



DANSK DEKOMMISSIONERING

Dekommissionering af DR 2

Afsluttende rapport



Dokument godkendt af de nukleare tilsynsmyndigheder

Dansk Dekommissionering, Roskilde
Maj 2009

Forfatter: Niels Strufe/nstr

Titel: Dekommissionering af DR 2

Sektion: Projektstyring

DD-38 (DA) Rev.1

Februar 2009

Resumé

Rapporten beskriver arbejdet med demontering og nedbrydning af reaktor DR 2, de frembragte affaldsmængder, helsefysiske forhold samt de anvendte frigivelsesprocedurer for udtagne emner og affald. Da endemålet for dekommissioneringsprojektet ikke var en frigivelse af bygningen, men en nedklassificering af denne med henblik på ombygning til videre nuklear anvendelse, er der gjort rede for nedklassificeringen samt for kendte forekomster af tilbageværende aktivitet. Rapporten fremhæver nogle af de overvejelser, der er gjort undervejs i projektet samt beskriver de erfaringer – "lessons learned" – dette dekommissioneringsprojekt har givet. Rapporten har også til hensigt, at bidrage til det tekniske og erfaringsmæssige grundlag for den videre dekommissionering af de nukleare anlæg i Danmark.

Revisioner foretaget i forhold til første udgave af rapporten er opregnet i et separat notat, "Revisioner foretaget i slutrapporten for DR 2 projektet", som fremsendes til de nukleare tilsynsmyndigheder sammen med nærværende rapport.

Sider: 122

Tabeller: 11

Figurer: 75

Referencer: 12

Bilag: 7

	Dato	Navn	Underskrift
Redigeret	13/2-09	Niels Strufe	
Godkendt	13/2-09	Kurt Lauridsen	

Dansk Dekommissionering

Postboks 320
4000 Roskilde

Tlf: 4677 4300

Fax: 4677 4302

E-mail: dd@dekom.dk

Web: www.dekom.dk

Indhold:

Indhold:	3
Forord	5
1 Indledning	6
2 Beskrivelse af anlæg og omgivelser	7
2.1 Reaktorens opbygning	8
2.1.1 Biologisk afskærmning	9
2.1.2 Forsøgsrør	10
2.1.3 Kølekredsløb	10
2.2 Karakterisering af aktivitetsindhold	13
3 Dekommissioneringsmål og strategi	15
4 Radionuklider og frigivelseskriterier	16
4.1 Frigivelsesfunktionen	16
4.2 Frigivelsesprocedurer	17
4.3 Dokumentstyring	17
5 Dekommissioneringsarbejdet	19
5.1 Ventilation	22
5.1.1 Helsefysiske målinger i ventilationsrummet	22
5.1.2 Demontering af gammelt ventilationsanlæg	22
5.1.3 Nyt ventilationsanlæg	24
5.2 Stripning af reaktorblokken	25
5.2.1 Rydning af igloen	27
5.2.2 Fjernelse af igloblokke	29
5.2.3 Udtagning af B, S, R, T og Instrumentrør	30
5.2.4 Udtagning af termisk kolonne	38
5.2.5 Udtagning af gitterplade	46
5.3 Dekommissioneringen af kølekredsløbet i kælderen	51
5.3.1 Henfaldstank	52
5.3.2 Varmevekslere	53
5.3.3 Rør, pumper og ionbytteranlæg	55
5.3.4 Fjernelse af løse emner oplagret på DR 2	57
5.4 Nedbrydning af den biologiske afskærmning/reaktorblokken	61
5.4.1 Fastlæggelse af omfang af aktiveret beton - karakterisering	61
5.4.2 Nedbrydningen af reaktorblokken	63
5.4.3 Sikkerheds- og sundhedsplan for nedbrydningsarbejdet	92
5.4.4 Doser under betonnedbrydningen	94
5.5 Dekontamineringsarbejder	94
5.6 Nødtankanlæg	95
6 Tilbageværende anlægsdele	97
7 Endelig radiologisk status	98
8 Dekommissioneringsaffald	99

8.1 Registrering af dekommissioneringsaffald	99
8.2 Registrerede affaldsmængder	101
8.2.1 Radioaktivt affald til deponering	101
8.2.2 Frigivet affald og affald til videre behandling	102
8.2.3 Konklusion	104
9 Overvågningsprogrammer, målemetoder og doser	106
9.1 Brug af dosimetre	106
9.2 Eksterne doser	106
9.3 Interne doser	109
9.4 Overvågning af luftkontamination	109
9.5 Overvågning af strålings- og kontaminationsniveauer	110
10 Unormale hændelser	111
11 Frigivelsesprocedurer/Nedklassificering	112
11.1 Frigivelse af emner	112
11.2 Ændring af sluttilstand for DR 2 dekommissioneringsprojektet	112
11.3 Nedklassificering af bygning 200 til hvidt strålings- og kontaminationsområde	113
12 "Lessons learned"	114
12.1 Tidsforløb	114
12.2 Metoder og teknikker	114
12.2.1 Affaldsregistrering	116
12.2.2 Kontrolmålinger	116
12.2.3 Arbejdsmetoder og værktøjer	116
12.3 Konklusion	119
13 Referencer	121
14 Bilag	122

Forord

DR 2 er den anden af tre forsøgsreaktorer på Risø området, som er blevet dekommissioneret. Nedtagningsarbejdet påbegyndtes i foråret 2006 efter en toårig planlægningsperiode.

Reaktoren var i brug fra 1959 til 1975. Den har således haft mere end 30 års henfaldstid; dog indeholdt den stadig komponenter med en betragtelig radioaktivitet. Den egentlige dekommissionering af reaktorblokken begyndte i maj 2006 og blev fuldført medio 2008.

Demontering af reaktorens mest aktive dele, så som forsøgsrør, brændselsgitterplade og termisk kolonne, blev gennemført af DD's eget personale. Ved sådanne operationer deltog typisk to teknikere, en helseassistent, en teknisk assistent og i nogle tilfælde en ingeniør. Nedbrydning af den biologiske afskærmning og de nødvendige dele af gulvet under reaktoren blev udført af en dansk nedbrydningsentreprenør under stadig overvågning af DD personale. Nedbrydningsentreprenøren havde typisk 2-4 personer i arbejde ad gangen. Samarbejdet med den eksterne entreprenør forløb særdeles tilfredsstillende; det har i denne forbindelse givetvis ikke været nogen ulempe, at valget efter offentligt udbud faldt på den samme entreprenør, som stod for betonnenedbrydningen på DR 1.

Nærværende rapport vil bidrage til det tekniske og erfaringsmæssige grundlag for den videre dekommissionering af de nukleare anlæg i Danmark.

1 Indledning

Dansk Dekommissionering (DD) har til opgave at dekommissionere de nukleare anlæg på RISØ. Forskningsreaktorerne DR 1 og DR 2 er de første anlæg ud af seks, som skal dekommissioneres og udgør derfor en særlig udfordring og ikke mindst risiko for uforudsete problemstillinger, som vil nødvendiggøre brug af specialudstyr og specielle metoder. Reaktorerne og laboratorierne på RISØ er de eneste nukleare anlæg i Danmark, følgelig vil dekommissioneringen af anlæggene være den første og eneste udført herhjemme. Dekommissioneringen af DR 2 har derfor væsentlig betydning for DD's fremtidige projekter, især DR 3 projektet.

Da reaktoren har været lukket i mere end 25 år er den næst efter DR 1 den reaktor, som forventedes at give mindst mulige problemer. Derfor blev det indledningsvis vedtaget, at de to reaktorer skulle tjene som lærestykker forud for dekommissioneringen af de resterende nukleare anlæg, i særdeleshed DR 3 (10 MW, lukket i år 2000). Dekommissioneringen af alle de nukleare anlæg på RISØ er planlagt til at løbe frem til år 2018.

Det overordnede mål med dekommissioneringen af de nukleare anlæg på RISØ er at opnå et green field, hvorved området og mulige tilbageblevne bygninger kan anvendes til andre formål uden nogen restriktioner (i forhold til radioaktivitet). Mere uddybende beskrivelser af reaktorerne og de nukleare anlæg på RISØ findes i [4].

Når det er muligt, udfører DD dekommissioneringen ved brug af eget personale og ekspertise. I nogen tilfælde kræver arbejdet specielle værktøjer og ekspertise, som vil blive leveret af eksterne entreprenører og specialister. Nedtagningsarbejdet på DR 2 har i stor udstrækning været udført med værktøjer og ekspertise, som allerede er tilgængelig i DD. Et antal specialværktøjer er dog blevet erhvervet til specifikke arbejder.

Dekommissioneringen af DR 2 var planlagt til at løbe i perioden 2005 – 2008. Projektbeskrivelsen blev godkendt af de nukleare tilsynsmyndigheder i december 2005 og budgettet (aktstykke) blev godkendt af Finansudvalget i maj 2006. Dekommissioneringsarbejdet blev igangsat umiddelbart herefter og endeligt afsluttet med nedklassificering af 'containment' bygningen medio 2008. Denne afsluttende rapport, der beskriver processen, er udarbejdet i umiddelbar forlængelse heraf.

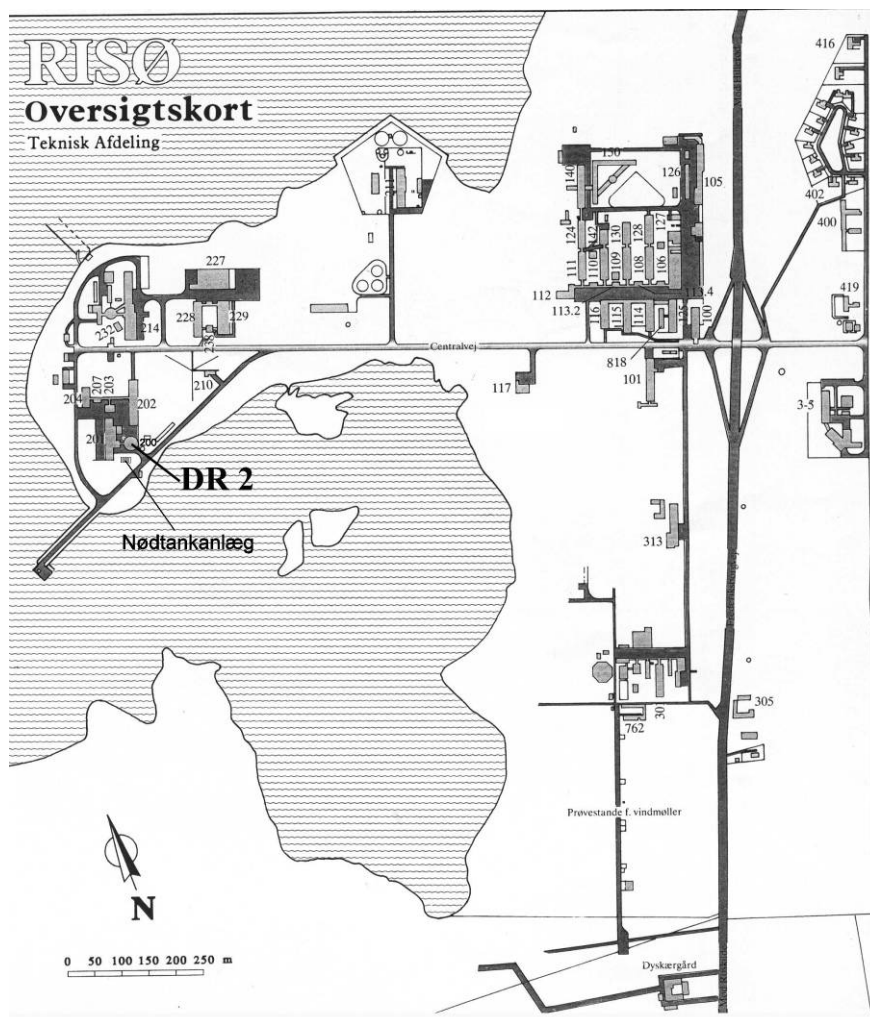
Nærværende rapport beskriver de valgte metoder og processer i forbindelse med dekommissionering af reaktoren. Rapporten indeholder bl.a. beskrivelser af dekommissioneringsaktiviteterne, den radiologiske status, det frembragte dekommissioneringsaffald, "lessons learned" og frigivelsesprocedurer og nedklassificering.

2 Beskrivelse af anlæg og omgivelser

DR 2 var en letvandskølet og -modereret heterogen forsøgsreaktor af tanktypen med en termisk effekt på 5 MW. Der anvendtes højt beriget uran i brændselelementerne.

DR 2 blev kritisk første gang i slutningen af december 1958, og blev nedlukket endeligt i 1975, da reaktor DR 3 havde tilstrækkelig kapacitet til de videnskabelige opgaver samt produktionen af radioisotoper og øvrige bestrålingsopgaver. Reaktoren blev af Atomenergikommissionen (AEK) indkøbt hos Foster Wheeler Corp. i New York, der leverede reaktorkomponenter, tegninger og specifikationer for montagen. Montagen af reaktoren blev udført af danske entreprenører.

Placeringen af DR 2 på Risø fremgår af figur 1. En indgående beskrivelse af Risø-området og dets omgivelser er givet i sikkerhedsdokumentationen for Dansk Dekommissionering [4].

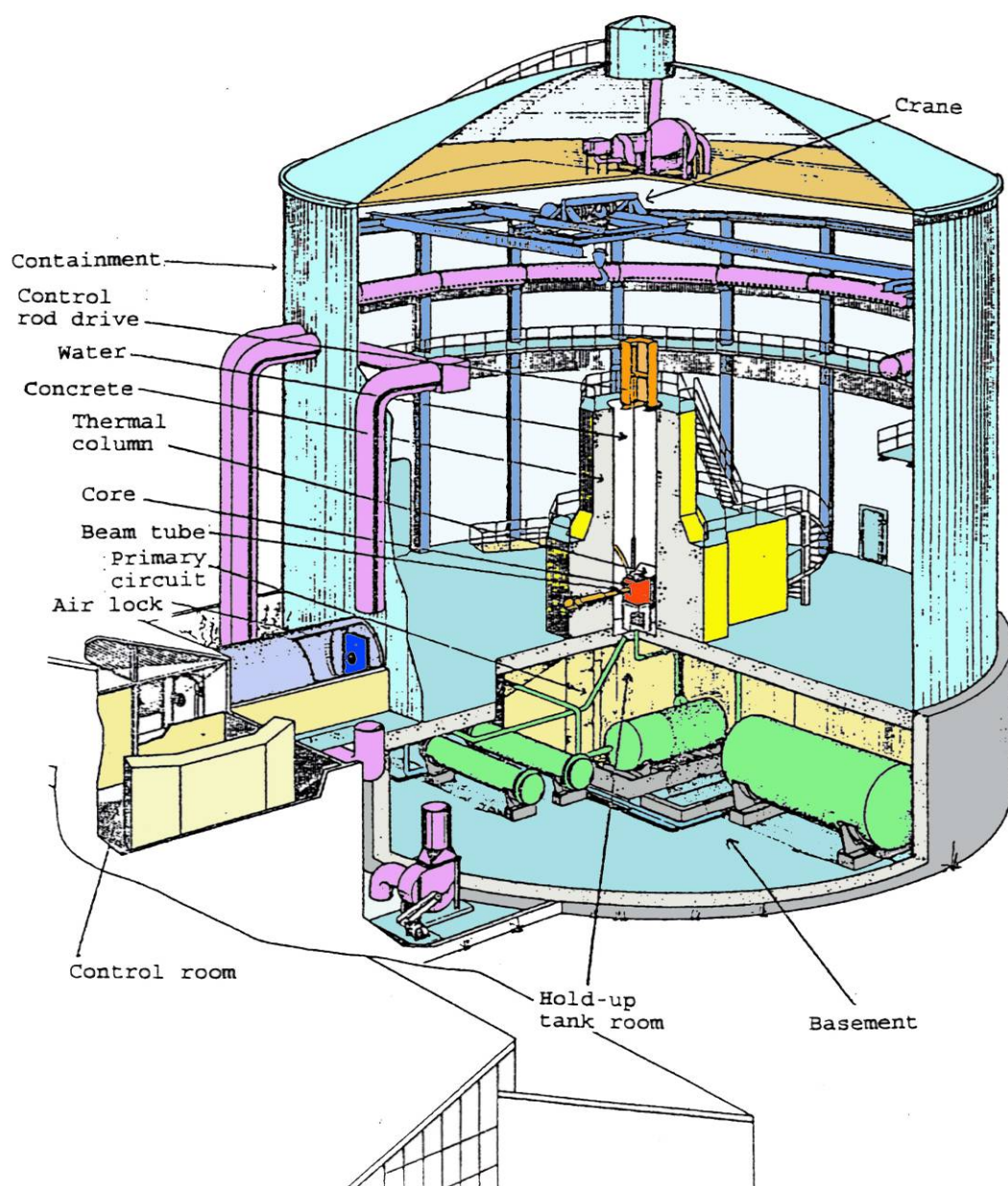


Figur 1 Kort over Risø med angivelse af DR 2s placering.

2.1 Reaktorens opbygning

Reaktor DR 2 kan opdeles i følgende dele:

- Reaktorblokken, indeholdende tank med afskærmning, reaktorkernen, termisk kolonne samt igloen (stueplan).
- Primære kølekredsløb med henfaldstank, varmevekslere, pumper og ionbytteranlæg (kælder).
- Sekundære kølekredsløb med nødtankanlæg (kælder og eksternt fra bygning).



Figur 2 Perspektivisk snit af reaktor DR 2 i bygningen.

Reaktortanken var en 2 m cylindrisk og 8 m høj åben tank. Reaktorkernen var placeret nederst i tanken, der var fyldt med demineraliseret let vand.

Omkring den nederste del af aluminiumstanken var den biologiske afskærmning opbygget som en ottekantet barytbetonskærm, der var ca. 2 meter tyk.

Reaktorkernen bestod af 36 brændselselementer med højt beriget uran. I specielle elementer var de midterste brændselsplader fjernet og erstattet med en aluminiumskasse, hvori de lodrette kontrolstænger (fem sikkerhedstænger og en reguleringsstang) med neutronabsorberende materiale var anbragt.

Sikkerhedsstængerne var ophængt i elektromagneter, der blandt andet ved for høj neutronintensitet, blev deaktiveret, hvorved sikkerhedsstængerne øjeblikkeligt faldt ned i kernen og standsede fissionsprocessen.

Reaktortanken var under driftsperioden fyldt med demineraliseret let vand, der til stadighed blev rensat i filtre og ionbytteranlæg. Vandet løb fra reaktortanken ned gennem brændselselementerne for køling af disse. Vandet opfyldte flere formål:

- Vandet overførte varmen fra brændselselementerne til det sekundære kølesystem ved hjælp af to varmevekslere, der var anbragt i driftskælderen. Det primære kølekredsløb var åbent ved reaktortoppen og bestod i øvrigt af et lukket rørsystem i driftskælderen.
- Vandet fungerede som moderator til nedbremsning af neutronerne til termiske energier.
- Vandet fungerede som reflektor for neutronerne sammen med reflektorelementer af beryllium og termisk kolonne. Berylliumelementerne var anbragt yderst i reaktorkernens gitterplade langs tre sider, fri af termisk kolonne.
- Vandet afskærmede opefter, således at strålingen fra reaktorkernen var stærkt dæmpet ved reaktortoppen. Fra reaktortoppen foregik al flytning af brændselselementer og indsættelse af forsøg ved hjælp af fjernbetjeningsværktøj ("fiskestænger") og kran, når reaktoren var standset.

Alle brændselselementer og kontrolstænger blev fjernet i forbindelse med nedlukning af reaktoren i 1975 [2]

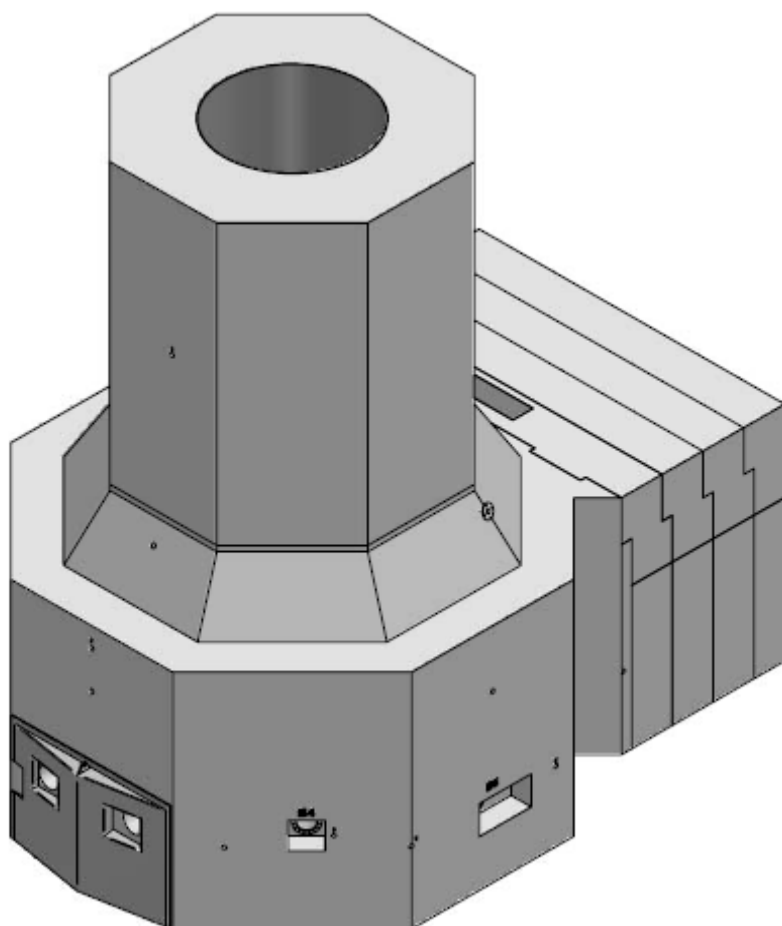
I tilknytning til reaktoren var der etableret et nødtankanlæg. Fjernelse af nødtankanlægget er beskrevet i afsnit 5.6.

2.1.1 Biologisk afskærmning

Omkring den nederste del af aluminiumstanken var den biologiske afskærmning opbygget som en ottekantet barytbetonskærm, der var ca. 2 meter tyk. Foroven var tykkelsen 0,8 m og materialet var almindelig beton.

Selve betonkonstruktionen var opbygget af tre forskellige typer beton. Den øverste del, 'skorstenen', bestod af standard beton med en vægtfylde på ca. 2,5 ton/m³. Den nedre del var konstrueret af barytbeton med en vægtfylde omkring 3,5 ton/m³. Afskærmningen omkring termisk kolonne – "igloen" var udført i magnetitbeton med en tilsvarende høj massefylde.

Betonkonstruktionen indeholdt ingen armeringsjern udover randarmeringsnet, der var placeret ca. 100 mm fra hhv. yderside og indre overflade mod aluminiumstanken. Konstruktionen indeholdt dog en lang række rør-føringer for kølevand til reaktoren, kølerør til vandrette forsøgsrør, kabel-føringer o. lign.



Figur 3 Opstalt af DR 2 reaktorens biologiske afskærmning.

2.1.2 Forsøgsrør

Som det er nærmere beskrevet i afsnit 5.2.3 og var DR 2 udstyret med otte vandrette forsøgsrør mrk. B1 – B8, et gennemgående forsøgsrør mrk. T1-T2, otte krumme forsøgsrør mrk. S1 – S6 og R1 – R2 samt seks instrumentrør placeret tre og tre over hinanden under kernen.

2.1.3 Kølekredsløb

Kølekredsløbet var placeret i kælderens under reaktoren (se figur 2 og 4). Hovedelementerne i kredsløbet var to varmevekslere af aluminium (se afsnit 5.3.2). Før kølevandet løb til varmevekslerne placeret i driftskælderen, ledtes det via en opholdstank (se afsnit 5.3.1). Denne tank var placeret i et afskærmet rum direkte under reaktoren, og tjente til at forsinke vandet, således at ^{16}N kunne henfalde, før vandet nåede varmevekslerne.

Herudover indeholdt kølekredsløbet en lang række rørforbindelser (hovedsagelig aluminium) og pumper med forbindelse til tankanlæg inde i bygningen (2 stk. Waste, 1 stk. Storage, som blev nedtaget ved lukning af reaktoren i 1975), ionbytteranlæg (se afsnit 5.3.3) og nødtankanlæg placeret uden for bygningen (se afsnit 5.6).

Det sekundære kølekredsløb bestod overordnet af en rørforbindelse til køletårnet placeret syd for bygningen. Køletårnet blev nedlagt efter reaktorens lukning [2].

Uddybende beskrivelser af de enkelte dele af reaktoren er givet i kapitlet om dekommissioneringsaktiviteterne (kap. 5). Der henvises endvidere til DR 2 projektbeskrivelse [2]

2.2 Karakterisering af aktivitetsindhold

Forud for igangsætning af dekommissioneringsaktiviteter blev der i 1997 - 2003 gennemført en karakterisering af aktivitetsindhold og fastlæggelse af hvilke radionuklider, der befandt sig i reaktoren, herunder hvor og i hvor store mængder. Dette dannede det nødvendige informationsgrundlag for beskrivelsen af de helsefysiske forhold og et godt overblik over, hvilke dele, der var aktiveret og hvilke radionuklider, der var i de pågældende materialer. Disse oplysninger var vigtige i forhold til planlægningen af dekommissioneringen. Resultaterne af karakteriseringsprojektet er detaljeret rapporteret i [11,2].

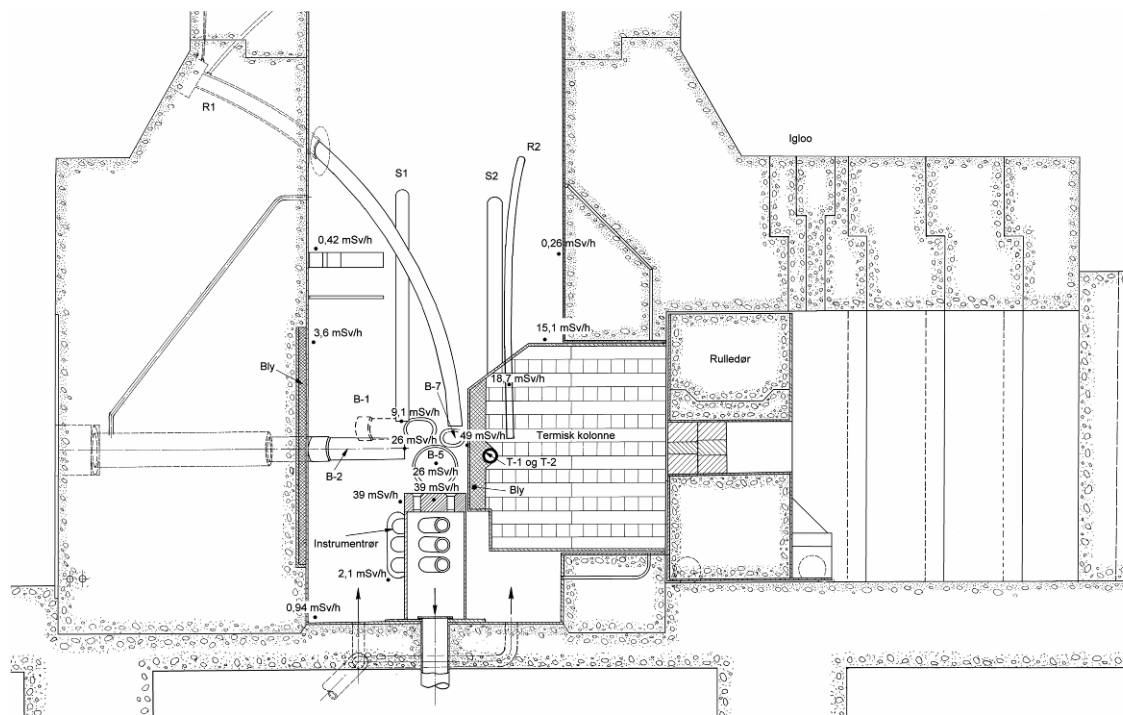
De gennemførte forsøg viste, at den resterende målte aktivitet i reaktoren fordelte sig som anført i tabellen nedenfor.

Tabel 1 Målte aktivitetsniveauer.

Komponent	Aktivitet
Termisk kolonne (grafit)	4 GBq ^{152}Eu
Termisk kolonne (blynæse)	0,1 GBq ^{60}Co og 0,5 GBq $^{108\text{m}}\text{Ag}$
Afskærmningspropper og foringsrør	1 GBq ^{60}Co
S-bestrålingsrør	0,1 GBq ^{60}Co

Herudover kom aktiviteten i gitterpladen, som har holdt brændselselementerne. Gitterpladen var en tyk aluminiumsplade med huller til brændselselementer, og ved hvert hul sad der en rustfri stålstift til styring af elementerne. Gitterpladen var fastholdt med rustfrie stålbolte. Det var ikke muligt særskilt at måle gitterpladens aktivitet, men det blev skønnet dengang, at være den mest aktive komponent i reaktoren. Aktiviteten i blyafskærmningen omkring instrumentrørene og reaktortank inkl. blyafskærmning blev heller ikke entydigt fastlagt, hvorfor den tilbageværende aktivitet i DR 2 blev forudsat at være af størrelsesordenen 5-10 GBq hovedsagelig ^{60}Co og ^{152}Eu .

Resultatet af strålingsmålingerne udført under karakteriseringen af reaktorblokken og termisk kolonne er angivet i figur 5. Som det kan ses, blev de største strålingsniveauer målt i området omkring gitterpladen og blynæsen af termisk kolonne [2].



Figur 5 Snit igennem reaktorblok og termisk kolonne med angivelse af strålingsniveau målt med TL-dosimetre i foråret 2001.

3 Dekommissioneringsmål og strategi

Det blev vedtaget at de to reaktorer DR 1 og DR 2 skulle tjene som lærestykker forud for dekommissioneringen af de resterende nukleare anlæg, i særdeleshed DR 3. Dekommissioneringen af DR 1 og DR 2 er planlagt til at finde sted fra år 2004 til medio 2009. Dekommissioneringen af alle de nukleare anlæg er planlagt til løbe frem til år 2018.

Det overordnede mål med dekommissioneringen af de nukleare anlæg på RISØ er at opnå et "green field", hvorved området og mulige tilbageblevne bygninger kan anvendes til andre formål, uden nogen restriktioner (i forhold til radioaktivitet). Mere uddybende beskrivelser af dekommissioneringsplanerne for reaktorerne og de nukleare anlæg på RISØ findes i [1].

Da det første udkast til en generel plan for dekommissionering af de nukleare anlæg på Risø-området var udarbejdet, påbegyndtes udvælgelsen af metoder til dekommissionering af alle nukleare faciliteter på anlægget.

En langt mere detaljeret planlægning for dekommissionering af DR 2 var udformet i projektbeskrivelsen [2] herunder udarbejdelsen af budgettet, som skulle godkendes af Folketingets Finansudvalg. Projektbeskrivelsen blev fremlagt til godkendelse hos de nukleare tilsynsmyndigheder.

I stor udstrækning er udvælgelsen af de endelige metoder og værktøjer til anvendelse i de enkelte dekommissioneringsarbejder, blevet truffet i løbet af den detaljerede forberedelse af disse arbejder. DD's generelle fremgangsmåde er, at foretage så meget som muligt af demonteringsarbejdet med egen arbejdskraft og kun indkalde eksterne leverandører til arbejder, som involverer lave niveauer af radioaktivitet.

En konsekvens af denne fremgangsmåde var eksempelvis planen om at erhverve et temmelig dyrt wireskærings-værktøj til brug for demonteringen af de mere radioaktive dele af det inderste af reaktoren. Denne løsning ville i så fald kræve uddannelse af personale og forudgående øvelser og prøveskæringer; forhold, som ville kræve tid og omkostninger. Denne plan blev derfor opgivet, da dygtige eksterne entreprenører forventedes at kunne udføre den pågældende opgave bedre, sikrere og hurtigere end DD's eget personale. Denne rapport vil berøre dette emne og give et overblik over de overvejelser, som blev gjort i forbindelse med udvælgelsen af vigtige værktøjer og demonteringsmetoder.

4 Radionuklider og frigivelseskriterier

I karakteriseringsprojektet [11] blev de fleste af de tilstedeværende radionuklider identificeret. Under dekommissioneringen er det kun de rene β -emittere ^3H og ^{14}C , der siden er blevet føjet til listen, se også afsnit 5.3. Disse blev identificeret ved afskrabningsprøver fra indersiden af det primære kølesystem. Den samlede liste over fundne radionuklider på DR 2 er givet i tabel 2.

For de fundne radionuklider anvendes frigivelsesniveauer, som ligeledes er angivet i tabel 2. Er anført i BfDA 7.2, Frigivelsesniveauer.

Tabel 2 De fundne radionuklider på DR 2 samt deres frigivelsesniveauer.

Radionuklid	Massespecifikt frigivelsesniveau (Bq/g)	Overfladespecifikt frigivelsesniveau (Bq/cm ²)
^3H	100	10000 (ej anvendt)
^{14}C	1	1000 (ej anvendt)
^{60}Co	0,1	1
^{133}Ba	0,1	1
^{137}Cs	0,1	1
^{152}Eu	0,1	1
^{154}Eu	0,1	1
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}^1$	0,1	0,1/1

4.1 Frigivelsesfunktionen

Der er opbygget en funktion under Sektionen for Strålings- og Nuklear Sikkerhed, som skal varetage frigivelsen af emner, bygninger og landområder. Frigivelsesfunktionen er en selvstændig enhed, som er akkrediteret efter DS/EN ISO/IEC 17025:2005². I forbindelse med akkrediteringen er der lavet en kvalitetshåndbog, som beskriver alle de procedurer og instrukser, der skal følges ved frigivelse af emner og bygninger³. Det næste afsnit beskriver i store træk nogle vigtige procedurer fra kvalitetshåndbogen.

¹ Den fundne uran stammer fra et uranpilotforsøg (efter DR 2's lukning), som tjente til på "halvindustriel skala" at afprøve teknikken til udvinding af uran fra malm fra det Grønlandske Kvanefjeld.

² Akkrediteringsnummer 488

³ Kvalitetshåndbog for Dansk Dekommissionerings Frigivelsesfunktion, Per Hedemann Jensen

4.2 Frigivelsesprocedurer

Der er introduceret et begreb, som betegnes frigivelsesindeks. Dette er defineret som forholdet mellem den målte aktivitetskoncentration og frigivelsesniveauet for en given radionuklid. Et emne kan således frigives, hvis frigivelsesindekset er mindre end 1. Såfremt der findes flere slags radionuklider i et emne, anvendes en sumformel. Denne sumformel inkluderer ligeledes de usikkerheder, der er ved målingen, så det beregnede frigivelsesindeks altid vil være konservativt. Den anvendte sumformel ser således ud:

$$FIM = \sum_i \left(\frac{C_i}{CLM_i} \right) + 1.65 \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(C_i)}{CLM_i} \right)^2}$$

hvor:

- *FIM* er frigivelsesindekset (masse-specifik)
- C_i er den målte aktivitetskoncentration for radionuklid i
- CLM_i er frigivelsesniveauet for radionuklid i (masse-specifik)
- $u(C_i)$ er usikkerheden på aktivitetskoncentration for radionuklid i

Brugen af sumformlen sikrer, at et frigivet emne med 95% sandsynlighed virkelig er frigiveligt. Der må maksimalt midles over 1000 kg.

Emner med jævne flader uden fordybninger, og som ikke er neutronaktiverede, kan frigives ved brug af overfladekontaminationsmålinger. Frigivelsesniveauet for β -kontamination (^{60}Co , ^{137}Cs) er 1 Bq/cm² og 0,1 Bq/cm² for α -kontamination (actinider), jf. myndighedernes krav i BfDA kap. 7. For frigivelse ved brug af kontaminationsmonitor anvendes en lignende formel som den ovenfor, hvor i i så fald antager værdierne α og β . Der må max. midles over 1 m².

Hvis et emne har et for stort omfang til at blive prøvet frigivet ved én måling, kan der udtages delprøver, som måles separat. Herefter benyttes en statistisk metode til at prøve mulig frigivelse. Der anvendes to metoder: Én for kendt fordeling af aktiviteten (metode A), og én for jævn fordeling af aktiviteten (metode B). Brugen af metode A indebærer, at der udtages prøver på de steder i emnet/systemet, hvor aktiviteten vides at være størst. Kan disse prøver frigives, vil hele emnet/systemet kunne frigives. Ved metode B udtages først et antal repræsentative prøver. En statistisk analyse af måleresultaterne og deres usikkerheder afgør om emnet/systemet straks kan frigives, eller der er brug for yderligere prøver.

4.3 Dokumentstyring

Ved frigivelsen af et emne genereres et antal dokumenter. I forbindelse med massespecifik frigivelse gemmes elektronisk den af måleprogrammet genererede målerapport, et regneark med indtastede måleresultater og usikkerheder samt en frigivelsesrapport på DD's fællesdrev og arkivsy-

stem. Herudover vedhæftes frigivelsesrapporten elektronisk på emnet i DD's affaldsdokumentationssystem (ADS). Alle dokumenter i forbindelse med et emnes frigivelse gemmes endvidere på papirform i frigivelseslaboratoriets arkiv.

Et regneark til massespecifik frigivelse beregner frigivelsesindekset ud fra ovennævnte formel, idet der vælges, hvilke nuklider der skal tages med i beregningen. Hvis der indenfor en given tælleperiode ikke måles en aktivitet for en given nuklid, der kan forventes at være i emnet, indtastes en "højest mulig aktivitet", PGA. PGA indgår dermed i beregningen af frigivelsesindekset. Vægten af emnet indtastes ligeledes i regnearket. Når alt er indtastet, og frigivelsesindekset er mindre end 1, overføres summen af måleværdierne, usikkerheden på summen af måleværdierne samt frigivelsesindekset til frigivelsesrapporten.

En frigivelsesrapport indeholder oplysninger om, hvilket emne der frigives, hvor tungt det er, hvilket instrument der er anvendt til målingerne samt oplysninger om fundne nuklider og ikke-fundne nuklider (hvor PGA indgår i stedet for en funden aktivitet).

For overfladespecifik frigivelse med kontaminationsmonitor gemmes de(t) udfyldte regneark samt frigivelsesrapporten på DD's fællesdrev samt i det elektroniske arkivsystem. Frigivelsesrapporten vedhæftes på emnet i ADS. I et regneark til overfladespecifik frigivelse indtastes måleresultaterne for hvert delareal svarende til detektorarealet. På baggrund af en summationsformel beregner regnearket frigivelsesindekset. Hvis frigivelsesindekset er mindre end 1, overføres måleresultatet og usikkerheden på måleresultatet til frigivelsesrapporten sammen med frigivelsesindekset.

En frigivelsesrapport for overfladespecifik frigivelse indeholder stort set de samme oplysninger, som hvis den var lavet for massespecifik frigivelse; kun er vægten skiftet ud med emnets areal.

5 Dekommissioneringsarbejdet

Dekommissioneringsarbejdet blev påbegyndt i 2006 og afsluttet i 2008. Som udgangspunkt udførte DD selv alle dekommissioneringsarbejder, hvor der var tale om aktiverede og kontaminerede emner. I særlige tilfælde, hvor DD ikke var i besiddelse af de nødvendige ekspertiser eller udstyr, blev der entreret med de nødvendige håndværksmæssige specialister.



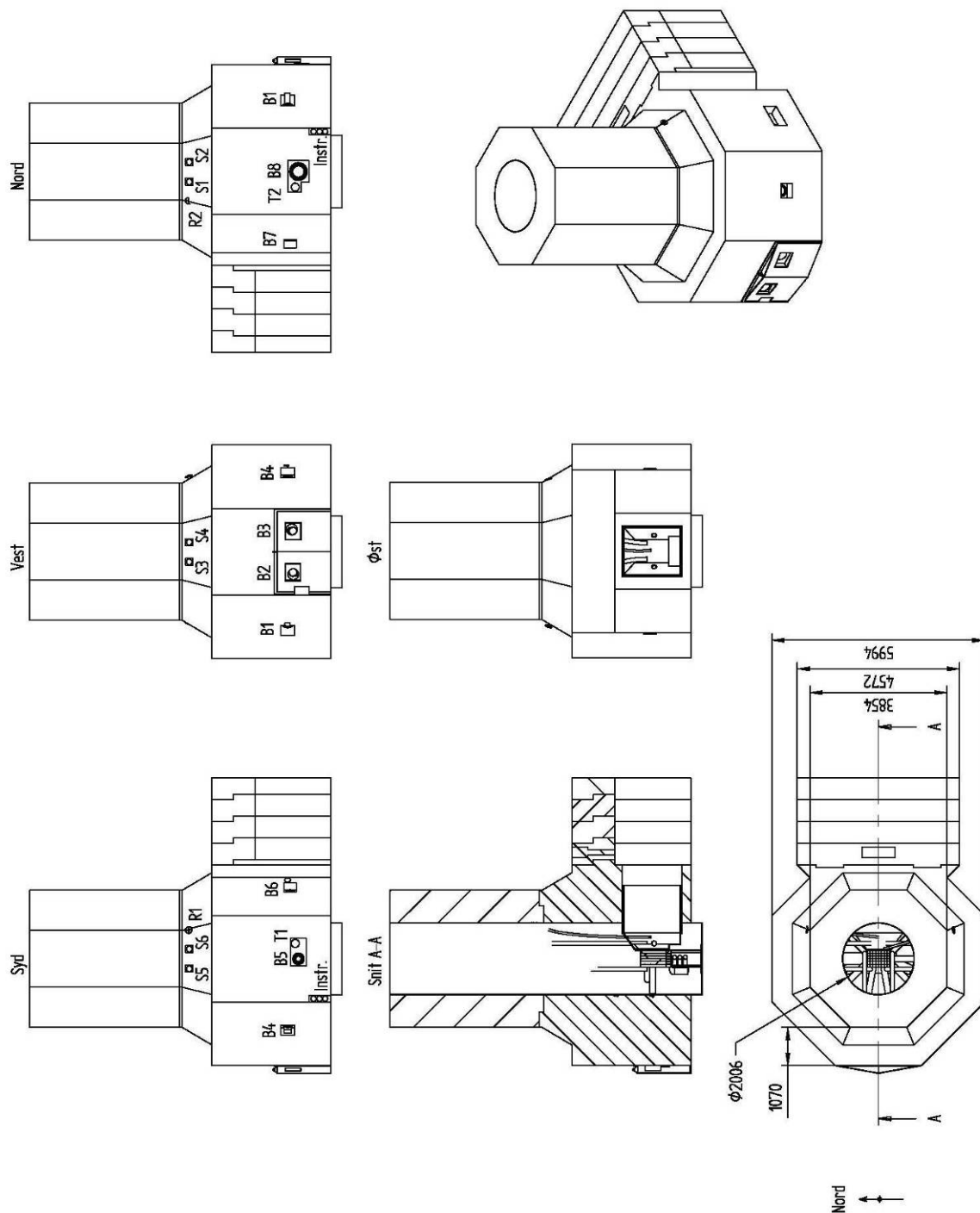
Figur 6 Reaktorblok og projektleder ved start af dekommissionering (juni 2006). Adgangsåbninger til forsøgsrør er afdækket.

Reaktorblokken var i forbindelse med nedlukningen i 1975 blevet aflukket og alle åbninger blændet.

Dekommissioneringsarbejdet omfattede stripning af reaktoren før nedbrydning af selve reaktorblokken, herunder den biologiske afskærmning. Dekommissioneringsarbejderne omfattede:

- Reetablering af ventilation i bygningen
- Stripning af reaktorblokken:
 - o Rydning af igloen
 - o Udtagning af B, R, S, T-rør og instrumentrør, inklusiv afskærmningspropper
 - o Udtagning af termisk kolonne
 - o Udtagning af gitterplade
- Nedtagning af kølekredsløb og Ionbytteranlæg (kælder)
- Nedbrydning af reaktorblokken og foringsrør (linere)
- Fjernelse af nødtankanlæg

Dekommissioneringsarbejdet blev parallelt med igangsætning af 'stripningen' indledt med en optegning af konstruktionen.



Figur 7 Optegning af reaktorblok ved start af dekommissionering.

5.1 Ventilation

Forud for igangsætning af dekommissioneringsarbejderne blev det besluttet at renovere ventilationsanlægget i bygningen [2]. Dette indledtes med kontrolmålinger af de eksisterende installationer af ventilationsanlægget i bygningens kælder.

5.1.1 Helsefysiske målinger i ventilationsrummet

Der blev foretaget kontaminationsmålinger og dosishastighedsmålinger i ventilationsrummet i DR 2's kælder (trykkammer m.v.) med henblik på nedtagning/ombygning af ventilationssystemet i rummet, jf. nedenstående

Regulære overflader blev stikprøvemålt med en kontaminationsmonitor af typen CoMo 170 kalibreret for ^{60}Co , og der er ikke blevet målt niveauer over baggrundsniveauet for området.

Der blev taget syv aftøringsprøver (papir smear tests) fordelt i de to trykkamre. Resultatet af analyse viste følgende:

Maksimalt α -kontamination: $3,6 \text{ Bq/m}^2 \pm 1,8 \text{ Bq}$

Maksimalt β -kontamination: $12,8 \text{ Bq/m}^2 \pm 6,4 \text{ Bq}$

De maksimale værdier er målt på en aftøringsprøve, der er taget gennem en loftslem i bagerste trykkammer. Der blev efterfølgende taget yderligere fire aftøringsprøver fra udvalgte steder i ventilationsrummet, og der blev ikke målt niveauer over baggrundsniveau.

Dosishastigheden i lokalerne er blevet målt, og de maksimale niveauer blev målt til $< 0,1 \mu\text{Sv/h}$.

På baggrund af de udførte målinger og analyser kunne det konkluderes, at ventilationsdelene kunne nedtages og fjernes fra kælderrummet, og at dette arbejde kunne udføres uden yderligere helsefysiske foranstaltninger. Under udførelsen blev der dog udført løbende kontrolmåling af nedtagne emner.

5.1.2 Demontering af gammelt ventilationsanlæg

Nedtagning af de gamle ventilationsinstallationer udførtes stort set af DD selv. De dele, der blev fjernet omfattede filtre, tanke, rørstykker og ventiler, herunder de tonstunge Gakoverventiler. Især sidstnævnte var en udfordring, da de største var placeret bagerst i trykkammeret. Så her måtte der hentes hjælp fra eksterne specialister i flytning af tungt udstyr.

Først blev der skåret hul i trykkammeret med skærebrænder. Efter afmontering af ventilerne, blev disse trukket, løftet og bakset ud ved brug af fingersnilde, muskelkraft og mobilkran.



Figur 8 Forberedelse til udtagning af Gako ventil.



Figur 9 Udtagning af Gako ventil.

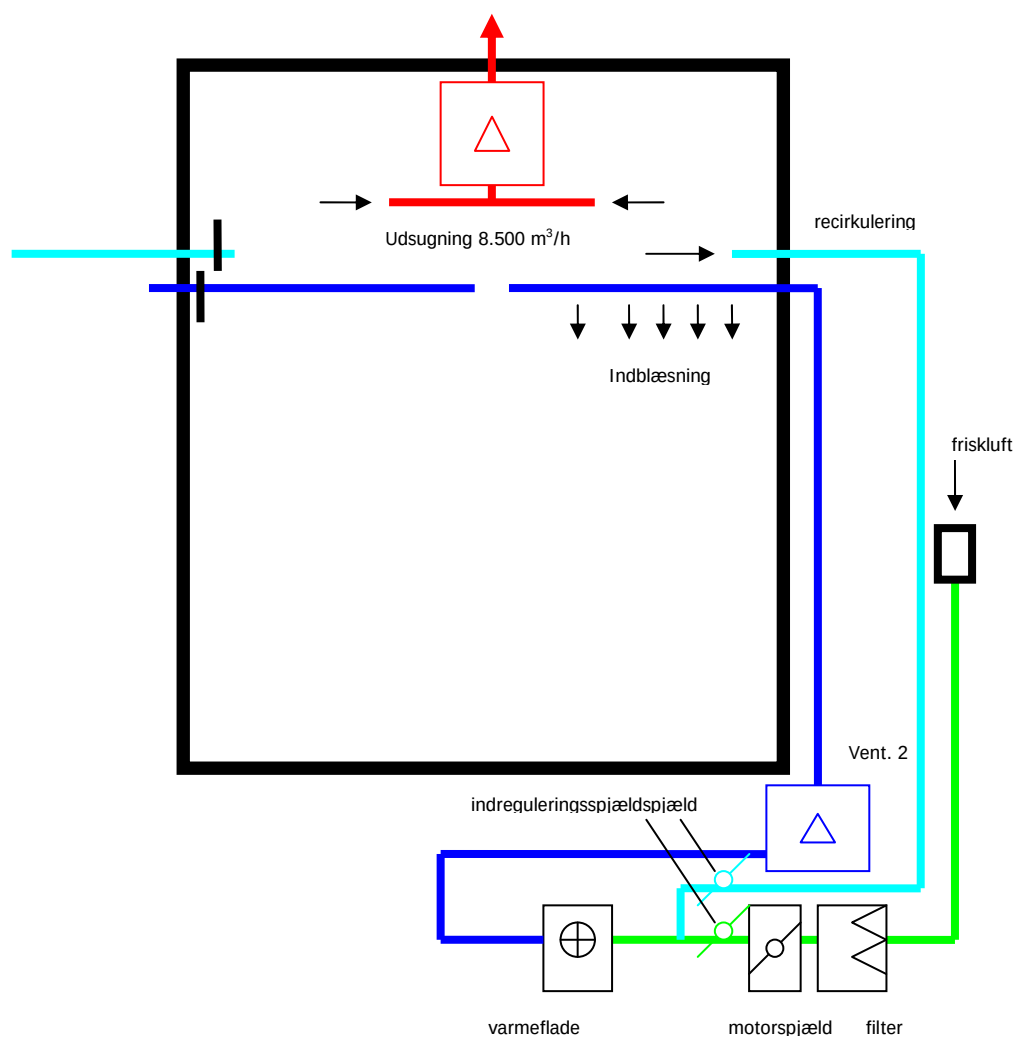
Alle delene, som blev nedtaget, blev kontrolmålt på alle tilgængelige flader, før de blev placeret i en container uden for bygningen. Containeren blev ikke fjernet fra området, før dette var godkendt af projektleder og helseassistent. Alle dele blev efter frigivelse bortskaffet som stålskrot.

5.1.3 Nyt ventilationsanlæg

Ventilationsanlægget blev ombygget så det kom til at se ud som skitseret i figur 10 nedenfor.

Sammenfattende bestod ombygningen af montering af en kanal med indreguleringsspjæld på friskluftkanalen efter motorspjældet inde i trykkammeret, fjernelse af spærring på recirkuleringen og forsyning af kanalen med et indreguleringsspjæld og forbindelse etableret over til friskluftkanalen, hvor de to mødes i et T-stykke.

Friskluft/recirkuleringsluft er ført i en kanal til varmebladen og derfra til ventilator 2 og ind i reaktorhallen. Indblæsning og recirkulering fra ventilator 1 er begge blændet inde i reaktorhallen. Når anlægget kører, kan det nu indreguleres, så der opnås et undertryk på 30-60 Pa i hallen.



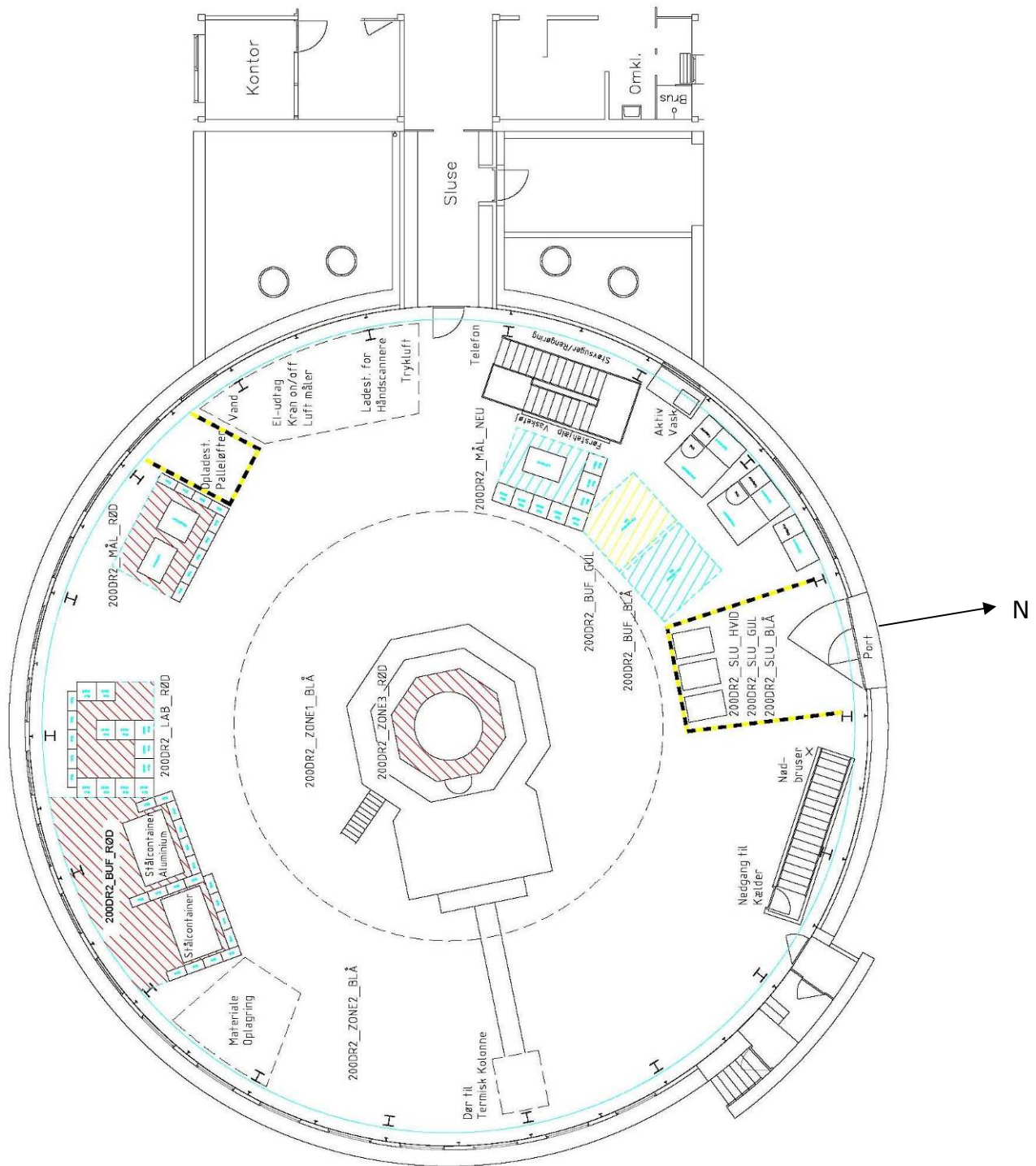
Figur 10 Principdiagram af nyt ventilationsanlæg.

