

## **Strålningsnivå och till vatten deponerad strålningsenergi utanför kapslar i slutförvar**

Klas Lundgren

ASEA-ATOM 1978-05-29

STRÅLNINGSNIVÅ OCH TILL VATTEN DEPONERAD  
STRÅLNINGSENERGI UTANFÖR KAPSLAR I  
SLUTFÖRVARET

Klas Lundgren  
ASEA-ATOM 1978-05-29

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av KBS. Slutsatser och värderingar i rapporten är författarens och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en förteckning över av KBS hittills publicerade tekniska rapporter i denna serie.

STRÅLNINGSNIVÅ OCH TILL VATTEN  
DEPONERAD STRÅLNINGSENERGI UTAN-  
FÖR KOPPARKAPSEL INNEHÅLLANDE UT-  
BRÄNDA BWR-BRÄNSLESTAVAR SAMT UTAN-  
FÖR BLYKAPSEL INNEHÅLLANDE AVFALL  
FRÅN UPPARBETNING.

Klas Lundgren

AB ASEA-ATOM 78-05-29

1978-05-29

RADIATION FIELD AND ENERGY DEPOSITION  
 IN WATER OUTSIDE A CAPSULE OF COPPER  
 CONTAINING SPENT FUEL RODS AND OUTSIDE  
 A CAPSULE OF LEAD CONTAINING WASTE FROM  
 REPROCESSING

K Lundgren

Summary

The radiation field outside a capsule of copper containing approximately 500 spent BWR fuel rods has been calculated. An average burnup of 30 000 MWd/tU and a cooling time of 40 years have been assumed. Neutrons from transuranic elements and photons from fission products contribute to the dose-rate. On the surface of the capsule the gamma dose-rate will be of the order of 17 mrem/h and the neutron dose-rate 40 - 95 mrem/h.

Interacting with water, ionizing radiation produces free radicals and oxygen. Energy deposition in water outside the above capsule of copper has been calculated to be  $1 \cdot 10^{18}$  and  $3 \cdot 10^{19}$  MeV, summed up to  $10^4$  and  $10^6$  years, respectively. The maximum theoretical amount of copper that could corrode is 17 g up to  $10^4$  years. In reality, the amount will certainly be much less. The neutron and gamma energy deposition in water in the event of any water getting inside the capsule, has also been calculated. Deposition rate after a cooling time of 40 years will be approximately  $1.5 \cdot 10^{14}$  eV/g H<sub>2</sub>O, and energy deposition, summed up to  $10^4$  and  $10^6$  years, will be  $2 \cdot 10^{23}$  and  $9 \cdot 10^{23}$  eV/g H<sub>2</sub>O, respectively. This is true when the water is not in direct contact with the fuel material. If the reverse is true, there are also contributions from  $\alpha$  - and  $\beta$ -radiation.

1978-05-29

Energy deposition in water outside a capsule of lead containing waste from reprocessing has also been calculated and the result is  $1 \cdot 10^{18}$  and  $3 \cdot 10^{19}$  MeV, summed up to  $10^4$  and  $10^6$  years, respectively (assumed a cooling time of 40 years before storage). The capsule is assumed to have a cladding of titanium, so that the lead cannot corrode unless the cladding is penetrated. In that case, the maximum theoretical amount of lead that could corrode will be 28 g up to  $10^4$  years. In reality, the amount will certainly be much less.

Distribution TK TK Lönnerberg Wedholm T Hannerz Hydén TR KVE KTC TQB TQB Nordesjö RF RFC KUB3	Från/From	Datum/Date	Reg.	Sida Page
	RFC	78-02-17	3840	1
	Författare/Author		K Lundgren 6021	
Granskad/Examined		Godkänd/Approved		

Titel/Title

SLUK - Förvaring av 498 blyingjutna BWR-bränslestavar  
i kopparkapsel - Strålskärmsberäkningar

Sammanfattning/Abstract

I föreliggande rapport redovisas de strålskärmsberäkningar som gjorts för avfallsbehållaren för utbränt kärnbränsle. Beräkningsförutsättning har varit, att 498 BWR-bränslestavar (motsvarar ca 1.6 ton UO<sub>2</sub>) placeras, omgivna av blysmälta, i en kopparkapsel med godstjockleken 200 mm. Medelutbränningen har förutsatts vara ca 30 000 MWd/tU. Avklingningstiden är satt till 40 år.

Till dosraten på ytan av kopparbehållaren bidrar neutroner från transuranerna med större del än gammastrålningen från klyvningsprodukterna. På ytan av behållaren i höjded mitt för bränslet blir gammadosraten 17 mrem/h medan neutrondosraten blir 40 - 95 mrem/h. Motsvarande värden 1 m utanför behållaren blir 4.6 resp 11 - 26 mrem/h.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Övertryckelse härav beivras med stöd av gällande lag. **ASEA-ATOM**  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. **ASEA-ATOM**

Innehållsförteckning

1. Beräkningsförutsättningar.
2. Gammakällstyrkor.
3. Neutronkällstyrkor.
4. Beräkning av dosrat utanför behållaren.
  - 4.1 Beräkning av gammadosrat.
  - 4.2 Beräkning av neutronsosrat.
5. Referenser.
6. Diagram.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. **ASEA-ATOM**

This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. **ASEA-ATOM**

1

Beräkningsförutsättningar

Förutsättning har varit, att stavar från utbränt BWR-bränsle placeras i cylindrisk behållare av koppar. Bränslets medelutbränning skall vara ca 30 000 MWd/tU och stavar svarande mot ca 1.6 ton UO<sub>2</sub> antas få plats i en behållare. 40 år antas förflyta mellan uttagandet ur reaktorn och placering i behållare. Resterande utrymme i behållaren förutsättes bli fyllt med bly innan behållaren förslutes.

Nedanstående beräkningar gäller för 498 BWR-stavar placerade i behållare med geometri enl nedanstående fig 1. Kopparbehållarens godstjocklek har förutsatts vara 200 mm.

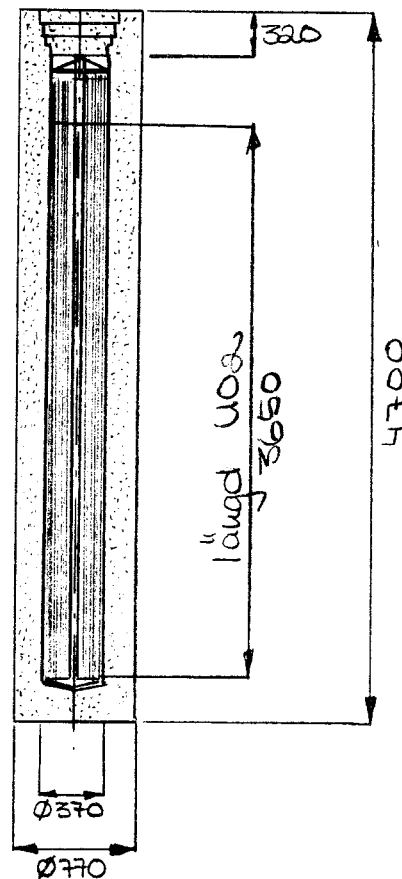


Fig 1 Beräkningsgeometri

2

Gammakällstyrkor

Klyvningsprodukternas gammakällstyrkor är tagna ur datorkörning för Forsmark 1-bränslet med datorprogrammet BEGA-FIP, referens 1. De använda värdena svarar mot 5 års reaktordrift, utbränningen 34 000 MWd/tU samt avklingningstiden 40 år.

Demo, handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigas användas. Övertiädelte ädrov beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ASEA-ATOM



Klyvningsprodukternas gammakällstyrkor för uppställningen enl fig 1, svarande mot medeldensiteten  $UO_2$  4.19 g/cm<sup>3</sup>, redovisas i nedanstående tabell 1.

Tabell 1 Klyvningsprodukternas gammakällstyrkor (MeV/cm<sup>3</sup>, s) vid avklingningstiden 40 år

E (MeV)	0.14	0.66	0.78	1.16	1.60
S <sub>v</sub> (MeV/cm <sup>3</sup> , s)	9.56(6)	3.05(9)	3.23(7)	1.09(8)	3.91(6)

De tunga nuklidernas bidrag till gammakällstyrkan har beräknats med hjälp av de beräkningsresultat som utgör underlag för referens 2. Vid avklingningstiden 40 år är dessa små i jämförelse med de i tabell 1, varför de ej medtagits.

Inducerad aktivitet i kapslingsmaterial och i fjädermaterial i fissionsgasutrymmet beräknas i referens 3. Till detta kommer aktiviteten i crudlagret som medföljer på ytan av kapslingen. Vid avklingningstiden 40 år är de resulterande gammakällstyrkorna små i jämförelse med de enl tabell 1, varför de ej medtagits.

### 3 Neutronkällstyrkor

För bränsle med relativt låg utbränning (<20 000 MWd/tU) utgör klyvningsprodukternas gammastrålning det dimensionerande bidraget vid strålskärmsdimensionering av transportflaskor och dylikt. Då bränsle från lättvattenreaktorer kommer upp i utbränningsnivåer i intervallet 20 000 - 40 000 MWd/tU innehåller det en tillräcklig mängd transuraner, så att strålskärmsbehovet av neutronkällor blir signifikativt. Detta observeras och analyseras bl a i referens 4.

Vissa transuraner har tillräckligt kort halveringstid för spontan fission för att ge upphov till ett avsevärt neutronflöde om nuklidkoncentrationen är tillräckligt stor. En ytterligare källa till neutroner är (α, n)-reaktioner med syret i UO<sub>2</sub>-bränsle.

I referens 4 visas, att för bränsle med utbränning >20 000 MWd/tU så är det huvudsakligen nukliderna Cm-242 och Cm-244 som bidrar till neutronkällstyrkan. Då Cm-242 har relativt kort halveringstid (T<sub>1/2</sub> = 163 d) återstår efter 40 års avklingning huvudsakligen Cm-244 (T<sub>1/2</sub> = 17.6 y).

För att uppskatta nuklidmassorna Cm-242 och Cm-244 som funktion av utbränningen har datorprogrammet PHOENIX, referens 5 använts. Som anrikning har valts 2.75 %, vilket är det normala för ersättningsbränsle i BWR. 4 olika beräkningar har utförts, dels 3 pin-cellberäkningar för voiderna 0,50 resp 70 %, dels en patronberäkning för voiden 50 %.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

I referens 4 anges omvandlingsfaktorer från nuklidmassa till neutronkällstyrka för nukliderna Cm-242 och Cm-244. Dessa faktorer har använts för att omräkna de med PHOENIX framtagna nuklidmassorna till neutronkällstyrkor. Dessa redovisas i diagram 1 och 2 för Cm-242 resp Cm-244. Som jämförelse har inlagts de resultat som redovisas i referens 4. Dessa resultat redovisas som band, vilket säges svara mot osäkerheten p g a variation i anrikning, driftbetingelser och spektrum i BWR och PWR. Som framgår av diagrammen överensstämmer våra resultat någorlunda väl med dessa band.

På mitten av en pinne med medelutbränningen 30 000 MWd / tU är den lokala utbränningen uppskattningsvis 34 000 - 35 000 MWd/tU. Voidhalten har varit ca 50 %. Som redan tidigare sagts återstår efter 40 års avklingning huvudsakligen Cm-244. Med hjälp av diagram 2 har vi uppskattat neutronkällstyrkan från Cm-244 till 250 - 600 n/g UO<sub>2</sub>, s. Därvidlag har vi tagit större hänsyn till våra egna beräkningar än till de enl referens 4. Vald anrikning och voidhalt bör vara representativt för de BWR-bränslestavar som skall lagras. Vald bandbredd, svarande mot drygt en faktor 2, tänkes då främst stå för osäkerheten i grunddata. Om hänsyn tas till 40 års avklingning samt antages medeldensiteten UO<sub>2</sub> 4.19 g/cm<sup>3</sup> erhålles neutronvolymkällstyrkan 220 - 520 n/cm<sup>3</sup>, s.

För nukliden Cm-244 dominerar neutronbidraget från spontan fission över bidraget från (α, n)-reaktionen i syre. (95 % resp 5 %). Fissionsspektrum och spektrum för (α, n)-neutronerna har erhållits från referens 6.

#### 4 Beräkning av dosrat utanför behållaren

Gamma- och neutrondosrater radiellt utanför kopparbehållaren har beräknats. Beräkningarna beskrivs mera ingående i nedanstående avsnitt 4.1 och 4.2. Gammadosraten på ytan av kopparbehållaren har beräknats till 17 mrem/h. Gammadosraten 1 m från behållaren blev 4.6 mrem/h. Motsvarande resultat för neutrondosraten blev 40 - 95 mrem/h resp 11-26 mrem/h. Den totala dosraten blir då 57-110 mrem/h på ytan av behållaren samt 16-310 mrem/h 1 m från behållaren. Ovanstående dosrater gäller i höjded med för behållaren.

Dosraten axiellt ovan behållaren har ej beräknats. Det relativt tjocka locket (ca 32 cm Cu) samt ca 25 cm blyfyllning över ök UO<sub>2</sub> medför, att dosraten ovan locket bör vara maximalt av storleksordningen 1 mrem/h.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delges annan eller ejst obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imported to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

4.1

Beräkning av gammadosrat

Gammatransportberäkningarna har utförts med punktkärne-  
koden CYLGAM, referens 7. Den cylindriska källregionen,  
har homogeniserats och därvid erhöles:

UO <sub>2</sub>	4.19 g/cm <sup>3</sup>
Zr <sup>2</sup>	0.90 "-
Cu	0.20 "-
Pb	4.70 "-

Med spektrum och volymkällstyrkor enl tabell 1 erhöles  
följande dosrater:

På kopparbehållaren	17 mrem/h
0.5 m från behållaren	7.2 "-
1.0 m från behållaren	4.6 "-

4.2

Beräkning av neutrondosrat

Neutrontransportberäkningarna har utförts med den endimen-  
sionella S<sub>n</sub>-koden DTF-IV, referens 8.

