bør implementeres og ved dramatiske bruksendringer som påvirker protonstrålingen, bør betongskjermingsberegninger utføres på nytt, med bruk av ny kunnskap om pasientsammensetning, behandlingsteknikk og workload.

For endelig godkjenning av skjermingen må beregningsresultatene bekreftes med målte data fra «radiation survey» når installasjonen av protonterapianlegget er fullført.

## 5.7 Oppsummering skjermingsberegninger

Ut fra sammenligning av stråleskjermingsberegningene utført av utstyrsleverandør og uavhengig vurdering utført med «Line-of-sight»-modell har arbeidsgruppen konkludert med at det festes lit til utstyrsleverandørens beregninger og at strålingsskjermingsdesignet vil ivareta (med god margin) norsk strålevernslovgivning når det gjelder bygningsmessig skjerming for protonterapianlegget ved Radiumhospitalet. Med de antagelser og avgjørelser som er gjort, anses utformingen i tillegg som konservativ, og vil i utgangspunktet tillate at endringer i behandling i fremtiden kan foretas uten at særlige endringer av skjermingsmessig karakter må gjennomføres.

## 6 Aktivering av kjølevann

Beregninger demonstrerer om vannaktivitet av (C-11, N-13 og O-15 i Århus) vil forventes å overskride «EU-fritak» verdier etter en kortvarig non-stop operasjon av syklotronen. Design av

kjølevannssystemet må ta høyde for dette. I dette kapittelet presenteres design konseptet for kjølevannsystem for protonanlegget ved Radiumhospitalet. Det presenteres også løsning for å isolere potensielt aktivert kjølevann fra resten av kjølevannssystemet og for hvordan en potensiell lekkasje av aktivert kjølevann kontrolleres før det slippes ut i avløpssystemet.

## 6.1 Oppsummering rapport aktivering av kjølevann

Rapport for kjølevann ble mottatt 20.03.20 og i det følgende oppsummeres hovedpunktene i denne rapporten. Rapporten vedlegges i sin helhet, «R-14.11.002\_1 cooling water Oslo» [11].

Rapporten tar utgangspunkt i eksisterende senter, slik som DCPT og Universitet i Cincinnati, som har ProBeam løsning. Resultatene fra eksisterende senter sammenlignes med aktuelt design for 3 rom ved Radiumhospitalet, ProBeam360. Det er pr i dag ikke er installert noen ProBeam 360 i verden. Forskjell mellom layout på en ProBeam 360 og ProBeam vises i Figur 35 og Figur 36.

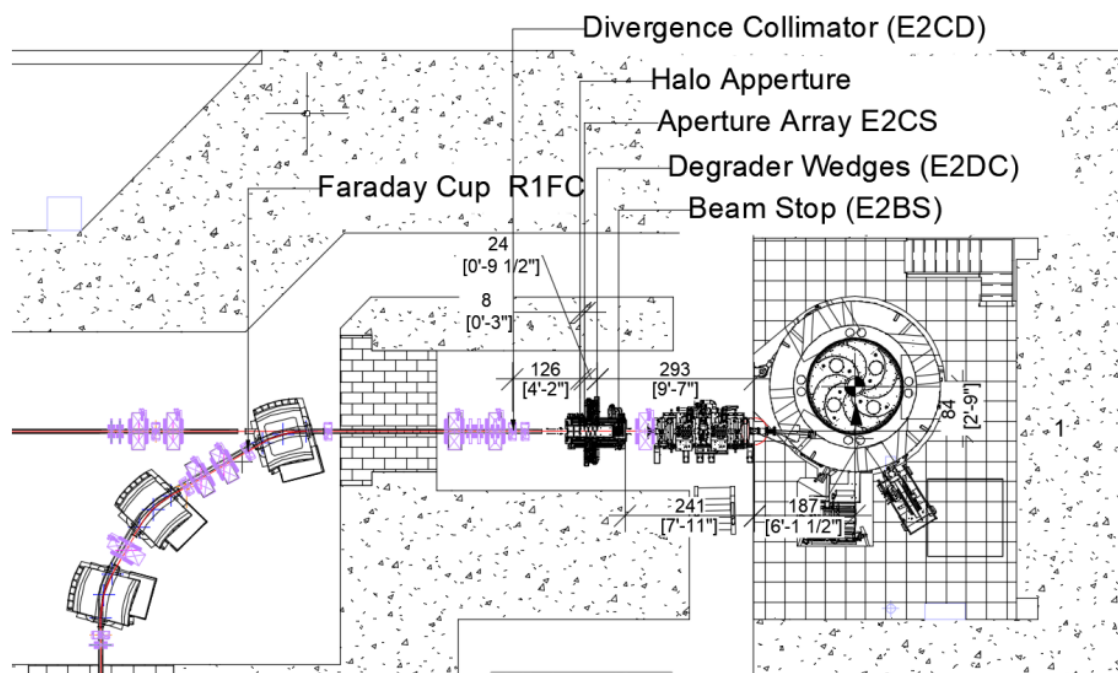


Figure 1. ProBeam 360 radiation sources

Figur 35: Strålekilder i en ProBeam 360 [11]



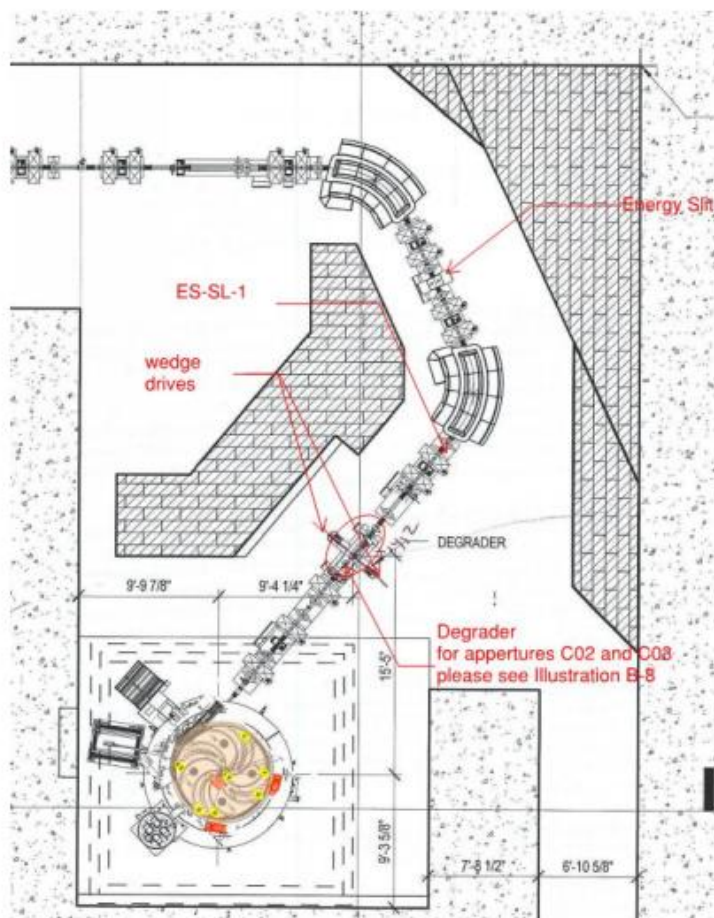


Figure 5. Radiation sources in ProBeam

Figur 36: Strålekilder i en ProBeam [11]

Forskjeller som er relevant til kjølevannet for de to systemene er listet opp i Figur 37.

	ProBeam	ProBeam 360
<b>Radiation Source</b>		
Max extraction energy	250 MeV	226 MeV
max extraction current	800 nA	800 nA
clinical energy range	69-242 MeV	60-218 MeV
beamline transmission	0.02% - 6.6%	0.1% - 24.3%
<b>water cooled devices in high radiation zone</b>		
<b>forward of degrader</b>	<b>3 Quad; 1x 65° Dipol</b>	<b>2 Quads</b>
estim. total water flow degrader and forward	4.65 m <sup>3</sup> /h	1.65 m <sup>3</sup> /h
thereof at apertures	0.45 m <sup>3</sup> /h	0.45 m <sup>3</sup> /h
<b>between cyclotron and degrader</b>	<b>2 Quad</b>	<b>2 Quad</b>
total water flow between cyclotron and degrader	1.2 m <sup>3</sup> /h	1.2 m <sup>3</sup> /h
<b>cyclotron</b>		
RF and pole cap cooling	25 m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h

Table 2. Differences relevant for cooling water activation

Figur 37: Forskjeller mellom ProBeam og ProBeam 360, kjølevann [11]

I ProBeam 360 er det mindre kjølevannvolum enn i ProBeam. I tillegg er maksimalenergien til systemet mindre enn sin forgjenger, som tidligere omtalt.

Kjølevannet som benyttes i systemet er deionisert, og det er montert system med ionefiltre plassert på eget kjølevannssrom. Disse ionefiltrene må byttes og utføres service på regelmessig.

Det anbefales at dette dedikerte rommet defineres som overvåket område, noe som allerede er implementert i prosjektet, se for øvrig Figur 40 for plassering av deioniseringsanlegget. Videre anbefales det at en doserateundersøkelse etter utvidet bruk av protonstråling gjennomføres. Dette vil utføres i samarbeid mellom utstyrsleverandør og OUS. Ved skifte av ionefiltre anbefales det å måle og analysere radioaktive komponenter i filteret. Dette løses med fremtidige driftsprosyder.

Rapporten anbefaler at potensielt radioaktivt spillvann bør samles i holdetank, dette er også implementert i prosjektet. Holdetank er etablert i eget, avstengt rom i plan U2, og det vil bli etablert prosedyrer for håndtering av dette systemet og utslipp av spillvann.

Utstyrsleverandøren har ved flere protonsentre gjort doseratemålinger i kjølevannssystemet. Disse viser alle at to timer etter kjøring av protonstråling er den målte doseraten tilsvarende bakgrunnsnivå. Dette understøttes også av egne målinger prosjektet har gjort ved DCPT i Århus i januar 2020 [6].

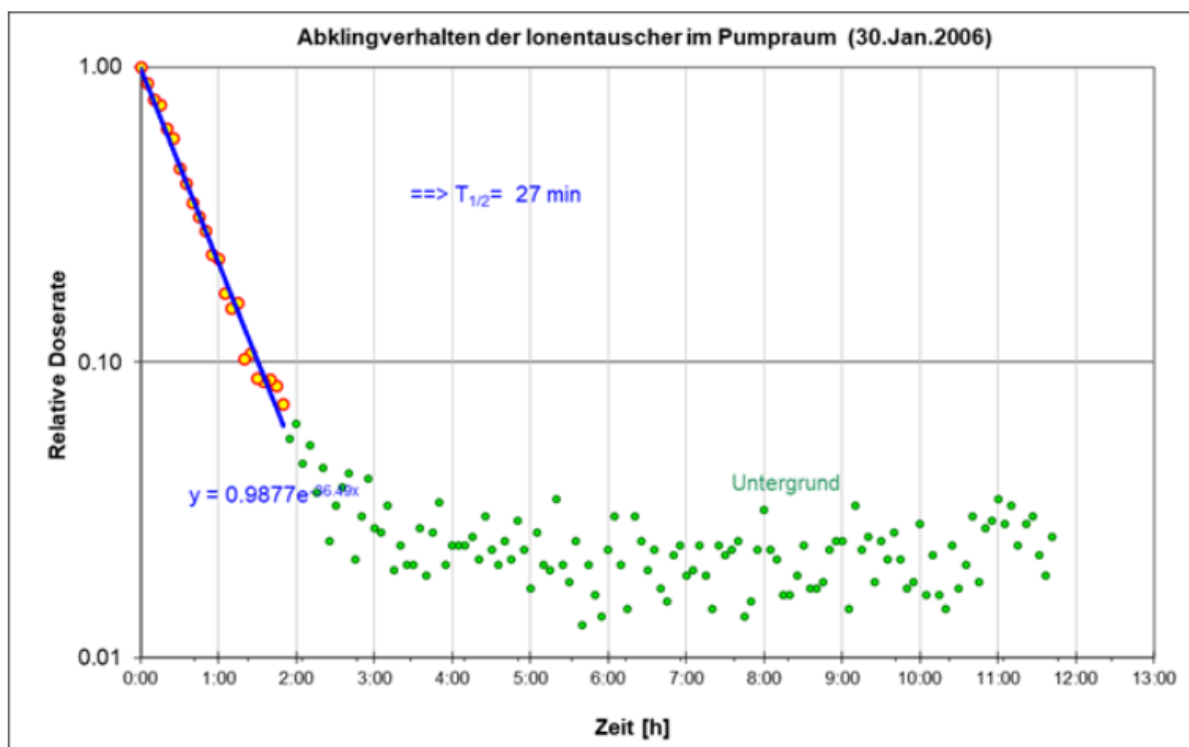


Figure 4. Decay curve of activity in the ion exchanger – RPTC Munich

Figur 38: Radioaktivt henfall i ionebyttekammer. Etter to timer er aktivitet tilsvarende bakgrunnsstråling [11]

Se for øvrig vedlagt rapport for mere detaljer [11].



Doserate for en servicearbeider er for DCPT anslått til å være 0,03 mSv/år i en avstand 30 cm fra ionefilteret [11]. Dersom forutsetningene er 20 cm avstand og en øvre grense på 10  $\mu$ Sv/år, vil det ved en meters avstand gi en doserate på 0,5  $\mu$ Sv/time, noe som tilsvarer 1 mSv for 2000 arbeidstimer. I prosjektet har området som er aktuelt, en definert oppholdsfaktor på  $T=1/10$ , dette gjør at serviceingeniøren kommer under anbefalt dosegrense på 0,25 mSv/år.

Rapporten oppsummerer at basert på disse vurderingene gjort ut fra ProBeam systemet, er det trygt å anta at all kjølevannsaktivering fra ProBeam 360 vil være lavere. Ved vanlig drift av protonstrålen er det forventet nivåer på kjølevannsaktivering tilsvarende bakgrunnsnivå. Etter utvidet operasjon av anlegget vil det kunne forekomme mer radioaktivitet, dette vil samles opp i ionefilteret. Ved dette filteret vil doseraten forventes å være fra 1-10  $\mu$ Sv/time ved 20-30 cm avstand når stråling pågår. Etter stråling er slått av vil hoveddelen av aktiviteten henfalle med en halveringstid på ca 30 minutter. Når stråling pågår i anlegget, vil ingen oppholde seg i nærheten ionefiltrene eller utføre service på kjølevannssystemet.

## 6.2 Design kjølevannsystem

Det etableres en egen kjølesentral for produksjon av kjøling til protonutstyret. Kjølingen leveres på et temperaturnivå tilpasset behovet til alle loopene på ca. +20°C. Kjølemaskinene plasseres i et eget område i L1-Behandlingsbygg U2. Maksimalt peak verdi for kjølebehov er på ca. 800 kW.

Protonkjølingen fordeler seg på 2 separate kjølelooper. Loop 1 dekker syklotron og magneter inne i stråletransportlinjen, loop 2 er delt i to, hvor den ene delloopen dekker strømforsyninger med mer i tekniske arealer direkte over protonstrålen og den andre delloopen dekker de kryogeniske kjølekompressorene for heliumet i syklotronen.

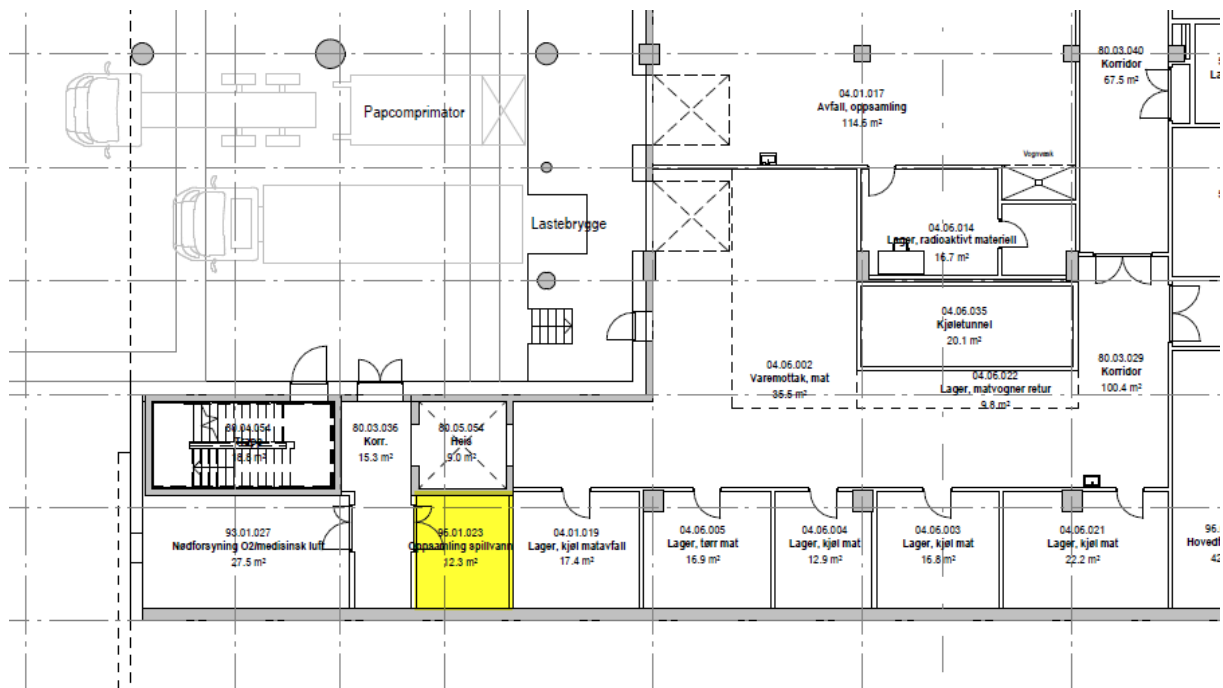
Det etableres en egen mellomsentral for kjøleutveksling til de ulike kjøleloopene med tilhørende pumper og ventilutrustning i arealene tilknyttet protonterapianlegget.

Kjøleloop 1 befinner seg inne i arealet med syklotronen og stråletransportlinjen, og vil således bli utsatt for nøytronstråling som kan aktivere kjølevannet. For å begrense mulighetene til aktivering av stoffer i vannet er det stilt strenge krav til konduktivitet, pH, partikler og tilsetningsadditiver.

For kjøleloop 2 er det et redundanskrav da eventuelt bortfall av kjøling til de kryogeniske kompressorene vil kunne medføre at det flytende heliumet i syklotronen fordampes og må evakueres. Dette vil kunne medføre en omfattende nedetid på syklotronen. Redundansbehovet er i utgangspunktet tenkt ivaretatt ved å benytte husets nettvann.

## 6.3 Potensiell lekkasje av aktivert kjølevann

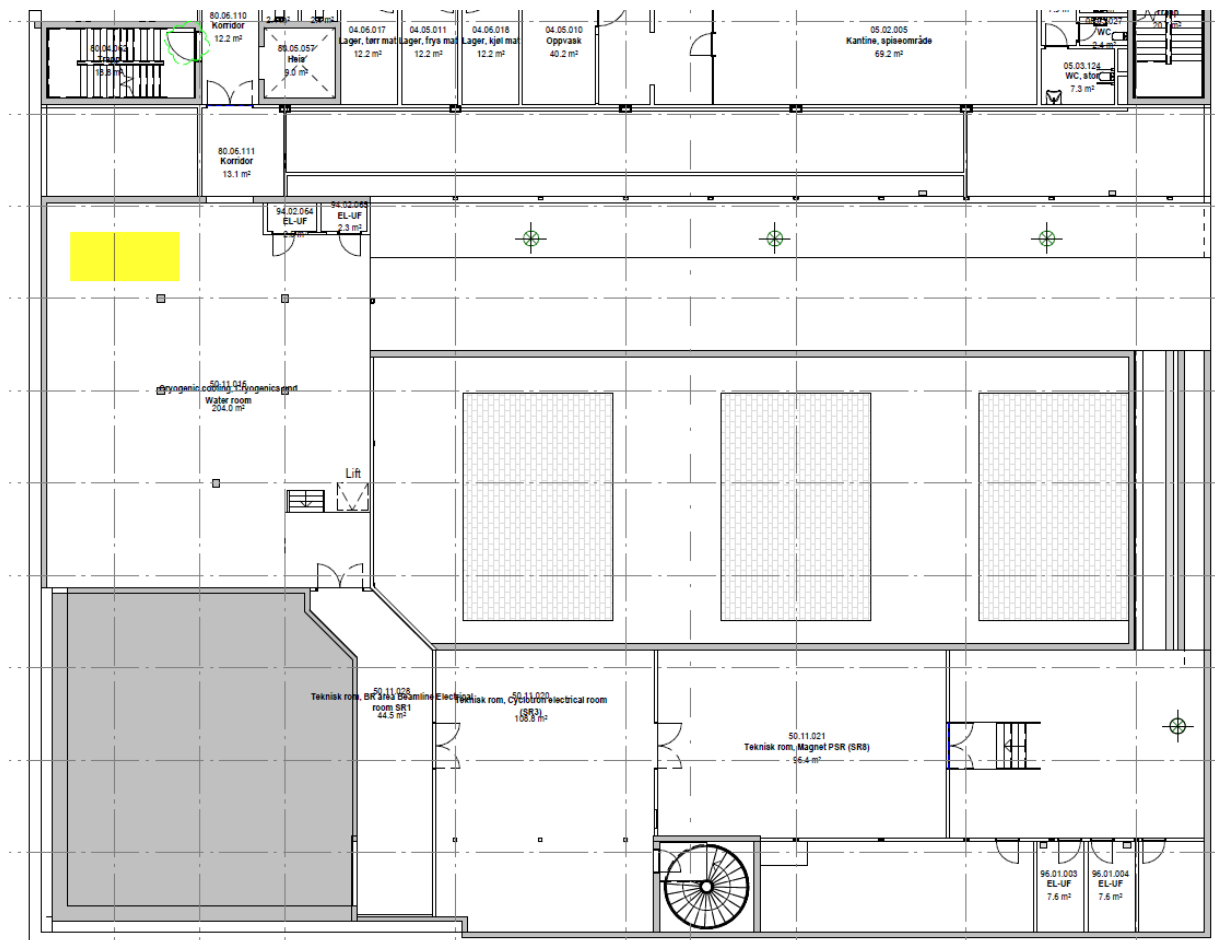
Sluk i arealer hvor kjøleloopene med potensielt aktivert kjølevann befinner seg føres med selvfall til oppsamlingstank for hot spillvann plassert i U2 i M2 klinikk, plassering vises i Figur 39. Spillvannet i tanken kontrolleres med hensyn på radioaktivitet før det eventuelt frigis til spillvannsnett. Når vannet er frigitt pumpes det videre til spillvannsnett ved hjelp av neddykkede pumper.