5.2 Stripning af reaktorblokken

Før igangsætning af en stripning af reaktoren og det videre arbejde blev hallen indrettet med det for øje, at en række faciliteter skulle være umiddelbart tilgængelige, herunder muligheden for adgang med kran og afskærmning af forskellige områder. Der blev derfor identificeret behov for etablering af bl.a.:

- Afskærmning til 2-3 stk. adskilte containere.
- Afskærmet område for kontrolmåling af emner
- Områder til henlæggelse af værktøj og andet udstyr
- Sluseområder klassificeret til henholdsvis blå og gult affald (alu-containere) og sluseområde for containere til videre transport ud af hallen.

Der blev derfor optegnet en indretningsplan, som dannede grundlag for indretning af hallen og opdeling i klassifikationszoner, jf. figur 11.



Figur 11 Logistikplan for DR 2 hal under stripping.

5.2.1 Rydning af igloen

Adgangen til termisk kolonne skete ved, at to store betonblokke (magnetit beton) for enden af igloen løftedes væk med ringkranen. Derefter kunne den store elektrisk drevne rulledeur køres ud på skinner.

Igloen indeholdt diverse komponenter, som var oplagret i forbindelse med lukningen af reaktoren i 1975.

Der blev indledningsvis dannet et overblik af indholdet, og på dette grundlag blev der taget stilling til i hvilken rækkefølge og på hvilken måde, de enkelte komponenter skulle tages ud.

Da indholdet i Igloen havde været hengemt i en længere årrække, forventedes det, at emnerne kunne være godt støvede, og arbejdet blev tilrettelagt herefter – dvs. at de enkelte komponenter blev udtaget én ad gangen og støvsuget umiddelbart uden for Igloen, og en første kontrolmåling blev foretaget. Herefter blev der taget stilling til, hvad der videre skulle ske med den enkelte komponent. Der blev ikke fundet kontamineret støv.

Alle emner blev kontrolmålt og registreret i affaldsdokumentationssystemet ADS.



Figur 12 Oplagrede emner i igloen.

Ved åbningen af igloen kunne det konstateres, at der var henlagt diverse kontaminerede hjælpeværktøjer, og andre dele fra driftsperioden, som fx grafit fra termisk kolonne, dummy plugs fra vandrette forsøgsrør m.v. Disse dele er beskrevet i "The DR 2 Project" [11].

5.2.1.1 Rulledeur

Efter tilslutning af strøm kunne det konstateres, at døren fortsat var funktionsdygtig. Rulledeuren kunne derfor fortsat anvendes, indtil igloen var tømt, og udtagningen af termisk kolonne skulle igangsættes.

Den centrale del af rulle-døren indeholdt en 'plug', som anvendtes i forbindelse med udtagning af de centrale grafitstringers i termisk kolonne.

Rulle-døren var opbygget af en kraftig stålkonstruktion og magnetitbeton. Døren havde en samlet vægt på ca. 16 tons. Ved kontrolmåling viste det sig, at den centrale del omkring pluggen var blevet aktiveret under DR 2s drift. Det blev derfor besluttet, at rulle-døren ved en senere lejlighed skulle neddeles, og de aktiverede dele fjernes. Det forventes, at kun en mindre del (< 1 ton) skal deponeres som aktivt affald, og at den øvrige del kan bortskaffes som frigivet affald. Dette arbejde er planlagt til senere udførelse jf. afsnit 11.2.



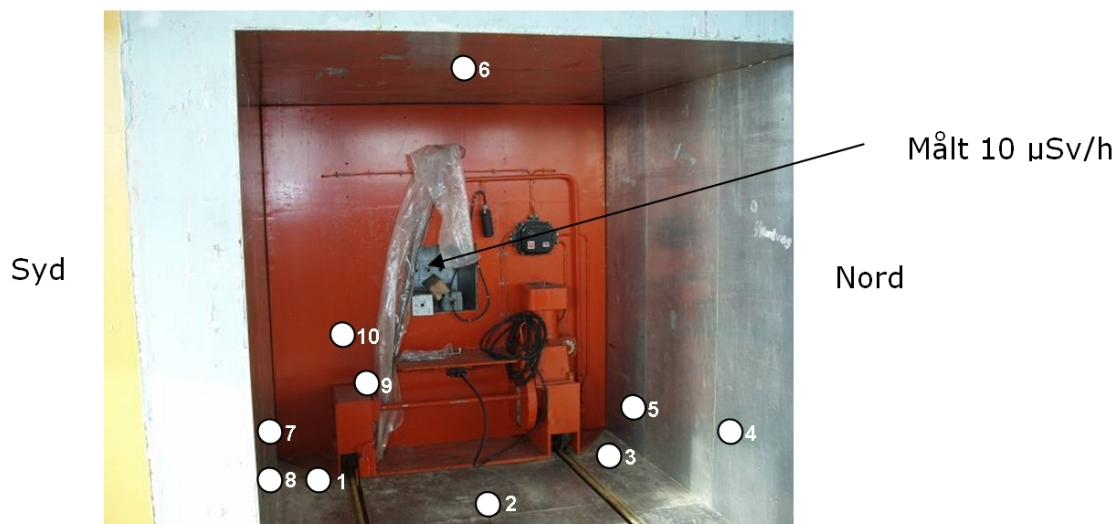
Figur 13 Rulle-døren køres ud. I midten ses plug til udtagning af grafit fra termisk kolonne. Skinnesystemet anes for neden.

5.2.1.2 Kontaminations- og dosishastighedsmålinger i iglo

Igloen blev efter tømning rengjort ved støvsugning, hvorefter der blev udført orienterende kontaminations- og dosishastighedsmålinger i igloen⁴.

Dosishastigheden i igloen blev målt til <1 µSv/h - dog blev der målt en dosishastighed på 10 µSv/h ved det grafit, der var placeret i hullet i rulle-døren.

⁴ Notat af 8. november 2006, *Kontaminations- og dosishastighedsmålinger i iglo - DR2*



Figur 14 Udførte målinger i iglo før fjernelse af rulleddør.

Tabel 3 Måleresultater af smear tests.

Punkt	α Bq/m ²	β Bq/m ²
1 Gulv syd	0,4	16,8
2 Gulv midt	0,4	10,9
3 Gulv nord	0,5	11,8
4 Væg nord-øst	0,4 (MDA)	5,5
5 Væg nord-vest	0,3 (MDA)	53,2
6 Loft	0,5	7,8
7 Væg syd-vest	0,3 (MDA)	8,3
8 Væg syd-øst	0,6	5,9
9 Vandret flade v/ bagvæg	0,2	11,8
10 Bagvæg	0,3	5,2

MDA står for Minimum Detectable Activity, og står for den aktivitet, der maksimalt kan være i smear testen.

På den grafit, der lå i hullet i rulleddøren, blev der fra indersiden (mod termisk kolonne) konstateret en dosishastighed på 40 µSv/h. Grafitten var samlet i en aluminiumsplug, og kunne fjernes og henlægges i en afskærmning til senere nedpakning i container.

Kontaminationsmålingerne bestod af smear tests, som blev taget 10 steder (se figur 14 og tabel 3).

5.2.2 Fjernelse af igloblokke

Igloen var udført som adskilte betonblokke og kunne således fjernes i 12 hele elementer samt en betondør i to elementer. Alle blokke var udstyret med indstøbte gevindrør til brug for løfteøjer. Blokkene, der var designet til at kunne fjernes, havde dog aldrig tidligere været flyttet.

Da blokkene skulle nedtages - enkelte vejede over 12 tons stykket - viste det sig i et par tilfælde, at disse ikke umiddelbart kunne adskilles i enkelt blokke. Dette var især bekymrende for de vandrette overliggende blokke,

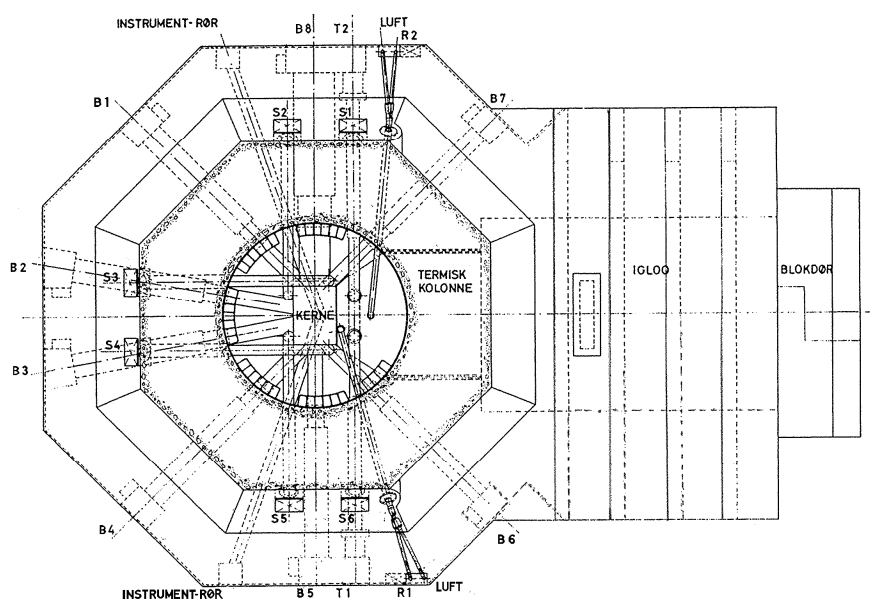
som dermed tilsammen vejede over 24 tons (2 stk.). Da kranen i hallen har en tilladelig løftekapacitet på 15 tons, kunne blokkene ikke løftes ned.

For at løse problemet blev der også anvendt donkrafte. Samtidig blev der arbejdet med at sprække blokkene ved brug af elektriske betonhammere. I et enkelt tilfælde skulle der, efter forarbejde med sprækning, anvendes hele kranens løftekapacitet i kombination med tre stk. 20 tons donkrafte, før blokkene blev adskilt.

Det blev vurderet, at tidens tand, de anvendte overfladebelægninger på betonblokkene ved opførelsen, og den senere anvendelse af bygningen til andre formål [2] i kombination havde medført den store vedhæftning mellem blokkene. Blokkene blev dog til sidst nedtaget, frimålt med kontaminationsmonitorer jf. Frigivelsesfunktionens Kvalitetshåndbog og bortskaffet som almindeligt bygningsaffald til genanvendelse.

5.2.3 Udtagning af B, S, R, T og Instrumentrør

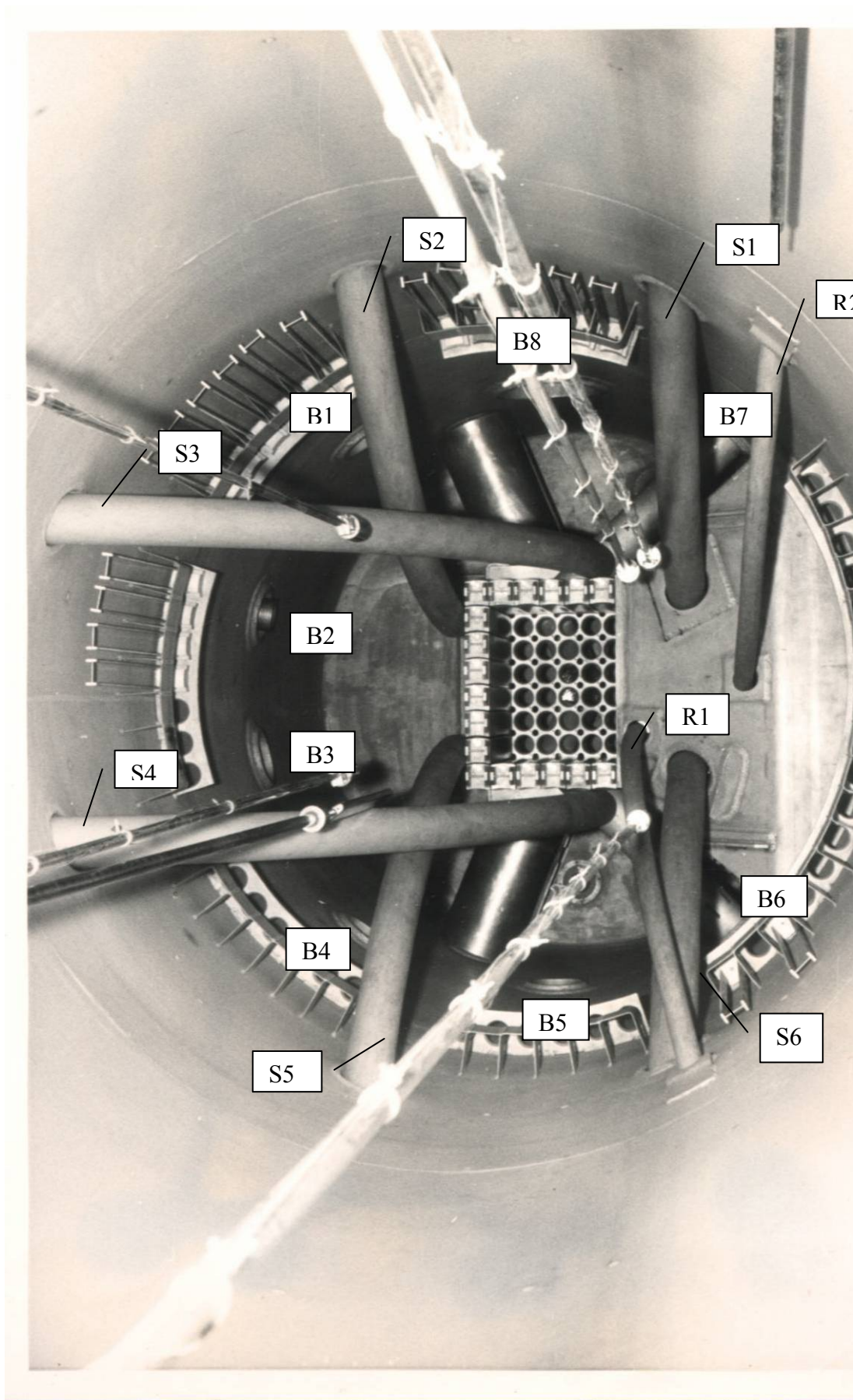
Som det fremgår af figur 15 var DR 2 udstyret med otte vandrette forsøgsrør mrk. B1 – B8, et gennemgående forsøgsrør mrk. T1-T2, otte krumme forsøgsrør mrk. S1 – S6 og R1 – R2, samt seks instrumentrør placeret tre og tre over hinanden under kernen.



Figur 15 Vandret snit gennem reaktor DR 2.

Dekommissioneringen af forsøgsrørene omfattede udtagning, opdeling og lagring (midlertidigt) af alle ovennævnte rør. Arbejdet blev udført fra starten af april 2006 og varede til og med udgangen af september. De dosis-hastigheder, der henvises til nedenfor, er alle hentet fra Povl L. Ølgaards "The DR-2 Project" [11].

Placering af de forskellige rør kan ses af ovenfor viste snittegning, og deres indbyrdes placering inde i reaktortanken ses på figur 16. T-rørene gik vandret direkte ind i termisk kolonne, og er ikke synlige på figur 16, da de ligger under de øvrige rør. Ligeledes er instrumentrørene ikke vist, da de var dækket af blykapper og placeret under gitterpladen.



Figur 16 Oversigt over installationer i reaktortanken.

5.2.3.1 S-rør

Beskrivelse

På balkonen af reaktorblokken var placeret seks bestrålingsrør, S-1 til S-6 som var lavet af aluminiumsrør, med en diameter på ca. 11 cm og en godstykkelse på 6 mm. S-rørene var monteret i betonen i foringer. S-2 og S-5 har været ude og blev målt i forbindelse med karakteriseringsprojektet af DR 2 i december 2001.

Stråling

Ved karakteriseringen blev der målt 600 $\mu\text{Sv/h}$ ved bundfladen af S-2, fallende til det halve i 40 cm afstand fra bunden. Den samlede aktivitet af de seks S-rør blev vurderet til ca. 0,1 GBq.



Figur 17 Udtagning af S-5 rør.

5.2.3.2 R-rør

Beskrivelse

Med adgang fra reaktorbalkonen var der ligeledes placeret to pneumatiske rør, R-1 og R-2. Disse rør var lavet af aluminium og målte 5,7 cm i diameter. R-1 gik fra blynæsen på termisk kolonne til ydersiden af betonaufskærmningen. R-2 gik fra grafitten i termisk kolonne til ydersiden af betonaufskærmningen. R-1 blev hurtigt taget ud af drift og i stedet brugt til vandstandsmåler i tanken i dennes levetid.

Stråling

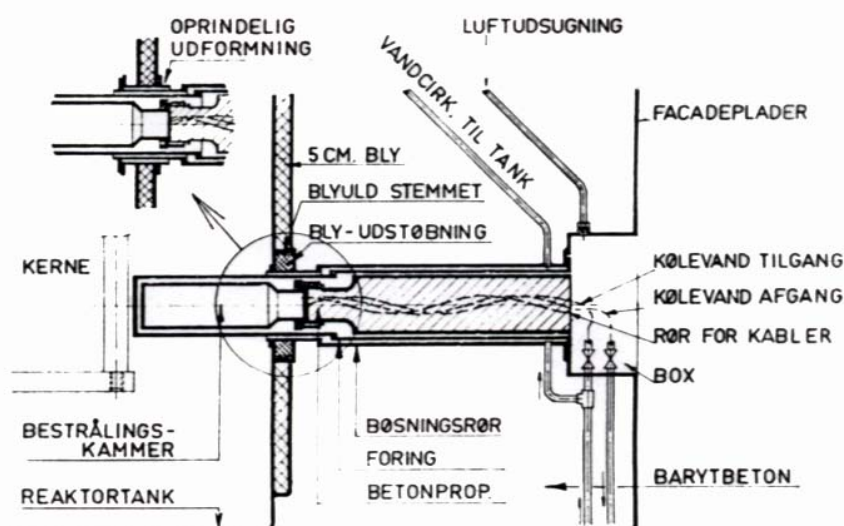
R-rørene var ikke ude i forbindelse med karakteriseringsprojektet, men ved stripningen blev den maksimale dosishastighed målt til 0,6 mSv/h⁵.

5.2.3.3 B-rør

Beskrivelse

Reaktoren havde otte bestrålingsrør, B-1 til B-8. B-1 til B-5 havde en nominal diameter på 6", B-6 og B-7 4", mens B-8 var på 13".

Bestrålingsrørene var sat i en aluminiumsforing, der var boltet til indersiden af vestibuleboksen og fortsatte ind til kernen af reaktoren. Denne foring var igen placeret i et bøsningrør, ligeledes af aluminium. Bøsningrøret var fast monteret i betonen, og strakte sig fra indervæggen af vestibuleboksen til et lille stykke ind i reaktortanken.



Figur 18 Principiel udføringsform af vandret forsøgsrør.

De vandrette forsøgsrør var principielt opbygget som vist i figur 18.

B-1 til B-7 indeholdt forskellige bestrålingsrør alt efter arten af de udførte forsøg, og B-8 har aldrig været i brug.

Bestrålingsrørene B-3 og B-5 var ude i forbindelse med karakteriseringsprojektet. B-3's foring blev trukket ud, men man opgav at udtrække B-5's foring, ligeledes opgav man at trække B-8 ud.

Stråling

Ved karakteriseringen blev der målt 600 µSv/h ved bundfladen af B-5 fallende til 30 µSv/h i en afstand af 1 meter fra endeflader. B-3's foringsrør blev også udtaget, og der blev målt 26 µSv/h i en afstand af 1 meter fra endeflader. For både B-3's og B-5's foringer og bestrålingsrør gjaldt det, at 70-80 cm fra den inderste ende var strålingsniveauet det samme som baggrundsniveauet.

⁵ Notat af 1. juni 2006, torsdag d. 1. juni 2006 - R2

Ved karakteriseringen blev den samlede aktivitet af de otte B-rør med foringer vurderet til ca. 1 GBq, men dette var dog behæftet med stor usikkerhed.



Figur 19 Udtagning af B-3 rør (foto fra karakteriseringsprojektet).

5.2.3.4 T-rør

Beskrivelse

Reaktoren havde to gennemgående forsøgsrør, T-1 og T-2. Disse rør løb igennem den termiske kolonne bag blynæsen og således tæt på kernen. T-rørene lå i en aluminiumsforing, som var boltet til indersiden af vestibuleboksen. Rørene er blevet brugt til korte bestrålingsforsøg, hvor prøverne er blevet ført frem og tilbage ved hjælp af pneumatik.

Under karakteriseringsprojektet blev bestrålingsrørene T-1 og T-2 taget ud, og strålingsniveauet målt. Det pneumatiske system blev opdelt således, at inderdelen blev lagret i en tromle, og yderdelen blev lagret i eksperimentkælderen. Til sidst blev pluggene sat i igen.

Stråling

Aktivitetsmålingerne kan ses i "The DR 2 Project" af Povl L. Ølgaard, side 49 [11]

Tabel 4 Aktivitet i gennemgående forsøgsrør

	^{60}Co	^{152}Eu	^{137}Cs
	(MBq)	(MBq)	(MBq)
T-1, ydre afskærmningsplugs	0,82		0,003
T-1, indre afskærmningsplugs	0,45		

	^{60}Co	^{152}Eu	^{137}Cs
T-2, indre afskærmningsplugs	0,20		
Trykluftrør system	2,41	0,16	0,04



Figur 20 Udtagning af T-1 rør.

5.2.3.5 Instrumentrør

Beskrivelse

Der var seks instrumentrør indbygget i reaktorkonstruktionen. De var placeret tre og tre henholdsvis på nord- og sydsiden af reaktoren, hvorfra de gik ind til centrum af tanken under gitterpladen.

Rørene, der var af aluminium, havde en diameter på ca. 11 cm med 6 mm godstykkelser og 2,8 meters længde. Rørene var monteret med ionkammer i spidsen. Allerede ved nedlukningen af reaktoren blev ionkammerne fjernet og placeret i Igloen (se også afsnit 5.2.1).

Stråling

Under karakteriseringsprojektet [11] blev de tre foringer taget ud, og dosishastigheden målt. Der blev målt 20 mSv/h inde ved kernen, faldende til 100 $\mu\text{Sv/h}$ ved starten af betonaftskærmningen og sluttende med 2 $\mu\text{Sv/h}$ yderst ved vestibuleboksen.



Figur 21 Instrumentrør

5.2.3.6 Demontering og neddeling af forsøgsrør

Udtagning og neddeling af forsøgsrør blev udført ifølge følgende retningslinjer fastlagt i en arbejdsplan:

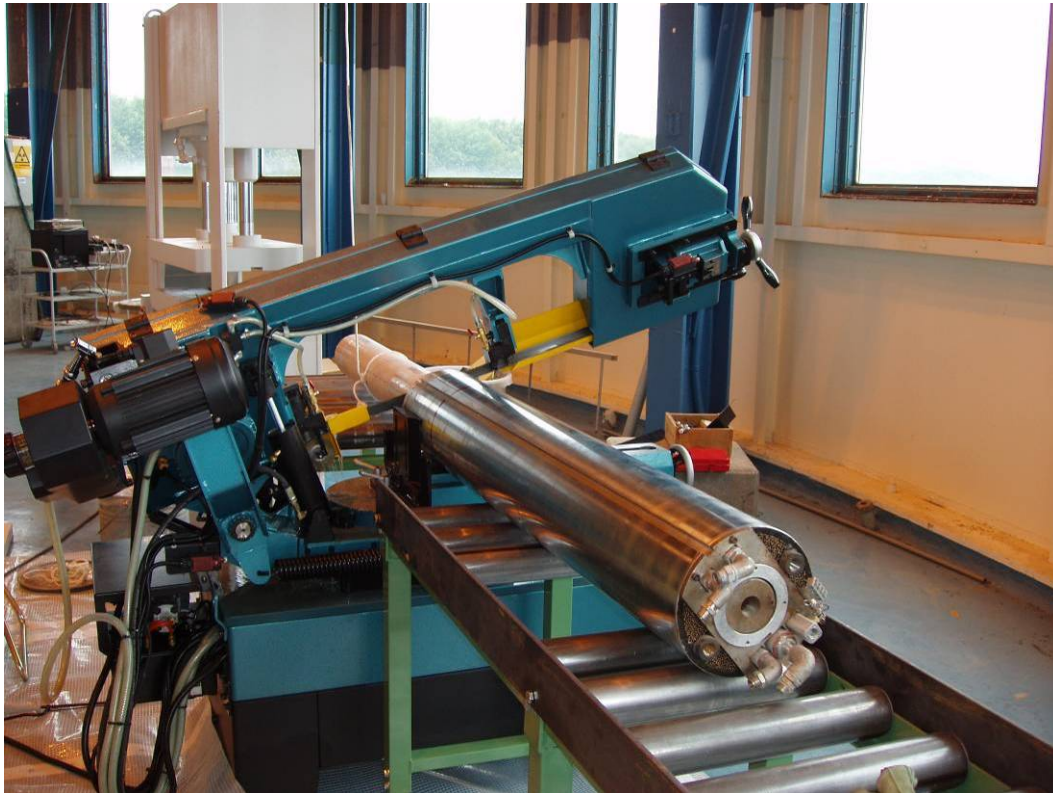
- Dækpladerne skulle gøres fri af betonafskærmningen.
- Strålingsniveauet skulle måles kontinuerligt under udtagning.
- Bolte i flange blev løsnet.
- Rør blev trukket ud med kran og løfteslæng.
- Rørene blev klippet i stykker på ca. 1 meters længde og blev mast flade i en hydraulisk presse.
- Afhængigt af strålingsniveau blev det afklippede stykke lagret i en stålcontainer eller blev opbevaret i en aluminiumscontainer for senere frigivelsesmåling på F-laboratoriet.
- Prøver blev udtaget til A-laboratoriet.
- Data for affaldsstykkerne blev indtastet i ADS.

Alle aktiverede dele fra forsøgsrørene blev afskåret og lagt i DD's stålcontainer og placeret på DD's Mellemlager.

Neddeling af S- og R-rør foregik bag afskærmning ved afklipping af de aktiverede dele direkte i DD's stålcontainer ved anvendelse af en fjernbetjent hydraulisk saks (figur 22).



Figur 22 Opstilling af fjernbetjent saks over container. Der er monteret kamera direkte på saksen. Monitor er placeret uden for afskærmning.



Figur 23 Neddeling af B-rør på automatisk båndsav.

De større rør, som fx B-rørene, blev neddelt ved brug af automatisk båndsav. Da rørene havde en betydelig vægt, anvendtes rullebord, og de aktiverede dele blev monteret med løfteslæng og kunne således overføres til DD's stålcontainere direkte fra saven.

Enkelte af pluggene til B-rørene var konstrueret med en kombination af stål/beton/stålkugler eller resin/stålkugler og kunne derfor ikke neddeles yderligere med DD's umiddelbart tilgængelige værktøj. Grundet den relativt lille mængde affald og for at undgå unødige strålingsdoser fra en eventuel kompliceret yderligere neddeling, blev det derfor besluttet, at anvende pluggene i forbindelse med indpakning og afskærmning af andre aktiverede emner fra reaktoren i DD's containere (jf. figur 34).

5.2.3.7 Doser ved udtagning af B-, S-, R-, T- og Instrumentrør

Alle rør blev udtaget med stor opmærksomhed på, at afstand og tid er vigtige i forhold til reducere doser. Der blev, som beskrevet ovenfor, udviklet værktøj, der kunne håndteres på afstand af de radioaktive emner. Den akkumulerede kollektive dosis for udtagning af instrument- og forsøgsrør var på 6 person- μ Sv, jf. kap.9. Herudover var der handledsdoser på 0,2 mSv til to teknikere (i begge tilfælde til begge hænder).

5.2.4 Udtagning af termisk kolonne

5.2.4.1 Udtagning af grafitstringere

Den termiske kolonne indeholdt ca. 200 grafitstringers på hovedsagelig 1 meter i længden og med en totalvægt på omkring fire tons. Det var nødvendigt at fjerne grafitten for at få adgang til kolonnens blynæse.

Der kunne sikres adgang til måling af strålingsniveauet fra grafitten fra ydersiden, men der var bekymringer om, hvorvidt den indre del af stringerne ville fremvise betydelige strålingsniveauer. Det blev derfor besluttet, at personalets håndtering af grafitmaterialet skulle minimeres.



Figur 24 Termisk kolonne med grafit, strålingsniveau måles.

Ved indgangen til igloen (fra blokkens yderside) blev der målt en dosishastighed på 10 $\mu\text{Sv/h}$.

Der blev foretaget en surveymåling foran grafitopbygningen, og den maksimale dosishastighed blev her målt til 250 $\mu\text{Sv/h}$ (i midten af grafitopbygningen i ca. 1 cm's afstand). Derudover blev der udført målinger både på syd- og nordsiden (hhv. til venstre og til højre i figur 24) af grafitopbygningen i ca. 50 cm's afstand, og den maksimale dosishastighed var her 50 $\mu\text{Sv/h}$ ⁶.

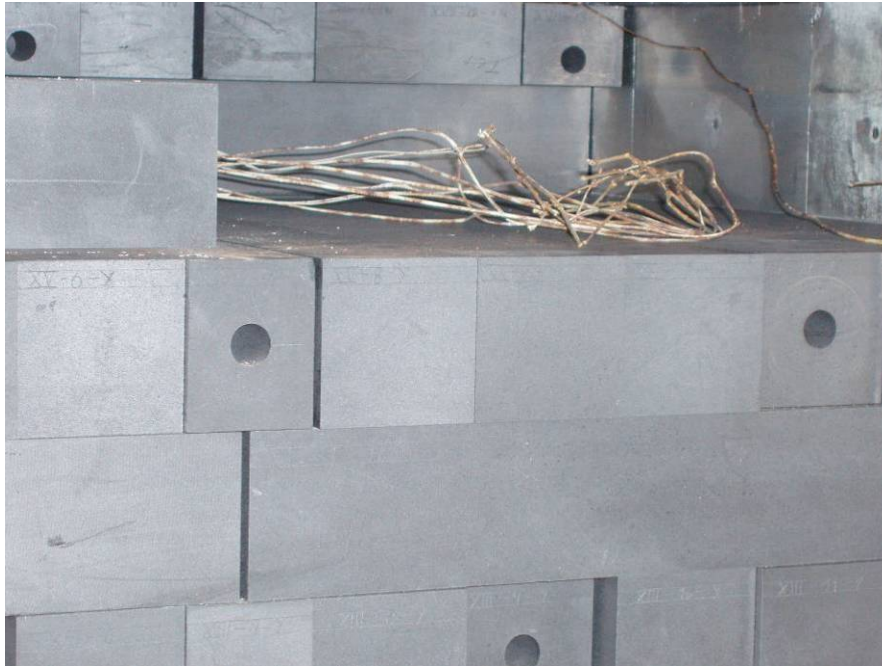
Det blev endvidere konstateret, at der, udover iagttagelse af strålingsniveauer og nødvendige afskærmningsforanstaltninger ved fjernelse af den termiske kolonne, skulle tages hensyn til muligheden for kontamineret/aktiveret grafitstøv. Som følge heraf var brugen af åndedrætsværn påbudt under arbejdet, og der blev efterfølgende iværksat ekstra rengøring.

Adgangen til den termiske kolonne skete via igloen. For at lette adgangen og håndteringen af de aktiverede emner fra kolonnen, herunder grafit, blev de overliggende blokke af igloen fjernet. De lodrette blokke blev be-

⁶ Notat af 8. november 2006, *Kontaminations- og dosishastighedsmålinger i iglo - DR2*

varet, for at virke som afskærmning under arbejdets udførelse. Herved kunne hallens ringkran anvendes uhindret til flytning af grafitstringerne.

Der blev derfor indledningsvis etableret et arbejdsområde i DR 2 hallen med passende afskærmning af containere, afskærmning omkring termisk kolonne og med mulighed for fjernbetjening af udstyr og håndtering af emnerne. Styling og overvågning kunne bl.a. udføres direkte fra reaktor-blokkens repos.



Figur 25 Grafitstringere, krydsforbandt ses, og kabler til termoelementer i blynæse er frilagte.



Figur 26 Arrangement for afskærmning og fjernbetjent håndtering af grafitudtagning og pakning af containere.

I forbindelse med andre tidligere arbejder, bl.a. DR 1 projektet, havde DD udviklet specielle trykluftsværktøjer med vakuum sugekopper til at løfte og fjerne grafit og andet materiale. Udstyret var derfor allerede tilgængeligt i DD, og behøvede kun lidt vedligeholdelse og tilpasninger, før det kunne anvendes til flytning af grafitstringere.

Arbejdet inkluderede fjernelse af alle grafitstringere til øremærkede containere, inklusiv opmåling og registrering af hver enkelt stringer⁷. Denne registrering, sammen med senere eksperimenter udført på udvalgte stringere tjente det formål at identificere den grafit, som skulle udglødes for Wigner-energi før endelig deponering.

For at løfte grafitstringerne var trykluftsværktøjerne monteret på en aluminiumsbjælke. En forlængerarm blev også monteret med en trykluftsanordning til at trække stringerne ud af den termiske kolonne. Fjernelse af stringerne ved brug af sugekopanordninger viste sig at være effektiv, og arbejdet blev udført sikkert og efter arbejdsplanen.



Figur 27 En Grafitstringer fjernes ved brug af vakuum løfteanordning og placeres i DD stålcontainer

I alt blev der fyldt to stk. DD stålcontainere, svarende til lidt over 5 m³. Grafitten blev ved udtagning fordelt i containerne, således at det yderste en meter lag blev pakket i én container, og den inderste ca. en meter blev pakket for sig.

Ved udtagningen og registreringen blev der målt en dosishastighed på stringerne på op til 800 µSv/h. Dette forhold skulle naturligvis tages i betragtning ved det videre arbejde, som beskrevet herefter.

5.2.4.2 Wigner-energi i grafitten

Da DR 2 reaktoren skulle demonteres, opstod spørgsmålet: Hvor meget Wigner-energi er lagret i den termiske kolonne i DR 2, og vil det være

⁷ Regneark af 23. marts 2007, 1207 Grafit Registrering.xls

nødvendigt at udgløde al eller en del af grafitten, før den kunne placeres i depot? Af denne grund blev eksperimentelle undersøgelser med udglødning af grafit gennemført i juni, juli og september 2007 og efterfølgende rapporteret (Bilag 2).

Undersøgelsen byggede på opvarmning af udvalgte grafitstykker til 350 °C. En yderligere temperaturstigning kunne tilskrives Wigner energi.

Resultaterne viser klart, at der er en betydelig mængde Wigner-energi, omkring 400 J/g, oplagret i den inderste, centrale del af den termiske kolonne, mens Wigner-energien i de yderste dele er tæt på nul. En hurtig frigivelse af 400 J/g ville resultere i en temperaturstigning på omkring 280-290 °C. I midten af den termiske kolonne ville temperaturstigningen blive betydeligt lavere, kun 40-45 °C

Det er i øjeblikket ikke kendt, hvilken energifrigivelse der er acceptabel i et depot for radioaktivt affald. Men for at være på den sikre side, synes det fornuftigt at udgløde den indre halvdel af grafitten fra den termiske kolonne i DR 2 til 350-400 °C, dvs. den del af kolonnen som svarer til den indvendige langsgående drager (~ 2 ton, 2,5 m³). Dette arbejde vil blive gennemført på et senere tidspunkt af DD, når de relevante faciliteter hertil er blevet etableret jf. afsnit 11.2.

5.2.4.3 Afskæring af blynæse fra termisk kolonne.

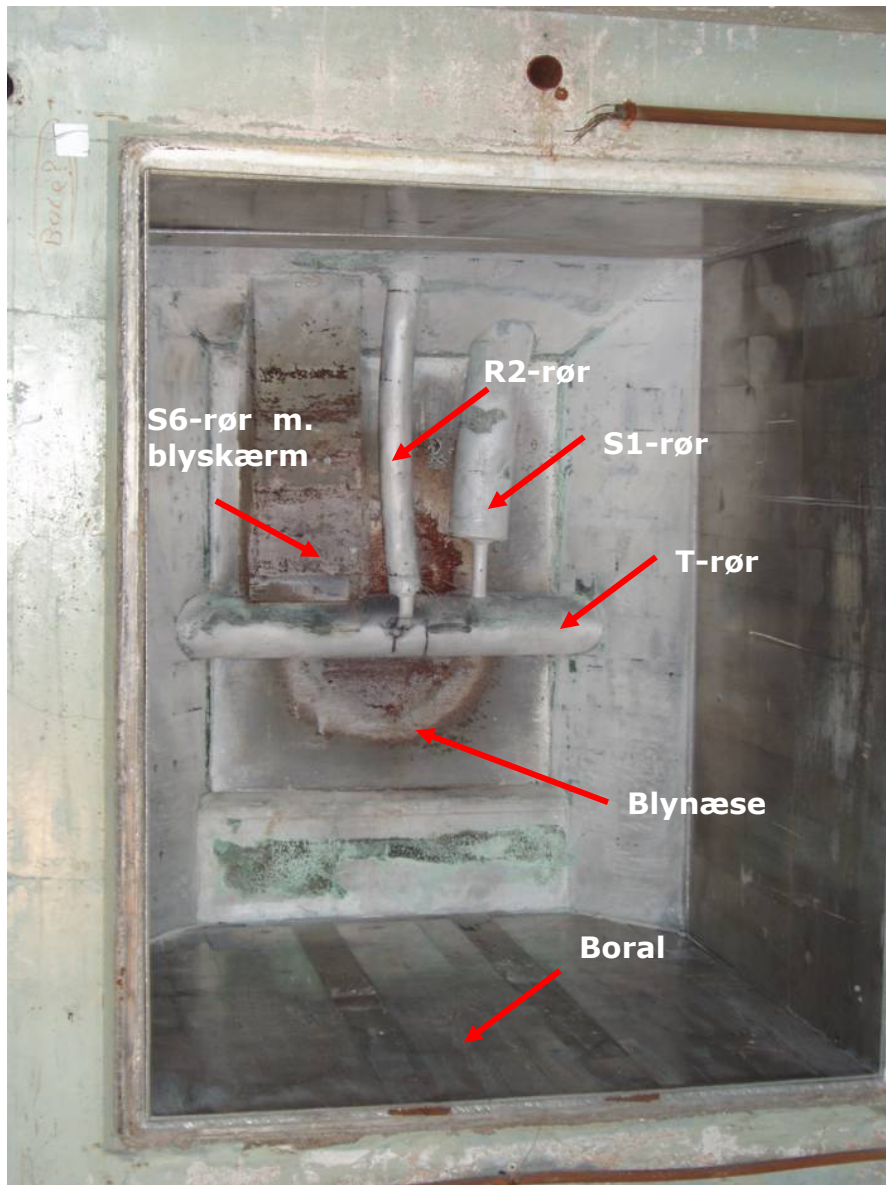
Konstruktionerne inde i reaktortanken var alle udført i aluminium, inklusiv termisk kolonne og gitterpladen og dens stativ.

Strålingsniveauet målt på blynæsens bagside – mod igloen – var efter fjernelse af grafitstringerne omkring 2 mSv/h. Fra tidligere målinger var det kendt, at det højeste strålingsniveau inde i reaktortanken var lige foran blynæsen over gitterpladen med et niveau på ca. 60 mSv/h⁸.

Hovedparten af strålingen blev anset for at komme fra gitterpladen, men en betydelig del måtte også forventes at komme fra selve blynæsen med dens placering direkte op til reaktorkernen. Ud fra kamera- og videoinspektioner af konstruktionerne inde i reaktortanken blev det anset for nødvendigt at fjerne blynæsen, før man kunne få en sikker adgang til gitterpladen og fjernelsen af denne.

Efter fjernelsen af grafitten blev det konstateret, at størstedelen af strålingen i den termiske kolonne kunne lokaliseres til den centrale del af blynæsen, som indeholdt indbyggede termoelementer anvendt til overvågning under driften af reaktoren.

⁸ Notat af 5. oktober 2006, *Dosishastighedsmålinger igennem B8-åbningen og op fra reaktortanken*



Figur 28 Termisk kolonne med grafitten fjernet og udækket blynæse (R1-rør dækket af S6).

Det blev besluttet at overskære termisk kolonne umiddelbart bag ved blynæsen. I tilknytning til detailarbejdsplanen for operationen blev der derfor udarbejdet tegninger for skærelinjer og anhugninger for løft af blynæsen.

Efter fjernelsen af grafitten gjorde konstruktionen af den termiske kolonne det muligt at afskærme for hovedparten af strålingen ved brug af standard 600×600×300 mm afskærmningsskærmblokke (tung beton). Blokkene blev sat direkte ind på en aluminiumspalle. Dette muliggjorde manuel skæring af blynæsen, såfremt der ikke kunne findes et værktøj, som var i stand til at skære med en tilfredsstillende hastighed.

Ifølge den tilgængelige dokumentation fra opførelsen af reaktoren var den termiske kolonne bygget af 19 mm aluminiumsplader foret med 6 mm boralplader på indersiden imod grafitten. Problemet bestod i at kunne skære igennem en konstruktion bestående af både "blødt" materiale, som aluminium, og de særdeles "hårde" boralplader med en samlet tykkelse på 25 mm. Der blev derfor indledningsvis udført en række tests med forskellige skæreværktøjer som rundsave med forskellig typer skæreskiver og en plasmaskærer. Det skal nævnes her, at plasmaskæring forudsætter trykluft på minimum seks bar. Dette var tilgængeligt i DR 2's bygning som basisudstyr.

De forskellige typer af save viste sig at være ineffektive og vanskelige at håndtere, og i særdeleshed viste de sig ikke at være så hurtige som ønsket. Kombinationen af hårdt og blødt materiale gjorde det vanskeligt at finde den rette skæreskive med tilpassede savtænder. Derimod viste plasmaskæreren sig at være løsningen, idet den var i stand til at skære direkte igennem konstruktionen. Plasmaskæreren viste sig også let i vægt og let at betjene. Tillige kunne den let tilpasses fjernbetjening.

Skæringen af blynæsen fra termisk kolonne blev udført ved at montere plasmaskæreren på en forlængerarm på to meter. Skæringen blev udført af to ansatte fra DD, hvor den ene udførte skæringen med forlængerarmen, og den anden håndterede spændingskontakten fra en afstand af ca. 4 meter fra kolonnen. Dette fandt man, var den sikreste løsning for reduktion af persondoser men også begrundet i, at plasmaskæreren kræver høj spænding, og arbejder ved elektrisk kontakt (lysbue på op til 20.000 volt) mellem skærehovedet, og emnet, som skal skæres.



Figur 30 Plasmaskæring af blynæse. Afskærmningen med betonblokke ses i midten samt punkt udsugning.

Efter afskæring af blynæsen blev denne flyttet med kran direkte til en DD stålcontainer. Vægten af blynæsen var 1225 kg. I containeren blev blynæsen afskærmet med stålkugler og andet mindre radioaktivt affald.



Figur 31 Afskåret blynæse lægges i container.

Det blev konkluderet, at plasmaskærere til skæring og neddeling af konstruktioner i stål og aluminium samt boral (i stål: op til 28 mm finskæring og op til 40 mm råskæring) var fordelagtig for denne type opgaver på DR 2, og at det havde været så succesfuldt som forventet og værd at købe. Plasmaskæreren kan også anvendes i andre projekter. Særlige fordele kan fremhæves:

- hurtig skæring og også skæring i boralplader/sammensatte konstruktioner
- lav vægt
- håndholdt og let at montere på en forlængerarm
- fjernbetjening mulig

Brug af plasmaskærere forudsætter, at der er den nødvendige elektriske spænding tilgængelig, at der er trykluft tilgængelig, og at der etableres nødvendig udsugning i arbejdsområdet. Det skal også iagttages, at der arbejdes med høj spænding og høje varmegrader. Ved arbejdets udførelse blev der etableret punktudsug ved skærestedet og alle tilstedeværende medarbejdere bar åndedrætsværn med partikelfilter (klasse P3) jf. figur 30. På plussiden kan tilføjes, at faguddannede smede, som er vant til skærearbejde i metaller, uden større problemer kan anvende værktøjet, og at det derfor hurtigt kan implementeres i værktøjssortimentet.

Plasmaskæreren blev derefter anvendt til også at skære gitterpladen og andre tilbageværende konstruktioner i reaktortanken.

En negativ effekt er, at der ikke kan måles for luftkontamination med iCAMS under plasmaskæring, grundet tilstopning af glasfiltrene med meget fine støvpartikler. Overvågningen blev derfor lukket ned mens skæringen stod på, og genoptaget når plasmaskæringen ophørte. Herefter blev arbejdsområdet rengjort. Det skal bemærkes, at der blev anvendt ånde-drætsværn under hele arbejdets udførelse.

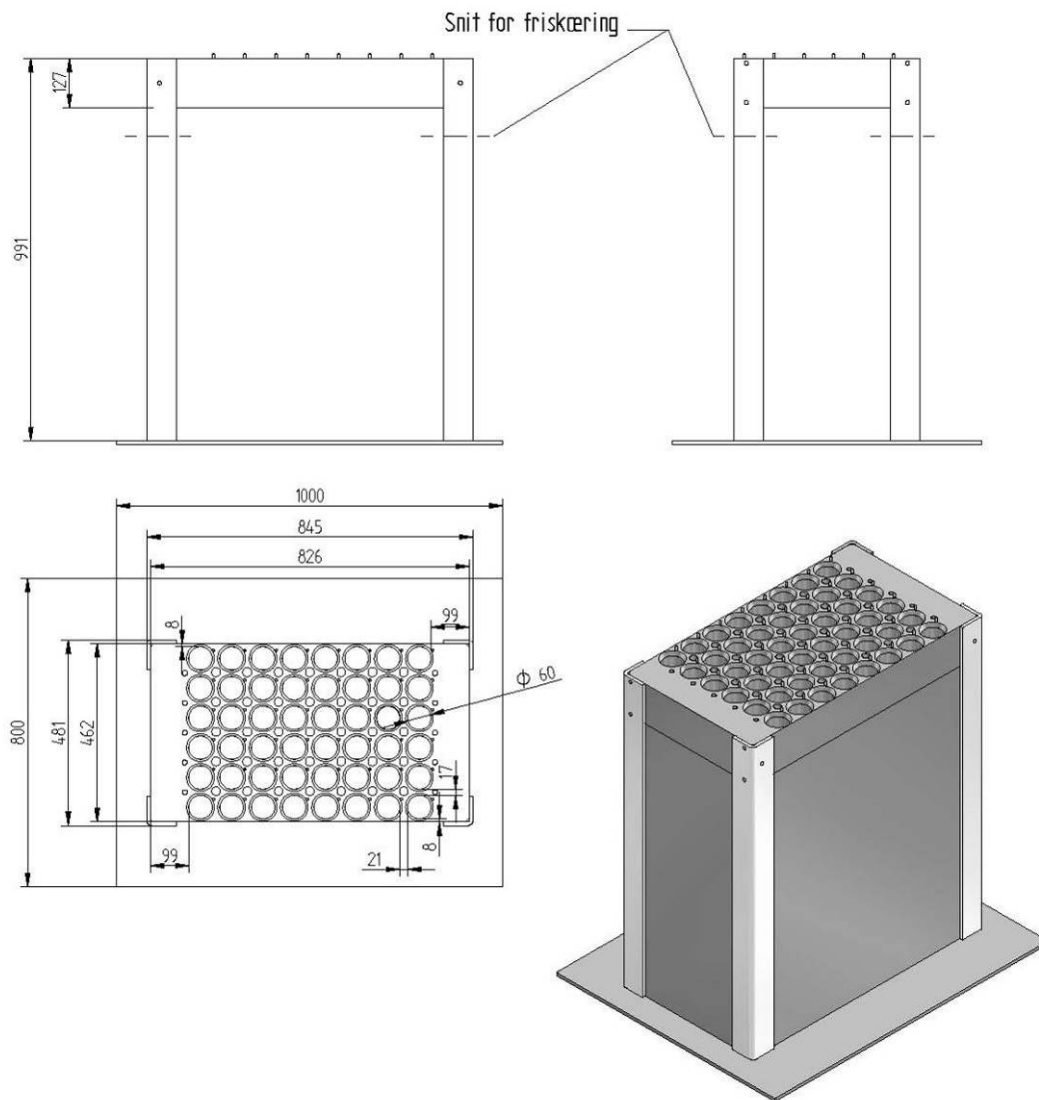
5.2.4.4 Doser ved udtagning af termisk kolonne

Arbejdet med at udtage den termiske kolonne bestod af to dele, udtagning af grafitstakken og udtagning af blynæsen. Under arbejdet med at udtage, registrere og overføre grafitstringere til containere blev der i alt registreret en kollektiv dosis på 0,5 person-mSv. Blynæsen blev skåret fri ved brug af plasmaskærer, hvilket indebærer, at teknikerne arbejdede forholdsvis tæt på det radioaktive emne. Den samlede kollektive dosis blev på 472 person-μSv, hvoraf to teknikere fik hhv. 200 μSv og 150 μSv, se kap. 9. Der var også hånd-doser til de to udførende teknikere på op til 0,4 mSv, se kap. 9.

5.2.5 Udtagning af gitterplade

Efter fjernelsen af blynæsen fra termisk kolonne var der åbnet for direkte adgang til gitterpladen, og de resterende konstruktioner i den nederste del af reaktortanken. Arbejdet omfattede således:

- udtagning af gitterplade fra reaktortank,
- udtagning af blykapper over instrumentrør,
- udtagning af foringsrør fra instrumentrør og
- udtagning af alu-konstruktioner monteret i bunden af reaktortanken (inkl. bærende konstruktionsstativ til gitterplade og stativ til blynæse).



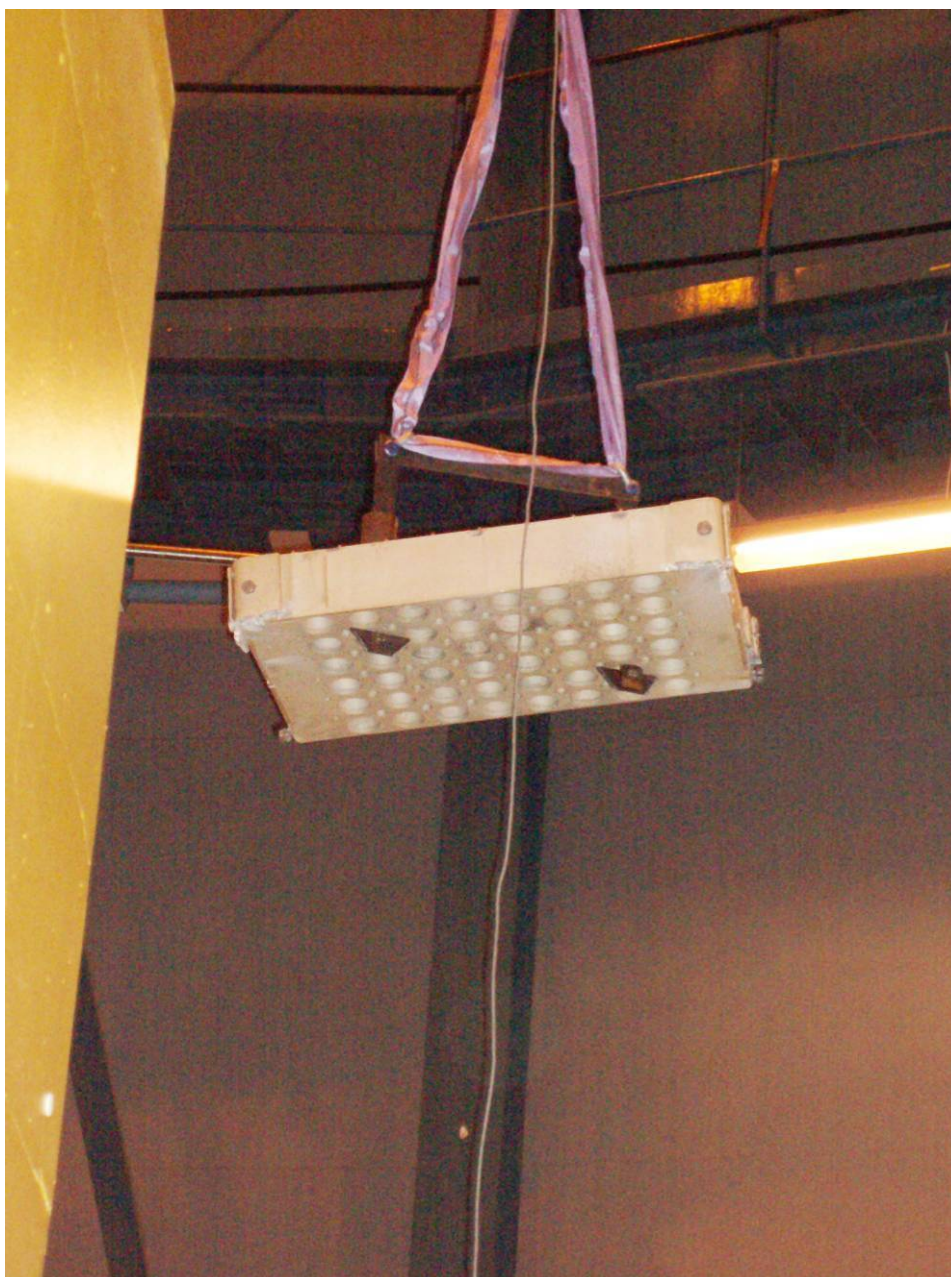
Figur 32 Gitterplade med stativ og angivelse af skæresnit.

Afskæringen af gitterpladen i reaktortanken foregik på tilsvarende måde som afskæringen af blynæsen. På grund af den højere dosishastighed fra den nu afdækkede gitterplade blev der til dette formål fremstillet en forlængerarm på otte meter, således at skæringen af gitterpladen kunne udføres fra tankåbningen ved reaktortoppen.

