

Vedlegg 1-1A:

Beskrivelse av Protonterapibygget og forhold relatert til strålevern



Figur 1: Inngangspartiet til protonterapisenteret ved Haukeland universitetssjukehus.

Figur; Arkitema Architects, 2020.

1 Anlegg for protonterapi ved Haukeland universitetssjukehus

Stortinget har vedtatt bygging av to anlegg for protonterapi i Norge, ett tre-roms anlegg ved Radiumhospitalet, Oslo Universitetssykehus, i Oslo, i helseregion Helse Sør-Øst RHF, og ett to-roms anlegg ved Haukeland universitetssjukehus, Helse Bergen HF¹, i Bergen, i helseregion Helse Vest RHF. Begge anleggene planlegges med oppstart pasientbehandling i 2024. Begge anleggene vil ha et dedikert forskningsrom med gantry og begge steder skal forskningsrommet kunne oppgraderes til behandlingsrom etter hvert som behovet tilsier dette. Begge anleggene skal inngå i en nasjonal oppbygning av likeverdig behandlingstilbud med protonterapi innen kreftbehandling i Norge.

¹ Haukeland universitetssjukehus, Helse Bergen HF, Postboks 1400, 5021 Bergen, Organisasjonsnummer: 983 974 724

Planleggingsarbeidet for disse to anleggene har pågått i flere år, i Oslo har Sykehusbygg HF planlagt anlegget for Helse Sør-Øst RHF, i Bergen er det Prosjektkontoret ved Helse Bergen HF som har ansvaret for planlegging og bygging av anlegget i Helse Vest RHF.



Figur 2: Protonterapisenteret ved Haukeland universitetssjukehus. I illustrasjonen er taket og deler av bygget gjort gjennomsiktig for å vise behandlingsetasjen og det tyngre protonterapi utstyret.

Figur; Arkitema Architects, 2020.

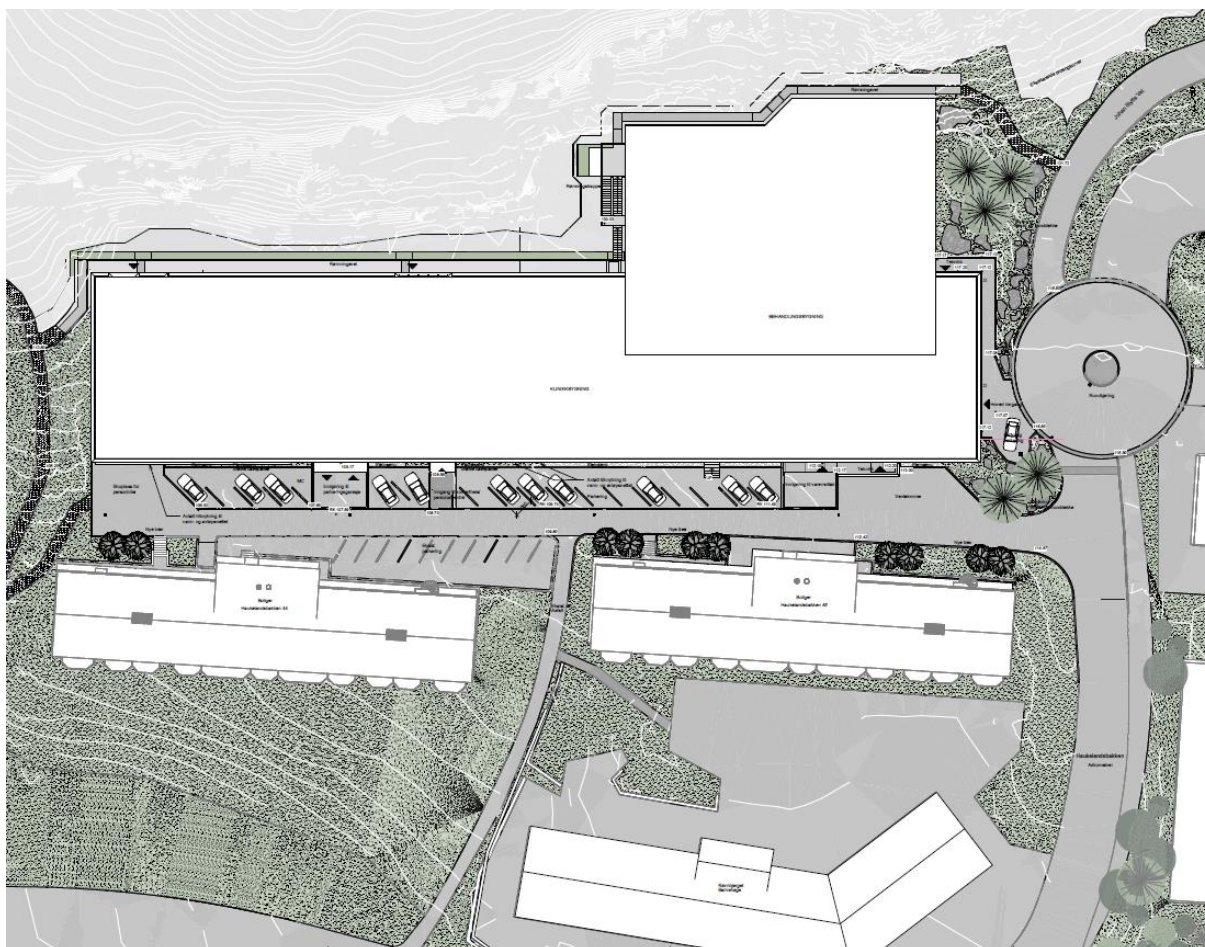
Anlegget ved Haukeland universitetssjukehus vil bli bygget på tomt i Haukelandsbakken, se figur 1, figur 2 og figur 3, og ha protonterapisystemet ProBeam 360, levert av Varian Medical Systems².



Figur 3: Protonterapisenteret ved Haukeland universitetssjukehus, perspektiv fra gangveien ned fra Montana.

Figur; Thomas Hagenes, Multiconsult, 2021.

² Varian Medical Systems Inc., 3100 Hansen Way, Palo Alto, CA 94304 USA



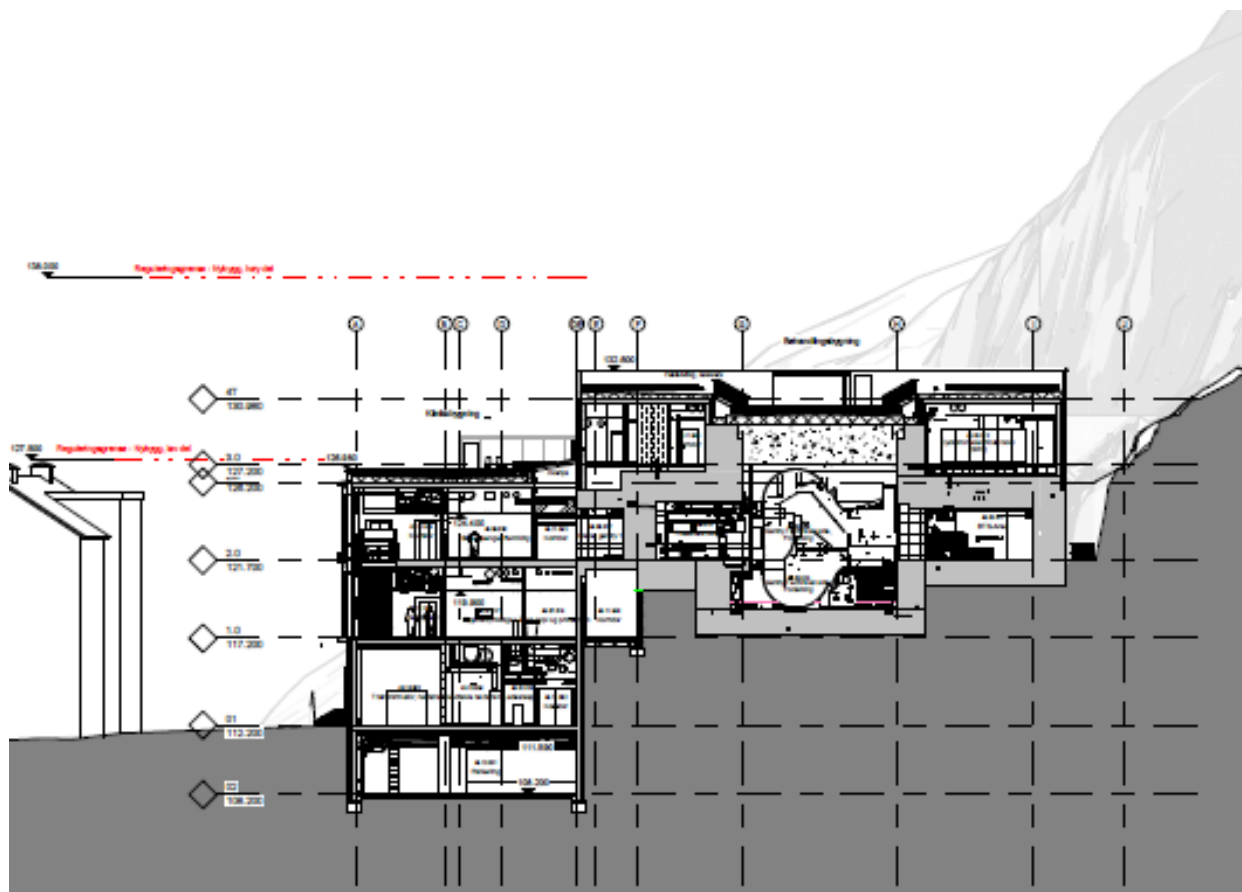
Figur 4: Situasjonsplan med oversikt over plassering av protonterapisenteret ved Haukeland universitetssykehus, protonbunkersområdet er plassert mot fjell i den syd-østlige delen av bygget.
Figur; Helse Bergen HF, 2021.

Det arbeides for tiden med detaljprosjektering for bygging av anlegg for protonterapi ved Haukeland universitetssykehus. Protonterapianlegget vil, idet tillatelse foreligger fra Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA), bli bygget på utpekt tomt i Haukelandsbakken, på tomt, Gnr. 161, Bnr. 1273, utpekt til formålet av styret i Helse Bergen HF.

I figur 3 og figur 4 vises situasjonsplanen for protonterapianlegget. Som figurene viser er protonterapianlegget plassert inntil en fjellskrent mot øst (vist i grått), bygget har to boligblokker som nabobygg mot vest, dette er adressene Haukelandsbakken 44 og 46, Ulriksbanens nedre stasjon i nord og en rundkjøring og vei oppover mot Montana Terrasse i sør.

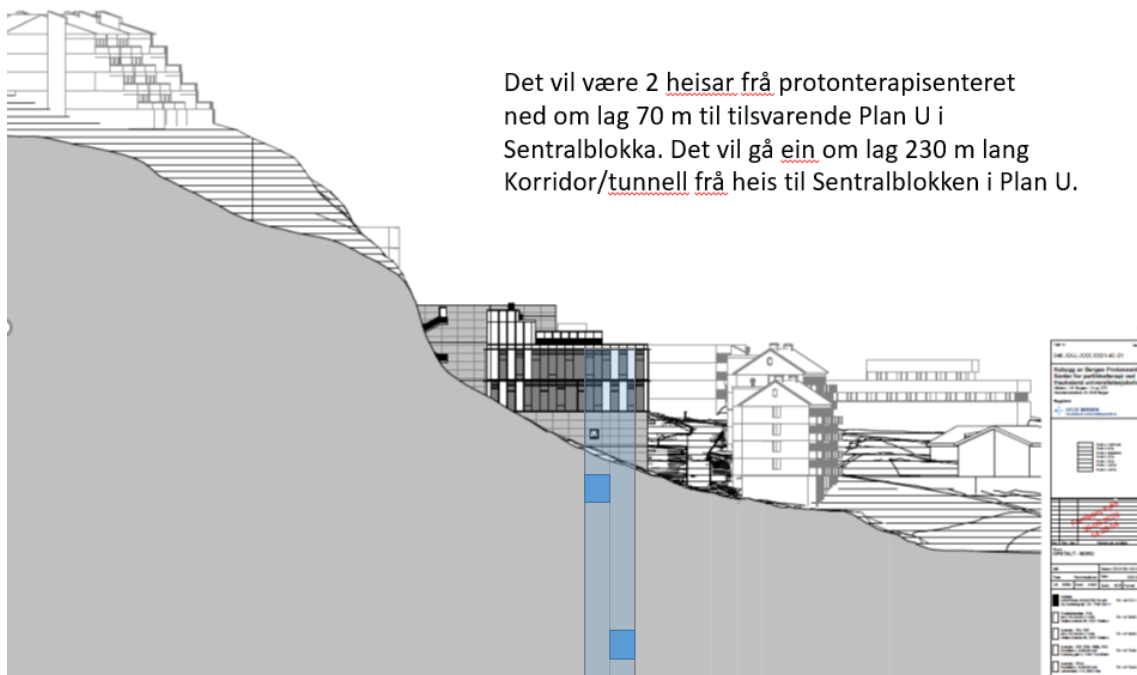
I figur 5 vises utsnitt av protonterapibygget i et snitt langs øst-vest akse, sett fra syd. Som figur 5 viser, vil protonterapibygget bli bygget over 5 etasjer på tomten. Som figur 1-5 viser, vil bygget bli plassert og orientert i terrenget slik at de deler av anlegget som vil ha de høyeste strålenivåer innvendig ved operasjon av anlegget, slik som akselerator og området for strålelinje med energimoduleringsenhet, blir plassert mot øst, mot fjell og terreng. Hele bunkersdelen blir skjermet

med tykke betongvegger og denne vil bli strengt adgangsregulert i forhold til øvrige områder i bygget og den alminnelige ferdsel.



Figur 5: Protonterapisenteret, sett fra syd gjennom snitt langs øst-vest akse gjennom isosenter i forskningsrommet syd i bygget. I figuren ser man byggets 5 plan, fra parkeringsdekke nederst, til tekniske arealer for leverandøren øverst. Gantry konstruksjonen strekker seg over tre plan i noen områder av bygget.

Figur; Helse Bergen HF, 2021.



Figur 6: Utsnitt fra nord som viser topologien der protonterapisenteret er plassert. Figuren viser Montana Terrasse (til venstre), fjellskråning, heissjakt (blå), protonterapibyget, boligblokker og barnehage (til høyre).
Figur; Helse Bergen, 2021.

I figur 6 vises et kartutsnitt, sett fra nord, som gir et inntrykk av topologien i området med den skrånende grunnen som anlegget vil bli bygget på. Som figur 6 viser, blir det planlagt kommunikasjon med 2 heiser for strekket fra protonterapibyget ned til plan samsvarende med plan U i Sentralblokken, med om lag 70 meter høyde, det vil bli bygget en gangtunnel 230 meter østover fra Sentralblokken til heissjaktene.