Figur 39: Plassering av spillvannstank i U2

## 6.4 Målinger fra DCPT

I januar 2020 ble det utført målinger under stresstest av syklotron ved DCPT. Rapport «Måling av indusert aktivitet i kjølevann og luft fra skorstein ved Dansk Center for Partikelterapi» [6] er vedlagt. Testen ble utført av fysikere ved DCPT og OUS. En B20-ER ble plassert på tanken for kjølevann til syklotronen, under drift av syklotronen. Det ble målt et maksimumsnivå på rundt 10  $\mu\text{Sv}/\text{time}$  direkte på overflaten etter 12 minutters kjøring av syklotron. Nivået avtok raskt med avstand og dosen falt når syklotronen ble slått av. Etter omtrent 45 minutter var strålenivået redusert til 1/3 av maksimumsnivå. Disse målingene viser at ved behov for vedlikehold og service på kjølevannssystemet, for eksempel bytte av ionefilter, kan holde strålenivået for servicepersonell godt innenfor tillatte grenseverdier ved hjelp av administrative rutiner (prosedyrer). Disse rutineene skal utvikles før oppstart av protonstråle og innebærer blant annet at måling av stråledose utføres foran hver service for å forsikre at dosenivå er så lavt som mulig før ionefilterbytte gjennomføres. Plassering av sted for ionefilterbytte vises i Figur 40.



Figur 40: Gult felt indikerer plassering der ionefiltrene befinner seg, plan 01

## 7 Aktivering av grunn og grunnvann

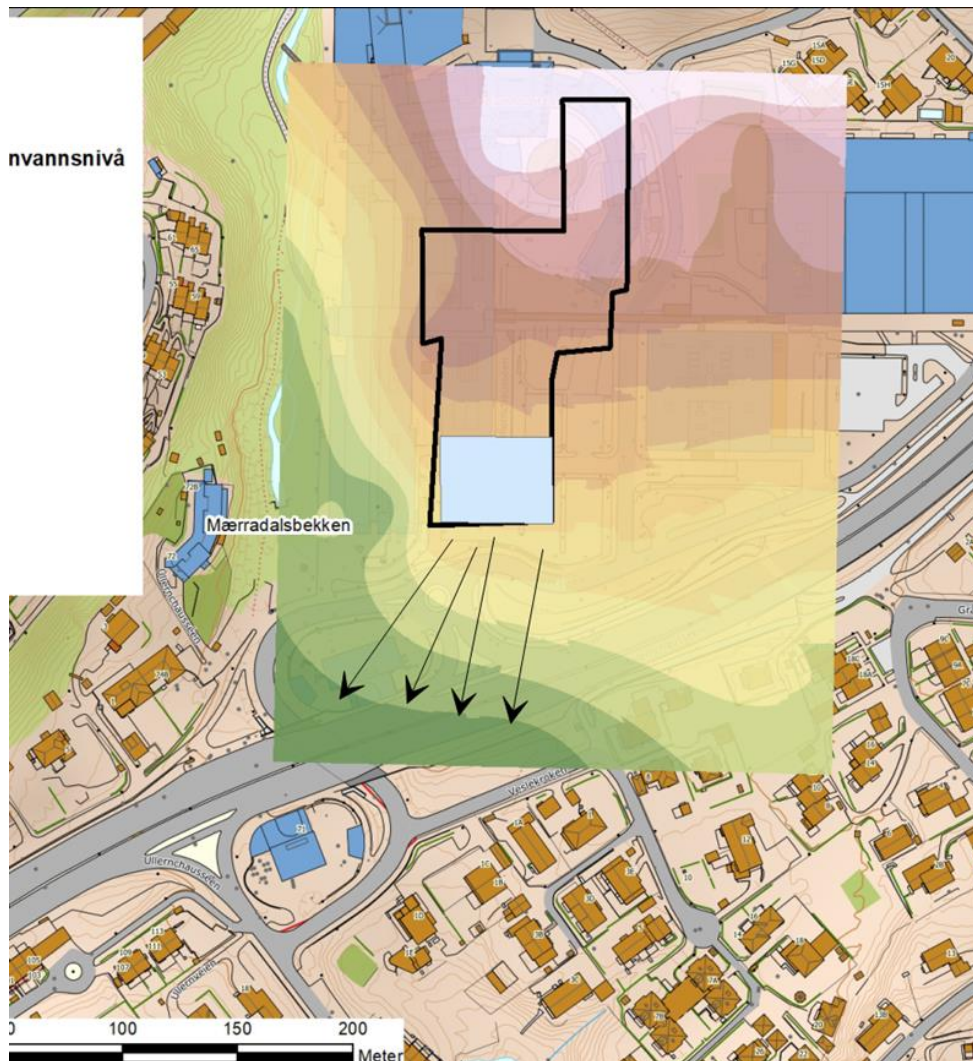
Aktivering av grunnvann kan teoretisk forekomme ved at termiske og hurtige nøytroner penetrerer betonggulvet og kan derfor være en kilde for eksponering av radioaktivitet til grunn og grunnvann. Protonanlegget på Radiumhospitalet står på en bunnplate av betong hvor tykkelsen på de ulike steder er kalkulert ut fra skjermingsberegningene. Bunnplaten vil absorbere nøytroner effektivt. Dette er iboende barrierer som gjør at faren for aktivering av grunn og grunnvann er minimal.

Ved Dansk Center for Partikelterapi ble det gjennomført en teoretisk beregning av aktivitetskonsentrasjon i grunnvann etter 30 års drift. «Potential activation og Ground Water Danish center for particle Therapy». I dette arbeidet ble aktivitetskonsentrasjonen estimert til å være svært lav sammenlignet med EU's grenseverdier for vann, typisk 10 000 ganger lavere enn grenseverdi. I den samme rapporten ble det utført en doseberegning basert på at grunnvann drikkes uforynnet. Resultatet da var årstdose på langt under 1  $\mu\text{sv}$ .

For Radiumhospitalet er ikke grunnvannet vurdert til å være en realistisk kilde til potensiell eksponering av radioaktivitet. Området rundt sykehuset, Montebello og Mærradalen er heller ikke aktuell som drikkevannskilde.

## 7.1 Beskrivelse av grunnvannsnivå

Grunnvannsnivået ved sydenden av M1 ble høsten 2019 målt til ca. kote +49. Dimensjonerende grunnvannsnivå er satt litt høyere, til mellom kote +50 – 51. Nivået på Mærradalsbekken er på ca. kote +46 rett vest for M1 og Mærradalsbekken renner sydover. En eventuell lekkasje fra M1 til grunnvannet vil sannsynligvis dreneres ut i syd fra byggegroppen og deretter mot Mærradalsbekken som vist i Figur 41.



Figur 41: Antatt grunnvannstrømning fra bygg M1

## 7.2 Analyse grunnforhold

Det ble i november 2019 tatt prøver av grunnen under hvert gantry samt under der hvor syklotronen skal plasseres. Prøvene ble tatt av NGI og analyse av disse ble utført av ALS laboratoriegroupe Norge AS.

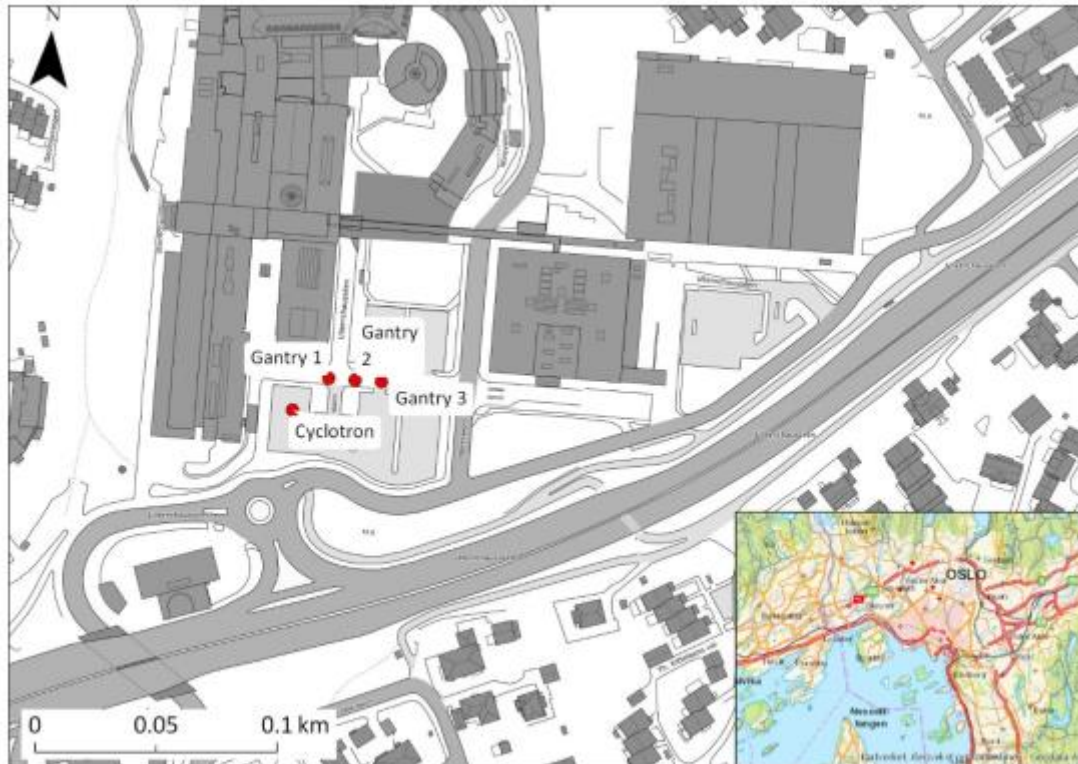


Figure 1 Sample location. Sample naming reflect overlying room.

Figur 42: Lokalisasjon for prøvetagning merket med rødt [13]

Prøvene viser at under gantry 1, 2 og syklotron er det leire, mens under gantry 3 er det berggrunn. Leire, berg og grunnvann er analysert for sammensetning av grunnstoffer. Resultatene av disse analysene er benyttet som underlag for rapport aktivering grunn og grunnvann utført av utstyrsleverandør. Analyseresultater fra NGI er vedlagt med designdokumentet V 2.0, «20190761-01-TN Grunnundersøkelser Radiumhospitalet» [13].



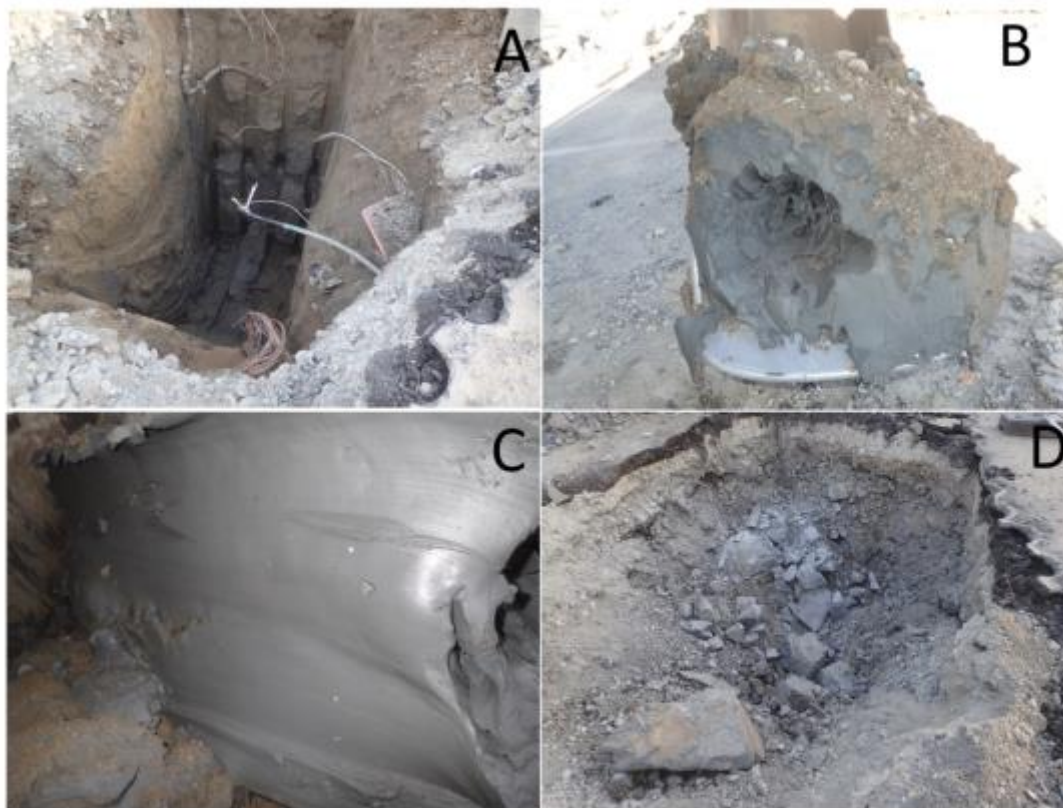


Figure 2 Photo collage displaying example of shaft from Gantry 2 in A. Illustrative sample images are displayed in B, C and D of Cyclotron, Gantry 2 and Gantry 3 respectively.

Figur 43: Bilder av grunnprøvetakning [13]

### 7.3 Oppsummering rapport aktivering av grunn og grunnvann

Aktivering av grunn og grunnvann fra protonanlegget fra sekundære nøytroner er vurdert og simulert av utstyrsleverandør. Resultatene er beskrevet i «R-14.11.003-1\_Soil\_and\_GW\_activation Oslo» [12] som vedlegges designdokumentet, V 2.0. Rapporten er basert på ProBeam 360 Proton Therapy Project med 3 Gantry-rom, og er spesifikk for anlegget på Radiumhospitalet.

Formålet med denne rapporten er å sammenligne funnene med grenseverdier angitt i forskrift Tabell 1 [M]. Funnene viser at forskrift overholdes når det gjelder potensielt aktivert grunn og grunnvann under betongskjermingsbarrieren ved protonsenderet på Radiumhospitalet.

Monte Carlo simuleringer ble benyttet (MCNP6.2) med en tidshorisont på 50 år med full klinisk workload/utnyttelse, etterfulgt med ett års ventetid før grunn eller grunnvann er tilgjengelig for grunnarbeid.

Kriteriene for å bestemme om grunn og grunnvann er under grensen for aktivering er «Forskrift om anvendelse av forurensningsloven på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall», Tabell 1 [M] sine definisjoner, Annex Ia og IAEAs part 3, Tabell 1 [Y], dersom isotopen ikke er oppgitt i norsk lovgivning. Summen av alle isotopene dividert på deres opplyste grenser må da være under 1.

Potensiell aktivering av grunn og grunnvann skjer ved at sekundærstråling, produsert ved protonstrålens interaksjon med komponenter i stråleoverføringslinjen eller pasienten, i form av nøytroner, reagerer med elementer i grunn og grunnvann utenfor betongskjermingen og produserer radionuklider. Siden produksjonen av disse radionuklidene er proporsjonal med nøytrondoseraten, er de lokasjonene der det blir produsert mest nøytroner undersøkt: Under syklotronen, under ESS og under gantry.

I beregningene er det gjort konservative antagelse, ved at maksimalverdiene som ble funnet for henholdsvis metallforurensningene i grunnprøvene og urenheter i grunnvannsprøvene ble benyttet. Den elementspesifikke sammensetningen som er benyttet for både grunn og grunnvannsprøvene i beregningene vises i Figur 44.

Soil		
	Clay	Limestone
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.99	2.7
Element	Content (wt%)	
Si	20.67%	23.43%
Al	6.47%	8.17%
Fe	3.73%	4.96%
Ca	0.90%	5.38%
Mg	1.17%	3.10%
P	0.08%	0.04%
Na	1.24%	0.75%
K	2.81%	3.14%
Ti	0.40%	0.41%
Mn	0.05%	0.05%
C	0.46%	1.79%
H	3.02%	0.91%
N	0.10%	0.11%
S	0.10%	0.32%
O	58.80%	47.46%

Metal impurities in soil			
Element	Content (mg/Kg)	Element	Content (mg/Kg)
As	7.16	Be	2.49
Ba	776.60	Cd	0.03
Co	29.40	Hg	0.04
Cr	275.09	Nb	19.38
Cu	36.74	S	1827.30
Ni	171.81	Sc	20.16
Pb	13.70	W	15.59
Sb	0.30	Y	23.31
Sn	0.71	Zr	97.02
Sr	287.01	Mo	0.85
V	154.92	Ag	0.07
Zn	84.31	Eu	1.04

**Table 1 Elemental composition of soil and metal impurities contained used in the calculation**

Groundwater			
Element	Content (mg/l)	Element	Content (mg/l)
N	0.67	Hg	0.0002
S	27.50	Se	0.0027
K	17.50	Zn	0.48
Ca	29.50	Mg	20.00
C	0.01	Na	12.00
F	0.0007	Al	30.50
Cl	0.01	Ba	0.30
As	0.01	Co	0.07
Cd	0.0003	Cr	0.04
Cu	0.40	Ni	0.11
Fe	88.40	Mo	0.01
Pb	0.24	Sb	0.0027
Mn	1.38	H	0.11
		O	0.89

**Table 2 Elemental composition of groundwater and impurities contained used in the calculation**

Figur 44: Elementkomposisjonen i grunn og grunnvann med dets urenheter benyttet i kalkuleringene [12]

Gjennomstrømning av grunnvann under Radiumhospitalet er svært liten, dvs  $10^{-9}$  m/s. Dette betyr at det vil ta 317 år før vannet forflytter seg 10 meter. Derfor anses grunnvannet som stasjonært.

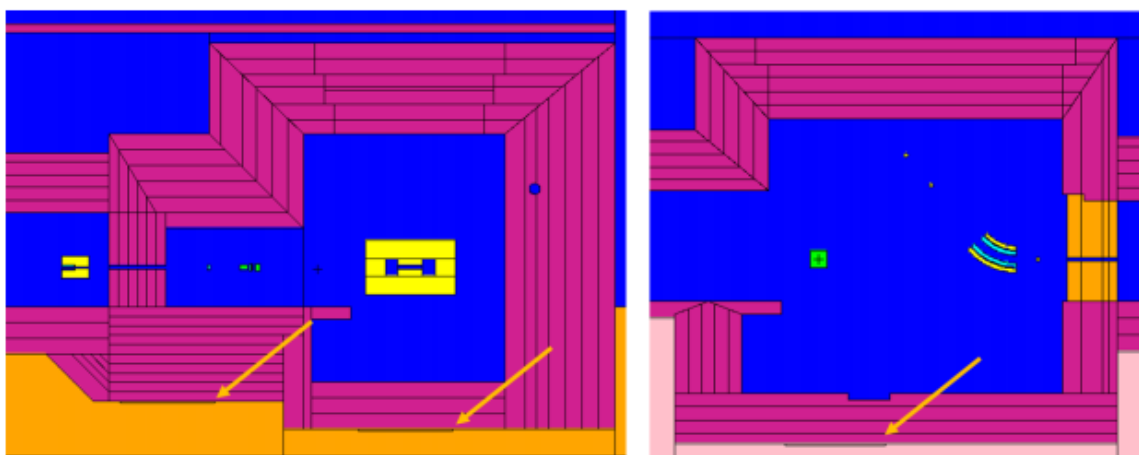


I Veileder om bunn- og sidetetting av deponier, kapittel 3.1, er kravet til en barriere for at den skal være tett for deponi av farlig avfall på  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Dette er tilsvarende forholdene for vanngjennomstrømming under protonterapibygget. Tabell 1

Aktiveringskonsentrasjonen i de stråleintense områdene bygges opp til et maksimalt metningsnivå når produksjonshastigheten av det radioaktive henfallet balanseres mot vanngjennomstrømningen. Generelt tar det ca 3 effektive halveringstider for å nå dette metningsnivået. Når strålingen opphører, vil produksjonen av radionuklider stoppe og man kan beregne restaktiviteten i grunn. Beregningene utført for Radiumhospitalet benytter 50 års full produksjon og ett år hvileperiode før eventuelt arbeid med grunnen tar til. Siden vanngjennomstrømning anses som stasjonær, vil man kunne benytte henfallskonstanten for den gitte radionukliden som tilnærmet lik den effektive henfallskonstanten, som ellers ville tatt høyde for en eventuell vanngjennomstrømning. For nærmere detaljering, se side 7 og 8 i rapporten [12].

Antall nøytroninduserte kjerner er beregnet ved Monte Carlo-simulering, i henhold til prøvesammensetningen på stedet, se Figur 44. Siden ikke alle nøytrontverrsnitt var tabulert for alle spaltasjonsrelevante energiområder ble det valgt å beregne alle tverrsnitt med en nøytronenergi under 20 MeV med tabulerte verdier. For nærmere detaljering, se side 9 i [12].

Geometrien for stedene som aktivering ble beregnet var 300 cm x 300 cm x 5 cm i henholdsvis bredde, lengde og høyde. Lokasjon under ESS, syklotron og gantry vises i Figur 45.



