

Kleine kansen - grote gevolgen

of

gevolgen van een groot ongeluk
met een kerncentrale



G. VAN DIJK

W. A. SMIT

Collectie Stichting Loka

www.loka.org

Gedigitaliseerd 2021



BOERDERIJCAHIER 7601

K L E I N E K A N S E N - G R O T E G E V O L G E N

of

GEVOLGEN VAN EEN GROOT ONGELUK MET EEN KERNCENTRALE

BOERDERIJCAHIER 7601

G. VAN DIJK

W.A. SMIT

INHOUDSOPGAVE

	pag.
VOORWOORD	i
INLEIDING	1
Referenties	6
I. METEOREOLOGISCHE EN RADIOLOGISCHE MODELLEN	7
1. Inleiding	7
2. Metereologisch verspreidingsmodel	7
3. Reactorinhoud	9
4. Lozing	9
4.1. Tijdstip en wijze van vrijkomen van radioactief materiaal	9
4.2. Vrijkomende hoeveelheden	10
4.3. Radioactief verval	11
5. Radiologische modellen	12
Referenties	13
II. KORTE TERMIJN GEZONDHEIDSEFFECTEN	14
1. Aard van de effecten	14
1.1. Inleiding	14
1.2. Dodelijke beenmergdosis	14
1.3. Longen	15
1.4. Maag-darm kanaal	17
1.5. Schildklier	17
1.6. Pre-natale sterfte	17
1.7. Synergetische effecten	18
1.8. Acute ziekteverschijnselen	19
2. Enkele scenario's	20
2.1. Inleiding	20
2.2. Weerscategorie F	21
2.2.1. Beenmergdosis	21
2.2.1.1 Geen evacuatie, geen afscherming	21
2.2.1.2 Geen evacuatie, wel afscherming	24
2.2.1.3 Evacuatie na passage van de wolk, geen afscherming	28
2.2.1.4 Evacuatie na passage van de wolk, wel afscherming	30
2.2.2. Longdosis	33
2.2.3. Maag-darmkanaal	33
2.2.4. Schildklierdosis	33

	pag.
2.2.3. Evacuatie	35
2.3. Weerscategorie D	38
2.3.1. Beenmergdosis	38
2.3.1.1 Geen evacuatie, geen afscherming	38
2.3.1.2 Evacuatie, geen afscherming	39
2.3.2. Longen	50
2.3.3. Maag-darm kanaal	50
2.3.4. Schildklierdosis	50
2.3.5. Evacuatie	50
2.4. Conclusies m.b.t. korte termijn gezondheidseffecten	54
Referenties	56
 III. STRALINGSBELASTING VAN SPECIFIEKE ORGANEN	 57
1. Inleiding	57
Referenties	88
 IV LANGE TERMIJN GEZONDHEIDSEFFECTEN	 89
1. Inleiding	89
2. Laat-somatische effecten	89
2.1. Dosis-effect relatie voor kankerinductie: kwalitatief	89
2.2. Dosis-effect relatie voor kankerinductie: kwantitatief	91
2.3. Schildklierkanker	95
3. Genetische schade	96
4. Omvang van laat-somatische en genetische schade in de scenario's	97
4.1. Weerscategorie F	97
4.2. Weerscategorie D	98
4.2.1. Droog weer	98
4.2.2. Regen	99
5. Waarschuwend opmerking	100
Referenties	101
 V. LANGE TERMIJN GRONDBESMETTING	 102
1. Inleiding	102
2. Bewoonbaarheid	102
2.1. Weerscategorie F. Totale γ -dosis in één jaar	102
2.2. Weerscategorie D	103
2.3. Afhangelijkheid van de lange termijn besmetting van de weersomstandigheden	113
2.4. Bijdrage van cesium aan stralingsintensiteit	113
2.5. Opwaaien van neergeslagen radioactieve deeltjes	117

	pag.
3.	Gevolgen voor landbouw en veeteelt 126
3.1.	Inleiding 126
3.2.	Besmetting van oogst en grasland 128
3.3.	Besmetting van de grond 135
4.	Slotopmerking 143
	Referenties 145
VI.	SAMENVATTING EN CONCLUSIES 147
1.	Problemen van kernenergie 147
2.	Gevolgen van een groot reactor ongeluk 148
2.1.	Gehanteerde methode en veronderstellingen 148
2.2.	Korte termijn gevolgen 149
2.3.	Lange termijn gevolgen 151
2.3.1.	Onbewoonbaarheid en onbruikbaarheid van het land 151
2.3.2.	Omvang van laat-somatische en genetische effecten 152
3.	Conclusies 154
4.	Aanvaardbaarheid van risico 155
	Referenties 157
APPENDIX A	RADIOACTIEVE INHOUD VAN EEN REAKTOR EN ENKELE FYSISCHE KONSTANTEN VAN DE RADIOAKTIEVE ISOTOPEN 158
1.1.	Reaktorinhoud 158
1.2.	Halveringstijd 159
1.3.	β - en γ -energieën 159
	Referenties 174
APPENDIX B	METEREOLOGISCH VERSPREIDINGSMODEL EN RADIOACTIEF VERVAL 175
1.	Het verspreidingsmodel 175
1.1.	Inleiding 175
1.2.	Invloed van menglaag en pluimstijging 175
1.3.	Stabiliteitsklassen 177
1.4.	Verspreidingsformules 177
1.5.	Depositie 179
1.6.	Neerslag t.g.v. uitregenen 180
2.	Radioactief verval 181
	Referenties 183

	pag.
APPENDIX C BEREKENINGSMETHODE VOOR STRALINGSDOSES T.G.V. RADIOAKTIEVE BESMETTING	184
1. Inleiding	184
2. Stralingsdosis t.g.v. depositie in de longen	184
2.1. Dosis in de verschillende organen	184
2.2. Stralingsdosis in de longen	185
2.3. Inwendige totale lichaamsdosis	186
3. Uitwendige totale lichaamsdosis t.g.v. γ -straling	186
4. Dosis t.g.v. achtergrondstraling van besmet land	187
5. Onbewoonbare gebieden t.g.v. besmetting	188
6. Vroeg- en laat-somatische dosis; genetische dosis	189
6.1. Vroeg-somatische dosis	189
6.2. Laat-somatische dosis	190
6.3. Genetische dosis	190
Referenties	191
 APPENDIX D GEVOELIGHEIDSANALYSE T.A.V. ENKELE AANNAMES	 192
1. Inleiding	192
2. 45 isotopen in het Gezondheidsraadrapport	192
3. Invloed van radioactieve dochterisotopen	194
4. Invloed van tijdstip van lozing	194

VOORWOORD

In dit rapport worden, modelmatig, de gevolgen onderzocht van een mogelijk, groot ongeluk met een kernenergiecentrale.

Dergelijke ongelukken vormen, tezamen met het gevaar van een mondiale radioactieve besmetting van het milieu op lange termijn, de verspreiding van kernwapens en de opslag van het langlevende radioactieve afval, de centrale problemen voor de samenleving bij de toepassing van kernenergie voor civiele doeleinden.

De problemen van ongelukken met kerncentrales spelen op twee niveau's. T.g.v. de verspreiding van (langlevende) radioactieve stoffen vormen zij een van de processen die een bijdrage leveren aan een mondiale radioactieve besmetting van het milieu. Bovendien kunnen deze ongelukken leiden tot onvoorstelbare rampen op regionaal niveau, met name in dichtbevolkte gebieden. Dit laatste aspect is het onderwerp van dit rapport.

In een vorig Boerderijcahier (7502; Kernenergie in Discussie) werd slechts de omvang van de lange termijn besmetting van het land t.g.v. een groot reactorongeluk besproken. Door tijdgebrek konden andere aspecten van de gevolgen van een dergelijk ongeluk niet behandeld worden. Dit tijdgebrek werd veroorzaakt doordat de Vaste Kamer-Commissies voor Economische Zaken en voor de Kernenergie, vóór 1 januari 1976 reacties inwachtten op drie, in opdracht van de regering verrichte, veiligheidsstudies, betreffende de eventuele bouw van 3 kerncentrales in Nederland. Het rapport "Kernenergie in Discussie", dat gedeeltelijk als een reactie op deze veiligheidsstudies kan worden beschouwd, diende daarom voor 1 januari 1976 gereed te zijn.

Het onderhavige rapport, dat zowel de korte- als de lange-termijn aspecten van een groot ongeluk met een kerncentrale in Nederland behandelt, kan daarom als een aanvulling op Boerderijcahier 7502, "Kernenergie in Discussie", gezien worden.

Door een aantal omstandigheden verschijnt dit rapport later dan aanvankelijk was voorzien. Daartegenover staat echter het voordeel dat voor een aantal aspecten nog gebruik gemaakt kon worden van de definitieve versie van het Rasmussenrapport dat in november 1976 in ons bezit kwam.

Ook ditmaal heeft Gerdien Linde-de Ruiter weer het grootste deel van de organisatie en het typewerk verzorgd.

Daarnaast is de Correspondentiekamer van de THTwente hulpvaardig geweest. Veel dank zijn we verschuldigd aan J.A. Helmantel en G.C. Ruissen van de Chemische Laboratoria der Rijksuniversiteit te Groningen die de vele figuren in het rapport getekend hebben.

Enschede, februari 1977

G. van Dijk
W.A. Smit

INLEIDING

Er bestaat een vrij uitgebreide literatuur over de gevolgen van ongelukken met kerncentrales. Meestal betreft deze ongelukken van beperkte omvang, in de zin dat men nog een zekere controle heeft over de hoeveelheid radioactieve stoffen die worden geloosd en de wijze waarop dit geschiedt. Een voorbeeld van een dergelijke beheerste lozing is het lozen van een overmaat van radioactieve gassen via de schoorsteen nadat binnen het reactorgebouw een ongewenste hoeveelheid radioactieve stoffen is vrijgekomen. Zo mogelijk worden daarbij de te lozen stoffen eerst nog gefilterd, bijvoorbeeld om de hoeveelheid in de atmosfeer komend radioactief jodium te beperken. Een niet beheerste lozing kan bijvoorbeeld optreden, indien de reactorkern door oververhitting smelt en het reactorgebouw onder invloed van overdruk of/ en explosies bezwijkt. Afhankelijk van het al dan niet werken van de diverse veiligheidssystemen van een kerncentrale is qua omvang een groot scala van ongelukken mogelijk.

De literatuur over grote ongelukken met kerncentrales waarbij geen controle meer uitgeoefend kan worden op omvang en wijze van lozing is veel beperkter. De omvang van de gevolgen zal in zo'n geval o.a. afhangen van de regionale situatie rond een kerncentrale. Meestal gaat de bespreking van zo'n ongeluk echter niet over een kerncentrale op een concrete vestigingsplaats maar wordt een hypothetische vestigingsplaats beschouwd met een gemiddelde bevolkingsdichtheid.

Een van de eerste analyses van de gevolgen van een groot, niet meer te beheersen reactorongeluk, werd in 1957 door de Amerikaanse Atoomenergiecommissie (AEC) gegeven¹⁾. Het ging hierbij om een, naar huidige maatstaven, kleine kerncentrale met een elektrisch vermogen van 170 Megawatt. (Op het ogenblik worden kerncentrales met een elektrisch vermogen van 1000 à 1200 Megawatt gebouwd.) De beschreven gevolgen bleken sterk afhankelijk van de, tijdens een ongeluk optredende weersomstandigheden. Het aantal directe slachtoffers zou volgens deze analyse kunnen oplopen tot 3400 doden en 43000 gewonden. Het door radioactiviteit ernstig besmette gebied tot 15000 km². Zeven jaar later werd deze studie door de AEC herhaald onder dezelfde aannames, maar nu voor grotere reactoren. Het resultaat van deze studie werd in 1964 echter niet vrijgegeven. Pas in 1973 werden de resultaten van deze studie onder sterke druk van de bevolking bekend gemaakt. In deze studie werd berekend dat de gevolgen van een ongeluk voor grote reactoren

zo'n 40 maal zo ernstig konden zijn als de studie van 1957 aangaf²⁾.

Op deze studie werd sterke kritiek uitgeoefend omdat de aannames over de hoeveelheid vrijkomend materiaal (n.l. de helft) veel te hoog zouden zijn. Gedeeltelijk is deze kritiek gerechtvaardigd. Van de vaste stoffen kan in een zeer ernstig ongeval vermoedelijk niet meer dan een paar procent vrijkomen, van de gasvormige echter wel bijna tot 100%.

De kwestie van catastrofale ongelukken met kerncentrales had intussen een belangrijke plaats in de publieke discussie over kernenergie gekregen. Als gevolg hiervan zag de Amerikaanse Atoomenergiecommissie zich genoodzaakt een studie te laten maken betreffende de veiligheid van kerncentrales. Daarbij werden ook de gevolgen van niet meer te beheersen ongelukken behandeld. In het in 1974 uitgebrachte rapport³⁾ werd het hele scala van kleine tot zeer grote ongelukken besproken waarbij, naast de gevolgen, uitgebreid aandacht werd besteed aan de grootte van de kansen die men voor het optreden van al deze soorten ongelukken had berekend. Deze kansberekeningen spelen n.l. een belangrijke rol in de veiligheidsfilosofieën die tegenwoordig t.a.v. de kernenergiecentrales gehanteerd worden.

De laatste jaren waren n.l. in de wereld van de kernenergieindustrie en atoomenergiecommissies redeneringen ontstaan waaruit de aanvaardbaarheid van de mogelijkheid op grote ongelukken zou moeten blijken. Dit op zich betekende al een verschuiving in houding omdat voordien er vanuit gegaan werd dat het optreden van dergelijke ongelukken voorkomen zou kunnen worden door toepassing van voldoende veiligheidsvoorzieningen en veiligheidsinspecties. Over de betekenis van veiligheidsvoorzieningen is reeds elders geschreven⁴⁾. Ook gaan we hier niet verder in op bovengenoemde veiligheidsfilosofieën waarbij getracht wordt de aanvaardbaarheid van de mogelijkheid van grote ongelukken met kerncentrales aan te tonen middels risicoanalyses noch op de rol van de kansberekeningen daarin en de vergelijkingen met andersoortige risico's, zoals o.a. in deze Rasmussen- en daarvan afgeleide studie (b.v. RASIN-studie⁵⁾) gehanteerd. Een bespreking van de betekenis van deze risicoanalyses en veiligheidsfilosofieën vindt men in een aantal andere publikaties⁶⁾.

Ook in de Nederlandse situatie stuitte het publiekelijk bespreekbaar maken van de gevolgen van een groot reactorongeluk op grote weerstand. Toen in 1974 op een symposium van het Verbond van Wetenschappelijke Onderzoekers door de auteurs enkele aspecten van een mogelijk groot ongeluk met een kerncentrale op de Maasvlakte werden gepresenteerd, waarbij in het geval

van ongunstige weersomstandigheden het directe aantal slachtoffers op 90000 doden werd geschat benevens enkelehonderdduizenden gevallen van lichte tot ernstige stralingsziekten⁷⁾, werd hiertegenover, van andere zijde gesteld, dat een ernstig ongeluk met een kerncentrale hoogstens tot één (!) dode zou leiden. Het zal duidelijk zijn dat de uitgangspunten wat betreft het meest ernstige ongeluk dat mogelijk is, geheel verschillend waren. In het ene geval werd uitgegaan van een niet onder controle te houden vrijkomen van radioactieve stoffen, in het andere geval van een beheerste lozing.

Nadat in de Rasmussenstudie de mogelijkheid van het, op niet beheerste wijze vrijkomen van grote hoeveelheden radioactief materiaal erkend was, en voor de Amerikaanse situatie de gevolgen waren beschreven, werden voor Nederland in een drietal veiligheidsstudies, door de Gezondheidsraad (GR), de Commissie Reactorveiligheid en de Samenwerkende Electriciteitsproductiebedrijven (SEP) uitgevoerd in opdracht van de regering, ongelukken van een dergelijk type beschouwd. In de RASIN-studie (van de SEP) werd, door de wijze van presentatie (n.l. door het geven van gemiddelde cijfers) nog getracht de ernst van de mogelijke gevolgen van deze ongelukken zoveel mogelijk te verhullen, hetgeen ook door de GR werd opgemerkt in haar commentaar op de RASIN-studie. De GR gaf wel aan wat, volgens haar berekeningen, de meest ernstige consequenties zijn. Zij deed dit echter niet voor concrete vestigingsplaatsen in Nederland maar voor een zgn. referentievestigingsplaats met een gemiddelde bevolkingsdichtheid. En ook de GR blijft niet geheel verschoond van een verhullende presentatie als het gaat om aan te tonen wat de gevolgen voor een concrete situatie in Nederland zullen zijn⁷⁾.

In het rapport "Kernenergie in discussie", waarin o.a. kritiek geleverd wordt op deze drie veiligheidsstudies, worden ook de lange termijn gevolgen van een groot reactor ongeluk op de Maasvlakte besproken. Dit is een wezenlijk aspect dat nauwelijks of in het geheel niet in de drie veiligheidsstudies wordt behandeld.

In dit rapport wordt tevens geconstateerd dat de GR nog tot een aanzienlijke onderschatting van de gevolgen moest komen omdat zij van een veel te lage reactorinhoud voor het radioactieve isotoop Cesium-134 uitgegaan was. Deze reactorinhoud had zij, evenals een studiegroep van de American Physical Society, klakkeloos overgenomen van het Rasmussenrapport (dat toen nog slechts in voorlopige versie bestond).

Tekenend is hoe van regerings- en departementale zijde op deze kritiek gereageerd wordt. Als bij de behandeling van de energienota in de Tweede Kamer op 3 februari 1976 deze kritiek m.b.t. de reactorinhoud van Cesium-134 ter sprake wordt gebracht, reageert minister Lubbers van Economische Zaken in een brief⁸⁾ hierop met de zinssnede dat "de Gezondheidsraad inderdaad een wat lage waarde gehanteerd heeft, doch het getal dat in het rapport van Boskma c.s. gebruikt wordt, is door een onjuist gebruik van de Amerikaanse gegevens een vergaande overschatting".

In de inmiddels in de Verenigde Staten verschenen definitieve versie van de Rasmussenstudie blijkt m.b.t. de reactorinhoud van Cesium-134 een belangrijke wijziging t.o.v. het voorlopige rapport te zijn aangebracht. Deze nieuwe waarde blijkt 4½ maal zo groot te zijn als de oorspronkelijke en de door de GR gehanteerde waarde, hetgeen door minister Lubbers "een wat lage waarde" wordt genoemd en de helft van de door ons gebruikte waarde, wat beschreven wordt als "een vergaande overschatting". Het gevoel voor verhoudingen lijkt zoek bij de Minister en het departement.

Inhoud rapport

Dit rapport geeft de resultaten en methoden weer van een uitgebreider onderzoek naar de gevolgen van een groot reactor ongeluk in een mogelijke Nederlandse situatie, n.l. van een kernenergiecentrale op de Maasvlakte. Daarbij worden zowel de korte termijn als de lange termijn aspecten besproken. De weerssituatie tijdens het ongeluk kan van grote invloed op de gevolgen zijn. Dit wordt uitgebreid besproken. Daarnaast worden nog enkele andere invloedsfactoren besproken.

In hoofdstuk I worden globaal de gebruikte meteorologische en radiologische modellen besproken. In appendix B en C wordt een meer gedetailleerde beschrijving gegeven. Bovendien wordt in hoofdstuk I een karakteristiek gegeven van de aard van het ongeluk. Oorzaken van een dergelijk ongeluk worden niet besproken. Een bespreking daarvan is elders te vinden⁹⁾. In hoofdstuk II worden de korte termijn effecten behandeld voor 3 verschillende weersomstandigheden. Het gaat daarbij zowel om gezondheidseffecten in de vorm van stralingsziekten en sterfte t.g.v. hoge stralingsdoses als om de noodzaak van evacuatie op korte termijn.

Na inademing van radioactieve stoffen kunnen deze via de longen en na opname in het bloed zich afzetten in diverse organen. Over deze interne stralingsbelasting gaat hoofdstuk III. Hoofdstuk IV behandelt de lange termijn gezond-

heidseffecten n.l. de laat somatische en genetische schade.

De lange termijn effecten t.g.v. besmetting van de grond worden in hoofdstuk V onderzocht. Met name gaat het hier om de omvang van de gebieden die voor lange tijd onbewoonbaar worden t.g.v. de hoge stralingsintensiteit in de besmette gebieden. Ook wordt ingegaan op de onbruikbaarheid van het land voor agrarische doeleinden.

Hoofdstuk VI tenslotte geeft in hoofdlijnen de resultaten van deze studie weer en evalueert de betekenis van de gevolgen van een groot reactor-ongeluk voor Nederland.

Referenties Inleiding

1. WASH-740, "Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants", USAEC, 1957.
2. Zie bijv. "Preliminary Review of the AEC Reactor Safety Study", Sierra Club - Union of Concerned Scientists, nov. 1974, p. 107 e.v.
3. "Reactor Safety Study. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants", WASH-1400, Draft (1974). De zgn. "Rasmussenstudie".
4. W.A. Smit, "Kernenergie: een controversieel risico" in "Kernvragen over de snelle kweekreactor", p. 1 e.v. Symposiumboek van de THDelft (nov. 1975).
5. "Risico-analyse van de splijtstofcyclus in Nederland" (RASIN-studie) door de N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Productiebedrijven, (juni 1975).
6. Zie hiervoor bijv. "Kernenergie in discussie ; een beschouwing naar aanleiding van drie veiligheidsstudies", Boerderijcahier 7502 THTwente (1975). hfdst. VII en hfdst..X.
W.A. Smit "Kernenergie een controversieel risico" in "Kernvragen over de snelle kweekreactor", p. 1 e.v. Symposiumboek van de THDelft (nov. 1975).
W.A. Smit, "Zijn risico's met kerncentrales aanvaardbaar?", Wending 31, nr. 3 (mei 1976), p. 157-167.
7. Zie hiervoor ref. 6, Boerderijcahier 7502, p. V-36 en V-37.
8. Brief van de Minister van Economische Zaken aan de Tweede Kamer, zitting 1975-1976, 13122, nr. 17.
9. Zie ref. 6, Boerderijcahier 7502, hfdst. VII.

Hoofdstuk I. METEREOLOGISCHE EN RADIOLOGISCHE MODELLEN

1. Inleiding

Om de gevolgen te berekenen van een groot reactorongeluk moeten we gebruik maken van modellen. Meteorologische verspreidingsmodellen voor de wijze waarop vrijgekomen radioactieve stoffen zich in de omgeving verspreiden en waarmee de radioactieve besmetting van zowel de mensen als het land bepaald wordt. Radiologische modellen waarmee de gevolgen van radioactieve besmetting uitgedrukt wordt in ziekten, sterfte en lichamelijke en geestelijke afwijkingen in latere generaties.

Dit hoofdstuk beschrijft de gehanteerde modellen en geeft een aantal uitgangspunten en aannames weer, die voor de berekeningen gebruikt zijn. Modellen zijn een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Zij kunnen deze nooit exact weergeven. Zij kunnen wel de hoofdlijnen, de belangrijke aspecten weergeven. De berekeningen in dit rapport geven dan ook geen voorspelling van wat er precies kan of zal gebeuren in geval van een groot reactor ongeluk. Zij geven echter wel de grootte orde van de mogelijke gevolgen, en een indruk van de omvang daarvan (zie ook hoofdstuk II-2.1).

2. Meteorologisch verspreidingsmodel

Zodra radioactieve stoffen in de atmosfeer vrijkomen worden deze met de wind meegevoerd. Tevens verspreiden ze zich in richtingen loodrecht op de windrichting (zowel in horizontale als in verticale richting). Bij een groot reactorongeluk waarbij in korte tijd een grote hoeveelheid radioactief materiaal vrijkomt trekt een zich uitdijende radioactieve wolk in de windrichting over het land. Daarbij slaat een gedeelte van het radioactief materiaal neer op het land (depositie) waardoor dit, evenals de aan de radioactieve wolk blootgestelde levende wezens, besmet wordt. Het zich afzetten van radioactief materiaal op het land zal in geval van regen ("natte depositie" of "uitregenen") sterker zijn dan bij droog weer.

Voor de berekeningen van de besmettingsgraad is gebruik gemaakt van het zgn. gaussische meteorologische verspreidingsmodel, dat ook uitgangspunt geweest is voor de berekeningen in het rapport van de Commissie van de Gezondheidsraad¹⁾ en in het Rasmussenrapport²⁾. Evenals in deze beide studies is het model gecorrigeerd voor depositie.

In bovengenoemde studies wordt ter vereenvoudiging uitgegaan van ringen met het lozingspunt als middelpunt, waarin de concentratie in radiale richting constant wordt gedacht. De concentratie-verdeling van de pluim in een doorsnede in horizontale richting wordt benaderd met een constante concentratie over een segment van de ring; in het overige deel van de ring wordt hij gelijk aan nul gesteld. Bij de berekeningen voor dit rapport worden deze vereenvoudigingen echter niet aangebracht. Tevens is niet uitgegaan van een model voor de bevolkingsdichtheid met gemiddelde bevolkingsdichtheden, zoals in het Gezondheidsraadrapport, maar is uitgegaan van de gegevens van het Centraal Bureau voor de Statistiek over de bevolkingsomvang in de Nederlandse gemeenten.

In deze studie zijn alleen de resultaten van berekeningen weergegeven voor weersomstandigheden gekarakteriseerd door de stabiliteitsklassen D en F volgens een indeling van Pasquill (onstabiele en stabiele atmosfeer) welke in Nederland het meest frequent voorkomen. Categorie D komt zelfs in meer dan 50% van de gevallen voor. Stabiliteitsklasse D is onderverdeeld in twee subklassen nl. met en zonder regen. De windsnelheid bedraagt voor categorie D 5 m/s en voor categorie F 1.5 m/s.

De mate waarin radioactief materiaal neerslaat uit de overdrijvende wolk wordt door verschillende factoren bepaald (b.v. deeltjes-grootte, regen). Voor de coëfficiënten die de droge en natte depositie bepalen zijn dezelfde waarden genomen als in de Rasmussenstudie. In de radioactieve wolk ontstaan tevens radioactieve isotopen ("dochter-isotopen") door radioactief verval. Bij het bepalen van de concentratie van deze dochterisotopen moet ook rekening gehouden worden met depositie. Voor de berekening van de concentratie in de lucht is de hoogste depositie-coëfficiënt genomen van de voorafgaande isotopen in de vervalreeks; voor de berekening van de concentratie op het land neergeslagen dochterisotopen de laagste waarde. Hierdoor wordt in beide gevallen een (geringe) onderschatting van de effecten gemaakt.

Voor een uitvoeriger beschrijving van het gebruikte meteorologische model zij verwezen naar appendix B.

3. Reactorinhoud

Voor een gedetailleerde opgave van de reactorinhoud leze men appendix A. Alleen betreffende de hoeveelheden van de isotopen Cs-134 en Cs-137 is het wenselijk enkele opmerkingen te plaatsen, te meer daar deze isotopen voor het overgrote deel de landbesmetting op lange termijn bepalen. Over de in de reactor aanwezige hoeveelheden lopen de schattingen van verschillende auteurs uiteen.

De door de Gezondheidsraad gehanteerde waarden zijn bijvoorbeeld overgenomen uit de (voorlopige versie van de) Rasmussenstudie. Evenals een studiegroep van de American Physical Society dit gedaan heeft. Deze waarden zijn echter gebaseerd op een oud computer-programma uit 1964. Meer recente gegevens b.v. van Blomeke e.a.³⁾ en Pigford⁴⁾ geven, met name voor Cs-134, veel hogere waarden (zie Hoofdstuk V-2.4). De door ons gehanteerde waarden zijn, evenals in het rapport "Kernenergie in Discussie"⁵⁾, gebaseerd op deze recentere gegevens.

Inmiddels is de definitieve versie van de Rasmussenstudie verschenen, waarin de waarden voor Cesium herzien zijn. De daarin gebruikte reactorinhoud voor Cs-134 is bijna 5 maal zo groot als in de voorlopige versie. Daarmee blijft een verschil bestaan (van een factor 2 voor de reactorinhoud voor Cs-134) tussen de definitieve Rasmussenstudie en dit rapport. De betekenis hiervan is echter niet meer zo dramatisch als het oorspronkelijke verschil tussen het rapport van de Gezondheidsraad en het rapport "Kernenergie in Discussie".

Op de omvang van de acute ziekteverschijnselen heeft dit verschil slechts geringe invloed. Het is nog wel van belang voor de lange termijn grondbesmetting, alhoewel het het kwalitatieve beeld hierdoor niet verandert.

4. Lozing

4.1. Tijdstip en wijze van vrijkomen van radioactief materiaal

Voor de berekeningen is uitgegaan van een lozing ineens van een grote hoeveelheid materiaal, twee uur na het stoppen van de kettingreactie in de reactor. Omdat een belangrijk deel van de isotopen met een korte halveringstijd na twee uur reeds grotendeels vervallen zijn heeft een aanname van een lozing ineens, inplaats van bijv. gedurende een half uur (zoals in de Rasmussenstudie is aangenomen in geval van een stoomexplosie) geen grote invloed op de resultaten. De keus van het tijdstip van lozing, 2 uur na stoppen van de kettingreactie is ook tamelijk willekeurig. Het stemt overeen met de lozingstijdstippen van 2 en 2½ uur, van enkele grote reactorongelukken die beschreven zijn in de Rasmussenstudie. Het

ligt enigszins later dan het lozingstijdstip van 40 minuten dat in een recente Duitse studie is aangenomen⁶⁾. (Zie voor de gevoeligheid van de gevolgen t.a.v. lozingstijdstip appendix D.)

Een uitgebreide beschouwing over de mogelijke oorzaken van ongelukken is te vinden in "Kernenergie in Discussie"⁵⁾.

4.2. Vrijkomende hoeveelheden

De hoeveelheid die vrij kan komen van de verschillende radioactieve isotopen hangt af van diverse chemische en fysische processen. Het is dan ook niet mogelijk om (vooral bij grote ongelukken) nauwkeurige voorspellingen te doen.

De fracties die vrijkomen zijn afhankelijk van de vluchtigheidsgraad van de verschillende isotopen. Voor de vluchtige en gasvormige stoffen nemen we een fractie aan, die inligt tussen de minima en maxima van het Rasmussenrapport⁷⁾, waarbij rekening is gehouden met de mogelijkheid van stoomexplosies. Voor de niet-vluchtige stoffen is het percentage dat vrijkomt gesteld op 1%, vanwege het feit dat het fysisch mogelijk is dat dit enkele procenten zal bedragen.

De door ons genomen waarden komen in grote mate overeen met die in het Rasmussenrapport gedefinieerde PWR-2 ongeluk (zie fig. I.1.). Tevens zijn nog de percentages vermeld die door het Duitse Institut für Reaktorsicherheit der Technische Überwachungs-Vereine in een recente studie⁶⁾ (aug. 1976) zijn gebruikt en die onlangs bekendheid kreeg (febr. 1977).

Fig. I-1. Percentages vrijkomende elementen. Tussen haakjes vermelde, zijn niet meegenomen in het Ramussenrapport (draft).

Element	percentage dat vrijkomt		
	dit rap- port	Rasmussen- rapport	Institut für Reaktor- sicherheit
(H), Kr, Xe	90	90	100 Kr, Xe
Br, I	60	70	100 Br, I
Se, Sb, Te	50	30	25 Te, As, Sb, Sn
Rb, Cs	40	50	90 Rb, Cs
Mo, Tc, Ru, Rh, Pd	25	2 - 40	Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, 5 Ag, Fe, Co, Cr, Cd, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Mn
Sr, Ba	4	6	20 Sr, Ba
(Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ga, Ge, As,) Y, Zr, Nb, (Ag, Cd, In, Sn,) La, Ce, Pr, Nd, Pm, (Sm, Eu, Gd, Tb, Pb, Bi, Ra, Th, Pa, U, Np,) Pu, (Am, Cm, Bk)	1	0 - 0,4	1 Ga, Y, Zr, Nb, In, La, Ce, Pr, Pm, U, Pu,

4.3. Radioactief verval

In het voor dit rapport gebruikte rekenprogramma wordt rekening gehouden met concentratie veranderingen door radioactief verval. Tevens worden de door verval ontstane dochterisotopen in de effecten-berekening meegenomen tot in de derde generatie, voorzover zij ontstaan na het stoppen van de kernreactie en voor de opname in het lichaam. Het niet verder gaan dan tot de derde generatie is een redelijke vereenvoudiging: alleen de zwaardere isotopen hebben langere vervalketens, wat bij deze isotopen enigszins tot een onderschatting van de gevolgen zal leiden.

5. Radiologische modellen

Door verblijf in een radioactief besmette omgeving wordt de mens blootgesteld aan radioactieve straling. Dit kan een uitwendige bestraling zijn, maar ook een inwendige als bijvoorbeeld radioactieve isotopen ingeademd worden. De hieruit voortvloeiende stralingsbelasting moet weer bepaald worden met behulp van bepaalde modellen (bijvoorbeeld betreffende de wijze van afgifte van stralingsenergie, verdeling en verblijftijd van radioactieve isotopen in het lichaam). De gehanteerde modellen zijn beschreven in appendix C. Nadat op deze wijze de stralingsbelasting berekend is, zullen de gevolgen voor de gezondheid bepaald moeten worden. De wijze waarop dit gebeurd is wordt in de betreffende hoofdstukken beschreven.

Referenties Hoofdstuk I

1. Gezondheidsraad, "Kerncentrales en Volksgezondheid", sept. 1975, deel II, bijlage VI, p. 107 e.v. Hierna te noemen GRR II.
2. "Reactor Safety Study. An assessment of accident risks in U.S. commercial power plants", WASH-1400 Draft (1974). Hierna te noemen RSS.
3. J.O. Blomeke, C.W. Kee, J.P. Nichols, "Projections of radioactive wastes to be generated by the U.S. nuclear power industry", ORNL-TM-3965, (1974), p. 16.
4. T.H. Pigford, M.J. Keaton, B.J. Mann, "Fuel cycle for electrical power generation", Teknekron Report No. EEED 101, (1973), p. 20.
5. P. Boskma e.a., "Kernenergie in Discussie", Boerderijcahier 7502, T.H.Twente, dec. 1975.
6. D. Bachner, D. Holm, A. Meltzer, G. Morlock, P. Neusser, H. Urbahn, "Untersuchungen zum vergleich grösstmöglicher Störfallfolgen in einer Wiederaufarbeitungsanlage und in einem Kernkraftwerk", aug. 1976 (voorlopige resultaten).

Hoofdstuk II. KORTE TERMIJN GEZONDHEIDSEFFECTEN

1. Aard van de effecten

1.1 Inleiding

Onder de korte termijn gezondheidseffecten verstaan we de ziekteverschijnselen die optreden binnen ongeveer een jaar na blootstelling aan de radioactieve straling. Deze korte termijn effecten treden slechts op bij hogere stralingsdoses (meer dan enkele tientallen rems). Hoe hoger de dosis en hoe korter de termijn waarin deze ontvangen wordt hoe ernstiger de effecten in de regel zijn. Zeer hoge stralingsdoses, van meer dan 600 rem, hebben praktisch in alle gevallen binnen enkele dagen tot enkele weken de dood tot gevolg. Stralingsdoses van enkele tientallen rems geven in de regel aanleiding tot (tijdelijke) afwijkingen in het bloed.

We zullen in het volgende een nadere uitwerking geven van een aantal dominante korte termijn effecten ten gevolge van een hoge stralingsbelasting in korte tijd, zonder te pretenderen hiermee een uitputtende behandeling of opsomming van de effecten te geven.

De stralingsbelasting waar het hier om gaat is die welke men ontvangt door verblijf in een overdrijvende radioactieve wolk waardoor men aan uitwendige bestraling blootstaat, en aan inwendige straling door inademing van radioactieve deeltjes, die zich in de longen kunnen afzetten en vervolgens, via het bloed, in andere organen opgenomen kunnen worden. Bovendien zal men door verblijf in gebieden die, door neerslag van radioactief materiaal op grond, gebouwen en gewassen, radioactief besmet zijn, nog een extra dosis uitwendige radioactieve straling kunnen oplopen.

1.2 Dodelijke beenmergdosis

Een hoge stralingsbelasting (enkele honderden rems) in korte tijd opgelopen, zal kunnen leiden tot de dood van het slachtoffer binnen een tijdsbestek van enkele dagen tot vele weken (afhankelijk van de hoogte van de belasting). Meestal wordt sterfte door straling voorafgegaan door stralingsziekten waarvan de verschijnselen zijn: vermoeidheid, braken, diarree, haaruitval, beenmergsyndroom etc. Hoe hoger de stralingsdosis, hoe groter de kans op sterfte. De dosis waarbij gemiddeld x% van de mensen sterft wordt aangeduid met LD_x .

Voor de dosis waarbij 50% van de bevolking sterft wordt door de Amerikaanse National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) een waarde van 300 rem gegeven¹⁾. De Rasmussenstudie hanteert een LD₅₀ van 340 rem, een LD₁₀ van 200 en een LD₉₀ van 450 rem, in geval er lichte medische hulp wordt verstrekt²⁾. De Gezondheidsraad³⁾ gaat voor haar berekeningen uit van een 100% dodelijke dosis van 400 rem en een LD₅₀ van 300 rem.

De belangrijkste oorzaak van deze stralingsziekten, gevolgd door eventuele sterfte is de stralingsschade aan het beenmerg waardoor een aantasting van het bloed optreedt. Bij een uitwendige bestraling van het totale lichaam wordt, naast het beenmerg, bovendien lymfatisch weefsel beschadigd hetgeen leidt tot een vermindering van de weerstand tegen infecties. Bovendien wordt bij deze wijze van stralingsbelasting tevens het vaatstelsel beschadigd wat het gevaar van bloedingen vergroot. Bij interne bestraling van het beenmerg, door ophoping van radioactieve isotopen zoals strontium-90 in het bot is de straling meer gelocaliseerd dan bij een uitwendige bestraling. Hierdoor hoeft deze wijze van bestraling niet gepaard te gaan met beschadiging van het lymfatisch weefsel en vaatstelsel

Doordat beschadiging van het beenmerg overweegt als doodsoorzaak bij hoge stralingsdosis is het voor het bepalen van de hiervoor relevante dosis niet voldoende om alleen de totale lichaamsdosis te beschouwen maar moet ook rekening gehouden worden met de interne stralingsbelasting door ophoping van radioactieve isotopen in het bot. In de definitieve versie van de Rasmussenstudie wordt deze dosis in rekening gebracht door bij de totale lichaamsdosis nog de eerste week dosis + de helft van de 2e t/m de 4e week dosis van het beenmerg t.g.v. interne bestraling op te tellen⁴⁾. (De factor $\frac{1}{2}$ is ingevoerd vanwege de verminderde effectiviteit van een dosis als deze opgelopen wordt in een langere tijd.) In dit rapport wordt de helft van de gedurende 30 dagen ontvangen interne stralingsdosis van het bot genomen als de voor stralingsziekte en sterfte relevante interne beenmergdosis.

1.3 Longen

In de Rasmussenstudie⁵⁾ worden de volgende verschijnselen vermeld. De reactie van de longen op een intensieve stralingsdosis afkomstig van externe bronnen wordt gekarakteriseerd door 1) een vroeg stadium van stralings-

longontsteking en 2) een laat stadium van longbindweefselvermeerdering. Een dosis opgelopen over langere tijd zal leiden tot minder onherstelbare schade dan wanneer deze in korte tijd wordt toegediend. Er zijn berekeningen waaruit blijkt dat een dosis van 1050 rem, in een keer toegediend, in 50% van de gevallen tot stralingslongontsteking leidt.

Fatale gevolgen bij de mens worden verwacht bij dosis groter dan 2500 tot 3000 rem. Voor honden is de dosis waarbij in 50% van de gevallen sterfte optreedt 1700 rem en voor muizen 1350 rem.

Voor sterfte door interne stralingsbelasting tengevolge van opname van radioactieve isotopen in de long is, indien deze over een langere periode (meer dan een jaar) opgelopen wordt, in de regel een hogere dosis nodig (10 à 40 duizend rem).

In dit rapport wordt voor de op korte termijn ontvangen totale longdosis, bestaande uit een externe dosis tijdens het overdrijven van de radioactieve wolk, een 24 uur dosis door verblijf in besmet gebied en een 30 daagse interne stralingsdosis, de dosis effect relatie gebruikt zoals vermeld in het rapport van de Gezondheidsraad⁶⁾ n.l. 0% sterfte bij dosis kleiner dan 3000 rem en 100% sterfte bij dosis groter dan 5000 rem met een linear verband daar tussenin.

Het zal blijken dat i.h.a. dosisverhouding voor beenmerg en longen zodanig is dat eerder sterfte door de beenmergdosis optreedt dan door de opgelopen longdosis.

1.4 Maag-darm kanaal

Er bestaan te weinig gegevens om een betrouwbare dosis-effect relatie voor de stralingsbelasting van het maag-darm kanaal van de mens te geven. Voor het optreden van acute effecten zijn waarschijnlijk dosis van meer dan 1500 rem nodig. Bij honden leiden acute doses van 3500 à 5000 rem tot sterfte en 2500 à 4000 rem veroorzaakte duidelijke ziekteverschijnselen en latere sterfte⁷⁾. In dit rapport wordt de dosis-effect relatie uit het Gezondheidsraadrapport (G.G.R.)⁸⁾ aangehouden waarbij 100% sterfte bij dosis groter dan 3000 rem aangenomen wordt en 0% sterfte bij doses kleiner dan 2000 rem met een lineair verband daar tussenin. Evenals bij de longdosis het geval is overweegt echter sterfte door een dodelijke beenmergdosis, die eerder bereikt wordt.

1.5 Schildklier

Zeer grote doses t.g.v. jodium-131 in de schildklier kan leiden tot een versneld vrijkomen van het schildklierhormoon. In ernstige gevallen kan dit leiden tot verschijnselen als koorts, hartaanvallen, en uitputting van adrenaline. Deze toestand, genaamd "schildklierstorm" kan in milde vorm bij bepaalde hartpatienten reeds tot sterfte leiden. Hoge dosis (in de orde van 25000 rem en hoger) kan leiden tot geheel of gedeeltelijk "wegbranden" van de schildklier. Huidige schattingen zijn dat het aantal sterftegevallen door schildklierstorm hoogstens 21 per 100000 mensen die een dosis hoger dan 25000 rem ontvangen, zal zijn⁹⁾.

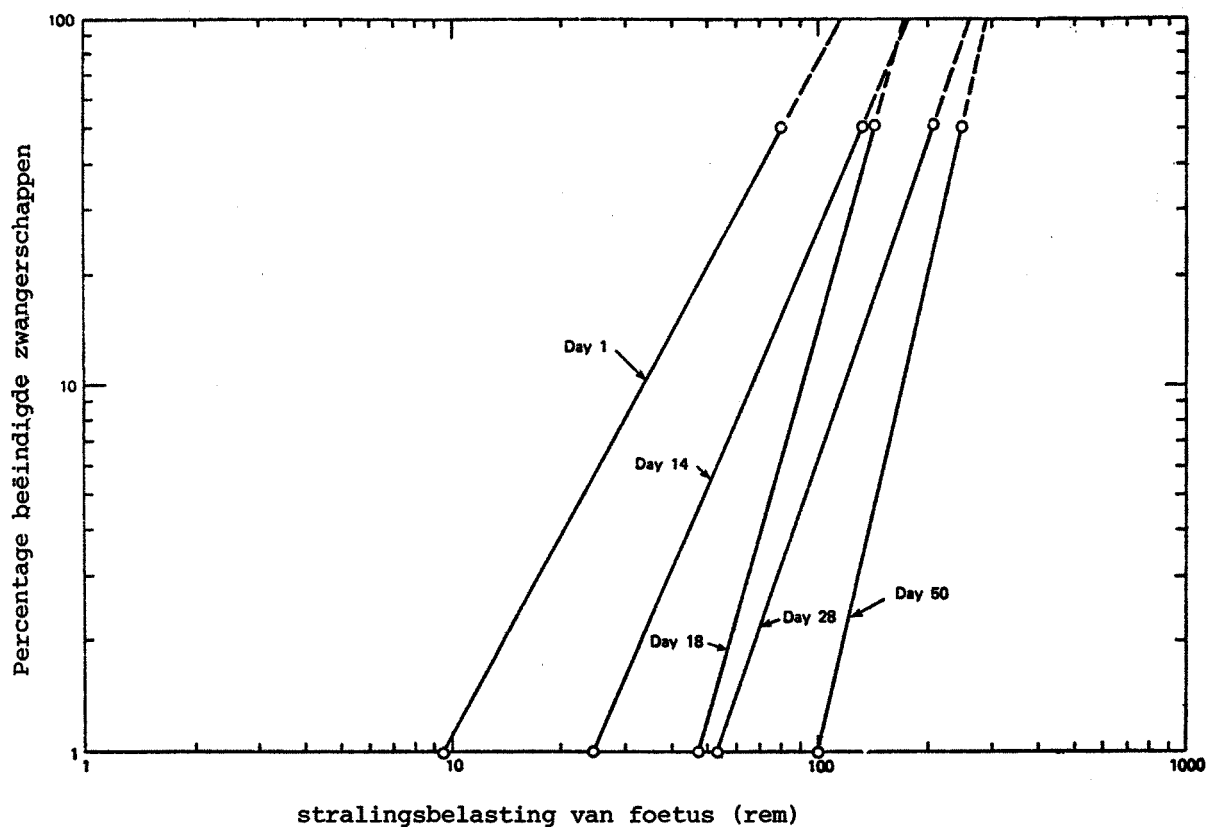
1.6 Pre-natale sterfte

Bijzonder gevoelig voor straling zijn de ongeboren kinderen, in het bijzonder de eerste 8 weken, waarin dosis van 10 tot 100 rem de zwangerschap kunnen beëindigen¹⁰⁾. (zie figuur II-1).

Indien geen beëindiging van de zwangerschap optreedt kan de opgelopen straling tot ontwikkelingsstoornissen leiden.

Fig. II-1. Percentage zwangerschapsbeëindigingen na korte uitwendige bestraling gedurende de eerste 3 maanden van de zwangerschap.

(fig. VI-9-5 uit WASH-1400)



1.7 Synergetische effecten

In geval van een groot reactorongeluk bestaat de stralingsbelasting uit vele componenten, n.l. naast een uitwendige bestraling van het totale lichaam, een inwendige bestraling van de verschillende organen. Deze verschillende doses zullen door gelijktijdige aanwezigheid het sterftecijfer kunnen verhogen doordat de schadelijke effecten elkaar versterken: niet dodelijke doses in de longen en de darmen kunnen als gezamenlijk effect wel tot sterfte leiden. Zo zal de dodelijke dosis van het beenmerg, die de belangrijkste bijdrage tot het sterftecijfer levert, effectief verlaagd kunnen worden doordat andere lichaamsorganen daarnaast nog aan een interne stralingsbelasting blootstaan.

Een dergelijke effectieve reductie van een dodelijke LD_{50} stralingsdoses is bij voorbeeld geconstateerd bij schapen waar deze dosis van 200 rem externe bestraling tot 145 rem werd teruggebracht indien rekening werd gehouden met een interne stralingsbelasting van de darmen.^{10a)} Kwantitatieve gegevens zijn hierover voor de mens zeker niet bekend, maar het lijkt niet onredelijk om in verband hiermee voor de dosis-effect relatie van de belasting van het beenmerg, het door de Gezondheidsraad gehanteerde verband aan te houden van 100% sterfte boven 400 rem, een LD_{50} van 300 rem met ernstige stralingsziekten tussen 200 en 400 rem en lichte stralingsziekten tussen 100 en 200 rem (hetgeen ongeveer correspondeert met gegevens van de NCRP¹⁾, maar 10% lager is dan de in het Rasmussenrapport genoemde dodelijke doses waarbij nog uitgegaan wordt van een lichte medische behandeling).

1.8 Acute ziekteverschijnselen

Zoals reeds eerder vermeld leiden hoge stralingsdoses tot zgn. stralingsziekten, gekarakteriseerd door verschijnselen als aantasting van het bloed, overgeven, diarree, haaruitval. Tevens treedt een vermindering van weerstand tegen ziektes op door aantasting van het immunosysteem. Bovendien kan door stralingsdoses onvruchtbaarheid veroorzaakt worden. Ernstige stralingsziekten treden op boven 200 rem, met toenemende sterfte bij hogere doses. Lichte stralingsziekten tussen 100 en 200 rem en tijdelijke aantasting van het bloed bij doses van 20 tot 100 rem¹¹⁾.

Bij huddoses van meer dan 300 rem treedt binnen 2 tot 3 weken haaruitval op. Ook treden bij doses van enkele honderden rem verschijnselen op analoog aan die van eerste graads verbranding (rood worden van de huid).

Verschijnselen van tweede graads verbranding treden op bij doses van 1000 tot 2000 rem en van derde graads verbranding boven 2000 rem¹²⁾

Een stralingsbelasting van 50 tot 100 rem van de mannelijke geslachtsorganen veroorzaakt een tijdelijke steriliteit van enkele weken tot 200 dagen.

Hogere doses kunnen tot langduriger onvruchtbaarheid leiden. Kwantitatieve gegevens over het optreden van onvruchtbaarheid bij de vrouw t.g.v. straling ontbreken. Eenmalige dosis van 30 tot 600 rem onderdrukken gedurende kortere of langere tijd, tot permanent de menstruatie¹³⁾. De Gezondheidsraad gaat voor de vrouw uit van permanente steriliteit bij doses hoger dan 300 rem¹⁴⁾.

Ziekteverschijnselen t.g.v. het "verbranden" van (een deel van) de schildklier treden op bij dosis boven 25000 rem. In de Rasmussenstudie wordt het aantal gevallen met deze verschijnselen geschat op 4.5% bij 25000 rem met een toename van 5% van de bevolking voor elke 10000 rem schildklierdosis die men meer ontvangt.

2. Enkele scenario's

2.1 Inleiding

De gevolgen van een groot reactorongeluk zijn afhankelijk van vele factoren, zoals de hoeveelheid vrijkomende radioactiviteit en de wijze waarop dit geschiedt, het tijdstip van vrijkomen en de duur hiervan. Een belangrijke factor is ook onder welke weersomstandigheden een ongeluk geschiedt. De meeste van deze factoren zijn niet te voorspellen, en m.b.t. vele van de fysische grootheden die een rol spelen (deeltjesgrootte, neerslag op het land, stijghoogte van een radioactieve wolk, invloed van oneffenheden in het terrein) bestaat aanzienlijke onzekerheid. Om toch enig inzicht te krijgen in de mogelijke omvang van de gevolgen van een groot reactorongeluk, stellen we een aantal scenario's op. Hierbij wordt voor de beschrijving van de fysische, biologische en meteorologische verschijnselen die een rol spelen gebruik gemaakt van modellen die enerzijds zo realistisch mogelijk zijn maar anderzijds onontkomelijk een aantal "idealiserings" van verschijnselen bevatten (bijvoorbeeld een constante windrichting en snelheid, een effen terrein, "standaardmensen" wat betreft radiobiologische effecten). Op zich is dat niet bezwaarlijk indien men zich bewust is van deze beperkingen van het opstellen van scenario's. Het voordeel van de scenariomethode is dat deze sterk verhelderend kan werken voor het verkrijgen van inzicht in complexe gebeurtenissen. Heeft men eenmaal een scenario opgesteld dan kan namelijk tevens de invloed van verschillende parameters of variabelen worden bestudeerd (binnen de gebruikte modellen).

De korte termijn gevolgen van een groot reactorongeluk blijken sterk af te hangen van de weersomstandigheden tijdens en na het ongeluk. We zullen daarom scenario's met twee verschillende weertypen beschrijven. Deze weertypen worden naar een indeling van Pasquill¹⁵⁾ gekarakteriseerd als categorie F (stabiele weersomstandigheden) en categorie D.

De laatste categorie is een die in meer dan de helft van de tijd in Nederland optreedt. Voor deze laatste categorie zullen we nog onderscheid makentussen een situatie met droog weer en met regen. De scenario's hebben betrekking op een concrete mogelijke situatie in Nederland nl. een 1000 MWe kerncentrale op de Maasvlakte.

Omdat dit rapport wil laten zien wat de consequenties van een grote reactorramp zijn voor Nederland is alleen een schatting gemaakt van het aantal slachtoffers binnen Nederland. De omvang van eventuele gevolgen in het buitenland, door grensoverschrijdende radioactiviteit, is niet berekend. In geval van de hier beschouwde scenario's betreffen de gevolgen voor het buitenland (Duitsland) voornamelijk problemen die zich over langere termijn uitstrekken zoals onbewoonbaarheid en onbruikbaarheid van het land en laat-somatische en genetische schade.

2.2 Weerscategorie F

Onder deze stabiele weersomstandigheden verspreidt de radioactieve wolk zich slechts weinig loodrecht op de wind, in verticale en horizontale richting. Langs de as van de windrichting zal de concentratie van radioactiviteit daardoor slechts betrekkelijk langzaam afnemen. De wind, met een snelheid van 1.5 m/sec ofwel 5.4 km/uur, waait in ons scenario vanuit zuid-westelijke richting.

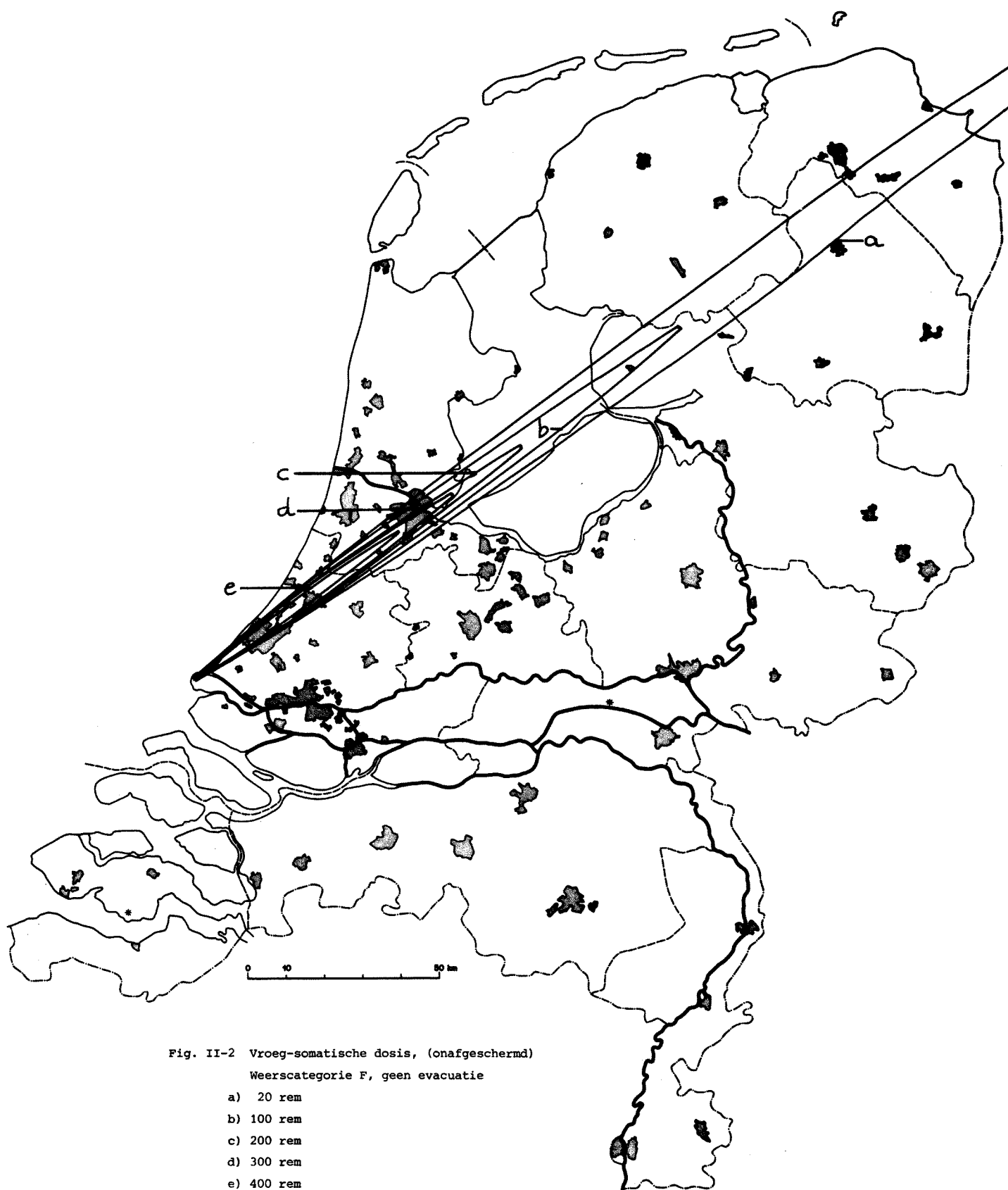
2.2.1 Beenmergdosis

2.2.1.1 Geen evacuatie, geen afscherming

Bij het overdrijven van de radioactieve wolk staat men aan straling bloot door uitwendige bestraling vanuit de wolk, inwendige bestraling door inademing van radioactief materiaal en uitwendige bestraling door verblijf in, door neerslag van radioactief materiaal, besmet gebied. Al deze vormen van bestraling dragen bij tot de totale beenmergdosis.

De stralingsbelasting van het beenmerg die men zou oplopen indien men na het overdrijven van de wolk nog 24 uur in besmet gebied verblijft, is weergegeven in fig. II-2. Dit representeert een mogelijke situatie waarbij evacuatie slechts langzaam op gang komt of mislukt door chaotische toestanden. Zoals in 1.2 aangegeven is een hoge stralingsbelasting van het beenmerg een belangrijke oorzaak van stralingsziekten en sterfte. Overeenkomstig het voorgaande geeft de grens van 400 rem het gebied aan waarbinnen onder deze omstandigheden 100% sterfte plaats vindt. Hierbij is geen rekening gehouden met eventuele afscherming van straling door gebouwen. In het gebied tussen de grenzen van 300 en 400 rem treden in dit geval ernstige stralingsziekten op met meer dan 50% sterfte en in het gebied tussen 200 en 300 rem met minder dan 50% sterfte.

Tussen de 100 en 200 rem treden lichte verschijnselen op van stralingsziekte waaronder vermoeidheid, braken en diarree. Bovendien ontstaat een verminderde weerstand tegen infecties en bij kinderen treedt beschadiging van groeizones in het skelet op waardoor de normale groei wordt belemmerd. In het gebied van 20 tot 100 rem treedt een tijdelijke aantasting van het bloed op zonder dat men zich ziek voelt.



De schatting van de omvang van de gevolgen is weergegeven in tabel II-1. Het gaat ons hierbij niet zo zeer om de nauwkeurigheid als om de grootte-orde.

Tabel II-1. Aantal slachtoffers bij Weerscategorie F, geen evacuatie, geen afscherming.

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen
>400	100 % sterfte	215000
300-400	stralingsziekten, sterfte >50%	185000
200-300	stralingsziekten, sterfte <50%	130000
100-200	lichte stralingsziekten	170000
20-100	bloedaantasting	300000

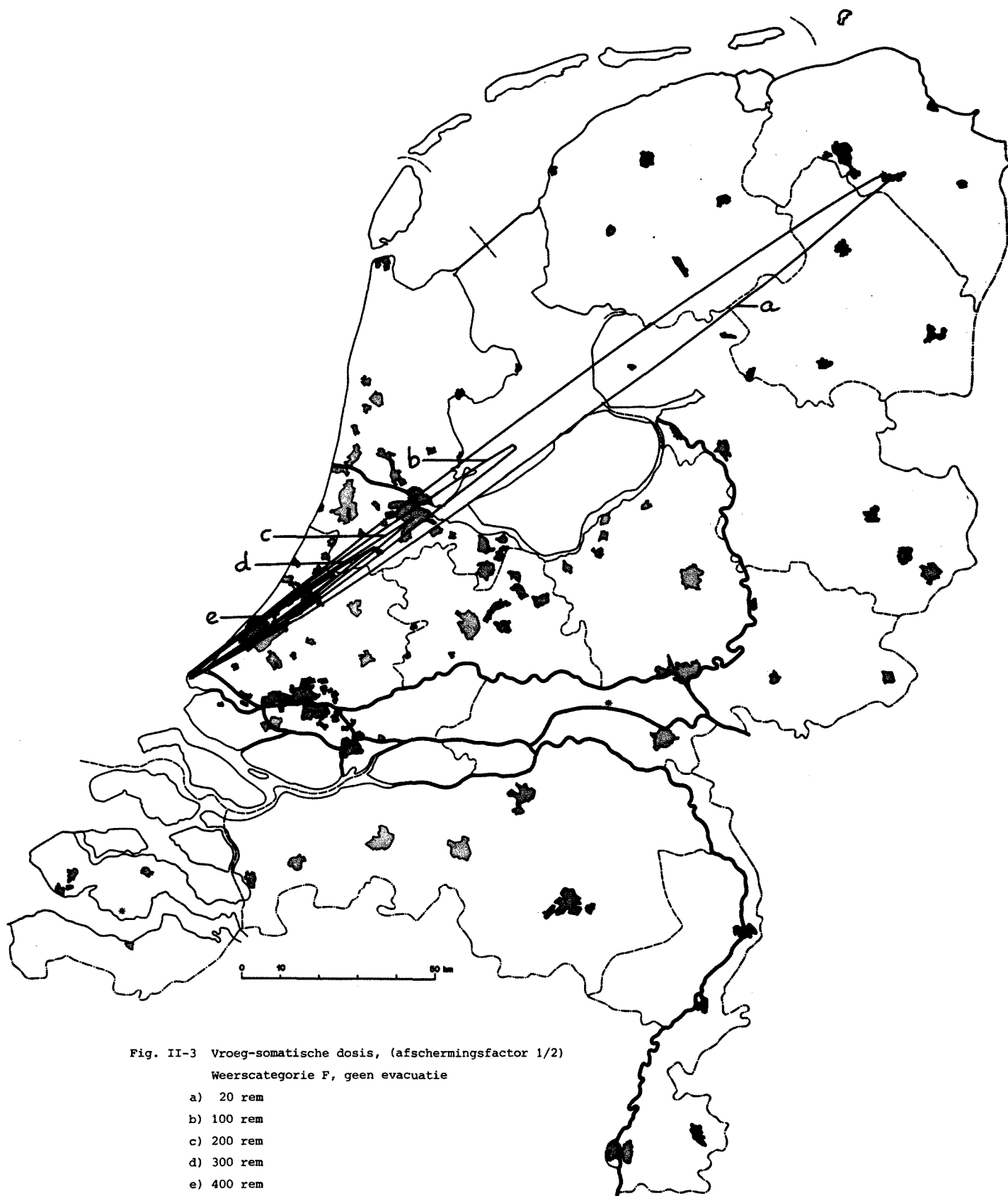
Het directe dodental bedraagt meer dan 350000, het aantal mensen met ernstige stralingsziekten dat wel op korte termijn overleeft ligt in de orde van 180000. Een ongeveer even groot aantal vertoont verschijnselen van lichte stralingsziekte. Het totaal aantal mensen dat op korte termijn sterft of direct in meer of mindere mate in zijn gezondheid wordt aangetast ligt blijkens de tabel in de orde van 1 miljoen mensen.

2.2.1.2 Geen evacuatie, wel afscherming

M.b.t. afscherming van radioactieve straling moet men onderscheid maken tussen de verschillende vormen van blootstelling n.l. uitwendige bestraling door verblijf in een radioactieve wolk, uitwendige bestraling door verblijf in, door neerslag van radioactief materiaal, besmet gebied en inwendige bestraling door inademing van radioactief materiaal. Afscherming van uitwendige bestraling wordt o.a. verkregen door verblijf in gebouwen. De mate van afscherming zal sterk afhangen van het materiaal van de muren, de grootte van het gebouw en de plaats waar men zich in het gebouw bevindt. In een kelder zal men veel sterker afgeschermd worden dan dichtbij ramen en deuren. De afschermingsfactor voor de uitwendige γ -straling van de radioactieve wolk is voor vele huizen ongeveer 0.4 à 0.7. Voor auto's is deze 1 (d.w.z. geen afscherming). De afscherming van straling van radioactieve neerslag op de grond is voor een normaal ruw oppervlak 0.7 in vergelijking met een volkomen effen oppervlak¹⁶⁾. Voor huizen varieert deze factor van 0.04 tot 0.5.

De afscherming tegen inademing van radioactief materiaal en daarmee tegen inwendige bestraling, door verblijf binnenshuis zal sterk afhangen van de omvang en wijze van ventilatie in huis en de tijdsduur van overdrijven van de radioactieve wolk. Bij redelijk sterke ventilatie en een passagetijd van meer dan een half uur zou deze afschermingsfactor 0.5 à 0.9 bedragen¹⁷⁾. De afscherming kan echter weer teniet gedaan worden doordat in een huis de radioactieve atmosfeer langer blijft hangen dan buiten, zodat men bij verblijf in huis langduriger radioactieve stoffen inademt. Hierdoor kan een inwendige dosis zelfs groter worden dan bij verblijf buitenshuis. Een effectieve afscherming tegen een inwendige dosis kan slechts verkregen worden indien vlak voor het overdrijven van de radioactieve wolk ramen en deuren goed gesloten worden en er juist weer sterk geventileerd wordt na passage van deze wolk¹⁸⁾. Op een dergelijk gedrag van mensen mag echter, zeker onder de te verwachten chaotische omstandigheden, niet gerekend worden. Een afscherming tegen inademing van radioactief materiaal is dan ook niet aannemelijk.

Om enig inzicht te verkrijgen in het effect van afscherming op de omvang van het gebied waarin de bevolking dezelfde grenswaarde doses zou ontvangen als zonder afscherming, zijn in fig. II-3 deze gebieden aangegeven. Hierbij is met een afschermingsfactor 0.5 voor alle bovengenoemde vormen van bestraling gerekend. De doses die men in het open veld op de aangegeven grenzen zou krijgen (zonder afscherming) zijn dus 40, 200, 600 en 800 rem.



