

Technical University of Denmark



Modelberegninger af befolkningsfordelingens betydning for valg af placering af kernekraftværker

Nielsen, F.; Walmod-Larsen, Niels Ole

Publication date:
1984

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Nielsen, F., & Walmod-Larsen, N. O. (1984). Modelberegninger af befolkningsfordelingens betydning for valg af placering af kernekraftværker. (Risø-M; Nr. 2295).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

RISØ-M-2295

**MODELBEREGNINGER AF BEFOLKNINGSPORDELINGENS BETYDNING FOR VALG
AF PLACERING AF KERNEKRAFTVÆRKER**

Flemming Nielsen og Ole Walmod-Larsen

Abstract. Denne rapport er udarbejdet til brug for den af Miljøstyrelsen i april 1981 nedsatte arbejdsgruppe vedrørende placering af kernekraftværker i Danmark. Arbejdsgruppens formål var, at undersøge betydningen af befolkningstæthed omkring kernekraftværker for sikkerheden ved anvendelse af kernekraft. Herunder skulle også beredskabsplanlægningens betydning undersøges.

Dette modelstudium beskriver konsekvenserne for befolkningen ved to uheldsforløb på et 1000 MW_e kernekraftværk ved to forskellige befolkningsfordelinger. Beregningerne er foretaget for den hyppigst forekommende vejr-situation. Der er beregnet individdoser til knoglemarv, lunger, mave-tarmkanal, skjoldbruskkirtel og helkropsdoser samt kollektive helkropsdoser til de to modelbefolkninger.

INIS-Descriptors FISSION PRODUCT RELEASE; HUMAN POPULATIONS; MELTDOWN; NUCLEAR POWER PLANTS; PWR TYPE REACTORS; RADIATION DOSES; REACTOR ACCIDENTS

Februar 1984

Forsøgsanlæg Risø, DK 4000 Roskilde, Danmark

ISBN 87-550-0772-4

ISSN 0106-6435

Grafisk Service, Risø 1986

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1. INDLEDNING	5
2. VALG AF MODELPLADSER	6
3. VALG AF VEJRSITUATION	12
3.1 Atmosfærens stabilitet	13
3.2 Vindhastigheden	15
3.3 Depositionshastighed	15
4. VALG AF MODELUDSLIP	16
4.1 PWR4-uheld	21
4.2 PWR6-uheld	21
5. BEREGNINGSMODEL OG ØVRIGE BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER	23
5.1 Beregningsmodel.....	23
5.2 Bygningsafskærmning	26
5.2.1. Indendørs ophold	26
5.2.2. Normal færd	27
5.3 Vejrefekt	28
5.4 Beregning af organdoser	28
5.4.1. Knoglemarv	28
5.4.2. Lunger	29
5.4.3. Mave-tarmkanal	29
5.4.4. Skjoldbruskkirtel	30
5.4.5. Hele kroppen	30

	Side
6. DOSER FRA PWR4-UDSLIP.....	31
6.1 Individdoser	31
6.1.1 Udendørs ophold i 8 timer.....	31
6.1.2 Indendørs ophold i 8 og 24 timer.....	34
6.1.3 Normal ophold færden i 1 år.....	38
6.1.4 Organdoser ved 24 timers indendørs ophold....	40
6.2 Kollektivdoser	45
6.2.1 Indendørs ophold i 24 timer.....	45
6.2.2 Normal færden i 1 år.....	53
7. DOSER FRA PWR6-UDSLIP	56
7.1 Individdoser	56
7.1.1 Udendørs ophold i 12 timer.....	56
7.1.2 Indendørs ophold i 12 og 24 timer.....	58
7.1.3 Normal færden i 1 år.....	62
7.1.4 Organdoser ved 24 timers indendørs ophold....	63
7.2 Kollektivdoser	67
7.2.1 Indendørs ophold i 24 timer.....	67
7.2.2 Normal færden i 1 år.....	74
8. KOLLEKTIVDOSER PÅ DE I DANMARK RESERVEREDE PLADSER VED PWR4-UDSLIP.....	77
9. REFERENCER	83

1. INDLEDNING

Denne rapport er udarbejdet på foranledning af og til brug for den af miljøstyrelsen (i skrivelse af 7. april 1981) nedsatte arbejdsgruppe vedrørende placering af kernekraftværker i Danmark. Arbejdsgruppen har haft til formål bl.a. at undersøge den betydning, befolkningstætheden omkring kernekraftværker og disses afstande fra større bymæssige bebyggelser har for sikkerhedsspørgsmålet ved anvendelse af kernekraft som energikilde. Herunder skulle også undersøges beredskabsplanlægningens betydning.

Arbejdsgruppen formulerede grundlaget for et modelstudium, der skulle beskrive konsekvenserne for befolkningen på forskelligartede placeringer fra udslip af radioaktive stoffer til atmosfæren i forbindelse med tænkte havarier på et kernekraftværk med en effekt på 1000 MWe. Arbejdsgruppen valgte derefter to forskellige modelpladser (befolkningsfordelinger), og to uheldsforløb samt definerede de meteorologiske forhold der har betydning for den dosismæssige påvirkning fra udslippet.

Beregning af de resulterende stråledoser er foretaget på basis af de ovennævnte forudsætninger i udslipsretningen midt henover de to valgte modelbefolkninger for de to valgte modeludslip. Der er beregnet såvel individdoser som kollektive doser til den udsatte befolkning for de to betragtede uheldssituationer. Beregningen af individdoser omfatter stråledoser til 4 enkeltorganer (knoglemarv, lunger, mave-tarmkanal og skjoldbruskkirtel) samt helkroppsosser.

Forudsætningerne for beregningerne ses resultaterne er nærmere beskrevet i denne rapport. I kapitel 2 er den af arbejdsgruppen udvalgte befolkningsfordeling for de to tænkte pladser beskrevet.

I kapitel 3 er den af arbejdsgruppen valgte vejr-situation beskrevet.

I kapitel 4 er de to af arbejdsgruppen valgte modeludslip beskrevet.

I kapitel 5 beskrives den model, der er brugt ved beregningerne samt de øvrige forudsætninger for beregningerne: bygningsafskærmning, vejreflekt og grundlaget for beregning af organdoser.

I kapitlerne 6, 7 og 8 er beskrevet selve resultaterne af dosisberegninger og for de to uheldsforløb.

2. VALG AF MODELPLADSER

Under et kortvarigt forløb af et havari på et kraftværk på f.eks. nogle få timer, kan man med rimelighed regne med, at vejret ikke ændrer sig synderligt under forløbet. Fra værket vil vinden bære et udslip i en bestemt retning som en fane hen over en forholdsvis smal sektor af hele det område, der omgiver værket.

Fanen spredes under den i Danmark hyppigst forekommende vejr-situation (nærmere beskrevet i kapitel 3) under kortvarige forløb hovedsagelig kun indenfor en vinkel på ca. 20° omkring fanens retning.

Foreliggende metoder til beregning af stråledoser fra radioaktivitetsindholdet i en sådan fane har deres begrænsninger. Den anvendte, såkaldte Gauss-model (nærmere beskrevet i kapitel 5) til beregning af stråledoser er verificeret ud til afstande af 20-30 km. Indenfor dette område kan koncentrationen af radioaktive stoffer og de resulterende stråledoser beregnes med rimelig nøjagtighed. Bortset fra ekstreme tilfælde bliver koncentrationer og stråledoser overvurderet på længere afstande. Overvurderingen vokser med afstanden og den kan være op til en faktor 10 ved 50 km. Det er derfor i denne undersøgelse valgt at begrænse den betragtede afstand i modelstudiet til 50 km fra udslipspunktet.

Befolkningens fordeling om de udpegede danske pladser, der bl.a. er reserverede til eventuelle kernekraftværker (Nielsen, 1974 og Nielsen, 1978), er beskrevet af Risø Helsefysikafdeling for Elsam (Jylland-Fyn området) og Elkraft (det Sjælland-Lolland-Falsterske forsyningsområde). Befolkningsfordelingen i de to områder er beskrevet på basis af folketællingen i 1970 samt registerfolketallet i 1976. Fordelingen foreligger med tal for hvert enkelt 1 x 1 km kvadrat. Der er på grundlag heraf udarbejdet en prognose for 1992.

Befolkningsfordelingen omkring en plads kan derefter beskrives ved en opdeling i sektorer (f. eks. på 30°) der igen inddeles i sektorafsnit. Fig. 2.1 viser en sådan inddeling, og sektorafsniternes størrelse fremgår af de to første kollonner i fig. 2.2.

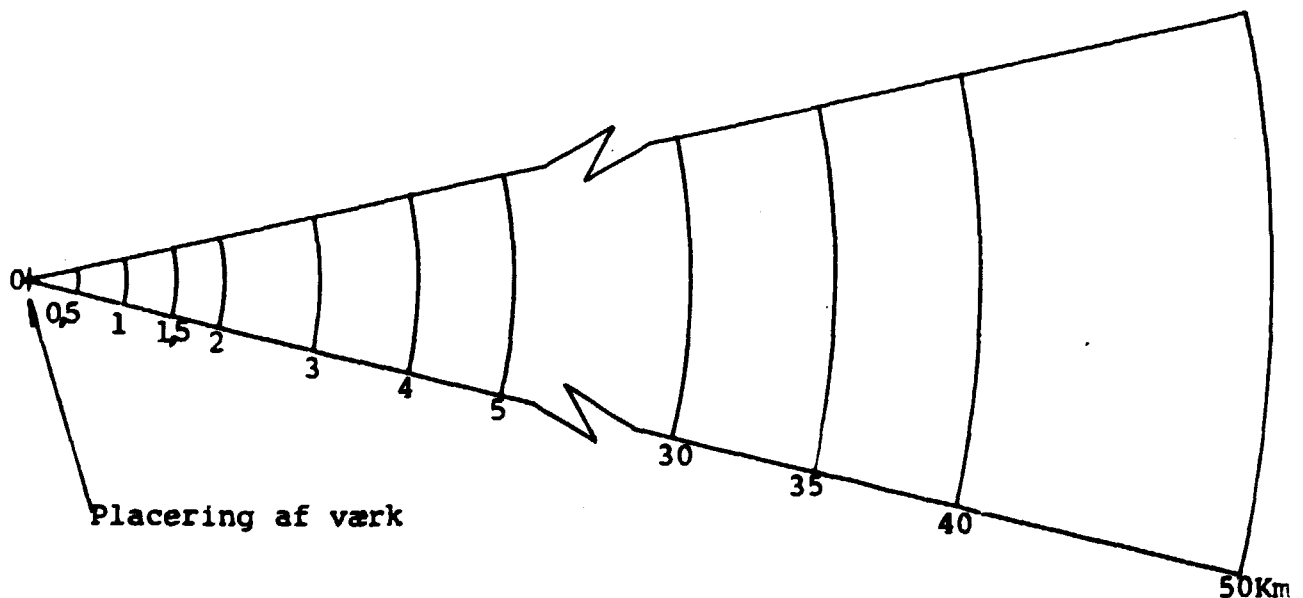


Fig. 2.1. 30° sektor med dens inddeling i sektorafsnit fra 0,5 km til 50 km afstand fra centret.

I en uheldssituation er det under kortvarige forløb kun en lille del af befolkningsfordelingen omkring værket, der berøres af udslippet (jfr. ovenstående fanevinkel på omkring 20°).

Befolkningsfordelingens betydning kan derfor vurderes ved at undersøge hver enkelt af de 12 sektorer, som området omkring hver plads er delt op i. Arbejdsgruppen har valgt denne måde at undersøge problemet på.

Alle de udvalgte danske pladser er kystplaceringer, hvor en stor del af sektorerne vender ud mod åbent vand med stor afstand til den nærmeste befolkning. Dette er et karakteristisk træk ved de danske pladser i forhold til mange udenlandske, som ligger ved pladser inde i landet.

Et eksempel på befolkningsfordelingen i en typisk 30° sektor ind over land udvalgt fra een af de 16 danske placeringer er vist i fig. 2.2. Sektoren repræsenterer et rimeligt gennemsnit bortset fra et forholdsvis stort antal mennesker mellem 1 og 1,5 km fra placeringen.

Sektorafsnit [km]	Areal [km ²]	Befolkning	Befolknings- tæthed km ⁻²	Akkumuleret befolkning
1,0 - 1,5	0,33	70	212	70
1,5 - 2	0,46	6	13	76
2 - 3	1,3	44	34	120
3 - 4	1,8	79	43	199
4 - 5	2,4	294	125	493
5 - 7,5	8,2	256	31	749
7,5 - 10	11,5	935	82	1684
10 - 12,5	14,7	430	21	2114
12,5- 15	18	1718	95	3832
15 - 20	46	2366	52	6298
20 - 25	59	5682	97	11880
25 - 30	72	26065	360	37945
30 - 35	85	4913	58	42858
35 - 40	98	13736	140	56594
40 - 50	236	17227	73	73821
1,0 - 50	655	73821	113	73821

Fig. 2.2. Befolkningsfordelingen indenfor en typisk 30° sektor udvalgt blandt de eksisterende danske pladser. For hver af de 15 sektorafsnit er angivet afsnittets areal, befolkningstallet, befolkningstæthed samt den akkumulerede befolkning til og med det betragtede afsnit.

Ved en detaljeret gennemgang af samtlige 30° sektorer ved alle de udpegede danske pladser er der fundet nogle karakteristiske forhold som er afgørende for befolkningsfordelingens betydning for placeringen. Det er befolkningen i kortest afstand fra værket, mindre bysamfund i lidt større afstande samt større befolkningskoncentrationer på længere afstande.

Arbejdsgruppen har på basis af sin gennemgang af samtlige udpegede pladser konstrueret to 30° sektorer med disse tre karakteristiske forhold repræsenteret: Høj befolkningstæthed nærmest værket, bysamfund i lidt større afstande samt en stor befolkningskoncentration på lidt længere afstand. De kaldes for plads 1 og plads 2. Det er for begge sektorer forudsat, at der ikke er indbyggere indenfor en afstand af 1 km, idet der i de færreste sektorer ved de udpegede danske pladser er mennesker indenfor en afstand af 1 km. De to sektorer rummer tilsammen de mest ekstreme befolkningsfordelinger ved samtlige reserverede danske pladser. Det skal understreges, at de er konstruerede. De to befolkningsfordelinger er vist i fig. 2.3.

Interval km	Befolkning				Akkumuleret befolkning	
	Plads 1	/km ²	Plads 2	/km ²	Plads 1	Plads 2
1,0 - 1,5	100	306	0	0	100	0
1,5 - 2,0	150	327	10	22	250	10
2,0 - 3,0	650	1103	20	34	900	30
3,0 - 4,0	800	437	70	38	1700	100
4,0 - 5,0	600	255	100	42	2300	200
5,0 - 7,5	2700	330	600	73	5000	800
7,5 -10,0	1900	166	1500	131	6900	2300
10,0 -12,5	1000	68	700	48	7900	3000
12,5 -15,0	2300	128	5000	278	10200	8000
15,0 -20,0	1800	39	14000	306	12000	22000
20,0 -25,0	2500	42	21000	357	14500	43000
25,0 -30,0	5000	70	32000	445	19500	75000
30,0 -35,0	6500	76	75000	881	26000	150000
35,0 -40,0	9000	92	150000	1530	35000	300000
40,0 -50,0	40000	170	400000	1700	75000	700000
1,0 -50,0	75000	115	700000	1070		

Fig. 2.3. Befolkningsfordelingen indenfor en 30° sektor ved de to modelpladser opdelt i 15 sektorafsnit og den akkumulerede befolkning til og med det betragtede afsnit.

For plads nr. 1 er der valgt en ekstremt høj befolkningstæthed indenfor de nærmeste 3 km (højere end det højeste fundet i samtlige sektorer), endvidere er et bysamfund placeret indenfor 10 km. Den øvrige fordeling fra 10 til 50 km er en typisk fordeling for de reserverede danske pladser. I 1980 var befolkningstætheden i Danmark 118,9 indbyggere/km².

Den fjernere liggende storbys indflydelse illustreres ved plads nr. 2. Her er regnet med en typisk fordeling ud til ca. 30 km, men fra 30-50 km er der regnet med en meget høj befolkningskoncentration.

På fig. 2.4 er indtegnet befolkningsfordelingen for de to konstruerede 30° sektorer, kaldet plads 1 og plads 2. Til sammenligning er tegnet fordelingen for den udvalgte, typiske sektor, vist i fig. 2.2.

Akkumuleret befolkning i 30' sektorer

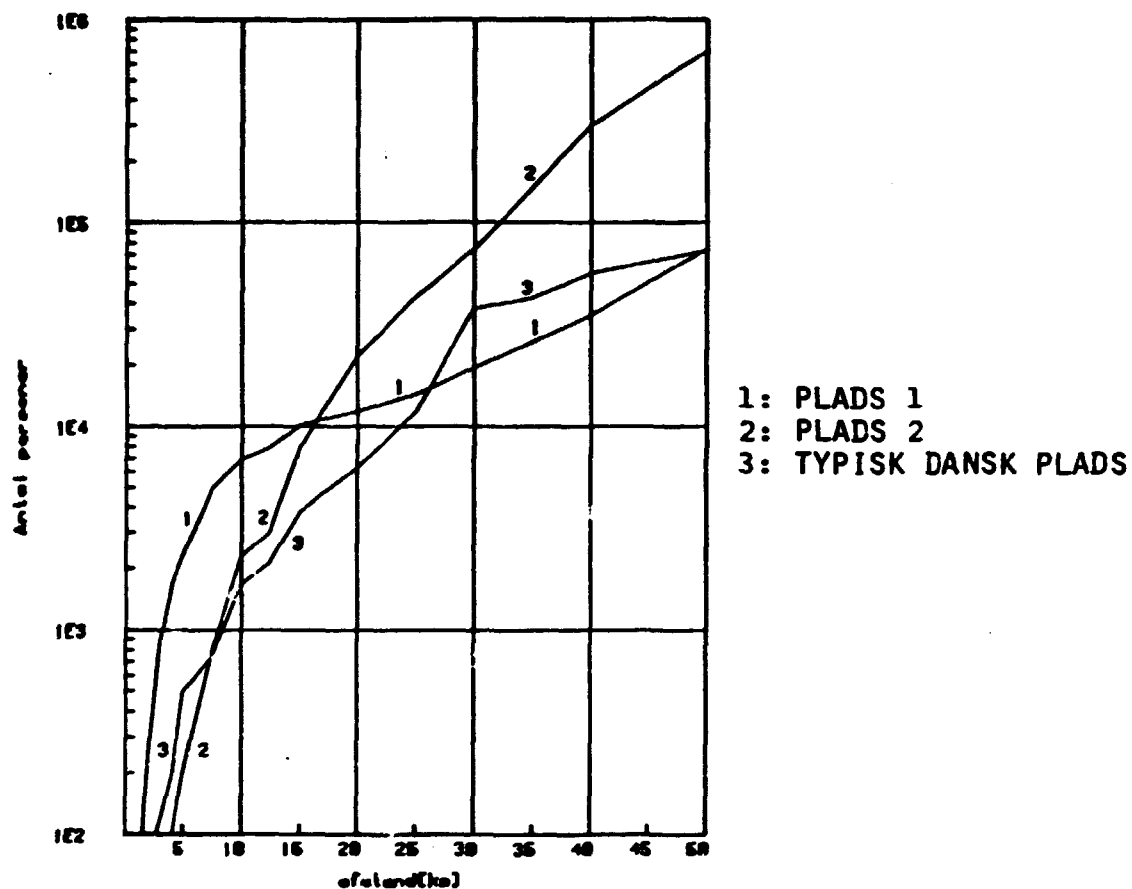


Fig. 2.4. Befolkningsfordelingen som funktion af afstanden i de 2 stk. 30° sektorer kaldet plads 1 og plads 2. Til sammenligning er tegnet 30° sektoren fra fig. 2.2.

3. VALG AF VEJRSITUATION

En række meteorologiske forhold, der bestemmer vejr-situationen i det tidsrum et udslip sker, er afgørende for stråledosis til de personer, der påvirkes af udslippet.

De meteorologiske parametre, der er væsentlige i denne sammenhæng, er:

Atmosfærens stabilitet, vindhastigheden, om det regner, samt valget af den såkaldte deponeringshastighed.

3.1. Atmosfærens stabilitet

Atmosfærens stabilitetsforhold kan meget groft inddeles i tre tilstande: Ustabile, neutrale og stabile forhold. De afhænger af temperaturens variation med højden over jorden.

Atmosfærens tilstand kaldes neutral, hvis atmosfærens temperatur falder ca. 1°C for hver 100 m's højdeforøgelse. Falder temperaturen i atmosfæren mere end 1°C for en højdeforøgelse på 100 m, kaldes atmosfærens tilstand ustabil. Falder temperaturen i atmosfæren mindre end 1°C for en højdeforøgelse på 100 m, eller vokser temperaturen med stigende højde, kaldes atmosfærens tilstand stabil.

En røgfane udbreder sig under neutrale forhold ofte langs et lige og veldefineret spor. Fanens tværsnit vokser jævnt med voksende afstand fra kilden, og koncentrationen falder tilsvarende.

Ustabile forhold er ofte karakteriseret ved små vindhastigheder sammen med en god solindstråling, der opvarmer jordoverfladen. Fanen opfører sig meget uregelmæssigt, og den stærke omrøring af luften over jordoverfladen bevirker en kraftig vertikal såvel som horisontal spredning af fanen og en ikke særlig veldefineret udbredelsesretning. Koncentrationen kan være høj i en kildes umiddelbare nærhed, men vil falde meget stærkt med afstanden fra kilden.

Stabile forhold optræder hyppigt om natten, når vinden er svag, og skydækket ringe nok til at tillade en effektiv afkøling af jordoverfladen. Fanens tværsnit øges kun ganske lidt med afstanden fra kilden, og fanen kan blive meget lang.

Det er umiddelbart klart, at atmosfæren ikke kun optræder i disse tre let identificerbare tilstande, men at der tværtimod er et kontinuert spektrum af tilstande. På grund af det rent praktiske behov for at kunne identificere atmosfærens spredningsevne ved hjælp af meteorologiske rutinemålinger anvendes et klassifika-

tionssystem, der bygger på et antal kategorier. I næsten alle tilfælde bruges det af Pasquill (Pasquill, 1961) foreslåede klassifikationssystem:

- A: ekstremt ustabil
- B: moderat ustabil
- C: let ustabil
- D: neutral
- E: let stabil
- F: moderat stabil
- G: ekstremt stabil

Baseret på statistisk behandling af data indsamlet gennem 10 år på Forsøgsanlæg Risøs meteorologimast er sandsynlighedsfordelingen af de forskellige stabilitetsklasser beregnet som vist i fig. 3.1. (Gyllander, 1980)

Stabilitetskategori	Sandsynlighed
A	1,2%
B	1,7%
C	3,3%
D	60,2%
E	27,1%
F+G	6,5%

Fig. 3.1 Sandsynlighedsfordeling af stabilitetskategorier målt på Forsøgsanlæg Risøs meteorologimast i en 10 års periode.

På basis af en række måleserier spredt over hele landet kan den angivne sandsynlighedsfordeling stort set regnes at være gældende for hele landet. Det ses, at kategori D er langt den hyppigst forekommende med godt 60%. Derfor er denne stabilitet brugt ved beregningerne.

3.2. Vindhastigheden

Middelvindhastigheden følger stabilitetskategorien, således at vindhastigheden er lavest ved stabilitet A og G mens de højeste vindhastigheder fås ved stabilitet D. Middelvindhastigheden ved stabilitet D er 6 m/s, denne vindhastighed er derfor valgt ved beregningerne. Lokale vejr-situationer kan tænkes at forekomme, men det er skønnet, at de næppe vil være så specielle, at de kræver særlig hensyntagen i denne sammenhæng.

3.3. Deponeringshastighed

Materialer i atmosfæren, partikulære eller luftformige, kan afsættes på overflader ved forskellige processer. Hele dette kompleks af processer kaldes bekvemt for deponering. Deponering afhænger af tre typer parametre. For det første parametre, der beskriver det materiale, der afsættes. For det andet meteorologiske parametre beskrivende temperatur, vindhastighed, fugtighedsindhold m.m. For det tredje parametre, der beskriver overfladen, f.eks. ruhedslængder, vegetationstype og -tæthed m.m.

Når man skal diskutere deponeringshastigheder, er det hensigtsmæssigt at opdele deponeringsprocesserne i forskellige grupper efter materialetype (luftarter, partikler), efter de meteorologiske forhold (tør- og våddeponering) og efter overfladetyper (ru og glatte overflader). Samtlige deponeringsprocesser er diskuteret i detaljer i en nyligt offentliggjort rapport (Nielsen, 1981).

Sandsynligheden for nedbør inden for et givet tidsrum er blevet vurderet på basis af en måleserie fra St. Hareskov dækkende 23 år (1951-1973). Sandsynligheden for tørvejr i 1 time er 92,4%, sandsynligheden for tørvejr i 4 timer er 88,8% og sandsynligheden for tørvejr i 8 timer er 86,2%. Da der således er langt overvejende sandsynlighed for tørvejr, er det valgt kun at betragte tørdeponering ved beregningerne.

Alle overflader betragtes som ru overflader (bevoksede overflader, græsmarker, kornmarker etc.), idet der her fås de største deponeringshastigheder.

For tørdeponering af luftarter i forbindelse med et hypotetisk reaktoruheld er det kun nødvendigt at beskæftige sig med elementær jod og luftformige forbindelser indholdende jod, f.eks. met-hyljodid. På baggrund af mange eksperimentelle bestemmelser af tørdeponeringshastigheder for jod kan det konkluderes, at en typisk værdi for jod kan sættes til 0,7 cm/s, og at det vil være meget usandsynligt, at værdien vil overstige 1 cm/s. For met-hyljodid er værdien ca. 100 gange mindre end for jod (Heinemann 1980 og Sehmel 1980).

Radioaktivt materiale absorberes mere eller mindre effektivt på partikler i atmosfæren. Tørdeponering af partikler afhænger primært af partikeldiametrene. Fra aerosoler i forbindelse med hypotetiske reaktoruheld vil man kunne sætte tørdeponeringshastigheden til 1 cm/s (Sehmel 1980).

Som fælles tørdeponeringshastighed er i nærværende rapport benyttet værdien 1 cm/s. Et muligt interval ved Pasquill stabilitetskategori D er 0,2 - 2 cm pr. sekund. (Thykier-Nielsen 1982). I forbindelse med modelstudiet har variationen i de medfølgende doser for ydergrænserne af dette interval været undersøgt.

4. VALG AF MODELUDSLIP

Arbejdsgruppen har besluttet at bruge velkendte referencer i undersøgelsen, og med hensyn til uheld og deres udslip har gruppen valgt at tage udgangspunkt i den amerikanske reaktorsikkerhedsrapport WASH 1400 fra 1975. Rapporten indeholder en systematisk gennemgang af mulige uheldsforløb på 2 amerikanske reaktorer, en kogendevandsreaktor (BWR) og en trykvandsreaktor (PWR). Rapporten beskriver 9 forskellige PWR-udslipskategorier og 5 forskellige BWR-udslipskategorier.

Konsekvenserne af et reaktoruheld afhænger af hvilke radioaktive stoffer, der slipper ud til omgivelserne og i hvilke mængder. Mængden og arten af det radioaktive udslip afhænger af, om reaktorkernen smelter, og om der sker brud på reaktorindeslutningen, og hvis der sker brud, da på hvilket tidspunkt og på hvilken måde.

Det fremgår af WASH 1400, at der ved reaktoruheld uden kernenedsmeltning frigøres så små mængder radioaktive stoffer, at der ikke herfra vil kunne påvises sundhedsmæssige virkninger i den omkringboende befolkning. Reaktoruheld uden kernenedsmeltning (PWR8, -9 og BWR5) behandles således ikke i modelstudiet.

Nyere undersøgelser har rejst tvivl om, hvorvidt konsekvenserne af og sandsynligheden for kernenedsmeltningsuheld vil være så store som beregnet i WASH 1400.

- Eksperimenter på Sandia-laboratorierne i USA (Berman m.fl., 1980) tyder på, at sandsynligheden for en dampekspllosion, som kan forårsage brud på reaktorindeslutningen, er to størrelsesordener mindre end antaget i WASH 1400. Sandsynligheden for det største PWR-udslip i WASH 1400 (PWR1) reduceres således 100 gange.
- Den svenske "Ångeeksplosionskomiteen" konkluderede i 1980 (DsI 1980:28), at dampekspllosioner i såvel BWR- som PWR-reaktorer ikke kan udelukkes i forbindelse med store reaktorhavarier, men at de ifølge komiteens konsulenter (Fauske 1980 og Mayinger 1980) ikke kan forårsage brud på hverken reaktortank eller indeslutning. Komiteen noterede i øvrigt, at der synes at være udbredt enighed om, at beskrivelsen af dampekspllosioner i WASH 1400 ikke er i overensstemmelse med senere teoretisk og eksperimentelt arbejde.
- Teoretisk og eksperimentelt arbejde på Kerneforskningsanlægget Karlsruhe i Tyskland (Rininsland m.fl., 1980) har vist, at tiden fra kernenedsmeltning til brud på reaktorindeslutningen forårsaget af overtryk på grund af damp eller gasudvikling og afbrænding af brint er 2-3 dage for en

tysk PWR. Det er ikke sandsynligt, at der vil ske gennemsmeltning af betonfunderingen i reaktorindeslutningen. Det er også blevet påvist, at koncentrationen af radioaktivt materiale i atmosfæren i reaktorindeslutningen på 2-3 dage vil være formindsket 3-5 størrelsesordener. Den mængde radioaktivt materiale, der er til rådighed for udslip til atmosfæren på det tidspunkt, hvor der sker brud på reaktorindeslutningen, er således meget lille.