Under skæringen af gitterpladen og udløftningen af denne blev halområdet midlertidigt klassificeret som 'rødt strålingsområde'.

Før friskæringen af gitterpladen blev der fremstillet et simpelt løftebeslag. Beslaget blev udformet som et 'engangs' vippebeslag, som blev monteret igennem gitterpladens huller til brændselement. Løfteanordningen blev fastgjort på gitterpladen og blev opstrammet, således at gitterpladen ikke kunne falde ned, når denne blev friskåret.

Med forlængerarmen blev gitterpladen afskåret fra stativet ved alle fire hjørner under stålboltene med plasmaskærer. Herefter blev gitterpladen løftet med kran ud af reaktortanken via skorstenen og direkte til en container.



Figur 33 Gitterpladen løftes ud af reaktortanken. Løftebeslag og stålbolte ved hjørner kan ses.

For optimal pakning og afskærmning af gitterpladen i en DD-stålcontainer blev denne indledningsvis 'foret' med syv svagt radioaktive plugs udtaget fra de vandrette forsøgsrør. Pluggene blev lagt i bunden af containeren. Der blev lagt et lag af ca. 60 liter 2-4 mm stålkugler på pluggene i bunden af containeren. Kuglerne, der tidligere var hengemt i kælderen, virkede selvnivellerende.

Ovenpå blev der lagt en 40 mm stålplade plant i midten af containeren (stammende fra et andet neddelte emne). En tilsvarende plade blev klargjort til at lægge oven på gitterpladen.

Der blev fremstillet en ca. 20 cm høj stålkasse, ligeledes af 40 mm stål, hvori gitterpladen blev placeret. Stålpladen blev lagt oven på den improviserede afskærmningskasse. Endnu en omgang stålkugler blev lagt ovenpå. Containeren kunne nu opfylde kravene til dosishastighed på overfladen for opbevaring på mellemlageret, jf. kapitel 8.



Figur 34 Gitterplade i container før lukning. Afskærmningskassen og plugs kan anes i bunden.

Efter fjernelse af gitterpladen kunne det konstateres, at strålingsniveauet i reaktortanken var reduceret til 20 $\mu\text{Sv/h}$ ⁹, så det resterende arbejde kunne udføres manuelt på stedet.



Figur 35 Resterende indvendig konstruktion efter fjernelse af gitterplade. Blykapper over instrumentrør er fjernet.

Blykapperne over instrumentrørene kunne efter montering af løftebeslag flyttes direkte til en container, og de resterende dele i tanken kunne friskæres og neddeles med brug af plasmaskærer og andet håndholdt værktøj. Arbejdet blev nøje overvåget af en helseassistent, og for yderligere kontrol bar alle udførende teknikere håndledsdosimetre under disse operationer. Alle tilstedeværende bar åndedrætsværn.

⁹ Notat af 20. februar 2007, DR2 - dosishastighedsmålinger i reaktortank



Figur 36 De sidste indre dele i reaktortanken fjernes.

Den resterende del af termisk kolonne blev udtaget i forbindelse med nedbrydningen af betonkonstruktionen, som er beskrevet senere.

5.2.5.1 Doser ved udtagning af gitterplade

Gitterpladen blev skåret fri med plasmaskærer med forlænger på, hvorved operatøren kunne arbejde på afstand af gitterpladen. Herefter blev den hejst op gennem reaktortanken og direkte ned i en afskærmet container. Derfor blev de modtagne doser til de to udførende teknikere reduceret til 200 μSv hver under hele operationen, se kap. 9.

5.3 Dekommissioneringen af kølekredsløbet i kælderen

Dekommissioneringen af kølekredsløbet i kælderen under DR 2 reaktoren omfattede:

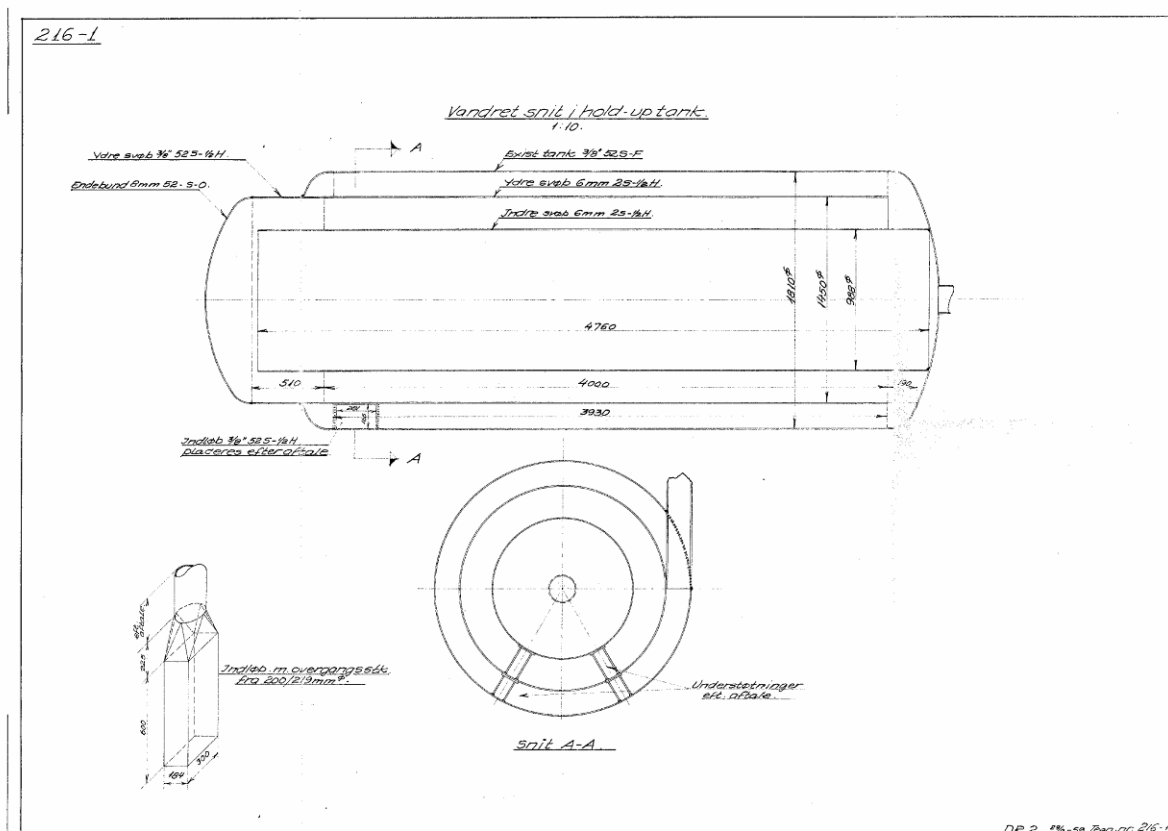
- henfaldstank (hold up tank)
- varmevekslere
- rør, pumper og ionbytter anlæg

Som det ses af diagrammet i afsnit 2.1.3, var henfaldstanken fysisk placeret i et adskilt rum i eksperimentkælderen. Tanken blev derfor nedtaget som en separat aktivitet. De øvrige emner var alle placeret i driftskælderen. En række rørføringer forbandt de enkelte elementer i de to kælder-rum samt til reaktoren. Overalt i kredsløbet kunne man se en mere eller mindre tydelig brunlig belægning. Der blev derfor udtaget 29 skrabeprøver/boreprøver flere steder i det primære kølekredsløb. Prøverne viste, at belægningen indeholdt op til 0,01 Bq/g materiale af ^{60}Co og ^{137}Cs , op til 100 Bq/g afskrab af ^3H og op til 600 Bq/g afskrab af ^{14}C . Koncentrationer-

ne varierede flere størrelsesordener gennem kredsløbet¹⁰. I de efterfølgende afsnit beskrives nedtagning og bortskaffelse af kølekomponenterne.

5.3.1 Henfaldstank

Henfaldstanken havde under reaktorens drift det formål at forsinke kølevandet før tilgang til det egentlige kølesystem, således at kortlivede radionuklider, specielt ¹⁶N kunne nå at henfalde.



Figur 37 Henfaldstank, snittegning.

Tanken var udført i høj kvalitet 8 mm tyk aluminium med en direkte tilslutning til bundafløbet i reaktortanken, og var således også placeret direkte under reaktoren. Konstruktionen omkring henfaldstanken var udført med ca. 1 meter tykke betonvægge, der også var en integreret del af de bærende reaktor- og bygningskonstruktioner.

Selve tanken var ca. fem meter lang og havde en ydre diameter på ca. to meter. Tanken var indvendigt opbygget med to svøb (6 mm), og indløb skete fra bunden af tanken med et vandret afløb via væggen til varmevekslersystemet i driftskælderen, som ses på figur 38. Den samlede vægt af tanken var på to tons.

Tanken var, som det øvrige primære kølekredsløb, se ovenfor, kontamineret indvendigt med primært ¹⁴C og ¹³⁷Cs. Det blev derfor besluttet at neddele tanken, og dennes svøb, i passende stykker, der kunne transporteres til DD's dekontamineringsfacilitet til afrensning. Selve neddelingen blev udført med en plasmaskærer. De neddelte emner blev indpakket i DD's alu-containerne for intern transport.

¹⁰ Notat af 5. juli 2007, *Frigivelsesmålinger på komponenter i driftskælderen på DR 2*

Alle dele fra henfaldstanken blev dekontamineret og herefter frigivet til bortskaffelse som aluminiumsskrot.

5.3.2 Varmevekslere

De to varmevekslere, der var placeret i driftskælderen (se figur 4, afsnit 2.1.3), var seks meter lange og indeholdt hver 2.020 stk. 6 mm kølerør i næsten fuld længde, svarende til omkring 8 km rør. Selve tanken var udført i 8 mm tyk højkvalitetsaluminium. Indvendigt var tankrummet opdelt med et antal skot for at sikre en jævn fordeling af kølevandet mellem kølerørene. Tankene var udført med aftagelige ydre endebunde i 12 mm aluminium.

Varmevekslertankene var, som en del af det primære kølekredsløb, kontamineret indvendigt. Det blev derfor besluttet, at tankene som udgangspunkt skulle neddeles og dekontamineres i DD's dekontamineringskabine.



Figur 38 Varmeveksleranlæg i driftskælderen før nedtagning.

Varmevekslernes endebunde, der var boltede, blev indledningsvis aftaget og sendt til dekontaminering uden større besvær. De indvendige rør viste sig ikke helt så nemme at udtage. 'Tidens tand' - erosion på overflader, og aflejringer på rørene, gjorde, at rørene ikke kunne trækkes hele ud igennem de indvendige endebunde. Det blev derfor besluttet at neddele rørene før udtagning.

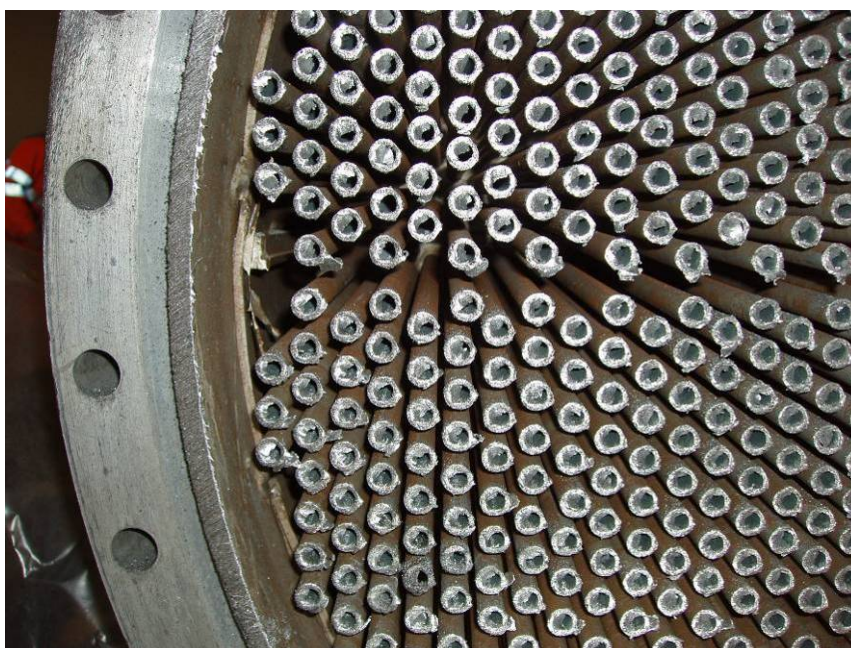
Der blev gennemført en række mindre forsøg med forskelligt skæreværktøj til neddelingen af rørene. Klipping og skæring med håndholdt skæreværktøj viste sig dog ikke praktisk anvendelig, da enderne af rørene ved overskæringen blev deformet og ikke kunne udtrækkes.

Da der parallelt med arbejdet i driftskælderen pågik wireskæring af betonkonstruktionen i reaktorhallen, blev det besluttet at forsøge med tør wireskæring af rørene, se figur 39.



Figur 39 Opstilling for tør wireskæring af varmeveksler rør.

Det blev fastlagt, at rørenderne skulle afskæres på den indvendige side af de indvendige endebunde. Det viste sig efter første forsøgsskæring, at wireskæringen forløb problemfrit og var relativt hurtigt. Det blev derfor besluttet, at der skulle udføres i alt fire snit med wireskæreren, således at alle ender af rørene i de to tanke var frilagte. Spredning af kontaminerede skærespåner fra rørene kunne nemt styres med en let afskærmning udført i plast.



Figur 40 Rørender i varmeveksler efter overskæring med tør wireskæring.

Efter overskæring af rørene (figur 40) blev disse trukket ud af tankene og yderligere neddelt til pakning i DD's ISO containere for oplagring som radioaktivt affald på DD's mellemlager. Tankenes ydre svøb blev neddelt, dekontamineret og efterfølgende frigivet til bortskaffelse som almindelig skrot.

Rørene fra varmevekslerne, der alle var overfladekontaminerede, blev besluttet ikke at skulle afrensnes. Dette blev besluttet på grundlag af forsøg med udvalgte rørstykker, med brug af manuel afrensning og afrensning ved brug af ultralyd. Det viste sig i alle tilfælde ikke effektivt og ressourcemæssigt rentabelt sammenholdt med, at rørene efter neddeling og optimal pakning, kunne indeholdes i en enkelt DD ISO container ($\sim 6 \text{ m}^3$).

Ud af en samlet vægt af varmevekslerne på 5,5 tons, blev i alt 2,7 tons ($\sim 50 \%$) frigivet efter dekontaminering af de ydre endebunde og tankenes ydre svøb.

5.3.3 Rør, pumper og ionbytteranlæg

5.3.3.1 Ionbytteranlæg

Ionbytteranlægget på DR 2 bestod af en kationbytter og en mixed-bed ionbytter (til venstre på nedenstående figur 41). Den sidste bestod af en blanding af kationbyttermasse og anionbyttermasse. Under driften blev de to slags ionbyttermasser blandet ved hjælp af trykluft. En række rør, pumper og diverse målere udgjorde resten af anlægget. En keramisk beholder til den kemiske regenereringsopløsning, som blev anvendt i processen (der blev anvendt bl.a. natriumhydroxyd og svovlsyre), var tidligere blevet fjernet i forbindelse med nedlukningen af DR 2.

Kationbytteren var afskærmet af blysten, som indledningsvis blev fjernet. Begge tanke indeholdt rester af ionbyttermasse og filtersten, som blev udtaget og kontrolmålt. Det kunne konstateres, at massen var svagt radioaktiv, og den blev bortskaffet som radioaktivt affald.

Rørsystemet var, som en del af det primære kølekredsløb, kontamineret indvendigt, jf. side 51. Da rørdimensionerne var små, og mængden ubetydelig, blev det besluttet at bortskaffe rørsystemet som radioaktivt affald.

Selve ionbyttertankene blev klassificeret som kontaminerede med mulighed for afrensning (gult affald) og sendt videre til DD's dekontamineringsfacilitet og senere frigivelse som skrotjern.

5.3.3.2 Rør og pumper i kældere

Som det fremgår af diagrammet i Figur 4 over driftskælderen i afsnit 2.1.3, indeholdt kølekredsløbet en lang række rørforbindelser og pumper, ventiler, målere o. lign. Hovedrørsystemer fra hold up tank og til varmevekslere var udført i $\varnothing$ 6"-8", aluminiumsrør med godstykkelse på 6mm.

Systemet indeholdte tre stk. hovedpumper af amerikansk oprindelse (USA). Disse pumper blev udtaget særskilt og destrueret under overvågning af inspektører fra IAEA og EURATOM.

Rørsystemet kunne konstateres at være kontamineret indvendigt, jf. side 51. Alle rørstykker, ned til $\varnothing$ 2", blev neddelt i længder af en meter, registreret og pakket, og sendt videre til DD's dekontamineringsfacilitet. Alle øvrige emner blev kontrolmålt på stedet, og emner, der ikke kunne frigives, blev defineret som radioaktivt affald og bortskaffet. Alle emner, som kunne frigives på stedet, blev bortskaffet som almindeligt skrot.

Driftskælderen indeholdt også en såkaldt 'sump' med forbindelse til nødtankanlægget. Denne var udført i stål og kunne ophugges fra betongulvet og sendes til dekontaminering.

Rør ført gennem vægge til henfaldstanken eller eksperimentkælderen blev ligeledes fjernet. Herfra er dog undtaget returrøret til reaktortanken, som sidder i væggen mellem driftskælder og eksperimentalkælder. Dette rør har en bøjning som gør, at det først kan fjernes, når væggen rives ned.

5.3.4 Fjernelse af løse emner oplagret på DR 2

I både driftskælderen og eksperimentkælderen har der gennem tiden været oplagret forskellige emner stammende fra diverse forsøg, driften af DR 2, aktiviteterne i bygningen efter DR 2's nedlukning samt emner fra de øvrige reaktorer på området. Før igangsætningen af dekommissioneringsarbejdet på kølesystemerne skulle disse ting fjernes. Alle emner skulle således registreres i ADS, kontrolmåles og bortskaffes efter samme retningslinier som for reaktoranlægget.

For at anskueliggøre omfanget af dette arbejde og hvilke tiltag, der blev foretaget i forhold til de enkelte emner, er her givet en oversigt i tabelform fra arbejdsplanerne (som udført) for udvalgte emner.

Foto	Beskrivelse og aktion:
 1	Emne: • Aktivt ventilationsanlæg for reaktorblok inkl. rør, filter, motor, m.v. • 2 stk. træ 6 x 14 cm, længde ca. 8 m.
 2	Måling på stedet / i F-lab.: • Er målt, og der er taget smertest indvendigt, som viser kontamination på alle dele. Dele skal dekontamineres i kabinen, hvilket kræver neddeling. • Rør (billede 1+2) emballeres med plast for transport. • Rør transporteres til hallen mhp. neddeling. • Rør neddeles på med sav (i hallen) til max 1 meter, pakkes enkeltvis i plast og ilægges alu-container. • Rør transporteres til bufferlager mhp. senere dekontaminering. >"GULT"
 3	• Filterkasse (billede 4) løftes ud for at lette tilgængelighed. • Fra filterkassen skal filtre udtages til deponering. Bemærk, at der er tale om absolutfilter samt, at der kan være olierester som skal opsamles ved åbning. Pakkes og transporteres i ISO-container >"RØDT".
 4	• Filterkasse (adskilles om nødvendigt yderligere) ilægges og transporteres i alu-container til bufferlager mhp. senere dekontaminering >"GULT". • Motor (billede 1) måles på stedet og bortskaffes som rødt affald til deponi. Pakkes og transporteres i ISO-container >"RØDT". • Pumpe til rørpost og flow-måler (billede 3) måles på stedet og bortskaffes til deponi. Pakkes og transporteres i ISO-container >"RØDT".
	• Træ (billede 1) måles på stedet og bortskaffes jf. AHF anvisning. • Alle dele vejes. • Der vil være behov for nødvendigt løftegrej samt skæreværktøj. • Indledningsvis etableres et arbejdsområde til neddeling af rør og adskillelse af filterkasse. Dette område etableres med plastunderlag samt ophængning af plast "vægge" for at undgå spredning af kontaminerende fragmenter ved neddeling. • Der etableres evt. et 'måleområde' jf. AHF anvisning.

Foto	Beskrivelse og aktion:
 5	Emne: • Dele fra reaktor DR 2 udtaget ved karakteriseringsprojektet. Måling på stedet: • Kassen flyttes op i hallen og alle emner måles og registreres i ADS >"BLÅT". • Neddeles på sav såfremt der skal ske videre transport i alu-container til F-laboratoriet. • Alle dele vejes.
 6	Emne: • Kasse med gamle el-komponenter Måling på stedet: • Indledningsvis måles kassen på stedet. • Kassen flyttes op i hallen, og emnerne kontrolmåles her, og det vurderes, om de skal måles yderligere på F-lab => "BLÅT". • Kassen vejes.
 7	Emne: • Neutronkilde afskærmning. Ikke fra DR 2 Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Transporteres til AH-hal for adskillelse og måling • Vejes.
 8	Emne: • Dummy elementer og andet gemt fra DR 2, som ikke har været brugt. • Skal gives til museum. Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Alle elementer måles på stedet • Rengøres (overflade) og pakkes i kassen ("museums kasse") (hvis de kan frigives). • Transporteres til museum
 9	Emne: • Plastikbeholder mærket "kemi". Har ikke været brugt i forbindelse med drift af DR 2. Menes at stamme fra senere uranprojekt. Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Beholder måles på stedet, foto registreres. • Der skal tjekkes for rester/væsker i beholdere.

Foto	Beskrivelse og aktion:
 10  11	Emne: • Pumper syv stk. • Kraftig gummislange $\varnothing 10$ mm, længde ca. 45 m. Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Pumper og slanger adskilles ved overklipping af slange ved sammenkobling. • Alle emner måles enkeltvis på stedet. • Hvis måling er 'positiv', skal <u>pumper</u> med motor flyttes op i hallen for måling, hvor de skal sorteres og det skal undersøges, om de skal på F-lab => "BLÅT". • Hvis måleresultater er 'positive', skal <u>slanger</u> klippes i passende længder (1 m) og kommes i alu-container for måling på F-lab. => "BLÅT". • Det skal ligeledes undersøges og besluttes, om pumpe og motor med fordel kan adskilles på stedet. • Alle dele vejes.
 12  13	Emne: • Diverse affald. Grafit / træ / metal. • Grafitten er ny grafit til brug i termisk kolonne. • Diverse løse beslag, bolte, affald (papir, plast, træ), o. lign. i driftskælder. Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Alt, der kan måles 100 % på stedet, måles, og det øvrige pakkes enkeltvis for måling på F-laboratoriet. • Hvis F-lab/ADS skal disse dele vejes.
 14	Emne: • Grafit er fra DR 1-EXPO forsøget. Har været udsat for neutroner. • I alt 102 stringere 10×10 cm, længde fra 1 m til 1,5 m. Måling på stedet / i F-laboratoriet: • Stængerne pakkes ikke ud, men plastik aftørres let inden pakning på en palle, og hver enkelt stang måles på stedet. • Fra alle stængerne udtages en lille materialeprøve (fx afklipping af hjørne), som skal sendes til NUK for måling af ^{14}C. Prøverne samles i plastkasse for transport. • Der aftales prøveplan med NUK mhp. hurtig frigivelse, evt. løbende proces med et x-antal prøver pr. dag.

Foto	Beskrivelse og aktion:
	• Både grafitstang og prøve nummereres, så de passer sammen parvis. • Alle dele vejes. • Grafitstænger stables på en alupalle uden kanter, indpakkes med plast om hele pallen og sendes til bufferlager. • Alt registreres i ADS, inkl. registreringsnummer på indpakning for hver stang. • I container transporteres grafitstænger til bufferlager. Den videre færd bestemmes ud fra måleresultater fra NUK.

5.4 Nedbrydning af den biologiske afskærmning/reaktorblokken

5.4.1 Fastlæggelse af omfang af aktiveret beton - karakterisering

Til fastlæggelse af omfang og udbredelse af neutronaktiveret beton i reaktoraftskærmningens betonkonstruktion, blev der udført en række boreprøver og udtagning af borekerner.

Generelt for udtagningen af borekernerne gjaldt det, at for at undgå kontamination af det yderste "næsten inaktive" lag med det inderste "mere aktive" skulle der ikke udføres gennemgående borer i én proces. Det blev derfor besluttet, at det var fordelagtigt at udtage de første 100 cm kerne i en adskilt boring (ydre del). Derefter blev borehovedet rengjort eller udskiftet før udtagning af den næste 100 cm borekerne (indre del). Det var også forudset, at hvis der blev taget borekerner ud med vand som kølemiddel, kunne boreslammet kontaminere den øvrige del af kernen, ligesom vandet kunne give anledning til udludning. I boreprocessen var det derfor nødvendigt løbende at overvåge udviklingen.

Det blev indledningsvis overvejet at udtage en boreprøve af gulvet/etagedækket under reaktorblokken. Dog blev det senere besluttet at lade den aktive profil i betonen fortsætte ned i etagedækket.

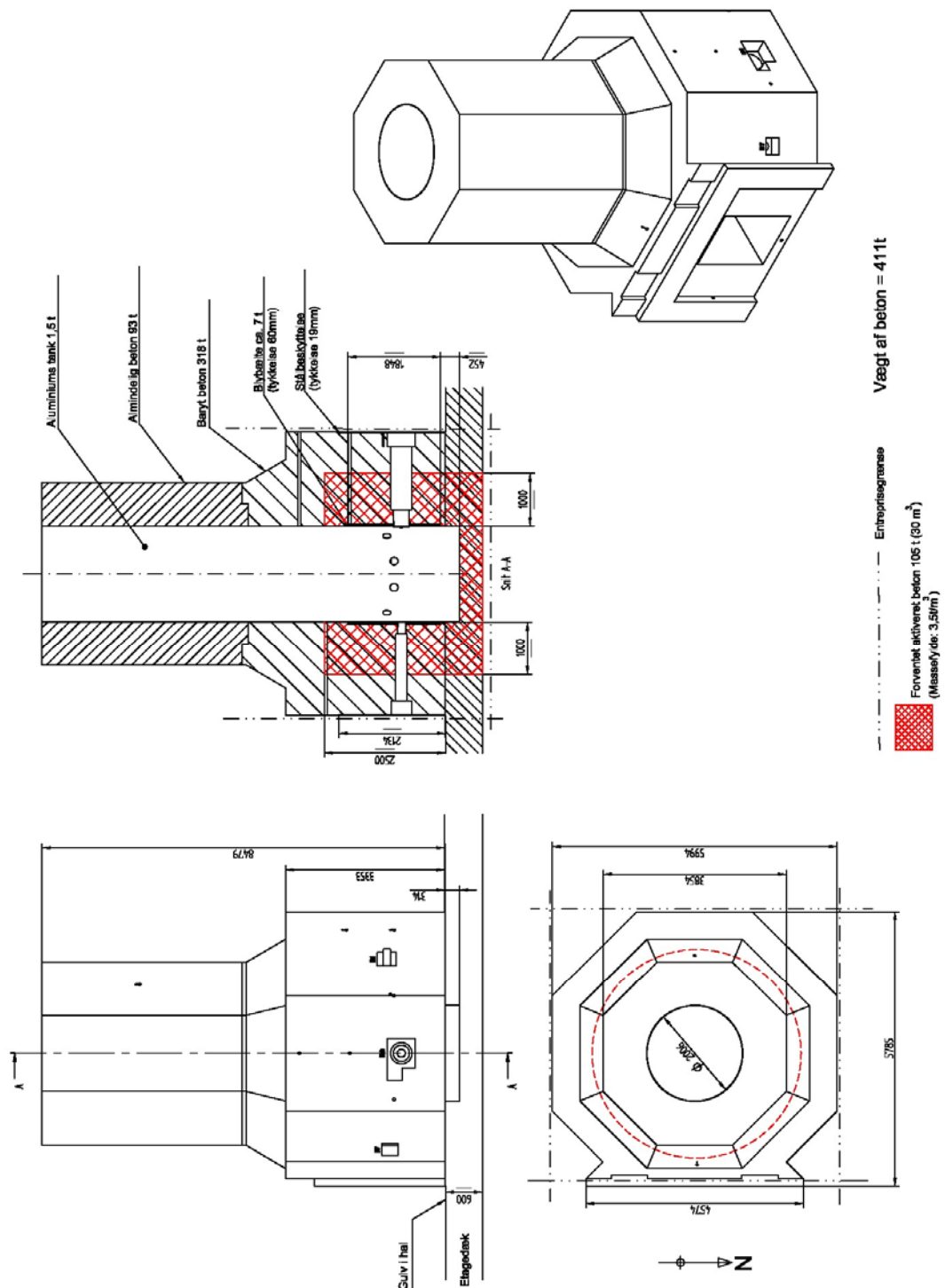
I alt blev der foretaget 20 borekerneprøver i reaktorblokken. Alle boreprøver blev udtaget vandret. I hovedparten af boreprøverne blev der boret ind mod den lodrette akse, der går gennem reaktorkernen. Herved blev der opnået en direkte aktivitetsprofil gennem betonlaget. Der blev dog også udtaget borekerner for fastlæggelse af aktivitetsprofilen omkring forsøgsrørene og ved termisk kolonne samt igloen.

Placeringen af de i alt 20 boreprøver, og analyseresultaterne af de udtagne borekerner fremgår af bilag 1, 6 og 7.

På grundlag af de gennemførte borekerne prøver og analyse på DD's F-laboratorium blev det fastslået, at den ikke-frigivelige beton (herefter kaldet "aktive profil") strakte sig cylindrisk ud fra kernen i en tykkelse af én meter i betonkonstruktionen. Reelt var der tale om lidt mindre, men af sikkerhedshensyn blev profilen fastlagt som angivet. Højden af den aktive cylinder var 2,5 meter over gulv og med samme radius som nævnt ovenfor, 25 cm ned i etagedækket mod kælder. Af praktiske grunde blev det

fastlagt, at gulvet (dæktykkelse = 60 cm) under reaktorblokken skulle fjernes i sin helhed. Den definerede aktive profil er illustreret på figur 42.

Omkring de vandrette forsøgsrør, instrumentrør og T-rør blev der konstateret en højere grad af aktivering af betonen umiddelbart omkring rørene. Det blev derfor besluttet, at en profil svarende til det aktuelle rørs ydre radius + 10 cm skulle fjernes som radioaktivt affald.



Figur 42 Aktivt profil i reaktorblok.

På grundlag af den fastlagte geometri af den aktive beton i reaktorafskærmningen kunne der nu udarbejdes retningslinjer for nedbrydningen og adskillelsen af betonkonstruktionen.

5.4.2 Nedbrydningen af reaktorblokken

Da DD ikke besidder de nødvendige ekspertiser og udstyr for nedbrydning af større betonkonstruktioner, blev der gennemført et offentligt udbud af nedbrydning af betonafskærmningen. Udbudsprocessen blev gennemført i andet halvår af 2006, og betonnedbrydningsentreprisen blev igangsat umiddelbart i begyndelsen af 2007. Den forventede entrepriseperiode var sat til ca. 1 år.

Efter prækvalificering blev fire udvalgte nedrivningsfirmaer inviteret til at afgive tilbud på opgaven. Hovedkravene til tilbudsgivningen og kontrakten blev fastlagt til at omfatte:

- Tilbudsgiver fremsætter forslag til metode (fx stålsav, wireskæring, hydraulisk spaltning eller hydraulisk hammer)
- Kun anvendelse af tørre metoder (intet vand)¹¹
- Brug af telt og ingen spredning af kontamination i bygningen og omgivelserne (undertryk)
- Beton og andre materialer fra reaktoren skal opdeles i aktive og ikke-aktive materialer
- Optimal opfyldning af containere med aktivt affald til depot
- Maksimal sikkerheds- og helbredssikring
- Fuld dokumentation og kvalitetssikring

Dette blev yderligere defineret og specificeret i udbudsmaterialet til de bydende. Som statsligt selskab blev der endvidere stillet krav til udførelsen i henhold til NMK96 [9].

5.4.2.1 Krav til betonnedbrydningsentreprisen

Nedbrydningsentreprisen bestod primært af betonnedbrydningsarbejde samt håndtering og bortskaffelse af nedbrudte materialer. Det specielle i denne nedbrydningsentreprise var, at dele af konstruktionerne var svagt radioaktive, hvilket betyder, at støv og evt. vand kunne medføre risiko for uønsket spredning af aktiverede materialer. Dette stillede store krav til entreprenørens planlægning, metodevalg og dokumentation.

Nedbrydningsarbejdet i entreprisen omfattede:

- Etablering og drift af arbejdsplads og dertil hørende velfærdsforanstaltninger
- Nedbrydning af reaktorblokken
- Etablering og drift af miljøforanstaltninger i forbindelse med nedbrydningen

¹¹ Afledt af "Lessons Learned" fra DR 1 projekt.

- Bortskaffelse af rene (ikke aktiverede / - kontaminerende) nedbrydningsprodukter
- Håndtering af kontaminerende /aktiverede nedbrydningsprodukter, der skal forblive på DD's område.

I udbudsmaterialet blev der fastsat to primære succeskriterier for nedbrydningen af reaktorblokken:

- Spredning af støv, skæreslam og andre kilder til spredning af aktiveret materiale skal undgås.
- Entreprenørens udførelse skal på ethvert tidspunkt tilgodese en minimering af det affald, der skal deponeres som radioaktivt.

Metode

Entreprenøren blev fritstillet med hensyn til valg af arbejdsmetoder og hjælpemidler, men blev anmodet om, i forbindelse med afgivelse af tilbud, at beskrive de planlagte metoder m.v. i detaljer.

Dog skulle entreprenørens metodevalg sikre en opdeling mellem aktiveret affald og affald til frigivelse. Aktiveret beton skulle således adskilles fra ikke aktiveret beton og neddeles til en passende håndtering og bortskaffelse. Den valgte metode er beskrevet i afsnit 5.4.2.3.

Vand

En række yderligere betingelser for udførelsen blev endvidere fastlagt, herunder for anvendelsen af vand. Anvendelse af vand i forbindelse med nedbrydningen af DR 2 var ikke ønskeligt. Årsagen var, at vand med radioaktivt betonstøv er et problematisk materiale. Dels kunne betonen kontaminere vandet, der derfor skulle renses. Dels betød de mange kanaler og rør i reaktorblokken, at vand i forbindelse med eksempelvis skæring kunne være svært at styre og kunne indebære risiko for ophobning af vand på steder, hvor det kunne blive kontamineret og senere løbe ukontrolleret ud på gulvet i reaktorhallen og/eller ned i kælderen. På den baggrund var det ikke tilladt at anvende vand ved bearbejdning af selve reaktorblokken.

Telt

Nedbrydningsarbejdet måtte ikke medføre, at reaktorhallen blev kontamineret. Det blev derfor krævet, at vægge og loft beskyttedes mod støv fra nedbrydningen.

Dette skulle sikres ved etableringen af et ventileret telt omkring reaktorblokken, hvori der kunne etableres ventilation med et undertryk i forhold til omgivelserne og dermed opslugning af støv. Herved kunne der oprettholdes et godt arbejdsmiljø uden spredning af radioaktivitet til den øvrige del af DR 2 hallen.

For at give entreprenøren et passende referencegrundlag ved udarbejdelse af løsningsforslag og prissætning af opgaven (tilbudsgivning), blev det defineret, at teltet som minimum skulle opfylde kravene angivet i "Den grønne asbest vejledning"¹², herunder Arbejdstilsynets bekendtgørelse 1502 af 21. december 2004. Herudover skulle entreprenøren opfylde bl.a. følgende krav til teltets indretning og drift:

¹² Alment kendt i nedrivnings- og asbestsaneringsbranchen

- Etablere en procedure – evt. ved brug af sluse – der sikrede at støv ikke kunne spredtes i forbindelse med, at nedbrydningsprodukterne transporterendes ud af teltet.
- Indrette teltet således at omklædning sker, inden personerne forlader arbejdsområdet.
- Etablere selvstændig ventilation af teltet uafhængig af eksisterende ventilation i hallen.
- Etablere undertryk i teltet. Undertrykket i teltet skulle overvåges elektronisk. Såfremt undertrykket forsvandt, skulle der automatisk afgives tydelig alarm med lyd og gult lys, hvorefter arbejdet skulle standses, indtil årsagen var fundet og udbedret.
- Luftudskiftningen skulle sikre, at sigtbarheden i teltet ikke forhindrede, at arbejdet kunne udføres sikkert og præcist.
- Luften fra teltet, skulle filtreres inden udkastning til det fri (hallen). Sidste filter i udsugningen skulle som minimum være et HEPA filter.
- Selve teltet skulle kunne rengøres effektivt.
- Udsugningssystemet skulle kunne rengøres effektivt.

Teltets endelige dimensionering og indretning blev fastlagt i samarbejde med DD under detailprojekteringen, og tilpasset den valgte metode, og de nødvendige arbejdsoperationer ved nedbrydningsarbejdet og affaldshåndteringen, som nærmere beskrevet nedenfor.

Herudover blev der stillet en række krav til håndtering og pakning af DD's containere med aktivt materiale, bortskaffelse af frigivet affald til kommunal anvisning og til renholdelse og rengøring af arbejdsområder.

Betonnedbrydningsentreprisen blev efter udbudsprocessen tildelt nedbrydningsentreprenør G. Tscherning A/S i hovedentreprise. Entreprenørens hold bestod af G. Tscherning A/S (betonnedbrydning) i samarbejde med MT Højgaards Bore- og skæreafdeling (boring og wireskæring), ventilationsfirmaet Dantherm Filtration (ventilation og centralsug), stilladsfirmaet E-service (telt og stilladser) og vognmand K. Jensen & Sønner (affaldsbortskaffelse). Herudover leveredes en række mindre opgaver af eksterne underentreprenører (skæring af stål, diverse udstyr m.v.).

5.4.2.2 Forberedende arbejder, indretning af arbejdspladsen

Telt

Der blev etableret et telt omkring reaktorblokken som led i arbejdspladsens opbygning. Teltet opbyggedes tæt og i en styrke som muliggjorde etablering af undertryk og flytbare punktudsugninger. Teltet blev opbygget i en størrelse på ca. 15 x 14 m og i en højde på 10 m. Opbygningen bestod af stilladsmateriale (stål) i 70 cm bredde, indvendigt beklædt med kraftig og klar presenning for opnåelse af så højt lysindfald som muligt ('Monarflex'). De nederste 1,5 m blev indvendigt beklædt med krydsfiner for at hindre maskiner, værktøj eller affald i at perforere presenningen (teltdugen). Teltets indvendige overflade var således glat, tæt og rengøringsvenlig.

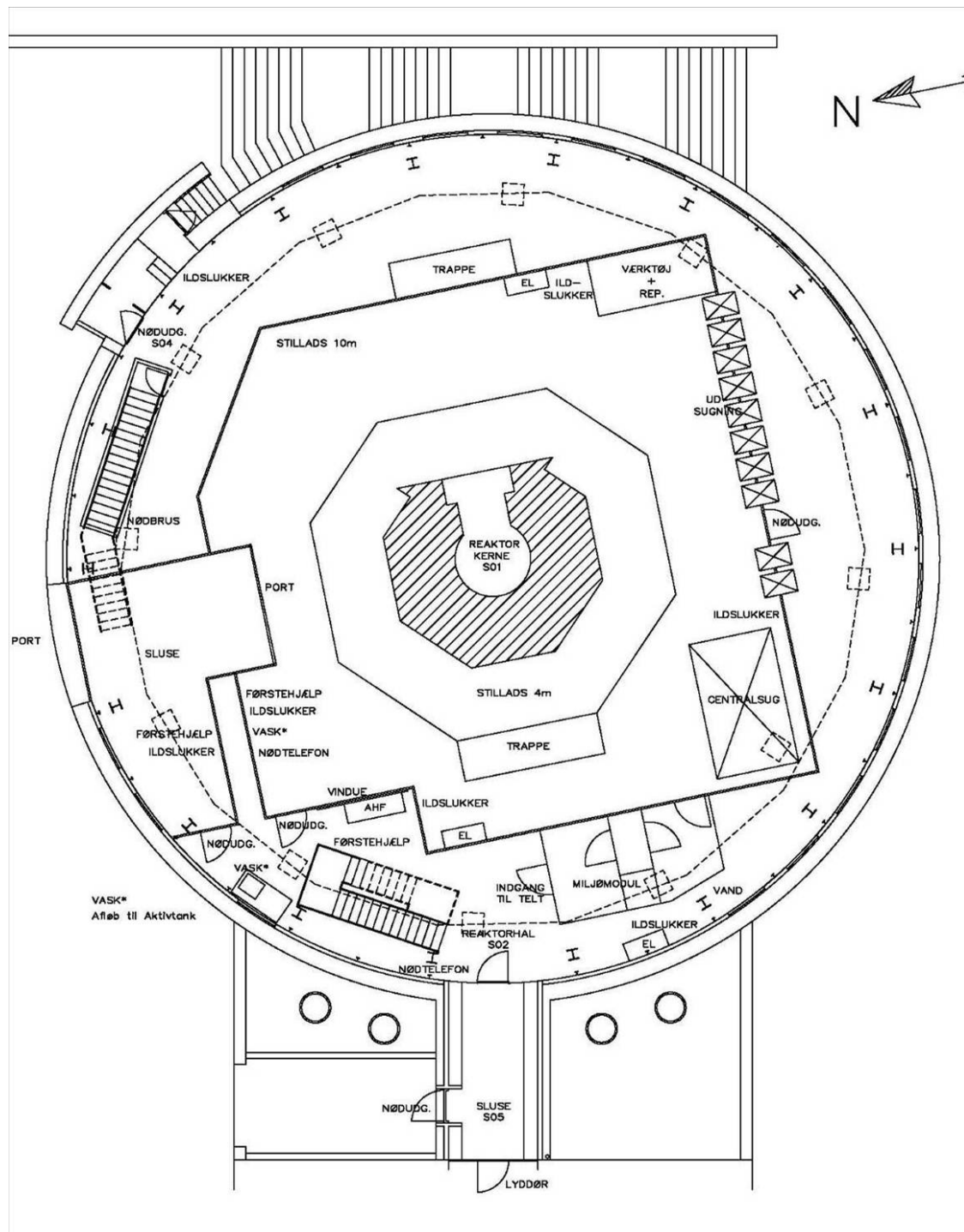
Teltets tag blev opbygget af gitterdragere, hvortil der blev fastgjort krydsfinerplader, hvorved der skabtes mulighed for færdsel for inspektion, ændringer eller reparationer. Tætning mellem tag og teltsider sikredes ved brug af tætningslister.



Figur 43 Stillads opsættes omkring reaktor

For at optimere arealet af arbejdsområdet og sikre en smidig håndtering af affaldsmaterialer, der skulle borttransporteres, blev den eksisterende sidehængte port til reaktorhallen udskiftet med en moderne vertikalt kørende ledhejseport (lodret rullende med skinneføring i siderne). Mellem teltet og porten i hallen blev der etableret en sluse, som var opbygget som det øvrige telt. En ledhejseport blev opsat mellem arbejdsområdet ved reaktorblokken og porten til reaktorhallen. Slusen sikrede den nødvendige udførelse af rengøring og kontrolmålinger af affald og materiel uden for arbejdsområdet omkring reaktorblokken. Efterfølgende blev frigivet affald og materiel taget ud via hallens port. I slusen etableredes døre som adgangsvej udelukkende for DD's helsefysiske – og tilsynsførende personale.

Indretningen af arbejdsområdet i reaktorhallen er illustreret i figur 44.



Figur 44 Indretningsplan for telt ved betonnenedbrydning (procestrin 1).

Alle samlinger i teltets inddækkende presenning udførtes med vulkaniserende dobbeltklæbende samlinger. Der blev endvidere etableret en række flugtvejsdøre i teltet. Dette sikrede samtidig DD's medarbejdere hurtige adgangsveje for inspektion af arbejdsområdet.



Figur 45 Stillads beklædt med presenning på inderside og personsluse i tre trin opbygges

Normal adgang for entreprenørens personale til arbejdsområdet foregik via et etableret tretrins slusesystem. Omklædnings og sluseadgang blev sat op uden for teltet med direkte adgang fra hallen og fra teltet. Sluseopbygningen bestod af et område for aftagning af eventuelt kontamineret arbejdstøj, gennemgang og nødbrydning samt et område for iklædning af rent tøj eller kittel. Nedbrydningsarbejdet, og relateret ophold i teltet, udførtes af personel iført heldragt og såkaldte turbomasker med minimum P3 filtre.

Færdsel mellem reaktorhal og arbejdsområde skete gennem slusemodulet. Færdsel ind og ud af hallen foregik via DD's eksisterende anlæg og faciliteter. Udgang fra hallen og arbejdsområdet afsluttedes ved kontrolmåling på stationær hånd- og fodmonitor. Alt personel i arbejdsområdet bar TL dosimetre og elektroniske MGP dosimetre (jf. kapitel 9.1).

Under entrepriseudførelsen blev der foretaget daglige kontroller af teltdug og konstruktion for at reducere risici for utætheder.

Den valgte teltløsning gav en stor konstruktionsmæssig styrke, den nødvendige tæthed, optimalt lysindfald, mulighed for visuel inspektion af arbejdet fra hallen, gode muligheder for fastgørelse af forsyninger og hjælpematerialer, ligesom teltets opbygning gjorde det let at rengøre overfladerne indvendigt og at inspicere og eventuelt reparere teltet udefra.

For at kunne udføre den første del af betonnenedbrydningen, som skulle udføres med mini-maskiner, blev der opstillet en arbejdsplatform i stålstillads, placeret i 4,5 m højde omkring skorstenen. Platformen, der var ca.

to meter bred, blev fastgjort til reaktorblokken for at kunne modstå de vandrette kræfter, når nedbrydningsmaskinen arbejdede. For at undgå nedfald af brokker i bunden af reaktortanken, blev der samtidig opsat en afdækning inde i skorstenen, i ca. fire meters højde over gulvet, lige over overkanten af reaktorblokkens nedre del. Afdækningen blev udført i fem mm rund stålplade, som vandret hvilede på brændselsracket i tankens side (se figur 16).

Rummet under reaktortanken (Opholdstankrummet) blev adskilt fra den øvrige del af kælderen ved opsættelse af en tæt, midlertidig væg med dør, beklædt med samme type presenning som teltet. For opretholdelse af undertryk i dette rum, blev der opsat en særskilt udsugning (miljøboks) med HEPA-filter og udblæsning til kælderen.

Ventilation og punktudsugning

Ventilationen i teltet etableredes for at opnå et generelt undertryk (i forhold til hallen) og for tilslutning af punktudsug til brug ved nedrivningsværktøjer. Begge anlæg blev samlet af miljøbokse (selvstændige, filtrerende ventilationsenheder, tilsvarende til brug ved fx asbestarbejde). Miljøboksene var forsynet med forfilter, grovfilter og HEPA-filter.

Alt luftafkast fra teltets ventilationsanlæg skete direkte til hallen, hvorved afkastet luft fra arbejdsområdet var omfattet af DD's løbende luftmonitoring, jf. kapitel 9.

Generelt undertryk, som i alle tilfælde blev opretholdt under nedrivningsarbejdets udførelse, etableredes ved opsætning af otte miljøbokse. Luftskiftet under nedbrydningen af reaktorblokken blev beregnet som tilsvarende luftskiftet ved asbestarbejde, 10 gange pr. time. Miljøboksene blev fordelt i teltets sydfacade (se figur 44), idet undertrykket blev etableret ved udtræk af luften umiddelbart over gulvniveau. For at sikre at undertrykket altid opretholdtes med 20 Pa, i forhold til hallen, blev miljøboksene tilsluttet to separate strømforsyninger. Undertrykkets tilstrækkelighed blev overvåget kontinuerligt med trykmåler, og eventuelt fald til kritisk niveau gav både et optisk og et akustisk signal samt sendte en SMS til en udvalgt mobiltelefon.

Anlægget for punktudsug opførtes som et centralt anlæg som, via et rør-system med 10 aflukkelige udtag/studse, placeredes langs teltsiden, hvortil slanger til punktsug kunne tilsluttes. Herved mindskedes omfanget af udsugningsslanger direkte på gulvet. Typisk anvendtes 5-6 samtidige punktsug. Ved maskinel nedrivning (fx med en nedbrydningsrobot) blev punktudsugningen fastgjort direkte i tilknytning til nedrivningsværktøjet, og ved skærearbejder med wire, der foregik i skærekasser blev punktudsugningen tilsluttet disse.

Det etablerede system begrænsede støvemissionen og spredningen i selve teltet, idet skærestøv og mindre betonfragmenter blev opsamlet tæt på kilden og ført direkte i tromler for videre håndtering.

Den valgte løsning bidrog samtidig til, ved afsluttende fjernelse af filtre, at centralsugeanlægget nemt kunne rengøres.

Den valgte ventilationsløsning vurderes af have medvirket til en høj grad af sikkerhed mod nedbrud, fleksibel tilpasning af luftskifte, velordnet adgang til punktudsug ved alle arbejdsområder, opsamling af støv tæt på

kilden, sikker håndtering af opsamlede støvmængder og alarmering ved svigtende undertryk i teltet. Ventilationsanlægget og centralsuget levede således op til bygherrens krav til arbejdets udførelse.



Figur 46 Venstre: Udsugningsanlæg på afkastsiden og i baggrunden afkast fra punktsug. Højre: Anlæg til punktudsug med tønde til opsamling af støv og afkast via HEPA filter.

Kontaminationsgraden i teltet blev vurderet dagligt ved stikprøvekontrol udført af DD's helsefysiske personale, jf. kapitel 9.

Arbejds miljø og sikkerhed

Sikkerheds - og arbejdsmiljøforanstaltninger blev også prioriteret højt i betonnedbrydningsprojektet som nærmere beskrevet i afsnit 5.4.3.

Det blev som udgangspunkt besluttet at der skulle fastlægges krav til sikkerhed og brug af værnemidler, som skulle gælde for alle medarbejdere i arbejdsområdet (telt) og, at disse regler skulle gælde i hele projektperioden, indtil nedklassificering af området var opnået.

Der blev således stillet krav til anvendelse af traditionelle værnemidler som eksempelvis hjelm, sikkerhedsfodtøj og øjenværn. Der blev fastsat krav om anvendelse åndedrætsværn med partikelfiltre. Ved længere ophold i telt (udførende) skulle der anvendes de såkaldte turbo masker og ved kort ophold (fx kontrolmålinger) kunne der anvendes engangsmasker. Alle filtre/masker skulle være af klasse P3, som beskytter mod de fleste typer sundhedsskadeligt støv (fx kvartsstøv, asbeststøv o.lign.) samt aerosoler og også dækker radioaktive partikler.



Figur 47 Arbejds miljøet spillede en afgørende rolle i projektet.

For arbejdstøj blev der fastlagt krav til, at ved lange ophold i telt (udførende) skulle der anvendes heldragter. Ved korte ophold kunne anvendes DD's almindelige kittel. Ved udførelse af arbejde var der krav til brug af handsker.

Alle opsatte stilladser og rækværker blev forud for brug kontrolgodkendt og lovpligtigt skiltet hermed. Ved arbejder i højden på reaktorblokken blev der anvendt sikkerhedsliner.

Da betonedbrydning er en støjende affære blev der af sikkerhedsgrunde opsat et visuelt alarmeringssystem til brug ved eventuel brand eller lignende. Alt entreprenørens mandskab var endvidere udstyret med radio-styret kommunikationsudstyr.

Teltet blev udstyret med vinduer, der gav mulighed for tilsyn med arbejdsstedet udefra, og der var endvidere etableret et antal nødudgange og opsat brandslukningsudstyr, forbindingskasse og øjenskyller. I personslusen var etableret en nødbriks.

Alle eksterne medarbejdere på pladsen, modtog før igangsætning af arbejdet instruktion i arbejde i klassificerede områder samt modtog DD's sikkerhedsfolder. Omkring 50 eksterne modtog instruktion. Alle eksterne medarbejdere blev endvidere udstyret med TL dosimeter og anvendte elektronisk dosimeter samt indgik i DD's urinprøveprogram.

