

**Loppuraportti osallistumisesta
OECD/NEA:n ja CEC:n
organisoimaan kansainväliseen
reaktorionnettomuuksien
ympäristöseurauksia laskevien
ohjelmien vertailuun**

Jukka Rossi
HELMIKUU 1994



SÄTEILYTURVAKESKUS

Strålsäkerhetscentralen
Finnish Centre for Radiation and
Nuclear Safety

STUK-YTO-TR 64
HELMIKUU 1994

Loppuraportti osallistumisesta OECD/NEA:n ja CEC:n organisoimaan kansainväliseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurauksia laskevien ohjelmien vertailuun

Jukka Rossi
Valtion teknillinen tutkimuskeskus
Ydinvoimatekniikan laboratorio

Tutkimuksen johto Säteilyturvakeskuksessa
Riitta Hänninen, Kari Sinkko

Tutkimus on tehty Säteilyturvakeskuksen tilauksesta.

SÄTEILYTURVAKESKUS
PL 268 00101 HELSINKI
Puh. (90) 70821

ROSSI, Jukka (VTT). Loppuraportti osallistumisesta OECD/NEA:n ja CEC:n organisoimaan kansainväliseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurauksia laskevien ohjelmien vertailuun. STUK-YTO-TR 64. Helsinki 1994. 20 s. + liitteet 11 s.

ISBN 951-47-8860-5
ISSN 0785-9325

Avainsanat: reaktorionnettomuus, todennäköisyyspohjainen ympäristöseurausten arviointi, ohjelmavertailu

TIIVISTELMÄ

Todennäköisyyspohjaista reaktorionnettomuuksien ympäristöseurausten arviointia (PCA) käytetään apuna paitsi riskitutkimuksissa myös vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen, sijoituspaikkojen ja turvallisuusviranomaisten määrittelemien annoskriteerien määrittämiseen. Tällaisissa arvioinneissa käytetään tietokoneohjelmiksi kehitettyjä malleja. Jotta eri mallien ominaisuuksista ja oikeellisuudesta saataisiin käsitys järjestettiin OECD/NEA:n toimesta tietokoneohjelmien vertailu, johon osallistui organisaatioita 15 eri maasta. Varsinaiseen vertailuun osallistui seitsemän ohjelmaa.

Projektin tavoitteena oli verrata tietokoneohjelmien tuloksia, edesauttaa PCA-tietokoneohjelmien laadunvarmistusta, ohjata mallien jatkokehitystä, yhdenmukaistaa malleja, välittää menetelmätietoutta myös muille kuin ohjelmien kehittäjille ja käyttäjille, tarjota mahdollisuus ajatusten vaihtoon ja tuottaa raportti PCA-ohjelmavertailusta.

Projekti alkoi vuonna 1991 ja laskut saatiin valmiiksi vuoden 1992 syksyllä. Kausainvälinen raportointi koostuu kahdesta osasta: päättäjille tarkoitettu yhteenvetoraportista (Overview Report) sekä yksityiskohtaisesta teknillisestä raportista (Technical Report). Tässä raportissa on tarkasteitu projektin tuloksia VTT:n ARANO-tietokoneohjelmien näkökulmasta ja arvioitu sen jatkokehitystarpeita.

ROSSI, Jukka (Technical Research Centre of Finland, VTT). Participation in the international comparison of probabilistic consequence assessment codes organised by OECD/NEA and CEC. Final Report. STUK-YTO-TR 64. Helsinki 1994. 20 pp + Appendices 11 pp.

ISBN 951-47-8860-5
ISSN 0785-9325

Keywords: reactor accident, probabilistic consequence assessment, benchmark comparison

ABSTRACT

Probabilistic Consequence Assessment (PCA) methods are exploited not only in risk evaluation but also to study alternative design features, reactor siting recommendations and to obtain acceptable dose criteria by the radiation safety authorities. The models are programmed into computer codes for these kind of assessments. To investigate the quality and competence of different models, OECD/NEA and CEC organised the international code comparison exercise, which was participated by the organisations from 15 countries. There were seven codes participating in the exercise.

The objectives of the code comparison exercise were to compare the results by the codes, to contribute to PCA code quality assurance, to harmonise the codes, to provide a forum for discussion on various approaches and to produce the report on the exercise.

The project started in 1991 and the results of the calculations were completed in autumn 1992. The international report consists of two parts: the Overview Report for decision makers and the supporting detailed Technical Report. The results of the project are reviewed as an user of the ARANO-programme of VTT and trends of it's further development are indicated in this report.

ESIPUHE

Työ on tehty Säteilyturvakeskuksen tilauksesta Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) ydinvoimatekniikan laboratoriossa. Yhteyshenkilöinä ovat toimineet ylitarkastaja Riitta Hänninen ja ylitarkastaja Kari Sinkko Säteilyturvakeskuksesta (STUK) sekä tutkija Jukka Rossi VTT:stä.

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ESIPUHE	
1 JOHDANTO	7
2 OSALLISTUJAORGANISAATIO	8
2.1 Tietokoneohjelmat	8
ARANO	9
CONDOR	9
COSYMA	10
LENA_P	10
MACCS	10
OSCAAR	10
MECA2	10
3 LÄHTÖTIEDOT	11
3.1 Päästö-, sää- ja ympäristötiedot	11
3.2 Suojausolosuhteet ja vastatoimenpiteet	12
3.3 Laskentatilanteet	12
4 TULOKSET	13
4.1 Annos	13
4.2 Terveysvaikutukset	14
4.3 Vastatoimenpiteiden vaikutus väestöön	14
4.4 Vastatoimenpiteiden vaikutus maatalouteen	15
4.5 Taloudelliset vaikutukset	16
4.6 Yksilöriski	16
4.7 Ilmassaleviäminen	16
5 ARANO:N JATKOKEHITYSTARPEET	17
5.1 Dispersiomalli	17
5.2 Annoslaskentamallit	17
5.3 Terveysvaikutusmallit	18
5.4 Taloudellisten menetysten mallinnus	18
6 YHTEENVETO	19
LÄHDELUETTELO	20
LIITTEET 1 - 11	21- 32

1 JOHDANTO

Tämä järjestyksessä toinen kansainvälinen tietokoneohjelmien (jatkossa käytetään lyhenettä: ohjelma) vertailu, jonka organisoijina toimivat nyt sekä OECD/NEA että CEC, käynnistyi varsinaisella laskentaosuudella vuoden 1992 alussa. Tätä oli edeltänyt parin vuoden pituinen lähtötietojen valinta ja asettelu /1,2/, jonka yhteydessä etenkin päästöstä päättäminen oli osoittautunut vaikeaksi. Ennen varsinaisia laskuja suoritettiin vapaaehtoinen pilot-laskentakierros, jossa testattiin ohjelmien käyttäytymistä alustavasti. Vertailun taustalla oli ensimmäisen kansainvälisen ohjelmavertailun vuonna 1982 tuottamat tulokset /3/, joissa ensisijaisesti oli tarkasteltu yksittäisiä tulossuureita, kuten annosta etäisyyden funktiona tietyssä leviämistilanteessa. Nyt laskentakäsittely laajennettiin PCA (Probabilistic Consequence Analysis) suuntaan siten, että tuloksena saadaan todennäköisyysjakauksia, joissa erilaisten leviämistilanteiden todennäköisyyden vaikutus lopputulokseen saadaan esiin. Näitä ohjelmia voidaan käyttää ydinvoimalaitosten lisensiointiin ja mm. siksi niiden PCA-kelpoisuutta haluttiin vertailussa arvioida. Säteilyannosta rajoittavien vastatoimenpiteiden käsittely tässä yhteydessä koettiin välttämättömäksi, koska siten päästään tarkastelemaan niiden aiheuttamia kustannuksia ja hyötyjä eri ohjelmien laskemana. Tavoitteena oli ensisijaisesti verrata eri ohjelmien tuloksia määritellyissä päästötapaüksissa ja vastatoimen-

pidetilanteissa eikä arvioida ympäristöseurausten suuruutta onnettomuusanalyysimelessä. Lisäksi pyrittiin selvittämään eri ohjelmien tuloksissa esiintyviä eroavuuksia ja löytämään näille syitä. Projektista valmistuu kaksi raporttia: päätöksentekijöille tarkoitettu yhteenvetoreportti Overview Report (NEA:n julkaisemana) /4/ sekä kaikki tulokset sisältävä Technical Report (CEC:n julkaisemana) /5/.