Det viser sig, at udslippet under uheldsforløbet, før bruddet på reaktorindeslutningen indtræffer efter 2-3 dage, vil være bestemt af lækagehastigheden gennem reaktorindeslutningen. For en isoleret reaktorindeslutning kan design lækagehastigheden være 0,25% af det totale rumfang pr. dag. Hvis lækagehastigheden svarer til designgrænserne, vil mængden af frigivet radioaktivt materiale i de uheldsforløb, som i WASH 1400 ville give kategori 2 og 3 udslip, være 100-1000 gange mindre end resultaterne i WASH 1400.

- ERPI-rapporten (Levenson & Rahn, 1980) viser med udgangspunkt i flere forskellige reaktoruheld og en række eksperimenter, at WASH 1400 ikke tager hensyn til adskillige naturlige mekanismer, som i større eller mindre grad vil holde de radioaktive stoffer tilbage i reaktoranlægget selv ved kernedsmeltningsuheld, hvor der sker brud på reaktorindeslutningen. F. eks. vil jod ikke frigøres fra det smeltede brændsel i form af I_2 , men som CsI (minder om kogsalt), der er meget letopløseligt i vand, og som bl.a. derfor tilbageholdes i et letvandsreaktoranlæg under uheld, hvor der er vand eller vanddamp til stede.

- Den amerikanske nukleare sikkerhedsmyndighed, NRC, skriver i NUREG 0772 fra juni 1981, at kernedsmeltningsuheld i nyere kogendevandsreaktoranlæg med en moderne reaktorindeslutning sandsynligvis vil medføre væsentlig mindre udslip af radioaktive stoffer, end det kan forventes ifølge WASH 1400, fordi frigørelsen af de radioaktive stoffer i sådan-

ne anlæg ikke vil ske direkte til atmosfæren fra reaktorindeslutningen, men f.eks. igennem kondensationsbassinet, hvor en stor del af radioaktiviteten vil blive tilbageholdt i vandet.

PWR4- og BWR3 udslippene har et stort indhold af jod, cæsium og ædelgasser. PWR5 er et jod- og et ædelgasudslip, mens PWR6 og BWR4 er ædelgasudslip med et mindre jodindhold.

Til brug for denne modelundersøgelse har arbejdsgruppen valgt at benytte udslipstyperne PWR4 og PWR6. Begge typer forudsætter kernesmelting og læk på reaktorindeslutningen, og der er i begge tilfælde tale om store, med dog ikke "værst tænkelige" udslip. Som det ses nedenfor er PWR4-udslippet noget større end PWR6-udslippet, men adskiller sig dog først og fremmest fra dette ved at indeholde større andele af radioaktivt jod og radioaktive alkalimetaller. Ved at gennemføre beregningerne for begge udslipstyper kan bl.a. betydningen af udslippets sammensætning af radioaktive stoffer for størrelsen af dosis bedømmes.

Det bør understreges, at de valgte udslip er modeludslip valgt fra WASH 1400 til et modelstudium, og at en godkendelse af et eventuelt dansk kernekraftværk skal foretages på basis af et detaljeret kendskab til det konkrete anlæg.

Inventaret af fissions- og aktiveringsprodukter i reaktorkernen afhænger af en lang række parametre. Til disse beregninger er valgt en trykvandsreaktor (PWR) på 3000 MW varmeudvikling, med en virkningsgrad på 33% giver det 1000 MW elektrisk. Til beregningen er i øvrigt brugt følgende parametre:

Berigning : 3,1%
Effektæthed: 34,4 kW/kgU
Udbrænding : 20,6 MWd/kgU

Udbrændingen er beregnet som middeludbrændingen for en ligevægtskerne til et tidspunkt umiddelbart før nedlukning med maksimalt radioaktivitetsindhold.

Frigørelsesprocenterne for de 2 uheldskategorier, der betragtes her, er angivet i figur 4.1. Til sammenligning er vist frigørelsesprocenterne fra uheldet på Tremileøen i USA, 1979.

	PWR4	PWR6	TMI
Xe-Kr	60	30	0,9
I-Br	9	0,2	0,00002
Cs-Rb	4	0,08	0
Te-Sb	3	0,1	0
Ba-Sr	0,5	0,009	0
Ru	0,3	0,007	0
La	0,04	0,001	0

Fig. 4.1. Frigørelsesprocenter for PWR4 og PWR6 ifølge WASH-1400. Til sammenligning er vist udslippet fra TMI.

Sandsynligheden, udslipshøjden, hastigheden af energifrigørelsen og den effektive udbredelseshøjde ved vejr-situationen neutralt vejr og en vindhastighed på 6 m/s er angivet i figur 4.2.

Udslips-kategori	Middelventetid pr. reaktor	Udslipshøjde [m]	Energifrigørelses-hastighed [MW]	Udbredelses højde [m]
PWR4	2 millioner år	0	0,3	8,4
PWR6	170.000 år	0	0	0

Fig. 4.2. Sandsynlighed, udslipshøjde og energifrigørelses-hastighed ifølge WASH-1400. Den effektive udbredelseshøjde er beregnet for vejr-situationen Pasquill D med en vindhastighed på 6 m/s.

Tidspunktet for udslippet start regnet fra nedlukningstidspunktet, varigheden af udslippet og varselstiden før udslippet er vist i figur 4.3.

Udslips- kategori	Starttidspunkt for udslip [timer]	Værlighed af udslip [timer]	Varselstid [timer]
PWR4	2	3	2
PWR6	12	10	1

Fig. 4.3. Starttidspunkter, værlighed samt varselstider for udslipskategorierne PWR4 og PWR6 ifølge WASH-1400.

På fig. 4.4 og 4.5 er vist tidsforløbet for skypassage som funktion af centerlinie afstanden.

4.1. PWR4-uheld

Denne kategori omfatter fejl i nødkølesystemet og i reaktorindeslutningens overbrusningssystem efter et uheld med tab af kølemiddel sammen med en fejl i reaktorindeslutningens isoleringssystem. Dette vil ifølge WASH-1400 resultere i udslip af 60% af ædelgasserne og 9% af joden og 4% af alkalimetallerne, som er til stede i kernen på udslipstidspunktet. Det meste af udslippet vil ske kontinuert over en periode af 2 til 3 timer. Udslippet medfører en relativ lav energifrigørelshastighed. Det understreges, at uheldet er et overordentligt alvorligt uheld, der fuldstændig ødelægger de centrale dele af reaktoren. Fremtidig elproduktion ved hjælp af reaktoranlægget må anses for udelukket.

4.2. PWR6-uheld

PWR6-uheldet er kendt under navnet: "Kinasyndromet".

Udslippet minder om TMI-udslippet, idet der er tale om et næsten rent ædelgasudslip. Måden, hvorpå udslippet sker, er der-

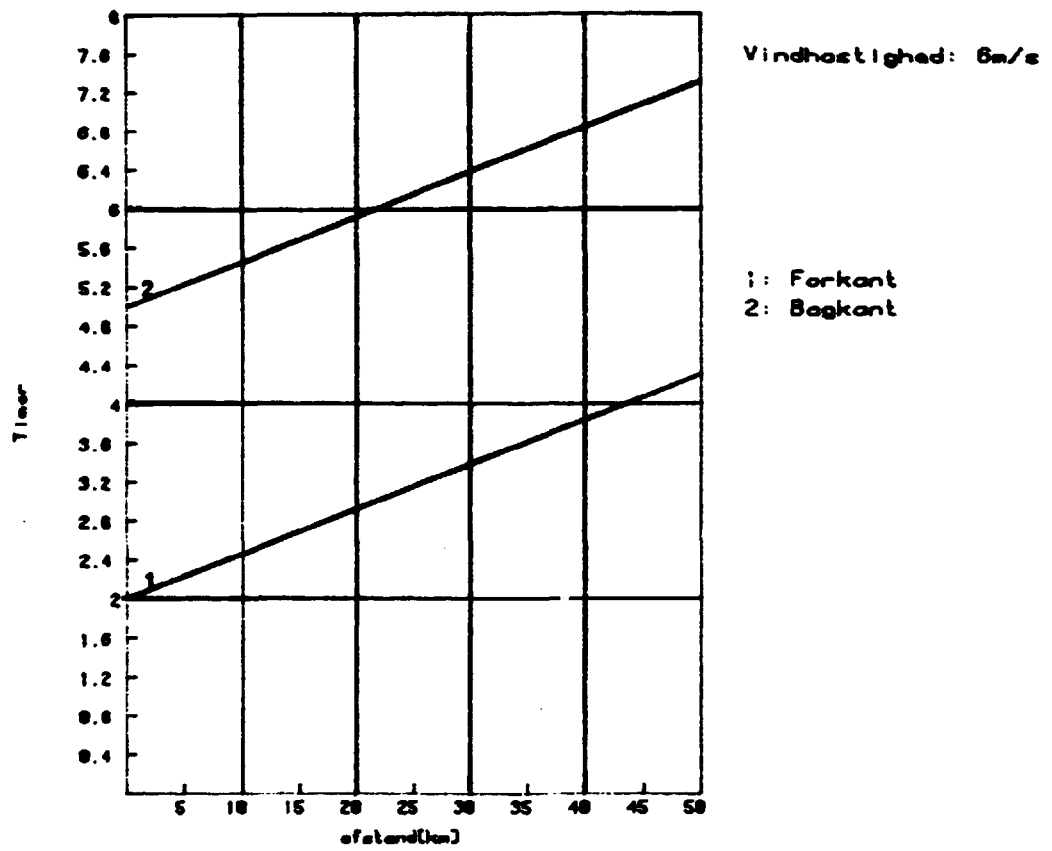


Fig. 4.4. PWR4 Skypassage

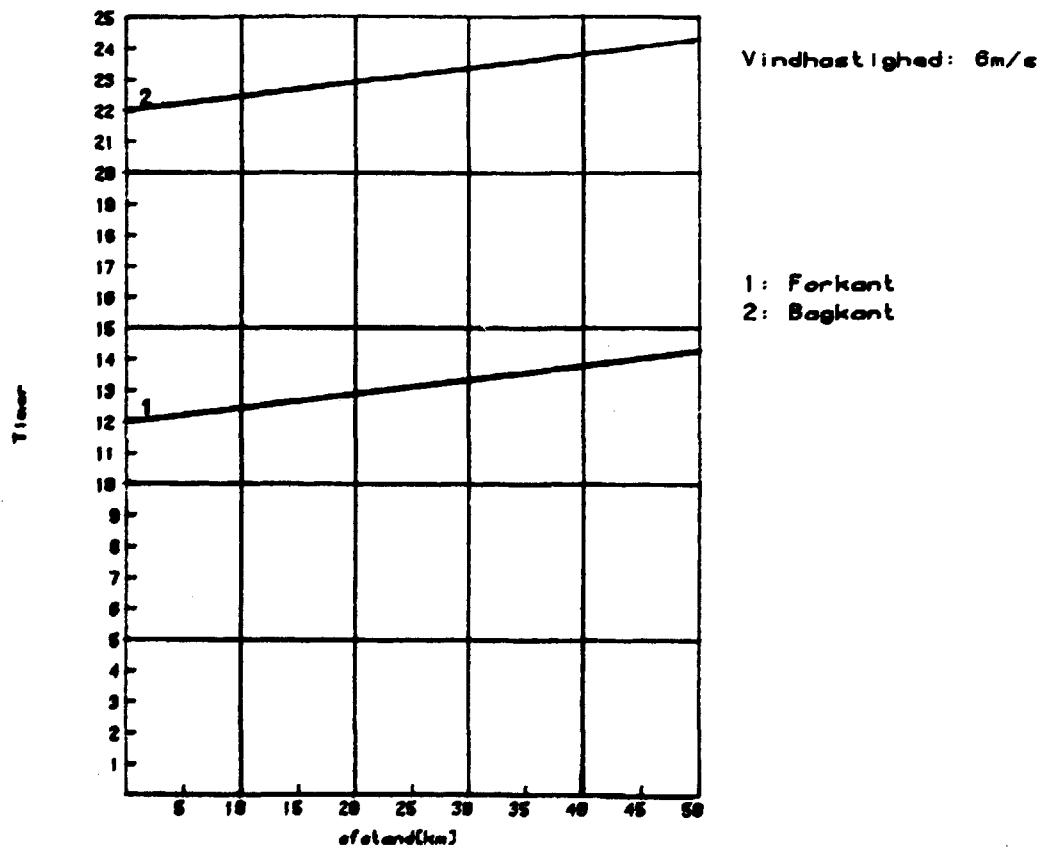


Fig. 4.5. PWR6 Skypassage

imod helt forskellig fra TMI-uheldet, hvor der ikke var tale om en kernenedsmeltning.

PWR6-uheldet omfatter en kernenedsmeltning på grund af fejl både i kernens primære kølesystem og i nødkølesystemet. Overbrusningssystemet i reaktorindeslutningen virker ikke, men indeslutningsbarrieren opretholdes, indtil den smeltede kerne i løbet af 12 timer har smeltet sig igennem indeslutningens betonfundament. De radioaktive materialer slipper ud i jorden, samtidig med at der sker en vis lækage til atmosfæren igennem jorden. Direkte lækage til atmosfæren vil også ske med lav hastighed forud for gennemsmeltningen af indeslutningen. Det meste af udslippet vil ske kontinuert over en periode af omkring 10 timer. Udslippet vil omfatte 30% af ædelgasserne, ca. 0,2% af joden og 0,08% af alkalimetallerne, som er til stede i kernen på udslipstidspunktet. Energifrigørelses hastigheden vil være meget lille.

Der er, som ved PWR4-uheldet, tale om et meget alvorligt uheld, der fuldstændig ødelægger de centrale dele af reaktoren. Fremtidig elproduktion ved hjælp af reaktoranlægget må anses for udelukket.

5. BEREGNINGSMODEL OG ØVRIGE BEREGNINGSPORUDSÆTNINGER

5.1. Beregningsmodel

De radioaktive materialer, der kan slippe ud i atmosfæren som følge af et uheld på et atomkraftværk er hovedsageligt luftarter, dråber og små partikler, og disse vil af vinden blive ført væk på samme måde som regnen fra en skorsten. Det simpleste billede af den atmosfæriske transportmekanisme er en horisontal fane, som består af de frigjorte luftbårne materialer og som følger vindens retning. Den vertikale og horisontale dimension af fanen vil vokse med voksende afstand fra kilden på grund af turbulent opblanding.

I fanen vil koncentrationerne af de frigjorte materialer i det væsentlige være bestemt af frigivelsesbetingelserne, afstanden til kilden, vindhastigheden, turbulensen samt fjernelsen af materialer fra fanen på grund af deponering.

Beregningerne i denne rapport af koncentrationer af radioaktive materialer er baseret på et sådant fanebillede, nemlig den såkaldte Gauss fanemodel.

Røg, der kommer ud af en skorsten, er kun undtagelsesvis formet som en glat horisontal konus med en retlinet akse, som det ses på fig. 5.1.

Det er vanskeligt at bestemme, hvorledes fanens form vil afvige fra den "ideale" på et givet tidspunkt, men det synes i mange tilfælde, at formen bliver ret regulær, hvis det billede, der betragtes, er midlet over nogle minutter. Det er denne midlede fane, som det er muligt at beskrive med den Gaussiske fanemodel.

Den Gaussiske fanemodel er begrænset af jordoverfladens tilstedeværelse. Det antages derfor, at det materiale i fanen, der når jordoverfladen, og som ikke bliver deponeret, bliver reflekteret ved overfladen.

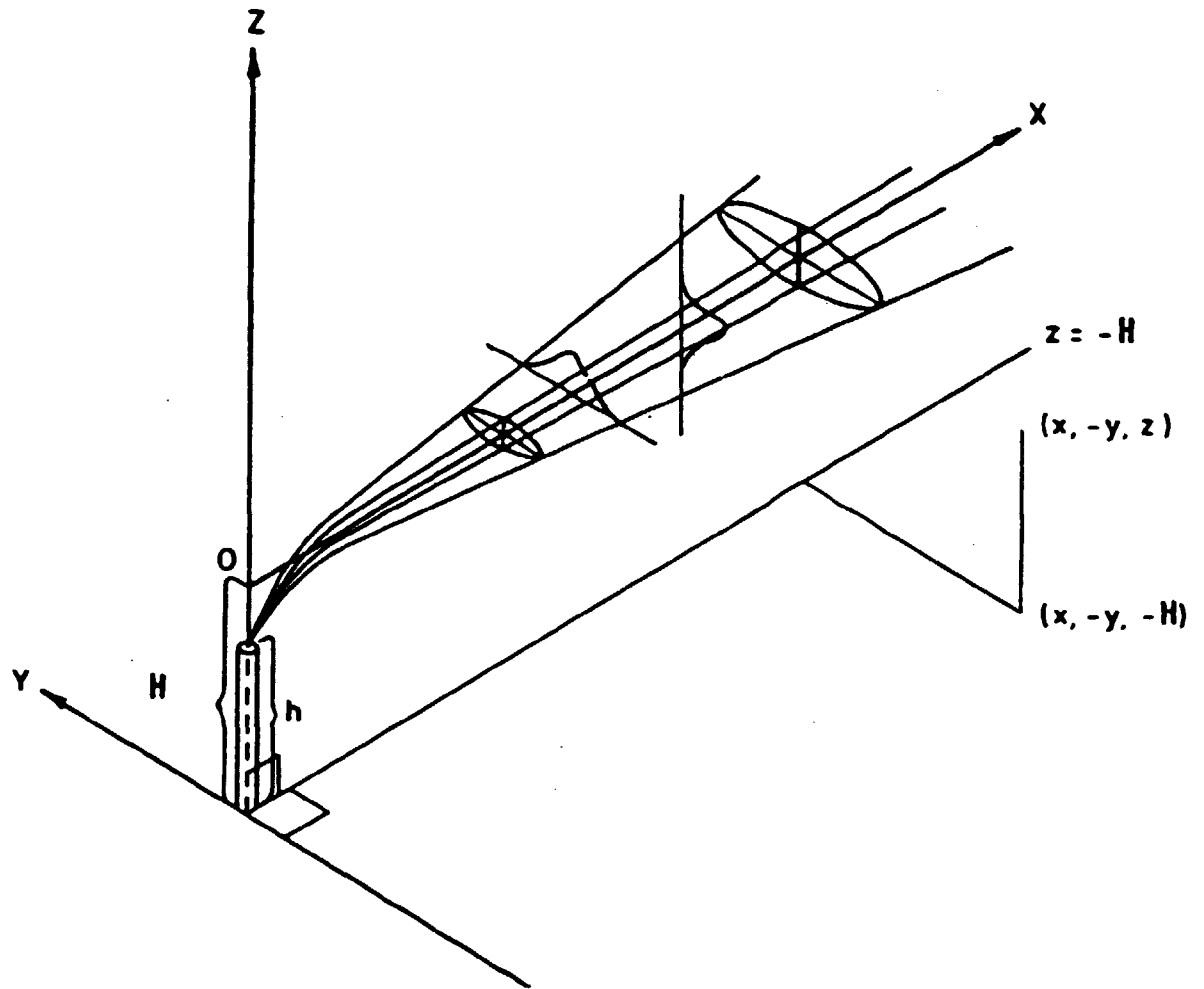


Fig. 5.1. Den Gaussiske fanemodel. Udslippet kommer fra en skorsten med højden h og den effektive udbredelseshøjde er H .

For at modellen kan anvendes til beskrivelse af spredning i atmosfæren af luftbårne materialer fra en forureningskilde, skal den atmosfæriske turbulens være homogen og stationær. Det er klart, at atmosfæren ikke er så ideel, hvorfor denne forudsætning kun er opfyldt med tilnærmelse. En af de karakteristiske egenskaber ved den Gaussiske spredningsmodel med spredningsparametrene givet som voksende funktioner med afstanden fra kilden, er, at koncentrationerne i fanen vil falde med voksende afstand.

Ofte fremstilles den Gaussiske fane som en cigarformet sky, som ikke ændres med tiden. Generelt er dette billede forkert, fordi - som man let kan overbevise sig om ved at betragte røgen fra en virkelig kilde - fanen med tiden vil "bølge" frem og tilbage henholdsvis til siderne og op og ned. Til trods herfor vil for praktiske formål en Gaussisk fanemodel ofte give tilfredsstillende nøjagtige resultater, forudsat der er midlet over det specificerede tidsrum, man er interesseret i. For nærmere beskrivelse af modellen henvises til (Thykier-Nielsen, 1980).

5.2. Bygningsafskærmning

I beregninger af dosis fra deponeret aktivitet på overflader anvendes dosis i én meters afstand over en plan flade af uendelig udstrækning og med jævnt fordelt overfladeaktivitet som referencedosis. Den reelle dosis vil altid være mindre end referencedosis på grund af forskellige reduktionsfaktorer, såsom afskærmning fra omkringliggende bygninger og de bygninger eller transportmidler, man opholder sig i.

Den afskærmende virkning af en bygning kan udtrykkes ved en afskærmningsfaktor, som er forholdet mellem dosis, der modtages henholdsvis inde i og udenfor bygningen.

5.2.1. Indendørs ophold

I USA er der udført en del eksperimenter til bestemmelse af huses afskærmningsfaktorer for deponeret aktivitet - primært for fritliggende huse med 1 eller 2 etager (Auxier, 1959, Burson, 1966 Burson, 1970 samt Burson 1975). Der blev for murstens- og betonvillae målt afskærmningsfaktorer i området 0,1-0,2 i de ydre rum borte fra vinduer og døre. I indre rum blev der målt afskærmningsfaktorer på 0,05-0,1 (Burson, 1966).

For et dansk enfamiliehus er afskærmningsfaktoren beregnet til ca. 0,07. Når hensyn tages til forskelle i byggetraditioner og -standarder i USA og Danmark er der en rimelig god overensstemmelse mellem de eksperimentelle resultater og den i disse bereg-

ninger brugte afskærningsfaktor på 0,08.

For de eksterne gammadoser der hidrører fra de radioaktive stoffers henfald i skyen er benyttet en afskærningsfaktor på 0,6 (fra WASH-1400).

På basis af de oplysninger, der forelå ved beregningernes gennemførelse (december 1981) er der for inhalationsdoserne brugt en reduktionsfaktor på 0,2 for at tage hensyn til filtervirkningen af bygninger.

5.2.2. Normal farten

Idet der forudsættes indendørs ophold under hele skypassagen bliver afskærningsfaktoren for de eksterne gammadoser fra skypassagen samt reduktionsfaktoren for inhalationsdoser uforandret fra indendørs ophold.

For at kunne tage hensyn til at personer opholder sig både udenørs og indendørs er det nødvendigt at anvende en tidsmidlet afskærningsfaktor for deponeret aktivitet.

I mangel af danske tal anvendes amerikanske (Aldrich, 1978), her opgives følgende midlede opholdstider:

Udendørs:	6% af tiden
Transport:	5% af tiden
Bolig, arbejde og skole:	89% af tiden

For bolig, arbejde og skole anvendes den ovenfor nævnte afskærningsfaktor på 0,08.

I følge ovenstående reference (Aldrich, 1978) er afskærningsfaktoren ved udendørs ophold såvel i spredt som i bymæssig bebyggelse 0,5. Det skyldes afskærmning fra omkringliggende bygninger m.v. Ved transport indregnes yderligere en faktor 0,5 som følge af transportmidlets egen afskærmende virkning (Lauridsen, 1981). Således bliver den samlede afskærningsfaktor ved transport $0,5 \times 0,5 = 0,25$.

Herefter kan den tidsmidlede afskærningsfaktor for deponeret aktivitet beregnes:

$$0,06 \cdot 0,5 + 0,05 \cdot 0,25 + 0,89 \cdot 0,08 = 0,11$$

5.3. Vejreffekt

Aktivitet, der er deponeret udendørs, vil som følge af vejrlig og specielt regn forsvinde hurtigere, end den fysiske halveringstid betinger. Der er tale om en korttidseffekt som følge af nedbør, der falder samtidig med eller i de første par dage efter deponeringen, samt om en langtidseffekt.

Der er på Risø gjort en række forsøg på at måle disse effekter med rubidium, der reagerer kemisk som cesium (Warming, 1981). I gennemsnit fås, at vejret i begyndelsesperioden giver en halveringstid på 27 dage på asfalterede veje.

H.J. Gale angiver en halveringstid på ca. 100 år for langtidseffekten (Gale, 1963).

Herefter bliver reduktionsfaktoren:

$$0,6 \cdot \exp(-9,5t) + 0,4 \cdot \exp(-0,0075t),$$

hvor t angives i år.

5.4. Beregning af organdoser

Stråledosis måles i enheden Sievert (Sv) samt i den ældre enhed rem (røntgen equivalent man), hvor 1 Sv er lig med 100 rem. På de følgende figurer og i teksten er dosis angivet i rem.

5.4.1 Knoglemarv

Store strålingsdoser kan skade knoglemarven og de andre bloddannende organer og dermed evnen til at producere nye blodceller. Det antages almindeligvis (WASH-1400), at skade på knoglemarven er den vigtigste årsag til tidlig død på grund af store strålingsdoser til hele kroppen. Det vil sige, at strålingsskade af lunger og mavetarmkanal sandsynligvis ikke vil være dødbringende, medmindre knoglemarven også beskadiges. Der-

for beregnes den akutte knoglemarvsdosis som summen af gammadosis fra skypassage, plus gammadosis fra deponeret aktivitet integreret over opholdstiden, plus hele indåndingsdosen i de første 7 dage samt halvdelen af indåndingsdosen fra den 8. til den 30. dag. Begrundelsen for reduktion af indåndingsdosen fra den 8. til den 30. dag er, at en strålingsdosis, som modtages over et tidsrum af 2-4 uger, kun er ca. halvt så effektiv med hensyn til skadevirkning, som hvis den samme dosis modtages over få dage (WASH-1400). Størstedelen af dosis til knoglemarven modtages indenfor den første måned.

5.4.2. Lunger

For de betragtede uheldsudslip vil sandsynligheden for dødsfald forårsaget af lungedoser være væsentlig mindre end fra den samtidig modtagne knoglemarvsdosis. Radioaktive stoffer, som tilhører aktiniderne (som inkorporeres i lymfeknuderne), lanthangruppen og i mindre grad rutheniumgruppen giver det største bidrag til lungedosis. Mellem 50% og 80% af den inhalerede dosis vil være absorberet indenfor et år. Dosis til lungerne beregnes derfor som summen af gammadosis fra skypassage, plus gammadosis fra deponeret aktivitet integreret over opholdstiden, plus den interne dosis til lungerne fra inhalation integreret over et år.

Da risikoen for akut skade afhænger af hastigheden, hvormed lungedosis akkumuleres, vil denne beregningsmetode overvurdere dosis.

5.4.3. Mave-tarmkanal

Lokal bestråling af mave-tarmkanalen med store doser kan medføre, at stamcellerne i tarmepitelet dør, hvilket manifesterer sig som diarré, blodstyrtning og endelig død.

Indholdet i mave-tarmkanalen fornyes normalt relativt hurtigt, og inhalationsdosis i dette område vil stort set være absorberet indenfor en uge. De vigtigste nuklider som bidrager til den interne dosis er lanthangruppen, aktiniderne og rutheniumgruppen.

Dosis beregnes som summen af gammadosis fra skypassage, plus gammadosis fra deponeret aktivitet integreret over opholdstiden, plus den interne dosis, der modtages af mave-tarmkanalen indenfor en uge.

5.4.4. Skjoldbruskkirtel

Meget store doser af I-131 til skjoldbruskkirtelen kan forårsage en accelereret frigivelse af hormoner. I ekstreme tilfælde kan der opstå en alvorlig forgiftning, som medfører hjertestop og død. Langtidskonsekvenserne af store skjoldbruskkirteldoser kan være såkaldt hyperthyreoidisme eller kræft. I-131 vil bidrage med ca. 2/3 af dosis til skjoldbruskkirtelen. Da I-131 har en halveringstid på 8 dage, og de andre radioaktive jodisotoper, der kommer i betragtning, har en halveringstid på mindre end en dag, vil størstedelen af inhalationsdosis til skjoldbruskkirtelen være absorberet i løbet af en måned.

Dosis beregnes som summen af gammadosis fra skypassage, plus gammadosis fra deponeret aktivitet integreret over opholdstiden, plus den interne dosis til skjoldbruskkirtelen fra indåndet aktivitet integreret over 30 dage. Inhalationsdosis er den mest dominerende komponent.

Dosis fra inhalation er beregnet for voksne; dosis til børn, der afhænger af alderen, kan være op til 3 gange så stor.

5.4.5. Hele kroppen

For at opgøre de mulige langtidskonsekvenser af bestråling af hele kroppen beregnes det såkaldte committede effektive dosisækvivalent. Dette beregnes som summen af gammadosis fra skypassage, plus gammadosis fra deponeret aktivitet integreret over opholdstiden, plus det committede effektive dosisækvivalent fra inhalation. Det committede effektive dosisækvivalent fra inhalation er defineret som:

$$H_{50} = \sum_i W_{T,i} O_{50,i}$$

$O_{50,i}$ = 50 års committed dosisækvivalent for organ i.