In tabel II-2 is voor de verschillende stralingsdoses het aantal mensen weergegeven dat hieraan naar schatting blootgesteld wordt.

Tabel II-2. Aantal slachtoffers bij weerscategorie F, geen evacuatie, afschermingsfactor 0.5.

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen
> 400	100% sterfte	130000
300-400	stralingsziekten, sterfte >50%	55000
200-300	stralingsziekten, sterfte < 50%	30000
100-200	lichte stralingsziekte	315000
20-100	bloedaantasting	300000

Door een algehele afscherming van een factor $\frac{1}{2}$ voor alle wijzen van stralingsbelasting en voor alle mensen zou het directe dodental wel gereduceerd worden, maar desondanks meer dan 170000 bedragen. Daarenboven zouden 45000 mensen aan ernstige en ruim 300000 aan lichte stralingsziekten lijden. Het direct aantal getroffen en is blijkens tabel II-2 ruim 800000.

Het introduceren van een algehele afschermingsfactor 0.5 zal vermoedelijk een overschatting geven van het effect van afscherming op de acute gezondheidseffecten. In de eerste plaats werkt deze afscherming, zoals we hierboven zagen, niet voor inademing. In de tweede plaats is het zoeken van afscherming slecht te combineren met pogingen tot evacuatie waarbij men juist onbeschermd is. In de derde plaats geldt de afscherming niet uniform voor iedereen: sommige mensen zullen mogelijk beter afgeschermd worden, anderen echter in het geheel niet. Bij een onafgeschermd dodelijke dosis van 400 rem zal bij een afscherming met een factor 0.5 in het ideale geval niemand een dodelijke dosis ontvangen (ieder krijgt de niet dodelijke dosis van 200 rem). Als echter bijvoorbeeld de helft van de bevolking sterker afgeschermd wordt en de andere helft in het geheel niet, zal de eerste geen dodelijke dosis krijgen maar de laatste groep wel.

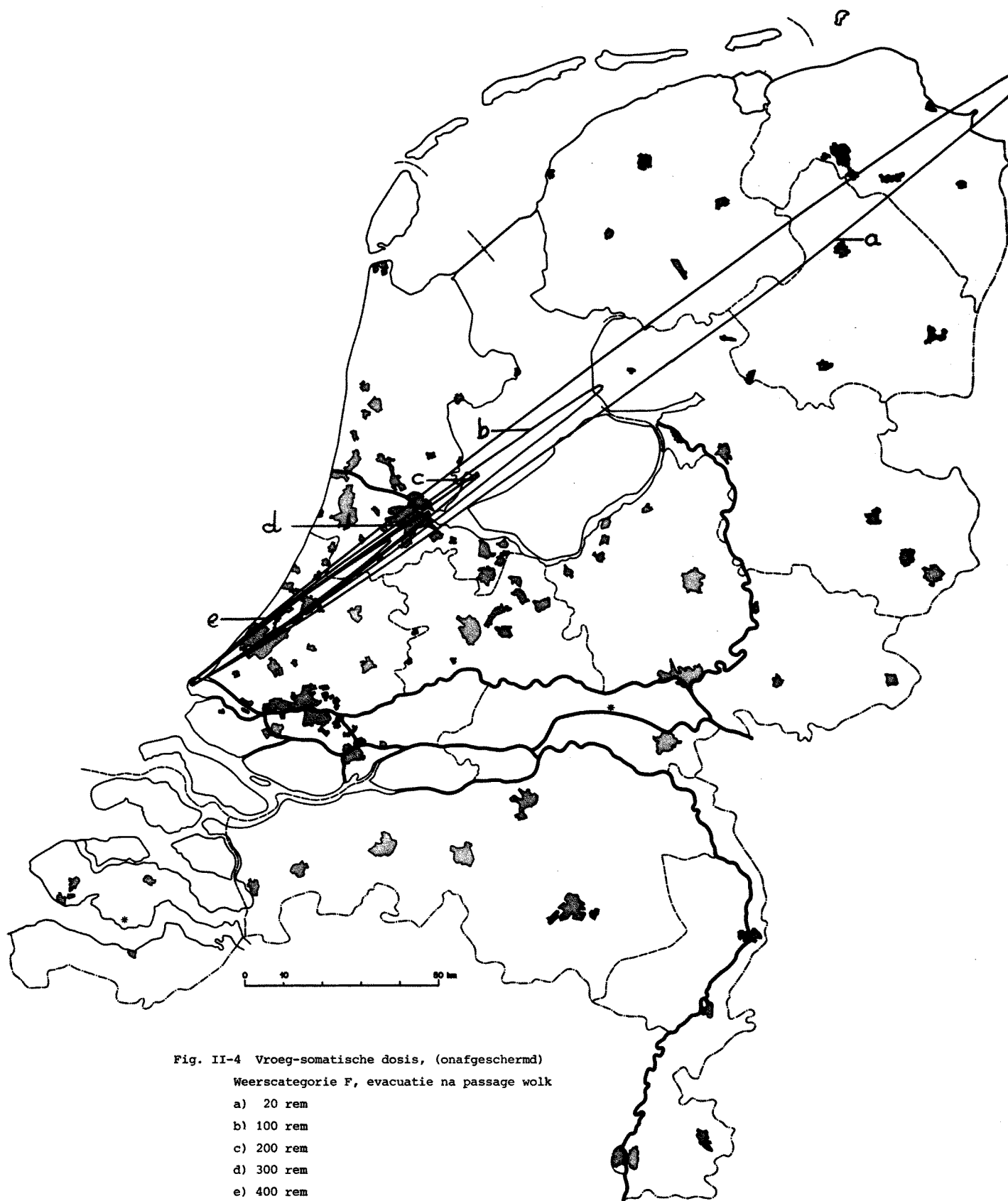


Fig. II-4 Vroeg-somatische dosis, (onafgeschermd)
Weerscategorie F, evacuatie na passage wolk
a) 20 rem
b) 100 rem
c) 200 rem
d) 300 rem
e) 400 rem

2.2.1.3 Evacuatie na passage van de wolk, geen afscherming

Indien evacuatiepogingen in zoverre wel succes zouden hebben dat men niet aan een uitwendige bestraling t.g.v. verblijf in besmet gebied blootstaat maar wel aan bestraling direct afkomstig van een overdrijvende wolk en inademing van radioactief materiaal uit deze wolk dan zullen de gebieden waar de bevolking aan hoge stralingsdoses blootstaat natuurlijk kleiner worden. De grenslijnen voor doses van 400, 300, 200, 100 en 20 rem, zonder afscherming, t.g.v. uitwendige γ -straling vanuit de wolk, interne bestraling van het gehele lichaam en interne bestraling van het beenmerg (de helft van de 30-daagse interne dosis van het bot) zijn weergegeven in fig. II-4.

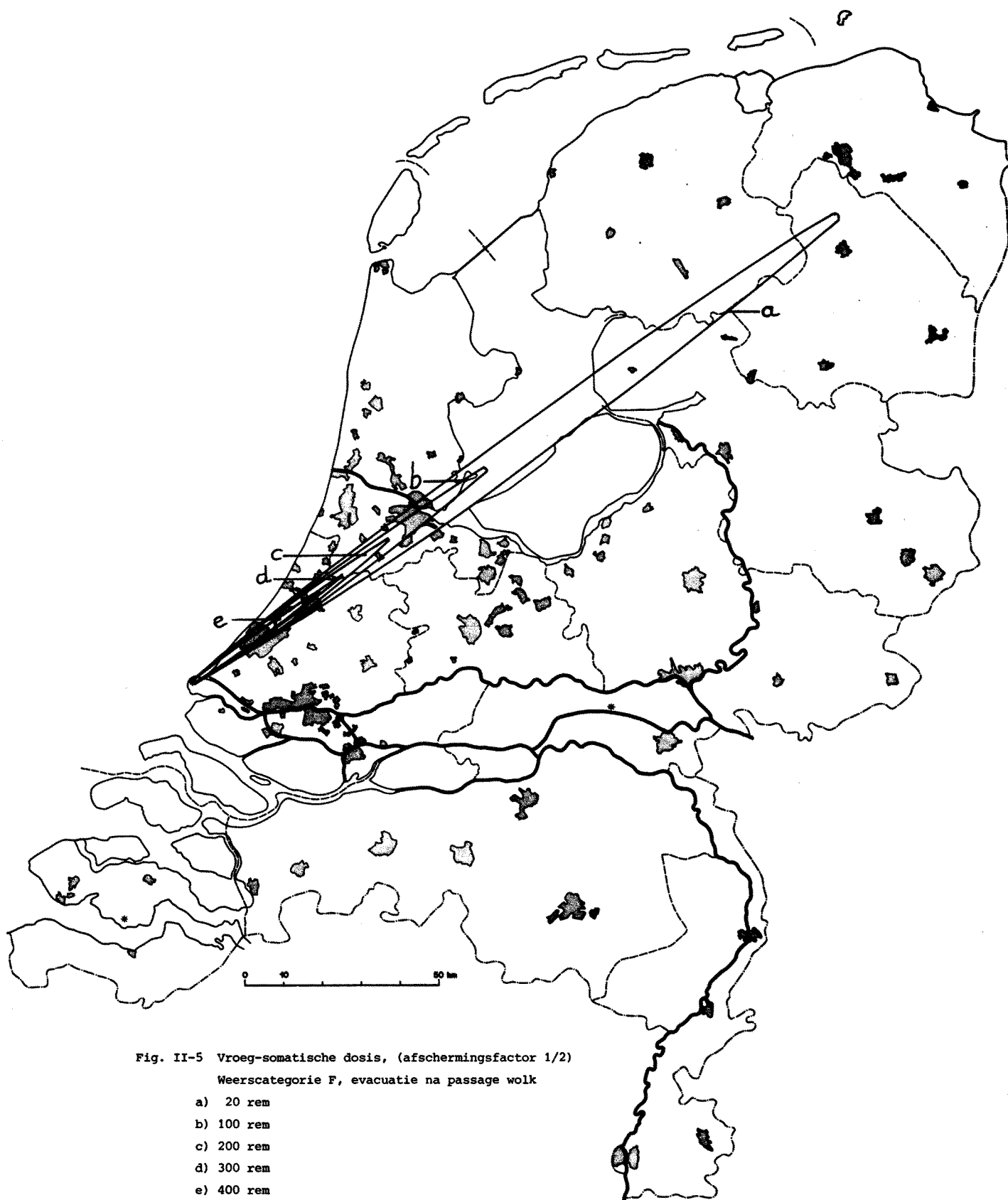
De invloed van evacuatie na het passeren van de wolk op het aantal slachtoffers blijkt uit tabel II-3.

Tabel II-3. Aantal slachtoffers, weerscategorie F, wel evacuatie, geen afscherming.

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen
>400	100% sterfte	200000
300-400	stralingsziekten, sterfte > 50%	75000
200-300	stralingsziekten, sterfte < 50%	160000
100-200	lichte stralingsziekten	230000
20-100	bloedaantasting	315000

Daar de 24 uren dosis t.g.v. verblijf in besmet gebied "slechts" 15 tot 20% is van de totale beenmergdosis zoals berekend onder 2.2.1.1, leidt dit slechts tot een relatief geringe verkleining van de gebieden met bovengenoemde grenzen.

Het dodental zal in dit geval zo'n 275000 bedragen. Het aantal gevallen van ernstige stralingsziekte ongeveer 175000. Het totale aantal mensen dat direct op een of andere wijze in zijn gezondheid wordt aangetast is hier ongeveer 1 miljoen.



Snelle evacuatie direct na passage van de radioactieve wolk leidt tot een relatief geringe vermindering van het aantal slachtoffers. Werkelijk effectief zou slechts een evacuatie vóór passage van de wolk zijn.

Door de nabijheid van de centrale tot de bevolkingscentra is de hiervoor beschikbare tijd slechts enkele uren. Gezien de grote bevolkingsdichtheid in de Randstad en het grote aantal mensen dat geëvacueerd moet worden lijkt dit een onhaalbare zaak.

2.2.1.4 Evacuatie na passage van de wolk, wel afscherming

Evenals in het voorgaande is nagegaan wat onder deze omstandigheden de invloed van afscherming is op de omvang van de gebieden waar de bevolking dezelfde dosis ontvangt als onder 2.2.1.3. Bij een afschermingsfactor van 0.5 zijn dit dus de gebieden waarvan de grenswaarden zonder afscherming twee maal zo hoog zijn. Dit is weergegeven in fig. II-5.

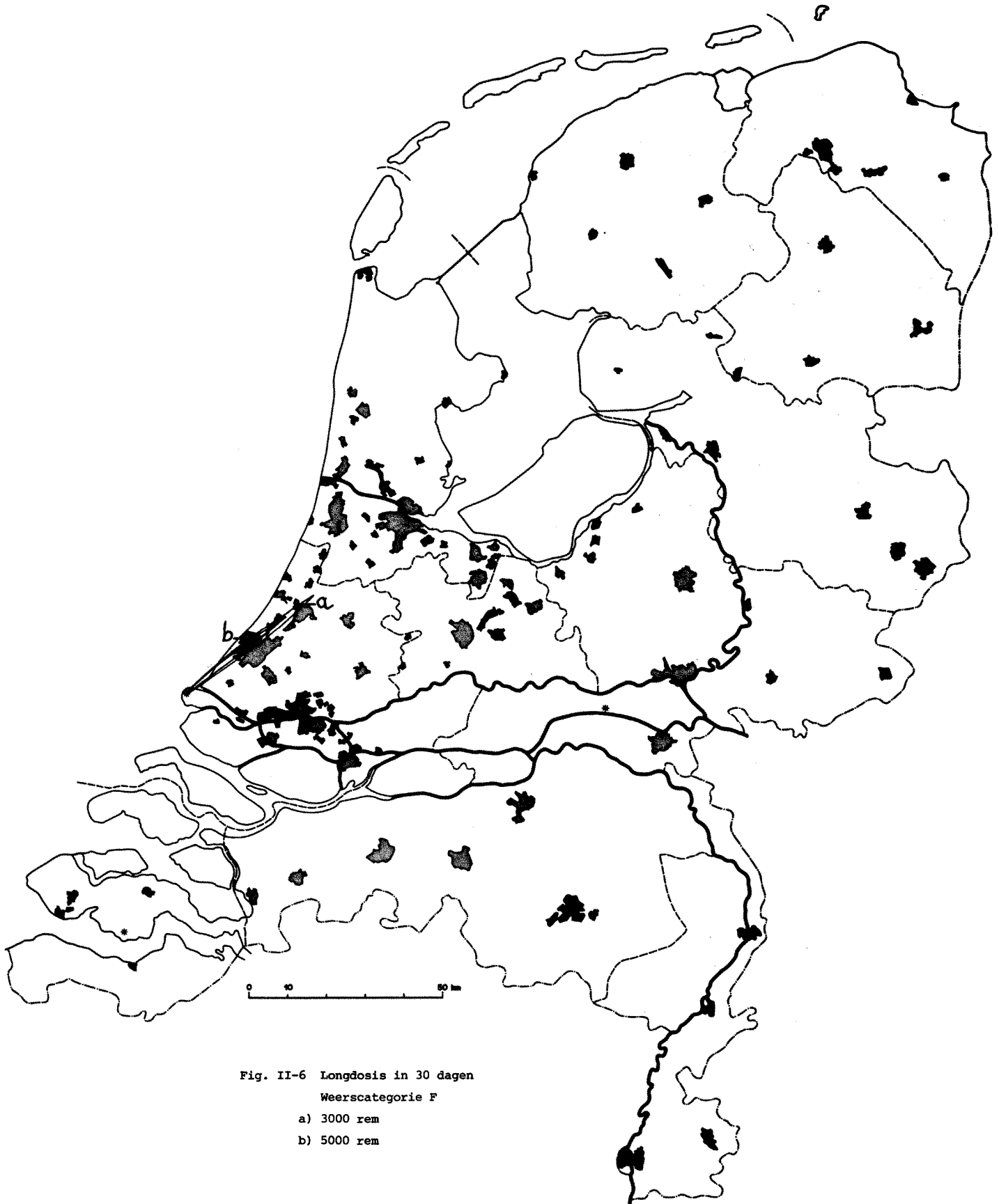
Het geschatte aantal getroffen en in de verschillende categorieën stralingsbelasting is weergegeven in tabel II-4.

Tabel II-4. Aantal slachtoffers, Weerscategorie F, wel evacuatie, afschermingsfactor $\frac{1}{2}$.

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen
>400	100% sterfte	90000
300-400	stralingsziekte, sterfte >50%	65000
200-300	stralingsziekte, sterfte <50%	45000
100-200	lichte stralingsziekte	235000
20-100	bloedaantasting	380000

Zelfs in het geval van onmiddellijke evacuatie na passage van de radioactieve wolk en een (onwaarschijnlijke) algehele afschermingsfactor $\frac{1}{2}$ is het sterftecijfer nog ongeveer 140000.

Het aantal ernstige stralingszieken dat in eerste instantie herstelt wordt geschat op 60000. Bovendien lijden 235000 mensen aan lichte stralingsziekten. Het totaal aantal in hun gezondheid getroffen en be- draagt blijkens tabel II-4 ruim 800000.



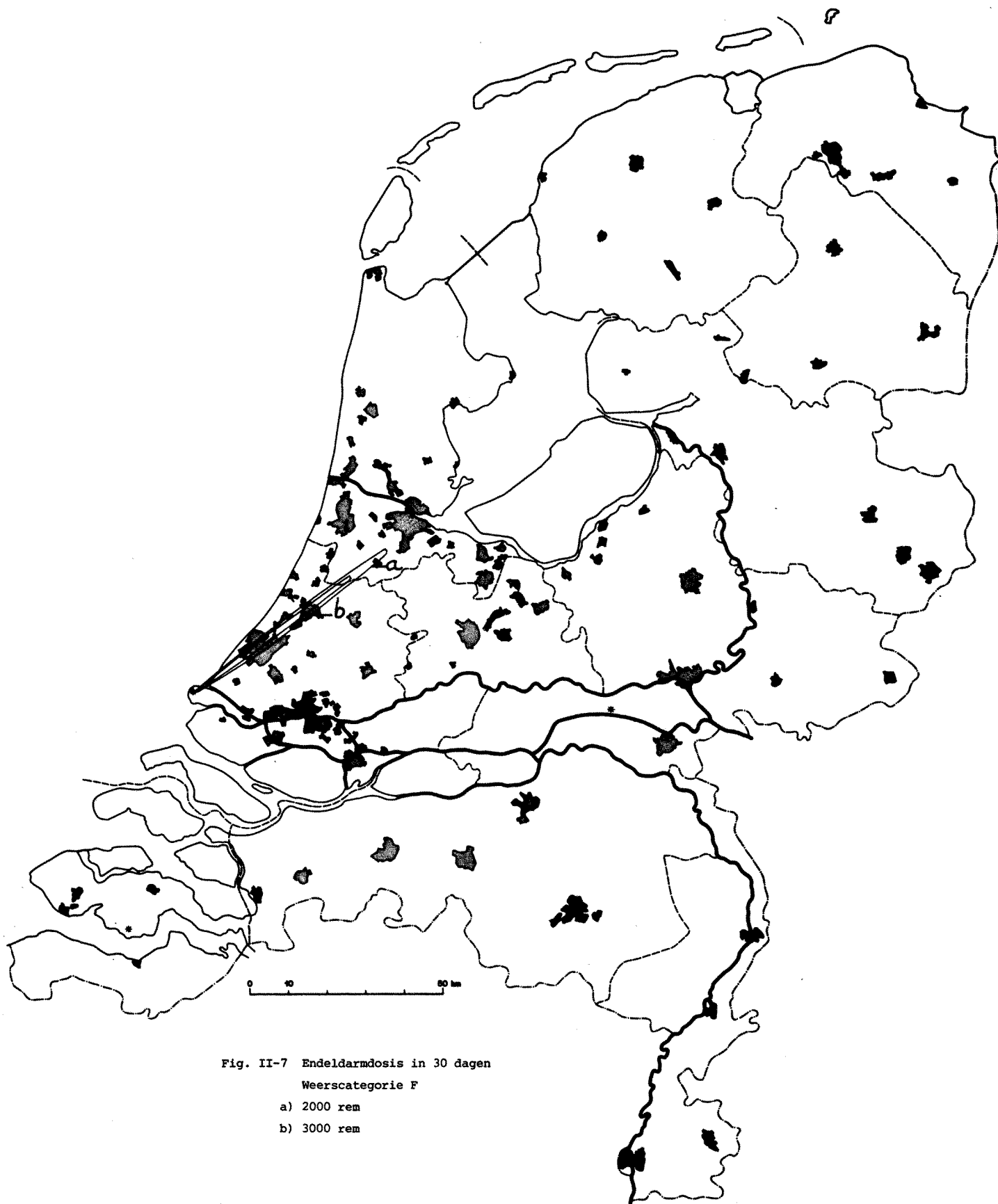


Fig. II-7 Endeldarmdosis in 30 dagen
Weerscategorie F
a) 2000 rem
b) 3000 rem

2.2.2 Longdosis

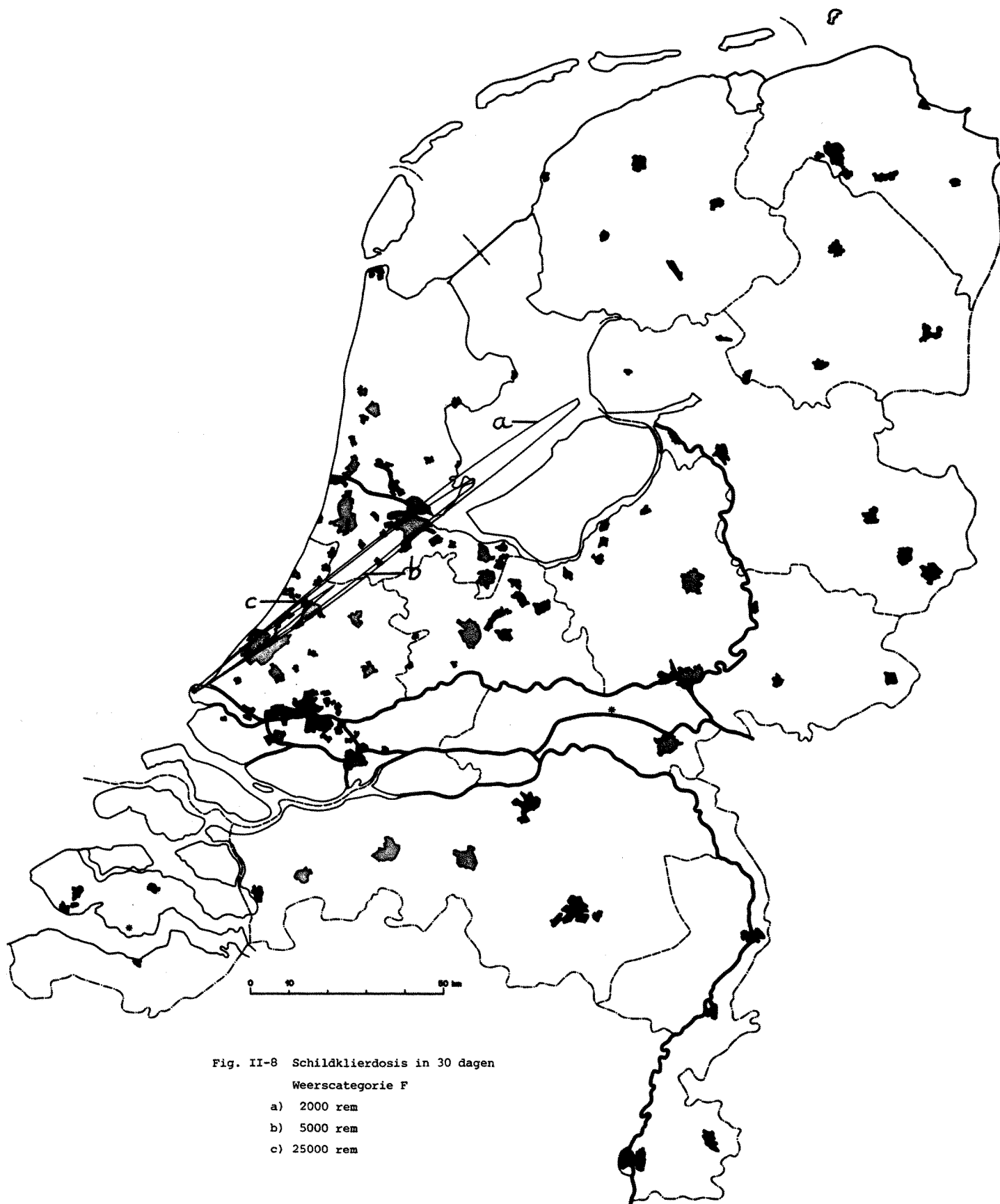
Veruit de belangrijkste bijdrage tot de stralingsbelasting van de longen wordt gevormd door afzetting in de longen van een deel van de onoplosbare radioactieve stoffen die ingeademd worden tijdens overdrijven van de radioactieve wolk. Zoals in 2.2.1.2 uiteengezet is een effectieve afscherming hiertegen zeer onwaarschijnlijk. In fig. II-6 zijn de gebieden aangegeven waarbinnen men een longdosis hoger dan 3000 en 5000 rem, gedurende 30 dagen na inademen oploopt. Uit vergelijking met fig. II-2 en II-3 blijkt dat, uitgaande van 100% sterfte boven 5000 rem en 0% beneden 3000 rem, sterfte door longbestraling alléén, ondergeschikt is aan sterfte door een hoge beenmergdosis. De belangrijkste invloed op sterfte zal dan ook, zoals aangegeven in 1.7 een effectieve verlaging van de dodelijke dosis t.g.v. andersoortige bestraling (beenmerg) zijn door synergetische versterking.

2.2.3 Maag-darmkanaal

Een gedeelte van het ingeademde radioactieve materiaal wordt vervolgens, o.a. na ophoesten, doorgeslikt waardoor het in het maag-darmkanaal terecht komt. Hiervan loopt de endeldarm veruit de grootste dosis op. In fig. II-7 zijn de grenzen aangegeven waarbij de endeldarm een dosis van 2000 en 3000 rem oploopt, de grenzen van 0 resp. 100% sterfte volgens de aannames van de Gezondheidsraad. Volgens dit criterium zijn de gebieden waar deze stralingsbelasting als doodsoorzaak kan optreden van dezelfde orde van grootte, maar wel enigszins kleiner dan die waar de beenmergdosis als doodsoorzaak optreedt (vgl. fig. II-2). Het belangrijkste effect zal dan ook, evenals bij de longdosis het geval is, een synergetische versterking van schadelijke gezondheidseffecten zijn.

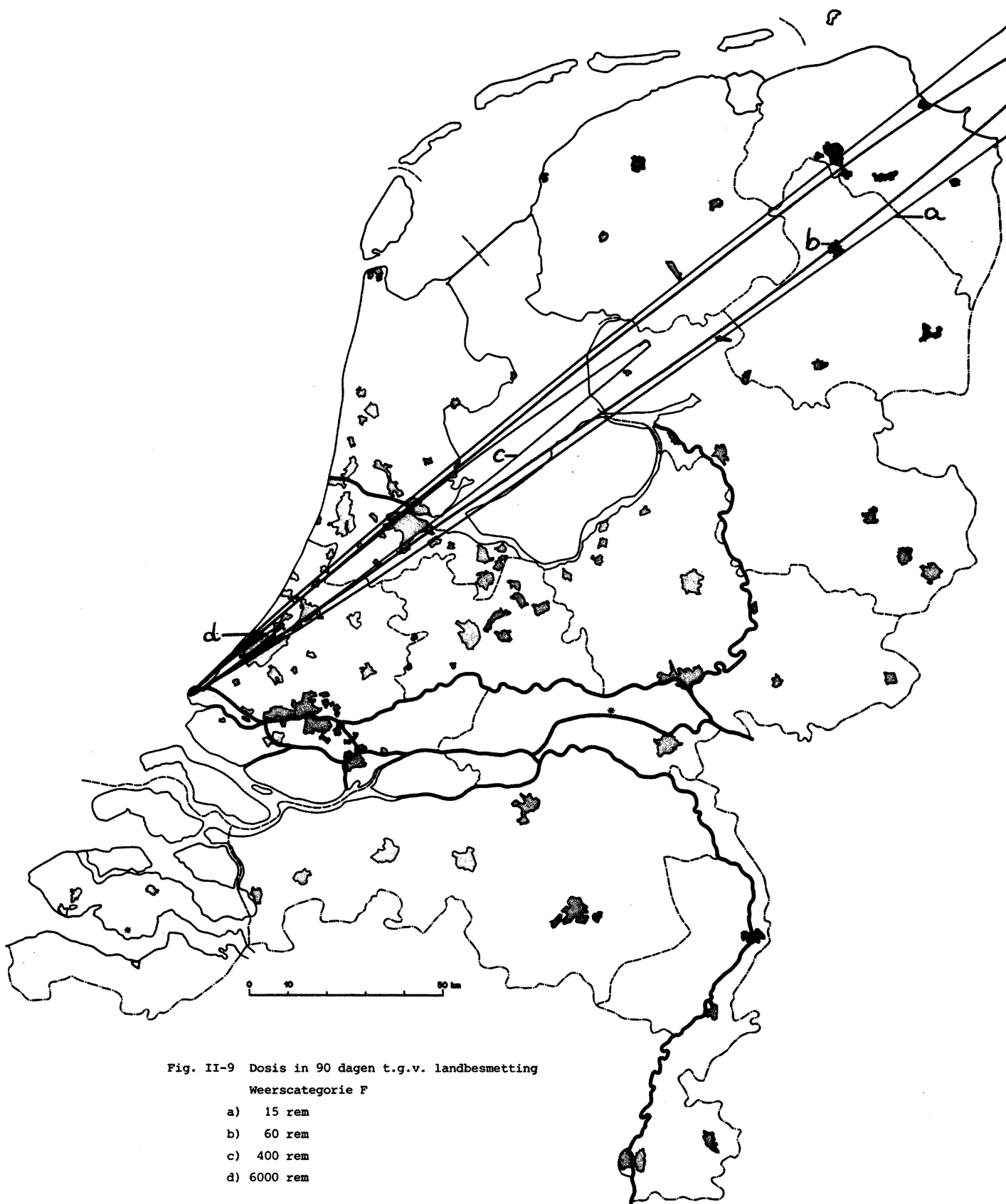
2.2.4 Schildklierdosis

In fig. II-8 zijn een aantal grenswaarden voor de 30 daagse schildklierdosis weergegeven. In 1.5 werden sterftecijfers van maximaal 21 per 100.000 bestraalde personen met een schildklierdosis boven de 25000 rem genoemd. Vergelijken we het betreffende gebied met de gebieden waar hoge sterfte door beenmergdoses optreedt dan is niet te verwachten dat de schildklierdosis op zich relatief in sterke mate bijdraagt tot het totale sterftecijfer.



2.2.5 Evacuatie

In eerste instantie zou getracht moeten worden om de bevolking te beschermen tegen de direkte straling ten gevolge van het passeren van de radioactieve wolk en de straling die men ontvangt door inademing tijdens verblijf in zo'n wolk. Dat betekent dat in elk geval de bevolking die hierdoor een dosis hoger dan 100 rem zou oplopen geëvacueerd zou moeten worden, voordat de radioactieve wolk ter plaatse arriveert, d.w.z. binnen een tijd van enkele uren. In dicht bevolkte, sterk verstedelijkte gebieden zoals de Randstad Holland lijkt dit een onhaalbare zaak, zodat er, zelfs bij evacuatiepogingen, een groot aantal slachtoffers zullen vallen. Terwijl pogingen tot evacuatie binnen enkele uren waarschijnlijk zullen mislukken of hoogstens gedeeltelijk zullen slagen, houdt dit niet in dat na deze eerste pogingen de noodzaak tot verdere evacuatie verdwenen is. Door neerslag van radioactief materiaal is een groot deel van het land waar de radioactieve wolk over heen gedreven is radioactief besmet geworden. Verblijf in dit gebied heeft tot gevolg dat men aan uitwendige radioactieve bestraling blootgesteld blijft. Om een verdere vergroting van het aantal slachtoffers te beperken zal daarom de noodzaak tot evacuatie, zelfs van een veel groter gebied dan waar de directe slachtoffers gevallen zijn, blijven bestaan. Welke gebieden op korte termijn geëvacueerd dienen te worden hangt natuurlijk af van de normen die men hanteert. De noodreferentienivo's die de Gezondheidsraad noemt, zijn 5 rem voor zwangere vrouwen en kinderen beneden 16 jaar en 15 rem voor overige personen. Deze noodreferentienivo's zijn de maximale doses die men in ongevalssituaties zou mogen oplopen. De Rasmussenstudie geeft als noodreferentienivo 10 rem totale lichaamsbestraling in 30 jaar, in dun bevolkte gebieden, en 25 rem voor stedelijke gebieden (een hogere dosis i.v.m. de grotere "lasten" van evacuatie). In fig. II-9 zijn een aantal grenswaarden aangegeven voor de totale lichaamsdosis die men zou oplopen tijdens verblijf van 3 maanden in deze gebieden, direct na besmetting. Hierbij is dus niet inbegrepen de dosis die men krijgt doordat men rechtstreeks blootgesteld is aan de overdrijvende radioactieve wolk (zie fig. II-4 en II-5). De aangegeven waarden zijn die welke men oploopt zonder afscherming. De grens van 15 rem (onafgeschermd dose) is bij een afschermingsfactor $1/3$ dus de grens voor kinderen en zwangere vrouwen indien we de noodreferentienivo's van de Gezondheidsraad zouden hanteren. De dosis van 60 rem is, bij een afschermingsfactor $1/3$, ongeveer de grenswaarde corresponderend met het noodreferentienivo voor de rest van de bevolking. Zonder afscherming zou ongeveer dit



gebied geëvacueerd moeten worden om reeds lichte ziekteverschijnselen bij een deel van de bevolking te voorkomen. Naast deze grenzen zijn ter illustratie nog 2 zeer hoge grenswaarden aangegeven nl. doses van 400 en 6000 rem bij 3-maandelijks verblijf.

In het Nederlandse deel van het gebied waar men bij verblijf gedurende de eerste 3 maanden na besmetting een onafgeschermd stralingsdoses van 15 rem (en dus 5 rem bij een afschermingsfactor $1/3$) zou oplopen wonen ruim $1\frac{1}{2}$ miljoen mensen. Bij het inachtnemen van de door de Gezondheidsraad vermelde noodreferentienivo's dient de bevolking van dit gebied binnen één tot enkele dagen (afhankelijk van de afstand tot de centrale) geëvacueerd te worden. Verminderd met het dodental van 140000 à 350000 (naar gelang de effectiviteit van vroege evacuatie en van afscherming gedurende passage van de radioactieve wolk) gaat het om 1.1 à 1.4 miljoen mensen die elders ondergebracht dienen te worden (waarvan in de orde van een tot enkele honderdduizenden in ziekenhuizen).

Het hierboven gehanteerde noodreferentienivo van 5 rem heeft betrekking op kinderen en zwangere vrouwen. Wil men bij evacuatie onderscheid maken tussen deze en andere leden van de bevolking dan ligt het getal van de te evacueren bevolking enkele honderdduizenden lager. (Het bevolkingsaantal in het gebied met een afgeschermd dosis groter dan 20 rem is 1.1 miljoen.) Het verandert in feite weinig aan het onvoorstelbare probleem waarvoor de Nederlandse samenleving gesteld wordt.

Door radioactief verval zal de stralingsintensiteit (langzaam) afnemen. Of, en zo ja wanneer, geëvacueerde mensen weer zouden kunnen terugkeren naar hun woonplaatsen zal in een volgend hoofdstuk worden besproken waar uitvoeriger op de lange termijn effecten t.a.v. bewoonbaarheid wordt ingegaan.

2.3 Weerscategorie D

Deze weerscategorie wordt gekarakteriseerd door minder stabiel weer dan de in het voorgaande besproken categorie F. Er vindt een sterkere en snellere verspreiding van radioactiviteit in richtingen loodrecht op de windrichting (zowel in horizontale als verticale richting) plaats, waardoor langs de as in de windrichting een sterke verdunning optreedt. De windsnelheid die in dit scenario is aangehouden is 5 m/sec (18 km/uur). Er zal nog onderscheid gemaakt worden tussen een situatie met en zonder regen.

2.3.1 Beenmergdosis

2.3.1.1 Geen evacuatie, geen afscherming

In fig. II-10 en II-11 zijn voor resp. een situatie zonder en met regen, de beenmergdoses weergegeven die men zou oplopen t.g.v. uitwendige bestraling door verblijf in de overdrijvende radioactieve wolk, door inwendige bestraling t.g.v. inademing van radioactief materiaal (zie 1.2) en door verblijf gedurende 24 uur in door neerslag besmet gebied. Terwijl bij weerscategorie F, voor een deel van de bevolking, dodelijke doses tot op vele tientallen kilometers opgelopen kunnen worden is dit voor categorie D met regen, tot ruim 15 km en voor categorie D zonder regen tot enkele kilometers het geval. De oorzaak hiervan ligt, zoals eerder aangegeven, in de sterkere verticale en horizontale diffusie van radioactief materiaal tijdens de verspreiding.

Bij categorie D, droog weer treedt daardoor geen acute sterfte op. Het aantal gevallen van stralingsziekte bedraagt naar schatting 300, en dat leidt aan tijdelijke aantasting van het bloed 250000.

In geval van regen en zonder evacuatie binnen 24 uur, bedraagt het acute sterftecijfer naar schatting 50000. Daarnaast zijn er ongeveer 50000 gevallen van ernstige stralingsziekte, en 900000 gevallen van bloedaantasting of lichte stralingsziekte.

Deze resultaten zijn samengevat in tabel II-5.

Tabel II-5 Aantal slachtoffers, Weerscategorie D, geen evacuatie

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen	
		droog weer	regen
> 400	100% sterfte	-	25000
300-400	stralingsziekte, sterfte > 50%	} 300	25000
200-300	stralingsziekte, sterfte < 50%		50000
100-200	lichte stralingsziekte		200000
20-100	bloedaantasting	250000	700000

2.3.1.2 Evacuatie, geen afscherming

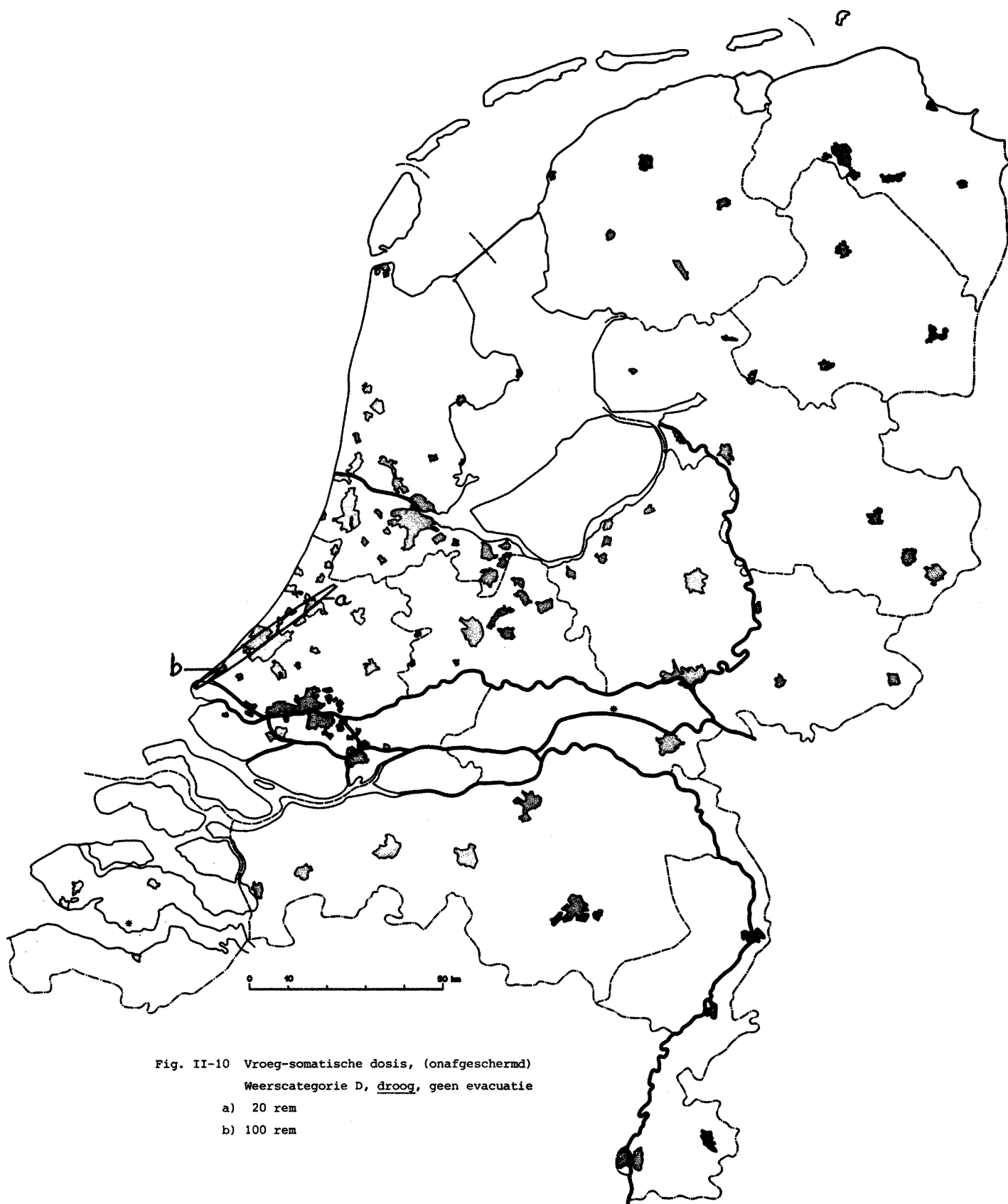
Het grote verschil in doses voor de situatie met en zonder regen wordt veroorzaakt door het verschil in neerslag van radioactief materiaal op het land en zit daardoor vooral opgesloten in de 24 uurs dosis t.g.v. verblijf op besmet grondgebied. In fig. II-12 en II-13 zijn de doses weergegeven die men zou oplopen indien men direct na passage van de radioactieve wolk geëvacueerd zou worden en daardoor deze landbesmettingsdosis ontloopt. Uit vergelijking met fig. II-10 en II-11 blijkt de belangrijke bijdrage die geleverd wordt door de besmetting t.g.v. uitregenen van radioactief materiaal.

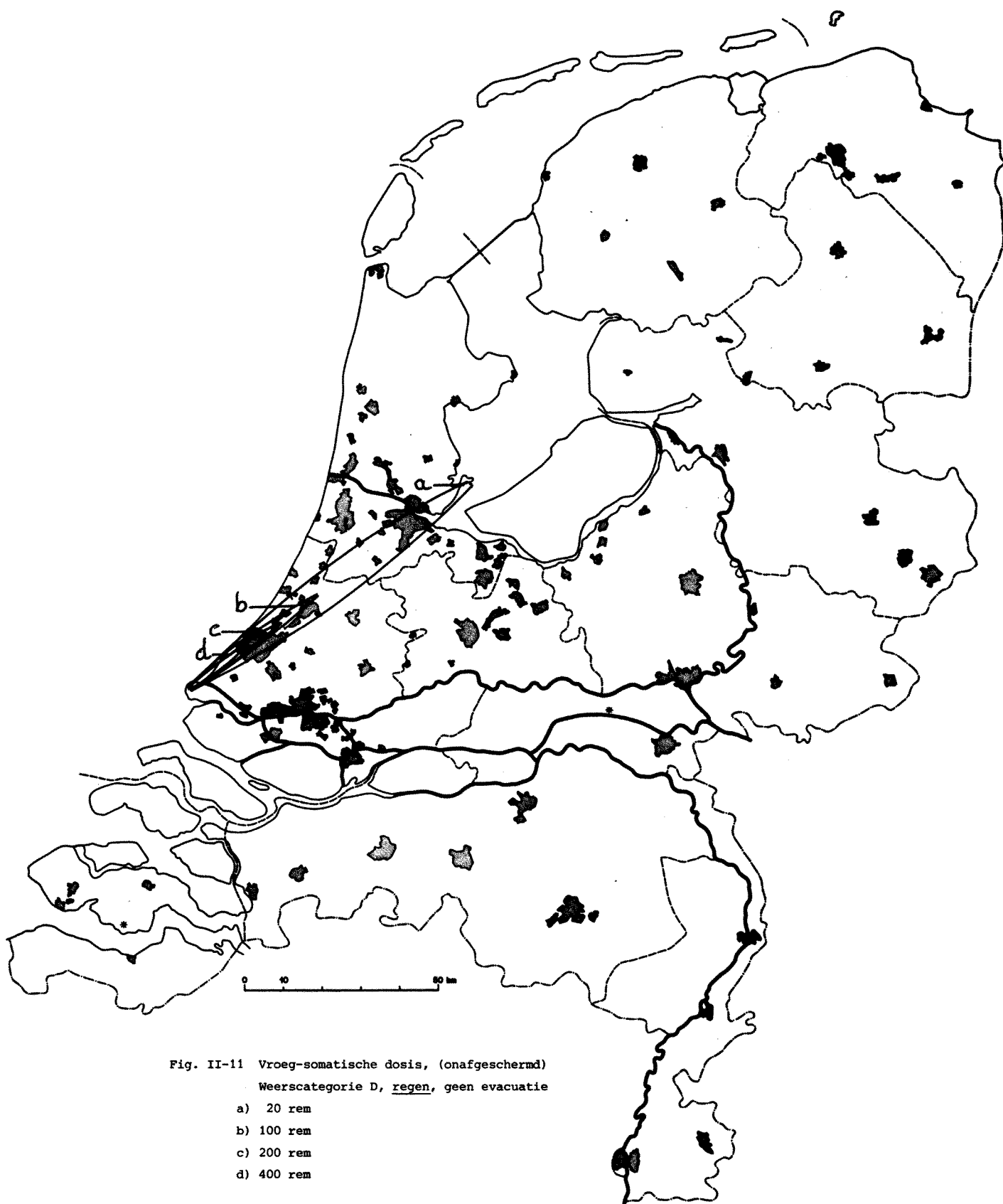
In de situatie met droog weer lijkt de directe evacuatie van mensen die zich binnen een afstand van 10 km in de windrichting bevinden, realiseerbaar, mogelijk ook nog tot op grotere afstand. In tabel II-6 is de stralingsbelasting gegeven als men alleen aan straling door verblijf in de radioactieve wolk blootstaat. Hierna zal, in verband met de lange termijn besmetting van het land, een veel groter evacuatieprogramma op gang moeten komen (zie 2.3.5).

In geval van regen zal een evacuatie ter voorkoming van acute slachtoffers veel urgenter zijn. Voorwaarde voor de uitvoerbaarheid van deze noodzakelijke evacuatie is dat men   de ernst van de situatie tijdig onderkent  n tijdig tot handelen overgaat  n te maken heeft met een rustig meewerkende bevolking. Deze voorwaarden maken een daadwerkelijke volledige evacuatie op korte termijn van een paar honderduizend al veel onwaarschijnlijker.

Tabel II-6 Aantal slachtoffers, Weerscategorie D, wel evacuatie

Dosis (rem)	effecten	aantal mensen	
		droog weer	regen
>400	100% sterfte	-	-
100-400	stralingsziekte	100	-
20-100	bloedaantasting	110000	30000





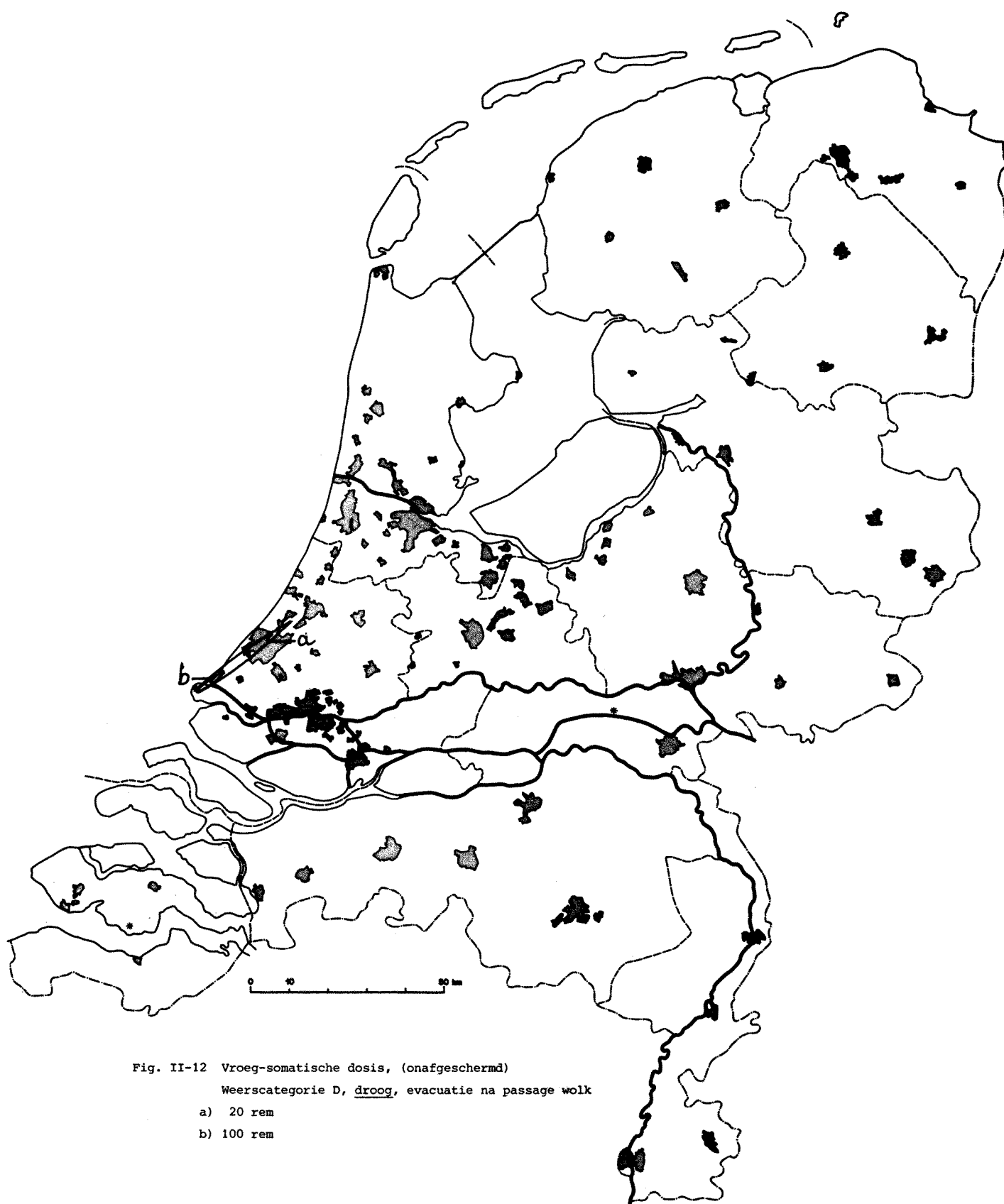
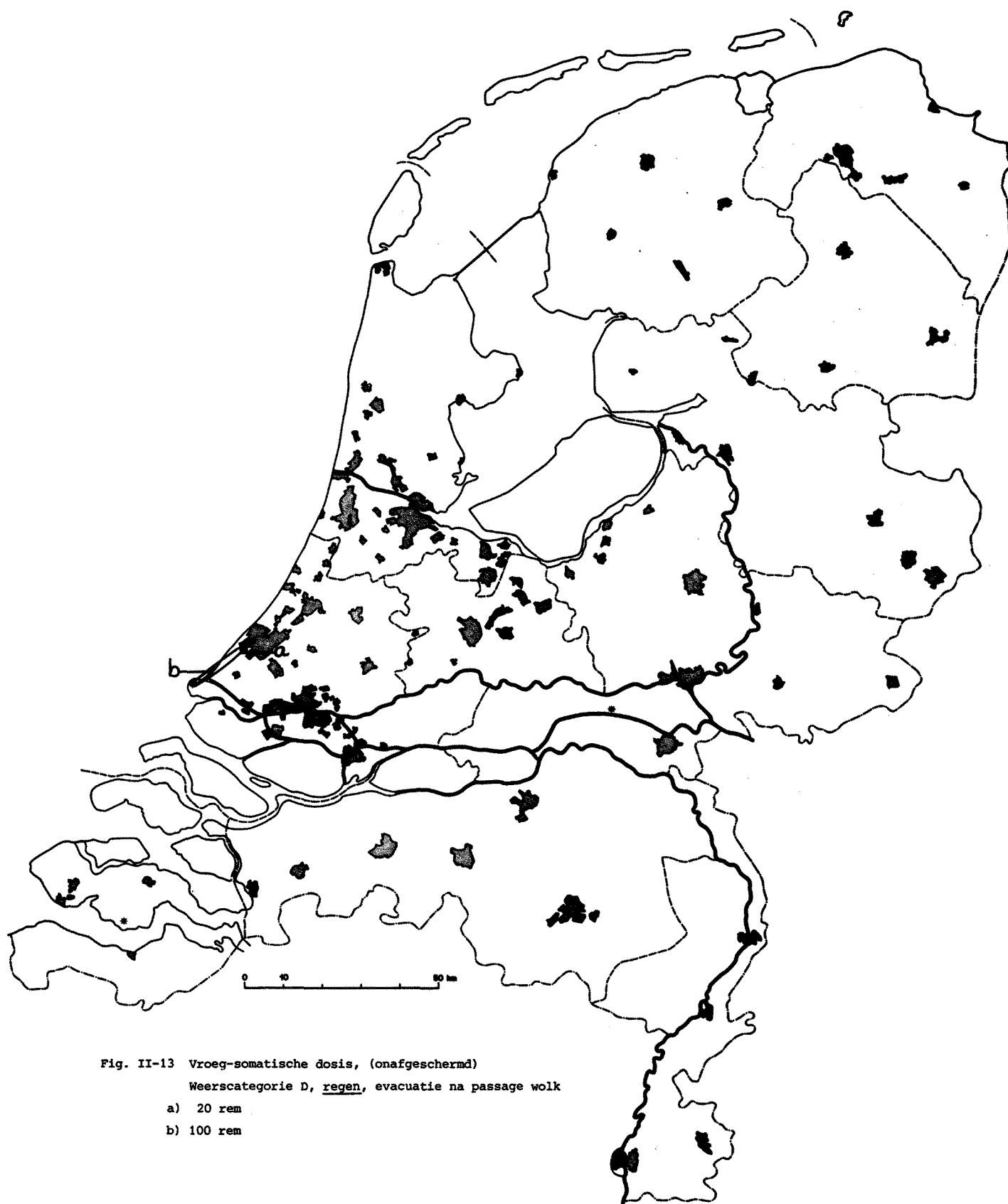
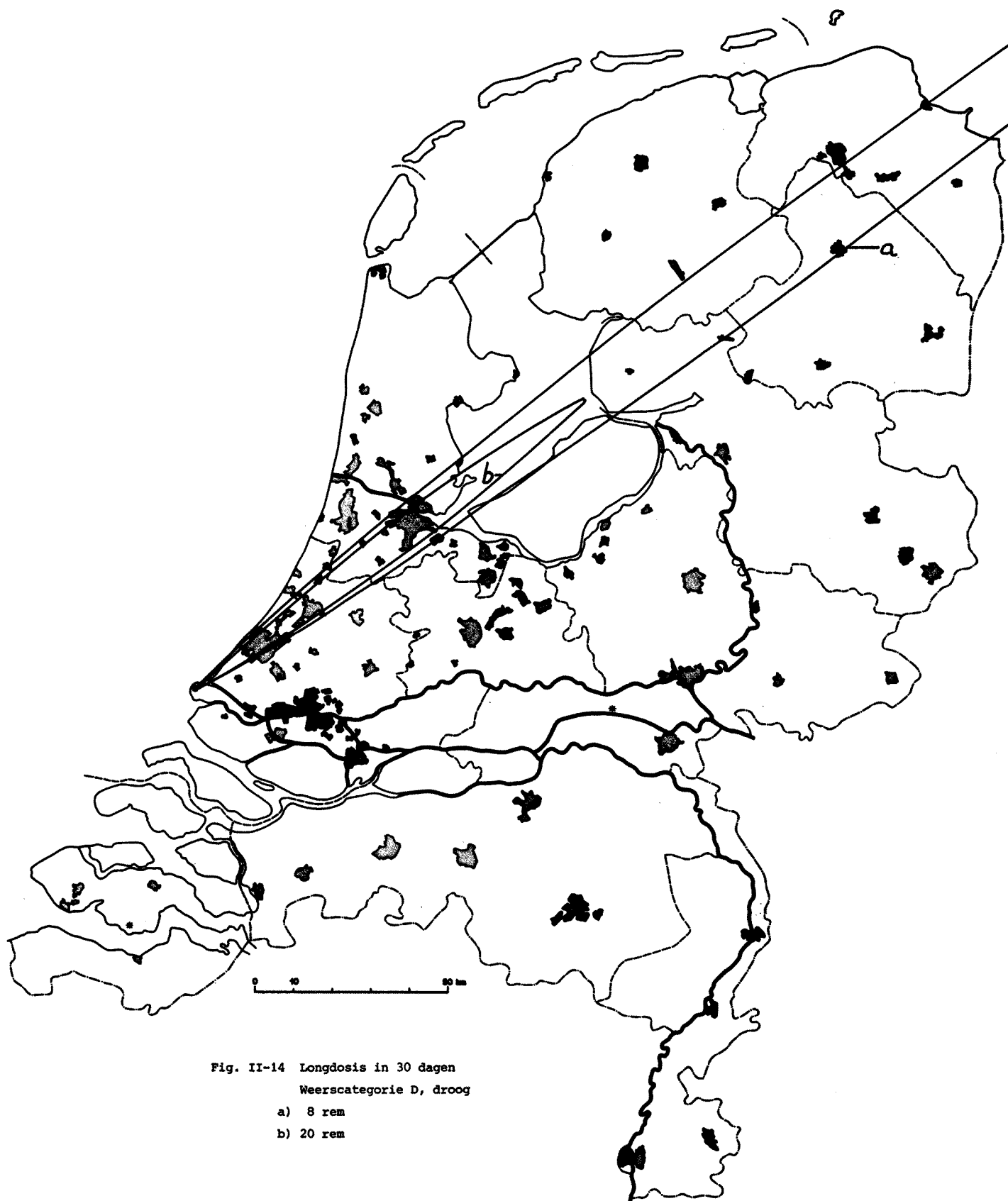


Fig. II-12 Vroeg-somatische dosis, (onafgeschermd)
Weerscategorie D, droog, evacuatie na passage wolk
a) 20 rem
b) 100 rem





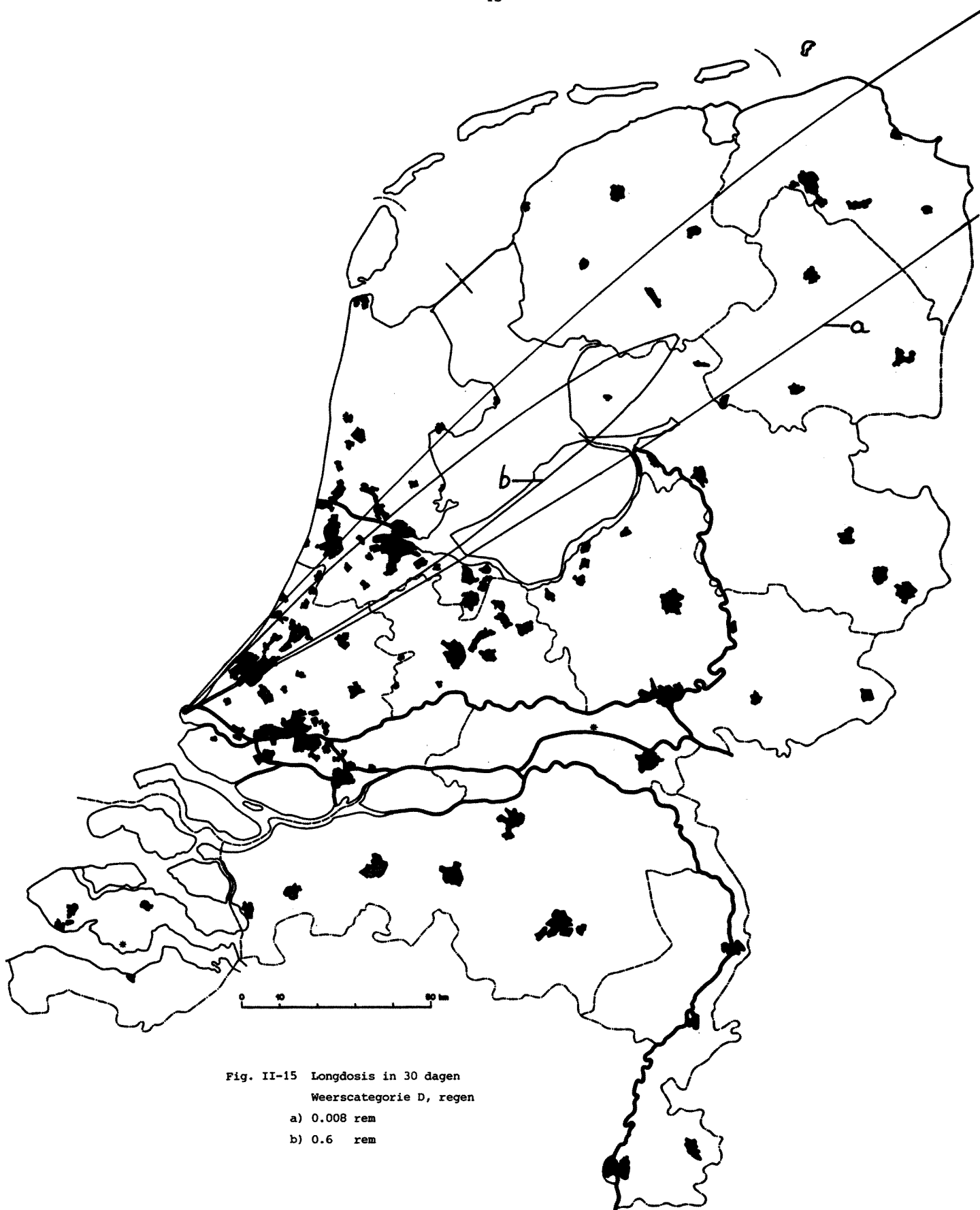


Fig. II-15 Longdosis in 30 dagen
Weerscategorie D, regen
a) 0.008 rem
b) 0.6 rem

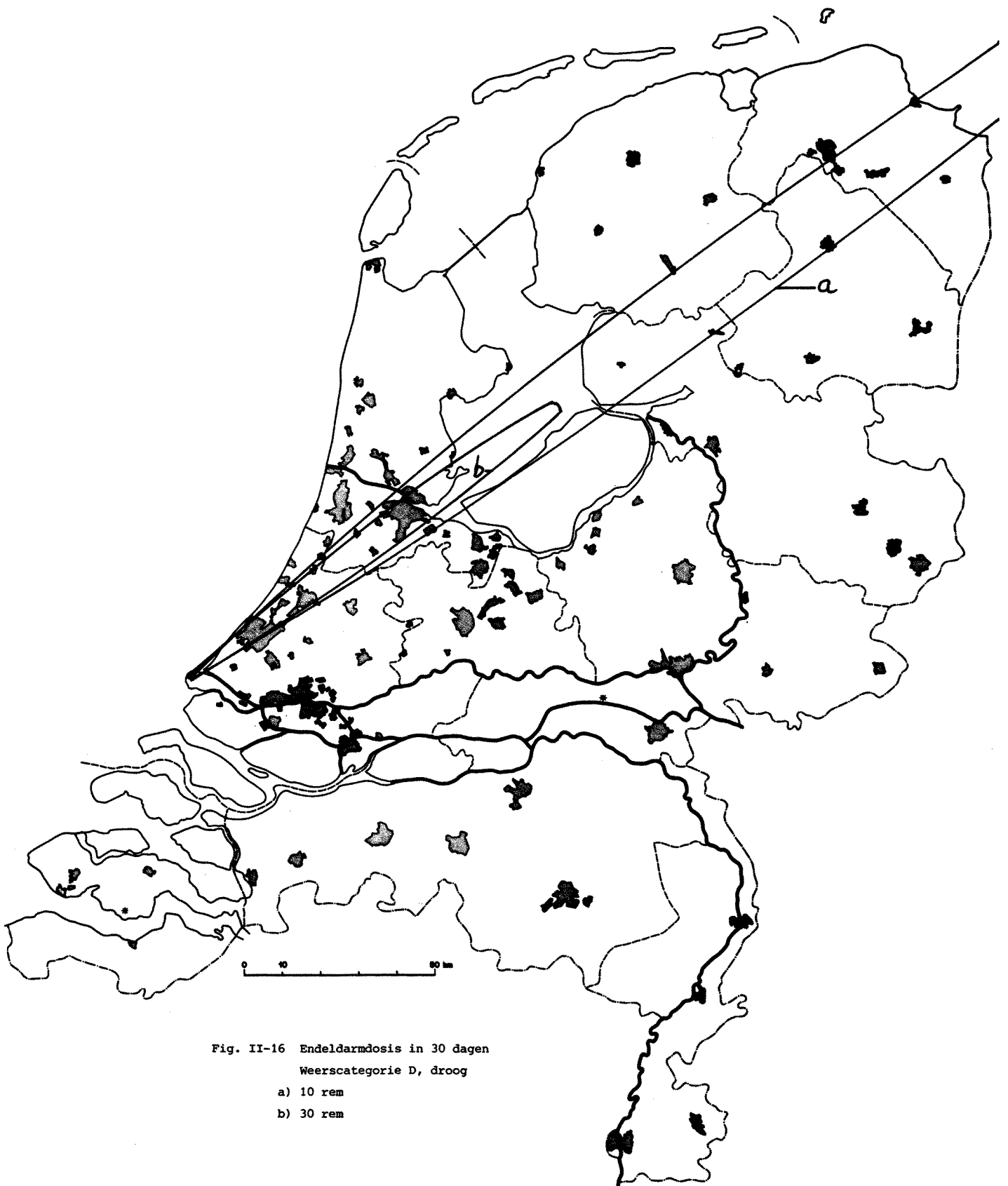


Fig. II-16 Endeldarmdosis in 30 dagen
Weerscategorie D, droog
a) 10 rem
b) 30 rem