Tässä selvityksessä on tarkoitus koota kokemukset ohjelmavertailuun osallistumisesta ARANO-ohjelman käyttäjän kannalta /6,7,8/ ja tuoda esiin ARANO:ssa esiintyneitä puutteita mahdollisten muutostarpeiden kartoittamiseksi. Osallistujien oli toimitettava toisilleen ohjelman kuvaukset mahdollisimman kattavasti, joten ohjelmavertailun kuluessa saapui viitemateriaalia huomattava määrä. Tässä yhteydessä ei ole kuitenkaan tarkoitus selvittää perinpohjin muiden ohjelmien ominaisuuksia, vaan tuoda esiin projektin kuluessa eräitä näissä ohjelmissa ilmenneitä piirteitä. ARANO:n perusversio on jo noin 15 vuotta vanha ja on muistettava sen alkuperäinen tarkoitus toimia rakennettavien ydinvoimalaitosten sijoituspaikkaselvitysten työkaluna. Tämän takia ei liene tarpeellistakaan pyrkiä muuttamaan ARANO:a niin, että kaikki tässä ohjelmavertailussa lasketut asiat voitaisiin laskea myös ARANO:lla, koska niitä ei muissa yhteyksissä tultane tarkastelemaan.

2 OSALLISTUJAORGANISAATIO

Projektin varsinaisina koordinaattoreina toimivat Bill Nixon Skotlannista ja Peter Cooper Englannista. Heidän vastuullaan oli lähtötietojen toimitus ja tulosten kokoaminen sekä ylipäänsä aikataulujen määrittely ja tehtäväjako. Christer Viktorsson (NEA) ja Neal Kelly (CEC) toimivat kokousten vetäjinä ohjaten projektia organisaatioidensa edunvalvojina. Lisäksi mainittakoon yksittäisistä tehtävistä, että Lev Neymotin (BNL) ja Claudia Steinheuer (KfK) tekivät tulosten esitystavasta ansiokkaat erilliset ehdotukset. Projektin johtoryhmä koostui eri organisaatioiden edustajista ja ad-hoc-ryhmä 15:sta OECD-maan ja kolmen tarkkailijamaan edustajista. Liitteessä 1 on esitetty ad-hoc-ryhmän työskentelyyn osallistuneet henkilöt. Ad-hoc-ryhmän tehtävänä oli lopulta hyväksyä Overview-raportti, kun taas teknillinen raportti jäi laskentaan osallistuneiden organisaatioiden vastuulle. Tämä organisaatio poikkesi aiemmasta, vuoden 1982 ohjelmavertailussa käytetystä menettelystä, jossa eri tehtäväkokonaisuuksille oli alunperin määrätty vastuuhenkilö. Kun projekti lopulta käynnistyi, pysyi se juuri ja juuri aikataulussaan. Tähän päästiin ja toisaalta jouduttiin poistamalla muutamia laskentatilanteita ja lisäämällä eräitä lisäinformaatiota tuottavia laskentatuloksia. Lisäksi laskuja jouduttiin osittain uusimaan esiintyneiden virheiden takia mikä aiheuttaa valitettavasti tämän suuruudessa tulosmäärässä huomattavia lisätoivia tulosten esityspäässä. Projektikokousten ohella ilmaantui paljon hyvinkin akuuttia kommunikointitarvetta, jota hoidettiin ensisijaisesti telekopioperiaatteella. Kun tämä yhteys ei joskus toiminut turvaututtiin perinteiseen posttiin, jonka nopeus ei aina täysin vastannut asetettuja aikataulutavoitteita, mistä oli seurauksena eräitä kiusallisia tilanteita.

2.1 Tietokoneohjelmat

Projektin alussa halukkaita organisaatiota oli kymmenkunta, mutta lopulta päädyttiin laskentaosallistumisoikeuden osalta siihen, että vain alkuperäisen ohjelman kehittäneet organisaatiot esiintyvät loppuraporteissa. Tällöin jäivät mm. MACCS-ohjelman edeltäjän CRAC2:n käyttäjät Slovakiasta pois. Luultavasti osasyynä oli myös se, että samalla ohjelmalla eri käyttäjät saivat melko erisuuria tuloksia. Lopulta vertailuun osallistui varsinaisesti kuusi ohjelmaa:

ARANO (VTT, Suomi),
CONDOR (SRD, NE, NRPB, Englanti),
COSYMA (KfK, NRPB, Englanti ja Saksa),
LENA (SSI, Ruotsi),
MACCS (NRC, USA),
OSCAAR (JAERI, Japani) sekä loppuvaiheessa seitsemäntenä MACCS:iin pohjautuv.
MECA2 (UPM, Espanja) taloudellisten seurausten arvioinnin osalta.

COSYMA (COde SYstem from MARIa) on CEC:n MARIA-tutkimusohjelman seurauksena syntynyt laaja PSA3-tason ohjelma, jota myös Hollannin KEMA käytti vertailun kuluessa. MACCS-ohjelma on USA:n liittovaltion laboratoriossa (Sandia Lab.) kehitetty tuote, jota tällä kertaa käytti Brookhaven National Laboratory Long Islandilta. *COSYMA*:n ja *CONDOR*:in kehittäjinä oli muutamia samoja henkilöitä. *COSYMA*:lla ja *MACCS*:lla laskivat myös niiden käyttäjäryhmät, joiden työstä ilmestyy erilliset raportit. Ainakin *COSYMA*:lla oli useita käyttäjiä eri Euroopan maissa, kuten Englanti, Hollanti ja Saksa ja projektin aikana näkyi näiden maiden osallistujien tiivis yhteistyö. Tähän tietysti vaikuttaa se, että *COSYMA*

koostuu useista moduleista, jotka on aluksi kehitetty erillisenä ja lopulta yhdistetty. Ranska ei osallistunut aktiivisesti COSYMA:n käyttöön. Sensijaa espanjalaiset esiintyivät MACCS:in jatkoksi kehitetyn MECA2:n käyttäjinä. Samoin Italia ja Kreikka nojautuivat MACCS:iin, kuten myös Norja.

Ohjelmista voidaan todeta COSYMA:n ja MACCS:n soveltuvan suoraan PSA3-tason työkaluiksi, joskin muistakin ohjelmista saadaan hyvin todennäköisesti ja kohtuullisella lisäpanostuksella PSA3:een soveltuva versio. Seuraavassa on lueteltu lyhyesti eräitä ohjelmien ominaisuuksista suhteessa ARANO:on.

Sääaineiston poiminta laskentaa varten voidaan tehdä periaatteessa satunnaislukupoimintaan perustuen tai käyttämällä syklistä menettelyä alkuajan suhteen. Kaikissa malleissa paitsi ARANO:ssa ja COSYMA:ssa yli 60 km:n etäisyyksillä käytetään sääaineiston poimintaa (stratified sampling), jolloin ei pyritäkään käymään kaikkia esiintyviä sääolosuhteita läpi, vaan turvaudutaan mahdollisimman edustavaan sääjoukkoon kaikista erilaisista leviämistilanteista. Menettelyn tarkoitus on vähentää tarvittavaa laskentatyötä, koska kaikkia vuoden leviämistilanteita ei tarvitse käydä läpi. Menettelytapa etenee periaatteessa kolmessa vaiheessa. Ensin koko sääaineisto jaetaan ryhmiin. Tämän tarkoituksena on, että kukin ryhmään kuuluva sää tuottaisi verrattain samanlaisen tuloksen; lisäksi on taattava riittävä hajonta eli myös ryhmien väliset erot on saatava esiin. Toisessa vaiheessa kustakin ryhmästä poimitaan yksi säätilanne edustamaan koko ryhmää varsinaiseen laskentaan. Lopuksi kunkin poimitun säätilanteen esiintymistodennäköisyys määritetään. Tällaisen ryhmittelyn kriteeri voi perustua esimerkiksi etäisyysväleittäin pilvessä jäljellä olevaan pitoisuuteen, mihin sade voimakkaimmin vaikuttaa tai hyvin stabiiliin sään esiintymiseen leviämisen alussa, millä on taipumusta lisätä akuutteja vaikutuksia.