**Figure 1 Location of maximum neutron dose under cyclotron/ESS floor (left) and gantry floor (right)**

*Figur 45: Lokasjon for maksimal nøytrondose under ESS-, syklotron- og gantrygulv [12]*

Beregningene tok høyde for energier som forårsaker maksimal nøytrondannelse for de tre ulike stedene. Det vil si 220 MeV for gantry og 70 MeV for syklotron og ESS.

Årlig dose til omgivelsene for de tre lokasjonene vises i Figur 46 og Figur 47 for henholdsvis energibinning jamfør skjermingsrapporten [4] og worst-case scenario som er svært konservativ. Worst case bygger på maksimal protontap på de ulike lokasjonene i henhold til skjermingsrapportens forventede protonproduksjon for protonsentret.

ID	Location	Dose limit mSv/a	Annual Ambient Dose H*(10)					cyc/ESS mSv/a	Ambient Dose H*(10) U=25% for each cardinal mSv/a
			Gantry 0° 100% mSv/a	Gantry 90° 100% mSv/a	Gantry 180° 100% mSv/a	Gantry 270° 100% mSv/a			
S1	Soil under Cyclotron floor	0.25	-	-	-	-	0.59	0.6	
S2	Soil under ESS floor	0.25	-	-	-	-	22.30	22.3	
S3	Soil under Gantry floor	0.25	6.53	0.12	3.14	0.13	-	2.5	

**Table 3 Annual ambient dose at each selected location under the facility considering energy binning**

Figur 46: Årlig dose til omgivelsene for hver skissert lokasjon, i henhold til Figur 45, med tanke på energibinding [12]

ID	Location	Dose limit mSv/a	Annual Ambient Dose H*(10)					cyc/ESS 70 MeV mSv/a	Ambient Dose H*(10) U=25% for each cardinal mSv/a
			Gantry 0° 100% mSv/a	Gantry 90° 0% mSv/a	Gantry 180° 0% mSv/a	Gantry 270° 0% mSv/a			
S1	Soil under Cyclotron floor	0.25	-	-	-	-	1.75	1.7	
S2	Soil under ESS floor	0.25	-	-	-	-	52.13	52.1	
S3	Soil under Gantry floor	0.25	15.86	-	-	-	-	15.9	

**Table 4 Annual ambient dose at each selected location under the facility in the worst scenario**

Figur 47: Årlig dose til omgivelsene for hver skisserte lokasjon, i henhold til Figur 45, i worst case scenario [12]

### 7.3.1 Grunnaktivering

Aktivitetkonsentrasjon av aktivert grunn og grunnvann for isotoper som har halveringstid større enn 24 timer er kalkulert. I tillegg ser man bort fra isotoper som har en aktivitet på mindre enn 10-10 Bq/g etter ett års hviletid. Dette er fornuftige tall siden ingen grenser gitt i forurensningsforskriften er under 0,1 Bq/g og bare I-129 har en lavere grense på 0,01 Bq/g ifølge IAEAs grenser.

Grunnaktivering under ESS er området som blir mest aktivert. Resultatene vises i Figur 48. For resultat under syklotron og gantry vises til rapport [12].

Isotope	H-L	t <sub>cool</sub> = 1 yr		Regulation of pollution Control Act			IAEA GSR part 3		Annex I.a Radioactive waste		Annex I.b Radioactive waste subject to a disposal requirement		Annex II Release of radioactive substances that always requires a	
		A (t <sub>cool</sub> ) (Clay + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Limestone + metal) [Bq/g]	Annex I.a [Bq/g]	Annex I.b [Bq/g]	Annex II [Bq/g]	Table I.2 [Bq/g]	Table I.1 [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Clay + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Limestone + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Clay + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Limestone + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Clay + metal) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) (Limestone + metal) [Bq/g]
Be-7	53.22 d	2.52E-07	2.34E-07	1.00E+01	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+03	2.52E-08	2.34E-08	2.52E-10	2.34E-10	2.52E-09	2.34E-09
Be-10	1.51 My	2.03E-10	1.83E-10	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+04	n/a	n/a	2.03E-14	1.83E-14	n/a	n/a
C-14	5.70 ky	1.04E-06	7.96E-07	1.00E+01	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+00	1.00E+04	1.04E-07	7.96E-08	1.04E-10	7.96E-11	1.04E-09	7.96E-10
Na-22	2.60 y	8.50E-05	8.19E-05	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	8.50E-04	8.19E-04	8.50E-06	8.19E-06	8.50E-05	8.19E-05
Al-26	717 ky	1.69E-08	1.77E-08	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+01	n/a	n/a	1.69E-09	1.77E-09	n/a	n/a
Si-32	153 y	3.31E-08	3.84E-08	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+03	n/a	n/a	3.31E-11	3.84E-11	n/a	n/a
P-33	25.35 d	1.93E-10	2.66E-10	1.00E+03	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+05	1.93E-13	2.66E-13	1.93E-15	2.66E-15	1.93E-14	2.66E-14
S-35	87.37 d	6.85E-07	9.22E-07	1.00E+02	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+02	1.00E+05	6.85E-09	9.22E-09	6.85E-12	9.22E-12	6.85E-11	9.22E-11
Cl-36	301.3 ky	1.69E-08	2.14E-08	1.00E+00	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+00	1.00E+04	1.69E-08	2.14E-08	1.69E-12	2.14E-12	1.69E-11	2.14E-11
Ar-37	35.01 d	9.29E-08	2.20E-07	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+05	n/a	1.00E+06	9.34E-14	2.20E-13	9.34E-14	2.20E-13	9.34E-13	2.20E-12
Ar-39	269 y	2.42E-05	2.57E-05	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+07	n/a	n/a	2.42E-12	2.57E-12	n/a	n/a
Ar-42	32.9 y	2.63E-08	4.84E-08	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Ca-41	99.4 ky	6.30E-08	2.94E-07	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+05	n/a	n/a	6.30E-13	2.94E-12	n/a	n/a
Ca-45	162.61 d	2.23E-06	8.99E-06	1.00E+02	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+04	2.23E-08	8.99E-08	2.23E-10	8.99E-10	2.23E-09	8.99E-09
Sc-46	83.79 d	4.71E-07	4.60E-07	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	4.71E-06	4.60E-06	4.71E-08	4.60E-08	4.71E-07	4.60E-07
Ti-44	60.25 y	3.48E-07	2.18E-07	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+01	n/a	n/a	3.48E-08	2.18E-08	n/a	n/a
V-49	330 d	5.08E-06	5.77E-06	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+04	n/a	n/a	5.08E-10	5.77E-10	n/a	n/a
Cr-51	27.70 d	4.18E-09	4.90E-09	1.00E+02	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+03	4.18E-11	4.90E-11	4.18E-12	4.90E-12	4.18E-11	4.90E-11
Mn-53	3.7 My	8.74E-10	1.02E-09	1.00E+03	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+04	8.74E-13	1.02E-12	8.74E-14	1.02E-13	8.74E-13	1.02E-12
Mn-54	312.05 d	6.10E-05	7.09E-05	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	6.10E-04	7.09E-04	6.10E-06	7.09E-06	6.10E-05	7.09E-05
Fe-55	2.744 y	3.76E-04	4.15E-04	1.00E+03	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+03	1.00E+04	3.76E-07	4.15E-07	3.76E-08	4.15E-08	3.76E-07	4.15E-07
Fe-59	44.5 d	2.29E-08	2.42E-08	1.00E+00	1.00E+01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+01	2.29E-08	2.42E-08	2.29E-09	2.42E-09	2.29E-08	2.42E-08
Co-57	271.74 d	1.50E-09	1.12E-09	1.00E+00	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+00	1.00E+02	1.50E-09	1.12E-09	1.50E-11	1.12E-11	1.50E-10	1.12E-10
Co-58	70.86 d	1.83E-10	1.38E-10	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E+01	1.00E+01	1.83E-10	1.38E-10	1.83E-11	1.38E-11	1.83E-10	1.38E-10
Co-60	5.27 y	3.52E-08	2.64E-08	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	3.52E-07	2.64E-07	3.52E-09	2.64E-09	3.52E-08	2.64E-08
Ni-63	101.2 y	4.97E-09	3.73E-09	1.00E+02	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+02	1.00E+05	4.97E-11	3.73E-11	4.97E-14	3.73E-14	4.97E-13	3.73E-13
Zn-65	243.93 d	9.83E-10	7.38E-10	1.00E+00	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	9.83E-10	7.38E-10	9.83E-11	7.38E-11	9.83E-10	7.38E-10
Sr-85	64.85 d	1.59E-10	1.19E-10	1.00E+00	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+00	1.00E+02	1.59E-10	1.19E-10	1.59E-12	1.19E-12	1.59E-11	1.19E-11
Y-88	106.63 d	1.70E-10	1.27E-10	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+01	n/a	n/a	1.70E-11	1.27E-11	n/a	n/a
Cs-134	2.07 y	3.72E-09	2.79E-09	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	3.72E-08	2.79E-08	3.72E-10	2.79E-10	3.72E-09	2.79E-09
Cs-137	30.08 y	1.67E-09	1.25E-09	1.00E+00	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	1.67E-09	1.25E-09	1.67E-10	1.25E-10	1.67E-09	1.25E-09
Ba-133	10.55 y	1.41E-08	1.06E-08	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+02	n/a	n/a	1.41E-10	1.06E-10	n/a	n/a
Eu-152	13.54 y	9.97E-08	7.49E-08	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	9.97E-07	7.49E-07	9.97E-09	7.49E-09	9.97E-08	7.49E-08
Eu-154	8.59 y	1.20E-08	9.03E-09	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	1.20E-07	9.03E-08	1.20E-09	9.03E-10	1.20E-08	9.03E-09
Total									1.47E-03	1.53E-03	1.47E-05	1.54E-05	1.47E-04	1.54E-04
									<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok

Table 7 ESS: Induced activity in soil with T<sub>1/2</sub> > 1 day and A > 10<sup>-10</sup> Bq/g after 1-year cooling time

Figur 48: Indusert aktivitet av grunn under ESS [12]

Resultatene viser at summen av alle isotopfraksjonen er 650 ganger mindre enn 1 under ESS. For syklotron er det i størrelsesorden 10<sup>4</sup> mindre. Dette betyr at aktiviteten er godt under gjeldende regulativ. Under gantry er summen av isotopfraksjonen også mye mindre enn 1, med en faktor i størrelsesorden 10<sup>3</sup> mindre.

### 7.3.2 Grunnvannsaktivering

Grunnvannsaktivering for samme område vises i Figur 49. For resultat under syklotron og gantry vises til rapport [12].

Isotope	H-L	t <sub>on</sub> = 50 yr	t <sub>cool</sub> = 1 yr	Regulation of pollution Control Act			IAEA GSR part 3		Annex I.a Radioactive waste		Annex I.b Radioactive waste subject to a disposal		Annex II Release of radioactive substances that	
				A (t <sub>on</sub> ) [Bq/g]	A (t <sub>cool</sub> ) [Bq/g]	Annex I.a [Bq/g]	Annex I.b [Bq/g]	Annex II [Bq/g]	Table I.2 [Bq/g]	Table I.1 [Bq/g]	A(t <sub>on</sub> )/limit	A(t <sub>cool</sub> )/limit	A(t <sub>on</sub> )/limit	A(t <sub>cool</sub> )/limit
H-3	12.32 y	4.46E-09	4.21E-09	1.00E+02	1.00E+06	1.00E+05	1.00E+02	1.00E+06	4.46E-11	4.21E-11	4.46E-15	4.21E-15	4.46E-14	4.21E-14
Be-7	53.22 d	5.03E-05	4.37E-07	1.00E+01	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+03	5.03E-06	4.37E-08	5.03E-08	4.37E-10	5.03E-07	4.37E-09
Be-10	1.51 My	3.85E-10	3.85E-10	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+04	n/a	n/a	3.85E-14	3.85E-14	n/a	n/a
C-14	5.70 ky	8.38E-07	8.38E-07	1.00E+01	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+00	1.00E+04	8.38E-08	8.38E-08	8.38E-11	8.38E-11	8.38E-10	8.38E-10
Na-22	2.60 y	3.18E-08	2.44E-08	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	3.18E-07	2.44E-07	3.18E-09	2.44E-09	3.18E-08	2.44E-08
S-35	87.37 d	1.04E-08	5.80E-10	1.00E+02	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+02	1.00E+05	1.04E-10	5.80E-12	1.04E-13	5.80E-15	1.04E-12	5.80E-14
Ar-39	269 y	8.57E-09	8.55E-09	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+07	n/a	n/a	8.57E-16	8.55E-16	n/a	n/a
Ca-45	162.61 d	9.71E-09	2.05E-09	1.00E+02	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+02	1.00E+04	9.71E-11	2.05E-11	9.71E-13	2.05E-13	9.71E-12	2.05E-12
V-49	330 d	1.39E-08	6.57E-09	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+04	n/a	n/a	1.39E-12	6.57E-13	n/a	n/a
Mn-54	312.05 d	1.67E-07	7.45E-08	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	1.67E-06	7.45E-07	1.67E-08	7.45E-09	1.67E-07	7.45E-08
Fe-55	2.744 y	4.96E-07	3.85E-07	1.00E+03	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+03	1.00E+04	4.96E-10	3.85E-10	4.96E-11	3.85E-11	4.96E-10	3.85E-10
Co-57	271.74 d	2.96E-10	1.17E-10	1.00E+00	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+00	1.00E+02	2.96E-10	1.17E-10	2.96E-12	1.17E-12	2.96E-11	1.17E-11
Co-60	5.27 y	2.52E-08	2.21E-08	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	2.52E-07	2.21E-07	2.52E-09	2.21E-09	2.52E-08	2.21E-08
Ni-63	101.2 y	2.43E-10	2.42E-10	1.00E+02	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+02	1.00E+05	2.43E-12	2.42E-12	2.43E-15	2.42E-15	2.43E-14	2.42E-14
Zn-65	243.93 d	2.52E-09	8.94E-10	1.00E+00	1.00E+01	1.00E+00	1.00E-01	1.00E+01	2.52E-09	8.94E-10	2.52E-10	8.94E-11	2.52E-09	8.94E-10
Ba-133	10.55 y	3.57E-10	3.34E-10	n/a	n/a	n/a	n/a	1.00E+02	n/a	n/a	3.57E-12	3.34E-12	n/a	n/a
Total									7.37E-06	1.34E-06	7.32E-08	1.28E-08	7.32E-07	1.27E-07
									<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok	<1 ok

Table 10 ESS: Induced activity in ground water with T<sub>1/2</sub> > 1 day and A > 10<sup>-10</sup> Bq/g after 1-year cooling time

Figur 49: Indusert aktivitet i grunnvann under ESS [12]

Resultatene viser at summen av alle isotopfraksjonen er  $10^5$  mindre enn 1 under ESS. For syklotron er det i størrelsesorden  $10^7$  mindre. Dette betyr at aktiviteten er godt under gjeldende regulativ. Under gantry er summen av isotopfraksjonen også mye mindre enn 1, med en faktor i størrelsesorden  $10^6$  mindre.

### 7.3.3 Konklusjon

Skjermingsbarrierene for de relevante arealene er designet tykk nok for å aktivere grunn- og grunnvann med grensene som gjelder norsk lovgivning, og IAEAs part 3, dersom norsk lovgivning ikke er gitt. Rapporten viser at selv i det mest stråleaktiverte området, under ESS, er alle aktiverte substanser i grunn eller grunnvann minst en faktor 650 under noen de nevnte grensene.

Sett i lys av «Forskrift om anvendelse av forurensningsloven på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall» definisjoner og Annex Ia, blir ingen radioaktivt avfall produsert hverken i grunn eller grunnvann.

## 8 Aktivering av luft

Aktivering av luft fra protonanlegget både fra primære protoner og sekundære nøytroner er en mulig bestrålingsvei som har blitt vurdert. Resultatene er beskrevet i «*Oslo\_Air Activation Report\_R-14.11.002-0*» [7] som vedlegges designdokumentet. Rapporten er basert på ProBeam 360 Proton Therapy Project med 3 Gantry-rom, og er spesifikk for anlegget på Radiumhospitalet. IFE har også gjennomført en analyse på et tidlig i prosjektet, med den info vi da hadde tilgjengelig. Som grunnlag for dette ble blant annet informasjon fra DCPT benyttet. Nedenfor vil funn og eventuelle ulikheter beskrives, da rapportene kan oppfattes motsigende.

### 8.1 Oppsummering rapport aktivering av luft

Beregninger for aktivering av luft for protonanlegget ved Radiumhospitalet viser at et utslipp pr år, med prosjekterte ventilasjonsløsninger og luftmengder, vil være i størrelsesorden  $7 \mu\text{Sv}/\text{år}$  [7]. De aktuelle radionuklider som er produsert i protonanleggets ventilasjonssystem og har betydning for luftaktivering er H-3, Be-7, C-11, N-13, O-15 og Ar-41. Ettersom luftavkastet består av en miks av disse isotopene, er summering av fraksjoner av disse benyttet. Summen av beregnet konsentrasjon av isotoper må være mindre enn en ( $< 1$ ) ved avkastet.

Isotope	Saturation activity concentration A (Bq/m <sup>3</sup> )				Limit (Bq/m <sup>3</sup> )	A/limit	Limit (Bq/m <sup>3</sup> )	A/limit
	Gantry	Cyclotron	BTS	Total exhaust	Most conservative	Fractions	German regulation	Fractions
H-3	0.00	0.00	0.00	0.00	1000	0.00	100	0.00
Be-7	0.00	0.05	0.00	0.01	1110	0.00	600	0.00
C-11	0.24	91.36	0.40	30.04	6000	0.01	600	0.05
N-13	3.27	1573.81	5.94	515.83	740	0.70	2000	0.26
O-15	1.17	854.45	5.07	281.49	740	0.38	1000	0.28
Ar-41	0.06	34.15	0.07	11.13	370	0.03	200	0.06
Sum of Fractions						1.11		0.65
								< 1 ok

Figur 50: Figuren viser at konsentrasjon av luftavkast er mindre enn  $7 \mu\text{Sv}$  og at summen av isotopene er  $< 1$

Norsk strålevernlovgivning angir at hver enkelt virksomhet skal begrense eksponering av allmennhet og ikke-yrkeseksponerte til 0,25 mSv per år. Beregningene for anlegget på Nye Radiumhospitalet viser at vi ligger langt under disse grensene. I rapporten er beregningene vurdert opp mot lovregulerte grenser i USA og Tyskland, og dette viser at vi er innenfor anbefalte verdier også i disse landene. Se vedlagt rapport [7] for mer detaljering.

Rapporten anbefaler god praksis ved å ha 3 m høy pipe over tak. Denne praksisen går i tråd med GMP – Good Manufacturing Practice – produksjon av (radioaktive) legemidler. Dette er ikke tilfelle for denne syklotronen. For ytterligere informasjon se kapittel 8.4.

## 8.2 Vurderinger fra Institutt for Energiteknikk (IFE)

IFE fikk i oppdrag å vurdere stråledoser til befolkningen fra utslipp av radionuklider fra protonanlegget. Grunnlagsdokument for dette var blant annet DCPT's rapport angående potensiell aktivering av luft. Rapporten «*IFE/KR/F-2020018 Stråledoser til befolkning fra utslipp av radionuklider fra protonsentere ved nytt Klinikk- og Protonbygg ved radiumhospitalet, Oslo universitetssykehus HF*» [8] er vedlagt i sin helhet.

Mest eksponert individ for utslipp vil være en person som er bosatt nær utslippsstedet på Radiumhospitalet. Det er beregnet resulterende effektiv dose for tre aldersgrupper; voksen (>17 år), barn (2-17 år) og spedbarn (0-2 år). I rapporten vises beregninger hvor det framgår at årtdose for spedbarn kun blir 0,1 µSv høyere enn for voksen i samme eksponeringssituasjon.

Samlet stråledose fra alle nuklider vil allerede i en avstand på 100 m, være svært lav. Det er derfor ikke presentert data for øvrige avstander fra utslippssted, kun vurdert avstander inntil 100 m. I det videre arbeid vil det beskrives nærmere både aktuelle avstander til utslippssted samt vurderes kortere avstander enn 100 meter. Dette vil gjøres samtidig med at det utføres en CFD analyse.

## 8.3 CFD simuleringer

### 8.3.1 Innledning

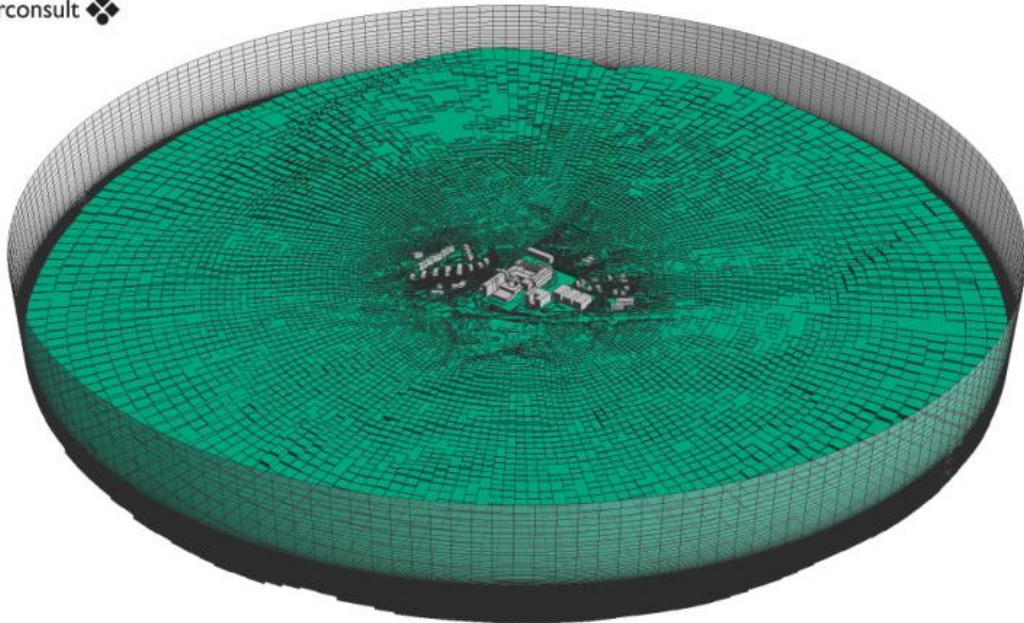
Computational Fluid Dynamics (CFD) er en fellesbetegnelse for beregnings- og analyseverktøy for simulering av gass- og væsketransport. Dette er utført av NorConsult for protonbygget i Oslo. Rapporten «*RAD-8201-V-RA-0001 CFD spredningsanalyse for spesialavkast*» [15] er vedlagt i sin helhet.