Kondensering av mikroskopiska tvärsnitt till gruppdito  
har gjorts med datorprogrammet MICO, referens 9. Till  
programmet har använts härd fysikprogrammet BUXY:s 69-  
gruppsbibliotekstape, se referens 10. Vid homogeniseringen  
av källregionen har samma densiteter som i avsnitt 4.1 an-  
vänts. För de tunga nukliderna har följande sammansättning  
använts:

U-235	0.030 g/cm <sup>3</sup>
U-236	0.013 "-
U-238	3.594 "-
Pu-239	0.026 "-
Pu-240	0.009 "-
Pu-241	0.006 "-

Neutronspektret har indelats i 16 grupper. Energigränser  
och motsvarande BUXY-grupper framgår av nedanstående ta-  
bell 3. Vid grupp-kondenseringen har spektret beräknats i  
MICO med hjälp av diffusionsteori. Hänsyn har därvid tagits  
till källregionens buktighet. Grupptvärsnitt för koppar-  
skärmen samt i den blyfyllda kopparcentrumstaven har be-  
räknats i MICO med samma spektrum som källregionen.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller  
delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Övertredelse härav be-  
ivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the  
contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for  
any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ASEA-ATOM

Tabell 3 Gruppstruktur använd i MICO och DTF-IV för kopparskärm

Energigrupp nr	Motsvarande BUXY-grupper	Energigränser eV
1	1	6.07(6)-10.0(6)
2	2	3.68(6)-6.07(6)
3	3	2.23(6)-3.68(6)
4	4	1.35(6)-2.23(6)
5	5	821(3)-1.35(6)
6	6	500(3)- 821(3)
7	7	303(3)- 500(3)
8	8	183(3)- 303(3)
9	9	111(3)- 183(3)
10	10	67.3(3)- 111(3)
11	11	40.9(3)-67.3(3)
12	12	24.8(3)-40.9(3)
13	13	15.0(3)-24.8(3)
14	14	9.12(3)-15.0(3)
15	15-20	367 -9.12(3)
16	21-69	0 - 367

Vid beräkningen med DTF-IV har antagits randvillkoren reflektion i centrum samt vakuum utanför behållaren. Cylindergeometri är förutsatt.

DTF-IV ger utskrift i varje definierad zon av neutronflödestätheten ( $n/cm^2, s$ ). För att erhålla dosrat (mrem/h) har omvandlingsfaktorer ur referens [1] använts. Följande dosrater erhöles (med neutronvolymkällstyrkan 220-520  $n/cm^3, s$ ):

På kopparbehållaren	40-95 mrem/h
0.5 m från behållaren	17-41 "-
1.0 m från behållaren	11-26 "-

5

Referenser

1. BEGAFIP  
Forsmark - Fissionsproduktaktivitet vid olika avklingningstider (74-01-15) (datorkörning).
2. K Lundgren  
Deponerad strålningsenergi utanför kopparkapsel innehållande 499 bränslestavar omgivna av bly  
PM RF 78-27 (1978)
3. K Lundgren  
Beräkning av neutroninducerad aktivitet i konstruktionsmaterial i bränslestavknippe  
PM RF 78-48 (1978)

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Övertiödelste härov be-  
 trivas med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the  
 contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for  
 any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

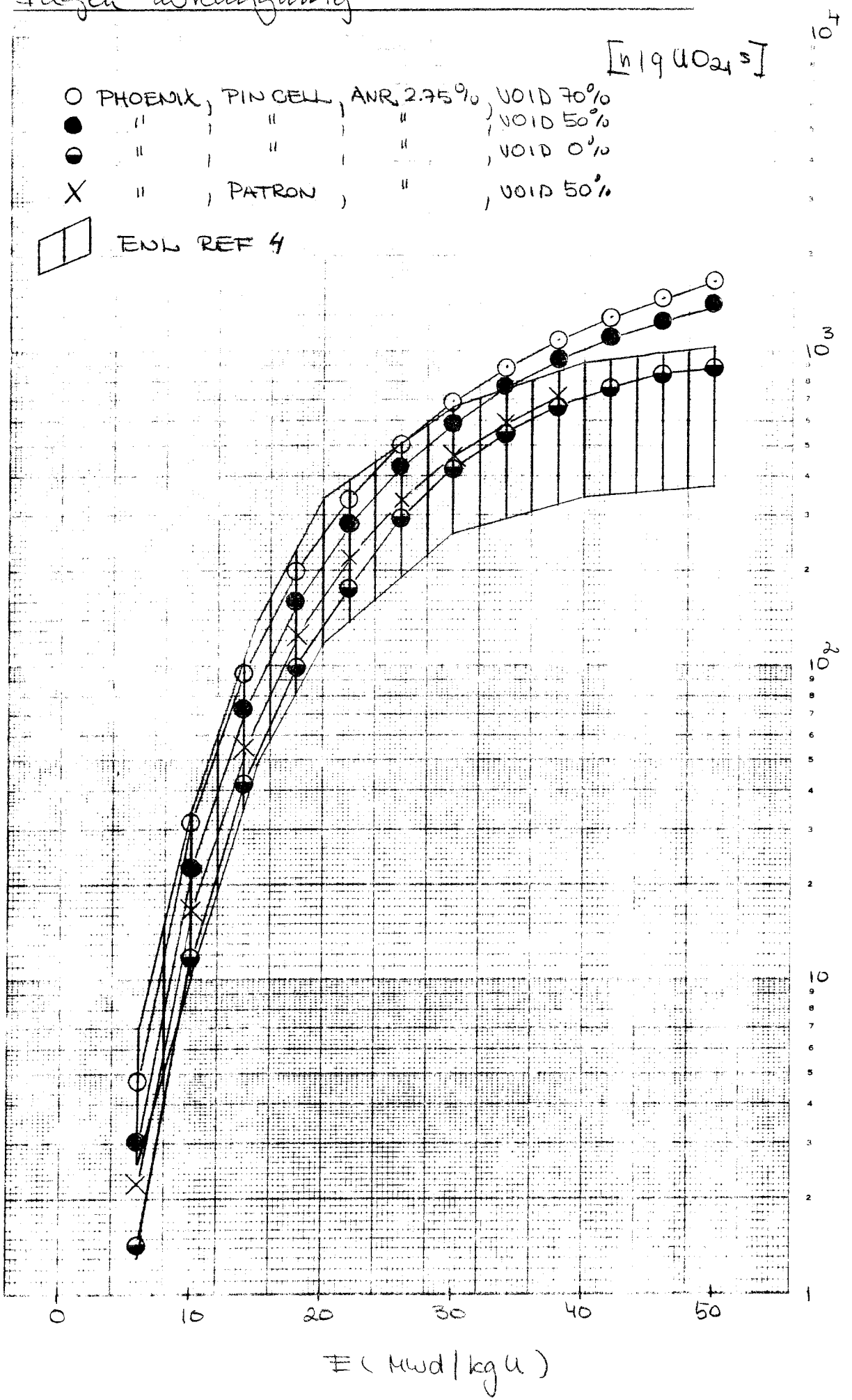
4. H S Bailey et al  
Neutron shielding problems in the shipping of high burnup thermal reactor fuel  
Nuclear Technology, vol 17, March 1973, s 217-224.
5. R Stamm'ler et al  
The PHOENIX computer program for fuel assembly and pin cell calculations  
PM RCA 77-12 (1977).
6. S J Remshaw, E E Ketchen  
Curium Data Sheets  
ORNL-4357, Oak Ridge National Laboratory (1969).
7. K Lundgren  
CYLGAY, CYLGAM och GAMEN - FORTY-program för gammatransportberäkningar runt cylindriska källfördelningar  
TR RF 75-194 (1975).
8. Rune Håkansson  
Instruktion för användande av DTF-IV AE-rapport TPM-FFX-110 (1969).
9. P Behrenz  
Ny version av MICO-programmet R41010  
PM RC 75-57 (1975).
10. M Edenius  
Data available on the BUXY 69-group library tape  
AE-rapport RF 71-187 BUXY-36 (1971).
11. J Elkert  
Strålskärmsfysik  
Studsviks högskolekompendier 2 (1971).

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överrättelse härov beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

SLUK - Neutronkällstyrka från  $\text{Cu-242}$  som funktion av utbränningen

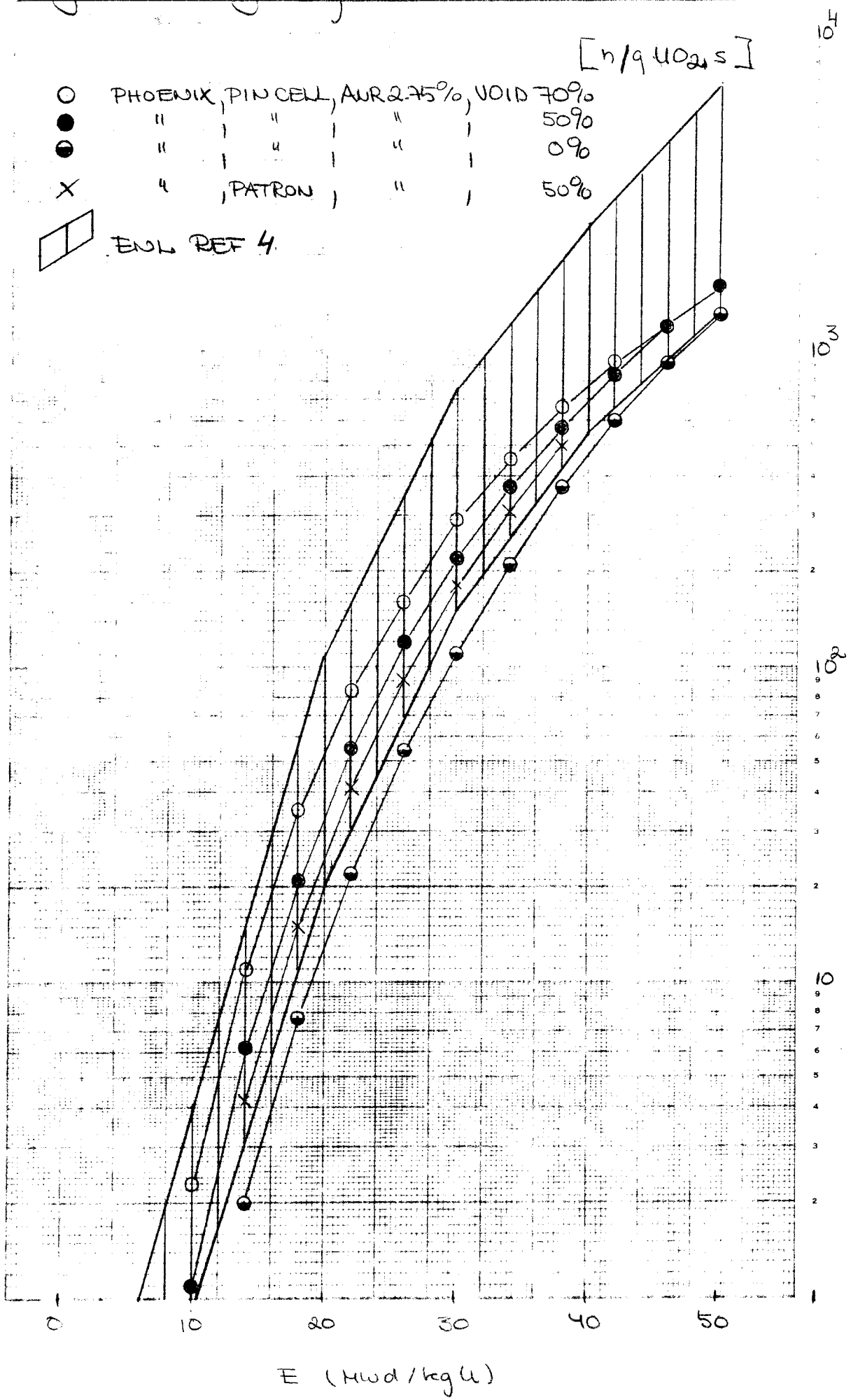
diagram 1

Trogen avklingning



SLIK - Neutronkällstyrka från Cm-244  
 som funktion av utbränningen  
 Ingen avklingning.

diagram



Distribution KBS (10)	Från/From	Datum/Date	Reg.	Page
	RFC	78-01-23	3840	Sida 1
	Författare/Author			
K Lundgren 6021		W		
Granskad/Examined		Godkänd/Approved		
JL		JL		

**Titel/Title**  
Deponerad strålningsenergi utanför kopparkapsel innehållande 499 utbrända bränslestavar omgivna av bly

**Sammanfattning/Abstract**

Den joniserade strålning som tränger ut genom kopparkapselns yta ger genom radiolys upphov till att oxiderande fria radikaler och syre produceras i vattnet. För att kunna ge en kvantitativ bedömning av om radiolysprodukterna genom reaktioner med kopparn kan förstöra kapselns integritet har en uppskattning gjorts av deponerad strålningsenergi i vatten utanför en kopparkapsel från 40 år efter uttagandet ur reaktorn och framåt i tiden (fram till  $10^6$  år).

Den till vatten totalt deponerade energin från gamma- och neutronstrålning blir  $1 \cdot 10^{18}$  resp  $3 \cdot 10^{19}$  MeV efter tiderna  $10^4$  resp  $10^6$  år. Osäkerheten i ovan angivna värden bör maximalt vara en faktor 2.

Den teoretiskt maximala korrosionsavverkningen på en hel kopparkapsel efter  $10^4$  år blir då ca 17 g. I verkligheten blir den säkerligen mycket lägre.

Även den till eventuellt vatten inne bland bränslestavarna deponerade energin från gamma- och neutronstrålning har beräknats. Depositionshastigheten för avklingningstiden  $40^4$  år är  $1.5 \cdot 10^{14}$  eV/g  $H_2O$ , s. Integrerad fram till tiderna  $10^4$  och  $10^6$  år erhålles totalt  $2 \cdot 10^{23}$  resp  $9 \cdot 10^{23}$  eV/g  $H_2O$ . Dessa värden är relevanta så länge eventuellt vatten<sup>2</sup> ej kommer i direkt kontakt med bränslematerialet, då man även måste ta hänsyn till  $\beta$ - och  $\alpha$ -strålningen.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delges annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ASEA-ATOM



Innehållsförteckning

1. Inledning.
2. Källstyrkor.
3. Deponerad strålningsenergi utanför kapseln.
4. Deponerad strålningsenergi innanför kapseln.
5. Effekten av deponerad strålningsenergi.
6. Referenser.
7. Diagram.