Akuuttien vaikutusten terveysvaikutusmalli oli muissa paitsi ARANO:ssa ja LENA_P:ssä Weibullin riskifunktion mukainen. Riski (R) kokea joku akuutti vaikutus saadaan kaavasta

$R = 1 - e^{-H}$,
missä H on määritelty seuraavasti: $H = \ln(2)(D/D_{50})^m$. Tässä D on saatu annos, D_{50} on annos, jolla 50 % väestöstä kokee terveysvaikutuksen ja m on muotokerroin. Yleisesti vielä ilmoitetaan annoksen alaraja, jonka alapuolella ei vaikutusta esiinny. D_{50} -arvoissa voidaan ottaa huomioon annosnopeusriippuvuus, jonka käsittely tapahtuu laskennallisesti jakamalla ohjelmassa annoksen kertyminen aikajaksoihin.

ARANO

ARANO on VTT:n ydinvoimatekniikan laboratoriossa 1970-luvulla kehitetty ympäristöseurausten arviointimalli. Dispersio oletetaan suoraviivaiseksi ja sää pysyy samana leviämisen aikana eli toisin kuin muissa paitsi LENA_P:ssä ja COSYMA:n ISOLA-osamallissa. Vertikaalin pitoisuuden laskenta poikkeaa olennaisesti kaikista muista osallistuneista ohjelmista, koska se lasketaan diffuusioyhtälön avulla, jolloin kuivadeposition oletetaan vaikuttavan pilven muotoon. Tämä vaikutus korostuu stabiileissa tilanteissa, jolloin K_z -mallissa pilvestä poistuminen on merkittävästi vähäisempää kuin perinteisissä Gaussin malleissa. K_z -malliin läheisesti liittyen ARANO:n toinen erityispiirre on se, että pilvigamma-annos lasketaan suoraan pilven pitoisuus-jakaumaan perustuen. Sääaineistona ARANO:ssa ei käytetä suoraan laitospaikan ympärivuotiseen mittaukseen perustuvaa dataa, vaan tunnittainen aineisto on ensin muokattava sektori/stabiluus/tuulennopeus/sade-frekvenssiksi.

Vastatoimenpiteinä voidaan käsitellä sisällesuojautumista, evakuointia, joditabletteja, dekontaminointia ja väestön pysyvää poissiirtoa. Taloudellisten menetysten laskenta perustuu 30 vuoden kuluessa laskeumasta kertyvään ulkoiseen säteilyannokseen siten, että etsitään se ajanjakso, jonka jälkeen 30 vuoden kuluessa kertyvä annos ei ylitä annoskriteeriä.

CONDOR

PCA-käyttöön ja hyvin modulaarisesti suunniteltu CONDOR on uusimpia PCA-ohjelmia ja sen manuaali ilmestyi vasta projektin aikana.

Leviämismalli on suoraviivainen Gaussin malli, jossa pitkä päästö jaetaan useaan päästöpilveen. Leviämistilanteiden näytteenotto tapahtuu stratified sampling-menetelmällä.

COSYMA

Leviämismallin rakenne eroaa oleellisesti muista ohjelmista, koska se on jaettu lähi/kaukokulkeutumiseen. Alle 60 km:n etäisyydelle (lähialue) leviäminen lasketaan käyräviivaisella Gaussin mallilla kun kauempana (kaukoalue) käytetään trajektorimallia. Akutteja terveysvaikutuksia esiintyy vain lähialueella mutta myöhäisvaikutuksia molemmilla alueilla. Vastatoimenpiteet jaetaan samalla etäisyysperiaatteella. Ohjelma koostuu kolmesta pääosasta: NE, NL ja FL, joissa N viittaa sanaan 'near', F sanaan 'far', E sanaan 'early' ja L sanaan 'late', joissa kaikissa tulokset saadaan omana ryhmänään.

COSYMA:ssa ilmaleviämismalleja on kaikenkaikkiaan viisi. COSGAP (lineaarinen Gauss), MUSEMET (segmentoitu Gauss) ja RIMPUFF (5 minuutin pölyhdysmalli; eng. puff), joissa kaikissa leviämisolosuhteet voivat muuttua leviämisen aikana. Kaikki kolme ovat NL- ja NE alueen malleja ja voivat käyttää hyväkseen tunnitain muuttuvia tuulennopeus-, stabiilius- ja sadetietoja. RIMPUFF voi käyttää laitospaikan sään lisäksi leviämisalueen paikallisia säätietoja. ISOLA on NL-alueen malli, joka on tarkoitettu pitkän ajan päästöihin. Sääparametrit eivät muutu leviämisen aikana ja tunnitaisen sääaineiston tilastointi tapahtuu paljolti ARANO-tyyppisesti. MESOS-malli on tarkoitettu FL-alueelle ja se käyttää hyväkseen laajojen alueiden säätietoja. Leviäminen lasketaan kolmen tunnin välein lähtevien trajektoreiden ja niihin liitettyjen päästöpilvien avulla. Malli muistuttaa paljon TRADOS-mallia, mutta esimerkiksi vertikaalijakauma oletetaan tasanjakautuneeksi ja pienen mittakaavan turbulenssi sekä wind-shear (tuulen suunnan muuttuminen eri korkeuksilla) otetaan huomioon. Sääaineiston poimintaan on tarjolla kolme erilaista menetelyä riippuen osittain dispersiomallista. ISOLA:a

varten ei ole menetelmää. MESOS käyttää yksinkertaisesti syklistä tai satunnaispoimintaa ja muut dispersiomallit stratified sampling-menetelyä.

LENA_P

Malli on kehitetty ohjelmavertailua varten samannimisen reaaliaikamallin LENA_Win pohjalta. Ohjelma on ylivoimaisesti pienin fyysiseltä kooltaan (exe-versio on alle 100 kbyteä). Leviäminen lasketaan Gaussin suoraviivaisella mallilla. Sään jako tapahtuu osittain ARANO-tyyppisesti, mutta käyttäen luokittelussa keskimääräisiä arvoja tuulennopeudelle ja -suunnalle, stabiiliudelle sekä laidunkauden pituudelle.

MACCS

Leviämismalli on suoraviivainen Gaussin malli, jossa pitkä päästö jaetaan useampaan pilveen.

OSCAAR

Tämä malli käyttää tuulikentätietoihin perustuvaa trajektorianalyysiä, josta voi muodostua useita pilviä. Pilven dimensiot määräytyvät Gaussin periaatteella.

MECA2

Mallin alkuosa on yhtäkuin MACCS ja taloudellisten vaikutusten laskenta on vaihtoehtona MACCS:n malleille. Jatkossa MECA2 tullee sisältymään COSYMA:n yhdeksi vaihtoehtoiseksi taloudellisten vaikutusten malliksi.

Ohjelmien vaatimia ajoaikoja ei voi suoraan verrata toisiinsa, mutta esimerkkinä suuruusluokista mainittakoon, että LENA_P kuluttaa noin tunnin PC486:lla 100 säätilanteen ajossa. COSYMA vie hieman yli puolitoista tuntia 144 säätilanteen ja kolmejaksoisen päästön laskennassa IBM-3090:lla, kun ARANO vie tyypillisesti noin 10 minuuttia CCDF-käyrien ajamiseksi PC486:lla.

3 LÄHTÖTIEDOT

Vaikka raporteissa korostetaankin lähtötietojen hypoteettisia arvoja, voitaneen todeta, että ydinvoimalaitoksen paikka sijaitsee läntisessä Saksassa lähellä Ranskan rajaa ja ympäristön väestö- ja tuotantojakaumat ovat mahdollisimman todellisia /9,10/. Joka tapauksessa päästöpaikka on tiheästi asutun Euroopan keskellä.

3.1 Päästö-, sää- ja ympäristötiedot

Päästöinä käsiteltiin viittä erisuuruista päästöä, joissa mm. kaikki jalokaasut vapautuivat, mutta enimmillään 10 % jodista ja kesiumista; muita aineita vähemmän (liite 2). Tämä valinta on hyvin sopusoinnussa VTT:ssä perinteisesti käytettyjen arvojen kanssa. Aika pikasulusta päästön alkuun oli 2 h kaikissa päästöissä. Päästöjen kestot vaihtelivat (pisin 24 h) ja korkeus oli 10 m, paitsi yhteen päästöön sisältyi pienehkö terminen lämpönousema. ARANO:ssa alin päästökorkeus on rajattu 20 m:iin, jota käytettiin näissä laskuissa. Päästöt perustuvat NUREG-1150 raporttiin, mutta esiintyvät jossain määrin muuteltuina tässä vertailussa. Inventaarina oli annettu 1000 MW:n reaktorin rukiidikohtainen inventaari.