Luften som slippes ut i det fri fra avkastet fra protonbygget inneholder små mengder av radioaktive stoffer, og det er derfor analysert hvor luften strømmer under forskjellige vindforhold, simuleringen er kjørt for 12 vindretninger og 3 vindhastigheter. Ved å analysere alle simuleringene, koblet med vindstatistikken, er det beregnet årsmidlet konsentrasjon av avkastluften fra spesialavkastet.

CFD-analysen bidrar til å gi grunnlag for vurdering av hvorvidt konsentrasjonene ligger innenfor akseptable verdier. Området som er simulert vises i Figur 51. Radius av simuleringsskylde er 2,65 km.



Norconsult 



Figur 51: Oversikt over simuleringsdomenet med en radius på 2,65 km, Radiumhospitalet i sentrum [15]

Det er spesielt sett på omkringliggende bygninger i og rundt Radiumhospitalet, som Figur 52.

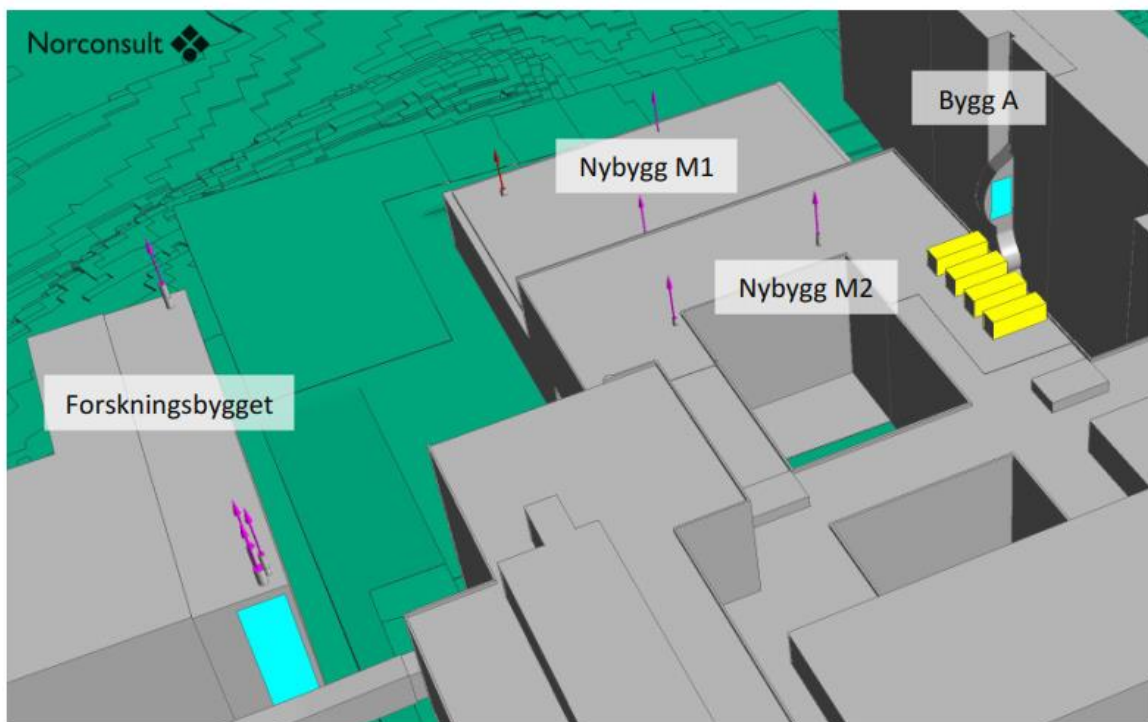
Norconsult 



Figur 52: Nærbildet av simuleringsdomenet med Radiumhospitalet, Ullern videregående skole og omkringliggende boliger [15]

### 8.3.2 Ventilasjonssystemet

Som underlag for CFD-simuleringene er posisjon for og luftmengder for inntak og avkast for nybygget og omkringliggende bygg oppgitt. Luftmengdene som presenteres er maksimum luftmengder for ventilasjonssystemene, se kapittel Design ventilasjonssystem 8.4. Det er gjort en vurdering av hvilke inntak og avkast som er relevant å ta med i simuleringene. Denne vurderingen er gjort hovedsakelig basert på nærhet til spesialavkastet og størrelsen på luftmengdene for de forskjellige inntakene og avkastene. Modellen inkluderer ett spesialavkast, åtte avkast, fire inntak og fire tørrkjølere, se Figur 53.

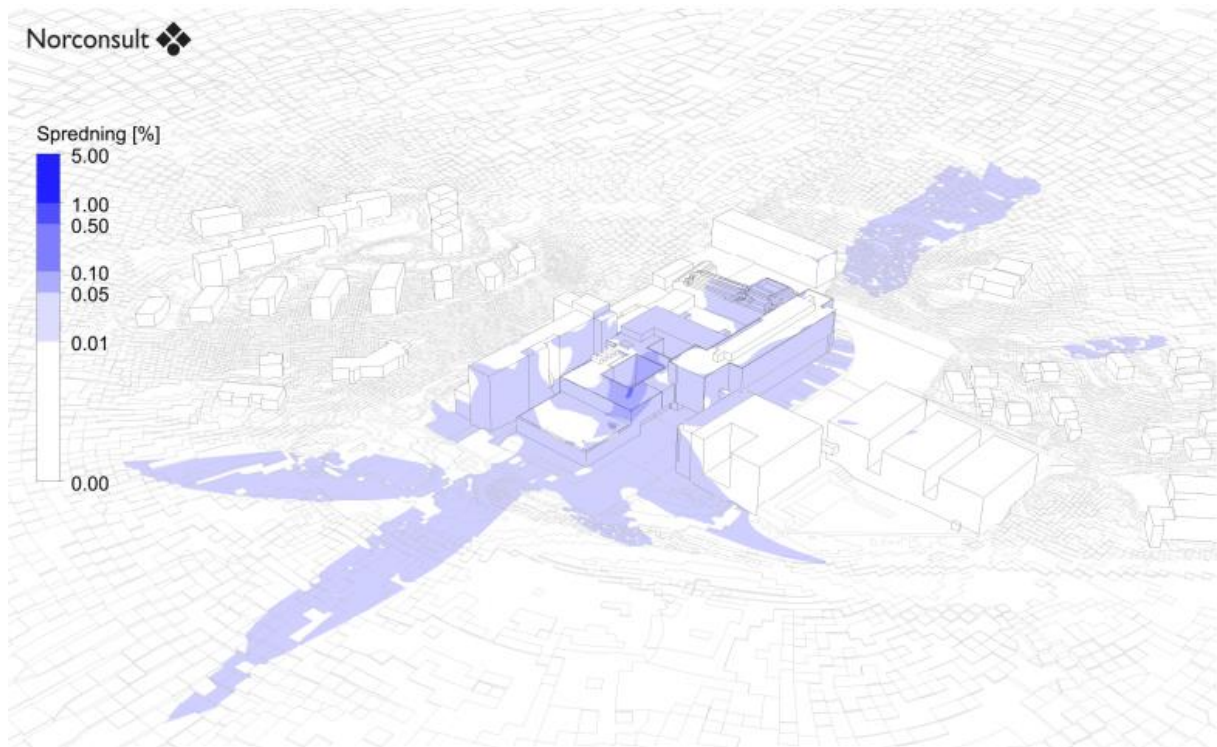


Figur 53: Inntak (turkis), spesialavkast proton (rødt), andre avkast (rosa) og tørrkjølere (gul) for Radiumhospitalet [15]

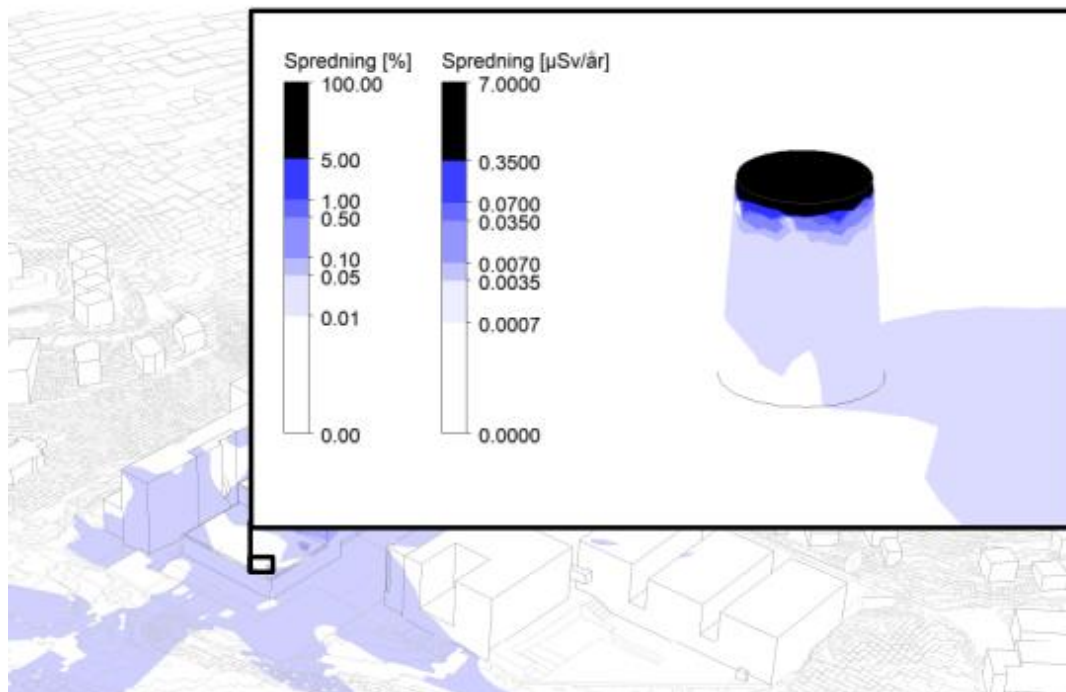
Analysene gjøres ved å spore «konsentrasjonen av avkastluft» gjennom beregningsdomenet. Ved utslippspunktet er denne konsentrasjonen 100 % som tilsvarer en doserate på  $7 \mu\text{Sv}/\text{år}$  [7]. Angitt i spesifikk aktivitet [ $\text{Bq}/\text{g}$ ] gir dette en konsentrasjonen på  $0,7 \text{ Bq}/\text{g}$ .

Figur 54 viser årsmidlet spredning av avkastluften i prosent. Figuren viser, med logaritmisk skala, at avkastluften uttynnes og at luften er uttynnet til under 0,05 % og 0,5% for henholdsvis terrenget og bygninger i området rundt avkastet. En konsentrasjon på 0,5 % tilsvarer  $0,035 \mu\text{Sv}/\text{år}$ . Forekomsten av konsentrasjoner fra 0,5 % til 100 % finnes kun på og i umiddelbar nærhet av utslippspunktet, Figur 55.





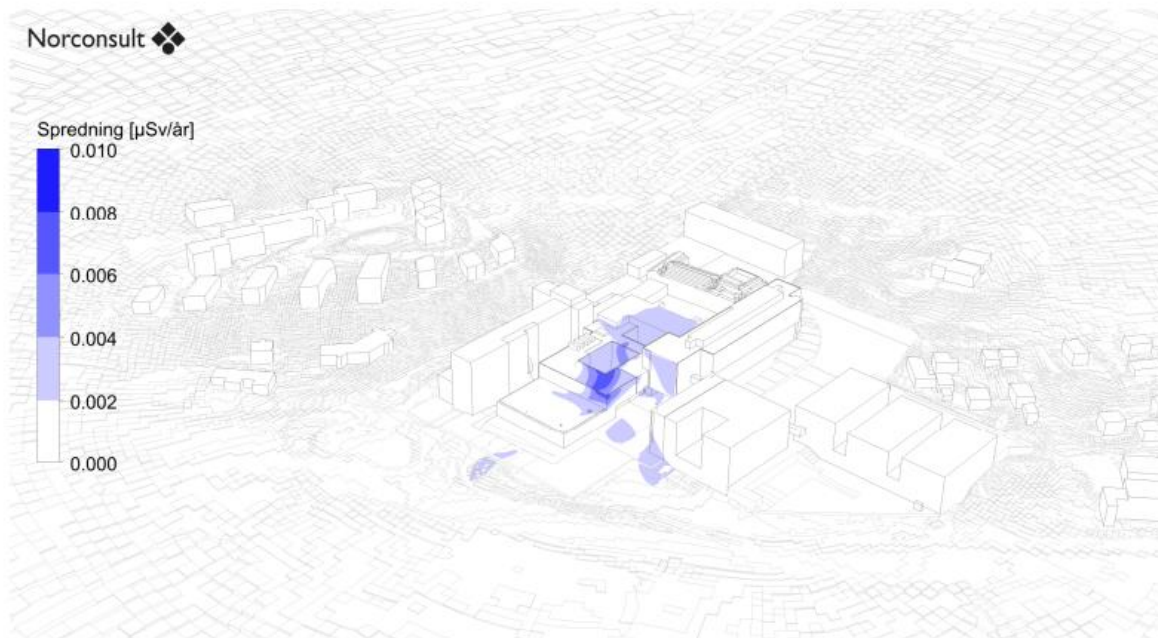
Figur 54: Årsmidlet spredning angitt i % - logaritmisk skala [15]



Figur 55: Aktivitet i pipe for spesialavkast proton, i % og  $\mu\text{Sv}/\text{år}$  [15]

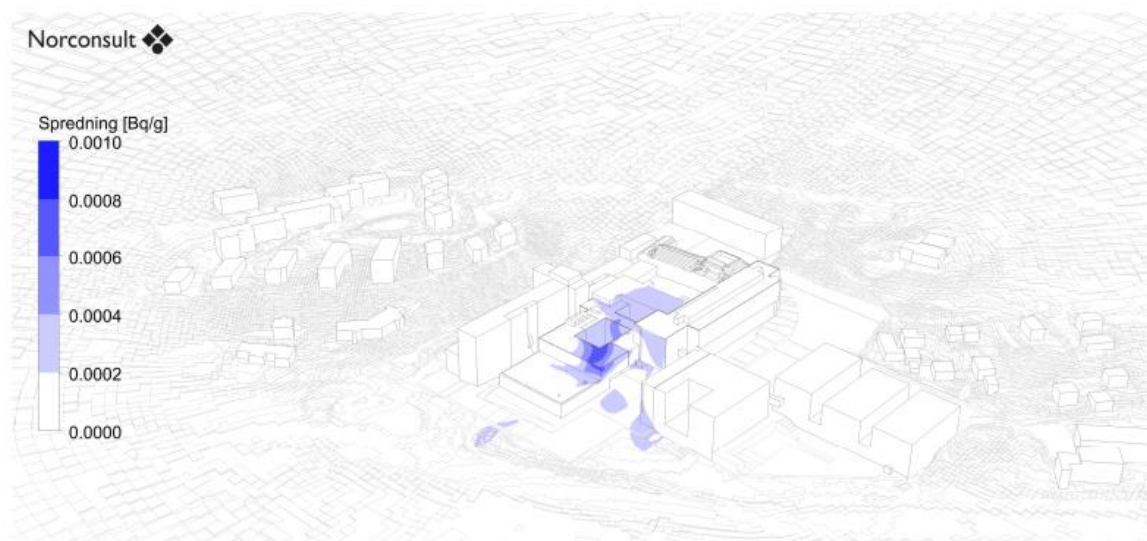
Figur 56 viser årsmidlet spredning av doserate i  $\mu\text{Sv}/\text{år}$ . Spredningen er begrenset til et lite område og det er viktig å understreke at denne er svært lav. De lyseblå områdene i figuren tilsvarer en årlig midlet doserate på 0,002 og 0,004  $\mu\text{Sv}/\text{år}$ . Et lite felt på figuren, angitt i

mørkere blått (lysgården i bygg M2), indikerer en doserate på 0,006 - 0,008  $\mu\text{Sv}/\text{år}$ . Nivåer over dette vil bare forkomme i utslippspunkt (pipeutløp, angitt i sort på Figur 55).



Figur 56: Årsmidlet doserate angitt i  $\mu\text{Sv}/\text{år}$  [15]

Figur 57 viser samme situasjon som Figur 56, med tilsvarende verdier angitt i Bq/g, spesifikk aktivitet.



Figur 57: Årsmidlet doserate angitt i Bq/g [15]

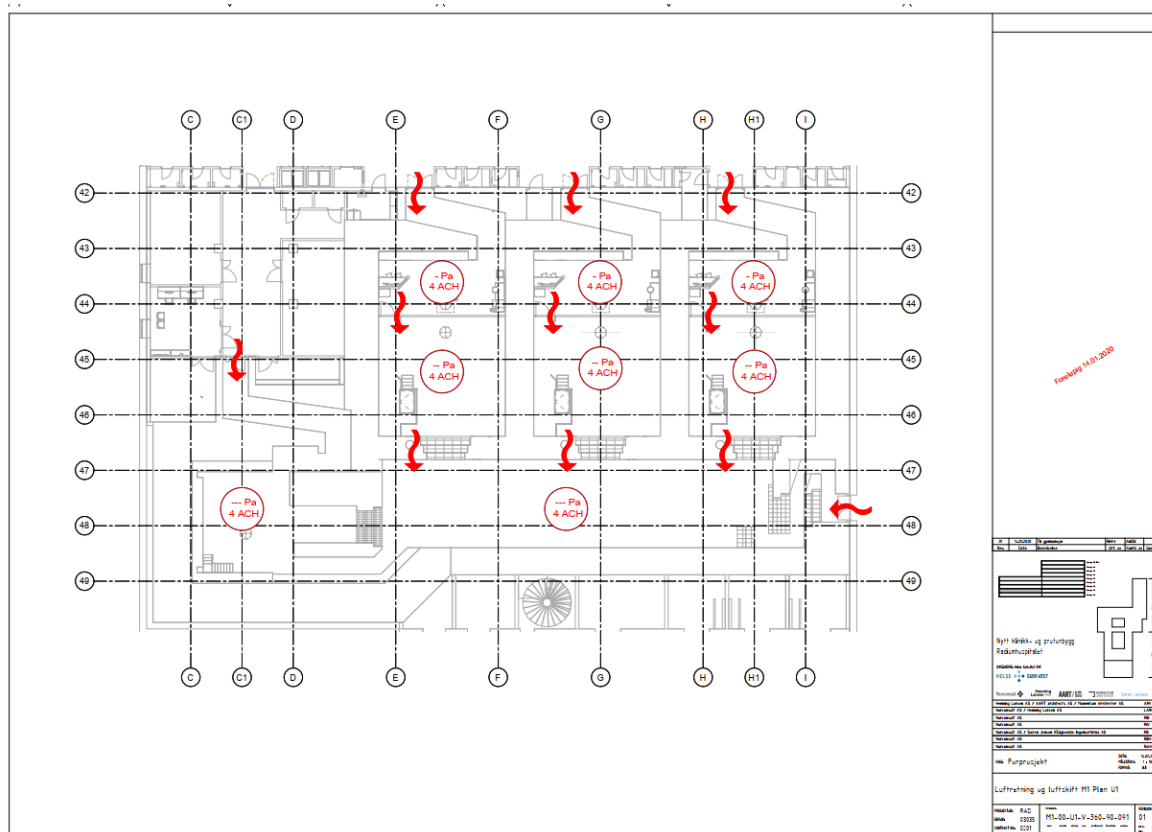
Alle analysene viser at nivået fra avkastet er langt under den normale bakgrunnsstrålingen man mottar i Norge, som på årsbasis er på 4,2 – 5,2 mSv.