1

Inledning

Ett alternativ för omhändertagande av det högaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken är direktdeponering av det utbrända bränslet under jord. Härvid placeras efter en avsvalningsperiod om minst 40 år ca 500 bränslestavar i en kopparkapsel. Den slutliga deponeringen tänkes ske i ett lager huvudsakligen bestående av kvartssand.

Den strålning som tränger ut genom kopparkapselns yta förorsakar bland annat att vattenmolekyler i det omgivande lagret sönderdelas och oxiderande fria radikaler och syre produceras i vattnet. Radiolysprodukterna kan reagera med kopparkapseln och i sämsta fall därmed förstöra skyddsbarriären mellan bränslestavarna och omgivningen. För att kunna ge en kvantitativ bedömning av detta problem har en uppskattning gjorts av deponerad strålningsenergi i vatten utanför en kopparkapsel från 40 år efter utplockandet ur reaktorn och framåt (fram till  $10^6$  år).

Kopparkapseln antages vara 3.65 m hög med inre och yttre diametrarna 35 cm respektive 75 cm. Kopparkapseln antages omgiven av  $\text{SiO}_2$  (torrvolymvikt  $1.45 \text{ ton/m}^3$ ) mättad med vatten (vattenhalt  $0.45 \text{ ton/m}^3$ ).

2

Källstyrkor

Den strålning som är av intresse i detta fall är gammastrålning från klyvningsprodukterna samt neutron- och gammastrålning från de tunga nukliderna, dvs bränsleisotoperna och de nuklider som bildas därur genom successiva neutronabsorptioner och sönderfall (ex Pu, Am, Cm, Th och Ra).

Klyvningsprodukternas gammaeffekt har beräknats med programmet BEGAFIP (ref 1) för en drifttid av 5 år och utbränningen 34 000 MWd/ton U.

För de tunga nukliderna har massorna vid drifttidens slut bestämts med kärnfysikprogrammet PHOENIX (ref 2) för ett realistiskt driftfall med utbränningen 30 000 MWd/ton U. Nuklidmassornas förändring med tiden på grund av de radioaktiva sönderfallen har därefter beräknats med ett enkelt datorprogram, varefter gammaeffekten lätt kan bestämmas. Det visar sig att källan avtar med avklingningstiden fram till drygt 1000 år. Därpå stiger denna effekt på grund av uppbyggnaden av Ra-226 och dess dotterprodukter till ett maximum omkring  $2 \cdot 10^5$  år, för att sedan åter avta. Maximet är flera tiopotenser lägre än begynnelsevärdet efter 10 års avklingning.

Neutronstrålningen härrör från spontan klyvning av nukliderna Cm-244 och Pu-240 samt från alfasönderfall av den sistnämnda nukliden, Am-241 och Pu-239 genom ( $\alpha$ , n)-reaktioner med syret i bränslet. För neutronskärmningen är Cm-244 helt bestämmande, medan Pu-240 på grund av sin långa halveringstid ger det dominerande bidraget till den deponerade neutronenergin.

3

Deponerad strålningseenergi utanför kapseln

Kopparkapseln antas innehålla 499 utbrända stavar från BWR-bränsle. Resterande utrymme inne i kapseln antas vara fyllt med bly. Transporten av gammastrålning från de inneslutna bränslestavarna ut genom kapseln och vidare in i blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten har beräknats med punktkärneprogrammet CYLGAM (ref 3), som ger energidepositionen i vattnet i mrad/h. Dessa resultat har omräknats till eV/g H<sub>2</sub>O,s (1 mrad/h = 1.74·10<sup>7</sup> eV/g,s).

Neutrontransportberäkningarna har utförts med den en-dimensionella S<sub>n</sub>-koden DTF-IV (ref 4). Förutom neutronflödestätheten på olika avstånd utanför kapseln erhålles absorptionsraten (n, γ) i kopparen resp blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten.

Energidepositionen (n,n) till vattnet pga elastisk spridning av snabba neutroner mot väte- och syre-kärnorna i vattnet har beräknats utgående från neutronflödestätheterna erhållna med DTF IV. Därvid har utförts en enkel numerisk integration vari bl a aktuella kärnors spridningstvärnsnitt ingår. Av resultatet framgår, att ca 94 % deponeras i väte och ca 6 % i syre.

Vid absorptionen i kopparen resp blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten erhålles gamma med hög energi. För kopparen erhålles totalt 8.2 MeV per infångning, motsvarande siffra för SiO<sub>2</sub> och vatten-blandningen är 3.3 MeV per infångning. Med hjälp av absorptionsraterna erhållna med DTF IV har gammakällstyrkor i skärmarna erhållits. Med dessa källstyrkor som indata har energidepositionen i vattnet beräknats med datorprogrammet CYLGAM (ref 3).

I diagrammen 1 och 2 redovisas energidepositionen i vattnet som funktion av avklingningstiden. Bidragen från de 3 ovan angivna källorna (γ), (n,n) samt (n,γ), redovisas var för sig. Diagram 1 gäller för en position nära kapseln medan diagram 2 gäller 20 cm från kapseln. Som framgår av diagrammen dominerar gammastrålningsbidraget vid korta samt vid mycket långa avklingningstider. Vid avklingningstider i intervallet 10<sup>2</sup> - 10<sup>4</sup> år dominerar de båda bidragen från neutronstrålningen.

För att erhålla till vattnet deponerad energi fram till en viss avklingningstid har de ovan redovisade deponeringshastigheterna integrerats i tiden från 40 år och framåt. Resultaten redovisas i diagram 3 som funktion av avståndet från kapseln. Av diagram 3 framgår, att (n,n)-bidraget är mera koncentrerat till området nära kapseln än de 2 övriga bidragen.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ASEA-ATOM

För att erhålla till vattnet totalt deponerad energi från kapselytan ut till en viss radie har ovan redovisade integrerade depositions-hastigheter integrerats i rummet. Resultaten redovisas i diagrammen 4 och 5, i diagram 4 som funktion av avståndet från kapseln och i diagram 5 som funktion av avklingningstiden. Av diagrammen framgår, att totalt deponerad energi till vattnet är ca  $1 \cdot 10^{18}$  MeV fram till  $10^4$  år och ca  $3 \cdot 10^{19}$  MeV fram till  $10^6$  år. I det förra fallet dominerar bidraget från neutronstrålningen, medan för  $10^6$  år gammastrålningsbidraget dominerar.

4

#### Deponerad strålningsenergi innanför kapseln

Energidepositionen till vattnet har beräknats med antagande att en liten mängd vatten har läckt in till utrymmet innanför kapseln. Transporten av gammastrålning har beräknats med punktkärnprogrammet CYLGAX (ref 3). Resultaten har omräknats till energidepositions-hastighet på samma sätt som i föregående avsnitt. För uppskattning av energidepositions-hastigheten till vattnet p g a elastisk spridning av snabba neutroner mot väte- och syrekärnorna i vattnet har samma neutrontransportberäkning som i föregående avsnitt använts. Bidraget från neutroninfångningsgamma i olika material har kunnat försummas, då källtermen i centrum av kapseln är låg (termaliserings av neutronerna sker först i området utanför kapseln).

I diagram 6 redovisas energidepositionen till vattnet som funktion av avklingningstiden. Bidragen från de 2 angivna källorna ( $\gamma$ ) samt (n,n) redovisas var för sig. Som framgår av diagrammet dominerar bidraget från gammastrålningen kraftigt.

För att erhålla till vattnet deponerad energi fram till en viss avklingningstid har de ovan redovisade deponerings-hastigheterna integrerats i tiden från 40 år och framåt. Resultaten redovisas i diagram 7 som funktion av avklingningstiden. Vid tiderna  $10^4$  och  $10^6$  år erhålles totalt  $2 \cdot 10^{23}$  resp  $9 \cdot 10^{23}$  eV/g  $H_2O$ .

Förutom gamma- och neutronstrålning utsänder det inneslutna bränslet  $\beta$ - och  $\alpha$ -strålning. Den  $\beta$ -strålning som utsändes har så gott som uteslutande energier  $< 1$  MeV, varför elektronerna inte når genom kapslingsmaterialet (ca 0.8 mm Zircaloy) i någon betydande utsträckning. P g a den låga  $\beta$ -strålningsenergin bör också bidraget från bromsstrålning kunna försummas. Förekommande  $\alpha$ -ener-gier ligger i intervallet 3 - 6 MeV, vilket innebär att även dessa ej når genom kapslingsmaterialet.

De framräknade värdena bör således vara relevanta så länge eventuellt vatten ej kommer i direkt kontakt med bränslematerial, då man även måste ta hänsyn till  $\alpha$ - och  $\beta$ -strålningen.

5

Effekter av deponerad strålningsenergi

I diagram 5 visas som nämnts den i vatten totalt deponerade energin s f a tiden inom en viss radie från kopparkapseln. Den deponerade strålningsenergin är så gott som helt av s k glesjoniserande slag, dvs den lokala deponeringshastigheten är relativt låg. De kemiska effekterna av sådan strålning är väl kända.

I detta fall gäller problemet att beräkna den mängd som bildas i bädden av oxiderande ämnen, som senare ev kan orsaka korrosion på kopparytan. Tänkbara oxiderande ämnen är fritt syre, väteperoxid, ferri-jon och cupri-jon. Det antas att de reagerar med metallisk koppar under bildning av vatten ferrojon och cupro-jon resp.

Den primära strålningskemiska effekten består i bildningen av joniserat vatten och s k hydratiserade elektroner. Dessa ger i sin tur upphov till hydroxylradikaler och väteatomer.

Maximalt tänkbart utbyte av oxiderande ämnen fås om båda dessa molekylfragment ger upphov till sådana. (Normalt är endast hydroxylradikelen oxiderande medan väteatomen verkar reducerande). Ett känt sådant fall är den s k ferrosulfatdosimetern. Den ger ett G-värde (antal bildade  $Fe^{3+}$  per 100 eV deponerad glesjoniserande strålning) av 15 (se ref 5). Det är alltså mycket konservativt att anta detta G-värde; det verkliga är säkerligen betydligt lägre. Bildning av  $Cu^{2+}$  ur  $Cu^+$  kan ske med maximalt detta G-värde.

Om man antar att alla bildade oxiderande ämnen inom en radie av 60 cm från kopparkapseln ger upphov till korrosion på denna, kan nu korrosionsangreppet efter godtycklig tid pga strålningsdeponering beräknas.

Exempel för 10 000 år:

Diagram 5 visar en deponering av  $1.1 \cdot 10^{18}$  MeV (gäller alltså hela kapseln).

Korroderad mängd koppar =

$$= \frac{1.1 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 63}{100 \cdot 6 \cdot 10^{23}} = 17 \text{ g} = 1.9 \text{ cm}^3.$$

Detta motsvarar ett medeldjup på 0.00023 mm eller ett 200 mm djupt hål med en diameter av 3.5 mm. I verkligheten är den korroderade mängden säkerligen mycket mindre.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Övertillståndet härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

6.

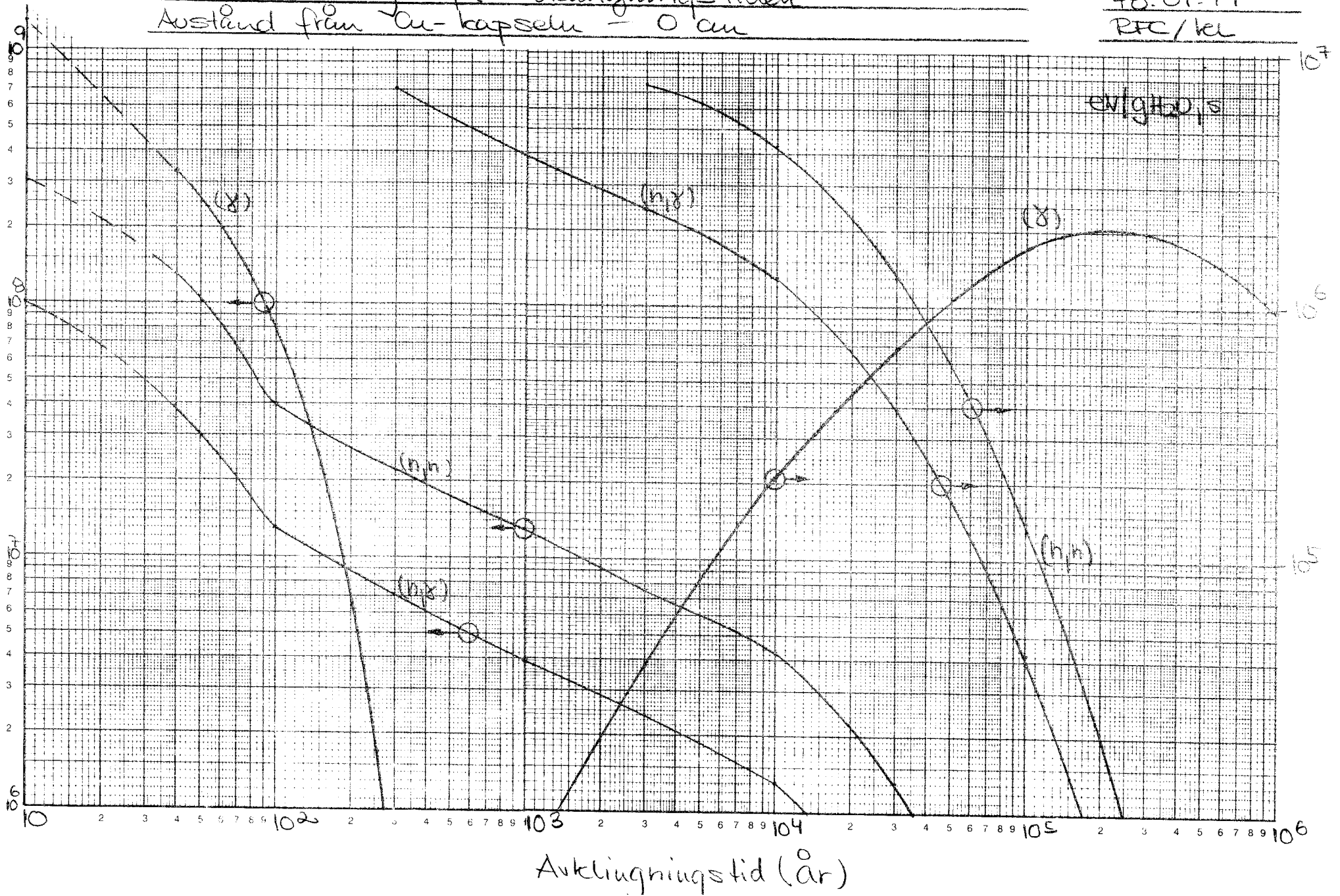
Referenser

1. J Elkert  
 BECAFIP - Ett program för  
 beräkning av klyvningspro-  
 dukternas aktivitet, beta-  
 och gammaeffekter  
 AE-RF-72-374  
 1972-11-30.
  