$W_{T,i}$ = Vægtfaktor for organ i.

Summationen foretages for alle organer nævnt i fig. 5.2.

Data for O_{50} og W_T er taget fra ICRP Publikation 30, 1979. Vægtfaktorerne er vist i fig. 5.2.

Organ	Vægtfaktor
Gonader	0,25
Bryst	0,15
Knoglemarv	0,12
Lunger	0,12
Skjoldbruskkirtel	0,03
Skelet	0,03
5 andre organer	0,30

Fig. 5.2. Vægtfaktorer for forskellige organer.

6. DOSER FRA PWR4-UDSLIP

6.1 Individdoser

Som nævnt i kapitel 5 er det dosis til knoglemarven, der er afgørende for, om der sker tidlige skader. Derfor er alle individdoser i de nedenstående afsnit 6.1.1-6.1.3 beregnet som knoglemarvsdoser.

6.1.1. Udendørs ophold i 8 timer

På fig. 6.1 er vist knoglemarvsdoser for 8 timers udendørs ophold under fanens midterlinie som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km. De 8 timer starter 2 timer efter nedlukningen, d.v.s. ved udslippets begyndelse. Da skypassagen er overstået efter 8 timer, er påvirkningen fra gammadosis fra skyen og inhalationsdosis nået op på deres maksimale værdier. Som det

ses af figuren falder gammadosis fra deponeret materiale relativt hurtigere med stigende afstand end de to andre dosiskomponenter. Dette skyldes, som det ses på fig. 4.1, at depositionen i afstanden 1 km starter efter 3 minutter, mens depositionen i afstanden 50 km starter efter 2 timer og 19 minutter, der er således 2 timer og 16 minutters længere bestrålingstid i afstanden 1 km end i afstanden 50 km.

På fig. 6.2 er i skalaen 1:305.000 vist isodosiskurver for dosisværdierne 50 rem, 10 rem og 3 rem. På fig. 6.3 er tilsvarende i skalaen 1:38.000 vist kurverne for 200 rem, 100 rem og 50 rem. Indenfor den enkelte kurve er dosis større end den angivne værdi for kurven.

I figur 6.4 er vist de til den enkelte isodosiskurve hørende maksimale udstrækning i vindretningen, den maksimale bredde samt arealet, kurven omfatter.

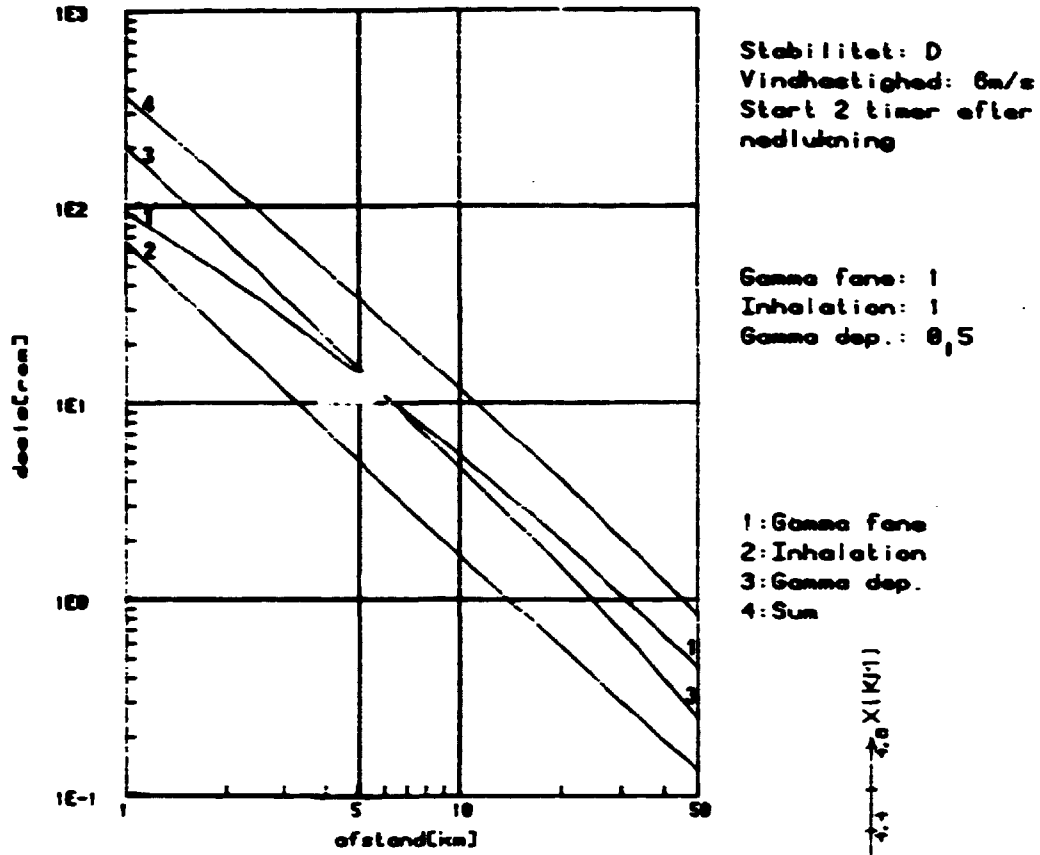


Fig. 6.1. PWR4. Maksimale knoglemarvdoser, 8 timer udendørs.

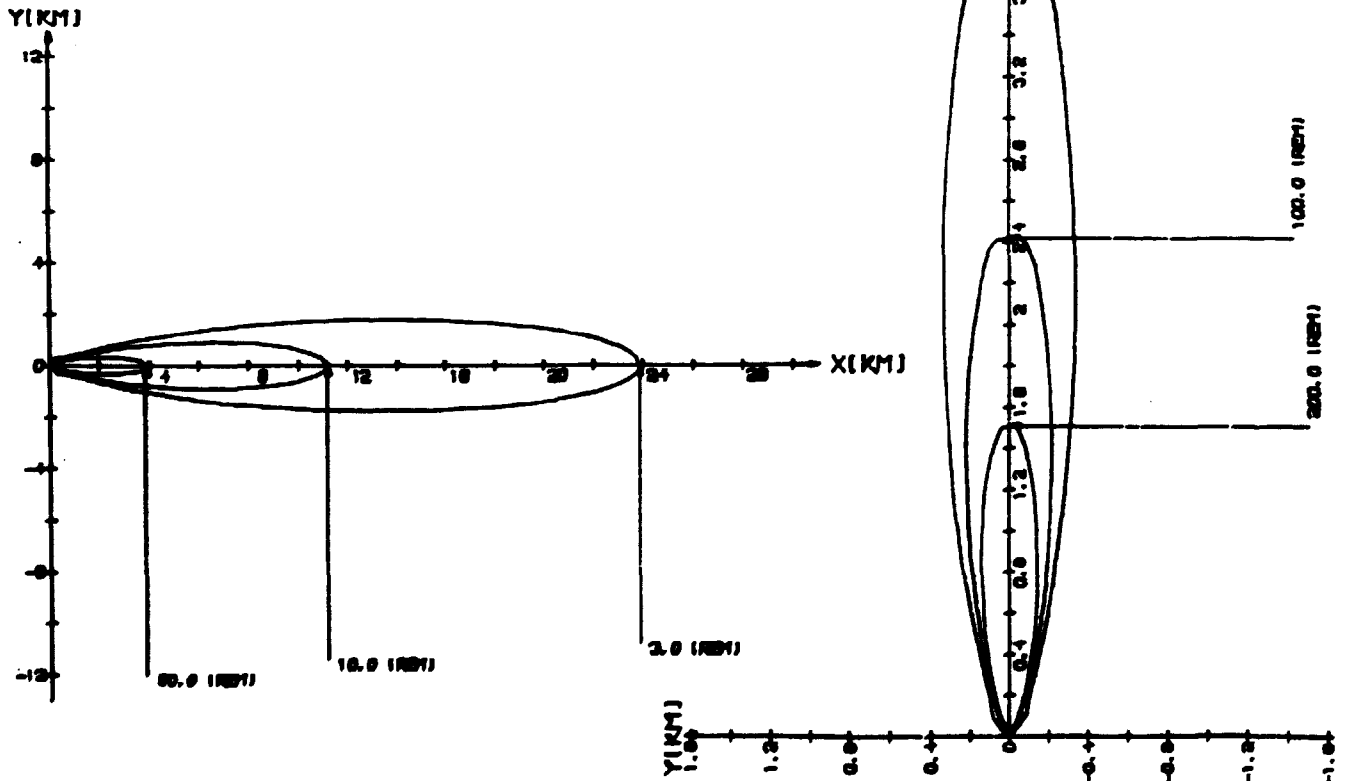


Fig. 6.2. Isodoser i skala 1:305.000

Fig. 6.3. Isodoser i skala 1: 38.000

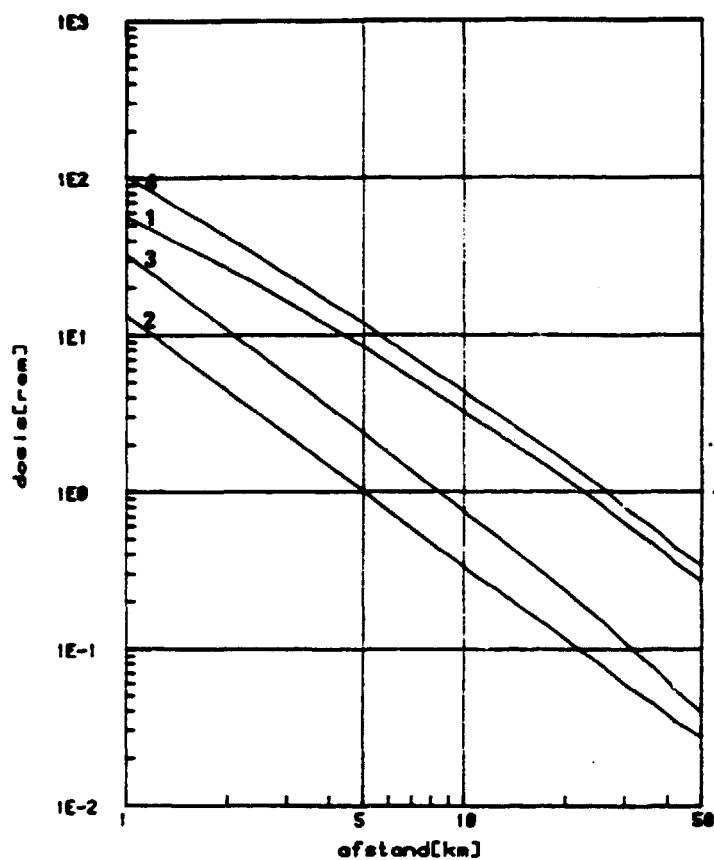
Dosisniveau udendørs ophold i 8 timer [rem]	Maksimal afstand i vindret- ningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
200	1,5	0,28	0,32
100	2,5	0,43	0,80
50	3,8	0,67	2,0
10	11,2	1,8	15,1
3	23,9	3,5	63,5

Fig. 6.4 Karakteristiske afstande og arealer af 5 isodosiskurver fra fig. 6.2 og 6.3 for PWR4-udslip, ved udendørs ophold i 8 timer startende 2 timer efter nedlukning.

6.1.2. Indendørs ophold i 8 og 24 timer

På fig. 6.5 er tilsvarende vist maksimale knoglemarvsdoser (d.v.s. doser i fanens centerlinie) for 8 timers indendørs ophold, som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km. Det ses, at indendørs ophold medfører et fald i dosis i forhold til udendørs ophold, fra 360 rem til 100 rem i 1 km's afstand og fra 0,8 rem til 0,3 rem i 50 km's afstand.

På fig. 6.6 er i skalaen 1:305.000 vist isodosiskurver for dosisværdierne 20 rem, 5 rem og 1 rem. På fig. 6.7 er tilsvarende i skalaen 1:38.000 vist kurverne for 100 rem, 50 rem og 20 rem.



Stabilitet: D
 Vindhastighed: 8m/s
 Start 2 timer efter nedlukning

Gamma fane: 0,6
 Inhalation: 0,2
 Gamma dep.: 0,08

1: Gamma fane.
 2: Inhalation
 3: Gamma dep.
 4: Sum

Fig. 6.5. Knoglemarv, 8 timer indendørs

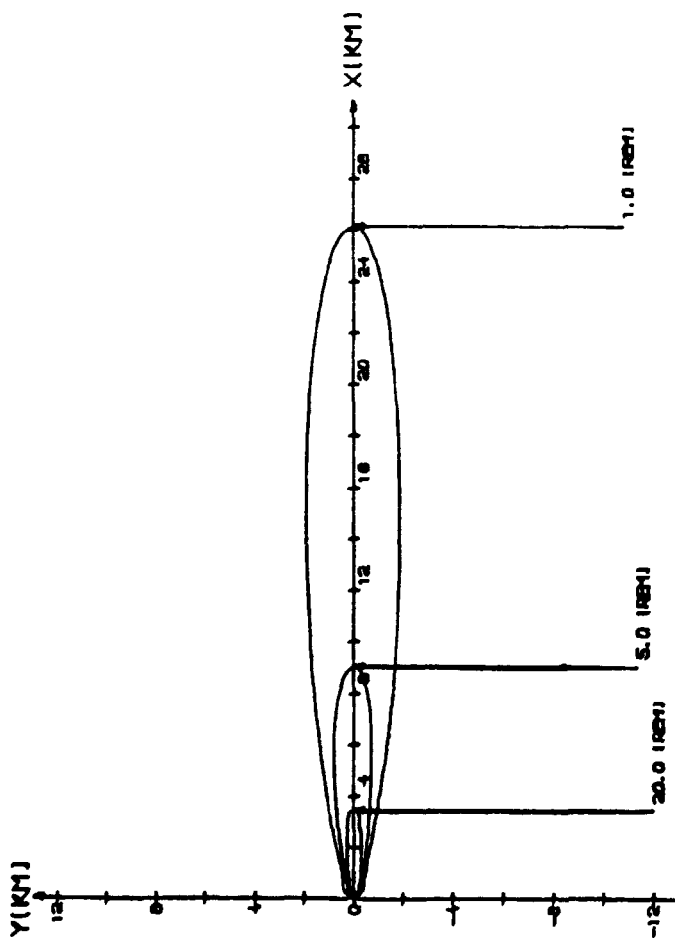


Fig. 6.6. Isodoser i skal 1: 305.000

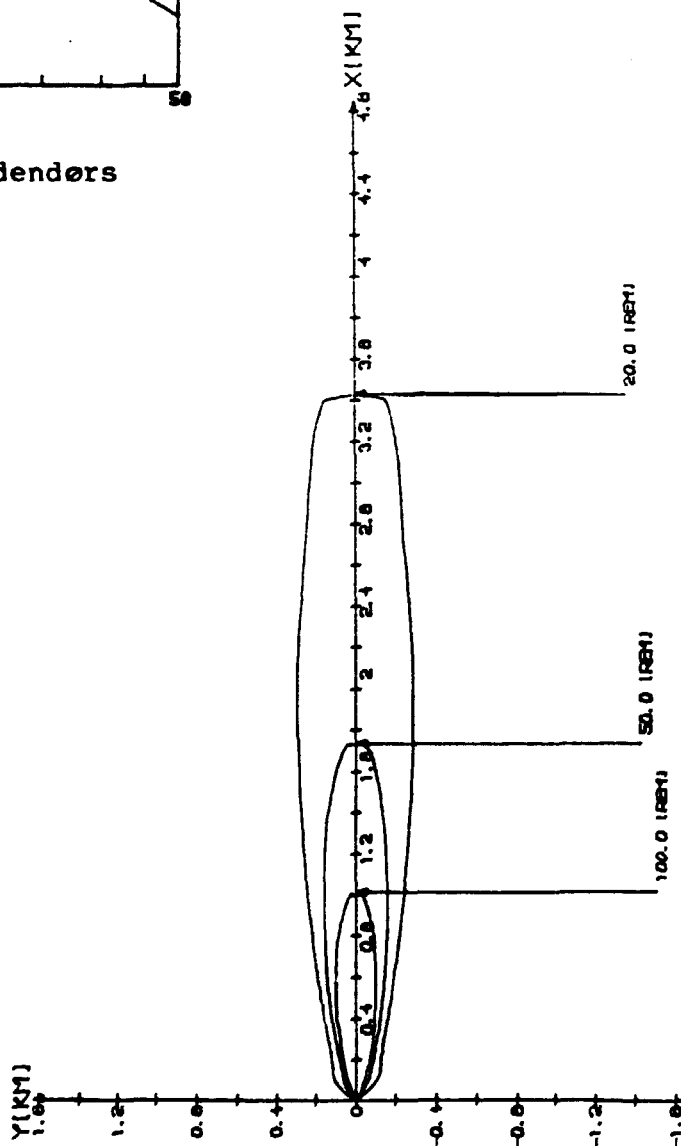


Fig. 6.7. Isodoser i skala 1: 38.000

I fig. 6.8 er vist de enkelte kurvers karakteristiske afstande og arealer.

Dosisniveau Indendørs ophold i 8 timer [rem]	Maksimal af- stand i vind- retningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
100	1,1	0,20	0,15
50	1,7	0,31	0,41
20	3,4	0,58	1,6
5	9,1	1,5	10,2

Fig. 6.8. Karakteristiske afstande og arealer af 5 isodosiskurver fra fig. 6.6 og 6.7 for PWR4-udslip ved indendørs ophold i 8 timer startende 2 timer efter nedlukning.

Det ses at overgangen fra udendørs ophold til indendørs ophold betyder et fald i centerliniedoserne på ca. en faktor 3 og et fald i de omsluttede arealer på ca. en faktor 5.

På fig. 6.9 er vist de maksimale knoglemarvsdoser i fanens centerlinie for 24 timers indendørs ophold, som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km. Gammadosis fra fanen og inhalationsdosis er uændret fra fig. 6.5, medens gammadosis fra deponeret aktivitet er steget mellem en faktor 2,4 og 3,4 mest på de største afstande. Det betyder, at den samlede dosis er steget mellem 44% og 28% mindst på de største afstande. Selv om gammadosis fra deponeret aktivitet således stiger mest på store afstande, betyder det mindst, fordi den eksterne gammadosis fra fanen er dominerende.

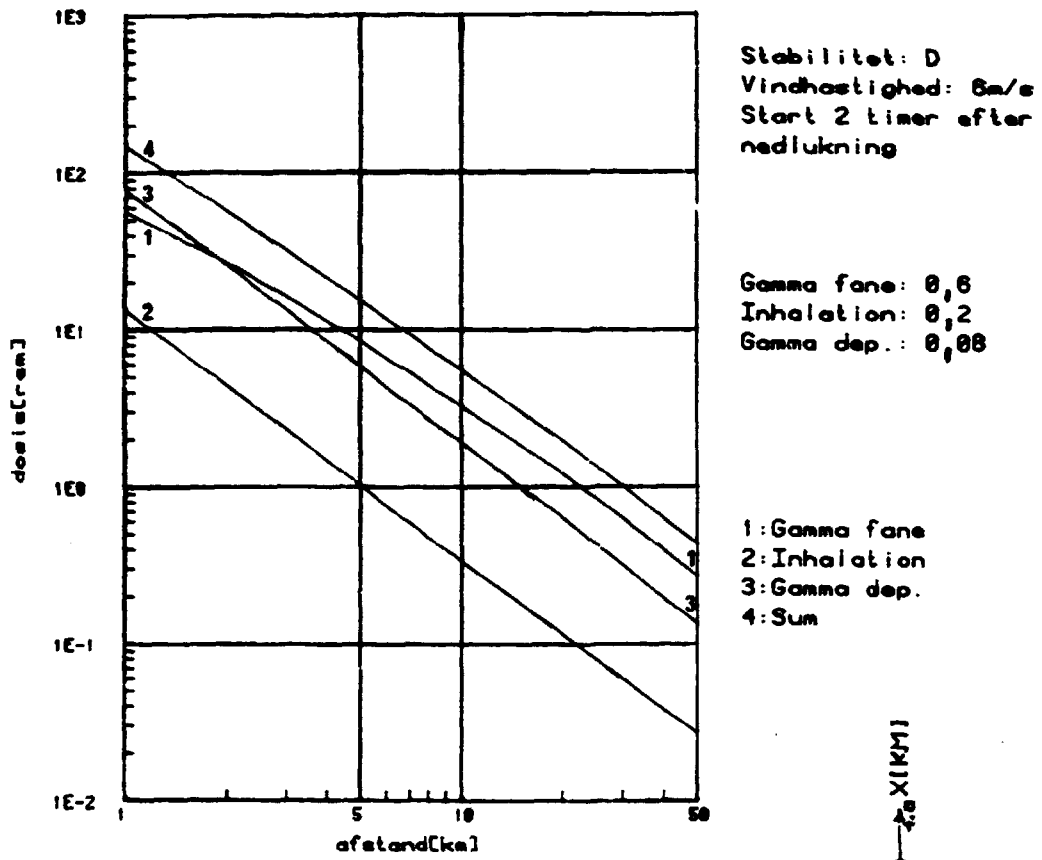


Fig. 6.9. PWR4 Knoglemarv, 24 timer indendørs

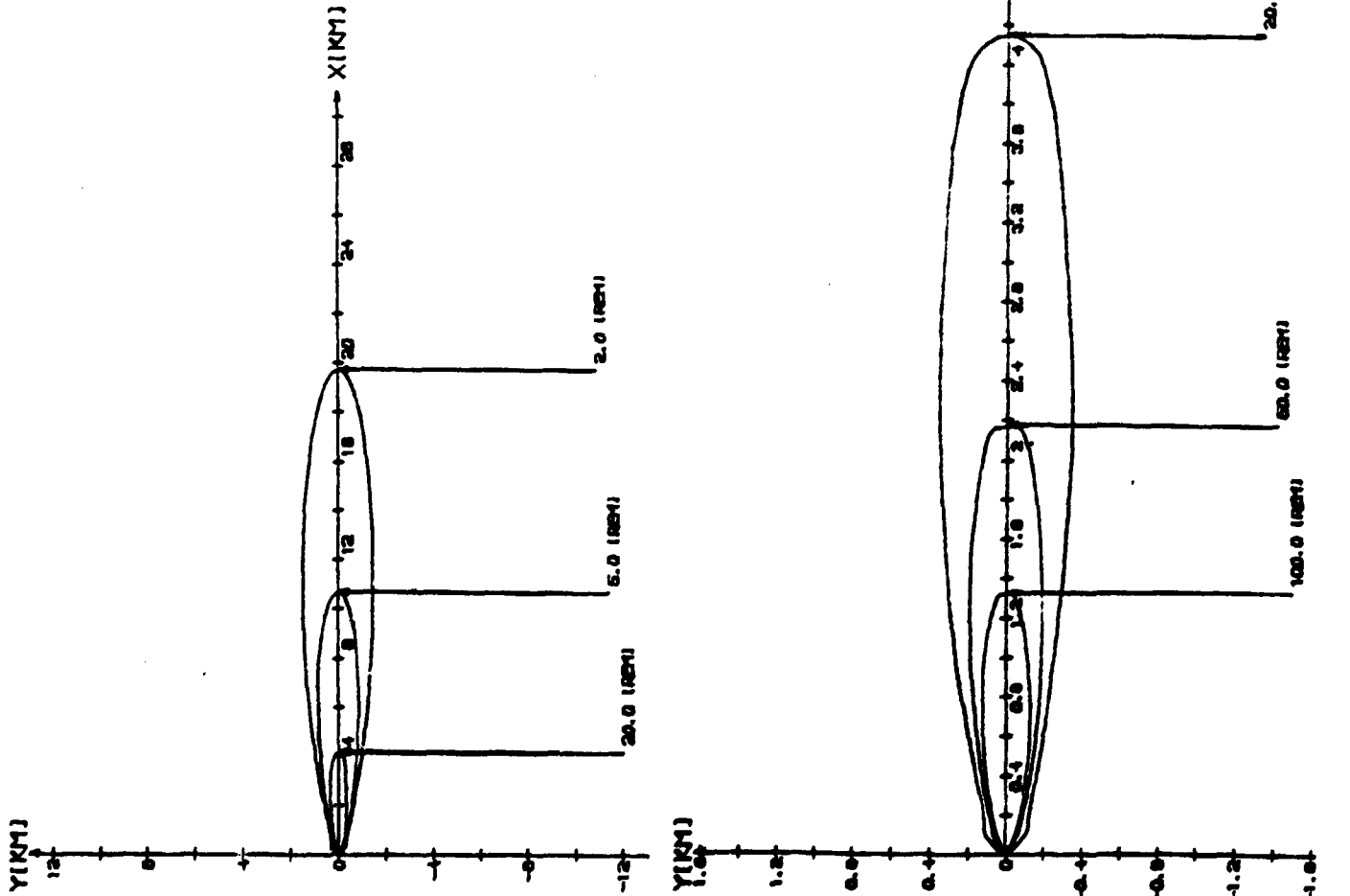


Fig. 6.10. Isodoser i skala 1: 305.000

Fig. 6.11. Isodoser i skala 1: 38.000

På fig. 6.10 er i skalaen 1:305.000 vist isodosiskurver for dosisværdierne 20 rem, 5 rem og 2 rem. På fig. 6.11 er tilsvarende i skalaen 1:38.000 vist kurverne for 100 rem, 50 rem og 20 rem.

I fig. 6.12 er vist de enkelte kurvers karakteristiske afstande og arealer.

Dosisniveau Indendørs ophold i 24 timer [rem]	Maksimal afstand i vindret- ningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
100	1,3	0,25	0,24
50	2,3	0,39	0,65
20	4,2	0,70	2,2
5	10,7	1,7	13,7 2
2	19,6	2,9	43,1

Fig. 6.12. Karakteristiske afstande og arealer af 5 isodosiskurver fra fig. 6.10 og 6.11 for PWR4-udslip, ved indendørs ophold i 24 timer startende 2 timer efter nedlukning.

Det ses at arealerne øges mellem 34% og 60%, størst for de små arealer, når tiden for indendørs ophold øges fra 8 timer til 24 timer.

6.1.3. Normal færd i 1 år

For normal færd som defineret i afsnit 3.4.2 er der beregnet knoglemarvsdoser på centerlinien for PWR4-udslippet for de fire centerlinieafstande 5 km, 10 km, 20 km og 50 km, som funktion af tiden. Under skypassage, d.v.s. de første 8 timer, er forudsat indendørs ophold. På fig. 6.13 er der for de 4 afstande vist en en kurve for den samlede knoglemarvsdosis.

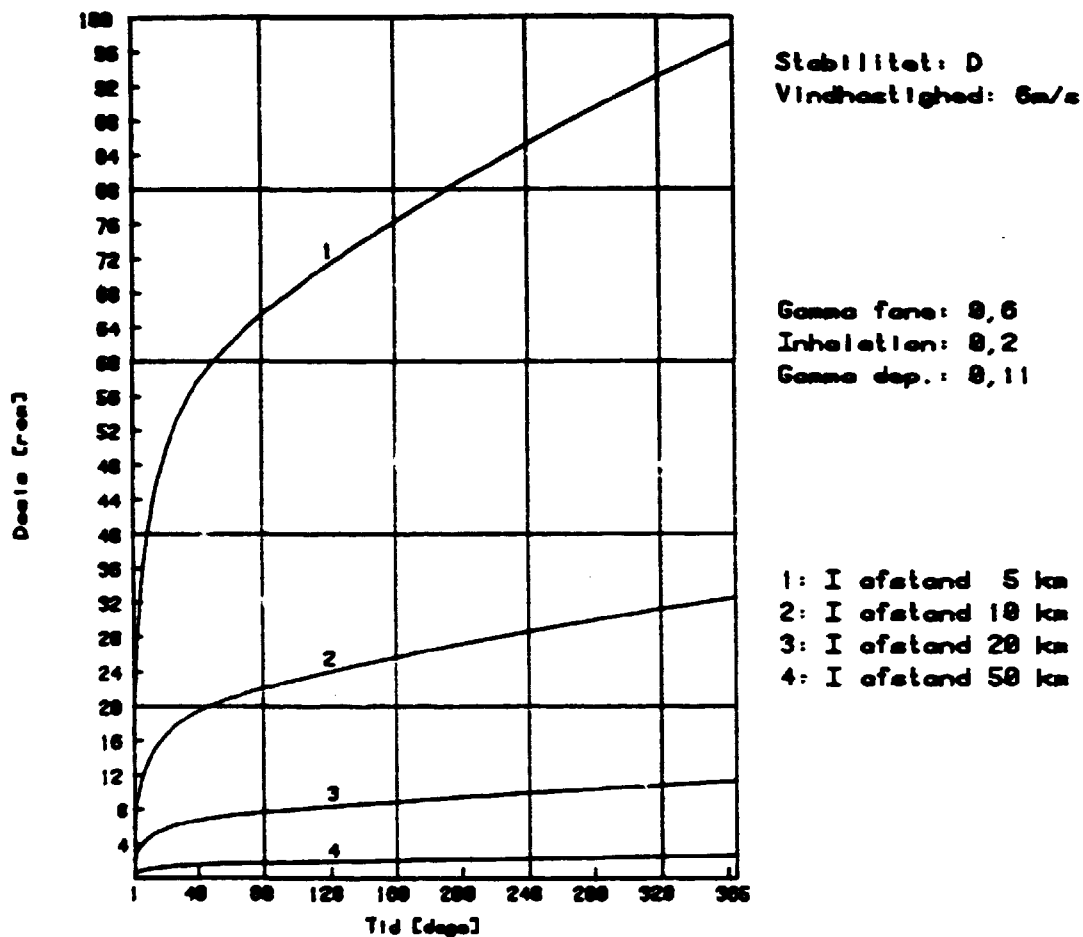


Fig. 6.13. Den samlede knoglemarvsdosis som funktion af tiden for PWR4-udslip. Kurverne er beregnet for normalt ophold på centerlinien (89% indendørs, 6% udendørs og 5% transport).