Säätielona käytettiin vuoden 1982 tunnittaista aineistoa (8760 kpl), jossa oli annettu tuulen suunta, stabiilius, sateen intensiteetti, tuulennopeus ja sekoituskorkeus. Intensiteetin perusteella sateen voimakkuutta ei ARANO:ssa ole erikseen käsitelty vaan sateen voimakkuus on sidottu stabiiliusluokkaan. Näin sateen voimakkuuksina käytettiin arvoja 3,6; 2 ja 1 ($\cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$) luokissa A ja B, C ja D sekä E ja F tässä järjestyksessä. Tässä yhteydessä on muistettava,

että ARANO:ssa tunnittainen tieto sateesta menetetään. Sääaineistossa esiintyi enimmillään 26 % ajasta sadetta D-luokassa ja alle prosentin A- ja F-luokissa. ARANO:ssa tunnittainen sää luokitellaan esiintymismäärän mukaisesti: sektori-, stabiilius-, tuulennopeus- ja sadeluokkiin. Näinollen ARANO:lla lasketaan kukin leviämistilanne läpi, ja vasta seuraavassa ajossa katsotaan esiintyykö tällaista leviämistilannetta, jota kautta todennäköisyys saadaan tuloksiin mukaan.

Ympäristöstä olivat saatavilla seuraavat lähtötiedot: väestö, lehmän maito, sen jalostustuotteet, vihannekset, juurekset, naudan liha, naudan maksa, lampaan liha, lampaan maksa, vilja, nautojen lukumäärä, viljan tuotantoala ja ekonominen alue. Nämä tiedot oli jaettu kolmeen eri hila-kokoon: 1, 100 ja 10000 km² 50, 500 ja 2000 km:n säteelle asti. Ekonominen data oli esitetty kahdella eri tavalla, joista saattoi käyttää jompaa kumpaa tai osittain molempia. Tiedostojen mukana tulivat myös konversio-ohjelmat, joilla neliöhiladatasta sai datan napakoordinaatistoon halutulla kulma- ja etäisyysjaotuksella. ARANO käyttää napakoordinaatistoon sijoiteltua ympäristödataa. ARANO-laskuissa on käytetty ympäristönjakauksia 300 km:n etäisyydelle asti. Kauempana olevat jakaumat vaikuttavat lineaarisesti riippuviin tuloksiin kuten väestöannokseen ilman vastatoimenpiteitä, mutta esim. varhaisvaikutusten määrään tällä etäisyydellä ei ole merkitystä. Koko 2000 km:n säteisen ympyränkaaren sisällä oleskelee 580 miljoonaa asukasta, josta keskimääräiseksi asukastiheydeksi tulee 46 asukasta/km². 300 km:n säteellä on 28 miljoonaa asukasta.

3.2 Suojausolosuhteet ja vastatoimenpiteet

Laskenta-alueen suojaus- ja suodatuskertoimet normaaliolosuhteissa sekä suojauduttaessa olivat annetut. Normaalioloissa oleskellaan 90 % sisällä ja 10 % ulkona. Suojauduttaessa kaikki ihmiset suojautuvat 10 km:n säteisellä alueella paitsi päästössä ST3 5 km:n säteellä, jolloin suojauskertoimet ovat paljon tehokkaammat. Suojautuminen tapahtuu 1 tunnin varoitusaajalla, joten koska viive pikasulusta päästön alkuun oli 2 h, oli väestö suojautuneena kaikissa suojautumistapauksissa altistuksen alettua. Määrittelyn mukaan suojautumisen oletettiin päättyvän, kun evakuointi alkaa, millä ei kuitenkaan ole merkitystä evakuoinnin hetkellisysoletuksen takia. Taulukossa I on esitetty laskennassa käytetyt suojauskertoimet sekä normaaleissa elinolosuhteissa että suojautumistilanteessa.

Evakuointi tapahtuu samalla kiinteällä alueella hetkellisenä toimenpiteenä 4 tunnin kuluttua varoitusaajan alusta. ARANO:ssa on perinteisesti käsitelty evakuointi hieman toisin - evakuointiaika on aika pilven saapumisesta alueelle. Nyt altistusaika sensijaan muuttui etäisyyden funktiona siten, että lähialueella väestö altistui pilvelle kolme tuntia yli kolmen tunnin päästöissä ja vain kaksi tuntia kahden tunnin päästöissä. Evakuoinnin paluuajan sai valita, mutta ARANO:ssa ei ole käytettävissä suoraan erillistä paluukriteeriä vaan sen ajanhetki on asetettava implisiittisesti ja laskettava sen jälkeen

kertyvä pitkän ajan annos, johon voidaan kylläkin soveltaa väestön pitempiäaikaisen poissiirron kriteeriä. Tämän kriteerin vaikutuksesta yksilöannoksesta leikataan pois ylimenevä osa. Tässä kriteerinä käytettiin 100 mSv/vuosi laskettuna 7 vrk:n jälkeen ulkoisesta laskeumasta tulevasta säteilystä. Paluukriteeri oli myös 100 mSv. COSYMA:ssa voidaan käyttää erisuuruista kriteeriä väestösiirrolle ja toisaalta paluulle, mutta MACCS:ssa molempien kriteerien tulee olla yhtä suuria.

Ravintoaineiden käyttö rajoitus määriteltiin kahdella vaihtoehdoisella tavalla: 5 mSv/vuosi yksittäisestä ravintoaineesta tai jos yksittäisen ravintoaineen pitoisuusraja ylittyy.

3.3 Laskentatilanteet

Jotta laskennan määrä ei olisi kasvanut liian suureksi rajoitettiin alkuperäinen määrä seitsemään tapaukseen, jotka muodostuvat viidestä päästöstä tietyillä kombinaatioilla vastatoimenpiteiden kanssa ja niitä ilman (liite 3). Laskentatyö jaettiin kahteen osaan, joista ensimmäisessä laskettiin kohdat C1-C4. Tämän jälkeen kokoonnuttiiin arvioimaan tuloksia ja päädyttiin poistamaan osa jatkolaskuista ja toisaalta laskemaan eräitä uusia tuloksia. Seuraussuureet, joita laskettiin olivat: väestöannos, varhais- ja myöhäisvaikutukset, vastatoimenpiteiden vaikutus ihmisiin, vastatoimenpiteiden vaikutus maatalouteen, taloudelliset menetykset ja yksilöriski.

Taulukko I. Laskennassa käytetyt suojauskertoimet ja suodatuskertoimet.

	Normaaliolosuhteet	Suojautuminen
Pilvigamma	0,19	0,05
Ulk. laskeumagamma	0,19	0,05
Hengitys	0,55	0,2
Hengitys resuspenziosta	0,55	0,2

4 TULOKSET

Ympäristövaikutusmallien tuloksissa esiintyy epävarmuutta, mikä on seurausta useista eri lähteistä. Mallinnuksen epävarmuus johtuu täydellisen tiedon puutteesta tai matemaattisen mallinnuksen yksinkertaistuksista. Kaikkia tulokseen vaikuttavia tekijöitä ei voida aina mallintaa. Lisäksi mallissa käytettyjen parametrien valintaan liittyy epävarmuutta. Tämän ohjelmavertailun tuloksissa esiintyvää hajontaa eri mallien tuottamissa tuloksissa ei pidä tulkita mallien epävarmuutena. Eräs arvio tulosten epävarmuudesta saadaan NUREG-1150 raportin arviosta, missä päästön päästön ominaisuuksien ja varsinaisten ympäristöseurausten kokonaisepävarmuudeksi on arvioitu useita kertaluokkia.

Tuloksena oli ilmoitettava komplementaarinen kumulatiivinen todennäköisyysjakauma (CCDF), sen odotusarvo, sekä 50, 90, 95, 99 ja 99,9 prosentin varmuusrajat sekä todennäköisyys, jolla seurauksen nolla-arvo saavutetaan. Lisäksi eräissä tapauksissa pyydettiin ilmoittamaan annoskomponenttien osuudet.