2. R Stamm'ler et al.  
 The PHOENIX computer program  
 for fuel assembly and pin cell  
 calculations  
 PM RCA 77-12.
  
3. K Lundgren  
 CYLGAX, CYLGAM och GAMEN -  
 Fortyprogram för gammatransport-  
 beräkningar runt cylindriska käll-  
 fördelningar  
 TR RF 75-194  
 1975-05-26.
  
4. R Håkansson  
 Instruktion för användande  
 av DTF-IV  
 AE-TPM-FFX-110  
 1969-02-25.
  
5. A J Swallow  
 Radiation chemistry,  
 an introduction  
 Longman Group Limited  
 London (1973).

Denna handling är ej utan vårt medgivande kopierad. Den får ej heller  
 delges annan eller släkt obehörigen användas. Överrättelse härav be-  
 träffas med straff av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the  
 content thereof must not be imparted to a third party nor be used for  
 any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. ASEA-ATOM

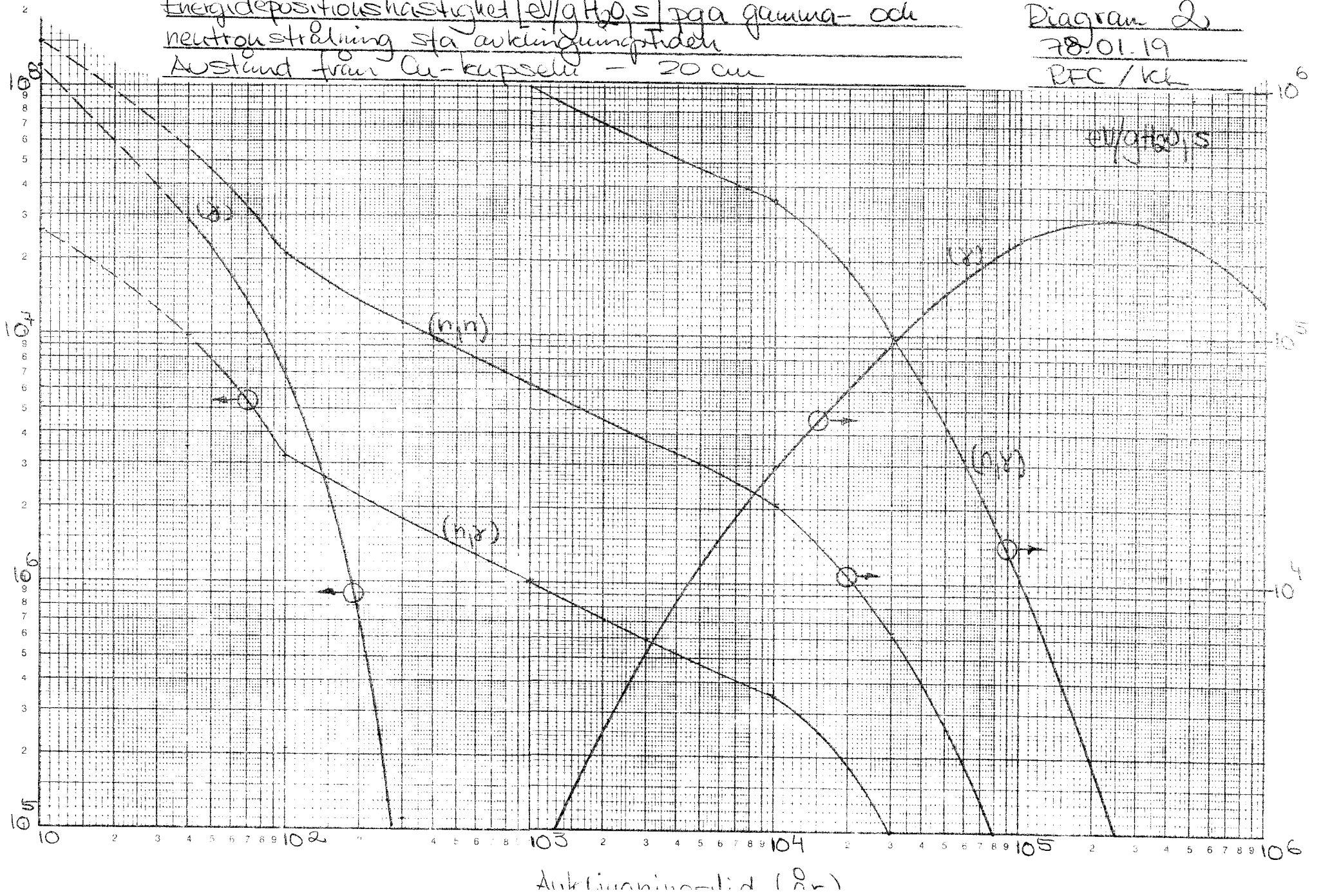
Energidepositions hastighet [ev/gH<sub>2</sub>O, s] pga gamma- och neutronstrålning sta avklingningstiden  
 Avstånd från Cu-kapseln = 0 cm

Diagram 1  
 78.01.19  
 RFC/kl



Energidepositions hastighet [eV/gH<sub>2</sub>O.s] pga gamma- och  
 neutronstrålning ska avklingnings tiden  
 Avstånd från Cu-kapseln - 20 cm

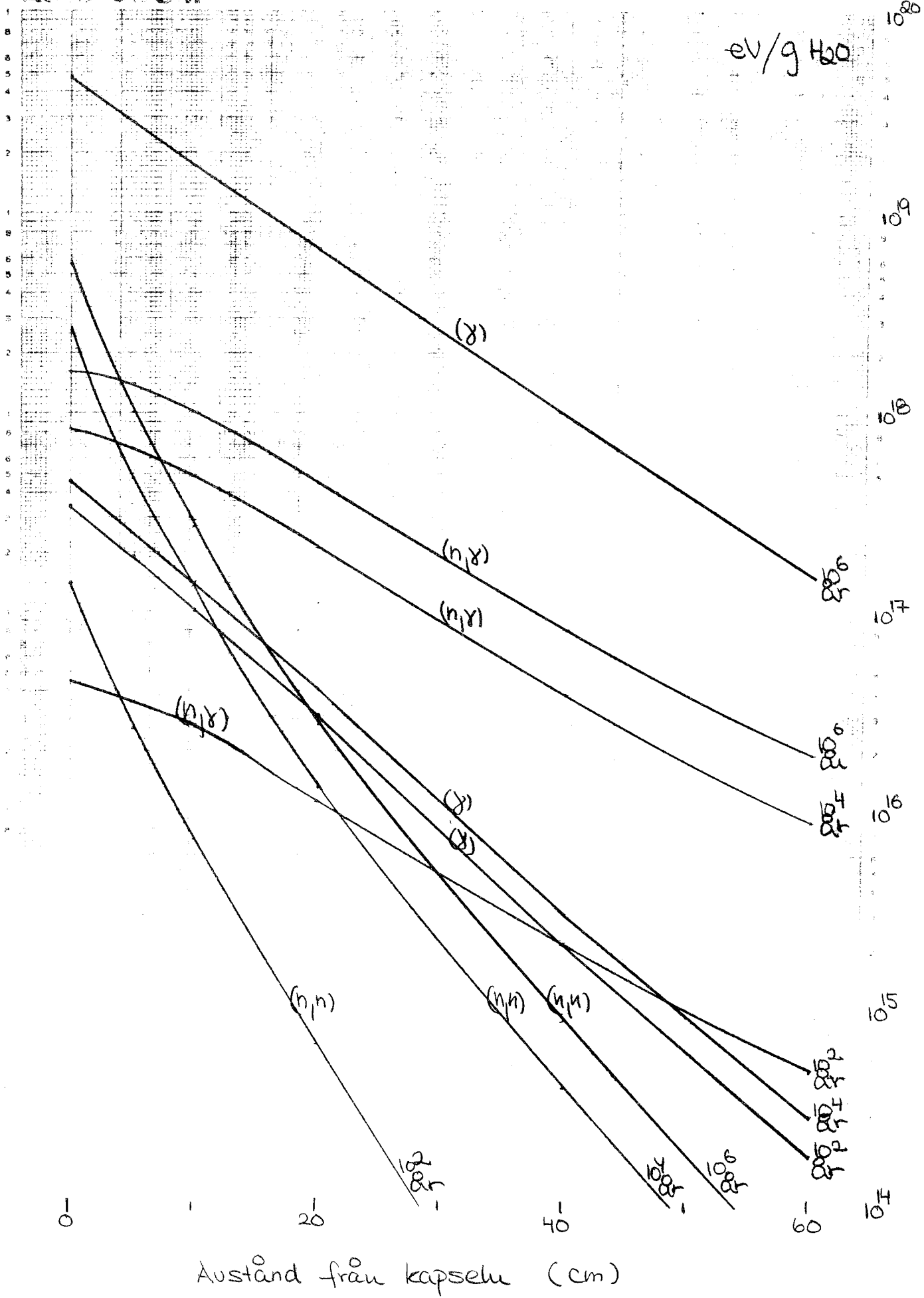
Diagram 2  
 78.01.19  
 RFC / kcl





Integrerad energideposition [eV/g H<sub>2</sub>O] pga gamma- och neutronstrålning ska avstånd från kapseln  
 Avdningstider: 40-100, 40-10<sup>4</sup> samt 40-10<sup>6</sup> år

Diagram 3  
 78.01.19  
 BFC / ka



Integrerad energideposition i vatten (MeV) pga  
 gamma- & neutronstrålning ska avståndet från kapseln  
 sönderkningsperioder:  $40 \cdot 10^2$ ,  $40 \cdot 10^4$  samt  $40 \cdot 10^6$  år  
 AS 10/10/11