5.4.2.3 Arbejdsplan for nedbrydning af betonkonstruktion

Metode valgt

Efter udvælgelse af entreprenør og kontrahering, blev følgende metode til nedrivning og værktøj aftalt:

- Nedrivning af beton ved brug af hydraulisk hammer monteret på en "Brokk" – nedrivningsrobot - fjernbetjent
- Tør wireskæring, fjernbetjent, fx til udskæring af vandrette forsøgsrør (beton, stål, aluminium, bly)

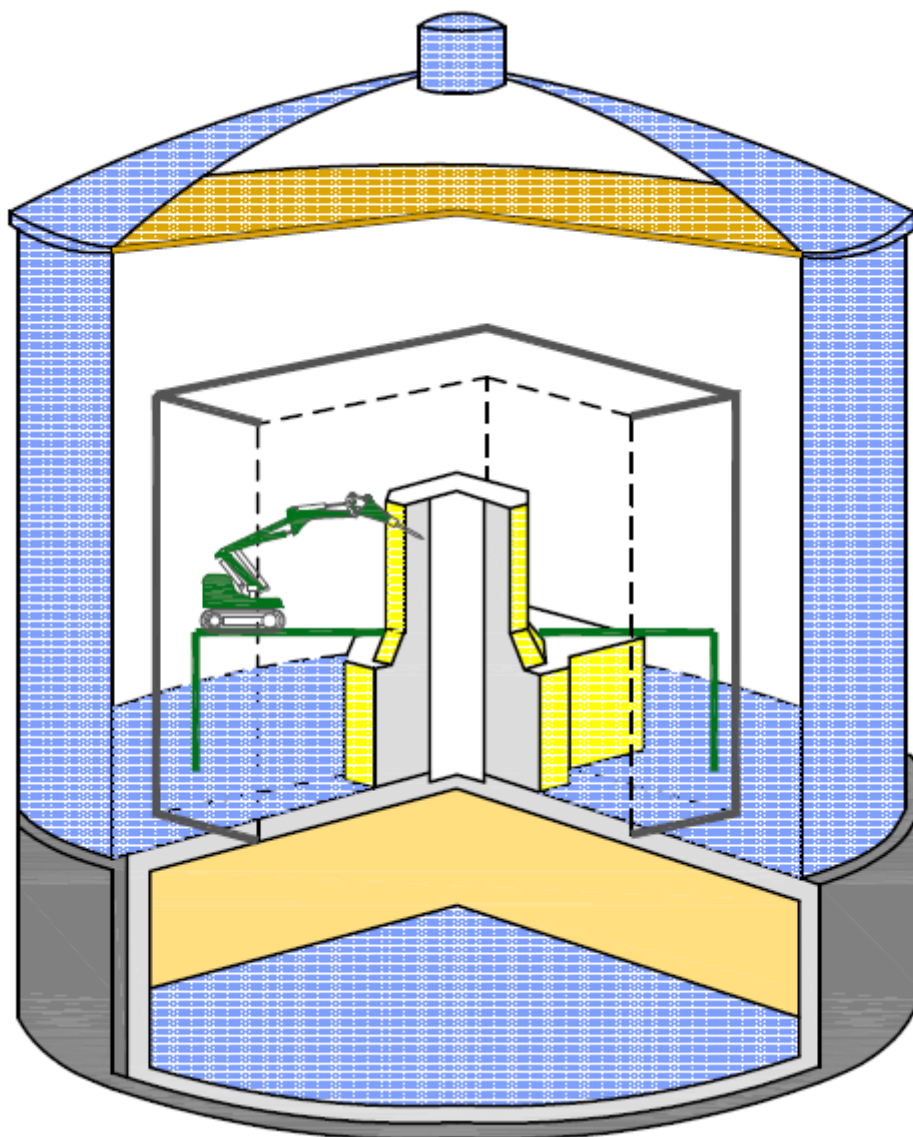
Nedrivning af andre materialer ved brug af:

- Plasmaskærer (stål, aluminium)
- Sav, håndholdt (aluminiumtank)
- Skærebrænder (stål, rør)

Arbejdsplanen for nedrivning af reaktorblokken bestod af i alt syv processertrin:

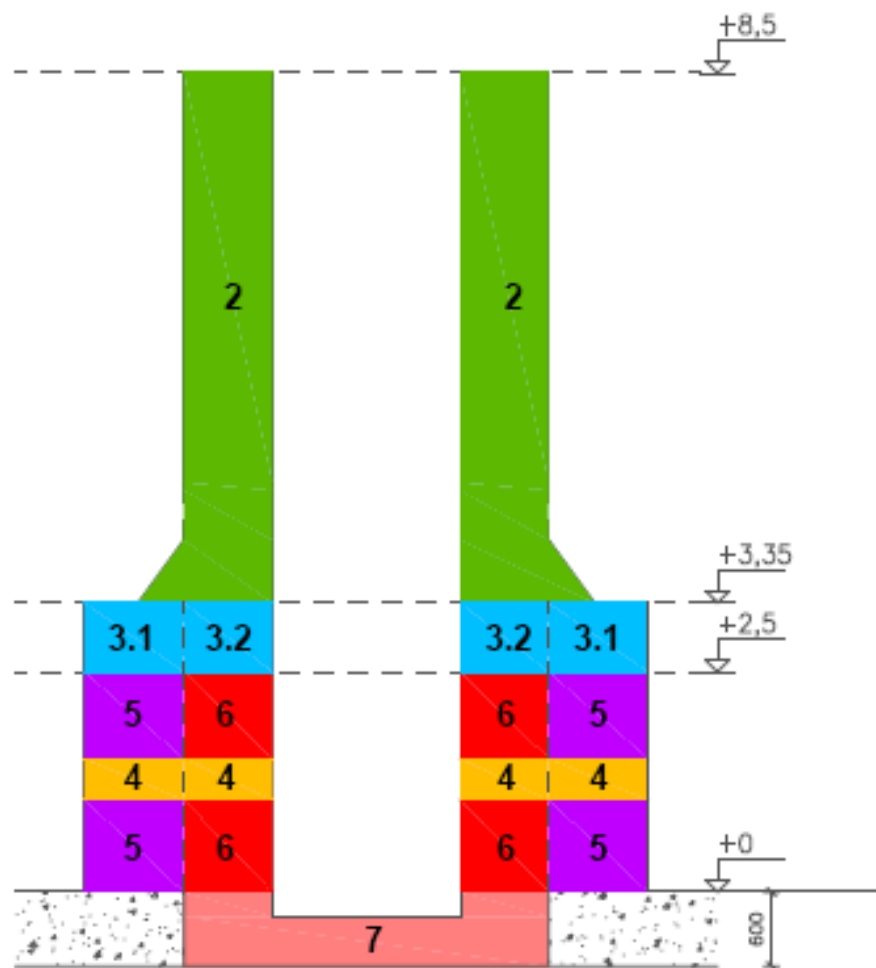
- 1) Etablering af arbejdsplads
- 2) Nedrivning af ikke-aktiveret overbygning (skorsten)
- 3) Nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktorblok, øvre del
- 4) Fjernelse af aktiverede gennemføringer i beton
- 5) Nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktorblok, nedre del
- 6) Nedrivning af aktiveret materiale fra reaktorblok
- 7) Fjernelse af aktiveret beton fra gulv

Procestrin 1, etableringen af arbejdspladsen er beskrevet ovenfor (5.4.2.2). Den principielle opbygning af arbejdsstedet ses af figur 48.



Figur 48 Principiel opbygning af arbejdsstedet for betonnedbrydning.

De enkelte procestrin i nedbrydningen af betonkonstruktionen ses af figur 49, og er uddybende beskrevet herefter.



Figur 49 Betonnedbrydning, procestrin 2-7.



Figur 50 Fjernstyrede nedbrydningsrobotter af typen 'Brokk', som anvendtes på opgaven.

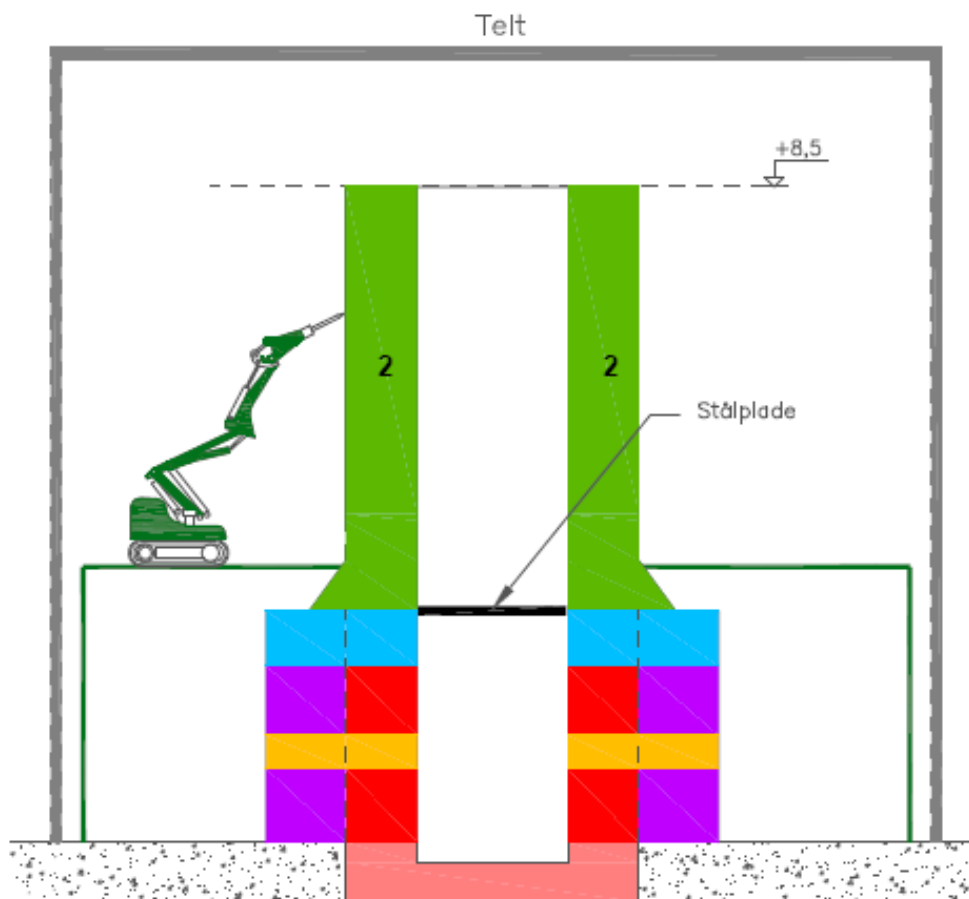
Procestrin 2, Nedrivning af ikke-aktiveret overbygning (skorsten)

I forbindelse med etableringen af arbejdspladsen blev en arbejdsplatform indrettet til hugning med fjernstyret mini-maskine (Brokk 90), placeret i 4,5 m højde omkring skorstenen. Der blev etableret punktsug på maskinen samt på platformen og i skorstenen. Al efterfølgende hugning under entreprisen blev udført med tilsluttet punktudsugning i udførelsesområdet.

For at undgå nedfald af brokker i bunden af reaktortanken etableredes af-dækning inde i skorsten i ca. 4 m højde over gulv, lige over overkanten af reaktorblokkens nedre del.

Skorstenen, fra kote ca. +8,5 m til kote ca. + 3,5m (koter i forhold til gulv), blev nedbrudt ved hugning med hydraulisk hammer på mini-maskine. Som udgangspunkt blev det skønnet, at betonen havde en styrke på 40 – 45 MPa, hvilket muliggjorde denne form for hugning.

Med nedrivningsrobotten blev betonen nedbrudt ned til reaktorblokkens *skulder* i ca. 3,5 m højde. Aluminiumstanken blev løsnet og løbende fjernet under hugningen. Armeringsjern og rørstykker blev ligeledes fjernet løbende under hugning.



Figur 51 Procestrin 2, nedrivning af ikke-aktiveret overbygning (skorsten).



Figur 52 Nedbrydning af skorsten fra platform. Fjernstyret nedbrydningsrobot 'Brokk90' i aktion.



Figur 53 Skorsten nedbrudt, platform fjernes, reaktortank afventer nedskæring.

Procestrin 3, Nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktorblok, øvre del

Indledningsvis blev det eksisterende omrids af reaktorblokken indmålt af en landmåler for fastlæggelse af fikspunkter for fjernelse af beton samt for sikring af adskillelse mellem frigivelige og ikke-frigivelige materialer, jf. DD's krav til udførelsen.

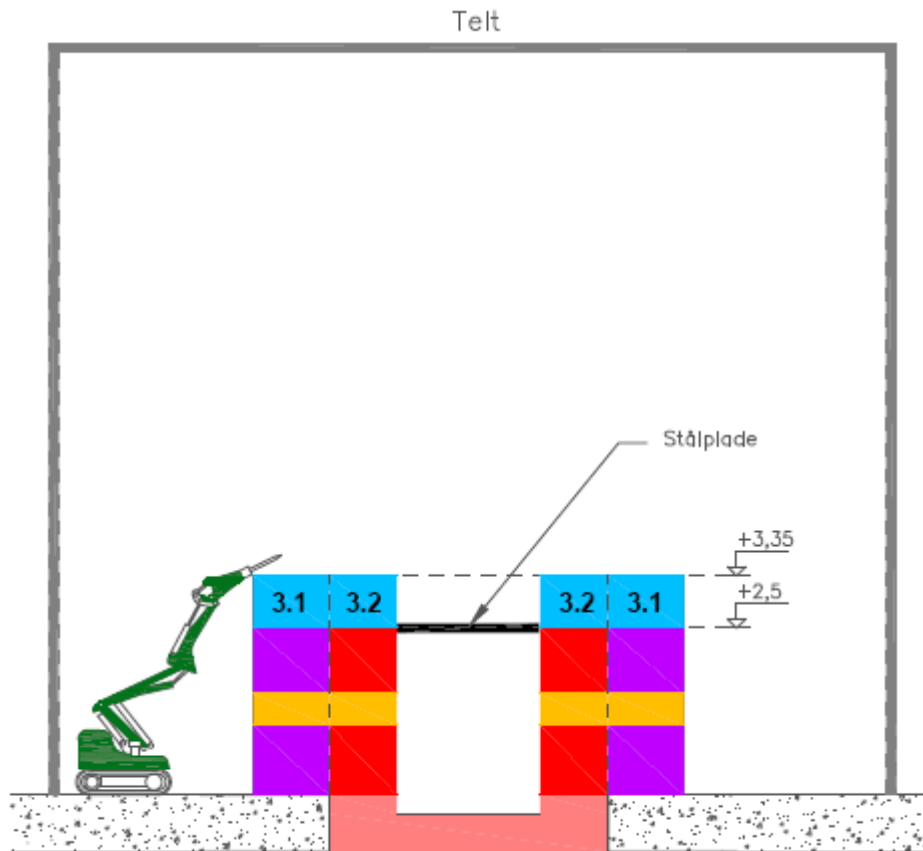
For visuel registrering af fremdrift, og for at kunne se skillelinjen under udførelsen, blev der boret en række horisontale huller i reaktorsiden. Hullerne blev boret til umiddelbart før skillelinjen mod aktivt beton, hvilket muliggjorde, at materialet kunne afhugges uden løbende kontrolmåling fra landmåler.

Arbejdsplatformen blev sænket til 2 meters højde over gulv for hugning af den ydre beton.

Den øvre, ydre, ikke aktive beton blev nedbrudt med hydraulisk hammer på en mini-maskine fra platformen.

Under hugningen blev armeringsjern og rør løbende udtaget. Den udvendige stålplade blev bortskåret løbende.

Beton og rør m.v. blev håndteret som "hvidt affald" dvs. frigivet materiale. Materialerne blev kontrolleret af AHF før udkørsel gennem slusen og videre behandling og blev deponeret efter kommunal anvisning.



Figur 54 Procestrin 3, nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktorblok, øvre del (ned til kote +2,5).



Figur 55 Nedbrydning af øvre del. Nedbrydningsrobot 'Brokk330' fjernstyres fra lift.



Figur 56 Øvre del af reaktorblok nedhugget og forberedelse til nedskæring af reaktortank.

Procestrin 4, Fjernelse af aktiverede gennemføringer i beton

Indledende testskæring

Konstruktionen af reaktorblokken havde vertikalt en lagdelt opbygning bestående af udvendigt beton (barytbeton), blybælte indstøbt i aluminium og en indvendig aluminiumstank (jf. figur 42). Der var således tale om en sammensat – "sandwich" - konstruktion bestående af bløde og hårde materialer. Det lå samtidig fast, at skæringen skulle foregå fra den udvendige side af reaktoren. Wiren til skæring skulle således føres ind i tanken og ud igen til wiremaskinen. Det første snit ville derfor være i den bløde del i den indvendige aluminiumstank og derefter i blybæltet omkring tanken, før wiren ville komme ind i betonen.

Da der ikke var tidligere erfaringer med skæring med wire i denne type konstruktioner, hverken hos DD eller hos entreprenøren, blev det besluttet at udføre en testskæring.

Der blev opstillet en testkonstruktion bestående af beton, aluminium og blysten, som en tilnærmet version af den aktuelle konstruktion.



Figur 57 Opstilling af testkonstruktion til forsøgsskæring med wire.

Der blev udført flere skæreforsøg til fastlæggelse af den rette type wire. Der blev identificeret en anvendelig type wire, men det stod klart, at på grund af blyets elasticitet og smeltning ved varmen fra wiren var den første del af skæringen også den vanskeligste at styre. Det blev derfor konkluderet, at for at sikre udskæringen af den definerede aktive profil af betonen omkring forsøgsrørene skulle der ved placeringen af wiren tages højde for eventuelle forskydninger.



Figur 58 Eksempel på skæring i bly med wire.

Wireskæring

De ti rørkanaler i betonkonstruktionen blev skåret ud ved hjælp af wireskæring uden brug af vand til direkte køling af wiren.

Der blev som forberedelse boret fire små huller Ø 50/35 mm to meter gennem betonvæggen og bly/aluminiumstanken. Den indstøbte jernplade

på den udvendige side af reaktorblokken blev anvendt til fastgørelse af boremaskinen. Med magnetboremaskine blev der boret hul og skåret gevind i jernpladen til at fastgøre diamantboremaskinen. For at undgå at skade diamantboret blev der først boret et Ø 60 mm hul i jernpladen, hvorefter diamantboret kunne gennemføres ind til betonen.

Ved boring omkring hjørnerne af reaktorblokken blev der anvendt et specielt PCD-diamantbor til tør boring med trykluft på boremaskinen, således at luften blev presset gennem boremaskinen og boret forbi segmenterne, der skærer i betonen. Udvendigt omkring boret blev der monteret et styr, hvor der blev monteret en sugeslange fra det centrale sugesystem til opsamling af støvet.

Herefter blev der wireshåret mellem disse huller, således at det enkelte rør blev skåret ud i en firkantet profil som en betonklods, der kunne fjernes fra betonvæggen.

Wiresaven blev monteret på en flytbar fundamentsklods af beton på gulvet i reaktorhallen. Dette sikrede stabiliteten af wireshæremaskinen under arbejdet. Wiren blev trukket gennem et af de diamantborede huller i reaktorblokken og ind i tanken, hvorfra den førtes til næste hul og ud igen. Det blev i den forbindelse besluttet af helsefysikeren, at den tid, som entreprenørens medarbejdere kunne opholde sig inde i reaktortanken, skulle være minimal. Når wiren var trukket tilbage samledes den, og der blev monteret en kasse med børster og sug til opsamling af støv, som wiren løb igennem under skæringen. I reaktortanken blev der endvidere etableret et centralsug fra tre punkter til opsamling af støv fra wireshæringen.

For at sikre personalet i hallen mod at komme i kontakt med wiren under skærearbejdet blev der opsat en pladeafskærmning foran det sted, hvor diamantwiren løb i fri luft. Wireshæringen foregik fjernbetjent.

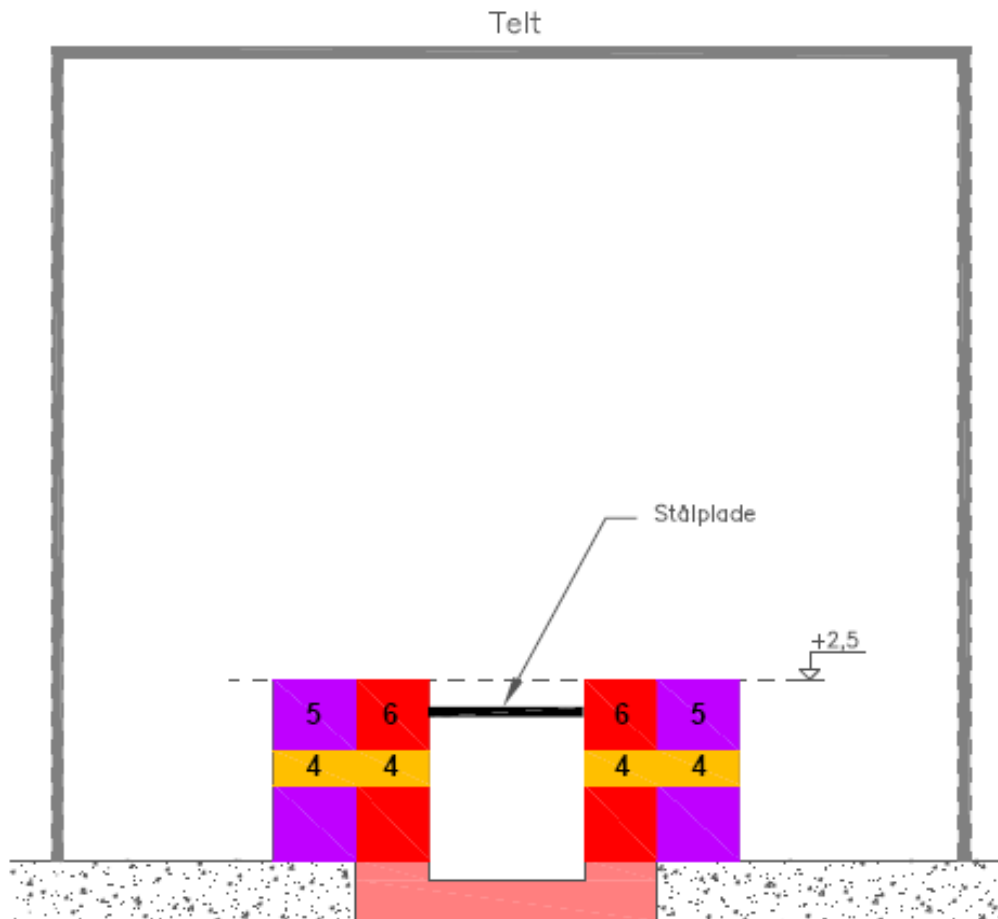


Figur 59 Udskæring af vandrette rør med wire.

Når 'klodsen' var skåret fri på alle sider, blev den aflagt på to stk. fladjern i bunden af udsparingen. Disse fladjern blev anvendt til at transportere klodsen ud af reaktorblokken.

Under skæringen med wiresaven var det nødvendigt at bruge ca. 1 m³ vand til køling af el-motoren på wiresaven. Vandet kom ikke i forbindelse med betonen men cirkulerede i et lukket system fra beholder gennem pumpen til elmotoren og retur til tanken. For det tilfælde, at der skulle ske vandspild, var der opstillet en vandsuger i hallen til opsamling af vandet.

Ved arbejdets afslutning blev alt værktøj og grej, der havde været benyttet i forbindelse med hugning, boring og wireskæring af betonen, først fjernet efter kontrolmåling, med enten kontaminationsmonitor eller gammapektrometer.



Figur 60 Procestrin 4, Fjernelse af aktiverede gennemføringer i beton.

Under udførelsen af udtrækningen af de friskårne klodser, blev det konstateret, at ikke alle kunne fjernes. Dette skyldtes ujævnheder i skæresnittene på den indvendige side i tanken, i bly/aluminum delen, som beskrevet ovenfor. Det blev derfor besluttet at frihugge klodserne i forbindelse med arbejdets procestrin 4. Klodserne med rør kunne derefter fjernes under udførelse af procestrin 6 og fjernelsen af den aktive beton.



Figur 61 Reaktortank set indefra under udskæring af vandrette rørklodser.

Procestrin 5, Nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktorblok, nedre del

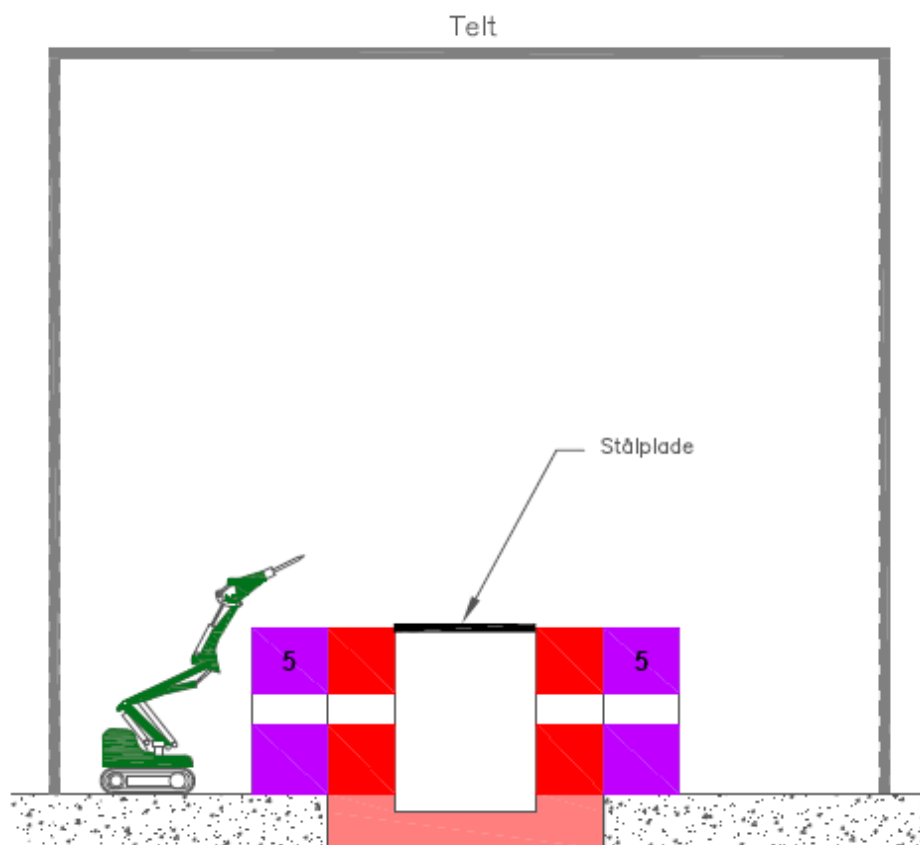
Den ydre, nedre del af den ikke aktiverede beton blev nedbrudt med hydraulikhammer på fjernbetjent minimaskine, dog en størrelse større end anvendt på den øvre del af konstruktionen.

Det eksisterende omrids af reaktorblokken blev målt af en landmåler for fastlæggelse af fikspunkter for løbende måling af fjernelsen af betonen samt for sikring af adskillelsen mellem aktivt og ikke-aktivt materiale.

For visuel registrering af fremdrift og skillelinje blev der boret en række vertikale huller i blokken. Hullerne blev boret til umiddelbart før skillelinjen.

Stålkappen på ydersiden blev nedbrudt forinden, således at betonbrokkerne kunne falde udad. Løbende blev armeringsjern og rør udtaget.

Beton og rør blev håndteret som "hvidt affald" og kontrolleret af AHF før bortskaffelse.



Figur 62 Procestrin 5, Nedrivning af ikke-aktiveret materiale fra reaktor-blok, nedre del.



Figur 63 Procestrin 5 er afsluttet. Aktiveret del af beton er "blotlagt".

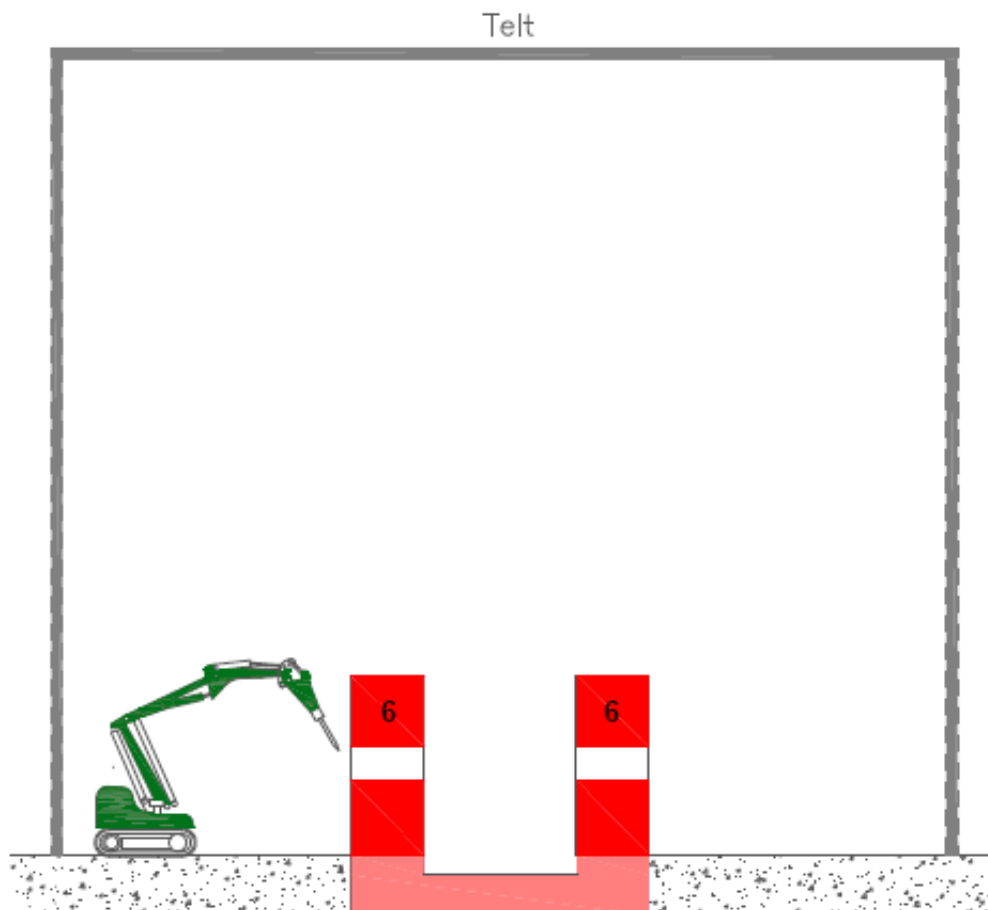
Procestrin 6, Nedrivning af aktiveret materiale fra reaktorblok, nedre del

Efter afslutningen på hugningen af skorstenen og skulderen, samt fjernelsen af ikke-aktivt beton og rør på den nedre del, fortsattes med nedbrydningen af de indre aktive dele fra kote +3,5 til 0.

Betonhugningen blev udført med en fjernstyret mini-maskine (Brokk 130) påsat hydraulisk betonhammer. Aluminiumsdele, blykappe og armeringsjern blev løbende frigjort og udtaget. Rør indsamledes ligeledes.

Selve reaktortanken af aluminium blev løbende nedskåret med håndværktøj fra kote +3,5 til 0 i passende stykker, således at stykkerne kunne lægges direkte i DD's containere.

Alt aluminium, armering og betonbrokker m.v. fra dette procestrin blev håndteret som radioaktivt affald.



Figur 64 Procestrin 6, Nedrivning af aktiveret materiale fra reaktorblok, nedre del.

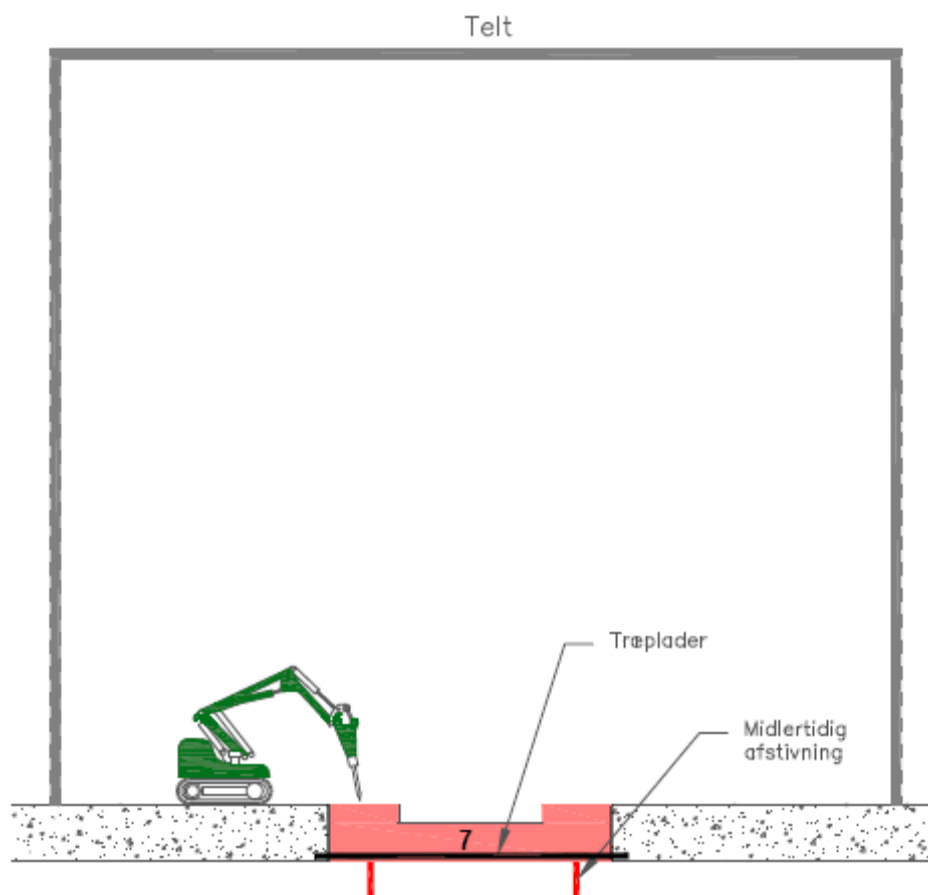


Figur 65 Nedrivning af aktiveret del af reaktorblok. Punktsug monteret til hydraulisk hammer.

Procestrin 7, Fjernelse af aktiveret beton fra gulv

Den aktiverede del af gulvet under reaktoren blev ligeledes fjernet ved hugning med fjernbetjent mini-maskine. Etagedækket (gulvet) mod kælderen var generelt for hallen 60 cm tykt, men direkte under tanken dog kun ca. 35 cm. Dækket var udført med kraftig stålarmering med op til 40 mm tentorarmring. Da mini-maskinen (Brokk 130) ikke var placeret direkte på den del af dækket, som var under nedbrydning, blev der i dette procestrin, ikke udført yderligere afstivning af gulvfeltet under tanken. Al beton og andre materialer fra dette procestrin blev, jf. definition, håndteret som radioaktivt affald.

Efter afslutningen på nedhugningen af den principielt fastlagte aktive del af betonkonstruktionen, udførtes en omhyggelig kontrolmåling af den tilbageværende del af etagedækket og betonkonstruktionen. Det kunne konstateres, at alle aktive dele af konstruktionen var fjernet som forudset. Der blev dog fundet et ringrørsystem (kølevand) i randområdet, som var indvendigt kontamineret. Dette blev derfor borthugget og fjernet som radioaktivt affald. Ligeledes blev det konstateret, at en enkelt rørføring, der gik fra ringrørssystemet omkring reaktoren og ned til det primære kølesystem i kælderen, også var indvendigt kontamineret. Da dette rørstykke var indstøbt på stedet under opførelsen af reaktoren, og gik via den bærende vægkonstruktion i kælderen, samt havde flere indstøbte bøjninger, blev det besluttet at efterlade rørstykket i forbindelse med nedklassificeringen af bygningen. Rørstykket blev dog rensat ved støvsugning af løse partikler og gennemspuling med vand. Derved kunne opnås et acceptabelt kontaminationsniveau for nedklassificering (se kapitel 11).



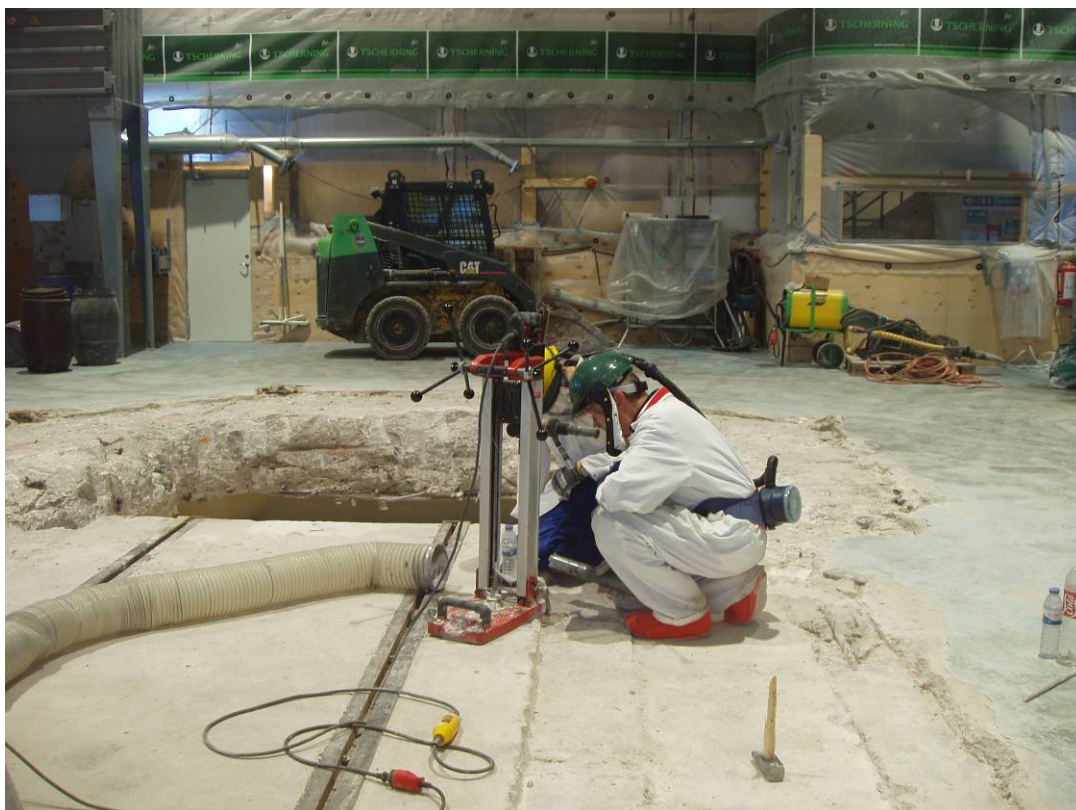
Figur 66 Procestrin 7, Fjernelse af aktiveret beton fra gulv.



Figur 67 Reaktoren er fjernet. I baggrunden ses den sydlige teltvæg med udsugningsenheder ("miljøbokse").

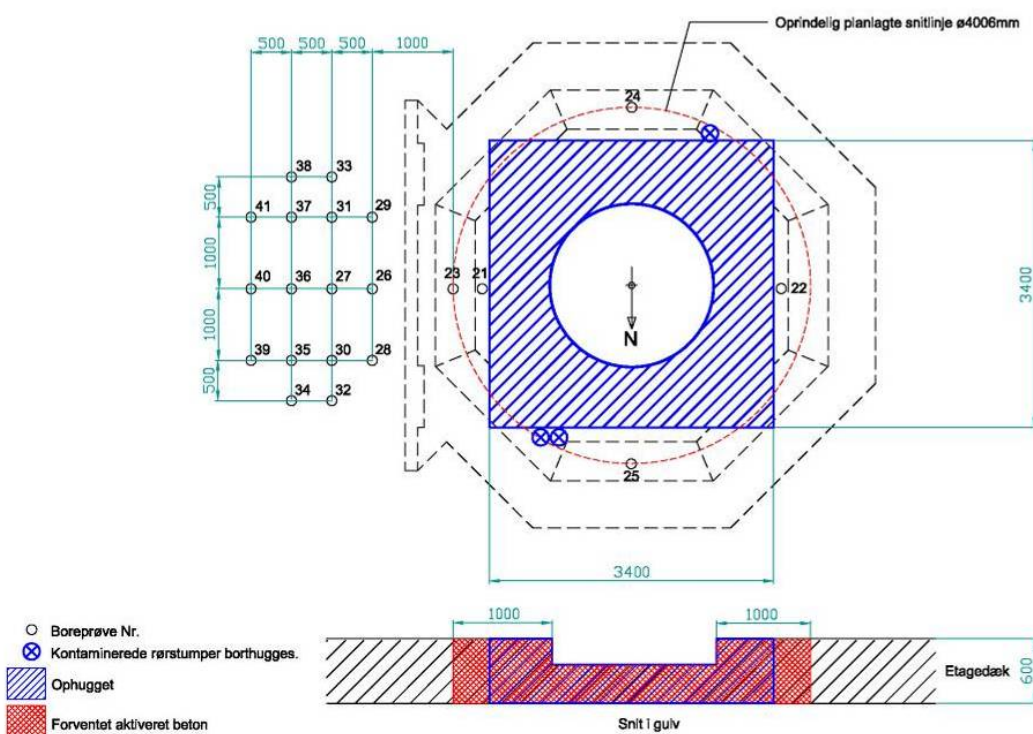
Kontrol af nedbrydning

Efter afslutningen på procestrin 7 blev der af DD udarbejdet en kontrolplan for at sikre, at alle aktiverede dele af betonkonstruktionen var fjernet i overensstemmelse med forudsætningerne (jf. afsnit 5.4.1). Det borthuggede område i betongulvet svarede ikke fuldstændigt til den forud fastlagte profil. Projektledelsen havde dog med hensyn til hallens fremtidige brug (se afsnit 11.2) et ønske om at undgå, i et alt for stort omfang, at borthugge beton fra de primære statiske bygningskonstruktioner. Der blev derfor udarbejdet en plan for udtagning af borekerneprøver i gulvområdet omkring reaktoren. Der blev her specielt lagt vægt på kontrol af området ud for termisk kolonne, hvor der havde været en større flux af termiske neutroner fra reaktorkernen end under betonaftskærmningen. Dette arbejde udførtes af DD.



Figur 68 Udtagning af boreprøver fra betongulv.

Resultatet af borekerneprøverne fremgår af kapitel 7. Alle udtagne prøver viste, at der ikke var efterladt aktiv beton, og betonnedbrydningsentreprisen kunne derfor afsluttes som planlagt.



Figur 69 Plan for borekerneprøver ved kontrol af betonnedbrydning.

5.4.2.4 Bortskaffelse af beton og materialer

Radioaktiv beton

Som forudsat i kravspecifikationerne til betonnedbrydningsentreprisen (5.4.2.1) blev den aktive beton adskilt fra den ikke aktive del. Den valgte proces sikrede dette som foran beskrevet.

Da de aktive dele af betonen på forhånd var klassificeret som radioaktivt affald, blev der ikke foretaget yderligere kontrol ved bortskaffelsen til DD's mellemlager. Der blev dog udført kontrol og registrering af strålingsniveauer i, og uden på, de anvendte stålcontainere.

Af praktiske hensyn blev det besluttet, at alle indstøbte rørstykker fra betonen skulle bortskaffes som radioaktivt affald. Dette skyldtes, at hovedparten af kølerørssystemet var indvendigt kontamineret, og at størstedelen af rørene var af lille diameter. Mængden var samtidig relativt beskednen. Rør af aluminium blev helt fjernet fra betonen og bortskaffet i særskilte containere. Dette skete af hensyn til en potentiel reaktion mellem beton og aluminium, hvorved der ville kunne udvikles brint.

Frigivet beton og andre emner

Aluminium fra tanken, armeringsjern og brokker fra den biologiske afskærmning blev neddelte i passende stykker og blev som udgangspunkt håndteret som ikke-aktivt affald til bortskaffelse som bygningsaffald jf. de kommunale forskrifter herfor, hvilket hovedsagelig vil sige bortskaffelse til genanvendelse.

Alt materiale til bortkørsel fra DD blev dog kontrolmålt af DD's helsefysiske personale og registreret før endelig godkendelse af projektleder til bortkørsel. Kontrollen blev udført direkte i containeren inden bortkørsel. Til formålet blev der etableret en godkendelsesprocedure med tilhørende dokumentation, som skulle attesteres af projektlederen eller en af denne udpeget ansvarsperson. Samtidig var entreprenøren forpligtet til at aflevere registrering af udførende transportør, transporterede mængder og slutdestination af materialet.

Den øvre del af reaktortanken af aluminium blev udtaget og dekontamineret i DD's eget dekontamineringsanlæg. Herefter blev emnerne frigivet til bortskaffelse.

Rørstykker i mindre dimensioner, som ikke kunne kontrolmåles på stedet for eventuel indvendig kontamination (typisk Ø mindre end 100 mm), blev udtaget fra den biologiske afskærmningskonstruktion. Udtagne emner blev målt særskilt på DD's frigivelseslaboratorium.



Figur 70 Indstøbte rørstykker fra betonkonstruktionen udtaget til videre kontrol.

5.4.3 Sikkerheds- og sundhedsplan for nedbrydningsarbejdet

Nedbrydningsentreprisen omfattede primært betonnedbrydningsarbejde samt håndtering og bortskaffelse af nedbrudte materialer. Det specielle i denne entreprise var, at dele af konstruktionerne var radioaktive, hvilket betød, at støv og vand kunne medføre risiko for uønsket spredning af radioaktive materialer. Dette stillede store krav til både DD (bygherre) og entreprenørens planlægning, valg af metode og dokumentation, herunder sikkerhedsarbejdet.

Som udgangspunkt omfattede nedbrydningsarbejdet:

- Etablering og drift af arbejdsplads og dertil hørende velfærdsforanstaltninger
- Nedbrydning af reaktorblok DR 2
- Etablering og drift af miljøforanstaltninger i forbindelse med nedbrydning
- Bortskaffelse af rene (ikke aktiverede / kontaminerede) nedbrydningsprodukter
- Håndtering af kontaminerede /aktiverede nedbrydningsprodukter, der skal forblive på DD's område.

Det blev derfor besluttet at udarbejde en sikkerheds- og sundhedsplan for arbejderne i forbindelse med nedbrydning af reaktorblokken. Ansvaret for udarbejdelse af denne plan var bygherrens. Planen var gældende for alle involverede parter i nedbrydningsentreprisen.

Sikkerhedsplanlægningen, herunder udarbejdelse af en sikkerheds- og sundhedsplan, blev udført af bygherren (DD). DD sørgede endvidere for

relevante oplysninger til entreprenøren om interne regler og procedurer, risikoområder etc., inden arbejdet blev igangsat.

DD varetog følgende forpligtelser under entrepriseudførelsen:

- Udarbejdelse af sikkerheds- og sundhedsplan
- Ajourføring af sikkerheds- og sundhedsplan
- Koordinering af sikkerhedsarbejdet
- Afgrænsning af sikkerhedsarbejdet

Entreprenøren sørgede for anmeldelse af arbejdspladsen til Arbejdstilsynet. Herudover blev det fastlagt, at entreprenøren skriftligt skulle meddele DD navnene på alle medarbejdere og udpege sikkerhedsrepræsentanter.

Der blev afholdt sikkerhedsmøder hver anden uge, hvor sikkerheds- og sundhedsplanen blev opdateret og revideret om nødvendigt. Sikkerhedsrepræsentanterne havde pligt til at sørge for at planen var tilgængelig for alle de håndværkere, som de repræsenterede, og som skulle færdes på byggepladsen. Sikkerhedsrepræsentanterne var således også ansvarlige for at planen var ajourført med de sidst reviderede bilag over for de håndværkere de repræsenterede.

Sikkerheds- og sundhedsplanen for nedbrydningen af reaktorblokken blev udarbejdet af DD med input fra entreprenøren og løbende opdateret i et tæt samarbejde. DD udpegede en sikkerhedskoordinator til daglig varetagelse af bygherrens forpligtigelser og løbende kontakt til entreprenørens sikkerhedsrepræsentanter.

Planen indeholdt en liste over kontaktpersoner hos bygherren DD og hos entreprenøren og alle involverede medarbejdere. Indretningen af arbejdspladsen blev beskrevet sammen med gældende bestemmelser for arbejderne på pladsen. I rapporten var inkluderet tidsplaner samt bilag med tegninger og planer.

Sikkerheds- og sundhedsplanen blev udarbejdet i overensstemmelse med arbejdsmiljølovens regler nævnt i At-vejledning nr. F.1.2 (marts 2003) Bygherrens ansvar og pligter.

Planen indeholdt beskrivelser og specificeringer for bl.a. følgende forhold:

- Koordinering af sikkerhedsarbejdet
- Navneliste, involverede medarbejdere fra DD og eksterne entreprenører
- Sikkerhedsorganisation
- Sikkerhedsmøder og samarbejde
- Arbejdspladsindretning
- Tilkørselsvej og parkering
- Beredskab og nødhjælp
- Etablering og indretning af arbejdsplads samt bestemmelser for drift af arbejdsplads og byggepladsforsyning (el, vand, trykluft, ventilation) og adgang til arbejdsområdet (telt)
- Krav til medarbejdere
- Behandling af affald

- Kontrolmålinger
- Krav til ydre miljø
- Afspærringer og afdækninger under udførelse
- Renholdelse af arbejdspladsen
- Tidsplaner

Herudover indeholdt sikkerheds- og sundhedsplanen en række uddybende bilag og tegninger omfattende bl.a.:

- Sikkerhedsorganisation
- DR 2 bygningen og pladsen omkring (tegninger),
- KMA-plan (entreprenørens *Plan for styring af kvalitet, miljø og arbejdsmiljø, herunder opgørelse af mængder bortskaffet materiale*),
- Sikkerhedsforhold for gæster og eksterne arbejdstagere,
- Kontrolskema for bortkørsel af dekommissioneringsaffald fra DR 2
- Kontrolskema for arbejdets udførelse
- Kontrolskema ved arbejdsdagens start og afslutning
- Arbejdsbeskrivelser for nedrivningsarbejder.

Sikkerheds- og sundhedsplanen var tilgængelig hos entreprenør og bygherre og forefandtes endvidere på arbejdsstedet.

Der blev under udførelsen af nedbrydningsarbejdet ikke rapporteret observationer eller ulykker. Nedbrydningsarbejdet blev gennemført til DD's fulde tilfredshed.

5.4.4 Doser under betonnedbrydningen

Som det fremgår af Tabel 11, side 108, er doserne til DD's egne medarbejdere under betonnedbrydningen begrænsede. En helseassistent (dosimeternummer 917) fik 0,2 mSv, da vedkommende skulle assistere nogle eksterne medarbejdere ved adgang til tanken (se nedenfor). Ellers fulgte DD-medarbejderne kun nedhugningsarbejdet på afstand. Derimod fik de eksterne arbejdere større doser. Doserne blev primært modtaget af MT-Højgaards medarbejdere under arbejdet med at skære B-rørenes linere ud af betonblokken. Ved flere lejligheder var de nødt til at gå ind i tanken, hvor strålingsniveauet flere steder var op til 500 µSv/h. Opholdstiden blev begrænset til 10 minutter pr. gang, hvilket bidrog til, at de samlede doser ikke blev høje. Den højeste dosis til en enkeltperson blev på 1050 µSv fordelt på fire måneder. Samlet set gav betonnedbrydningen en kollektiv dosis på 4,8 person-mSv.

5.5 Dekontamineringsarbejder

Affaldsemner med en løstsiddende overfladekontamination har som udgangspunkt været klassificeret som 'gult' affald og er sendt fra dekommissioneringsstedet til DD's dekontamineringsfacilitet. I denne facilitet kan emner på ca. 1x1 meter overfladeafrensnes manuelt ved brug af et blæsemiddel af glas.

På grundlag af de i ADS registrerede affaldsemner (se kap. 8.2) kan det opgøres, at 100 emner blev karakteriseret som 'gult' affald til dekontaminering, med en samlet mængde på lidt over 30 tons. Hovedparten af disse emner har kunnet afrensnes og er frigivet til bortskaffelse som almindeligt affald. Der resterer en mindre mængde, som fortsat venter på at blive rensat i DD's dekontamineringsfacilitet.

Af de oprindeligt 'gult' karakteriserede emner har kun ni stk., efter en ikke succesfuld afrensning, måtte omklassificeres til 'rødt' affald samlet i alt tre tons, altså 10% af den samlede mængde 'gult' affald. Disse emner er alle af stål og aluminium, og har vist sig ikke at kunne dekontamineres tilfredsstillende, som eksempelvis rørene fra varmevekslerne (se afsnit 5.3.2).

Ud over affaldsemner har enkelte værktøjer og maskinel, både fra DD og eksterne entreprenører på projektet, været igennem en dekontaminering før frigivelse, i nogle tilfælde har der blot været tale om behov for almindelig afvaskning (til aktivt afløb). Det kan derfor konkluderes, at DD's dekontamineringsfaciliteter har virket tilfredsstillende.

Som det fremgår af rapportens afsnit 8.2.2 er der på tidspunktet for nærværende rapport opgjort 420 tons frigivet affald. Som nævnt forventes det, at hovedparten af affaldet til videre behandling og frigivelsesmåling (20 tons), vil blive frigivet. Den samlede mængde frigivet affald til bortskaffelse vil således ende på 440 tons.

5.6 Nødtankanlæg

Det nedgravede nødtankanlæg bestod i korthed af 3 stk. 20 m³ tanke, 2 stk. 50 m³ tanke og diverse 2", 3", og 4" rørføringer, rørkanaler m.v. Tankanlægget var placeret i et nedgravet betonanlæg syd for DR 2 bygningen. Tankene 2, 3, 4 og 5 har aldrig været i brug, da reaktor DR 2 var i drift. Tankenes formål har været at modtage store mængder af kontamineret vand i tilfælde af unormale hændelser, hvor sprinkleanlægget i hallen blev sat i gang. Vand ville successivt løbe via et overløb fra tank 1 til tank 2, og osv.

Tank nr. 1 er blevet brugt under reaktordrift og overvåget af Behandlingsstationen med hensyn til drift og tømning. Denne tank blev konstateret at være kontamineret og blev derfor henstillet til senere neddeling. De øvrige tanke blev bortskaffet efter frigivelse.

De udførte målinger af tankanlægget er beskrevet i AHF arbejdsnotat af 14. maj 2006 [DD-2005-0421-1] som er vedlagt hertil som bilag 4.

Den tilbageværende tank nr. 1, blev henstillet i eksperimentkælderen for neddeling med henblik på dekontaminering. Tanken har været brugt i en kort periode i et uranudvindingsprojekt efter DR 2's nedlukning, og var lettere kontamineret i bunden op til hvor vandspejlet har været.

Aftøringsprøver fra tank 1 viste spor af ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co og ²³⁵U, og en vandprøve (400 ml) udtaget i den samme tank viste spor af ¹³⁷Cs. Det blev besluttet at pumpe så meget vand som muligt fra tanken til Behandlingsstationen via tankvognen og placere tanken på et lukket område til senere neddeling og dekontaminering.

Da tanken var epoxybelagt indvendigt og var kontamineret, valgtes et lokkeværktøj til at neddele tanken med for ikke at sprede kontamination via røg og indebrænding fra gnister. Tanken har tidligere været spulet indvendigt og suget tør for produkter i form af slam.

Tanken var 9000x1700 mm, udført i 6 mm stål, havde en samlet vægt på 2.417 kg, og blev lokket ud i passende stykker, som var håndterbare i dekontamineringsfaciliteten. De udlokkede stykker, på ikke over 1x1m, blev sorteret på paller med sidestykker og plastik i bunden.

De ikke-kontaminerede stykker blev kontrolmålt på stedet og efter en hel-sefysisk vurdering frigivet på stedet. De kontaminerede dele blev transporteret til dekontamineringskabinen og blev her rensset.

Arbejdet blev udført i løbet af 2007. Hovedparten af tank 1 kunne frigives efter dekontaminering, og kun en mindre mængde på 65 kilo afskæringer, stammende fra neddelingen af tanken, er bortskaffet som radioaktivt affald og placeret på DD's mellemlager. Hermed er alle fem tanke fra tank-anlægget frigivet og bortskaffet som almindeligt stålskrot.

Rørledning fra DR 2 til tankanlæg

Ved demontering af afløbsrørene i kanalen fra DR 2 til tankanlægget blev der ligeledes gennemført kontrolmålinger. Nogle af rørene indeholdt jord/slam, og der blev målt niveauer over baggrunds niveauerne for området. Disse rør og tilhørende tagrender blev skåret i passende størrelser, pakket i plastik til senere kontrolmålinger, eventuelt efter dekontaminering. Rørledningen ved reaktorbygningen er blevet lukket i enderne med plastik. Målinger foretaget i 2004 i kanalen med kontaminationsmonitorer viste ingen strålings- eller kontaminationsniveauer over baggrunds niveauet for området.