1.1 Planløsning i bygget

Protonterapibyget er på totalt 10.700 m². Bygget strekker seg over 5 etasjer; bygget vil ha kommunikasjon og innendørs gangvei til Sentralblokken ved sykehuset gjennom en underjordisk gangtunnel og to heiser som vist i figur 6. Bygget er for øvrig frittstående i terrenget, protonterapibyget har følgende planløsning, fra nederst til øverst;

- **Plan 2. Underetasje;**
Parkeringsetasje, med parkeringsplass til 34 biler, ladestasjon for elbiler, oppstillingsplass for sykler og for kjøretøy for spesialtransport for pasienter.
- **Plan 1. Underetasje;**
Varemottak, tekniske arealer, garderober, renholdsentral, hospitaldrift, lagerrom, verksted, kontorer, rom for forsinkelsestank kjølevann fra syklotron.
- **Plan 1. Etasje;**
Undersøkellesområde, medisinerom, laboratorier, samtalerom, prøvetagningsstasjoner, kontorer, pauserom for personalet, møterom, vestibyle og resepsjonsarealer, ventearealer for pasienter, laboratorier for preklinisk (dyre) forskning, tekniske lagerrom.

- **Plan 2. Etasje:**

I dette planet foregår protonterapi behandlingen, behandlingsetasjen rommer syklotronbunker med akselerator, strålelinjeområde, energijusteringssystem, lagerrom for aktivert utstyr, teknisk (bakre) del av gantryrom, behandlingsrom og forskningsrom, behandlingskontrollrom, forskningskontrollrom, hovedkontrollrom for syklotron drift, tekniske arealer og serverrom for leverandør, venteområde for pasienter, omkleddningsrom, anestesiroom, støtterom for dosimetri og forskning, CT og MR skannere, avsatt areal til fremtidig skanner (formål doseverifikasjon), forberedelsesrom for fiksering og til skannere, kontorer for doseplanlegging og personale, møterom, forskningslaboratorium (celle laboratorium), lagerrom og møterom.

- **Plan 3. Etasje:**

Tekniske arealer for protonterapisystemene; kjøling, elektro og ventilasjon, kontorer, pauserom og møterom for leverandørens personale.

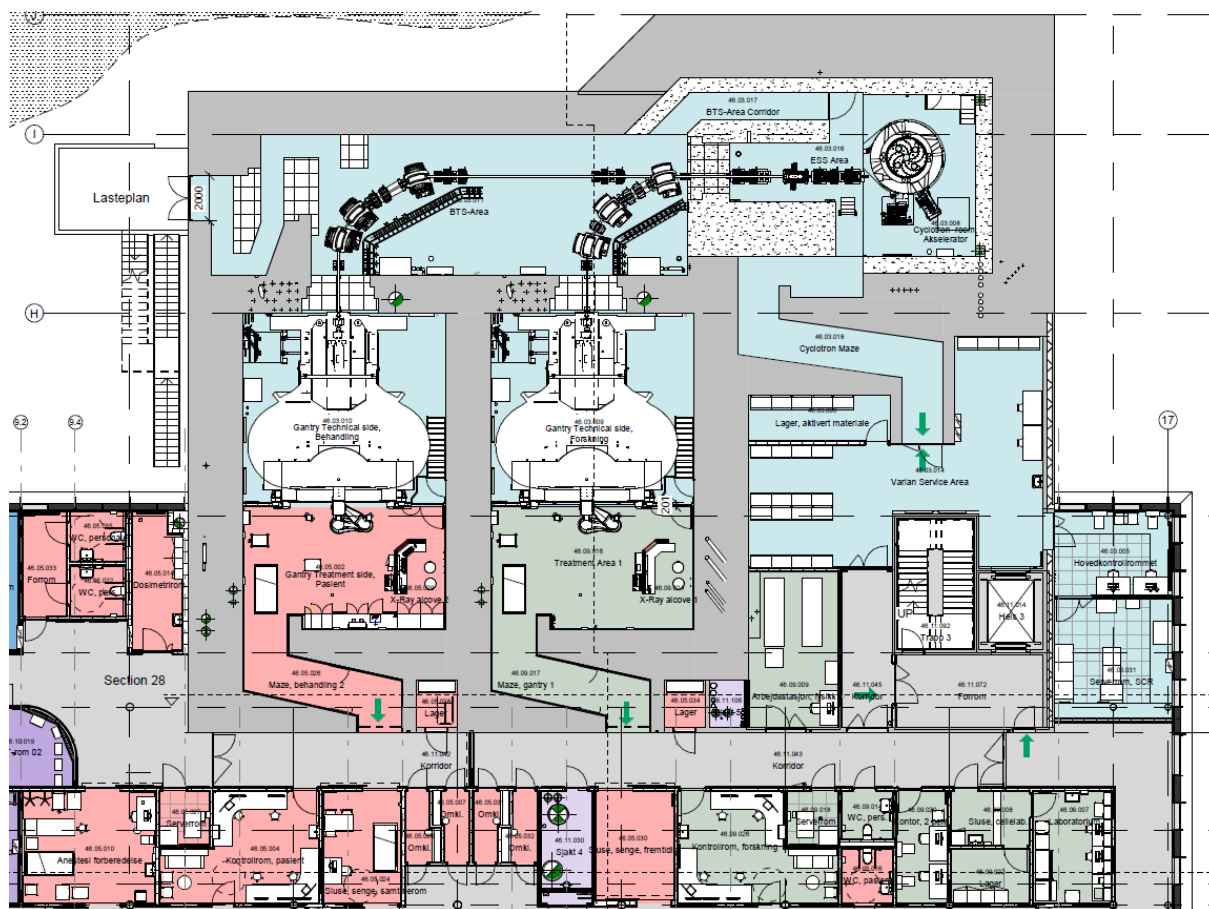
- **Tak og takterrasse:**

På taket av protonterapibygget er det en takterrasse, helt i nordlig del, for personalet. Det er adgangsregulert tilkomst til taket for drift og vedlikehold av tekniske installasjoner, tilkomst til solcellepaneler, ventilasjonsutstyr og kjøleaggregat, utslippspunkt for ventilasjon fra syklotronområdet (mot syd).

Det vises til vedlagte plantegninger over hele bygget³, til målsatte plantegninger over protonbunkersområdet⁴ og til del 3 i dette dokumentet hvor samtlige rom i bygget er listet opp.

³ Vedlegg 1-1B: Plantegninger over protonterapibygg i 5 plan, 11.03.2021.

⁴ Vedlegg 1-1C: Plantegninger, Målsatt i syklotron-gantryområdet, 03.03.2021.



Figur 7; Bunkersområdet i anlegget. Øverst til høyre vises akselerator, en syklotron, videre langs strålelinjen mot venstre sees energiutvelgelsessystemet (ESS og Degrader), stråle transport område med fokuserings- og bøyemagneter inn til de to gantry rommene. Figur; Helse Bergen, 2021.

I figur 7 vises protonbunkersområdet i behandlingsetasjen, Plan 2. Etasje. Øverst til venstre på figuren vises nødutgang ut fra stråle transport området, døren ut vil være strengt adgangsregulert. Øverst til høyre i plantegningen vises syklotronbunker med energiutvelgelsessystem, stråletransportområde (øverst sentralt i figuren), de to gantry rommene med teknisk del (hvitt) og pasientdel (lyserødt; behandlingsrom, grønt; forskningsrom), hovedkontrollrom for syklotronoperatør (lyseblått, til høyre) og behandlings- og forskningskontrollrom (nederst i midten). En kortfattet liste med informasjon om ProBeam 360 systemet er vist i tabell 1.

Tabell 1: Kortfattet informasjon om ProBeam 360 systemet fra Varian Medical Systems.

Akselerator	Isokron superledende syklotron
Gantry struktur	Vekt 70 tonn, montert på en enkeltbæring
Energiutvelgelse	Degrader system med kiler laget av karbon, plassert i luft
Energiområde	Fra 60 MeV til 226 MeV, tilsvarende 3 cm til 30 cm rekkevidde i vann
Stråleutbredelse	Minimum 4 mm spot størrelse (σ i luft) ved maksimalenergi
Bestrålingsfelt	Maksimalt bestrålingsområde: 25 cm x 25 cm i isosenterplanet
Avbildningssystem	2 stk Varex GS-20712 røntgen kilder for ortogonal kV avbildning
Pasient posisjonering	Leoni bordrobotsystem med 6 frihetsgrader for bevegelse

1.2 Hovedelementene i bygget

Protonterapidelen av anlegget i bygget består av hovedelementene;

- 1) **Område for stråleproduksjon og stråletransport**
- 2) **Behandlingsrom og forskningsrom og kontrollrom**
- 3) **Pasientarealer, diagnostikk, fikserings- og undersøkelses arealer**

1) Område for stråleproduksjon og stråletransport

Område for stråleproduksjon rommer elementene syklotronbunker, syklotron-akselerator, energi modulerings- og energiutvelgelsessystem og strålelinjeområde for transport av protoner fra akselerator til behandlingsrom og forskningsrom og tilstøtende tekniske rom. Området for stråleproduksjon vil være skjermet med tykke betongvegger, noen steder i flere lag og med opptil 3,5 meter tykkelse, også tak, gulv er skjermet, dette området vil være underlagt strenge adgangsbegrensninger. Protoner vil bli akselerert opp i energi ved hjelp av en isokron, superledende, syklotron som leverer stråleknipper med protoner til gjennomføring av bestråling ved Pencil Beam Scanning (PBS) teknikk til behandlingsrom og forskningsrom.

Akselerator og energiutvelgelsessystem produserer protonstråler i energiområdet fra 60 MeV til 226 MeV, med tilsvarende rekkevidde for protoner i vann fra 3 cm til 30 cm.

I dette området vil kun et fåtall kvalifiserte personer ha adgang, det vil etableres stråleskjerming og rutiner for å minimalisere stråleeksponering til personalet og omgivelsene ved operasjon av anlegget. Strålenivåene vil kontinuerlig overvåkes på utvalgte steder i bygget, det vises til prosjekterte målepunkter i bygget som omtales nedenfor.

2) Behandlingsrom og forskningsrom og kontrollrom

Protonterapi anlegget vil være utstyrt med to identiske gantryrom; ett rom for behandling og ett rom for forskning, begge rommene vil være utstyrt med 360° roterende gantry, forskningsrommet skal kunne omgjøres til behandlingsrom ved behov, begge rom har avbildningsstasjon.

Behandlingsrom og forskningsrom vil romme et teknisk bakrom for det roterbare gantry med stålramme som er bærende struktur for den om lag 70 tonn tunge hoveddelen av gantry med rotasjons mekanisme og balanserende motvekter, magnetsystemer, el-forsyning og en rekke styringssystemer, inkludert skannemagnetene for protonstrålen. Selve gantry vil romme avbøyningsmagneter, fokuseringsmagneter, skannemagneter og systemer for kontroll av stråleposisjon og dosimetri. Protonstrålen avsluttes i pasientdelen av behandlingsrommet i et munnstykke (eng. nozzle) som rommer utstyr for finjustering av hvilket område i pasienten som skal punkt-bestråles med proton-stråleknippene.

Selve pasientdelen av behandlingsrom vil inneholde bordrobotsystem for behandlingsbordet med pasienten, 2D kV og 3D CBCT (Cone Beam-CT) -avbildningsutstyr, pasientovervåkningssystem, kommunikasjonssystem, en avskjermet stasjon for avbildning for pasientposisjonering og det utstyr man behøver for gjennomføring av behandlingen; herunder fikseringsutstyr, anesthesiutstyr og lasersystem for posisjonering. Inngangen til behandlingsrom fra gangen utenfor vil være gjennom en maze, en korridor med flere retningsendringer (vinkler), for stråleskjerming, utformet slik spesielt med tanke på nøytronstråling i behandlingsrom.

Behandlingskontrollrom og kontrollrom for forskningsrom vil være plassert rett over korridor ved inngang til maze inn til gantryrom, på vestsiden av korridoren utenfor maze. Disse rommene vil være utstyrt med behandlingskontrollsystem, overvåknings- og kommunikasjonssystemer mellom kontrollrom og behandlings- og forskningsrom. I dette området vil pasienter, helsepersonell og i noen tilfeller pårørende oppholde seg ved operasjon av anlegget.

Protonanlegget vil inneholde et teknisk hovedkontrollrom for akseleratorkontroll og kontroll av strålelinjer og gantry og tilhørende støttesystemer (elektro, kjøling og vakuum), leverandøren sine ansatte vil operere systemene herfra, dette blir anleggets operasjonssentral, plassert helt i sydenden av bygget.

3) Pasientarealer, diagnostikk, fikserings- og undersøkelses arealer

Venterom, administrasjonsområde, kontorer, øvrige pasientfasiliteter. Arealer som resepsjon, venterom, samtalerom, lekerom for barn, kontorer for administrasjon og øvrig personale. Anlegget vil fra starten av romme 1 CT skanner med teknisk rom og kontrollrom, 1 MR skanner med teknisk rom og kontrollrom, i dette diagnostikkområdet er det arealer for fiksering og forberedelse for strålebehandling, det vil være 4 undersøkelsesrom i senteret, laboratorier, prøvetagningsstasjoner, medisinerom, samtalerom og diverse støtterom og lagerrom.

Alle skannerrom vil bli forskriftsmessig skjermet i forhold til stråling og magnetfelt, dette innebærer å legge inn adekvat skjerming i gulv, vegger og tak. Det er avsatt plass til en fremtidig doseverifikasjonsskanner, med kort avstand til behandlingsrom og forskningsrom, like nord for behandlingsrommet.