Diagram 4  
 78.01.20  
 BFC/kl  
 $10^{20}$

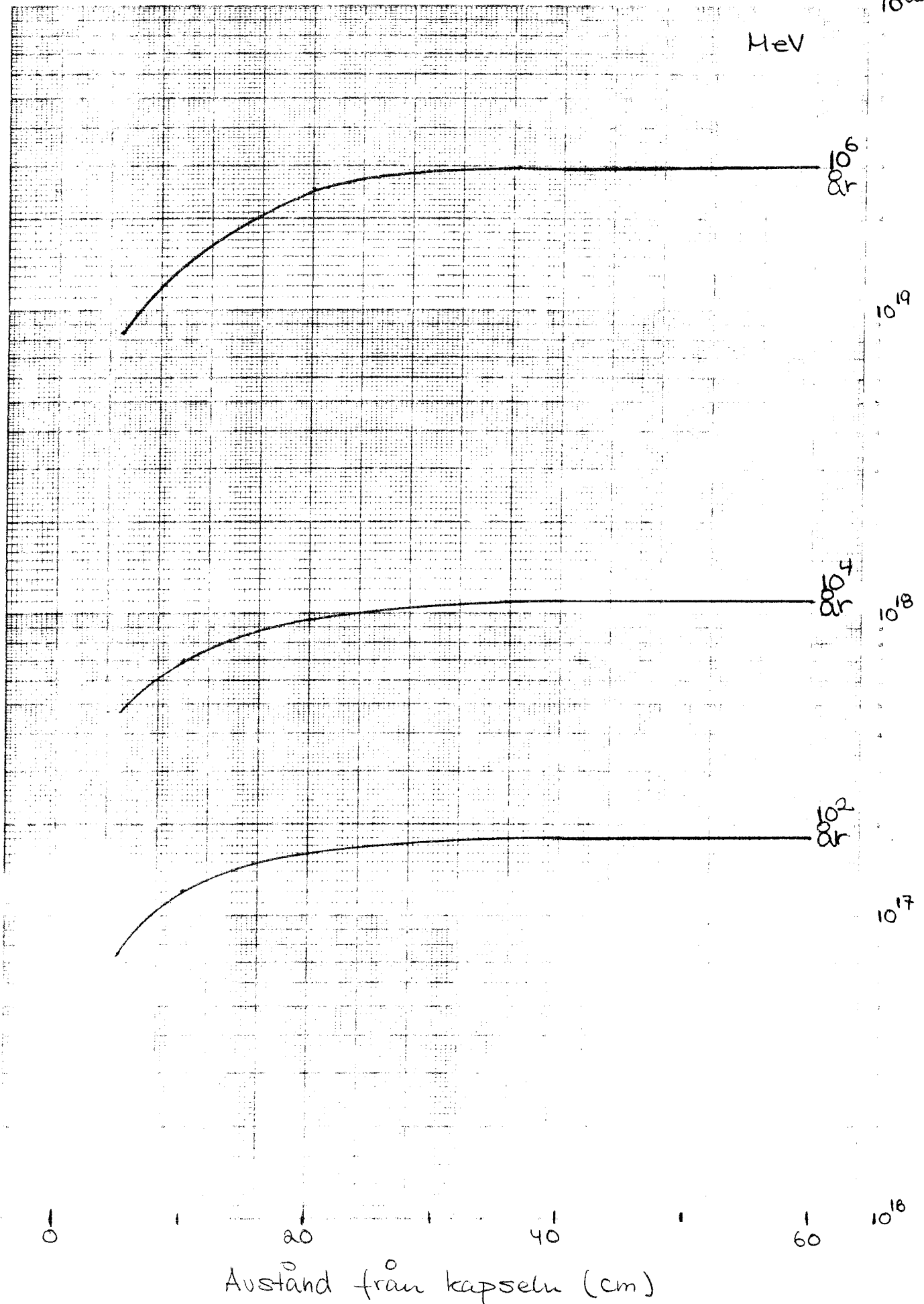
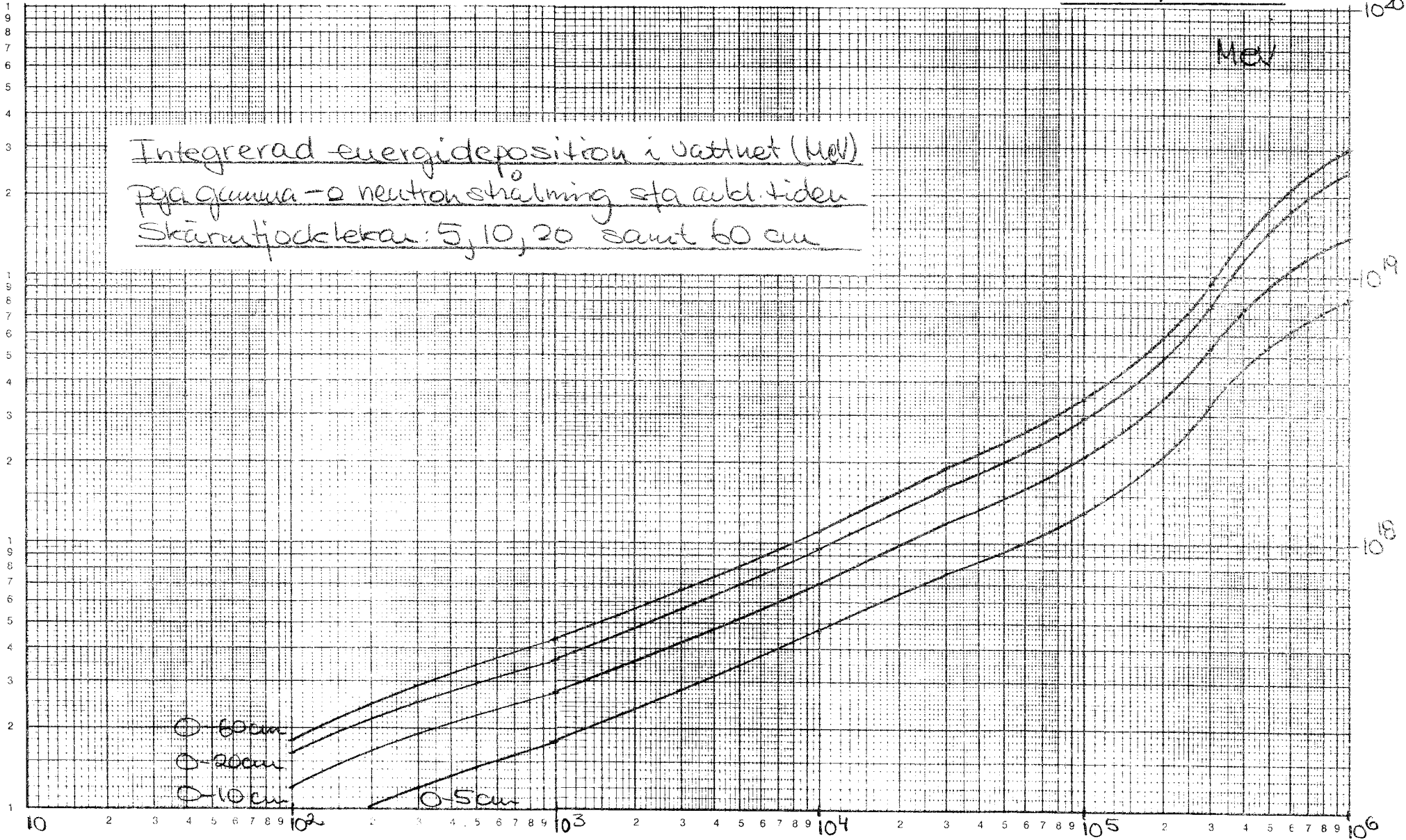


Diagram 5  
 78.01.20  
 RFC/KL

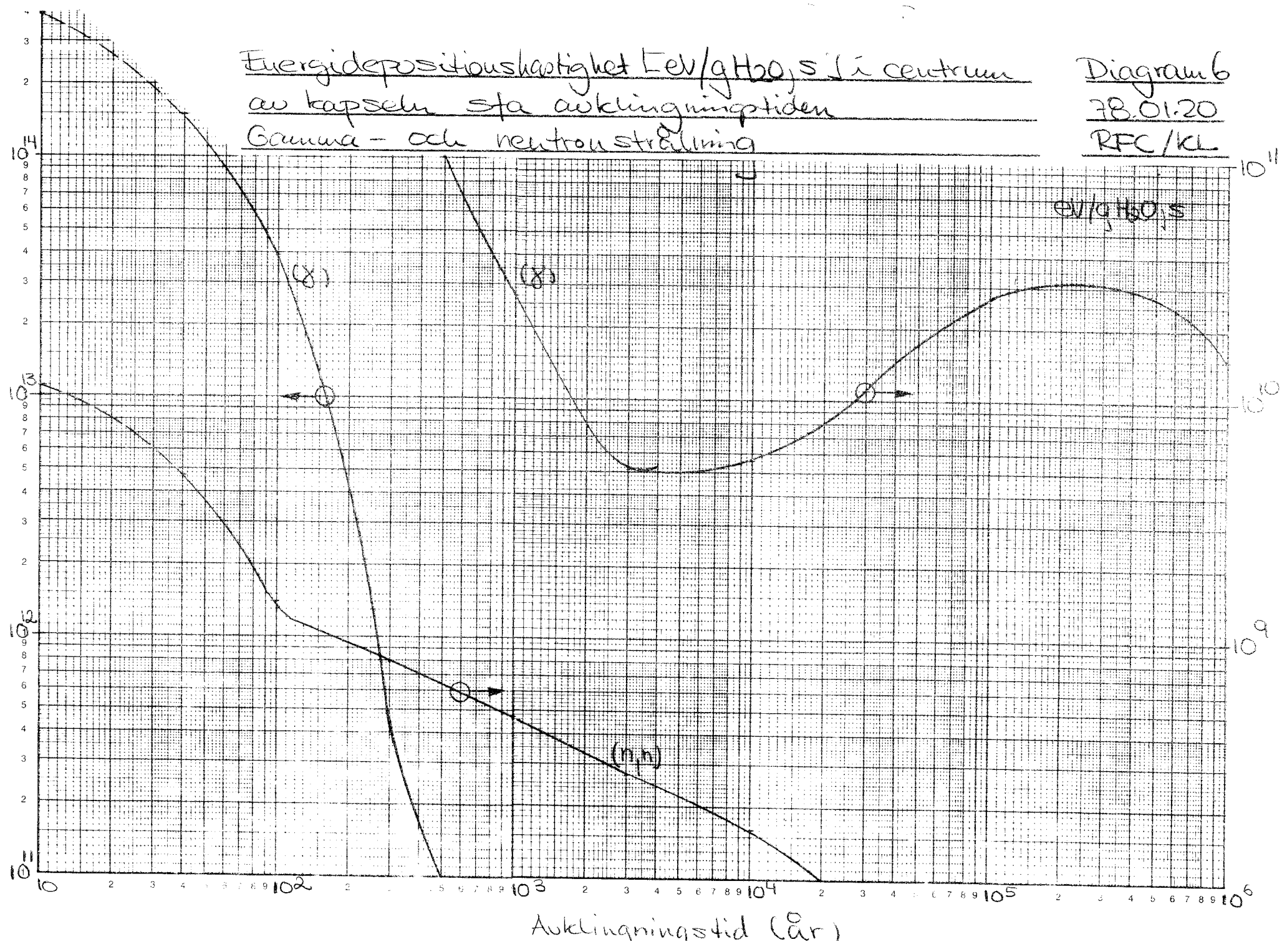


Integrerad energideposition i vattnet (MeV)  
för gamma- och neutronstrålning på avl. tiden  
Skärmtjocklekar: 5, 10, 20 samt 60 cm

Auklingstid (år)

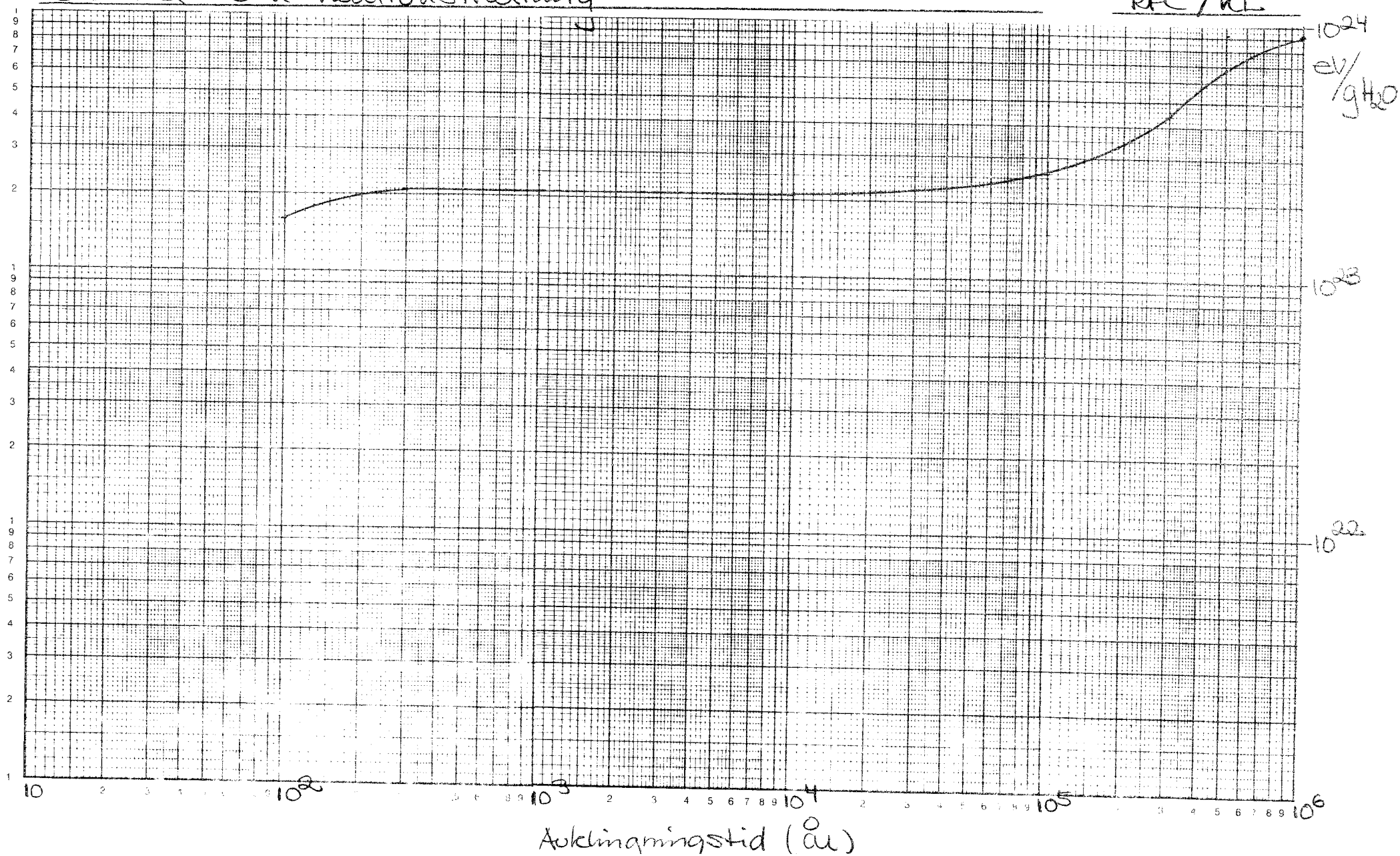
Energidepositions-kraftighet  $E_{ev/gH_2O,s}$  i centrum  
av kapseln sta avklingningstiden  
Gamma- och neutronstrålning

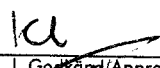
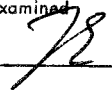
Diagram 6  
78.01.20  
RFC/KL



Integrerad energideposition [eV/g H<sub>2</sub>O] i centrum av  
kapseln s<sup>ta</sup> avklingningstiden  
Gamma- och neutronstrålning

Diagram 7  
79.01.20  
RFC/KCL



Distribution Korrosionsinstitutets referensgrupp	Från/From	Datum/Date	Reg.	Page Sida
	RFC	77-11-28	3840	
	Författare/Author K Lundgren 6021		 Godkänd/Approved	
Granskad/Examined				
Titel/Title Deponerad strålningsenergi utanför blykapsel innehållande avfallet från upparbetat kärnbränsle				
Sammanfattning/Abstract				

Den joniserande strålning som tränger ut genom blykapselns yta ger genom radiolys upphov till att oxiderande fria radikaler och syre produceras i vattnet. För att kunna ge en kvantitativ bedömning av om radiolysprodukterna kan förstöra kapselns integritet har en uppskattning gjorts av deponerad strålningsenergi i vatten utanför kapseln från 40 år efter uttagandet ur reaktorn och framåt i tiden (fram till  $10^6$  år).

Den till vatten totalt deponerade energin från gamma- och neutronstrålning blir  $1 \cdot 10^{18}$  och  $4 \cdot 10^{18}$  MeV efter tiderna  $10^4$  resp  $10^6$  år. Osäkerheten i ovan angivna värden bör maximalt vara en faktor 2.