Dosis fra deponeret aktivitet afhænger af hvor lang tid det er siden deponeringen skete, denne tid er på ethvert tidspunkt mindst for store afstande på grund af den senere skypassage. Et døgn efter nedlukning udgør dosis fra deponeret aktivitet mellem 37% og 45% af den samlede dosis, mindst for store afstande. 365 døgn efter nedlukning udgør dosis fra deponeret aktivitet mellem 89% og 91% af den samlede dosis. Forskellen falder naturligvis efterhånden som tiden går, idet forskellen i skypasagetidspunktet får relativ mindre betydning.

6.1.4. Organdoser ved 24 timers indendørs ophold

På fig. 6.14 er vist organdoser for 4 organer samt helkroppsdo-
ser som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km.

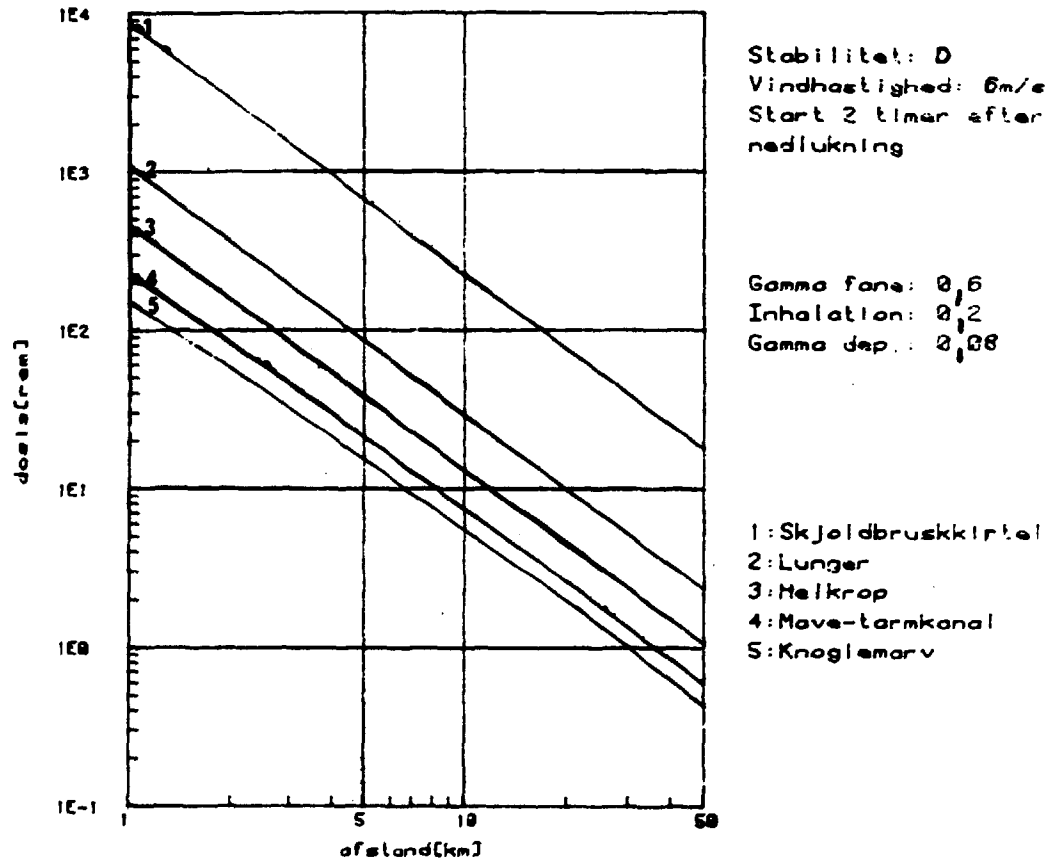


Fig. 6.14. PWR4 udslip. Organdoser ved 24 timers indendørs op-
hold.

Kurven med knoglemarvsdoser er den samme som sumkurven i fig. 6.9. Tærskelværdien, hvorunder der ikke kan ske tidlige dødsfald, er ved minimal behandling, 100 rem (ved organdoser bør anvendes enheden rad, der angiver strålingsenergi p. masseenhed. Enheden rem, der normalt kun anvendes ved helkroppsdo-
ser, er et mål for strålingens biologiske virkning, den fremkommer ved at gange den absorberede dosis i rad med en kvalitetsfaktor. Da der i disse beregninger kun indgår gammastråling, hvor kvalitetsfaktoren er 1, er enheden rad ikke indført).

Denne værdi er baseret på bl.a. data fra ofrene for atombomb-erne i 1945, som kun fik begrænset medicinsk behandling, på et tidspunkt da den nukleare medicin var mindre fremskreden end i dag. Når denne tærskelværdi overskrides, vokser sandsynligheden for dødsfald kun langsomt, således er der mere end 99% chance for at overleve en dosis på 200 rem.

Forudsætter man minimal behandling, er der således mulighed for tidlige dødsfald inden for det område i vindretningen, der er indrammet af isodosiskurven for 100 rem. Af fig. 6.3 ses, at udstrækningen af dette område ved 8 timers udendørs ophold er 2,4 km, og områdets største bredde er ca. 430 m. (areal 0,8 km²). Bor indbyggerne jævnt fordelt, omfatter området for plads 1's vedkommende ca. 200 indbyggere og for plads 2 ca. 15 indbyggere.

For indendørs ophold i 8 timer viser fig. 6.5, at knoglemarvsdosis i centerlinien netop er 100 rem i 1 km's afstand. Da der ikke er regnet med indbyggere indenfor denne afstand, kan der altså ikke forventes nogen tidlige dødsfald ved indendørs ophold i 8 timer, selv under den pessimistiske forudsætning om minimal behandling.

Med støttende medicinsk behandling, som inkluderer steril isolation, rigelige antibiotika og hel eller delvis udskiftning af blodet, høves tærskelværdien, hvorunder der ikke kan ske tidlige dødsfald til 300 rem. På fig. 6.1 ses, at knoglemarvsdosis i centerlinien ved 8 timers udendørs ophold i 1 km's afstand er mindre end 300 rem. Med støttende medicinsk behandling kan muligheden for tidlige dødsfald således helt udelukkes.

For lungedoser er der i WASH-1400 (fig. VI 9-3) vist sammenhængen mellem sandsynligheden for dødsfald indenfor et år og den modtagne lungedosis. En lungedosis på 5.000 rem giver en dødsrisiko på 2% og en lungedosis på 4.000 rem giver en dødsrisiko på 1%. På fig. 6.14 ses at lungedosis i afstanden 1 km er på 1000 rem, hvilket altså ikke giver risiko for tidlige dødsfald.

Ifølge WASH-1400 er tærskelværdien for akutte skader som følge af skjoldbruskkirteldoser på 25.000 rem. Desuden oplyses at enhver, der får mindre end tærskelværdien i knoglemarvsdosis, også vil få mindre end tærskelværdien i skjoldbruskkirteldosis. På figuren ses, at skjoldbruskkirteldosis i afstanden 1 km er på 8.500 rem, hvilket ikke vil medføre akutte skader.

For doser til mave-tarmkanalen angiver WASH-1400 tærskelværdien, hvorunder der ingen risiko er, til 2.000 rem. Det ses, at dosis til mave-tarmkanalen i afstanden 1 km er på 220 rem, hvilket ikke vil medføre dødsfald.

På fig. 6.15 og 6.16 er vist helkroppsdozer for 24 timers ophold opdelt på 3 isotopgrupper: Ædelgas, jod og andre isotoper. På fig. 6.15 er vist den absolutte fordeling, hvor sumkurven er den samme som kurve 3 på fig. 6.14. På fig. 6.16 er sumkurven sat til 100%, og den relative dosisfordeling af de 3 isotopgrupper er vist. Det ses, at ædelgasbidraget er relativt stigende med afstanden, det skyldes, at dette bidrag falder langsommere end bidraget fra jod og andre isotoper, hvor der sker deponering.

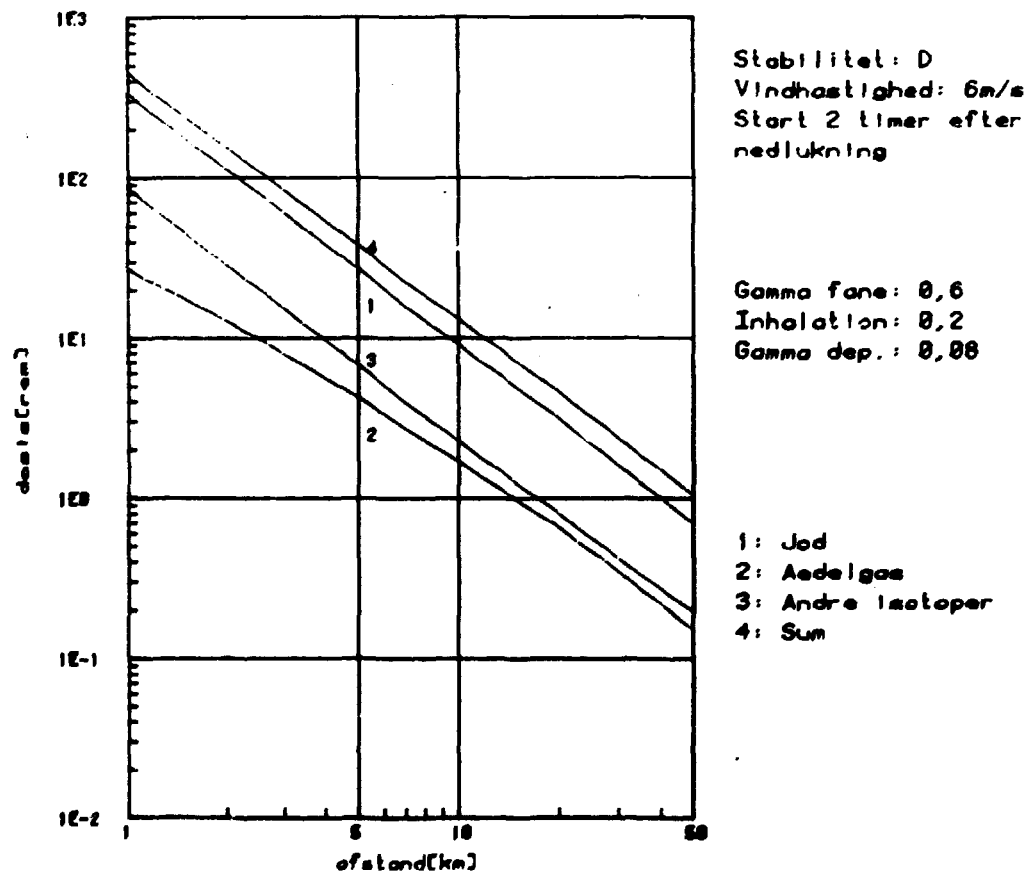


Fig. 6.15. PWR4, Helkrop, 24 timer indendørs

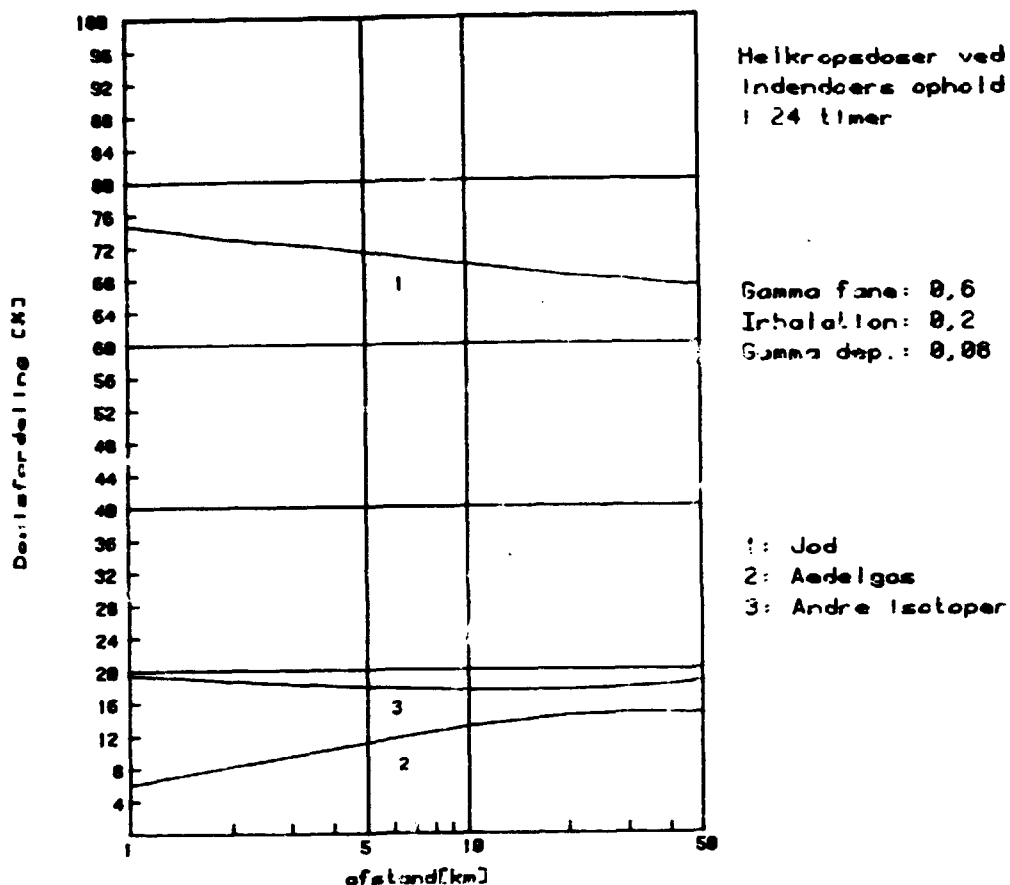


Fig. 6.16. Dosisfordeling ved PWR4-uheld

På fig. 6.17 og 6.18 er vist en følsomhedsanalyse for tørdeponeringshastigheden v_g . På fig. 6.17 er kurve 2 med $v_g = 1$ cm/s, den samme som sumkurven på fig. 6.15 og kurve 3 på fig. 6.14. Denne værdi er taget fra WASH-1400 og gælder kun for ru overflader, d.v.s. landområder. Ved glatte overflader som veje, husvægge og -tage, ubevoksede jordoverflader etc. er deponeringshastighederne i intervallet 0,02 til 0,03 cm/s (Hobert, 1976 og Jonas, 1979). For et byområde med 82% glatte overflader og 18% ru overflader fås $v_g = 0,2$ cm/s som vist i kurve 3. Det teoretiske maksimum fås for en perfekt absorberende overflade med $v_g = 2$ cm/s som vist i kurve 1. Af kurverne ses, at indviddoserne er meget lidt følsomme for den valgte værdi af v_g . Uanset om v_g stiger en faktor 2 eller falder en faktor 5, bliver udsvinget i doserne mindre end 25%.

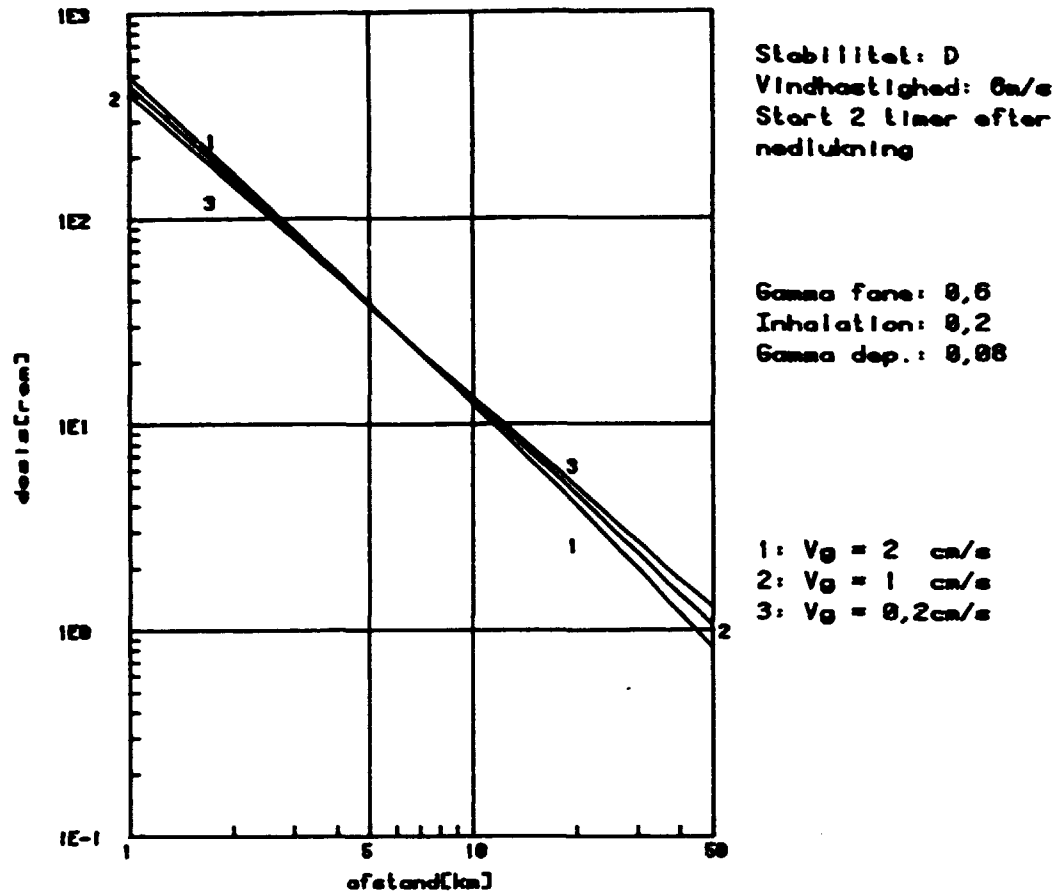


Fig. 6.17. PWR4 Helkrop, 24 timer indendørs

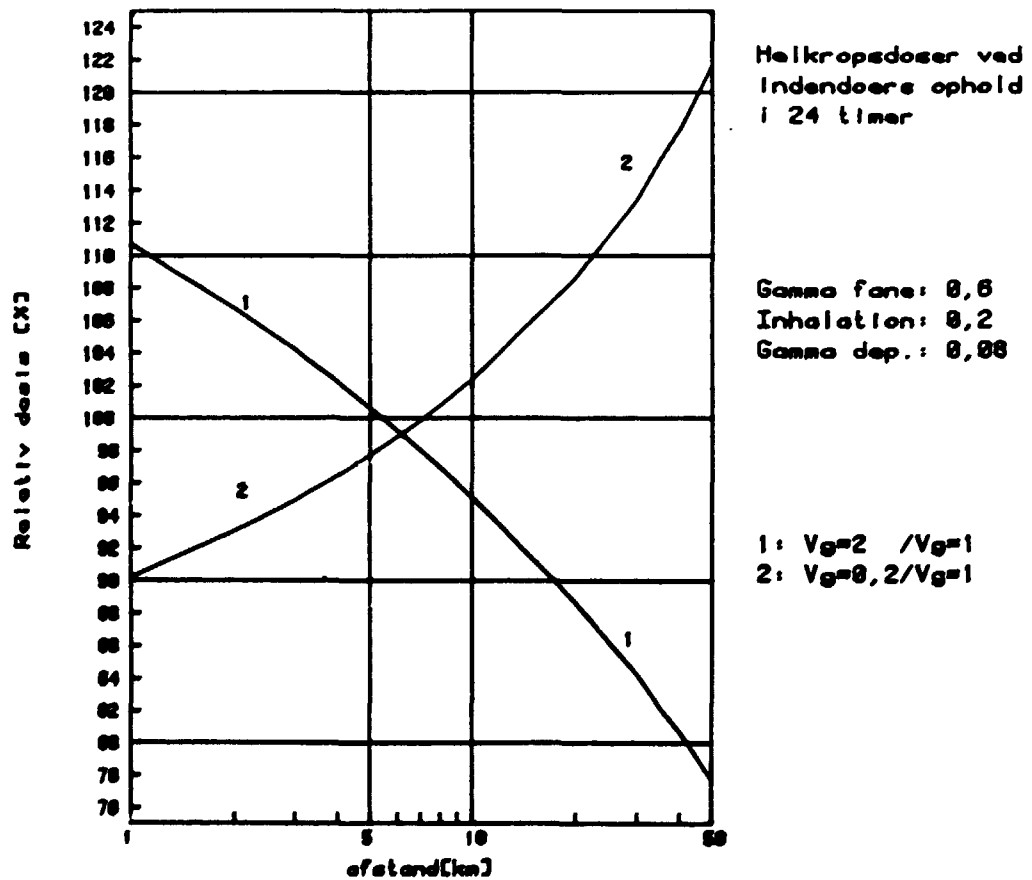


Fig. 6.18. Relativ dosis ved PWR4-uheld

6.2 Kollektivdoser

I modsætning til akutte effekter er senskader et tilfældigt fænomen, hvor sandsynligheden for et kræfttilfælde er en funktion af den modtagne dosis. Det må erindres at kræfttilfælde kan forårsages af meget andet end stråling. Da det ikke er muligt at skelne mellem strålingsinducerede kræfttilfælde og andre kræfttilfælde, vil de senskader, der opstår på grund af et udslip af radioaktivt materiale kun kunne registreres som en forøgelse af antallet af kræfttilfælde i den bestrålede befolkning.

6.2.1. Indendørs ophold i 24 timer

Den kollektive helkropps dosis efter 24 timers indendørs ophold for plads 1 er vist i fig. 6.19. Dosis er beregnet for alle personer i 30° sektoren ud til 50 km. Herefter er doserne sammenlagt i 15 afstandsintervaller og middeldoserne er beregnet. Personer på centerlinien får de helkropps doser, der kan aflæses på fig. 6.14. Det ses at middeldoserne er noget lavere end centerliniedoserne.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	100	18400	18400	184
1,5-2,0	150	15800	34200	105
2,0-3,0	650	39100	73300	60
3,0-4,0	800	28300	101600	35
4,0-5,0	600	14100	115700	24
5,0-7,5	2700	30100	145800	11
7,5-10,0	1900	18100	163900	9,5
10,0-12,5	1000	3100	167000	3,1
12,5-15,0	2300	10000	177000	4,4
15,0-20,0	1800	3200	180200	1,8
20,0-25,0	2500	1700	181900	0,68
25,0-30,0	5000	3700	185600	0,74
30,0-35,0	6500	3900	189500	0,60
35,0-40,0	9000	3900	193400	0,43
40,0-50,0	40000	17400	210800	0,44
1,0-50,0	75000	210800	210800	2,83

Fig. 6.19. Helkropsdoser og middeldoser ved et PWR4 udslip på plads nr. 1. Der regnes med indendørs ophold i 24 timer med start ved udslippets begyndelse.

Den kollektive helkropsdosis for plads 2 opdelt i 15 afstandsintervaller er vist i fig. 6.20.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	0	-	-	-
1,5-2,0	10	1000	1000	100
2,0-3,0	20	1200	2200	60
3,0-4,0	70	2500	4700	36
4,0-5,0	100	2400	7100	24
5,0-7,5	600	9400	16500	16
7,5-10,0	1500	7600	24100	5,1
10,0-12,5	700	3000	27100	4,3
12,5-15,0	5000	7800	34900	1,6
15,0-20,0	14000	43000	77900	3,1
20,0-25,0	21000	23000	100900	1,1
25,0-30,0	32000	22000	122900	0,69
30,0-35,0	75000	53000	175900	0,71
35,0-40,0	150000	87000	262900	0,58
40,0-50,0	400000	106000	368900	0,27
1,0-50,0	700000	368900	368900	0,53

Fig. 6.20. Helkropsdoser og middeldoser ved et PWR4-udslip på plads nr. 2. Der regnes med indendørs ophold i 24 timer med start ved udslippets begyndelse.

Det ses, at middeldoserne svinger omkring de samme værdier som i figur 6.19. Udsvingene skyldes, at befolkningen ikke er jævnt fordelt indenfor hvert afstandsinterval. Når der bor mange tæt på centerlinien, stiger middeldoserne.

På fig. 6.21 og 6.22 er vist, hvordan den akkumulerede kollektivdosis vokser op som funktion af afstanden for de to pladser for PWR4-uheldet. Det ses, at 80% af dosis for plads 1's vedkommende falder indenfor de første 15 km, medens 80% af dosis for plads 2's vedkommende falder i afstandsintervallet fra 20 km til 50 km.

På fig. 6.23 og 6.24 er vist den kollektive dosis for hvert enkelt af de 10 intervaller på hver 5 km. Det ses, at for plads 1 er over halvdelen af dosis afgivet indenfor 5 km fra udslipsstedet til en befolkningsgruppe, der omfatter 2200 personer. I de næste 5 km afgives yderligere ca. en fjerdedel af kollektivdosen til 4600 personer. For plads 2 afgives modsat hovedparten af kollektivdosen på mere end 35 km's afstand.

På fig. 6.25-6.28 er vist en følsomhedsanalyse for tørdepositionshastigheden v_g . Ved sammenligning med fig. 6.17 og 6.18 ses, at de små afvigelser ved individdoser er blevet endnu mindre ved de kollektive doser. $v_g = 2$ cm/s giver de største doser på kort afstand og har derfor størst betydning for plads 1. I 1,5 km's afstand giver denne depositions-hastighed 9,4% større doser end $v_g = 1$ cm/s, men den samlede dosis efter 50 km bliver 1% mindre end for $v_g = 1$ cm/s. $v_g = 0,2$ cm/s giver de største doser på lang afstand og har derfor størst betydning for plads 2. Af fig. 6.28 ses, at denne depositions-hastighed giver mindre doser end $v_g = 1$ cm/s de første 16 km, men den samlede dosis efter 50 km bliver 13,7% større end for $v_g = 1$ cm/s.

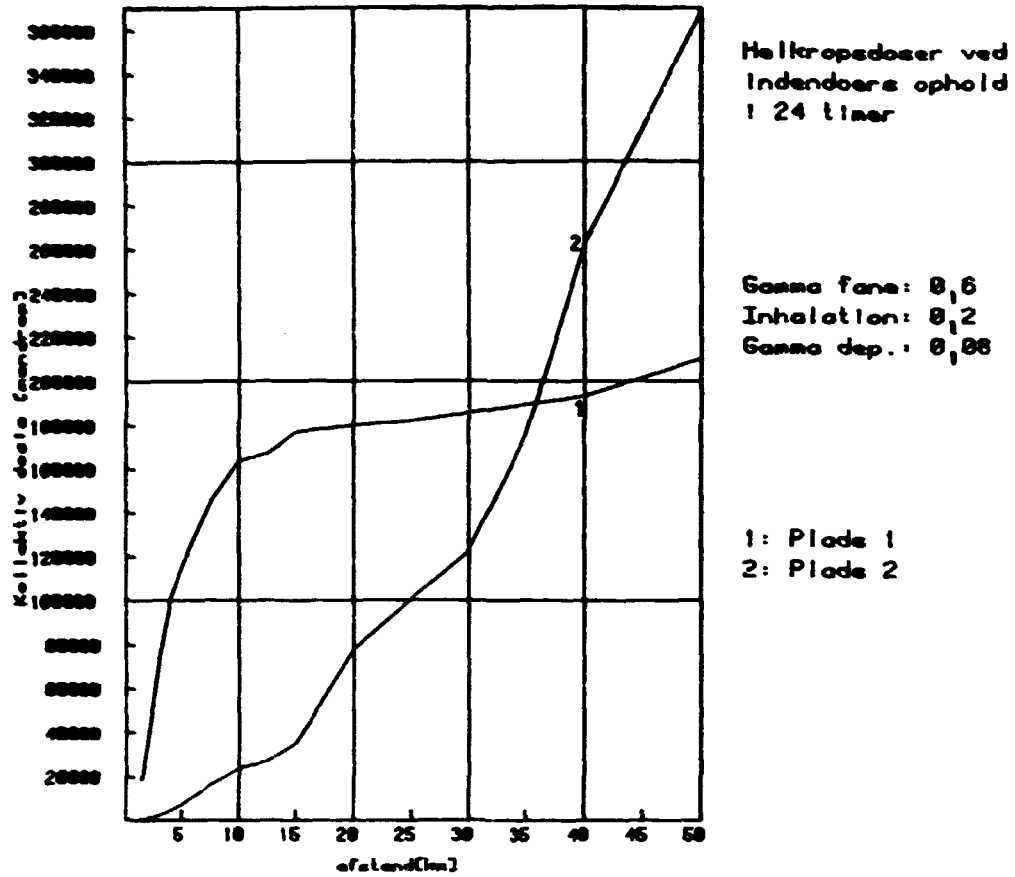


Fig. 6.21. Akkumuleret kollektiv dosis ved PWR4-uheld.