Rør og tagrender er efterfølgende blevet dekontamineret og frigivet til almindelig bortskaffelse.

Kanalen mellem DR 2's reaktorbygning og tankgraven er blevet muret til i enden ved tankgraven. Når betonkanalen skal fjernes på et senere tidspunkt, vil der blive foretaget kontrolmålinger af betonen.

6 Tilbageværende anlægsdele

I bygning 200 resterer der i dag indvendigt selve ventilationskanalerne i hallen og i kælderen, som har været anvendt under DR 2's driftsperiode. Herudover eksisterer der fortsat et enkelt rørstykke indstøbt i de bærende konstruktioner mellem hal og kælder, som formodes at indeholde en svag kontamination. Disse dele, sammen med forannævnte rørkanal til nødtankanlægget, skal kontrolleres ved udtagning i forbindelse med en endelig frigivelse eller nedrivning af selve bygningen (se kap. 11).

7 Endelig radiologisk status

Efter dekommissioneringsarbejdets afslutning var alle emner enten frigivet eller kørt til mellemlagring. Nedbrydningen af reaktorblokken blev afsluttet med, at den del af gulvet, der var nærmest reaktoren, blev brudt op og deponeret som radioaktivt affald. For at bestemme, hvor meget af gulvet, der skulle hugges væk, blev der lavet et prøveprogram baseret på betonboreprøver. Prøveprogrammet blev baseret på metode A, (se kap. 4), hvilket i denne sammenhæng betyder, at hvis boreprøver måles til at være frigivelige, vil den beton, der er længere væk fra reaktorkernen, såvel horisontalt som vertikalt, ligeledes være frigivelig. Boreprøvernes placering er vist på figur 69, side 90, og deres målte frigivelsesindekser er vist i nedenstående tabel. Nogle boreprøver blev målt sammen for at spare måletid. I så fald fremgår det af tabellen.

Tabel 5 Boreprøver.

Boreprøve	Frigivelsesindeks (<1 = kan frigives)
21	114,02
22	0,86
23	13,85
24	0,59
25	0,52
26	1,38
27+30+31 (øverste 15 cm)	0,29
28+29 (øverste 15 cm)	0,64
32+33+34+38 (øverste 10 cm)	0,63
35+36+37 (øverste 10 cm)	0,60

Prøverne 21 og 23, der begge blev taget øst for reaktorens position (mod igloen), kan ses at have et frigivelsesindeks, der er større end 1. Det var derfor nødvendigt at hugge mere af gulvet i østlig retning. Der blev taget yderligere tre prøver mod øst, hhv. nummer 26, 28 og 29 for at bestemme, hvor meget der yderligere skulle hugges af gulvet. Nummer 26 viste sig ligeledes at være ikke-frigivelig, dog med et noget lavere frigivelsesindeks. Efter endnu en serie boreprøver (27, 30, 31, 32 og 33), som alle var frigivelige, blev gulvet hugget op ud til disse. Endnu en serie prøver blev taget længere mod øst; alle havde et frigivelsesindeks under 1. Prøverne 39 – 41 (se tabel 5) blev udtaget, men ikke målt.

Ved dekommissioneringsprojektets afslutning er det ikke blevet forsøgt at frigive bygningen og omgivende landområder til brug uden restriktioner. Dette skyldes at det er blevet besluttet fortsat at benytte bygningen til arbejde med radioaktive materialer. Til gengæld er der lavet en nedklassificering til hvidt strålings- og kontaminationsområde, se bilag 3.

8 Dekommissioneringsaffald

8.1 Registrering af dekommissioneringsaffald

Alt affaldsmateriale stammende fra dekommissioneringen blev løbende registreret i DD's Affalds Dokumentations System, ADS.

Dataregistreringen af affaldsemner omfattede identifikation samt karakteriserings- og måledata [5]. Herudover foretoges dataregistrering på frigivelseslaboratoriet, ved dekontamineringsfaciliteten og ved transport og oplagring af materialer. I nedenstående tabeller er angivet eksempler på den typiske dataregistrering af ét affaldsemne på stedet for dekommissioneringen.

I lighed med de enkelte affaldsemner bliver de containere, hvori emnerne pakkes, registreret i ADS, og de emner, der lægges i en container, knyttes til denne i systemet, således at man kan få en oversigt over samtlige enkeltsemner, der findes i en given container. ADS er i den nuværende version ikke i stand til at summere aktivitetsindholdet fra de enkelte emner, så dette må ske manuelt. Når en container flyttes fra anlægget under nedbrydning til Mellemlageret eller Bufferhallen, bliver dosishastigheden på overfladen målt og indført i ADS, ligesom det bliver kontrolleret, at der ikke er kontamination på de ydre overflader af containeren. Endvidere bliver den samlede vægt af container plus indhold registreret; men en specifikation af mængderne af forskellige materialer som den, der kan ses i Bilag 5, må udføres manuelt med den nuværende version af ADS.

Tabel 6 Identifikation af affaldsemne eller prøve (anlæg).

Operation	Unik ID	Tabel (stamdata)
Ved nedbrydning	Anlæg Tidspunkt Navn (ansvarlig person) Oprindelsessted Beskrivelse, evt. henvisning til konstruktionstegninger Foto Vægt Dimensioner Materialesammensætning (ned til ppm)	Anlægsliste Personer
Ved prøveudtagning	Navn (ansvarlig)	Personer
Evt.	Kommentarer og bemærkninger	

Tabel 7 Karakterisering af affaldsemne (anlæg).

Operation	Unik ID	Tabeller (stam-data)
Opdeling (speciel dekontaminering)	Tidspunkt Lokalitet Navn Ved deling ref. til "moderemne"	Faciliteter Personer
Eventuelt deles affaldsemnet	Moder ID strejkode Oprette datternummer ID strejkoder	Affalds-ID-liste
Håndmåling	Tidspunkt Sted Navn Max β - γ strålingsniveau i 1 meters afstand max. β - γ strålingsniveau ved overflade (A) Instrument Max. α - β kontaminationsniveauer (B) Instrument Klassificering: A > 1 μ Sv/h, A er aktivt (RØD) A < 1 μ Sv/h til F-laboratorium (BLÅ) B > 500 Bq(β)/m ² , B er aktivt (GUL) B < 500 Bq(β)/m ² til F-laboratorium (BLÅ)	Anlægsliste Personer Instrumenttype
Måling på affaldsemne	Instrument Gammamåling: Bq/g og counts/sec fordelt på forskellige γ -emittere. Vægt af affaldsemne	
Ved mulighed for dekontaminering	Tidspunkt Navn Beskrivelse af metode.	
Specielt for prøveudtagning	Instrument Vægt af affaldsemne Prøvetype Positionsbestemmelse af affaldsemne (koordinater) Orientering af affaldsemne Positionsbestemmelse af prøver i forhold til emne Materialetype	Instrumenttype Prøvetyper Materialetyper
Evt.	Kommentarer og bemærkninger	

Totalt set blev der registreret 930 affaldsemner, inkl. prøver, på DR 2 projektet. Dette omfatter eksempelvis hovedkonstruktioner, hvor fx betonkonstruktionen er opdelt i tre registrerede emner, henholdsvis 'skorsten', ydre del og indre del (aktiv).

Aktiveret eller kontamineret affald til deponering er blevet pakket i DD's specialdesignede stålcontainere (2,7 m³) eller i ISO containere i halv størrelse (6,5 m³). Alle containere er lukkede og registreret i ADS systemet (se også bilag 5).

8.2 Registrerede affaldsmængder

I bilag 5 er opregnet den samlede registrerede mængde affald fra DR 2 i containere oplagret på DD's mellemlager. Der er oplagret 12 stk. DD stål-containere (å 2,7 m³) med aktiveret/kontamineret affald som ikke kan dekontamineres ('rødt') og 13 stk. ISO containere (å 6,5 m³), svarende til et samlet affaldsvolumen på omkring 114 m³.

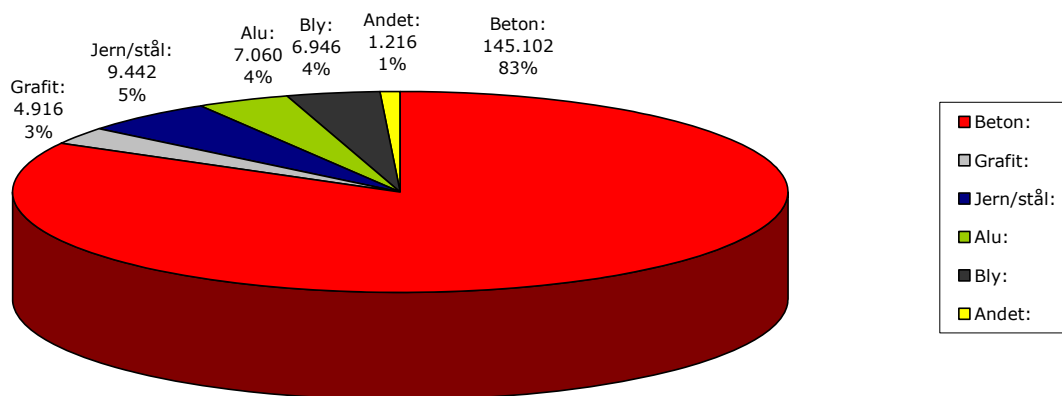
Der er fra dekommissioneringen af DR 2 samlet registret i alt 615 tons affald, opdelt på henholdsvis 175 tons radioaktivt (rødt) affald, 20 tons affald til videre behandling og frigivelsesmålinger (blåt/gult) og 420 tons frigivet affald. Der er en resterende mængde på 20 tons affaldsemner på vej igennem DD's dekontaminerings- og frigivelsesproces (blå/gult). Det forventes, at hovedparten af dette affald vil blive frigivet, således at den endelige mængde frigivet affald ender på 440 tons.

I tabel 8, 9 og 10 er angivet de samlede registrerede mængder af frigivet og aktivt affald. I det følgende gives en uddybning af de registrerede mængder.

8.2.1 Radioaktivt affald til deponering

Tabel 8 Radioaktivt affald til deponering.

Rødt affald [kg]						
Emner	Beton	Grafit	Jern stål	Alu.	Bly	Andet
Reaktor, Tank, Forsøgsrør	142.994		3.175	2.836	5.194	58
Igloblokke og Rulledør			85	566	8	3
Termisk Kolonne			521	700	1.241	
Grafit fra DR 2		4.398				
Grafit fra DR 1		518				
Fundamenter i Kælder	1.673					
Varmevekslere				2.802		
Primær Kølekredsløb			94			
Ionbytteranlæg			554	126		88
Hold-up Tank	126					
El-Tavler						
Nødtankanlæg						
Diverse (bl.a. jern+bly-kugler til afskærmning)	309		5.013	30	503	1.067
SUM	145.102	4.916	9.442	7.060	6.946	1.216
Total	174.682					



Figur 71 Fordeling af rødt affald på materialetyper.

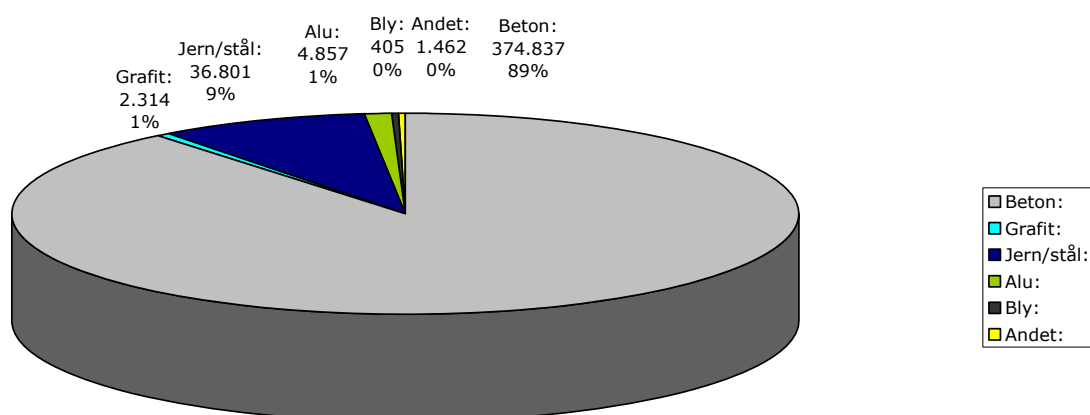
8.2.2 Frigivet affald og affald til videre behandling

Tabel 9 Affald til videre behandling og frigivelsesmåling.

Blå/Gult Affald til videre behandling/frigivelse [kg]						
Emner	Beton	Grafit	Jern/ stål	Alu.	Bly	Andet
Reaktor, Tank, Forsøgsrør			464	481		4
Igloblokke og Rulledør	16.000					
Termisk Kolonne						
Grafit fra DR 2						
Grafit fra DR 1						
Fundamenter i Kælderen						
Varmevekslere						
Primær Kølekredsløb				1.855		
Ionbytteranlæg			473			
Hold-up Tank				233		
El-Tavler						
Nødtankanlæg						
Diverse			724		84	26
SUM	16.000	0	1.661	2.569	84	30
Total						20.344

Tabel 10 Frigivet affald (bortskaffet).

Frigivet affald [kg]						
Emner	Beton	Grafit	Jern/ stål	Alu.	Bly	Andet
Reaktor, Tank, Forsøgs- rør	254.040		7.426	265		
Igloblokke og Rulledør	112.370		1.607			
Termisk Kolonne						
Grafit fra DR 2		188				
Grafit fra DR 1		2.126				
Fundamenter i Kælderen	8.427					
Varmevekslere			774	2.775		
Primær Kølekredsløb			785	662		
Ionbytteranlæg			734			
Hold-up Tank				906		
El-Tavler			1.073	122	405	575
Nødtankanlæg			15.610			
Diverse (bl.a. jern, inkl. 2 stk.gl. porte=7000kg)			8.792	127		887
SUM:	374.837	2.314	36.801	4.857	405	1.462
Total						420.676



Figur 72 Fordeling af frigivet affald på materialetyper.

På tidspunktet for nærværende rapportering, er der opgjort 420 tons frigivet affald. Som nævnt ovenfor forventes det, at hovedparten af affaldet til videre behandling (blå/gul) vil blive frigivet. Den samlede mængde frigivet affald til bortskaffelse vil således blive på omkring 440 tons.

Det fremgår af ovenstående opgørelse og bilag 5, at en mindre del af affaldet stammer fra DR 1 reaktoren og andre faciliteter fra reaktorernes driftsperiode. Disse emner fremkommer som affald i forbindelse med dekommissioneringen af DR 2 og er derfor registreret i dette projekt.

Herudover resterer der 20 tons bly i form af byggesten til afskærmningsformål. Blyet er klassificeret som 'gult' til dekontaminering. Blystenene forventes brugt til afskærmning i forbindelse med fremtidige dekommis-

sioneringsprojekter. Mængden er derfor ikke indregnet i nærværende affaldsoppgørelse.

8.2.3 Konklusion

Anvendelse af Affalds Dokumentations Systemet (ADS), som først var fuldt implementeret i DD i løbet af efteråret 2006, resulterede for DR 2 projektets vedkommende i, at en DD medarbejder måtte anvendes til næsten fuld tid til dette formål. Herudover foretog DD's helseassistenter målinger på affaldet, som også blev indlagt i ADS, og der foretoges dataregistrering på laboratorier og ved transporter af affald og containere. Samlet set en ikke ubetydelig og ressourcekrævende aktivitet i dekommissioneringsarbejdet.

Den samlede mængde af ikke-radioaktivt affald fra dekommissioneringen af DR 2 er i projektbeskrivelsen [2] skønnet at kunne blive op til omkring 900 tons. Indeholdt i denne mængde var en oprindelig forestilling om nedrivning af bygningen omkring reaktoren ('containment') inklusive de bærende betonkonstruktioner i kælderen under reaktoren. Som anført i afsnit 11.2 har DD til hensigt at anvende bygningen til håndtering af affaldsemner til videre behandling i forbindelse med de fremtidige dekommissioneringsopgaver. De opgjorte mængder affald fra dekommissioneringen afviger derfor i en vis grad fra de i projektbeskrivelsen forventede mængder, og mængderne er ikke direkte sammenlignelige.

Den samlede mængde af affaldsmaterialer frembragt ved dekommissioneringen af DR 2 er 636 tons.

Af den samlede mængde på 636 tons affaldsmaterialer, er der sammenfattende opgjort i alt (afrundede tal): 552 tons beton (87 %) og 7,2 tons grafit (1 %), 49,5 tons jern/stål (8 %), 17 tons aluminium (2 %), 7,5 (1 %) tons bly og en rest af andet/diverse på 2,7 tons (~1 %).

I projektbeskrivelsen blev betonmængden fra DR 2 estimeret til totalt 276 m³, hvoraf ca. 260 m³ forventedes at kunne frigives og bortskaffes som almindeligt bygningsaffald. Den aktiverede mængde af beton var således kun estimeret til 16 m³. Af de registrerede mængder af bortskaffet - frigivet - beton er der opgjort i alt 376 tons (jf. KMA materiale, se 5.4.3, side 92).

Hvis det antages, som anført i projektbeskrivelsen, at den frigivne beton hovedsagelig er tung beton, med en gennemsnitlig massefylde på 3,5 tons/m³, svarer den frigivne mængde beton fra dekommissioneringen til ca. 107 m³. Med henvisning til den samlede affaldsregistrering, bilag 5, er der oplagret 145 tons aktiv beton på mellemlageret, eller knap 89 m³ container volumen. Det skal understreges, at nedbrudt beton har et betydeligt større (og varierende) volumen end udstøbt beton. Hvis de samme vægtmæssige forhold antages at gælde for den oprindeligt estimerede mængde aktivt beton, ville den forventede mængde svare til ca. 112 tons. Da karakteriseringen af betonaufskærmning og fastlæggelse af den aktive profil først blev endeligt fastlagt i forbindelse med dekommissioneringen (se afsnit 5.4.1), vurderes det, at de endelige affaldsmængder er forholdsmæssigt i rimelig overensstemmelse med de forventede.

Med en samlet mængde affald på 636 tons og en andel af frigivne materialer på 440 tons, kan det konkluderes, at over 70 % af de frembragte

affaldsmængder har kunnet sorteres og efterbehandles til endelig frigivelse og bortskaffelse som almindeligt affald. Da hovedparten af affaldet består af traditionelle byggematerialer, er materialerne bortskaffet til videre genanvendelse.

9 Overvågningsprogrammer, målemetoder og doser

Alle ikke-rutine arbejdsoperationer i de klassificerede områder blev overvåget løbende mht. doser, strålingsniveauer og kontaminationsniveauer – herunder luftkontamination. Helseassisterne udgjorde rygraden i den helsefysiske overvågning. Deres arbejde bestod bl.a. i måling af strålingsfelter (rutine og ad-hoc), kontaminationsmålinger (rutine og ad-hoc), tjek af teknikernes elektroniske dosimetre samt kontrolmålinger på affald.

9.1 Brug af dosimetre

Alt personale, såvel eksterne som DD medarbejdere, bar TL dosimetre og elektroniske dosimetre under arbejdets udførelse, se billeder herunder.



Figur 73 TL dosimeter og elektronisk dosimeter

Brugen af det personlige TL dosimeter er påkrævet til klassificerede områder. Det sættes udvendigt på tøjet ved arbejdsdagens begyndelse og sættes ind i et rack ved arbejdsdagens slutning. Dosimetrene sendes til Risø DTU Afdeling for Strålingsforskning (NUK) for udlæsning en gang om måneden. Herefter modtager DD en dosisliste med persondoser for den pågældende måned. Doser mindre end 0,2 mSv er ikke medtaget i dosislisten.

TL dosimetrene har deres begrænsninger. Det er fx ikke muligt, at afgøre hvilken arbejdsoperation en given dosis stammer fra. Derfor anvendes også elektroniske dosimetre af mærket MGP. Ved indgang til et klassificeret område logger personen på dosimetersystemet ved at indtaste sit dosimeternummer på en terminal, hvorefter dosimeteret begynder at måle. Når personen igen forlader det klassificerede område logger vedkommende ud igen, og dosimeteret ophører med at måle. En server registrerer indlognings/udlognings-tidspunkt samt en evt. dosis.

Udover dosimetrene til måling af helkropps doser, anvendes også pande- eller håndledsdosimetre afhængig af arbejdsopgaven. Det drejer sig om enkelte TL piller der sættes i en lille lomme med tape på, så de kan sættes i panden eller på håndleddet. Efter brug "fremkaldes" TL pillerne af NUK på samme måde som TL dosimetrene.

9.2 Eksterne doser

Da der anvendes to typer dosimetre er der som udgangspunkt opgivet to doser for hver person og for hver arbejdsoperation (hvis der er registrerede doser). Den kollektive dosis i løbet af projektet er beregnet ved at benytte den største af de to opgivelser.

Det skal bemærkes, at de opgivne doser for hhv. TL og MGP i nogle få tilfælde afviger meget fra hinanden. Der kan være forskellige årsager; som beskrevet ovenfor anvendes dosimetrene forskelligt: Et TL dosimeter akkumulerer strålingsenergi hele tiden – også mens det sidder i sit rack, hvor MGP dosimetrene kun akkumulerer i den tid personen er inde i det klassificerede område. Herudover opgives for TL dosimetrene kun doser, der overstiger 0,2 mSv/måned. Endelig kan placeringen på kroppen have været forskellig i disse få tilfælde. Et forsøg er sat i gang, som skal sammenligne målte doser for de to dosimetertyper ved en række kendte dosishastigheder.

Alle eksterne doser under projektet er opgivet i Tabel 11. Den højest registrerede akkumulerede dosis til en enkelt person under hele dekommissioneringsprojektet var 1050 μ Sv målt på TL dosimeter og fordelt over fire måneder. Doserne blev modtaget af en ekstern arbejder under betonnedbrydningen primært ved udskæringen af linerne til B-rørene. Den akkumulerede kollektive dosis til de eksterne arbejdere under betonnedbrydningen var på 3,2 person-mSv (målt med TLD, fremgår ved at summere tallene i Tabel 1). Den akkumulerede kollektive dosis til DD's egne medarbejdere under hele projektet var 1,6 person-mSv (fremkommer ved at summere doserne – den højeste af MGP eller TLD - fra de enkelte delprojekter).

Ansatte hos DD																
Dosimeternummer	1005			210			1190		1839			917			1714	
Delprojekt	MGP	TLD	Special	MGP	TLD	Special	MGP	TLD	MGP	TLD	Special	MGP	TLD	Special	MGP	TLD
Udtagning af S-rør	1															
Udtagning af B-rør	5		200/200/-			200/200/-										
Grafit	36			95	250	150/250/100	59		33		0/0/-	48		0/0/-	6	
Blynæse	68	100*	400/250/-	72	150*	250/200/-						6			11	
Gitterplade	85	200*		92	200*										13	
Betonnedbrydning				1								1	200			
Sum	195	300	600/450/-	260	600	600/650/100	59		33			55	200	0/0/-	30	

Ansatte hos DD								
Dosimeternummer	1816		1460		197		1865	
Delprojekt	MGP	TLD	MGP	TLD	MGP	TLD	MGP	TLD
Udtagning af S-rør								
Udtagning af B-rør								
Grafit	6		2		53		29	
Blynæse	3				27	200	2	
Gitterplade					5		3	
Betonnedbrydning								
Sum	9		2		85	200	34	

Eksterne arbejdere i forbindelse med betonnedbrydningen

Dosimeternummer	78	80	66	118	74	61	72	77	122
MGP	0	0	40	12	158	61	9	183	0
TLD	250	200	1050	250	400	200	200	400	250

Tabel 11. Eksterne doser givet i µSv.

Udover MGP og TL dosimetrene blev der ved visse operationer anvendt håndleds- og pandedosimetre. Disse er i tabellen angivet under "special". Der er tre tal under "special" med formatet <højre hånd>/<venstre hånd>/<pande>. Et "-" betyder at det pågældende dosimeter ikke er blevet anvendt. Eksempelvis betyder 200/200/- at begge hænder har fået 0,2 mSv, og at der ikke er anvendt pandedosimeter.

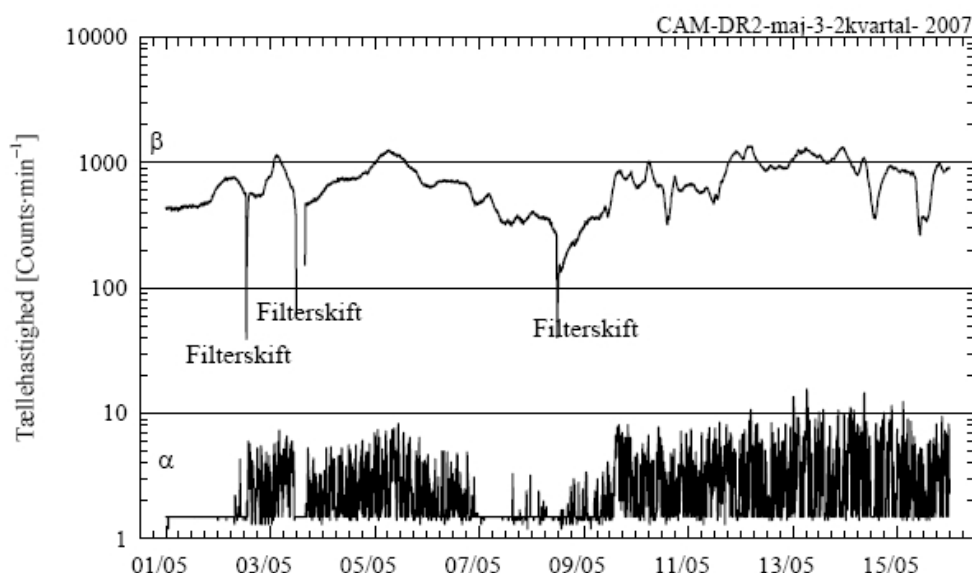
* Blynæsen og gitterpladen blev udtaget i samme måned, hvilket betyder at TLD doserne dækkede over begge arbejdsoperationer. Her er de imidlertid fordelt ud på de to operationer, ud fra et skøn, som bygger på MGP doserne.

9.3 Interne doser

Alle DD medarbejdere afgiver urinprøver en gang månedligt til bestemmelse af interne doser. Under betonnedbrydningen afgav de eksterne medarbejdere ligeledes urinprøver. Der blev målt for β og γ hos NUK på Risø. Der er ikke konstateret interne doser under dekommissioneringen af DR 2.

9.4 Overvågning af luftkontamination

Der blev overvåget for evt. luftkontamination (både α - og β -kontamination) med en Continuous Air Monitor (iCAM) i reaktorhallen under hele dekommissioneringsprojektet, men uden at konstatere luftkontamination udover tilstedeværelsen af radon og radondøtre. I marts 2007 blev den eksisterende monitor skiftet ud med en nyere model. Målingerne fra 2006, dvs. under strippingen af reaktoren, findes som regnearksfiler, hvor målinger fra januar 2007 og frem blev medtaget i kvartalsrapporterne til SIS¹³. Et eksempel på en præsentation af iCAM måleresultater er givet i figuren herunder (sidste halvdel af maj 2007).



Figur 74 Præsentation af iCAM måleresultater

Øverst på figuren ses udviklingen af β -kontaminationen og nederst α -kontaminationen. Grundet variationen i luftens indhold af radon(døtre) er der ikke tale om vandrette linjer. Hvis der havde været en β -kontamination udover det naturlige niveau, ville grafen stige til et højere niveau uden at falde ned igen, da de tilstedeværende radionuklider på DR 2 havde lange halveringstider i forhold til levetiden af et iCAM filter.

Under betonnedbrydningen målte iCAM'en i hallen uden for teltet, dvs. i det samme rum, hvori ventilationsafkastet fra teltet blev ført ud. Resultaterne fra iCAM målingerne under betonnedbrydningen (april 2007 - de-

¹³ Rapporterne DD-I-26(DA), DD-I-28(DA), DD-I-30(DA) og DD-I-31(DA) *Helsefysiske målinger på nukleare anlæg og laboratorier på Risø-området*

ember 2007) er alle medtaget i kvartalsrapporterne. Der blev ikke observeret forhøjet luftkontamination under projektets udførelse. At der ikke blev målt forhøjet luftkontamination viser, at telt og ventilation inkl. afkastfiltrering har fungeret effektivt. Dette kan også ses af, at HEPA filtrene fra teltets ventilationsafkast kunne frigives jf. Frigivelsesfunktionens Kvalitetshåndbog efter nedbrydningens ophør.

9.5 Overvågning af strålings- og kontaminationsniveauer

Igennem hele dekommissioneringsprojektet har DR 2 bygningen været et klassificeret strålings- og kontaminationsområde. Som oftest har der været tale om blå kontaminationsområde, men under nedhugningen af den ikke-frigivelige beton blev teltet klassificeret som rødt kontaminationsområde. Områderne blev løbende overvåget ved både rutinemæssige og ad-hoc aftørningsprøver samt strålingsmålinger. Resultaterne findes dels i kvartalsopgørelserne, som tilsendes SIS, dels som ugemålinger. I hele dekommissioneringsperioden blev grænseværdierne for de respektive strålings- og kontaminationsområder overholdt. Herudover benyttes som retningslinje, at der skal foretages yderligere rengøring i et blå kontaminationsområde, såfremt niveauet overstiger 100 Bq/m².

Betonnedbrydningen blev foretaget af eksterne arbejdere. Arbejderne fik et halv-dags kursus i helsefysik og om, hvad tilstedeværelsen af radionuklider betyder for arbejdets udførelse. Dette kan være af afgørende betydning for, at der ikke blev spredt kontamination fra teltet til omgivelserne.

10 Unormale hændelser

Der har igennem dekommissioneringen ikke været unormale hændelser af større betydning. I et par tilfælde har der dog været et par overraskelser, bl.a. ved boring af borekerner til karakterisering og ved nedtagning af igloblokke.

Boreslam

I forbindelse med boring af kerneprøver fra betonkonstruktionen for fastlæggelse af det aktive profil i reaktorblokken (se afsnit 5.4.1) blev et indstøbt kølerør anført. Røret var afmonteret i driftskælder, men ikke afproppet. Dette resulterede i, at boreslam i et lille omfang løb ud i kælderen. Det viste sig, at boreslammet var aktivt, sandsynligvis stammende fra det aktiverede beton.

Boreslammet kunne umiddelbart opsuges, og der kunne rengøres. Dette medførte dog, at der ved boringer fremover blev holdt et vågent øje med boreprocessen.

Dette var, sammen med erfaringerne fra DR 1 projektet, medvirkende til at bekræfte beslutningen om ikke at anvende vand i forbindelse med nedbrydningen af reaktorblokken (se afsnit 5.4.2.1).

Iglo blokke

Som nævnt i afsnit 5.2.2, side 29, blev betonblokkene fra reaktorens iglo nedtaget og bortskaffet. Blokkene, der var designet til at kunne fjernes, havde aldrig i reaktorens driftstid været flyttet.

Da blokkene skulle nedtages, viste det sig da også i et par tilfælde, at disse ikke umiddelbart kunne adskilles i enkeltblokke. Vandrette overliggende blokke, som tilsammen vejede over 24 tons (2 stk.) kunne derfor ikke løftes ned, da kranen i hallen har en maksimal tilladelig løftekapacitet på 15 tons.

For at løse problemet blev der tilføjet anvendelse af donkrafte. Samtidig blev der arbejdet med sprækning af blokkene. I et enkelt tilfælde skulle der, efter forarbejde med sprækning, anvendes hele kranens løftekapacitet i kombination med 3 stk. 20 tons donkrafte, før blokkene blev adskilt.

Der skulle i denne arbejdsproces derfor anvendes langt flere ressourcer og tid end forudsat, og det skulle nøje iagttages, at der ved brug af så megen løftekapacitet (over 70 tons), var taget de nødvendige arbejds- og sikkerhedsmæssige foranstaltninger.

11 Frigivelsesprocedurer/Nedklassificering

11.1 Frigivelse af emner

Emner, hvorpå der ikke kunne påvises nævneværdige dosishastigheder, er forsøgt frigivet efter de principper, der er nævnt i kapitel 4. De fleste emner kunne måles direkte på frigivelseslaboratoriet eller med kontaminationsmonitorer. En undtagelse er betonblokken. Betonblokken har været udsat for neutroner; jo tættere på tanken, desto højere neutronflux, hvilket betyder, at aktiveringsgraden aftog radialt fra reaktortanken og udad. Ved at udtage boreprøver og dele dem op i mindre stykker, var det muligt ved hjælp af gammaspektrometriske målinger på Frigivelseslaboratoriet at afgøre, hvor grænsen mellem frigiveligt beton og ikke-frigiveligt ("rødt beton") befandt sig i reaktorblokken. Hermed er metode A til frigivelse ved hjælp af prøvetagning anvendt: Hvis betonen i en given afstand fra kerne kunne frigives, ville alt beton, der befandt sig længere væk fra kerne, ligeledes kunne frigives. Yderligere målinger, udover kontrolmålinger, var ikke nødvendige (se bilag 6).

Antallet af boreprøver, samt deres placering, blev tilrettelagt på forhånd på en sådan måde, at aktivitetsfordelingen i hele reaktorblokken blev kendt med tilstrækkelig nøjagtighed. I nærheden af B-rørs linerne blev der taget yderligere boreprøver, da betonen i højere grad var aktiveret langs med disse.

Under nedhugningen blev der hugget ind til skillelinjen mellem den frigivelige og den ikke-frigivelige beton, som beskrevet i afsnit 5.4, og den frigivelige beton blev kørt væk som byggeaffald. Hver container blev dog kontrolmålt med såvel strålingsmålinger som kontaminationsmålinger. Ved en enkelt lejlighed blev der på denne måde opdaget, at et aktiveret rørstykke fejlagtigt var blevet lagt op i containeren.

11.2 Ændring af sluttilstand for DR 2 dekommissioneringsprojektet

I den oprindelige projektbeskrivelse for dekommissionering af DR 2 [2] anføres det i kapitel 5.11, at slutmålet for frigivelsesmålinger, og dermed for projektet, er frigivelse til anvendelse uden restriktioner. Imidlertid har DD identificeret et behov for omladnings- og håndteringsfaciliteter for radioaktive emner, hvor DR 2's reaktorhal vil kunne anvendes. Yderligere vil kælderfaciliteterne i bygningen (bygning 200) kunne tjene som bufferhal for radioaktivt affald, såfremt det bliver nødvendigt at inddrage også den østlige del af Bygning 249 til mellemlager.

Da ovennævnte anvendelse af hallen – og de tilhørende omklædningsfaciliteter – vil indebære en klassifikation som strålings- og kontaminationsområde, ønsker DD, at bygningen efter afslutning af dekommissionering af DR 2 overgår til "fortsat nuklear anvendelse". Forud herfor er bygningen blevet gennemmålt og rengjort i en sådan grad, at den kan klassificeres som hvidt strålings- og kontaminationsområde efter DD's klassifikationssystem. I hvidt strålingsområde skal dosishastigheden være mindre end 2,5 µSv/h, og for hvidt kontaminationsområde gælder at aktivi-

tetsniveauet på overflader skal være mindre end 10^4 Bq/m² for α -aktivitet og mindre end 10^5 Bq/m² for β -aktivitet. Ved arbejde i hvide områder er der ikke nogen krav om særlig påklædning eller skoskifte. Nedklassificeringen medfører derfor blandt andet, at det ikke vil være nødvendigt at pålægge håndværkere helsefysiske restriktioner i forbindelse med ombygning af faciliteterne. Endvidere vil nedklassificeringen sikre, at der ikke efterlades væsentlige mængder radioaktivt materiale fra driften af DR 2.

DD ønskede således at lade nedklassificering af reaktorhallen og tilhørende lokaler til hvidt strålings- og kontaminationsområde være slutmålet for DR 2 dekommissioneringsprojektet. Bygningen vil herefter blive overført som en facilitet under Behandlingsstationen.

Foranstående er blevet forelagt de nukleare tilsynsmyndigheder i form af et Addendum til DR 2 projektbeskrivelsen [3]. Myndighederne har tilkendegivet, at de finder, at anvendelse af DR 2-hallen til de beskrevne formål, efter gennemførelse af de nødvendige ændringer, vil være en brugbar løsning på de erkendte behov for yderligere omladnings- og håndteringsfaciliteter, og at dette, som foreslået, bør ske som en facilitet under Behandlingsstationen (BEH). De nukleare tilsynsmyndigheder har på dette grundlag godkendt Addendum. Det skal bemærkes, at den nye anvendelse af bygningen vil kræve ændringer af BfDA [10].

Planerne for indretning af bygningen til de nye anvendelser vil uafhængigt af nærværende projekt blive forelagt de nukleare tilsynsmyndigheder til godkendelse, når de foreligger.

11.3 Nedklassificering af bygning 200 til hvidt strålings- og kontaminationsområde

Nedklassificeringen dokumenteres ud fra et måleprogram, som skal sandsynliggøre, at ovenstående grænseværdier overholdes. Alle gulve er totalmålt, hvorimod vægge og installationer er målt stikprøvevis.

Ingen af de målte niveauer gav problemer i forhold til nedklassificeringen, men der blev identificeret nogle kontaminerede områder, som der skal gøres noget ved, når bygningen skal forsøges frigivet efter endt anvendelse. Det drejer sig især om forureninger med uran fra uranpilotforsøget i 1970'erne, jf. projektbeskrivelsen [2]. Kontaminationen findes på store dele af gulvet i eksperimentkælderen. I hallen blev der ligeledes fundet kontamination med uran, men kun enkelte pletter af begrænset omfang. Disse blev fjernet inden nedklassificeringen. Det kan dog ikke udelukkes, at der er flere kontaminerede områder under epoxy-belægningen.

Der er efterladt nogle indstøbte rør i gulvet omkring det hul, der var tilbage efter betonnedbrydningen. Rørene indeholder noget lyst materiale, som formentlig stammer fra boreprøvetagningen i den biologiske afskærmning. De fundne radionuklider er derfor typiske for aktiveret baryt-beton. Rørene er forsøgt rensede inden nedklassificeringen for at nedbringe strålings- og kontaminationsniveauet, men der er formentlig behov for yderligere dekontaminering inden frigivelse forsøges.

Nedklassificeringsmålingerne er beskrevet i et notat, som er vedlagt som bilag 3. Heri er det også nærmere beskrevet, hvad man skal være opmærksom på ved en fremtidig frigivelse.

12 “Lessons learned”

12.1 Tidsforløb

Dekommissioneringen af DR 2 var planlagt til at løbe i perioden 2005 – 2008. Efter karakteriseringen af reaktoren og udarbejdelse af projektbeskrivelse, blev denne godkendt af tilsynsmyndighederne i december 2005. Det tilhørende budget blev dog først endeligt godkendt af Finansudvalget i maj 2006, hvorefter dekommissioneringsarbejdet kunne igangsættes.

I forbindelse med igangsætning af arbejdet blev der på grundlag af projektbeskrivelsen udarbejdet en detailtidsplan for gennemførelsen. Hovedvægten i planen blev lagt på den største enkeltopgave, nedbrydningen af betonkonstruktionen. Dette blev valgt fordi arbejdet skulle udføres af en ekstern entreprenør på grundlag af en forudgående licitationsrunde. Udbud af entrepriser af denne størrelse er omfattet af EU's udbudsregler og regler for udbud af opgaver fra statslige selskaber. Samtidig skulle DD udføre en række aktiviteter, som skulle være afsluttet før igangsætning af betonnedbrydningsentreprisen kunne ske. Det blev derfor vurderet, at denne entrepriseopgave var den mest kritiske, både tidsmæssigt og økonomisk.

Da en del af dekommissioneringsopgaverne var uafprøvede blev tidsplanen for enkelte aktiviteter fastlagt ud fra et kvalificeret skøn. Under udførelsen kunne det da også konstateres at enkelte opgaver tog længere tid, nogle lidt kortere tid og, få opgaver måtte rykkes i forhold til det oprindeligt forudsatte, som også illustreret i nedenstående tidsplan.

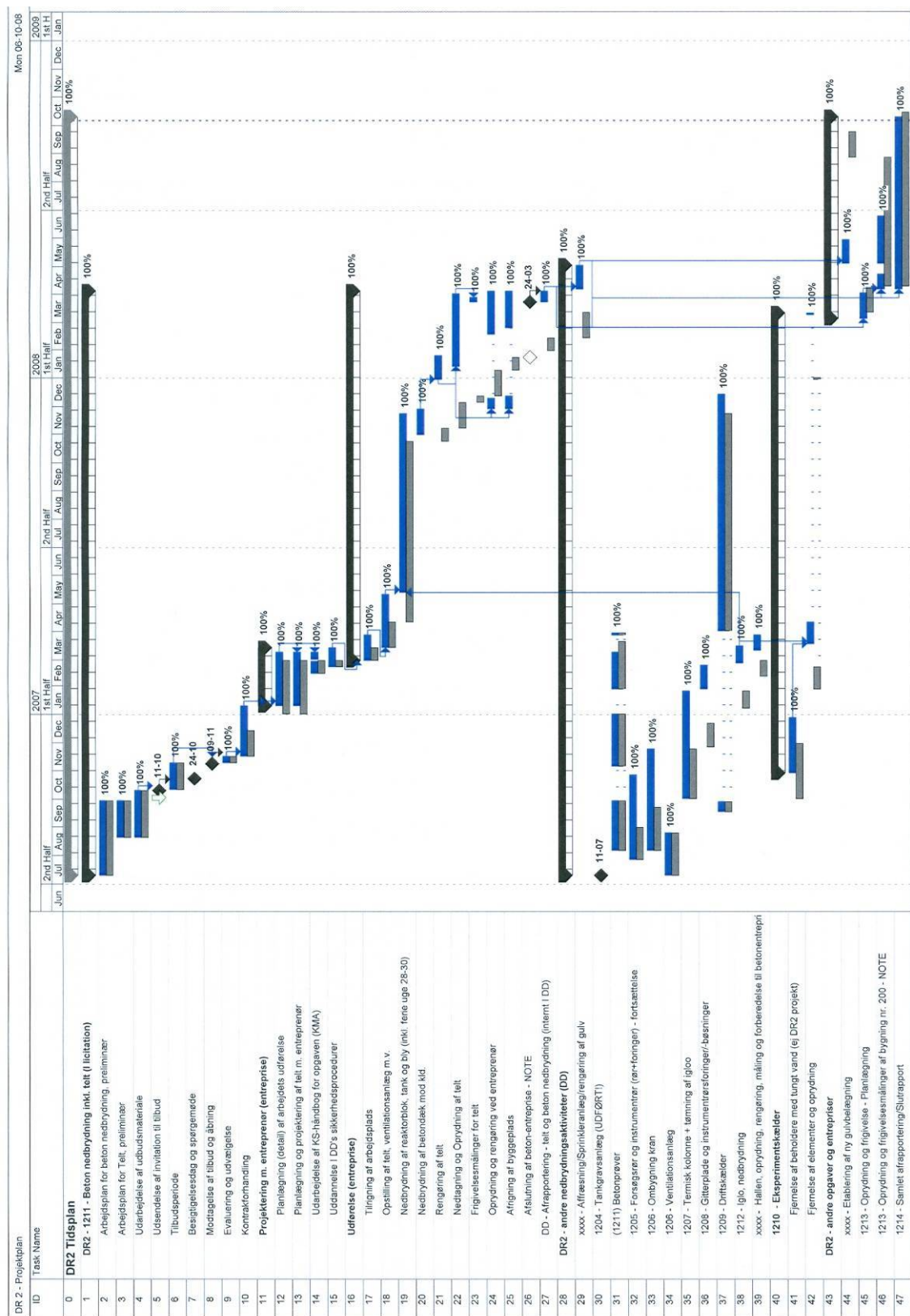
Samlet set kan det dog konkluderes, at tidsplanen som helhed blev overholdt og arbejdet udført på tilfredsstillende vis indenfor de fastlagte hovedtidsrammer.

Projektet blev afsluttet med nedklassificering af 'containment' bygningen medio 2008 og, udarbejdelse af nærværende rapport, i umiddelbar forlængelse heraf. Rapporteringen, og myndighedernes godkendelse af denne, udgør den endelige afslutning af dekommissioneringen af DR 2 projektet.

12.2 Metoder og teknikker

De forskellige værktøjer som er præsenteret i rapporten og den praktiske brug af dem, fordele og ulemper, begrænsninger osv., er af DD betragtet som højst værdifulde erfaringer. Erfaringer og beslutninger gjort under projektet er alle rapporteret internt. Særlige fund og observationer er alle indberettet til myndighederne.

Hos DD varetages planlægning og styring af dekommissioneringsprojekter af sektionen for Projektstyring. Det sikres således at de indhøstede erfaringer og viden fra dekommissioneringen til stadighed opdateres og indarbejdes i de fremtidige opgaver. Viden og erfaring, som er opnået under DR 1 og DR 2 projekterne er allerede inkorporeret i det næste projekt, dekommissionering af Hot Cell, for eksempel vedrørende brugbarhed af værktøjer, kvalitetssikring og udformning af arbejdsplaner for enkeltopgaver. Endvidere er erfaring overført ved at det er den samme projektleder og den samme helsefysiker, der medvirker i Hot Cell projektet.



Figur 75 Tidsplan for dekommissioneringsarbejder på DR 2 (grå = planlagt, blå = realiseret).

Det er konkluderet, at projekterne er blevet udført ifølge planen, og at resultaterne har været tilfredsstillende. Fra DD's synspunkt har DD selv i sidste instans været "flaskehalsen" i forskellige funktioner.

12.2.1 Affaldsregistrering

Dette kom eksempelvis til udtryk ved anvendelse af Affalds Dokumentations Systemet (ADS), som først var fuldt implementeret i DD i løbet af efteråret 2006. Samtidig var antallet af enkeltemner, som skulle registreres og antallet af data for hvert enkelt emne ikke estimeret forud for projektets igangsætning. Det resulterede for DR 2 projektets vedkommende i at en DD medarbejder måtte anvise næsten fuld tid til dette formål. For nuværende er DD overbevist om, at ADS systemet og softwaren fungerer ordentligt. Fremover skal behovet for en væsentlig arbejdsressource til denne opgave indarbejdes i projektplanlægningen.

12.2.2 Kontrolmålinger

Procedurerne for kontrolmålinger af affald og udstyr blev ændret grundet implementeringen af et akkrediteret kvalitetssikringssystem for frigivelse af materialer og udstyr i løbet af foråret 2007. Dette var et krav fra myndighederne og skabte noget turbulens og misforståelser i begyndelsen indtil procedurerne var indarbejdet. Dette vurderes ikke at få betydning for de fremtidige opgaver.

12.2.3 Arbejdsmetoder og værktøjer

Plasmaskæring:

Anvendelse af plasmaskæring til neddeling af metalliske konstruktioner viste sig at være yderst nyttig i dekommissioneringen. Af særlige fordele kan fremhæves:

- hurtig skæring
- skæring i boralplader og sammensatte konstruktioner af bløde og hårde materialer
- lav vægt ved manuelt arbejde
- håndholdt og let at montere på en forlængerarm
- fjernbetjening mulig via forlængerarm og dermed i princippet også via robotarm
- høj skærehastighed i stål og aluminium.

Brug af plasmaskærer forudsætter dog, at der er den nødvendige elektriske spænding tilgængelig, at der er trykluft tilgængelig og, at der etableres nødvendig udsugning i arbejdsområdet. Plasmaskæring kan medføre problemer for overvågning af luften med den type udstyr (iCAM), som anvendes af DD. Det skal også iagttages, at der arbejdes med høj spænding og høje varmegrader.

Der er således behov for at der etableres punktudsug ved skærestedet og alle tilstedeværende medarbejdere skal bære åndedrætsværn med partikelfilter (klasse P3). På plussiden kan tilføjes, at faguddannede medarbejdere, uden større problemer kan anvende værktøjet, og at det derfor hurtigt kan implementeres i værktøjssortimentet. Plasmaskæring vurderes med fordel at kunne anvendes i andre projekter.

Ingen brug af vand:

Det blev forud for igangsætning af betonnedbrydningen besluttet at der ikke måtte anvendes vand i processen.

Erfaringerne fra DR 1 projektet viste, at det kunne være vanskeligt at kontrollere vand fra nedbrydningen – våd wireskæring – under udførelsen, hvilket medførte krydskontaminering og dermed ekstraarbejde.

Ved karakteriseringen af betonkonstruktionen på DR 2 blev det konstateret, at den manglende dokumentation af indstøbte rør i den biologiske afskærmning og i bygningen medførte problemer under foretagelsen af boreprøver. Prøverne blev udboret med anvendelse af vand. Dette resulterede i at vand løb via "ukendte" rør fra hallen til kælderen og gav en let krydskontaminering.

Det viste sig, at kravet om ikke at anvende vand i nedbrydningen af betonkonstruktionerne af baryt-beton ikke gav anledning til problemer i udførelsen.

I forbindelse med betonnedbrydningen blev der foretaget borer i betonkonstruktionen på 2,5-3 meters længde (styre linjer til adskillelse af aktivt beton) uden anvendelse af vand.

Der blev udført wireskæring af den biologiske afskærmning uden anvendelse af vand. I dette tilfælde blev der forudgående udført test af forskellige typer af wire og den valgte type viste sig yderst anvendelig.

Støvemissionen fra betonnedbrydningen, med hydraulisk hammer, ville typisk have været kontrolleret ved sprøjtning med vand. I DR 2 projektet blev dette gjort ved brug af punktudsug placeret på nedbrydningsmaskinen og i nærheden af arbejdsområdet samt god ventilation i rummet.

Wireskæring i hårde og bløde materialer:

Al wireskæring udført på DR 2 blev foretaget uden brug af vand. forudgående blev der udført test på de materiale- og konstruktionstyper, som der skulle nedbrydes.

Der anvendtes wireskæring til nedbrydning af baryt beton, som beskrevet ovenfor.

Der blev anvendt wireskæring til udskæring af vandrette forsøgsrør, som i dele af deres konstruktion indeholdt både aluminium, bly og beton. Det viste sig her vanskeligt at styre wirerne i den bløde aluminiumsdel hvilket medførte skæve snit. Når først wiren havde fået tilstrækkeligt "bid" i den hårde beton kunne skærelinjen fastholdes.

Ved neddeling af varmevekslerne blev der også anvendt wireskæring. Dette forløb stort set problemløst og reducerede tidsforløbet for denne aktivitet betydeligt. Der blev foretaget afdækning af arbejdsstedet for at undgå spredning af skærespåner.

Wireskæring har samtidig den fordel, at det i væsentligt omfang kan udføres fjernbetjent. Når først opstillingen af skæremaskinen og wire er foretaget kan selve skæringen styres fjernbetjent. Selve wiren har en levetid, der er afhængig af beskaffenheden af materialet, som der skæres i, konstruktionens udformning (fx skarpe kanter, kompositmaterialer o. lign.) og

typen af wire m.v. Samlet set må wireskæring betragtes som en yderst anvendelig metode til nedbrydning af nukleare konstruktioner.

Det er endnu ikke afprøvet at anvende wireskæring til neddeling af betonkonstruktioner indeholdende såkaldt shot-beton (stål/bly-kugler). Dette bør overvejes i forbindelse med det fremtidige projekt på DR 3.

Kontamination:

Hvis der ses bort fra de ovenstående eksempler med brug af vand, har krydskontamination af forskellige områder ikke fundet sted på DR 2 projektet.

Kontamination i bygningen, især af gulvet i hallen, stammede fra forsøg med udvinding af uran, udført efter lukningen af reaktoren. Kontaminationen var således ikke registreret og udbredelsen helt ukendt. Dette forhold kan tilskrives, at reaktoren lukkede allerede i 1975 og, at hallen gav muligheden for gennemførelse af den type forsøg, som var skønnet formålstjenstlig på daværende tidspunkt. Dette problem skønnes for nuværende ikke at ville optræde på fx DR 3.

Telt:

At inddække arbejdsområdet for nedbrydningen af betonkonstruktionen ved at etablere et telt i DR 2 hallen har vist sig yderst praktisk og økonomisk overkommeligt. Der blev på intet tidspunkt konstateret kontamination stammende fra nedbrydningsarbejdet uden for teltet.

Teltet medvirkede til at afgrænse arbejdsområdet fra alle andre aktiviteter i bygningen. Det gav mulighed for etablering af særskilt sluse- og omklædningsfacilitet og anvendelse af særligt arbejdstøj og – udstyr i arbejdsområdet. Samtidig kunne der oprettes et adskilt trin til materiale sluse for kontrol af nedbrudte materialer før fjernelse fra bygningen.

Teltets konstruktion med anvendelse af traditionelt stålstillads og anvendelse af presenning (armeret plast dug) til lufttæt vægkonstruktion viste sig meget brugbar og let at vedligeholde og rengøre. Konstruktionen var også relativt enkel af nedtage og kontrolmål. Stilladsets modulopbygning og presenningens opdeling i "baner" gjorde frigivelsesmålingerne relativt enkle og hurtige.

Ventilation og punktudsugning:

Etablering af særskilt ventilationsanlæg i det opførte telt i hallen viste sig uproblematisk. Der var til anlægget etableret display til aflæsning af aktuelt trykniveau samt visuel alarm, og styring af undertrykket i teltet var også uden problemer. Anvendelse af individuelle udsugningsenheder virkede tilfredsstillende. Alle udsugninger havde tretrins filtersystem med for-, fin-, og HEPA filter. Med forfilter placeret umiddelbart tilgængeligt kunne der udføres løbende kontrolmålinger af kontaminationsgrad og eventuelt strålingsniveau på filtre. Samtidig viste det sig fordelagtigt at hovedparten af støvet – og kontaminationen – satte sig i de to yderste filtre. Resultatet blev således, at alle HEPA filtre efterfølgende kunne frigives, hvorved der opnåedes en økonomisk besparelse på forbruget af filtre.

Punktudsugningen, der anvendtes under betonnedbrydningen, viste sig at være fordelagtig. Anlægget bestod af et centralt anlæg med posefiltre efterfulgt af HEPA filter med afkast til hallen uden for teltet. Der var ført punktudsug med udtag 10 steder i hallen og hele arbejdsområdet kunne

således dækkes. Der var også mulighed for direkte montering på maskiner.