4.1 Annos

ARANO:n osalta väestöannosta vastatoimenpiteitä ei laskettu tilanteissa, joissa väestön pitempiaikainen poissiirto vaikuttaa annokseen, johtuen tämän kriteerin määrittelystä 100 mSv /vuosi, kun se ARANO:ssa on määritelty 30 vuoden kuluessa kertyneen annoksen perusteella. Liitteessä 4 on esitetty perustilanteen väestöannos kaikista altistusteista ilman vastatoimenpiteitä. CCDF-käyrät ovat melko yhtenevät ja odotusarvoissa on eroa tekijällä 4. ARANO tuottaa pienimmän annosarvion, johon vaikuttaa

se, että ARANO:n laskenta-alue ulottui vain 300 km:n etäisyydelle ja kaikkia maataloustuotteita ei käsitelty. Poisjätetyn alueen merkitystä kokonaisannokseen kuvaa osaltaan ARANO:lla suoritettu laskenta, jossa käytettiin keskimääräistä väestöjakaumaa 46 asukasta/km² 2000 km:n etäisyydelle asti ja laskettiin väestöannoksena ulkoinen annos pilvestä ja laskeumasta sekä hengitysannos. Näiden summan odotusarvo oli 18 % suurempi kuin vastaava annos 300 km:n säteelle laskettuna. Suuremman alueen väestömäärä on noin 20-kertainen mutta radioaktiivisten aineiden pienempi pitoisuus kompensoi tulosta huomattavasti enemmän kauempana. Vertailutulos on suuntaa antava, koska siihen vaikuttaa sääjakauman ja väestöjakauman yhteensattuminen.

Kokonaisväestöannoksen kaikista altistusteista lisäksi tässä kohdassa laskettiin 1 vuorokauden ja 50 vuoden yksilöannosta 1 ja 30 km:n etäisyydellä pohjoiseen. Näissä laskuissa trajektorimallien ja suoraviivaisten leviämismallien tulokset poikkesivat yllättävän vähän toisistaan. ARANO:lla saadaan tulos lasketuksi osittain aproksimatiivisesti, koska leviämisuuntaa käsitellään 30 asteen tarkkuudella, jolloin annos otetaan keskimääräisenä arvona tuossa sektorissa. Lisäksi molempiin viereisiin sektoreihin suuntautuva leviäminen voi ulottua yli ao. sektorin ja vaikuttaa pohjoissuunnassa kertyvään annokseen. Tämän laskemiseksi joudutaan ajamaan kolme ajoa ja lopuksi yhdistämään tulokset. Viereisiin sektoreihin suuntautuvat päästöt aiheuttavat kuitenkin vain vähäisen lisäyksen varsinaiseen tarkastelusektoriin ja lisäävät vain pienten annosten todennäköisyyttä.

Taulukossa II on esitetty esimerkinomaisesti osa käytetystä sää- ja väestöjakaumasta. Taulukosta ilmenee, että pohjoissuunnassa esiintyy stabiiliusluokkaa F 47 % ajasta, mutta tähän sektoriin tuulee vain 6 % ajasta. Hyvin stabiilin leviämisen esiintyminen korostaa eroavuutta ARANO:n ja muiden dispersiomallien välillä. K_2 -mallissa poistuminen pilvestä on tällöin hitampaa, joten suurilla etäisyyksillä on odotettavissa myös suurempia annoksia kuin Gaussin malleilla. Muista tekijöistä voidaan mainita trajektorien osumistodennäköisyys pisteeseen ja mahdollinen sateen ajoittainen esiintyminen, joiden vaikutusta on vaikea ennustaa. Ravinrosta aiheutuu 60-90 % kokonaisannoksesta, kun taas pilvestä tuleva ulkoinen annos jää alle prosentin.

4.2 Terveysvaikutukset

Terveysvaikutuksina laskettiin akuutit kuolemantapaukset ja kuolemaan johtavat syöpätapaukset. Lisäksi ensimmäisen laskentakierroksen jälkeen päädyttiin laskemaan hypotyroidismitapaukset, koska yleisesti ottaen vähäisten akuuttien tapausten takia toivottiin saatavan lisävalaistusta tuloksissa esiintyneeseen hajontaan. Akuuttien tapausten laskennassa ARANO poikkeaa eniten muista ohjelmista tässä vertailussa. ARANO näyttää ennustavan vastatoimenpidetapauksissa vähemmän tapauksia kuin muut ohjelmat ja vastaavasti ilman vastatoimenpiteitä hieman enemmän tapauksia kuin muut ohjelmat (liite 5). COSYMA tuotti kuitenkin melko samansuuruisia tuloksia kuin ARANO. Akuutit vaikutukset ovat herkkiä käytetylle annosvaikutusriippuvuudelle, jota osoittaa liitteen 6 ARANO:lla lasketut CCDF-käyrät. Lisäksi liite 7 osoittaa Gaussin ja K_2 -mallin vaikutuksen niiden henkilöiden määrään, jotka ylittävät 3 Sv:n rajan WASH-1400 raportin päästössä BWR2 /11/. Pitoisuudet ovat hyvin erisuuret lähialueella, missä korkeita annostasoja esiintyy.

Koska riskiriippuvuutta ei ollut määritelty, valittiin riskifunktiot käyttäjien kokemusten perusteella. Kaikkien valinta perustui merkittävästi NUREG:n suosituksiin. Koska ARANO:ssa ei voida suoraan käyttää s-muotoista riski-

funktiota, arvioitiin lineaariporrastyyppinen funktio NUREG-lähteisiin perustuen seuraavasti: luuydinannoksen kasvaessa 1,8 Gy:stä 6,3 Gy:een kasvaa akuutin kuoleman todennäköisyys nolasta ykköseen. Koska akuuttien kuolemantapausten määrä jää vähäiseksi, on taulukon II esittämällä lähialueen väestöjakaumalla ja dispersio-olosuhteilla oleellinen vaikutus tulokseen. Muutaman kilometrin säteellä on jo satoja asukkaita, kun taas ARANO:n tulosten mukaan akuutteja vaikutuksia esiintyy vain muutamia.

Hypotyroidismitapaukset laskettiin hengitysanoksen kautta samalla kriteerillä kaikilla ohjelmilla, mutta ARANO:on ei ole mallinnettu ulkoista altistusreittiä kilpirauhaselle, joten sen vaikutus jäi ARANO:sta pois. Koska jodia on päästössä mukana, aiheutuu annos tässä tapauksessa kuitenkin lähes kokonaan hengityksen kautta. Hypotyroidismitapauksen määrät jäävät myös ARANO:n osalta vähäisemmiksi vastatoimenpidetapauksissa kuin muilla ohjelmilla (liite 8).

Myöhäisvaikutuksena laskettujen syöpätapausten määrä laskettiin ARANO:n osalta lineaarisen riskikertoimen 0,05/manSv avulla. Muissa ohjelmissa on kertoimeen sisällytetty myös annosnopeuden vaikutus, ikärakenne ja luonnollinen syöpäriski. Kokonaisriskikerroin tulee kuitenkin muissakin ohjelmissa lukuarvon 0,05 tasolle, joskin japanilaisten arvo jää selvästi pienemmäksi.

ARANO ennustaa syöpätapausten määrät melko samansuuruisiksi kuin muut ohjelmat (liite 9), mikä on odotettavissa väestöannoksen perusteella.

4.3 Vastatoimenpiteiden vaikutus väestöön

Tässä kohdassa kysyttiin aluksi evakuoitun alueen pinta-alaa ja evakuoitua väestömäärää. Alussa näissäkin arvoissa oli huomattavia eroavuuksia, vaikka ne on laskettavissa lähtötiedoista käsin ilman PCA-ohjelmia. Kymmenen kilometrin säteisellä alueella asuvan väestön määrä on riippuvainen napakoordinaation

Taulukko II. Osittainen sää- ja väestöjakauma. Todennäköisyys on leviämissektorissa esiintymisen sektorissa ja stabiilius on laskettu ao. suunnassa esiintyvistä kaikista stabiiliudesta. Tuulennopeutta ja sadetta ei ole esitetty. Väestöjakauma on esitetty sektoreittain ja etäisyysväleittäin.