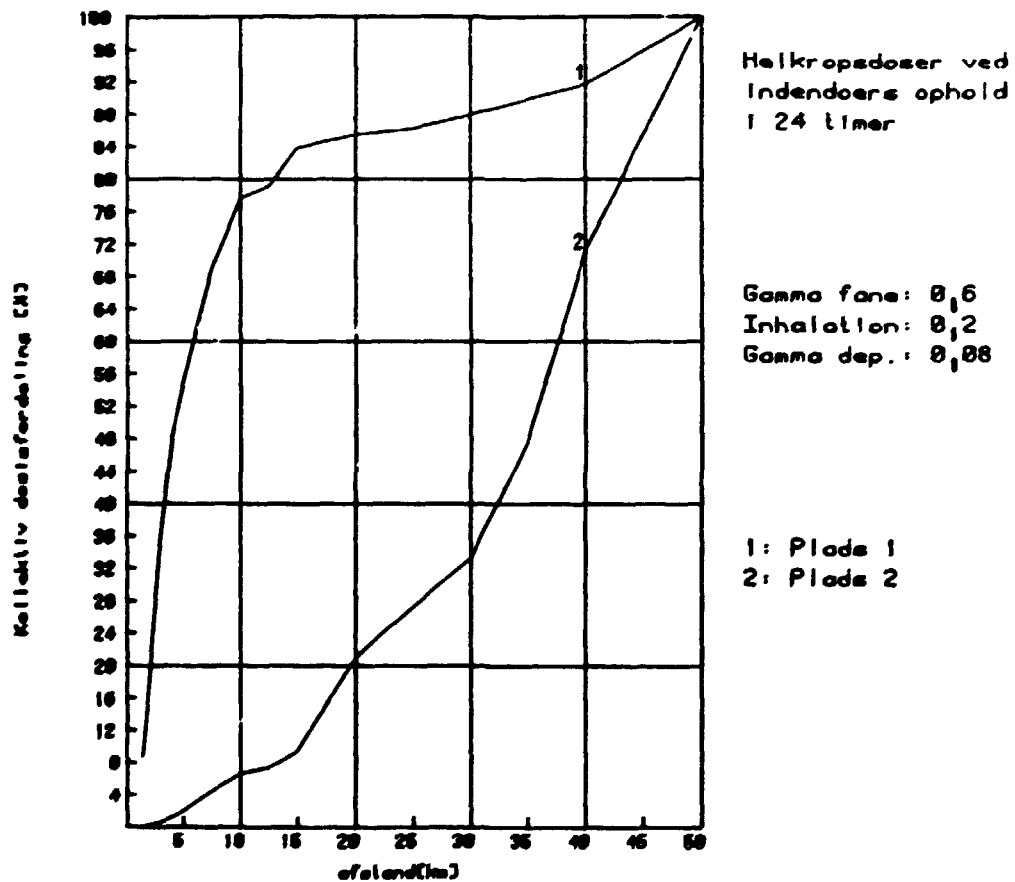


Fig. 6.22. Kollektiv dosisfordeling ved PWR4-uheld.

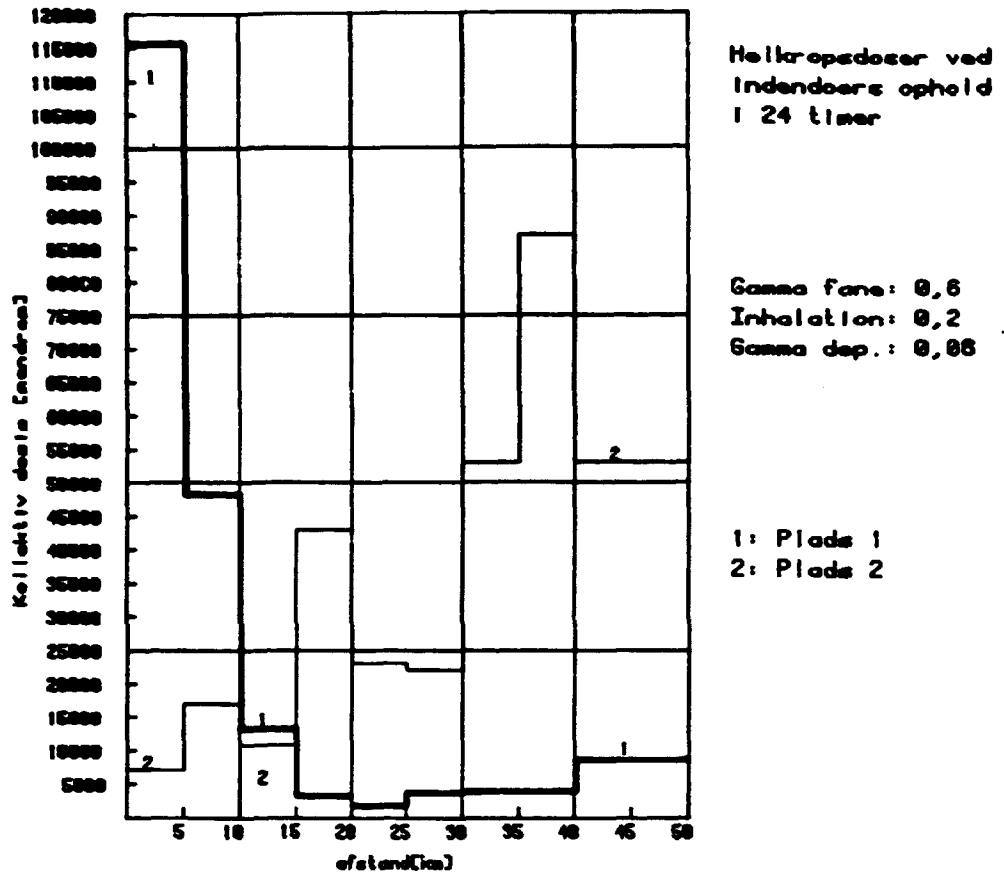


Fig. 6.23. Kollektiv dosis ved PWR4-uheld.

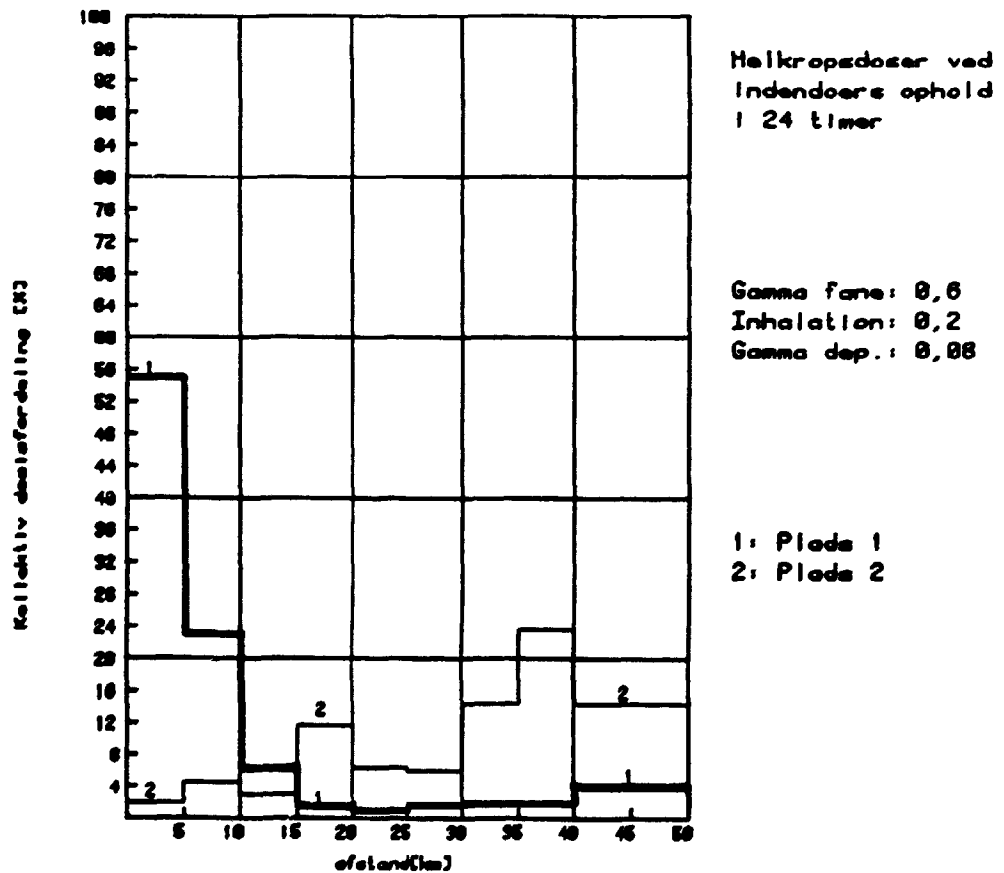


Fig. 6.24. Kollektiv dosisfordeling ved PWR4-uheld.

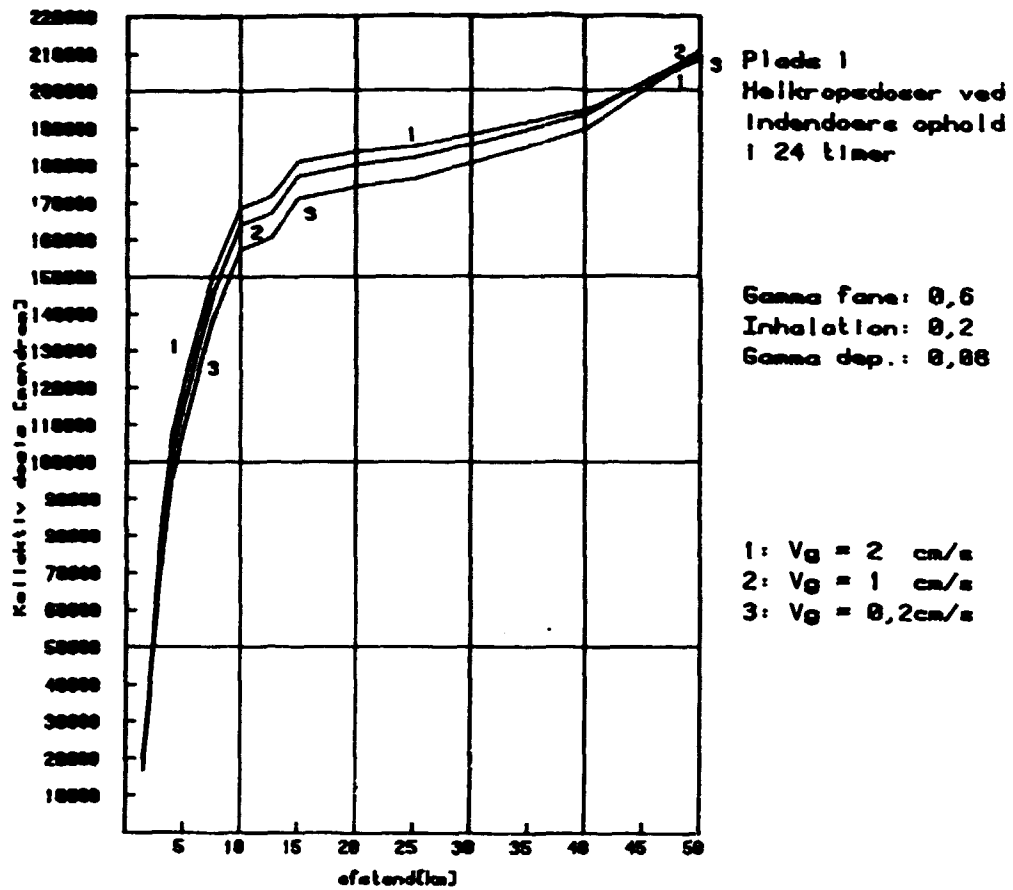


Fig. 6.25. Akkumuleret kollektiv dosis ved PWR4-uheld.

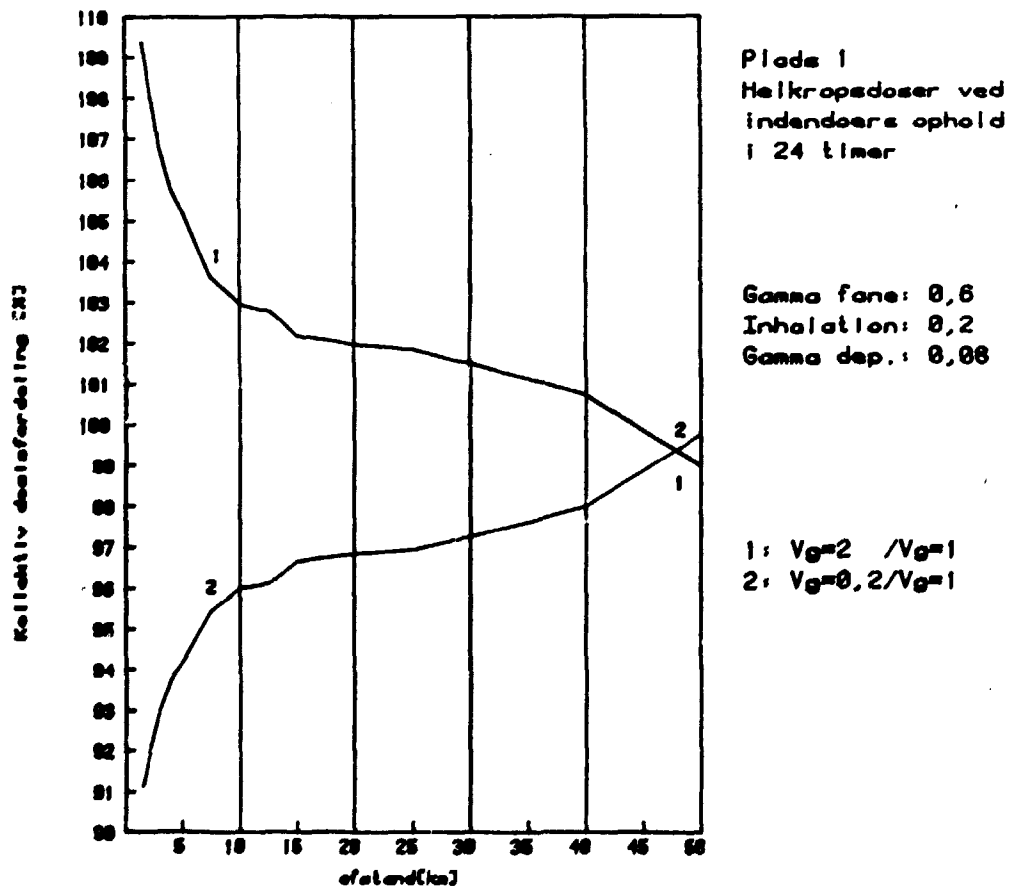


Fig. 6.26. Relativ kollektiv dosisfordeling ved PWR4-uheld.

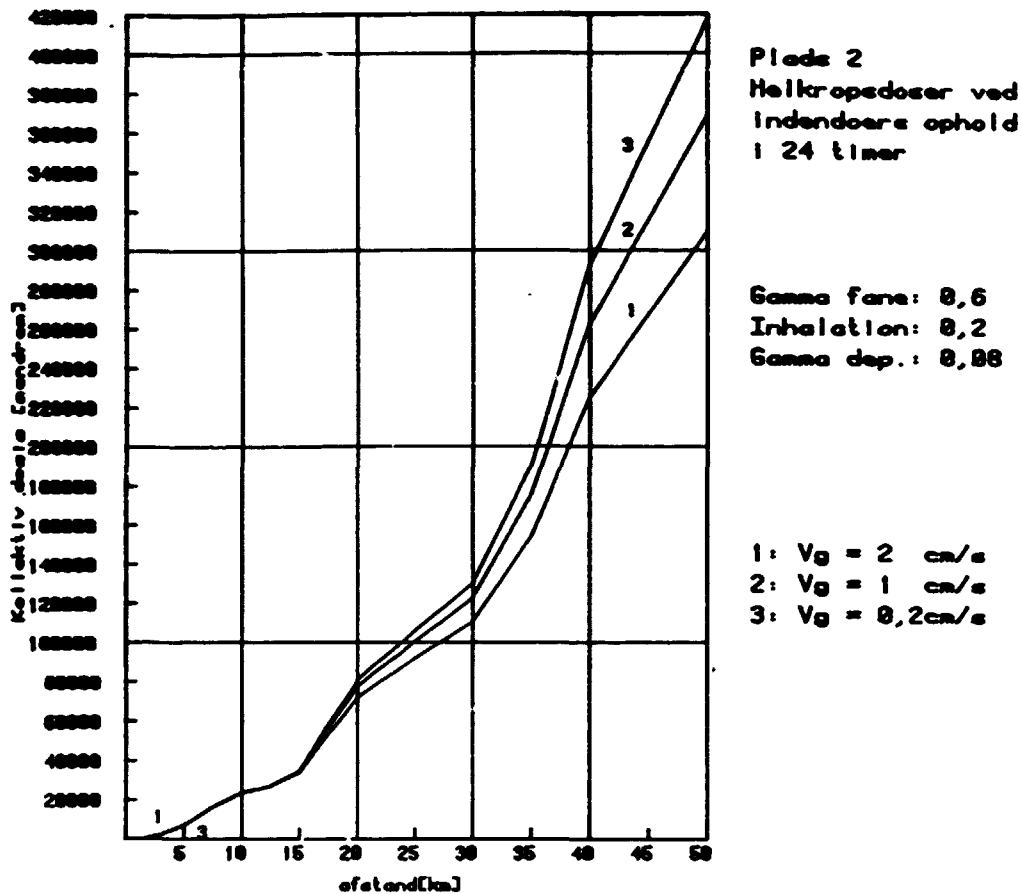


Fig. 6.27. Akkumuleret kollektiv dosis ved PWR4-uheld.

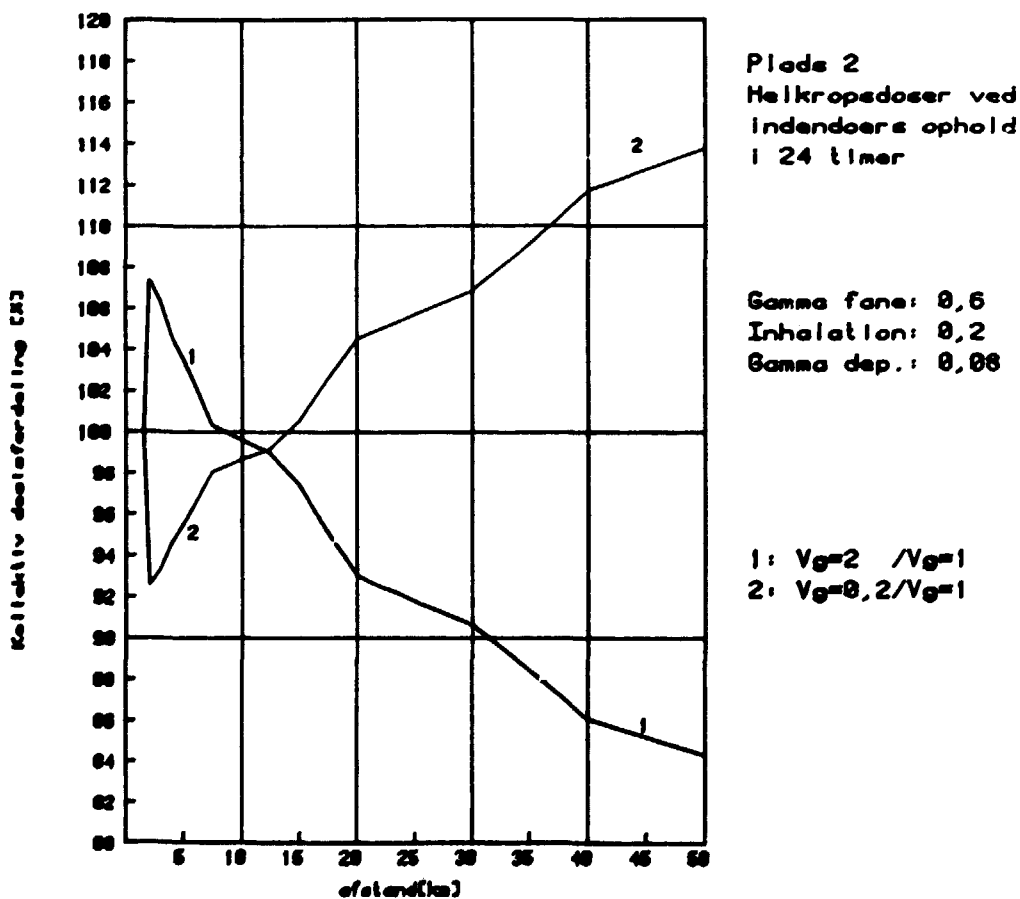


Fig. 6.28. Relativ kollektiv dosisfordeling ved PWR4-uheld.

6.2.2. Normal færden i 1 år

Når der regnes med indendørs ophold under skypassagen og derefter 1 års normal færden på stedet fås for henholdsvis plads 1 og plads 2 de kollektive helkropsdoser på fig. 6.29. og 6.30.. Der er tale om en meget teoretisk situation, hvor der intet gøres for at reducere strålingen fra det radioaktive nedfald. I en virkelig situation ville befolkningen i de områder, hvor der måles de største dosishastigheder midlertidigt kunne flytte, således at ingen ville få doser over vedtagne maksimale værdier, mens foranstaltninger til reduktion af dosis fra nedfaldet iværksættes. Beregningen er kun medtaget for at vise, at forholdet mellem kollektivdosis for de to modelpladser ikke ændrer sig med tiden. Af fig. 6.19. og 6.20. fremgår således, at forholdet mellem kollektivdosis ud til 50 km for plads 1 og plads 2 er 1,75, når kun det første døgn tages i betragtning. Når beregningen udstrækkes til et helt år, ses det af fig. 6.29. og 6.30., at dette forhold kun ændres til 1,71.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	100	61500	61500	615
1,5-2,0	150	52000	113500	347
2,0-3,0	650	126400	239900	194
3,0-4,0	800	90100	330000	113
4,0-5,0	600	44400	374400	74
5,0-7,5	2700	92600	467000	34
7,5-10,0	1900	55600	522600	29
10,0-12,5	1000	9700	532300	9,7
12,5-15,0	2300	30500	562800	13
15,0-20,0	1800	9700	572500	5,4
20,0-25,0	2500	5100	577600	2,0
25,0-30,0	5000	11600	589200	2,3
30,0-35,0	6500	12100	601300	1,9
35,0-40,0	9000	12200	613500	1,4
40,0-50,0	40000	54300	667800	1,4
1,0-50,0	75000	667800	667800	8,9

Fig.6.29. Helkroppsdozer og middeldoser ved et PWR4-udslip på plads nr. 1. Der regnes med indendørs ophold under sky-passagen og derefter normal færden i 365 dage.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	0	-	-	-
1,5-2,0	10	3400	3400	340
2,0-3,0	20	3900	7300	195
3,0-4,0	70	7800	15100	111
4,0-5,0	100	7700	22800	77
5,0-7,5	600	29100	51900	49
7,5-10,0	1500	22700	74600	15
10,0-12,5	700	9300	83900	13
12,5-15,0	5000	23900	107800	4,8
15,0-20,0	14000	131600	239400	9,4
20,0-25,0	21000	70700	310100	3,4
25,0-30,0	32000	66900	377000	2,1
30,0-35,0	75000	162600	539600	2,2
35,0-40,0	150000	271900	811500	1,8
40,0-50,0	400000	330900	1142400	0,83
1,0-50,0	700000	1142400	1142400	1,6

Fig. 6.30. Helkropsdoser og middeldoser ved et PWR4-udslip på plads nr. 2. Der regnes med indendørs ophold under skypassagen og derefter normal færden i 365 dage.

7. DOSER FRA PWR6-UDSLIP

7.1 Individdoser

Som i kapitel 6 er alle individdoser i de nedenstående afsnit 7.1.1-7.1.3 beregnet som knoglemarvsdoser.

7.1.1 Udendørs ophold i 12 timer

Fig. 7.1 viser knoglemarvsdoser som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km for udendørs ophold i 12 timer, startende 12 timer efter nedlukning. Kurverne er beregnet for ophold under fanens centerlinie og viser altså den maksimale stråledosis i den pågældende afstand. Det fremgår af kurverne, at det dominerende bidrag er ekstern gammadosis fra fanen i overensstemmelse med det dominerende ædelgasbidrag i udslippet (fig. 4.1). I 1 km's afstand er dosis fra inhalation og gammadosis fra deponeret aktivitet henholdsvis en faktor 4,4 og 2,4 mindre end gammadosis fra skyen, forskellen øges, således at de to faktorer i 50 km's afstand bliver henholdsvis 11,2 og 10,1.

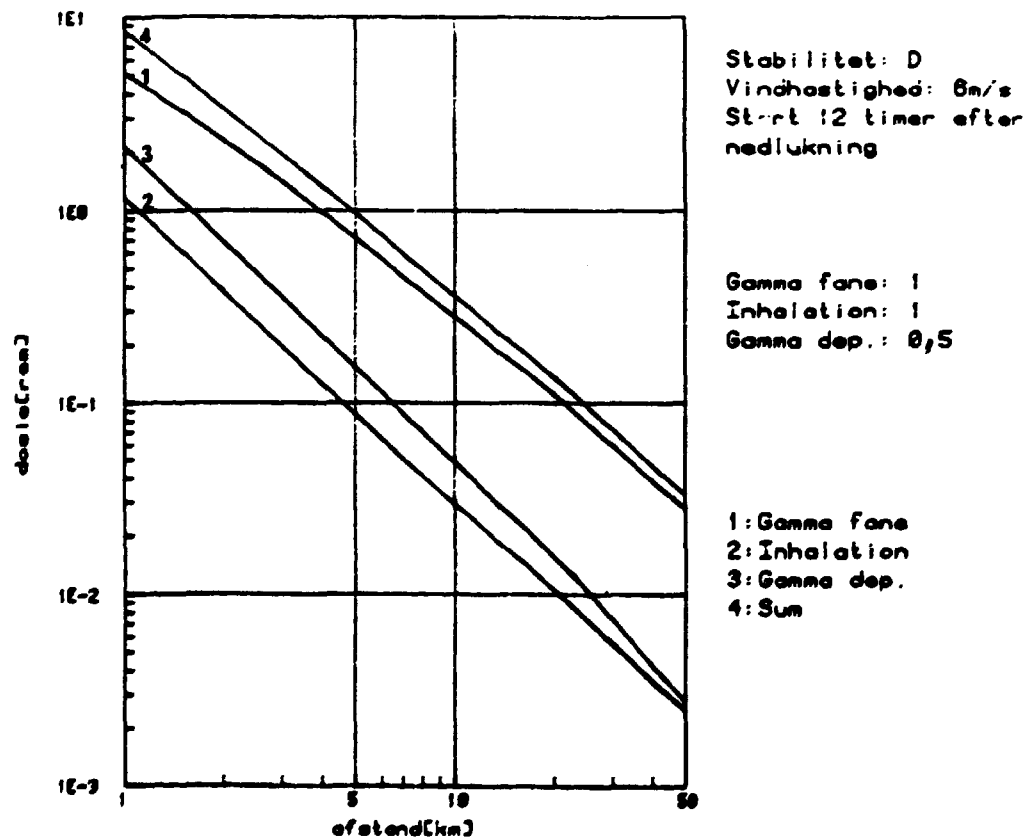


Fig. 7.1. PWR6 Knoglemarv, 12 timer udendørs

På fig. 7.2 er i skalaen 1:76.000 vist isodosiskurver for knoglemarvsdosisværdierne 5 rem, 2 rem og 0,5 rem. De til kurverne hørende karakteristiske afstande og arealer er vist i fig. 7.3.

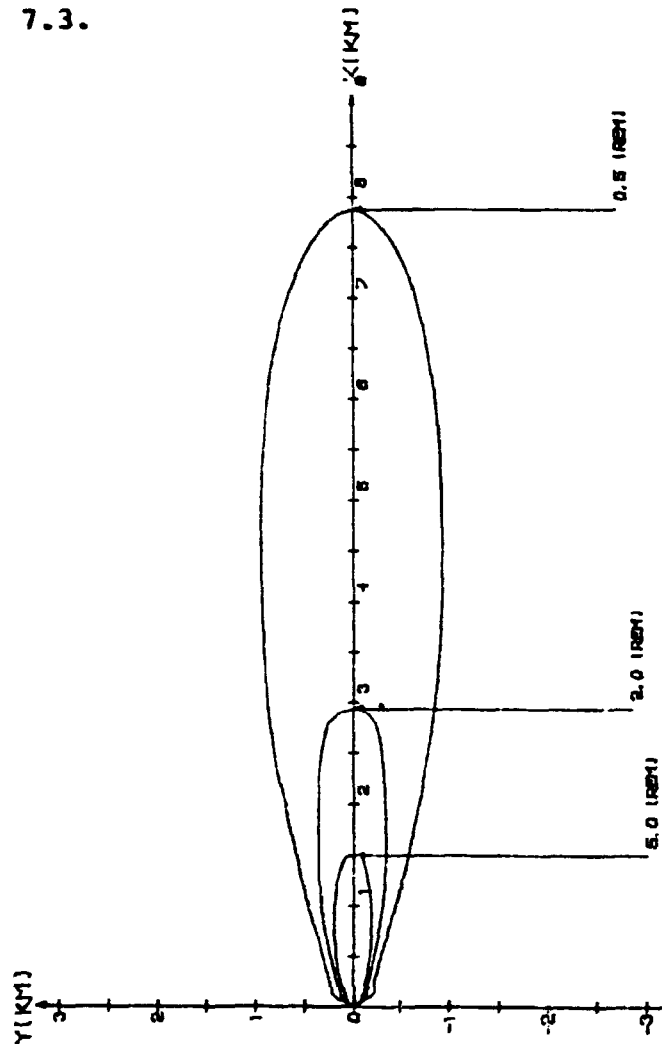


Fig. 7.2. PWR6
Isodoser i Skala
1:76.000

Dosisniveau udendørs ophold i 12 timer [rem]	Maksimal afstand i vindret- ningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
5	1,5	0,40	0,46
2	2,8	0,73	1,7
0,5	7,9	1,9	11,1

Fig. 7.3. Karakteristiske afstande og arealer af 3 isodosiskurver fra fig. 7.2 for PWR6-udslip, ved udendørs ophold i 12 timer, startende 12 timer efter nedlukning.