## 8.4 Design ventilasjonssystem

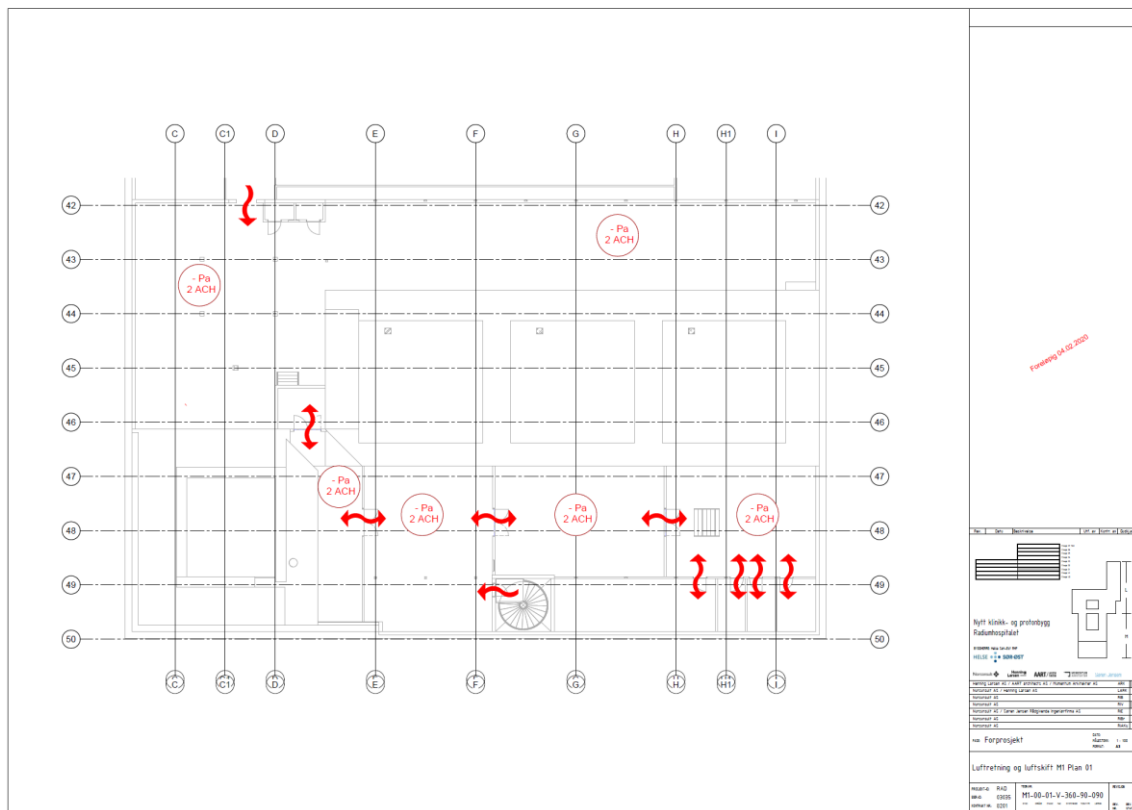
Kontrollerte områder med mulighet for radioaktivitet prosjekteres med et undertrykk sammenlignet med korridoren utenfor for å hindre at aktivert luft skal kunne spre seg til ikke-kontrollerte områder. Det legges opp til et trykkhierarki internt i de kontrollerte områdene hvor behandlingsrommet har høyest trykk, og så med gradvis lavere trykk inn mot strålingskildene i syklotronen og stråletransportlinjen. Det fokuseres kun på luftretning og defineres ingen spesifikke trykknivåer. En oversikt vises i Tabell 8.

Tabell 8: Oversikt over rom med tilhørende luftmengde, luftskift, klassifisert sone og grad av romtrykk

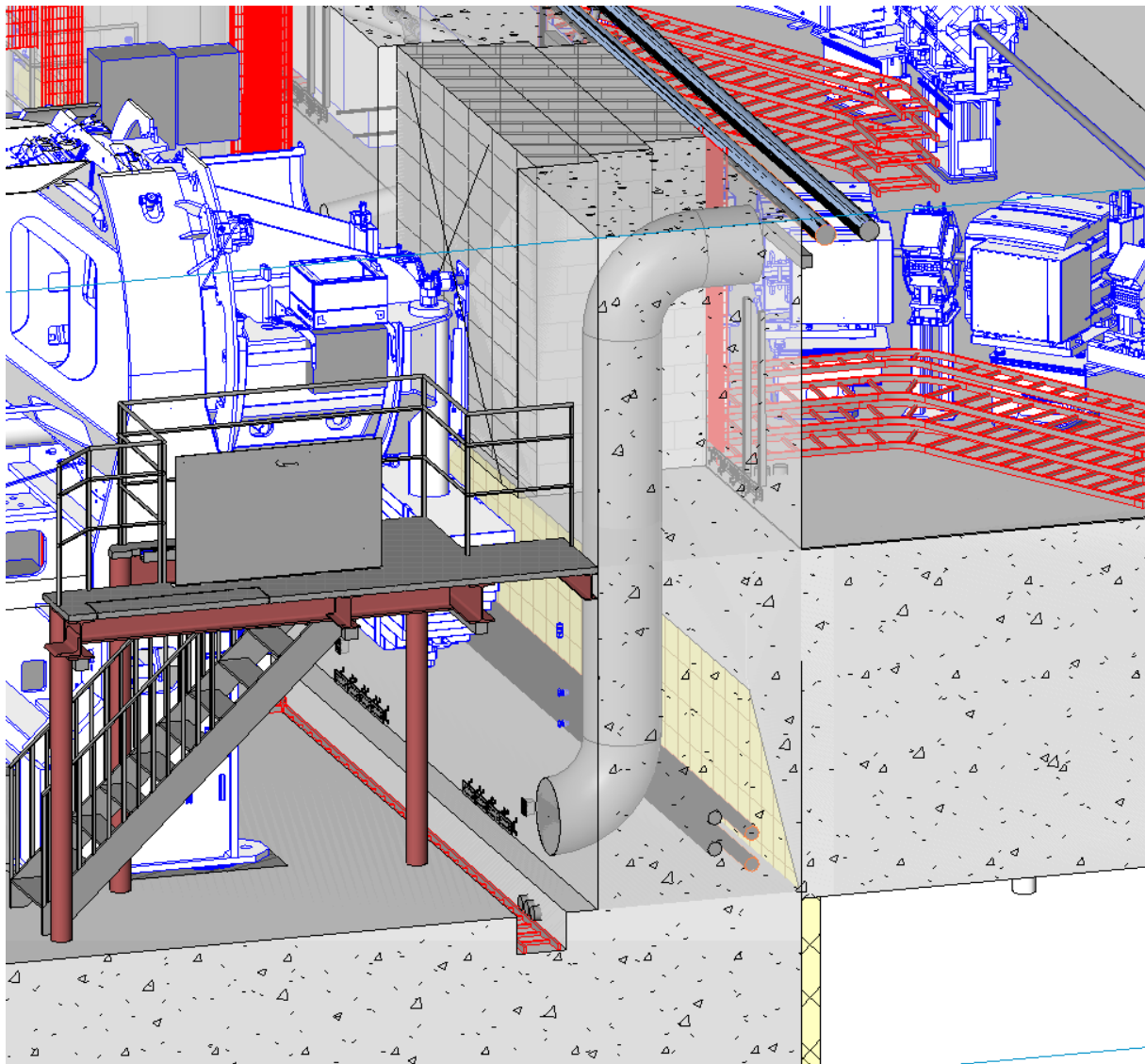
Romnavn	Luftmengde m <sup>3</sup> /t / m <sup>2</sup>	Luftskift i timen (ACH) 1/t	Sone	Trykk [Pa]
Maze behandlingsrom 1, 2 og 3	8		Overvåket/ Kontrollert	-
Gantry, behandlingsrom 1, 2 og 3	18		Overvåket /Kontrollert	-
Gantry rom 1, 2 og 3		4	Kontrollert	--
Maze for syklotron, syklotron og energivelger		4	Kontrollert	---
Stråletransportsystem		Kun overstrømning fra gantry	Kontrollert	---



Figur 58: Luftretning og luftskift bygg M1 plan U1



For å begrense kanalføringer inne i bunker-delen, og etablering av trykkhierarkiet, planlegges det stor grad av overstrømning mellom rommene med ett felles avtrekk i enden av stråletransportlinjen og ett i syklotronområdet.



Figur 60: Overstrømmning av luft fra gantry til stråletransportsystemet

Plassering av avkast med potensielt aktivert luft er vurdert med CFD-analyse for å verifisere at det ikke utgjør noen fare for mennesker eller miljø. Avtrekksvifte er tenkt plassert direkte over enden av stråletransportlinjen i plan 01.

Fra over syklotronen skal det etableres quench-tube for helium som holder en temperatur på  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Utløpspunktet fra quench-tuben må være fysisk avgrenset i en radius på 3 m, og 6 m vertikalt. Eventuelle vinduer innenfor dette avgrensede volumet må permanent avlåst og lukket. Illustrasjon av avkast ventilasjon og quench-rør vises i Figur 61.





Figur 61: Avkast quenchrør og avkast proton illustrert i Revit

Ventilasjonssystemet for de kontrollerte områdene utstyres med væskebasert varmegjenvinner for å unngå krysskontaminering av luften. Det stilles i utgangspunktet ingen spesifikke krav til filtrering av tilluften, men ettersom nøytronstrålingen fra protonutstyret vil kunne aktivere partikler i luften legges det opp til en sluttfiltrering med finfilter F9 (ISO ePM1 75 %).

Ventilasjonskanalene som skal føres gjennom tykke betongvegger og -dekker utføres på en slik måte at man ivaretar stråleskjermingen på en tilfredsstillende måte, typisk med minimum 2 bend inne i betongen.

Innenfor de kontrollerte områdene i protonbunkeren så kan arealene grovt deles i to grupper. Én gruppe med arealer som må ventileres av hensyn til personene som skal oppholde seg der, og én gruppe med arealer hvor det primært er utstyrsleverandøren som er premissgiver.

Hovedutfordringen for utstyret er temperatursensitiviteten, hvor den termiske utvidelsen/sammentrekningen av utstyret blir kritisk allerede ved et par graders variasjon i romtemperatur. I dialog med utstyrsleverandøren ble det tidlig anbefalt å benytte ca. 3-6 luftskifte i timen for de tekniske arealene med protonutstyr. Prosjekteringsgruppen har lagt seg i det nedre sjiktet som ble anbefalt av utstyrsleverandøren, og benyttet ca. 3-4 luftskift i timen som et utgangspunkt for designet.

Av arealene uten varig personopphold er det kun syklotronrommet og de tekniske gantryrommene som har en direkte friskluftstilførsel. I syklotronrommet er det ikke ønskelig å plassere teknisk utstyr lokalt i rommet ettersom det er et område med svært høy stråleaktivitet, slik at kjølebehovet og temperaturkravene i praksis må ivaretas ved hjelp av friskluftstilførsel. I de tekniske gantryrommene benyttes det en del lokal romkjøling, men det



alene er ikke tilstrekkelig for å ivareta temperaturkravene, så det er også lagt inn en grunnfriskluftstilførsel tilsvarende i underkant av 4 luftskift i timen for disse rommene.

Spredning av luftavkast i nærmiljø er analysert ved hjelp av CFD-simuleringer, se kapittel 8.3. Ettersom at utslippet i pipeutløpet er svært lavt ( $7 \mu\text{Sv}$ ) så er spredningen av aktivert luft tilsvarende tilnærmet ubetydelig. Rapporten fra utstyrsleverandør anbefaler god praksis ved å ha 3 m høy pipe over tak. Med tanke på den lave aktiveringen av utkast luft og CFD-simuleringen for dette prosjektet, som omtales i kapittel 8.3, anses det ikke nødvendig med slik høyde på pipen. Praksisen det henvises til er for øvrig utarbeidet for produksjon av (radioaktive) legemidler, noe som ikke er tilfelle for denne syklotronen. På bakgrunn av dette er det vurdert at 1 m pipe er tilstrekkelig for prosjektet i Oslo, noe som understøttes av CFD-simulering og luftaktiveringskonsentrasjon. Det har også vært vurdert om innstallering av kullfilter/hepafilter ved utslippspunkt kan redusere eventuell radioaktivitet i luftavkast. Sett i lys av CFD-simuleringene og utstyrsleverandørs beregninger av utslippsluften, er ikke montering av filtre hensiktsmessig. Dette fordi det som slippes ut tilsvarer nivå for bakgrunnsstråling og filtrenes evne til å redusere denne radioaktiviteten ytterligere er svært liten. Det samme gjelder målesystemer for radioaktivitet ved luftavkastet. Dette understøttes av målinger gjort ved DCPT beskrevet i kapittelet under. Når anlegget er i drift vil det bli gjort kontrollmålinger av luftavkastet. Eventuelle nødvendige tiltak vil da blir vurdert, hvis dette viser seg å være nødvendig.

## 8.5 Målinger fra DCPT

Under stresstest av syklotron ved DCPT i januar [6] ble det også målt aktiveringsnivå i pipeløp for syklotronen. En NaI(Tl)-scintillatordetektor ble plassert på toppen av pipeutløpet. Resultatene viste så lave strålingsnivåer ut fra pipen (størrelsesorden  $0.05 \mu\text{Sv/t}$ ) at det er vanskelig å skille disse fra den naturlige bakgrunnsstrålingen. Siden syklotronen ved DCPT er tilnærmet lik de som prosjektene i Norge får, bortsett fra at DCPT's syklotron har litt høyere maksenergi er disse målingene mulig å benytte for våre prosjekter, se for øvrig Kapittel 3.2.1 for ytterligere informasjon.

## 9 Bygningsmessig utførelse

Selve bygget som huser protonanlegget, M1 utformes som en betongbunker med massive plasstøpte betongkonstruksjoner med betongtykkelser opp til 3,5 m. Beskrivelse av utførelse av betongarbeider, gjennomføringer og armering samt materialsammensetninger er utførlig beskrevet i rapport «*RAD-8201-B-NO-3002 Protonbunker, betongarbeider*» [9] vedlagt. Rapporten er utarbeidet av prosjekteringsgruppen.

På grunn av stråleskjermingskrav har den bygningsdelen som rommer selve protonanlegget betongdimensjoner som er langt større en statisk nødvendig. M1 fundamenteres ved hjelp av stålkjernepeler ned til fast berg og har dermed en robust fundamenteringsløsning som har begrenset deformasjoner, hvilket er et krav fra leverandør. Det er prosjektert en fuge mot klinikkbygget(M2), slik at protonbygget ikke påvirkes av bevegelser av nabobygg.

I forbindelse med innlasting av stort og tungt utstyr, vil enkelte av veggene etableres med mindre byggelement for enklere montering/demontering. Disse elementene utføres i samme materiale som de plasstøpte veggene og samme krav til stråleskjerming gjelder for disse.

Over de tre gantry og syklotronrom er takdekket delvis demonterbart, slik at det er mulig å heise ut og inn tungt utstyr også i fremtiden.

Utstysleverandør har beskrevet toleranser som må følges mht. plaststøpte konstruksjoner, posisjon av utstyr og innstøpingsgods. Dette vil bli vist på tegninger og i beskrivelse og vil bli utført og kontrollert meget nøyaktig da eventuelle avvik kan få negative konsekvenser for overføring av stråle eller funksjonaliteten til protonterapiet.

## 9.1 Krav til betong

Følgende krav stilles til betongen i protonbunkeren:

- Densiteten skal være minimum 2350 kg/m<sup>3</sup>
- Vanninnholdet i betongen skal være 3-5 % av betongvekten. Det vil si summen av kjemisk bundet vann og vann i gelporer ved en hydratasjonsgrad på 75 %
- Betongen skal være rissfri. Alle vannførende riss uansett størrelse og alle riss >0,35 mm skal injiseres. Med hensyn til stråling så har ikke mindre riss noen konsekvens
- Varmeutviklingen i betongen og fersk betongtemperatur skal være så lav som mulig for å redusere opprissing på grunn av fastholdingeffekter og termisk og autogen dilatasjon. Det skal gjøres temperatur- og spenningsberegninger for å ha kontroll på betongens opprissing

## 9.2 Forhåndsdokumentasjon

Før oppstart av betongarbeidene skal leverandør gi en forhåndsdokumentasjon for de betongoppskriftene som planlegges brukt for protonbunkeren. Dette er viktig særlig med tanke på innhold av ulike grunnstoffer i betongen, da grunnstoffer aktiveres på ulik måte.

Resultatene fra forhåndsprøvingen skal fremlegges 1 mnd. Før oppstart av betongarbeidene. Før oppstart av betongarbeidene skal betongreseptene som planlegges brukt for protonbunkeren beskrives og det skal utføres forhåndsprøving (prøvestøp) av materialene.

## 9.3 Prøvetagning underveis i betongarbeidene

Prøvetaking av betongen skal gjennomføres i henhold til NS-EN 13670:2009 + NA:2010 utførelsesklasse 3 med følgende tilleggskrav:

- Terningene tatt for identitetsprøving skal kontrolleres for densitet i henhold til SVV håndbok R210 Laboratorieundersøkelser metode 422 ved avforming
- Betongens herdetemperatur skal logges i minst 3 døgn, eller til betongens maksimaltemperatur er oppnådd, og lagres for hver 0,5 timer i følgende punkter hvis ikke annet avtales med byggherren
  1. Luft
  2. Massesenter av konstruksjonen
  3. Ved overflaten nærmest massesenter av konstruksjonen
  4. Midt mellom punkt 2 og 3
- Det skal tas stikkprøver av betongens densitet med uttak av kjerneprøver i kritiske konstruksjoner

## 9.4 Krav til gjennomføring av støpeprosessen

Under gjennomføringen er det meget viktig med tette porefrie overflater. Fersk betongtemperatur skal holdes så lav som praktisk mulig. Dette kan innebære overrisling av grovt tilslag. Betongen skal vibreres godt slik at støpereir unngås. Alternativt kan veggene støpes med selvkomprimerende betong. Det skal gjennomføres en prøvestøp av alle betongresepter (med spesielt fokus på marmorbetong) hvor det prøves både for godkjenning av overflater og utstøpning.

## 9.5 Krav til armering

Armering består tradisjonelt av stoffer som blir aktivert av radioaktiv stråling. Det er derfor gjort vurderinger av nødvendig mengde minimumsarmering i de massive konstruksjonsdeler som vegger, skiver og dekker. Det er hentet informasjon fra norsk og tysk regelverk samt erfaringstall fra norske damkonstruksjoner.

Vegger og etasjeskillere er støpt i betong med tykkelser fra 1,0 m og helt opp til 3,5 m. Tykkelsene er valgt for at betongkonstruksjonene skal utgjøre en effektiv barriere mot radioaktive partikler. Riss i betongen har ikke noen konsekvens for konstruksjonens strålingsbeskyttelse, men bør uansett begrenses. Dette gjøres ved bruk av armering ut mot betongoverflatene. Armering må imidlertid ikke være gjennomgående gjennom tverrsnittstykkelsen. Armeringen vil da kunne fungere som en ledning for partikkeltransport gjennom tykkelsen, en ledningsvei som medfører en langt raskere partikkeltransport gjennom tverrsnittet enn gjennom selve betongen.

For massive tverrsnitt, der tykkelsen er langt større enn statisk nødvendig, må mengden av minimumsarmeringen i betongoverflatene derfor velges ut fra andre kriterier enn slik kravet kommer frem i prosjekteringsstandard for betong, NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2018.

Tidligere norsk betongstandard NS 3473:2003 inkluderer forslag til minimumsarmering for massive fundamenter med tykkelser større enn statisk nødvendig.

Endelig armeringsmengde skal vurderes ut fra erfaring fra andre prosjekt med tilsvarende massive tverrsnitts tykkelser. Mengden og plassering av armering skal tilpasses ytterligere, basert på valg av betongresept inklusive tilsiktet betongfasthet, vurdering av temperaturutvikling inklusive spesifisering av herdetiltak etc.

I områder med eventuelt marmorbetong vil det gjelde spesielle krav mht. armeringen. Plassering av armering og evt. Bruk av glassfiberarmering vil defineres i den videre prosess.

## 9.6 Staggjennomføring for forskaling

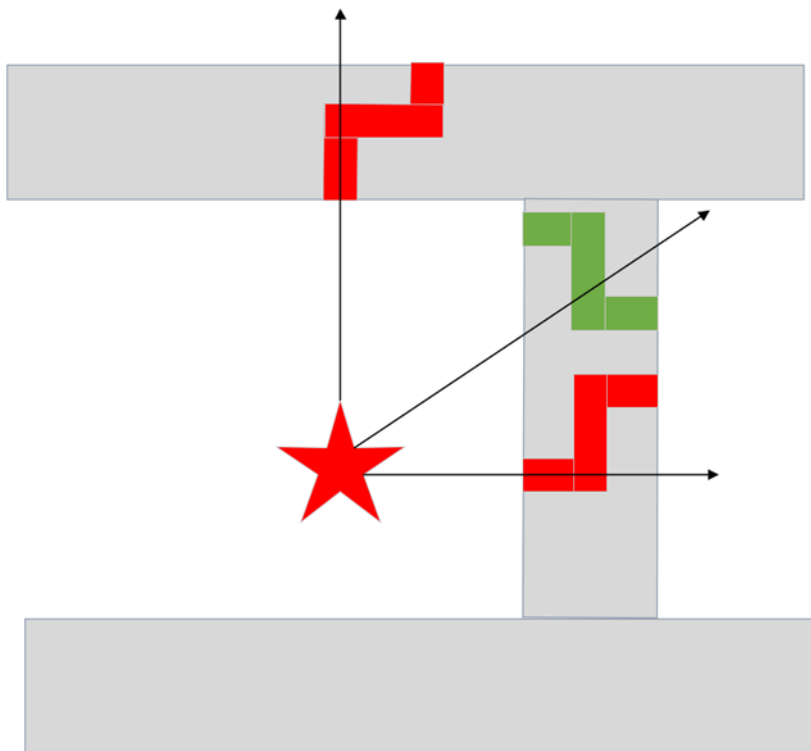
Det skal benyttes vanntett løsning for staggjennomføring for betong under terrengnivå. Vanntette vegger skal plugges på utside med skrubar endepropp. Ingen metallisk tetting på innside vegger. Midt i vegger skal stag skjøtes med vannsperre. Stag fjernes fra konstruksjon slik at avstandsrør i plast står igjen. Avstandsrør fylles med sementbasert gysemasse med densitet minimum 2200 kg/m<sup>3</sup>. Stag i en vinkel som er mindre enn +/- 2 grader fra strålingskilder skal ikke forekomme. Områder uten staghull markeres på tegning. Staghull på innside av vegger skal plugges med plastpropper.

## 9.7 Kanaler, rør og trekkerør i betong

Det skal støpes inn en del rør og kanaler i betongen i varierende dimensjon og omfang. Systemene som skal ha innstøpte rør er spillvann, forsyning av sprinkler, tekniske gasser, kjølerør og ventilasjonskanaler. Ventilasjonskanalene vil ha de største dimensjonene med dimensjoner opp mot  $\varnothing 630$  mm, men den største andelen av rørene vil være i størrelsen DN 100 til DN 200. Det er generelt tenkt å benytte syrefaste stålrør.

Generelt skal alle rør og kanaler monteres slik at stråleskjermingen i bunkeren svekkes så lite som mulig. Det innebærer at alle gjennomføringer må monteres med minimum 2 bend og ikke peke direkte mot strålekildene som er plassert 1.25 m over gulvet.