Punktudsugningen samlede betydelige mængder støv under arbejdsprocessen. Støvet fra nedbrydningsprojektet opsamledes løbende i samlet 15 stk. 200 liter tønder med spændelåg og kunne således transporteres bort direkte fra sugeanlægget. De ca. 10 ton støv blev af procesmæssige grunde bortskaffet som aktivt affald. Posefiltret blev afslutningsvis klassificeret som aktivt og HEPA filtret blev efterfølgende kontrolmålt til frigivelse. Selve sugeanlægget kunne rengøres og dekontamineres uden problemer.

12.3 Konklusion

Det kan konkluderes, at projektet og de enkelte aktiviteter er blevet udført ifølge planen, at de valgte metoder og teknikker har vist sig anvendelige. Tidsplanen som helhed blev overholdt og arbejdet generelt er udført på tilfredsstillende vis indenfor de fastlagte rammer.

En væsentlig erfaring vedrørende værktøjer og metoder, som blev gjort under DR 2 projektet, er, at tør wireskæring kan lade sig gøre – også når der skal skæres i en "sandwich" indeholdende beton, aluminium og bly. Ligeledes kunne der uden problemer skæres i rent aluminium, som det skete med varmevekslerrørene, jf. kapitel 5.3.2. Selv om tør wireskæring er dyrere på grund af prisen på wiren, og muligvis også en kortere holdbarhed af denne, er det DD's erfaring, at denne metode er at foretrække frem for vandkølet wireskæring, som blev anvendt i DR 1 projektet.

Tilsvarende kan det konstateres, at betonnedbrydning med hydraulisk hammer kan lade sig gøre uden at der kommer støv uden for teltet, selv om dette telt ikke er særligt avanceret. Løbende i processen kunne en betydelig del af den producerede støvmængde indsamles ved udbredt anvendelse af punktsug. Erfaringen viste også, at det kunne lade sig gøre at ramme den fastlagte skillelinje mellem den del af betonafskærmningen, der kunne frigives, og den, der skulle deponeres som radioaktivt affald.

DD har haft anledning til at delagtiggøre internationale kolleger i erfaringerne vedrørende metode- og værktøjsvalg i forbindelse med deltagelse i et IAEA projekt desangående¹⁴ [12].

Det må forudses, at også i de følgende projekter bliver affaldsregistreringen en opgave, der kommer til at lægge beslag på det meste af en teknisk medarbejder.

Det er konkluderet, at DD kan forbedre processerne omkring beslutningstagning om fx helsefysiske forhold, valg af arbejdsmetoder, sikkerhedskrav og bestemmelse af hvilke typer af container, som skal anvendes til forskellige materialer. Kort sagt, organisation, projektledelse og kvalitets sikring er en kontinuerlig proces i forbedring. Noget af denne forbedring kommer "af sig selv" i og med, at de deltagende medarbejdere oparbejder mere erfaring, mens andet befordres af instrukser og involvering af alle relevante eksperter på et tidligt tidspunkt i planlægningen af projekter.

¹⁴ Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities (T2.40.07). Projektet forløb fra 2004 til 2008.

DD's projektstyringssektion arbejder løbende med forbedringer og optimering i planlægning af dekommissioneringsprojekterne.

Ud over de her nævnte erfaringer vil der blive udarbejdet et særskilt katalog over erfaringer med en uddybning af bl.a. de mere materialemæssige, tekniske og værktøjsmæssige erfaringer, som er indhøstet i DR 2 projektet.

13 Referencer

1. Overordnet plan for dekommissionering af de nukleare anlæg på Risø-området. Dansk Dekommissionering, Roskilde. August 2004. DD-1(rev.2)(DA).
2. Projektbeskrivelse for dekommissionering af DR 2. DD-I-011(rev.2)(DA), december 2005.
3. Addendum til projektbeskrivelse for dekommissionering af DR 2. DD-I-011, december 2007.
4. SIKKERHEDSDOKUMENTATION – Dekommissionering af de Nukleare Anlæg på Risø-området. Rev. 0, 16. oktober 2003
5. Affald ID-gruppen. Kravspecifikation for affaldsdokumentationssystem. DD-I-10(DA).
6. Generelle krav til prøvnings- og kalibreringslaboratoriers kompetence. Dansk Standard, DS/EN ISO/IEC 17025, 2. udgave, 10. juni 2005
7. Franz Meyer, Decommissioning of the ASTRA-Research Reactor Review and Status. December 2003.
8. Affald ID-gruppen. Kravspecifikation for affaldsdokumentationssystem. DD-I-10(DA).
9. NMK 96, Nedbrydningssektionens Miljøkontrolordning af 1996
10. Betingelser for Drift og Afvikling, Rev. 1., 1. juni 2005
11. Povl L. Ølgaard, The DR 2 Project. Risø-R1427 (EN). Forskningscenter Risø. June 2003
12. Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities. Final report of a coordinated research project 2004-2008. IAEA-TECDOC-1602. The International Atomic Energy Agency, Vienna. October 2008.

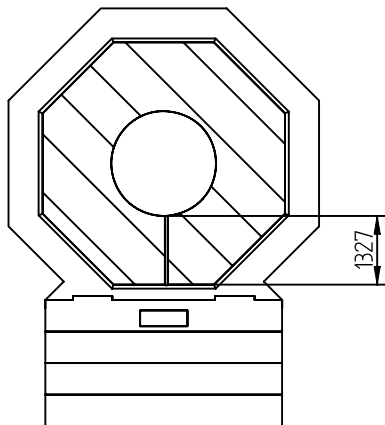
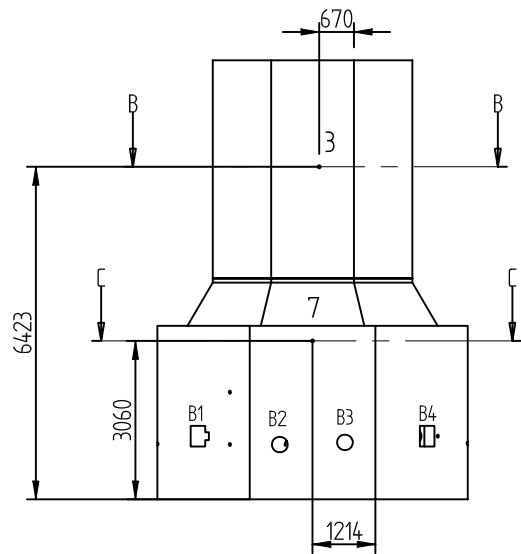
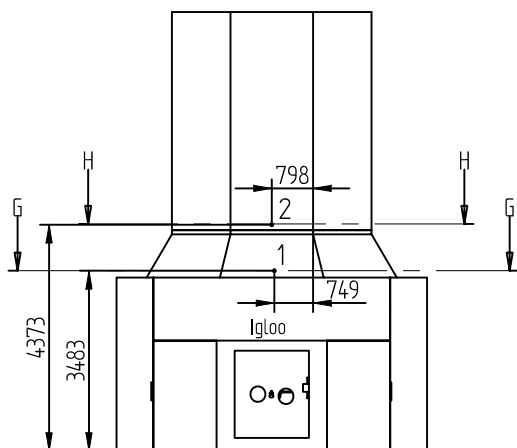
14 Bilag

Bilag 1	Borekerner og resultater
Bilag 2	Wigner-energi i DR 2 grafit
Bilag 3	Nedklassificering af DR 2
Bilag 4	Nødtankanlæg ved reaktor DR 2
Bilag 5	Affaldsmængder
Bilag 6	Frigivelsesrapport for frigivelig del af beton-blok, af 28. maj 2008
Bilag 7	Boreprøver fra den biologiske afskærmning på DR 2

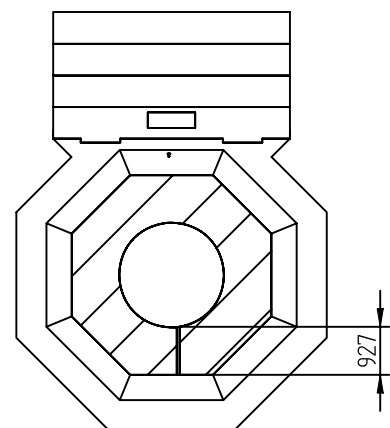
Bilag 1

Borekerner, tegninger og resultater

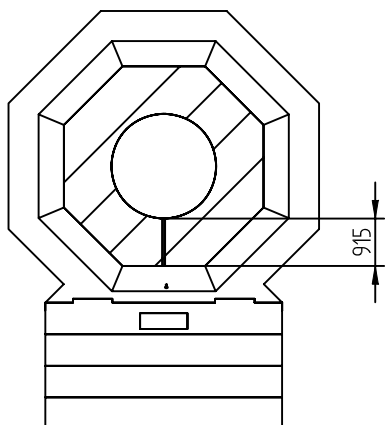
DR2 Boreprøver



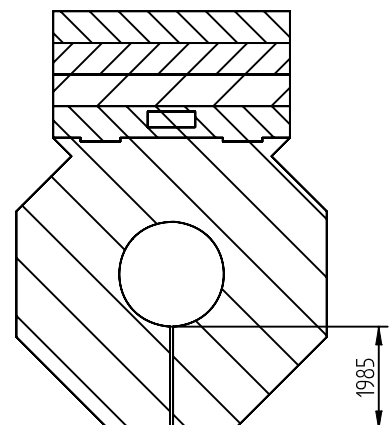
Snit G-G
Boreprøve Nr. 1



Snit B-B
Boreprøve Nr. 3

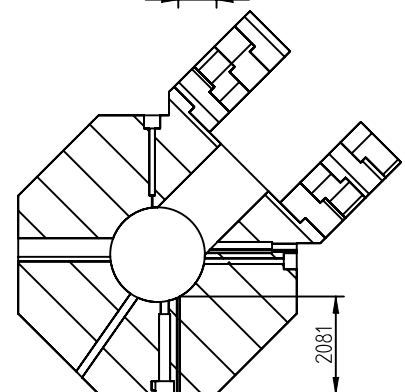
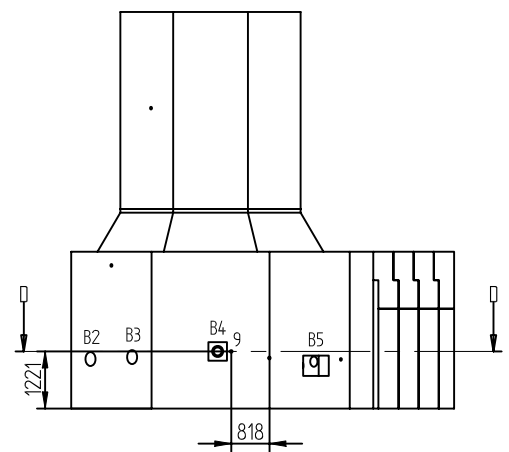
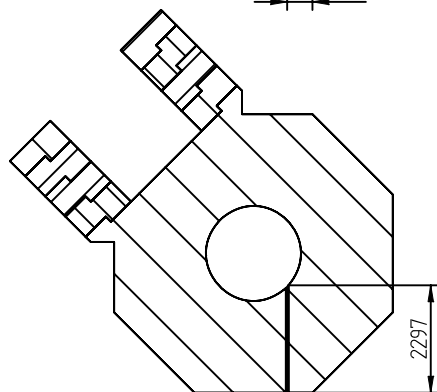
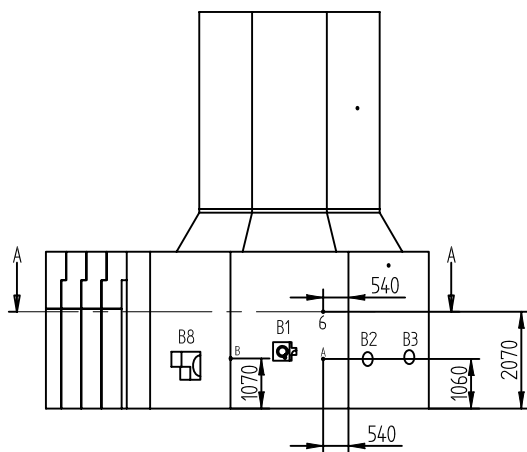
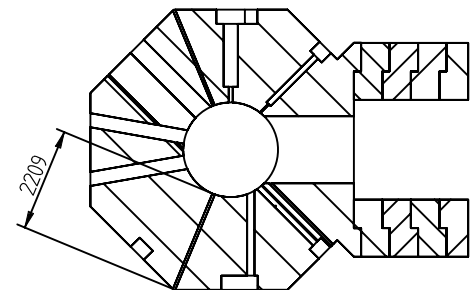
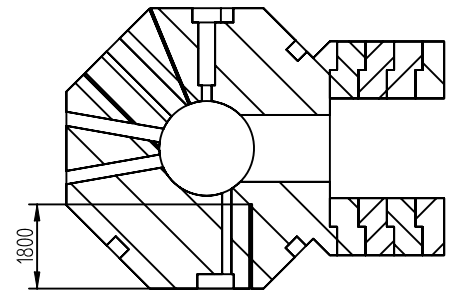
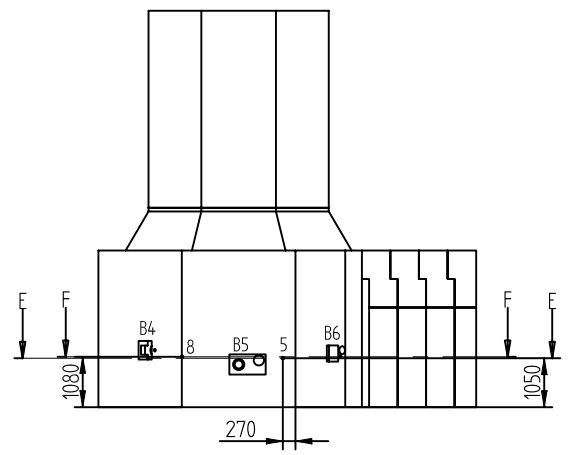
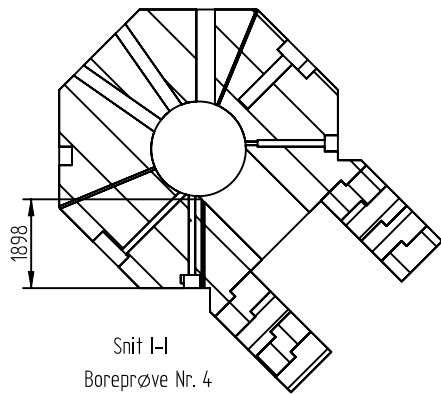
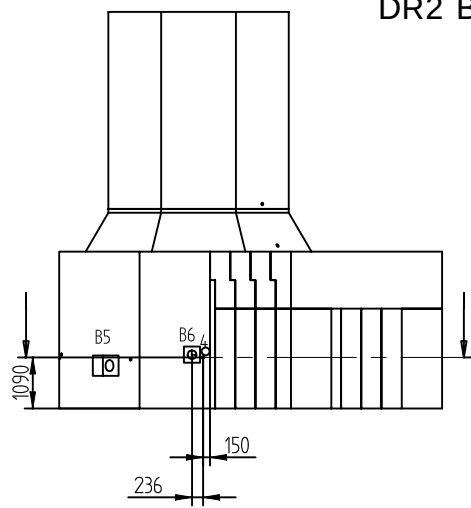


Snit H-H
Boreprøve Nr. 2



Snit C-C
Boreprøve Nr. 7

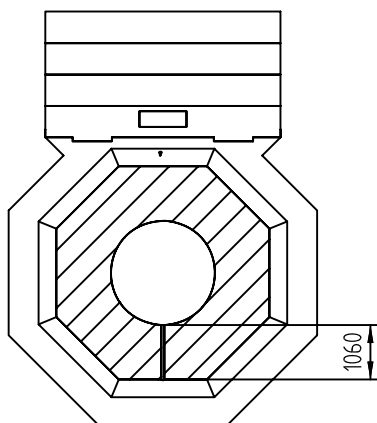
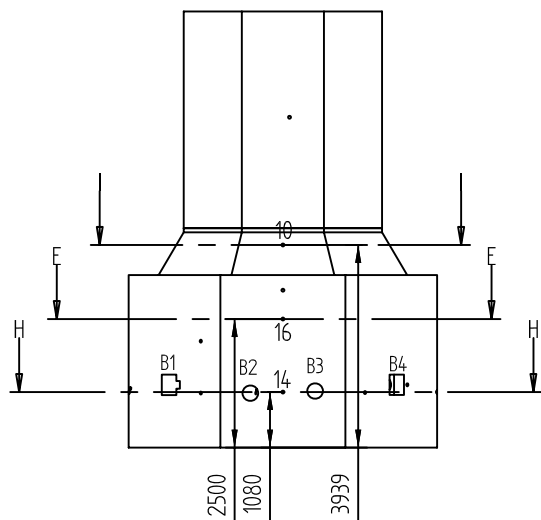
DR2 Boreprøver



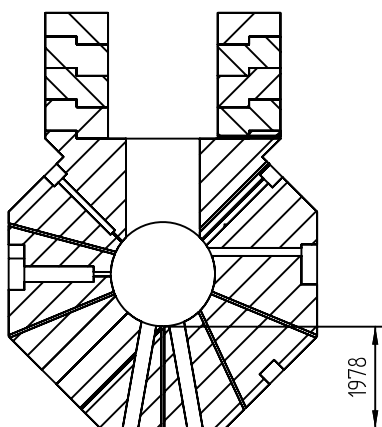
Snit A-A
Boreprøve Nr. 6

Snit D-D
Boreprøve Nr. 9

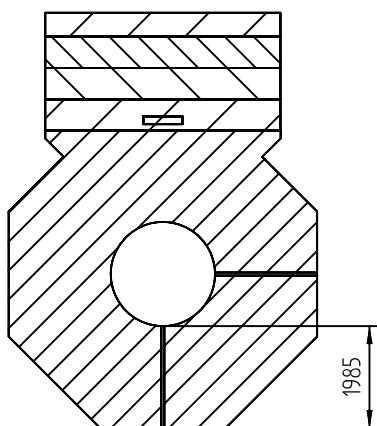
DR2 Boreprøver



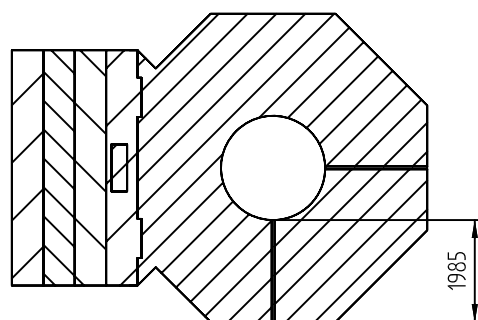
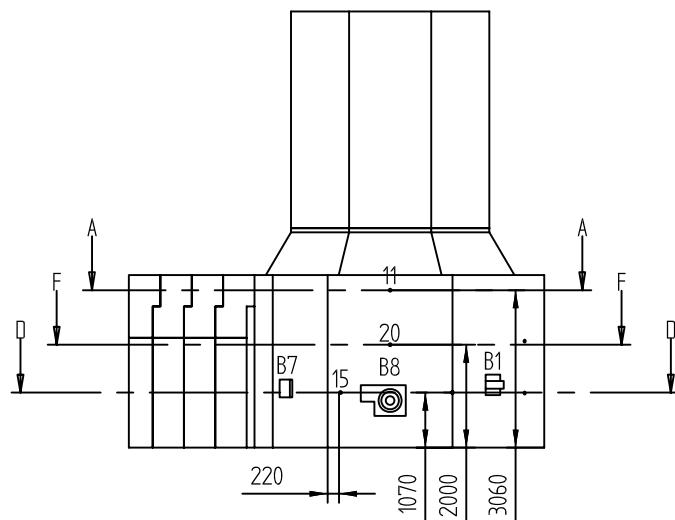
Snit I-I
Boreprøve Nr. 10



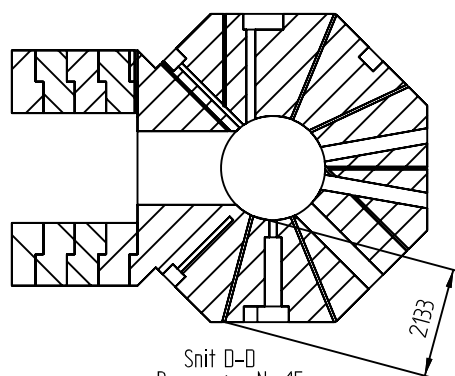
Snit H-H
Boreprøve Nr. 14



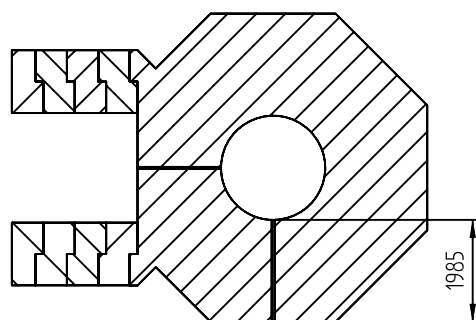
Snit E-E
Boreprøve Nr. 16



Snit A-A
Boreprøve Nr. 11

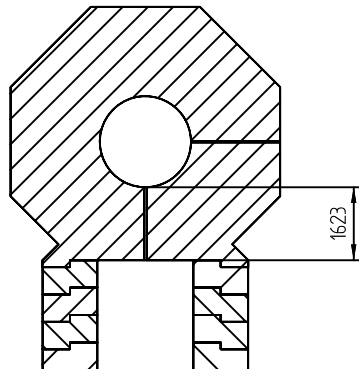
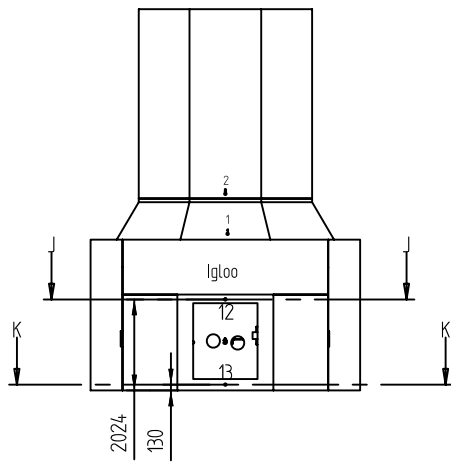


Snit D-D
Boreprøve Nr. 15

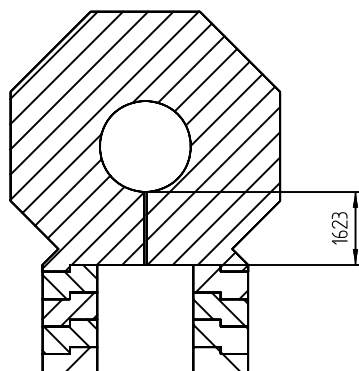


Snit F-F
Boreprøve Nr. 20

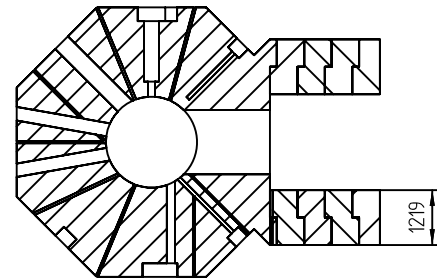
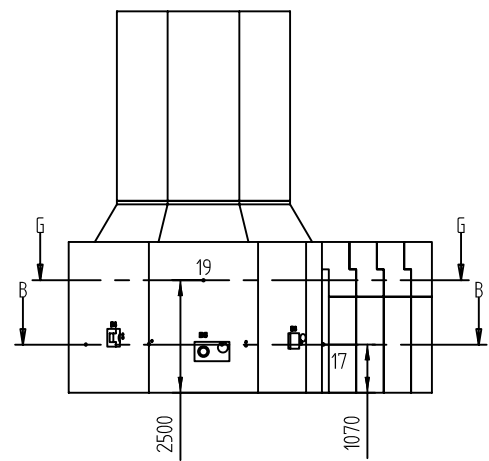
DR2 Boreprøver



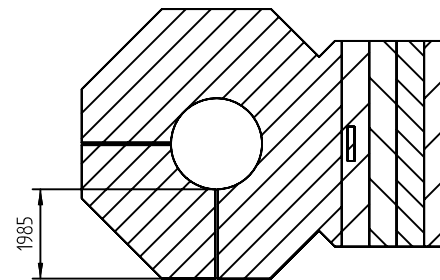
Snit J-J
Boreprøve Nr. 12



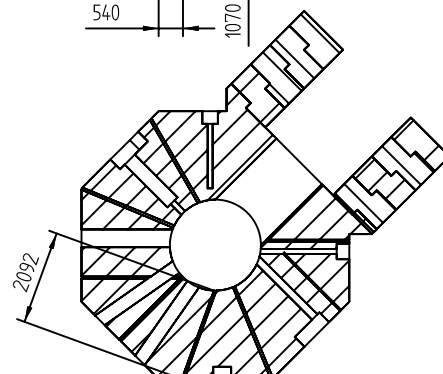
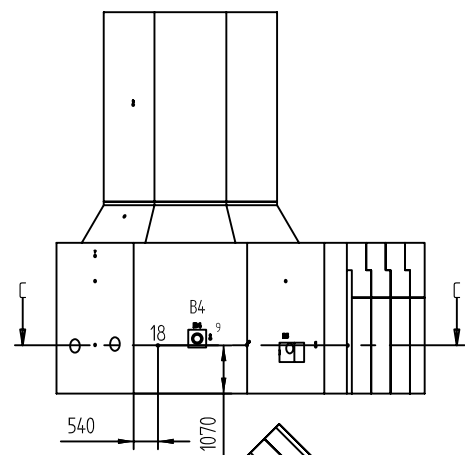
Snit K-K
Boreprøve Nr. 13



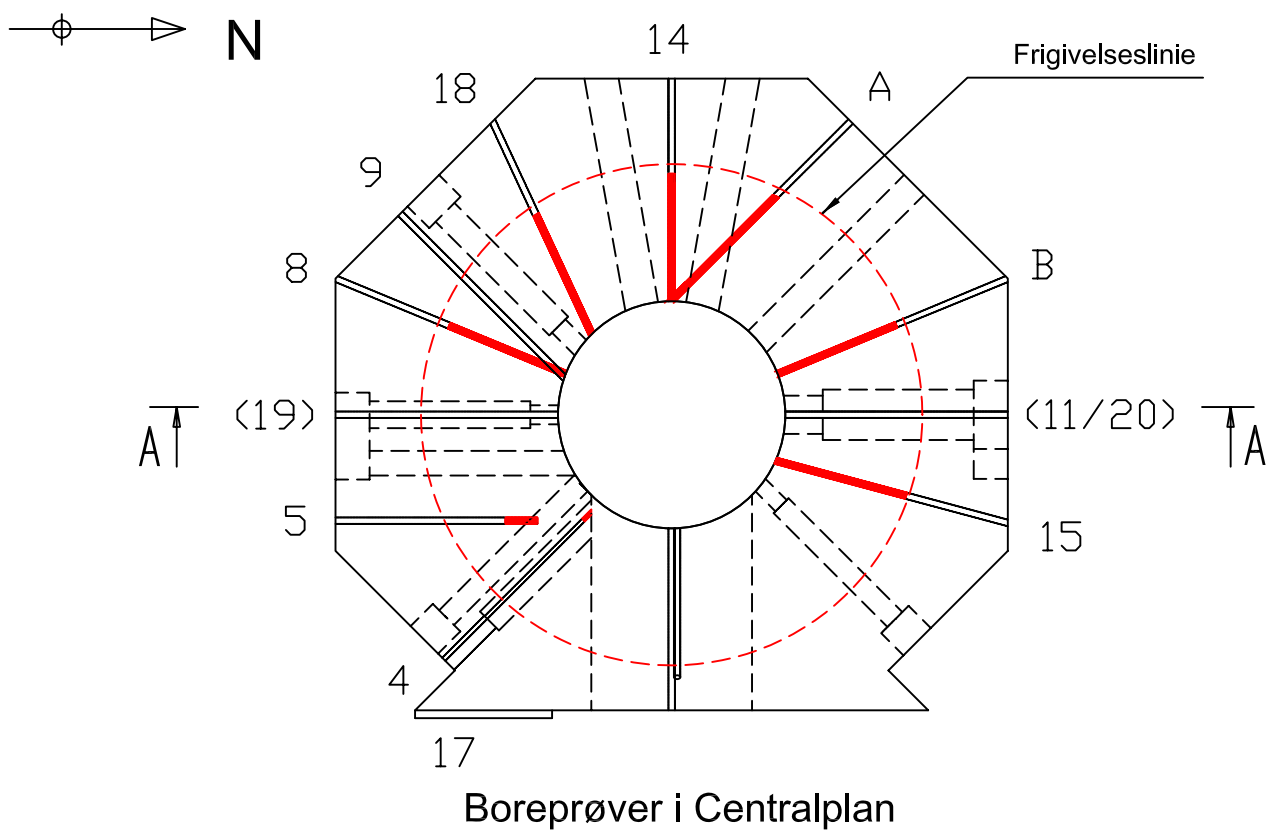
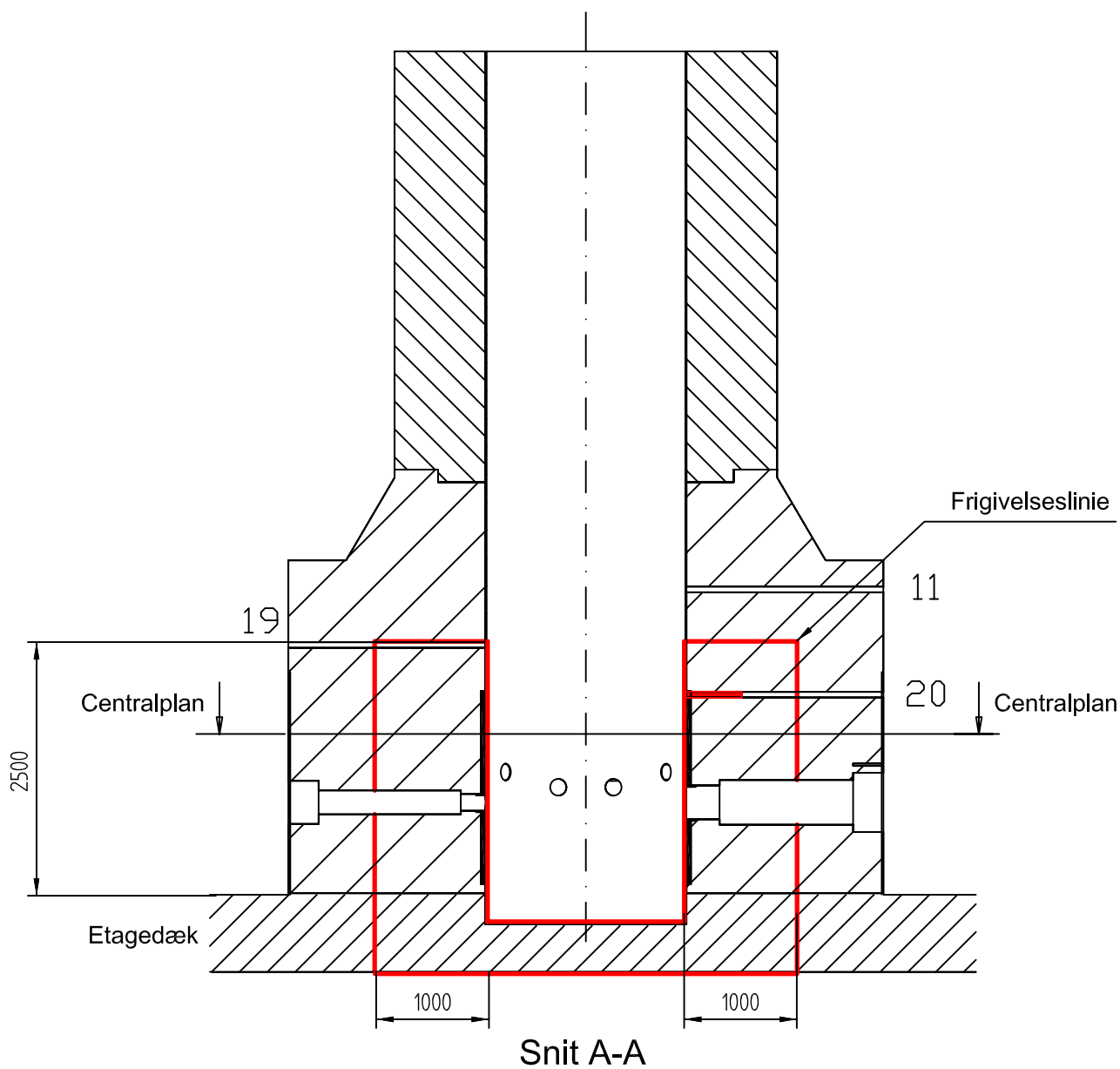
Snit B-B
Boreprøve Nr. 17



Snit G-G
Boreprøve Nr. 19



Snit C-C
Boreprøve Nr. 18



Bilag 2

Wigner Energi i DR 2 grafit

Wigner Energy in the Graphite of the Thermal Column of DR2

Povl L. Ølgaard

**Danish Decommissioning
September 2007**

Contents

1. Introduction...3
2. Earlier Work on the DR2 Graphite...3
3. An Estimate of the Wigner Energy of the DR2 Graphite Based on ASTRA Data...3
4. The Present Investigations...6
5. Discussion of the Results Obtained...13
6. Conclusions...15
7. References...15

1. Introduction

When the DR2 reactor was to be dismantled the question arose: How much Wigner energy is stored in the thermal column of the DR2, and will it be necessary to anneal all or part of the graphite before it can be disposed of in a repository? For this reason working group was established composed of Niels Strufe, head of the DR2 project, Tommy Larsen of the Applied Health Physics Section, Anne Sørensen of the Department of the Waste Management Plant and Povl Ølgaard, consultant. A review of available information on the DR2 graphite and a proposal for additional investigations were prepared (ref. 1) and approved by the group in May 2007. The experimental investigations were carried out in June, July and September 2007, primarily by Kenn Skjørringe of the Department of the Waste Management Plant.

2. Earlier Work on the DR2 Graphite

In the spring of 1963 samples of the graphite of the thermal column were extracted from the DR2 and the stored Wigner energy was measured at the Physics Department of the Risø National Laboratory. The measurements involved the use of a special calorimeter in which two graphite samples, one irradiated and one not irradiated, were heated while the temperature of the two samples were recorded. The result of this investigation was that the Wigner energy of the innermost part of the graphite of the column was 65 cal/g or 270 J/g (ref. 2). At this time the integrated power of the DR2 was about 2100 MWd. At the final shut-down its integrated power was 5488 MWd, so at that time the stored energy would be somewhat higher.

In February 1964 an attempt was made to anneal the graphite of the thermal column of the DR2 by heating the graphite electrically up to about 200 °C. The attempt was not successful, since the temperature of most of the graphite did not exceed 150 °C and only at one point a temperature of 250 °C was reached (ref. 2).

3. Estimate of the Wigner Energy of the DR2 Graphite Based on ASTRA Data

In order to obtain an early estimate of the maximum amount of Wigner energy in the graphite of the innermost part of the thermal column of the DR2, data from the ASTRA reactor at Seibersdorf in Austria was used. The design of the core and the thermal column of the ASTRA is quite similar to that of the DR2. In Table 3.1 data for the two reactors are presented. The data for ASTRA have been obtained from references 3, 4 and 5, while those of DR2 have been obtained from references 6, 7 and 8.

Table 3.1. Data for the ASTRA and the DR2

Reactor	ASTRA	DR2
Power level (MW)	10	5
Time of operation	1960-1999	1959-1975
Integrated power at shut-down (MWd)	23200	5500
Wigner energy in innermost graphite at shut-down (J/g)	572	-
Fast neutron fluence in innermost graphite (n/cm ²)	1.7 10 ²⁰	~0.4 10 ²⁰
¹⁴ C activity in innermost graphite (kBq)	467	26

Some of the figures of Table 3.1 are rather uncertain. This applies in particular to the fast neutron fluence which is not a very well defined term. The actual position in

the thermal column from where the samples were taken also affects the values significantly. Note that the ratio of the ASTRA and the DR2 ^{14}C activities is significantly larger than the ratio of the corresponding integrated powers. The reason for this difference is not understood.

In ref. 3 and 5 corresponding values of the Wigner energies measured in the ASTRA thermal column, and the corresponding values of the fast flux fluences are given. These values were obtained in a scientific investigation with calorimeter measurements similar to those carried out in the Risø Physics Department mentioned above. The investigation was made after the actual decommissioning of the ASTRA, so the results had no influence on the decommissioning process. The five value sets closest to the inner end of the thermal column are given in Table 3.2. This part of the thermal column consists of layers of graphite stringers with a thickness of 9.77 cm. The distances given in Table 3.2 are the distances from the inner end of the column to the midpoint of the layer considered.

Table 3.2 Fast Neutron Fluence and Wigner Energy

Graphite layer No.	Distance from Inner end of column (cm)	Fast neutron fluence (n/cm^2)	Wigner energy (J/g)
1	4.9	$1.7 \cdot 10^{20}$	572
2	14.7	$5.0 \cdot 10^{19}$	354
3	24.4	$1.5 \cdot 10^{19}$	267
4	34.1	$4.9 \cdot 10^{18}$	257
5	44.0	$1.6 \cdot 10^{18}$	136

In Figure 3.1 the Wigner energy is plotted as a function of the fast neutron fluence using the values of Table 3.2. It is seen that a reasonable curve can be drawn through the points. .

Assuming that the integrated power is proportional to the fast neutron fluence, and that the proportionality factor is the same for ASTRA and for DR2, an integrated power of 2100 MWd corresponds to a fast neutron fluence of $0.15 \cdot 10^{20} \text{ n}/\text{cm}^2$. Due to the similarity of the two reactors these assumptions seem reasonable. The value of the Wigner energy measured at DR2 at an integrated power of 2100 was 270 J/g and this value is also plotted in Figure 3.1 (a cross). It is seen that this point agrees well with the curve and the other points (circles) of Figure 3.1.

At the final shut-down of DR2 the integrated power was 5500 MWd, and this value corresponds to an integrated flux of about $4 \cdot 10^{19} \text{ n}/\text{cm}^2$. From Figure 3.1 it is seen that the corresponding Wigner energy is 400 J/g. Thus at the innermost end of the thermal column of DR2 the maximum stored energy should be about 400 J/g.

This determination of the maximum Wigner energy of the graphite in the DR2 thermal column is based on a number of assumptions. It is however believed that while a significant uncertainty may be connected to the figure of 400 J/g this value still gives the right order of magnitude of the stored energy.

It should be mentioned that since data of Table 3.2 were not available at the time of the decommissioning of the ASTRA reactor, a different approach was used to determine what parts of the graphite of the thermal column had to be annealed before final disposal. Here graphite samples of the inner part of the column were heated in an oven to a temperature of 350-400 °C and the temperature increase inside the graphite samples was measured with thermocouples. During this heating 95% of the Wigner

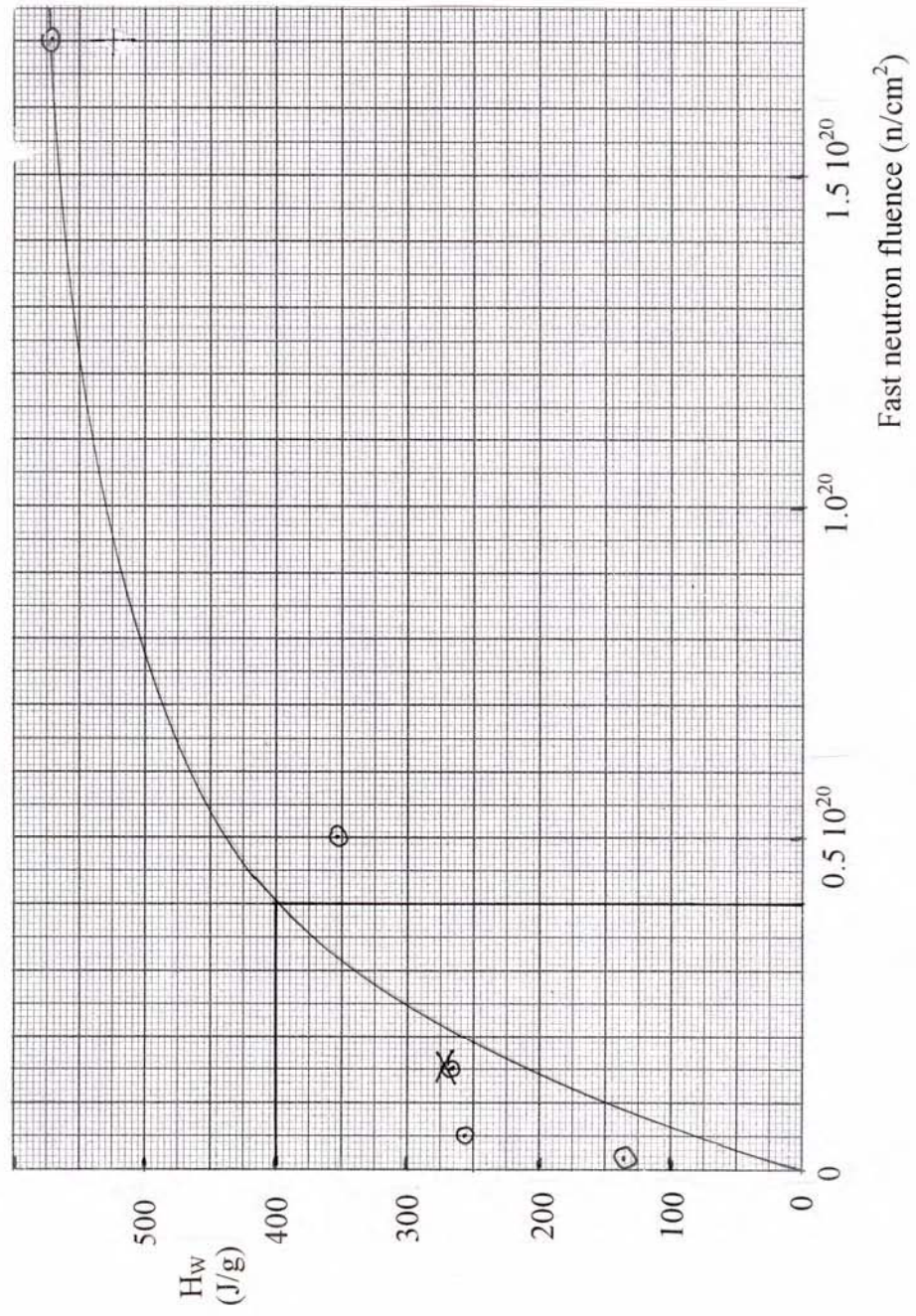


Figure 3.1. Wigner energy, H_w , versus fast neutron fluence for the ASTRA reactor.

energy is released. Next the experiment was repeated with same sample and the temperature in the sample was again recorded. When the two temperature curves were almost identical, there was little Wigner energy in the sample and therefore no longer any need to anneal the graphite. It turned out that there was only a need to anneal the inner 50-60 cm of the thermal column (ref. 9). The annealing involved the heating of the graphite to 350 °C.

4. The Present Investigations

To investigate the need for annealing of the graphite of the thermal column of DR2 samples were taken from the centre of layer No. 8 of the thermal column. The position of this layer can be seen on Figures 4.1 to 4.3. This graphite layer had been in the thermal column during all the operation of DR2 and is close to the centre of the core. Samples with dimensions of about 10×10×2.5 cm were cut out of the central stringers of the layer in a glove box. A 1.5 mm diameter hole down was drilled at the centre of the sample down to a depth of 10 mm and a thermocouple (diameter 1 mm) was placed in the hole, fixed by use of a graphite pin of a pencil. The sample with its thermocouple was placed in a Nabertherm oven, situated in a pyrex bowl to avoid contamination of the oven. The oven was also ventilated during the heating. The volume of the oven is 16×20×20 cm, and its temperature can be varied from 30 to 3000 °C. It took the samples about half an hour to reach 400 °C (ref. 10).

Each graphite sample was heated to 400 °C two or three times. During the first heating practically all of the Wigner energy of the sample was released. Therefore the second heating gave the temperature curve quite close to that of a non-irradiated graphite sample. That this was so, was checked by heating a non-irradiated graphite sample and recording the temperature curve. The third heating of the sample should give a temperature curve identical to that of the second heating. This was not always the case, and the difference between the second and the third curves was taken as a measure of the uncertainty of the temperature curves.

Measurements were carried out on seven samples from layer No. 8, situated in five distances from the inner end of the thermal column. The heating lasted in three cases about 24 hours and in the remaining four cases about 15 hours during which periods the temperature was measured. The reason for these two different heating periods was to examine whether the length of the heating had any significant effect on the Wigner energy released. This was found not to be the case. In Figures 4.4 to 4.6 the heating curves for the innermost sample (No.1000011150), for one of the middle samples (No.1000011173/1) and for the outermost sample (No.1000010582) are shown. Note that $t=0$ sec. has arbitrarily been assumed to be the point in time when a sample temperature of 100 °C is reached.

From Figure 4.4 it is seen that at the innermost sample there is a significant release of the Wigner energy while the Wigner energy released by heating the outermost sample is very small, if any. In Figure 4.4 it is seen that at around 200 °C there is a sudden jump in the sample temperature of the first run due to release of Wigner energy. A similar jump was found for the two samples 1000011550/1 and 1000011550/2. From Figures 4.4 to 4.6 it is seen that the second and third temperature curves, which should be identical, differ by 10 to 20°C, so that the uncertainty of the temperature measurements is probably $\pm 10^\circ\text{C}$.

The release of the stored Wigner energy results in higher sample temperatures when heating an irradiated graphite sample than a non-irradiated sample. Therefore the maximum distance between the temperature curves of the first and of the

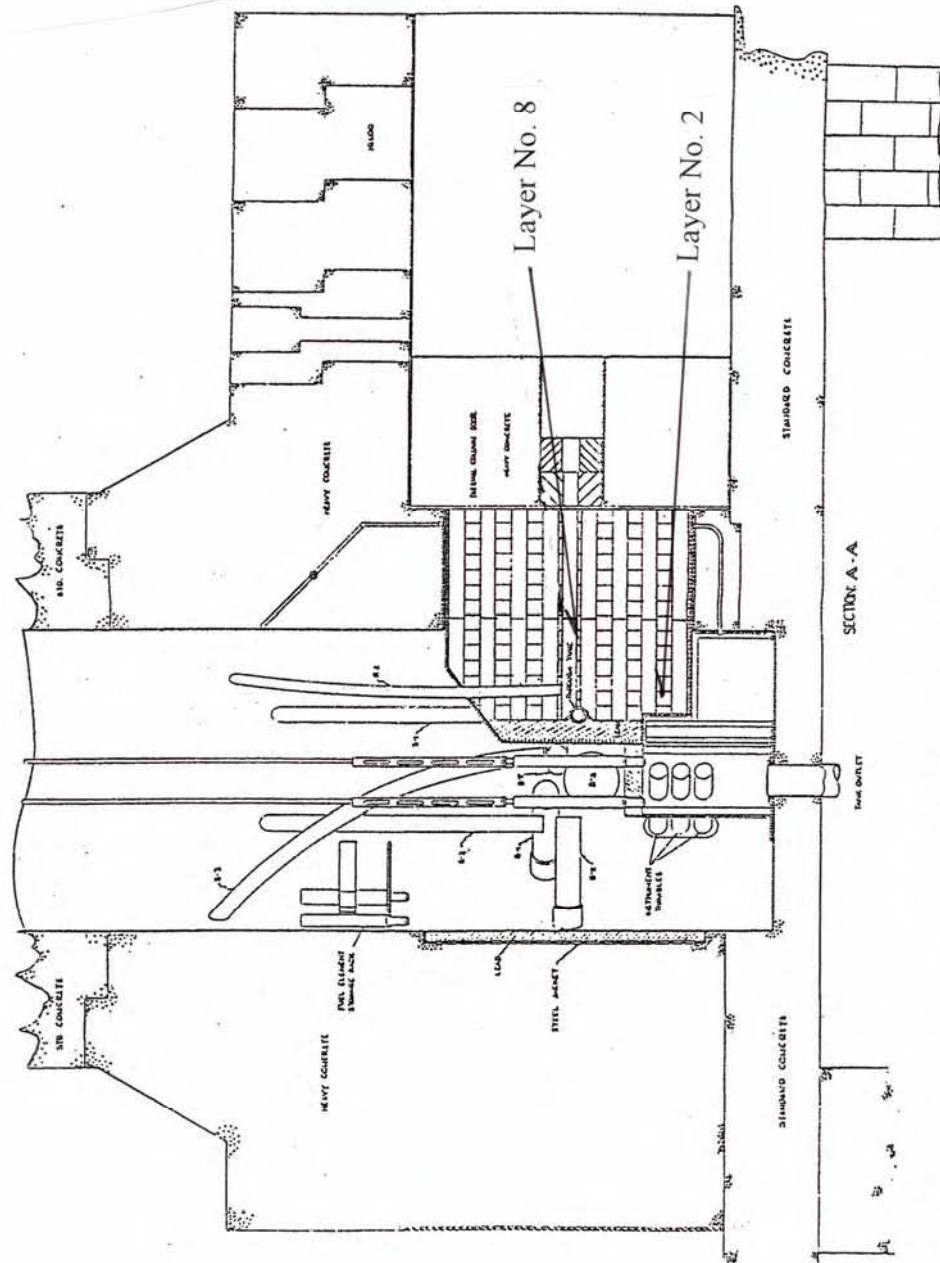


Figure 4.1. Vertical cross section of the DR2 giving the position of layer No. 2 and 8 of the thermal column. Sample 1000010715 was taken from the inner end of layer No. 2.

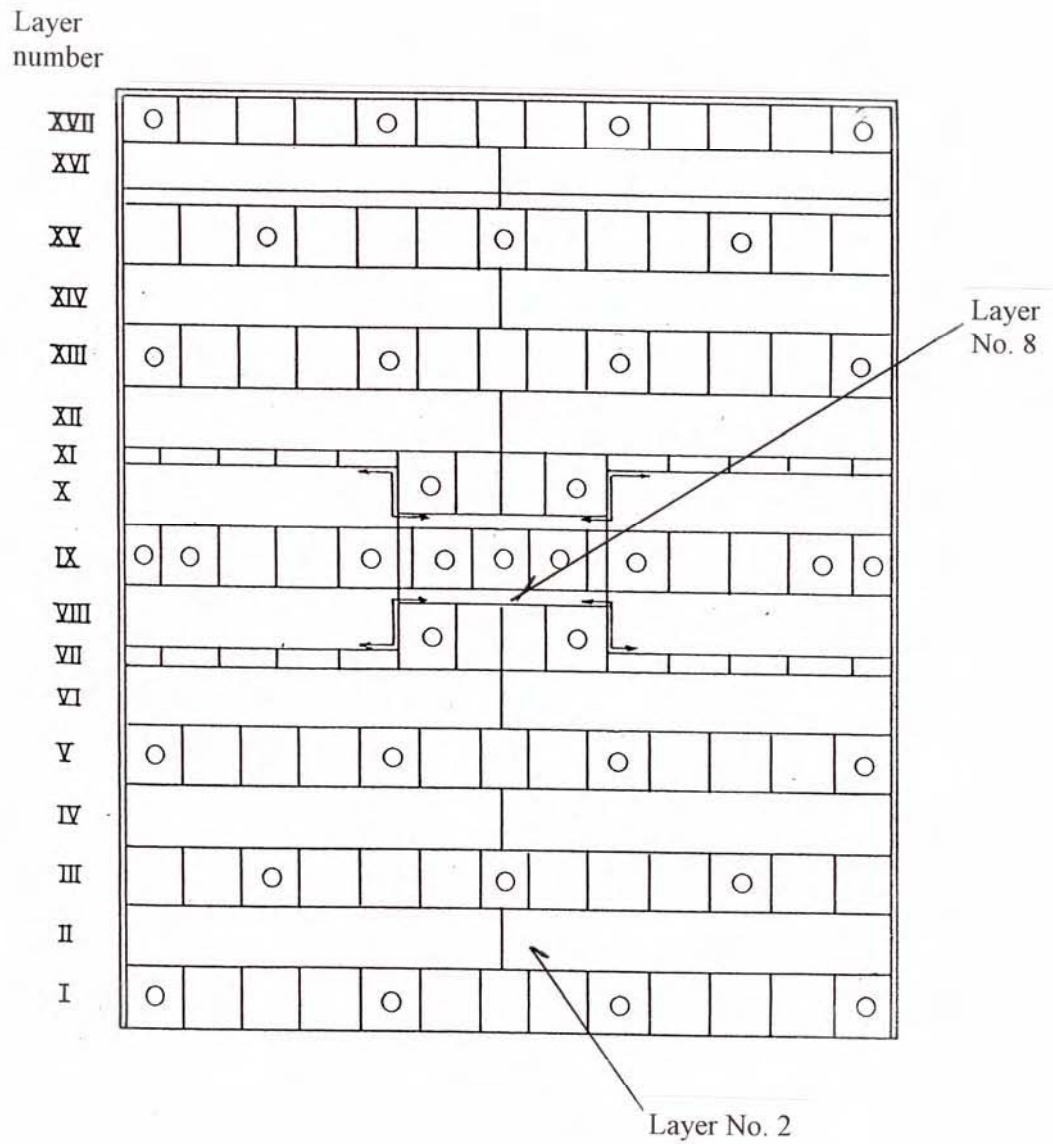


Figure 4.2 Vertical cross section through the thermal column of DR2 giving the position of lager No. 8 and 2.