Sektori ^(*)	Sektorin todennäk. [%]	Stabiiliusluokan todennäköisyys [%]					Väestöjakauma etäisyysväleittäin [km]					
		A	B	C	D	E	F	0-1.2	1.2-1.8	1.8-3.2	3.2-4.0	4.0-5.0
1	6	1	2	6	8	37	47	0	0	248	245	334
2	22	2	4	13	54	18	9	0	2.4	172	203	459
3	22	4	8	18	54	12	5	0.6	29	215	268	453
4	4	8	9	26	32	16	9	3.4	26	198	185	226
5	2	18	10	18	20	25	9	0.3	12	36	24	32
6	1	18	15	13	8	28	18	0	0	50	65	130
7	5	12	12	14	12	30	18	0	0	40	35	38
8	13	5	9	14	16	27	29	0	0	15	19	25
9	15	6	9	14	22	21	29	0	0	1.7	7	2
10	5	5	9	12	14	25	35	0	0	0	1.6	5
11	2	2	7	5	7	36	43	0	5	76	77	289
12	3	1	2	4	4	35	54	0	1.2	195	160	117

^(*) Sektori 1 on välillä 346-15 astetta (pohjoiseen), sektori 2 on välillä 16-45 astetta, jne.

määrittelystä neliöhilasta konvertoitaessa. Tämänkin lukuarvo on lopulta hyvin samansuuruinen kaikilla osallistujilla (noin 5300 asukasta).

Seuraavaksi tarkasteltiin sen alueen pinta-alaa, jolta väestö siirretään pois pitkäksi aikaa ja poissiirretyn väestön määrää sekä lopuksi näiden aikaintegraaleja. Taloudellisten vahinkojen laskemisen on ajateltu perustuvan pitemmän ajan kuin vuoden kuluessa kertyvään annokseen. Siten ARANO:ssa lasketaan ensin se aika, jonka kuluttua 30 vuoden kuluessa kertyvä ulkoinen annos ei ylitä kriteeriä. Kun tässä vertailussa kuitenkin halutaan tietää, minkä alueen käyttö kielletään vuosiannosrajaan perustuen, edellytti se laskentarutiinien muutosta. Toisaalta aikaintegraalin laskentaa ja sen vaatimaa muutostyötä ei pidetty saavutettavaan hyötyyn nähden tarpeellisena. ARANO:ssa laskenta etenee periaatteessa seuraavasti: ensin määritetään sen alueen osuus leviämissektorissa etäisyyden funktiona, jossa annoskriteeri ylittyy ja tämän jälkeen yhdistetään tulokseen alueella oleva väestömäärä.

Liitteessä 10 on esitetty siirretyn väestön määrä kahdessa eri laskentatilanteessa, joista jälkimmäisessä päästömäärä oli kaksi kertaluokkaa pienempi kuin edellisessä. Jälkimmäisessä kuvassa esiintyvä hajonta johtuu siitä, että annokset jäävät lähialueella kriteerin tasolle, jolloin meteorologisten tilanteiden poimintatapa yhdessä epätasaisen väestöjakauman kanssa vaikuttaa hajonnan muodostumiseen.

4.4 Vastatoimenpiteiden vaikutus maatalouteen

Tässä kohdassa kysyttiin maataloustuotteiden menetyksiä ja niiden aikaintegraaleja muodossa, mitä ei yleensä ole ARANO:lla laskettu. ARANO:n ravintoainemalli perustuu NRPB:n laske-miin nuklidikohtaisiin aikaintegraaleihin sovellettuna kuitenkin pohjoismaiseen viljelyskäytännöön. Malli on voimakkaasti 30 vuoden nautinnasta kertyvän annoksen laskentaan perustuva. Kolmen ensimmäisen vuoden laskenta on jaettu ensimmäisen ja toisen - kolmannen vuoden

kuluessa kertyvään annokseen, joten vuositasolla kieltokriteerin mukaanotio olisi vaatinut ohjelman muutosta.

Yleensä ARANO:n ravintoaineannosten CCDF-käyrissä näkyy selvästi kausivaihtelun vaikutus. Kesäkauden suuret annokset, mutta pienet todennäköisyydet ja talvikauden pienet annokset, mutta suuret todennäköisyydet. Nyt ohjelmavertailu: kuvissa ei yleensä ottaen tällaista vaihtelua näytä esiintyvän, mikä viittaisi voimakkaan kausiriippuvuuden puuttuvan malleista. Tähän vaikuttaa luonnollisesti etelän pitemmät kasvukaudet. Kaikenkaikkiaan ravintoainemallien lähestymistavoissa on merkittäviä eroja, joten tulosten vertailu ei yleisellä tasolla ole järkevää.

4.5 Taloudelliset vaikutukset

Taloudellisina vaikutuksina laskettiin evakuoimien ja väestösiirron, ravinnon kieltokriteerin sekä terveysvaikutusten kustannukset. Yleisesti ottaen ruoan käyttökiellosta aiheutui selvästi suurin kustannus ja seuraavaksi suurin kustannus aiheutui väestön poismuutosta yksivaiheisessa päästössä, mutta terveysvaikutuksista pitkässä päästössä, jossa pitoisuudet jäivät pienemmiksi.

ARANO:lla oli laskettu vain poismuuttokustannukset, koska muiden komponenttien laskenta olisi vaatinut ohjelman muuttamista. Poismuuton kustannusten laskentaa varten oli iimoitettu vuosiansioksi 13200 ECU:a, pitempiäaikaista väestön poissiirtoa seuraavan palautumisen ajaksi 2 vuotta ja tämän ajan majoituskustannukseksi 5 ECU/henkilövuorokausi ja evakuointi/siirtokustannus 3 ECU/henkilö. Lisäksi oli annettu diskonttaus korko 5 %.

4.6 Yksilöriski

Terveysvaikutusten riski etäisyyden funktiona on esitetty liitteessä 11 ilman vastatoimenpiteitä. ARANO:n tulos on sopusoinnussa muiden kanssa. Laskenta tapahtuu siten, että lasketaan halutuilla etäisyyksillä väestöannos sijoittamalla yksi asukas kuhunkin sektoriin ja jakamalla lopuksi tulos sektoreiden määrällä.

4.7 Ilmassaleviäminen

ARANO:lla ei laskettu Cs-137:n ilmapitoisuutta eikä laskeumaa annetuissa etäisyyssysteissä. Muissa ohjelmissa eroavuuksia esiintyi tunnettaisen säädäntä poiminnasta ja dispersiomallista johtuen, joiden vaikutus kertyy laskentapuolella.

5 ARANO:N JATKOKEHITYSTARPEET

Ohjelmavertailun kuluessa vahvistui käsitys eräistä jo ennestäänkin tiedossa olleista täydennystarpeista ARANO:n mallinnuksen osaluveilta, jotka voivat tulla kyseeseen mallin jatkokehityksessä.

5.1 Dispersiomalli

Pitkäkestoisten päästöjen käsittely on tapahtunut kasvattamalla sivusuuntaista leviämistä kertomalla σ_y -arvot päästön kestosta ja etäisyydestä riippuvilla kertoimilla ns. meandering-ilmion huomioonottamiseksi. Tämä menettely on tarkoitettu kuitenkin vain tuntiskaalalle, joten esim. vuorokauden pituisen päästön osalta menettelyä voitaisiin kehittää. Tässä yhteydessä on toisaalta syytä muistuttaa, että on kyse PCA-tyyppisestä ohjelmasta, jolloin pitkäkestoisien päästön aiheuttama annos lasketaan joka tapauksessa mukaan. Reaaliaikamalleissa tilanne on täysin toinen ja pilven absoluuttisella asemalla on merkitystä.

Hyvin yleinen tapa PCA-ohjelmissa on käyttää suoraan tunnittaista säädettä eli päästön jatkuessa käytetään uudelle päästölle aina uusia säätietoja. Tässä on periaatteessa kolme eri tapaa:

- 1) päästö etenee suoraviivaisesti käyttäen lähtöhetken säätä,
- 2) päästö etenee suoraviivaisesti käyttäen uusinta säätä tai
- 3) päästö etenee käyttäen uusinta säätä.

Vaihtoehto 3 edellyttäisi pilven kääntymistä leviämisen aikana, mikä on napakoordinaatissa hankalasti toteutettavissa. Joko kohtien 1 tai 2 mukaista rakennetta on ajateltu myös ARANO:on. Lineaarisen annoslaskennan osalta muutostyö on suhteellisen suoraviivainen,

mutta annos/terveysvaikutus ja taloudellisten vahinkojen osalta muutostyö vaatii huomattavasti ohjelman rakenteen muuttamista, koska nykyisellään annos ja sen vaikutus liittyvät yhteen ja samaan sektori/etäisyysväliin mutta uudessa systeemissä yksittäisen yli tunnin pituisen päästön suunta voi vaihdella. Vertailussa havaittiin erään osallistujan taholta esiintyvän merkittävää eroa tuloksissa riippuen siitä, milloin sade aloitettiin, minkä takia vaihtoehto 2 puoltaa paikkaansa.