1.3 Produksjon av stråling i protonterapibygget

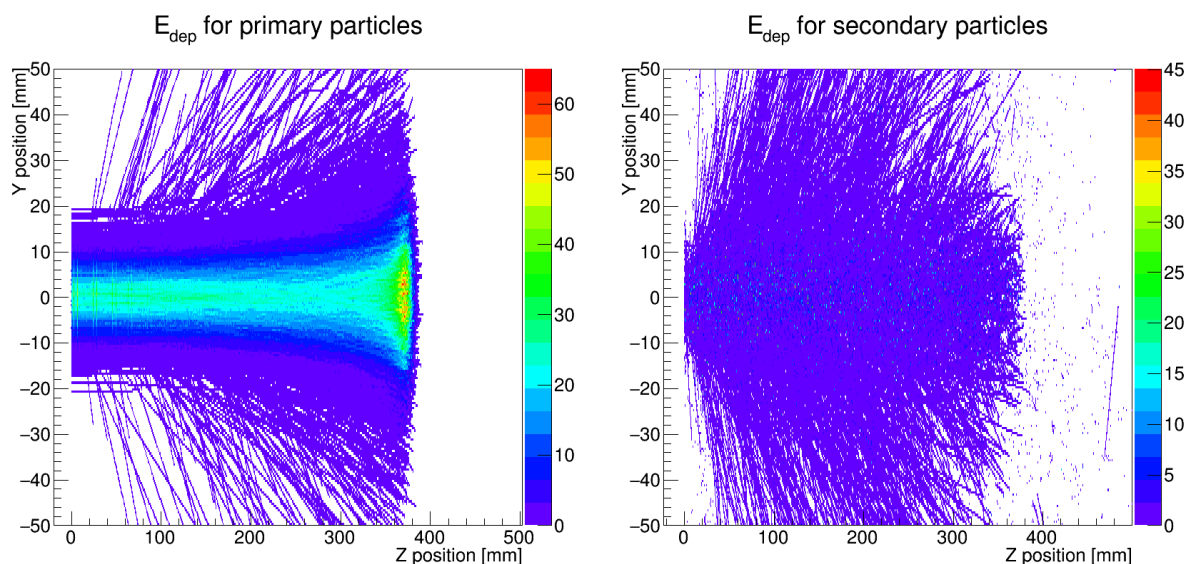
Ved vurdering av skjerming og stråleverntiltak i protonterapibygget er det av betydning å skille mellom:

- 1) **Stråling fra primærstrålen;** Primærstrålen er den protonstrålen man anvender til kreftbehandling, denne består av elektrisk ladde høy-energetiske protoner som tilføres kinetisk energi og akselereres opp til ønsket maksimalenergi i partikkelakseleratoren, her opp til 226 MeV. Primærstrålen styres fra akseleratoren gjennom strålelinjer frem til behandlingsrommene. Primærstrålen kontrolleres og fokuseres ved hjelp av et presist og omfattende magnetsystem.
- 2) **Sekundærstråling;** Stråling som har opphav i vekselvirkning mellom primærstrålen og det materiale primærstrålen treffer og vekselvirker med på veien fra akselerator til pasientene i behandlingsrommet. Sekundærstråling fra en primærstråle med protoner vil omfatte stråling fra; nøytroner, ladde kjernepartikler (slik som protoner, deuterium, tritium, helium, karbon, silisium, oksygen) og høyenergetisk gammastråling fra kjernereaksjoner og de-eksitasjonsprosesser. Sekundærstrålingen inneholder både stabile og radioaktive isotoper.

- 3) **Diagnostisk utstyr;** Anlegget for protonterapi vil også inneholde diagnostisk utstyr, plassert både inne i behandlingsrommene og i arealene like i nærheten av disse, dette diagnostiske utstyret er fra starten av en CT-skanner, en MR-skanner og kV utstyr for bruk til 2D og 3D (Cone Beam CT) avbildning av pasienten ved posisjonering før behandling og til monitorering av pustebevegelse under behandling. Dette diagnostiske utstyret vil bli stråleskjernet på ordinær måte, med 3 mm Pb ekvivalent skjerming i veggene rundt CT skanner og i veggene rundt rom for fremtidig avbildning (doseverifikasjon) og med 2 mm Pb ekvivalent tykkelse i veggene i alkovene i In-Room avbildningsstasjonene, bidraget fra dette utstyret inngår i en totalvurdering av strålevern tiltak ved anlegget. Det vil søkes DSA om alle nødvendige tillatelser for det diagnostiske utstyret i protonterapibygget i en egen prosess for dette, det ligger utenfor den søknad som sendes nå.

1.4 Stråling ved protonterapi; primærstråling og sekundærstråling

Ved operasjon av protonterapianlegget blir sekundærstråling produsert på de steder hvor primærstrålen (protonstrålen) vekselvirker med annet materiale, dette blir gjerne omtalt som punkter for stråletap. Slike stråletap vil oppstå i akseleratoren, langs strålelinjen fra injeksjon, akselerasjon, ekstraksjon, gjennom energi moduleringsystemet (degrader) og transport videre i strålelinjeområdet frem mot isosenteret i hvert av behandlingsrommene. Videre vil det forefinnes stråletap i utstyr for utforming av strålefeltet i strålehodet inne i behandlingsrommene og endelig i pasientens kropp, som fungerer som «Beam Stop» i behandlingssituasjonen, det produseres sekundærstråling, slik som nøytroner, inne i pasienten ved bestråling, under behandling.



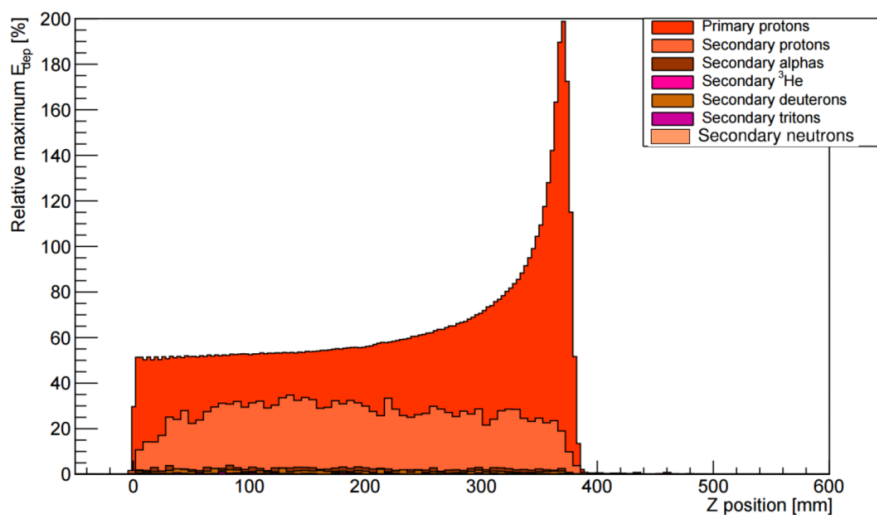
Figur 8: Energiavsetning i vann i transversalplanet fra en (monoenergetisk) protonstråle med energi 250 MeV og med en utstrekning av behandlingsfeltet på $10 \times 10 \text{ cm}^2$ i iso-senterplanet. Figuren er fra arbeid av ⁵.

⁵ H. E. S. Pettersen, Monte Carlo simuleringer, Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen, 2015.

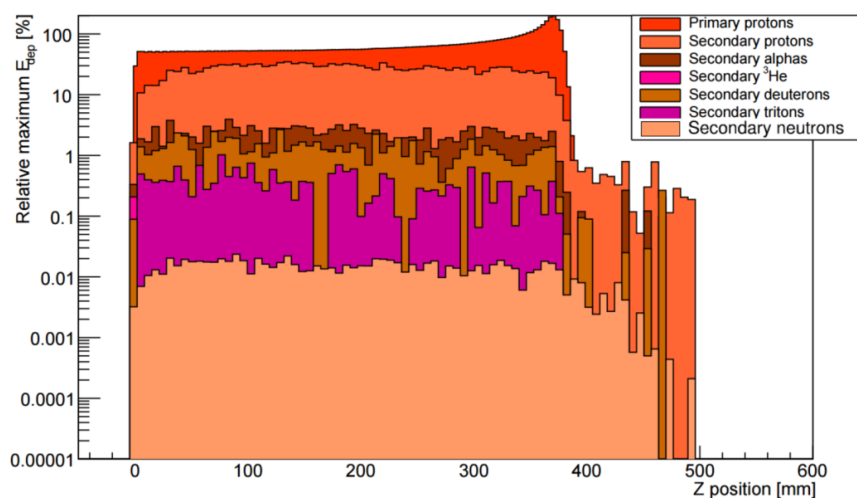
Det vises til figur 8 og figur 9 for illustrasjon av romlig fordeling av energiavsetning og dybde dose fordeling fra primærstrålen og fra sekundærstråling i vann fra en primærstråle som bestråler et $10 \times 10 \text{ cm}^2$ felt, målt i isosenter planet, med protoner ved energi 250 MeV.

Sekundærstrålingen vil omfatte; høy- og lav-energetiske (termiske) nøytroner, ladde kjernepartikler (slik som protoner, deuterium, tritium, helium, karbon, silisium, oksygen) og høy-energetisk gammastråling fra kjernereaksjoner og de-eksitasjons prosesser. Sekundærstrålingen vil ha en umiddelbar komponent; såkalt prompt (øyeblikkelig) stråling og en tidsforsinket komponent, der forsinkelsen er avhengig av halveringstider for produserte radioaktive isotoper og tidsforløpet av de-eksitasjons prosesser for eksiterte atomer. Materiale som har blitt aktivert av primærstrålen eller av høy-energetisk sekundærstråling, slik som betong og armeringsjern, vil inneholde radioaktive isotoper med halveringstider varierende fra år ned til, typisk, nanosekund skala.

Depth dose distribution by various particle types



Depth dose distribution by various particle types



Figur 9: Energiavsetning i vann og produksjon av sekundær stråling, som en funksjon av dyp for en (monoenergetisk) primærstråle med 250 MeV protoner. I plottet øverst i figuren er y-aksen lineær, i plottet nederst er y-aksen logaritmisk. Figuren er fra arbeid av ⁵.

Primærstrålen slik den genereres fra akselerator har i utgangspunktet høy nok protonintensitet til at doseraten med en viss margin er i henhold til hva man behøver sett fra et klinisk ståsted. Det er av betydning hvor stort intensitetstap som finner sted i magnetsystemet for stråletransport og energimodulering i forhold til hvilken protonintensitet man sender inn i akseleratoren for akselerasjon.

Rekkevidden for en protonstråle med energi på 226 MeV er like under 32 cm målt i vann, vann har en stoppeevne for protoner omtrent som normalt kroppsvev. Man vil måtte påregne et betydelig intensitetstap i energimodulasjonsleddet, derfor må syklotronen kunne levere protonstråler med vesentlig høyere intensitet og med litt høyere energi enn nødvendig doserate og energi tilsvarende rekkevidden til størst ønskelig behandlingsdyp.

Man vil som regel bestråle pasientene fra flere vinkler (flere strålefelt) for å redusere dosen til friskvev og for å unngå risikoorganer. Et behandlingsrom vil være utrustet med et bordrobotsystem for nøyaktig posisjonering og orientering av pasient i forhold til de strålefelt som benyttes.

Man anvender pr i dag samme fraksjoneringsregime ved protonterapi som ved fotonterapi, det vil si at man anvender omtrent likt antall fraksjoner og like fraksjonsdoser ved protonterapi som ved fotonterapi. Protoner har en biologisk effekt som i gjennomsnitt er målt til å være omlag 10 % høyere enn effekten fra fotonstråling. Det er her antatt at en pasient i gjennomsnitt vil gjennomgå 26 fraksjoner med 2 GyE dose til målvolumet ved protonterapi, dette fraksjonstallet vil variere alt avhengig av tumortype og behandlingsformål. Basert på resultater fra kliniske studier og som en følge av utvikling av ny teknologi og nye behandlingsteknikker vil fraksjoneringen kunne endres i fremtiden.

Av betydning for hvilke maksimale og gjennomsnittlige aktivitetsnivåer som genereres og avsettes som dose, er den protonintensiteten som akselereres pr tidsenhet idet anlegget er i drift. Leverandørene oppgir normalt hvilken doserate deres system er i stand til å levere. Ofte oppgis det hvor hurtig systemet kan levere en fysisk dose, gjerne 1 Gy, til et målvolum på 1 liter i et visst vanddyb. Vanlige tall for doserate er 2 Gy/l pr minutt i et dyp mellom 10 cm og 20 cm; det vil si at akseleratorsystemet er i stand til å levere det antall protoner pr sekund som skal til for å oppnå denne doseraten i dette dyppet. Strålingstap i energimodulatorleddet vil være av betydning og det er et viktig element i denne sammenhengen.

Videre vil det være slik at pasienten er en kilde til stråletap. En primærstråle av protoner vil miste om lag 1 % av stråleintensiteten pr cm traversert vev gjennom de nevnte kjernereaksjoner, i 20 cm dyp har primærstrålen dermed mistet om lag 20 % av protonene i primærstrålen gjennom kjernereaksjoner i vevet. Pasienten er i behandlingssituasjonen å betrakte som «Beam Stop» for protonstrålen.

Primærstrålen med protoner vil ha en transversal utstrekning i pasienten fra om lag 1 cm opptil 2-3 cm i isosenter-planet, dette er sterkt energiavhengig, og protonstrålen vil styres og fokuseres med høy presisjon av en serie dipol (avbøynings-) og kvadrupol (fokuserings-) magneter i et omfattende stråletransportsystem plassert mellom akselerator og behandlingsrom.

Aktiv leveringsteknikk, såkalt Pencil Beam Scanning (PBS), innebærer en reduksjon av sekundærstråling sammenlignet med tidligere tiders passive behandlingsteknikk, denne innebar anvendelse av aperturer og plassering av annet feltmodulerende utstyr inn i strålelinjen nær pasienten. Ved aktiv leveringsteknikk bestråles målvolumet punktvis av en protonstråle med transversal utstrekning mellom 1-3 cm. Ved dette reduseres da stråletapet i det pasientnære området vesentlig ved at det indueres vesentlig mindre vekselvirkning mellom primærstrålen og materiale i og rundt denne. Det vil være tilnærmet 100 % transmisjon gjennom leveringssystemet i den pasientnære delen av dette (i strålehode området). Dette vil tilsa en noe bedret doserate med PBS leveringsteknikk og mindre behov for skjerming i deler av strålelinje området. Sekundærstrålingen generert inne i pasienten er nesten uavhengig av leveringsteknikk.

Prinsippet for energijustering i et syklotronsystem fungerer slik at primærstrålen med protoner ekstraheres ut fra syklotronen ved systemets høyeste energi, behøves lavere energi, oppnås dette ved og hurtig å plassere materiale inn i strålelinjen, og derigjennom redusere primærstrålens energi ved å induere vekselvirkning mellom protonstrålen og materialet i dens vei.

I ProBeam 360 systemet blir kileformede spisser (wedges) laget av karbon anvendt som energijusterings materiale; jo mer av karbon materialet protonene traverserer gjennom, jo større energitap finner sted og jo større produksjon av sekundær stråling, gamma- og nøytronstråling, oppstår i og rundt degrader/energijusteringssystemet.

2 Bygningsmessig skjerming

I skjermingssammenheng er det betongbunkersdelen av bygget som danner utgangspunktet for beregninger og tiltak. Denne delen av bygget er planlagt med utgangspunkt i Varian Medical System sitt grunndesign og layout for deres ProBeam 360 to-roms anlegg. Betongbunkersdelen av bygget omfatter:

- Syklotronbunker
- Området for degrader/energijusterings-system
- Området for strålelinjetransport fra degrader frem til hvert gantryrom
- Begge bunkere rundt gantryrommene, disse favner om en teknisk bakre del og en fremre del med behandlingsrommet og forskningsrommet
- Inngangsparti (maze) inn til behandlingsrom og forskningsrom
- Inngangsparti (maze) inn til syklotronbunker
- Området for service og kontrollrom for leverandør like utenfor inngangspartiet til syklotron, inkludert et lagerrom for oppbevaring av aktiverte komponenter og deler
- Alle vegger, gulv og tak som omslutter disse arealene
- Tilstøtende arealer som omslutter denne delen av bygget, disse arealene strekker seg over tre plan over deler av dette området. I disse arealene er det plassert tekniske rom med el.- og kjøle-systemer til leverandørens utstyr, det er plassert innlastingsluke i taket over hvert av gantryrommene og over syklotronen i syklotronbunker.