Innehållsförteckning

1. Inledning
2. Källstyrkor
3. Deponerad strålningsenergi utanför kapseln
4. Effekter av deponerad strålningsenergi
5. Referenser
6. Diagram

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. **ASEA-ATOM**

This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. **ASEA-ATOM**

## 1

Inledning

Ett alternativ för omhändertagande av det högaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken är upparbetning, ingjutning i glas samt därefter strålskärning av glasmassan genom placering i kapsel av bly. Upparbetning antas ske efter 10 år efter uttagande ur reaktorn. Efter en avsvallningsperiod om 30 år antas kapslarna slutligt deponeras i ett lager huvudsakligen bestående av kvartssand.

Den strålning som tränger ut genom kapselns yta förorsakar bland annat att vattenmolekyler i det omgivande lagret sönderdelas och oxiderande fria radikaler och syre produceras i vattnet. Radiolysprodukterna kan reagera med kapseln och i sämsta fall därmed förstöra skyddsbarriären mellan avfallet och omgivningen. För att kunna ge en kvantitativ bedömning av detta problem har en uppskattning gjorts av deponerad strålningsenergi i vatten utanför en kapsel från 40 år efter utplockandet ur reaktorn och framåt (fram till  $10^6$  år).

Blykapseln antages vara 1.50 m hög med inre och yttre diametrarna 40 cm respektive 60 cm. Bly antages omgiven av  $\text{SiO}_2$  (torrvolymvikt  $1.45 \text{ ton/m}^3$ ) mättad med vatten (vattenhalt  $0.45 \text{ ton/m}^3$ ). Glaset innehållande avfallet antages ha densiteten  $2.8 \text{ ton/m}^3$ .

## 2

Källstyrkor

Den strålning som är av intresse i detta fall är gammastrålning från klyvningsprodukterna samt neutron- och gammastrålning från de tunga nukliderna, d v s bränsleisotoperna och de nuklider som bildas därur genom successiva neutronabsorptioner och sönderfall (ex Pu, Am, Cm, Th och Ra).

Klyvningsprodukternas gammaeffekt har beräknats med programmet BEGAFIP (ref 1) för en drifttid av 5 år och utbränningen  $34\ 000 \text{ MWd/ton U}$ .

För de tunga nukliderna har massorna vid drifttidens slut bestämts med hård fysikprogrammet PHOENIX (ref 2) för ett realistiskt driftfall med utbränningen  $30\ 000 \text{ MWd/ton U}$ . Nuklidmassornas förändring med tiden på grund av de radioaktiva sönderfallen har därefter beräknats med ett enkelt datorprogram, varefter gammaeffekten lätt kan bestämmas. Vid denna beräkning har antagits, att vid tidpunkten för upparbetningen d v s efter 10 år, allt utom 0.2 % av uranet samt 0.5 % av plutoniet avlägsnas. Övriga tunga nuklider antas utan reduktion medfölja avfallet. Det visar sig att källan avtar med avklingningstiden fram till drygt 1000 år. Därpå stiger denna effekt på grund av uppbyggnaden av Ra-226 och dess dotterprodukter till ett maximum omkring  $2 \cdot 10^3$  år, för att sedan åter avta. Maximet är flera tiopotenser lägre än begynnelsevärdet efter 10 års avklingning.



Neutronstrålningen härrör från spontan klyvning av nukliderna Cm-244 och Pu-240 samt från alfasönderfall av den sistnämnda nukliden, Am-241 och Pu-239 genom ( $\alpha$ , n)-reaktioner med syret i bränslet. För neutronsörmskärningen är Cm-244 helt bestämmande, medan Am-241 på grund av sin långa halveringstid ger det dominerande bidraget till den deponerade neutronenergin.

3

Deponerad strålningsenergi utanför kapseln

Kapseln antas innehålla glasingjutet avfall från upparbetat BWR-bränsle svarande mot 1 ton anrikat uran. Transporten av gammastrålning från det inneslutna avfallet ut genom kapseln och vidare in i blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten har beräknats med punktkärneprogrammet CYLGAM (ref 3), som ger energidepositionen i vattnet i mrad/h. Dessa resultat har omräknats till eV/g H<sub>2</sub>O, s (1 mrad/h = 1.74·10<sup>7</sup> eV/g, s).

Neutrontransportberäkningarna har utförts med den endimensionella S<sub>n</sub>-koden DTF-IV (ref 4). Förutom neutronflödestätheten på olika avstånd utanför kapseln erhålles absorptionsraten (n,  $\gamma$ ) i blyet resp blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten.

Energidepositionen (n, n) till vattnet p g a elastisk spridning av snabba neutroner mot väte- och syre-kärnorna i vattnet har beräknats utgående från neutronflödestätheterna erhållna med DTF IV. Därvid har utförts en enkel numerisk integration vari bl a aktuella kärnors spridningstvärsnitt ingår. Av resultatet framgår, att ca 94 % deponeras i väte och ca 6 % i syre.

Vid absorptionen i blyet resp blandningen av SiO<sub>2</sub> och vatten erhålles gamma med hög energi. För blyet erhålles totalt 7.3 MeV per infångning, motsvarande siffra för SiO<sub>2</sub> och vatten-blandningen är 3.3 MeV per infångning. Med hjälp av absorptionsraterna erhållna med DTF IV har gammakällstyrkor i skärmarna erhållits. Med dessa källstyrkor som indata har energidepositionen i vattnet beräknats med datorprogrammet CYLGAM (ref 3).

I diagrammen 1 och 2 redovisas energidepositionen i vattnet som funktion av avklingningstiden. Bidragen från de 3 ovan angivna källorna ( $\gamma$ ), (n, n) samt (n, $\gamma$ ), redovisas var för sig. Diagram 1 gäller för en position nära kapseln medan diagram 2 gäller 20 cm från kapseln. Som framgår av diagrammen dominerar gammastrålningsbidraget vid korta samt vid mycket långa avklingningstider. Vid avklingningstider i intervallet 300 - 10<sup>4</sup> år dominerar de båda bidragen från neutronstrålningen.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

För att erhålla till vattnet deponerad energi fram till en viss avklingningstid har de ovan redovisade deponeringshastigheterna integrerats i tiden. Resultaten redovisas i diagram 3 som funktion av avståndet från kapseln. Av diagram 3 framgår, att (n, n)-bidraget är mera koncentrerat till området nära kapseln än de 2 övriga bidragen.

För att erhålla till vattnet totalt deponerad energi från kapselytan ut till en viss radie har ovan redovisade integrerade depositionshastigheter integrerats i rummet. Resultaten redovisas i diagrammen 4 och 5, i diagram 4 som funktion av avståndet från kapseln och i diagram 5 som funktion av avklingningstiden. Av diagrammen framgår, att totalt deponerad energi till vattnet är ca  $1 \cdot 10^{18}$  MeV fram till  $10^4$  år och ca  $4 \cdot 10^{18}$  MeV fram till  $10^6$  år. Bidraget från gammastrålningen dominerar i bägge fallen.

4  
Effekter av deponerad strålningsenergi

I PM RF 77-404 redovisades motsvarande beräkningar för fallet direktdeponering med kopparkapsel. I detta fall kan man konservativt översätta deponerad energimängd till korroderad mängd koppar. Så länge titankapseln är intakt är en motsvarande beräkning för det här aktuella fallet meningslös.

I det fall titankapseln är penetrerad kan man emellertid göra en med kopparfallet analog beräkning betr korroderad blymängd. En med RF 77-404 (s 5) analog beräkning ger en korroderad blymängd av:

$$\frac{1.1 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 207}{100 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 2} = 28 \text{ g}$$

efter 10 000 år ( $1.1 \cdot 10^{18}$  MeV deponerat).

5  
Referenser

1. J Elkert  
BEGAFIP - Ett program för beräkning av klyvningsprodukternas aktivitet, beta- och gammaeffekter  
AE-RF-72-374  
1972-11-30.
2. R Stamm'ler et al.  
The PHOENIX computer program for fuel assembly and pin cell calculations  
PM RCA 77-12.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller elfest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA-ATOM  
 This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Controvention will be prosecuted. ASEA-ATOM

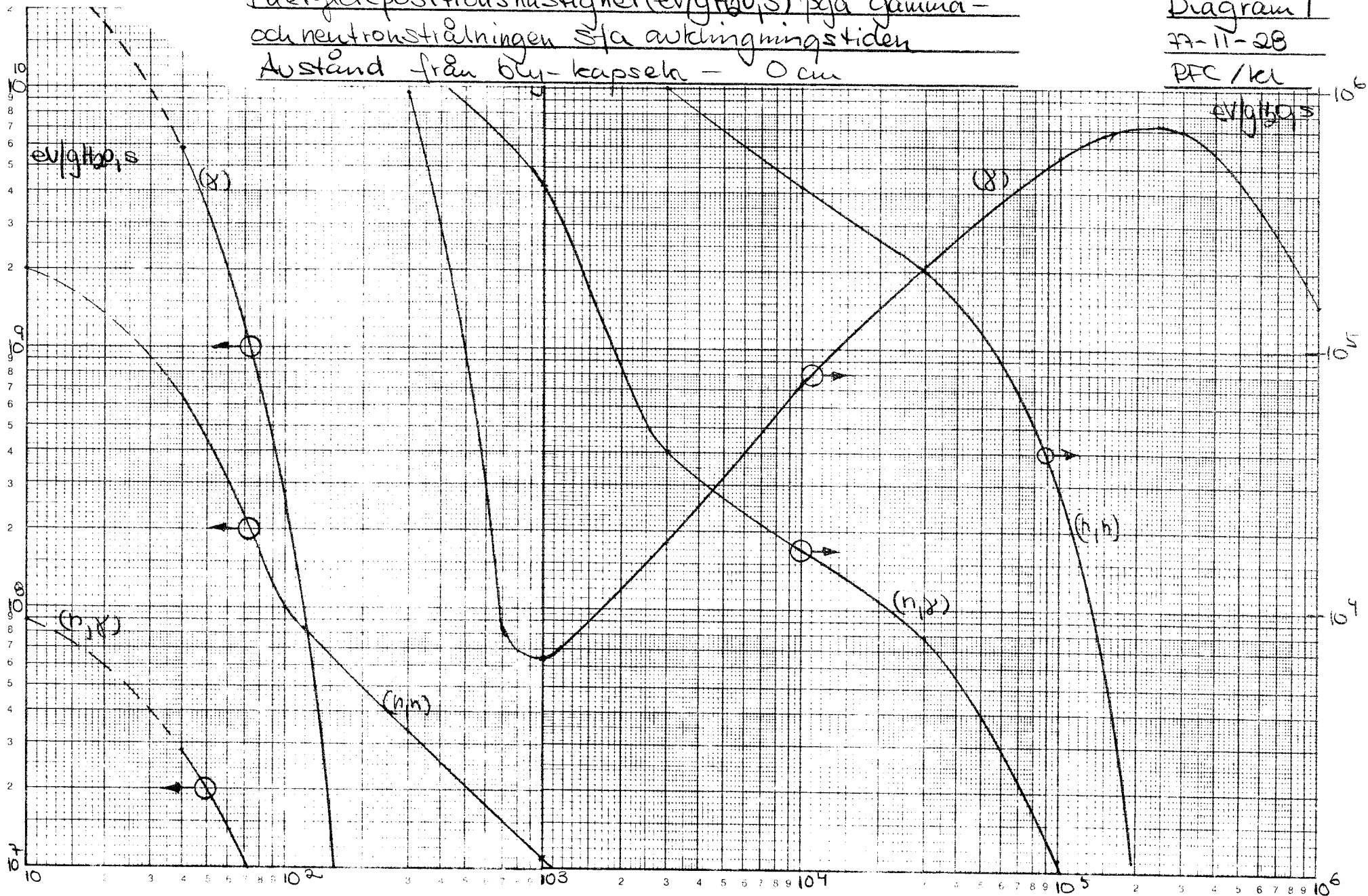
3. K Lundgren  
CYLGAX, CYLGAM och GAMEN -  
Fortyprogram för gammatrans-  
portberäkningar runt cylind-  
riska källfördelningar  
TR RF 75-194  
1975-05-26.
  