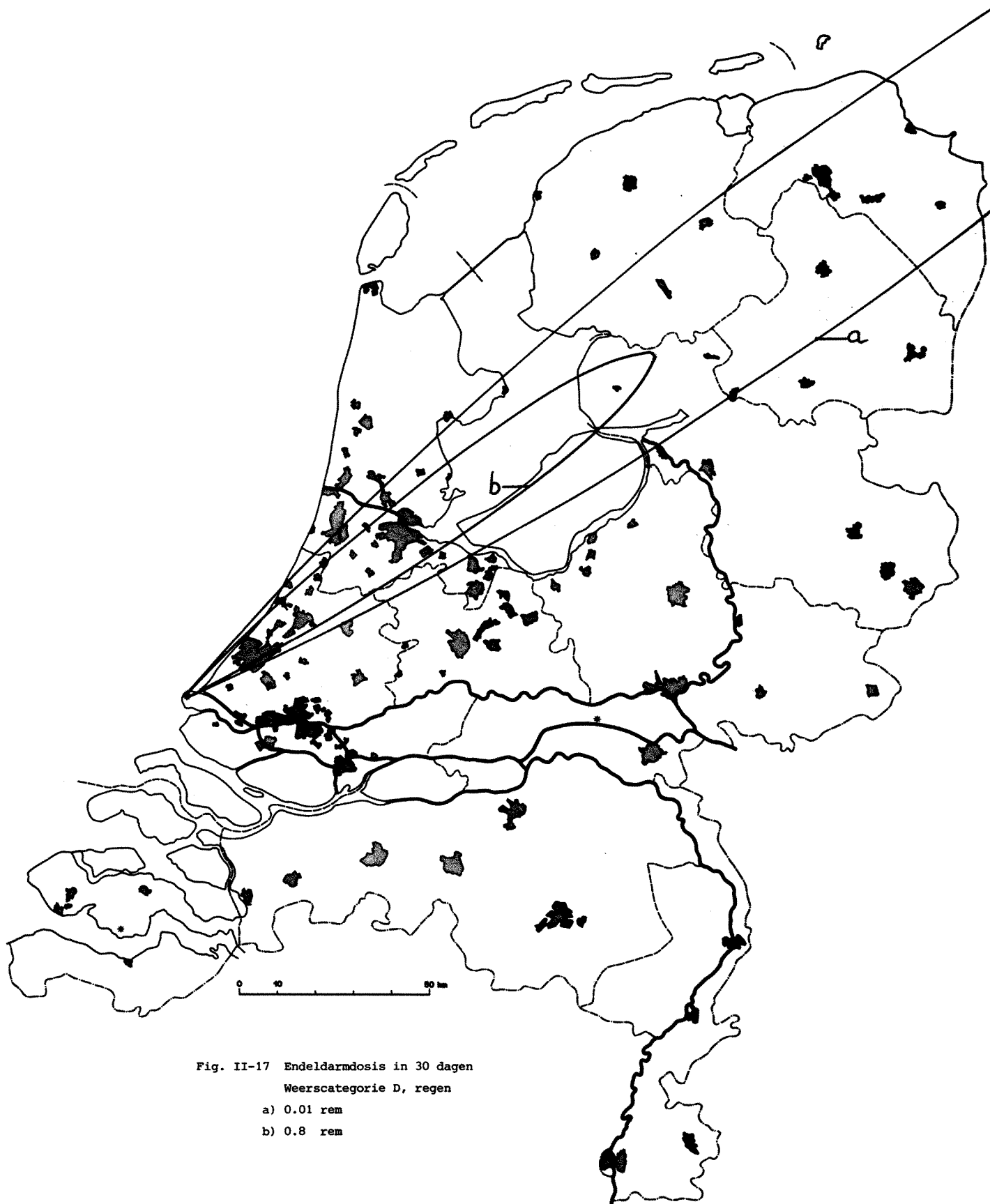


Fig. II-17 Endeldarndosis in 30 dagen

Weerscategorie D, regen

a) 0.01 rem

b) 0.8 rem

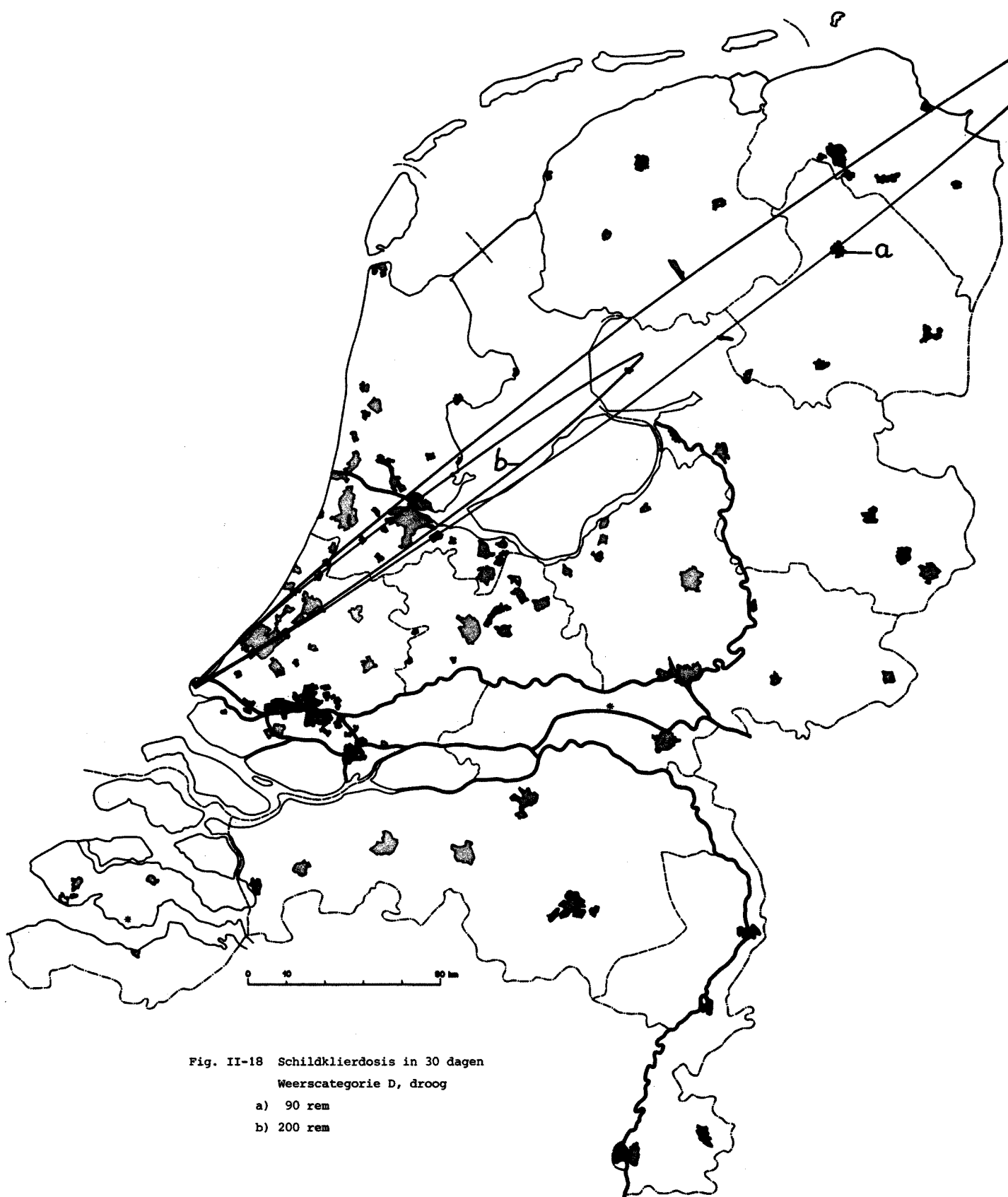


Fig. II-18 Schildklierdosis in 30 dagen
Weerscategorie D, droog

- a) 90 rem
- b) 200 rem

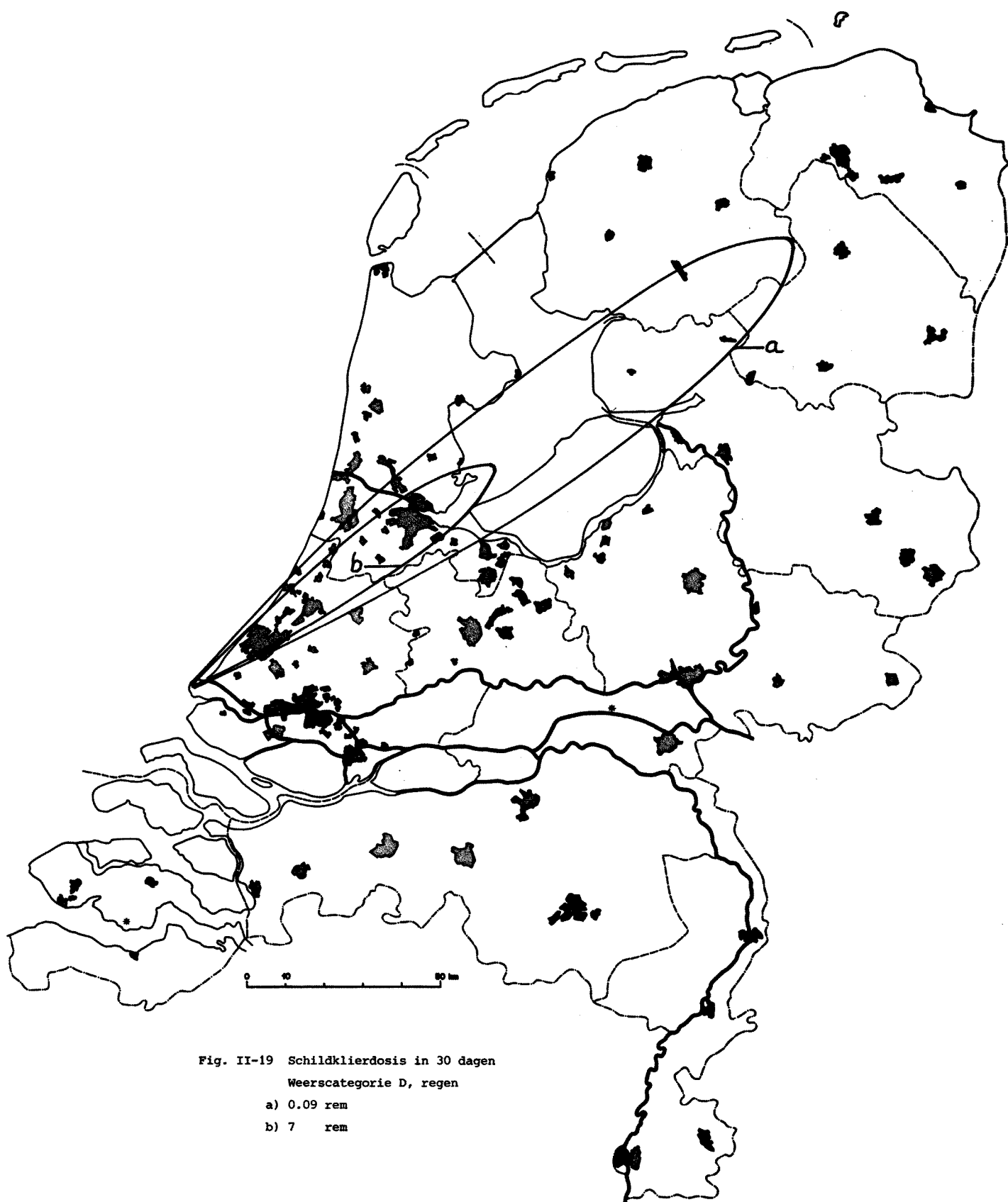


Fig. II-19 Schildklierdosis in 30 dagen
Weerscategorie D, regen
a) 0.09 rem
b) 7 rem

2.3.2 Longen

Ook wat betreft de longdosis strekt het gebied waar een dodelijke dosis opgelopen wordt zich niet verder uit dan tot op enkele kilometers. Dit valt binnen het gebied waar reeds sterfte optreedt door hoge beenmergdosis. Daarbij is het zo dat de dosis in geval van regen lager zal zijn dan zonder regen omdat meer radioactief materiaal uit de wolk neerslaat op het land en er dus minder in de atmosfeer aanwezig is. In fig. II-14 en II-15 zijn twee willekeurige grenzen weergegeven om het patroon van afname van de dosis te illustreren.

2.3.3 Maag-darm-kanaal

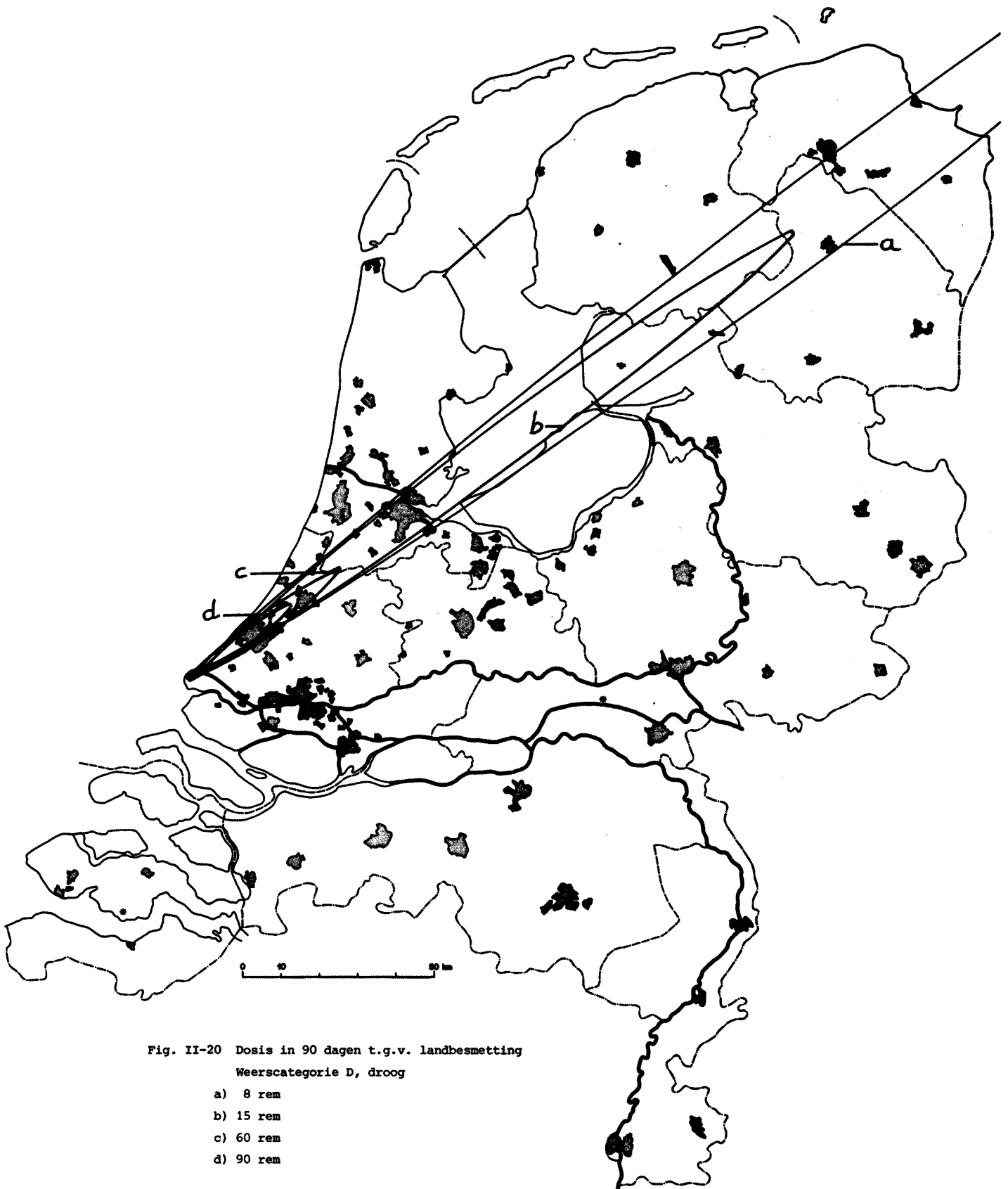
De endeldarm ontvangt weer de grootste dosis. De grens van 2000 rem, waarboven sterfte begint op te treden t.g.v. deze stralingsbelasting, ligt op enkele kilometers afstand van de centrale en valt binnen de grenzen waar reeds sterfte door een hoge beenmergdosis optreedt. In fig. II-16 en II-17 zijn enkele willekeurige grenzen aangegeven om de afname van de dosis met de afstand te illustreren.

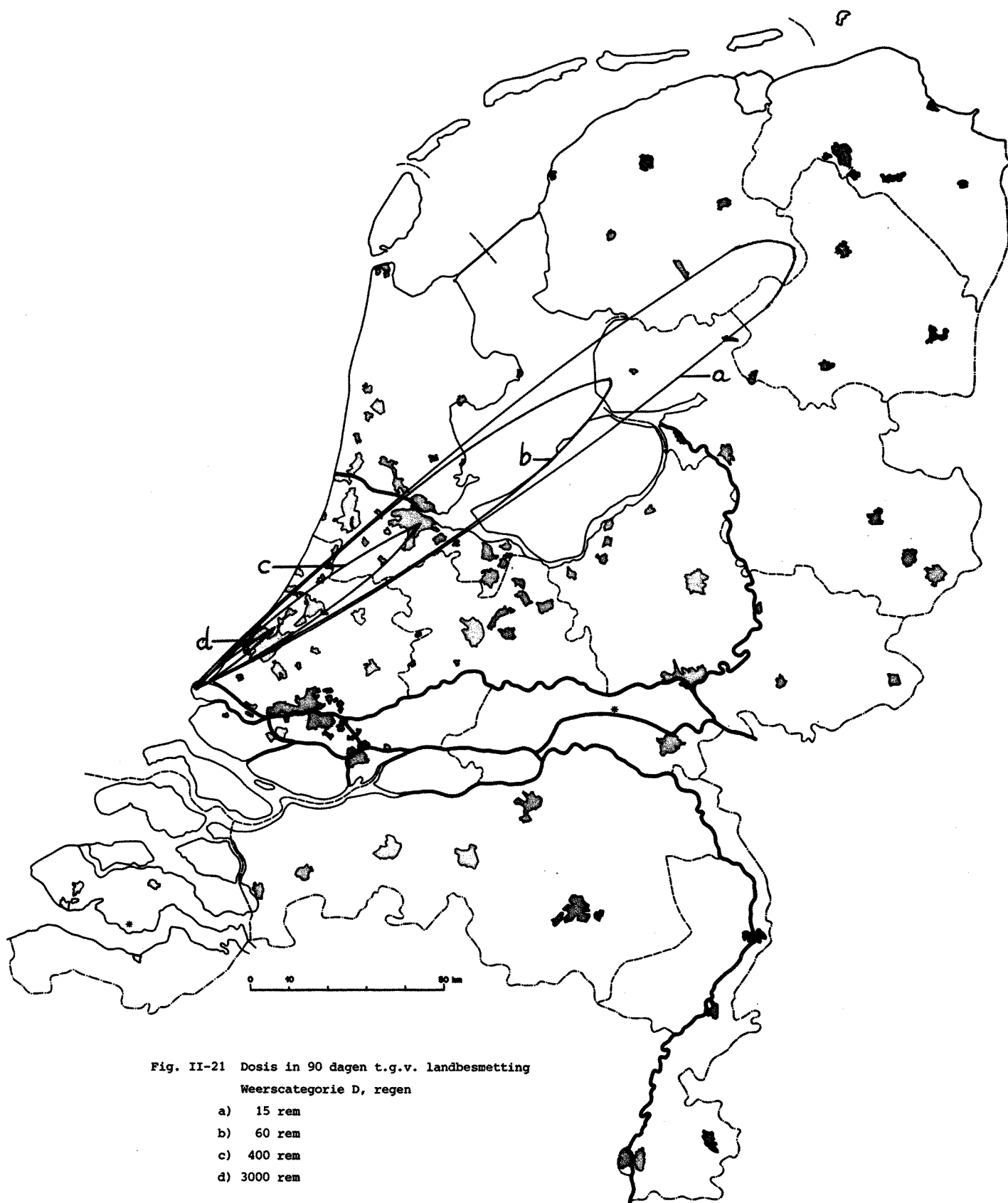
2.3.4 Schildklierdosis

In fig. II-18 en II-19 zijn een aantal grenswaarden weergegeven voor de in 30 dagen ontvangen schildklierdosis na inademing van radioactief materiaal uit de overdrijvende wolk. De grens van 25000 rem die voor een deel van de bevolking tot dodelijke gevolgen kan leiden strekt zich slechts uit tot enkele kilometers van de centrale en is niet weergegeven.

2.3.5 Evacuatie

Terwijl het direkte aantal slachtoffers bij weerscategorie D door blootstelling aan een overdrijvende radioactieve wolk aanzienlijk kleiner is dan onder weersomstandigheden van cat. F. en zal vallen binnen een tiental kilometers van de centrale, kan dit aantal nog sterk oplopen indien geen evacuatie uit, door neerslag besmet grondgebied, plaatsvindt. Met name zal dit het geval zijn bij zware besmetting tijdens regenval. Zelfs indien men er in slaagt binnen een aantal uren die gebieden te ontruimen, waar men een dosis zou oplopen die tot stralingsziekte en/of acute sterfte leidt, is hiermee de noodzakelijke evacuatie niet beëindigd. Integendeel, veel grotere gebieden moeten in de daarop volgende dagen ontruimd worden, om ziekte en overschrijding van stralingsnormen te voorkomen. In fig. II-20 en II-21 zijn een aantal grenswaarden aangegeven voor de doses die men





oploopt bij verblijf gedurende 3 maanden onmiddellijk na besmetting van het land. (Uitgezonderd de op de 1e dag opgelopen stralingsdosis.)

De grens van 15 rem geeft het gebied aan dat ontruimd moet worden opdat tengevolge van deze stralingsbron het door de Gezondheidsraad genoemde noodreferentienivo van 5 rem voor zwangere vrouwen en kinderen, bij een afschermingsfactor van $1/3$, niet overschreden wordt (zie ook 2.2.5).

Bij droog weer strekt dit gebied zich uit tot in Drente, en 1.2 miljoen mensen zijn hier woonachtig. Wil men bij evacuatie onderscheid maken tussen kinderen en zwangere vrouwen enerzijds en andere leden van de bevolking anderzijds, wat 'toegestane' stralingsdosis betreft (voor de laatste groep een noodreferentienivo van ongeveer 20 rem), dan lijkt het te ontruimen gebied voor de laatste groep aanzienlijk kleiner te zijn (bij een afschermingsfactor van $1/3$, gebied c in fig. II-20 omvattende 250000 personen). Dit is evenwel schijn want, zoals in hoofdstuk V blijkt, zal een veel groter gebied op grond van de huidige stralingsnormen voor vele jaren onbewoonbaar zijn.

Bij regen treedt een nog sterkere besmetting op. Het gebied waarin men gedurende 3 maanden een stralingsdosis, gelijk aan het noodreferentienivo van 5 rem oploopt (bij een afschermingsfactor $1/3$) strekt zich uit over een afstand van 190 km. Ontruiming hiervan betekent de evacuatie van 2 miljoen mensen, die elders ondergebracht moeten worden. Binnen het gebied met een stralingsdosis hoger dan 20 rem (bij een afschermingsfactor van $1/3$) wonen $1\frac{1}{2}$ miljoen mensen. De urgentie waarmee een zeer omvangrijk evacuatie programma moet worden uitgevoerd blijkt o.a. hieruit dat anders 600000 mensen, tot op een afstand van 70 km, binnen 3 maanden een stralingsdosis van meer dan 400 rem zouden oplopen.

Het belangrijkste verschil tussen de situaties met regen en zonder regen is dat met regen, op afstanden dichterbij de centrale, door een grotere neerslag, een veel hogere besmettingsgraad in een breder gebied ontstaat dan zonder regen het geval is. Als gevolg hiervan is op grotere afstand de besmettingsgraad in de situatie zonder regen groter (met natuurlijk lagere waarden dan dichtbij de centrale). Of en wanneer men in de ontruimde gebieden zou kunnen terugkeren, wordt in hoofdstuk V besproken.

2.4 Conclusies m.b.t. korte termijn gezondheidseffecten

Het aantal directe slachtoffers (doden en stralingszieken) is zeer sterk afhankelijk van de weersomstandigheden. In stabiele weersomstandigheden (cat. F) vindt slechts een geringe verspreiding van radioactief materiaal in horizontale en verticale richting loodrecht op de windrichting plaats. Daardoor is de concentratie langs de windrichtingsas groot en neemt deze slechts betrekkelijk langzaam met de afstand af. Zowel door deze hoge stralingsdosis en de grote omvang van het gebied waarin een dodelijke dosis opgelopen kan worden zal het aantal directe slachtoffers zeer groot zijn. Van pogingen tot evacuatie zal men in dit geval, in een stedelijk gebied als de Randstad Holland, geen sterke vermindering van het aantal slachtoffers mogen verwachten. Hoofdzakelijk niet vanwege de te verwachten chaotische toestanden die de evacuatie van vele honderdduizenden tot enkele miljoenen mensen in enkele uren tijds sterk zullen belemmeren. Dit wordt nog in de hand gewerkt doordat van te voren niet precies een grens is aan te geven welk gebied wel en welk niet ontruimd moet worden (denk aan windrichting schommelingen). Bovendien zullen door evacuatiepogingen, de mensen doordat ze zich dan buitenshuis bevinden, minder afgeschermd worden van de straling afkomstig van een overdrijvende radioactieve wolk. Ook na een eerste dag van (mislukte) evacuatiepogingen blijft de noodzaak van evacuatie in een groter gebied bestaan opdat het aantal slachtoffers niet nog verder oploopt t.g.v. verblijf in, door neerslag van radioactief materiaal, besmet gebied. De ontstane chaos met alle secundaire gevolgen is nauwelijks te beschrijven. We hebben ons in het voorgaande beperkt tot enkele karakteristieke hoofdtrekken. Secundaire, maar desalniettemin, zeer belangrijke aspecten zijn bijvoorbeeld de noodzaak van het bergen van zwaar radioactieve lijken uit zwaar besmette gebieden, zowel van mensen als van een onnoemelijk aantal omgekomen dieren, en het ontstaan van ziekten, nog gepaard gaand met een vermindering van weerstand tegen infecties, door opgelopen straling. Alleen de directe korte termijn effecten betekenen dus al een onvoorstelbare ramp.

De lange termijn gevolgen komen nog in volgende hoofdstukken ter sprake.

Onder minder stabiele weersomstandigheden als cat. D vindt een sterkere verspreiding van radioactief materiaal in horizontale en verticale richting loodrecht op de windrichting plaats wat leidt tot een geringere concentratie. Het gebied waarin men een dodelijke stralingsdosis t.g.v. een overdrijvende radioactieve wolk kan oplopen beperkt zich tot enkele kilometers. Doordat het onmiddellijk te evacueren gebied veel kleiner is dan bij weerscat. F zal deze evacuatie, mits op tijd onderkend en ingezet, een veel grotere kans van slagen hebben. Terwijl het directe aantal slachtoffers hierdoor in aanzien-

lijke mate beperkt zou kunnen blijven geldt voor cat. D dat de belangrijkste problemen hierna ontstaan n.l. de evacuatie van een veel groter radioactief besmet gebied. Gaat men uit van het noodreferentienivo van 15 rem (met een afschermingsfactor $1/3$ is dit het gebied met een dosis hoger dan het noodreferentienivo voor kinderen en zwangere vrouwen) dan betekent dit de evacuatie van een sigaarvormig gebied met een lengte van ruim 180 km en een grootste breedte van ongeveer 10 km in het geval van geen regen (fig. II-10). In het geval van regen beslaat deze grenswaarde van 15 rem een sigaarvormig gebied met een lengte van ruim 190 km en een maximale breedte van ruim 20 km (fig. II-21). Deze noodzaak tot evacuatie en de langdurige onbewoonbaarheid (zie hoofdstuk V) van een groot deel van Nederland inclusief een belangrijk deel van de Randstad zullen, ook onder deze weersomstandigheden, tot een totale ontwrichting van de Nederlandse samenleving leiden.

Referenties Hoofdstuk II

1. National Council on Radiation Protection and Measurements, 1974, "Radiological Factors Affecting Decision Making in a Nuclear Attack", NCRP report No. 42, Washington D.C.
2. "Reactor Safety Study: An assessment of accident risk in U.S. Commercial Nuclear Power Plants" WASH-1400, U.S. Nuclear Regulatory Commission (october 1975), appendix VI, p. F.37. Ook wel "Rasmussen-studie" genoemd. Hierna aan te halen als WASH-1400.
3. Gezondheidsraad "Kerncentrales en Volksgezondheid", sept. 1975. Hierna aan te halen als GRR.
4. WASH-1400, appendix VI, p. 9-3.
5. WASH-1400, app. VI, p. F-3 e.v.
6. GRR, deel I, p. 6.17.
7. WASH-1400, app. VI, p. F-11.
8. GRR, deel I, p. 6.17.
9. WASH-1400, app. VI, p. 9-10.
10. WASH-1400, app. VI, p. 9-10.
- 10a. WASH-1400, app. VI, p. F-22.
11. GRR, deel I, p. 4.4.
12. WASH-1400, app. VI, p. F-13.
13. WASH-1400, app. VI, p. 9-15.
14. GRR, deel I, p. 4.5.
- 14a. WASH-1400, app. VI, p. 9-13.
15. F. Pasquill, "Atmospheric Diffusion", Van Nostrand Co, New York (1962).
16. WASH-1400, app. VI, p. 11-23.
17. WASH-1400, app. VI, p. 11-9.
18. WASH-1400, app. VI, p. 11-8.

Hoofdstuk III. STRALINGSBELASTING VAN SPECIFIEKE ORGANEN

1. Inleiding

In hoofdstuk II is uitvoerig ingegaan op de korte termijn stralingsbelasting van het totale lichaam en van enkele specifieke organen (beenmerg, longen, maag-darm kanaal, schildklier). Er zijn echter nog meer organen die een interne stralingsdosis ontvangen door ophoping van radioactieve isotopen. Door transport van radioactieve isotopen, via opname in het bloed vanuit de longen zullen specifieke isotopen zich in bepaalde organen concentreren, zoals strontium in het bot en jodium in de schildklier. Hierdoor ontstaat een extra stralingsbelasting van deze organen. Meestal is echter deze dosis van een dergelijke omvang dat acute effecten t.g.v. deze stralingsbelasting ondergeschikt zijn aan die van de stralingsbelasting van het totale lichaam. Slechts de op korte termijn ontvangen beenmergdosis is een belangrijke oorzaak van directe stralingsziekten en sterfte. Het korte termijn effect van stralingsbelasting van specifieke organen is vooral een synergetische versterking van de gezondheidseffecten van bijvoorbeeld een totale lichaams- en beenmergdosis.

Na ophoping in de specifieke organen zal de stralingsintensiteit in deze organen in de loop der tijd afnemen, zowel door radioactief verval van de isotopen als door biologische uitscheiding uit de organen. De snelheid waarmee dit laatste proces plaats vindt wordt in de regel ook gekarakteriseerd door een (biologische) halveringstijd: d.w.z. de tijd die nodig is om de hoeveelheid in een orgaan met de helft te verminderen. Deze halveringstijd hangt zowel van het isotoop als van het orgaan af. De waarden lopen uiteen van enkele dagen tot vele jaren. Met name in gevallen van langere radiologische en biologische halveringstijden zal, na een eenmalige ingenomen hoeveelheid van een radioactief isotoop, de stralingsdosis in de loop der jaren nog sterk kunnen oplopen. Deze stralingsdosis die over langere tijd opgelopen wordt is vooral van belang in verband met de in hoofdstuk IV te bespreken laat-somatische en genetische schade die door straling veroorzaakt wordt.

Uit tabel 2 van hoofdstuk IV kan ook een indruk verkregen worden van de hoogte van de dosis die sommige organen pas over langere tijd oplopen in vergelijking met de op korte termijn ontvangen stralingsdosis.

In dit hoofdstuk zal de interne stralingsbelasting van een aantal specifieke organen weergegeven worden die men gedurende 30 jaar na inademing oploopt. Deze stralingsbelasting is berekend voor zover de daarvoor benodigde gegevens (concentratiefactor, effectieve stralingsenergie), vermeld zijn door de ICRP¹⁾, en is in de ons beschouwde scenario's dus een ondergrens. De grenzen in de figuren zijn zo gekozen dat een ruw beeld van het stralingsbelastingspatroon onder de verschillende weersomstandigheden ontstaat. Tevens is in een aantal tabellen voor de diverse organen de relatieve bijdrage van de verschillende isotopen aan de stralingsbelasting gegeven. (Voor weerscategorie F, op een afstand van 50 km van de centrale.)

In fig. III-1 t/m III-3 zijn voor de drie, in hoofdstuk II genoemde weerscategorieën (cat. F, cat. D zonder en cat. D met regen) een aantal grenslijnen betreffende de stralingsbelasting van de lever t.g.v. interne bestraling gegeven.

Tabel III-1 geeft de relatieve bijdrage van de, voor deze stralingsbelasting belangrijkste isotopen.

Tabel III-1. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van lever.

isotoop	bijdragen in %
Cm-242	23.2
Pu-238	17.4
Cm-244	15.0
Cs-134	12.3
Ce-144	7.4
Pu-241	7.0
Cs-137	3.7
Pu-240	3.3
Te-132	2.4
Mo-99	2.2
Pu-239	2.2
totaal	96.1

In fig. III-4 t/m III-6 zijn een aantal grenswaarden voor de interne stralingsbelasting gedurende 30 jaar van het bot gegeven. Tabel III-2 geeft de relatieve bijdrage van de belangrijkste isotopen.

Tabel III-2. Relatieve bijdrage isotopen aan stralingsbelasting van het bot.

isotoop	bijdrage in %
Pu-241	25.0
Pu-238	22.2
Sr-90	21.0
Cm-244	5.6
Pu-240	4.3
Cm-242	4.3
Sr-89	4.0
Ce-144	3.4
Pu-239	2.9
Ba-140	1.8
Y-91	1.0
totaal	95.5

Fig. III-7 t/m III-9 geeft het stralingsbelastingpatroon voor de nieren. Tabel III-3 vermeldt de relatieve bijdrage van diverse isotopen.

Tabel III-3. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van nieren.

isotoop	bijdrage in %
Te-132	18.6
Pu-238	13.4
Pu-241	13.4
Cm-244	8.8
Ru-106	7.2
Cm-242	7.2
Mo-99	5.4
Ce-144	4.6
Te-129m	4.5
Cs-134	4.2
Ru-103	3.1
Pu-240	2.5
Pu-239	1.7
Cs-137	1.4
totaal	96.0

In fig. III-10 t/m III-12 is de stralingsbelasting van de longen geïllustreerd. Tabel III-4 geeft de relatieve bijdrage van de diverse isotopen.

Tabel III-4. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van de longen.

isotoop	bijdrage in %
Ru-106	64.0
Ru-103	8.1
Te-132	5.7
Cm-242	3.7
Ba-140	3.2
Ce-144	3.0
Te-129m	2.0
Sr-89	1.8
Mo-99	1.5
Pu-238	1.2
Zr-95	1.0
totaal	95.2

Fig. III-13 t/m III-15 geven een aantal grenswaarden voor de stralingsbelasting van de milt, terwijl tabel III-5 de relatieve bijdrage van de verschillende isotopen geeft.

Tabel III-5. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van de milt.

isotoop	bijdrage in %
Cs-134	47.6
Te-132	23.7
Cs-137	16.2
Te-129m	5.8
Zr-95	2.6
Cs-136	1.3
totaal	97.2

In fig. III-16 t/m III-18 worden een aantal grenswaarden voor de stralingsbelasting van het spierweefsel gegeven. De relatieve bijdrage van de verschillende isotopen staat in tabel III-6.

Tabel III-6. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van het spierweefsel.

isotoop	bijdrage in %
Cs-134	79.5
Cs-137	18.8
Cs-136	1.6
totaal	99.9

Fig. III-19 t/m III-21 geeft de stralingsbelasting van de pancreas.

Tabel III-7 vermeldt de verdeling hiervoor over de isotopen.

Tabel III-7. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van de alvleesklier.

isotoop	bijdrage in %
Rb-86	94.0
Co-60	3.3
Co-58	2.4
totaal	99.7

In fig. III-22 t/m III-24 wordt de stralingsbelasting van de mannelijke geslachtsorganen gegeven, welke relevant is voor erfelijke schade. Onvoldoende gegevens waren voorhanden om de stralingsbelasting van de vrouwelijke geslachtsorganen te berekenen.

Tabel III-8 geeft de relatieve bijdrage van de verschillende isotopen.

Tabel III-8. Relatieve bijdrage van isotopen aan stralingsbelasting van testikels.

isotoop	bijdrage in %
Te-132	74.7
Te-129m	21.0
Te-127m	3.6
totaal	99.3

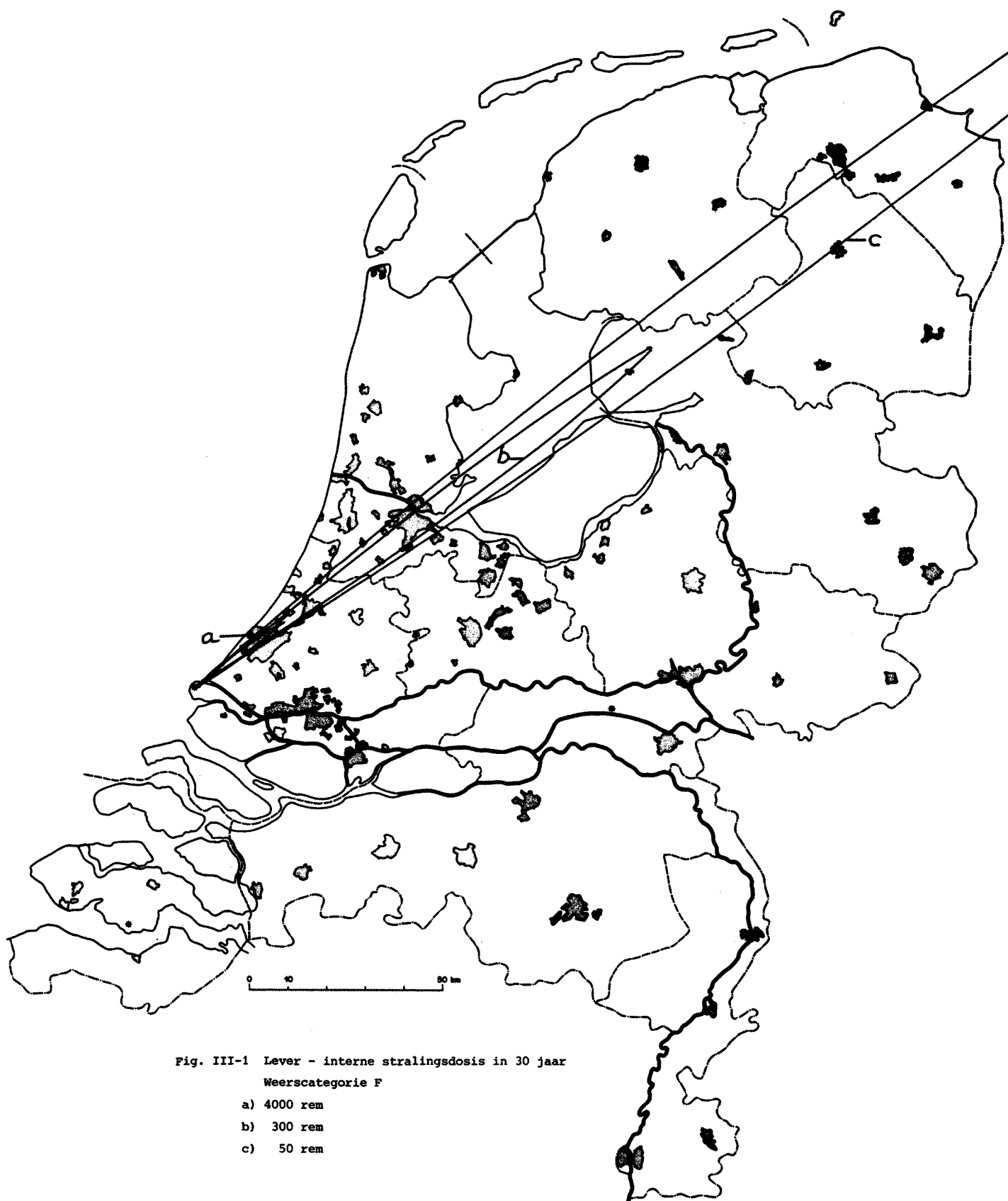
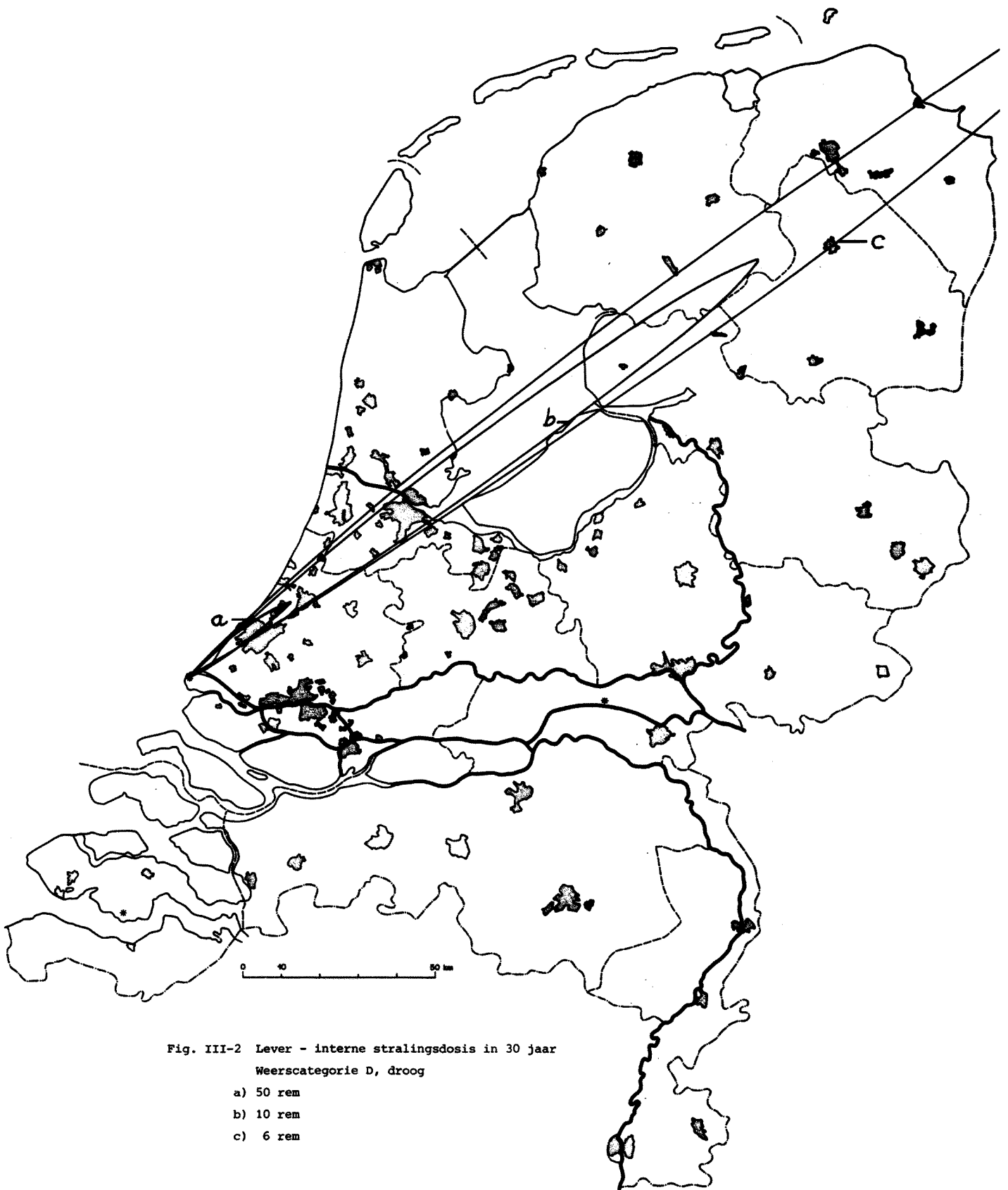
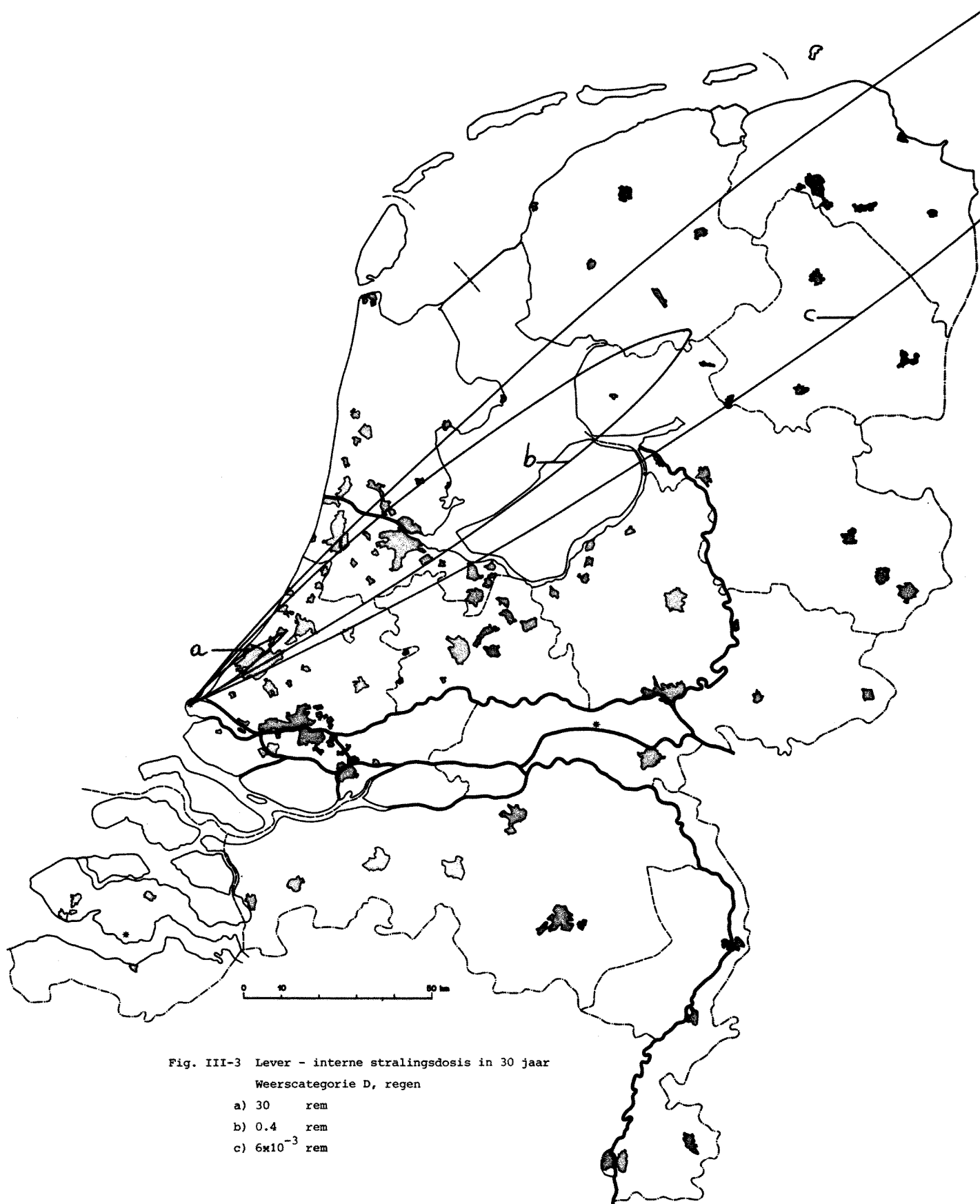


Fig. III-1 Lever - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F





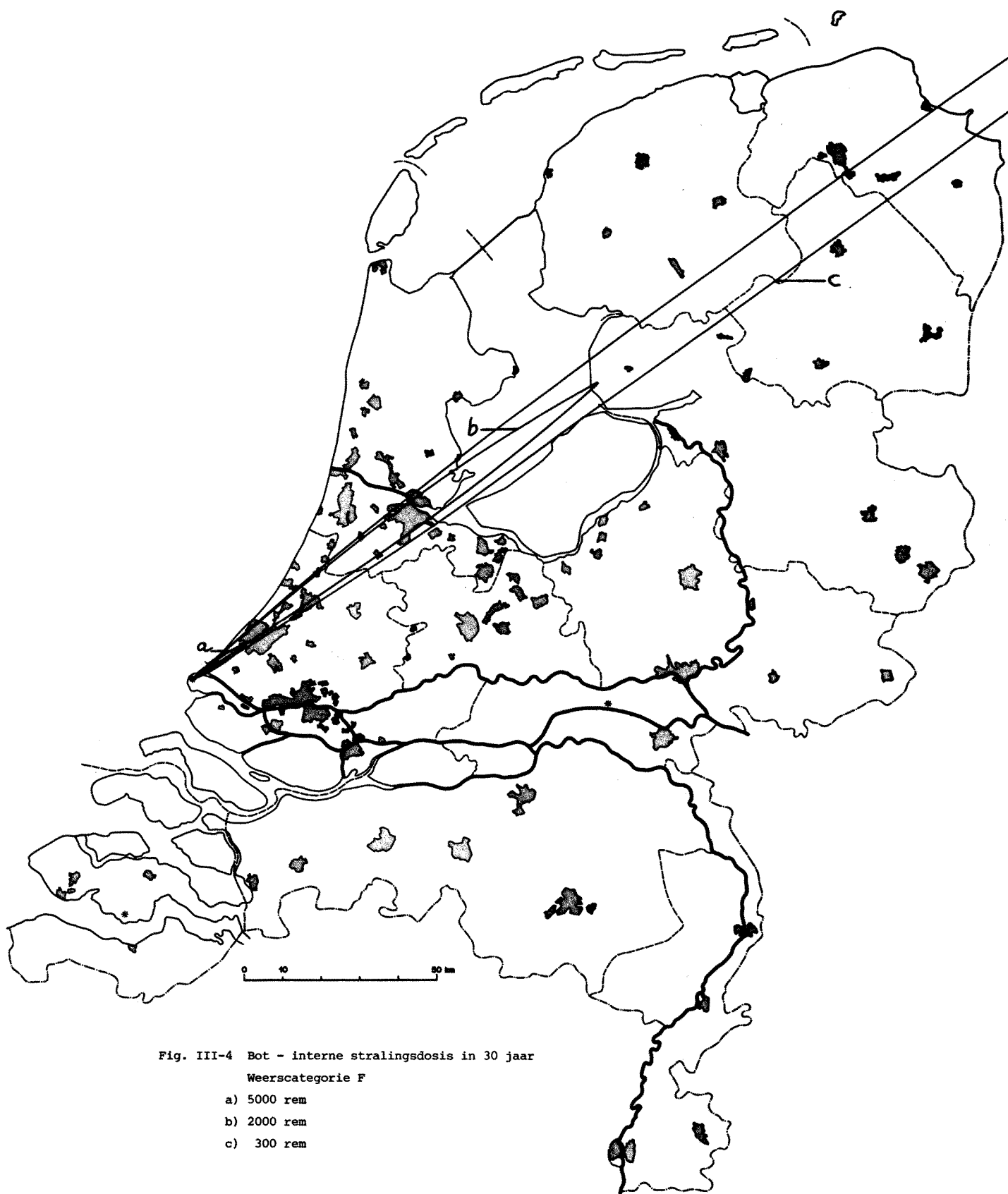


Fig. III-4 Bot - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F

- a) 5000 rem
- b) 2000 rem
- c) 300 rem

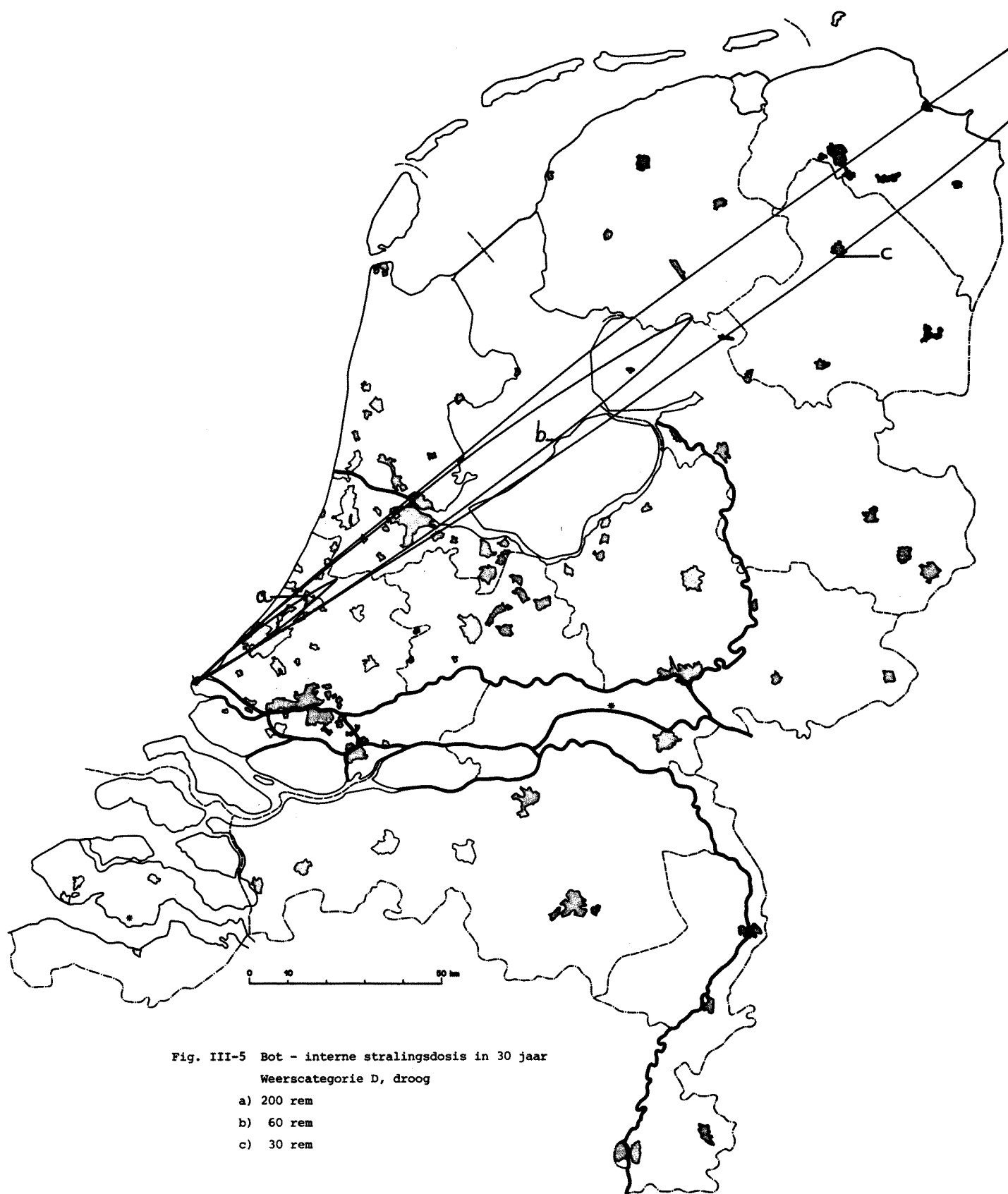
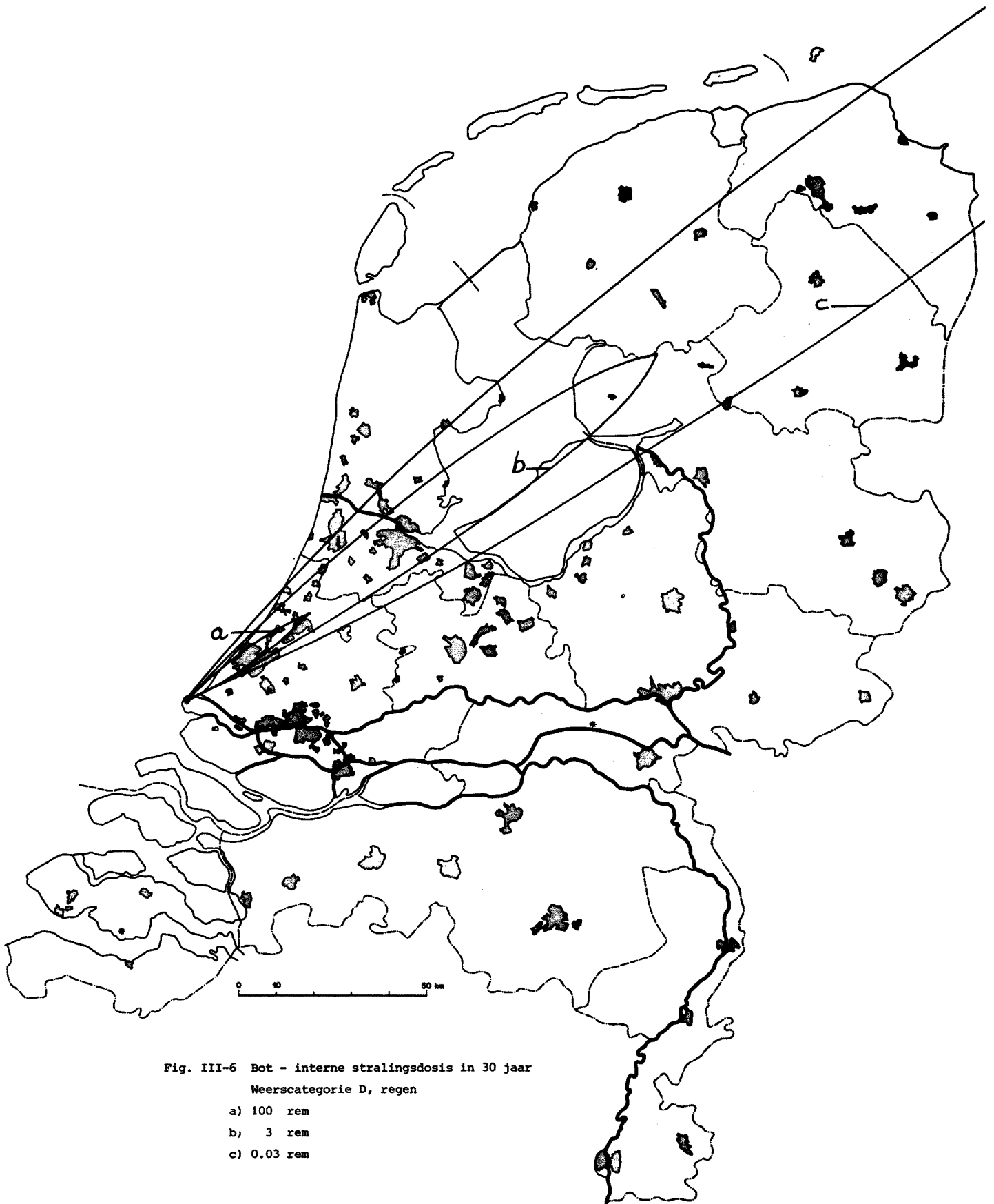