2.1 Premisser for skjermingsarbeidet

Anlegg for protonterapi skal opereres uten at man overstiger de maksimalt tillatte grenser for doser til personalet ved anlegget, pasienter, pårørende, beboere i området eller den generelle befolkning.

Det vil skjermes mot stråling på en slik måte at anlegget kan driftes for fullt uten at strålingsnivåene vil utgjøre noen begrensende faktor for operasjon og drift av anlegget.

I skjermingssammenheng er et nært samarbeid med leverandøren helt nødvendig og arbeidet har blitt gjennomført i nært samarbeid med Varian Medical Systems. Det vises til del 4 i dette dokumentet for oversikt over kravspesifikasjonen i forhold til strålevern.

Arbeidet med strålevern og skjerming for anlegget vil videre være basert på følgende momenter:

- Utforming av anlegg; hele protonbunkersdelen er basert på Varian Medical System sine anleggstegninger; dimensjoner, størrelser og avstander, vegg-, gulv- og tak tykkelser og relativ plassering av funksjoner ved anlegget følger av dette.
- Akselerator type og minimums- og maksimums (behandlings-) energi for denne. Informasjon fra leverandør er innhentet. Ved minimums (behandlings-) energi vil nøytronproduksjonen være på sitt største rundt degrader-systemet i syklotronbunkeren, ved maksimums (behandlings-) energi vil nøytronproduksjonen være mindre rundt degrader-systemet.
- Oversikt over stråletap⁶ ved akselerasjon og videre transport av partikkelstrålen, inkludert vekselvirkning mellom primærstrålen og materiale i og ved strålelinjene, frem til pasientene i behandlingsrommene.
- Oppetid og bestrålingstid for anlegget; maksimalt antall pasienter som behandles pr år, en modell for fordelingen av pasienter behandlet i et gjennomsnittsårlig og pr dag; maksimalt antall timer akseleratorsystemet er i operasjon pr dag, pr år og netto bestrålingstid: forholdet mellom tid med bestråling ut i behandlingsrom og tid der systemet er klart for operasjon uten bestråling. Det vil være av betydning om behandlingsrommene er utstyrt med roterbart gantry idet dette har betydning for retningen og den romlige fordelingen av strålingen i rommene.
- Oppholdstider i samtlige rom i anlegget; basert på oversikt over hvor lang tid personalet og pasienter oppholder seg i de respektive arealer i anlegget; årlig arbeidsturnus, rotasjonsordninger, adgangsbegrensninger, områder hvor man ikke tillater tilgang under operasjon og drift av anlegget⁷. Det blir lagt til grunn at personale som arbeider i protonterapisenteret arbeider 2000 timer årlig (konservativt anslag).
- Utstyr for utforming, styring og kontroll av primærstrålen og hvordan bestrålingen foregår, herunder leveringsteknikk; aktiv bestråling med intensitetsmodulert spot skannings teknikk (IMPT).
- Lover og forskrifter for alt stråleproduserende elektromagnetisk utstyr ved anlegget.

⁶ Oversikt over stråletap i ProBeam 360 systemet, P00839-Rev 00-Report - Determining the Input Data for the Radiation Protection Calculations. Rapporten er underlagt konfidensialitetsbestemmelser.

⁷ Vedlegg 1-9B: Plantegninger over kontrollert- overvåket område og områder med adgangskontroll.

- Lover og forskrifter for produksjon av og arbeid med stråling og radioaktivitet; maksimalt tillatte doser til personale (yrkeseksponerte), pasienter og den øvrige befolkning; nødvendige tiltak for å holde dosene på et minimum vil presenteres i Risiko og Sårbarhetsanalysen for protonterapivirksomheten⁸.
- Måling og registrering av utslipp til omgivelsene og mottatte doser til personalet idet anlegget er i drift. Personalet vil bære persondosimetre som måler daglige helkroppsdoser og som varsler dersom dosegrenser passeres. Utslippsgrenser fra Statens Strålevern. Miljøet vil overvåkes med strålemonitører. Plantegninger som viser plassering av stasjonære målepunkter for stråleovervåkning er vedlagt⁹. Det har blitt antatt en oppholdsfaktor tilsvarende 10 % opphold i uteområdene like utenfor protonbunkersdelen, dette er et konservativt anslag da det vil være meget lite opphold i området mellom protonbunkers og fjellskråningen på østsiden og syd-østsiden i umiddelbar nærhet av bygget.
- Oppfølgende målinger av strålingsnivåer og doser i alle deler av anlegget; langsiktig arbeid med siktemål å holde dosenivåene til personalet på et minimumsnivå og for å kunne vurdere tiltak for å redusere strålenivåene ved normal operasjon og drift på et minimumsnivå.

2.2 Betongvalg og hensyn til aktivering av betong og armeringsjern

Betong

Kravspesifikasjonen for betongen som vil bli anvendt beskriver tetthet og kvalitet av betong og tilsvarende for kvalitet av armering. Prosjektet ved Haukeland universitetssjukehus har lagt til grunn de samme krav med hensyn til strålevern som de man anvendte for anlegget ved Radiumhospitalet, OUS.

Spesielt viktig er kravet om egenvekt på minimum $2,35 \text{ g/cm}^3$ i forhold til skjermingsegenskapene.

Det pågår for tiden en prosess hvor prosjektene i Oslo og Bergen søker å avklare omfanget av aktivering av betong og armeringsjern i protonbunkerdelen av byggene. Basert på erfaringer fra Dansk Center for Partikel Terapi i Århus har man gjennomført analyse av innhold i både normal betong og marmor betong, og påbegynt beregninger av aktivering av begge typer betong. Man studerer aktivering av bygget over en periode med 50 års fulldrift av anleggene.

De foreløpige resultatene peker mot at det er hensiktsmessig å anvende marmor betong i vegger, gulv og tak rundt degrader-systemet. For tiden pågår det et analysearbeid for og endelig å avklare om man også vil benytte marmor betong i det ytterste laget av betongveggene rundt syklotronen.

For å kvantifisere effekten av å anvende marmor betong med lavere egenvekt enn normal betong ble det i skjermingsberegningene for anlegget ved Haukeland universitetssjukehus antatt egenvekt på $2,2 \text{ g/cm}^3$ for den marmor betong som ble tenkt anvendt i anlegget, og i to omfang; **scenario 1**; marmor betong rundt degrader (vegger, tak, gulv) og **scenario 2**; marmor betong også rundt

⁸ Vedlegg 2: Risiko og sårbarhetsanalyse: Risikorapport Strålebruk ved protonbehandling med vurdering av risiko for påvirkning av mennesker og med en miljøkonsekvensanalyse, 12.03.2021.

⁹ Vedlegg 1-8: Beskrivelse av målepunkter for overvåkning av strålenivåer i protonterapibygg, 05.02.2021.

syklotronen (det 75 cm ytterste laget av vegger og tak). I skjermingsrapporten for anlegget blir resultatene for begge scenarier presentert. Det vises til skjermingsrapporten for detaljert oversikt over resultatene og forskjellene mellom disse to scenariene. I målsatte plantegninger over betongbunkerdelene⁴ er områder med marmor betong rundt degrader og syklotron vist i en mørkere gråfarge enn området med normal betong.

Det har etter at skjermingsberegningene ble utført blitt avklart at det vil være mulig å anvende marmor betong med egenvekt $2,35 \text{ g/cm}^3$, dette medfører at skjermingsegenskapene til betongen vil være tilnærmet uendret i forhold til valg av omfang av marmor betong i forhold til omfang av normal betong. Skjermingsegenskapene rundt protonbunkerdelene vil dermed i realiteten være tilsvarende bedre enn resultatene fra simuleringene i skjermingsrapporten, da disse ble utført med den noe lavere egenvekt for marmor betongen enn den man i virkeligheten vil kunne anvende.

Det vil bli viet betongtetthetskravet for egenvekt på minimum $2,35 \text{ g/cm}^3$ stor oppmerksomhet i byggefasen ved oppsett av et eget kontrollregime for målinger av egenvekt.

Armeringsjern

For armeringsjern er det spesielt innhold av kobolt som er avgjørende for i hvilken grad armeringsjernet rundt degrader og syklotron vil måtte behandles som spesialavfall ved fremtidig dekommisjonering av anlegget.

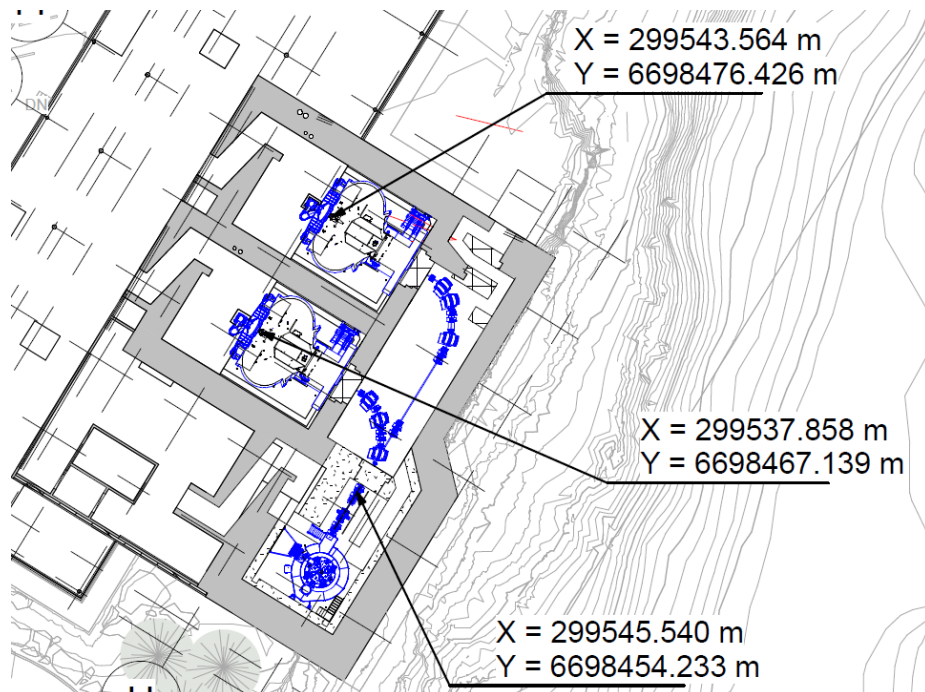
En rapport om aktivering av betong og armeringsjern vil bli oversendt DSA når dette arbeidet har blitt ferdigstilt. Prosjektorganisasjonene undersøker for tiden leveringsmulighetene for armeringsjern med så lite innhold av kobolt som mulig.

Dekommisjoneringsplan for anlegget

Det vil bli gjennomført ytterligere beregninger av aktivering av betong og armeringsjern i syklotronbunkersområdet - gjennom 50 års full drift av anlegget med den proton last man forventer - man vil i disse beregningene se på hvor mange år det tar fra drift av protonterapianlegget opphører til aktivitetsnivåene er under gjeldende grenseverdier for radioaktivt avfall.

Helseforetaket vil i sammenheng med utarbeidelse av dekommisjoneringsplan som vil bli vedlagt søknad om utslippstillatelser for anlegget, beskrive hvor lang tid anlegget må stå uten operasjon for at de radioaktive isotoper i anvendt betong og armeringsjern har henfalt til nivåer under grenseverdier for lagring som radioaktivt avfall.

2.3 Prøvetagning i grunnen under anlegget og beregning av aktivering av grunnen



Figur 10: Prøvetagning i grunnen under protonterapibygget; på figuren er de tre prøvetagningsposisjonene vist, punkt 1 er under degrader (nederst), punkt 2 er under iso-senter i forskningsrom (i midten) og punkt 3 er under ios-senter i behandlingsrom (øverst). Figur fra¹⁰.

Vinteren 2020-2021 ble det gjennomført prøvetagning i grunnen under protonterapianlegget¹⁰. Det ble tatt prøver av grunnen under degrader og under hvert iso-senter, det vises til figur 10. Prøvene ble analysert og analyseresultatene danner grunnlag for en simulering av aktivering av grunnen gjennom 50 års fulldrift av anlegget, resultatene vil bli ettersendt DSA¹¹.

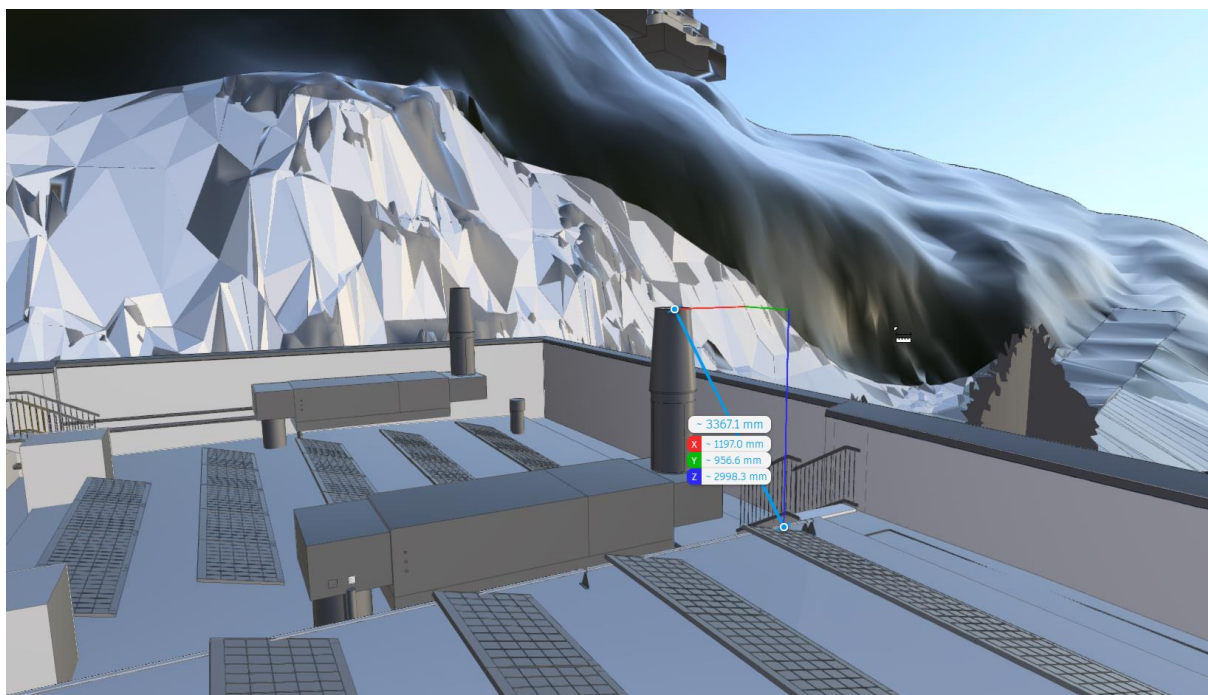
2.4 Ventilasjon av luft ut fra behandlingsrom, forskningsrom, stråletransportlinje og syklotronbunker

Den delen av ventilasjonssystemet i protonterapibygget som ventilerer luft gjennom behandlingsrom og forskningsrom, stråletransportområdet og protonbunker er beskrevet i rapport fra Meissner Consulting for beregning av aktivering av luft¹². Denne delen av ventilasjonssystemet har en maksimal kapasitet på 9400 m³ luft pr time, fordelt på to avtrekkskanaler med kapasitet 4700 m³ pr time hver.