Sett fra strålekildens sted vil den mest effektive skjermingen typisk oppnås ved at gjennomføringen starter i retning fra strålekilden, men uten å peke direkte på strålekilden, for å så slå seg nærmere strålekilden. Se eksempel i Figur 62 hvor grønn gjennomføring maksimerer den effektive skjermingen.



Figur 62: Figur viser gjennomføringer i betong med hensyn til effektiv skjerming, hvor grønn gjennomføring maksimerer den effektive skjermingen

Trekkerør for kabler vil være av varierende dimensjoner og lengder. De vil gå mellom alle rom og er av et særdeles omfattende omfang. Kabelanlegget vil bestå av kommunikasjonskabler, kabler til elektroteknisk forsyning og jordingsanlegg, både for den generelle elektrotekniske installasjonen samt protonleverandørens installasjoner.

Trekkerørene legges på en slik måte at strømføringsevne til forsyningskabler opprettholdes og avstandskrav til kommunikasjonskabler overholdes.

Rørene skal modelleres vinkelrett 90 grader ut fra vegg, gulv eller tak. I tillegg skal rørene ikke endre retning, eller påbegynne bøyning, før 150 mm inn i vegg av den ordinære betongen grunnet armeringssystemet. Dersom rørgjennomføringen skal passere marmorbetong, som ligger som ekstra lag til den ordinære betongen, forlenges rørene vinkelrett ut fra den ordinære betongen.

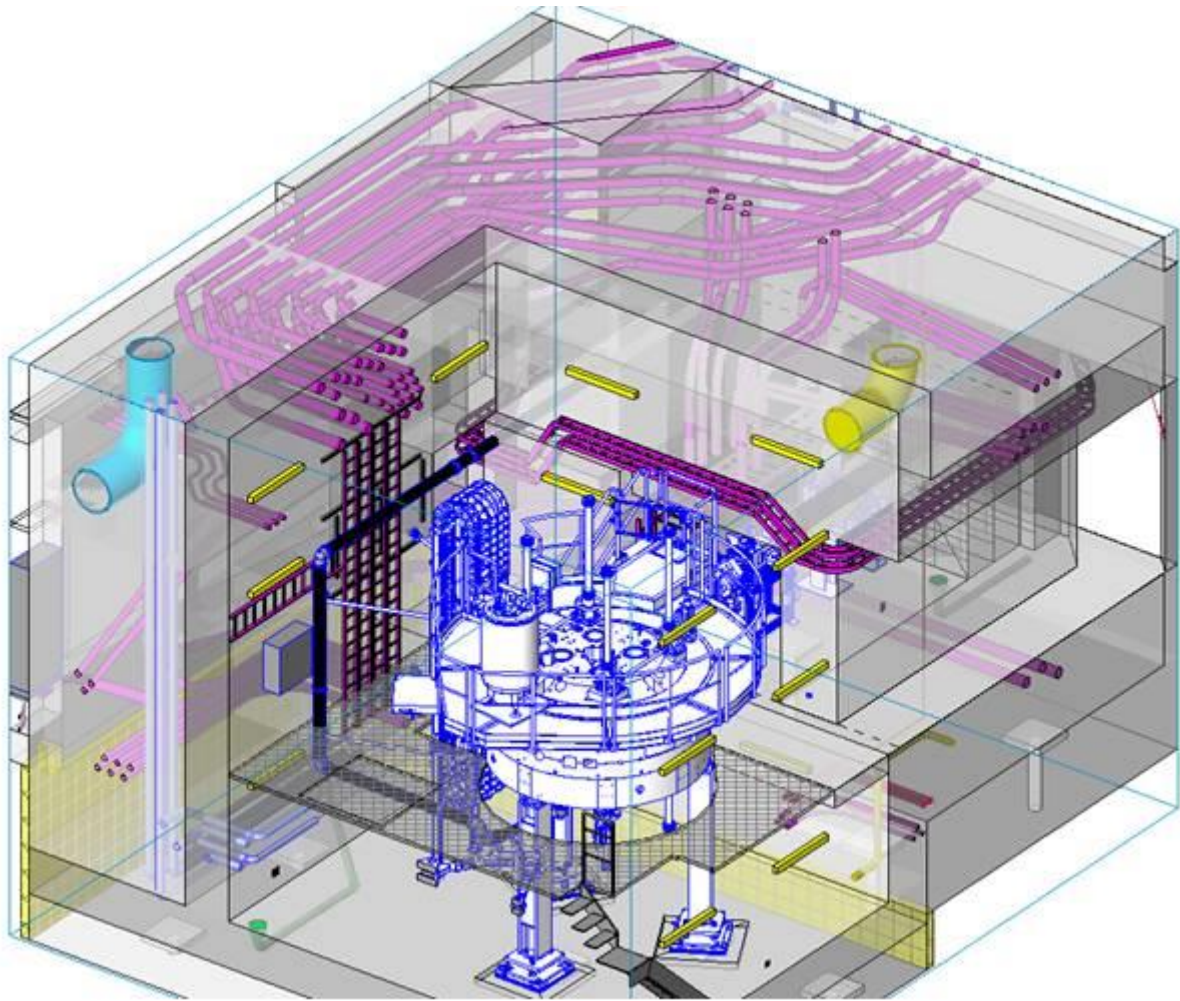
I veggene inn til gantry skal det etableres utsparinger for innmåling og justering av posisjon av gantry i tilfelle ved deformasjoner i bygget. Disse er navngitt «Alignment tubes». Plassering og toleranser for dette vil bli vist på tegninger.

Videre skal det før overflater gjøres ferdig, monteres et høy-presisjons inn-målingssystem.

### **9.7.1 Prosjekterte løsninger**

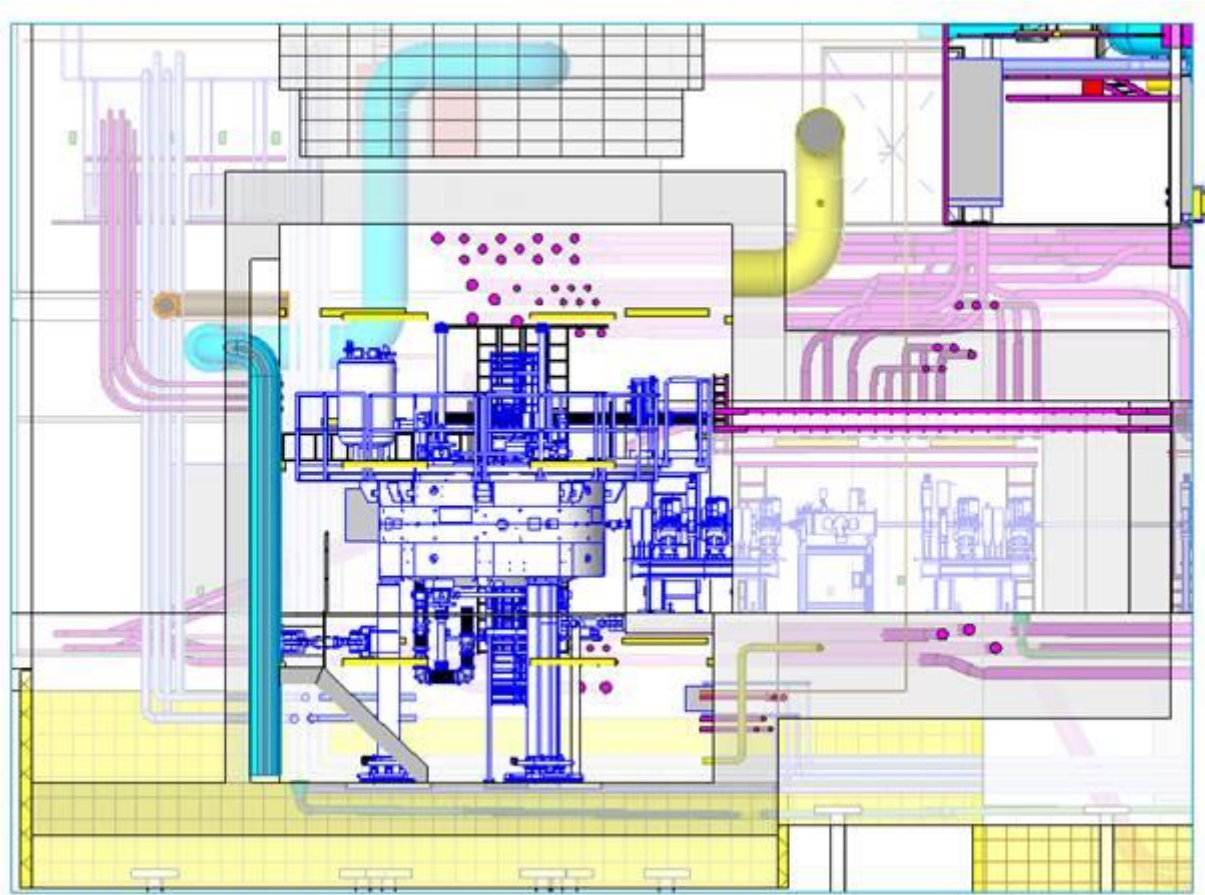
Det er prosjektert med løsninger for gjennomføringer som ivaretar prinsipper for stråleskjerming. Alle gjennomføringer av en viss størrelse har bøyninger tilsvarende anbefalingene angitt over, og er plassert utenfor de mest stråleintense områdene. Dette vil si enten høyt oppe ved taket eller nede ved gulv. Dette vises i skissene under. Ved leveranse av Designdokument V2.0 er de fleste gjennomføringer implementert i modellen. Før Designdokument V3.0 vil det bli avholdt en workshop med DSA hvor modellen vises og gjennomgås av prosjekteringsgruppen. Dette ble gjennomført 16.04.20.

Figur 63, Figur 64 og Figur 65 viser utsnitt fra Revit 3-D modell rundt syklotron og stråleoverføringslinjer med ulike gjennomføringer.

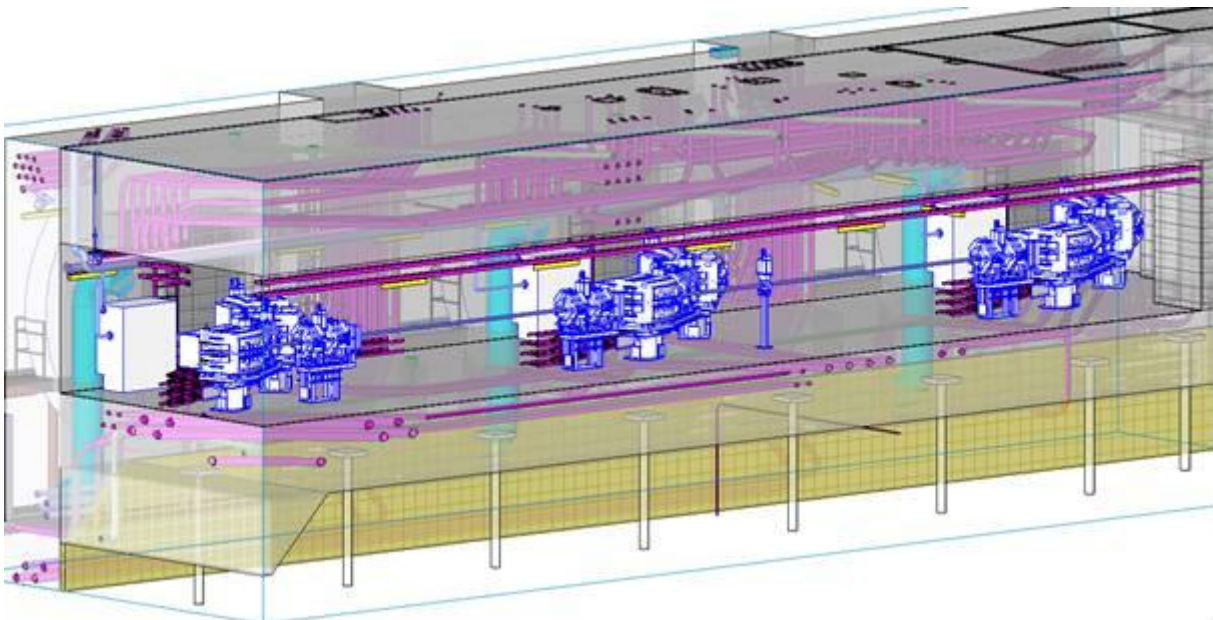


Figur 63: Utsnitt fra Revit modell med diverse gjennomføringer rundt syklotron





Figur 64: Utsnitt fra Revit modell som viser syklotronområdet sett fra siden



Figur 65: Utsnitt fra Revit modell som viser diverse gjennomføringer sett fra Stråleoverføringslinjen, BTS

## 9.8 Aktivering av betong

Det pågår et arbeid med å kartlegge hvor aktivert betong og armeringsjern i de stråleintense områdene av bygget vil bli.

I dette arbeidet vil de radioaktive isotopene i betongen og armeringsjernet identifiseres og tallfestes, med tanke på grad av aktivering (mengde), type radioaktive isotoper som dannes (halveringstid) og isotopenes henfallsmekanismer (energiutsendelse).

Dette blir vurdert i forhold til;

- 1) Identifisering av strålingsbidraget fra de aktiverte deler av bygget med hensyn til skjerming i anlegget ved operasjon og service
- 2) Optimalisering av bygget med tanke på minimering av strålingsindusert aktivering
- 3) Anvendelse av betong med lavt innhold av grunnstoffer som gir opphav til langlivede radioaktive isotoper og/eller radioaktive isotoper med spesielt energirike henfall
- 4) Tillatte grenseverdier for hver enkelt radioaktiv isotop ved håndtering av det strålingsinduserte materialet. Samsvar med grenseverdier er avgjørende for hvordan anlegget skal dekommisjoneres

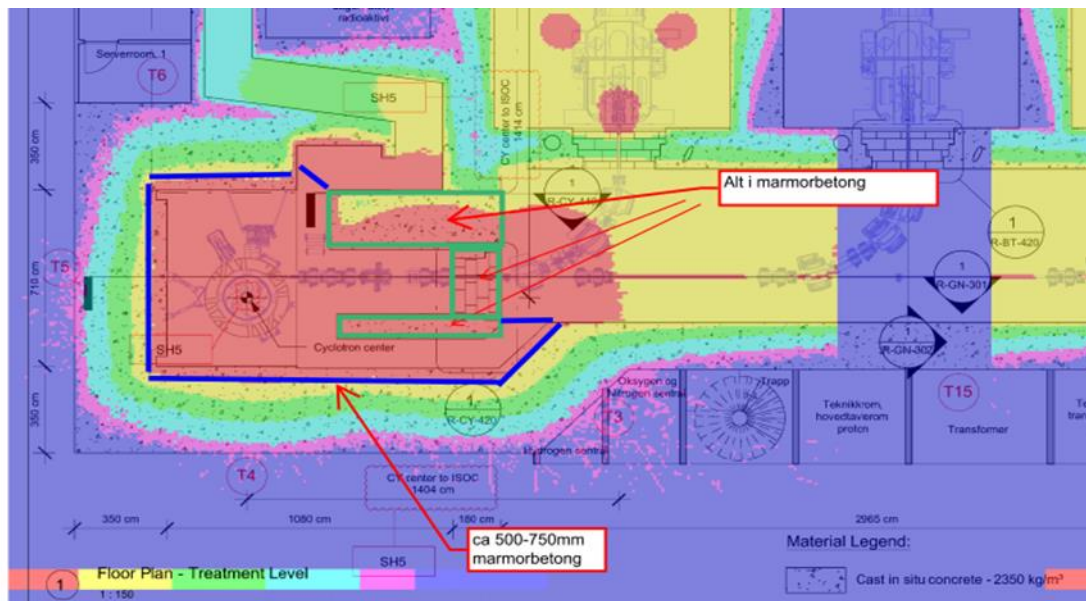
Årlig produksjon av nøytroner i anlegget beregnes ved hjelp av estimert antall behandlede pasienter ved full drift i alle rom, grad av forskningsaktivitet, samt tider for service, vedlikehold og kvalitetskontroll.

Nøytronfeltet, med kjent energifordeling og intensitet, vil bli brukt i en simulering der nøytronene transporteres fra strålekildene (syklotron, degrader, bøymagneter og energiutvelgelsessystem) frem til og gjennom betong med armeringsjern.

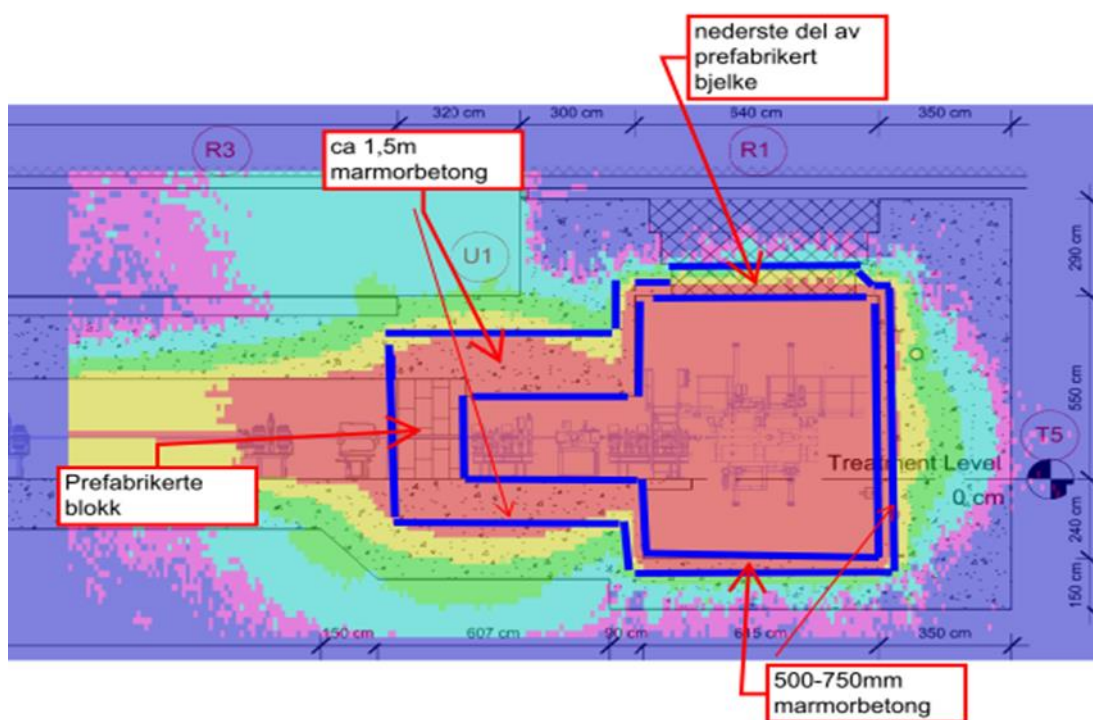
Basert på kjennskap til nøytronfeltets intensitet og energifordeling med tilhørende sannsynlighetsfordeling (tverrsnitt) for produksjon av radioaktive isotoper, vil samlet produksjon av strålingsinduserte radioaktive isotoper bli kartlagt. Dette vurderes så opp mot punkt 1) til 4).

### 9.8.1 Dekommisjonering av anlegget

En tilsetning av marmor i betongen vil begrense hvor aktivert denne blir, og ergo minske mengde av radioaktiv betong som må dekommisjoneres. Det planlegges derfor bruk av marmorbetong ved syklotron og BSS. Tykkelsen av dette sjiktet er under detaljering og er per nå vurdert slik vist i Figur 66 og Figur 67, under:



Figur 66: Plantegning som viser behov av marmorbetong ved syklotron og stråletransportsystemet



Figur 67: Snittegning som viser behov av marmorbetong ved syklotron og stråletransportsystemet

Ved protonanleggets «end of life», vil som nevnt over noe av bygningsmassen i bygg M1 være klassifisert som radioaktivt avfall. Dette vil i hovedsak dreie seg om betong, armeringsjern og metall benyttet i de mest stråleutsatte områdene (rundt syklotron, energiseleksjonssystemet og degrader). Det må derfor lages en detaljert plan inkludert tentative kostnadsvurderinger for avhending/dekommisjonering av bygningsmassen. En slik dekommissjoneringsplan består typisk av:

- En strategi for avhending som sykehuset/eier må forplikte seg til
- Et estimat på type avfall og mengde ved tidspunktet for dekommisjonering
- Kostnadsestimat

Det vil være et viktig grep å produsere så lite aktivert byggemateriale som mulig, dette er i vårt prosjekt gjort ved å unngå å benytte materialer som inneholder grunnstoff som gir langlevende datternuklider nærmest protonstrålen (særlig Eu, Co og Fe). Sammensetning av betongen er viktig, det bli tilsatt marmor i betongen som inneholder svært lite av grunnstoffene som skal unngås. Armering i betongen føres så langt ut fra veggoverflatene som mulig med tanke på aktivering av metallet og senere dekommisjonering av dette. Ved endt levetid for anlegget, som er vurdert til 50 år, vil man derfor kunne avhende det meste av byggemateriale som vanlig byggavfall. Det arbeides videre med en strategi der bygget vil stå ett år etter beam off, før videre avhending og riving.

En plan for dekommisjonering skal utarbeides i løpet av prosjektperioden.