Fig. III-5 Bot - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, droog



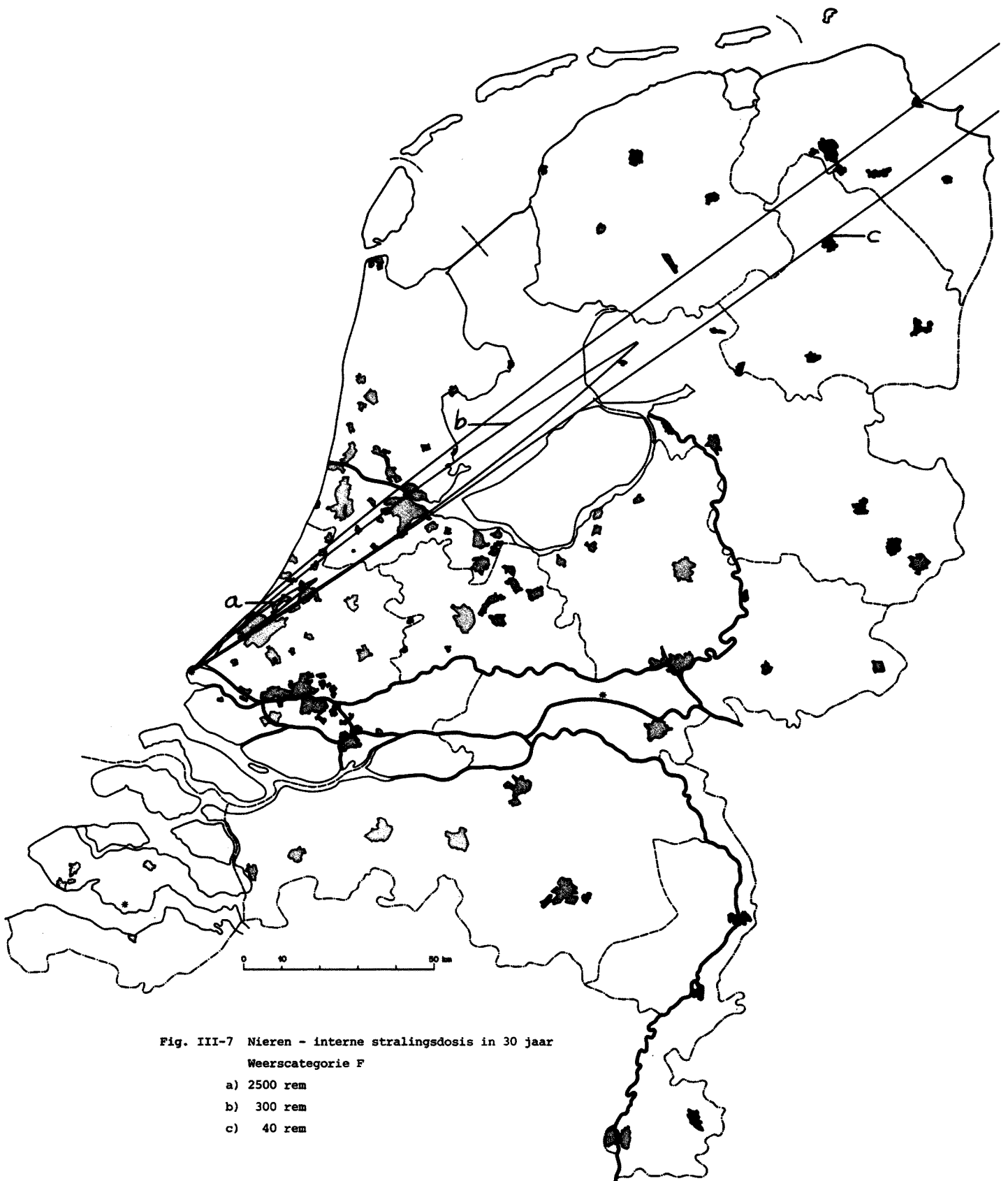


Fig. III-7 Nieren - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F

- a) 2500 rem
- b) 300 rem
- c) 40 rem

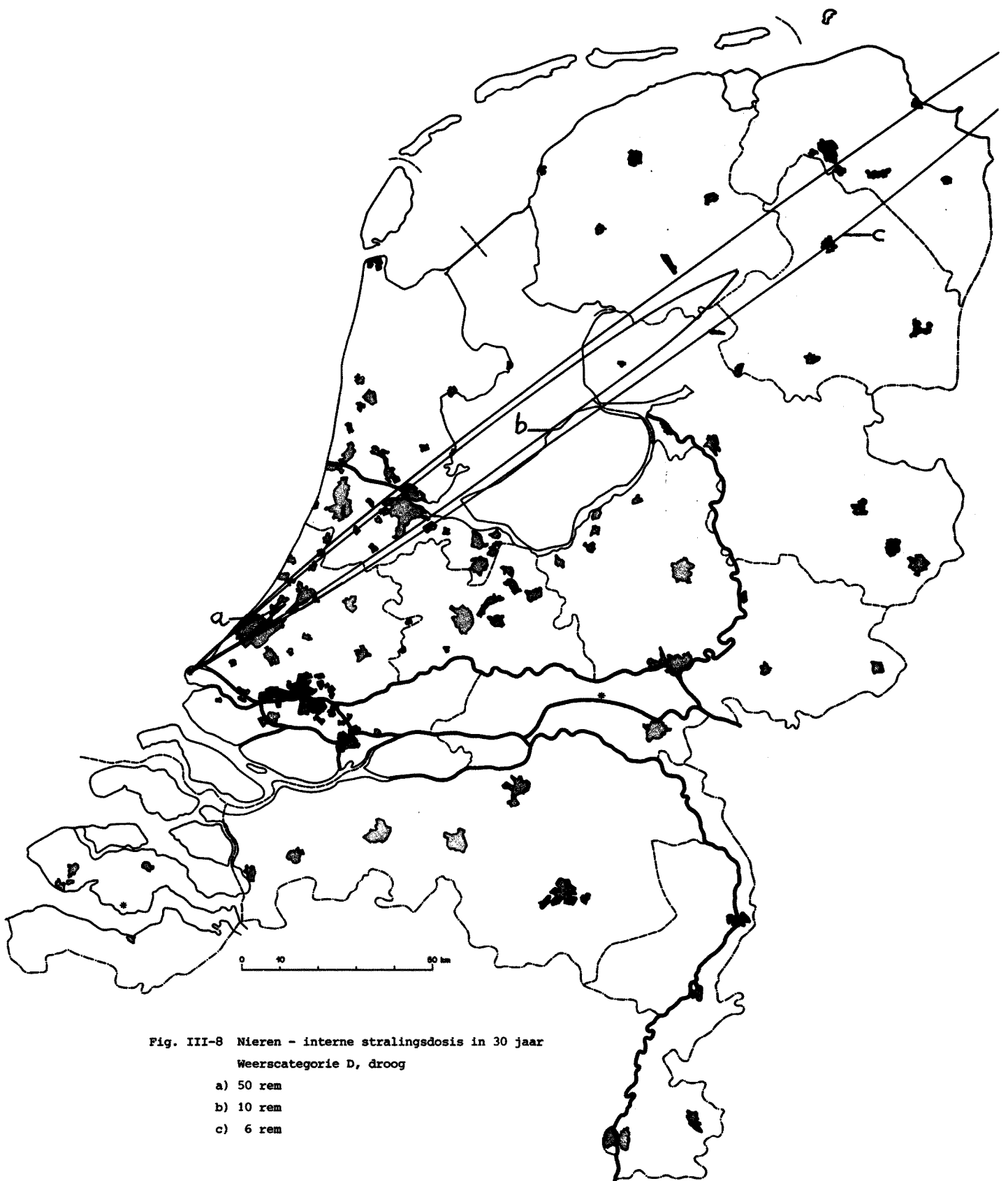


Fig. III-8 Nieren - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, droog

- a) 50 rem
- b) 10 rem
- c) 6 rem

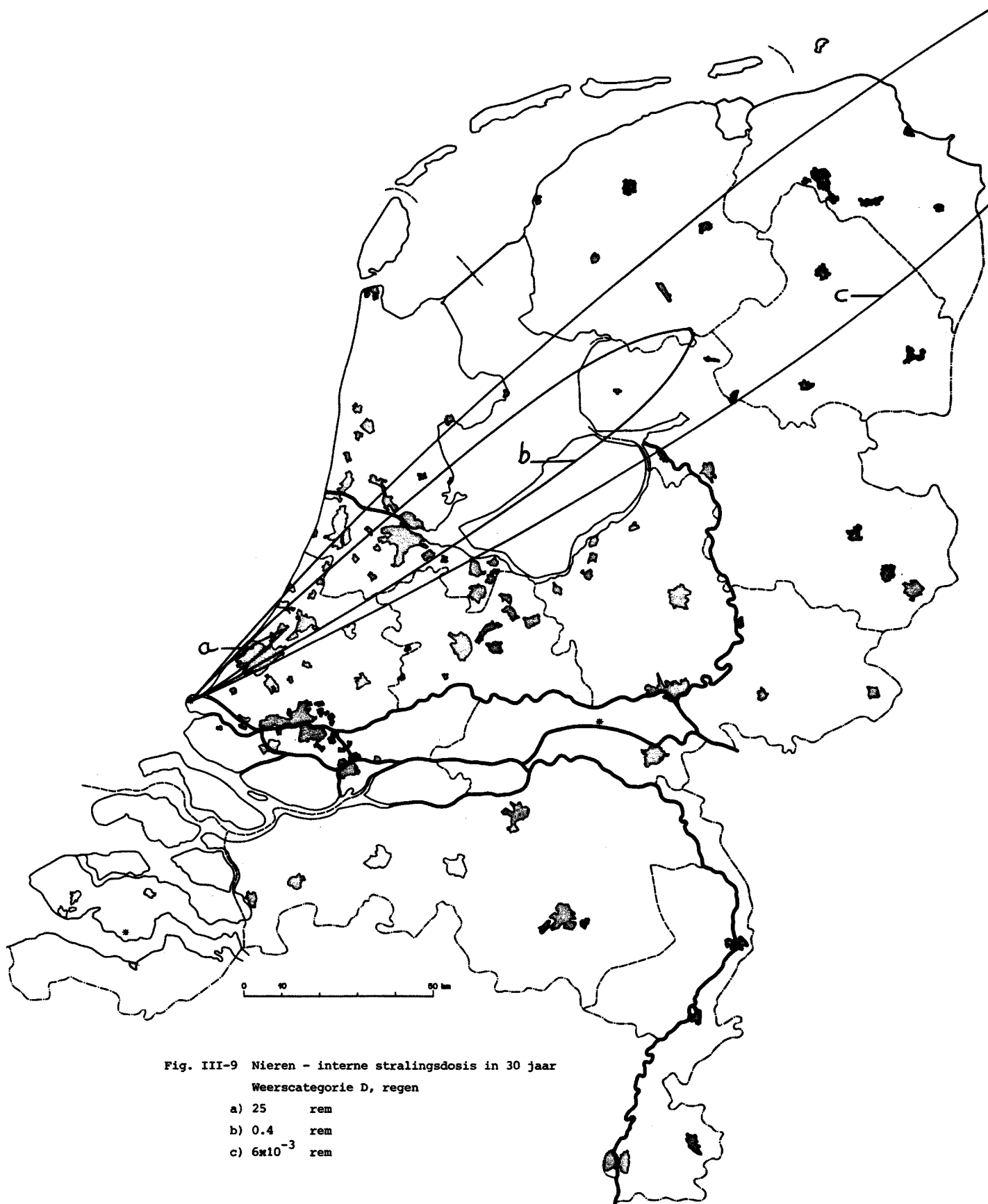
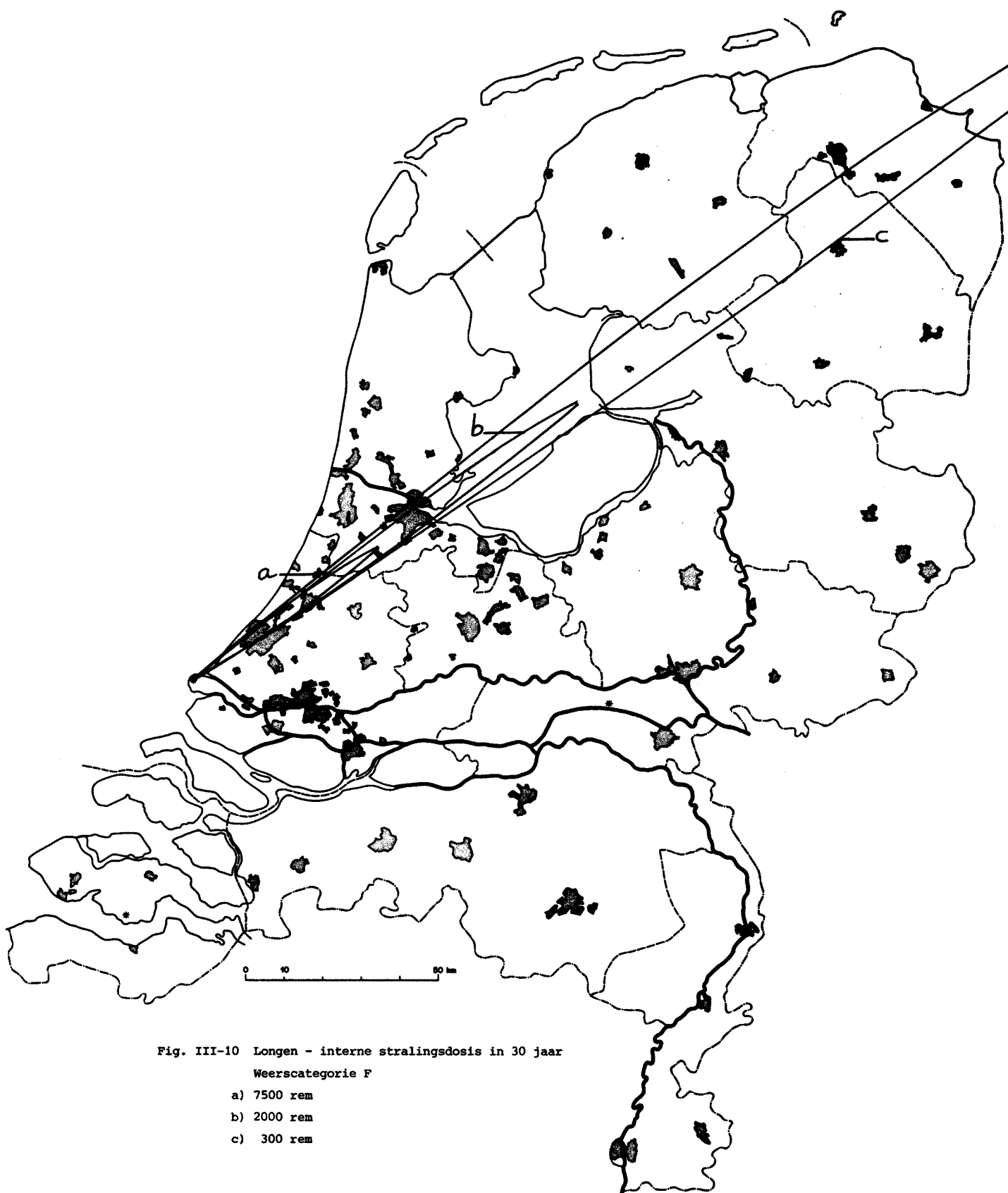


Fig. III-9 Nieren - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, regen



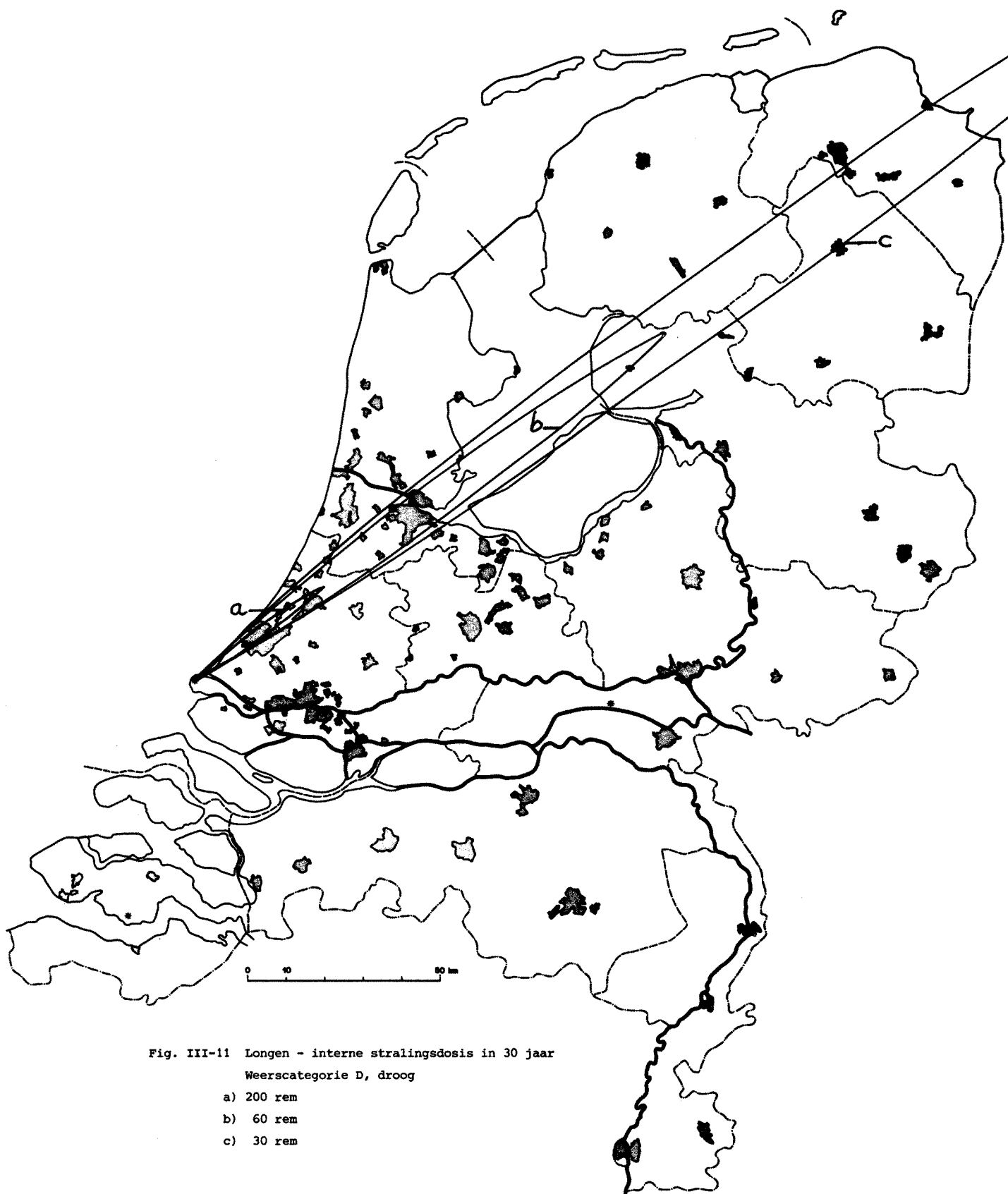
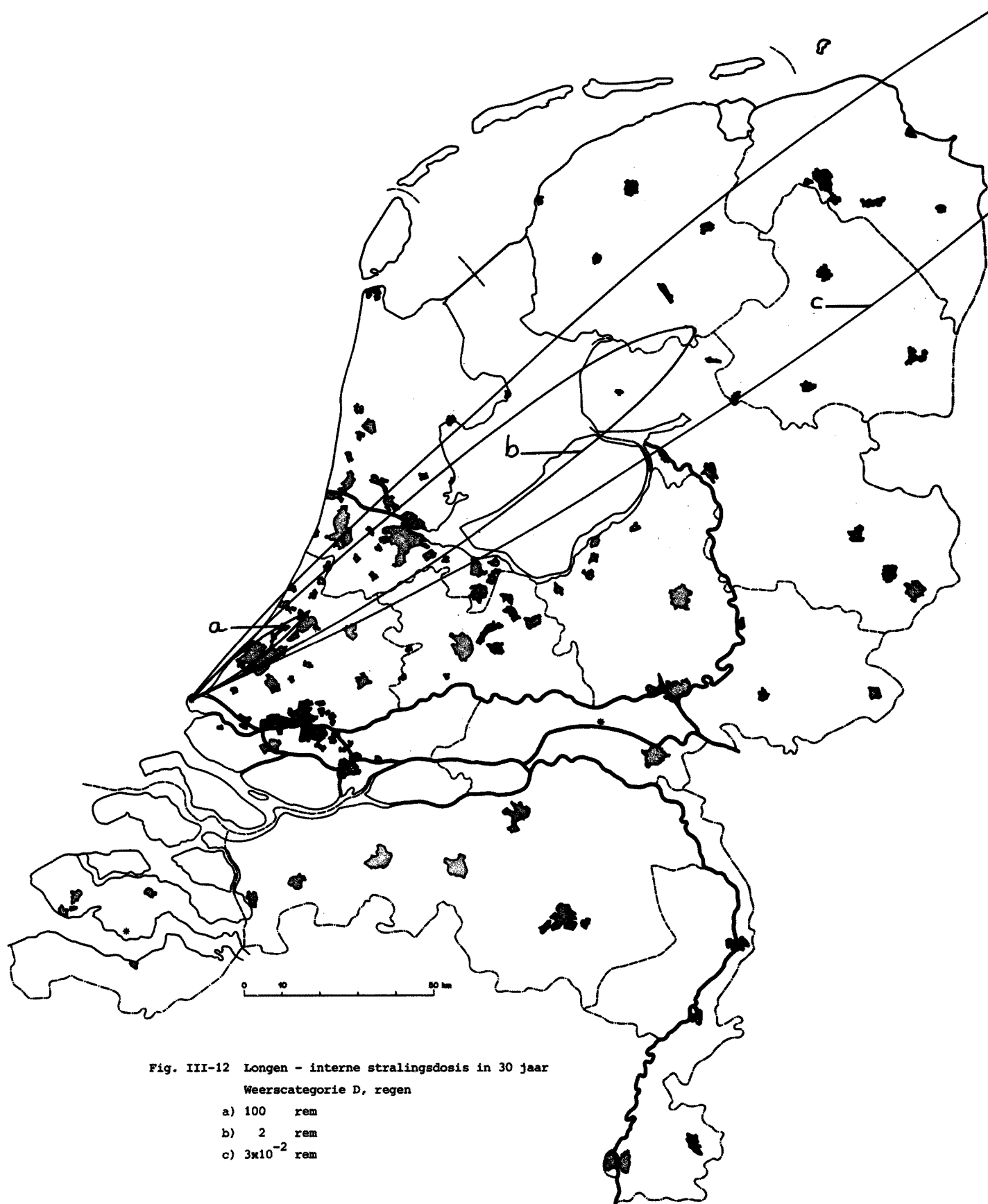


Fig. III-11 Longen - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, droog

- a) 200 rem
- b) 60 rem
- c) 30 rem



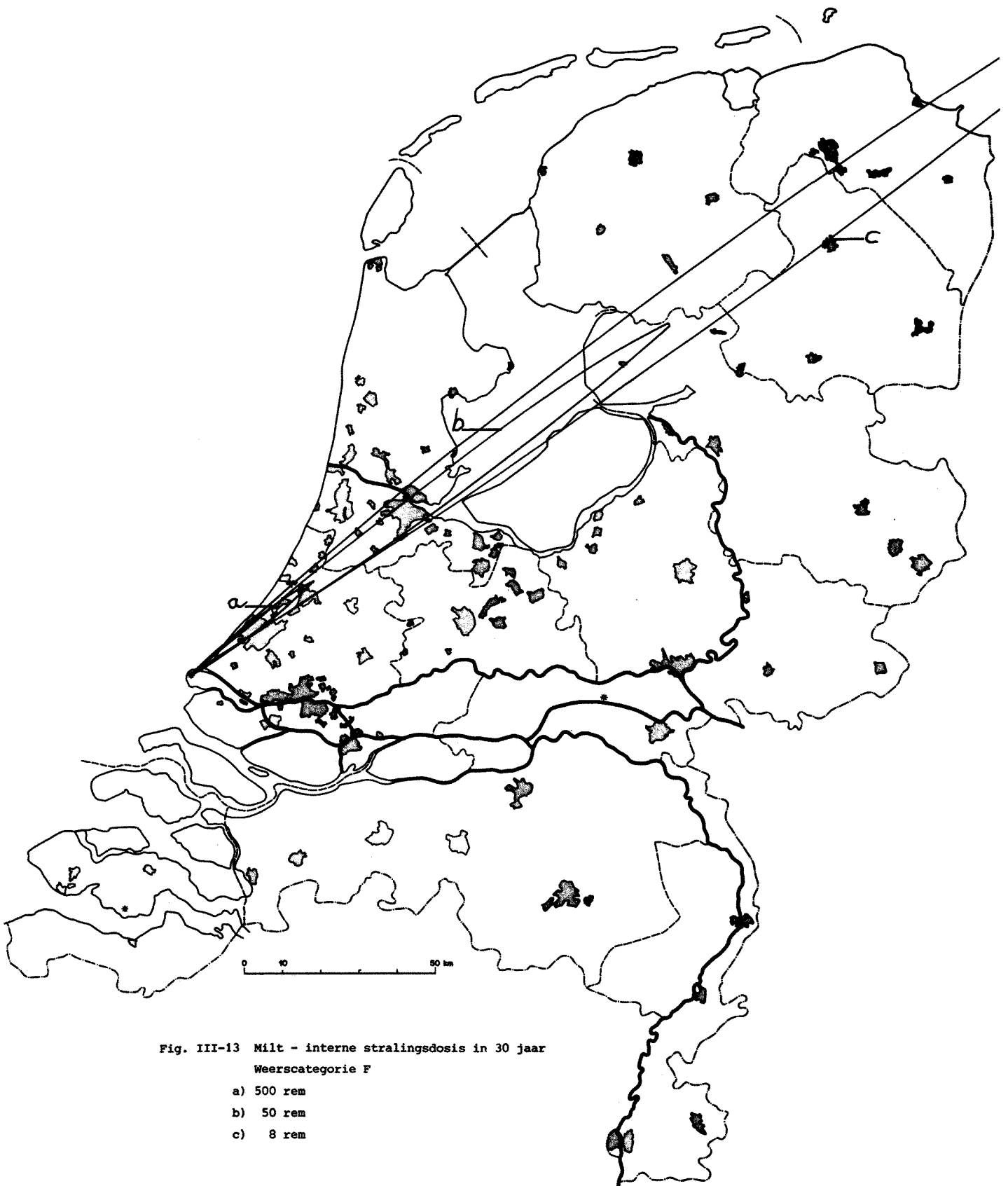


Fig. III-13 Milt - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F

- a) 500 rem
- b) 50 rem
- c) 8 rem

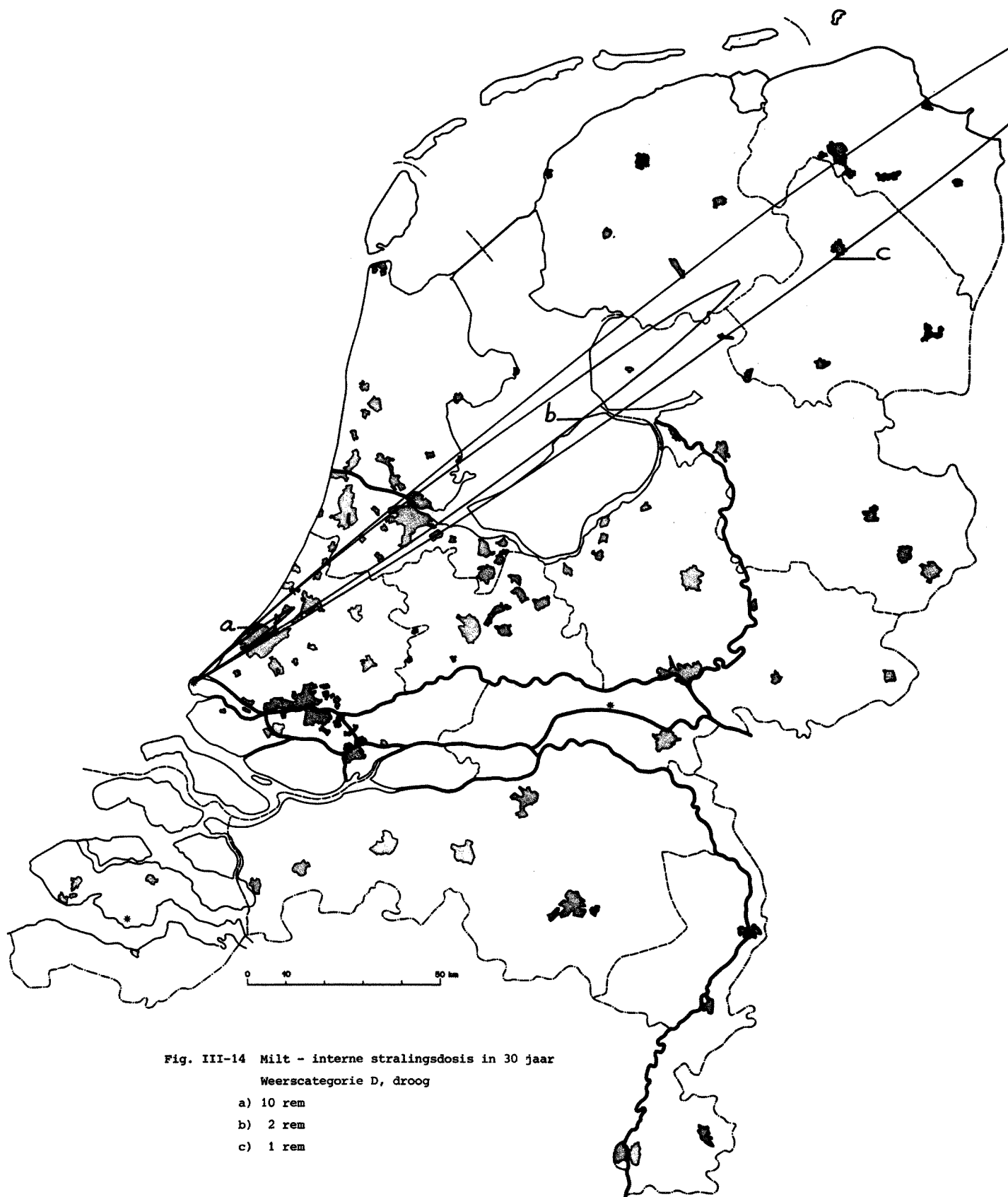
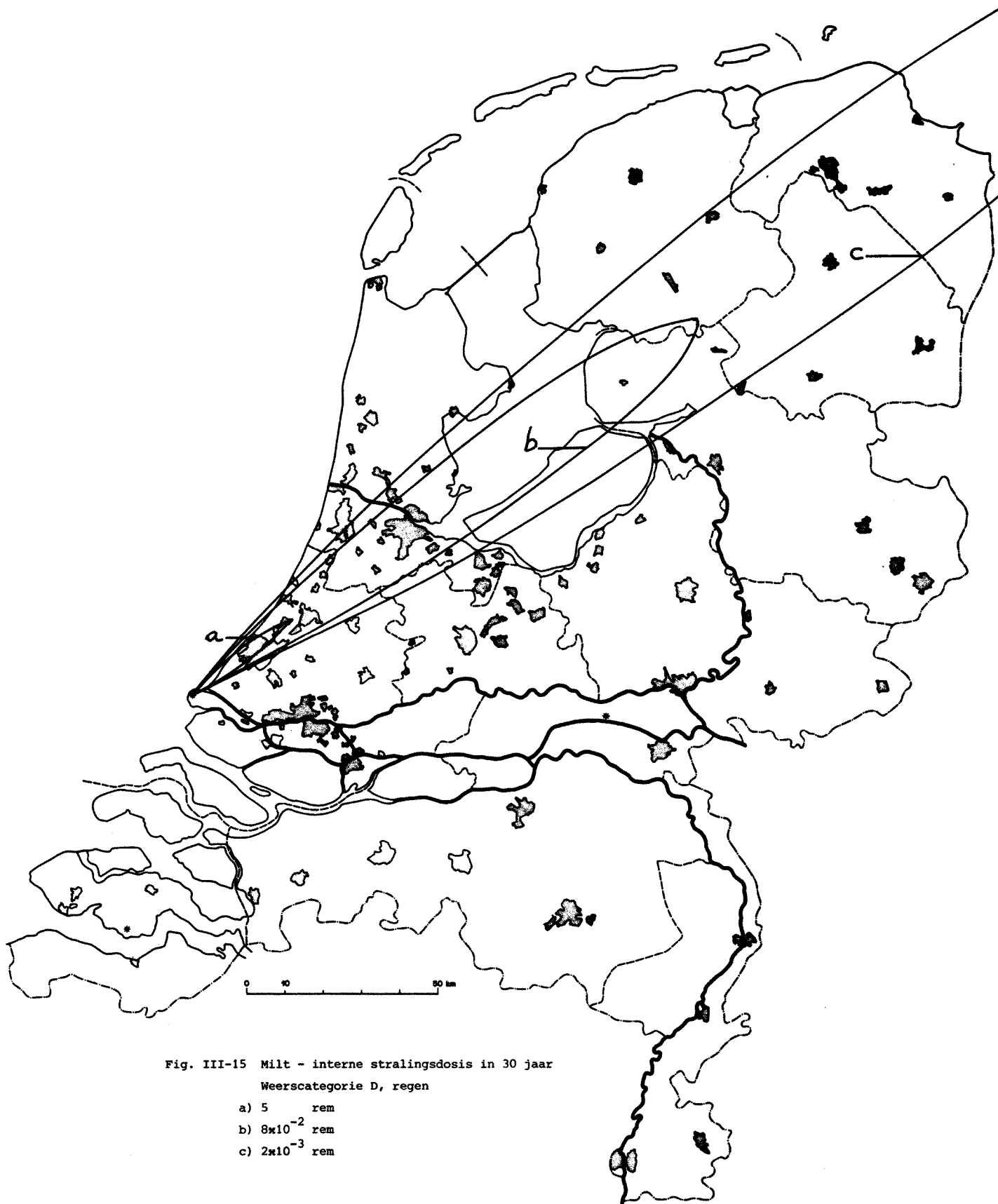
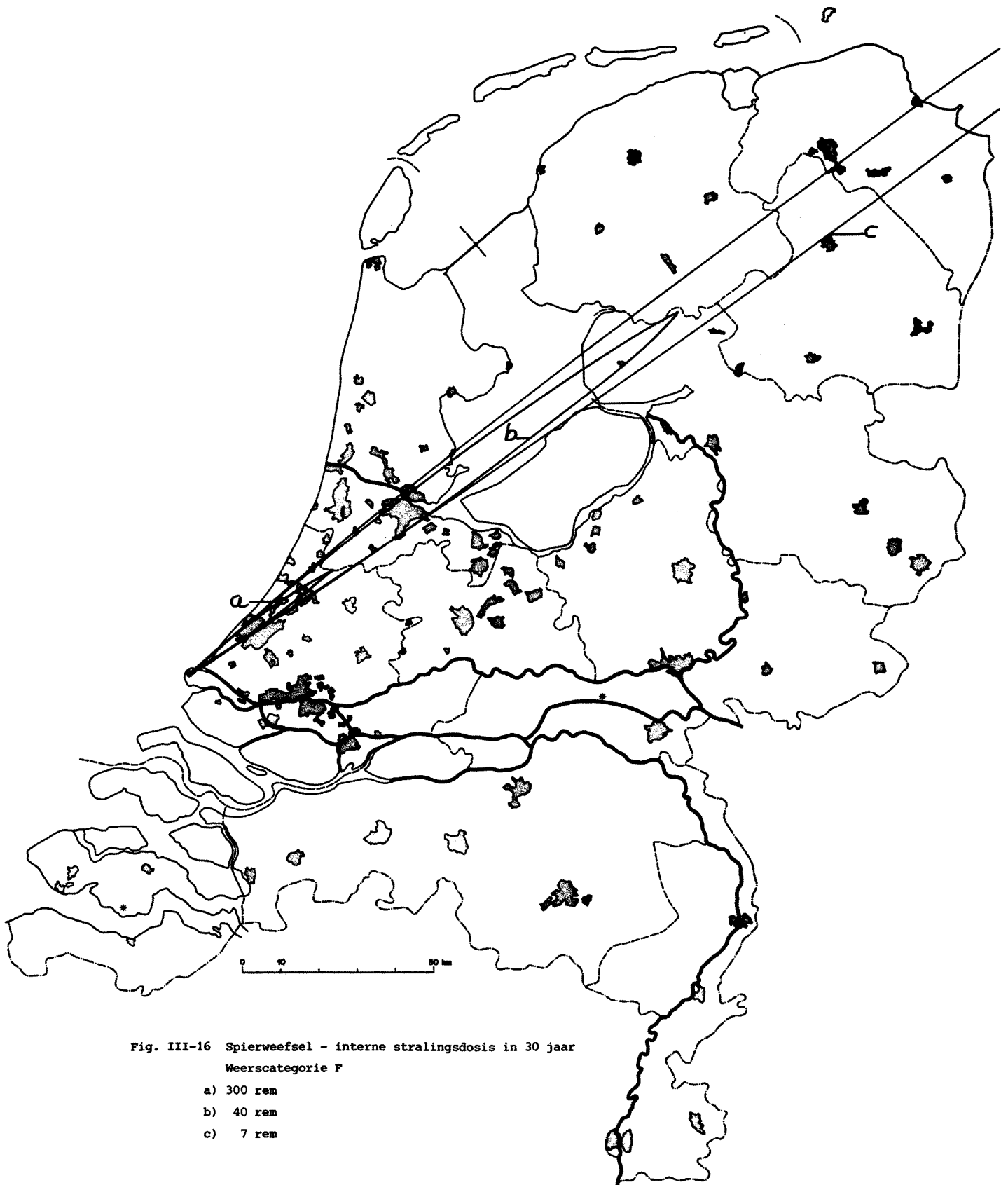
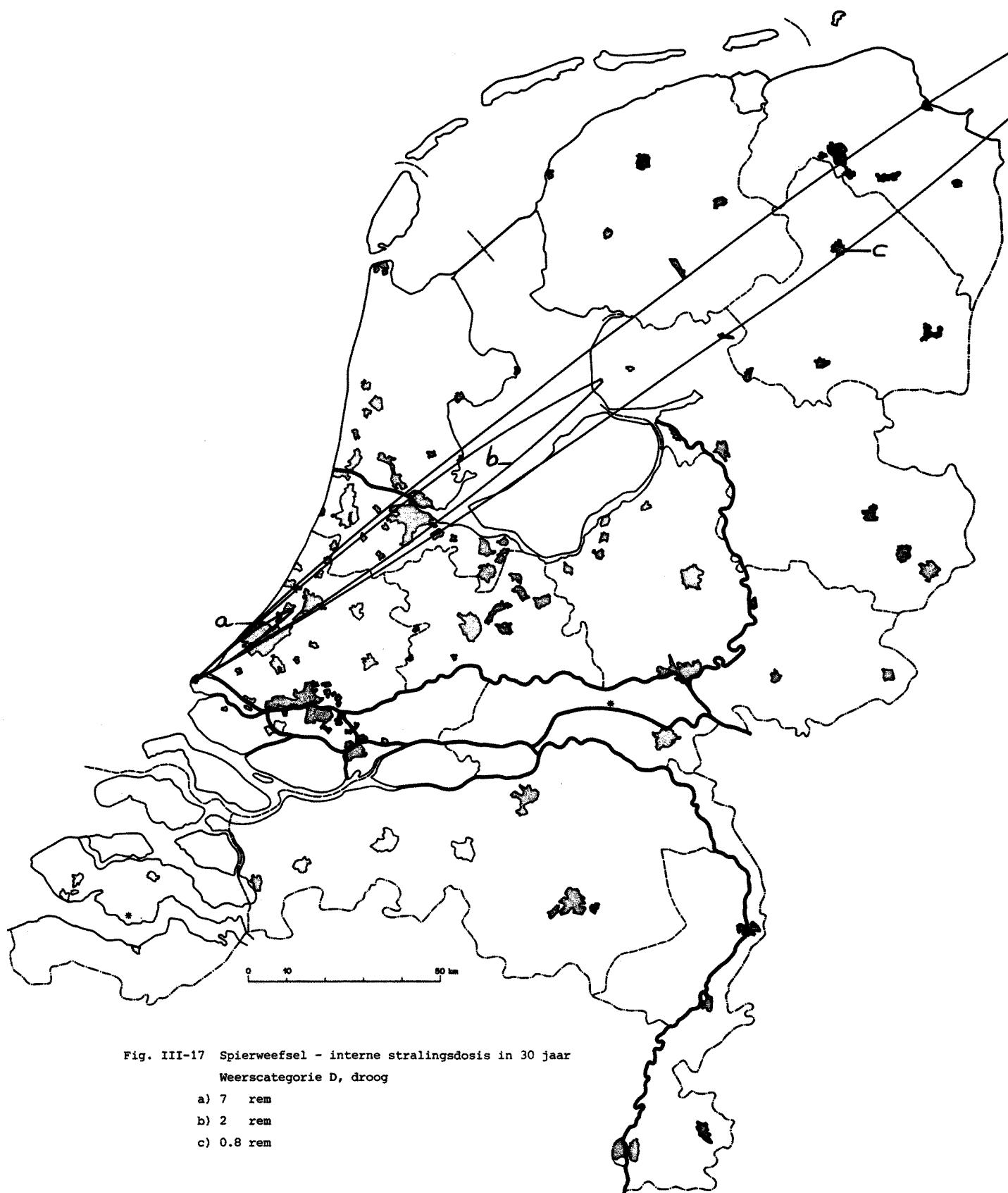


Fig. III-14 Milt - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, droog







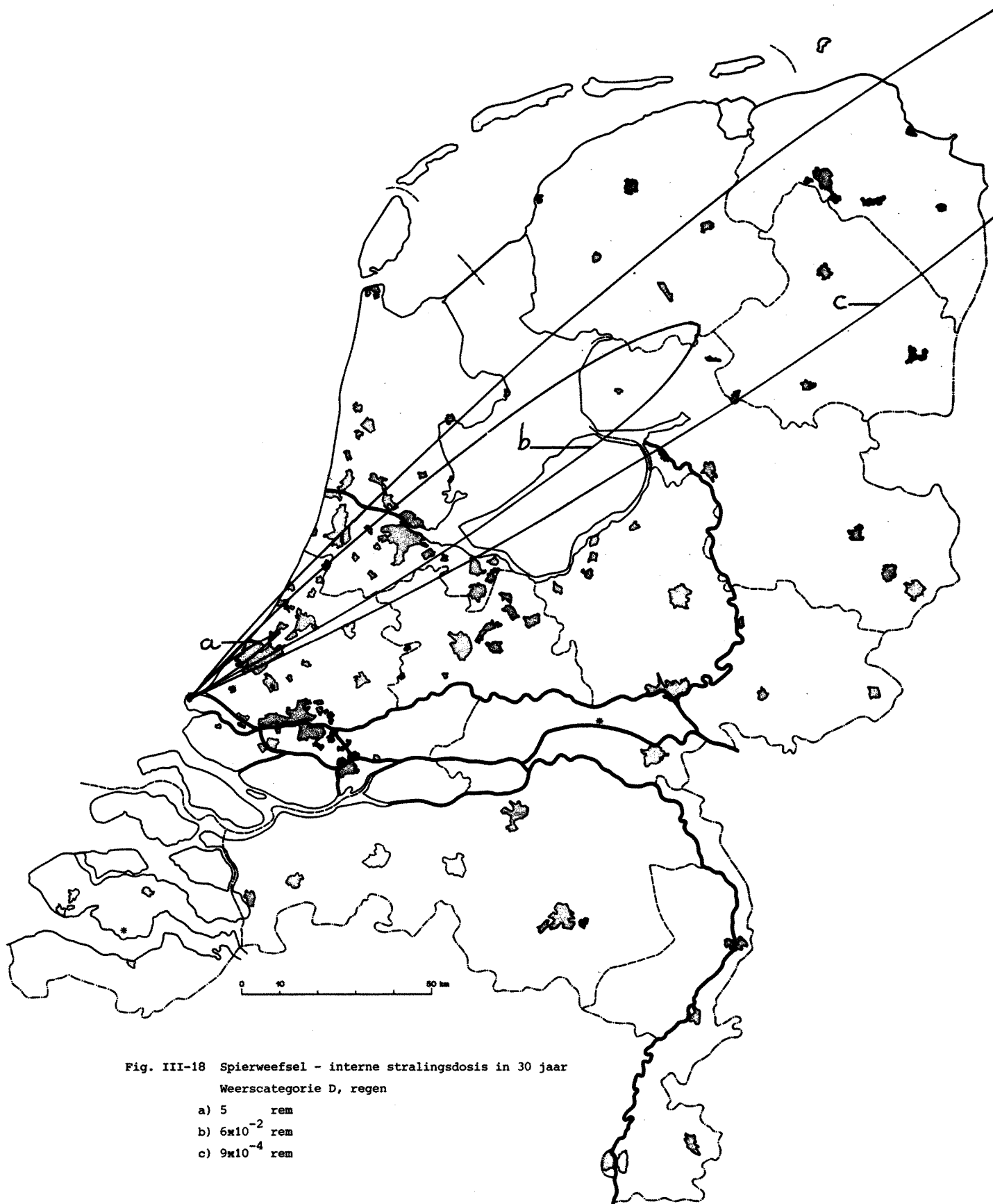


Fig. III-18 Spierweefsel - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, regen

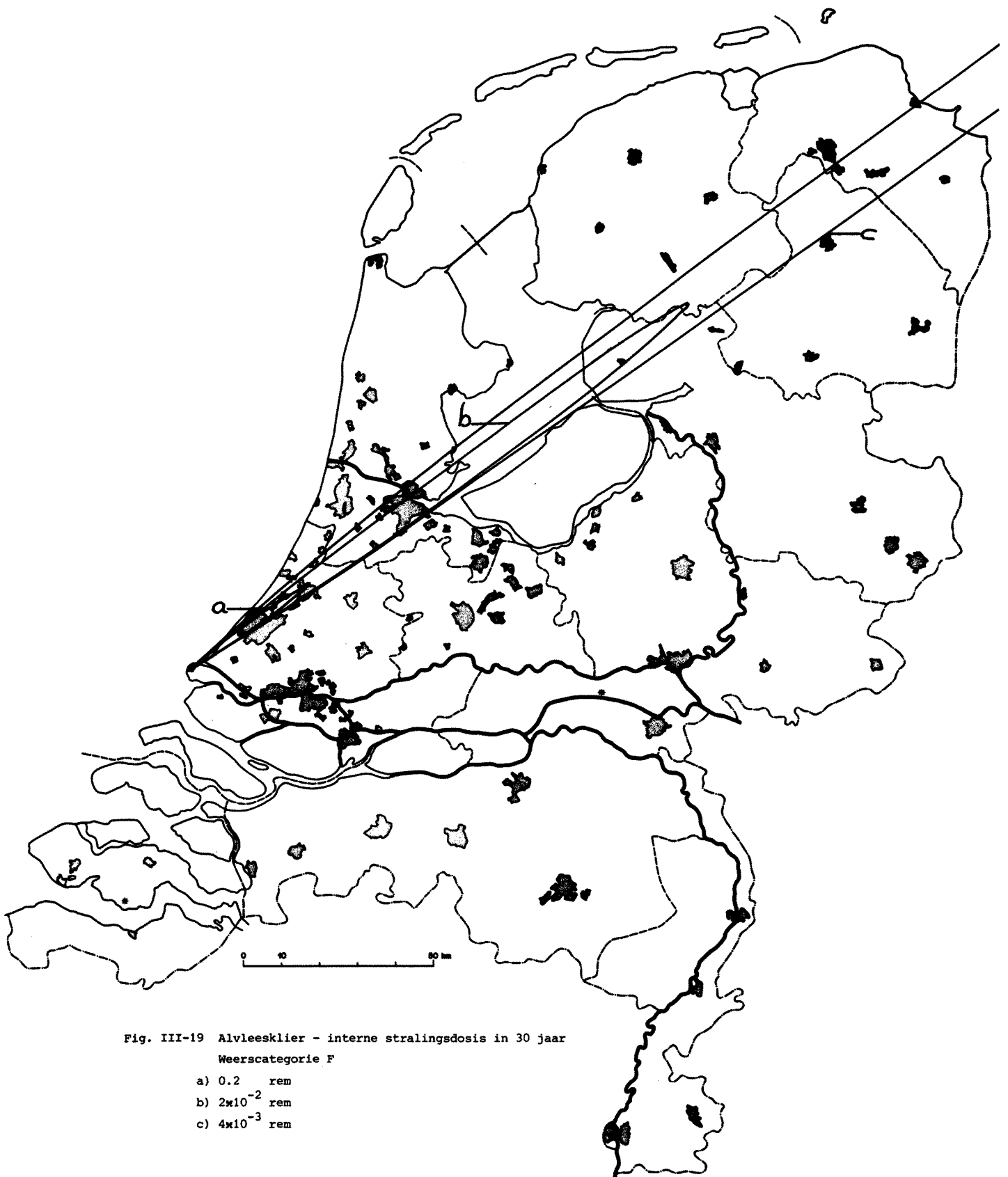
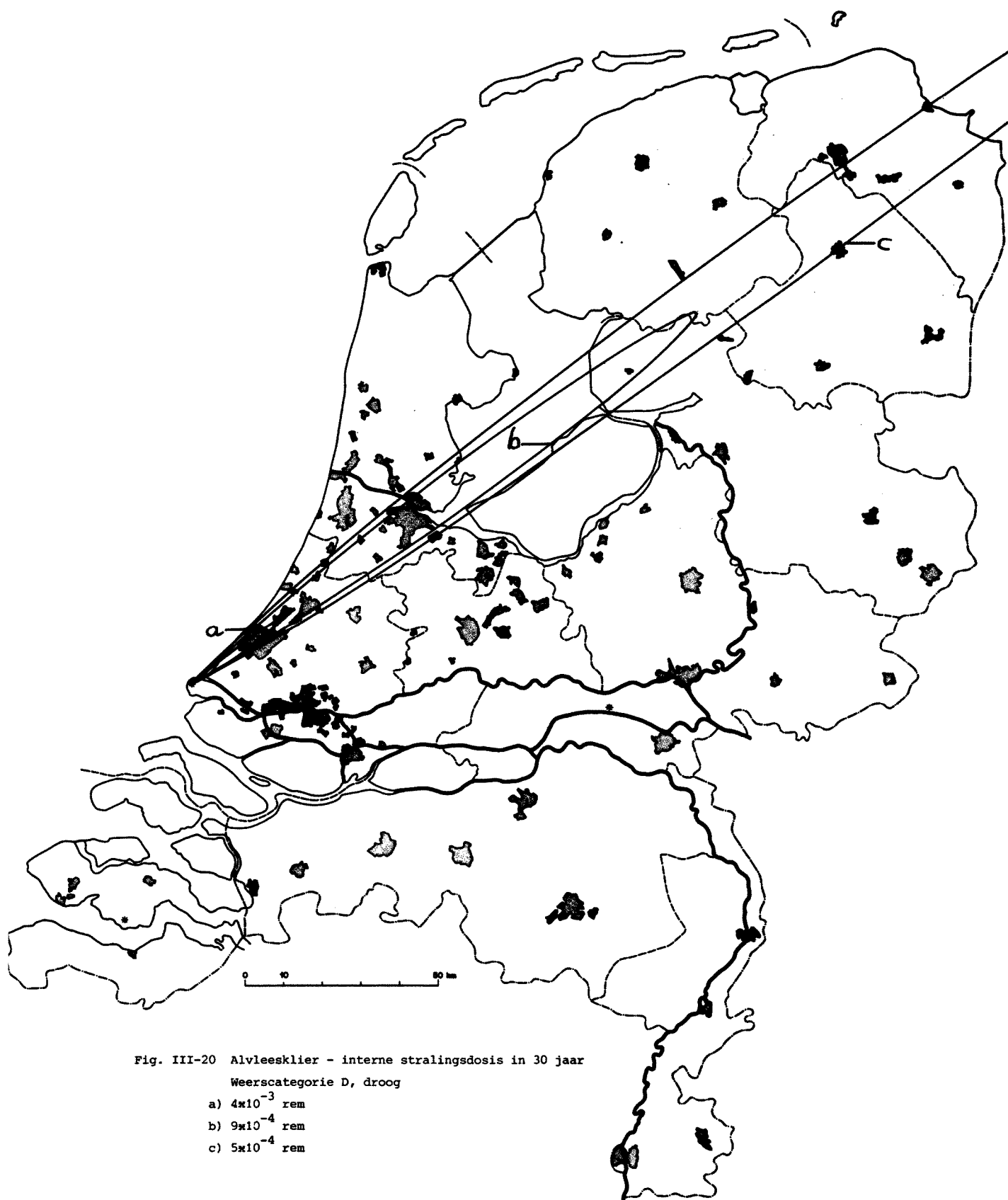
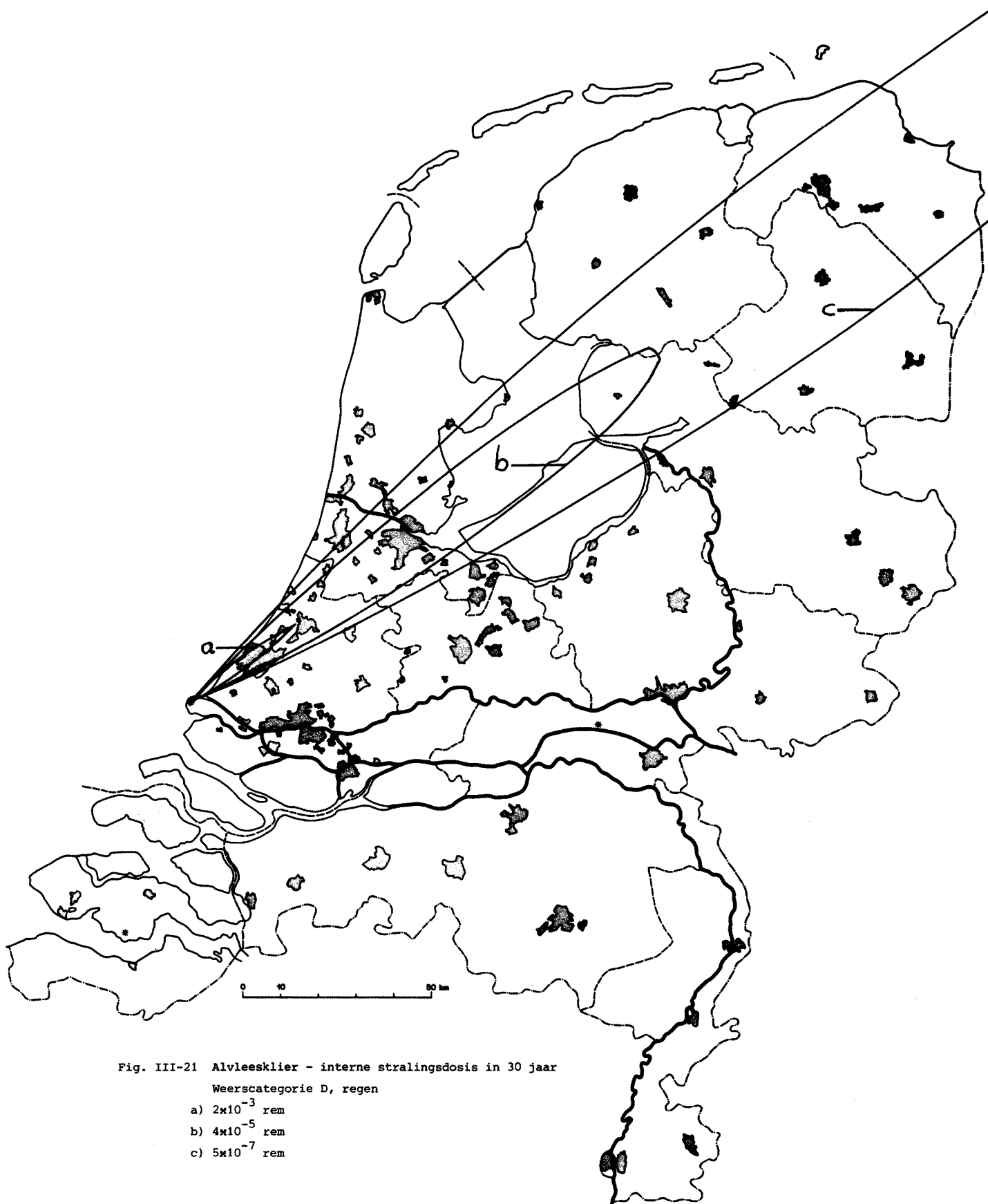


Fig. III-19 Alvleesklier - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F

- a) 0.2 rem
- b) 2×10^{-2} rem
- c) 4×10^{-3} rem





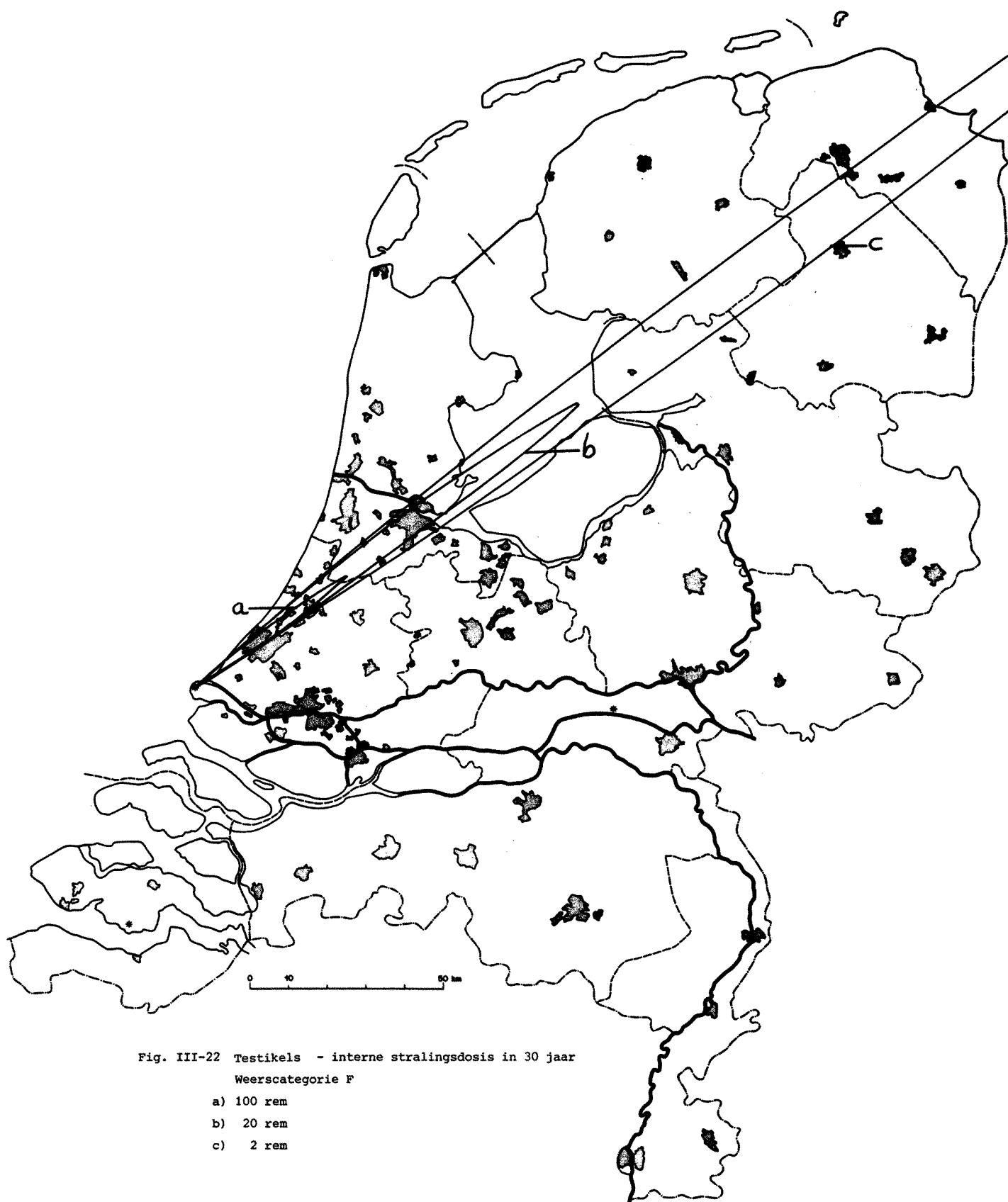


Fig. III-22 Testikels - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie F

- a) 100 rem
- b) 20 rem
- c) 2 rem

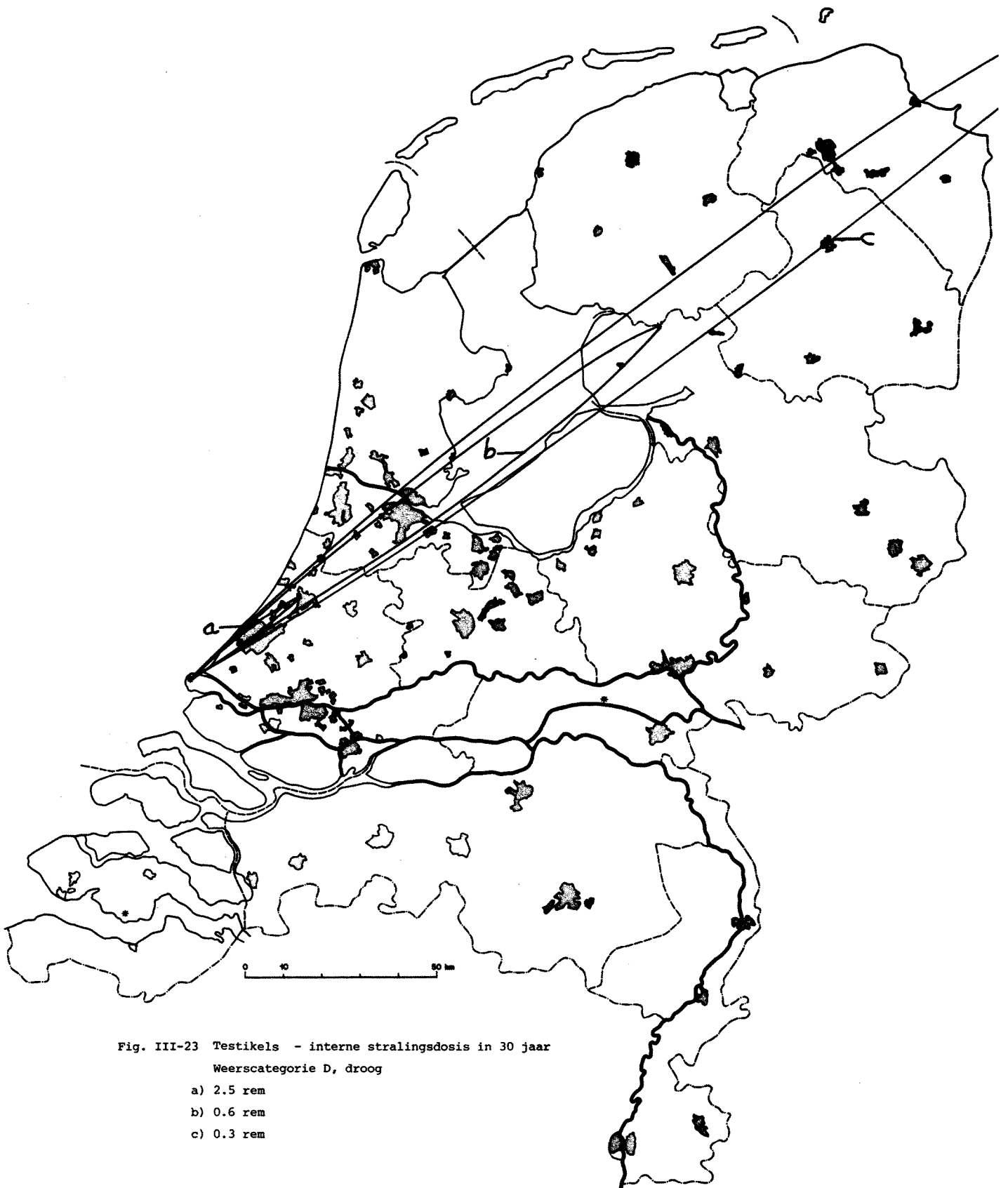
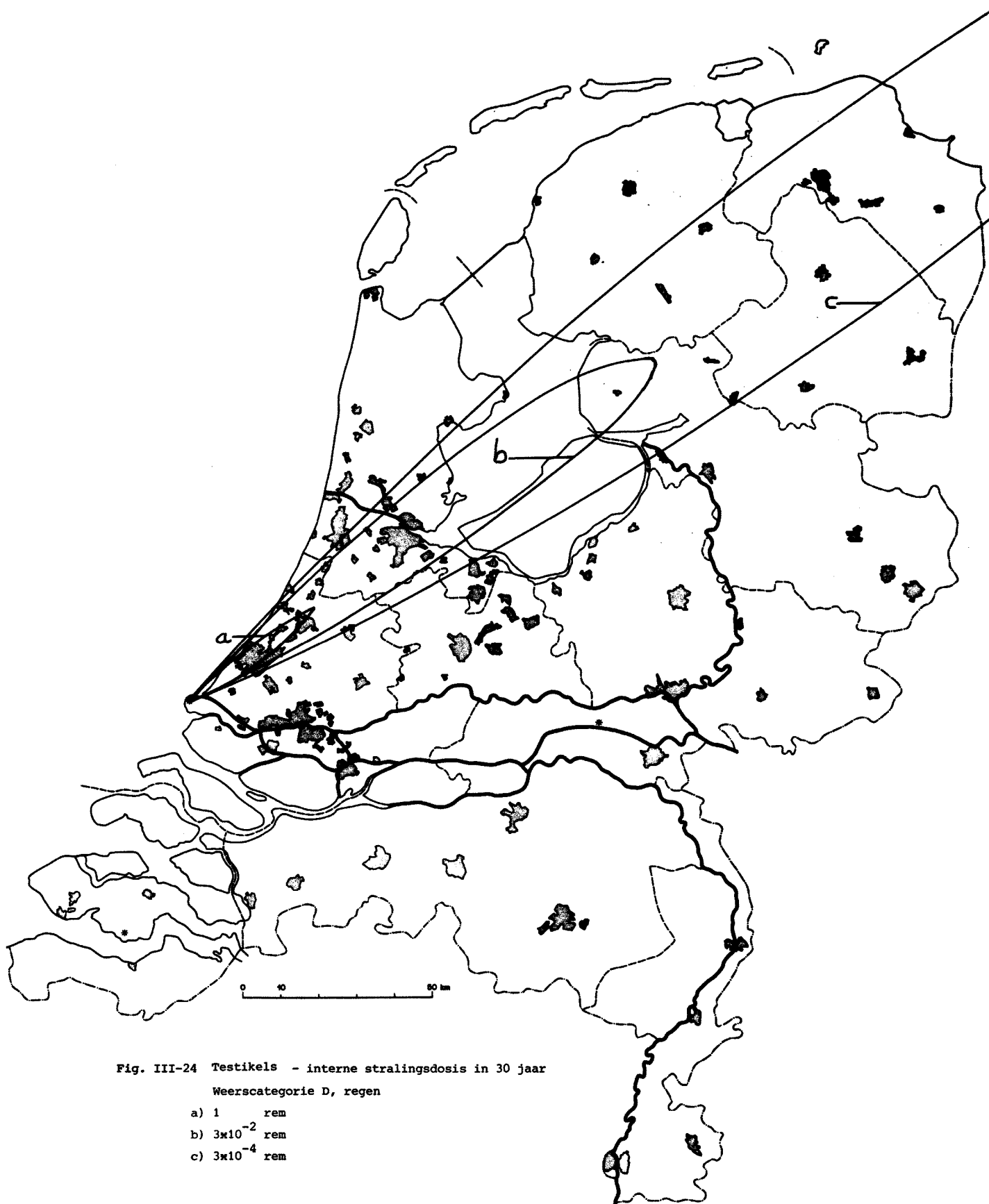


Fig. III-23 Testikels - interne stralingsdosis in 30 jaar
Weerscategorie D, droog

- a) 2.5 rem
- b) 0.6 rem
- c) 0.3 rem



Referenties hoofdstuk III

1. International Committee on Radiation Protection (ICRP)
"Report of Committee II on Permissible Dose for Internal
Radiation", New York, 1959.

Hoofdstuk IV LANGE TERMIJN GEZONDHEIDSEFFECTEN

1. Inleiding

De gezondheidsgevolgen van opgelopen radioactieve bestraling beperken zich niet tot de in hoofdstuk II besproken korte termijn gevolgen (stralingsziekten, sterfte) van de eerste dagen en maanden. Op lange termijn, vele jaren na een ongeluk waarbij een grote hoeveelheid radioactiviteit via de atmosfeer verspreid wordt, zullen zich nog schadelijke gevolgen voor de gezondheid voordoen. Dat zijn de zogenaamde laat-somatische en genetische effecten. We kunnen in feite onderscheid maken tussen twee categorieën stralingsoorzaken van lange termijneffecten. Enerzijds uitwendige straling tijdens het overdrijven van de radioactieve wolk en gedurende kort verblijf (1 dag) op radioactief besmette grond, benevens inwendige straling door ingeademd radioactief materiaal ("korte termijn stralingsbelasting"). Anderzijds de radioactieve bestraling gedurende lange tijd door verblijf in, door neerslag van radioactief materiaal, besmet gebied ("lange termijn stralingsbelasting"). In dit hoofdstuk zullen we nader ingaan op de omvang van de lange termijn gevolgen van de "korte termijn stralingsbelasting".

2. Laat-somatische effecten

2.1 Dosis-effect relatie voor kankerinductie: kwalitatief

Onder de laat-somatische effecten wordt verstaan het optreden van leukemie (bloedkanker) en tumoren (kankergezwellen), vaak vele jaren na blootstelling aan straling. Het is niet duidelijk of voor deze effecten een drempeldosis bestaat. In dat geval zouden beneden een bepaalde stralingsdosis deze effecten niet optreden. Omdat tot nu toe geen drempeldosis gevonden is gaat men in de regel, voorzichtigheidshalve uit van de aanname dat deze niet bestaat, zodat elke dosis hoe klein ook, tot kanker kan leiden. Daarbij is het niet zo dat ieder die een zekere stralingsdosis heeft opgelopen ook kanker zal krijgen: het optreden hiervan is een toevalsproces - verhoging van de stralingsbelasting vergroot de kans op kankerinductie en hoe hoger de stralingsdosis hoe groter deze kans wordt. Daarbij is het zo dat een dosis in één keer toegediend in de regel¹⁾ effectiever werkt m.b.t. kankerinductie dan wanneer deze dosis uitgesmeerd over langere tijd wordt opgelopen.

Zoals reeds eerder gesteld treden de kankerverschijnselen niet onmiddellijk na blootstelling aan straling op: er bestaat een z.g. latentieperiode na blootstelling waarin de verhoging van de kankerfrequentie praktisch nihil is terwijl deze daarna pas toeneemt gedurende een bepaalde tijd (de zgn. risicoperiode).