7.1.2. Indendørs ophold i 12 og 24 timer

På fig. 7.4 er tilsvarende vist knoglemarvsdoser for 12 timers indendørs ophold, som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km. Det ses, at indendørs ophold medfører et fald i dosis i forhold til udendørs ophold, fra 8,4 rem til 3,6 rem i 1 km's afstand og fra 33 mrem til 18 mrem i 50 km's afstand.

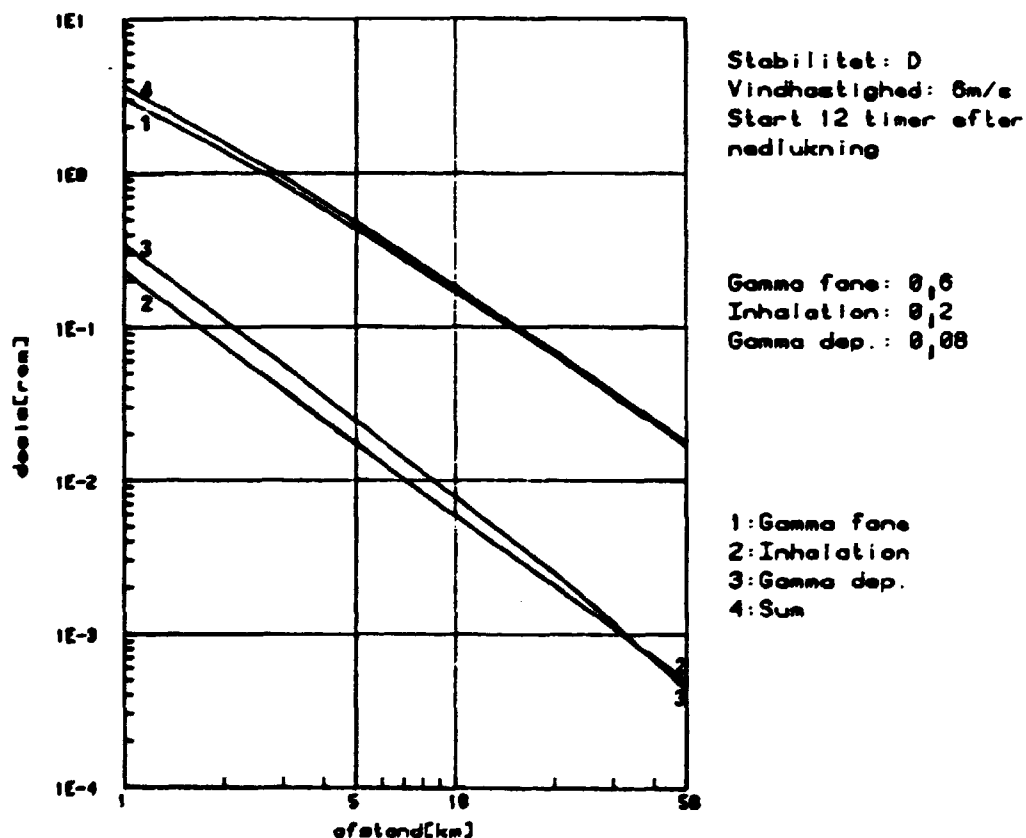


Fig. 7.4. PWR6 knoglemarv, 12 timer indendørs

På fig. 7.5 er i skalaen 1:76.000 vist isodosiskurver for knoglemarvsdosisværdierne 3 rem, 1 rem og 0,3 rem. De til kurverne hørende karakteristiske afstande og arealer er vist i figur 7.6.

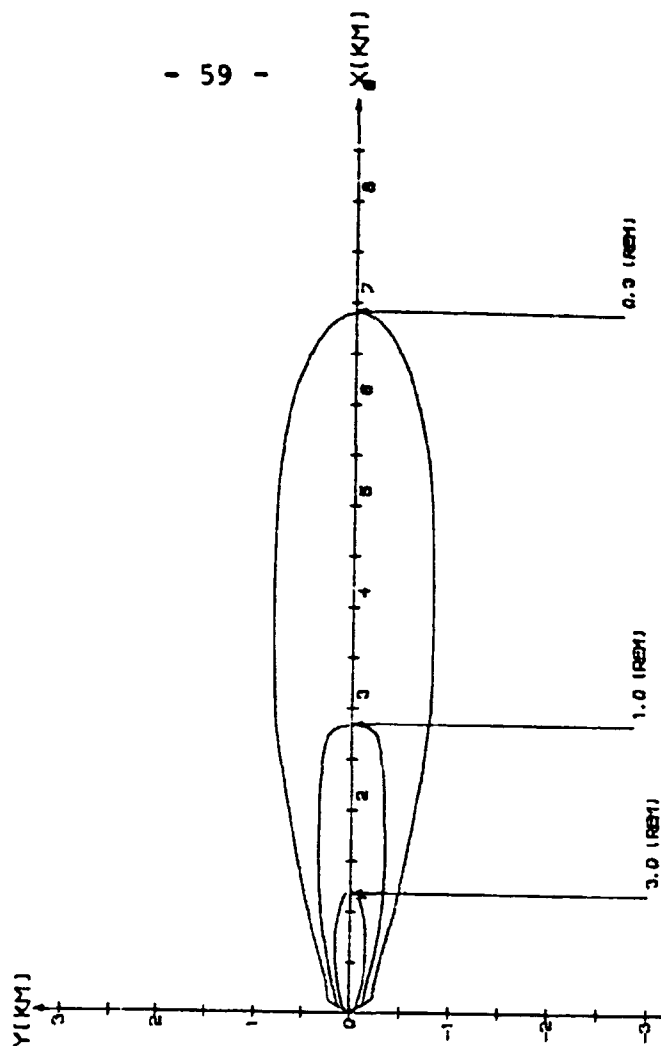


Fig. 7.5. PWR6 Isodoser i skala 1:76.000

Dosisniveau Indendørs ophold i 12 timer [rem]	Maksimal afstand i vindret- ningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
3	1,1	0,31	0,27
1	2,8	0,68	1,6
0,3	6,9	1,6	8,6

Fig.7.6. Karakteristiske afstande og arealer af 3 isodosiskurver fra fig. 7.5 for PWR6-udslip, ved indendørs ophold i 12 timer, startende 12 timer efter nedlukning.

På fig. 7.7 er vist knoglemarvsdoser for 24 timers indendørs ophold som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km. Gammadosis fra fanen og inhalationsdosis er uændret fra fig. 7.4 på de første 43,2 km, idet skypassagen er overstået ud til denne afstand 12 timer efter udslippets start jfr. fig. 4.5. I 50 km's afstand er gammadosis fra fanen og inhalationsdosis steget 3% i forhold til fig. 7.4. Gammadosis fra deponeret aktivitet er steget mellem en faktor 2,3 og 3,0 i forhold til fig. 7.4. Dette giver dog kun anledning til, at den samlede dosis er steget mellem 9% og 12%, idet kstern gammadosis fra fanen er helt dominerende.

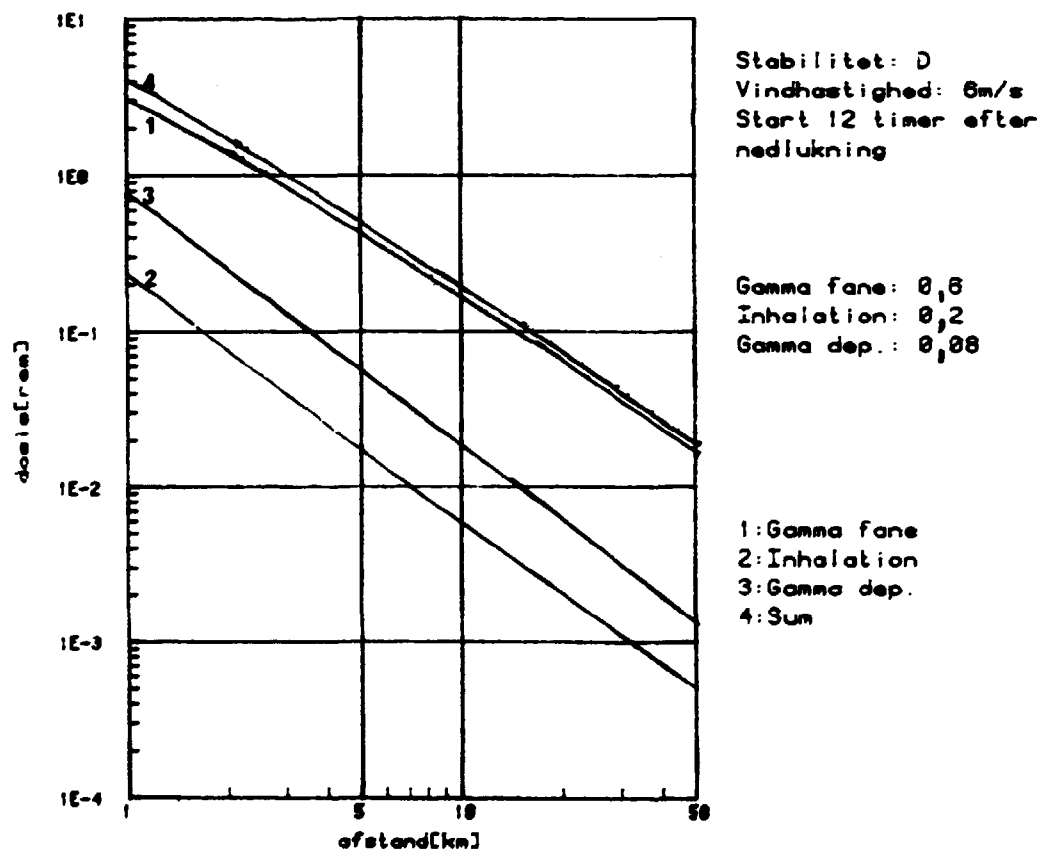


Fig. 7.7. PWR6 Knoglemarv, 24 timer indendørs

På fig. 7.8 er i skalaen 1:76.000 vist isodosiskurver for knoglemarvs dosisværdierne 3 rem, 1 rem og 0,3 rem. De til kurverne hørende karakteristiske afstande og arealer er vist i figur 7.9.

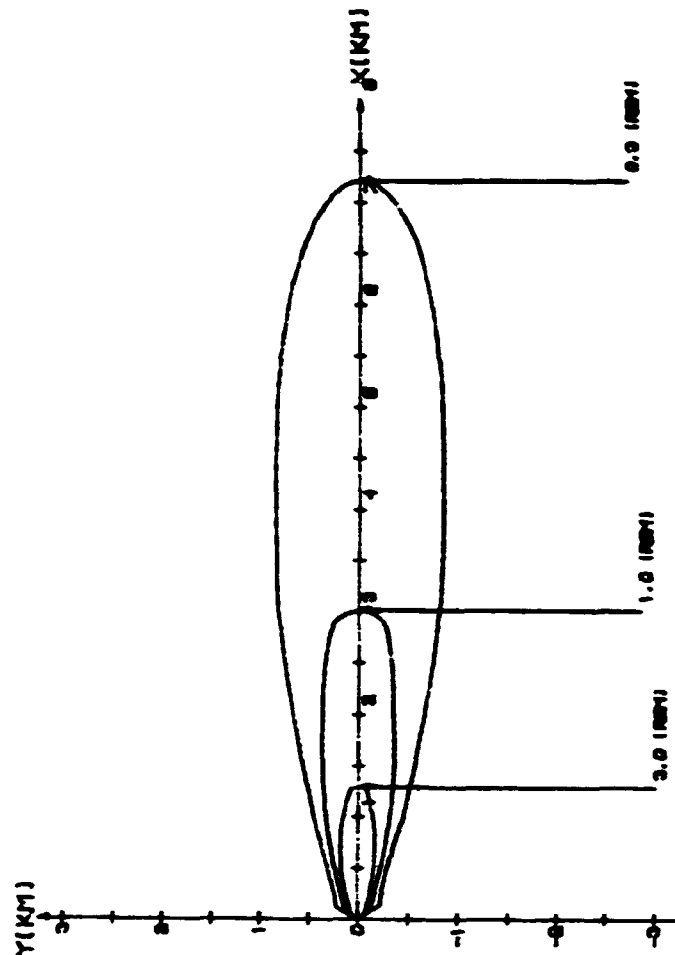


Fig. 7.8. Isodoser i skala 1: 76.000

Dosisniveau Indendørs ophold i 24 timer [rem]	Maksimal afstand i vindret- ningen [km]	Maksimal bredde [km]	Areal [km ²]
3	1,3	0,34	0,34
1	3,0	0,73	1,8
0,3	7,1	1,7	9,4

Fig. 7.9. Karakteristiske afstande og arealer af 3 isodosiskurver fra fig. 7.8 for PWR6-udslip, ved indendørs ophold i 24 timer, startende 12 timer efter nedlukning.

Det ses, at arealerne øges mellem 9% og 26%, størst for de små arealer, når tiden for indendørs ophold øges fra 12 timer til 24 timer.

7.1.3. Normal færden i 1 år

For normal færden er der beregnet knoglemarvs doser på centerlinien for PWR6-udslippet for de fire centerlinieafstande 5 km, 10 km, 20 km og 50 km, som funktion af tiden. Under skypassage er forudsat indendørs ophold. På fig. 7.10 er der for de 4 afstande vist en kurve for den samlede knoglemarvsdosis.

Et døgn efter nedlukning udgør dosis fra deponeret aktivitet kun mellem 3% og 7% af den samlede dosis, mindst for store afstande. 365 døgn efter nedlukning udgør dosis fra deponeret aktivitet mellem 66% og 73% af den samlede dosis.

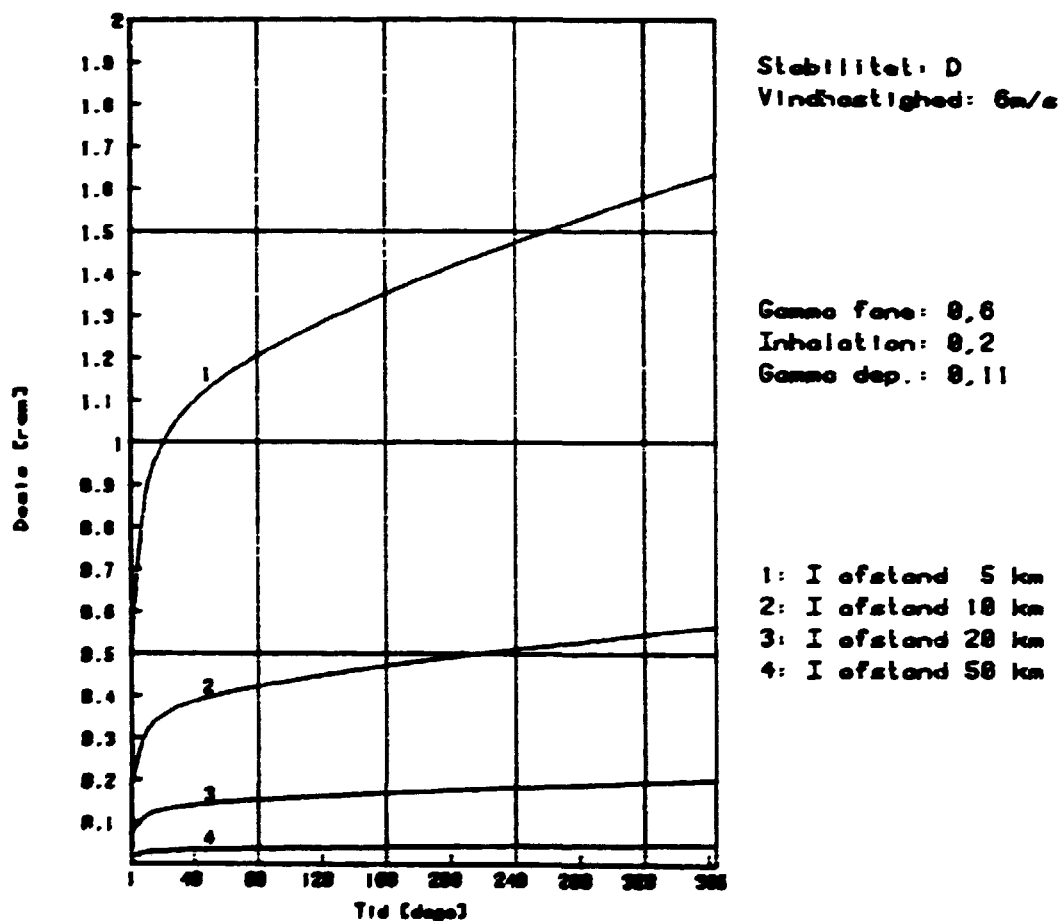


Fig. 7.10. Den samlede knoglemarvsdosis som funktion af tiden for PWR6-udslip. Kurverne er beregnet for normalt ophold på centerlinien (89% indendørs, 6% udendørs og 5% transport).

7.1.4. Organdoser ved 24 timers indendørs ophold

På fig. 7.11 er vist organdoser for 4 organer samt helkroppsdo-
ser som funktion af afstanden i vindretningen ud til 50 km.

Kurven med knoglemarvsdoser er den samme som sunkurven i fig.
7.7. I 1 km's afstand er knoglemarvsdosen 4,1 rem, hvilket er
en faktor 25 under den grænse, hvor tidlige dødsfald begynder
at forekomme.

Lungedosis i 1 km's afstand på 18 rem giver heller ikke risi-
ko for tidlige dødsfald.

Skjoldbruskkirteldosis er i 1 km's afstand 110 rem, hvilket er
en faktor 230 under tærskelværdien for akutte skader.

Dosis til mave-tarmkanal er i 1 km's afstand 5,1 rem, hvilket
er en faktor 390 under tærskelværdien for akutte dødsfald.

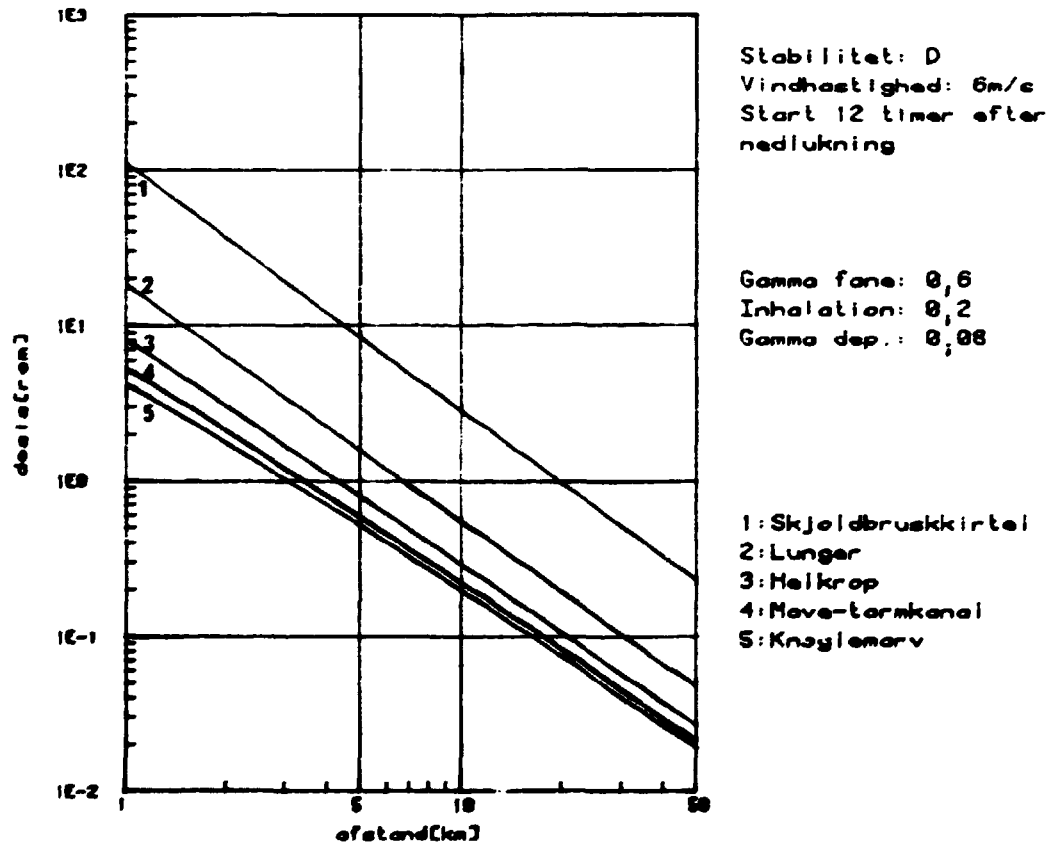


Fig. 7.11. PWR6-udslip. Organdoser ved 24 timers indendørs
ophold.

På fig. 7.12 og 7.13 er vist helkropps-doser for 24 timers indendørs ophold opdelt på 3 isotopgrupper: Ædelgas, jod og andre isotoper. På fig. 7.12 er vist den absolutte fordeling, hvor sumkurven er den samme som kurve 3 på fig. 7.11. På fig. 7.13 er sumkurven sat til 100%, og en relative dosisfordeling af de 3 isotopgrupper er vist. Det ses, at deponeringen af jod og andre isotoper medfører, at ædelgasbidraget bliver relativt stigende med afstanden. Ved sammenligning med fig. 6.16 ses, at dosis fra ædelgas giver mere end 4 gange så stort bidrag til den samlede dosis ved PWR6-uheld i forhold til PWR4-uheld. Tilsvarende bliver dosisbidraget fra jodisotoperne mindre ved PWR6-uheld end ved PWR4-uheld.

På fig. 7.14 og 7.15 er vist en følsomhedsanalyse for tørdeponeringshastigheden v_g . På fig. 7.14 er kurve 2 med $v_g = 1$ cm/s, den samme som sumkurven på fig. 7.12 og kurve 3 på fig. 7.11. Da ædelgasudslippet har relativt større betydning ved PWR6-uheld end ved PWR4-uheld, får deponeringshastigheden tilsvarende relativt mindre betydning ved PWR6-uheld end ved PWR4-uheld. Ved sammenligning med fig. 6.18 ses, at udsvinget er faldet fra mindre end 25% til mindre end 15%.

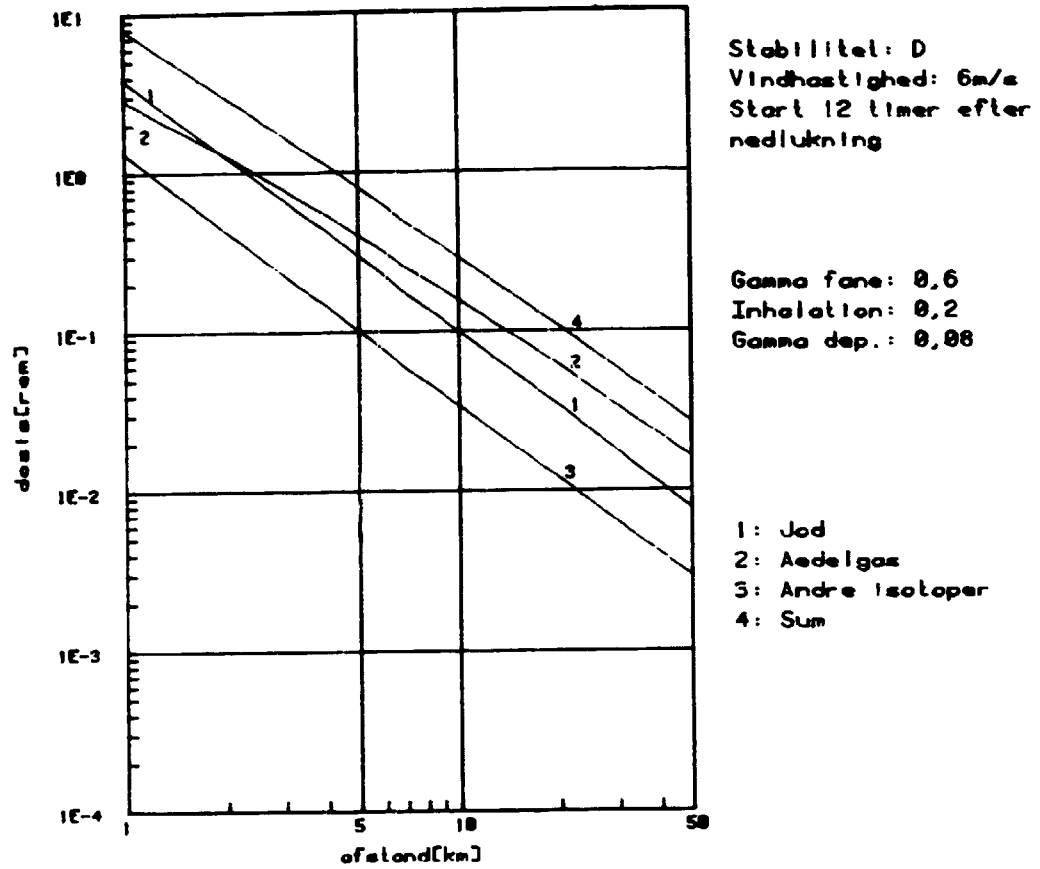


Fig. 7.12. PWR6 Helkrop, 24 timer indendørs.

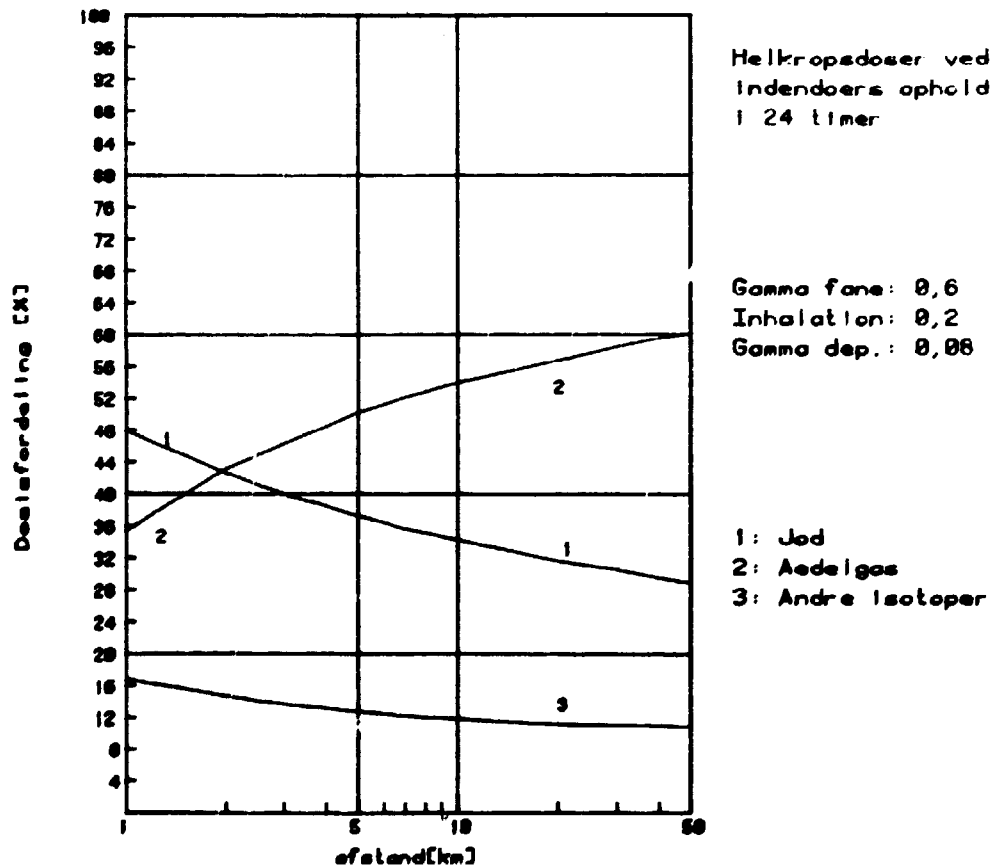


Fig. 7.13. Dosisfordeling ved PWR6-uheld.