## 9.9 Videre prosess og gjenstående avklaringer

Det er noe punkter/områder som ikke er helt avklart og der det utover våren 2020 skal arbeides med at finne den optimale løsningen med tanke på omfanget av avfall som må håndteres som spesialavfall ved dekommisjonering. Dette gjelder blant annet:

- Krav til betongen i ESS og syklotron med tanke på tilslag. Eventuell bruk av marmorbetong og hvor skal dette i så fall benyttes og med hvilken tykkelse. Det pågår en prosess der det innhentes informasjon om betongresepter fra forskjellige betong leverandører som kan være aktuelle for prosjektet. Samtidig vil det gjøres en beregning av grenseverdier av betongens tilslag i tråd med norske krav. Dette vil gi en bedre forutsetning for at kunne vurdere behovet av marmortilslag i betongen og tykkelsen på marmorbetongsjiktet.
- Krav til plassering av armering ved stråletransportsystemet og syklotron. Det kan være hensiktsmessig å flytte inn armeringen i betongen på noen steder for at begrense aktiveringen av armeringen. Det vil også vurderes å begrense mengde armering.
- Detaljerte arbeidstegninger utarbeides med alle rørgjennomføringer og innstøpningsgods i betongen.
- Krav til plassering av forskalingshull i betongen mht. stråling. Det vil bli utarbeidet en tegning som viser sikker plassering av forskalingsstagene.

## 10 Andre installasjoner

### 10.1 Sikkerhetssystemer som hindrer utilsiktet stråling

Flere sikkerhetssystemer skal hindre at personell utsettes for utilsiktet stråling, samt overvåke områdene. Alle sikkerhetssystemer vil bli forsynt med avbruddsfri strømforsyning, og vil dermed fungere uavhengig av tilgjengeligheten til den ordinære strømforsyningen.

#### 10.1.1 Adgangskontroll

Hovedoppgaven til adgangskontrollfunksjonen er å forsikre kontroll av riktig personell inn til strålingsutsatte rom i protosenter.



For protonsenderet vil de kontrollerte områdene favne behandlingsrommenes inngangssone (maze), hvert behandlingsrom med tilhørende tekniske bakre del (gantry), BSS, ESS og syklotron med tilhørende maze.

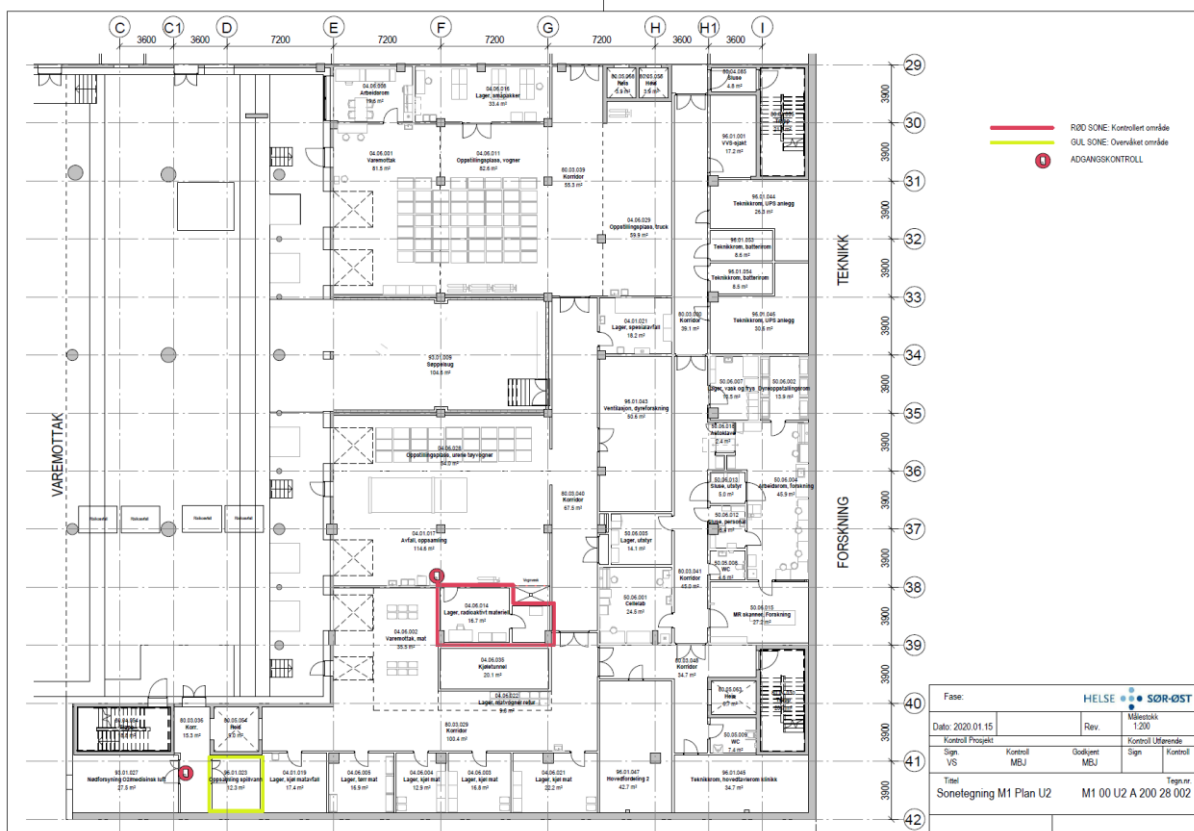
For å imøtekomme sikker prosedyre, eksempelvis servicearbeid, er strålingsutsatte rom inndelt i seksjoner. En slik seksjon kan endre status fra et «usikret» til et «sikkert» område og vice versa seksjon for seksjon etter behov. Seksjonene er separert med fysiske låste dører med adgangskontroll.

Ingen personer har adgang til å være i en «sikkert»-seksjon, slik som service- eller strålebehandlingsrom, hvis en stråle er klar til å bli slått på. Etter at strålen er slått av er det kun kvalifisert personell som kan avgjøre om det er trygt å gå inn i disse seksjonene.

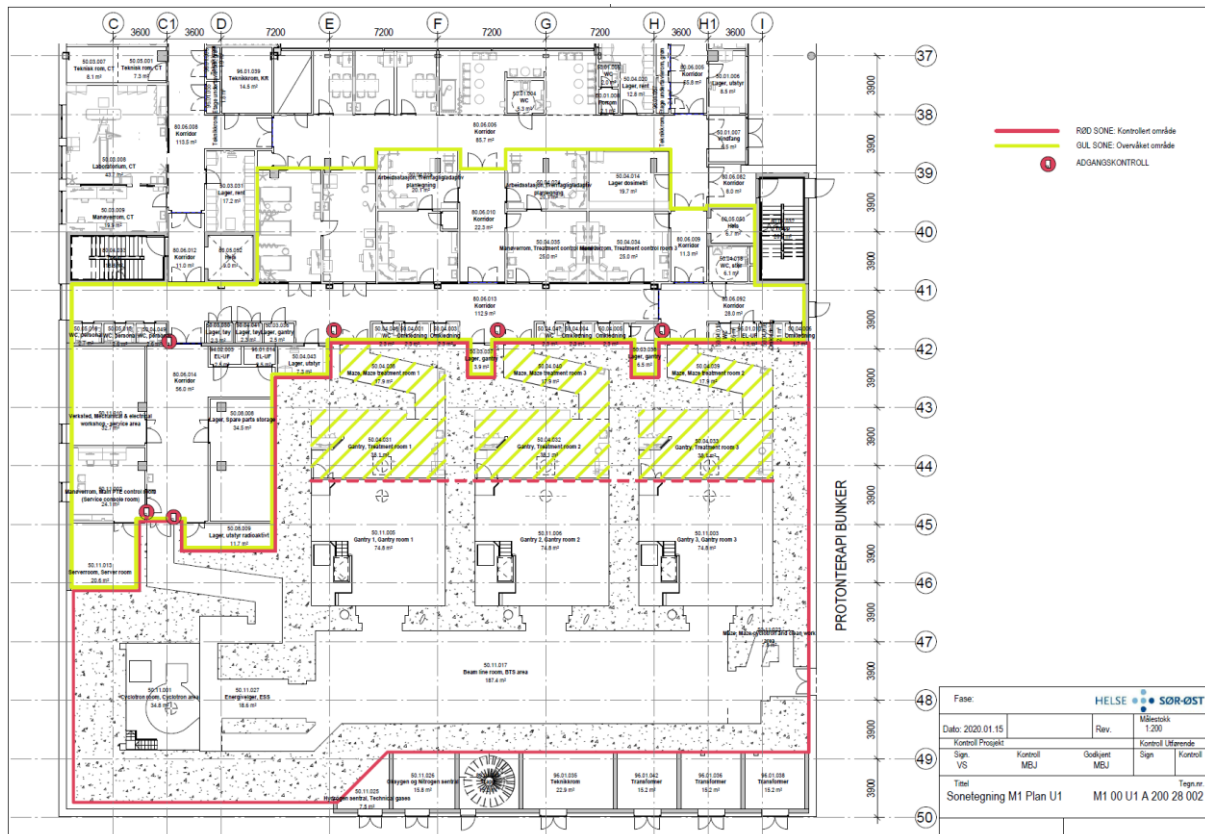
De ansatte som betjener og utfører service på protonanlegget er underlagt strenge prosedyrer og krav til opplæring, og skal bli autorisert av strålevernskoordinator. Det skal utarbeides sikker adgangsinstruks som beskriver hvordan man sikrer, melder, opptre og inntre inn til og i disse seksjonene. Arbeid vil kun bli gjennomført etter avtale med strålevernskoordinator i sykehuset.

De ovennevnte seksjonene vil bli utstyrt med adgangskontrollerte dører med kodetablå og kortleser.

Figurer under viser omfang og plassering av adgangskontroll med kodetablå og kortleser i protonsenderet.

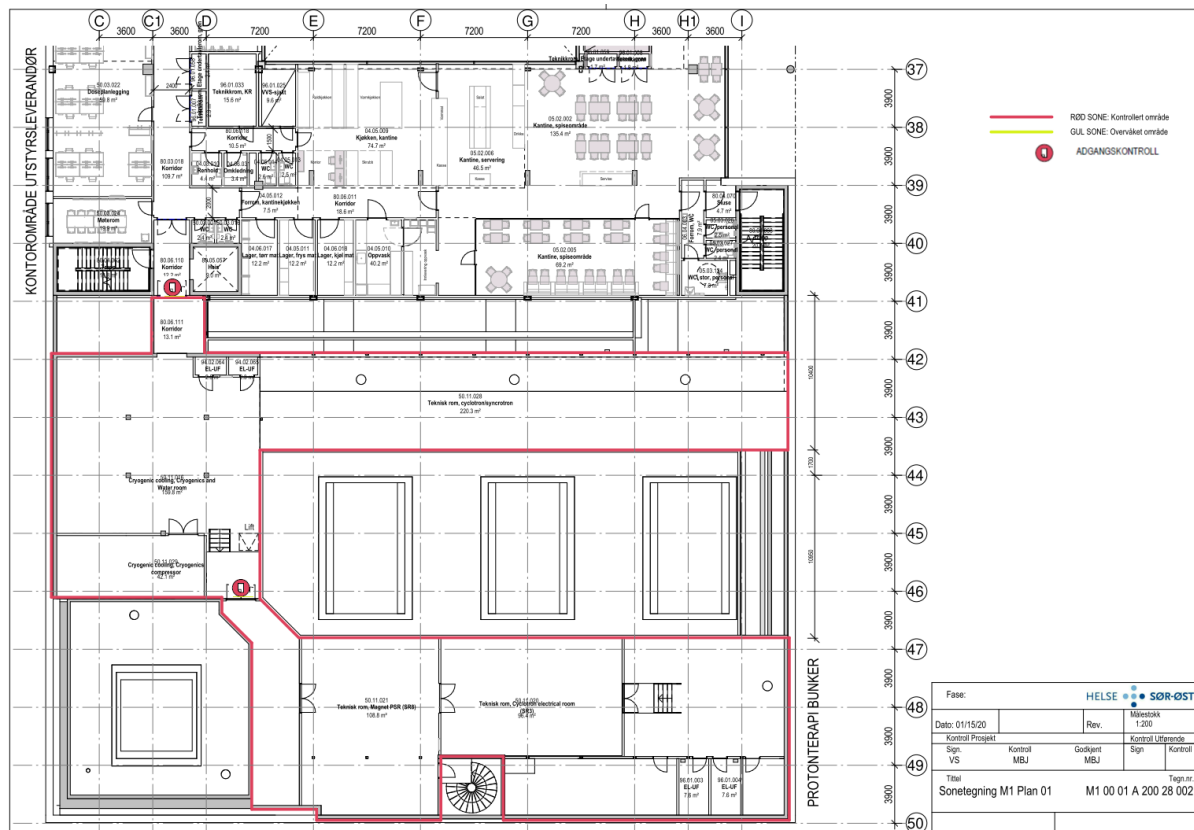


Figur 68: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan U1 som viser plassering av adgangskontroll med kodetablå og kortleser



Figur 69: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan U1 som viser plassering av adgangskontroll med kodetablå og kortleser





Figur 70: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan 01 som viser plassering av adgangskontroll med kodetabå og kortleser

## 10.1.2 Protonanleggets interne sikkerhetssystem

Selve protonanlegget har innebygget sikkerhetsfunksjoner som sørger for overvåkning, logging og monitorering av anleggets statusforhold, og overholder gjeldende krav til bevegelige deler, elkraft med mere.

Systemet vil gi alarm dersom potensiell uønsket hendelse inntreffer innen maskinbevegelse, strålegenerering, stråleparametere, elektroforsyning, datakommunikasjon, utilsiktet adgang, pasientposisjonering, og så videre.

Systemet holder oversikt over mange mekaniske, elektriske og programmessige forhold som må være innenfor toleransegrensene for at strålebehandling skal gjennomføres. Dersom noen av parameterne er utenfor akseptert toleransegrense vil systemet gå i en sikkerhetsmodus ved blant annet å slå av strålen.

Systemet består blant annet av:

- Redundant feilsikker programmerbar logisk kontroll
- Statusmonitorering av stråletransport og syklotron
- Kontroll av stråleutkobler – «Stråle av»-knapp
- Dørforrigling inn til stråleutsatte områder
- Akustisk og optisk advarselsindikatorer
- Gassalarmanlegg
- Bekreftelsesbrytersystem - «Sistemann ut knapp»
- Nødstoppbrytere

Samlet vil dette hindre personell å gå inn rom/områder samt at overføring av stråle ikke kan forekomme før systemet er sikret og pasienten er korrekt plassert.

Det henvises til vedlagte tegninger som viser omfang og plassering av protonanleggets interne sikkerhetssystem i protosenteret.

### Dørmonitorering og -forrigling

I sikkerhetssystemet vil man monitorere status på dører som innehar posisjonsbrytere. Dette inkluderer dører inn til behandlingsrommenes inngangssone (maze), hvert behandlingsrom med tilhørende tekniske bakre del (gantry), service-maze stråletransportsystem, og maze syklotron.

Denne funksjonen inkluderer:

- Dørmonitorering og logging
- Redundante dørposisjonsbrytere
- Akustisk og optisk advarselsindikatorer

Dersom en av de redundante dørkontaktene blir trigget vil systemet agere ved å:

- Bryte protonstrålen ved den redundante sikkerhetsaktuator i syklotronen
- Aktivere bevegelsesstopp i protonanleggets posisjonssystem
- Aktivere signallamper og sirener i korresponderende områder
- Indikere alarmbeskjeder i brukergrensesnittet

Eksempelvis; hvis en person åpner en dør inn til strålebehandlingsrommet under pågående strålebehandlingen vil sikkerhetssystemet gå i sikkerhetsmodus og koble ut strålen.

### «Sistemann ut knapp»

For å hindre at stråling slås på mens det er mennesker i de tekniske områdene vil et bekreftelsesbrytersystem «Sistemann-ut-knapp»-forriglingssystem installeres i protonterapisenteret. Dette systemer vil holde oversikt om det er personer inne i protonanlegget og forhindre at anlegget aktiverer systemet til strålebehandling om ikke bekreftelsesbrytersystem er kvittert ut.

### Akustisk og optisk advarselsindikatorer

Signallamper er hensiktsmessig plassert flere steder i protosenteret, i tillegg til at signallamper i tekniske områder er supplert med sirener.

Signallamper og sirener blir aktivert av protonanleggets personbeskyttelsessystem på bakgrunn av protonanleggets driftsstatus. Signallamper er formet som lystårn og har ulike farger basert på systemets status, som eksempelvis viser om rommet er sikret, usikret eller om strålen er på. Utenfor inngangen til maze for strålebehandlingsrom og syklotron er det eget belyst advarselsskilt som viser om strålen er «på» eller «av».

### Nødstoppbryter

Nødstoppbryter etableres i alle lokasjoner i protonanlegget med kort avstand mellom hver bryter. Dersom en nødstoppbryter betjenes, vil protonanleggets personbeskyttelsessystem gå

i sikkerhetsmodus. Dette ved å bryte protonstrålen og sende feilmelding til systemoperatør. En autorisert bruker må kvittere ut feilmeldingen for at protonanlegget skal gå tilbake til normal driftsmodus.

Når nødstrømbryter blir aktivert fra kontrollrommet stopper også all bevegelige deler i protonanlegget.

### Audiovideosystem

I strålebehandlingsrommet vil det bli montert eget audiovideo system med kamera, mikrofon og høyttalere himling for visuell og akustisk kommunikasjon med pasient.

Systemet vil bestå av totalt tre kamera. For visuell kontroll av klaringer og for å unngå kollisjoner rundt pasientbord vil det bli montert to domekameraer.



Figur 71: Eksempel på domekameraer

I tillegg vil det bli etablert eget kamera som vil fokusere kun på pasienten. Bildene fra disse kameraene vil bli vist i tilhørende manøverrom til strålebehandlingsrommet.

Høyttaler og mikrofon mellom strålebehandlingsrommet og tilhørende manøverrom, muliggjør toveiskommunikasjon mellom terapeut og pasient.

### «Stråle av»-knapp

I utstyrsleverandørens kontrollrom rett utenfor syklotronmaze, vil det være en «Stråle av»-knapp som kan benyttes dersom man har behov for å ta pause i behandlingen eller for å avbryte behandlingsprosessen.

### Bevegelsesdeteksjonssensorer

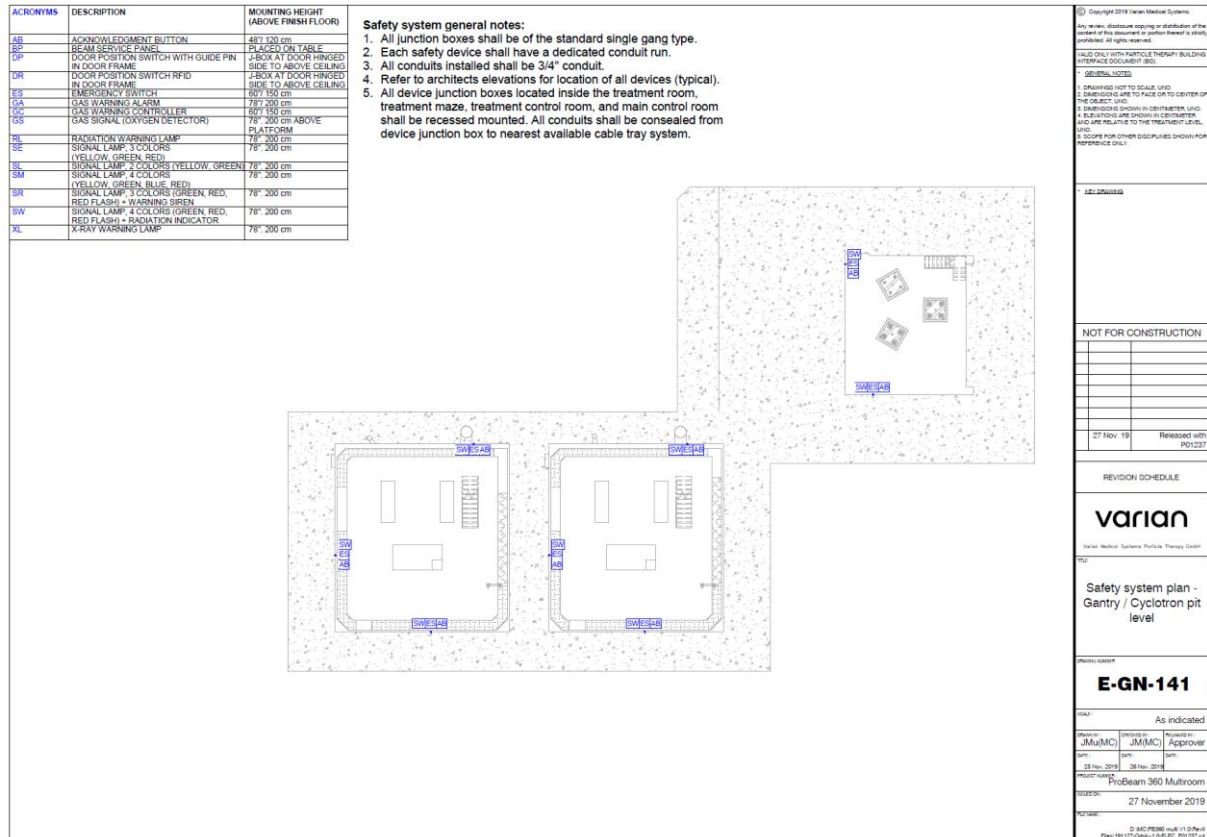
Bevegelsesdeteksjonssensorer detekterer når utstyr kommer innenfor toleranse-avstandsgrensen til annet utstyr, pasienten eller annet.