¹⁰ Vedlegg 1-5: Sampling and characterisation of bedrock and ground water, NGI report, Doc. No. 20200501-01-R, Rev. No. 0/2021-02-03.

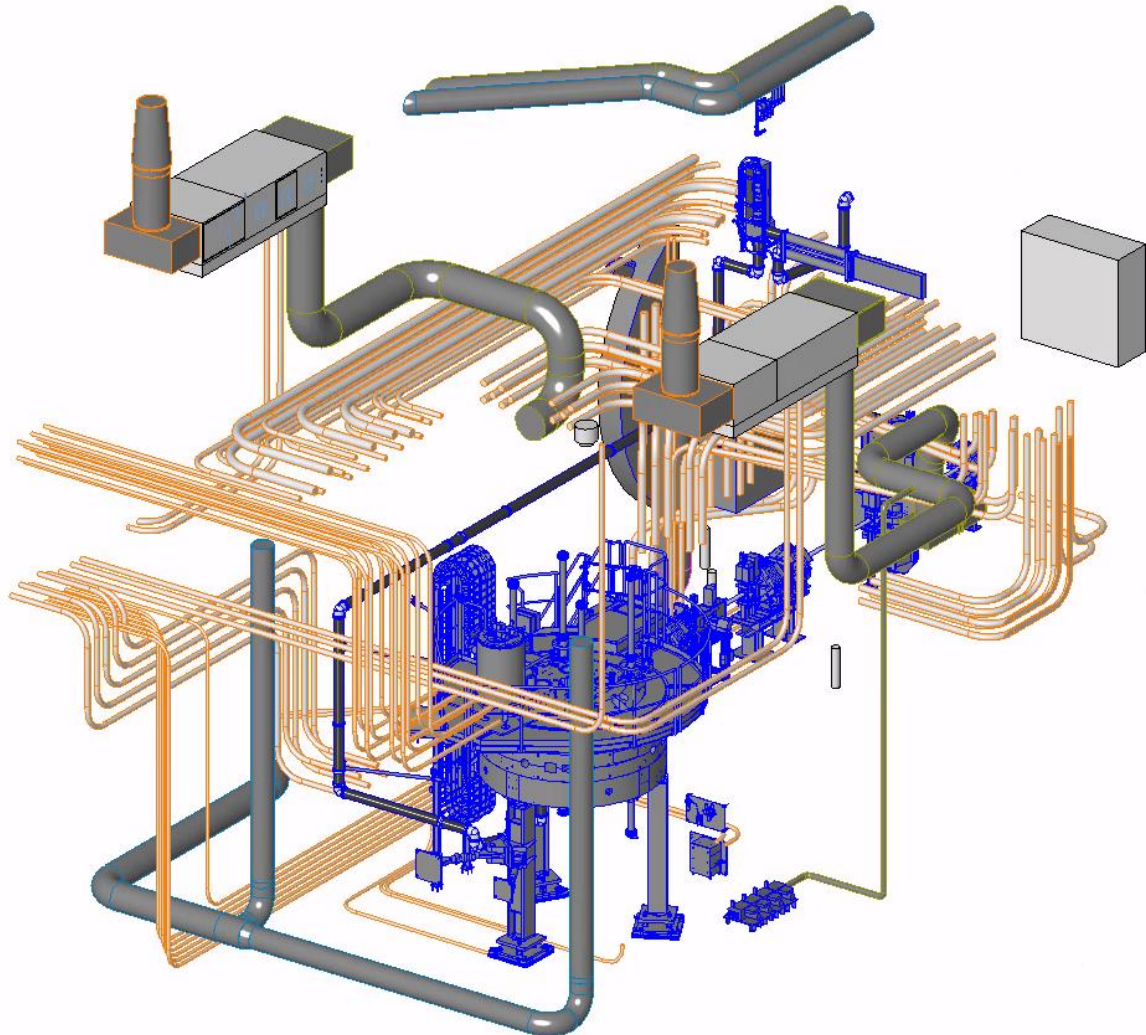
¹¹ Vedlegg 1-6: RAPPORT 3 Aktivering av grunn og konsekvenser for grunnvann, Meissner Consulting. Rapporten ettersendes, 2021.

¹² Vedlegg 1-3: RAPPORT 2 Aktivering av luft, Meissner Consulting, ProBeam 360 2 Gantry Bergen Air Activation Report, R-14.12.002 Rev. 01, 12.02.2021.



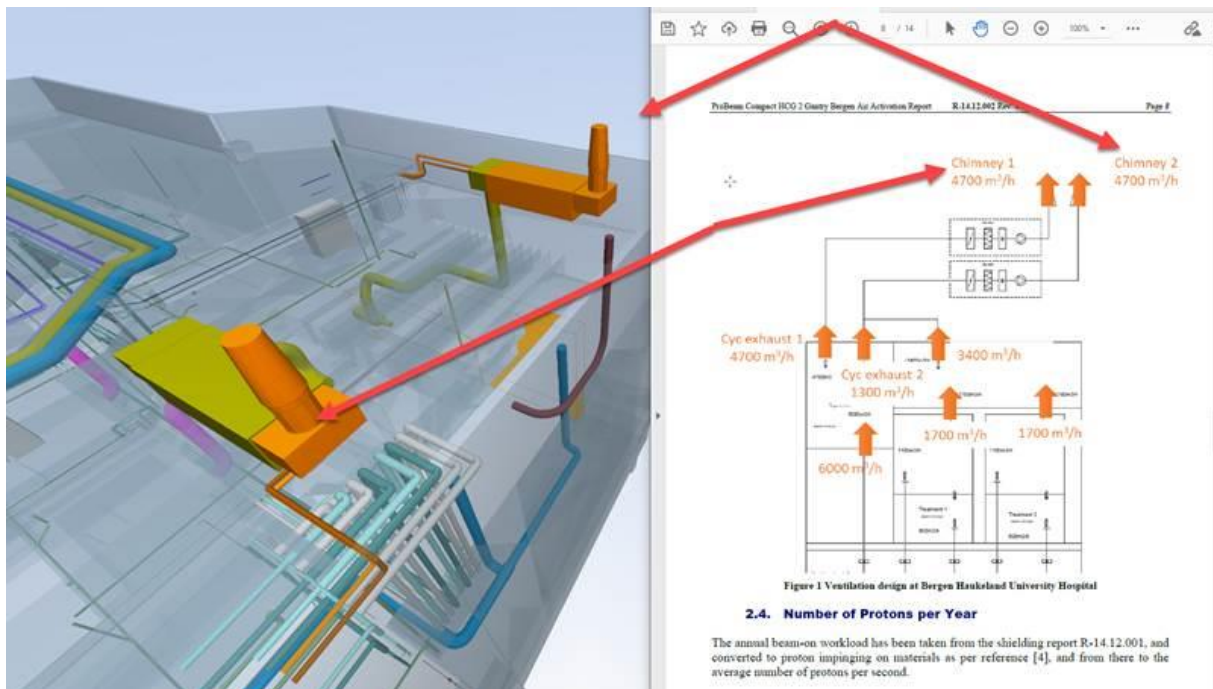
Figur 11: illustrasjon fra taket over protonbunkersdelen av bygget; ventilasjonsaggregat på taket, nærmest er pipe 1, bakenfor er pipe 2, høyden over lokalt tak er 3 meter for begge piper. Figur; Multiconsult, 2021.

Avtrekksluften går ut av dette området gjennom to ventilasjonspiper plassert på taket av syklotronbunkeren, de to pipene er plassert med en avstand på om lag 10 meter mellom hverandre, langs øst-vest akse, høyden for utslippspunktet er 3 meter over lokalt tak for begge pipene. Plasseringen av utslippspunktene er vist i vedlagte plantegninger og i figur 11. Pipe nummer 1 er plassert lengst mot vest på taket like over syklotronbunker, pipe nummer 2 er plassert lengst mot øst på taket like over syklotronbunker, se figur 11.



Figur 12: Ventilasjonssystemet i protonbunkersdelen av bygget. Ventilasjonsaggregat 1, til venstre, trekker luft ut fra syklotronbunker og ut pipe 1, ventilasjonsaggregat 2, til høyre, trekker luft ut fra begge gantry rom og strålelinjeområdet og ut pipe 2. Syklotronen er vist i grått med blått omriss. Figur; Multiconsult, 2021.

I figur 12 er ventilasjonssystemet vist for protonbunkerdelen av bygget, som figuren viser er det plassert store ventilasjonsrør oppunder tak innvendig i bunker for ventilasjonsaggregat 1 og like oppunder tak i stråletransportområdet for ventilasjonsaggregat 2. Disse to aggregatene trekker samlet luft gjennom behandlingsrom, forskningsrom og hele protonbunkerdelen av bygget. Syklotronen er vist i grått med blått omriss, som man ser av figuren, er syklotronen plassert på vertikale stag, den strekker seg vertikalt over 3 plan i bygget.



Figur 13: Plassering av ventilasjonspiper: pipe nummer 1 er plassert mot vest, pipe nummer to er plassert mot øst, på taket like over syklotronbunkereren. Figur; Multiconsult, 2021.

I rapport for beregning av aktivering av luft i er aktivitetsmengde ut gjennom hver pipe presentert med tilhørende tegninger over ventilasjonssystemet i protonterapidelen av bygget. Vi har fra denne rapporten at de mest fremtredende radioaktive isotopene som blir produsert gjennom vekselvirkning mellom primærstrålen og sekundærstråling og luften er som vist i tabell 2.

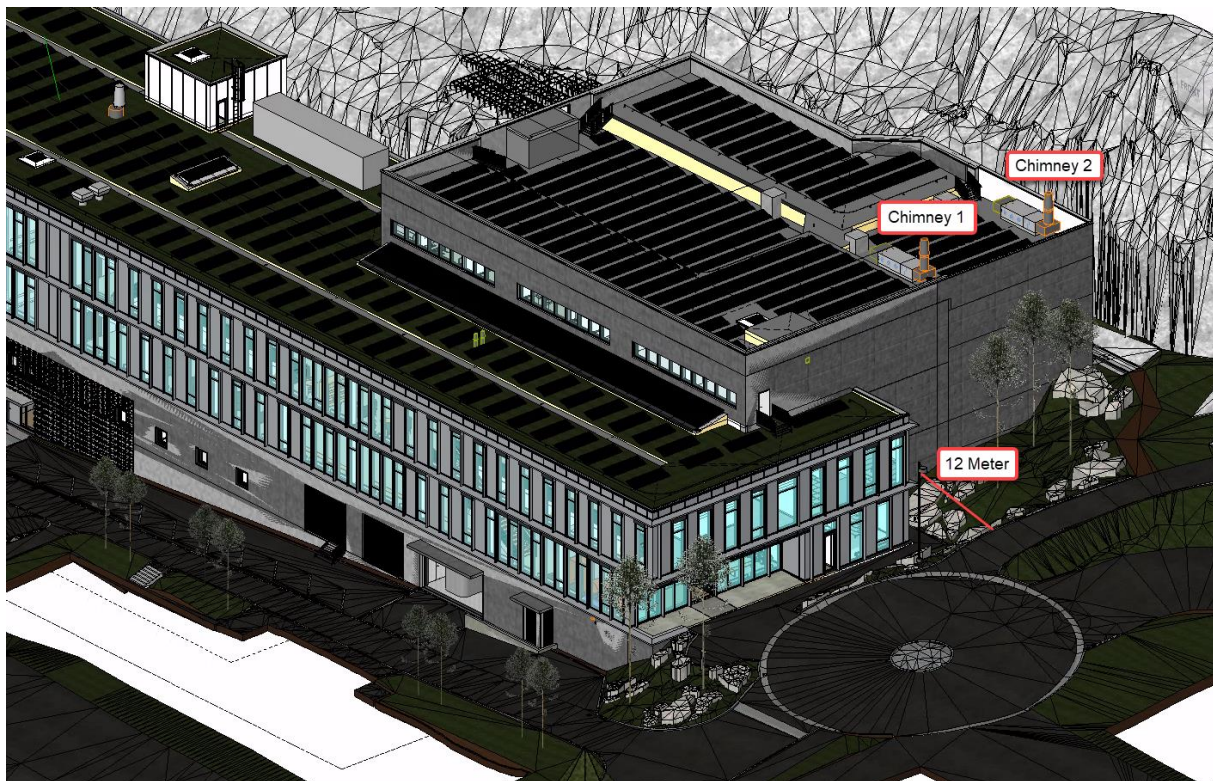
Tabell 2: De mest fremtredende radioaktive isotopene som blir produsert gjennom vekselvirkning mellom protoner og nøytroner og luft.

Isotop	H-3	Be-7	C-11	N-13	O-15	Ar-41
Halveringstid	12,32 år	58,22 dager	20,33 minutt	9,97 minutt	2,04 minutt	1,83 time

Av disse isotopene, er det størst produksjon av N-13 og O-15, og størstedelen av denne produksjonen skjer i området rundt syklotron og degrader.

Den totale utslippsmengde av radioaktivitet fra protonterapianlegget er lav, tilsvarende under 1 μSv pr år til omgivelsene¹².

Forholdet mellom radioaktivitet i luftmengdene ut gjennom pipe 1 (vestlig) og pipe 2 (østlig) er 3,5 : 1, av denne grunn ble det valgt å prosjektere inn en detektor i ventilasjons pipe 1 for overvåkning av utslipp gjennom denne. I figur 13 vises plassering av pipe 1 og pipe 2 og tall for ventilasjonskapasitet.



Figur 14: Posisjonen på tak for de to ventilasjonspipene som trekker luft ut fra bunkersdelen av protonterapibygget. Det er om lag 12 meter fra syd vegg av protonbunker til gangvei til Montana.

Figur; Multiconsult, 2021.

I figur 14 vises plassering av ventilasjonspiper på taket av protonterapibygget, også vist i figuren er avstanden fra syd vegg av protonbunker til gangvei opp mot Montana, den er om lag 12 meter.