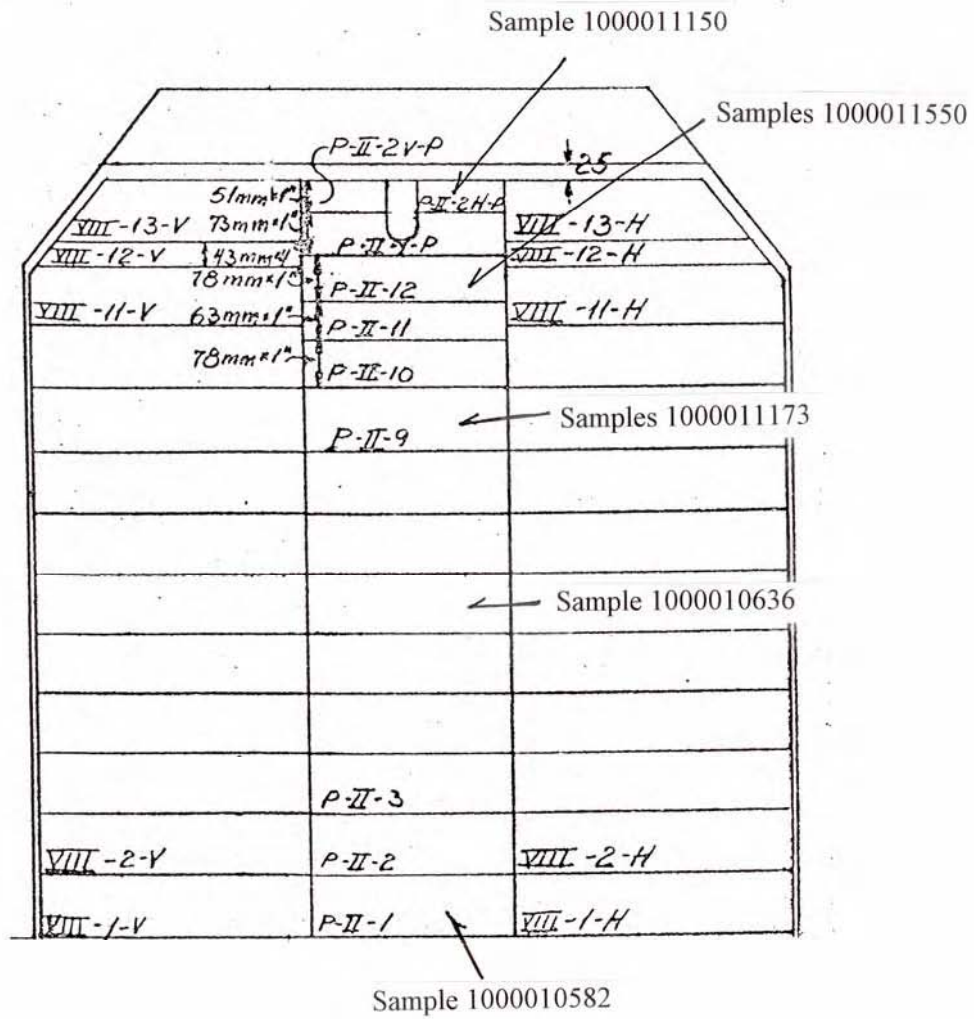


Figure 4.3 Horizontal cross section of the 8th layer of the thermal column of DR2 giving the positions from where samples were taken.

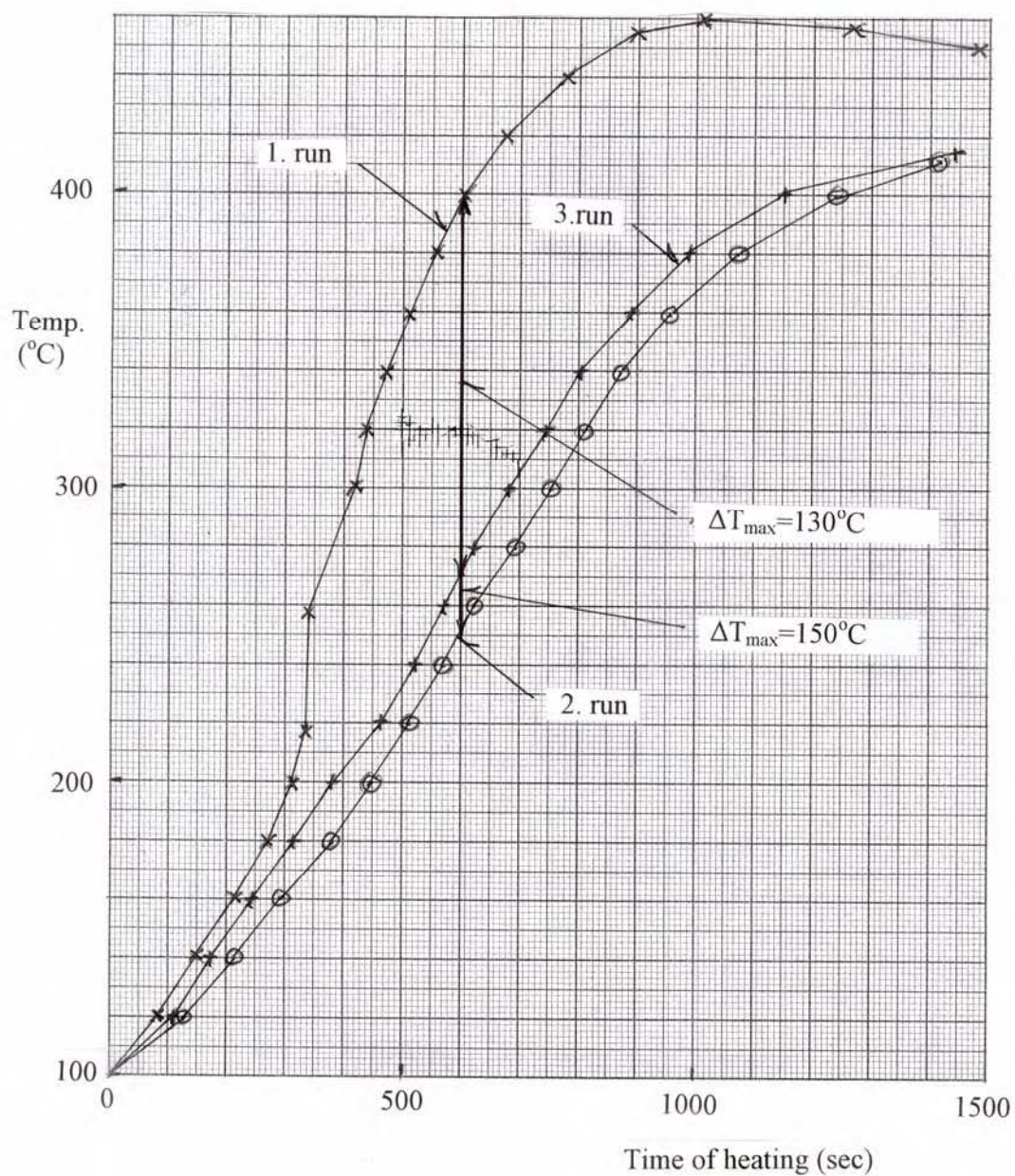


Figure 4.4. Temperature versus time of heating for sample 1000011150. 1. run is the heating of the irradiated sample. 2. run is the reheating of the sample. 3. run is the third heating of the sample. $\Delta T_{\max}$ is given as the maximum temperature difference both between the 1. and the 2. run, and between the 1. and the 3. run.

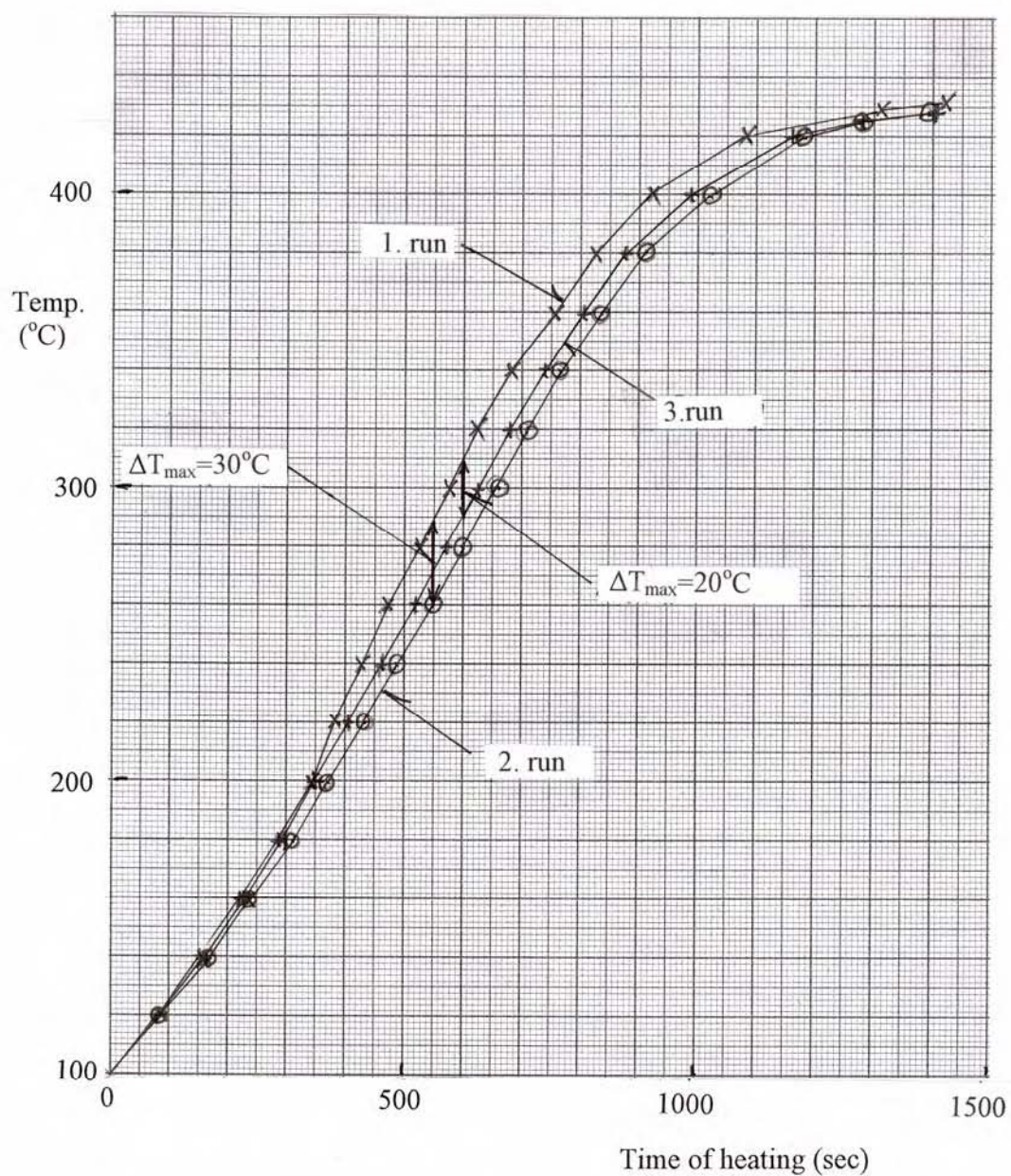


Figure 4.5. Temperature versus time of heating for sample 1000011173/1. 1. run is the heating of the irradiated sample. 2. run is the reheating of the sample. 3. run is the third heating of the sample. $\Delta T_{\max}$ is given as the maximum temperature difference both between the 1. and the 2. run, and between the 1. and the 3. run.

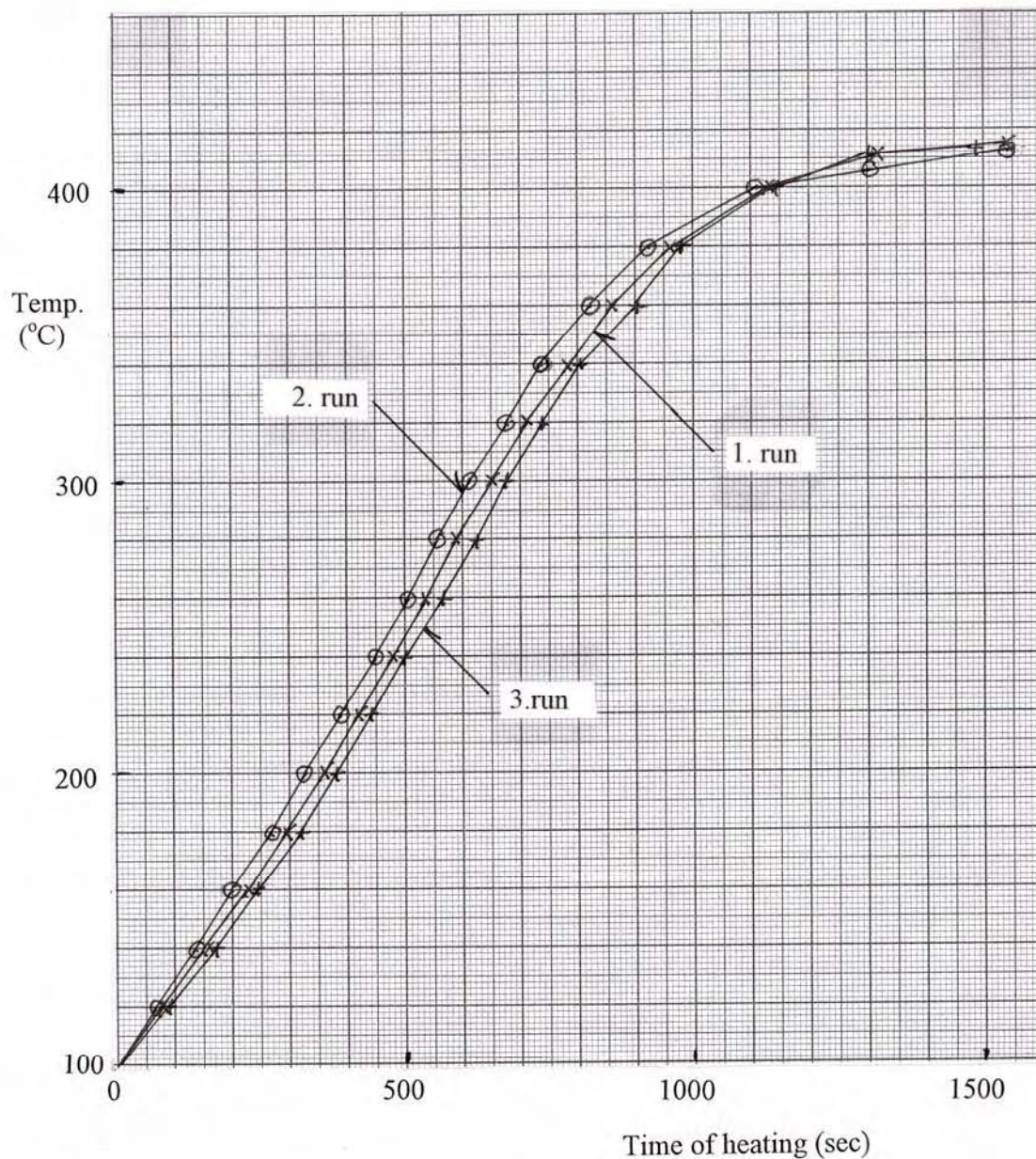


Figure 4.6. Temperature versus time of heating for sample 1000010582. 1. run is the heating of the irradiated sample. 2. run is the reheating of the sample. 3. run is the third heating of the sample. Due to the low Wigner energy it is not meaningful to show any $\Delta T_{\max}$.

second/third run was determined for all samples. These maximum temperature differences, $\Delta T_{\max}$, are given in Table 4.1.

Table 4.1 Temperature Increases in DR2 Graphite Samples

Sample No.	Distance from inner end of thermal column (cm)	Maximum temperature difference, $\Delta T_{\max}$ (K)	Heating period (hr)
1000011150	2.6	130 – 150	15
1000011550/1	16.3	130 – 140	15
1000011550/2	16.3	130	24
1000011173/1	39.3	20 – 30	15
1000011173/2	39.3	20	24
1000010636	69.3	20	24
1000010582	119.3	± 10	15

To investigate how the size of the graphite sample will influence the temperature curves a 10×10×10 cm sample (No.1000010715) was cut out from the innermost stringer of layer No. 2. A 4 cm deep hole was drilled down into the middle of the sample and a thermocouple was placed at the bottom of the hole. Two heating runs were carried out with the sample, both to 400 °C and lasting 24 hours.

The curves of the temperature versus time are shown in Figure 4.7. From this figure it is seen that there is a significant release of Wigner energy in the sample. The temperature curve of the first run rises more rapidly than that of Figure 4.4, when the Wigner energy release starts, but after the initial rise the temperature increases less rapidly than in Figure 4.4 and the maximum temperature is lower than in Figure 4.4. The temperature curve for the second run is similar to that of the second run of Figure 4.4, but the increase is slower due to the larger mass that has to be heated. The value of $\Delta T_{\max}$ is about the same as that of the innermost sample of layer No.8 (No. 1000011150).

5. Discussion of the Results Obtained

From the measured values of $\Delta T_{\max}$ of Table 4.1 an attempt was made to obtain the Wigner energy released during the first heating run. This attempt was based on the following considerations. If the heating of the irradiated sample had been adiabatic, $c_p \Delta T_{\max}$ would have been the Wigner energy released per gram. c_p is here the specific heat of graphite which in the temperature range of 200-400 °C is about 1.4 J/g/K. However, the heating was not adiabatic. As the Wigner energy starts to be released during the first run, the sample will be hotter and therefore receive less energy than at the same point in time during the second/third run. If the sample temperature exceeds that of the oven the sample will even transfer energy to the oven, something that can never happen during the second/third run. Therefore the $c_p \Delta T_{\max}$ will be less than the Wigner energy.

For the innermost sample $c_p \Delta T_{\max} = 140 \times 1.4 = 196$ J/g. In section 3 the Wigner energy in the graphite at the inner end of the thermal column was estimated to be about 400 J/g at reactor shut-down. This means that in this case the ratio R between the actual Wigner energy and $c_p \Delta T_{\max}$ is $400/196 = 2$. Assuming that R is independent of the amount of Wigner energy, a somewhat dubious assumption, the Wigner energy of the seven samples can be calculated. The results are given in Table 5.1.

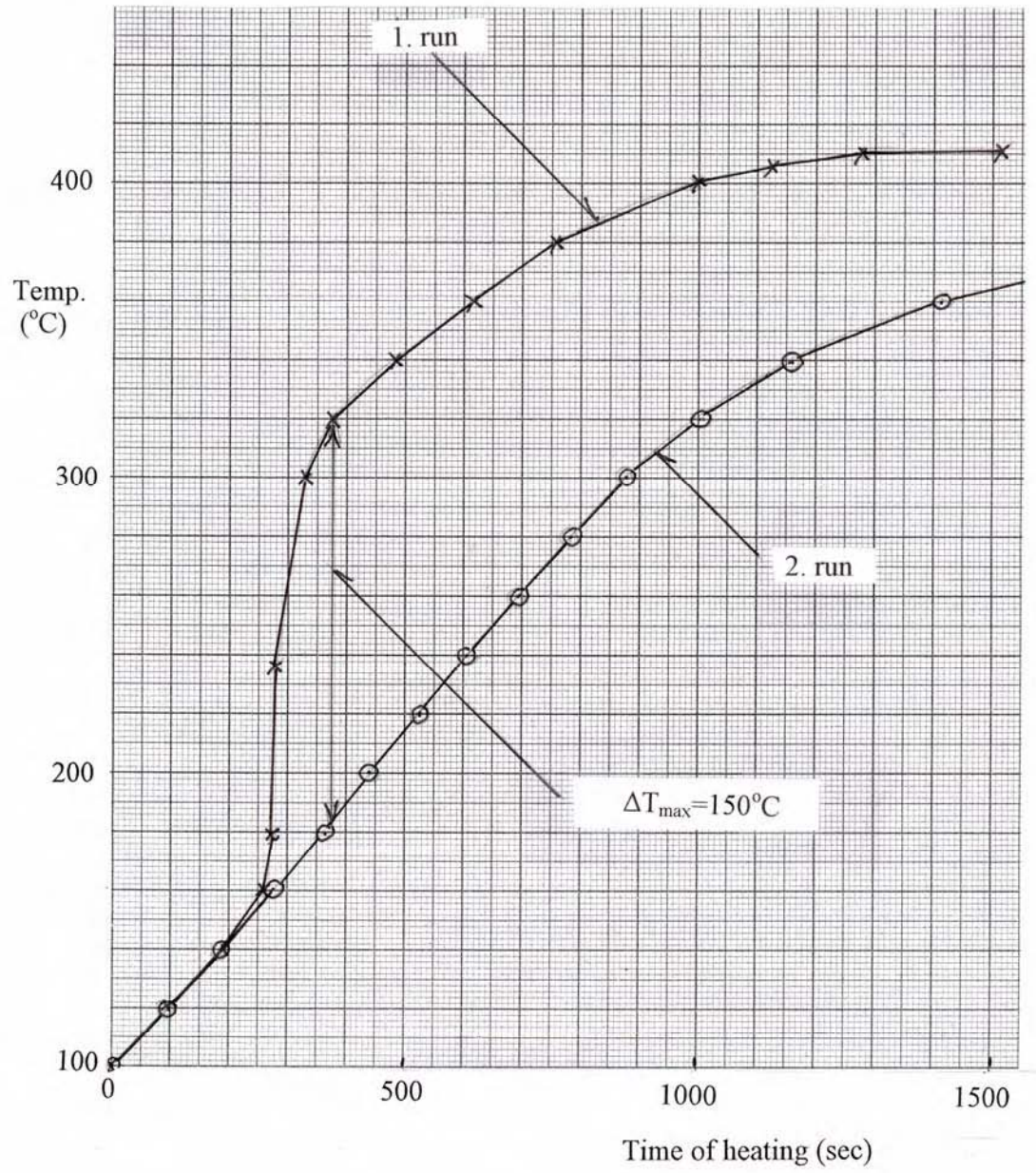


Figure 4.7. Temperature versus time of heating for sample 1000010715. 1. run is the heating of the irradiated sample. 2. run is the reheating of the sample. $\Delta T_{\max}$ is given as the maximum temperature difference between the 1. and 2. run

Table 5.1 Estimates of Wigner Energy in DR2 Graphite Samples

Sample No.	Distance from inner end of thermal column (cm)	$c_p \Delta T_{\max}$ (J/g)	Wigner energy (J/g)
1000011150	2.6	196	400
1000011550	16.3	186	372
1000011173	39.3	32	64
1000010636	69.3	28	56
1000010582	119.3	<14	<28

of the amount of Wigner energy, a somewhat dubious assumption, the Wigner energy of the seven samples can be calculated. The results are given in Table 5.1.

In Figure 5.1 the estimated Wigner energy is plotted as a function of the distance from the inner end of the thermal column of DR2. It should be remembered that since the calculation of the Wigner energies of Table 5.1 is based on somewhat dubious assumptions the numerical results should be taken as estimates only.

Since sample No.100010715 has been situated farther away from the reactor core than sample No.1000011150, and therefore has been exposed to a lower fast neutron fluence, the Wigner energy of sample No. 1000010715 must be lower than that of sample No.1000011150. This means that the factor for converting $\Delta T_{\max}$ into Wigner energy released per gram has to be lower than 2. However, sample No. 1000010715 still contains a significant amount of Wigner energy.

6. Conclusions

The curves of Figures 4.1 and 5.1 clearly demonstrates that there is a significant amount of Wigner energy, about 400 J/g, stored in the innermost, central parts of the thermal column of DR2 while the Wigner energy in the outermost parts is close to zero. A rapid release of 400 J/g would result in a temperature increase of about 280-290 °C. At the middle of the thermal column the energy temperature increase would be significantly lower, only 40-45 °C.

It is not known what energy release is acceptable in a repository for radioactive waste, but it will presumably depend on the design of the part of the repository where the graphite is stored. However, to be on the safe side, it would seem reasonable to anneal the inner half of the graphite of the thermal column of the DR2 to 350-400 °C, i.e. the part of the column corresponding to the inner. longitudinal stringers.

7. References

1. P.L.Ølgaard: Wigner-energien i grafitten i DR-2s termiske kolonne. Apr. 25 2007 (in Danish).
2. B. Møller Jensen, P.Z.Skanborg og H.Sørensen: Annealing af grafit i DR2's termiske kolonne. Risø-M-39, maj 1964 (in Danish).
3. Franz Meyer, private communication, Apr. 4 2007.

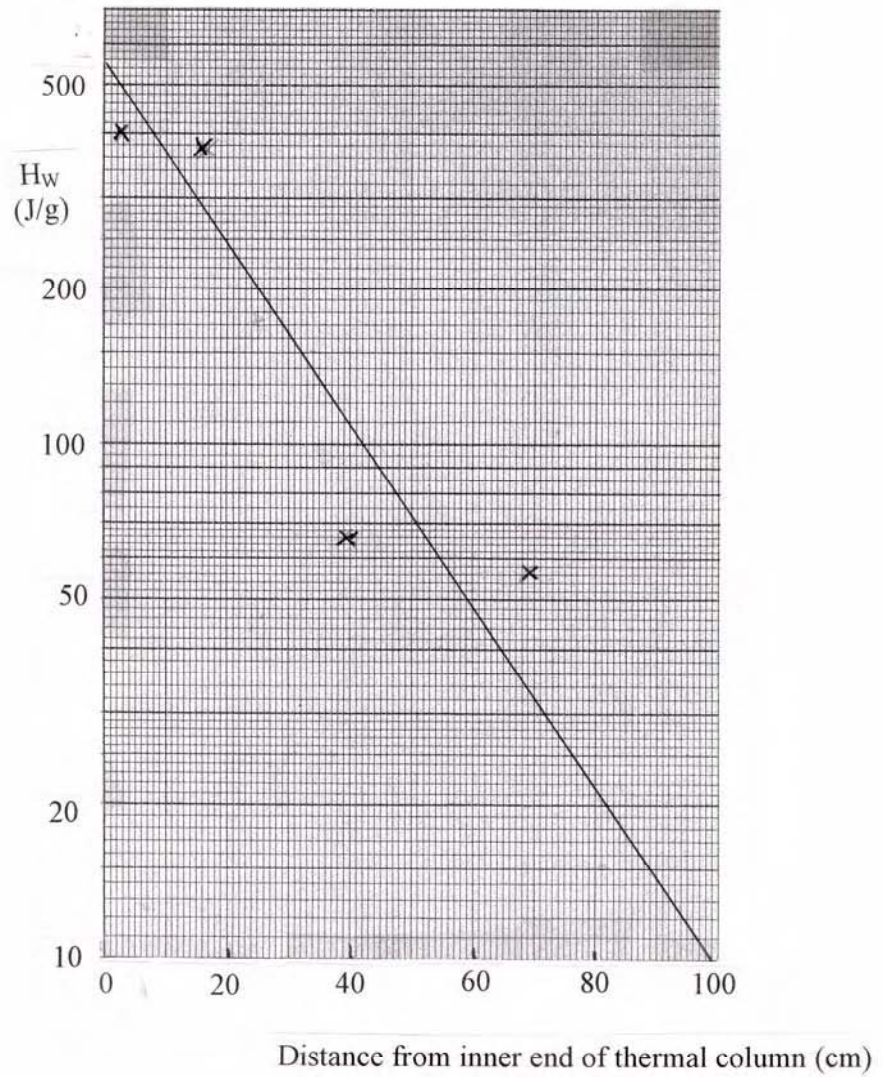


Figure 5.1. Estimate of the Wigner energy H_w in the graphite of the thermal column of DR2 as a function of the distance from the inner end of the column.

4. Franz Meyer: Decommissioning of the ASTRA research reactor – Review and status on July 2003. Nuclear Technology and Radiation Protection 2/2003.
5. D.Lexa and A.J.Kropf: Thermal, structural and radiological properties of irradiated graphite from the ASTRA research reactor – Implications for disposal. Journ. of Nuc. Mat, 348 (2006) 122-132.
6. P.L.Ølgaard: The DR-2 project. Risø-R-1427(EN), June 2003.
7. P.Skanborg: Hurtig neutronflux i DR2. DR 2-DATA-3-028-1, Sep. 9 1961.
8. K.Brodersen: Interpretation of measurements on graphite from DR2 and methods for estimating integrated flux. Risø Decommissioning Mar. 4 2003.
9. Franz Meyer, private communication, Jan 16 2007.
10. Ken Skjørringe: Notat. Forsøg med wigner-effekt i grafitstænger. July 10 2007.

Bilag 3

Nedklassificeringsnotat



DANSK DEKOMMISSIONERING

Notat

30. september 2008

Ref. tlar
Strålings- og Nuklear Sikkerhed

Nedklassificering af DR 2

Dekommissioneringen af et nukleart anlæg afsluttes normalt med en frigivelse af bygning og omgivende landområde til brug uden restriktioner. I DR 2's tilfælde er det imidlertid planen, at bygningen fortsat skal anvendes til nukleare formål (arbejde med radioaktive materialer) under Behandlingsstationen. Den vil derfor fortsat være et klassificeret område under myndighedernes kontrol.

Det er besluttet, at dekommissioneringsprojektet afsluttes med en nedklassificering af bygningen til hvidt strålings- og kontaminationsområde. Dette indebærer, at der intetsteds må være et strålingsniveau højere end $2,5 \mu\text{Sv/h}$, samt at der ikke må være kontaminationsniveauer større end 10 Bq/cm^2 for β -kontamination og 1 Bq/cm^2 for α -kontamination.

Nedklassificeringen dokumenteres ud fra et måleprogram, som skal sandsynliggøre, at ovenstående grænseværdier overholdes. Gulve totalmåles så vidt muligt med en gulvmonitor – her anvendes der Thermo. Såfremt der findes områder med forhøjede værdier, måles efter med en kontaminationsmonitor med mindre probe – her anvendes CoMo 170, som har et detektorareal på 170 cm^2 . Vægge totalmåles eller stikprøvemåles med CoMo 300, som har et detektorareal på 300 cm^2 . Hvis der findes kontamination, afgøres det, hvor stor en del, der er løstsiddende. Stikprøvemålingerne er ikke foretaget ud fra en statistisk vurdering, men ud fra en kvalitativ vurdering i forhold til aktiviteterne art i hal såvel som kælderrum. Dette betyder eksempelvis, at der tages flere prøvemålinger i mandshøjde end højere oppe, da evt. kontaminerende arbejde foregik i mandshøjde. Hvad angår strålingsfeltet, kan det efter reaktorens fjernelse kun være homogent. Alle foretagne målinger beskrives nedenfor.

1 Nedklassificeringsmålinger

1.1 Reaktorhallen

Med til reaktorhallen hører stålsøjler til kran, kran, balkon, nødsluse, trappe til kælder, samt personsluse.

1.1.1 Nedklassificering til hvidt strålingsområde

Der blev lavet otte strålingsmålinger nær ved ydervæggen i retningerne N, S, V, Ø samt NV, SØ, SV og NØ. Baggrundsniveauet var $0,05 \mu\text{Sv/h}$, og der blev ikke målt stråling over baggrundsniveauet. Hallen blev derfor nedklassificeret til hvidt strålingsområde.

1.1.2 Nedklassificering til hvidt kontaminationsområde

1.1.2.1 Gulv

Gulvet blev totalmålt for forurenede områder med en Thermo gulvmonitor. Hvis der blev fundet kontaminationsniveauer over baggrund, målt efter med en CoMo 170 kontaminationsmonitor. Denne har et mindre detektorareal, og midler derfor over et mindre område. Begge instrumenter er i stand til at skelne mellem α - og β -kontamination.

Nogle få spots blev fundet med gulvmonitoren. Baggrunden blev målt med CoMo 170 til $0,31 \text{ Bq/cm}^2$, når den var indstillet til at måle β -kontamination og $0,00 \text{ Bq/cm}^2$ α -kontamination. Derefter blev CoMo 170 anvendt til at måle de fundne spots med. Højeste forureningsniveau blev fundet til at være $5,50 \text{ Bq/cm}^2$ β -kontamination. Dette er tilstrækkeligt lavt til at gulvet ville kunne nedklassificeres til hvidt kontaminationsområde. Alligevel blev det besluttet at fjerne de fundne spots, da der kun var tale om få spots med en lille udstrækning. Herefter blev der igen målt med CoMo 170 til max $0,76 \text{ Bq/cm}^2$ β -kontamination og $0,01 \text{ Bq/cm}^2$ α -kontamination.

1.1.2.2 Vægge og søjler

Væggene blev målt ved stikprøver foretaget med en CoMo 300. Stikprøverne blev taget ca. hver 3. meter i to højder: dels lige over gulvniveau, dels i 2 m over gulv. På væggen i balkonhøjde blev der foretaget otte CoMo-målinger i retningerne N, S, V, Ø samt NV, SØ, SV og NØ. Herudover blev der lavet en enkelt CoMo måling på hver af de lodrette stålbjælker (kranunderstøtning). Såfremt CoMo'en målte aktivitet over baggrunden i et givent målepunkt, ville der blive taget en aftørningsprøve det pågældende sted for at fastslå, om det var løstsiddende aktivitet, og hvilke radionuklider, der evt. var tale om.

Baggrunden blev målt med en CoMo 300 til at være $0,21 \text{ Bq/cm}^2$, når den var indstillet til at måle β -kontamination og $0,00 \text{ Bq/cm}^2$ α -kontamination.

Det maksimale måleresultat var på $0,36 \text{ Bq/cm}^2$ β -kontamination og $0,00 \text{ Bq/cm}^2$ α -kontamination.

1.1.2.3 Balkon, trappe til balkon og ringkran

Balkon-gangarealet samt trappen til balkonen blev totalmålt med Thermo gulvmonitor. Ingen målinger var over baggrunden.

Kranen blev målt med en CoMo 170. Baggrunden blev målt til $0,20 \text{ Bq/cm}^2$ β -kontamination og målingerne lå mellem $0,55 \text{ Bq/cm}^2$ og $1,00 \text{ Bq/cm}^2$. Der blev ikke detekteret α -kontamination. En efterfølgende måling på opsamlet støv med gamma-spektrometer viste en ^{60}Co aktivitet på 10 Bq/g . Kranen blev gjort ren, hvorefter gentagne målinger med CoMo 170 viste $0,47 \text{ Bq/cm}^2$ (inkl. baggrund) som højeste niveau.

1.1.2.4 Nødsluse, trappe til kælder samt personslyse

Der blev målt med en CoMo 170. Baggrunden blev målt til $0,20 \text{ Bq/cm}^2$ β -kontamination og ingen α -kontamination. Der blev ikke målt noget over baggrund.

På baggrund af disse målinger, blev hallen nedklassificeret til hvidt kontaminationsområde.

1.2 Omklædningsrum og gangareal ved hånd- og fodmonitor

1.2.1 Nedklassificering til hvidt strålingsområde

Der blev lavet dosishastighedsmålinger med Automess. Maksimal dosishastighed 0,05 $\mu\text{Sv/h}$. Området blev herefter nedklassificeret til hvidt strålingsområde.

1.2.2 Nedklassificering til hvidt kontaminationsområde

Gulvet blev totalmålt med en Thermo gulvmonitor. Baggrunden var 0,10 Bq/cm^2 β -kontamination på linoleumsgulvet og 0,15 Bq/cm^2 β -kontamination på klinkegulvet. I begge tilfælde blev der ikke detekteret α -kontamination. Der blev ikke målt noget over baggrund.

Væggene blev totalmålt med CoMo 170. Med en baggrund på 0,25 Bq/cm^2 β -kontamination blev der maksimalt målt 0,61 Bq/cm^2 β -kontamination på flisevægge (fliserne indeholder naturlig aktivitet). Området blev efter disse målinger nedklassificeret til hvidt kontaminationsområde.

1.3 Driftkælder

1.3.1 Nedklassificering til hvidt strålingsområde

Der blev lavet fire dosishastighedsmålinger med Automess; de to nær skillevæggen mellem kældrene, og de resterende to nær ydervæggene. Dette blev vurderet at være tilstrækkeligt, da strålingsniveauet i kældrene, såvel som i hallen var homogene. Baggrunden blev målt til at være 0,05 $\mu\text{Sv/h}$, og der var ingen målinger over baggrund.

Driftkælderens kunne hermed nedklassificeres til hvidt strålingsområde.

1.3.2 Nedklassificering til hvidt kontaminationsområde

Totalmåling af gulv med Thermo gulvmonitor. Baggrunden blev målt til at være 0,22 Bq/cm^2 β -kontamination og 0,0 Bq/cm^2 α -kontamination. Der blev ikke målt kontamination over baggrunden.

Væggene blev målt med CoMo 300. Der måltes hver 3. meter 1m over gulv samt 1m under loft. Baggrunden var 0,22 Bq/cm^2 , og den maksimale måling var på 0,45 Bq/cm^2 β -kontamination. Der blev ikke detekteret α -kontamination. I det store indstøbte rør i væggen mod eksperimentkælderen blev der målt 1,4 Bq/cm^2 β -kontamination, men ingen α -kontamination.

Driftkælderens blev herefter nedklassificeret til hvidt kontaminationsområde.

1.4 Eksperimentkælder

1.4.1 Nedklassificering til hvidt strålingsområde

Der blev lavet fire dosishastighedsmålinger med Automess; de to nær skillevæggen mellem kældrene, og de resterende to nær ydervæggene. Baggrundsniveauet var 0,05 $\mu\text{Sv/h}$. Maksimal dosishastighed var 0,14 $\mu\text{Sv/h}$, hvilket var ud for teglstensvæggen mod driftkælderen.

Eksperimentkælderen blev herefter nedklassificeret til hvidt strålingsområde.

1.4.2 Nedklassificering til hvidt kontaminationsområde

Gulvet blev totalmålt med Thermo gulvmonitor. Der blev identificeret mange kontaminede områder, som efterfølgende blev målt med en CoMo 170. Baggrundsvisningen var 0,44 Bq/cm^2 β -kontamination og ingen α -kontamination. Det højest målte kontaminationsniveau var 2,10 Bq/cm^2 β -kontamination og 0,13 Bq/cm^2 α -kontamination. Målinger på et par prøver taget fra et af de kontaminede områder med et gamma-spektrometer viste, at der var op til 0,58 Bq/g ^{235}U . Dermed kan det fastslås, at kontaminationen stammer fra uran-pilotforsøget og ikke fra reaktordriften. Den ene af prøverne er taget i nogle cm dybde. Denne indeholder også ^{235}U -aktivitet, der overstiger frigivelsesniveauet. Grundet kontaminationens omfang i såvel dybde som areal, og da den ikke udgør et problem i forhold til nedklassificeringen, er der ikke gjort forsøgt på at fjerne den.

Væggene blev målt med en CoMo 170. Baggrundsniveauet var 0,36 Bq/cm^2 β -kontamination og ingen α -kontamination. De højeste niveauer blev målt på væggen mod driftkælderen max 0,51 Bq/cm^2 β -kontamination og 0,01 Bq/cm^2 α -kontamination. Et enkelt spot på den sydlige del af væggen mod driftkælderen blev dog målt til 1,50 Bq/cm^2 β -kontamination.

Et brunt 1" afløbsrør i det sydlige hjørne af kælderen havde en fastsiddende β -overfladekontamination på 3,60 Bq/cm^2 .

Eksperimentkælderen blev herefter nedklassificeret til hvidt kontaminationsområde.

1.5 Udvendige målinger

Der blev målt for mulig kontamination foran alle tre porte med en Thermo gulvmonitor. Baggrundsvisningen var 0,15 Bq/cm^2 β -kontamination og ingen α -kontamination. Der blev ikke målt noget over baggrund.

2 Forhold omkring fremtidig frigivelse af bygningen

Under arbejdet med at nedklassificere bygningen er der flere steder fundet et indhold af radionuklider, der ganske vist ikke er et problem i forhold til nedklassificeringen, men som kan være et problem i forhold til en fremtidig frigivelse. Disse forhold beskrives kort nedenfor.

2.1 Reaktorhallen

Som beskrevet ovenfor blev der fjernet nogle spots på gulvet før nedklassificeringen. Det var karakteristisk for disse spots, at epoxy-belægningen var slidt af, så det rå betongulv kom til syne. Der blev taget prøver af betongulvet i flere dybder. Prøverne blev målt på et gamma-spektrometer, hvorved det kunne konstateres, at forureningen bestod af ^{235}U i mængder der oversteg frigivelsesniveauet (0,14 Bq/g ned til 2 cm, og fra 2 til 4 cm blev der målt 0,02 Bq/g – herudover skal der tages højde for ^{238}U). Der blev taget yderligere en prøve i den sydlige del af hallen som reference, da der her ikke forventedes at være kontamination. ^{235}U indholdet i referenceprøven blev målt til at være af størrelsesordenen 10^{-4} Bq/g. Kontaminationen stammer dermed ikke fra reaktordriften, men fra uranpilotforsøget. Der blev iværksat et måleprogram på halgulvet med en Exploranium NaI detektor for at lokalisere ikke-synlige forurenede områder under epoxy-laget. Målingerne blev foretaget langs otte retninger fra centrum i hallen og ud mod væggen. Der blev ikke konstateret variationer udover måleusikkerheden. Alligevel kan det ikke udelukkes, at der stadig kan være forurenede områder under epoxy-laget. Disse forureninger kan være trukket et par cm ned i betongulvet. Exploranium målingernes placering samt placeringen af de fundne spots, er vist på figur 1.

I gulvet omkring det hul, der var tilbage efter betonnedbrydningen, befinder der sig stadig rør, som blev brugt til at lede kølevand til forsøgsrørene. Rørene ligger i en ring omkring hullet. Inden hullet blev udbedret, blev det konstateret, at rørene indeholdt en hvid substans, som gav anledning til et væsentligt strålingsniveau. Gamma-spektrometer målinger viste, at der var tale om ^{133}Ba , ^{152}Eu og i mindre grad ^{60}Co , altså radionuklider der typisk findes i aktiveret barytbeton. Forklaringen er, at tidligere udførte borekerneudtagninger i den biologiske afskærmning er gået igennem nogle af disse kølerør, så vand blandet op med aktiveret beton fra borekernerne dermed er løbet ned i bunden af rørene. Rørene er rensat igennem, men der er formentlig stadig en del aktivitet tilbage.

2.2 Driftkælder

I den sydlige del af driftkælderen – til højre for porten, var sumpen, som havde forbindelse til tankgravsanlægget. Begge er fjernet, men forbindelseskanalen mellem dem er der stadig, og der er ikke foretaget målinger i kanalen. Mulige radionuklider er ^{60}Co , ^{137}Cs og ^{235}U .

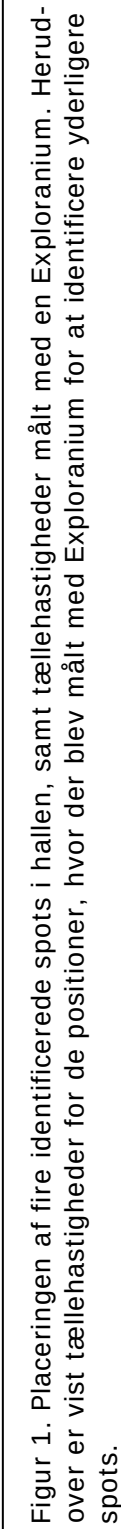
I væggen mod eksperimentkælderen er der en række indstøbte rør op mod loftet. Et af disse har forbindelse til det rørsystem, der som ovenfor beskrevet er kontamineret med radionuklider, der er typiske for aktiveret barytbeton.

Ligeledes i væggen mod eksperimentkælderen er der ca. en meter over gulvet et større rør, som bøjer op mod reaktorens tidligere placering. Dette rør førte det primære kølevand tilbage til reaktoren efter køling og ionbytning. Røret har en belægning, som kan indeholde tritium, ^{14}C , ^{137}Cs og ^{60}Co , som målt andre steder i det primære kølesystem.

2.3 Eksperimentkælder

Som beskrevet under afsnittet om nedklassificering til hvidt kontaminationsområde, er der fundet mange kontaminerede områder på gulvet, især i den nordlige del af kælderen. Forureningen stammer fra uranpilotforsøget, som prøvede at udvinde uran fra Kvanefjeldet i Grønland. Ved fremtidige frigivelsesmålinger skal der derfor tages højde for såvel ^{235}U som ^{238}U , idet indholdet af ^{238}U er 21 gange større end indholdet af ^{235}U . Et par prøver viste, at forureningen kan være trukket forholdsvis dybt ned i betonen. Det

vil være nødvendigt at skrælle det øverste lag beton af for at imødekomme frigivelses-kriterierne.



Figur 1. Placeringen af fire identificerede spots i hallen, samt tællehastigheder målt med en Exploranium. Herudover er vist tællehastigheder for de positioner, hvor der blev målt med Exploranium for at identificere yderligere spots.

Bilag 4

**Arbejdsnotat, nødtankanlæg ved reaktor DR 2,
af 14 maj 2006**

Arbejdsnotat

Nødtankanlæg ved reaktor DR 2

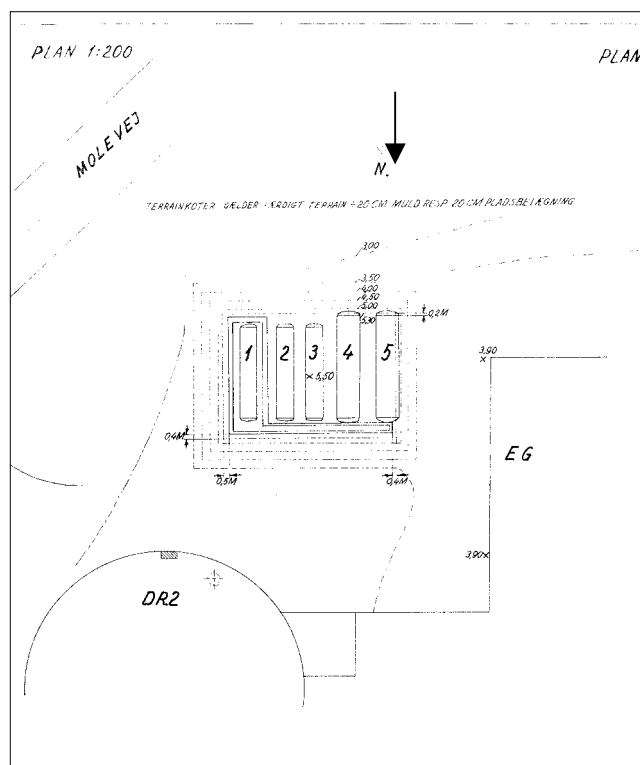
I marts 2006 blev tankanlægget syd for DR 2 blotlagt og gjort klar til inspektion og kontrolmålinger med henblik på fjernelse af hele anlægget fra området.

Ifølge en telefonisk samtale mellem Povl Ølgaard og Preben Skanborg, tidligere mangeårig reaktorchef for DR 2, vedrørende brug af tankanlægget, da reaktor DR 2 var i drift, har tankene 2, 3, 4 og 5 aldrig været i brug, da deres formål har været at modtage store mængder af vand i tilfælde af unormale hændelser, hvor sprinkleanlægget blev sat i gang. Vand ville successivt løbe via et overløb fra tank 1 til tank 2, og osv.

Tank nr. 1 er blevet brugt under reaktordrift og overvåget af Behandlingsstationen med hensyn til drift og tømning.

Der blev aftalt mellem projektkontoret og AHF at undersøge tankene 1 og 2 indvendigt. Hvis der fandtes vand i tank 2, ville det blive analyseret og målt for radioaktivitetsindhold. Hvis vandet var kontamineret, vil der også blive foretaget målinger i tank 3, osv.

I tank nr. 2 blev der fundet vand/slam (ca. 1 m³), og en inspektion af tankene 3, 4 og 5 viste, at tank 4 indeholdt lidt vand (ca. 0,5 m³). Tankene var intakte og viste ikke tegn på gennemtæring. Tankenes placering er vist på figur 1.



Figur 1. Oversigt over tankgrav ved reaktor DR 2.

Kontrolmålinger

De håndbårne instrumenter, der blev brugt ved kontrolmålinger af tankgravsanlægget var kontaminationsmonitor CoMo model 170 og strålingsinstrument Automess AD-2. Det målte kontaminationsbaggrunds niveau for området: lå på mellem 0,25 og 0,35 Bq/cm², kalibreret for ⁶⁰Co. Baggrundstrålingsniveauet lå på mellem 0,1 og 0,2 µSv/h.

Der blev foretaget strålings- og kontaminationsmålinger med håndbårne instrumenter rundt om anlægget med vægt på betonkammeret, hvor tank 1 stod.

Dækkepladerne fra betonkammeret og fra rørledningskanalen mellem tank 1 og tank 2, 3, 4 og 5 blev stikprøvemålt med håndbårne instrumenter, og der blev ikke målt niveauer over baggrunds niveauer for området.

Prøver

Der blev udtaget 6 prøver fra tank 1 i form af materialeprøver, aftøringsprøver og vandprøver. Aftøringsprøven blev udtaget med vat på et elektrisk rør nede i bund af tanken, men da der var vand/slam i bunden af tanken, var det umuligt at foretage en egentlig aftøringsprøve af overfladen. Vandprøven blev udtaget, efter der var rørt rundt i vandet i bunden af tanken, ved at sænke en 500 ml plastflaske igennem et hul i tanken.

Fra tank 2 blev der taget en aftøringsprøve inde fra tanken og en 500 ml vandprøve. Der kunne ikke måles kontamination på aftøringsprøven. Da vandprøven heller ikke viste tegn på kontamination, blev tank 2, 3, 4 og 5 fjernet og bortskaffet som almindeligt jernskrot.

Der er ikke blev udtaget jordprøver fra området, hvor tankene 2, 3, 4 og 5 stod, da tankene var intakte og ikke kontaminerede udvendigt.

Tank 1

Aftøringsprøver fra tank 1 viste spor af ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co og ²³⁵U, og en vandprøve (400ml) udtaget i den samme tank viste spor af ¹³⁷Cs. Der blev besluttet at pumpe så meget vand som muligt fra tanken til Behandlingsstationen via tankvognen og placere tanken på DR 3s lukkede område til senere vurdering. Tank 1 er nu placeret i et kontrolleret område på DR 3.

Da tank 1 stod på en metalbakke i betonkammeret, blev bakken kontrolmålt ved udtagning af materialprøver i form af 2 brikker fra det sted, hvor der var mest synlig korrosion. Disse blev analyseret på gamma-spektrometret. Der blev ikke fundet kontamination på hverken stålbakken eller på gulvet i betonkammeret. Stålbakken og betonen blev derfor fjernet som ikke-aktivt affald.

Rørledning fra DR 2 til tankanlæg

Yderligere målinger blev foretaget ved demontering af afløbsrørene i kanalen fra DR 2 til tankanlægget. Nogle af rørene indeholdt jord/slam, og der blev målt niveauer over baggrunds niveauer for området. Disse rør og tilhørende tagrender er blevet skåret i passende størrelser, pakket i plastik og venter til senere kontrolmålinger, eventuelt efter dekontaminering. Rørledningen ved reaktorbygning er blevet lukket i enderne med plastik. Tagrenderne blev kontrolmålt, og de var ikke kontaminerede. Der blev udtaget en prøve fra rørene i tankgravens udluftningssystem, og der blev ikke fundet kontamination på prøven.

Målinger foretaget i 2004 i kanalen med kontaminationsmonitører viste ingen strålings- eller kontaminationsniveauer over baggrunds niveauet for området.

Kanalen mellem DR 2's reaktorhallen og tankgraven er blevet muret til i enden ved tankgraven. Når betonkanalen skal fjernes på et senere tidspunkt, vil der blive foretaget kontrolmålinger af betonen.

Konklusion

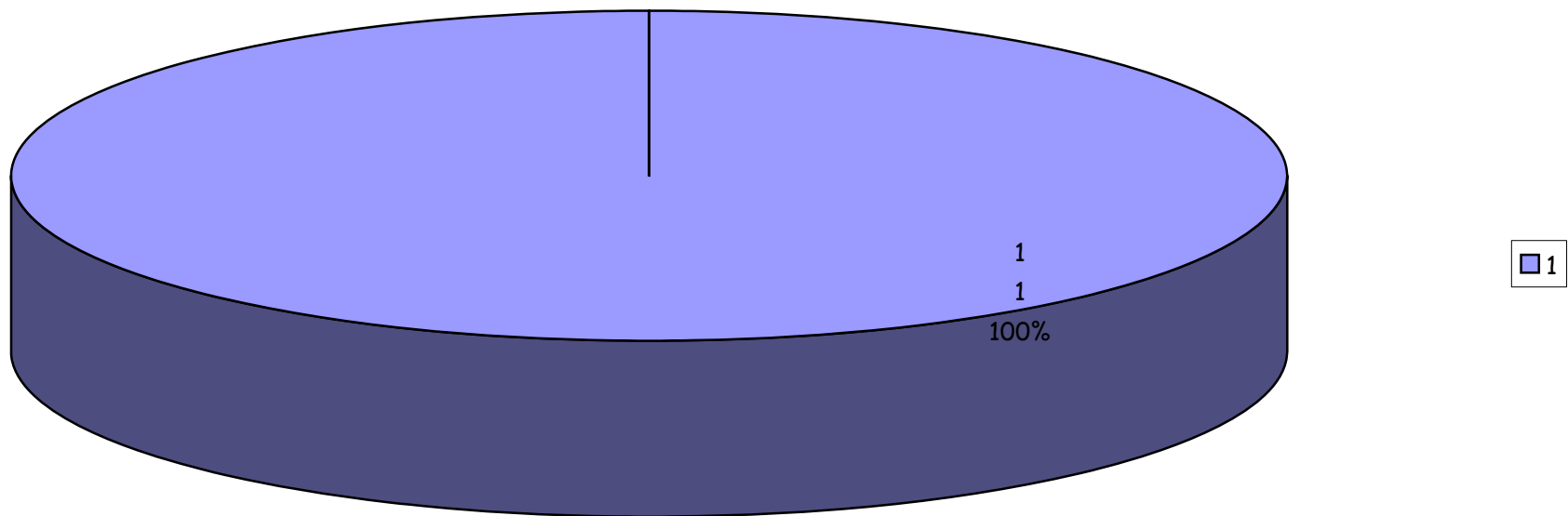
De foretagne målinger har vist kontamination over baggrunds niveau i tank 1 og rørforbindelserne til denne. Dette udstyr er blevet oplagret i lukket område på DR 3 og afventer nærmere undersøgelser. På det øvrige udstyr: betongulv, dækkeplader, tanke 2 - 5, jord mv. er der ikke målt kontamination over baggrunds niveauet, og det kan derfor frigives til anvendelse uden restriktioner.