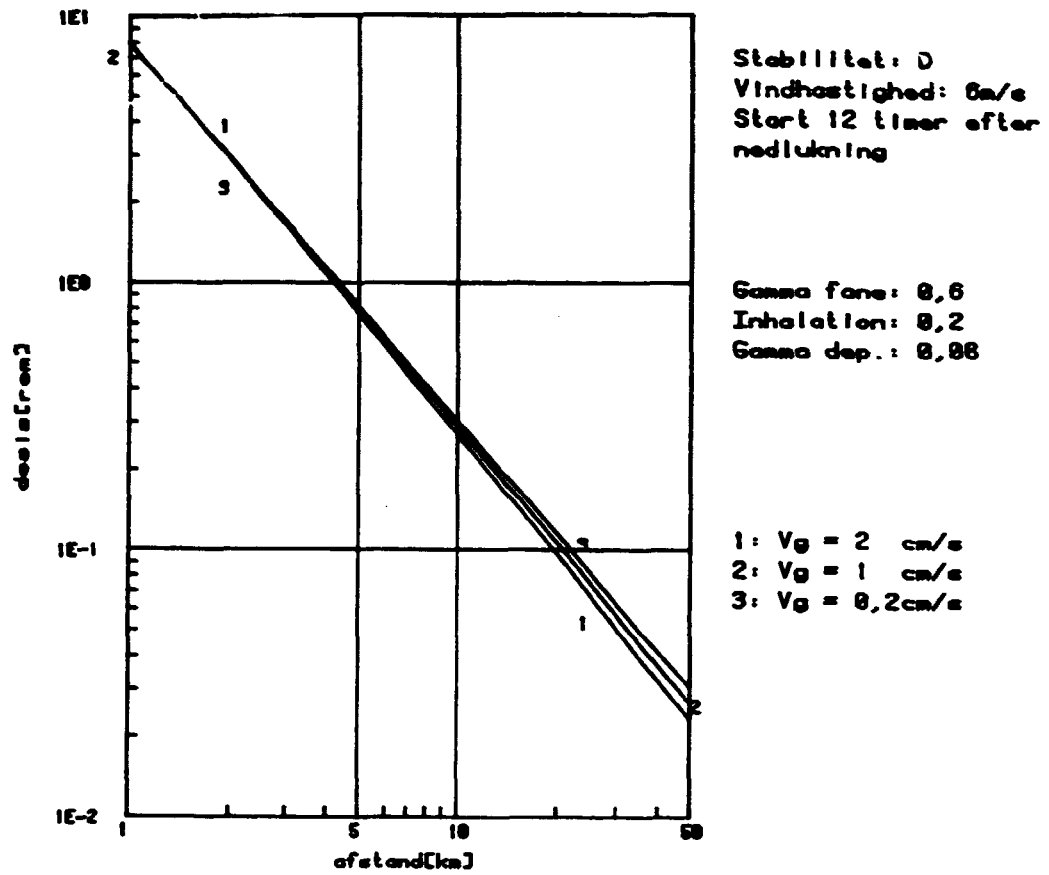


Fig. 7.14. PWR6 Helkrop, 24 timer indendørs.

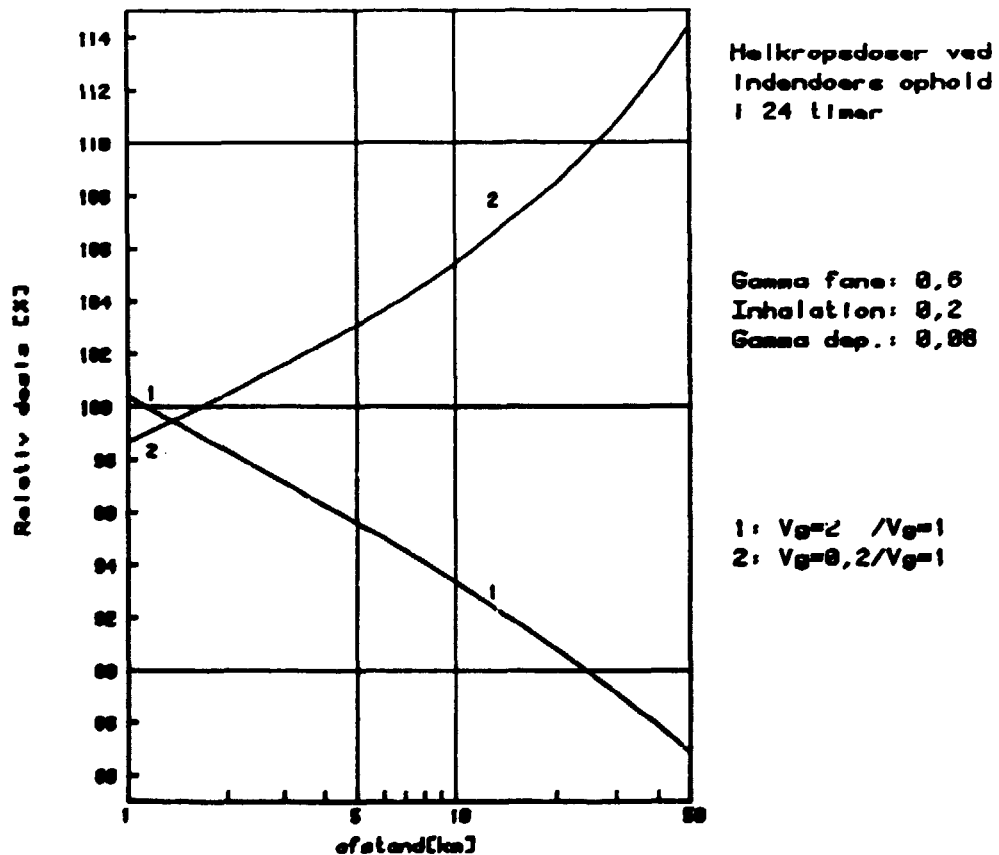


Fig. 7.15. Relativ dosis ved PWR6-uheld.

7.2 Kollektivdoser

7.2.1. Indendørs ophold i 24 timer

Den kollektive helkropps dosis for plads 1 opdelt i 15 afstandsintervaller er vist i fig. 7.16.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	100	440	440	4,4
1,5-2,0	150	400	840	2,7
2,0-3,0	650	1000	1840	1,5
3,0-4,0	800	770	2610	0,96
4,0-5,0	600	390	3010	0,65
5,0-7,5	2700	870	3880	0,32
7,5-10,0	1900	550	4430	0,29
10,0-12,5	1000	130	4560	0,13
12,5-15,0	2300	290	4850	0,13
15,0-20,0	1800	110	4960	0,06
20,0-25,0	2500	70	5030	0,03
25,0-30,0	5000	130	5160	0,03
30,0-35,0	6500	170	5330	0,03
35,0-40,0	9000	160	5490	0,02
40,0-50,0	40000	710	6200	0,02
1,0-50,0	75000	6200	6200	0,08

Fig. 7.16. Helkropps doser og middeldoser ved et PWR6-udslip på plads nr. 1. Der regnes med indendørs ophold i 24 timer med start ved udslippets begyndelse.

Den kollektive helkropps-dosis for plads 2 opdelt i 15 afstandsintervaller er vist i figur 7.17.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	0	-	-	-
1,5-2,0	10	26	26	2,6
2,0-3,0	20	31	57	1,6
3,0-4,0	70	67	123	0,96
4,0-5,0	100	67	190	0,67
5,0-7,5	600	250	440	0,42
7,5-10,0	1500	280	720	0,19
10,0-12,5	700	120	840	0,17
12,5-15,0	5000	380	1220	0,08
15,0-20,0	14000	1200	2420	0,09
20,0-25,0	21000	970	3390	0,05
25,0-30,0	32000	830	4230	0,03
30,0-35,0	75000	1900	6130	0,03
35,0-40,0	150000	3200	9350	0,02
40,0-50,0	400000	4800	14200	0,01
1,0-50,0	700000	14200	14200	0,02

Fig. 7.17. Helkropps-doser og middeldoser ved et PWR6-udslip på plads nr. 2. Der regnes med indendørs ophold i 24 timer med start ved udslippets begyndelse.

På fig. 7.18 og 7.19 er vist, hvordan den akkumulerede kollektivdosis vokser op som funktion af afstanden for de to pladser for PWR6-uheldet. Kurverne er næsten identiske med fig. 6.21 og 6.22, det ses dog, at en større del af dosis bliver givet på større afstande ved PWR6-uheldet i forhold

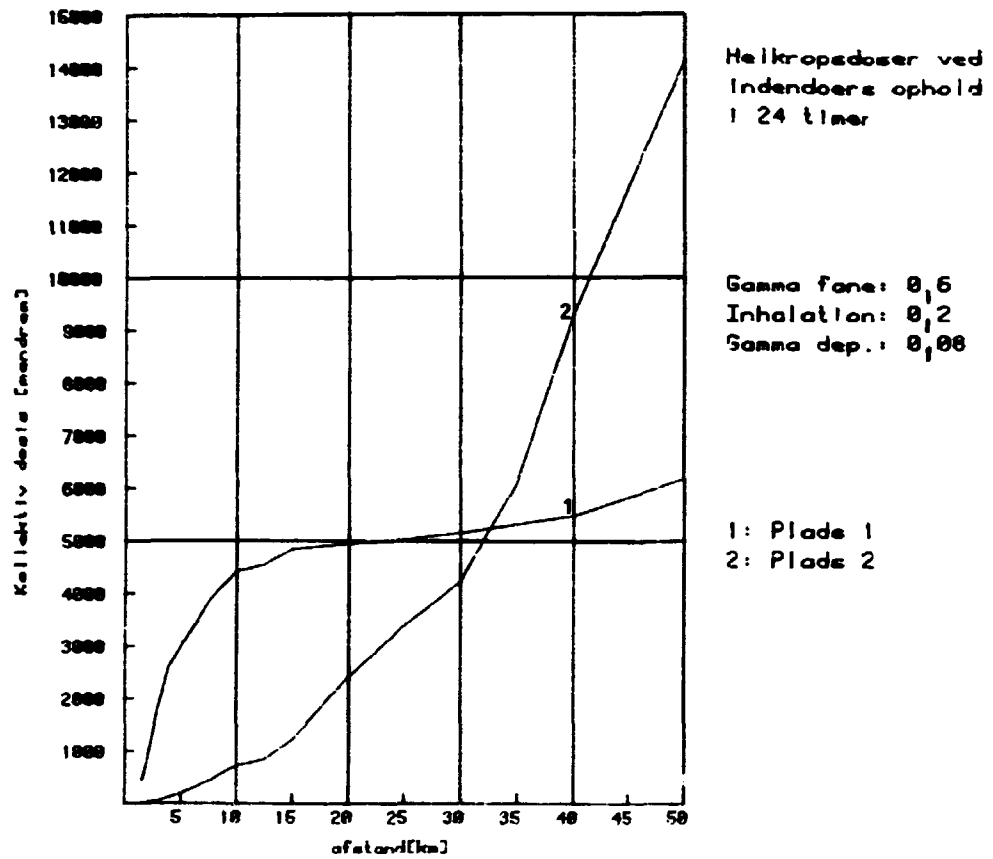


Fig. 7.18. Akkumuleret kollektivdosis ved PWR6-uheld

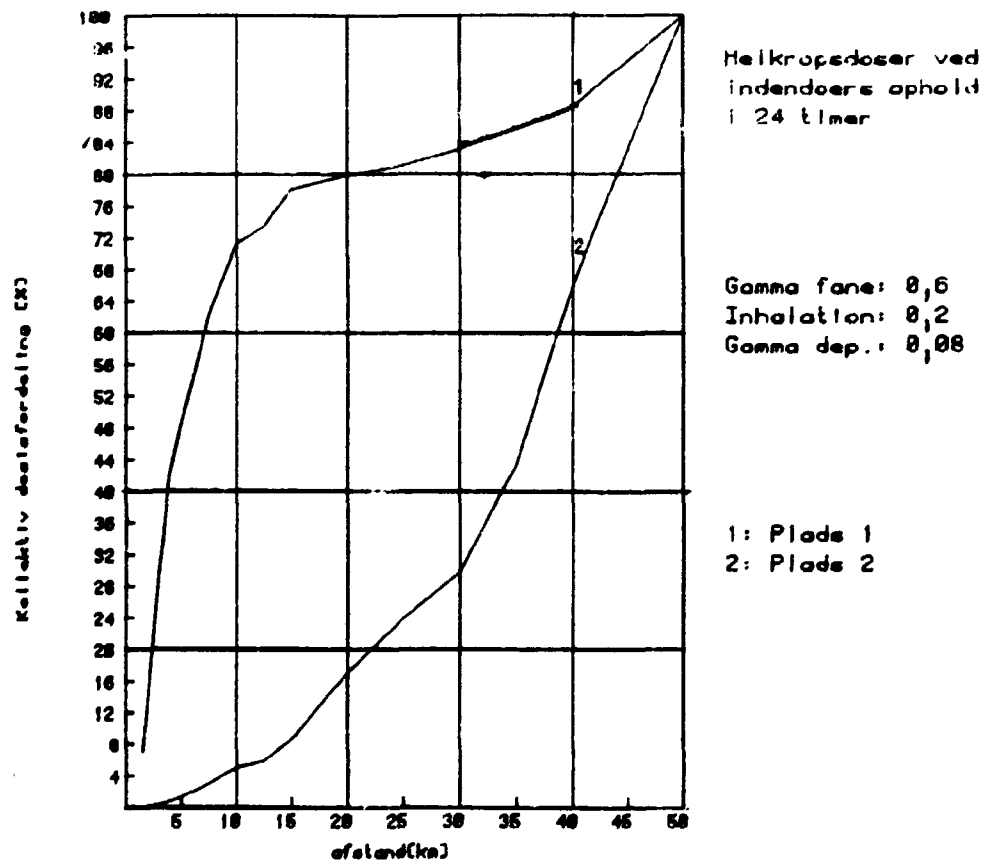


Fig. 7.19. Kollektiv dosisfordeling ved PWR6-uheld

til PWR4-uheldet. Den væsentligste ændring findes i akseinddelingen, der er 25 gange mindre på fig. 7.18 i forhold til fig. 6.21.

På fig. 7.20 og 7.21 er vist den kollektive dosis i 10 intervaller på hver 5 km. Ved sammenligning med fig. 6.23 og 6.24 ses, som ovenfor nævnt, at en større del af dosis bliver givet på større afstande ved PWR6-uheldet i forhold til PWR4-uheldet.

På fig. 7.22-7.25 er vist en følsomhedsanalyse for tørdeponeringshastigheden v_g . Ved sammenligning med fig. 7.14 og 7.15 ses, at de små afvigelser ved individdoser er blevet endnu mindre ved de kollektive doser. I modsætning til ved PWR4-uheldet er det deponeringshastigheden $v_g = 0,2$ cm/s, der giver de største doser både for plads 1 og for plads 2. Efter 50 km giver denne deponeringshastighed 4,6% større doser ved plads 1 og 11,1% større doser ved plads 2 end $v_g = 1$ cm/s.

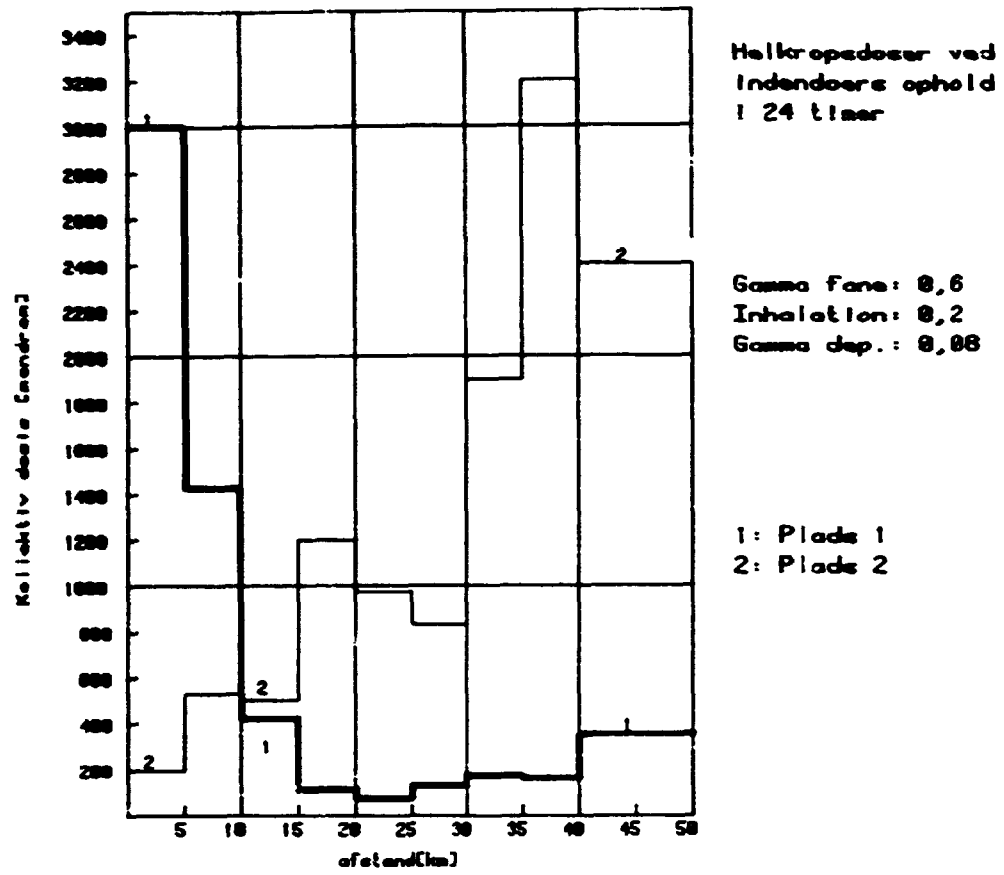


Fig. 7.20. Kollektiv dosis ved PWR6-uheld.

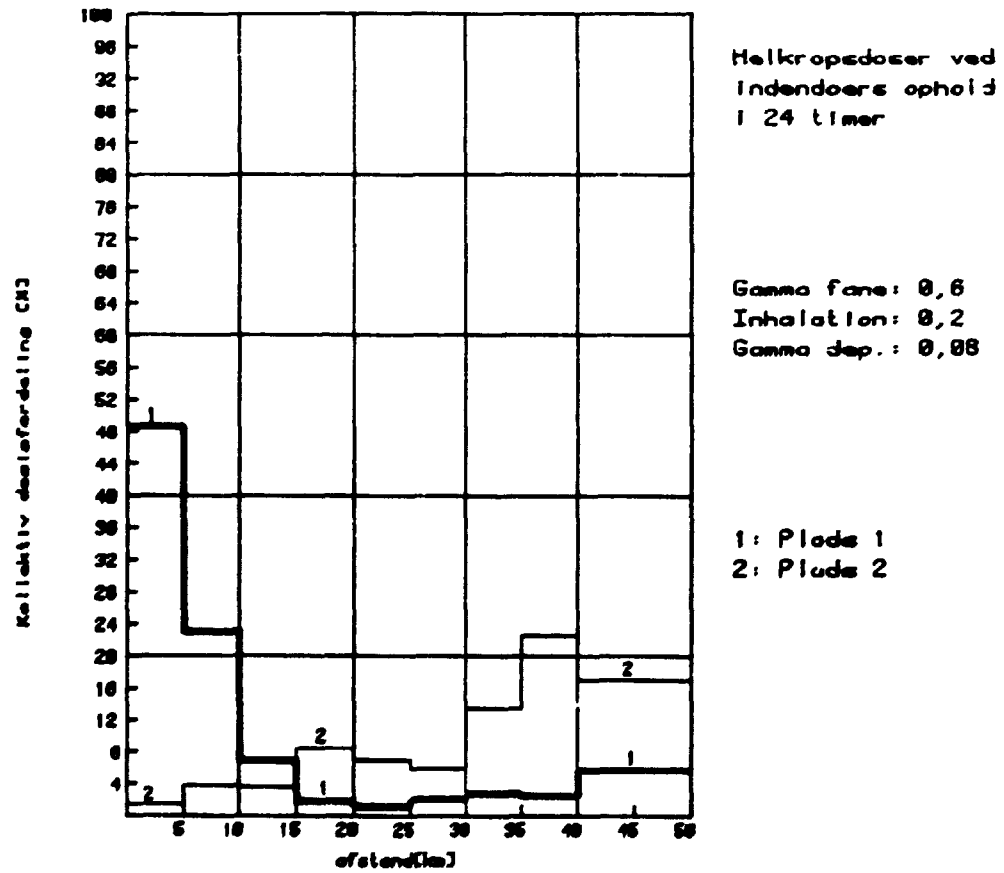


Fig. 7.21. Kollektiv dosisfordeling ved PWR6-uheld.

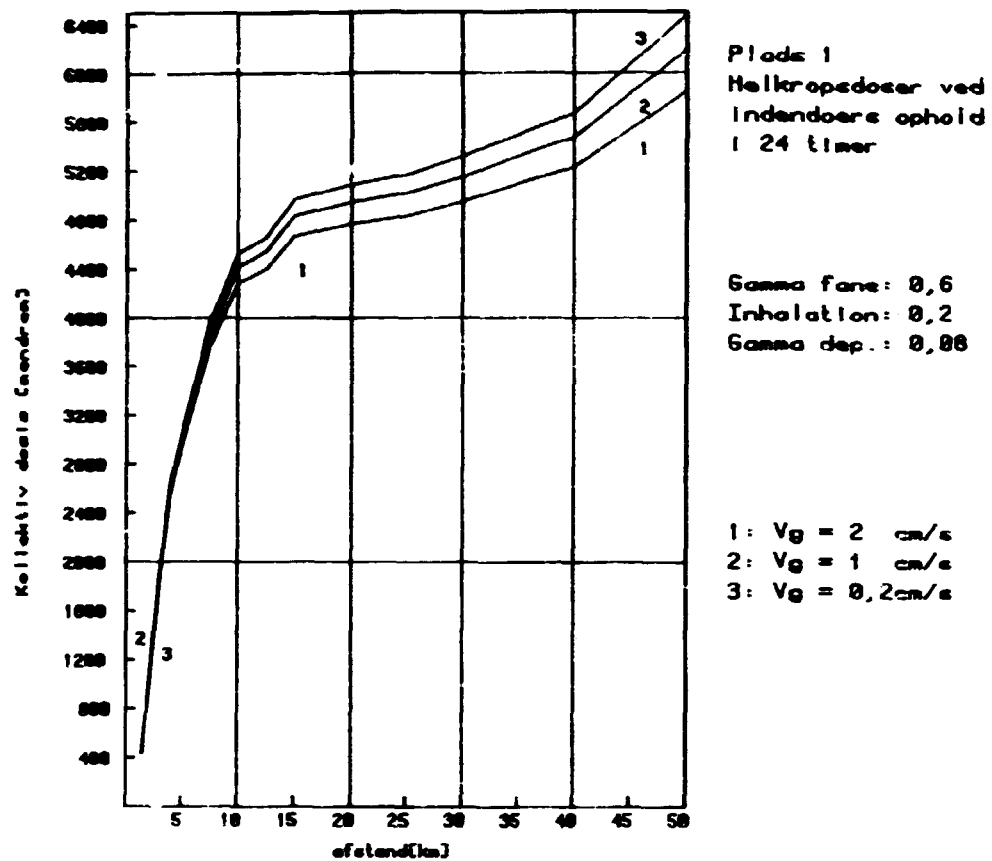


Fig. 7.22. Akkumuleret kollektivdosis ved PWR6-uheld

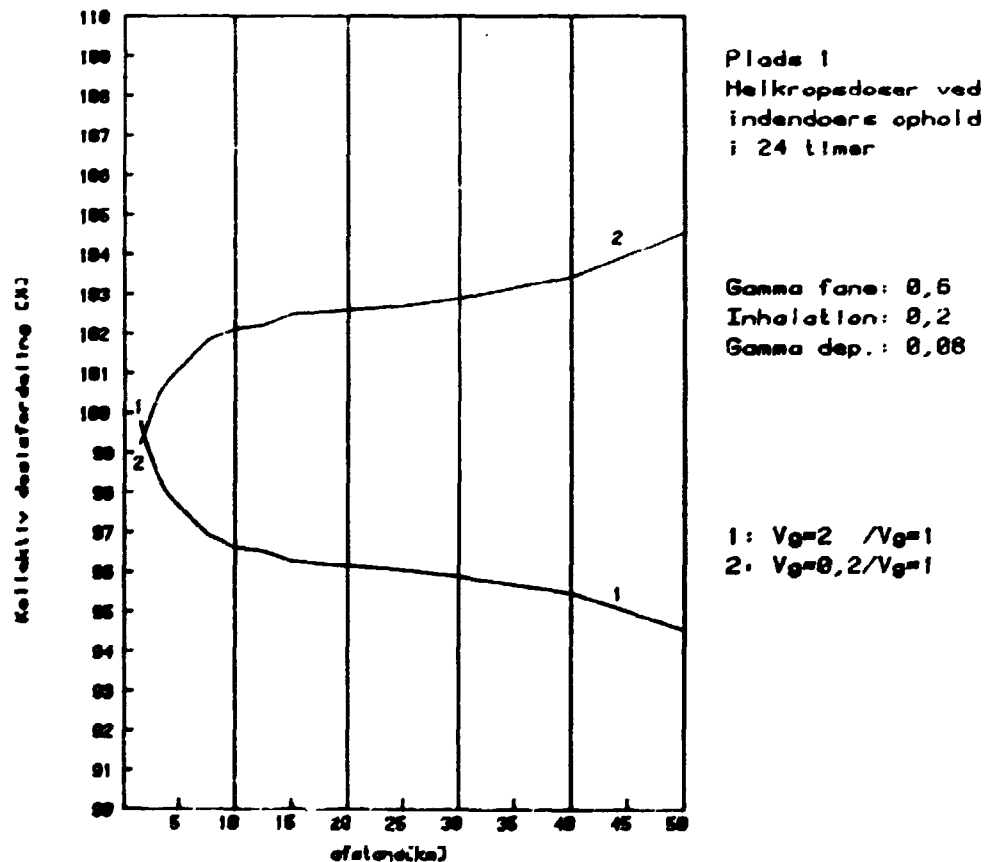


Fig. 7.23. Relativ kollektiv dosisfordeling ved PWR6-uheld

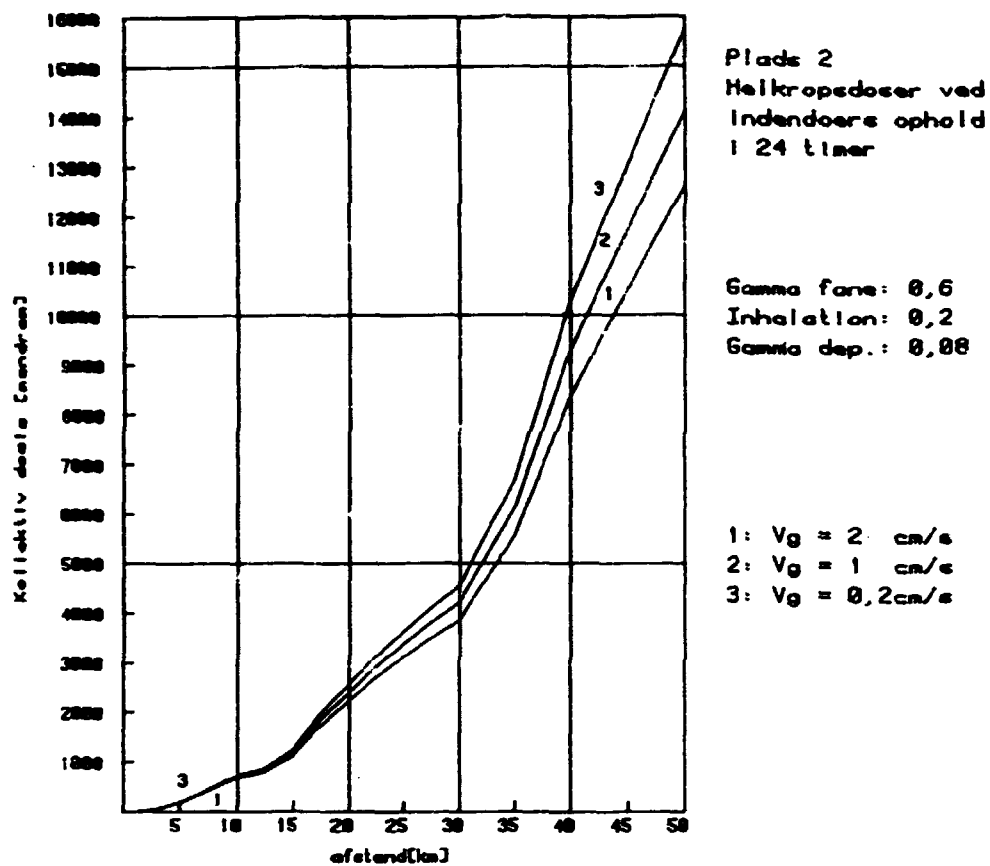


Fig. 7.24. Akkumuleret kollektiv dosis ved PWR6-uheld.