Schematisch is dit weergegeven in fig. IV-1

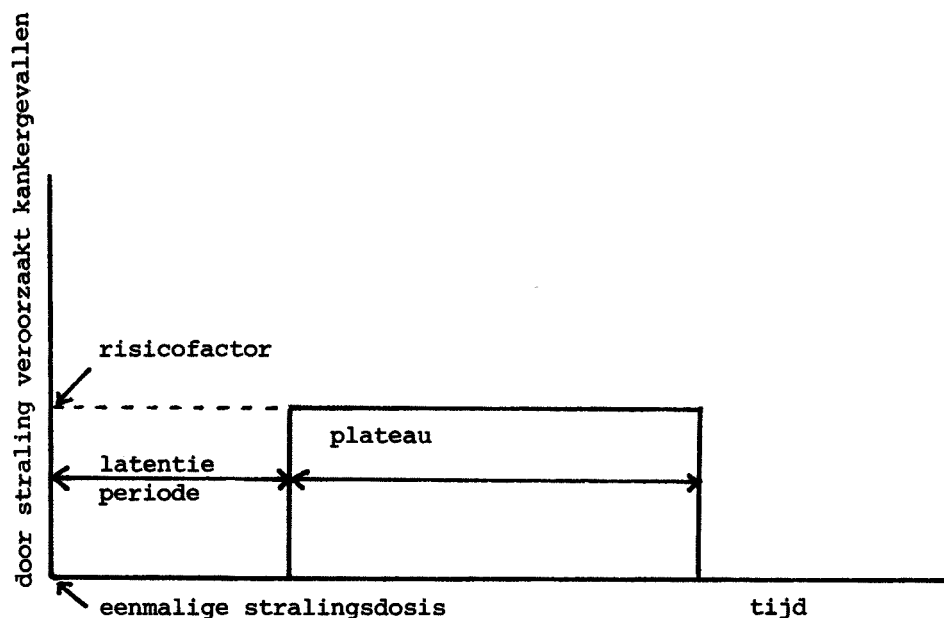


Fig. IV-1 Basismodel voor optreden van laat-somatische effecten

De latentieperiode voor leukemie is ongeveer 2 jaar met een risicoperiode daarna van ongeveer 25 jaar met afnemend risico na het 10e jaar (voor ongeboren kinderen zijn deze periodes resp. 0 en 10 jaar)^{1a)}.

Voor tumoren wordt veelal een latentieperiode van 10 à 15 jaar aangehouden en een risicoperiode van 30 tot 50 jaar²⁾. Een betrouwbare kwantitatieve schatting over het aantal kankergevallen t.g.v. een bepaalde stralingsbelasting van de bevolking is moeilijk te maken gezien de vele onzekerheden in de dosis-effect relatie³⁾. Tot deze onzekerheden behoren o.a. de dosis-effect relatie bij kleine doses, het optreden van synergetische effecten, en de extra gevoeligheid van speciale subpopulaties (rokers, astmapatienten).

Ondanks de vele onzekerheden m.b.t. deze laat-somatische effecten zijn in het verleden toch een aantal pogingen gedaan om de omvang van deze effecten te schatten. Daarbij moet men gebruik maken van een bepaald model m.b.t. de dosis-effect relatie. Het meest gehanteerde model is dat van een lineaire dosis-effect relatie waarbij het aantal kankergevallen evenredig is met de totale door de bevolking opgelopen stralingsdosis. Daarbij maakt het voor het aantal kankergevallen niet uit of 1 miljoen mensen elk 0.1 rem ontvangen of dat 10.000 mensen elk 10 rem dosis krijgen. Maar zelfs binnen deze aannamen kan men nog verschillende modellen hanteren die tot verschillende resultaten leiden. Bekend zijn bijvoorbeeld het in het BEIR-rapport⁴⁾ besproken absoluut risicomodel en relatief risicomodel. In het relatief risicomodel wordt uitgegaan van een evenredigheid tussen het door straling geïnduceerde aantal kankergevallen en de "spontane" kankerinductie. In het absoluut risicomodel gaat men uit van een vast aantal kankergevallen per stralingsdosis. Deze twee modellen kunnen al leiden tot grote verschillen in de schattingen (bijv. leidt voor de V.S. het relatief risicomodel tot een 5 maal zo hoge schatting als het absoluut risicomodel). Er bestaan echter nog andere modellen; de hoogste en laagste schatting in allerlei rapporten verschillen zelfs een factor 20.⁵⁾

Zonder daarmee een uitspraak te doen over de onderlinge waarde van de verschillende modellen zullen we onze schattingen baseren op het absoluut risico-model zoals dat ook in de Rasmussenstudie is gehanteerd. De enige functie van het geven van deze schattingen is het bepalen van de grootteorde waartoe een dergelijk model leidt. Een dergelijke gedachtenbepaling is een mogelijk uitgangspunt voor het aanbrengen van wijzigingen op basis van andere modellen.

2.2 Dosis-effect relatie voor kankerinductie: kwantitatief

Bij het bepalen van het aantal kankergevallen t.g.v. blootstelling van een deel van de bevolking aan straling zal tevens rekening gehouden moeten worden met de leeftijdsopbouw van de bevolking. O.a. omdat oudere mensen, statistisch gezien, door eerder overlijden, niet een volledige risico-periode meemaken. Anderzijds lopen b.v. ongeboren kinderen in de baarmoeder een veel hoger risico voor leukemie⁶⁾.

Voor mensen onder de 10 jaar stelt het BEIR-rapport⁷⁾ het risico voor kanker inductie op 1 sterftegeval per jaar per miljoen mensen t.g.v. leukemie en op

5 t.g.v. andere kankers (borst, long, maag, bot en andere).

Rekening houdend met de leeftijdsopbouw in de V.S. geeft het Rasmussenrapport een totaal van 122 gevallen van kankersterfte (exclusief schildklierkanker) t.g.v. blootstelling van de bevolking aan 1 miljoen manrem externe lichaamsstraling. De verdeling over de verschillende soorten kanker is gegeven in tabel IV-1⁸⁾.

Tabel IV-1. Verwachte kankersterfte per miljoen manrem externe straling

Soort kanker	verwacht aantal sterftegevallen per 10 ⁶ manrem
Leukemie	28.4
Long	22.2
Maag	10.2
Darmkanaal	3.4
Alvleesklier	3.4
Borst	25.6
Bot	6.9
Alle andere	21.6
Totaal (exclusief schildklier)	121.6

De Gezondheidsraad hanteert in haar rapport⁹⁾ een risicofactor van 200 gevallen van kankersterfte per miljoen manrem, met de restrictie dat dit niet erg nauwkeurig is en ook bijvoorbeeld tweemaal zo groot of zo klein kan zijn (exclusief schildklier kanker).

Niet alleen een totale lichaamsdosis leidt tot stralingsbelasting van allerlei lichaamsorganen. Zoals besproken in hoofdstuk III hopen zich, na inademing, radioactieve isotopen op in specifieke organen waardoor deze extra belast worden. In tabel IV-2 is, voor weerscategorie F, op een afstand van 30 km van de centrale op de windrichtingsas de interne stralingsbelasting weergegeven die specifieke organen gedurende de eerste 30 dagen en 30 jaar na het ongeluk, oplopen door ophoping in de organen.

Tabel IV-2 Stralingsbelasting t.g.v. concentratie van ingeademde radio-actieve isotopen in specifieke organen op een afstand van 30 km van de centrale (weerscategorie F).

lichaamsorganen	30 dagen dosis (rem)	30 jaar dosis (rem)
totale lichaam	3.8×10^2	1.3×10^3
lever	5.6×10^2	3.8×10^3
bot	1.3×10^3	2.0×10^4
milt	3.4×10^2	7.5×10^2
nieren	1.7×10^3	3.8×10^3
spierweefsel	9.6×10^1	5.7×10^2
manl. gesl. organen	1.9×10^2	2.0×10^2
alvleesklier	2.4×10^{-1}	3.1×10^{-1}
longen (onoplosbare deeltjes)	5.5×10^3	1.9×10^4
maag	5.4×10^1	5.4×10^1
dunne darm	6.9×10^1	6.9×10^1
dikke darm	6.3×10^2	6.3×10^2
endeldarm	7.4×10^3	7.4×10^3
schildklier	5.5×10^4	5.8×10^4

Bij het bepalen van de gevolgen van kankerinductie in de bevolking t.g.v. deze interne stralingsbelasting moet in principe rekening gehouden worden met de verandering in leeftijdsopbouw van de bevolkingsgroep die aan deze interne bestraling blootstaat. (Een deel van deze groep overlijdt door natuurlijke oorzaak; na 10 jaren b.v. is de leeftijdsgroep van 0-10 jaar niet onderhevig aan interne stralingsbelasting.) Hierdoor neemt het kanker-sterftecijfer per manrem interne straling die in latere jaren afgeleverd worden in deze bevolkingsgroep af, en wel, in het voor tabel IV-1 gebruikte model, van 122 per 10^6 manrem direct na het ongeluk tot 70 per 10^6 manrem 30 jaar later¹⁰⁾. De afname is evenwel voor de verschillende soorten kanker niet even sterk (zie tabel IV-3)¹¹⁾.

Tabel IV-3 Kankersterfte per 10^6 manrem interne straling, opgelopen gedurende specifieke perioden.

Soort kanker	Tijdsperiode (jaren) na ongeluk				
	0-1	1-20	11-20	21-30	31-40
Leukemie	28.4	27.2	18.7	13.8	9.7
Long	22.2	22.2	22.2	14.5	8.1
Maag/darm	13.6	13.6	13.6	8.9	5.0
Alvleesklier	3.4	3.4	3.4	2.2	1.3
Borst	25.6	25.6	25.6	16.8	9.4
Bot	6.9	6.7	5.0	2.6	1.6
Alle andere	21.6	19.8	17.1	11.2	6.3
Totaal	121.6	118.5	105.5	70.1	41.3

Bij de in dit rapport te geven ruwe schattingen op basis van het absoluut-risicomodel van late kankersterfte zullen deze verfijningen niet nauwkeurig in rekening worden gebracht. In het licht van eerdergenoemde onzekerheden zijn deze ook niet zo zinvol. Aangezien in de totale interne stralingsbelasting van de verschillende organen (exclusief schildklierdosis) van tabel IV-2, die van lever, bot, nier, long en endeldarmdosis overwegen en gegeven de in tabel 3 genoemde risicocijfers, is het voor ons doel voldoende nauwkeurig om een gemiddeld kankersterftcijfer per miljoen manrem voor de som van de interne doses van de specifieke organen te hanteren. Een redelijke orde van grootte wordt verkregen door dit cijfer gelijk te stellen aan $\frac{1}{10}$ van het risicocijfer voor totale lichaamsbestraling. We zullen voor dit laatste risicocijfer het getal van de Gezondheidsraad hanteren: 200 kankergevallen per miljoen manrem.

Voor berekeningen zal daarom in dit rapport als relevante dosis van de kankersterfte genomen worden, de som van de totale lichaamsdosis (extern en intern) en één tiende van de som van de interne doses van specifieke organen, met een sterftcijfer van 200 per miljoen manrem.

2.3 Schildklierkanker

De schattingen m.b.t. het optreden van schildklierknobbeltjes t.g.v. de stralingsbelasting lopen ook nogal uiteen. In het rapport van de Gezondheidsraad¹²⁾ wordt uitgegaan van een risicofactor voor het optreden van schildklierknobbeltjes t.g.v. radioactief jodium in de schildklier van 300 gevallen per miljoen manrem voor 0 tot 19-jarigen en van 100 per miljoen manrem voor ouderen. (De schildklierdosis voor kinderen bij eenzelfde hoeveelheid jodium is bovendien ongeveer 2 maal zo groot omdat de schildklier kleiner is dan bij volwassenen.) Verder wordt door de Gezondheidsraad aangenomen dat 90% een goedaardig karakter heeft en dat 10% kwaadaardige kankergezwellen zijn. Van deze laatste tumoren zou dan nog weer 90% te genezen zijn en 10% tot sterfte leiden.

In de Rasmussenstudie¹³⁾ wordt onderscheid gemaakt tussen interne bestraling van jodium-131 enerzijds en van interne bestraling t.g.v. andere isotopen en externe bestraling anderzijds. Jodium-131 zou daarbij slechts één tiende maal zo effectief zijn in het veroorzaken van schildklierknobbels als de andere categorie straling. Bovendien wordt uitgegaan van een maximumdosis waarboven geen schildklierknobbeltjes gevormd worden (meer dan 2500 à 5000 rem externe bestraling, of 50000 rem jodium-131 bestraling).

Bij een jodium-131 bestraling van meer dan 50000 rem treedt wel "verbranding" van de schildklier op.

De in de Rasmussenstudie gehanteerde dosis-effect relatie, is als gegeven in tabel IV-4.

Tabel IV-4 Dosis-effect relatie voor optreden van schildklierknobbeltjes

dosisgebied (rem)	Optreden schildklierknobbeltjes per 10 ⁶ manrem	
	goedaardig	kwaadaardig
<1500	200	134
1500-5000	100	67
>5000	0	0

De dosis is hierbij de som van de externe dosis, de interne dosis gedurende 30 dagen t.g.v. inademing van radioactieve isotopen, behalve jodium-131, plus ééntiende van de 30 dagen dosis van jodium-131.

Voor schattingen zullen we de relatie uit het Rasmussen-rapport hanteren. Het aantal gevallen van andere aandoeningen van de schildklier wordt ruw geschat van dezelfde orde van grootte te zijn als het aantal gevallen met schildklierknobbeltjes¹³⁾.

3. Genetische schade

Genetische schade is schade toegebracht aan geslachtscellen die overgedragen wordt aan volgende generaties waar ze zich kan uiten in velerlei meer of minder ernstige afwijkingen, zowel lichamelijke als geestelijke. Ook kan deze erfelijke schade leiden tot een toename van het aantal ziektes die voor een deel erfelijk bepaald zijn (b.v. bloedarmoede, epilepsie en schizofrenie). Bovendien kan deze erfelijke schade leiden tot een vermindering van weerstand tegen ziekten. Over de omvang van deze laatste effecten is zeer weinig bekend. Voor genetische schade geldt in nog sterkere mate dan voor de laat-somatische schade, dat, vanwege de vele onzekerheden¹⁴⁾, geen betrouwbare schatting van het aantal slachtoffers van deze schade te maken zijn.

Voor de duidelijker herkenbare afwijkingen geeft de Gezondheidsraad een schatting van 100 per miljoen manrem¹⁵⁾, maar dit kan volgens haar ook wel een factor 10 hoger of lager zijn. De in de Rasmussenstudie¹⁶⁾ gehanteerde risicofactor ligt in dezelfde orde van grootte, zij het dat nog wat meer verfijning is aangebracht in deze schatting. Gezien de vele onzekerheidsfactoren is deze verfijning voor onze schattingen, waarvan het doel slechts een eerste gedachtenbepaling is, niet zinvol. We zullen dan ook voor schattingen uitgaan van een risicofactor van 100 per miljoen manrem waarbij gerekend wordt met de stralingsbelasting (zowel extern als intern) van de mannelijke geslachtscellen die vermoedelijk de grootste bijdrage tot erfelijke schade levert¹⁷⁾. (Daarbij is de 30 jaar dosis interne bestraling slechts 5 à 10% hoger dan de 30 dagen interne bestraling.)

4. Omvang van laat-somatische en genetische schade in de scenario's

Op basis van de voorgaande beschouwingen zullen we nu een ruwe schatting geven van het aantal slachtoffers t.g.v. de laat-somatische en de genetische schade. De hiervoor relevante doses zijn gedefinieerd in appendix C. Alleen het aantal slachtoffers binnen Nederland is berekend (dat in de beschouwde gevallen het aantal in het buitenland verre overtreft).

4.1 Weerscategorie F

Bij de bepaling van het aantal laat-somatische en genetische slachtoffers moet rekening gehouden worden met het aantal mensen dat reeds in een vroeg stadium aan ernstige stralingsziekten overleden is. De totale stralingsbelasting van de bevolking, uitgedrukt in manrem, is dan ook alleen berekend over de overlevenden. Bij de bepaling van de omvang van de vroeg-somatische effecten is in hoofdstuk II een onderscheid gemaakt tussen situaties met en zonder (gedeeltelijke) afscherming van straling en een al of niet mogelijke evacuatie onmiddellijk na passeren van de radioactieve wolk. Dit leidde tot verschillende getallen voor het aantal vroeg-somatische slachtoffers. Hetzelfde onderscheid maken we hier voor de laat-somatische en genetische slachtoffers. De resultaten zijn weergegeven in tabel IV-5. Daarbij moet men bedenken dat pogingen tot evacuatie, onmiddellijk na passeren van de radioactieve wolk, in de regel slecht te combineren zijn met een effectieve afscherming tegen straling.

Tabel IV-5 Aantal gevallen van late kankersterfte (uitgezonderd schildklierkanker) en genetische defecten. Weerscategorie F.

onder aanname	kanker-sterfte	erfelijke afwijkingen
Geen afscherming, geen evacuatie	70000	9500
Geen afscherming, evacuatie na passage wolk	65000	9000
Afschermingsfactor $\frac{1}{2}$, geen evacuatie	50000	6500
Afschermingsfactor $\frac{1}{2}$, evacuatie na passage wolk	45000	6000

De schildklierdosis wordt praktisch geheel veroorzaakt door de interne stralingsbelasting van jodium isotopen die zich na inademing in de schildklier concentreren. Op basis van de in paragraaf 2.3 gegeven dosis-effect relatie schatten we het aantal ziektegevallen met schildklierknobbeltjes op 85000 waarvan 50000 met een goedaardig en 35000 met een kwaadaardig karakter. Bij de aanname dat van de kwaadaardige gezwellen 90% te genezen is leidt dit tot een sterftecijfer van 3500 door schildklier-

kanker. 'Wegbranden' van de schildklier t.g.v. zeer hoge stralingsdosis treedt alleen in die gebieden op waar men toch al slachtoffer is van ernstige stralingsziekten, en is daarom verder niet onderzocht. Naast het optreden van schildklierknobbeltjes kunnen zich nog andere aandoeningen van de schildklier voordoen waarvan de omvang volgens 2.3 in dezelfde orde van grootte ligt als het aantal gevallen met schildklierknobbeltjes. In totaal dus 170000 gevallen met schildklieraandoeningen. Omdat de stralingsbelasting vooral veroorzaakt wordt door interne stralingsbelasting, verandert evacuatie onmiddellijk na passeren van de radioactieve wolk niets aan dit beeld. Zoals in hoofdstuk II, 2.2.1.2. reeds opgemerkt is een afscherming tegen inademing van radioactief materiaal niet redelijkerwijs aan te nemen. Een vermindering van de schildklierdosis door afscherming, is dan ook niet aannemelijk.

4.2 Weerscategorie D

Onder deze meer onstabiele weersomstandigheden treedt een sterkere verdunning van radioactief materiaal in de atmosfeer op. De concentraties van de radioactieve stoffen in de lucht zijn lager, de gebieden waarover deze zich uitstrekken echter groter. In geval van regen is de stralingsbelasting door verblijf in besmette gebieden relatief van groot belang, zo niet overwegend. Daarom maken we voor het geval van regen nog onderscheid tussen al of niet onmiddellijke evacuatie na passage van de wolk.

4.2.1 Droog weer

Een ruwe schatting voor de laat-somatische kankersterfte, onder droge weerscondities, geeft een sterftecijfer van 10.000. Het aantal genetische defecten in latere generaties wordt geschat op 1200. Daarnaast wordt het aantal gevallen met schildklierknobbeltjes geschat op 43000, waarvan 26000 goedaardige en 17000 kwaadaardige gevallen. Indien 10% van de laatste gevallen sterfte veroorzaakt geeft dit een verhoging van het sterftecijfer met 1700.

Behalve het optreden van schildklierknobbeltjes kunnen zich nog andere aandoeningen van de schildklier voordoen. Dit aantal bedraagt naar schatting ook 43000. Deze resultaten zijn samengevat in tabel IV-6.

Tabel IV-6 Omvang van laat-somatische en genetische effecten.
Weerscategorie D, droog.

	aantal getroffen
late kankersterfte	10000
genetische defecten	1200
schildklierknobbeltjes - goedaardig	26000
schildklierknobbeltjes - kwaadaardig	17000
andere schildklieraandoeningen	43000
sterfte door schildklierkanker	1700

4.2.2 Regen

In tabel IV-7 zijn de verschillende schattingen gegeven voor late kankersterfte en genetische defecten. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen wel of geen evacuatie onmiddellijk na passage van de wolk. In het geval van 'geen evacuatie' is in de laat-somatische dosis de uitwendige stralingsbelasting meegerekend, die mee oploopt door verblijf gedurende 24 uur in besmet gebied. (Aangenomen is dat na 24 uur een evacuatie geëffectueerd kan zijn.) In geval van 'evacuatie' is deze 24 uren dosis niet meegerekend. Aangezien het niet waarschijnlijk is dat totale evacuatie van meer dan een miljoen mensen, onmiddellijk na passage van de radioactieve wolk gerealiseerd zal zijn, zal de werkelijkheid eerder tussen deze 'uitersten' liggen.

Tabel IV-7 Omvang van laat-somatische en genetische effecten,
Weerscategorie D, regen

Aantal gevallen van	geen evacuatie	evacuatie na passage wolk
late kankersterfte	9000	4000
genetische defecten	3000	300
schildklierknobbeltjes - goedaardig	17000	6500
schildklierknobbeltjes - kwaadaardig	12000	4000
andere schildklieraandoeningen	30000	10000
sterfte door schildklierkanker	1200	400

5. Waarschuwendende opmerking

Er zij nogmaals op gewezen dat de in het bovenstaande gegeven getallen zeer ruwe schattingen zijn. In de eerste plaats vanwege de in paragraaf 2 en 3 van dit hoofdstuk genoemde onzekerheden betreffende de dosis-effect relaties. Ten tweede vanwege het 'gestileerde' karakter van de scenario's. Er is daarom ook niet gestreefd naar grote nauwkeurigheid bij het bepalen van de totale stralingsbelasting van de bevolking, uitgedrukt in manrem. De berekende resultaten geven dan ook slechts een grootte-orde aan voor de beschouwde scenario's. Wel zijn de gegeven getallen in de meeste gevallen eerder te laag dan te hoog.

In het bovenstaande is de bepaling van het aantal slachtoffers in latere jaren ten gevolge van uitwendige bestraling, slechts gebaseerd op de stralingsdosis afgegeven door de overdrijvende radioactieve wolk en (in sommige gevallen) van de opgelopen stralingsdosis door een verblijf van 1 dag in radioactief besmet gebied. Indien de in hoofdstuk II en V genoemde, en op basis van huidige normen noodzakelijke, ontruiming van zwaar en licht besmette gebieden niet of pas later plaats vindt zal het aantal late slachtoffers nog aanzienlijk hoger kunnen oplopen.

Referenties hoofdstuk IV

1. Er zijn aanwijzingen dat bepaalde vormen van stralingsschade juist effectiever veroorzaakt worden bij lage doseringssnelheid. Zie hiervoor Boerderijcahier 7502, THTwente, p. III-8.
- 1a. "Reactor Safety Study: An assessment of accident risk in U.S. Commercial Nuclear Power Plants" WASH-1400, U.S. Regulatory Commission (october 1975), appendix VI, p. G.6. Hierna aan te halen als WASH-1400.
2. WASH-1400, app. VI, p. G-1 e.v.
3. "Kernenergie in Discussie: een beschouwing naar aanleiding van drie veiligheidsstudies", Boerderijcahier 7502, THTwente, (1975), hfdst. III.
4. Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR-rapport) NAS/NRC, Washington, (1972).
5. Boerderijcahier 7502, p. III-11.
6. BEIR-rapport, p. 171.
7. BEIR-rapport, p. 171.
8. WASH-1400, app. VI, p. 9-33.
9. Gezondheidsraad "Kerncentrales en Volksgezondheid", (sept. 1975), p. 4.11. Hierna aan te halen als GRR.
10. WASH-1400, app. VI, p. 9-34.
11. WASH-1400, app. VI, Tabel VI-9-5.
12. GRR, p. 4.11 en 6.17.
13. WASH-1400, app. VI, p. 9-27.
14. Zie hiervoor Boerderijcahier 7502, hfdst. III.
15. GRR, p. 4.19.
16. WASH-1400, app. VI, p. 9-40 en 9-41.
17. WASH-1400, app. VI, p. I-2.
18. WASH-1400, app. VI, p. 9-13.

Hoofdstuk V LANGE TERMIJN GRONDBESMETTING

1. Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken zijn de gevolgen van de korte termijn radioactieve besmetting besproken, d.w.z. t.g.v. de dosis die in de eerste dag opgelopen is (externe straling) of waarvan de oorzaak gelegen is in in het lichaam opgenomen radioactieve stoffen tijdens het overdrijven van de radioactieve wolk (interne straling).

Naast deze korte termijn stralingsbelasting zal men echter gedurende vele jaren nog aan radioactieve straling blootgesteld kunnen worden door verblijf in radioactief besmet gebied. Om dit te voorkomen zal een deel van het land voor bepaalde tijd onbewoonbaar moeten worden verklaard. Deze grondbesmetting met zijn consequenties voor bewoonbaarheid, landbouw en veeteelt is onderwerp van dit hoofdstuk.

2. Bewoonbaarheid

2.1 Weerscategorie F. Totale γ -dosis in één jaar

De bewoonbaarheid van een gebied zal bepaald worden door de stralingsdosis die men verkrijgt door verblijf in dit gebied en door de normen die daarvoor gelden. Als tamelijk absolute norm geldt natuurlijk dat men door verblijf niet op korte termijn ziek wordt. De eisen die hierdoor opgelegd worden m.b.t. een snelle evacuatie zijn besproken in hoofdstuk II par. 2.2.5 en 2.3.5.

Een strenger criterium voor bewoonbaarheid op langere termijn zal gekoppeld zijn aan de stralingsdosis die men zal krijgen als men gedurende een jaar in een bepaald gebied verblijft. Om een inzicht te krijgen is de besmettingsgraad van het land en de omvang van het besmette gebied uitgerekend. In fig. V-1 zijn een aantal grenzen aangegeven van deze jaardosis die men krijgt indien men één week na het ongeluk het gebied (na dus 1 week evacuatie) weer betreft. Binnen de grenslijnen ontvangt men dus altijd een hogere dosis dan op de grens. De buitenste grens (a) geeft het gebied aan waarbinnen de jaardosis hoger is dan 100 millirem. Met afscherming, bijvoorbeeld doordat men een gedeelte van de tijd binnenshuis vertoeft, is indien men hiervoor een afschermingsfactor 1/3 hanteert, deze jaardosis groter dan 30 millirem, de bovengrens die de Gezondheidsraad stelt voor omwonenden van een kerncentrale¹⁾. Het aantal mensen, woonachtig in dit gebied is 2.3 miljoen.

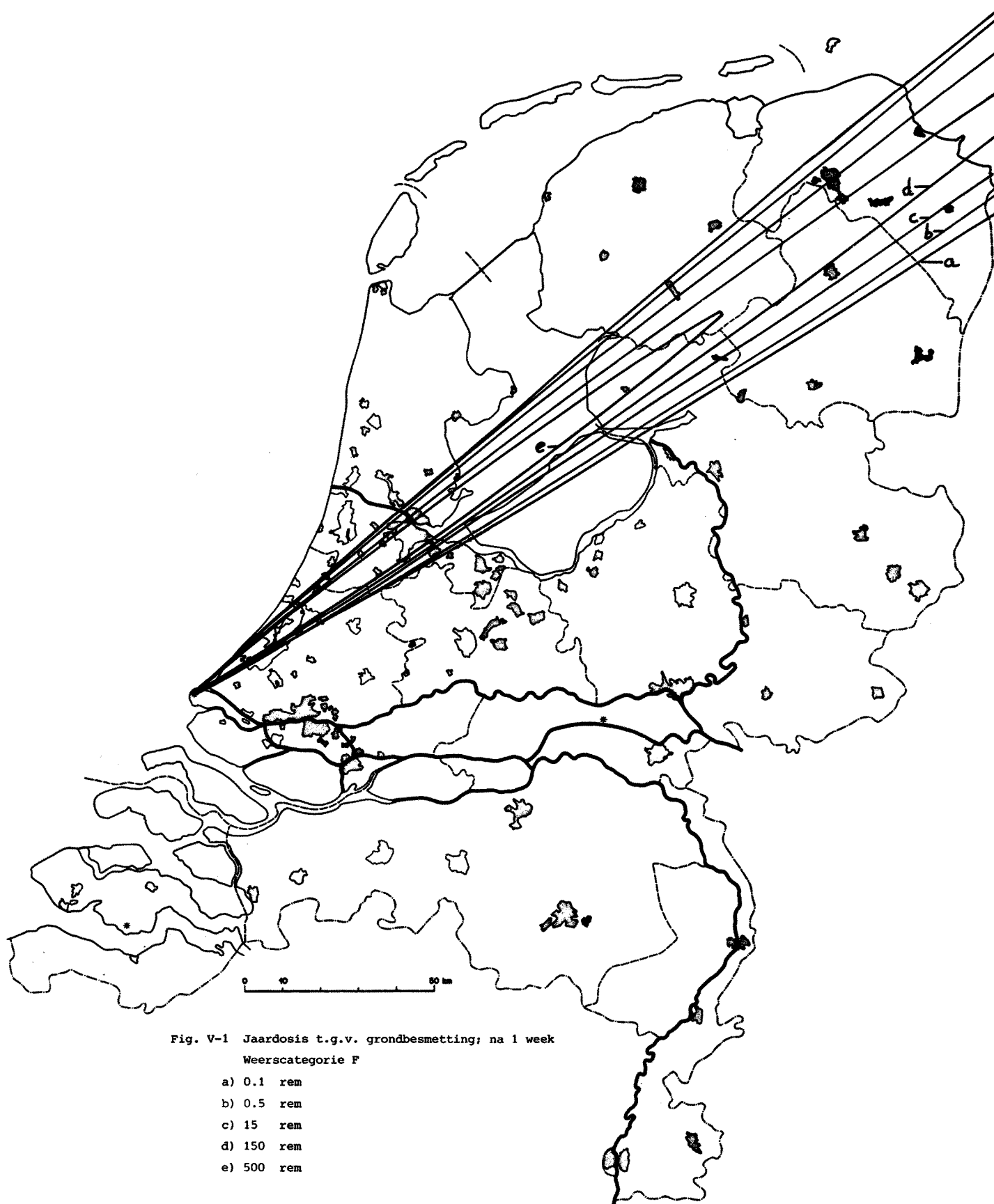
Lijn b geeft het gebied aan waarbinnen men, 1 week na het ongeluk, nog een jaardosis krijgt van 500 millirem onafgeschermd en dus 170 millirem bij afschermingsfactor 1/3. D.w.z. lijn b geeft het gebied aan waarbinnen men de stralingsnormen die de ICRP voor bevolkingsgroepen opgesteld heeft, overschrijdt. In dit gebied wonen ruim 2 miljoen mensen. Lijn c (15 rem) geeft vervolgens het gebied aan waarin men, rekening houdend met een afschermingsfactor 1/3 het door de Gezondheidsraad opgestelde noodreferentienivo van 5 rem voor kinderen en zwangere vrouwen overschrijdt²⁾. Dit is het gebied waarvan de Gezondheidsraad stelt dat dit "in eerste instantie onbewoonbaar is door hoge stralingsintensiteit"³⁾. Hierin zijn ongeveer 1.7 miljoen mensen woonachtig. Tenslotte zijn nog twee grenslijnen aangegeven, d en e, met de willekeurig gekozen grenswaarden van 150 resp. 500 rem (onafgeschermd).

Van belang is natuurlijk te weten hoe deze situatie verandert in de tijd. Daarom is in fig. V-2 en fig. V-3 aangegeven hoe de situatie na 1 jaar, resp. 5 jaar is. De lijnen a t/m e geven weer de grenzen aan waarbinnen men een stralingsdosis hoger dan de grenswaarde ontvangt indien men gedurende een jaar in dit gebied verblijft, maar nu niet vanaf 1 week na het ongeluk maar vanaf 1 jaar resp. 5 jaar na het ongeluk.

De figuren V-1 t/m V-3 illustreren een situatie waarover de Gezondheidsraad nauwelijks meer opmerkt dan: "Als gevolg van een reactorongeval kan men dus in de omgeving te maken krijgen met een jaren durende verhoging van de achtergrondstraling"^{3a)}.

2.2 Weerscategorie D

In fig. V-4 t/m V-6 zijn de gebieden weergegeven met dezelfde grenswaarden voor de 1-jaar dosis bij verblijf in deze gebieden, als voor weerscategorie F (uitgezonderd de 75 rem grens in fig. V-6). De figuren hebben weer betrekking op de jaardosis die men zou ontvangen indien men de betreffende gebieden 1 week, 1 jaar en 5 jaar na het ongeluk weer zou betrekken. Fig. V-4 t/m V-6 hebben betrekking op een situatie met droog weer. In fig. V-7 t/m V-9 zijn de besmettingsgebieden geschetst voor een situatie met regen. Het gebied waarin men gedurende het eerste jaar een stralingsdosis hoger dan 170 millirem (de ICRP-norm voor de bevolking) zou oplopen, rekening houdend met een afschermingsfactor 1/3, bevat in het geval van droog weer bijna 3 miljoen inwoners en in de situatie met regen 3,2 miljoen (lijn c in fig. V-5 en V-6). Het aantal inwoners in de gebieden met stralingsdosis hoger dan 5 rem (afschermingsfactor 1/3) zijnde het noodreferentienivo voor kinderen en zwangere vrouwen bedraagt in de situatie zonder en met regen resp. 1.5 milj. en 2 milj.



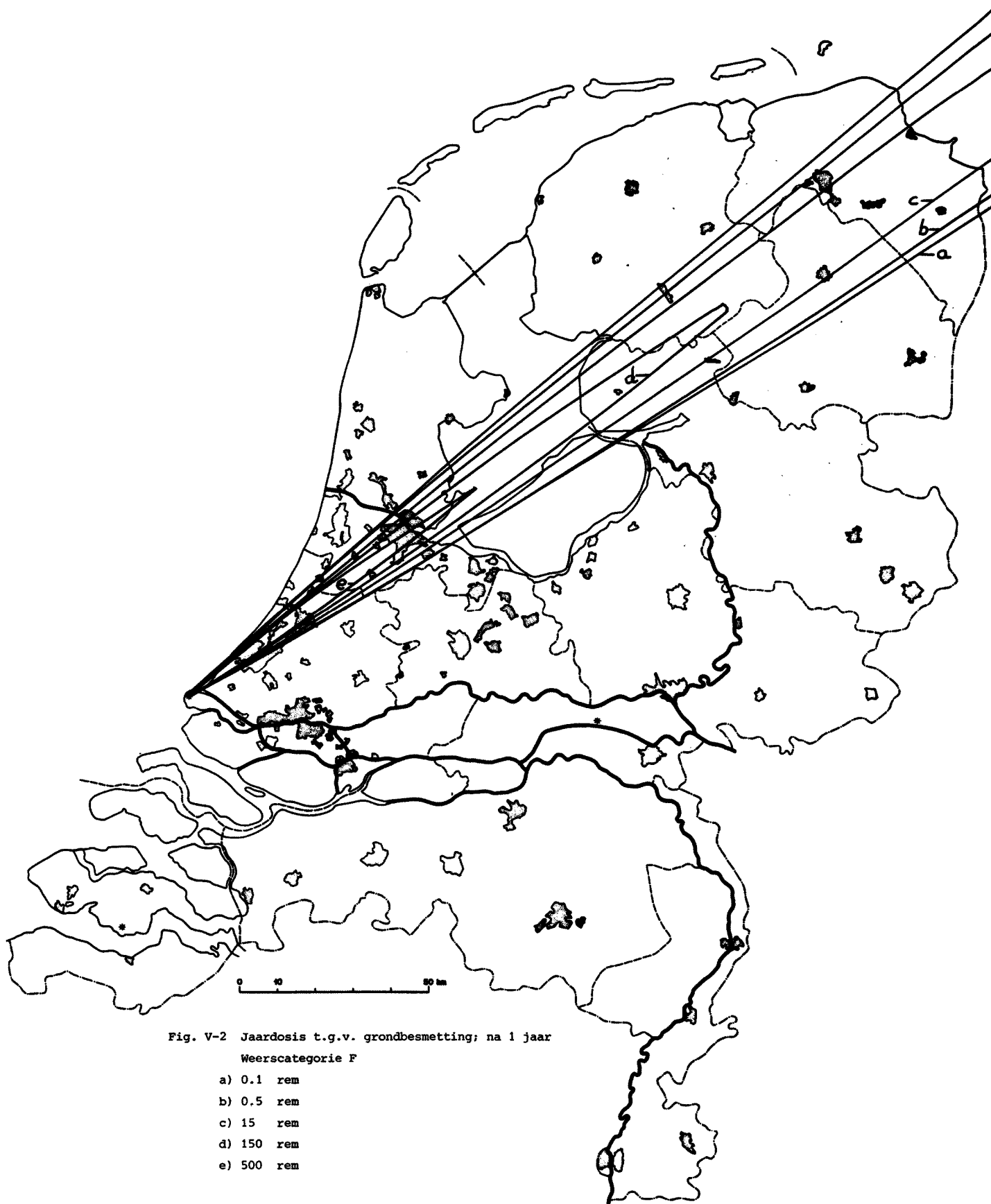
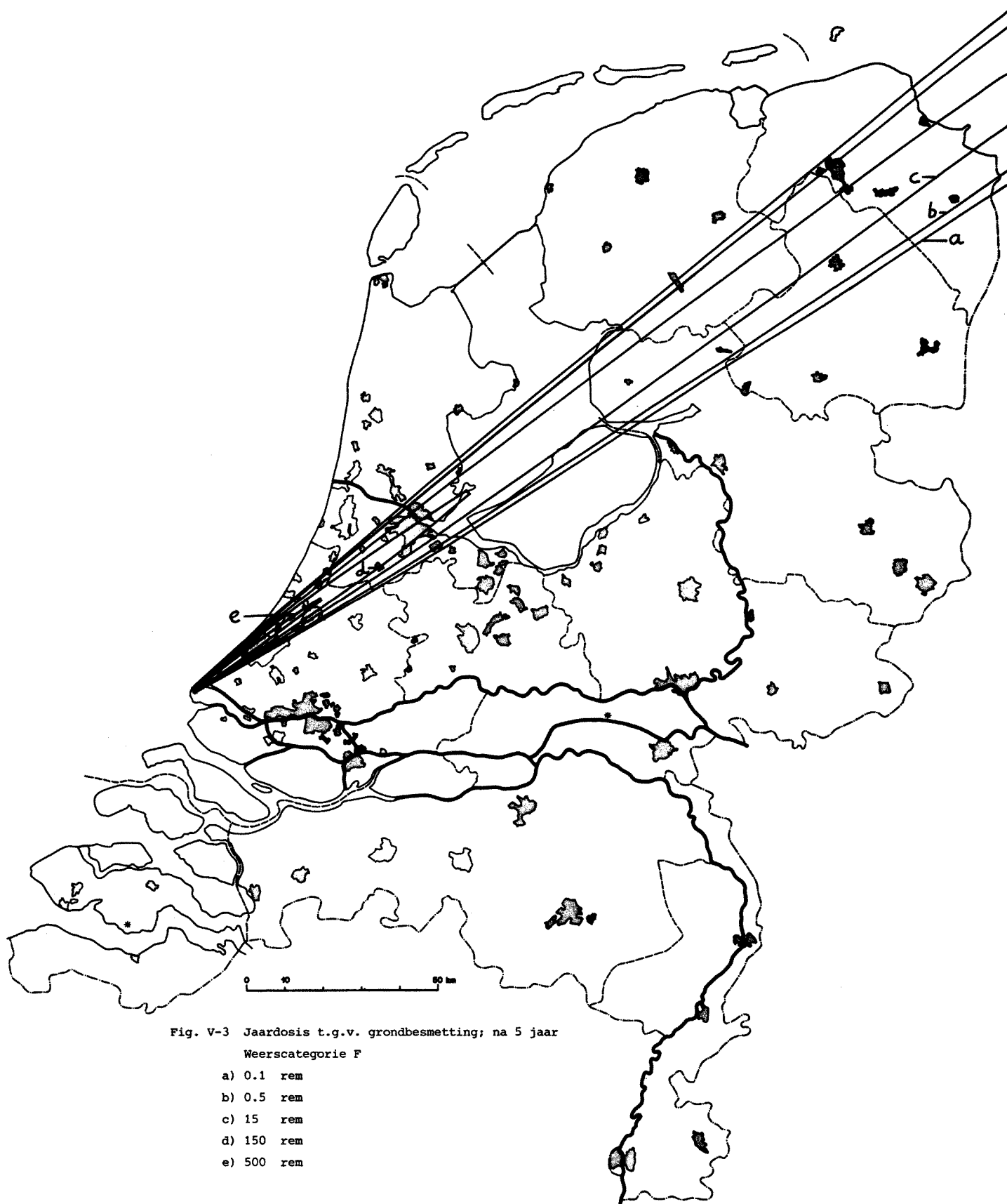
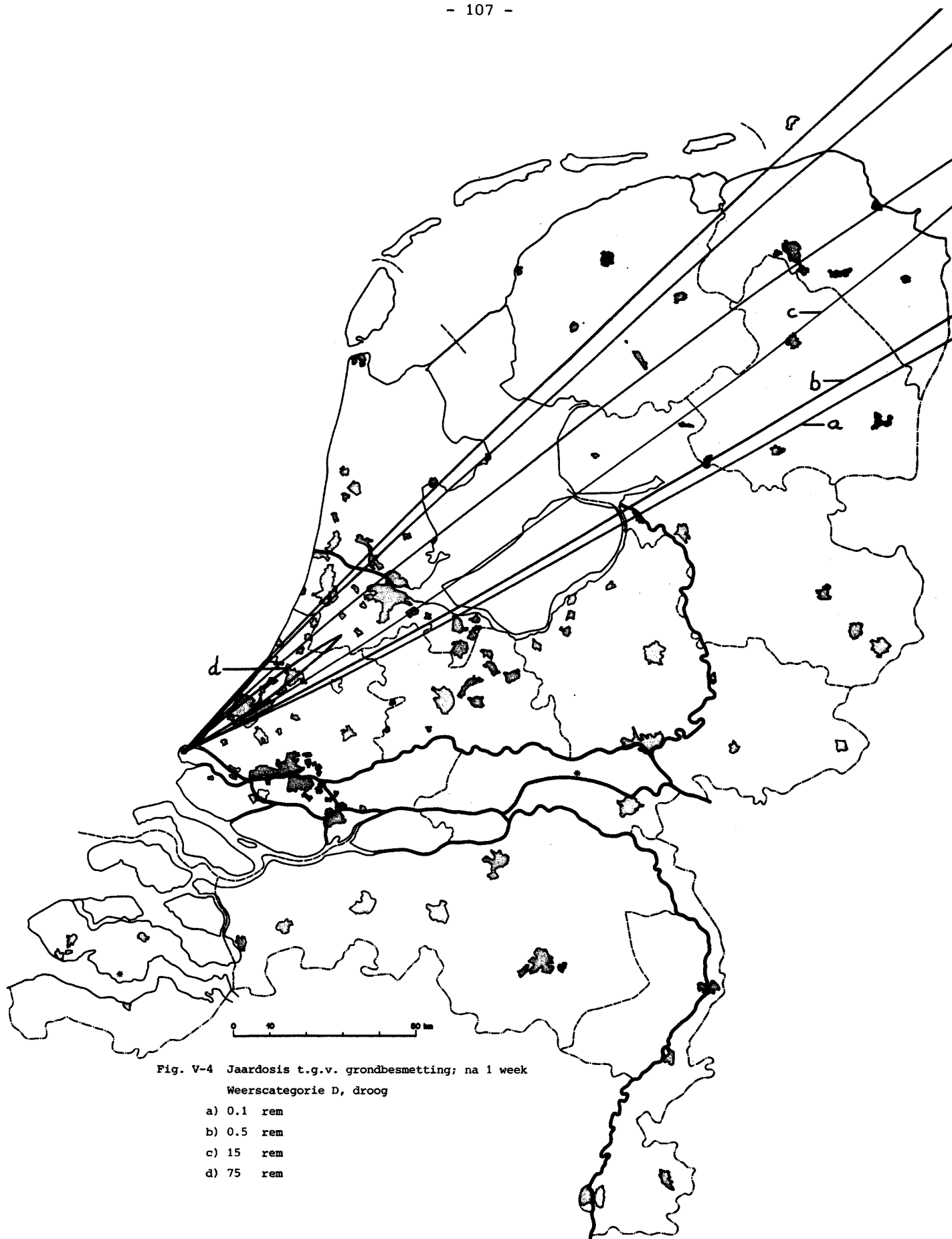


Fig. V-2 Jaardosis t.g.v. grondbesmetting; na 1 jaar
Weerscategorie F

- a) 0.1 rem
- b) 0.5 rem
- c) 15 rem
- d) 150 rem
- e) 500 rem





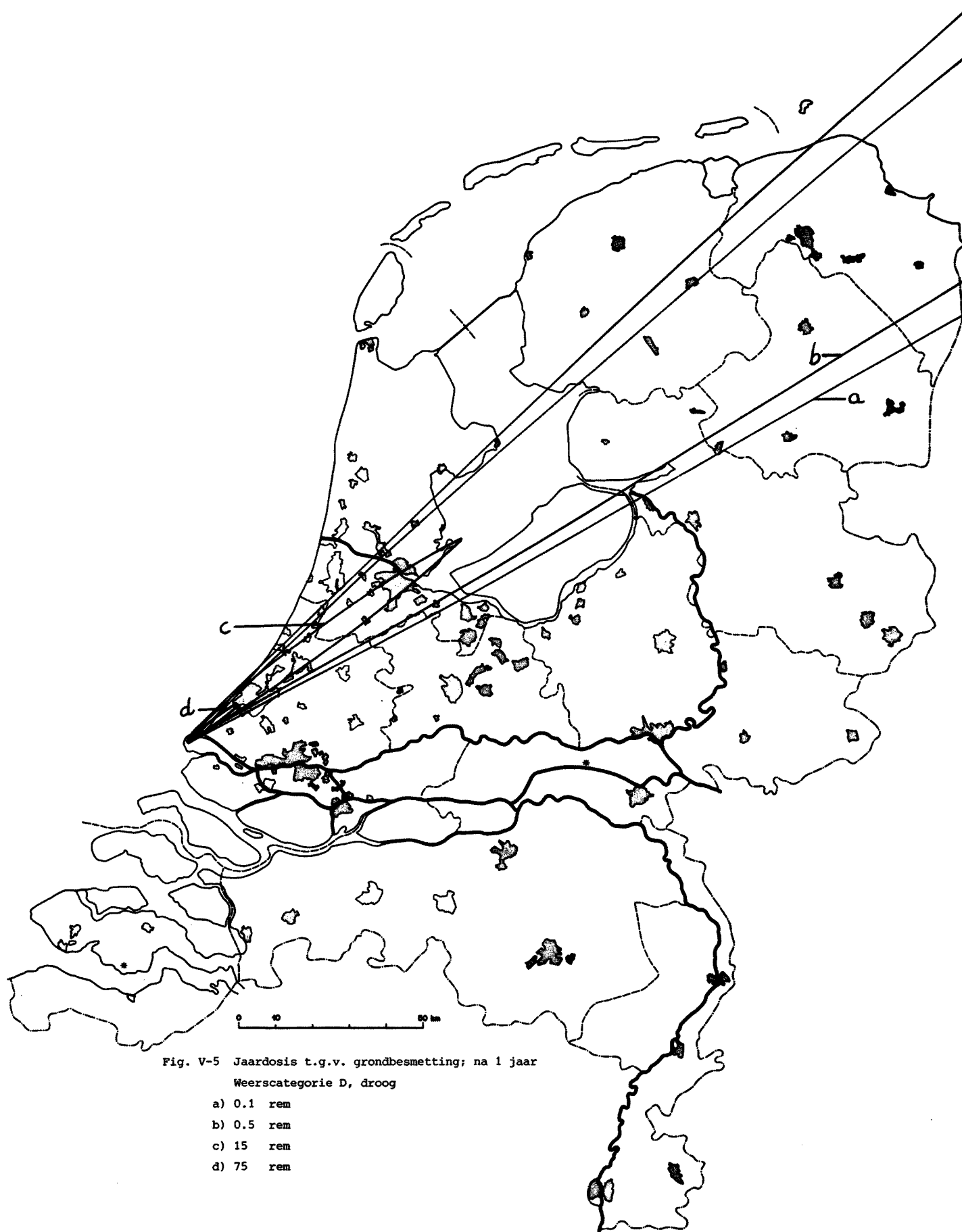


Fig. V-5 Jaardosis t.g.v. grondbesmetting; na 1 jaar
Weerscategorie D, droog

- a) 0.1 rem
- b) 0.5 rem
- c) 15 rem
- d) 75 rem

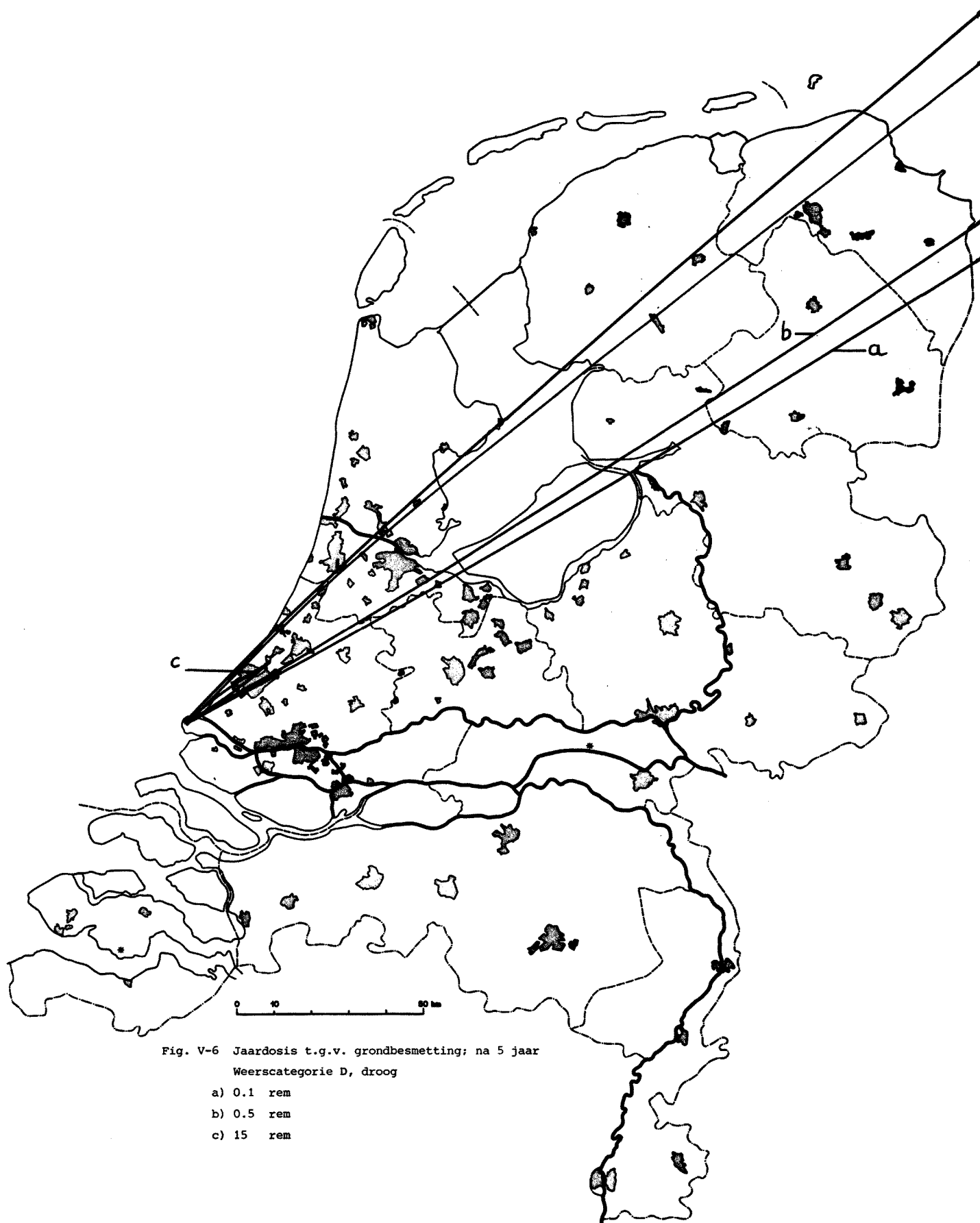


Fig. V-6 Jaardosis t.g.v. grondbesmetting; na 5 jaar
Weerscategorie D, droog

- a) 0.1 rem
- b) 0.5 rem
- c) 15 rem

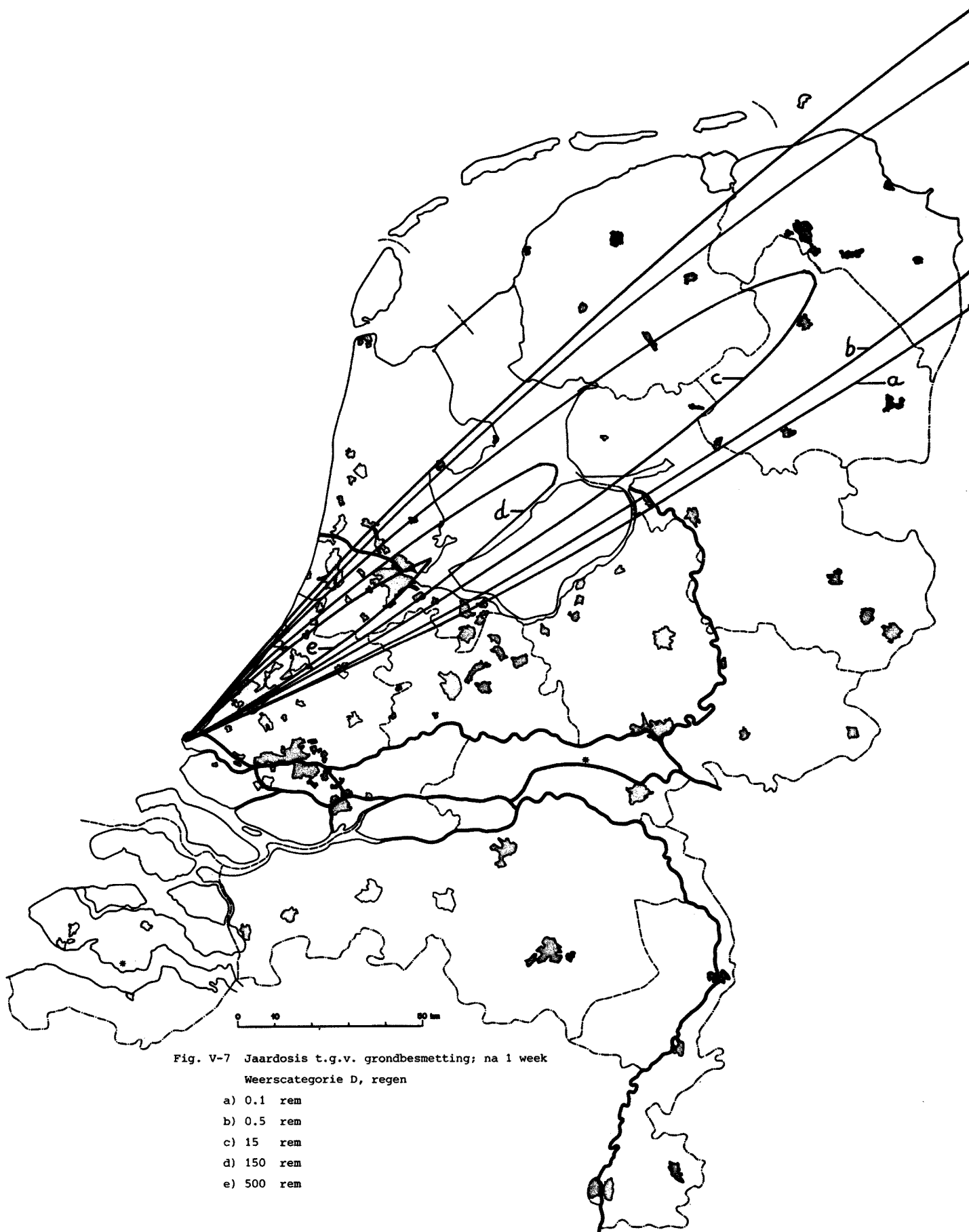
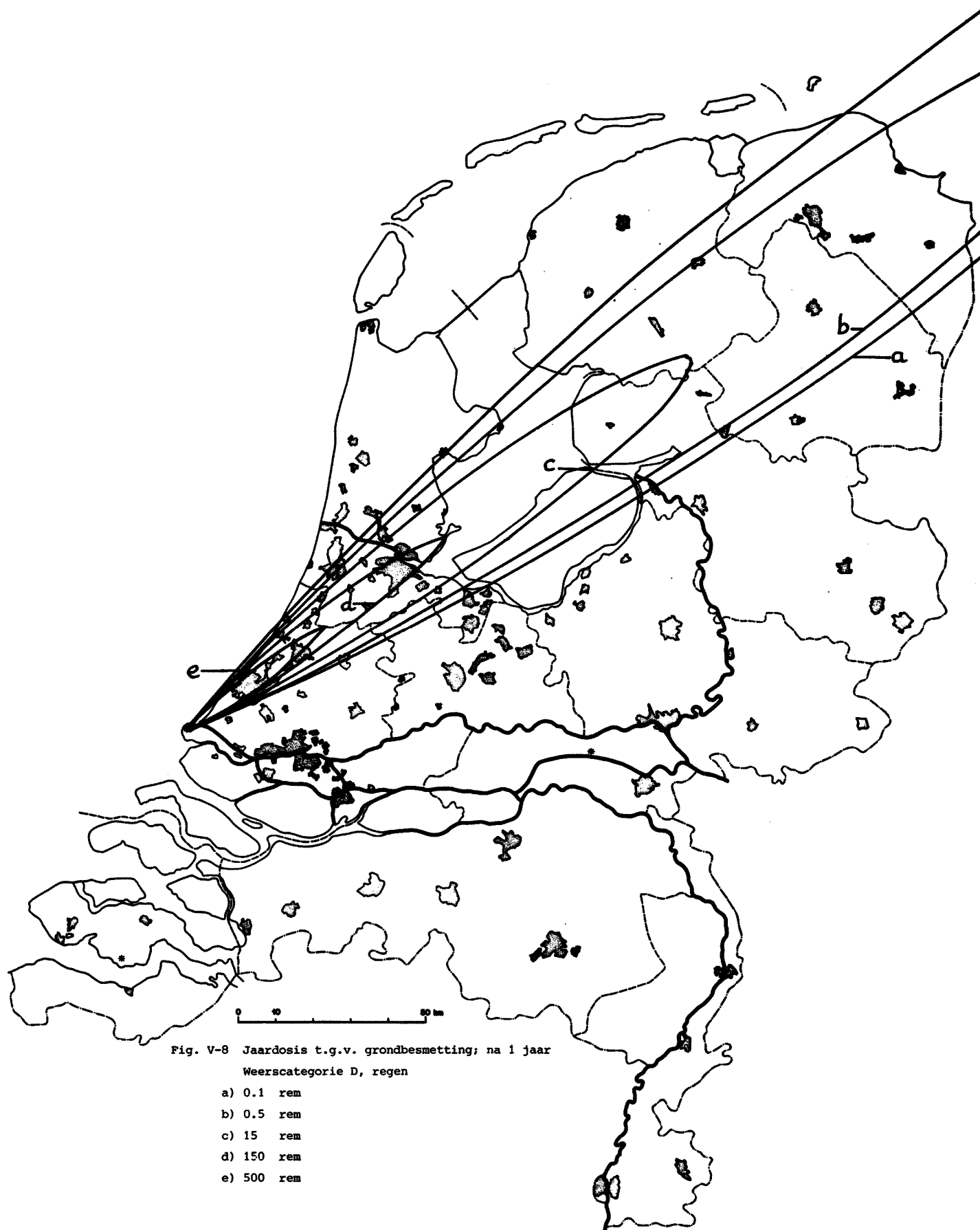


Fig. V-7 Jaardosis t.g.v. grondbesmetting; na 1 week
Weerscategorie D, regen

- a) 0.1 rem
- b) 0.5 rem
- c) 15 rem
- d) 150 rem
- e) 500 rem



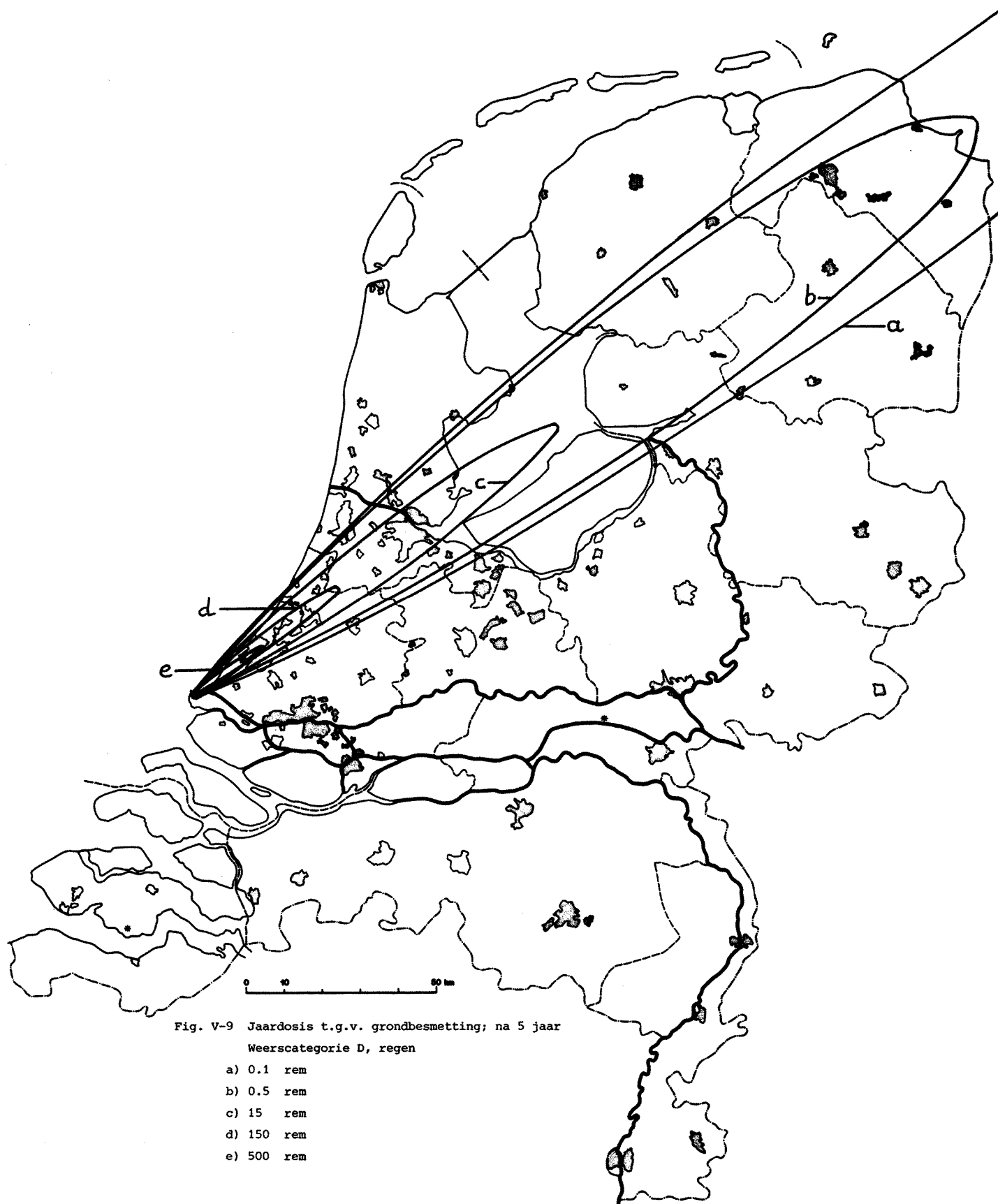


Fig. V-9 Jaardosis t.g.v. grondbesmetting; na 5 jaar
Weerscategorie D, regen

- a) 0.1 rem
- b) 0.5 rem
- c) 15 rem
- d) 150 rem
- e) 500 rem

2.3 Afhankelijkheid van de lange termijn besmetting van de weersomstandigheden

In hoofdstuk II bleek dat er aanzienlijke verschillen in de korte termijn gezondheidseffecten (stralingsziekten, sterfte) bestaan tussen weerscategorie F en D. Uit de fig. V-1 t/m V-9 blijkt nu dat de ernst van de lange termijn besmetting van het land veel minder sterk afhankelijk is van de weersomstandigheden. Slechts de structuur van de besmetting verschilt. In beide gevallen is zij echter rampzalig voor Nederland te noemen.

Bekijken we eerst het verschil tussen cat. F en cat. D met regen m.b.t. de zeer hoge besmettingsgraden (in de orde van 100 rem per jaar) dan zien we dat het belangrijkste verschil is dat de sigaarvormige besmettingsgebieden bij cat. D met regen, breder en korter zijn dan bij cat. F (zie fig. V-1 en V-7). De sterke langgerektetheid in cat. F wordt veroorzaakt door de geringe diffusie loodrecht op de windrichting en de daarmee samenhangende hoge concentratie op de windrichtingsas.

Ook m.b.t. de gebieden met lagere besmettingsgraden (lager dan 10 rem per jaar) doet zich een dergelijk verschil in vorm voor. Cat. D met regen geeft kortere bredere besmettingsgebieden dan cat. F. Dit effect veroorzaakt door diffusie loodrecht op de windrichting wordt nog versterkt doordat in de situatie met regen een relatief sterkere afname van de besmettingsgraad langs de windrichtingsas plaats vindt door een sterkere neerslag dichterbij de centrale door het uitregenen. De concentratie vermindering met de afstand is daardoor veel sterker dan in een situatie met droog weer.

Dit heeft ook tot gevolg dat bij cat. D met droog weer de besmettingsgraad dichterbij de centrale niet zo extreem hoog is als bij cat. D met regen, maar ook dat de gebieden met lagere besmettingsgraden in cat. D zonder regen, veel groter zijn dan in een situatie met regen, vooral op grotere afstand (vgl. fig. V-4 t/m V-6 met fig. V-7 t/m V-9).

In alle gevallen blijkt dat, wil men de op het ogenblik gehanteerde normen (van de ICRP, of de Gezondheidsraad) handhaven, een groot deel van Nederland (en ook van het buitenland) voor vele jaren onbewoonbaar zal zijn. Zeer hoge besmettingsgraden komen daarbij voor bij weerscategorie F, en D met regen. Onder weersomstandigheden gekarakteriseerd door D zonder regen is de besmettingsgraad lager maar zijn de besmette gebieden bij de lagere stralingsniveau's groter.