### Gassalarmanlegg

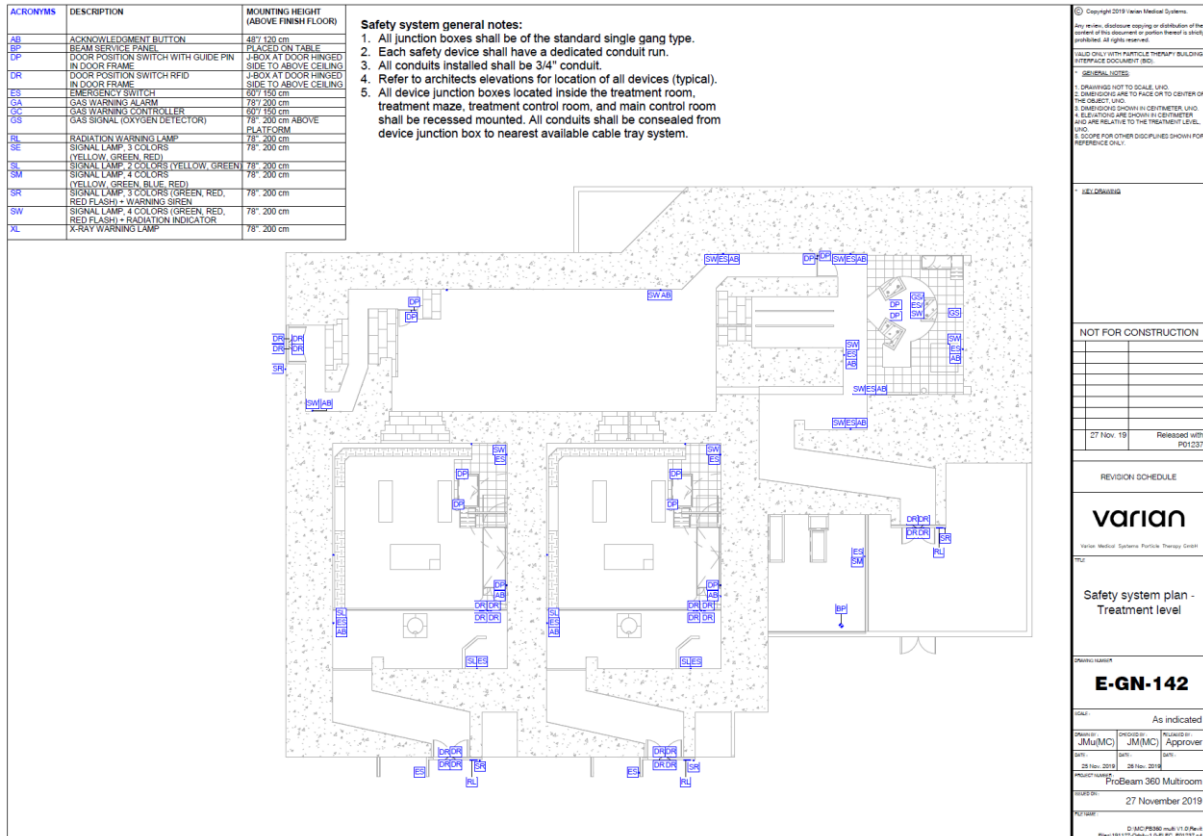
Protonanleggets interne sikkerhetssystem inkluderer også deteksjon av oksygen i syklotronrommet.

## Tegninger av protonanleggets interne sikkerhetssystem

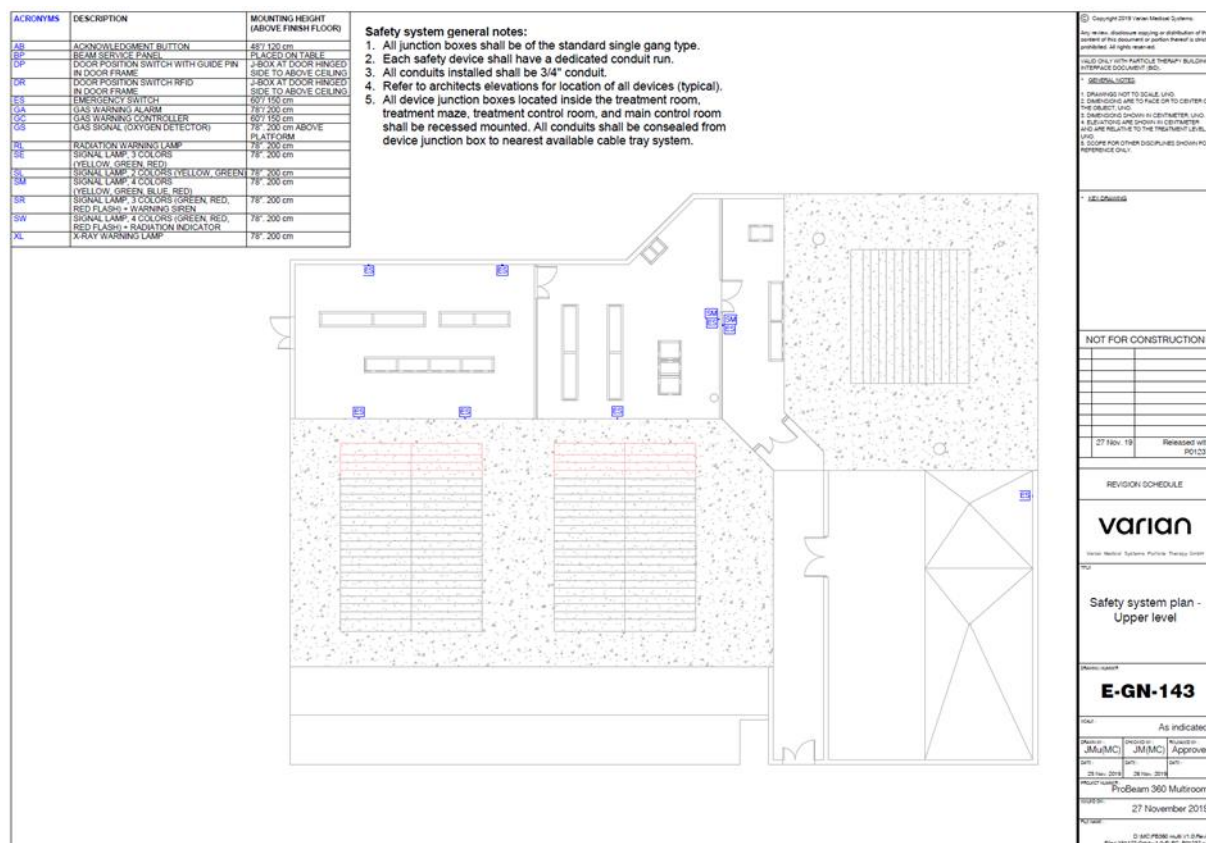
Figurer under viser omfang og plassering av periferiutstyr tilhørende protonanleggets interne sikkerhetssystem i protosenteret.



Figur 72: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan U2/Pit som viser omfang og plassering av periferiutstyr tilhørende protonanleggets interne sikkerhetssystem i protosenteret



Figur 73: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan U1 som viser omfang og plassering av periferiutstyr tilhørende protonanleggets interne sikkerhetssystem i protosenteret



Figur 74: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan 01 som viser omfang og plassering av periferiutstyr tilhørende protonanleggets interne sikkerhetssystem i protosenteret

### 10.1.3 Strålemonitoreringsanlegg

I protonanlegget vil det bli etablert strålemonteringsanlegg. Dette vil komme i tillegg til utstyrsleverandørens eget sikkerhetsanlegg.

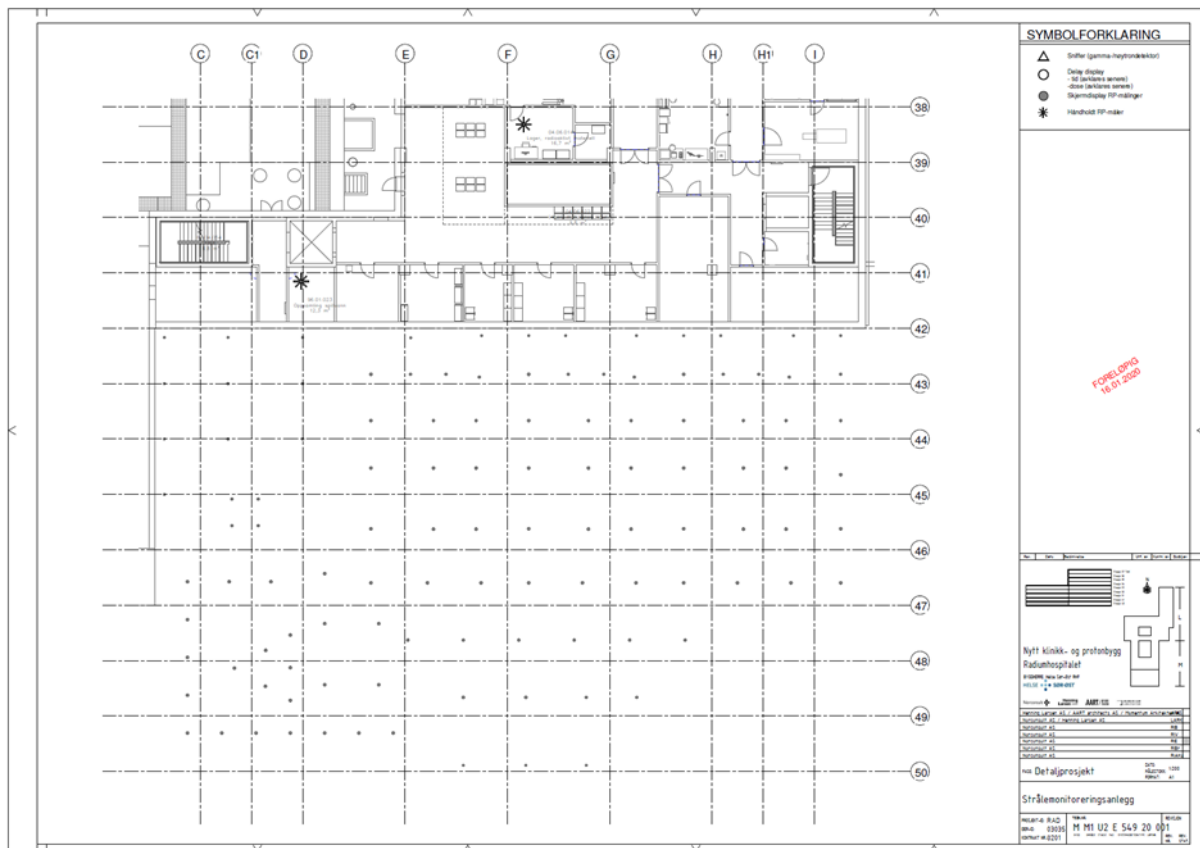
Anlegget vil typisk bestå av:

- Sniffere (gamma- og nøytrondetektorer)
- Delay display
- Skjermdisplay for strålingsoversikt

Sniffere bestykses i utvalgte rom med gamma- og nøytrondetektorer som plasseres inne i protonanleggets mest stråleintense områder, sett i lys av skjermingsberegninger utført av utstyrsleverandør.

Skjermdisplay som viser strålingsoversikt plasseres i protonanleggets kontrollrom. I tillegg vil det forefinnes håndholdte strålingsmålere og personlige dosimeter. Figurene under viser omfang og plassering av strålemonitoreringsanlegget i de ulike etasjene i protosenteret.





Figur 75: Utsnitt modell, protonbygg M1, plan U2 som viser omfang og plassering av strålemonitoreringsanlegget i protonsentret





I teknisk forskrift klassifiseres sykehus innenfor risikoklasse 6. Dette utløser krav til fullsprinkling av Nytt klinikk- og protonbygg. Ved unntaksvis bruk av andre slukkesystemer behandles dette avviket i brannstrategidokumentet.

I bygget etableres en felles sprinklersentral, med eget pre action sprinklersystem for M1 Protonbygg. Pre action innebærer at sprinkleranlegget først utløser ved en kombinasjon av detektert brann og utløste sprinklerhoder. Inntil det er detektert brann er rørene kun fylt med trykkluft, det vil dermed ikke være noe vann i sprinklerrørene som kan bli bestrålt.

Det etableres brannslangeskap for manuell slokking som skal dekke hele bygningsmassen.

Det etableres manuelle håndslukkere som supplement til brannslangeskap. Dette i henhold til brannkonsept, lover og forskrifter.

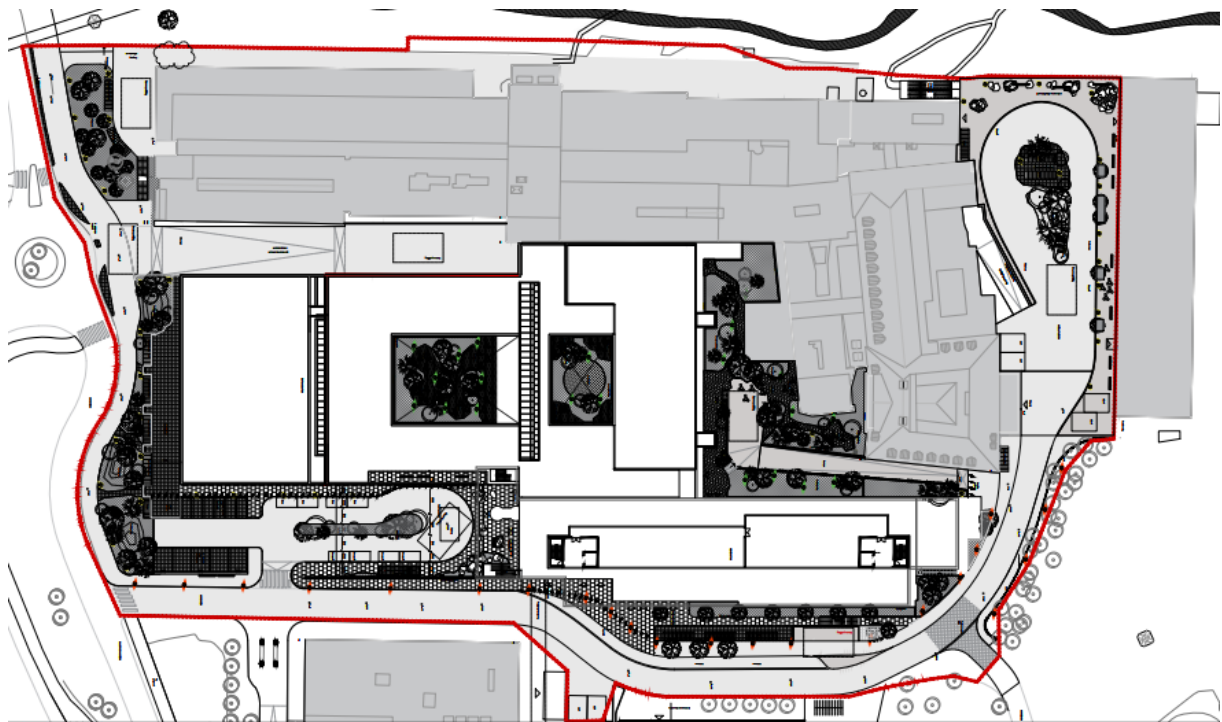
## 10.5 Gass og trykkluft

De tekniske gassanleggene til proton skal forsyne protonutstyret. Det skal benyttes Hydrogen til generering av protonstrålen, Oksygen for beredning av deflektorene i syklotronen og Nitrogen for lufting av syklotronen.

Gassene skal leveres fra flaskesentraler plassert direkte ved syklotronen. Flaskesentralen for Hydrogen skilles ut i eget rom (branncelle) for å separere det fra oksygenflaskene.

Det etableres eget sentralt anlegg for teknisk trykkluft til bruk i strålebehandlingsdelen. Trykkluften skal ha kvalitet 3:2:1 etter DIN ISO 8573-1. Det benyttes vannkjølte oljefrie trykkluftkompressor, plassert i kompressorsentral i U2, med luftinntak over tak.

## 10.6 Utendørsanlegg



Figur 78: Oversikt over utenomhusanlegg for Nye Radiumhospitalet – tegning er vedlagt for bedre detaljoppløsning

## 11 Vedlegg og referanser

Vedlegg og referanser utover Lover og retningslinjer listet opp i Tabell 1 i kapittel 2.4 er listet opp i tabellen nedenfor.

Tabell 9: Vedlegg og referanser tilknyttet designdokumentet er listet opp nedenfor

Nr	Tittel	Dato	Vedlegg	Referanse
1	Sluttrapport Konseptfase Innføring av Protonbehandling <a href="https://www.helse-sorost.no/Documents/Styret/Styremøter/2016/20160630/064-2016%20Vedlegg%20-%20Konseptrapport.pdf">https://www.helse-sorost.no/Documents/Styret/Styremøter/2016/20160630/064-2016%20Vedlegg%20-%20Konseptrapport.pdf</a>	16.06.2016		X
2	Miljøkonsekvensanalyse ID: RAD-0000-S-RO-0001-01	04.06.2019	X	
3	Oslo_ShieldingDrawings_D-14.11.001	04.11.2019	X	
4	Oslo_Shielding Report R-14.11.001_1	04.12.2019	X	
5	Bulk Shielding Analysis of OUS Proton Therapy Facility	17.01.2020	X	
6	Måling av indusert aktivitet i kjølevann og luft fra skorstein ved Dansk Center for Partikelterapi	07.01.2020	X	
7	Oslo_Air Activation Report_R-14.11.002-0	05.12.2019	X	
8	IFE/KR/F-2020018 Stråledoser til befolkning fra utslipp av radionuklider fra protonsentere ved nytt Klinikk- og Protonbygg ved Radiumhospitalet, Oslo Universitetssykehus HF	13.02.2020	X	
9	RAD-8201-B-NO-0002 Protonbunker Betongarbeider	14.02.2020	X	
10	2019_PT_Occupational_doses	14.02.2020	X	
11	R-14.11.002_1 cooling water Oslo	20.03.2020	V2.0	
12	R-14.11.003-0_Soil_and_GW_activation	23.03.2020	V2.0	
13	20190761-01-TN Grunnundersøkelser Radiumhospitalet	28.01.2020	V2.0	
14	Activated Maintenance Oslo University Hospital	16.02.2020	V2.0	
15	RAD-8201-V-RA-0001 CFD spredningsanalyse for spesialavkast	17.04.2020	V3.0	

## 12 Videre prosess

Utformingen av anlegget for protonbehandling ved Radiumhospitalet er i detaljeringsfase når søknad med designdokument versjon 1.0 oversendes DSA. Fotavtrykk og betongkonstruksjoner er ferdig prosjektert, men det vil foregå videre detaljering av gjennomføringer og tekniske løsninger, og etter hvert utarbeidelse av arbeidstegninger til entreprenører frem mot byggestart i september 2020. Noe detaljering av de tekniske løsninger vil også foregå etter dette.

Videre detaljering av løsninger samt restanser på leveranser for aktivering av kjølevann, grunn og grunnvann vil ettersendes i versjon 2.0 og 3.0, i mars og april 2020. Versjon 3.0 anses som endelig leveranse.

Det vil utarbeides en plan for videre søknadsprosesser før oppstart behandling av pasient, samt plan for dekommisjonering. I dette arbeidet vil OUS delta, og det vil være mye fokus på kontrolltiltak og organisatorisk drift. En plan for dette arbeidet forventes å foreligge høsten 2020. I denne sammenheng vil det også gjennomføres risikoanalyser for å favne om uhellssituasjoner og estimere risikoen for uønsket stråleeksponering av personell, pasienter og befolkningen og likeledes risikoen for utslipp til omgivelser, berggrunnen, området rundt anlegget og til luft.

Det vil arbeides videre med systemer som sikrer internkontroll jamfør internkontrollforskriftens § 5.6 [Tabell 1, S].

I forbindelse med ferdigstilling av prosjektet skal det utarbeides en samlet plan for slutfasen. I denne vil eierskifte av bygg og utstyr mellom prosjektorganisasjonen, PRAD, og driftsorganisasjonen, OUS HF, beskrives og det vil utarbeides prosedyrer og systemer for overføring av informasjon om løsninger for teknikk og bygg. I tillegg har OUS HF medvirket i stor grad underveis i hele prosjektet, nettopp for å sikre at driftsorganisasjonens kunnskap og eierskap til ferdig leveranse er på et godt nivå. Plan for fremtidig dekommisjonering vil være en del av dette arbeidet.

Det arbeides nå med kartlegging av materialsammensetning i bygget og da særlig med tanke på betongen og armering. Dette arbeidet skal brukes i samhandling med utførende entreprenør når denne er på plass for å sikre at det blir valgt de mest hensiktsmessige materialer med tanke på dekommisjonering.

I arbeidet med oppføring av bygg og utstyr så vil det bli nøye oppfølging av de ulike entreprenørene. Det utarbeides systemer for byggherrekontroll for å sikre at bygning er i henhold til planene, og for å tidligst mulig oppdage eventuelle feil i byggeprosessen som kan påvirke strålevern. Det er ansatt fysikerressurs i prosjektorganisasjonen, og denne arbeider tett med tilsvarende ressurs i Helse Bergen. OUS vil også ha personell dedikert til slik kontroll. Det vil være systemer for håndtering av endring og avvik samt systemer for å sikre koordinering av et byggeprosjekt med mange samtidige arbeidsprosesser og mange ulike interessenter på plass på tomten samtidig. Det er per mars 2020 ansatt en egen byggeleder for M1, betongbunkeren, for å ivareta dette samt en egen prosjektleder med ansvar for koordinering av alle områder tilknyttet proton: utstyr, bygg, IKT, strålevern, driftsorganisasjon og nasjonale føringer.



## 13 Endringslogg

Versjon	Endring	Dato	Sign
1.0	Endelig versjon	14.02.2020	MN
2.0	Kapittel 2.4: Oppdatert tabell 1 [Æ] Kapittel 6.1: Resultater kjølevannsrapport Kapittel 7: Oppdatert tekst og bilder samt underkapitler Kapittel 8.4: Oppdatering noe tekst og Figur 61 om avkast og pipeløp Kapittel 9.7.1: Nytt delkapittel Kapittel 9.8: Ny tekst angående aktivering av betong/kartlegging isotoper Kapittel 9.8.1: Oppdatert tekst i kapittel Kapittel 12: Oppdatering kapittel med internkontroll	27.03.2020	MN
3.0	Kapittel 8.3: CFD simuleringer – ny tekst og figurer Kapittel 9: Ny tekst satt inn i første avsnitt angående byggesteiner Kapittel 10.1.3: Ny Figur 76 og Figur 77, samt tekstuelle endringer tilknyttet disse Kapittel 11: Nytt vedlegg 15	17.04.2020	KR