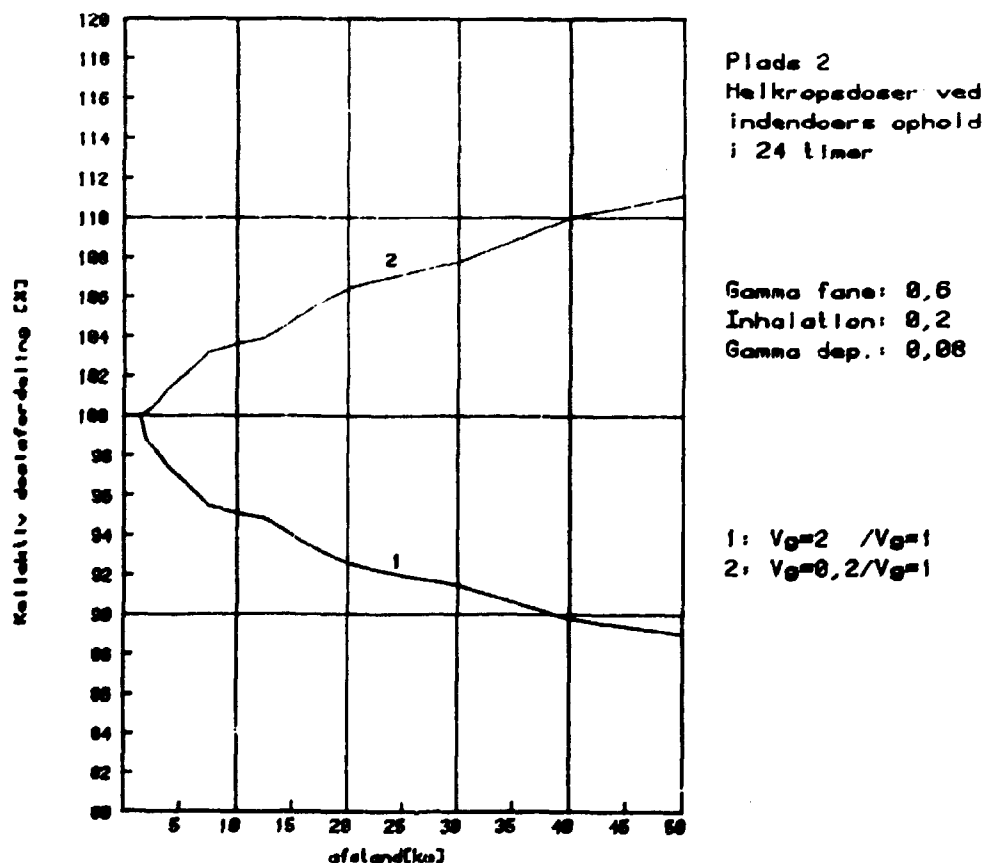


Fig. 7.25. Relativ kollektiv dosis ved PWR6-uheld.

7.2.2. Normal færden i 1 år

Når der regnes med indendørs ophold under skypassagen og derefter 1 års normal færd på stedet fås for henholdsvis plads 1 og plads 2 de kollektive helkropsdoser på fig. 7.26. og 7.27. Det ses, at doserne er af en sådan størrelse, at der næppe er behov for dosisreducerende foranstaltninger i form af dekontaminering og fraflytning, især ikke når det tages i betragtning, at der er regnet med ophold på stedet hele året. I en virkelig situation vil folk bevæge sig ind og ud af det forurenede område, hvorved den gennemsnitlige dosis vil blive reduceret væsentligt. Beregningen er kun medtaget for at vise, at forholdet mellem kollektivdosis for de to modelpladser ikke ændrer sig med tiden. Af fig. 7.16. og 7.17. fremgår således, at forholdet mellem kollektivdosis ud til 50 km for plads 1 og plads 2 er 2,29, når kun det første døgn tages i betragtning. Når beregningen udstrækkes til et helt år, ses det af fig. 7.26. og 7.27., at dette forhold kun ændres til 2,08.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	100	1240	1240	12
1,5-2,0	150	1070	2310	7,1
2,0-3,0	650	2630	4940	4,0
3,0-4,0	800	1930	6870	2,4
4,0-5,0	600	960	7830	1,6
5,0-7,5	2700	2050	9880	0,76
7,5-10,0	1900	1300	11180	0,68
10,0-12,5	1000	290	11470	0,29
12,5-15,0	2300	660	12130	0,29
15,0-20,0	1800	250	12380	0,14
20,0-25,0	2500	150	12530	0,06
25,0-30,0	5000	290	12820	0,06
30,0-35,0	6500	360	13180	0,06
35,0-40,0	9000	350	13530	0,04
40,0-50,0	40000	1540	15070	0,04
1,0-50,0	75000	15070	15070	0,20

Fig. 7.26. Helkroppsdozer og middeldoser ved et PWR6-udslip på plads nr. 1. Der regnes med indendørs ophold under skypassagen og derefter normal færd i 365 dage.

Interval [km]	Befolkning	Dosis [mandrem]	Akkumuleret dosis [mandrem]	Middel- dosis [rem]
1,0-1,5	0	-	-	-
1,5-2,0	10	70	70	7,0
2,0-3,0	20	80	150	4,0
3,0-4,0	70	170	320	2,4
4,0-5,0	100	160	480	1,6
5,0-7,5	600	640	1120	1,1
7,5-10,0	1500	600	1720	0,40
10,0-12,5	700	270	1990	0,39
12,5-15,0	5000	850	2840	0,17
15,0-20,0	14000	2740	5580	0,20
20,0-25,0	21000	2150	7730	0,10
25,0-30,0	32000	1840	9570	0,06
30,0-35,0	75000	4190	13760	0,06
35,0-40,0	150000	7030	20790	0,05
40,0-50,0	400000	10570	31360	0,03
1,0-50,0	700000	31360	31360	0,04

Fig. 7.27. Helkropps doser og middeldoser ved et PWR6-udslib på plads nr. 2. Der regnes med indendørs ophold uden skypassagen og derefter normal færd i 365 dage.

8. KOLLEKTIVDOSER PÅ DE I DANMARK RESERVEREDE PLADSER VED PWR4-UDSLIP

En relativ sammeligning af de reserverede danske pladser er foretaget på grundlag af kollektivdosis beregnet for 24 timers indendørs ophold efter start af et PWR4-udslip.

Beregningen omfatter 10 pladser i ELSAM-området og 6 pladser i ELKRAFT-området. Pladsen Søgrund tæt ved Gylling Næs er medregnet selvstændigt, selvom den er omfattet af arealreservationen for Gylling.

Der er ved beregningerne brugt befolkningsdata for 1992.

En nødvendig forudsætning - for at kunne anvende kollektivdosis til sammenligning af pladser - er, at der er taget stilling til den afstand, hvortil dosis skal beregnes.

Det blev ved modelberegningerne valgt at anvende afstanden 50 km bl.a. fordi det skønnedes, at en større afstand ikke på afgørende måde ville ændre forholdene mellem kollektivdoserne for mulige danske pladser.

De foretagne beregninger af kollektivdosis for de 16 reserverede pladser belyser dette forhold yderligere, idet der er gennemført dosisberegninger for afstande 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km og 60 km. For hver afstand er kollektivdosis beregnet for den af kompasrosens 12 stk. 30^o-sektorer, der giver den største dosis. Resultaterne af beregningerne er vist i fig. 8.1.-8.7.

Plads	Største kollektivdosis (i mandrem) i 30 ^o -sektorer ud til:					
	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
Ørby Hage 1	25900 150	122400 240	128700 240	132700 240	134700 240	139500 240
Jørl Hage 2	24700 240	161500 240	169600 240	173900 240	175800 240	180700 240
Brandse 3	800 120	38400 120	117500 360	131100 360	147400 360	161000 360
As Hoved 4	78900 210	96400 300	109700 300	117900 210	163700 150	180300 150
Gylling Næs 5	26700 330	40500 360	143300 270	299200 360	338500 360	346000 360
Søgrund 6	23600 360	51900 330	136700 270	175100 360	216500 360	223100 360
Katholm 7	31200 300	87400 360	89500 360	89500 360	90900 240	114300 240
Søråmark 8	32300 30	32900 210	68100 360	205800 240	223200 240	227400 240
Harboøre 9	80600 360	81300 360	81300 360	81300 360	81300 360	81300 360
Bøsøre 10	35700 270	73800 360	80800 210	101300 300	113900 300	120800 300
Sømmer 11	53800 90	128100 210	152200 90	292100 90	397800 90	397800 90
Stevns 12	46800 60	56700 270	143300 330	169500 330	217700 360	340600 360
Rødby 13	30300 330	44400 330	54900 330	64000 330	64900 330	64900 330
Tårs 14	23300 150	95800 150	100400 150	107300 150	107400 150	107400 150
Klinteby 15	55800 90	224400 60	245600 60	251300 60	266800 60	267600 60
Mullerup 16	69600 30	105600 120	110500 120	115100 120	145600 120	150200 120

Fig. 8.1. Største kollektivdosis ved PWR4-udslip i 30^o-sektorer ud til forskellige afstande fra de reserverede danske pladser. Nederste tal i kolonnerne angiver sektorretningen.

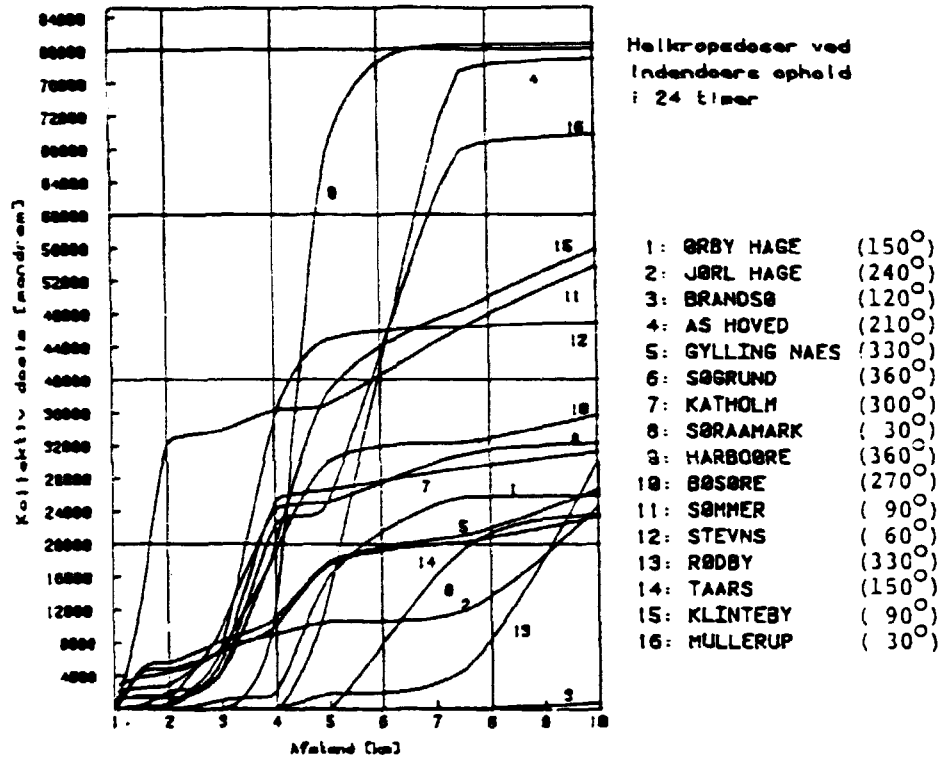


Fig. 8.2. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 10 km.

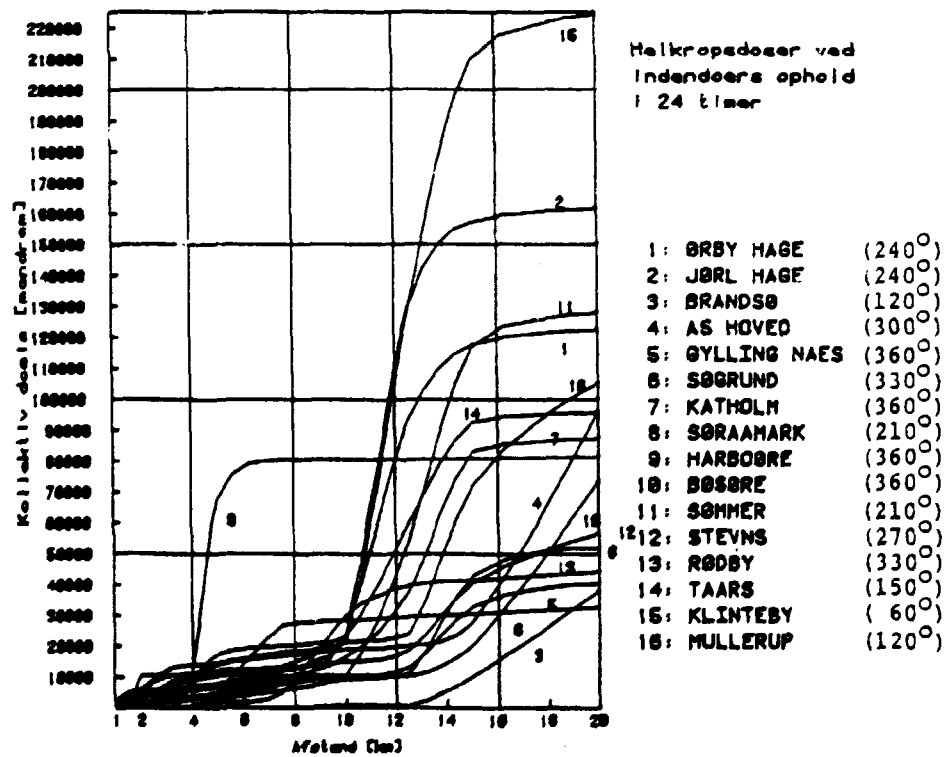


Fig. 8.3. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 20 km.

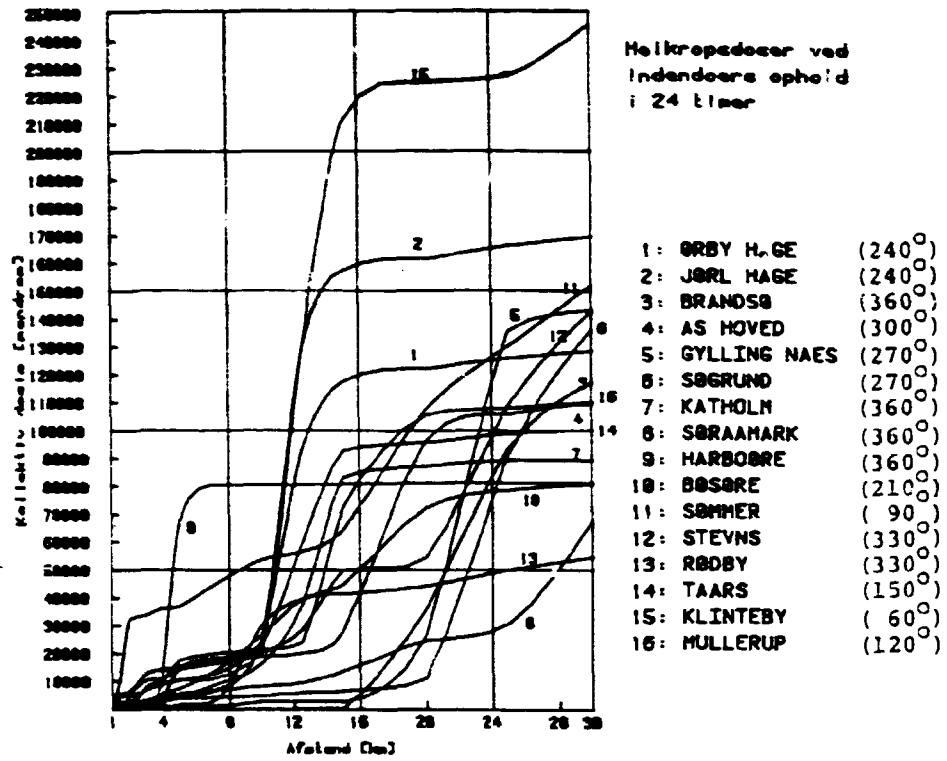


Fig. 8.4. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 30 km.

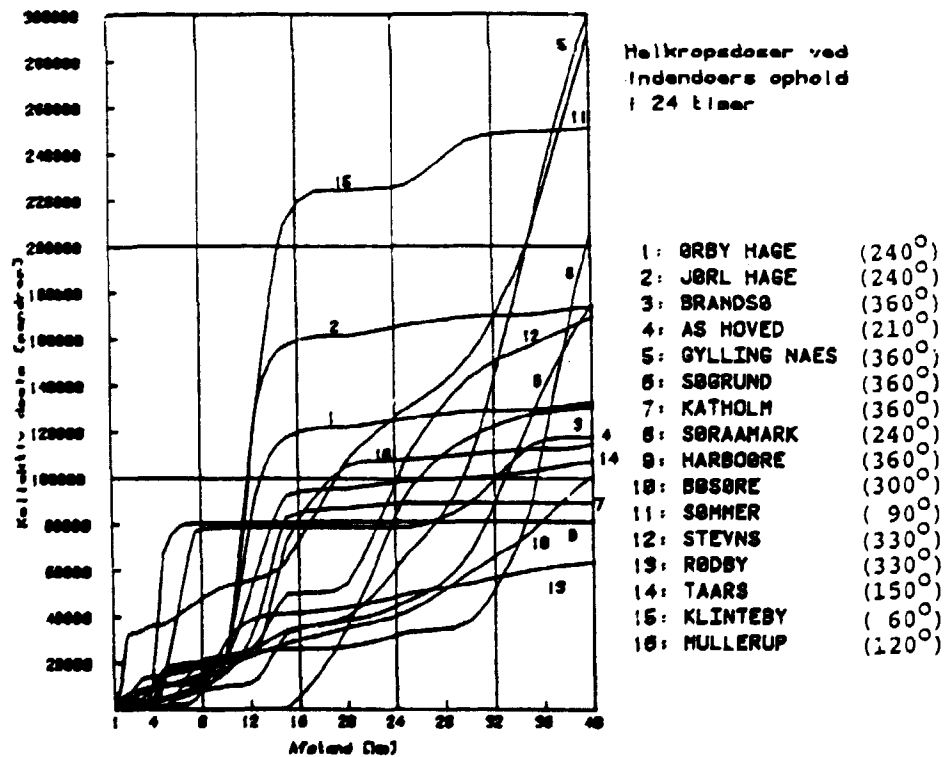


Fig. 8.5. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 40 km.

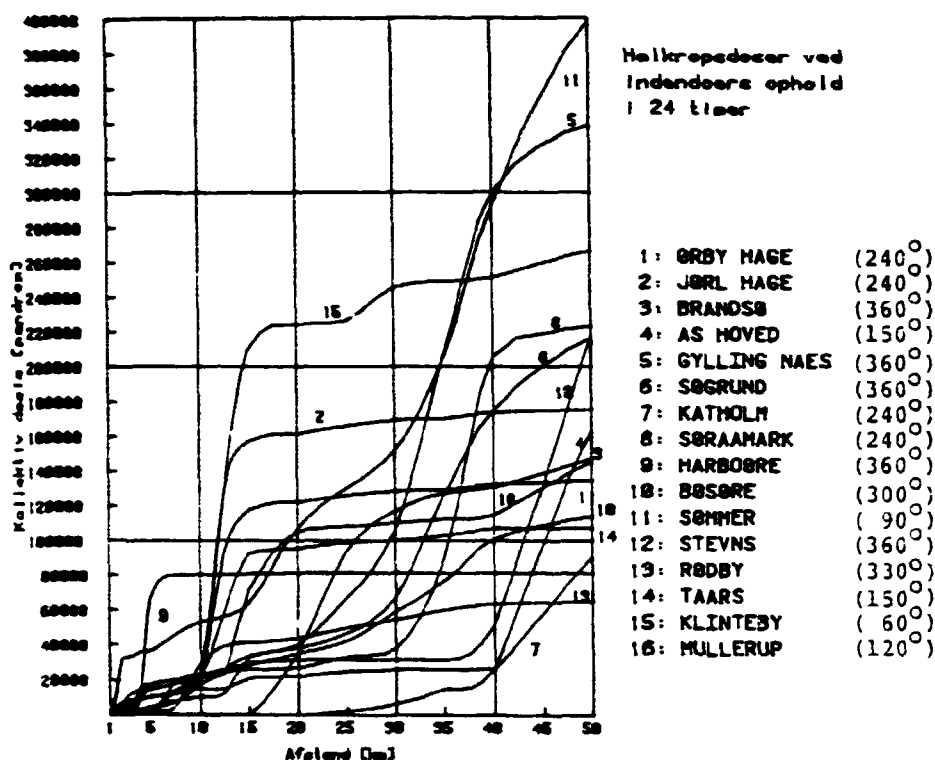


Fig. 8.6. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 50 km.

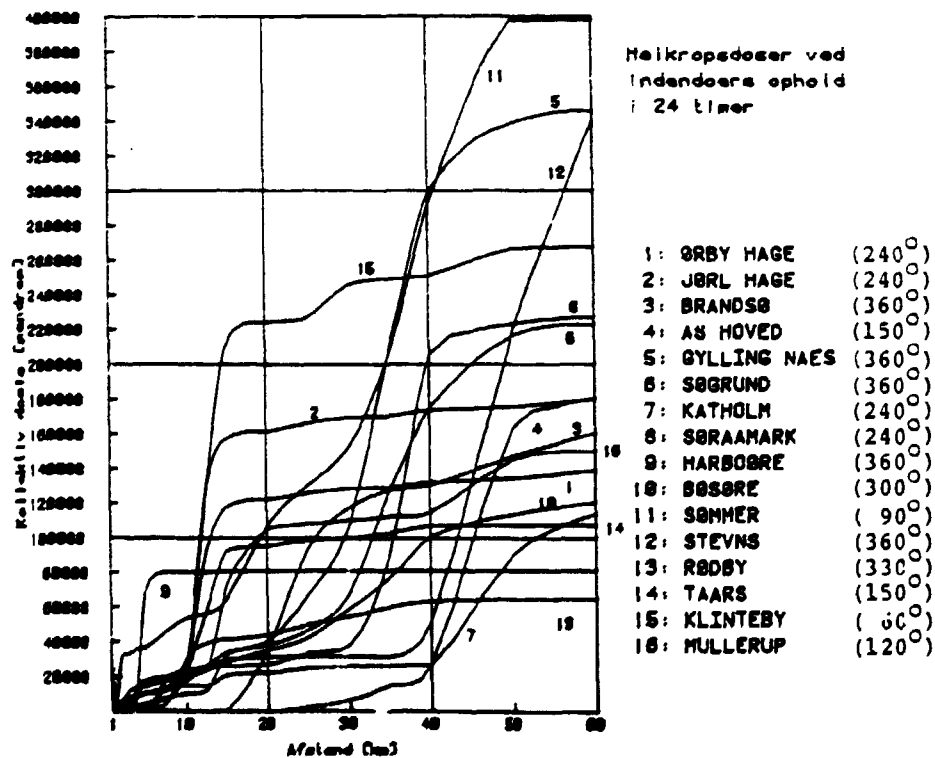


Fig. 8.7. Akkumuleret kollektiv dosis ud til 60 km.

Kollektivdosis er som nævnt tidligere udtryk for den samlede (kollektive) risiko for den berørte befolkning, hvorimod den personlige (individuelle) risiko ikke kommer klart til udtryk. De gennemførte beregninger for de reserverede pladser må ses på denne baggrund.

Kollektivdoserne er beregnet for den 30^o-sektor, der giver størst dosis. Beregninger over den midlede kollektivdosis for alle 12 30^o-sektorer omkring en plads viser, at forholdet mellem de enkelte pladsers kollektivdosis i det store og hele bliver det samme som i 30^o-sektor tilfældet, selvom der naturligvis sker en vis udjævning af forskellene. Hvis sammenligningen baseres på midlede kollektivdoser, bør man tage hensyn til, at vinden ikke blæser lige ofte fra alle retninger, og at vejrforholdene i øvrigt er skiftende. Beregningerne bliver herved meget omfattende, men resultaterne stadigvæk omtrent uændrede. Det er derfor fastholdt at sammenligne pladserne på grundlag af kollektivdosis i den 30^o-sektor, hvor dosis er størst ud til 60 km.

Beregningerne viser, at forskellen i kollektivdosis som følge af et radioaktivt udslip mellem de enkelte pladser er mindre end en faktor 10, og at rangfølgen mellem pladserne er helt afhængig af den afstand, der lægges til grund for dosisberegningen.

9. REFERENCER

- ALDRICH, D.C., m.fl., 1978, "Public protection strategies for potential nuclear reactor accidents: Sheltering concepts with existing public and private structures", SAND 77-1725.
- AUXIER, J.A., m.fl., 1959, "Experimental evaluation of the radiation protection afforded by residential structures against distributed sources", CEX-58.1, USAEC.
- BERMAN, M., m. fl., 1980, "US Steam Explosion Research. Risk Perspective and Experimental Results". Pg. 101. Samlung der Vorträge zum Jahreskolloquium 1980. Kfk. 3070.
- BURSON, Z.G., 1966, "Experimental radiation measurements in conventional structures. Part I: Radiation measurements in two two-storey and three one-storey typical residential structures before and after modification", CEX-59.7B, USAEC.
- BURSON, Z.G., 1970, "Experimental evaluation of the fallout radiation protection provided by structures in the control point area of the Nevada Test Site", CEX-69.5, USAEC.
- BURSON, Z.G., 1975, "Structure shielding from cloud and fallout gamma ray sources for assessing the consequences of reactor accidents", EGG-1183-1670.
- GALE, H.J., m.fl., 1963, "The weathering of caesium 137 in soil", AERE-R-4241.
- GYLLANDER, C. og WIDEMO, U., 1980, "Våtdeposition-aerosoler, et litteratur studie", studsvik Arbetsrapport, K2-80/271.
- HEINEMANN, K. og VOGT, K.J., 1980, "Measurements of the deposition of iodine onto vegetation and of the biological half-life of iodine on vegetation", Health Physics 39, 463-502.
-

HORBERT, M., m.fl., 1976, "Untersuchungen zur Ablagerung von Aerosolen auf Vegetation und anderen Grenzflächen", Jül-1288.

ICRP 79. "Limits for the intake of radionuclides by Workers". ICRP publication 30, part 1, 1979.

INDUSTRIDEPARTEMENTET, 1980. "Ångexplosioner i Lättvattenreaktorer". Betänkande av Ångexplosionskommiteen, Ds I 1980: 28.

JONAS, R., 1979, "Status über die Feldversuche zur Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit von Aerosolen", ZST-Bericht No. 295.

LAURIDSEN, B. og HEDEMANN JENSEN, P., 1981, "Shielding Factors for Vehicles to Gamma Radiation from Activity Deposited on Ground Surfaces", Risø-M-2339.

LEVENSON, M. og RAHN, P., 1980. "Realistic Estimates of the Consequences of Nuclear Accidents". Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA.

NIELSEN, O.J., 1981, "A literature review on radioactivity transfer to plants and soil". Risø-R-450.

NIELSEN, V.R., m.fl., 1974, "Placeringsmuligheder for atomkraftværker vest for Storebælt". Redegørelse fra den af Miljøministeriet nedsatte arbejdsgruppe vedrørende lokalisering af atomkraftværker. Miljøministeriet, januar 1974.

NIELSEN, V.R. m.fl., 1978, "Placeringsmuligheder for atomkraftværker øst for Storebælt". Redegørelse fra den af Miljøministeriet nedsatte arbejdsgruppe vedrørende lokalisering af atomkraftværker. Miljøministeriet, maj 1978.

NRC, 1975, "Reactor Safety Study. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants", WASH-1400 (NUREG 75/014).

NUREG-0772, 1981. "Technical Bases for Estimating Fission Product Behaviour During LWR Accidents".

PASQUILL, F., 1961, "The estimation of the dispersion of windborne material", Met. Mag., 90, 33.

RININSLAND, H., m.fl., 1980. "Fortschritte der Reactorsicherheitsforschung in Project Nukleare Sicherheit". Pg. 23. Sammlung der Vorträge zum Jahreskolloquium, 1980. Kfk 3070.

SEHMEL, G.A., 1980, "Model predictions and a summary of dry deposition velocity data", accepteret til Atmospheric Environment i 1981.

THYKIER-NIELSEN, S., 1980, "The Risø model for calculating the consequences of the release of radioactive material to the atmosphere", Risø-M-2214.

THYKIER-NIELSEN, S. og LARSEN, S., 1982, "The Importance of Deposition for Individual and Collective Doses in Connection with Routine Releases from Nuclear Power Plants", Risø-M-2205.

WARMING, L., 1981, "Weathering and decontamination of radioactivity deposited on asphalt surfaces", Risø-M-2273.

<p>Title and author(s)</p> <p>Model Calculations of the Influence of Population Distribution on the Siting of Nuclear Power Plants (in Danish) Flemming Nielsen and Ole Walmod-Larsen</p>	<p>Date Februar 1984</p>
<p>85 pages + tables + illustrations</p>	<p>Department or group</p> <p>Health Physics</p>
<p>Abstract</p> <p>This report was prepared for a working group established in april 1981 by the Danish Environmental Protection Agency with the task of investigating siting problems of nuclear power stations in Denmark.</p> <p>The purpose of the working group was to study the influence of the population density around a site on nuclear power safety. The importance of emergency planning should be studied as well.</p> <p>In this model study two specific accident sequences were simulated on a 1000 MWe nuclear power plant. The plant was assumed to be placed in the center of two different model population distributions. The consequences for the two population distributions from the two accidents were calculated for the most frequent weather conditions.</p> <p>Doses to individuals were calculated for the bone marrow, lungs, gastrointestinal tract, thyroidea and for the whole body.</p> <p>The collective whole body doses were also calculated for the two pupulations considered.</p> <p>Available on request from Risø Library, Risø National Laboratory (Risø Bibliotek), Forsøgsanlæg Risø), DK-4000 Roskilde, Denmark Telephone: (03) 37 12 12, ext. 2262. Telex: 43116</p>	<p>Group's own registration number(s)</p> <p>Copies to</p>