2.4 Bijdrage van cesium aan stralingsintensiteit

De bijdrage van de verschillende isotopen aan de totale stralingsintensiteit is tevens onderzocht. Het blijkt dat cesium, na 1 week, verreweg de belangrijkste bijdrage levert aan de uitwendige γ -bestraling bij verblijf op

besmette grond, n.l. ongeveer 75%. Bovendien neemt het relatieve aandeel van cesium in de loop der tijd toe. Het blijkt ook dat het isotoop Cs-134 de eerste 5 jaar een grotere bijdrage levert dan het Cs-137. De stralingsintensiteit t.g.v. deze isotopen is berekend met behulp van de in appendix C par. 5 vermelde UNSCEAR gegevens; daarbij is voor de uitspoeltijd van Cs-134 dezelfde tijd gebruikt als voor Cs-137.

Het verloop in de tijd van het relatieve aandeel van deze beide isotopen in de totale stralingsintensiteit is gegeven in tabel V-1.

Tabel V-1. Aandeel van Cs-134 en Cs-137 in stralingsintensiteit van besmette grond.

Tijdstip	Aandeel Cs-134	Aandeel Cs-137
1 week	62%	11%
1 jaar	79%	18%
5 jaar	54%	44%

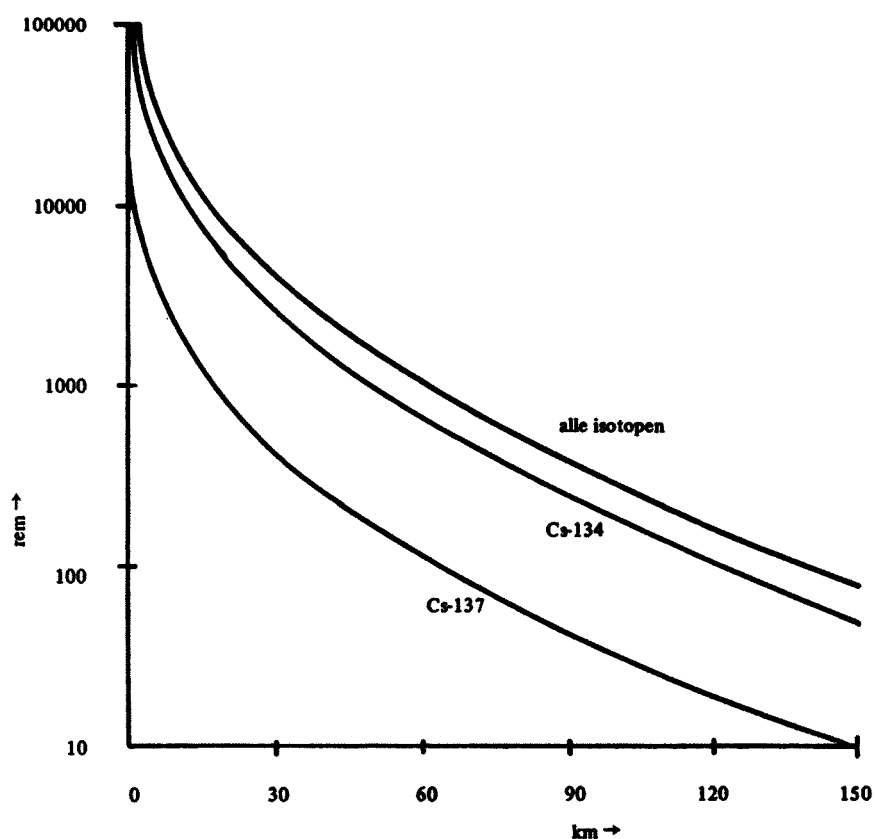


Fig. V-10. Stralingsintensiteit op windrichtingsas tgv grondbesmetting, jaardosis na 1 week

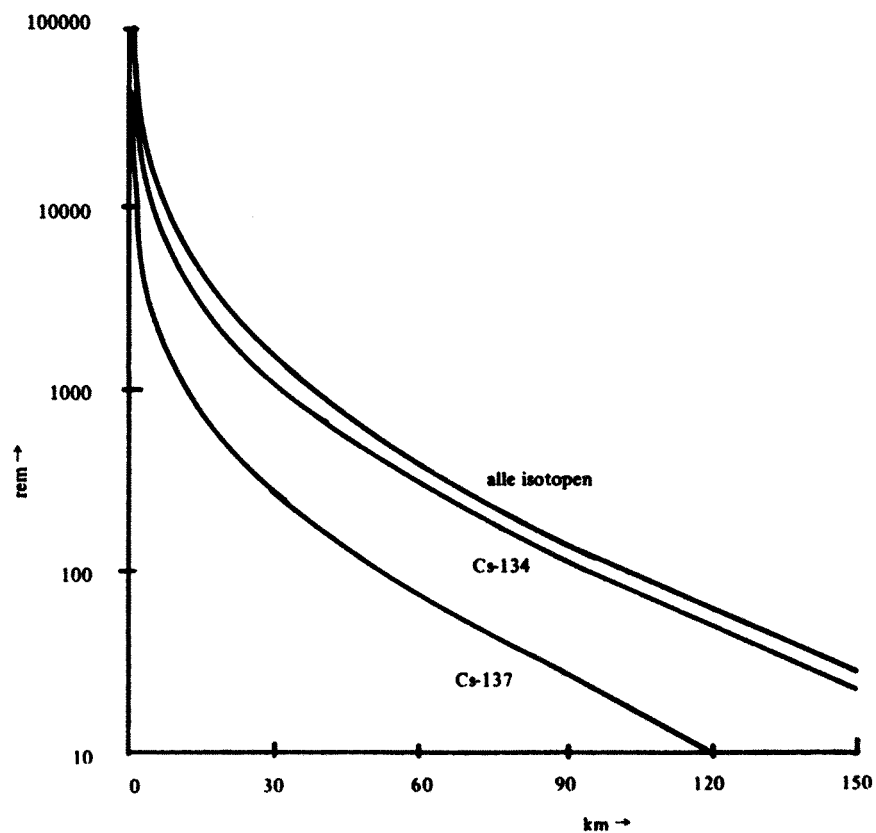
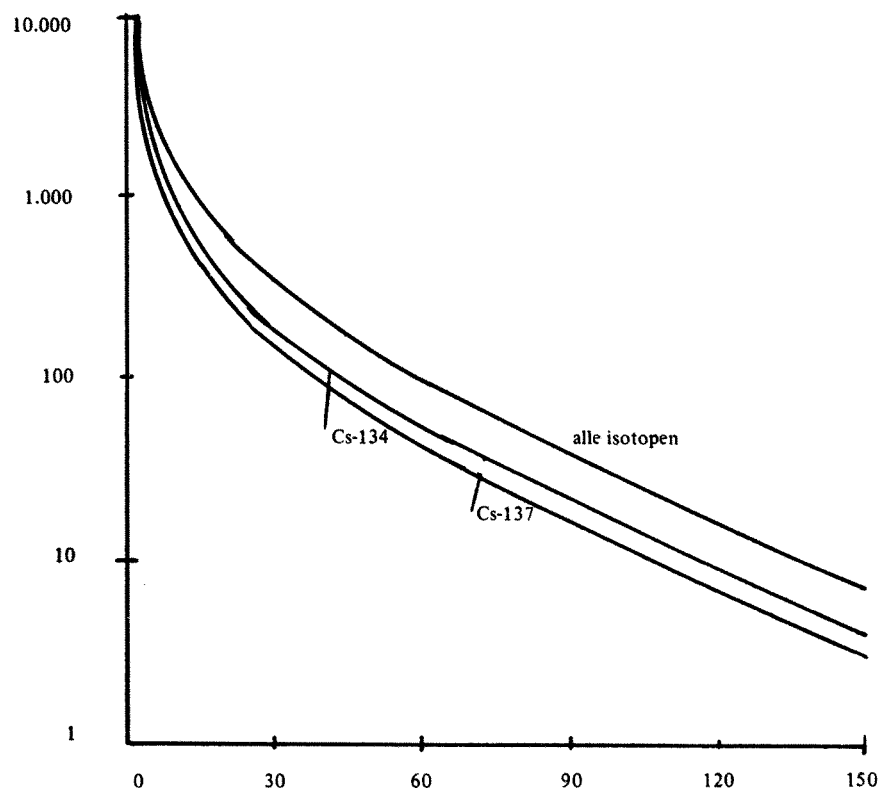


Fig. V-11. Stralingsintensiteit op windrichting na 1 jaar



Bovendien is voor weerscategorie D met regen, in fig. V-10 t/m V-12 de jaardosis gegeven, langs de as in de windrichting, als functie van de afstand tot de kerncentrale voor resp. 1 week, 1 jaar en 5 jaar na het reactorongeluk. Daarin is ook het stralingsniveau van Cs-134 en Cs-137 apart aangegeven. Tot op zeker 30 kilometer heerst een extreem hoge stralingsintensiteit.

Opmerkelijk is de belangrijke rol die Cs-134 (dat een radiologische halveringstijd van 2 jaar heeft) speelt. De eerste vijf jaar is deze zelfs belangrijker dan die van Cs-137 (radiologische halveringstijd 30 jaar). Dit heeft twee oorzaken. In de eerste plaats is de vrijkomende γ -energie per desintegratie voor Cs-134 twee en een half maal zo groot als voor Cs-137. In de tweede plaats is de door ons gebruikte hoeveelheid curie voor Cs-134 in de reactorkern ongeveer 2.5 maal zo groot als die voor Cs-137. Hier ligt een belangrijk verschil met de in het oorspronkelijke Rasmussenrapport gehanteerde hoeveelheden, welke door de Gezondheidsraad zijn overgenomen voor haar berekeningen. De hoeveelheden in het Rasmussenrapport zijn berekend met het ISOGEN-computerprogramma uit 1964⁴⁾. De door ons gebruikte hoeveelheden zijn gebaseerd op gegevens van Blomeke e.a. van 1974, die berekend zijn met het zgn. ORIGIN-computerprogramma⁵⁾. In tegenstelling tot de gegevens voor radioactieve inhoud van de kern heeft de Gezondheidsraad m.b.t. het radioactief afval wel de door haar gebruikte hoeveelheden van de (door haar beschouwde radioactieve isotopen) gebaseerd op het ORIGIN-computerprogramma⁶⁾. De studiegroep van de American Physical Society heeft, evenals de Gezondheidsraad, de gegevens betreffende de radioactieve inhoud van de reactorkern uit het Rasmussenrapport overgenomen. Tabel V-2 geeft een overzicht van de door verschillende auteurs gehanteerde reactorinhoud voor Cs-134 en Cs-137.

Tabel V-2. Reactorinhoud voor 1000 MWe kerncentrale van Cs-134 en Cs-137.

auteur	Cs-137 (Curie)	Cs-134 (Curie)
Rasmussenrapport, Gezondheidsraad en American Physical Society	5.8×10^6	1.7×10^6
Blomeke et. al., (ORNL-TM-3965)	6.5×10^6	16×10^6
Pigford ⁸⁾	6.6×10^6	14×10^6
RASIN-studie	4.7×10^6	7.5×10^6
Dit rapport	6×10^6	16×10^6

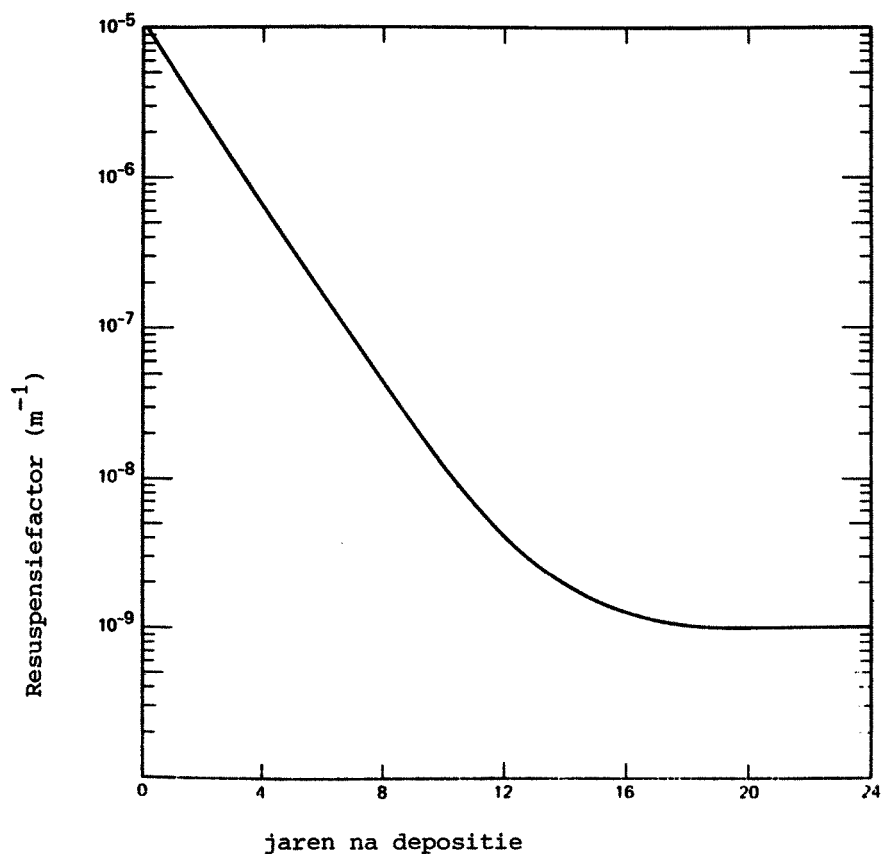
Ook de RASIN-studie⁷⁾ geeft voor Cs-134 een hogere inhoud dan voor Cs-137. Daarin is echter niet berekend wat de gevolgen hiervan zijn voor de besmetting van het land; deze zijn althans niet gepresenteerd in de RASIN-studie. Ten behoeve van de definitieve versie van het Rasmussenrapport zijn nieuwe berekeningen gemaakt voor de reactorinhoud van Cesium. De resultaten hiervan blijken dezelfde te zijn als in de RASIN-studie zijn gebruikt en bevestigen dat de Gezondheidsraad een aanzienlijke onderschatting heeft gemaakt.

2.5 Opwaaien van neergeslagen radioactieve deeltjes

In een met radioactief materiaal besmet gebied kan het neergeslagen materiaal weer gedeeltelijk opwaaien (resuspensie). Hierdoor zal zich in de atmosfeer, boven een dergelijk besmet gebied, een bepaalde concentratie van radioactieve deeltjes bevinden. Bij verblijf in een dergelijk gebied zal men daarvoor radioactieve deeltjes inademen. Deze kunnen zich in de longen afzetten en eventueel weer, via het bloed, opgenomen worden in specifieke organen. De concentratie van radioactief materiaal in de atmosfeer zal onder andere afhangen van de besmettingsgraad van het land. De verhouding tussen de concentratie van de radioactieve deeltjes in atmosfeer en die op het land is afhankelijk van vele factoren en kan daardoor sterk variëren. De verhouding tussen de concentratie in de atmosfeer (in Curie/m³) en die op het land (in Curie/m²) wordt de resuspensiefactor genoemd. In de Rasmussenstudie wordt uitgegaan van een resuspensiefactor van 10^{-5} m^{-1} , die in de loop van de tijd exponentieel afneemt tot een waarde van 10^{-9} m^{-1} (na 19 jaar)⁹⁾. Dit is weergegeven in fig. V-13.

Voor onderzoek van het belang van dit proces voor de lange termijn stralingsbelasting en de bewoonbaarheid van besmette gebieden gaan we uit van dezelfde resuspensiefactor. Op basis hiervan kan nagegaan worden bij welke graad van grondbesmetting de door de ICRP¹⁰⁾ maximaal toegestane concentratie in de atmosfeer, voor verschillende radioactieve isotopen overschreden wordt. (Daarbij zijn de toegestane concentraties voor de bevolking een factor 10 kleiner dan voor degene die beroepshalve aan straling bloot staan.) Voor de maximaal toegestane concentratie in de atmosfeer maakt de ICRP onderscheid tussen oplosbare en niet oplosbare vorm van de elementen.

Fig. V-13. Tijdsafhankelijkheid van resuspensiefactor



De oplosbare elementen worden vrij snel uit de longen in het bloed opgenomen. De onoplosbare deeltjes worden slechts langzaam uit de longen verwijderd en blijven voor een deel gedurende vele jaren in de longen radioactief werkzaam. De belangrijkste elementen voor dit type besmetting zijn ruthenium, plutonium, americium, curium, strontium en cesium, waarbij we er van uitgaan dat de eerste vier elementen in onoplosbare vorm aanwezig zijn terwijl strontium en cesium vrij snel in het bloed opgenomen zullen

worden. Indien plutonium in oplosbare vorm aanwezig zou zijn is de door de ICRP maximaal toegestane concentratie 15 maal zo klein.

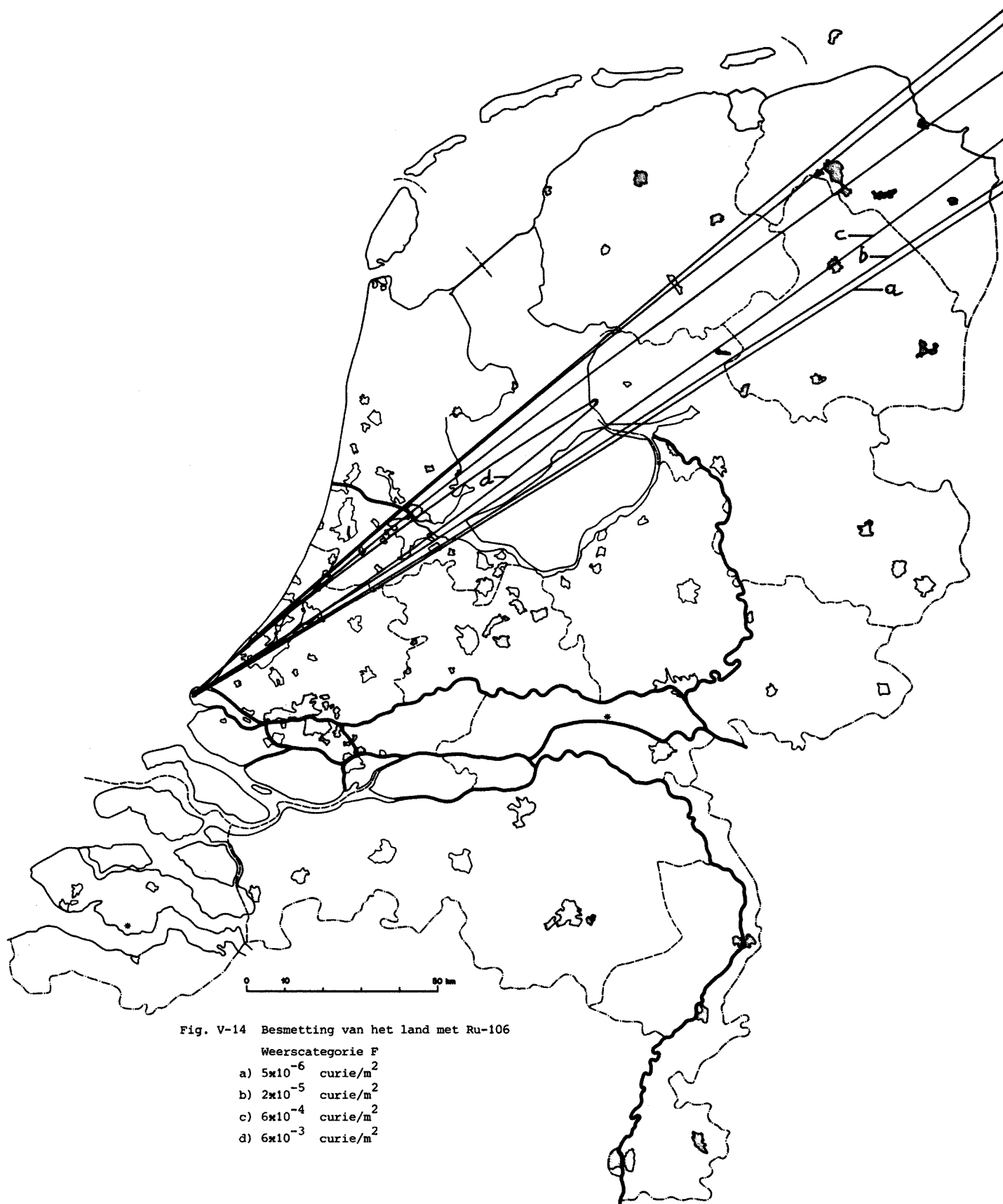
Ruthenium-106 heeft een halveringstijd van 1 jaar. De maximaal toelaatbare concentratie in de atmosfeer volgens de ICRP is 2×10^{-10} Curie/m³.

Met een resuspensiefactor van 10^{-5} ligt deze grens aanvankelijk bij een besmettingsgraad van 2×10^{-5} Curie/m². Voor de drie beschouwde weerscategorieën is de grenslijn weergegeven in de fig. V-14 t/m V-16. Door radioactief verval en daling van de suspensiefactor zal deze grenslijn verschuiven. Na 2.5 jaar loopt de grens volgens lijn c (aanvankelijke besmettingsgraad 6×10^{-4} Curie/m²) en na ruim 4 jaar volgens lijn d. (Niet getekend in fig. V-15.)

Plutonium-238 heeft een halveringstijd van 86 jaar. De maximaal toelaatbare concentratie (MTC) in de atmosfeer is volgens de ICRP voor de bevolking 10^{-12} Curie/m³ voor plutonium in onoplosbare vorm, dat zich in de longen afzet. (Als het in oplosbare vorm is zodat het, via het bloed opgenomen wordt in het bot is de MTC zelfs 7×10^{-14} Curie/m³.) In fig. V-17 t/m V-19 zijn voor de verschillende weerscategorieën de grenzen van 10^{-7} Curie/m² aangegeven, waarbinnen de MTC in de atmosfeer overschreden wordt. Als de resuspensie na 4 jaar met een factor 10 gedaald is zijn deze grenzen verschoven tot de lijnen van 10^{-6} Curie/m². (Niet aangegeven in fig. V-18.) Ook is nog de grens van 10^{-8} Curie/m² en 10^{-9} Curie/m² weergegeven.

In het algemeen zullen de gebieden waar deze ICRP norm overschreden wordt, reeds onbewoonbaar zijn op grond van overschrijding van de norm voor externe bestraling vanaf de besmette grond.

De ICRP normen voor plutonium zijn om verschillende redenen echter nogal omstreden. Gofman¹¹⁾ berekende dat de longkankerdosis voor reactor plutonium, 1.4×10^{-6} gram is voor niet-rokers. D.w.z. dat een hoeveelheid van 1.4×10^{-6} gram plutonium in de longen van een bevolkingsgroep gemiddeld zal leiden tot 1 longkanker geval. (Omdat het ontstaan van kanker een statistisch proces is maakt het niet uit of deze hoeveelheid nu verdeeld is over de longen van veel of weinig mensen.) Voor rokers berekende Gofman zelfs een longkankerdosis van 1.1×10^{-8} gram reactor plutonium. Nu correspondeert een concentratie van 10^{-12} Curie/m³ plutonium-238 met een concentratie van 3.2×10^{-12} gram/m³ reactor plutonium in de atmosfeer. Gemiddeld ademt een mens 7300 m³ lucht per jaar in en uit en ademt bij de genoemde concentratie 2.3×10^{-8} gram reactor plutonium in. Indien hiervan, 1/8 in de longen achterblijft¹²⁾, betekent dit na 1 jaar een longbelasting van 3×10^{-9} gram. Deze 1 jaars-dosis zou reeds bij een kwart van de rokers tot longkanker



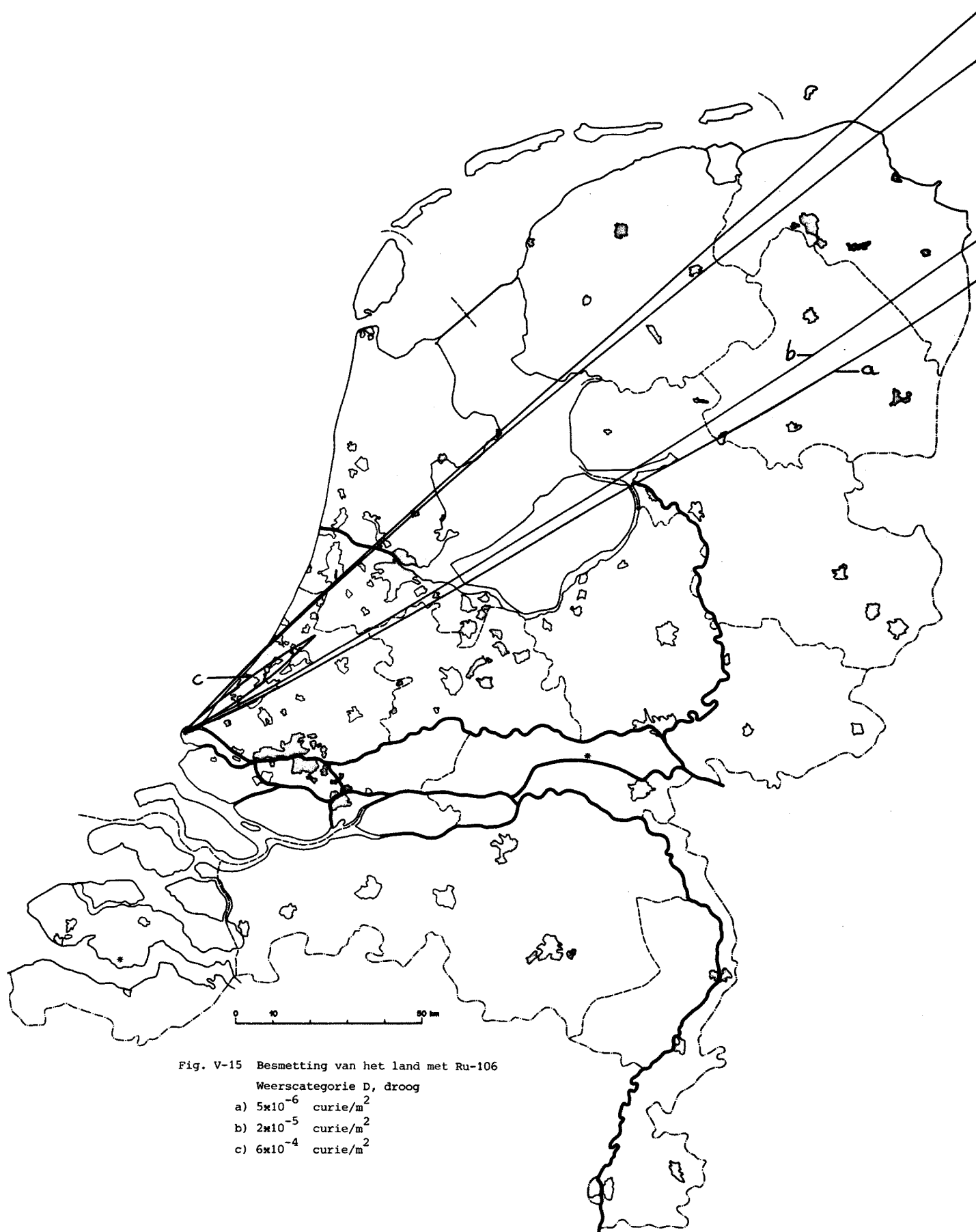
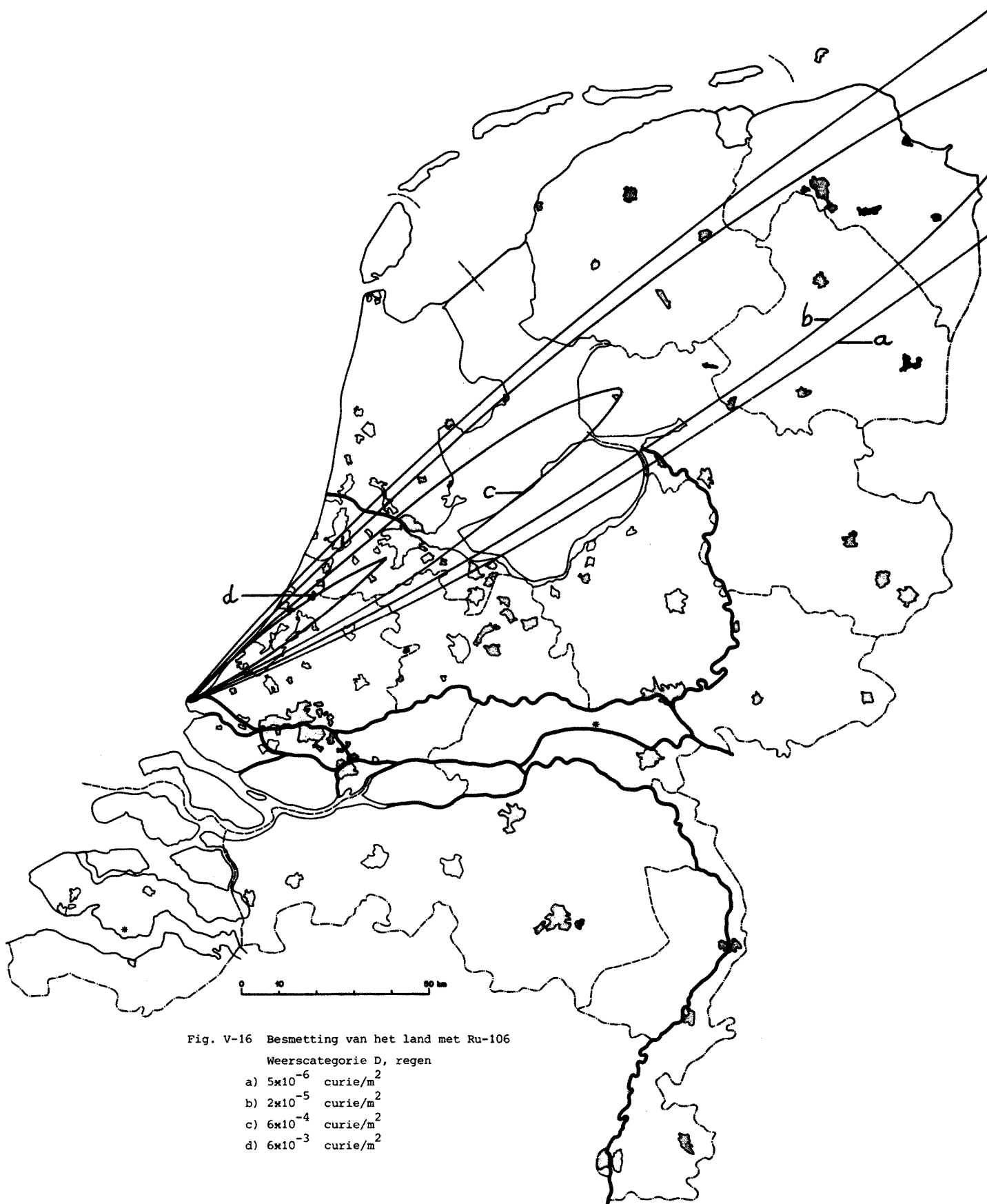
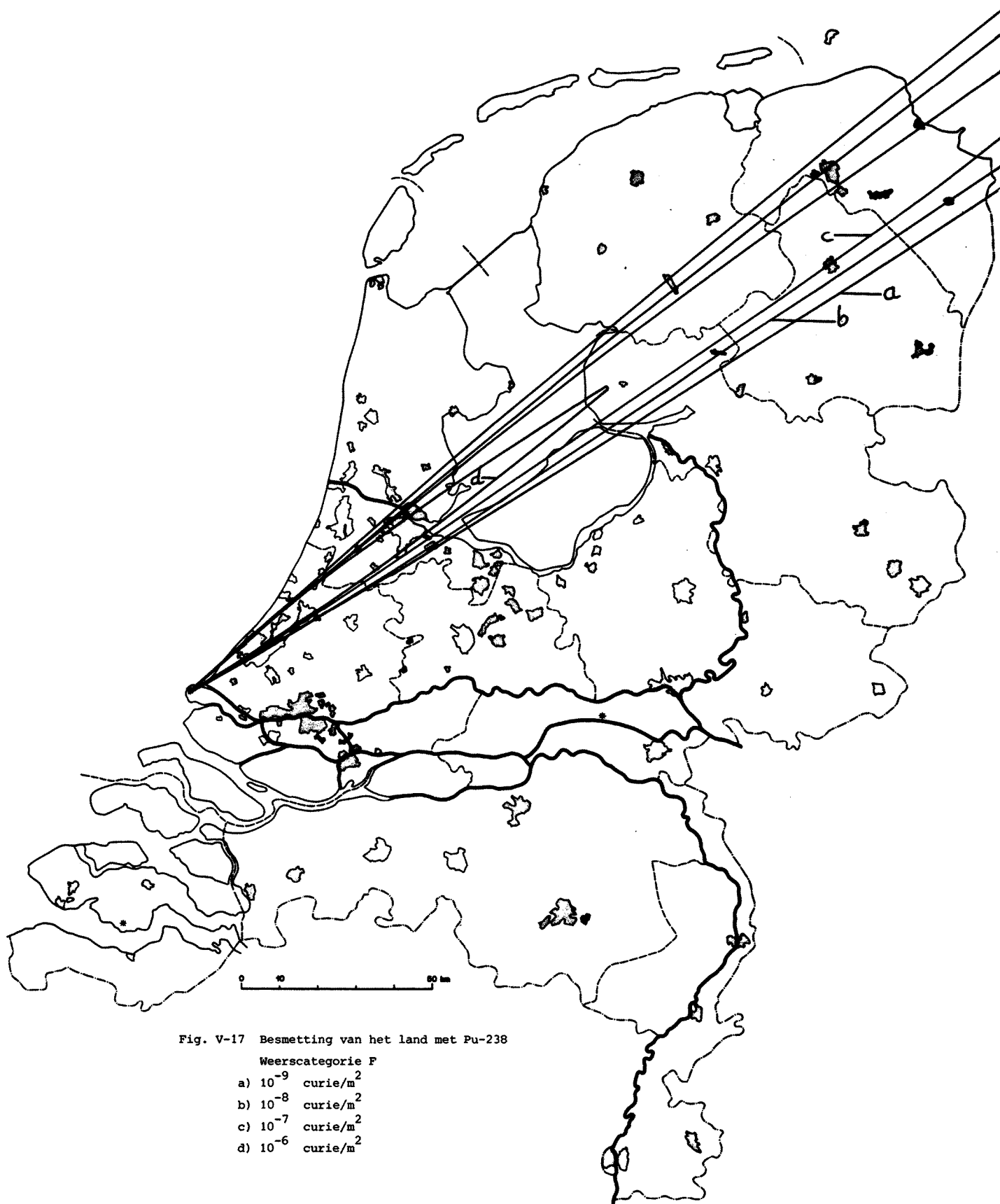


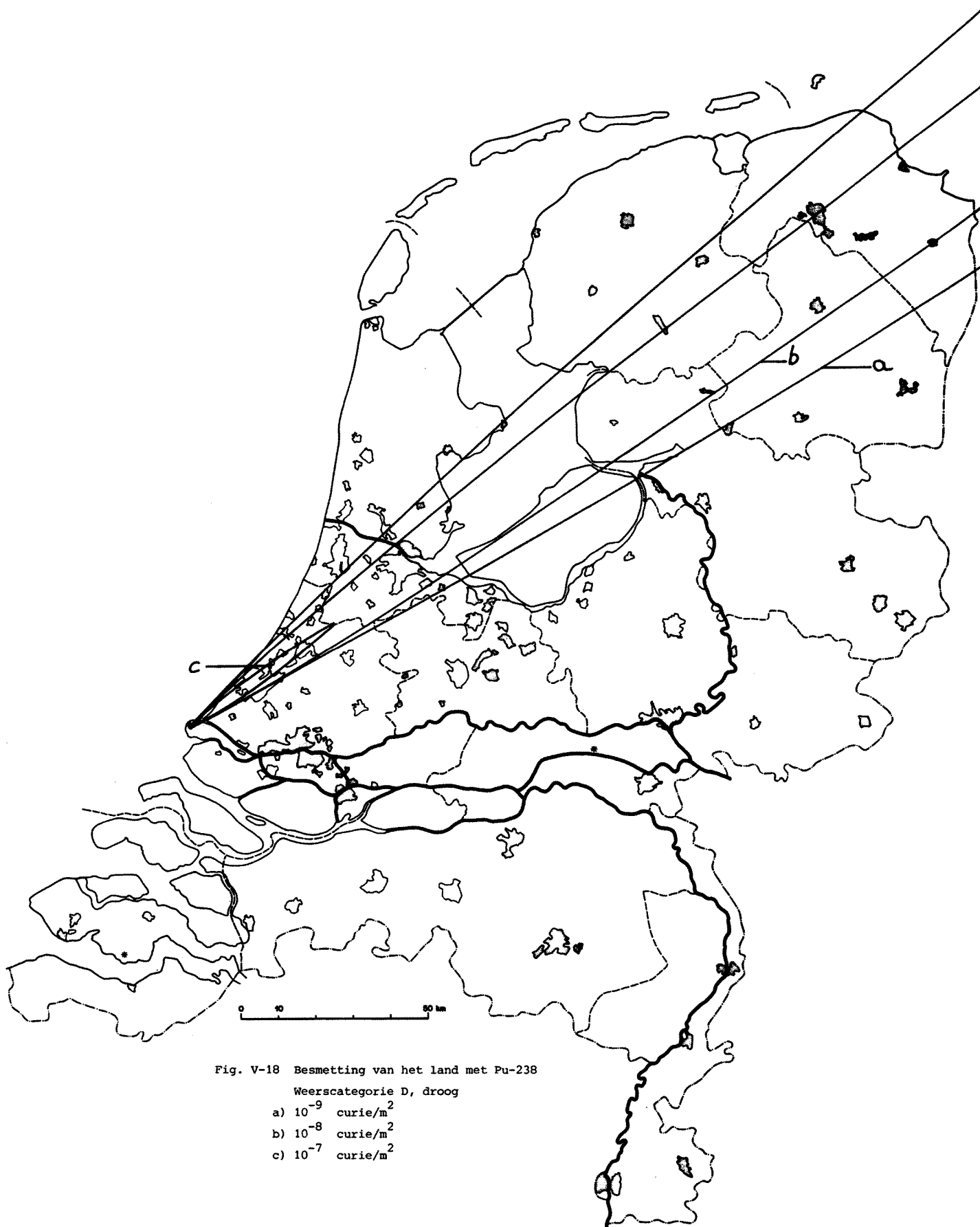
Fig. V-15 Besmetting van het land met Ru-106

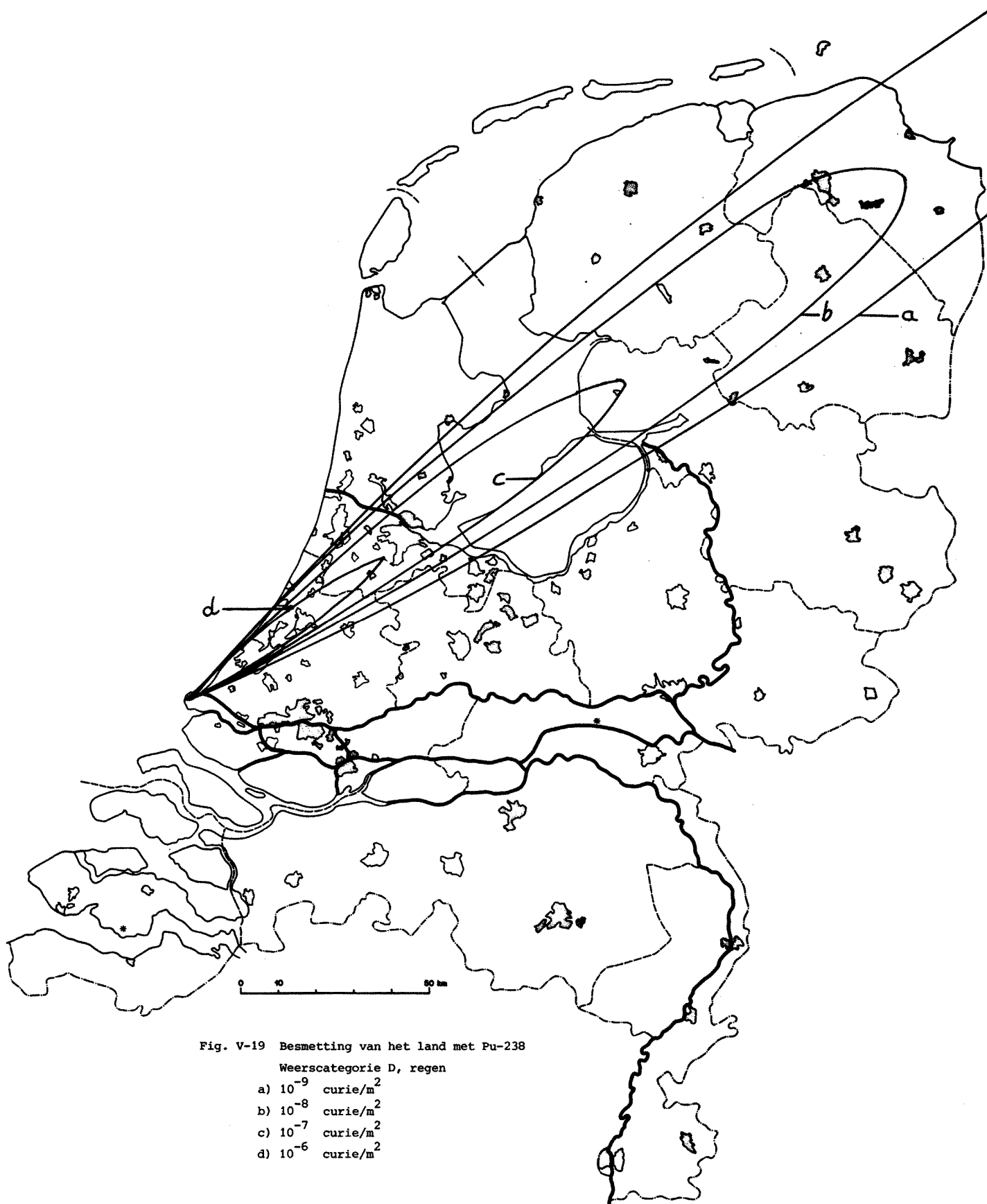
Weerscategorie D, droog

- a) 5×10^{-6} curie/m²
- b) 2×10^{-5} curie/m²
- c) 6×10^{-4} curie/m²









leiden en bij 0.2% van de niet-rokers. Blootstelling van een bevolking van bijvoorbeeld 2 miljoen mensen waarvan een kwart rokers zou t.g.v. deze 1 jaars dosis reeds aanleiding geven tot 128000 longkanker gevallen. Na 2 jaar zou de ingeademde (dubbele) hoeveelheid leiden tot het dubbele aantal (256000) gevallen. Indien de dosis-effect relatie inderdaad overeenkomstig de door Gofman aangegevene zou zijn, dan is deze norm van de ICRP veel te hoog en zou zeker enkele orden van grootte verlaagd moeten worden. In dat geval zou deze vorm van stralingsbelasting van hetzelfde belang kunnen worden als die van de externe bestraling t.g.v. grondbesmetting.

3. Gevolgen voor landbouw en veeteelt

3.1 Inleiding

Bij het overdrijven van een radioactieve wolk zal zich ook radioactief materiaal afzetten op gewassen op het land, zoals koren en gras. Bovendien zullen etenswaren hierbij besmet worden. Of de oogst na verloop van tijd weer bruikbaar is, zal afhangen van de mate van besmetting en van de halveringstijden van de radioactieve isotopen. Door de lange halveringstijden van vele isotopen zal het er echter op neerkomen dat de gehele oogst die ten tijde van het ongeval op het land stond, vernietigd moet worden, bij overschrijding van een bepaalde besmettingsgraad.

Een bijzondere positie neemt nog het grasland in. Via de keten gras-koe-melk-mens, kunnen belangrijke concentraties van radioactieve stoffen in verschillende organen komen. Bekend is bijvoorbeeld dat radioactief jodium langs deze weg hoge concentraties in de schildklier kan bereiken. Het isotoop Jodium-131 is het meest overwegend bij deze besmetting vanwege de grote hoeveelheid hiervan in de reactor (ongeveer 70 miljoen Curie) en zijn betrekkelijke lange halveringstijd van 8 dagen. Maar ook Jodium-129 is op zich een belangrijk isotoop, ondanks de kleine hoeveelheid (slechts 2 Curie) in de reactor. Het heeft echter een halveringstijd van maar liefst 17 miljoen jaar. Het wordt echter vaak buiten beschouwing gelaten, vermoedelijk vanwege de, ten opzichte van de gevolgen van jodium-131, relatief kleine korte-termijn effecten. Vergelijken we echter de dosis die de eierstokken van de vrouw na 30 jaar t.g.v. J-129 opgelopen kan hebben, met de dosis, die het bot in 30 jaar verkrijgt door besmetting van het gras met Sr-90, dan

is deze dosis (in verhouding tot de door de Gezondheidsraad genoemde normen) van dezelfde orde van grootte.

Van de grootte van de stralingsbelasting van een aantal organen t.g.v. een eenmalige besmetting van gras door radioactieve fall-out is een afschatting gemaakt door Yook e.a.¹³⁾. Zij gaan er hierbij vanuit dat het afspoelen van de radioactiviteit van het gras plaats vindt met een halveringstijd van 14 dagen. Dat betekent dat de besmettingsgraad van het gras hierdoor alleen, ongeacht de radiologische halveringstijd van de isotopen, in een half jaar met een factor van ongeveer 10000 is afgenomen. Na dit halfjaar zal dan ook de besmetting van gras door opname van radioactieve isotopen via de wortels uit de grond, en mogelijk oppervlakte besmetting van de grond gaan overwegen.

Op langere termijn wordt de bruikbaarheid van de grond voor agrarische doeleinden bepaald door de besmettingsgraad van het gewas door opname van radioactieve isotopen via de wortels uit de grond. Ook voor de hierdoor veroorzaakte stralingsbelasting in het lichaam hebben Yook e.a. een afschatting gemaakt. Zij hebben voor een groot aantal radioactieve isotopen berekend hoe groot deze dosis kan worden gedurende 30 jaar na het ontstaan van de besmetting van de grond. Voor elk isotoop is een kritisch orgaan aan te geven dat het sterkst belast wordt. Op basis van deze gegevens en met behulp van de normen voor diverse organen¹⁴⁾ is aan te geven hoe groot het gebied is dat ongeschikt is voor agrarisch gebruik t.g.v. elk isotoop afzonderlijk. Daarbij wordt uitgegaan van de dosis die men in de loop van 30 jaar na de kindertijd zou ontvangen.

Yook e.a. hebben getracht de maximum dosis te schatten die men door dit proces kan oplopen. Zij geven daardoor, zoals zij zelf stellen, waarschijnlijk voor een aantal isotopen een overschatting van de dosis. Hoe groot deze overschatting is, is moeilijk na te gaan. Voor Sr-90 correspondeert de dosis in elk geval ruwweg met de gegevens in het UNSCEAR-rapport¹⁵⁾. Om toch enigszins rekening te houden met een mogelijke overschatting en doordat d.m.v. diep ploegen de concentratie van de radioactieve stoffen in de grond wat verlaagd kan worden, zullen we hiervoor een correctiefactor gelijk 4 toepassen.

De besmettingsgraad zal in de loop der tijd verminderen, zowel door radioactief verval als door uitspoeling uit de grond. Over de snelheid waarmee dit uitspoelen geschiedt bestaat weinig kennis. Deze uitspoeling zal sterk

bepaald worden door grondsoort, regenval en chemische eigenschappen van de radioactieve stoffen. Het UNSCEAR-rapport van 1972 geeft voor Sr-90 een exponentiële afname door dit proces met een halveringstijd van 6 tot 10 jaar. Voor Cesium-137 worden halveringstijden voor het uitspoelproces genoemd van 5 en 23 jaar¹⁶⁾.

3.2 Besmetting van oogst en grasland

Meer dan honderd radioactieve isotopen in de reactorkern hebben een halveringstijd groter dan een halve dag. Door verspreiding van deze isotopen wordt oogst, voedsel, (drink-)water en grasland besmet. Door het eten van besmet voedsel of het drinken van melk van koeien die op besmet land ge-graasd hebben worden radioactieve stoffen opgenomen die zich kunnen afzetten in specifieke organen. We behandelen, als voorbeeld, 2 belangrijke isotopen uitvoeriger. Een hiervan is jodium, dat zich concentreert in de schildklier. Een zeer zware besmettingsgraad ontstaat door de verspreiding van jodium. In figuur V-20 t/m V-22 geeft lijn a de grens aan waar het grasland zo sterk (meer dan 1.5×10^{-6} Curie/m²) met Jodium-131 besmet is dat men door het drinken van de melk uit dit gebied een schildklierdosis van meer dan 25 rem zou krijgen. De halveringstijd van J-131 is 8 dagen zodat de besmettingsgraad t.g.v. radioactief verval ongeveer elke week met de helft daalt. Na 7 weken is de activiteit met een factor 100 gedaald en is lijn b (aanvankelijk 1.5×10^{-4} Curie/m²) de grenslijn van 1.5×10^{-6} Curie/m² geworden. Na 15 weken is de activiteit met een factor 10000 gedaald en geeft lijn c deze grenslijn aan.

Een veel langduriger besmetting van het grasland wordt veroorzaakt door Sr-90, dat een radiologische halveringstijd heeft van 28 jaar.

Volgens de in paragraaf 3.1 genoemde studie van Yook kan bij een besmetting van 5×10^{-7} Curie/m² de ICRP-norm¹⁷⁾ van 90 rem in het bot, het kritisch orgaan voor strontium, reeds overschreden worden door het drinken van melk uit een dergelijk besmet gebied.

In fig. V-23 t/m V-25 is met de lijn a het gebied aangegeven dat een hogere besmettingsgraad heeft dan 5×10^{-7} Curie/m².

Volgens de Gezondheidsraad¹⁸⁾ daalt de concentratie in twee jaar mogelijk tot 20% van het oorspronkelijk niveau. De grenslijn in fig. V-23 t/m V-25 verschuift in die tijd daardoor van a naar b. Door deze besmetting wordt de mogelijkheid van veeteelt dus zeer ernstig beperkt.

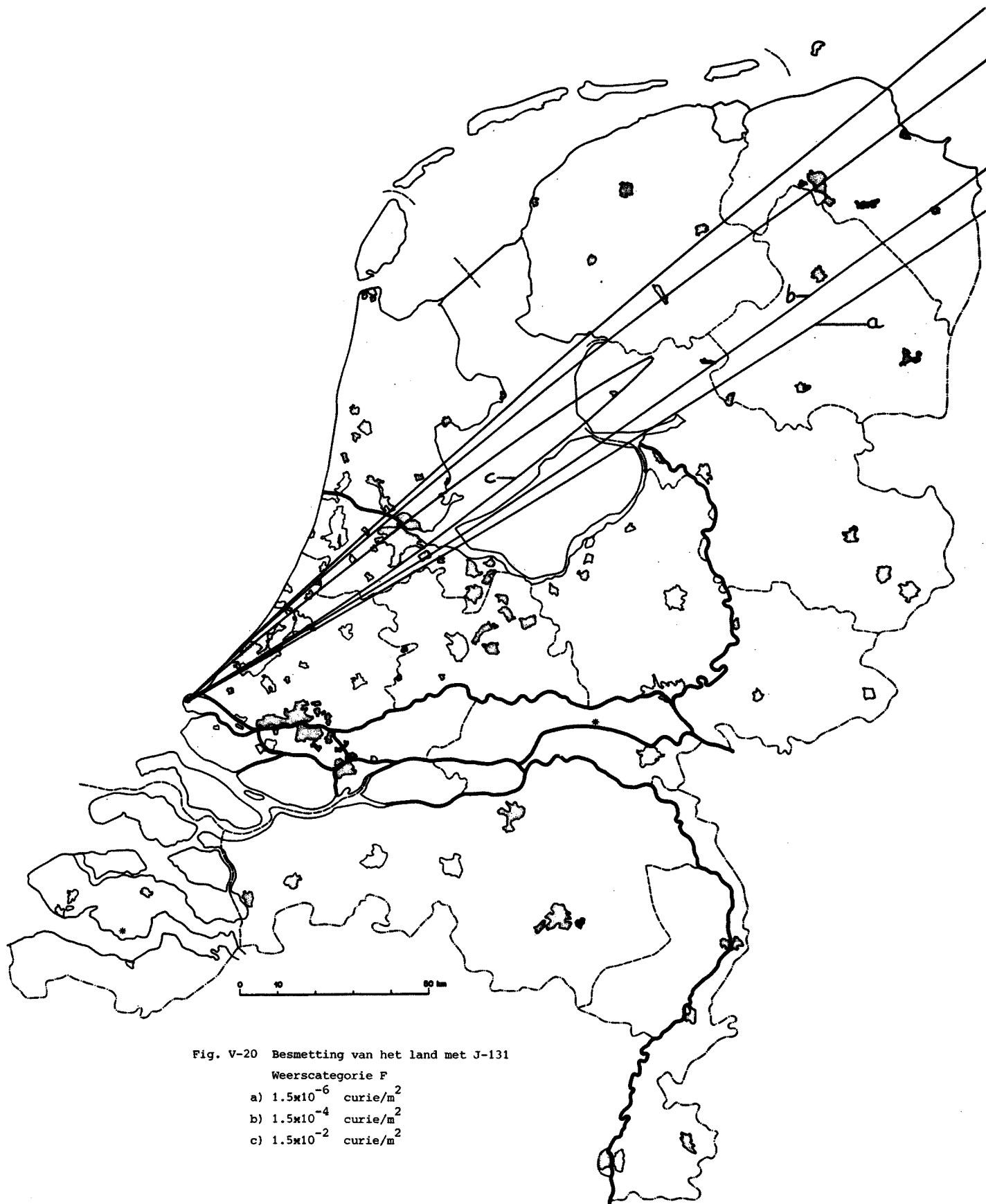
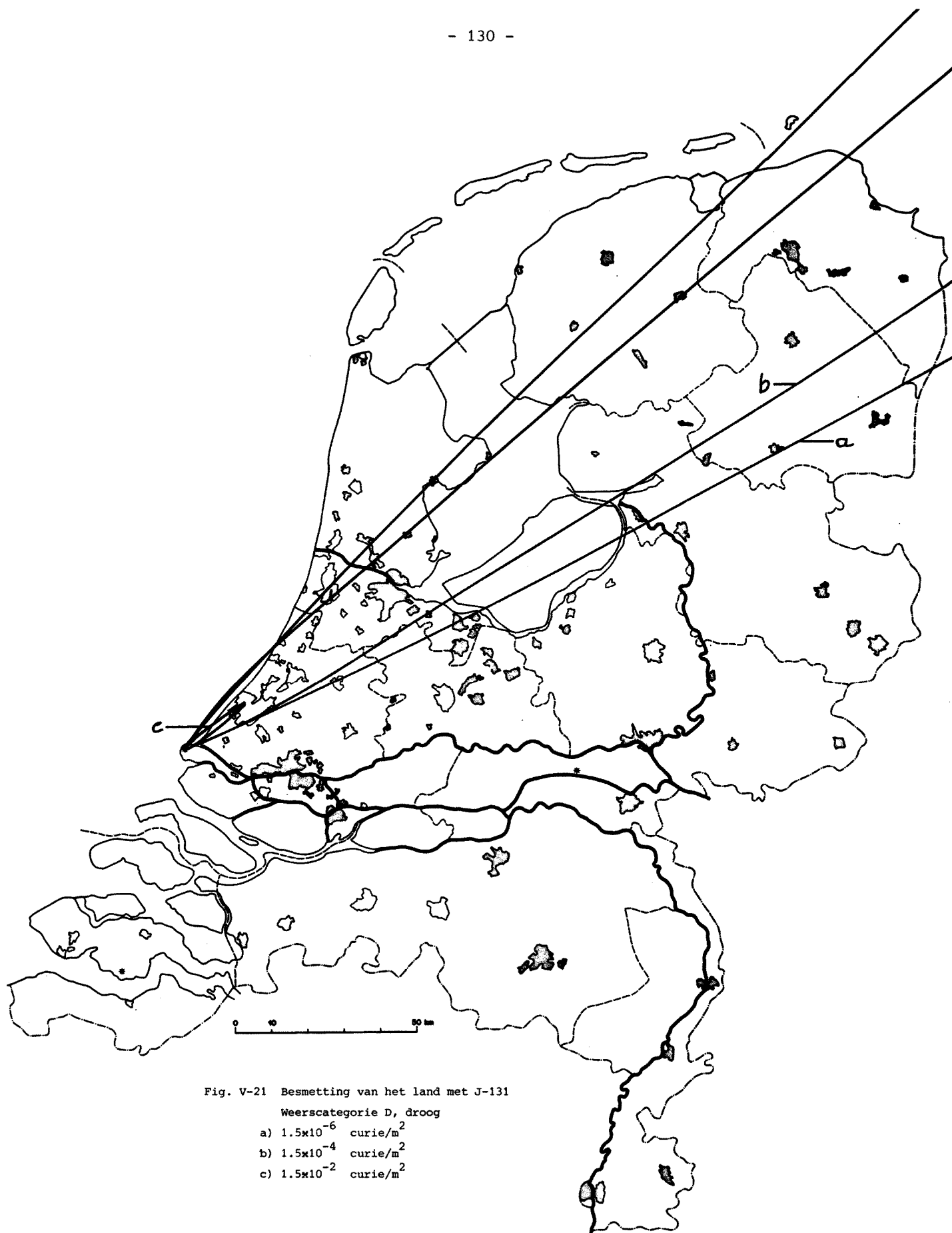
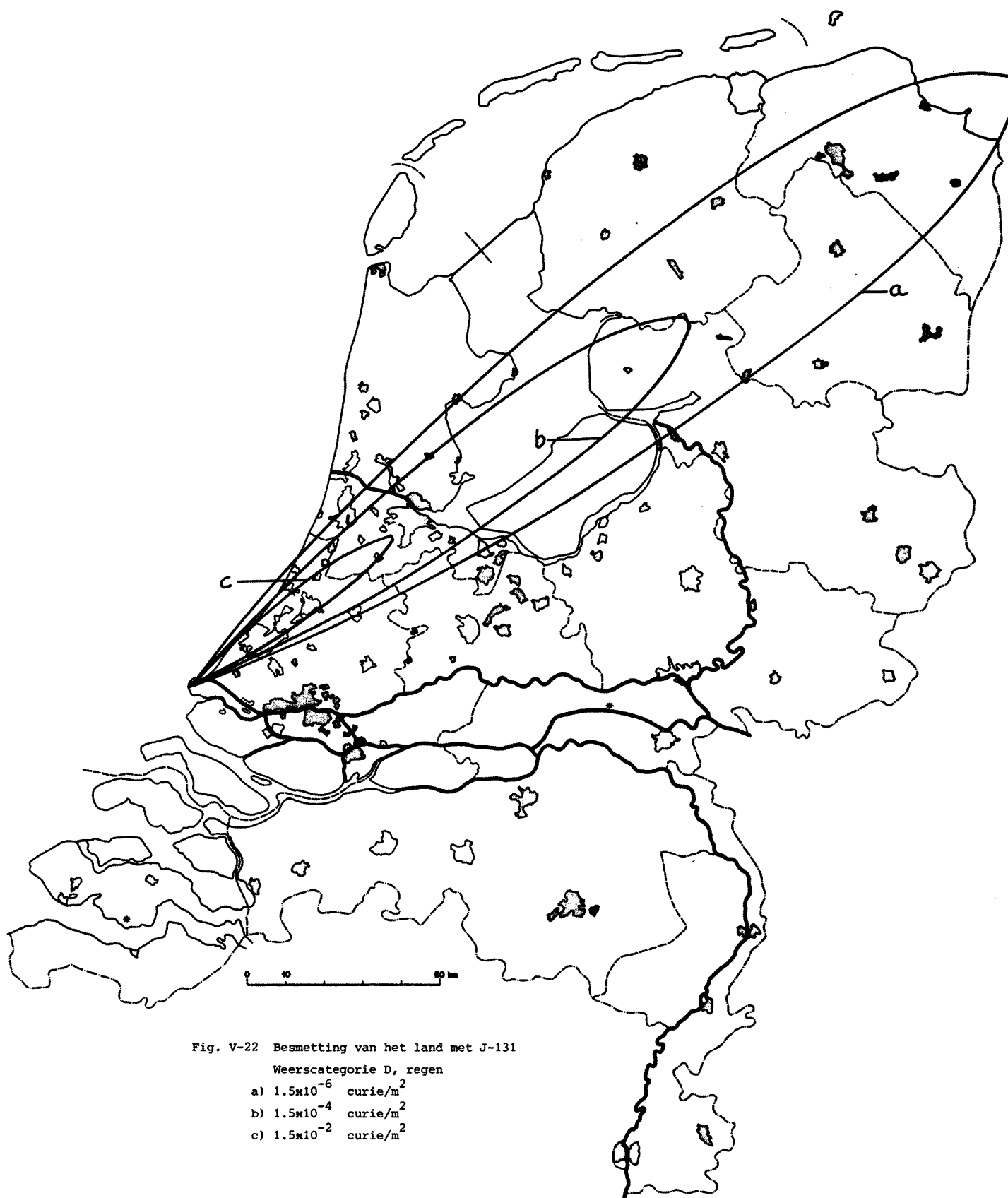


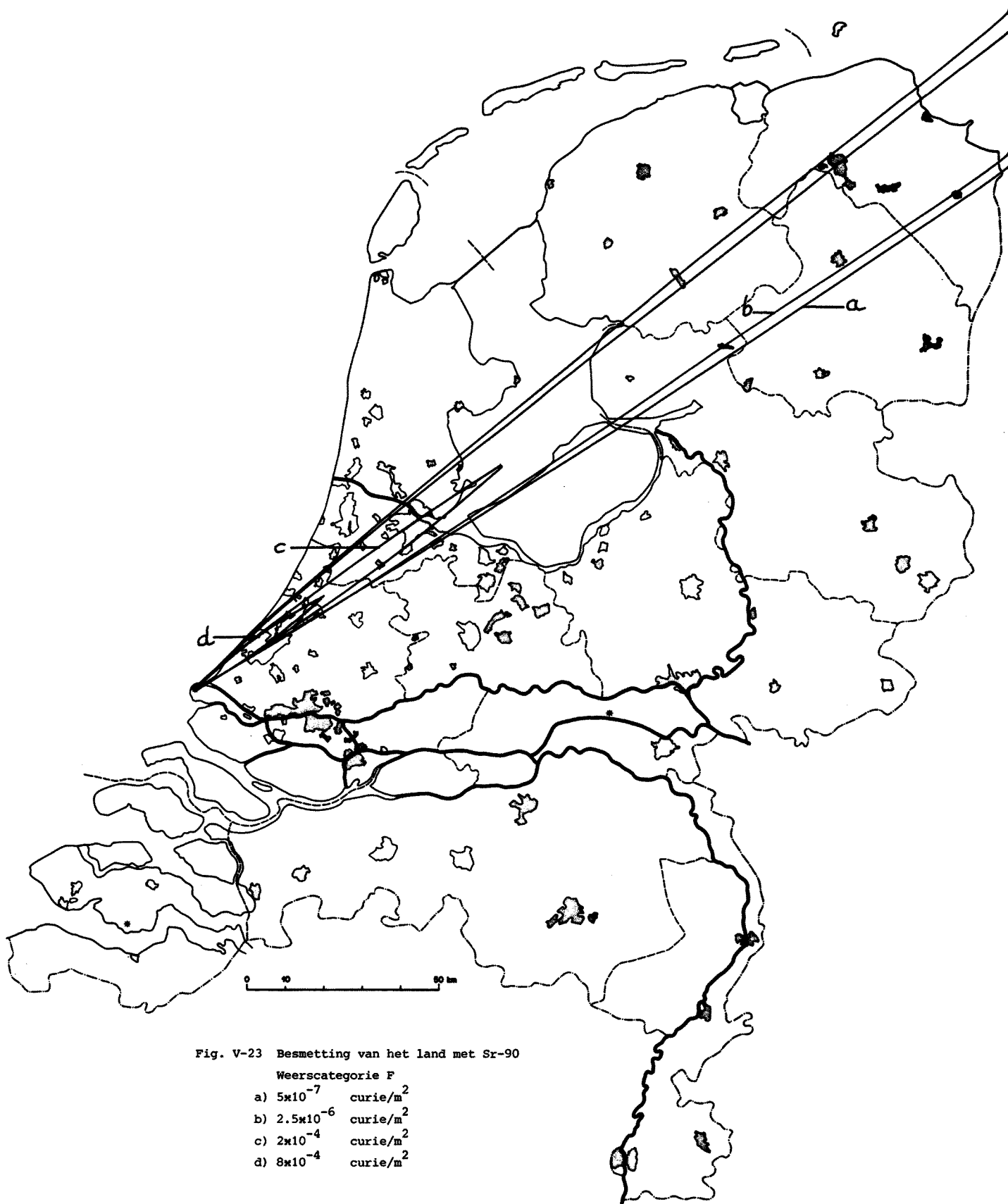
Fig. V-20 Besmetting van het land met J-131

Weerscategorie F

- a) 1.5×10^{-6} curie/m²
- b) 1.5×10^{-4} curie/m²
- c) 1.5×10^{-2} curie/m²







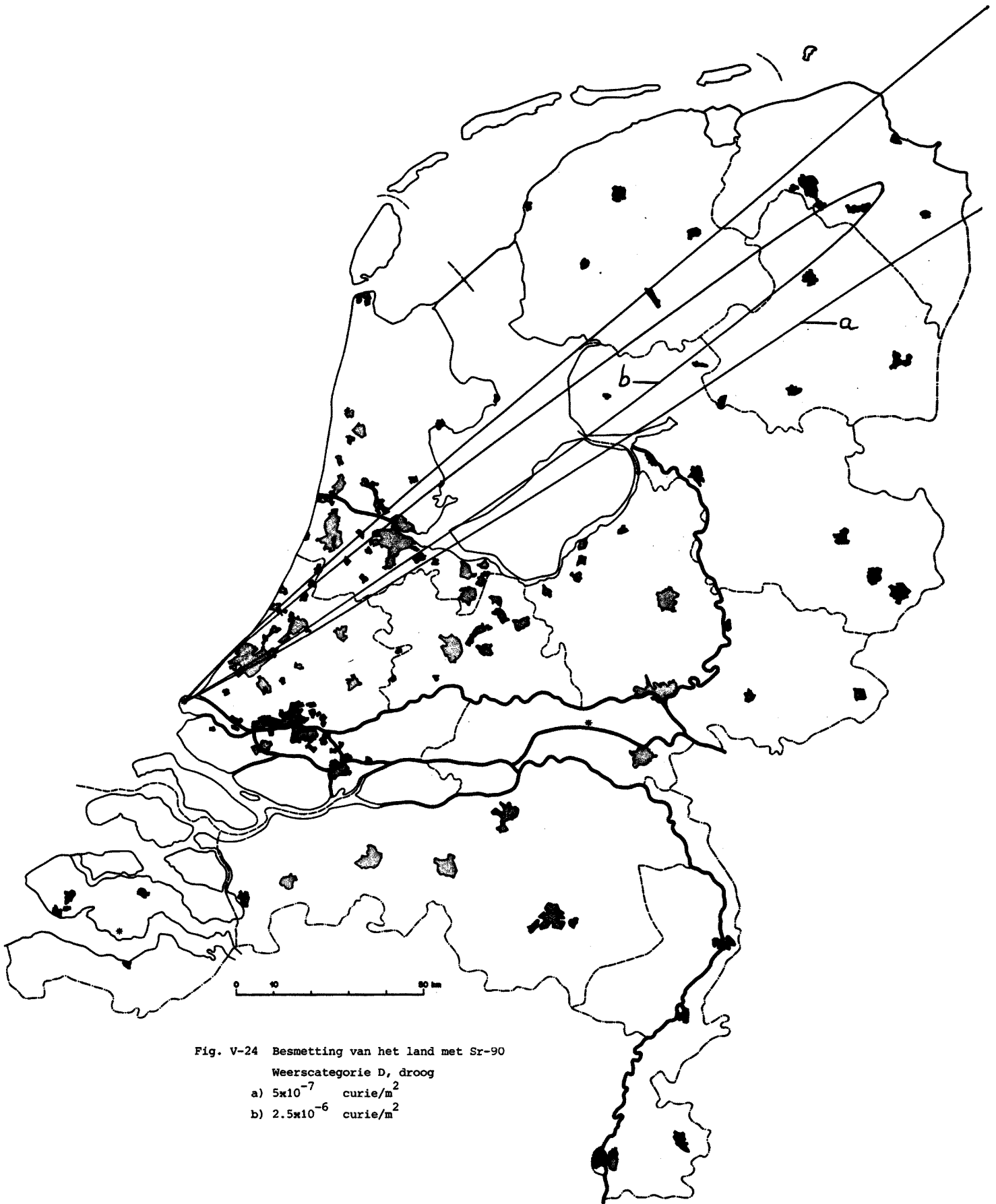


Fig. V-24 Besmetting van het land met Sr-90

Weerscategorie D, droog

- a) 5×10^{-7} curie/m²
- b) 2.5×10^{-6} curie/m²

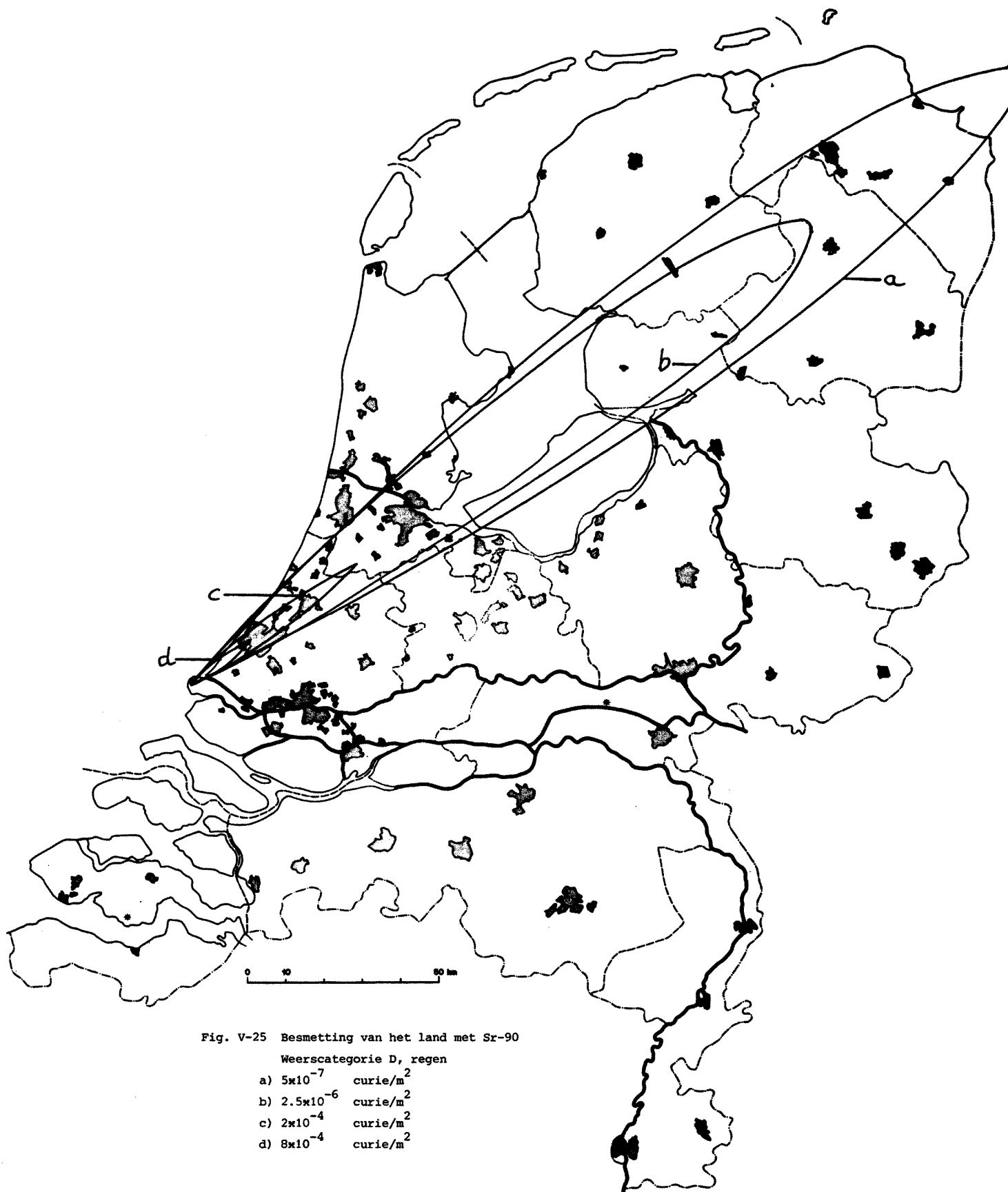


Fig. V-25 Besmetting van het land met Sr-90

Weerscategorie D, regen

- a) 5×10^{-7} curie/m²
- b) 2.5×10^{-6} curie/m²
- c) 2×10^{-4} curie/m²
- d) 8×10^{-4} curie/m²

In fig. V-26 t/m V-28 geven lijn a (0.6×10^{-6} Curie/m²) en lijn b (1.2×10^{-6} Curie/m²) de grenslijn aan voor melkproductie voor resp. de isotopen Cs-134 en Cs-137. Hierbij zijn de eierstokken bij vrouwen het kritische orgaan. Ook de besmetting door Cesium is een zeer langdurige zoals we reeds eerder gezien hebben (par. 3.1 en appendix C, par. 5).