João Silva

Bilag 5

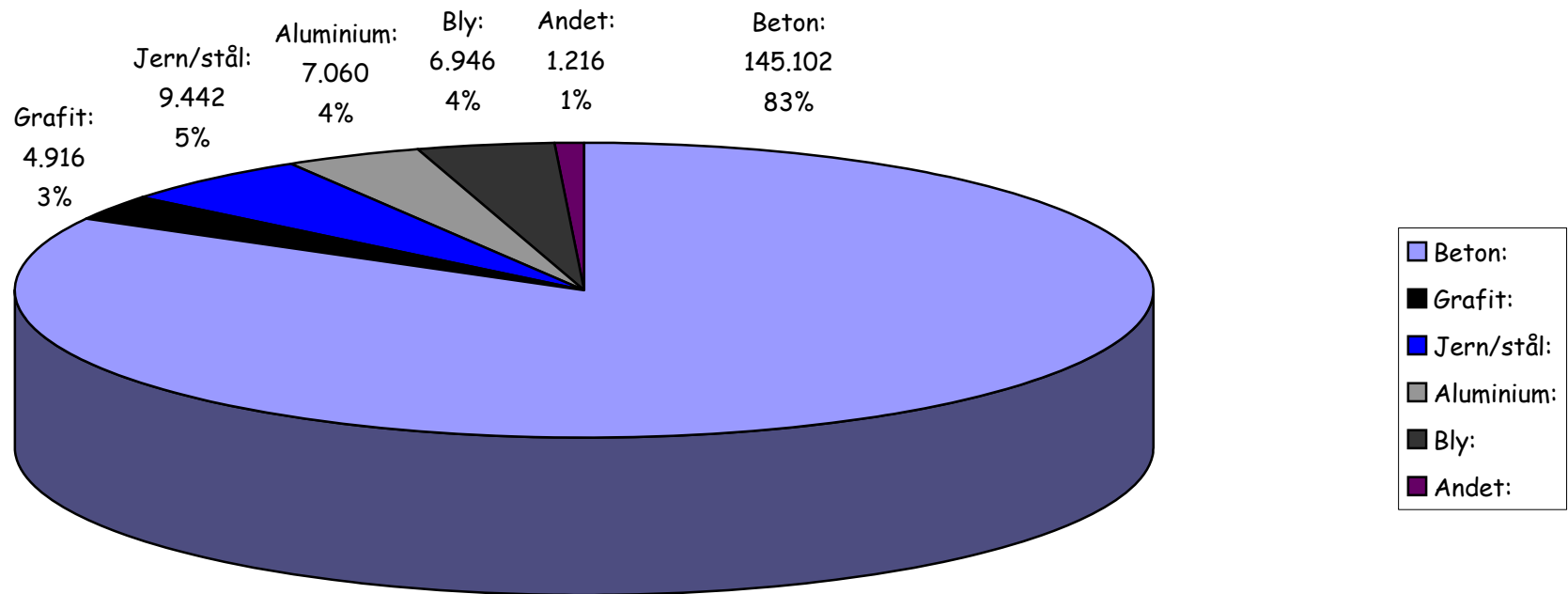
Affaldsmængder, registrering

DR2 Frigivet Affald



Totalvægt: 420676kg

DR2 Rødt Affald



Totalvægt: 174682kg

DR2 Opgørelse Affaldsmængder i Containerne:

[illegible]

DR2 Opgørelse Affaldsmængder i Containere:

Vægt angivet i kg	Beton:	Grafit:	Jern / stål:	Aluminium	Bly:	Andet:	Bemærkninger:
RØDE Stål-containere [2,7m3]:							
200000 83 20				127	4.338		
200000 82 88				600	500		
200000 72 35	4.980						Incl. Sleeves
200000 68 14	4.400						Incl. Sleeves
200000 57 80		518	711	700			Grafit fra DR1
200000 48 42			3.564	727	347		
200000 42 09			1.338	984	1.678	1.000	Andet: Messing + Kobber
200000 41 79		1.775					
200000 31 63		2.623					
200000 10 40	896		1.373	15	33	68	
200000 10 38				366			
20000 102 83	973		544	18			Container ½ fyldt.
RØDE Træpaller:							
20000 10 866			50	6	50	18	Omlades senere.
20000 10 878			138	24		8	Omlades senere.
							Samlet mængde Rødt Affald:
SUM Rødt Affald:	145.102	4.916	9.442	7.060	6.946	1.216	174.682

DR2 Opgørelse Affaldsmængder i Containerne:

[illegible]

Bilag 6

Frigivelsesrapport for frigivelig del af betonblok



DANSK DEKOMMISSIONERING



DANAK

TEST Reg. nr. 488

Frigivelsesrapport

Masse-frigivelsesindeks bestemt ud fra masse-specifik aktivitet

ADS-nummer for emnet: 1000013674 + 1000013959

Kort beskrivelse af emnet: Den ydre og den øverste del af den biologiske afskærmning (af beton) på DR 2. Igloen er ikke medtaget i denne rapport, da den er frigivet særskilt.

Emnets vægt: ca. 118660 kg ("skorsten") + ca. 134320(nedre del – yderst) kg: i alt ca. 253000 kg

Dato for måling: Målingerne er foretaget i perioden 1. september 2006 til 15. maj 2007.

Anvendte detektorer til gamma-spektrometrisk måling: B00384, B05053 og B05064.

Betonen er frigivet ved hjælp af udtogene prøver, taget fra kerner boret ud af afskærmningen. Der er brugt metode A i kvalitetshåndbogen for frigivelsesfunktionen. Da neutronfluencehastigheden har aftaget ud gennem betonen og op gennem betonen, har det været muligt at bestemme grænseflader, uden for hvilke, det massespecifikke frigivelsesindeks i en vilkårlig del vil være mindre end 1.

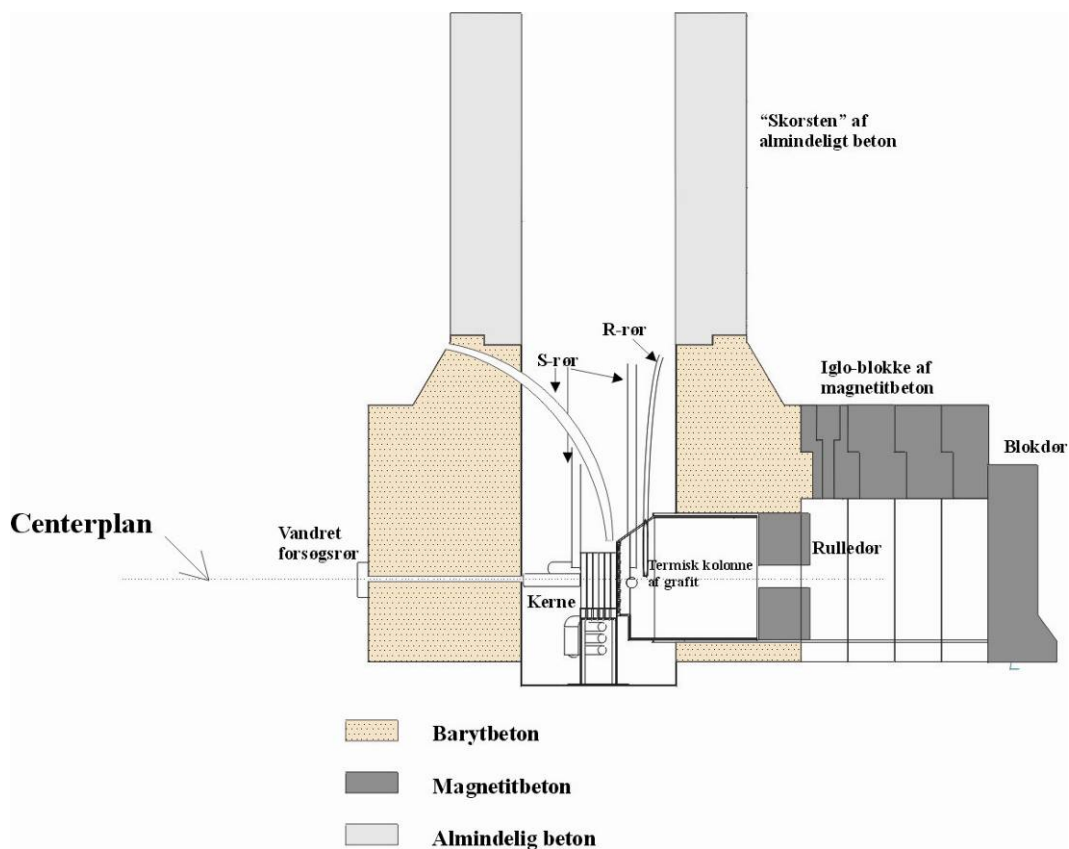
På de følgende sider er strategi for udtagning af borekerner, prøver, prøveplanen, valg af mulige radionuklider, måleresultater og konklusion om frigivelse beskrevet.

1 Strategi for udtagning af boreprøver

Betonen (eksklusiv Igloen) i DR 2's reaktorblok består af to typer af beton:

1. Den øverste del, "skorstenen", er fremstillet af almindeligt beton med en massefylde på $2,3 \text{ g/cm}^3$.
2. Den nederste del af reaktorblokken er fremstillet af barytbeton med en massefylde på $3,5 \text{ g/cm}^3$.

Figur 1 viser et lodret snit af reaktoren.



Figur 1. Lodret snit af reaktoren.

1.1 Øverste del af betonen, almindeligt beton

Denne del er langt væk fra reaktorkernen. Neutronfluencehastigheden vil aftage med højden over kerneplanet. Området med størst aktivitet vil derfor findes i bunden af skorstenen. Der blev målt på en prøve (1_15-16), der var taget i den nederste og inderste del af skorstenen.

1.2 Nederste del af betonen, barytbeton

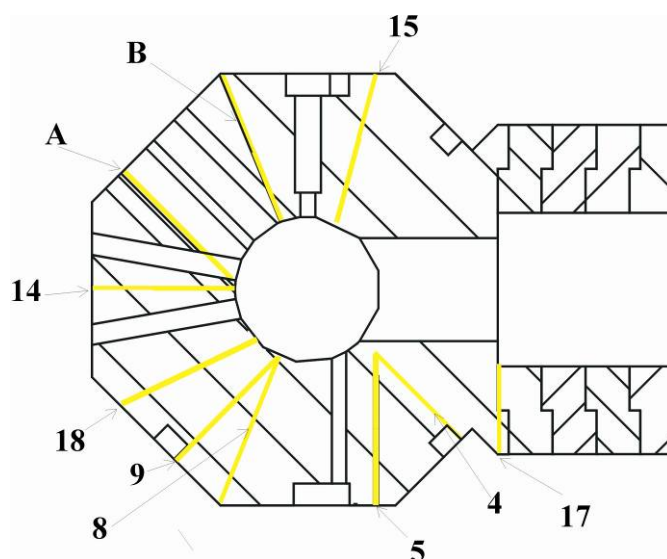
På grund af reaktorens opbygning med de fleste eksperimentrør befindende sig i centerplanen (der er ca. 1 meter over gulvplan), vil der i højden svarende til centerplan forventes, at der ikke er helt symmetri omkring reaktorens hovedakse. Der er derfor foretaget 10 borer i dette plan. Den ene borekerne, borekerne nummer 9, blev taget umiddelbart ved siden af et af eksperimentrørene, således at det kunne vurderes, hvor meget streaming af neutroner, der havde været ud gennem disse. Der blev ligeledes taget 2 borekerner, nummer 12 og 13, lige over og lige under hullet, hvor termisk

kolonne havde siddet. Specielt prøve nummer 12 blev brugt til at vurdere, hvor langt ud betonen i gulvet var aktiveret. Højere oppe fra 2 m over gulvniveau vil der være symmetri.. Der er derfor kun taget to prøver i hver af højderne 3 meter, 2,5 meter og 2 meter over gulvet. Der blev desuden taget en borekerne (10) i ca. 4 meters højde over gulvplanet, tæt på udløbet af det ene S-rør, da der eventuelt kunne have været streaming af neutroner op langs røret.

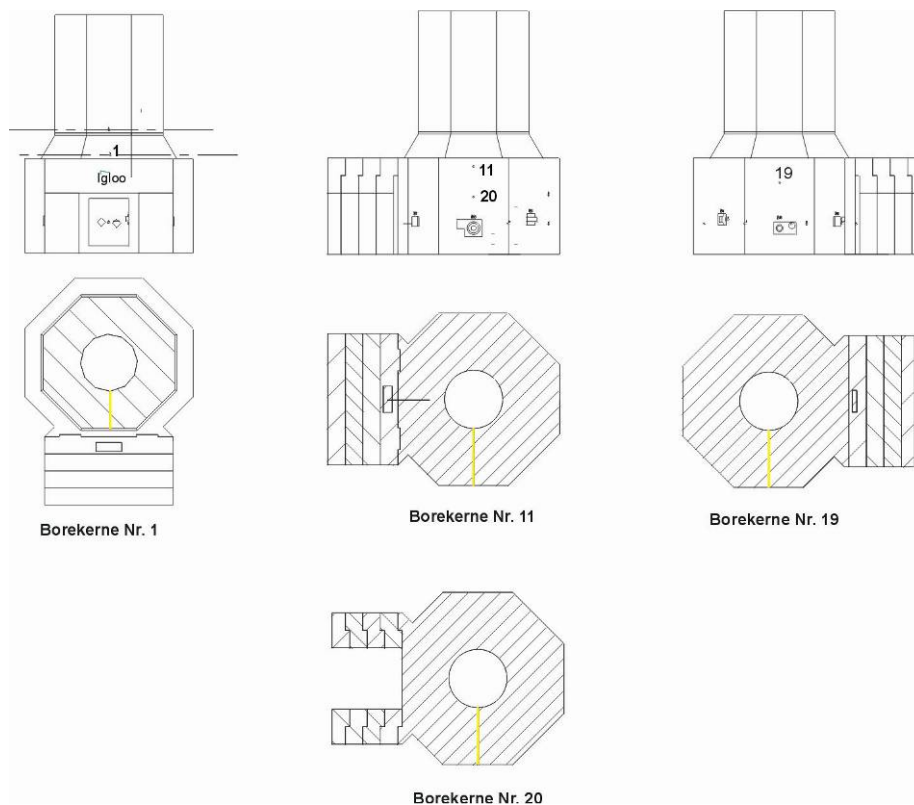
2 Prøveplanen

På figur 2 er vist, hvor borekernerne i centralplanen er taget, nemlig borekernerne 4, 5, 8, 9, 14, 15, 17 og 18 samt borekernerne A og B. Borekerne 9 er taget ved siden af et forsøgsrør, for at bedømme, hvor meget streamingen af neutroner har betydet. Denne boreprøve er altså ikke bestemmende for skæringsfladen frigiveligt/ikke frigiveligt beton.

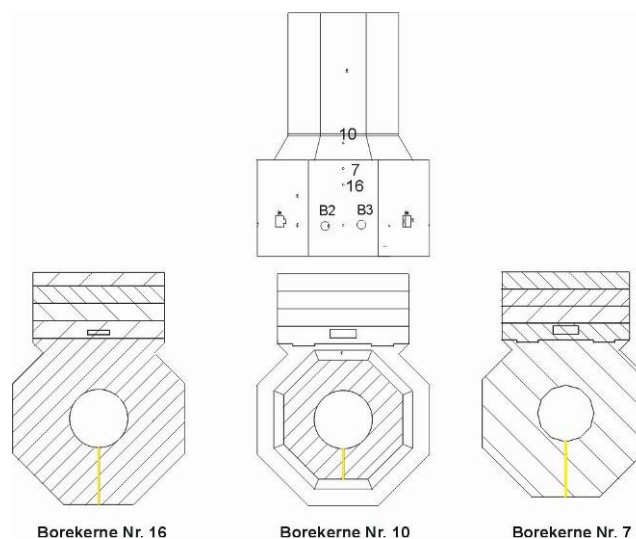
På figur 3 er vist, hvor borekernerne 1, 11, 19 og 20 er taget. På figur 4 er vist, hvor borekernerne 7, 10 og 16 er taget. Borekerne 6 er taget 200 cm over gulvplanet og 100 cm over A. Borekernerne 12 og 13 er som nævnt taget henholdsvis lige over og lige under blynæsens placering i igloen; dette er vist på figur 5.



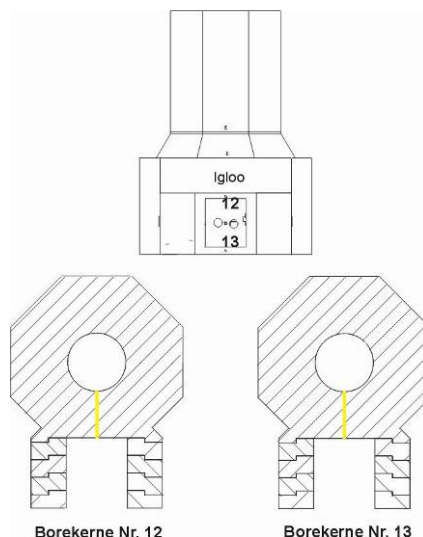
Figur 2. Tværsnit af DR 2 i de vandrette plan, hvor centrum af reaktorkernen var placeret. Borekernerne er angivet med gult.



Figur 3. Angivelse af, hvor borekernerne 1, 11, 19 og 20 er taget. Borekernerne er angivet med gult.



Figur 4. Angivelse af, hvor borekernerne 7, 10 og 16 er taget. Borekernerne er angivet med gult



Figur 5. Angivelse af, hvor borekerne 12 og 13 er taget. Borekerne 12 og 13 er angivet med gult.

Hver borekerne blev delt i et antal boreprøver, således at det kunne bestemmes, hvilken del af blokken, der kunne frigives. Hver prøve blev målt med en gammapektrometrisk måling. Skæringsfladen frigivelse/ikke frigivelse blev ca. lagt ved den boreprøve, der kunne frigives. Dette er en konservativ måde til at sikre, at hvert tons beton, hvordan det end skæres ud af den ydre blok, kan frigives.

3 Valg af nuklider

I de to typer af beton er nuklidsammensætningen forskellig, hvilket resulterer i forskellig sammensætning af radionuklider i hver betontype.

3.1 Øverste del af betonen, almindeligt beton

I almindeligt beton kan de aktiveringsprodukter, der udsender gammastråling være ^{60}Co , ^{152}Eu og ^{154}Eu . Desuden kan der være ^3H , ^{14}C samt ^{41}Ca , der alle henfalder uden udsendelse af γ -stråling (rene β -emittere). Skaleringsfaktorer for disse nuklider er beregnet, og ^{60}Co er anvendt som nøgle-nuklid.

3.2 Nederste del af betonen, barytbeton

I barytbeton kan de aktiveringsprodukter, der udsender gammastråling være ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu og ^{154}Eu . Desuden kan der være ^3H , ^{14}C samt ^{41}Ca , der alle henfalder uden udsendelse af γ -stråling (rene β -emittere). Skaleringsfaktorer for disse nuklider er beregnet, og ^{60}Co er anvendt som nøgle-nuklid.

4 Resultater

Placering i forhold til centerplanen, afstanden fra indersiden af betonblokken, måleværdier, C_i/CLM_i , ekspanderede usikkerheder, $U(C_i/CLM_i)$, massefrigivelsesindeks, FIM , samt afstanden fra indersiden af betonblokken er angivet i nedenstående tabel for de boreprøver, der netop kan frigives.

Tabel 1. Resultaterne for boreprøverne. Afstand fra indersiden af betonblokken angiver det sted, hvor den inderste del af prøven starter. Dette giver en indikering af, hvor stor en del af borekernen, der ikke kan frigives.

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra indersiden af betonblokken [cm]	Måleværdi C_i/CLM_i	Ekspanderet usikkerhed $U(C_i/CLM_i)$	FIM
1_15-16	3,5 m over gulvniveau	137	0	0,25	0,06	0,31
4_19-20	centralplan	165	9	0,29	0,06	0,35
5_15A-16	centralplan	165	62,5	0,37	0,06	0,43
8_09-09A	centralplan	215	99,5	0,40	0,06	0,46
14_9C-9B	centralplan	193,5	92	0,68	0,12	0,8
15_09-10	centralplan	204	101,5	0,70	0,11	0,81
17_12-13	centralplan	61,5	0	0,08	0,02	0,10
18_09-10	centralplan	181	93	0,19	0,05	0,24
A_10	centralplan	194,5	99	0,76	0,13	0,88
B_10	centralplan	205	99	0,51	0,15	0,66
6_22-23	2,07 m over gulvniveau	206	57	0,24	0,06	0,30
20_10-11	2,0 m over gulvniveau	202	50	0,60	0,10	0,71
16_23-24	2,5 m over gulvniveau	207	0	0,73	0,11	0,84
19_16-17	2,5 m over gulvniveau	199	0	0,47	0,08	0,55
7_21-22	3,06 m over gulvniveau	188,5	0	0,51	0,12	0,63
11_25-26	3,06 m over gulvniveau	200	0	0,13	0,03	0,16

5 Konklusion

Resultaterne af målingerne betyder, at betonen fra hele ”skorstenen” kan frigives. Ligeledes kan al barytbetonen ned til 2,5 meter over gulvhøjde frigives. For de nederste 2,5 meter af betonblokken var det praktisk at gøre hele den inderste meter til aktivt affald, selv om målingerne viser, at der fra 2 til 2,5 meters højde kunne frigives mere. Der udskæres 15 cm beton rundt om alle forsøgskanalerne hele vejen ud, som ikke frigives, da betonen kan være aktiveret til over frigivelsesniveauet på grund af neutronstreaming. Resultaterne fra borekerne 10 viste, at det ikke var nødvendigt at skære ud omkring S-rørene.

Bestemt af (Person-ID samt underskrift):

Dato:

Gennemgået af (Person-ID samt underskrift):

Dato:

Symbolforklaring

C_i	Aktivitetskoncentrationen af nuklid i angivet i Bq/kg. Denne kan være bestemt ved en direkte måling eller fastsat som påvisningsgrænsen for den pågældende nuklid. For nuklider, der ikke udsender gammastråling ved henfald, er den bestemt ved skalering ud fra indholdet af en gamma-emitter.
PGA_{K_i}	Påvisningsgrænse for aktivitetskoncentration af nuklid i angivet i Bq/kg. Påvisningsgrænsen er den laveste værdi af målestørrelsen <i>aktivitetskoncentration</i> som med det valgte signifikansniveau fører til konklusionen, at aktivitetskoncentrationen af nuklid i er større end nul. Med det anvendte signifikansniveau er sandsynligheden for en forkert konklusion højst 5% (det er antaget, at måleresultaterne er normalfordelt). Ved de gammaspektrometriske målinger, beregnes PGA_{K_i} -værdier ud fra de af spektrometri-programmet Genie2000 beregnede PGA_i -værdier.
CLM_i	Det massespecifikke frigivelsesniveau for nuklid i angivet i Bq/kg.
$U(\sum_i \frac{C_i}{CLM_i})$	Den ekspanderede usikkerhed på $\sum C_i/CLM_i$, dimensionsløs. Dækningsfaktoren, k , er sat til 1,65, som foreskrevet af de nukleare tilsynsmyndigheder.
SF_β	Dimensionsløs skaleringsfaktor. Indholdet af rene beta-emittere kan bestemmes ud fra skaleringsfaktorerer, der angiver forholdet mellem koncentrationerne af den pågældende β -emitter og en nøglenuklid, der er en af de målte gamma-emittere i prøven. Den kan findes enten ved beregning eller måling. Beregning kan ske, når emnet er neutron-aktiveret, og når neutron-fluencen samt materialsammensætningen af emnet er kendt. Tiden, siden neutron-bestrålingen er ophørt, skal også kendes.
FIM	Dimensionsløst masse-frigivelsesindeks. Dette er defineret for at have en bekvem størrelse til undersøgelse af, om alle værdier i dækningsområdet for $\sum_i C_i/CLM_i$ er mindre end 1.

Frigivelsesniveauerne for de enkelte nuklider er fastsat af Statens Institut for Strålehygiejne og baserer sig på frigivelsesniveauerne angivet i tabel 2 i IAEA's Safety Guide No. RS-G-1.7, *Application of the concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*, 2004.

Denne frigivelsesrapport opbevares elektronisk og på Frigivelseslaboratoriet. Den er tilgængelig for kunden, Statens Institut for Strålehygiejne.

Denne rapport må kun gengives i sin helhed, medmindre Frigivelsesfunktionen har givet skriftlig tilladelse til andet.

Formular F.06

Udstedelsesdato: 2007-05-28

Version nr.: 4

Ansvarlig: Den teknisk-administrative leder af Frigivelsesfunktionen

Frigivelsesfunktionen

Sektionen for Strålings- og Nuklear Sikkerhed

Postboks 320

Frederiksborgvej 399

DK 4000 Roskilde

Bilag 7

Boreprøver fra den biologiske afskærmning på DR 2

Notat



DANSK DEKOMMISSIONERING

20. januar 2009

Ref. Bente Lauridsen
Strålings- og nuklear sikkerhed

Boreprøver fra den biologiske afskærmning på DR 2

Dette notat er en uddybning af Tabel 1 i frigivelsesrapporten for betonen i den biologiske afskærmning på DR 2.

I forhold til frigivelsesrapporten er der i dette notat yderligere angivet den målte aktivitetskoncentration, henholdsvis PGAK og skaleret aktivitetskoncentration (jævnfør den del af Instruktion I.08 i Kvalitetshåndbogen for Dansk Dekommissionerings Frigivelsesfunktion, der vedrører teorien for prøvetagning efter "metode A" (vedlagt) samt Appendiks A.11 og Appendiks A.12 i Kvalitetshåndbogen (vedlagt)) for de boreprøver, der netop kan frigives.

De store variationer i FIM-værdierne skyldes, at frigivelsesindekset bestemmes på grundlag af (1) direkte målte koncentrationer af nuklider, (2) skalering af rene beta-emittere til en nøgle-nuklid (ofte Co-60) og (3) påvisningsgrænser (PGA) for mulige nuklider i betonen. Der måles kun så længe, at FIM bliver mindre end 1. Der er derfor ikke nogen entydig sammenhæng mellem FIM og en symmetrisk fordeling af nukliderne i betonblokken.

Grunden til, at der ikke er angivet data for prøve nr. 12 og 13 er, at de er dømt røde på forhånd, fordi de ligger i en afstand på mindre end 1 meter fra den inderste overflade. Prøve nr. 10 er ikke medtaget, for dens placering er identisk med prøve nr. 1, der er hvid. Prøve nr. 9 blev brugt til at vurdere, om der havde været neutron-streaming omkring forsøgsrørene, således at der skulle skæres aktiveret beton væk omkring rørene.

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGAK [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
1_15-16	3,5 m over gulvniveau	137	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca		$2,25 \cdot 10^{-3} \pm 6,17 \cdot 10^{-4}$ $4,70 \cdot 10^{-3} \pm 1,29 \cdot 10^{-3}$ $1,10 \cdot 10^{-2} \pm 3,02 \cdot 10^{-3}$ $5,96 \cdot 10^{-3} \pm 1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^0 \pm 6,61 \cdot 10^{-1}$ $2,25 \cdot 10^{-3} \pm 1,69 \cdot 10^{-3}$ $2,25 \cdot 10^{-3} \pm 1,09 \cdot 10^{-3}$	0,25	0,06	0,31
4_19-20	centralplan	165	9	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca		$5,28 \cdot 10^{-3} \pm 1,45 \cdot 10^{-3}$ $3,18 \cdot 10^{-3} \pm 8,72 \cdot 10^{-4}$ $3,99 \cdot 10^{-3} \pm 1,09 \cdot 10^{-3}$ $7,99 \cdot 10^{-3} \pm 2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^0 \pm 1,55 \cdot 10^0$ $5,28 \cdot 10^{-3} \pm 3,97 \cdot 10^{-3}$ $5,28 \cdot 10^{-3} \pm 2,56 \cdot 10^{-3}$	0,29	0,06	0,35
5_15A-16	centralplan	165	62,5	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$2,39 \cdot 10^{-2} \pm 2,59 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3} \pm 3,87 \cdot 10^{-4}$ $7,07 \cdot 10^{-3} \pm 1,94 \cdot 10^{-3}$ $3,61 \cdot 10^{-3} \pm 9,89 \cdot 10^{-4}$	$6,29 \cdot 10^{-1} \pm 4,15 \cdot 10^{-1}$ $1,41 \cdot 10^{-3} \pm 1,06 \cdot 10^{-3}$ $1,41 \cdot 10^{-3} \pm 6,85 \cdot 10^{-4}$	0,37	0,06	0,43

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGAK [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
8_09-09A	centralplan	215	99,5	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$1,96 \cdot 10^{-3} \pm 2,53 \cdot 10^{-4}$ $3,12 \cdot 10^{-2} \pm 3,73 \cdot 10^{-3}$ $2,64 \cdot 10^{-3} \pm 6,49 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-3} \pm 3,18 \cdot 10^{-4}$	$8,73 \cdot 10^{-1} \pm 5,36 \cdot 10^{-1}$ $1,96 \cdot 10^{-3} \pm 1,40 \cdot 10^{-3}$ $1,96 \cdot 10^{-3} \pm 8,24 \cdot 10^{-4}$	0,40	0,06	0,46
14_09C-09B	centralplan	193,5	92	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$5,54 \cdot 10^{-2} \pm 6,98 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-3} \pm 4,15 \cdot 10^{-4}$ $6,63 \cdot 10^{-3} \pm 1,82 \cdot 10^{-3}$ $3,54 \cdot 10^{-3} \pm 9,69 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-1} \pm 4,45 \cdot 10^{-1}$ $1,52 \cdot 10^{-3} \pm 1,14 \cdot 10^{-3}$ $1,52 \cdot 10^{-3} \pm 7,35 \cdot 10^{-4}$	0,68	0,12	0,80
15_09-10	centralplan	204	101,5	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$2,51 \cdot 10^{-3} \pm 1,04 \cdot 10^{-3}$ $4,44 \cdot 10^{-2} \pm 5,42 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-2} \pm 3,90 \cdot 10^{-3}$ $7,17 \cdot 10^{-3} \pm 1,96 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^0 \pm 8,14 \cdot 10^{-1}$ $2,51 \cdot 10^{-3} \pm 2,04 \cdot 10^{-3}$ $2,51 \cdot 10^{-3} \pm 1,44 \cdot 10^{-3}$	0,70	0,11	0,81

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGAK [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
17_12-13 Denne er taget i magnetitbetonen og derfor lidt anderledes med hensyn til skalering.	centralplan	61,5	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca ⁵⁵ Fe		$7,00 \cdot 10^{-4} \pm 1,92 \cdot 10^{-4}$ $1,47 \cdot 10^{-3} \pm 4,02 \cdot 10^{-4}$ $3,40 \cdot 10^{-3} \pm 9,31 \cdot 10^{-4}$ $1,90 \cdot 10^{-3} \pm 5,20 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-1} \pm 8,22 \cdot 10^{-2}$ $4,20 \cdot 10^{-4} \pm 3,16 \cdot 10^{-4}$ $4,90 \cdot 10^{-4} \pm 2,38 \cdot 10^{-4}$ $3,08 \cdot 10^{-3} \pm 1,49 \cdot 10^{-3}$	0,08	0,02	0,10
18_09-10	centralplan	181	93	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$1,35 \cdot 10^{-2} \pm 1,61 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-4} \pm 1,56 \cdot 10^{-4}$ $2,91 \cdot 10^{-3} \pm 7,98 \cdot 10^{-4}$ $1,45 \cdot 10^{-3} \pm 3,97 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-1} \pm 1,68 \cdot 10^{-1}$ $5,71 \cdot 10^{-4} \pm 4,30 \cdot 10^{-4}$ $5,71 \cdot 10^{-4} \pm 2,77 \cdot 10^{-4}$	0,19	0,05	0,24
A_10	centralplan	194,5	99	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	$6,44 \cdot 10^{-2} \pm 7,49 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3} \pm 3,55 \cdot 10^{-4}$ $5,97 \cdot 10^{-3} \pm 1,64 \cdot 10^{-3}$ $3,24 \cdot 10^{-3} \pm 8,88 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-1} \pm 3,80 \cdot 10^{-1}$ $1,30 \cdot 10^{-3} \pm 9,74 \cdot 10^{-4}$ $1,30 \cdot 10^{-3} \pm 6,28 \cdot 10^{-4}$	0,76	0,13	0,88

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGAK [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
B_10	centralplan	205	99	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	3,24·10 ⁻² ±4,11·10 ⁻³	1,99·10 ⁻³ ±5,46·10 ⁻⁴ 9,44·10 ⁻³ ±2,58·10 ⁻³ 5,01·10 ⁻³ ±1,37·10 ⁻³ 8,86·10 ⁻¹ ±5,85·10 ⁻¹ 1,99·10 ⁻³ ±1,50·10 ⁻³ 1,99·10 ⁻³ ±9,66·10 ⁻⁴		0,51	0,15	0,66
6_22-23	2,07 m over gulvniveau	206	57	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca		2,03·10 ⁻³ ±5,56·10 ⁻⁴ 5,19·10 ⁻³ ±1,42·10 ⁻³ 1,00·10 ⁻² ±2,74·10 ⁻³ 5,28·10 ⁻³ ±1,45·10 ⁻³ 9,04·10 ⁻¹ ±5,96·10 ⁻¹ 2,03·10 ⁻³ ±1,53·10 ⁻³ 2,03·10 ⁻³ ±9,85·10 ⁻⁴		0,24	0,06	0,30
20_10-11	2,0 m over gulvniveau	202	50	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	3,87·10 ⁻² ±4,94·10 ⁻³	1,84·10 ⁻³ ±5,04·10 ⁻⁴ 9,44·10 ⁻³ ±2,59·10 ⁻³ 4,84·10 ⁻³ ±1,33·10 ⁻³ 8,19·10 ⁻¹ ±5,40·10 ⁻¹ 1,84·10 ⁻³ ±1,38·10 ⁻³ 1,84·10 ⁻³ ±8,92·10 ⁻⁴		0,60	0,10	0,71

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGAk [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
16_23-24	2,5 m over gulvniveau	207	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	5,47·10 ⁻² ±6,52·10 ⁻³	1,91·10 ⁻³ ±5,24·10 ⁻⁴ 9,67·10 ⁻³ ±2,65·10 ⁻³ 5,14·10 ⁻³ ±1,41·10 ⁻³ 8,52·10 ⁻¹ ±5,62·10 ⁻¹ 1,91·10 ⁻³ ±1,44·10 ⁻³ 1,91·10 ⁻³ ±9,28·10 ⁻⁴		0,73	0,11	0,84
19_10-11	2,5m over gulvniveau	202	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca	3,48·10 ⁻² ±4,33·10 ⁻³	1,35·10 ⁻³ ±3,69·10 ⁻⁴ 6,78·10 ⁻³ ±1,86·10 ⁻³ 3,38·10 ⁻³ ±9,27·10 ⁻⁴ 6,00·10 ⁻¹ ±3,96·10 ⁻¹ 1,35·10 ⁻³ ±1,01·10 ⁻³ 1,35·10 ⁻³ ±6,53·10 ⁻⁴		0,47	0,08	0,55
7_21-22	3,06 m over gulvniveau	188,5	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca		7,95·10 ⁻³ ±2,18·10 ⁻⁴ 8,39·10 ⁻³ ±2,30·10 ⁻³ 1,96·10 ⁻² ±5,38·10 ⁻³ 1,06·10 ⁻² ±2,89·10 ⁻³ 3,54·10 ⁰ ±2,33·10 ⁰ 7,95·10 ⁻³ ±5,98·10 ⁻³ 7,95·10 ⁻³ ±3,86·10 ⁻³		0,51	0,12	0,63

Boreprøve	Placering	Længde af borekerne [cm]	Afstand fra inder siden af betonblokken [cm]	Nuklid	Aktivitetskoncentration [Bq/g]	PGA K [Bq/g]	Skalering [Bq/g]	Måleværdi $\sum C_i / CLM_i$	Ekspanderet usikkerhed $U(\sum C_i / CLM_i)$	FIM
11_25-26	3,06 m over gulvniveau	200	0	⁶⁰ Co ¹³³ Ba ¹⁵² Eu ¹⁵⁴ Eu ³ H ¹⁴ C ⁴¹ Ca		$1,11 \cdot 10^{-3} \pm 3,03 \cdot 10^{-4}$ $2,93 \cdot 10^{-3} \pm 8,02 \cdot 10^{-4}$ $5,63 \cdot 10^{-3} \pm 1,54 \cdot 10^{-3}$ $2,84 \cdot 10^{-3} \pm 7,78 \cdot 10^{-4}$	 $4,93 \cdot 10^{-1} \pm 3,25 \cdot 10^{-1}$ $1,11 \cdot 10^{-3} \pm 8,33 \cdot 10^{-4}$ $1,11 \cdot 10^{-3} \pm 5,37 \cdot 10^{-4}$	0,13	0,03	0,16



I.08 Udtagning af og måling på delprøver

Nødvendigt antal delprøver, prøvetagning og beslutning om frigivelse

Reference: Kvalitetshåndbog, afsnit 5.7.

Formål: At beskrive hvorledes delprøvemålinger benyttes til afgørelse om frigivelse.

Ansvarlig: Den teknisk-administrative leder af Frigivelsesfunktionen.

Denne instruktion anvendes, når målinger af aktivitetskoncentrationer i delprøver af et emne skal anvendes til at vurdere, om emnet kan frigives. Der anvendes to metoder, hvor målinger på delprøver bruges som grundlag for afgørelse om frigivelse.

Ved den første metode (A) kendes den relative fordeling af aktivitetskoncentrationen så godt, at de udtagne prøver giver maksimalværdier af koncentrationen for de enkelte områder i emnet og/eller maksimalværdier af koncentration i områder af emnet på basis af målinger på delprøver fra andre området i emnet. Den totale masse af emnet, må højst være 1000 kg.

Ved den anden metode (B) vides det med stor sandsynlighed, at aktivitetskoncentrationen er nogenlunde homogen i emnet uden forekomst af hot-spots.

Metode A

Der er kendskab til den relative aktivitetskoncentration i emnet

Prøver udtages i de områder, hvor aktivitetskoncentrationen er størst. Hvor mange områder, der medtages, afhænger af, hvor tæt aktivitetskoncentrationen vurderes at være på frigivelsesniveauet. På grundlag af de målte aktivitetskoncentrationer, $C_{i,j}$ af nuklid i i voluminet j , der har massen m_j , usikkerhederne, u , på de fra målingerne beregnede aktivitetskoncentrationer i emnet og frigivelsesniveauet CLM_i for nuklid i , beregnes masse-frigivelsesindekset FIM som:

$$\sum_i \left(\frac{\sum_j (C_{i,j} \cdot m_j) / \sum_j m_j}{CLM_i} \right) + 1,65 \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(\sum_j (C_{i,j} \cdot m_j) / \sum_j m_j)}{CLM_i} \right)^2} \quad (1)$$

Hvis masse-frigivelsesindekset er mindre end 1, kan emnet frigives.

Ved beregningen af masse-frigivelsesindekset kan et område af emnet tildeles en værdi af aktivitetskoncentrationen, der er målt i et andet område, når det vides, at dette andet område har en højere koncentration. Hvis der for de mest aktive områder (eller område) af et emne kan beregnes et masse-frigivelsesindeks, der er mindre end



1, kan hele emnet frigives uden yderligere målinger.

Den samlede usikkerhed på aktivitetskoncentrationen, u , af nuklid i i den del af emnet, som indgår i beregningen af masse-frigivelsesindekset, beregnes som:

$$u\left(\sum_j (C_{i,j} \cdot m_j) / \sum_j m_j\right) = \sqrt{\sum_j \left(\frac{m_j}{\sum_j m_j} \cdot u(C_{i,j})\right)^2 + \left(\frac{C_{i,j} \cdot \sum_j m_j - \sum_j (C_{i,j} \cdot m_j)}{(\sum_j m_j)^2} \cdot u(m_j)\right)^2} \quad (2)$$

hvor:

- $u(C_{i,j})$ er usikkerheden på bestemmelsen af aktivitetskoncentrationen af nuklid i i voluminet j ved hjælp af prøven fra dette område. $u(C_{i,j})$ beregnes som:

$$u(C_{i,j}) = \sqrt{\left(\frac{u(q_{i,j})}{m'_j}\right)^2 + \left(\frac{q_{i,j}}{(m'_j)^2} \cdot u(m'_j)\right)^2} \quad (3)$$

hvor:

- $q_{i,j}$ og $u(q_{i,j})$ er henholdsvis aktiviteten af nuklid i bestemt fra prøven udtaget fra volumen j og usikkerheden på denne aktivitetsbestemmelse.
- m'_j og $u(m'_j)$ er henholdsvis massen af den prøve, der er brugt til at bestemme $q_{i,j}$ og usikkerheden på denne massebestemmelse.
- m_j er massen af voluminet j
- $u(m_j)$ er usikkerheden på bestemmelsen af m_j
- $u(\sum_j m_j)$ er usikkerheden på den samlede masse af de medtagne volumener j .

$u(\sum_j m_j)$ beregnes som:

$$u\left(\sum_j m_j\right) = \sqrt{\sum_j (u(m_j))^2} \quad (4)$$

I de tilfælde, hvor aktivitetskoncentrationen bliver bestemt ved γ -spektrometri, enten direkte (målt koncentration eller minimum detekterbar koncentration) eller beregnet eller ved skalering med γ -emitter, kan usikkerheden på aktivitetskoncentrationen beregnes ved hjælp af de udtryk, der er givet i appendiks A.11. Bestemmes aktivitetskoncentrationen på anden vis, benyttes den herved indgående usikkerhed.



A.11 γ -spektrometriske målinger og deres usikkerhed

1. Aktivitetsbestemmelser i forbindelse med γ -spektrometrimålinger

I forbindelse med de gamma-spektrometriske målinger på Frigivelseslaboratoriet bestemmes/fastsettes de masse-specifikke aktiviteter i emnet ud fra ud fra en af de følgende tre måder.

- (1) direkte måling ved γ -spektrometri, hvor aktiviteten af γ -emittere bestemmes direkte ud fra fototop-arealer i det målte spektrum.
- (2) aktiviteten af γ -emittere, der ikke manifesterer sig ved en fototop i spektret, fastsettes ud fra påvisningsgrænsen for aktivitet, PGA , i emnet ved den pågældende måling; påvisningsgrænsen for aktivitetskoncentration, $PGAK$, fås ved at dividere PGA med emnets masse; der beregnes kun påvisningsgrænser for de γ -emittere, som emnet ud fra beskaffenhed og historie vurderes at kunne indeholde.
- (3) indirekte bestemmelse, hvor aktiviteten af rene β -emittere bestemmes ved gange aktivitetskoncentrationen af en γ -emitter (nøglenuklid) i emnet med en skaleringsfaktor.

2. Direkte bestemmelse af koncentration og dens usikkerhed

Ved den direkte γ -spektrometriske bestemmelse af aktivitetskoncentrationen, $C_{\gamma,i}$, af de enkelte radionuklider, i , og de tilhørende usikkerheder $u(Q_{\gamma,i})$, indgår følgende størrelser:

- målt aktivitet, $Q_{\gamma,i}$
- tælleusikkerhed på den målte aktivitet, $u_{\text{genie}}(Q_{\gamma,i})$, der beregnes af spektrometriprogrammet Genie
- usikkerhed på aktivitetsbestemmelsen, $u_{\text{isocs}}(Q_{\gamma,i})$ som følge af usikkerhed på ISOCS-programmets beregning af tælleeffektiviteten; denne er af programleverandøren opgivet til at være $0,1 \cdot Q_{\gamma,i}$
- emnets masse, M
- usikkerheden på massen, $u(M)$, der vurderes af Frigivelsesfunktionen til at være $0,05 \cdot M$

Koncentrationen, $C_{\gamma,i}$, og den kombinerede usikkerhed på koncentrationen, $u_c(C_{\gamma,i})$, bestemmes som:

$$C_{\gamma,i} = \frac{Q_{\gamma,i}}{M} \quad (19)$$



$$u_c(C_{\gamma,i}) = \sqrt{\left(\frac{u(Q_{\gamma,i})}{M}\right)^2 + \left(\frac{Q_{\gamma,i}}{M^2} \cdot u(M)\right)^2} \quad (20)$$

hvor

$$\begin{aligned} u(Q_{\gamma,i}) &= \sqrt{u_{\text{Gauss}}^2(Q_{\gamma,i}) + u_{\text{ISOCS}}^2(Q_{\gamma,i})} \\ &= \sqrt{u_{\text{Gauss}}^2(Q_{\gamma,i}) + (0,1 \cdot Q_{\gamma,i})^2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$u(M) = 0,05 \cdot M \quad (22)$$

Den kombinerede usikkerhed på koncentrationen, $u_c(C_{\gamma,i})$, bliver da:

$$\begin{aligned} u_c(C_{\gamma,i}) &= \frac{1}{M} \cdot \sqrt{u_{\text{Gauss}}^2(Q_{\gamma,i}) + u_{\text{ISOCS}}^2(Q_{\gamma,i}) + \left(\frac{Q_{\gamma,i}}{M} \cdot u(M)\right)^2} \\ &= \frac{1}{M} \cdot \sqrt{u_{\text{Gauss}}^2(Q_{\gamma,i}) + (0,1 \cdot Q_{\gamma,i})^2 + (0,05 \cdot Q_{\gamma,i})^2} \end{aligned} \quad (23)$$

3. Påvisningsgrænse for koncentration (PGA_K) og dens usikkerhed

Ved de gamma-spektrometriske målinger beregner spektrometriprogrammet Genie påvisningsgrænser for aktiviteten af γ -emittere, der ikke har manifesteret sig i spektret. For de γ -emittere i , der vurderes af Frigivelsesfunktionen til at kunne være til stede i emnet, men som ikke har manifesteret sig i spektret, beregnes påvisningsgrænsen for aktivitetskoncentrationen, $PGA_{K,\gamma,i}$ som:

$$PGA_{K,\gamma,i} = \frac{PGA_{\gamma,i}}{M} \quad (24)$$

hvor $PGA_{\gamma,i}$ er påvisningsgrænsen for aktiviteten af nuklid i i emnet og M er massen af emnet. Aktivitetskoncentrationen i emnet af nuklid i , $C_{\gamma,i}$, fastsættes herefter til $PGA_{K,\gamma,i}$, og den kombinerede usikkerhed, $u_c(C_{\gamma,i})$, på $C_{\gamma,i}$ beregnes som:

$$u_c(C_{\gamma,i}) = \sqrt{\left(\frac{C_{\gamma,i}}{1,65}\right)^2 + (0,1 \cdot C_{\gamma,i})^2 + (0,05 \cdot C_{\gamma,i})^2} \quad (25)$$



Det første led under kvadratrodstegnet er bidraget som følge af tælleusikkerheden ved aktivitetsbestemmelsen, det andet led er bidraget som følge af usikkerheden i de beregnede tælleeffektiviteter (som opgivet af leverandøren), og det tredje led skyldes bidraget fra usikkerheden på massebestemmelsen (som den er vurderet af Frigivelsesfunktionen).

4. Indirekte koncentrationsbestemmelse ved hjælp af skaleringsfaktorer

Hvis det vurderes, at der kan være rene β -emittere i et emne, bestemmes disse på grundlag af såkaldte skaleringsfaktorer, SF_{β} , der angiver forholdet mellem koncentrationen af den pågældende β -emitter og en nøglenuklid, der er en γ -emitter, der er til stede i emnet, f.eks. ^{60}Co , $^{152/154}\text{Eu}$ eller anden typisk γ -emitter i den givne materialetype (metal, beton etc.) Skaleringsfaktorer kan findes direkte ved målinger og i visse tilfælde ved beregning. Da aktivitetsforholdene er tidsafhængige på grund af forskellig halveringstid for de rene β -emittere og nøglenuklider, er skaleringsfaktorerne tidsafhængige. For en materialeblanding, hvor skaleringsfaktorerne er kendt for blandingens enkelte bestanddele, kan skaleringsfaktoren for blandingen beregnes ud fra bestanddelenes skaleringsfaktorer.

4.1 Bestemmelse af skaleringsfaktorer ud fra målinger

Når skaleringsfaktoren bestemmes ved måling, bestemmes aktivitetskoncentrationen af nøglenukliden og af den pågældende nuklid i et antal prøver fra emnet. Målingen af aktivitetskoncentrationen af den rene β -emitter sker ved væskescintillationsmålinger, der foretages i Afdelingen for Strålingsforskning på Risø (NUK). Denne afdeling afleverer resultatet af de enkelte målinger som aktivitetskoncentrationer af de relevante nuklider med de tilhørende standard usikkerheder, der er tilknyttet målingen til Frigivelsesfunktionen. Bestemmelsen af aktivitetskoncentrationen af nøglenukliden kan enten foregå ved væskescintillationsmålinger i NUK eller ved målingen på prøverne med γ -spektrometri i Frigivelsesfunktionen. Frigivelsesfunktionen beregner herefter skaleringsfaktorer som gennemsnittet af aktivitetskoncentrationsforholdene (ren β -emitter/nøglenuklid) i prøverne.

Usikkerheden på skaleringsfaktoren sættes til den værdi, der er størst: *enten* (1) den eksperimentelle standardafvigelse på gennemsnittet af aktivitetskoncentrationsforholdene i prøverne *eller* (2) den beregnede kombinerede usikkerhed på den beregnede skaleringsfaktor.

4.2 Bestemmelse af skaleringsfaktorer ved beregning

Skaleringsfaktorer kan beregnes, når aktiviteten af nøglenukliden og aktiviteterne af de pågældende nuklider er dannet ved den samme neutronbestråling, og når følgende er kendt:



- koncentrationen af de nuklider, der aktiveres (modernukliderne)
- bestrålingsperiodens længde
- variation af neutronfluencehastigheden i bestrålingsperioden (relativt til et givent tidspunkt)
- tiden fra bestrålingens ophør til tidspunktet, hvor skaleringsfaktoren skal bruges

I de tilfælde, hvor beregning af skaleringsfaktorer finder anvendelse, er usikkerheden på nuklidkoncentrationerne af modernukliderne i materialerne den helt dominerende usikkerhedskomponent på de beregnede skaleringsfaktorer, da variation i neutronfluencehastighed i bestrålingsperioden og tiden for ophør af bestrålingen er kendte reaktoroptyksninger.

For et givent materiale bliver modernuklidkoncentrationerne (masse-koncentrationerne) og tilhørende usikkerheder estimeret af Frigivelsesfunktionen baseret på leverandøroptyksninger og/eller litteraturoptyksninger og/eller direkte målinger på udtagne prøver (ultra sensitiv massespektrometri, der kan udføres i NUK).

Angiver en leverandør en typisk værdi for en nuklidkoncentration benyttes denne. Angiver leverandøren en usikkerhed på denne typiske værdi anvendes denne usikkerhed, ellers fastsættes usikkerheden til 0,4 gange værdien, når masse-koncentrationen af nukliden er under 10000 ppm, over denne værdi fastsættes usikkerheden til 0,1 gange værdien. Angiver leverandøren et interval for koncentrationens værdi vælges midtpunktet i dette interval som værdi, og usikkerheden på denne værdi fastsættes som den halve intervalbredde.

Anvendes litteraturoptyksninger vælges for modernukliden af en ren β -emitter gennemsnittet af de mest troværdige koncentrationer som koncentrationens værdi. Usikkerheden på koncentrationens værdi fastsættes som den største værdi af *enten*:

- den halve bredde af det interval, der indeholder de mest troværdige koncentrationens værdier, *eller*
- 0,4 gange den fastsatte værdi af nuklidkoncentrationen, hvis nuklidkoncentrationen er under 10000 ppm, *eller*
- 0,1 gange den fastsatte værdi af nuklidkoncentrationen, hvis nuklidkoncentrationen er over 10000 ppm.

Koncentrationen af moderen til nøglenukliden vælges som halvdelen af gennemsnittet af de mest troværdige koncentrationer. Usikkerheden på koncentrationens værdi fastsættes som den største værdi af *enten*:



- den halve bredde af det interval, der indeholder de mest troværdige koncentrationsværdier, *eller*
- 0,4 gange den fastsatte værdi af nuklidkoncentrationen, hvis nuklidkoncentrationen er under 10000 ppm, *eller*
- 0,1 gange den fastsatte værdi af nuklidkoncentrationen, hvis nuklidkoncentrationen er over 10000 ppm.

Ved direkte målinger af nuklidkoncentrationer anvendes gennemsnittet af værdierne bestemt i de analyserede prøver. Usikkerheden på gennemsnittet fastsættes som den værdi, der er størst: *enten* (1) den eksperimentelle standardafvigelse på gennemsnittet af masse-koncentrationerne *eller* (2) den beregnede kombinerede usikkerhed på gennemsnittet.

Ved beregning af den kombinerede usikkerhed på de beregnede skaleringsfaktorer, tages der kun hensyn til usikkerheden på de indgående masse-koncentrationer.

4.3 Anvendelse af skaleringsfaktorer

Koncentrationen af en given ren β -emitter beregnes ud fra den målte aktivitetskoncentration af nøglenukliden, $C_{\gamma, Co-60}$, der her antages at være ^{60}Co , som:

$$C_{\beta,i} = C_{\gamma, Co-60} \cdot SF_{\beta,i} \quad (26)$$

Usikkerheden på bestemmelsen af aktivitetskoncentrationen af de betragtede β -emittere, $u(C_{\beta,i})$, beregnes ud fra usikkerheden på aktivitetskoncentrationen af ^{60}Co , $u(C_{\gamma, Co-60})$ og usikkerheden på skaleringsfaktoren, $u(SF_{\beta,i})$, som:

$$u_c(C_{\beta,i}) = \sqrt{\left(u(C_{\gamma, Co-60}) \cdot SF_{\beta,i}\right)^2 + \left(C_{\gamma, Co-60} \cdot u(SF_{\beta,i})\right)^2} \quad (27)$$

Er ^{60}Co -aktivitetskoncentrationen fundet ved direkte bestemmelse i emnet, anvendes ligning 23 til bestemmelse af $u(C_{\gamma, Co-60})$ i ovenstående udtryk. Er koncentrationen fastsat ud fra påvisningsgrænsen, anvendes ligning 25.

Eventuelt indhold af rene α -emittere vil blive fundet ved skalering analogt til bestemmelsen af indholdet af rene β -emittere.



A.12 Masse-frigivelsesindeks ud fra γ -spektrometriske målinger

I appendiks A.11 er beskrevet, hvorledes aktivitetskoncentrationen og usikkerheden på disse bestemmes ved γ -spektrometriske målinger med germanium-detektorer. Disse størrelser indgår i beregningen af masse-frigivelsesindekset, *FIM*.

Masse-frigivelsesindekset, *FIM*, beregnes som:

$$FIM = \sum_i \left(\frac{C_i}{CLM_i} \right) + 1,65 \cdot \sqrt{\sum_i \left(\frac{u(C_i)}{CLM_i} \right)^2} \quad (28)$$

hvor

- C_i er aktivitetskoncentrationen af nuklid i i emnet
- CLM_i er det masse-specifikke frigivelsesniveau for nuklid i
- $u(C_i)$ er usikkerheden på aktivitetskoncentrationen for nuklid i

Når den beregnede værdi af *FIM* ved hjælp af ovenstående udtryk er mindre end 1, kan emnet frigives som værende ikke-radioaktivt.