4. R Håkansson  
Instruktion för användande  
av DTF-IV  
AE-TPM-FFX-110  
1969-02-25.

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. **ASEA-ATOM**

This document must not be copied without our written permission, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose. Contravention will be prosecuted. **ASEA-ATOM**

Energidepositions hastighet (eV/gH<sub>2</sub>O, s) pga gamma- och neutronstrålningen 5fa avklingningstiden  
Avstånd från bly-kapseln - 0 cm

Diagram 1  
 77-11-28  
 BFC/KC

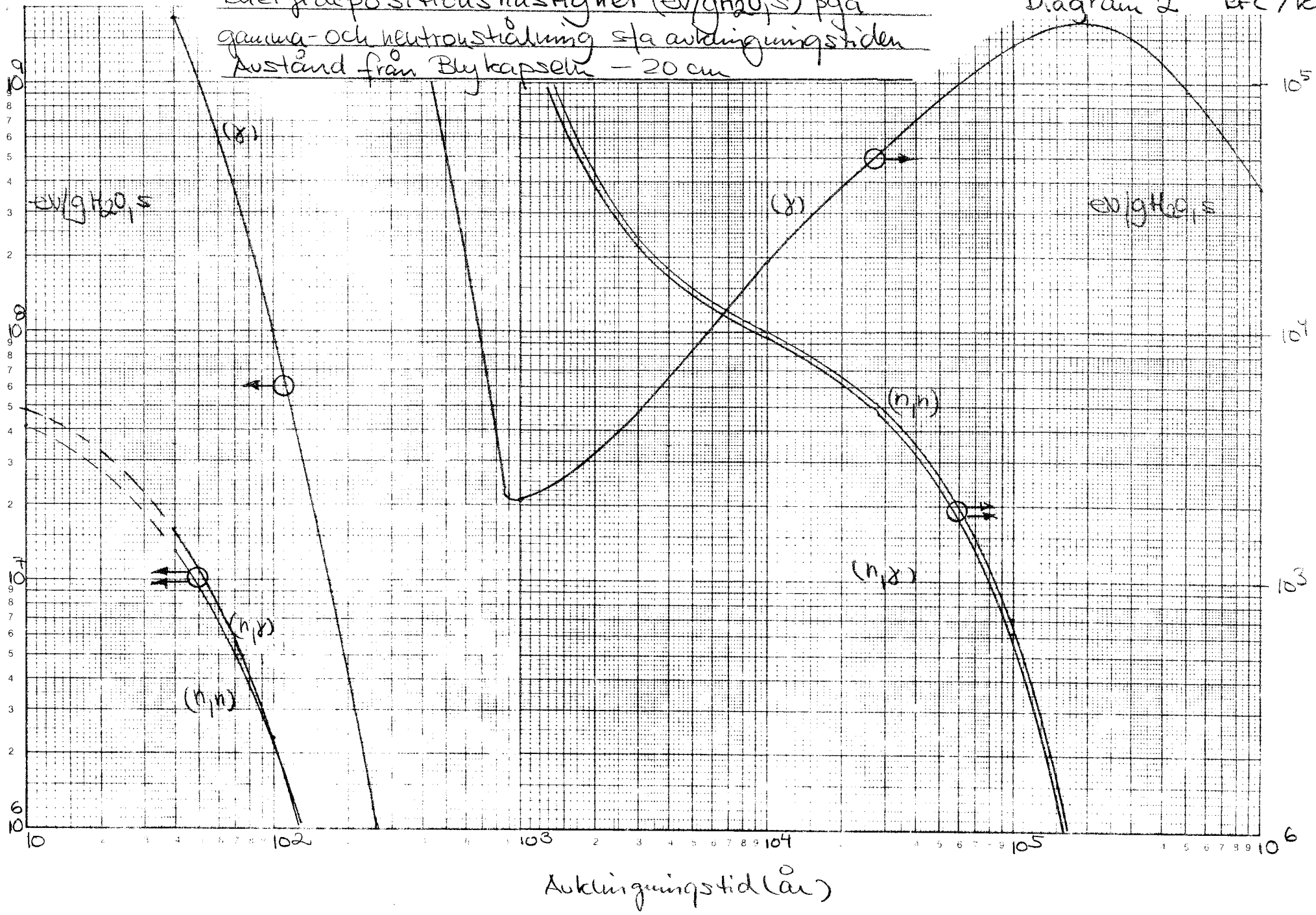


Avklingningstid (s)

Energidepositions hastighet (eV/gH<sub>2</sub>O, s) pga  
 gamma- och neutronstrålning s:a avklingningstiden  
 Avstånd från Blykapseln - 20 cm

Diagram 2

771128  
 RFC / kl

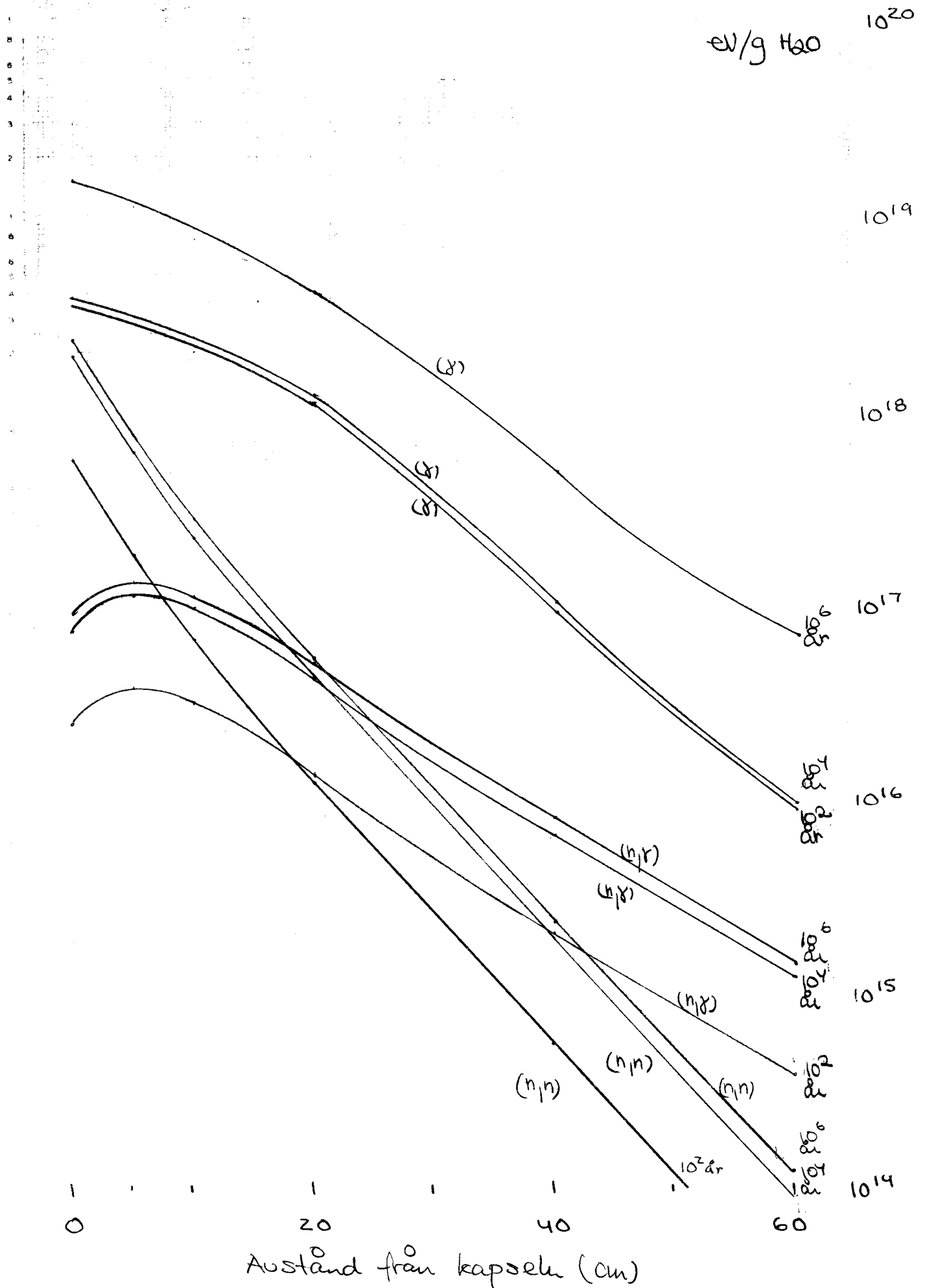


Integrerad energideposition (eV/g H<sub>2</sub>O) pga gamma- och neutronstrålning ska avståndet från kapseln  
 Avklingningstider: 10<sup>2</sup>, 10<sup>4</sup>, samt 10<sup>6</sup> år

Diagram 3

77-11-28

RFC / ka

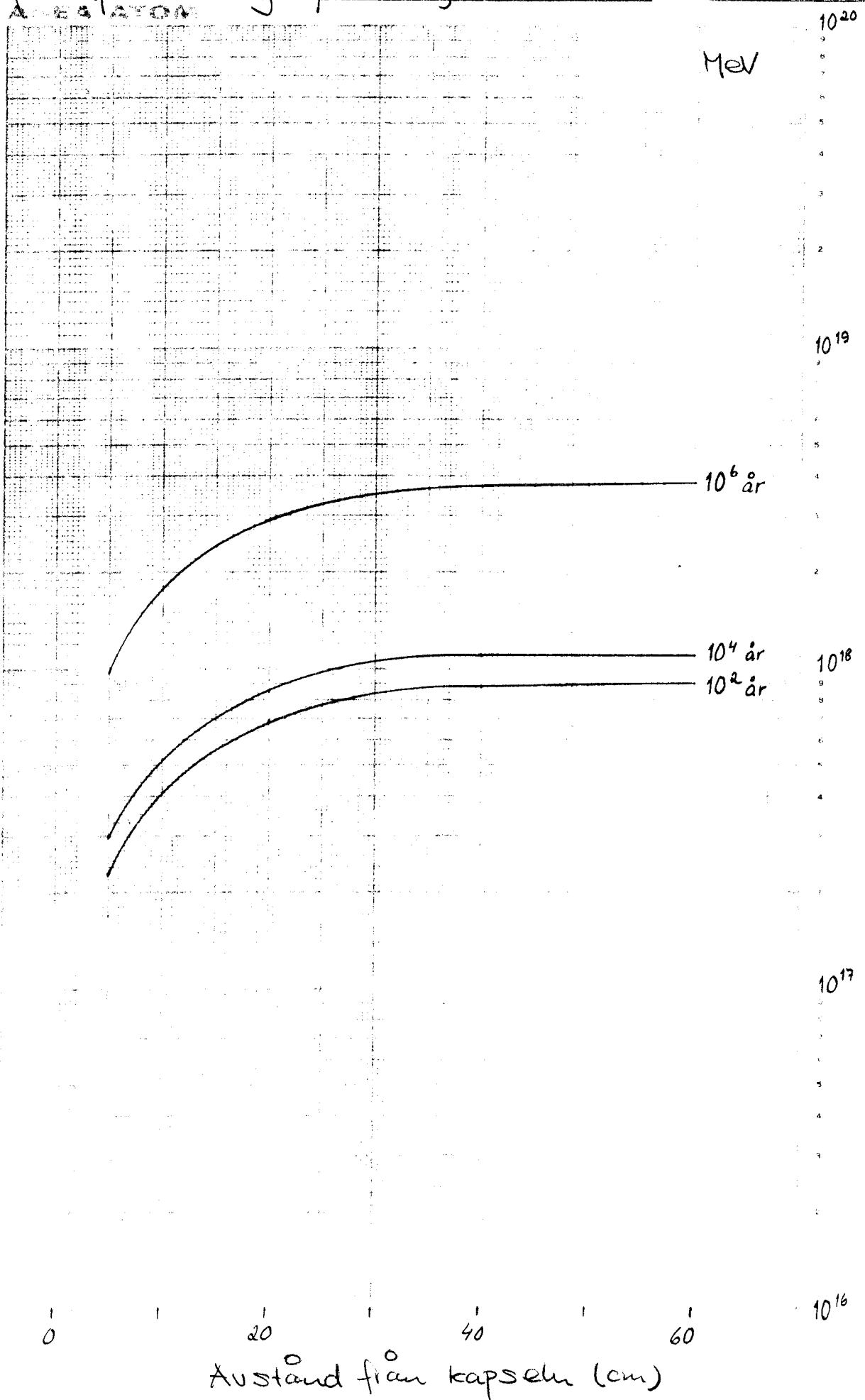


Integrerad energideposition till vattnet (MeV)  
pga gamma- och neutronstrålning ska avståndet  
från kapseln: Avklingningstider:  $10^2$ ,  $10^4$  samt  $10^6$  år

Diagram 4

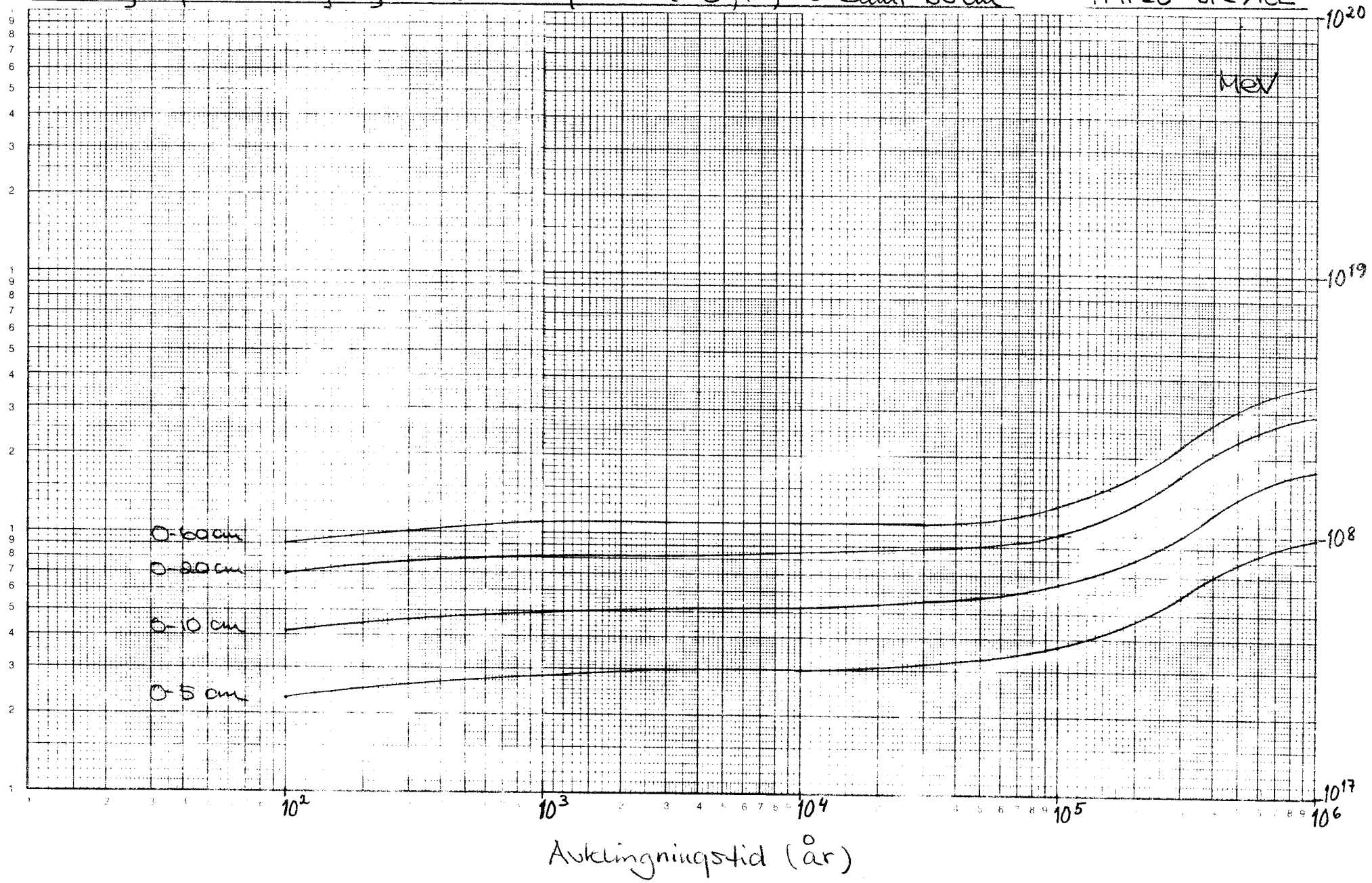
77-11-28

BFC / kl



Integrerad energideposition till vattnet (MeV) pga gamma- och neutron-  
strålning sfa avklingningstiden. Skärutjocklekar 5, 10, 20 samt 60 cm