3.3

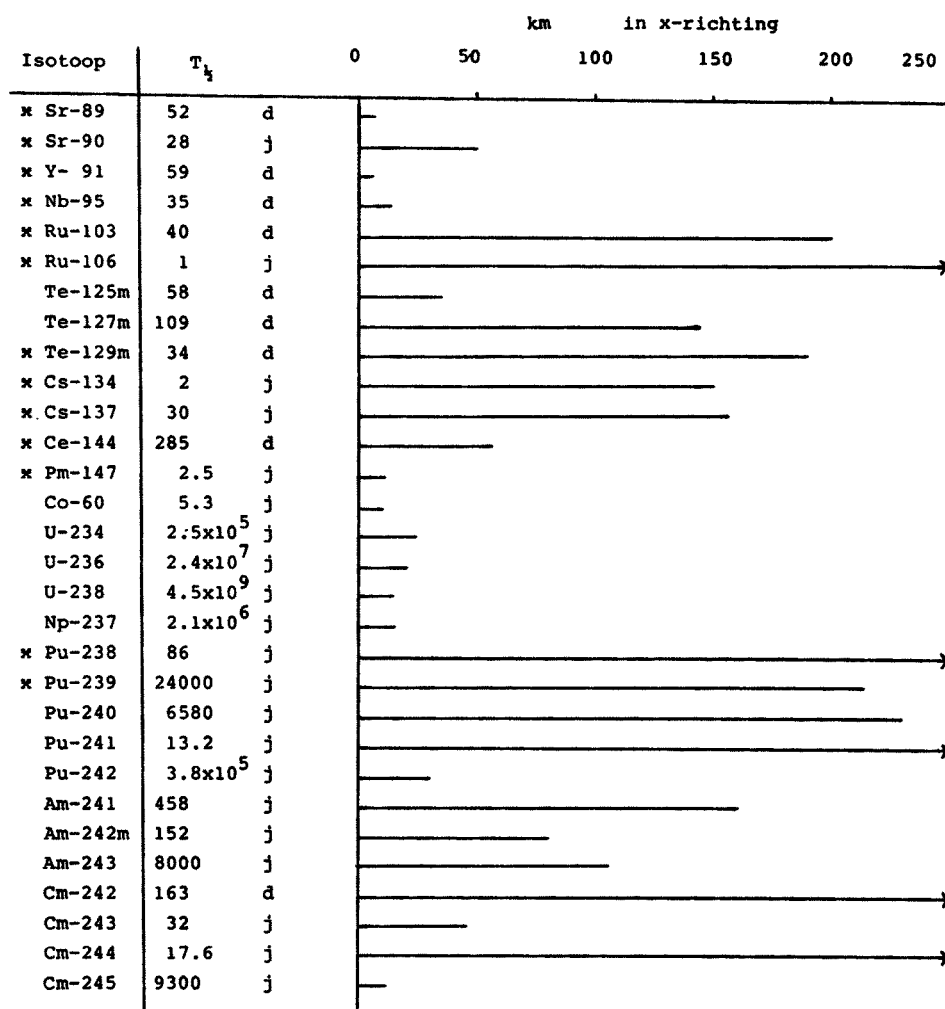
Besmetting van de grond

Doordat de grond besmet wordt met radioactief materiaal kunnen radioactieve stoffen ook via plantenwortels worden opgenomen. Bij gebruik van deze planten als voedsel kunnen radioactieve stoffen zich ook weer in organen gaan concentreren. Om een inzicht te verschaffen in de grote diversiteit van radioactieve isotopen waarmee de grond besmet wordt, zijn deze, voorzover Yook et.al. daarover gegevens verschaffen, en de halveringstijd groter dan een halve dag is, getabelleerd in tabel V-3 (weerscategorie D, met regen).

Om een beeld te krijgen van de relatieve ernst van de lange termijn besmetting door de verschillende isotopen voor agrarisch gebruik is de lengte aangegeven van het gebied dat met deze isotopen tot een zodanige graad is besmet dat de maximaal toegestane stralingsbelasting in 30 jaar¹⁹⁾ van de, voor deze isotopen, kritische organen kan worden overschreden. Dit op basis van de gegevens van Yook et.al. (zie par. 3.1) m.b.t. de mogelijke stralingsdosis t.g.v. het nuttigen van in dit gebied verbouwde gewassen. (Hiermee is dus niets gezegd over het belang van de verschillende isotopen m.b.t. de stralingsbelasting van de mens via andere processen dan het gebruiken van voedsel dat besmet is door opname van radioactieve stoffen via de wortels; vgl. J-129 en Sr-90 in par. 3.1.) Bovendien is de radiologische halveringstijd van deze isotopen aangegeven zodat een eerste indruk van de duur van deze besmetting wordt verkregen. Ook is aangegeven welke isotopen wel en welke niet door de Gezondheidsraad zijn genoemd.

Voor een paar isotopen zijn expliciet, op de kaart van Nederland, voor de verschillende omstandigheden, de gebieden aangegeven, die ongeschikt kunnen worden voor landbouw door overschrijding van de stralingsnormen bij gebruik van deze gewassen voor consumptie (op grond van de schattingen van Yook e.a.).

In fig. V-23 en V-25 geeft lijn c dit gebied aan voor Sr-90, waarbij het bot het kritische orgaan is. De halveringstijd voor uitspoelen is 6 à 10 jaar volgens het UNSCEAR-rapport van 1972 (zie 3.1) zodat deze besmetting van zeer lange duur is. Door diep ploegen is de concentratie mogelijk met een factor 4 te verkleinen. Hierdoor verschuift de grenslijn van c naar d. (De gebieden c en d zijn vanwege de geringe omvang niet aangegeven in fig.V-24) Het is duidelijk dat (de eerste jaren) de besmettingsgraad voor de veeteelt belangrijker is dan voor de landbouw.



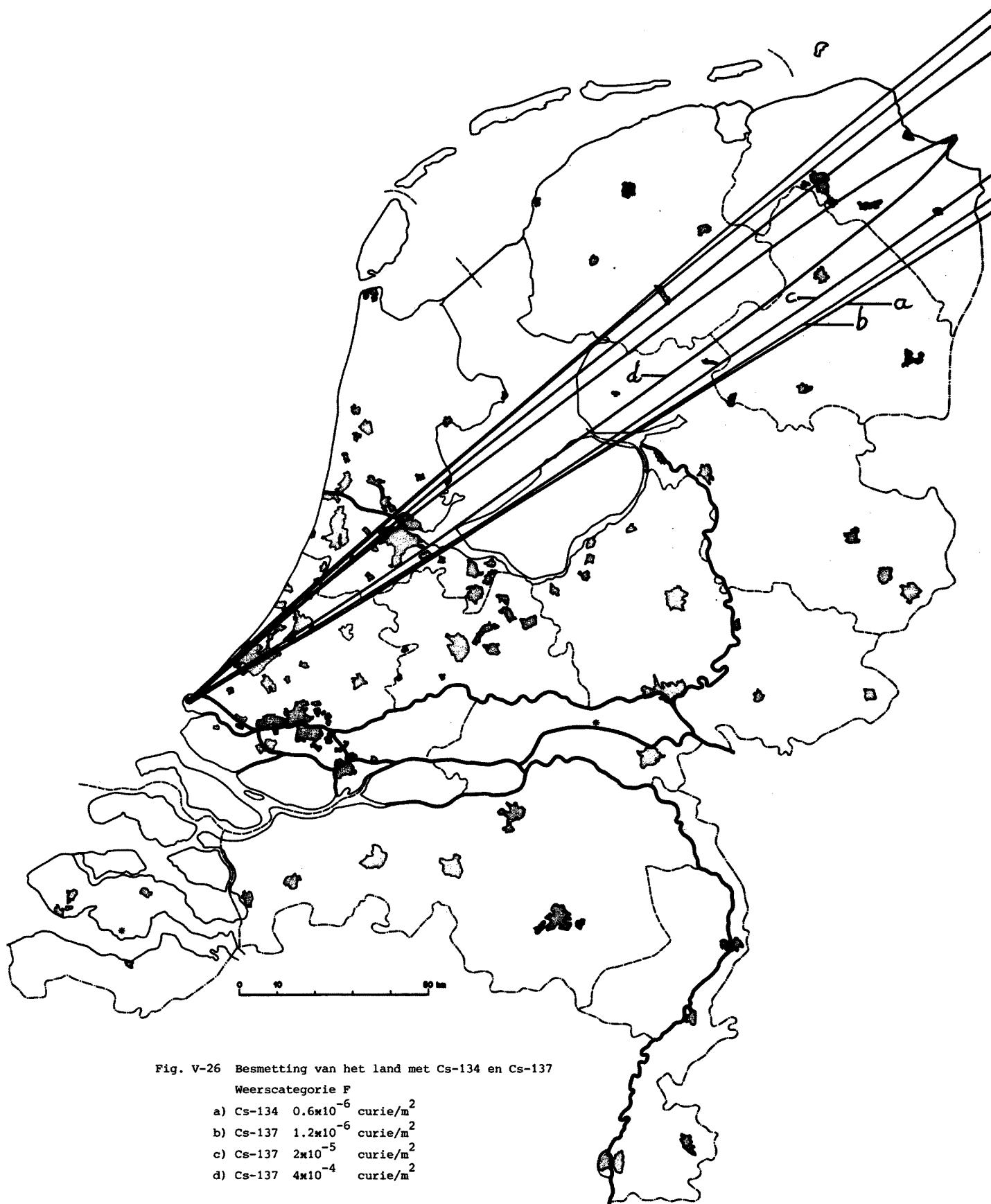
Mn-54, Fe-55, Fe-59, Co-58, Ni-59, Ni-63, Se-75, afstand, waarbij kritische
Se-79, Zr-93, *Zr-95, Nb-94, *Tc-99, Pd-107, besmettingsgraad (volgens
Ag-110m, Cd-113m, Cd-115m, In-114m, Sn-119m, Yook) wordt overschreden,
Sn-126, Sb-124, Sb-125, Te-123m, J-129, Cs-135, is kleiner dan 5 km
Ce-141, Pm-148m, Sm-151, Eu-152, Eu-154,
Eu-155, Gd-153, Tb-160, U-232, U-235, Pu-236
Cm-246, Bk-249

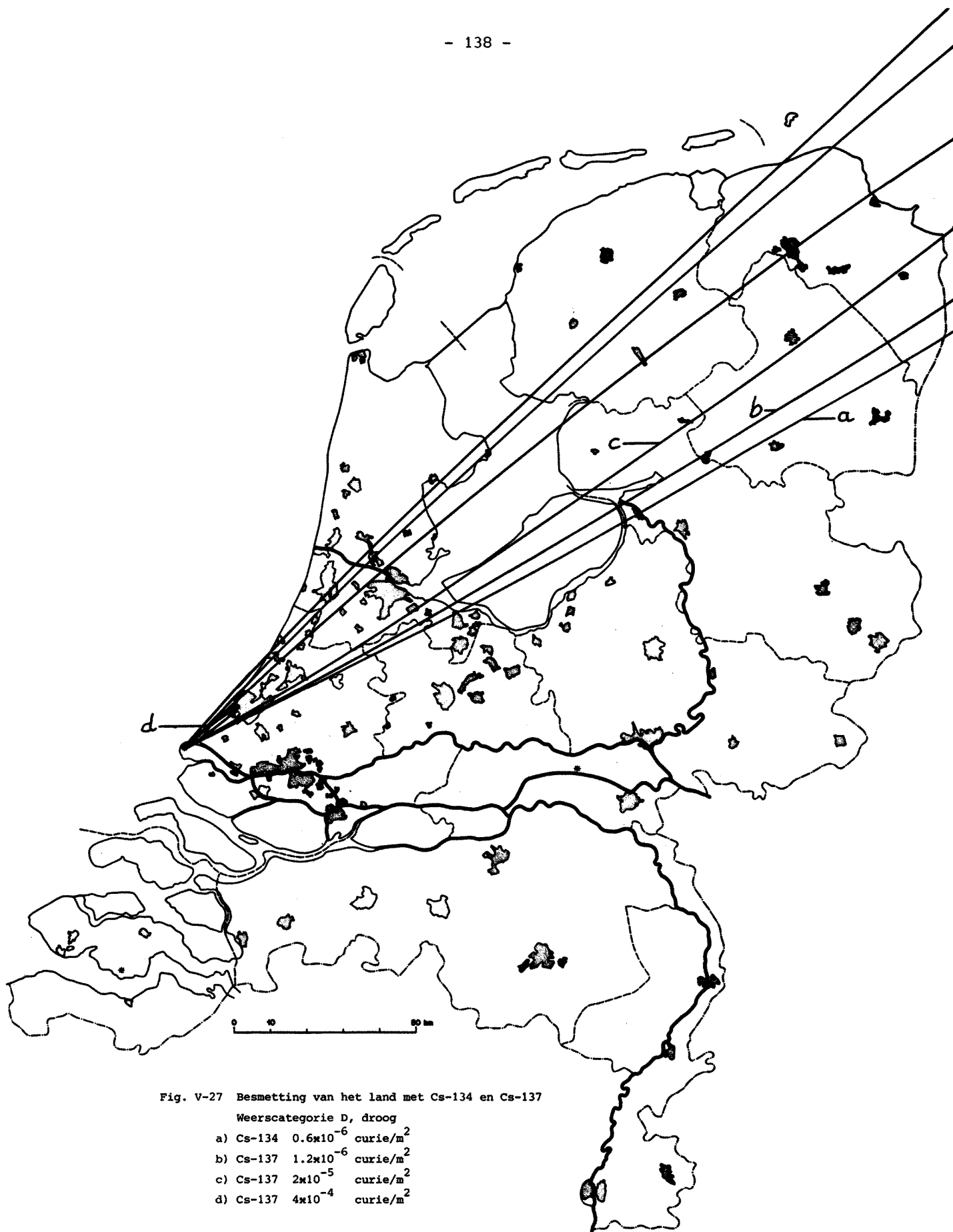
Cr-51, As-77, Br-82, Rb-86, *Y-90, *Zr-97, voor deze isotopen zijn
Nb-95m, Nb-96, *Mo-99, Rh-105, Pd-109, Pd-112, door Yook geen grenzen voor
Ag-111, Cd-115, Sn-117m, Sn-121, Sn-125, landbouw gegeven w.b.t.
Sb-122, Sb-126, Sb-127, Sb-128, *Te-131m, besmettingsgraad (soms
*Te-132, J-130, *J-131, *J-133, *Cs-136, echter wel voor veeteelt).
Ba-140, *La-140, *Ce-143, Pr-142, *Pr-143,
*Nd-147, Pm-148, *Pm-149, Pm-151, Sm-153,
Eu-156, Eu-157, Gd-159, Np-239, Am-242

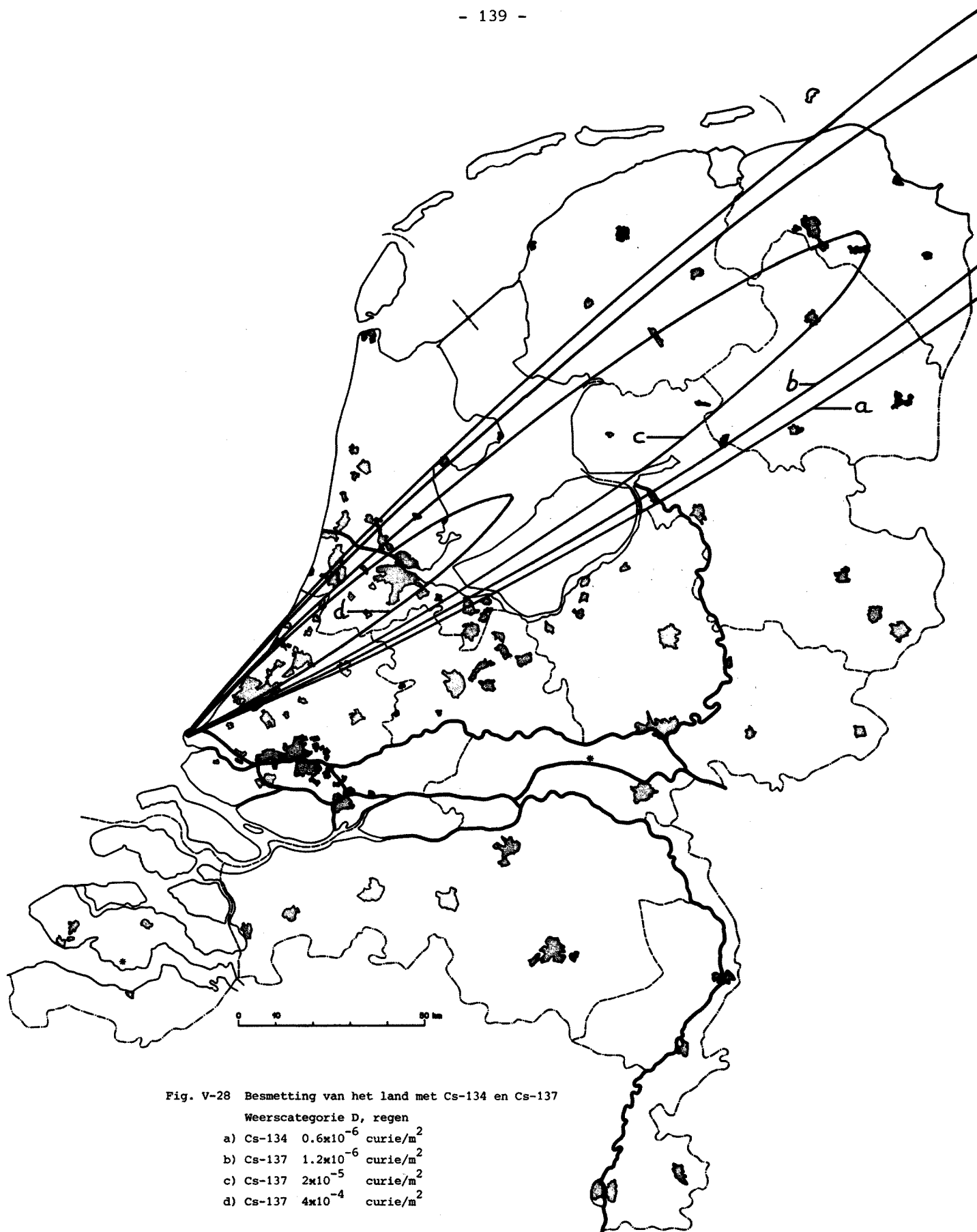
Tabel V-3. Lengte van ("sigaarvormig") gebied dat door besmetting van de
afzonderlijke isotopen ongeschikt is voor landbouw (geen maat-
staf voor veeteelt!).

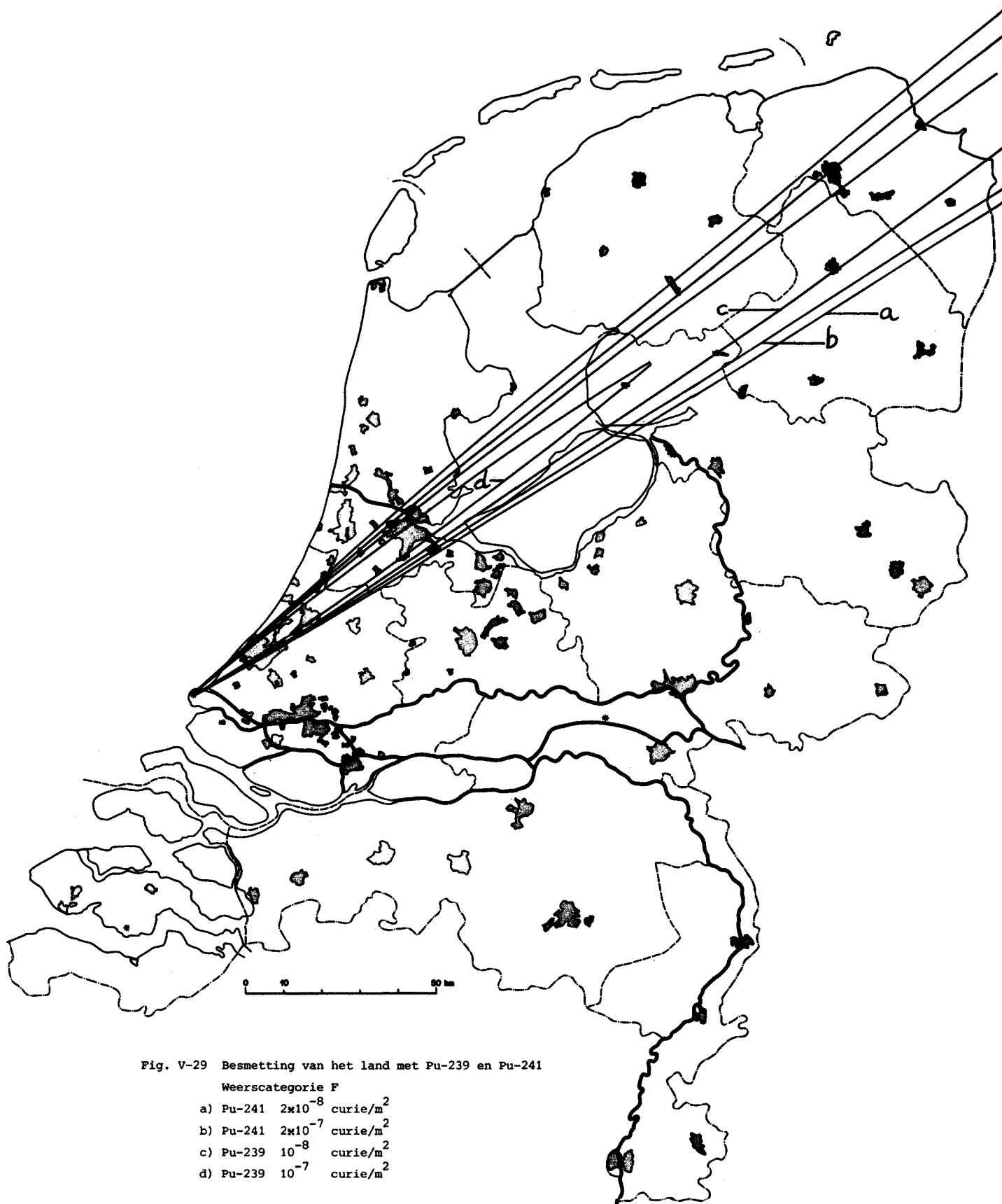
Alleen isotopen met een halveringstijd langer dan een halve
dag zijn beschouwd.

Slechts de met een * aangeduide isotopen behoren tot de 45 in
het Gezondheidsraadrapport beschouwde isotopen.









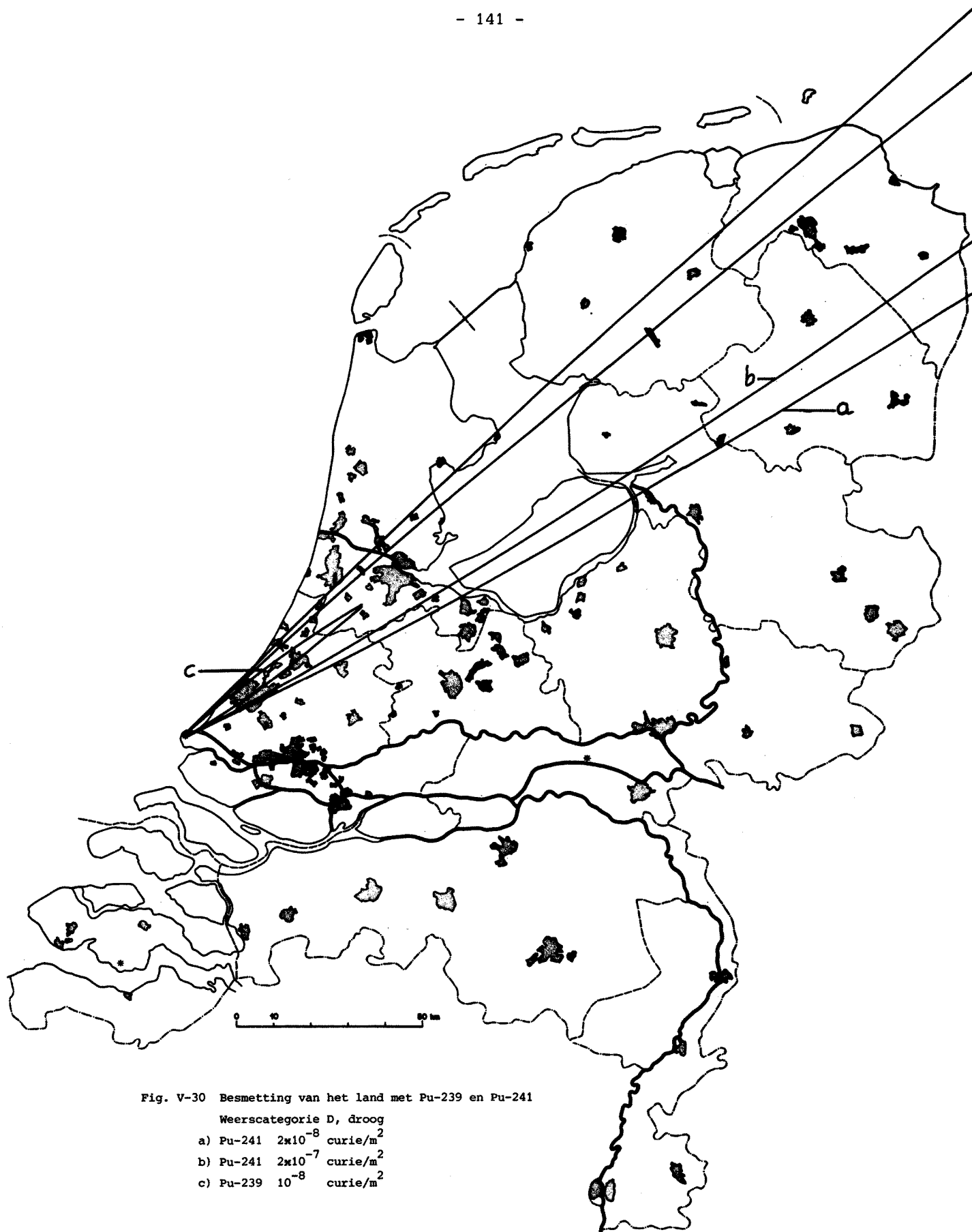
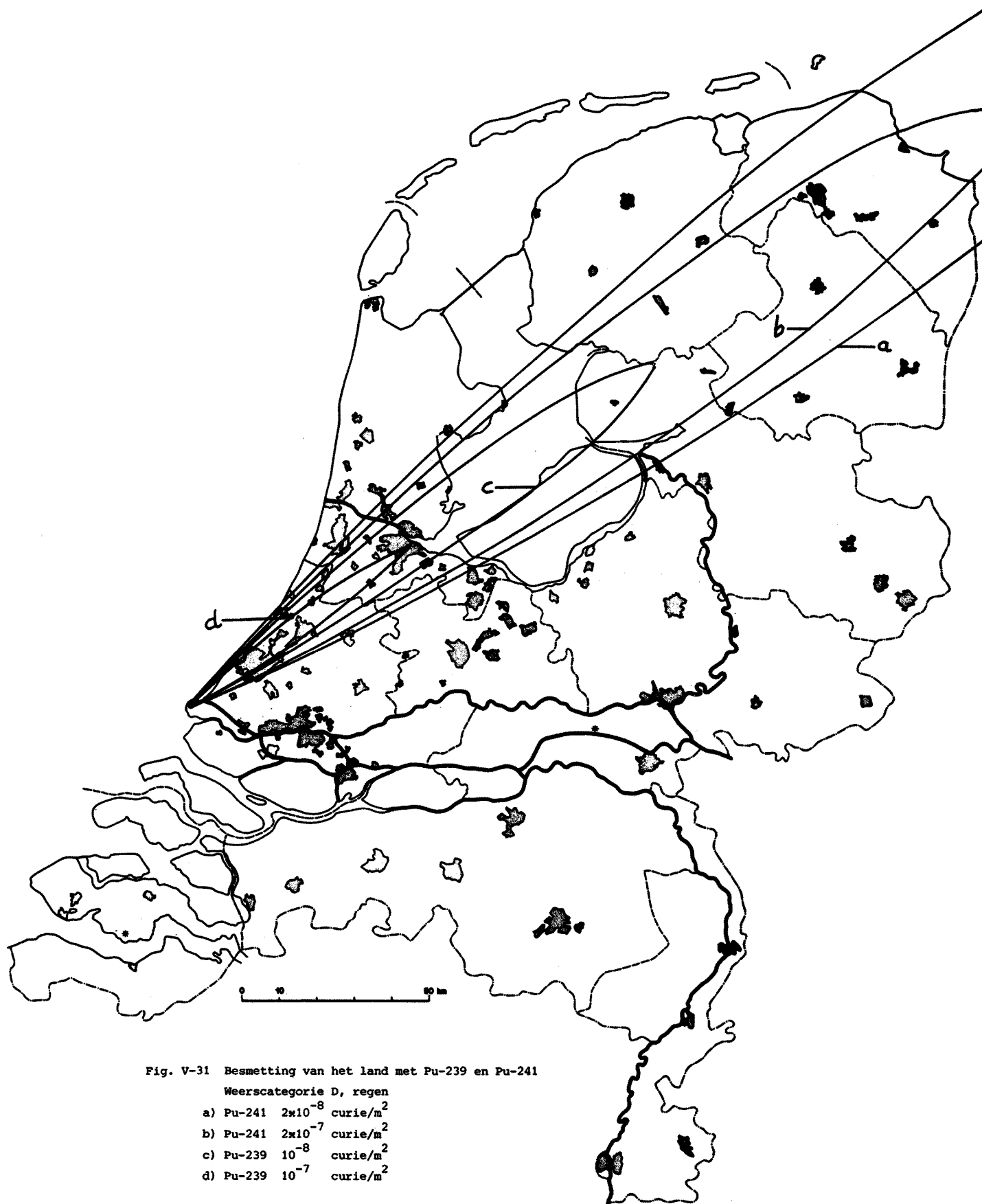


Fig. V-30 Besmetting van het land met Pu-239 en Pu-241

Weerscategorie D, droog



De grenslijn voor landbouw i.v.m. cesium besmetting (zowel Cs-134 als Cs-137) wordt aangegeven door lijn d in fig. V-26 t/m V-28 (waarbij uitgegaan is van een concentratieverlaging van een factor 4 door ploegen). De grens die in het Rasmussenrapport voor agrarisch gebruik wordt gegeven is 2×10^{-5} Curie/m² (lijn c).

Ruthenium-106 (halveringstijd 1 jaar) is een isotoop dat ook tot zeer zware besmetting kan leiden. Voor dit isotoop hebben wij wat betreft de hoeveelheid die vrijkomt een aanzienlijk hogere schatting dan de Rasmussenstudie, op grond van de door de APS geopperde mogelijkheid²⁰⁾.

Als kritisch orgaan voor Ru-106 noemen Yook e.a. de nieren. De stralingsnorm wordt overschreden bij gebruik van gewassen van grond met een besmettingsgraad hoger dan 5×10^{-6} Curie/m² (lijn a in fig. V-14 t/m V-16). Als door diep ploegen dan concentratievermindering met een factor 4 bereikt wordt verschuift deze grens naar lijn b. Een tamelijk willekeurige grenslijn is nog lijn c gegeven met een besmettingsgraad 100 maal zo hoog als op lijn a.

Tenslotte zijn in fig. V-29 t/m V-31 twee besmettingsgraden aangegeven zowel voor plutonium-239 (halveringstijd 24000 jaar) als voor plutonium-241 (halveringstijd 13 jaar). Op grond van het rapport van Yook e.a. liggen de grenzen voor agrarisch gebruik bij een besmettingsgraad 2.5×10^{-9} Curie/m² voor Pu-239 en 5×10^{-9} Curie/m² voor Pu-241. Lijn c en a geven gebieden aan waar de besmettingsgraad minstens 4 maal zo groot is, zodat dit mogelijke grenslijnen zijn in geval van diep ploegen. In het Rasmussenrapport wordt als grens voor het agrarisch gebruik de waarde 10^{-7} Curie/m² gegeven voor Pu-239. Dit correspondeert met de lijn d in fig. V-29 t/m V-31. Lijn b is verder grenslijn van 2×10^{-7} Curie/m² voor Pu-241.

4. Slotopmerking

Bij bestudering van de radioactieve besmetting met behulp van een bepaald meteorologisch verspreidingsmodel mag niet vergeten worden dat het beeld dat men verkrijgt van de besmettingsgebieden in hoge mate gestileerd is. In een werkelijke situatie zal het beeld veel grilliger zijn door aanwezigheid van gebouwen, windfluctuaties en ook door mogelijke verandering in het weer gedurende de verspreiding. Met name geldt dit voor de besmetting op grote afstand van de centrale.

Alle restricties die de Gezondheidsraad bijvoorbeeld maakt²¹⁾ m.b.t. het gebruik van de meteorologische verspreidingsmodellen om het werkelijke verloop van de verspreiding van het radioactief materiaal te beschrijven zijn ook hier van toepassing. Wat echter wel goed aangegeven wordt is een kwalitatief beeld en de grootte van omvang en de graad van besmetting van het land. Deze grootte-orde voor de langdurige besmetting is bovendien niet bijzonder gevoelig voor de weerssituatie waarin het ongeluk plaats vindt; dit in tegenstelling tot de omvang van de vroeg-somatische stralingsgevolgen van een reactorongeluk.

Referenties hoofdstuk V

1. Gezondheidsraad, "Kerncentrales en Volksgezondheid", sept. 1975, deel I, p. 4.47. Hierna aangeduid als GRR.
2. GRR I, p. 4.32.
3. GRR I, p. 6.29.
- 3a. GRR I, p. 6.29.
4. "Reactor Safety Study: An assessment of accident risk in U.S. commercial nuclear power plants", WASH-1400 D, Atomic Energy Commission (aug. 1974), appendix VI, p. 5. (Rasmussenstudie). Hierna aangehaald als RSS Draft.
5. J.O. Blomeke, C.W. Kee and J.P. Nichols, "Projections of radioactive wastes to be generated by the U.S. Nuclear Power Industry", ORNL-TM-3965, 1974, p. 16.
6. GRR II, bijlage 1.
7. "Risico-analyse van de splijtstofcyclus in Nederland" (RASIN-studie) door de N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Productiebedrijven (juni 1975).
8. T.H. Pigford, M.J. Keaton, B.J. Mann, "Fuel cyclus for electrical power generation", Teknekron Report No. EEED 101, (1973), p. 20.
9. RSS-WASH-1400 (oct. 1975, definitieve versie), app. VI, p. 8-11.
10. International Committee on Radiation Protection (ICRP) "Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation". New York, (1959) Hierna aan te halen als ICRP II.
11. Zie bijv. J.W. Gofman, "The Cancer Hazard from inhaled plutonium", 1975, CNR Report, 1975-1-R.
12. ICRP II.
13. C.Ng. Yook, C.A. Burton, S.E. Thompson, R.K. Tandy, H.K. Kretner and M.W. Pratt, "Prediction of the maximum dosage to man from the fall out of nuclear devices IV. Handbook for estimating the maximum internal dose from radionuclides released to the biosphere" (1968), UCRL-50163, part IV, p. 41 e.v.
14. Zie bijv. GRR I, p. 4.29.

15. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), "Ionizing Radiation: Levels and Effects", 1972, Vol. I, p. 50 en 92. Hierna te noemen UNSCEAR I.
16. UNSCEAR I, p. 52 en 55.
17. GRR I, p. 4.32.
18. GRR I, p. 6.33.
19. GRR I, p. 4.32.
20. "Report to the American Physical Society by the study group on light-water reactor safety", Rev. of Modern Physics, Vol. 47, Suppl. No. 1, zomer 1975, p. S44.
21. GRR II, bijlage 6.

Hoofdstuk VI SAMENVATTING EN CONCLUSIES

1. Problemen van kernenergie

De problemen verbonden aan de toepassing van kernenergie op grote schaal, kunnen we in vijf categorieën indelen. Door de nauwe koppeling tussen civiele en militaire toepassing van kernsplijting dreigt met de verbreiding van kernenergie een verdere verspreiding van kernwapens over de wereld plaats te vinden. Zeker in de huidige situatie waarin de wereld opgedeeld is in soevereine nationale staten en de kernenergie niet onder een mondiaal beheer staat. En, een situatie waarin deze staten menen dat hun nationale veiligheid afhankelijk is van het bezit van kernwapens¹⁾. Niet alleen dreigt het aantal landen dat over kernwapens beschikt vergroot te worden. Het gevaar bestaat ook dat niet-gouvernementele groepen m.b.v. splijtbaar materiaal, al of niet door diefstal verkregen, atoombomben kunnen maken²⁾. Een tweede probleem aan de toepassing van kernenergie is de mogelijkheid van catastrofale ongelukken, b.v. met kerncentrales of opwerkingsfabrieken; ongelukken met zeer omvangrijke gevolgen en gevolgen op lange termijn ten gevolge van radioactieve besmetting. In de derde plaats wordt een grote hoeveelheid radioactief afval geproduceerd dat gedurende vele honderdduizenden jaren gevaarlijk blijft. Het moet daarom gedurende deze onafzienbare periode veilig afgesloten worden van de biosfeer. Ook voor dit probleem is nog geen oplossing bekend³⁾. Tevens dreigt, op langere termijn, in geval van het op wereldwijde schaal toepassen van kernenergie, een mondiale besmetting van het milieu met langlevende radioactieve stoffen. Dit ten gevolge van de verspreiding van deze stoffen in het milieu door continue lozingen en door het optreden van kleine en/of grote ongelukken in de gehele splijtstofcyclus (van uraniumwinning tot de opslag van radioactief afval). Deze penetratie van radioactieve stoffen in het milieu en de ophoping daarvan, via voedselketens in planten en dieren, kunnen op de duur tot ernstige verstoringen van subtiele ecologische evenwichten leiden en zelfs een gevaar voor het voortbestaan van de mensheid vormen⁴⁾. Tenslotte brengt kernenergie nog een aantal sociale en maatschappelijke problemen met zich mee die op tweeërlei manieren met democratische waarden in conflict kunnen komen. Namelijk enerzijds door de zeer strenge controle op 'betrouwbaarheid' van allen die bij de kernenergie op een of andere wijze betrokken zijn (alle 'afwijkend gedrag' wordt al snel verdacht, politieke overtuiging kan belangrijk worden) en door de uitgebreide politiebewaking van kerncentrales, transporten, opwerkingsfabrieken etc. tegen sabotage aanslagen en diefstal van splijtbaar materiaal⁵⁾.

Anderzijds doordat kernenergie aanleiding geeft tot zeer sterk gecentraliseerde beslissings- en machtsstructuren. Van al deze aspecten wordt in dit rapport slechts ingegaan op het probleem van catastrofale ongelukken met kerncentrales. De andere aspecten zijn reeds eerder behandeld in het rapport "Kernenergie in Discussie"⁶⁾.

2. Gevolgen van een groot reactor ongeluk

2.1 Gehanteerde methode en veronderstellingen

Dit rapport handelt over de gevolgen van een ongeluk met een kerncentrale in Nederland, waarbij een grote hoeveelheid radioactief materiaal vrijkomt. Daarbij is uitgegaan van een zo concreet mogelijke situatie, n.l. een ongeluk met een kerncentrale op de Maasvlakte, één van de potentiële vestigingsplaatsen voor nieuwe kerncentrales in Nederland.

Om inzicht te krijgen in de mogelijke gevolgen, is gekozen voor de zgn. scenariomethode. Er worden een aantal redelijke aannames gemaakt m.b.t. de belangrijke factoren zoals het verloop van een ongeluk, de weersomstandigheden en de neerslag van radioactief materiaal. Daarbij wordt voor de beschrijving van de fysische, biologische en meteorologische verschijnselen die een rol spelen, gebruik gemaakt van modellen die enerzijds zo realistisch mogelijk zijn, maar anderzijds onontkomelijk een aantal "idealiserings" van verschijnselen bevatten (b.v. een constante windrichting en windsnelheid, onveranderlijke weersituatie, effen terrein en "standaardmensen" wat betreft radiologische effecten).

Op zich is dat niet bezwaarlijk als men zich bewust is van de beperkingen van deze methode. Het werkelijke beeld zal in de regel veel grilliger zijn dan het gestileerde beeld dat via de scenariomethode verkregen wordt. Het voordeel van de methode is dat zij sterk verhelderend kan werken voor het verkrijgen van inzicht in complexe gebeurtenissen. Zij levert daarbij een kwalitatief juist beeld van de omvang van de gevolgen van een groot reactor ongeluk. En daar gaat het voornamelijk om bij de beoordeling van de aanvaardbaarheid van dergelijke ongelukken.

De studie geeft een schatting van de gevolgen onder drie weersomstandigheden die het meest frequent voorkomen n.l. een weerscategorie met een stabiele atmosfeer (categorie F, 10% voorkomen) en een weerscategorie met een onstabiele atmosfeer (categorie D, meer dan 50% voorkomen). De laatste is onderverdeeld in een situatie met en zonder regen. Hoewel de gevolgen van een groot reactor ongeluk door de atmosferische verspreiding van radioactief materiaal in de regel grensoverschrijdend zijn, beperkt deze studie zich tot de gevolgen voor Nederland. Onder de "geïdealiseerde" weersomstan-

digheden zijn de tot een bepaalde graad radioactief besmette gebieden 'sigaarvormig' (gericht langs de as van de windrichting).

De in dit rapport beschreven gevolgen betreffen zowel de korte als de lange termijn. Bij de korte termijn aspecten rekenen we de gevolgen die zich binnen enkele maanden doen voelen zoals acute sterfte en stralingsziekten t.g.v. zeer hoge stralingsdoses en de evacuatie van radioactief besmette gebieden. Tot de lange termijn gevolgen behoren die gevolgen die (vele) jaren merkbaar blijven zoals het onbewoonbaar zijn van radioactief besmette gebieden alsmede de onbruikbaarheid van het land voor agrarische doeleinden en andere economische activiteiten. Ook behoren hiertoe de, vaak pas na vele jaren optredende, kankergevallen (laat-somatische effecten) en de door straling veroorzaakte erfelijke schade die overgedragen wordt aan latere generaties.

2.2 Korte termijn gevolgen

De stralingsdoses die men oploopt zijn van verschillende aard. Door verblijf in een overdrijvende radioactieve wolk staat men bloot aan uitwendige straling, evenals door verblijf in gebieden die radioactief besmet zijn door neerslag van radioactief materiaal tijdens passage van de wolk. Door verblijf binnen gebouwen kan een zekere afscherming van deze straling verkregen worden. Daarnaast staat men bloot aan inwendige straling afkomstig van ingeademd radioactief materiaal dat zich in het lichaam in verschillende organen afzet.

Het aantal acute slachtoffers- doden en stralingszieken- hangt sterk af van de weersomstandigheden. Onder stabiele atmosferische omstandigheden (weerscategorie F) varieert het sterftecijfer voor de hier beschouwde scenario's, van 140.000 tot 350.000. Dit aantal is afhankelijk van de effectiviteit van afscherming tegen de straling gedurende het passeren van de radioactieve wolk en de mogelijkheid van onmiddellijke evacuatie hierna. In een groot gebied zullen mensen getroffen worden door ernstige stralingsziekten, die voor een deel de dood tot gevolg hebben. Het aantal ernstige stralingszieken dat in eerste instantie herstelt, varieert, afhankelijk van bovengenoemde aannamen, van 60.000 tot 180.000. Daarnaast zullen enkele honderdduizenden mensen nog lijden aan lichte stralingsziekten en aantasting van het bloed, waarvoor medische hulp vereist is. Onder alle gemaakte aannamen betreffende afscherming en evacuatie, is het resultaat dat het aantal mensen dat op enigerlei wijze direct in zijn gezondheid wordt aangetast in de orde van grootte van 1 miljoen ligt. Wel verschilt, afhankelijk van deze aannamen, de verhouding van aantallen ernstige en minder ernstige getroffen slachtoffer. Delengte

van de gebieden waar de stralingsdosis dodelijk is varieert onder de verschillende aannamen van 40 tot 65 kilometer. Een gedetailleerder overzicht is te vinden in tabellen II-1 t/m II-4, met begeleidende tekst, en fig. II-2 t/m fig. II-5 in hoofdstuk II.

Werkelijk effectief om te voorkomen dat er acute slachtoffers vallen, is slechts de tijdige evacuatie van alle mensen uit de met hoge stralingsdoses bedreigde gebieden vóórdat de radioactieve wolk overdrijft. Door de nabijheid van de kerncentrale tot de bevolkingscentra is de hiervoor beschikbare tijd slechts enkele uren. Omdat bovendien rekening gehouden moet worden met schommelingen in de windrichting zullen de te evacueren gebieden nog groter (breder) zijn dan uit de figuren in dit rapport blijkt. Gezien de grote bevolkingsdichtheid in de Randstad en het grote aantal mensen dat in korte tijd geëvacueerd moet worden, lijkt dit een onhaalbare zaak.

In het geval van weersomstandigheden met een minder stabiele atmosfeer (weerscategorie D) vindt een sterke verdunning plaats van de radioactiviteit in de overdrijvende wolk. De lagere concentratie in de wolk die hierdoor ontstaat leidt tot een aanzienlijk geringere stralingsbelasting. Hierdoor loopt men slechts in een veel kleiner gebied een dodelijke stralingsdosis op. Bij droog weer tot op een afstand van enkele kilometers van de centrale, bij regen tot op een afstand van 15 km indien geen onmiddellijke evacuatie na overdrijven van de radioactieve wolk plaats vindt.

Bij droog weer staan mogelijk enkele mensen aan een dodelijke stralingsdosis bloot. Het aantal stralingszieken wordt geschat op 300. Tijdelijke aantasting van het bloed treedt op bij 250000 mensen. Een evacuatie op korte termijn van mensen in de met hoge stralingsdoses bedreigde gebieden lijkt in principe haalbaar. Het evacueren op korte termijn van gebieden met lagere stralingsdoses zal, vanwege de grotere omvang en de grote bevolkingsdichtheid al aanzienlijk moeilijker zijn.

In geval van regen zullen, indien binnen 24 uur geen evacuatie heeft plaats gevonden, naar schatting 50000 mensen door hoge stralingsdosis overlijden. Daarnaast bedraagt het aantal gevallen van ernstige stralingsziekte dat niet direkt sterfte tot gevolg heeft, eveneens ongeveer 50000. Het aantal gevallen van lichte stralingsziekte en van bloedaantasting ten gevolge van de stralingsdoses van de 1e dag, bedraagt 900000. Aangezien onder deze weersomstandigheden de stralingsbelasting van de 1e dag hoofdzakelijk ver-

oorzaakt wordt door verblijf in, door neerslag, radioactief besmette gebieden zouden deze getallen aanzienlijk teruggebracht kunnen worden door een tijdige evacuatie. Ter voorkoming van sterfte en ernstige stralingsziekten zouden zeker 100000 mensen tot op een afstand van 25 km, onmiddellijk geëvacueerd moeten worden. Voorwaarde voor de uitvoerbaarheid van deze noodzakelijke evacuatie is dat men òn de ernst van de situatie tijdig onderkent en tijdig tot handelen overgaat òn te maken heeft met een rustig meewerkende bevolking. Deze voorwaarden maken een succesvolle volledige evacuatie op korte termijn al veel onwaarschijnlijker.

Onder alle beschouwde weersomstandigheden zal in verband met radioactieve besmetting van het land na enkele uren of in elk geval na de 1e dag, een gigantisch evacuatieprogramma in een uitgestrekt gebied op gang moeten komen. Het gebied waarin het door de Gezondheidsraad gegeven noodreferentienivo voor kinderen en zwangere vrouwen reeds binnen 3 maanden wordt overschreden, strekt zich (rekening houdend met een afschermingsfactor van 1/3) bij weerscategorie F uit tot in Duitsland (grootste breedte van deze strook is 20 km) en onder weerscategorie D tot in Drente (zowel bij droog weer als bij regen met een grootste breedte van de strook van resp. 11 en 20 km). Het aantal mensen dat in deze besmette gebieden woont bedraagt 1.5 miljoen voor weerscategorie F, 1.2 miljoen voor weerscategorie D (droog weer) en 2 miljoen voor weerscategorie D met regen. Of en wanneer men in deze ontruimde gebieden zal kunnen terugkeren hangt af van de lange termijn grondbesmetting,

2.3 Lange termijn gevolgen

2.3.1 Onbewoonbaarheid en onbruikbaarheid van het land

Terwijl betreffende de omvang van de acute gezondheidsgevolgen grote verschillen bestaan tussen de verschillende weersomstandigheden is dit veel minder sterk het geval voor de lange termijn grondbesmetting. In alle gevallen is deze dramatisch voor Nederland te noemen.

De grondbesmetting heeft gevolgen zowel voor de bewoonbaarheid van het land als voor de bruikbaarheid voor agrarische en andere doeleinden. Uit de figuren V-1 t/m V-9 is duidelijk dat een brede strook door Nederland voor minstens 5 jaar onbewoonbaar is, wil de ICRP-norm voor de bevolking van 170 millirem/jaar gehandhaafd worden. Het aantal inwoners in dit gebied bedraagt voor weerscategorie F ruim 2 miljoen, voor weerscategorie D in geval van droog weer bijna 3 miljoen en in geval van regen 3.2 miljoen.

In een belangrijk deel van de randstad zal gedurende deze tijd zelfs een extreem hoge stralingsintensiteit heersen van meer dan 100 rem/jaar, met name bij weerscategorie F en categorie D met regen.

In deze gebieden zullen tevens, door opwaaien vanaf de grond, radioactieve deeltjes in de lucht zweven. Bij verblijf in deze gebieden zullen deze ingeademd worden. In fig. V-17 t/m V-19 zijn de gebieden aangegeven waar de ICRP-normen voor Pu-238 overschreden worden. Ook hierdoor al zou een belangrijke strook door Nederland onbewoonbaar zijn. Aangezien de normen voor plutonium nog al overstreden zijn, zijn ook andere grenzen aangegeven. De onbewoonbare gebieden zouden hierdoor nog aanzienlijk vergroot worden.

Een zeer grote diversiteit van radioactieve isotopen slaat tijdens de verspreiding neer op het land. Dit heeft tot gevolg dat, een op het land staande getroffen oogst niet meer gebruikt kan worden, boven een bepaalde besmettingsgraad. Tevens is een brede strook door Nederland voor jaren ongeschikt geworden voor de veeteelt.

Op de grond neergeslagen en daarin doorgedrongen radioactieve stoffen kunnen bovendien door gewassen, via de wortels, opgenomen worden, zodat deze als voedsel ongeschikt worden. Hierdoor zal tevens een brede strook door geheel Nederland voor vele jaren voor de landbouw onbruikbaar zijn.

De intensiteit van de besmetting is daarbij voor de weerscategorieën D met regen en F groter dan voor categorie D zonder regen.

De gebieden die in die mate besmet zijn, dat ze ongeschikt voor de landbouw zijn geworden, zijn voor weerscategorie D (zowel met als zonder regen) in de regel aanzienlijk breder dan voor weerscategorie F.

2.3.2 Omvang van laat-somatische en genetische effecten

De vroeg-somatische effecten (stralingsziekten, acute sterfte) treden slechts op bij hogere stralingsdoses. Voor deze effecten bestaat een zgn. drempeldosis. Dit is (hoogst waarschijnlijk) niet het geval voor de laat-somatische en genetische effecten. Daardoor zijn de verschillen in omvang van deze effecten, tussen de diverse weersomstandigheden minder groot.

De berekende verschillen zijn echter ook voor deze effecten aanzienlijk. Temeer daar de invloed van verblijf voor langere tijd in, door neerslag van radioactief materiaal, besmette gebieden niet berekend is. Dit vanwege de aanname dat deze gebieden, op grond van de huidige stralingsnormen, ontruimd moeten worden. Zou dit niet gebeuren dan zou dit de omvang van de kankersterfte in latere jaren en van de genetische effecten aanzienlijk verhogen. Tevens zouden dan de verschillen tussen de diverse weersomstandigheden minder groot worden.

Onder deze voorwaarden komen we tot de volgende resultaten. Zij geven o.a. vanwege onzekerheden in de dosis-effect relatie hoogstens een orde van grootte aan. Voor weerscategorie F een sterftcijfer t.g.v. late kanker van 45000 tot 70000 (afhankelijk van aannames betreffende afscherming en evacuatie), 170000 gevallen van schildklieraandoeningen, waaronder 50000 gevallen van goedaardige en 35000 van kwaadaardige schildklierknobbeltjes en een aantal genetische defecten van 6000 tot 9500. Voor weerscategorie D zonder regen, wordt het sterftcijfer voor late kankergevallen geschat op 10000, het aantal genetische afwijkingen op 1200 en het aantal schildklieraandoeningen op 86000 waarvan 26000 met goedaardige en 17000 met kwaadaardige schildklierknobbeltjes. Voor de situatie met regen zijn deze getallen (afhankelijk van aannames betreffende evacuatie): late kankersterfte 4000 tot 9000, genetische defecten 300 tot 3000, een aantal gevallen van schildklieraandoening 10000 tot 30000 waarvan de helft met schildklierknobbeltjes.

3. Conclusies

De conclusie uit het voorgaande kan niet anders zijn dan dat een groot ongeluk met een kernenergiecentrale een existentiële ramp is voor Nederland. Onder ongunstige weersomstandigheden zal een dergelijk ongeluk leiden tot een zeer groot aantal acute slachtoffers, zowel doden als stralingsziekten. Gezien het aantal (in de orde van een miljoen) mensen dat op enigerlei wijze, in meerdere of mindere mate, in zijn gezondheid wordt aangetast lijkt het onmogelijk om iedereen passende medische hulp te verstrekken. Dit te meer vanwege de te verwachten chaotische toestanden tengevolge van vluchtende en te evacueren mensen. Naast de primaire gezondheidseffecten wordt men daarnaast nog geconfronteerd met secundaire, maar desalniettemin zeer belangrijke aspecten. Zo is er het probleem van het bergen van zwaar radioactieve lijken uit zwaar besmette gebieden, zowel van mensen als van een onnoemelijk aantal omgekomen dieren. Dit gaat waarschijnlijk nog gepaard met het optreden van allerlei ziekten en een vermindering van weerstand tegen infecties, door opgelopen straling.

De situatie dat daarnaast een belangrijk deel van Nederland voor vele jaren onbewoonbaar zal zijn en niet gebruikt kan worden voor agrarische of andere economische activiteiten betekent een volledige ontwrichting van de Nederlandse samenleving. Dit laatste geldt eveneens voor de situatie waarin het aantal acute slachtoffers niet zo groot is, bijvoorbeeld door dat de weersomstandigheden gunstiger zijn. Alleen al de nodige evacuatie van enkele miljoenen mensen en de onbewoonbaarheid en onbruikbaarheid van een belangrijk deel van Nederland, zou een totale maatschappelijke ontreding inhouden.

Het evacueren van enkele miljoenen Nederlanders zal door velen als een niet realiseerbare opgave worden beschouwd. Het resultaat zal waarschijnlijk zijn dat men zich niet zo veel meer van de huidige stralingsnormen zal aantrekken en de mensen aan veel hogere stralingsdoses blootgesteld zullen worden. Dit betekent dan een soort verschuiving van "schade" naar latere tijden, want hogere stralingsdoses zullen wel leiden tot verhoging van kankersterfte in latere jaren en een toename van erfelijke schade. Er blijven evenwel nog grote gebieden waarin men door de hoge besmettingsgraad zelfs niet kan verblijven zonder op korte termijn ziekteverschijnselen te vertonen. Deze gebieden zullen in elk geval geëvacueerd worden.

In het rapport "Kernenergie in Discussie" werd er reeds op gewezen dat "ook al zou getracht worden het noodzakelijke, gigantische evacuatie-programma van de grond te krijgen, het niet waarschijnlijk is dat dat zou slagen. Radioactiviteit vormt een voor de bevolking zonder gebruik van speciale apparatuur niet detecteerbare bedreiging. Daardoor ontstaat de situatie dat enerzijds een deel van de bevolking er door de autoriteiten van overtuigd moet worden, dat zij in gevaar is en dat pijnlijke maatregelen (b.v. evacuatie) noodzakelijk zijn, terwijl een ander deel van de bevolking in daaraan grenzende gebieden er juist van overtuigd moet worden dat zij niet in gevaar is, en op haar plaats moet blijven. De grens van de gebieden is bovendien nogal arbitrair en oncontroleerbaar. De dubbelzinnigheid van deze situatie maakt dat een geordende en snelle evacuatie, zeker op grote schaal hoogst waarschijnlijk onmogelijk is."

Hoe waar deze prognose is, is gebleken bij een enigszins vergelijkbaar geval, zij het op veel kleinere schaal, n.l. de TCDD-ramp in Seveso, Italië. Nadat in juli 1976 uit een chemische fabriek naar schatting 2 kg. van het uiterst giftige TCDD in de omgeving werd verspreid, zijn vele honderden inwoners (te laat) geëvacueerd. Een groot besmet gebied (maar waarschijnlijk toch nog te klein) werd "afgegrensd". Ook bij betreden van een met TCDD besmet gebied ondervindt men geen direkte schadelijke gezondheidseffecten. In oktober 1976 drongen 200 van de geëvacueerde bewoners met geweld door tot het afgesloten gebied en trokken weer in hun huizen. Met moeite zijn ze weer verwijderd. Nu, na 3/4 jaar is het gebied nog steeds besmet en geen mogelijkheid bekend tot ontsmetting. Het illustreert enigszins, op kleine schaal, het soort problemen waarvoor men, op grote schaal, bij een ramp met een kerncentrale komt te staan.

4. Aanvaardbaarheid van risico

De beoordeling van de aanvaardbaarheid van de mogelijkheid van grote reactorongelukken is geen op zich zelf staande zaak. Het is één van de aspecten van kernenergie en dient in samenhang met de andere problemen van kernenergie beschouwd te worden. Bij de beoordeling van de wenselijkheid van de invoering van kernenergie zal men ook de voordelen moeten bekijken. Bij de beoordeling van de noodzaak van invoering zal men de alternatieven voor zowel de wijzen van energieverbruik als de wijzen van energievoorziening moeten beschouwen. In het afwegingsproces zal duidelijk moeten zijn welke menselijke en maatschappelijke waarden men het zwaarst laat wegen. Toch doet zich de vraag voor of er geen maatstaf te vinden is om het gevaar van grote reactorongelukken te beoordelen. De laatste tijd wordt in

risicobeschouwingen vaak de grootheid 'kans x gevolgen' als zodanig gehanteerd. Daarbij maakt het, ruw gesproken, dan niet uit of er een kans is van eens in de 10 miljoen jaar op een ongeluk met 300000 slachtoffers of een kans van eens in de 100 jaar op 3 slachtoffers. In beide gevallen is het aantal slachtoffers gemiddeld over alle jaren hetzelfde. (Nog in het midden latend wat de waarde van de kansberekening is.)