Numerisk Fluidodynamisk beregning av fordeling av utslipp fra ventilasjonspipene fra protonbunkersdelen av anlegget

Norconsult arbeider med en CFD (Computational Fluid Dynamics) simulering av fordeling av luft ut fra protonterapianlegget og videre i området rundt anlegget. Basert på et detaljert kart over topologi og bygningsmasse i området, en modell for vindstyrker og vindretninger i et normalår, den beregnede aktivering av luften pr år i en fulldriftsituasjon med behandling i begge gantryrom, beregnet ved utslippspunktene, som grunnlag, vil fordelingen av utslipp i dette området beskrives. Resultatene vil bli oversendt til Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet så snart de foreligger for Helse Bergen HF.

2.5 Betingelser for skjermingsberegningene

Betingelsene for skjermingsberegningene er at bygget er ferdig planlagt og videre;

1. Norsk strålevern lovgivning og forskrifter følges, herav følger grenseverdier for årlig dose man i planleggingen skal ha for å holde doseverdier så langt under tillatte grenser, for mottatt dose til personale og til befolkningen for øvrig, som mulig.

2. Kunnskap er innhentet om hvilke grenseverdier for utslipp til omgivelsene man må forholde seg til.
3. Man følger det internasjonalt anerkjente ALARA prinsippet i strålevernplanleggingen.
4. Plantegninger av protonterapibygget; målsatte tegninger av alle plan i bygget, med alle rom inntegnet, rommene er nummerert og funksjonen i alle rom er kjent. Meissner Consulting har hatt tilgang til Varian Medical Systems sine designtegninger for to-roms ProBeam anlegg, inkludert alle tekniske gjennomføringer, dette bidrar til forståelsen av de tilpasninger man har foretatt enkelte steder i bunkersområdet basert på hensynet til prosjektering av systemer i tillegg til utstyr og systemer levert av Varian Medical Systems.
5. For betongvegger, strukturer og blokker har man oppgitt minimum egenvekt og en del andre krav til innhold med tanke på å holde aktivisering av betong og armeringsjern på et minimum. En del av kravene inngår som en del av en planlegging av dekommisjonering av anlegget en gang i fremtiden, etter 50 års drift.
6. Modell som viser protonterapibygget i 3D; vegger, gulv, tak, inkludert alle gjennomføringer for ventilasjon, el. forsyning, kjøling, utstyr (og målekabler).
7. Kartskisser og 3D modell over uteområdene rundt protonterapibygget, i disse fremkommer bygningsmassen rundt senteret, topologien i terrenget, adkomst muligheter rundt bygget, veier og trafikksituasjon i umiddelbar nærhet av tomten.
8. Et estimat over årlig behandlingsskapasitet i fulldriftsituasjonen; herunder all operasjon og drift for behandling, service og vedlikehold, kvalitetskontroll og forskning i bygget.
9. En modell som representerer antatt pasientfordeling i en fulldrift situasjon, dette har betydning i forhold til hvilke behandlingsenergier man vil arbeide med; hvor store volum som skal bestråles og på hvilket dyp man skal bestråle og til en viss grad hvilken behandlingsteknikk man skal anvende (bestrålingsvinkler og feltmodulering).
10. Oversikt over funksjoner i bygget og derav utledede oppholdstider gjennom arbeidsåret.
11. For å undersøke og tallfeste konsekvensene og endringer av skjermingsegenskapene til betong med en annen egenvekt for betongen enn den som inngår i kravspesifikasjonen for betong; $2,35 \text{ g/cm}^3$, ble to sett av skjermingsberegninger utført;
 - **Scenario 1** med marmor betong utelukkende rundt degrader systemet, med en egenvekt på $2,2 \text{ g/cm}^3$, hele bygget for øvrig bygget med vanlig betong, med egenvekt $2,35 \text{ g/cm}^3$. Egenvekten for marmor betong ble valgt som et konservativt nedre anslag, i ettertid har prosjektet fått informasjon om at det er uproblematisk å få marmor betong med egenvekt $2,35 \text{ g/cm}^3$.
 - **Scenario 2** med marmor betong i tillegg til rundt degrader systemet også i det ytterste 75 cm tykke laget i syklotronbunkeren rundt syklotronen - også i gulv og tak. Egenvekt av marmorbetongen også her $2,2 \text{ g/cm}^3$. Hele bygget for øvrig bygget med vanlig betong med egenvekt $2,35 \text{ g/cm}^3$.
12. Gjennomføringer (ventilasjon, elektro, kjøling, dosimetri) i betongen i området rundt protonbunkeren må planlegges og gjennomføres, med tanke på antall og plassering av bend, i henhold til de retningslinjer som prosjektet har mottatt fra Meissner Consulting, det vises til skjermingsrapporten der disse retningslinjene beskrives nærmere.

Det vises til skjermingsrapporten for ytterligere beskrivelse av premisser for beregningene.

2.6 Årlig produksjon av protoner

Vesentlig for skjermingsberegningene er en estimering av den proton produksjon anlegget må forestå for å arbeide med maksimal behandlingsskapasitet pr år for hele anlegget idet man er i stabil drift med strålebehandling i begge gantry rom. Det har i planleggingsarbeidet blitt estimert at hvert behandlingsrom vil kunne ha en maksimal behandlingsskapasitet på 290 pasienter pr år, forutsatt 25 minutt fraksjonstid og i snitt 26 behandlingsfraksjoner, og forutsatt 13 timers klinisk drift i hvert rom pr dag og 240 behandlingsdager pr år. Selv om dette er en god del år frem i tid, så er dette den antatte situasjonen under maksimal drift som man har måttet ta høyde for i skjermingsarbeidet.

For å inkludere alt strålings genererende arbeid med akselerator og de nødvendige støttesystemer, alt årlig service- og vedlikeholdsarbeid, arbeid med kvalitetssikring og kvalitetskontroll, og for å ta høyde for daglige kontroller av akselerator, strålelinjer og kliniske daglige kontroller i behandlingsrom og forskningsrom, har man lagt til grunn en årlig behandlingsskapasitet tilsvarende 400 pasienter pr gantry-rom pr år, til sammen 800 pasienter behandlet ved anlegget pr år.

Det legges til grunn at protonterapianlegget må opereres i 4000 timer pr år for å behandle til sammen 800 pasienter. Det legges videre til grunn at for yrkeseksponert personell tilsvarer 2000 timer et fullt arbeidsår.

Det vil være viktig å skille mellom a) situasjonen hvor akseleratorsystemet er på, men hvor man ikke sender primærstrålen videre ut i systemet for pasientbehandling, og b) situasjonen hvor man behandler pasienter med primærstrålen.

Stråleskjermingen vil måtte ta høyde for situasjonen med størst strålingsproduksjon, det vil normalt si situasjonen hvor man behandler pasienter, men det vil også kunne være i situasjoner med service og vedlikehold av systemet hvor stråleproduksjonen i deler av systemet når maksimalnivåer.

Man vil i overskuelig fremtid behandle pasientene sekvensielt, ikke parallelt, det vil si at man alltid vil ha primærstråle i et behandlingsrom av gangen, dette vil komme til uttrykk i form av bestrålingstider og oppholdstider for de respektive rom i anlegget.

For behandlingsrommene er maksimalenergien til primærstrålen, og dermed maksimalenergien til nøytronstrålingen av betydning for skjermingsbehovet, primærstrålens retning i rommet er også av betydning, i behandlingsrom med roterbart gantry vil man vekte strålingens retning i rommet basert på antatt gjennomsnittlig like stor bruk av hoved gantry vinklene 0° og vinkelrett på 0°; det vil si 25 % behandling med hhv 0°, 90°, 180° og 270° gantryvinkel.

2.7 Klinisk behandlingsmodell (pasient miks)

Med utgangspunkt i en forventet pasient sammensetning når man har kommet i gang med protonterapi i Norge og har oppnådd erfaring med pasientfordelingen, under antagelsen at man antageligvis vil se en dynamikk i hvilke pasientgrupper som vil bli tilbudt protonterapi over tid, kunne man estimere seg frem til en fordeling mellom diagnose grupper representativ for pasientfordeling på noe lengre sikt. Helse Bergen HF gikk inn for en pasient fordeling som vist i tabell 3.

Tabell 3: Klinisk pasient behandlingsmodell (pasient miks):

Pasientgruppe	Antall pasienter pr år
Hjerne	100
Hode og hals	40
Bekken/Gynekologisk/Rectum	80
CNS/Lunge/Bryst	120
Thorax	40
Prostata	20
Totalt pr gantry rom	400

Når det gjelder valg av klinisk behandlingsmodell så ligger betydningen av denne i denne sammenhengen i hvilke energier de forskjellige tumorgruppene krever for behandling av tumor og marginer.

Sekundærstrålingen fra nøytronfeltet som genereres i energiutvelgelsessystemet og i degrader-systemet er funksjon av omfanget av energimoduleringen som finner sted i disse systemene. Pasient miksen gir grunnlag for å estimere hvilke behandlingsenergier man vil måtte forutsette at senteret vil arbeide med i løpet av et år i en fulldrift situasjon.

I situasjoner hvor man behandler dyptliggende målvolument, vil bestrålingen skje med relativt høye protonenergier, dette innebærer mindre reduksjon av energien til protonstrålene ut fra syklotronen og gjennom energijusteringsystemet, med en tilsvarende relativt større grad av vekselvirkning, nøytronproduksjon, inne i selve pasienten.

I situasjoner hvor man behandler målvolument på grunn dyp, vil man måtte redusere protonenergien i større grad før man når frem til pasienten, dette innebærer en større produksjon av nøytroner i degrader området.

Dess mer materiale protonstrålen traverserer gjennom, dess større reduksjon av energien finner sted, siden en større del av vekselvirkning mellom primærstrålen med protoner og degrader materialet innebærer en større produksjon av sekundær stråling i dette området.

Varian Medical Systems har utarbeidet en detaljert rapport som viser hvor i anlegget det forekommer stråletap⁶, dette dokumentet forklarer en del av grunnpremissene for skjermingsberegningene da man her viser hvor i systemet stråletap til omgivelsene rundt protonstrålelinjen foregår.

2.8 Beregning av årsdoser til et sett av posisjoner i protonterapibygget

Skjermingsrapporten presenterer premisser og underlag for beregningene, detaljerte, målsatte, medfølgende plantegninger viser posisjonen i bygget til et sett av målepunkter som danner grunnlaget for bestemmelse av skjermingsegenskapene til bygget.

I resultatdelen av rapporten presenteres årlig omgivelsesdose og ekvivalent helkroppsdose på årsbasis til alle måleposisjonene som er listet opp i tabell 4.

Tabell 4: Oversikt over målepunkter for doseverdier og helkroppsdozer på årsbasis i skjermingsberegningene.

Posisjon	Romnummer	Type rom	Etasje
P1	46.11.048	Korridor, forskningskorridor (nær taket)	1. ETG.
P2	46.09.006	Over himling i sluse, dyr og utstyr til pre-klinisk forskning	1. ETG.
T1	46.03.014	Utenfor syklotron (maze) inngang	2. ETG.
T2	46.03.018	Lager, aktivert materiale (mot forskningsrom)	2. ETG.
T2'	46.03.014	Varian Service Area	2. ETG.
T3	Utvendig	På utsiden av BTS mot øst	2. ETG.
T4	Utvendig	På utsiden av syklotronbunker mot øst	2. ETG.
T5	Utvendig	På utsiden av syklotronbunker mot syd	2. ETG.
T6	46.03.014	Varian Service Area	2. ETG.
T7	46.03.014	Utenfor syklotron inngang	2. ETG.
T8	46.05.028	Lager ved inngang behandlingsrom	2. ETG.
T9	46.11.043	I korridor like utenfor inngang behandlingsrom	2. ETG.
T10	46.09.016	Inne i forskningsrom ved vegg mot nord	2. ETG.
T11	46.05.002	Inne i behandlingsrom ved vegg mot syd	2. ETG.
T12_G2	46.05.002	Isosenter behandlingsrom; stråling på i forskningsrom	2. ETG.
T12_G1	46.09.016	Isosenter forskningsrom; stråling på i behandlingsrom	2. ETG.
T13	Utvendig	Nedgang trapp på nordsiden av behandlingsrom	2. ETG.
T14	Utvendig	På utsiden av nødutgang fra BTS mot nord	2. ETG.
T15	Utvendig	På utsiden av BTS mot øst	2. ETG.
T16	46.11.043	I korridor nord for inngang behandlingsrom	2. ETG.
U1	46.03.013	BT Area SR1, over degrader	3. ETG.
U2	46.03.015	Cryogenics and Water room, over Varian Server Room	3. ETG.
U3	46.11.046	Korridor til Varian kontor PTE (ved gulv)	3. ETG.
U3'	Kanal	I kanal over maze vest for behandlingsbunker	3. ETG.
U4	46.03.004	Magnet Power Supply Room (PSR), over BTS (ved gulv)	3. ETG.
U5	46.03.019	PSR Service Access, korridor over syklotron	3. ETG.
V1	46.03.001	Kontor, PTE Varian, kontor vest for behandlingsbunker	3. ETG.
V2	46.03.012	Cyclotron electrical room (SR3), over degrader	3. ETG.
V3	Utvendig	På taket over syklotronen, ventilasjonspipe 2	Taket
V4	Utvendig	På taket over syklotronen, ventilasjonspipe 1	Taket
V5	Utvendig	På taket over syklotronen ved ventilasjons Quench pipe	Taket
V6	Ventilasjonskanal	Under ventilasjonskanal til behandlingsrom	1. ETG.
V7	Ventilasjonskanal	Under ventilasjonskanal til forskningsrom	1. ETG.
V8	Ventilasjonskanal	Nær ventilasjonskanal inne i møterom	1. UETG.
R1	Utvendig	På taket; på takluken over syklotronen	Taket
R2	Utvendig	På taket; på takluken over isosenter for behandlingsrom	Taket
R3	Utvendig	På taket over degrader og SR3 (hulldekke)	Taket

2.9 Resultater fra skjermingsberegningene

Skjermingsberegningene har blitt gjennomført av Meissner Consulting GmbH, München, Tyskland, på oppdrag fra Varian Medical Systems, som en del av leverandørens forpliktelser overfor eier av protonterapi anlegget, regulert gjennom aksept av kravspesifikasjonen. Skjermingsrapporten¹³ ble mottatt 27.11.2020. For beregningene ble Monte Carlo simuleringprogrammet Monte Carlo N-Particle Transport versjon 6.2 (MCNP6.2) anvendt.

Monte Carlo beregningene ble gjennomført på grunnlag av en geometrisk modell som representerte bygget i 3 dimensjoner; alle veggtykkelser og romstørrelser er inkludert, gjennomføringer (strålelinjer, ventilasjon, kjølevann, elektro) var inntegnet med beskrivelse av materialer (betong og tetthet til betongen) i bygget var med som grunnlag. I tillegg lå oppholdstider i alle rom, en klinisk behandlingsmodell (pasient miks) og grenseverdier i norsk strålevern lovgivning som basis for beregningene.