Diagram 5  
77-11-28 BFC/KL





## FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN  
Nils Kjellbert  
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial  
Sven Knutsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans  
Arvid Jacobsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans  
Arvid Jacobsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1  
Roland Blomqvist  
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase 1, State of the art and detailed study plan  
Ulf Lindblom  
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS  
Del 1 Litteraturgenomgång  
Del 2 Beräkningar  
Kim Ekberg  
Nils Kjellbert  
Göran Olsson  
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium  
Hans Häggblom  
AB Atomenergi 77-03-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model  
Bertil Grundfelt  
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall  
Sture Henriksson  
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg  
Sven G Bergström  
Göran Fagerlund  
Lars Rombén  
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering  
Ragnar Gelin  
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall  
Rapport 2  
Roland Blomquist  
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring  
Åke Hultgren  
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements  
Arne Bjerhammar  
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden  
Nils-Axel Mörner  
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar  
Robert Lagerbäck  
Herbert Henkel  
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne  
Kennert Röshoff  
Erik Lagerlund  
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972  
Ota Kulhánek  
Rutger Wahlström  
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain  
situation in tunnels or bore holes with radioactive con-  
sisters embedded in a bentonite/quartz buffer mass  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass  
A model study  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och akti-  
nider från en cylinder av franskt glas  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi  
Ingemar Larsson KTH  
Tom Lundgren SGI  
Ulf Wiklander SGU  
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan  
Kjell Pettersson  
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing  
properties of natural zeolites  
Arvid Jacobsson  
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt  
Sven Knutsson  
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg  
Ove Stephansson  
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository  
Ivars Neretnieks  
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda  
för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27  
samt kompletterande yttranden.  
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 32 Egenskaper hos bentonitbaserat buffertmaterial  
Long term mineralogical properties of  
bentonite/quartz buffer substance  
Arvid Jacobsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-06-10
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer  
masses  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-10-19
- 34 Tillverkning av bly-titan kapsel  
Folke Sandelin AB  
VBB  
ASEA-Kabel  
Institutet för metallforskning  
Stockholm november 1977
- 35 Project for the handling and storage of vitrified high-  
level waste  
Saint Gobain Techniques Nouvelles October, 1977
- 36 Sammansättning av grundvatten på större djup i  
granitisk berggrund  
Jan Rennerfelt  
Orrje & Co, Stockholm 1977-11-07
- 37 Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts  
Hans Fagerström, VBB  
Björn Lundahl, Stabilator  
Stockholm oktober 1977
- 38 Utformning av bergrumsanläggningar  
Alf Engelbrektson, VBB  
Arne Finné, KBS  
Stockholm december 1977
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering  
ASEA-ATOM  
VBB  
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna  
radioaktiva ämnen  
Ronny Bergman  
Ulla Bergström  
Sverker Evans  
AB Atomenergi 1977-12-20
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.  
Lagar, normer och bedömningsgrunder  
Christina Gyllander  
Siegfried F Johnson  
Stig Rolandson  
AB Atomenergi och ASEA-ATOM 1977-10-13

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall  
Ann-Margret Ericsson  
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar  
Bertil Grundfelt  
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas  
Tibor Lakatos  
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3  
Roland Blomquist  
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för slutförvar för använt bränsle  
Taivo Tarandi  
VBB
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser  
John Stokes  
Roger Thunvik  
Inst för kulturteknik KTH maj 1978
- 48 The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge  
Graham Swan  
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva  
Hans Carlsson  
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Lakningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock  
F Ringdal  
H Gjøystdal  
E S Husebye  
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water  
H Häggblom  
AB Atomenergi 1977-09-14
- 53 Mätning av dissusionshastighet för silver i lera-sand-blandning  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15

- 54 Groundwater movements around a repository
- 54:01 Geological and geotechnical conditions  
Håkan Stille  
Anthony Burgess  
Ulf E Lindblom  
Hagconsult AB september 1977
- 54:02 Thermal analyses  
Part 1 Conduction heat transfer  
Part 2 Advective heat transfer  
Joe L Ratigan  
Hagconsult AB september 1977
- 54:03 Regional groundwater flow analyses  
Part 1 Initial conditions  
Part 2 Long term residual conditions  
Anthony Burgess  
Hagconsult AB oktober 1977
- 54:04 Rock mechanics analyses  
Joe L Ratigan  
Hagconsult AB september 1977
- 54:05 Repository domain groundwater flow analyses  
Part 1 Permeability perturbations  
Part 2 Inflow to repository  
Part 3 Thermally induced flow  
Joe L Ratigan  
Anthony S Burgess  
Edward L Skiba  
Robin Charlwood
- 54:06 Final report  
Ulf Lindblom et al  
Hagconsult AB oktober 1977
- 55 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg,  
Del 1  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Jan Rydberg  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-10
- 56 Radiolys av utfyllnadsmaterial  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Jan Rydberg  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15
- 57 Stråldoser vid haveri under sjötransport av kärnbränsle  
Anders Appelgren  
Ulla Bergström  
Lennart Devell  
AB Atomenergi 1978-01-09
- 58 Strålrisker och högsta tillåtliga stråldoser för människan  
Gunnar Walinder  
FOA 4 november 1977

- 59 Tectonic Lineaments in the Baltic from Gävle to Simrishamn  
Tom Flodén  
Stockholms Universitet 1977-12-15
- 60 Förarbeten för platsval, berggrundsundersökningar  
Sören Scherman  
  
Berggrundvattenförhållande i Finnsjöområdet  
nordöstra del  
Carl-Erik Klockars  
Ove Persson  
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 61 Permeabilitetsbestämningar  
Anders Hult  
Gunnar Gidlund  
Ulf Thoregren  
  
Geofysisk borrhålmätning  
Kurt-Åke Magnusson  
Oscar Duran  
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 62 Analyser och åldersbestämningar av grundvatten på stora  
djup  
Gunnar Gidlund  
Sveriges Geologiska Undersökning 1978-02-14
- 63 Geologisk och hydrogeologisk grunddokumentation av  
Stripa försöksstation  
Andrei Olkiewicz  
Kenth Hansson  
Karl-Erik Almén  
Gunnar Gidlund  
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1978
- 64 Spänningsmätningar i Skandinavisk berggrund - förutsättningar  
resultat och tolkning  
Sten G A Bergman  
Stockholm november 1977
- 65 Säkerhetsanalys av inkapslingsprocesser  
Göran Carleson  
AB Atomenergi 1978-01-27
- 66 Några synpunkter på mekanisk säkerhet hos kapsel för  
kärnbränsleavfall  
Fred Nilsson  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm februari 1978
- 67 Mätning av galvanisk korrosion mellan titan och bly samt  
mätning av titans korrosionspotential under  $\gamma$ -bestrålning  
3 st tekniska PM  
Sture Henrikson  
Stefan Poturaj  
Maths Åsberg  
Derek Lewis  
AB Atomenergi januari-februari 1978

- 68 Degraderingsmekanismer vid bassänglagring och hantering  
av utbränt kraftreaktorbränsle  
Gunnar Vesterlund  
Torsten Olsson  
ASEA-ATOM 1978-01-18
- 69 A three-dimensional method for calculating the hydraulic  
gradient in porous and cracked media  
Hans Häggblom  
AB Atomenergi 1978-01-26
- 70 Lakning av bestrålat  $UO_2$ -bränsle  
Ulla-Britt Eklund  
Roland Forsyth  
AB Atomenergi 1978-02-24
- 71 Bergspricktätning med bentonit  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-11-16
- 72 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av kompakterad  
bentonit  
Sven Knutsson  
Högskolan i Luleå 1977-11-18
- 73 Self-injection of highly compacted bentonite into rock  
joints  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 74 Highly compacted Na bentonite as buffer substance  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 75 Small-scale bentonite injection test on rock  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 76 Experimental determination of the stress/strain situation  
in a sheared tunnel model with canister  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 77 Nuklidvandring från ett bergförvar för utbränt bränsle  
Bertil Grundfelt  
Kemakta konsult AB, Stockholm
- 78 Bedömning av radiolys i grundvatten  
Hilbert Christenssen  
AB Atomenergi 1978-02-17
- 79 Transport av oxidants and radionuclides through  
a clay barrier  
Ivar Neretnieks  
Kungsl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-02-20



- 80 Utdiffusion av svårlösliga nuklider ur kapsel efter kapselgenombrott  
Karin Andersson  
Ivars Neretnieks  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-03-07
- 81 Tillverkning av kopparkapsel  
Kåre Hannerz  
Stefan Sehlstedt  
Bengt Lönnerberg  
Liberth Karlson  
Gunnar Nilsson  
ASEA, ASEA-ATOM
- 82 Hantering och slutförvaring av aktiva metalledar  
Bengt Lönnerberg  
Alf Engelbrektsson  
Ivars Neretnieks  
ASEA-ATOM, VBB, KTH
- 83 Hantering av kapslar med använt bränsle i slutförvaret  
Alf Engelbrektsson  
VBB Stockholm april 1978
- 84 Tillverkning och hantering av bentonitblock  
Alf Engelbrektsson  
Ulf Odebo  
ASEA, VBB
- 85 Beräkning av kryphastigheten hos ett blyhölje innehållande en glaskropp under inverkan av tyngdkraften  
Anders Samuelsson
- Förändring av krypegenskaperna hos ett blyhölje som följt av en mekanisk skada  
Göran Eklund  
Institutet för Metallforskning september 1977 - april 1978
- 86 Diffusivitetmätningar av metan och väte i våt lera  
Ivars Neretnieks  
Christina Skagius  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-01-09
- 87 Diffusivitetmätningar i våt lera Na-lignosulfonat,  $\text{Sr}^{2+}$ , Cs  
Ivars Neretnieks  
Christina Skagius  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-03-16
- 88 Ground water chemistry at depth in granites and gneisses  
Gunnar Jacks  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm april 1978
- 89 Inverkan av glaciation på en deponeringsanläggning belägen i urberg 500 m under markytan  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1978-03-16

- 90 Koppar som kapslingsmaterial för icke upparbetat kärnbränsleavfall - bedömning ur korrosionssynpunkt  
Lägesrapport 1978-03-31  
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp
- 91 Korttidsvariationer i grundvattnets trycknivå  
Lars Y Nilsson  
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm september 1977
- 92 Termisk utvidgning hos granitoida bergarter  
Ove Stephansson  
Högskolan i Luleå april 1978
- 93 Preliminary corrosion studies of glass ceramic code 9617 and a sealing frit for nuclear waste canisters  
I D Sundquist  
Corning Glass Works 78-03-14
- 94 Avfallsströmmar i upparbetningsprocessen  
Birgitta Andersson  
Ann-Margret Ericsson  
Kemakta mars 1978
- 95 Separering av C-14 vid upparbetningsprocessen  
Sven Brandberg  
Ann-Margret Ericsson  
Kemakta mars 1978
- 96 Korrosionsprovning av olegerat titan i simulerade deponeringsmiljöer för upparbetat kärnbränsleavfall  
Sture Henrikson  
Marian de Pourbaix  
AB Atomenergi 1978-04-24
- 97 Colloid chemical aspects of the "confined bentonite concept"  
Jean C Le Bell  
Ytkemiska Institutet 1978-05-07
- 98 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg  
Del 2  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Börje Torstenfelt  
Chalmers Tekniska Högskola 1978-04-20
- 99 Lakning av högaktivt franskt glas  
Lägesrapport 1978-06-01  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi
- 100 Dos och dosinteckning från grundvattenburna radioaktiva ämnen vid slutförvaring av använt kärnbränsle  
Ronny Bergman  
Ulla Bergström  
Sverker Evans  
AB Atomenergi

- 101 Utläckning av Ni-59 från ett bergförvar  
Ivars Neretnieks  
Karin Andersson  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm 1978-04-24
- 102 Metod att bocka bestrålade bränslestavar  
Torsten Olsson  
ASEA-ATOM 1978-03-29
- 103 Some aspects on colloids as a means for transporting  
radio nuclides  
Ivars Neretnieks  
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm
- 104 Finit elementanalys av bentonitfyllt bergförvar  
Ove Stephansson  
Kenneth Mäki  
Tommy Groth  
Per Johansson  
Högskolan i Luleå
- 105 Neutroninducerad aktivitet i bränsleelementdetaljer  
Nils A Kjellbert  
AB Atomenergi 1978-03-30
- 106 Strålningsnivå och till vatten deponerad strålnings-  
energi utanför kapslar i slutförvaret  
Klas Lundgren  
ASEA-ATOM 1978-05-29
- 107 Blyinfodrad titankapsel för upparbetat och glasat  
kärnbränsleavfall - Bedömning ur korrosionssynpunkt  
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp. Slutrapport  
1978-05-25
- 108 Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline  
rock  
Peter Behrenz  
Kåre Hannerz  
ASEA-ATOM 1978-05-30
- 109 Läckningsbar spaltaktivitet  
Lennart Devell  
Rolf Hesböl  
AB Atomenergi
- 110 Finita elementanalyser  
O Stephansson  
Högskolan i Luleå
- 111 Nuklidhalter i använt LWR-bränsle och i högaktivt  
avfall från återcykling av plutonium i PWR  
Nils Kjellbert  
AB Atomenergi
- 112 Säkerhetsanalys av hanteringsförfarandet vid inkapsling  
av utbränt bränsle i kopparkapsel  
Erik Nordesjö  
ASEA-ATOM 1978-03-20