Kuivadepositiolle on ollut kaksi vaihtoehtoista suuruutta 0,01 ja 0,001 m/s, joista jälkimmäistä käytettiin tässä ohjelmavertailussa. Lisäksi ARANO:ssa on ollut käytettävissä suurille partikkeleille kahta oleellisesti suurempaa depositionopeutta gravitaatiovaikutuksen takia. Ilmatieteen laitoksen kanssa on alustavasti suunniteltu dispersion laskemisen kehittämistä kaukokulkeutumismallissa uusimman tiedon pohjalta, jossa yhteydessä myös lähialuemallin dispersiolaskentaa voidaan arvioida. Myös sateen intensiteetin suora käyttö tunnittaisesta sääaineistosta olisi järkevää.

5.2 Annoslaskentamallit

Annoskriteereitä asetetaan nykyisellään muissa ohjelmissa vuositasolla, joten on harkittava tällaisen integrointiajan mahdollistamista sekä laskeumasta tulevan ulkoisen annoksen ja ravintoaineteiden yhteydessä taloudellisia menetyksiä laskettaessa. Ravintoainemallin käyttäytymistä on arvioitava uudemman tiedon pohjalta.

5.3 Terveysvaikutusmallit

ARANO:ssa on käytössä kolme vaihtoehtoista riskifunktiota: lineaarinen, lineaariportainen ja kynnysmäinen. Nyt esim. NUREG esittää akuuttien vaikutusten laskentaan sopivat parametrit Weibullin jakauman avulla, mikä johtaa s-muotoiseen riskifunktioon, jonka tarkka aproksimointi nyt käytössä olevilla käyrillä on mahdotonta. Annostason jäädessä kriteerin alarajan läheisyyteen, vaikuttaa funktiomuoto

merkittävästi tapausten määrään. Tästä syystä ARANO:on voisi kehittää uuden riskifunktion perustuen ED_{50} -, kynnysarvo- ja muotokerroinparametreihin.

5.4 Taloudellisten menetysten mallinnus

Annoskriteerin asetus vuositasolle muuttaa ohjelman rakennetta.

6 YHTEENVETO

Kansainvälinen tietokoneohjelmavertailu tarjosi tilaisuuden arvioida ARANO:n nykyistä toimivuutta suhteessa muihin vastaavatyypisiin PCA-ohjelmiin. Ensimmäisen ohjelma-vertailun, noin kymmenen vuotta sitten, jälkeen on kansainvälistä kehitystä vanhojen ohjelmien osalta tapahtunut ja on myös tehty aivan uusia ohjelmia, joista huomattavin on yhteiseurooppalainen COSYMA. COSYMA tulee toimimaan jatkossa CEC:n tason 3 PSA-ohjelmana. CEC:n reaaliaikamalli RODOS on parhaillaan laajan kehitystyön alia. Työn kuluessa muodostui kaksi yksittäistä ohjelman käyttäjäryhmää: MACCS- ja COSYMA-ryhmä. VTT on ilmoittanut olevansa halukas ryhtymään myös COSYMA:n käyttäjäksi. COSYMA:a olisi tarkoitus käyttää apuna tutkimuksessa ja tehdä sillä vertailulaskuja, mutta ARANO säilyisi edelleen varsinaisena perustyökaluna.

Vertailuprojektin puitteissa ohjelmia voitiin verrata ja siten eräänlaista laadunvarmistustyötä toteutettiin, mihin tällaisten ohjelmien kohdalla muutoin on harvoin mahdollisuuksia. Ohjelmien kehittäjät ja käyttäjät saattoivat vaihtaa kokemuksiaan ja mielipiteitään, mikä sekin on tärkeää alueella toimivien osalta. Myös ohjel-

mointivirheitä löytyi ja mallien erilaisista ominaisuuksista opittiin. Tuloksissa esiintyvä hajonta jäi lopultakin yllättävän pieneksi, kun otetaan huomioon malleihin implisiittisesti liittyvät tekijät. Tulosten maksimi- ja minimiarvon suhde jäi yleensä selvästi alle kertaluokan. Suoraviivaisen ja trajektorimallin välillä ei havaittu olennaista eroa tulosten osalta. Sensijaan tunnittaisen sääaineiston näyteenotolla havaittiin olevan huomattava merkitys lopputuloksiin, joten sen osa-alueen kehittämistä toivottiin. Taloudellisten vaikutusten laskentaan toivottiin lisäkehitystä ja maataloustuotannon uusien vastatoimenpiteiden lisäystä ohjelmiin Tshernobylin valossa esitettiin.

Projektin katsottiin tulleen onnistuneesti loppuunviedyksi, koska suurin osa tehtävämäärittelyn mukaisia laskentoja suoritettiin ja tulokset osoittautuivat julkaisukelpoisiksi sekä kansainväliset loppuraportit ovat lopullisessa hyväksymisvaiheessa. ARANO:lla pystyttiin laskemaan tehtävämäärittelyiden mukaisesti huomattava määrä tuloksia, vaikka ohjelmia ei ole merkittävästi täydennetty alkuperäisestä versiosta. Projekti vahvisti ja toi esille tiettyjä parannusmahdollisuuksia myös ARANO:n osalta.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Vuori S. Matkakertomus osallistumisesta EY:n MARIA-tutkimusohjelmaa ja COSYMA-tietokoneohjelmistoa käsitelleeseen seminaariin, Ateena 7-11.5.1990. YRTA-2/90.
- /2/ Vuori S, Sinkko K. Matkakertomus osallistumisesta OECD/NEA:n ja CEC:n yhteiseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurausten arviointimallien benchmark-vertailuhanketta koskevaan kokoukseen, Pariisi 3-4.10.1991. BMK-1/91.
- /3/ International Comparison Study on Reactor Accident Consequence Modeling, Summary Report to CSNI by an NEA group of experts, NEA 1983.
- /4/ International Comparison Exercise on Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes, Overview Report, NEA, Final Draft, May 1993.
- /5/ Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes, Second International Comparison, Technical Report EUR 15109, CEC, OECD/NEA 1993.
- /6/ Rossi J. Matkakertomus osallistumisesta OECD/NEA:n ja CEC:n yhteiseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurausten benchmark-koodivertailukokoukseen, Pariisi 4-5.6.1992. BMK-1/92.
- /7/ Rossi J. Matkakertomus osallistumisesta OECD/NEA:n, SRD:n ja CEC:n yhteiseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurausten benchmark-koodivertailukokoukseen, Expert Groupin tulosten esitysluonnostelu, Bryssel 2-6.11.1992. BMK-2/92.
- /8/ Rossi J. Matkakertomus osallistumisesta OECD/NEA:n, SRD:n ja CEC:n yhteiseen reaktorionnettomuuksien ympäristöseurausten benchmark-koodivertailukokoukseen, Expert Groupin tulosten esitysluonnostelu, Pariisi 27-29.1.1993. BMK-1/93.
- /9/ Specification for the Joint NEA/CEC Intercomparison Exercise on Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes, OECD/NEA/PCA/DOC(91)4, Final version 26.11.1991, Restricted.
- /10/ Additional data and instructions for the Joint NEA/CEC Intercomparison Exercise on Probabilistic Accident Consequence Assessment Codes, OECD/NEA/PCA/DOC(91)5, Final version 26.11.1991, Restricted.
- /11/ Nordlund G. et al, Effect of application of surface depletion model on estimated reactor accident consequences, Health Physics, Vol. 37, 1979.