Resultatene for **Scenario 1** og **Scenario 2**, de to forskjellige variantene av omfang av marmor betong, scenario1 med marmor betong med egenvekt lik $2,2 \text{ g/cm}^3$ kun rundt degrader systemet (vegger, gulv og tak), scenario 2 der man i tillegg anvendte marmor betong i det ytterste 75 cm tykke laget av vegger, gulv og tak rundt syklotronen, viser kun små forskjeller totalt sett i de måleposisjonene man studerer.

Resultatene viser at dose rate i måleposisjonene utenfor syklotron bunkeren er noe høyere i Scenario 2, med bruk av marmor betong med lav egenvekt i området rundt syklotronen. Protonterapisenteret kommer til å bli bygget med $2,35 \text{ g/cm}^3$ som minimumskrav til betongens egenvekt uavhengig av om betongen er av normal type eller marmor betong.

Skjermingsrapporten presenterer en liste av hovedkonklusjoner og forklaring av hvilke gjennomføringer og systemer man har inkludert i vurderingene, det vises til den vedlagte rapporten.

Konklusjonene fra skjermingsberegningene:

I skjermingsrapportens kapittel 4.3, Conclusions, presenteres samtlige konklusjoner, det vises til rapporten¹³.

Hovedkonklusjon; for begge scenariene, **Scenario 1** og **Scenario 2**, viser skjermingsrapporten at alle målepunkter har beregnede verdier for mottatt helkropps dose som tilfredsstillende myndighetskrav for ekvivalent helkropps dose på årsbasis.

Skjermingsberegningene viser at protonterapibygget er tilstrekkelig skjermet forutsatt at man har adgangskontroll og adgangsbegrensninger for de nærmere spesifiserte arealer i byggets 3. etasje; de tekniske rommene i arealet over degrader og stråletransport området, samt på taket over dette området.

¹³ Vedlegg 1-2A: RAPPORT 1 Shielding Report, Meissner consulting, R-14.12.001_00 Bergen Shielding rev 00, 27.11.2020.

Ansvarlig eier av protonterapianlegget, Haukeland universitetssjukehus, Helse Bergen HF, må sørge for;

- At arealet ved posisjon **U1** (rom 46.03.013), kalt **SR1**, i 3. etasje i bygget, plassert i etasjen over energijusterings/degrader-systemet, må adgangsreguleres for å opprettholde kontroll med oppholdstid og doser til personalet, man må her måle og logge doser til omgivelsene, person dosimetre må bæres ved opphold her.
- At arealet ved posisjon **V2** (rom 46.03.012), kalt **SR3**, i 3. etasje i bygget, plassert i etasjen over energijusterings/degrader-systemet, må adgangsreguleres for å opprettholde kontroll med oppholdstid og doser til personalet, man må her måle og logge doser til omgivelsene, person dosimetre må bæres ved opphold her.
- At **taket** over el. forsynings areal, posisjonen benevnt **R3**, plassert over **U1** og **V2**, like over energijusterings/degrader-systemet, må adgangsreguleres for å opprettholde kontroll med oppholdstid og doser til personalet, man må her måle og logge doser til omgivelsene, person dosimetre må bæres ved opphold her.
- Det er anbefalt å måle og logge dosen til omgivelsene;
 1. I det overvåkede området, se avsnittet om adgangs regulering; det anbefales å plassere målepunkt mellom posisjonene **SR1** og **SR3**.
 2. Ved (maze) inngang til syklotron, **T7**, og behandlingsrom og forskningsrom og i arbeidsposisjoner, **T10** og **T11**, inne i behandlingsrommene.
 3. Det anbefales å montere nøytron detektor ved posisjon **U1** og å evaluere måleresultatene kvartalsvis.

De kontrollerte områdene i bygget; syklotronbunker, stråletransport området, bakre teknisk del av gantry rommene, vil ikke være tilgjengelige under operasjon (under bestråling eller operasjon av syklotronen med stråle på), dette forutsetter streng kontroll med interlock-, overvåknings- og kontrollsystemer i anlegget. Dette vil bli ivaretatt.

3 Oversikt over samtlige rom i protonterapibygget

Her vises en oversikt over samtlige rom, funksjon og romnummer i plantegningene for samtlige plan i protonterapi bygget. Oppholdstidene er i tråd med retningslinjer for dette i strålevernssammenheng, f. eks. har kontrollrom en oppholds faktor tilsvarende 100 % opphold i arbeidstiden (1.0), en korridor har normalt en oppholds faktor tilsvarende 10 % opphold i arbeidstiden (0.1), skannerrom har en oppholds faktor tilsvarende 25 % opphold i arbeidstiden (0.25). Det vises til tabell 4.

For alt personale som arbeider i protonterapibygget vil 100 % opphold i bygget tilsvare 2000 arbeidstimer pr år.

For noen arealer har man valgt mer konservative oppholds faktorer enn strengt tatt påkrevd i forhold til rom kategori, dette for å være på den sikre siden i forbindelse med skjermingsberegninger, i betydningen mer opphold i beregningene enn man egentlig forventer, for å ha noe større sikkerhets margin, med tanke på den langsiktige bruk av disse arealene.

For mesteparten av rommene i klinikkdelen av bygget, kan man i all hovedsak se vekk fra betydningen av oppholds faktorer, disse rommene er listet opp for at skjermingskonsulentene skulle ha full oversikt over hele bygget.

Det er meget viktig å angi realistiske og konservative oppholds faktorer for arealene og rommene rundt og i tilknytning til bunkersdelen. For selve syklotron bunkers og stråletransport området oppgis det ikke oppholds faktorer for, da det aldri kommer til å kunne oppholde seg noen i disse områdene ved operasjon og drift av protonterapi med stråling på.

Tabell 4: oversikt over samtlige rom i protonterapibygget, inkludert hovedfunksjon og oppholds faktor.

Etasje: PLAN 2. UETG			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.10.028	Etasje ford.	Technical room	0.1
46.11.001	Trapp 1	Staircase #1	0.1
46.11.002	Trapp 2	Staircase #2	0.1
46.11.003	Trapp 3	Staircase #3	0.1
46.11.012	Heis 1	Elevator #1	0.1
46.11.014	Heis 3	Elevator #3	0.1
46.11.015	Heis 4	Elevator #4	0.1
46.11.016	Heis 5	Elevator #5	0.1
?	Lager, disp.	Storage	0.1
46.11.060	Forrom	Hallway	0.1
46.11.061	Forrom	Hallway	0.1
46.11.063	Forrom	Hallway	0.1
46.11.077	Forrom	Hallway	0.1
46.11.094	Trapp 4	Staircase #4	0.1
46.12.001	Parkering	Parking	0.1
Etasje: PLAN 1. UETG			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.01.004	Renh. sentral	Facility central	0.1
46.01.010	WC	WC, staff	0.1
46.01.015	Avfallsrom, sentral	Facility service central	0.1
46.01.016	Lager, Mottak	Storage	0.25
46.01.017	Varemtotak	Supply delivery	0.25
46.01.018	Ladestasjon	Charging station	0.1
46.01.020	Lager	Storage	0.1
46.01.021	Renhold	Facility services	1.0
46.01.022	Tøylager, urent	Clothes, used	0.25
46.01.023	Tøylager, rent	Clothes, clean, unused	0.25

46.01.024	Hospitaldrift	Facility management	1.0
46.02.003	Garderobe, kvinner	Wardrobe, women	0.25
46.02.004	Garderobe, menn	Wardrobe, men	0.25
46.02.010	Toalett, HC	WC, HC, staff	0.25
46.02.036	Tørkerom	Drying room	0.25
46.02.042	Lager	Storage	0.1
46.02.062	Lager, rekvisita	Storage	0.1
46.03.003	Teknisk gass	Technical area, gas	0.1
46.03.021	Radioaktivt vann	Technical area, delay tank	0.1
46.04.040	Lager, disp	Storage, radiation therapy	0.1
46.06.018	Lager, undersøkelse, sykepl.	Storage	0.1
46.10.001	Transformator, normalkraft	Technical area, transformers normal supply	0.1
46.10.002	Transformator, nødstrøm	Technical area, transformers, backup supply	0.1
46.10.003	Hovedfordeling, normalkraft+Varian	Technical area, main power distribution+Varian	0.1
46.10.004	Hovedtavle, nødstrøm	Main distr. Backup supply	0.1
46.10.010	Etasje ford.	Technical area	0.1
46.10.011	Etasje ford.	Technical area	0.1
46.10.012	MU serverrom	Technical area	0.1
46.10.013	UPS Varian	Technical area, UPS Varian	0.1
46.10.016	IKT-Patche rom	IT Technical area	0.1
46.10.021	Teknikk, vandinntak	Technical area	0.1
46.10.022	Teknikk, varme	Technical area	0.1
46.10.023	Teknikk, sprinkler	Technical area	0.1
46.10.030	Teknikk, ventilasjon, kjøling	Technical area, ventilation, cooling	0.1
46.10.031	Teknikk, Gass	Technical area, gas	0.1
46.10.032	Teknikk, trykkluft	Technical area	0.1
46.10.033	Lager, disp.	Storage	0.1
46.10.034	Lager, disp.	Storage	0.1
46.10.037	Teknikkrom, verksted	Technical area, workshop	0.25
46.10.038	UPS, bygg	Technical area, UPS	0.1
46.10.039	UPS, batterirom, bygg	Technical area, UPS	0.1
46.10.040	Lager, teknisk avdeling	Technical area, storage	0.25
46.11.012	Heis 1	Elevator #1	0.1
46.11.014	Heis 3	Elevator #3	0.1
46.11.015	Heis 4	Elevator #4	0.1
46.11.016	Heis 5	Elevator #5	0.1
46.11.034	Korridor	Hallway, corridor	0.1

46.11.035	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.036	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.052	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.065	Forrom	Hallway	0.1
46.11.066	Forrom	Hallway	0.1
46.11.067	Forrom	Hallway	0.1
46.11.068	Forrom	Hallway	0.1
46.11.082	Trapp 1	Staircase #1	0.1
46.11.086	Trapp 2	Staircase #2	0.1
46.11.090	Trapp 3	Staircase #3	0.1
46.11.095	Trapp 4	Staircase #4	0.1
46.11.103	Korridor	Hallway, corridor	0.1
Etasje: Plan 1. ETG			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.01.005	Avfall, miljøst.	Facility room	0.1
46.02.006	Personalrom	Lunch room staff	1.0
46.02.011	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.020	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.021	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.022	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.023	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.024	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.025	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.026	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.028	Konferanserom	Conference room	1.0
46.02.029	Prosjektrum	Project, conference room	1.0
46.02.030	Møterom	Meeting room	1.0
46.02.031	Møterom	Meeting room	1.0
46.02.032	Kopi	Copy room	0.25
46.02.035	Tekjøkken	Tea kitchen	0.25
46.02.037	WC, HC, pers	WC, HC, staff	0.25
46.02.038	WC, pers.	WC, staff	0.25
46.02.039	WC, pers.	WC, staff	0.25
46.02.040	Forrom	Hallway	0.25
46.02.041	Samtalerom	Meeting room	1.0
46.02.044	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.045	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.046	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.047	Kontor, 2 pers.	Office staff	1.0
46.02.049	Opphold, pause	Staff pause area	1.0
46.02.059	Opphold, pause	Staff waiting area	1.0
46.02.060	Opphold, pause	Patient waiting area	1.0
46.02.061	Lager, konferanse	Storage, conference	0.1

46.03.007	Delelagerrom	Spare parts Varian	0.25
46.03.024	Gantry Support Room Pit 2		0.1
46.03.025	Gantry Support Room Pit 1		0.1
46.03.029	Lager, Gass, ute	Outdoor gas storage	0.1
46.07.002	Vindfang	Entrance	0.25
46.07.003	Resepsjon	Reception	1.0
46.07.004	Vent. voksne	Patient waiting area	1.0
46.07.005	Vente voksne/barn	Patient waiting area	1.0
46.07.007	WC, pasient	WC, patients	0.25
46.07.008	WC, pers.	WC, staff	0.25
46.07.009	WC, pasient	WC, patients	0.25
46.07.010	Stillerom	Quiet waiting area	1.0
46.07.011	Bøttekott	Facility service	0.1
46.07.013	Information	Information area	1.0
46.07.014	Kafe /aut.	Coffee machine area	1.0
46.07.016	Lager, printerrom	Storage, printer room	0.25
46.07.017	Opphold, frivillige	Patient and staff	1.0
46.08.001	Undersøkelsesrom	Examination room	1.0
46.08.002	Undersøkelsesrom	Examination room	1.0
46.08.003	Undersøkelsesrom	Examination room	1.0
46.08.004	Undersøkelsesrom	Examination room	1.0
46.08.005	Prøvetakingsrom	Test sample room	1.0
46.08.006	Laboratorium	Laboratory	1.0
46.08.007	Medisinrom	Medicine room	1.0
46.08.008	Lager	Storage room	0.25
46.08.009	Kopierom	Copy room	0.25
46.08.010	Arbeidsstasjoner, sekretær	Workstations, secretaries	1.0
46.08.011	Arbeidsstasjoner, sykepleier	Workstations, nurses	1.0
46.08.015	WC, pasient	WC, patient	0.25
46.08.016	Kontor, 4 pers.	Office, staff	1.0
46.08.017	Bøttekott	Facility room	0.1
46.08.018	Venterom, voksne, barn	Patient waiting area	1.0
46.08.021	Skyllerom	Cleaning room	0.1
46.08.022	WC, HC, pasient	WC, HC, patient	0.25
46.08.023	Nisje, seng	Bed waiting area	1.0
46.08.024	Nisje, senge	Bed waiting area	1.0
46.09.001	Oppstalling dyr	Animal laboratory	1.0
46.09.002	Lager, forskning	Storage research	1.0
46.09.003	Procedurerom	Research laboratory	1.0
46.09.004	Sluse, person	Pass-through research	1.0
46.09.005	Luftsl.	Pass-through research	1.0