Deze benadering lijkt ons volkomen ongeschikt voor de beoordeling van de aanvaardbaarheid van ongelukken met een dergelijke omvang als in dit rapport beschreven. Het hier beschreven reactorongeluk met zijn lange termijn gevolgen en de resulterende maatschappelijke ontwrichting is kwalitatief anders dan bijvoorbeeld een bedrijfsongeval of een verkeersongeval waarbij 3 mensen om het leven komen.

De wezenlijke vraag is dan ook, of elk ongeluk, hoe omvangrijk de gevolgen ook zijn, aanvaardbaar is, als de berekende kans op zo'n ongeluk maar klein genoeg is. Wij zijn geneigd deze vraag ontkennend te beantwoorden.

Er is een maximum aan de grootte van ongelukken die nog maatschappelijk aanvaardbaar moeten worden geacht. Zeker als de noodzaak van het introduceren van activiteiten waaraan deze gevaren verbonden zijn ontbreekt.

Referenties hoofdstuk VI

1. Zie voor dit probleem bijv.
 - a) P. Boskma "Reaktor en bom: een siamese tweeling" in "Problemen van Kernenergie" Wetenschap en Samenleving 74/8 (aug 1974);
 - b) F.B. van der Meer, W.A. Smit en P. Boskma "Civiele nukleaire technologie en verspreiding van kernwapens", Wetenschap en Samenleving 76/7 (juli 1976)
2. Zie hiervoor o.a.
 - a) "Kernenergie in Discussie: een beschouwing naar aanleiding van drie veiligheidsstudies", Boerderijcahier 7502, THTwente (1975) hfdst. VIII;
 - b) Zie ook ref. 1a.
3. Zie bijv. Boerderijcahier 7502, THTwente, hfdst. IX.
4. Zie bijv.
 - a) H.J. Groenewold "We moeten kernenergie - maar mag dat wel?" in "Problemen van Kernenergie", in Wetenschap en Samenleving 74/8 (1974);
 - b) Boerderijcahier 7502, THTwente, hfdst. III.
- 5 a) Zie bijv. de illegale af luisteraffaire van de kernfysicus K.R. Traube door de Duitse Verfassungsschutz. Der Spiegel (28 febr. 1977), p. 19 e.v.;
 - b) "Atomstaat oder Rechtsstaat", commentaar van Rudolf Augstein, uitgever van der Spiegel, op de af luisteraffaire van Traube in der Spiegel (28 febr. 1977), p. 29 e.v.;
 - c) Zie ook ref. 1a);
 - d) Boerderijcahier 7502, THTwente (1975) hfdst. VIII.
6. Boerderijcahier 7502, THTwente (1975).

APPENDIX A Radioactieve inhoud van een reaktor en enkele fysische konstanten van de radioactieve isotopen

In onderstaande tabel is een zo volledig mogelijk overzicht gegeven van de radioactieve inhoud van een reaktor met een vermogen van 1000 MWe. Tevens zijn voor alle isotopen de halveringstijd en de gemiddelde β - en γ -energie, die vrijkomt bij verval, vermeld.

1.1 Reaktorinhoud

Voor de bepaling van de radioactieve inhoud van een reaktor werd in eerste instantie uitgegaan van de gegevens zoals die berekend zijn door Blomeke e.a.¹⁾. Aanvullende gegevens kwamen uit een rapport van Pigford²⁾.

De hoeveelheden werden herleid op een reaktorinhoud van 90 ton licht verrijkt (ongeveer 3%) uranium, waarvan elk jaar één derde deel vervangen wordt. Aangenomen is dat gedurende de drie jaar dat de splijtstofstaven in de reaktor verblijven een versplijtingsgraad van 33000 MWd per ton wordt bereikt. De in de tabel gegeven hoeveelheden zijn die welke in de reaktor aanwezig zijn vlak voor het verwisselen van (één derde deel van) de lading.

De zo verkregen hoeveelheden werden vervolgens aangevuld met getallen verkregen uit eigen berekening.

Een redelijke eerste benadering voor de hoeveelheid van een radioactief isotoop in een kernreaktor, zoals die zich gedurende het splijtingsproces opbouwt, kan men verkrijgen m.b.v. de formule⁸⁾

$$A = 8.45 Y.M.(1-e^{-\lambda t}) \times 10^3 \text{ Curie} \quad (1)$$

Hierbij is A de hoeveelheid radioactiviteit in de reaktor van een bepaald isotoop na een bestralingstijd t van de splijtstof. M is het thermisch vermogen van de reaktor uitgedrukt in Megawatt. λ is de vervalsconstante van het radioactieve isotoop en Y de procentuele opbrengst van het isotoop bij splijting van U-235. De formule is gebaseerd op een energieproductie van 200 MeV per splijting.

Bij de berekening werden voor Y waarden gebruikt gebaseerd op gegevens van Davies³⁾. Behalve door rechtstreekse produktie bij splijting van U-235 wordt de hoeveelheid van een isotoop soms ook sterk mede bepaald door radioactief verval van een ander isotoop dat bij de splijting geproduceerd wordt. Hiermee is bij de berekening rekening gehouden.

1.2 Halveringstijd

Voor zover mogelijk werd uitgegaan van de gegevens volgens het Handbook of Chemistry and Physics⁴⁾.

1.3 β - en γ -energieën

In eerste instantie werden hiervoor de gegevens uit de Table of Isotopes⁵⁾ gebruikt. Deze werden zo mogelijk aangevuld met gegevens uit andere referenties. Indien geen energiewaarden werden gevonden of hierover onvoldoende duidelijkheid bestond is dit weergegeven door een streepje (-). In de berekeningen werd in die gevallen een energiewaarde gelijk 0 gebruikt.

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
H-3	43000			12.26 j			0.006	0	
Ca-45	2.8			165 d		0.84		0	
Sc-46	383			83.80 d		0.12		2.0	
Cr-51	2.6×10^6			27.8 d			-		-
Mn-54	15000			303 d			-		-
Fe-55	1.6×10^6			2.6 j		0		0.23	
Fe-59	25000			45.1 j		0.17		1.18	
Co-58	8.4×10^5			71.3 d		0.13			-
Co-60	4.0×10^5			5.26 j		0.12		2.48	
Ni-59	231			80000 j		0		0	
Ni-63	34000			92 j		0.067		0	
Zn-72			406	46.5 u		0.1		0.14	
Zn-73			2790		2 m ³⁾		1.6 ⁶⁾		-
Ga-72			406	14.10 u		0.40		2.82	
Ga-73			2790	4.9 u		0.38		0.4	
Ga-74			8870	7.9 m			-		3.1 ³⁾
Ga-75			30000	2 m		1.1		0.006	
Ge-75m			1220		48 s ⁵⁾	0		0.14	
Ge-75			29000	82.78 m		0.35		0.14	
Ge-77m			1.8×10^5	54 s		0.68		0.08	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ⁴⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Ge-77	24		68000	11.3 u	3.9 m ⁵⁾	0.52	0.986 ⁶⁾	1.18	0.36 ³⁾
Ge-78			5.0x10 ⁵	1.47 u		0.24		0.28	
As-77			2.0x10 ⁵	38.8 u		0.22		0.01	
As-78			5.0x10 ⁵	91 m		1.1		1.0	
As-79			1.4x10 ⁶	9.0 m		0.71		0.08	
Se-79m			1.4x10 ⁶	65000 j		0		0.096	
Se-79						0.05		0	
Se-81m			1.3x10 ⁵			0		0.103	
Se-81			4.5x10 ⁶			0.55		0.007	
Se-83			1.3x10 ⁷			0.46		2.23	
Se-84			2.4x10 ⁷						
Br-82			43000			0.148		2.65	
Br-83			1.3x10 ⁷			0.30		0.057	
Br-84			2.5x10 ⁷			1.065		1.5	
Br-85			3.3x10 ⁷			0.83		0	
Br-86			4.8x10 ⁷			-		0.82 ³⁾	
Br-87			6.1x10 ⁷			1.41		1.88	
Kr-83m	5.7x10 ⁶	1.86 u	0	0.0418					
Kr-85m	1.7x10 ⁶	4.39 u	0.208	0.186					
Kr-85	6.8x10 ⁵	10.76 j	0.23	0.002					
Kr-87	3.4x10 ⁷	76 m	1.05	0.74					

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Kr-88	45000	5.0x10 ⁷		2.80 u	1.3 m ⁵⁾	0.34	1.077 ⁷⁾	1.78	3.89 ⁷⁾
Kr-89		6.1x10 ⁷		3.2 m					
Rb-86				18.66 d		0.56		0.094	
Rb-88			8.5x10 ⁷	17.8 m		1.61		0.37	
Rb-89			1.1x10 ⁸	15.4 m		0.51		2.4	
Rb-90			1.5x10 ⁸	2.9 m		1.1		3.25	
Rb-91	6.4x10 ⁷ 4.6x10 ⁶		1.4x10 ⁸	1.2 m		1.53	2.69 ⁷⁾	0.9	0.565 ⁷⁾
Sr-89				52 d		0.487		0	
Sr-90				28.1 j		0.18		0	
Sr-91			1.5x10 ⁸	9.67 u		0.54		0.92	
Sr-92			1.5x10 ⁸	2.71 u		0.22		1.26	
Sr-93			1.6x10 ⁸	8 m		0.92		2.0	
Sr-94	4.8x10 ⁶ 8.5x10 ⁷		1.3x10 ⁸			0.7		1.42	
Sr-95			8.6x10 ⁷	0.8 m					
Y-90				64 u		0.76		0.035	
Y-91m			8.8x10 ⁷	50 m		0		0.551	
Y-91				58.8 d		0.52		0.004	
Y-92			1.5x10 ⁸	3.53 u		1.13		0.244	
Y-93			1.6x10 ⁸	10.2 u		0.93	1.515 ⁷⁾ 1.263 ⁷⁾	0.095	0.738 ⁷⁾ 0.897 ⁷⁾
Y-94			1.6x10 ⁸	20.3 m					
Y-95			1.5x10 ⁸	10.9 m					

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Y-96			1.5x10 ⁸	2.3 m			-		-
Zr-93	114			1.5x10 ⁶ j		0.02		0	
Zr-95	1.3x10 ⁸			65 d		0.13		0.73	
Zr-97			1.6x10 ⁸	17 u		0.61		0.15	
Zr-98			1.4x10 ⁸	1 m		0.5			0 ³⁾
Nb-93m	0.5				13.6 j ⁵⁾	0		0.03	
Nb-94			1.1	20000 j		0.17		1.57	
Nb-95m	2.5x10 ⁶				90 h ⁵⁾	0		0.235	
Nb-95	1.2x10 ⁸			35.15 d		0.053		0.76	
Nb-96			16000	23.4 u		0.24		2.43	
Nb-97m			1.5x10 ⁸	1.0 m		0		0.747	
Nb-97			1.6x10 ⁸	72 m		0.42		0.67	
Nb-98			1.5x10 ⁸	51 m		1.0		1.6	
Nb-99			1.5x10 ⁸	2.4 m		1.0			0
Nb-100			1.6x10 ⁸	3.0 m			2.0 ⁴⁾		0.85 ³⁾
Nb-101			1.2x10 ⁸	1.0 m			-		-
Mo-93	1.2			100 j			-		-
Mo-99			1.5x10 ⁸	66.69 u		0.35		0.31	
Mo-101			1.3x10 ⁸	14.6 m		0.39		1.65	
Mo-102			1.0x10 ⁸	11 m		0.4		0	
Mo-103			7.4x10 ⁷	62 s			-		-

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Mo-104			4.3×10^7	1.3 m			-		-
Tc-99m			1.4×10^8	6.0 u		0		0.14	
Tc-99	850			2.12×10^5 j		0.097		0	
Tc-101			1.3×10^8	14 m		0.44		0.32	
Tc-102	alleen als dochter isotoop			5 s		1.4		0	
Tc-103			7.6×10^7	50 s			-		-
Tc-104			4.6×10^7	18 m			-		-
Tc-105			2.3×10^7	8 m		1.13		0.11	
Ru-103	1.0×10^8			39.6 d		0.072		0.52	
Ru-105			2.3×10^7	4.44 u			0.388 ⁷⁾		0.693 ⁷⁾
Ru-106	3.6×10^7			367 d		0.013		0	
Ru-107			4.8×10^6	4.2 m		0.083		2.95	
Ru-108			1.7×10^6	4.5 m		0.42		0.046	
Rh-103m	1.0×10^8				57 m ⁵⁾	0		0.04	
Rh-105m			4.8×10^6	45 s			0 ⁷⁾		0.13 ⁶⁾
Rh-105			2.3×10^7	35.9 u		0.15		0.1	
Rh-106	5.0×10^7			30 s		1.13		0.13	
Rh-107			4.8×10^6	22 m		0.40		0.3	
Rh-108	alleen als dochter isotoop			17 s			-		0.38 ³⁾
Pd-107	6			7×10^6 j		0.04		0	
Pd-109			7.6×10^5	13.47 u		0.34		0	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Pd-111			4.8×10^5	22 m		0.73		0	
Pd-112			2.5×10^5	21 u		0.093		0.018	
Pd-113			4.0×10^5	1.4 m			-		-
Pd-114			3.2×10^5	2.4 m			-		0 ³⁾
Pd-115			1.7×10^5	45 s			-		-
Ag-109m			7.6×10^5	40 s		0		0.0877	
Ag-110m	2.3×10^5			253 d		0.08		2.74	
Ag-111m			4.8×10^5	74 s		0		0.07	
Ag-111	3.6×10^6			7.5 d		0.34		0.04	
Ag-112			2.5×10^5	3.2 u		1.0		0.95	
Ag-113m			4.0×10^5	1.2 m			0 ⁶⁾		-
Ag-113	alleen als dochterisotoop			5.3 u			-		-
Ag-114			3.6×10^5	2 m			1.37 ⁶⁾		-
Ag-115			2.0×10^5	20 m		0.7		1.2	
Ag-115m	alleen als dochterisotoop								
Ag-116			4.3×10^5	2.5 m			-		-
Ag-117			2.2×10^5	1.1 m			-		-
Cd-113m	600			14 j		0.19		0.0003	
Cd-115m	50000			43 d		0.53		0.05	
Cd-115			2.3×10^5	53.5 u		0.31		0.20	
Cd-117			2.8×10^5	2.4 u		0.4		0.96	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halfwaardetijd ⁵⁾		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Cd-118			3.5×10^5	49 m		0.27		0	
Cd-119			3.2×10^5	10 m		1.2		0	
In-114m	136			50.0 d		0		0.19	
In-114	200			72 s		0.63		0.003	
In-115m			2.3×10^5	4.50 u		0.01		0.31	
In-116m			590	54 m		0.84		0.81	
In-117m			2.8×10^5	1.93 u		0.34		0.17	
In-117			1.3×10^5	44 m		0.24		0.73	
In-119m			3.2×10^5	18 m		0.85		0.07	
In-119			32000	2.1 m		0.55		0.83	
In-120			3.5×10^5		44.3 s ³⁾	0.97		2.4	
Sn-117m	1.1×10^6			14 d		0		0.317	
Sn-119m	1200			250 d		0		0.089	
Sn-121m	20			76 j		0.15		0.037	
Sn-121			3.5×10^5	27 u		0.13		0	
Sn-123	8.0×10^5			42 m		0.44		0	
Sn-125	5.5×10^6			9.4 d		0.78		0.07	
Sn-126	32			1×10^5 j			0.85 ⁶⁾		-
Sn-127			3.2×10^6	2.1 u			1.61 ⁶⁾		-
Sn-128			9.2×10^6	59 m		0.25		0.5	
Sn-129			1.8×10^7		7.5 m ³⁾		-		-

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie (in MeV)		Gemiddelde γ energie (in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Sn-130			2.8×10^7		$2.6 \text{ m}^{5)}$		-		-
Sn-131			2.6×10^7		$3.4 \text{ m}^{5)}$		-		-
Sn-133			2.0×10^6		55 $\text{s}^{3)}$		-		-
Sb-122			228	2.8 d		0.50		0.47	
Sb-124	2400			60.3 d		0.34		1.9	
Sb-125	5.7×10^5			2.7 j		0.10		0.45	
Sb-126m	1300			19 m		0.63		1.8	
Sb-126	3400			12.5 d		0.63		1.8	
Sb-127			3.5×10^6	93 u		0.40		0.39	
Sb-128m			9.1×10^6	11 m		0.8		1.9	
Sb-128			2.4×10^6		$9.0 \text{ u}^{3)}$	0.8		1.9	
Sb-129			2.5×10^7	4.3 u		0.6		0.7	
Sb-130			5.1×10^7	2.6 m			$2.2^{6)}$		$2.74^{3)}$
Sb-131			6.3×10^7	25 m			$1.8^{6)}$		$0.7^{3)}$
Sb-132			8.3×10^7	2.1 m			$2.6^{6)}$		-
Sb-133			8.1×10^7	4.2 m			$2.1^{6)}$		-
Sb-134			4.3×10^7		45 $\text{s}^{6)}$		$2.9^{6)}$		-
Te-123m	50			117 d		0		0.25	
Te-125m	2.0×10^5			58 d		0		0.14	
Te-127m	1.3×10^6			109 d		0		0.089	
Te-127	6.4×10^6			9.4 u		0.23		0.001	
Te-129m	5.0×10^6			34 d		0.02		0.10	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie (in MeV)		Gemiddelde γ energie (in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Te-129	3.0×10^7			69 m		0.46		0.10	
Te-131m			9.5×10^6	30 u		0.156		1.59	
Te-131			6.2×10^7	25 m		0.63		0.37	
Te-132			1.0×10^8	78 u		0.07		0.38	
Te-133m			5.8×10^7	50 m		0.44			2.182 ⁷⁾
Te-133			1.1×10^8	12.5 m		0.54			1.30 ⁷⁾
Te-134			1.6×10^8	42 m			0.466 ⁷⁾		0.48 ³⁾
I-128	2		1200	25.1 m		0.63		0.24	
I-129				1.7×10^7 j		0.05		0.04	
I-130			16000	12.3 u		0.28		2.16	
I-131		7.7×10^7		8.1 d		0.19		0.40	
I-132			1.0×10^8	2.3 u		0.45		2.22	
I-133			1.4×10^8	20.9 u		0.45		0.45	
I-134			1.6×10^8	52 m		0.46		2.83	
I-135			1.2×10^8	6.7 u		0.31		1.88	
I-136			5.4×10^7	83 s			1.405 ⁷⁾		2.814 ⁷⁾
Xe-131m	5.7×10^5			11.8 d		0		0.164	
Xe-133m			3.3×10^6	2.26d		0		0.233	
Xe-133	1.4×10^8			5.27d		0.115		0.082	
Xe-135m			3.7×10^7	15.6 m		0		0.527	
Xe-135			2.6×10^7	9.2 u		0.31		0.23	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Xe-137		1.3×10^8		3.9 m		1.31		0.15	
Xe-138		1.3×10^8		17 m		0.80		0.40	
Xe-139		1.1×10^8		42 s			1.58 ⁷⁾		0.258 ⁷⁾
Cs-134	1.6×10^7			2.05 j		0.166		1.56	
Cs-135	17			3×10^6 j		0.07		0	
Cs-136	5.4×10^6			13 d		0.12		2.17	
Cs-137	6.0×10^6			30.23 j		0.19		0.62	
Cs-138			1.7×10^8	32.2 m		0.89		2.15	
Cs-139			1.6×10^8	9.5 m			0.125 ⁷⁾		0.23 ⁷⁾
Cs-140			1.5×10^8	66 s			1.532 ⁷⁾		1.401 ⁷⁾
Ba-137m	6.0×10^6			2.55 m		0		0.662	
Ba-139			1.6×10^8	82.9 m		0.77		0.028	
Ba-140	1.4×10^8			12.8 d		0.27		0.25	
Ba-141			1.5×10^8	18 m			0.857 ⁷⁾		0.528 ⁷⁾
Ba-142			1.5×10^8	11 m			0.383 ⁷⁾		1.150 ⁷⁾
La-140	1.4×10^8			40.22 u		0.40		2.56	
La-141			1.5×10^8	3.9 u		0.78		0.077	
La-142			1.5×10^8	92 m		0.7		2.4	
La-143			1.5×10^8	14 m			1.07 ⁷⁾		0.075 ⁷⁾
La-144			1.3×10^8		41 s s		0.902 ⁷⁾		2.706 ⁷⁾
Ce-141	8.3×10^7			33 d		0.165		0.086	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Ce-143	7.8x10 ⁷		1.5x10 ⁸	33 u		0.354		0.377	
Ce-144				284.9 d		0.091		0.046	
Ce-145			9.8x10 ⁷	3.0 m		0.67		0.6	
Ce-146			7.2x10 ⁷	14 m		0.23		0.77	
Ce-147			4.8x10 ⁷	65 s			-		-
Ce-148	1.1x10 ⁸		2.7x10 ⁷	43 s			-		-
Pr-143				13.7 d		0.31		0	
Pr-144			1.0x10 ⁸	17.3 m		0.99		0.031	
Pr-145			9.8x10 ⁷	5.98u		0.6			0.012 ³⁾
Pr-146			7.5x10 ⁷	24 m		0.8		1.7	
Pr-147	6.7x10 ⁶			12.0 m		0.62		0.85	
Pr-148			4.1x10 ⁷	2.0 m		1.4		0.3	
Nd-147	5.3x10 ⁷			11.1 d		0.23		0.21	
Nd-149			2.6x10 ⁷	1.73u		0.41		0.44	
Nd-151			1.0x10 ⁷	10 m		0.64		0.47	
Pm-147	6.7x10 ⁶			2.5 j		0.075		0	
Pm-148m	3.5x10 ⁶			42 d			-	0.14	
Pm-148	1.8x10 ⁷			5.39d		0.61		0.64	
Pm-149			2.4x10 ⁷	53.1 u		0.34		0.047	
Pm-150			33000	2.7 u		0.74		1.21	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Pm-151			1.1×10^7	28 u		0.28		0.36	
Pm-152			6.1×10^6	6 m		0.73		1.3	
Pm-154			1.3×10^6	2.5 m		0.83		0	
Sm-151	75000			93 j		0.025		0.0004	
Sm-153			4.1×10^6	46.8 u		0.24		0.09	
Sm-155			7.6×10^5	22 m		0.56		0.11	
Sm-156			2.9×10^5	9.4 u		0.19		0.16	
Eu-152	750			13 j			-		-
Eu-154	4.2×10^5			16 j		0.25		1.23	
Eu-155	5.1×10^5			1.81 j		0.056		0.08	
Eu-156	2.0×10^7			15 d		0.40		1.25	
Eu-157			1.6×10^5	15.2 u		0.33		0.33	
Eu-158			81000	46 m			0.87 ⁶⁾		1.7 ³⁾
Eu-159			19000	18 m		0.66		0.58	
Eu-160			3300	2.5 m		1.2		0	
Gd-153	2500			242 d			-	0.1	
Gd-159			26000	18 u		0.30		0.06	
Tb-160	1.1×10^5			73 d		0.21		1.18	
Pb-212	0.14			10.64 u			-		-
Bi-212	0.14			60.6 m			-		-
Po-216	alleen als dochterisotoop			0.155			-		-

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Rn-220	0.14			55 s		0		0	
Ra-224	0.14			3.64d		0		0.01	
Th-228	0.14			1.913j		0		0.02	
Th-231	71			25.5 u		0.08		0.10	
Th-234	28			24.1 d		0.05		0.03	
Pa-231	alleen als dochterisotoop			32500 j		0		0.07	
Pa-233	29			27.0 d		0.07		0.33	
Pa-234 m	29			1.17m		0.77		0	
U-232	0.54			73.6 j		0		0.02	
U-233	alleen als dochterisotoop			1.62x10 ⁵ j		0		0.005	
U-234	67			2.47x10 ⁵ j		0		0.01	
U-235	1.5			7.1x10 ⁸ j		0		0	
U-236	26			2.39x10 ⁷ j		0		0.01	
U-237	7.8x10 ⁷			6.75 d		0.17		0	
U-238	28			4.51x10 ⁹ j		0		0	
Np-237	20			2.14x10 ⁶ j		0		0	
Np-239	1.7x10 ⁹			2.35d		0.24		0	
Pu-236	14			2.85j		0		0	
Pu-238	1.6x10 ⁵			86 j		0		0.01	
Pu-239	19000			24400 j		0		0	
Pu-240	29000			6580 j		0		0	

Isotoop	Reaktorinhoud 1000 MWe (in Curie)			Halveringstijd		Gemiddelde β energie(in MeV)		Gemiddelde γ energie(in MeV)	
	Blomeke e.a. ¹⁾	Pigford ²⁾	eigen berekening	Handbook ⁴⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties	Table of Isotopes ⁵⁾	Andere referenties
Pu-241	6.3×10^6			13.2 j		0.007		0	
Pu-242	83			3.79×10^5 j		0		0.01	
Am-241	5100			458 j		0		0.06	
Am-550	550			152 j		0		0.048	
Am-242	5.7×10^6			16.0 u		0.20		0.02	
Am-243	1086			7370 j		0		0.08	
Cm-242	2.3×10^6			163 d		0		0.01	
Cm-243	220			32 j		0		0	
Cm-244	1.5×10^5			17.6 j		0		0.01	
Cm-245	20			9300 j		0		0.18	
Cm-246	4			5500 j		0		0.01	
Bk-249	0.25			314 d		0.04		0	
Cf-249	alleen als dochter isotoop			360 j		0		0.4	

Referenties

1. J.O. Blomeke, C.W. Kee, J.P. Nichols, "Projections of Radioactive Wastes to be Generated by the U.S. Nuclear Power Industry", ORNL-TM-3965 (1974).
2. T.H. Pigford, "Protection of the Public from radioactivity produced in Nuclear Power Reactors", Transactions on Nuclear Science (1972)
3. B.S.J. Davies, "Data for the Calculation of gamma radiation spectra from fission products", General Electricity Generating Board, RD/B/M1551, JNPC/SWP/P160 (jan. 1970).
4. "Handbook of Chemistry and Physics", 51th edition, the Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, U.S.A., (1970).
5. C.M. Lederer, J.M. Hollander en I. Perlman, "Table of Isotopes", 6th. ed., John Wiley & Sons inc., London (1967).
6. J.O. Blomeke en M.F. Todd, "Uranium-235 fission-product as a function of thermal neutron flux, irradiation time, and decay time", ORNL-2127, (1957).
7. A.J. Brook, "Calculations on the gaseous and volatile fission products in highly irradiated nuclear fuel", UKAEA-AHSB(S)R140. (1968)
8. Zie bij voorbeeld ook J.R. Beattie en P.M. Bryant, "Assessment of environmental hazards from reactor fission product releases", UKAEA-AHSB(S)R135. (1970)

APPENDIX B. METEREologisch VERSPREIDINGSMODEL EN RADIOactief VERVAL

1. Het verspreidingsmodel

1.1 Inleiding

Om de in dit rapport beschreven radioactieve besmetting te bepalen, ten gevolge van de lozing van een grote hoeveelheid radioactief materiaal, is uitgegaan van het Gaussische metereologische verspreidingsmodel, dat ook uitgangspunt voor de berekeningen in het Gezondheidsraad rapport is geweest¹⁾.

De basisformule voor de concentratie-verdeling in dit Gaussische pluimmodel is²⁾

$$\chi(x, y, z; H_0) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left\{ \exp \left[\frac{-(z-H_0)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[\frac{-(z+H_0)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (1)$$

Hierbij is

$\chi(x, y, z; H_0)$ = de gemiddelde concentratie in het punt (x, y, z) ten gevolge van de emissie op hoogte H_0 meter.

Q = het emissietempo van de bron, de bronsterkte, in Curie/sec.

x = afstand, in meters, langs de x-as, in de gemiddelde richting van de wind, gemiddeld over de periode waarover χ wordt berekend.

y = afstand, in meters, langs de y-as, loodrecht op de gemiddelde wind-richting.

z = afstand, in meters, boven het grondoppervlak.

u = de gemiddelde windsnelheid, in meters/sec, op hoogte H_0 .

σ_y en σ_z = standaardafwijking, in meters, van de gemiddelde concentratieverdeling op de as van de pluim in horizontale, respectievelijk verticale richting. σ_y en σ_z zijn functies van x .

σ_y en σ_z zijn afhankelijk van de weersomstandigheden. In dit rapport is gebruik gemaakt van een indeling in weerscategorieën volgens Pasquill³⁾.

1.2 Invloed van menglaag en pluimstijging

Bij de verspreiding van deeltjes via de atmosfeer moet men er rekening mee houden, dat menging in de atmosfeer vaak slechts plaats vindt binnen een menglaag van eindige dikte L .

Bij stijging van de pluim, gedurende de verspreiding, vindt bij een bepaalde hoogte reflectie (naar beneden) plaats, zodat, voorbij een zekere afstand in de wind-

richting, in feite een homogene verdeling in de verticale richting, binnen de menglaag, ontstaat.

De invloed van een menglaag met eindige dikte L is als volgt in rekening gebracht⁴⁾
Er worden drie gebieden onderscheiden: $x < x_1$, $x_1 < x < x_2$ en $x > x_2$, waarin verschillende formules voor de concentraties gebruikt worden.

Voor een lozing op grondniveau ($H_0=0$) worden x_1 en x_2 bepaald door de condities dat

$$\begin{aligned}\sigma'_z(x_1) &= 0.5L \\ \sigma'_z(x_2) &= 1.25L\end{aligned}\tag{2}$$

waarbij een effectieve dispersiecoëfficiënt $\sigma'_z(x)$ ingevoerd is, om in de spreiding in de verticale richting het effect van pluimstijging in te bouwen.

$\sigma'_z(x)$ wordt gedefinieerd door

$$\sigma'_z(x) = [\sigma_z^2(x) + H^2(x)]^{\frac{1}{2}}$$

$H(x)$ is de hoogte van de pluimstijging t.g.v. de warmteinhoud van de wolk.

Voor de Pasquill-stabiliteitsklassen A,B,C,D kan deze beschreven worden volgens⁵⁾

$$H(x) = \left[\frac{1.5t^2}{u \epsilon^2} \left(\frac{1}{3} F^* At + F \right) \right]^{\frac{1}{3}}\tag{3}$$

en voor Pasquill-stabiliteitsklassen E en F door⁶⁾

$$H(x) = \left[\frac{3}{\beta u \epsilon^2} (F^* At + F) \right]^{\frac{1}{3}}\tag{4}$$

waarin

$\beta = 0.5 \times 10^{-3}$ voor klasse E (in sec^{-2})

$\beta = 1.2 \times 10^{-3}$ voor klasse F (in sec^{-2})

$\epsilon = 0.44$

$t = \text{reistijd} = \frac{x}{u}$ (in sec)

$A = \text{totale activiteit in de wolk}$ (in Curie)

$u = \text{windsnelheid}$ (in m/sec)

$F = \text{parameter voor de aanvankelijke energieinhoud}$ (in m^4/sec^3)

$F^* = \text{parameter voor de invloed van radioactief verval op de warmteinhoud van de wolk}$ (in m^4/sec^3)

$$F = \frac{g Q}{\pi \rho c_p T} \quad \text{en} \quad F^* = \frac{g Q^*}{\pi \rho c_p T}\tag{5}$$

waarin

- g = zwaartekrachtversnelling ($=9.8 \text{ m/sec}^2$)
 c_p = soortelijke warmte ($=0.24 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$)
 ρ = soortelijke massa ($=1.2 \text{ kg/m}^3$)
 T = absolute temperatuur ($= 300^\circ\text{K}$)
 Q = warmtelozing bij vrijkomen van de wolk (Kcal/sec)
 Q^* = warmteproductie in geloosde wolk door radioactief verval (Kcal/sec per Curie activiteit in de wolk).

Bovenstaande formules (3) en (4) zijn de door Gifford gemodificeerde formules van Briggs⁷⁾.

De dikte L van de menglaag wordt voor de weerscategorieën A,B en C op 1500 meter gesteld en voor stabiliteitsklassen D,E, en F op 1000 meter, overeenkomstig de gegevens van het Gezondheidsraadrapport⁸⁾.

1.3 Stabiliteitsklassen

Voor het toekennen van waarden aan de dispersiecoëfficiënten σ_y en σ_z is gebruik gemaakt van een indeling van de weerscategorieën in 6 klassen (A,B,C,D,E en F) zoals voorgesteld door Pasquill.

De dispersiecoëfficiënten kunnen daarin benaderd worden door functies van de volgende vorm⁹⁾

$$\sigma_z = ax^b + c \quad \text{en} \quad \sigma_y = \alpha x^\beta \quad (6)$$

waarbij de waarde van a,b,c, α en β in tabel B.1 vermeld staan.

1.4 Verspreidingsformules

Voor de drie gebieden worden 3 verschillende diffusieformules gebruikt (concentratie op grondniveau):

voor afstanden kleiner of gelijk aan x_1 :

$$\chi(x,y) = \frac{Q(x)}{\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right] \quad (7)$$

voor $x > x_2$:

$$\chi(x,y) = \frac{Q(x)}{\sqrt{2\pi} L u \sigma_y(x)} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right] \quad (8)$$

voor $x_1 < x < x_2$

$$\chi(x,y) = \exp [a \ln(x) + b] \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right] \quad (9)$$

Tabel B1. Parameters voor dispersiecoëfficiënten

Stabiliteits- klasse	x<1000 m					x>1000 m				
	a	b	c	α	β	a	b	c	α	β
A	0.0015	1.941	9.27	0.3658	0.9031	0.00024	2.94	- 9.6	0.3658	0.9031
B	0.038	1.149	3.3	0.2751	0.9031	0.055	1.098	2.0	0.2751	0.9031
C	0.113	0.911	0	0.2089	0.9031	0.113	0.911	0	0.2089	0.9031
D	0.222	0.725	-1.7	0.1474	0.9031	1.26	0.516	- 13	0.1474	0.9031
E	0.211	0.678	-1.3	0.1046	0.9031	6.73	0.305	- 34	0.1046	0.9031
F	0.086	0.74	-0.35	0.0722	0.9031	18.05	0.18	- 48.6	0.0722	0.9031

In deze formule is:

$\chi(x,y)$ = de concentratie van de activiteit op de plaats (x,y,o) geïntegreerd over de tijdsduur van het overdrijven van de radioactieve wolk, in Curie sec/m^3 .

$Q(x)$ = de effectieve bronsterkte voor de geloosde hoeveelheid radioactiviteit op afstand x , in Curie (zie ook paragraaf 1.5 en 1.6).

u = windsnelheid, in m/sec .

y = afstand in horizontale richting loodrecht op de windrichting in meters.

σ_y, σ_z = dispersiecoëfficiënten voor y -, resp. z -richting, in m .

L = dikte van de menglaag, in m .

$$a = \ln \left[\frac{\chi(x_1, o)}{\chi(x_2, o)} \right] / \ln \left[\frac{x_1}{x_2} \right] \quad (10)$$

$$b = \left[\ln \chi(x_1, o) \ln x_2 - \ln \chi(x_2, o) \ln x_1 \right] / \ln \left[\frac{x_2}{x_1} \right] \quad (11)$$

In formules (9) en (10) is dus:

$$\chi(x_1, o) = \frac{Q(x_1)}{\pi u \sigma_y(x_1) \sigma_z(x_1)} \quad (12)$$

$$\text{en} \quad \chi(x_2, o) = \frac{Q(x_2)}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x_2) L u} \quad (13)$$

5.5 Depositie

Behalve door diffusie, verandert de concentratie van radioactief materiaal in de pluim ook door de neerslag van deeltjes op de grond. Deze neerslag op de grond door turbulente beweging in de lucht wordt depositie genoemd. In de formules (7), (8), (9), (12) en (13) is hiermee rekening gehouden door introductie van een plaatsafhankelijke effectieve bronsterkte

$$Q(x) = Q_o P_1(x) P_2(t) \quad (14)$$

Hierbij is Q_o de werkelijke bronsterkte van de lozing van een bepaald radioactief isotoop. $P_1(x)$ en $P_2(t)$ zijn correctietermen voor resp. depositie en radioactief verval (zie par. 2).

De correctieterm $P_1(x)$ voor depositie wordt als volgt bepaald. De depositie $\omega(x,y)$ op de plaats (x,y) is volgens de hiervoor gebruikelijke formule¹⁰⁾

$$\omega(x,y) = v_g \chi(x,y,o) \text{ curie}/\text{m}^2 \quad (15)$$

waarin v_g de depositiesnelheid is, uitgedrukt in m/sec en $\chi(x, y, 0)$ de concentratie van de radioactieve deeltjes op grondniveau (in Curie sec/m³).

De afname van de effectieve bronsterkte $Q(x)$ per eenheid afstand door deze neerslag wordt dan gegeven door

$$\frac{\delta Q(x)}{\delta x} = - \int_{-\infty}^{\infty} \omega(x, y) dy \quad (16)$$

Hieruit volgt dat de correctieterm $P_1(x)$ de volgende vorm heeft

$$\text{voor } x < x_1 \text{ is } P_1(x) = \exp \left[- \frac{v_g}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z^2(x)} dx \right] \quad (17)$$

$$\text{voor } x > x_2 \text{ is } P_1(x) = P_1(x_2) \exp \left[\frac{-v_g}{uL} (x - x_2) \right] \quad (18)$$

terwijl voor het tussengebied $x_1 < x < x_2$ de correctieterm in de meeste gevallen goed benaderd wordt door de uitdrukking

$$P_1(x) = P_1(x_1) \exp \left[\frac{-v_g}{uL} (x - x_1) \right] \quad (19)$$

1.6 Neerslag t.g.v. uitregenen

Ook bij uitregenen zal neerslag van radioactief materiaal op het land plaatsvinden. Relatief gezien (t.o.v. de hoeveelheid materiaal in de overdrijvende radioactieve wolk) zelfs in sterkere mate dan bij droge depositie doordat dit uitregenen meestal in de gehele verticale pluimdoorsnee plaatsvindt, en de depositie dus niet alleen bepaald wordt door de concentratie van de wolk op grondniveau.

De neerslag $\omega(x, y)$ op het land van radioactief materiaal in geval van regen wordt, volgens Chamberlain¹¹⁾, bepaald door een uitregencoefficient Λ en de hoeveelheid radioactief materiaal in de wolk.

$$\omega(x, y) = \Lambda \int_0^{\infty} \chi(x, y, z) dz \quad (20)$$

Voor $x < x_1$ en $x > x_2$ wordt de neerslag op grond van deze formule beschreven door

$$\omega(x, y) = \frac{\Lambda Q(x)}{u \sigma_y^2(x)} \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{-y^2}{2 \sigma_y^2(x)} \right] \quad (21)$$

terwijl deze formule in de meeste gevallen voor het tussengebied $x_1 < x < x_2$ een goede benadering is.

De afname van de hoeveelheid radioactief materiaal in de wolk door deze neerslag wordt weer beschreven d.m.v. een correctieterm $P_1(x)$ (zie par. 1.5).

Deze heeft de volgende vorm

$$P_1(x) = e^{-\frac{\Lambda x}{u}} \quad (22)$$

waarin u de windsnelheid is en x de afstand tot de bron, en de uitregencoefficient Λ de fractie aangeeft die per seconde uit de wolk wordt verwijderd.

In dit rapport zijn voor Λ en v_g dezelfde waarden gebruikt als in de Rasmussenstudie, n.l.

isotoop	v_g (m/sec)	Λ (sec ⁻¹)
(edel)gassen zoals Kr, Xe	0	0
J, Br	5×10^{-3}	2×10^{-4}
andere isotopen	2×10^{-3}	1×10^{-4}

2. Radioactief verval

Nadat de kettingreactie in de reactor gestopt is verandert de hoeveelheid van de radioactieve isotopen praktisch alleen nog door radioactief verval. Dit heeft tot gevolg dat voor vele isotopen de hoeveelheid aan twee soorten van verandering onderhevig is: enerzijds een afname door radioactief verval van deze isotopen zelf, anderzijds een toename door radioactief verval van "moederisotopen" waarvoor "dochterisotopen" geproduceerd worden.

De afname van de activiteit $A(t)$ van een moederisotoop in de loop der tijd wordt gegeven door de betrekking

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t} \quad (23)$$

waarbij $A(t)$ de activiteit op tijdstip t is en λ de halveringsconstante van dit isotoop.

Als door radioactief verval van een moederisotoop een radioactief dochterisotoop ontstaat, dan wordt de activiteit van dit dochterisotoop op het tijdstip t , indien deze op tijdstip $t=0$ gelijk 0 is, bepaald door de volgende formule

$$A_1(t) = A_0 \lambda_1 \left[\frac{e^{-\lambda_0 t}}{\lambda_1 - \lambda_0} + \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_0 - \lambda_1} \right] \quad (24)$$

Hierin is

$$\begin{aligned} A_1(t) &= \text{de activiteit van het eerste dochterisotoop op tijdstip } t \\ A_0 &= \text{de activiteit van het moederisotoop op } t=0 \\ \lambda_0 &= \ln(2)/T_{1/2}^0, \text{ met } T_{1/2}^0 \text{ de halveringstijd van het moederisotoop} \\ \lambda_1 &= \ln(2)/T_{1/2}^1, \text{ met } T_{1/2}^1 \text{ de halveringstijd van het dochterisotoop.} \end{aligned}$$

Uit het eerste dochterisotoop kunnen door radioactief verval tweede, derde, etc. radioactieve dochterisotopen ontstaan.

Voor de activiteit van het i^{de} dochterisotoop geldt de relatie

$$A_i(t) = A_0 \prod_{j=1}^i \lambda_j \sum_{h=0}^i \frac{e^{-\lambda_h t}}{\prod_{\substack{p=0 \\ p \neq h}}^i (\lambda_p - \lambda_h)} \quad (25)$$

Hierbij is $\prod_{j=1}^i \lambda_j$ gedefinieerd als $\lambda_1 \times \lambda_2 \times \dots \times \lambda_i$ en

$$\prod_{j=1}^i \lambda_j = 1 \quad \text{voor } i=0$$

In de verspreidingsformules is met dit radioactief verval rekening gehouden middels de correctieterm $P_2(t)$ van formule (14).

$$P_2(t) = A_i(t)/Q_0$$

waarbij $Q_0 = A_0$ en t de tijd is die sinds het stoppen van de kettingreactie verstreken is.

Referenties appendix B.

1. Gezondheidsraad, "Kerncentrales en Volksgezondheid", Deel II, bijlage VI, (sept. 1975), p. 107 e.v. Verder aan te duiden met GRR II.
2. GRR II, p. 110.
3. F. Pasquill, "Atmosferic Diffusion", Van Nostrand Co., New York (1962).
4. "Luchtverontreiniging en weer", Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Staatsuitgeverij, 's Gravenhage (1974), p. 198 e.v.
5. Zie bijv. GRR II, p. 116.
6. Zie ref. 5.
7. F.A. Gifford Jr., "The rise of Strongly Radioactive Plumes", Journal of Appl. Meteorology 6 (1967), p. 644.
8. GRR II, p. 123.
9. F.Th.M. Nieuwstadt, "Stabiliteitsklassen en dispersiecoefficienten", Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, WR 75-3, (1975), p. 25.
10. Zie bijv. ref. 4., p. 207.
11. A.C. Chamberlain, "Aspects of Deposition of Aerosol and Vapour Clouds", U.K.A.E.A. Report AERE-HP/R1261 H.M.S.O. (1955)

APPENDIX C Berekeningsmethode voor stralingsdoses t.g.v. radioactieve besmetting

1. Inleiding

De doses als gevolg van blootstelling aan een radioactieve wolk zijn als volgt onder te verdelen:

- dosis door inademing van radioactief besmette lucht met daarop volgende depositie in longen en migratie naar andere organen
- dosis door uitwendige bestraling gedurende het overdrijven van de radioactieve wolk
- dosis t.g.v. verblijf in door neerslag van radioactief materiaal besmet gebied.

Voor beschouwingen over de gevolgen van radioactieve besmetting worden deze gevolgen meestal in drie categorieën ingedeeld, n.l. vroeg-somatische, laat-somatische en genetische schade, met de voor deze effecten relevante stralingsdoses.

2. Stralingsdosis t.g.v. depositie in de longen

In het geval van inademen van radioactief materiaal kan men drie wijzen van stralingsbelasting onderscheiden: de dosis die de longen krijgen door de depositie van het materiaal hierin, de dosis in de verschillende lichaamsorganen t.g.v. opname vanuit de longen in de bloedstroom en de daarop volgende ophoping in specifieke organen, en de inwendige totale lichaamsdosis.

Deze verschillende wijzen van stralingsbelasting kunnen alle met behulp van de in het ICRP-rapport, no. 2, verschaft gegevens worden berekend¹⁾. Opgemerkt moet worden dat het ICRP-rapport voor vele van de in appendix A genoemde isotopen nog onvoldoende gegevens geeft voor de berekening van de gezondheidseffecten.

2.1 Dosis in de verschillende organen

De inwendige stralingsbelasting van de kritische organen gedurende een tijd t na het overdrijven van een radioactieve wolk, waarbij radioactief besmette lucht ingeademd is bestaat uit de som van doses van alle radioactieve isotopen.

Voor een bepaald isotoop kan deze belasting als volgt berekend worden

$$D = \frac{E_{\text{eff}} \times 3.7 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-6}}{100 \text{ m}} \times I_f \int_0^t e^{-\lambda_{\text{eff}} t} dt \quad (1)$$

Hierin is:

- D = de dosis in het kritisch orgaan uitgedrukt in rem.
- E_{eff} = de per desintegratie vrijkomende effectieve energie (in MeV) voor de stralingsbelasting van het beschouwde orgaan.
- 3.7×10^{10} = aantal desintegraties per sek. van 1 Curie van het radioactieve isotoop
- 1.6×10^{-6} = ergs/MeV
- 100 = erg/gram per rad
- m = massa van het beschouwde orgaan (in gram)
- χ = concentratie van het radioactieve isotoop in de wolk (in Ci.sek/ m^3), gedurende de tijd van inademing.
- I = het gemiddelde volume lucht dat per seconde wordt in- en uitgeademend.
Dat is ongeveer $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sek}$, gemiddeld over een dag met een werktijd van 8 uur²⁾.
- f = fraktie van de ingeademde hoeveelheid van het isotoop die in het beschouwde orgaan terecht komt.
- t = tijd na inademing van de radioactieve isotopen.
- λ_{eff} = effectieve vervalskonstante gedefinieerd als

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}^r} + \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}^b}$$

waarin $T_{\frac{1}{2}}^r$ = radiologische halveringstijd (in sekonde)

$T_{\frac{1}{2}}^b$ = biologische halveringstijd (in sekonde)

In de berekeningen worden voor E_{eff} , m, f en $T_{\frac{1}{2}}^b$ de in de ICRP-publicatie-2 gegeven waarden gebruikt³⁾.

2.2 Stralingsdosis in de longen

De totale longdosis is onder te verdelen in twee afzonderlijke doses met enigszins verschillende oorsprong

- dosis, waarbij in de longen, net als in de andere organen, radioactieve isotopen via opname uit het bloed worden opgehoopt
- dosis t.g.v. depositie van onoplosbaar materiaal in de longen.

ad a). Deze dosis wordt op identieke wijze berekend als voor de andere kritische organen.

ad b). Ook hier wordt een analoge berekeningswijze toegepast, echter met dien verstande dat aangenomen wordt dat er een fraktie van 12½% in de longen achterblijft met een biologische halveringstijd van 120 dagen⁴⁾ met uitzondering van

plutonium, thorium en ruthenium, waarvoor een biologische halveringstijd van resp. 1 jaar, 4 jaar en 230 dagen aangehouden wordt⁵⁾. Voor zover in ICRP-publikatie-2 geen waarden voor de effectieve energie E_{eff} vermeld worden, is gebruik gemaakt van de gemiddelde β -energie die per desintegratie vrijkomt (zie Appendix A).

2.3 Inwendige totale lichaamsdosis

Voor de berekening van deze dosis wordt een identieke procedure gevolgd als bij de berekening van de stralingsbelasting van de kritische organen is toegepast.

3 Uitwendige totale lichaamsdosis t.g.v. γ -straling

De γ -dosis als gevolg van immersie in de radioactieve wolk wordt als volgt berekend⁶⁾:

$$D = \frac{1}{2} \int_0^t dt \times E_{\gamma} \times 1.6 \times 10^{-6} \times A \times 3.7 \times 10^{10} \times \frac{1}{1.2 \times 10^3 \times 100} \quad \text{rad} \quad (2)$$

Hierin is

D = de totale γ -lichaamsdosis (rad)

t = tijd gedurende welke de persoon in de radioactieve wolk verblijft (sek.)

E_{γ} = per desintegratie vrijkomende gemiddelde γ -energie (MeV)

1.6×10^{-6} = omrekeningsfaktor erg/MeV

A = aktiviteit in de wolk (Curie/m³)

3.7×10^{10} = aantal desintegraties per seconde van 1 Curie radioactief materiaal

1.2×10^3 = gewicht van 1 m³ lucht uitgedrukt in gram

100 = omrekeningsfaktor erg/gram per rad

De faktor $\frac{1}{2}$ voor het integraalteken geeft aan dat terug-verstrooiing aan het aardoppervlak verwaarloosd is. Verder wordt aangenomen dat de energiedissipatie per gram in biologisch weefsel even groot is als in lucht. Na uitvoering van de integratie luidt relatie (2):

$$D = 0.246 E_{\gamma} \chi \quad \text{rad} \quad (3)$$

Hierin is χ de geïntegreerde aktiviteit van het beschouwde isotoop in Curie $\times$ sek/m³ gedurende het overdrijven van de wolk, waarbij is aangenomen dat de hiervoor benodigde tijd klein is in verhouding tot de radioactieve vervaltijd van het isotoop in de wolk. Voor de meeste m.b.t. de voor de totale stralingsbelasting relevante isotopen is dit een redelijke aanname.

4. Dosis t.g.v. achtergrondstraling van besmet land

Volgens WASH-740⁷⁾ geeft een grondbesmetting van 1 Curie/m² met 0.7 MeV gamma-emitters een dosissnelheid van 10.6 rad/uur. Opgemerkt dient te worden dat het daarbij gaat over effen oppervlakken. Voor verblijf in het open veld is deze aanname redelijk bruikbaar binnen het door ons gehanteerde model. De stralingsbelasting door verblijf op besmet grondgebied wordt dan gegeven door

$$D = 15.14 \times E_{\gamma} \times A \times \int_0^t e^{-\lambda t} dt \quad (5)$$

Hierin is:

D = de dosis (rem)

15.14 = dosissnelheid van (1 Curie/m²) van 1 MeV γ -emitters (rad/uur)

E_{γ} = gemiddelde γ -energie van een isotoop per desintegratie (MeV)

A = besmettingsgraad van de grond met een isotoop (Curie/m²)

t = tijd van verblijf in het gebied (uur)

λ = vervalskonstante: $\frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ waarin $T_{1/2}$ de halveringstijd van het betreffende isotoop is (uitgedrukt in uren).

Voor de meeste isotopen geeft deze relatie goede waarden. Voor Cesium (134 en 137), die de belangrijkste isotopen voor deze soort stralingsbelasting blijken te zijn, geeft bovengenoemde relatie praktisch dezelfde waarden als de in de Rasmussen-studie gehanteerde relatie.

In dit rapport wordt de dosis berekend voor een verblijftijd in besmet gebied van 24 uur en 30 dagen na het ongeluk.

5. Onbewoonbare gebieden t.g.v. besmetting

Om na te gaan welke gebieden onbewoonbaar zullen zijn door radioactieve besmetting en voor welke termijn, dient men hiervoor een criterium te hebben.

Een eerste ruw criterium zou kunnen zijn de hoeveelheid straling die men oploopt bij verblijf in deze gebieden gedurende een jaar, te rekenen vanaf een bepaald tijdstip. In dit rapport zijn deze jaardoses uitgerekend voor 3 van dergelijke tijdstippen, nl. bij verblijf vanaf 1 week, 1 jaar en 5 jaar na het reactorongeluk.

Voor deze berekening die analoog is aan die voor de berekening van de stralingsbelasting t.g.v. grondbesmetting vanaf het moment van overdrijven van de radioactieve wolk (par. 4) dient rekening gehouden te worden met het proces van uitspoelen van de grond.

Het UNSCEAR-rapport van 1972⁹⁾ schat de halveringstijd voor uitspoeling van Sr-90 op 6-10 jaar. Cesium heeft het voordeel dat het gemakkelijk oplost en zodoende gemakkelijk zou kunnen wegspoelen. Echter, Cesium hecht zich bijzonder sterk aan grond en gebouwen waardoor het juist moeilijk wegspoelt. Het grootste deel blijft dan ook in de bovenste 10 cm van de grond.

Voor de bepaling van de stralingsbelasting t.g.v. een grondbesmetting met Cesium kan volgens het UNSCEAR-rapport van 1972, het uitspoelproces van Cesium het best als volgt beschreven worden¹⁰⁾: twee derde deel van het Cesium spoelt uit met een halveringstijd van 0.5 jaar en een derde deel met een halveringstijd van 100 jaar. Voor de andere isotopen wordt in dit rapport een halveringstijd voor uitspoeling aangenomen van 5 jaar, aangezien het UNSCEAR-rapport hierover geen gegevens levert. Voor isotopen met een radiologische halveringstijd veel kleiner dan 5 jaar is deze aanname van weinig invloed. Voor isotopen met een radiologische halveringstijd van ongeveer 5 jaar of meer is deze aanname willekeurig. Voor Sr-90 is zij te klein, voor anderen mogelijk te groot. Het is echter voldoende voor het verkrijgen van een indruk van de grootteorde van het besmette gebied.

Voor de berekening is de volgende relatie gebruikt:

$$D = 15.14 \times E_{\gamma} \times A \times \int_0^{T_1} e^{-\lambda_{\text{eff}} \cdot t} dt \quad (6)$$

Hierin is:

- D = dosis t.g.v. verblijf van 1 jaar in besmet gebied vanaf een tijd T na het overdrijven van de wolk (rem)
- 15.14 = dosissnelheid van 1 Curie/m² van 1 MeV γ -emitters (rad/uur)
- E_{γ} = gemiddelde per desintegratie vrijkomende γ -energie (MeV)
- A = besmettingsgraad van de grond met een bepaald isotoop (Curie/m²)
- T = tijd tussen het overdrijven van de radioactieve wolk en het begin van het verblijf in het besmette gebied: 1 week, 1 jaar en/of 5 jaar
- T^1 = T + 1 jaar
- λ_{eff} = effectieve halveringstijd = $\frac{\ln 2}{T^1} + \frac{\ln 2}{5}$ hierin is $T_{\frac{1}{2}}$ de radiologische halveringstijd(in jaar).

Voor Cs wordt i.p.v. 5 jaar 0.5 jaar gebruikt voor 2/3 van de hoeveelheid Cs en 100 jaar voor 1/3 deel van het Cs

6. Vroeg- en laat-somatische dosis; genetische dosis

Voor de berekening van de verschillende doses worden de volgende veronderstellingen gebruikt.

6.1 Vroeg-somatische dosis.

Onder de vroeg-somatische dosis verstaan we de stralingsbelasting die de vroeg-somatische effecten veroorzaakt. Deze dosis bestaat uit de som van de totale lichaamsdosis t.g.v. uitwendige γ bestraling door verblijf in de wolk (zie 3), de inwendige totale-lichaamsdosis opgelopen gedurende een periode van 30 dagen onmiddellijk na het ongeluk (zie 2.3), de helft van de gedurende deze 30 dagen opgelopen (inwendige) stralingsbelasting van het bot (beenmerg) (zie 2.1) en de dosis t.g.v. verblijf in door neerslag van radioactief materiaal besmet gebied gedurende een periode van 24 uur onmiddellijk na het passeren van de radioactieve wolk (zie 4). (Dit alles natuurlijk voor zover men aan deze diverse vormen van stralingsbelasting is blootgesteld.) De basis van de laatstgenoemde periode van 24 uur is de aanname dat na 24 uur de daarvoor in aanmerking komende gebieden geëvacueerd kunnen zijn.

6.2 Laat-somatische dosis

De laat-somatische dosis bestaat uit een stralingsbelasting van het totale lichaam en een stralingsbelasting van specifieke organen. De eerste wordt gevormd door de som van de uitwendige totale lichaamsdosis aan γ -straling door immersie in de radioactieve wolk (zie 3), de inwendige totale lichaamsdosis gedurende een periode van 30 jaar t.g.v. opname van radioactieve isotopen via de longen (zie 2.3) en de dosis t.g.v. de straling door verblijf in besmet gebied gedurende 24 uur onmiddellijk na passeren van de radioactieve wolk (zie 4). Voor de stralingsbelasting van de specifieke organen t.g.v. ophoping van radioactieve isotopen in deze organen uit het bloed na inademing van deze isotopen wordt de dosis berekend die deze organen gedurende 30 jaar ontvangen (zie 2.1)

6.3 Genetische dosis

De genetische dosis bestaat uit de som van de laat-somatische totale lichaamsdosis en de dosis in de geslachtsorganen gedurende een periode van 30 jaar, t.g.v. concentratie van isotopen in deze organen. Betreffende de in dit rapport beschouwde isotopen worden in de ICRP-publicatie-2 slechts voldoende gegevens vermeld voor berekening van de stralingsbelasting van de mannelijke geslachtsorganen.

APPENDIX C - REFERENTIES

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP-Publication 2, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press, (1959) (In het vervolg aangegeven als ICRP-publikatie-2.
2. ICRP-publikatie-2, p. 152.
3. ICRP-publikatie-2, p. 88-230.
4. ICRP-publikatie-2, p. 153.
5. ICRP-publikatie-2, p. 34.
6. "Theoretical Possibilities of Accidents in Nuclear Power Plants", WASH-740, p. 33. Hierna te noemen WASH-740.
7. WASH-740, p. 39.
8. "Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants", USAEC, WASH-1400, 1974, App. VI, p. 60.
9. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR), "Ionizing Radiation: Levels and Effects", 1972, Vol. I, p. 45.
10. UNSCEAR I (1972), p. 54, 55.

APPENDIX D Gevoeligheidsanalyse t.a.v. enkele aannames

1. Inleiding

In het rapport van de commissie van de Gezondheidsraad "Kerncentrales en Volksgezondheid" (1975) wordt bij de bepaling van de gevolgen van een groot reactor-ongeluk slechts met het vrijkomen van een beperkt aantal radioactieve isotopen rekening gehouden, n.l. 45 in totaal. De meeste van de niet beschouwde isotopen zijn weggelaten op grond van hun korte halveringstijd. Zij zijn vervallen tot stabiele isotopen voordat zij buiten de reactor vrijkomen en daar schade kunnen aanrichten. De grenswaarde voor deze halveringstijd zal echter afhangen van de tijdsduur tussen het stoppen van de kettingreactie en het vrijkomen van de radioactieve isotopen. Deze grens is niet scherp te trekken.

In dit aanhangsel zullen we nagaan wat de invloed van deze beperking is op de hoogte van de stralingsbelasting. Daartoe is naast de berekening van de stralingsbelasting op basis van alle soorten vrijkomende radioactieve isotopen ook de stralingsbelasting bepaald van het pakket van de 45 in het Gezondheidsraadrapport beschouwde isotopen.

Bovendien is onderzocht wat de invloed op de stralingsbelasting is van het vervroegd vrijkomen van radioactieve isotopen n.l. na een half uur i.p.v. 2 uur na het stoppen van de kettingreactie.

Bij verval van radioactieve kernen ontstaan in vele gevallen weer nieuwe radioactieve kernen die op hun beurt weer, onder het uitzenden van radioactieve straling vervallen. De relatieve bijdrage van deze zogenaamde radioactieve dochterisotopen wordt in deze bijdrage ook bepaald.

2. 45 isotopen in het Gezondheidsraadrapport

De invloed van het meenemen in de berekening van meer dan de 45 door de Gezondheidsraad beschouwde isotopen is berekend voor de verschillende soorten van stralingsbelasting. Daarbij is er telkens van uitgegaan dat de hoeveelheid van deze 45 isotopen die vrijkomt in beide gevallen (vrijkomen van slechts 45 isotopen of van alle isotopen) dezelfde is.

De beperking tot 45 isotopen heeft, indien voor de berekening van de stralingsbelasting wel rekening gehouden wordt met de invloed van, door verval ontstane, radioactieve dochterisotopen in de meeste gevallen slechts een relatief geringe invloed, van enkele procenten. Dit geldt zowel voor de op korte termijn ontvangen uitwendige γ -straling, door verblijf in een

radioactieve wolk, als voor de dosis t.g.v. verblijf in radioactief besmet gebied. Ook op de lange termijn grondbesmetting heeft deze beperking een invloed van hoogstens enkele procenten. Deze verschillen vallen binnen de foutengrenzen van de nauwkeurigheid.

De beperking tot de 45 door de Gezondheidsraad beschouwde isotopen leidt wel tot een aanzienlijke onderschatting van de stralingsdosis t.g.v. interne bestraling in een aantal organen door opgenomen radioactieve isotopen. Met name geldt dit voor de interne stralingsdosis op lange termijn. De grotere stralingsbelasting verhoogt het aantal slachtoffers t.g.v. laat-somatische effecten (kankersterfte).

Tabel D-1 geeft voor een aantal organen de verhouding van die stralingsbelasting waarbij rekening gehouden wordt met alle isotopen tot die waarbij alleen van het vrijkomen van bovengenoemde 45 isotopen, uitgegaan wordt (waarbij wel de invloed van de dochterisotopen meegerekend wordt).

Tabel D-1. Verhouding van interne stralingsbelasting van alle isotopen tot die van 45 isotopen uit het Gezondheidsraadrapport.

orgaan	verhouding stralingsbelasting alle isotopen tot stralingsbelasting 45 isotopen	
	na 30 dagen	na 30 jaar
Lever	1.3	2
Bot	1.2	1.6
Nieren	1.05	1.5
Longen	1.05	1.05
Milt	~1	~1
Spierweefsel	~1	~1
Mannelijke geslachtsorganen	1.05	1.05
Maag	1.1	1.1
Dikke darm	1.05	1.05
Schildklier	~1	~1

3. Invloed van radioactieve dochterisotopen

Een deel van de vrijkomende radioactieve isotopen vervalt naar (dochter-) isotopen die ook weer radioactief zijn. Nagegaan is wat de bijdrage van deze dochterisotopen, die ontstaan na het stoppen van de kettingreactie, is aan de verschillende vormen van stralingsbelasting. Het relatief grootste verschil treedt op t.a.v. de uitwendige γ -bestraling die men oploopt door verblijf in de radioactieve wolk. De relatieve bijdrage van de dochterisotopen is hier 20% (weerscategorie F) tot 30% (weerscategorie D). Ten aanzien van de uitwendige γ -bestraling door verblijf gedurende de 1e dag op besmette grond is de relatieve bijdrage van de dochterisotopen ongeveer 8%. Aan de stralingsdosis bij verblijf gedurende lange tijd in besmet gebied, leveren deze dochterisotopen nauwelijks een bijdrage. Ook de berekende interne stralingsbelasting verandert niet door weglaten van de, gedurende de verspreiding ontstane dochterisotopen. Dit laatste wordt echter veroorzaakt doordat bij berekening van de interne stralingsbelasting, het ontstaan van dochterisotopen in de lichaamsorganen ook in de gebruikte 'effectieve energie' verdisconteerd is.

Dit heeft tot gevolg dat de invloed van deze dochterisotopen in de berekening van de in appendix C gedefinieerde laat-somatische en genetische dosis enkele procenten bedraagt en voor de gedefinieerde vroeg-somatische dosis 5 à 10%.

Op de dosis tengevolge van langdurig verblijf in besmet gebied hebben ze praktisch geen invloed.

4. Invloed van tijdstip van lozing

Om na te gaan hoe gevoelig de omvang van de gevolgen is voor het tijdsverloop tussen het stoppen van de kettingreactie en het vrijkomen van het radioactief materiaal, is de stralingsbelasting berekend voor het geval dit tijdsverloop een half uur is in plaats van 2 uur. De radioactieve isotopen met een korte halveringstijd, in de orde van 10 minuten, zouden de stralingsdosis kunnen verhogen.

Op korte afstand van de centrale is dit inderdaad het geval, zij het alleen voor de uitwendige γ -straling. Bij weerscategorie F is is, in het geval van lozing na een half uur i.p.v. na 2 uur, op een afstand van 15 km, de uitwendige γ -straling t.g.v. verblijf in de radioactieve wolk 20% hoger en de eerste dag dosis t.g.v. verblijf op besmet land 8% hoger. Op een afstand van 30 km is dit nog slechts enkele procenten. Alle andere in dit rapport beschouwde stralingsdoses zijn hoogstens enkele procenten hoger.

Het beeld van de gevolgen verandert hierdoor nauwelijks.

De zeer kort levende radioactieve isotopen, die op het moment van het stoppen van de kettingreactie nog een aanzienlijke radioactiviteit vertegenwoordigen, zijn binnen een half uur reeds grotendeels vervallen. De isotopen met een halveringstijd in de orde van een kwartier geven in de berekeningen een relatief geringe bijdrage aan de stralingsbelasting. Voor inwendige stralingsbelasting veroorzaakt door vele van deze isotopen kan de bijdrage echter niet berekend worden wegens het ontbreken van de benodigde gegevens in ICRP-rapport no. 2.

De radioactiviteit van de langer levende isotopen neemt in een uur tijds zo weinig af, dat een verschuiving in lozingstijdstip van één tot enkele uren van ondergeschikt belang is voor de effecten.

Collectie Stichting Loka

www.loka.org
Gedigitaliseerd 2021