46.09.006	Sluse, dyr og utstyr	Pass-through research	1.0
46.09.010	Kontor, 2 pers.	Office, staff	1.0
46.09.011	Kontor, 2 pers.	Office, staff	1.0
46.09.012	Kontor, 2 pers.	Office, staff	1.0
46.09.025	WC, pers.	WC staff	0.25
46.10.006	Etasje ford.	Technical area	0.1
46.10.008	Etasje ford.	Technical area	0.1
46.10.018	IKT-Patche rom	IT Technical area	0.1
46.11.012	Heis 1	Elevator #1	0.1
46.11.014	Heis 3	Elevator #3	0.1
46.11.015	Heis 4	Elevator #4	0.1
46.11.016	Heis 5	Elevator #5	0.1
46.11.023	Sjakt 1	Technical area #1	0.1
46.11.024	Sjakt 2	Technical area #2	0.1
46.11.026	Sjakt 4	Technical area 4	0.1
46.11.038	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.040	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.048	Korridor	Hallway, corridor, research	0.25
46.11.062	Forrom	Hallway	0.1
46.11.064	Forrom	Hallway	0.1
46.11.069	Forrom	Hallway	0.1
46.11.070	Forrom	Hallway	0.1
46.11.083	Trapp 1	Staircase #1	0.1
46.11.087	Trapp 2	Staircase #2	0.1
46.11.091	Trapp 3	Staircase #3	0.1
46.11.096	Trapp 4	Staircase #4	0.1
46.11.100	Vestibyle	Reception area	1.0
46.11.101	Forrom	Hallway	0.1
46.11.102	Korridor	Hallway, corridor, conference area	0.25
Etasje: Plan 2. ETG – Behandlingsetasje (Isosenter nivå)			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.01.006	Avfall, miljø	Waste, recycling	0.1
46.03.005	SCR	Cyclotron main control room	1.0
46.03.006	Storage room radioactive parts	Controlled storage room	0.1
46.03.008	Cyclotron room Akselerator	Cyclotron bunker	
46.03.009	Gantry Support Room 1	Research gantry	
46.03.010	Gantry Support Room 2	Treatment gantry	
46.03.011	BTS-Area		
46.03.014	Varian Service Area	Varian service area	1.0

46.03.016	ESS-Area	ESS and Degrader	
46.03.017	BTS-Area Corridor	BTS corridor	
46.03.018	Cyclotron Maze	Cyclotron maze	
46.03.031	Serverrom, SCR	Server room Varian	1.0
46.04.001	CT -skanner	CT scanner room	0.25
46.04.002	Forberedelsesrom	Patient preparation CT	1.0
46.04.004	Teknikkrom CT	Technical room CT	0.1
46.04.005	Teknikrom	Technical room scanner	0.1
46.04.006	MR- skanner	MR scanner room	0.25
46.04.007	Forberedelsesrom, MR	Patient preparation MR	1.0
46.04.008	Teknikkrom MR	Technical room MR	0.1
46.04.009	Skanner Fremtidig- afbildning	Scanner (future) dose verification	0.25
46.04.010	WC, pasient	Patient WC	0.25
46.04.011	WC, pasient	Patient WC	0.25
46.04.013	Omkl.	Patient changing room	0.25
46.04.014	Omkl.	Patient changing room	0.25
46.04.015	Omkl.	Patient changing room	0.25
46.04.016	Omkl.	Patient changing room	0.25
46.04.019	Kontrollrom MR	Control room MR	1.0
46.04.020	Kontrollrom	Control room future scanner	1.0
46.04.021	Kontrollrom, CT	Control room CT	1.0
46.04.022	Pasient fiksering	Patient fixation	1.0
46.04.023	Tilvrik./oppbevar av fikseringsutst.	Fixation and preparation	0.25
46.04.027	Lager	Storage room	0.1
46.04.028	Bøttekott	Facility service	0.1
46.04.029	Kontor, radiologer	Office, staff	1.0
46.04.030	WC, pers.	WC staff	0.25
46.04.035	Forrum	Hallway	0.25
46.04.037	Venterom/seng	Patient waiting area, bed	1.0
46.04.038	WC, CT	WC inne på CT	0.25
46.04.039	WC, HC, pers	Staff HC WC	0.25
46.05.002	Treatment Area 2	Treatment room	0.25
46.05.004	Kontrollrom, pasient	Treatment control room	1.0
46.05.006	Omkl.	Changing room patient	0.25
46.05.007	Omkl.	Changing room patient	0.25
46.05.010	Anestesi forberedelse	Anesthesia, preparation wake up	1.0
46.05.014	Dosimetrirom	Dosimetry storage	0.25
46.05.015	Vente voksen/barn	Patient waiting area	1.0
46.05.018	Lager	Storage	0.1
46.05.022	WC, pers	Staff WC	0.25
46.05.024	Sluse, senge, samtalerom	Pass-through patient	1.0
46.05.026	Maze, gantry 2	Maze treatment room	0.25
46.05.027	Serverrom	Server room	0.25

46.05.028	Lager	Storage room	0.1
46.05.029	X-Ray alcove 2	In-Room imaging station 2	0.25
46.05.030	Sluse, senge, samtalerom	Pass-through patient	1.0
46.05.031	Omkl.	Changing room patient	0.25
46.05.032	Omkl.	Changing room patient	0.25
46.05.033	Forrom	Hallway WC	0.25
46.05.034	Lager	Storage room	0.1
46.05.035	Toalett Pasient	Patient WC	0.25
46.06.002	Inntegner rom	Office, staff	1.0
46.06.003	Inntegner rom	Office, staff	1.0
46.06.004	Konferanserom	Conference room	1.0
46.06.006	Kontor, 2 plass	Office, staff	1.0
46.06.007	Kontor, 2 plasser	Office, staff	1.0
46.06.008	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.009	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.010	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.011	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.012	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.013	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.014	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.015	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.016	Kontor, 2 pers	Office, staff	1.0
46.06.017	Opphold, pause	Resting, pause staff	1.0
46.07.018	WC, HC	HC, WC	0.25
46.09.007	Laboratorium	Laboratory	1.0
46.09.008	Sluse, cellelab	Pass-through to cell lab	1.0
46.09.009	Arbeidsstasjon, fysikk	Physics research support room	1.0
46.09.014	WC, pers	Staff WC	0.25
46.09.016	Treatment Area 1	Research Room	0.25
46.09.017	Maze, gantry 1	Maze research room	0.25
46.09.018	Serverrom	Server room	0.25
46.09.020	Kontor, 2 pers	Office for 2 persons	1.0
46.09.022	Lager	Storage	0.1
46.09.024	X-Ray alcove 1	In-Room imaging station 1	0.25
46.09.026	Kontrollrom, forskning	Control room research	1.0
46.10.007	Etasje ford.	Technical room	0.1
46.10.009	Etasje ford.	Technical room	0.1
46.10.019	IKT-Patche rom	IT Technical room	0.1
46.11.012	Heis 1	Elevator #1	0.1
46.11.014	Heis 3	Elevator #3	0.1
46.11.015	Heis 4	Elevator #4	0.1
46.11.016	Heis 5	Elevator #5	0.1

46.11.017	Opphold, pause	Resting and pause area	1.0
46.11.027	Sjakt 1	Technical are	0.1
46.11.029	Sjakt 2	Technical area	0.1
46.11.039	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.041	Korridor	Hallway and pause area	1.0
46.11.042	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.043	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.044	Korridor	Hallway and waiting area	1.0
46.11.045	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.047	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.049	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.050	Korridor	Hallway, corridor	0.1
46.11.056	Nisje	Future copy/printer	0.1
46.11.071	Forrom	Hallway	0.1
46.11.072	Forrom	Hallway	0.1
46.11.073	Forrom	Hallway	0.1
46.11.074	Forrom	Hallway	0.1
46.11.088	Trapp 2	Stairway #2	0.1
46.11.092	Trapp 3	Stairway #3	0.1
46.11.097	Trapp 4	Stairway #4	0.1
Etasje: Plan 3. ETG			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.03.001	Kontor, PTE	Office, Varian staff	1.0
46.03.002	Kontor, PTE	Office, Varian staff	1.0
46.03.004	Magnetic Power Supply Room (PSR)	Technical room – Varian	0.1
46.03.012	Cyclotron electrical room	Technical room – Varian	0.1
46.03.013	BT Area SR1	Technical room - Varian	0.1
46.03.015	Cryogenics and Water Room	Technical room - Varian	0.1
46.03.019	PSR Service access	Technical room - Varian	0.1
46.03.022	Bøttekott	Facility	0.1
46.03.023	WC, HC, pers	WC HC staff - Varian	0.25
46.03.030	Tekjøkken	Tea kitchen - Varian	1.0
46.03.032	IKT rom	Technical room	0.1
46.03.033	Lager, disp.	Storage room	0,1
46.10.005	Etasje ford.	Technical room	0.1
46.10.041	Teknikkrom, solceller	Technical room, solar cell	0,1
46.11.012	Heis 1	Elevator #1	0.1
46.11.014	Heis 3	Elevator #3	0.1
46.11.046	Korridor	Hallway	0.1
46.11.075	Forrom	Hallway	0.1

46.11.078	Forrom	Hallway	0.1
46.11.085	Trapp 1	Staircase #1	0.1
46.11.089	Trapp 2	Straircase #2	0.1
46.11.093	Trapp 3	Staircase #3	0.1
46.12.002	Teknikk, tak	Technical area - roof	0.1
46.12.003	Terrasse	Terrace	0,1
Etasje: Takplan			
Rom nummer	Rom navn	Funksjon	Oppholdsfaktor
46.10.042	Teknikkrom, solceller	Technical room, solar cell	0,1

4 Kravspesifikasjonen i forhold til strålevern

Konkurransen for anskaffelse av utstyr for de norske protonterapianleggene ble igangsatt sommeren 2018, kontrakt mellom den leverandøren som til slutt ble foretrukket ble inngått i mai 2019 mellom Varian Medical Systems og Helse Bergen HF, på vegne av Helse Vest RHF, og mellom Varian Medical Systems og Helse Sør-Øst RHF.

Anskaffelsen i Norge ble gjennomført som en konkurranse med forhandling, etter en forutgående prekvalifisering. Utstyrsanskaffelsen definerte noen av premissene for bygget og de tekniske anleggene; kravspesifikasjonen legger premisser for skjerming av protonbunkeren inn som et fellesanliggende mellom utstyrsleverandør og ansvarlig eier av anlegget.

Den samlede kravspesifikasjon for konkurransen ble kommunisert gjennom 66 minimumskrav og 152 evalueringskrav. For strålevern ble det lagt frem 12 minimumskrav til leverandør, leverandør måtte bekrefte sin aksept av ivaretagelse av kravet og skissere løsning for å tilfredsstille kravspesifikasjonen i henhold til dette.

Strålevernkravene M52-M63 er oppgitt i tabell 5, kravene definerer leverandørens forpliktelse og rolle i forhold til arbeidet med strålevern, skjerming og løsninger i henhold til norsk strålevern lovgivning.

Sykehusorganisasjonene har ansvaret for all underlagsinformasjon i søknader til Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet, en del av grunnlagsrapportene blir allikevel, slik kravspesifikasjonen foreskriver, utarbeidet av leverandøren, eller av underleverandører på vegne av leverandøren, slik tilfellet er for begge protonterapi prosjektene.

Radiumhospitalet (OUS) og Haukeland universitetssykehus HF arbeider hver for seg og i samarbeid med uavhengig verifikasjon av de rapporter som Varian Medical Systems fremskaffer, for å kunne kvalitetskontrollere arbeidet og for å sørge for at man i driftsfasen av anleggene har på plass en omforent forståelse av hvordan man må følge opp arbeidet med stråleverntiltak og med kontrollmålinger av strålingsnivåer og målinger av års doser til personalet ved drift av anleggene.

Tabell 5: Kategori F6; Radiation Shielding and Protection, fra kravspesifikasjonen til det nasjonale protonterapiprosjektet¹⁴.

Category F6: Radiation shielding and protection	
Minimum Requirement	
M52.	<p>The Contractor is requested to provide information and documentation describing the normal range of radiation levels in:</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) The accelerator bunker, (b) The area for the energy selection system (ESS), (c) The beam transport area, (d) The gantry area (technical gantry room), (e) In and around the treatment rooms; both for treatment rooms with gantry and rooms with fixed beam, (f) In the treatment control rooms, (g) Outside of these areas; on the outer surface in all directions and (h) The immediate surroundings around a facility. <p>The information will be applied when estimating and describing the radiation levels during normal operation, during maximum load of the accelerator and during normal service operation for the purpose of implementing adequate radiation shielding and in order to obtain the required licenses from the Norwegian Radiation Protection Authorities.</p>
M53.	The Contractor must provide information with respect to radiation induced activation of the equipment, building elements and other components in all the above listed areas.
M54.	The Contractor must provide information needed and requested by the Client concerning potential activation of ground water and the surroundings of a proton therapy facility.
M55.	The Contractor must provide information needed and requested by the Client concerning potential releases of activated air and airborne radioactivity released to the surroundings of a proton therapy facility.
M56.	The Contractor must in particular provide information concerning the levels of neutron radiation during normal operation of the facility.
M57.	The Contractor must provide drawings, preferentially in 3D, displaying the general and proposed layout of the above listed areas. The drawings must contain information about materials and recommended thicknesses of walls, floors and roofs. The drawings must be detailed in order to be an adequate basis for, at first estimation, and further detailed calculations of radiation levels and for determination of yearly radiation loads for personnel, and thus be reference documents for radiation shielding purposes.
M58.	A safety interlock system of the accelerator must prevent any unclear situations with respect to entrance to areas with radiation during operation of the system or during other maintenance operations. This safety interlock system must be Fail-Safe in order to prevent personnel being exposed to radiation during loss of power or in other situations with malfunction of the equipment. The Contractor is expected to provide information concerning the use of signals from the accelerator control system in a

¹⁴ Contract HUS-9001-U-SP-0016, New proton therapy center Haukeland University Hospital, 26.04.2019.

	safety interlock system at the facility.
M59.	The Contractor must inform about which areas of the facility that must have restricted access due to the radiation levels during operation and due to other safety issues.
M60.	An overall agreement for management and storage of radioactive parts from the facility from time of installation and commissioning and during the duration of contracts for operations and maintenance must be implemented in the proton therapy equipment purchase contract. It must be clearly identified in this agreement which of the parties that has the responsibility for all operation and handling of equipment (used parts and components) that are radioactively activated during normal operation of the facility. This agreement must cover all handling, storage, transportation and shipment of equipment (used parts and components) that are activated and thus are to be handled as radioactive sources. The agreement must clearly identify the responsibilities for the following: (a) Identification of which components that routinely are replaced and that are to be considered as radioactive sources due to activation from gamma and neutron radiation during operation, (b) Identification of the levels of activity that normally are to be expected from the activated components and equipment parts, (c) Measurements of activity from used parts during storage must be sufficient to prevent any uninformed handling of radioactive used part or components at any stage of these operations, (d) Safe storage of radioactive parts and components at local storage area in facility; a policy of very limited access to local storage in the proton therapy facility must be enforced, (e) Safe transportation of radioactive parts and components from local storage in the proton therapy facility to any intermediate storage area prior to shipment to permanent storage facility, (f) Safe shipment of radioactive parts and components from intermediate storage to permanent storage facility in Norway or abroad.
Monitoring and logging of radioactive levels in the facility:	
M61.	A detector system must be coupled to a fail-safe interlock system that prevents personnel to enter areas with radioactive levels above accepted limits.
M62.	A detector system must be coupled to a fail-safe interlock system that prevents personnel to enter areas where the radioactive levels are undecided.
M63.	The radiation levels must be logged continuously and stored for monitoring and reporting purposes.