Liite 1

APPENDIX D

LIST OF PARTICIPANTS IN ADHOC GROUP ON THE
NEA/CEC INTERCOMPARISON EXERCISE ON
PROBABILISTIC ACCIDENT CONSEQUENCE ASSESSMENT CODES

Belgium	A. Lemmens, Tractebel A. Sonier, SCK/CEN	Spain	E. Gallego, UPM E. Gil, CSN R. Mendiloba, CSN J. Serrano, CSN
Denmark	S. Thykier-Nielsen, Risø	Sweden	U. Baverstam, SSI O. Karlberg, SSI
Finland	R. Hänninen, STUK J. Rossi, VTT K. Sinkko, STUK S. Vuori, VTT	Switzerland	H.P. Isaak, HSK
France	J. Brenot, IPSN J. Le Grand, IPSN D. Manesse, IPSN Y. Roux, IPSN	United Kingdom	J. Boardman, SRD P.J. Cooper, SRD J.O. Corbett, NE S.M. Haywood, NRPB J.A. Jones, NRPB W. Nixon, SRD A.C. Ponting, NE
Germany	J. Ehrhard, KfK I. Hasemann, KfK W. Pfeffer, GRS C. Steinnauer, KfK	United States	S. Acharya, DOE J. Glynn, NRC C. Liu, NRC L. Neymotin, BNL
Greece	J.G. Kollas, NCSR	CEC	G. Fraser, DG XI G.N. Kelly, DG XII
Italy	A. Bottino, ENEA V. Cammarata, ENEA A. Fanfanello, ENEL S. Monti, ENEA	IAEA	A. Gheorghe, NSD
Japan	T. Homma, JAERI H. Matsuzuru, JAERI O. Togawa, JAERI	OECD	C. Viktorsson, NEA J. Royen, NEA
Netherlands	J. Grupa, ECN R. Jansma, ECN P. Roelofsen, ECN J. van der Steen, KEMA E.v. Wonderen, KEMA	Observers	L. Koblinger, Hungary J. Duran, Slovakia M. Stupna, Slovakia H.F.B. Minnaar, South Africa D. Schuykens, South Africa
Norway	U. Tveret, IFE		

Lähde: Viite nro 4 ss. 92-93.

TABLE 4

Source Term	Time before release ¹ (h)	Duration of release (h)	Rate of release (MW)	Release height (m)	Warning time ² (h)	Release fractions ³						
						Xe-Kr	Org- I ⁴	I	Cs-Rb	Te-Sb	Ba-Sr, Ru ⁵	La ⁶
ST1	2.0	1.0	2.0	10	1.0	1.0	0.001	0.1	0.1	0.05	0	0
	3.0	5.0	0.2	10	-	-	-	-	-	0.05	0.01	0.001
ST2	2.0	1.0	0	10	1.0	1.0	0.001	0.1	0.1	0.1	0.01	0.001
ST3 ⁷	2.0	1.0	0	10	1.0	0.1	0.00001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.00001
ST4	2.0	1.0	0	10	1.0	1.0	0.00033	0.033	0.033	0.033	0.0033	0.00033
	3.0	1.0	0	10	-	0	0.00033	0.033	0.033	0.033	0.0033	0.00033
	5.0	1.0	0	10	-	0	0.00033	0.033	0.033	0.033	0.0033	0.00033
ST5	2.0	24.0	0	10	1.0	1.0	0.001	0.1	0.1	0.1	0.01	0.001

ST6 same as for ST2 apart from particle size distribution, see Table 5

¹ Time between shutdown and beginning of release to the environment.

² Period of time available for the initiation of countermeasures before the release to the environment begins.

³ All elements, apart from organic iodine and the noble gases, are assumed to be released in the oxide form and as an aerosol of size of 1 μ m AMAD. The release fractions have been applied to the inventory of radionuclides in a 1250 MW(e) reactor [6].

⁴ Organic Iodine.

⁵ Includes Ru, Rh, Co, Mo, Tc.

⁶ Includes Y, La, Zr, Nb, Ce, Pr, Nd, Np, Pu, Am, Cm.

⁷ For source term ST3 the radius of the fixed area used for sheltering and evacuation is 5 km.

NOTE: Source term ST1 is based on a two-puff release corresponding to the V-sequence (by-pass) in the NUPEC-1150 Study (CR-4551) for the Surry-1 NPP (three-loop PWR). This accident sequence is initiated by a failure of the check valves separating the RCS and the Low Pressure Injection System (LPSI). A release into the environment through the auxiliary building develops following a subsequent failure of the LPSI piping. This source term with some modifications has been used as a prototype for the international intercomparison Exercise.

Liite 3

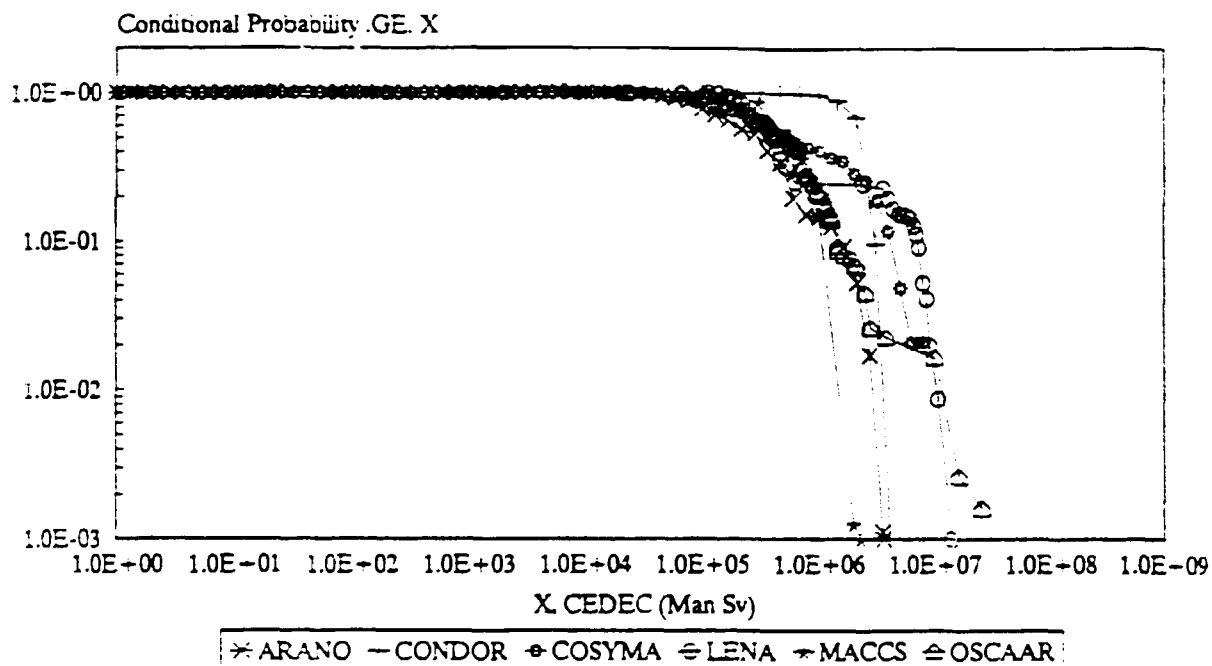
TABLE 6

CODE COMPARISON CALCULATIONS

C1	Source term <u>ST2</u> with: countermeasures, deposition characteristics as specified in Section 3.2.6, ingestion pathways, countermeasures on food based on dose levels (see section 3.2.7)
C2	As C1 but with source term <u>ST5</u>
C3	As C1 but with <u>no</u> countermeasures
C4	As C1 but with <u>no</u> ingestion doses
C5 to C8	As C1 but with source terms ST1, ST3, ST4 and ST6 respectively
C9	As C1 but with participants own choice of deposition characteristics for the specified physico - chemical forms of the released material (see section 3.2.6).
C10	As C1 but with countermeasures on food based on activity levels (see Section 3.2.7)

Lähde: Viite nro 4 s. 76 ja viite nro 5 s. 108.

Liite 4

a(i) Total Collective Effective Dose Equivalent Commitment From All Pathways
Calculation C3

International Comparison of PCA Models							
Sheet 2	a(i) Total Collective Effective Dose Equivalent Commitment (over all time) to the whole population from all pathways (Man Sv)						
Calculation C 3	Expectation Value	Value of the pth Percentile					Probability of zero effects
		p = 50	p = 90	p = 95	p = 99	p = 99.9	
ARANO	5.26E+05	2.96E+05	1.56E+06	2.17E+06	2.92E+06	3.67E+06	0
CONDOR	2.39E+06	2.29E+06	3.14E+06	3.29E+06	3.63E+06	4.17E+06	0
COSYMA	1.52E+06	5.01E+05	4.27E+06	4.90E+06	9.12E+06	9.65E+06	0
LENA	1.82E+06	4.14E+05	7.34E+06	8.04E+06	1.03E+07	1.42E+07	0
MACCS	6.40E+05	5.59E+05	1.06E+06	1.17E+06	1.48E+06	2.32E+06	0
OSCAAR	9.27E+05	5.26E+05	1.35E+06	2.20E+06	1.57E+07	2.58E+07	0

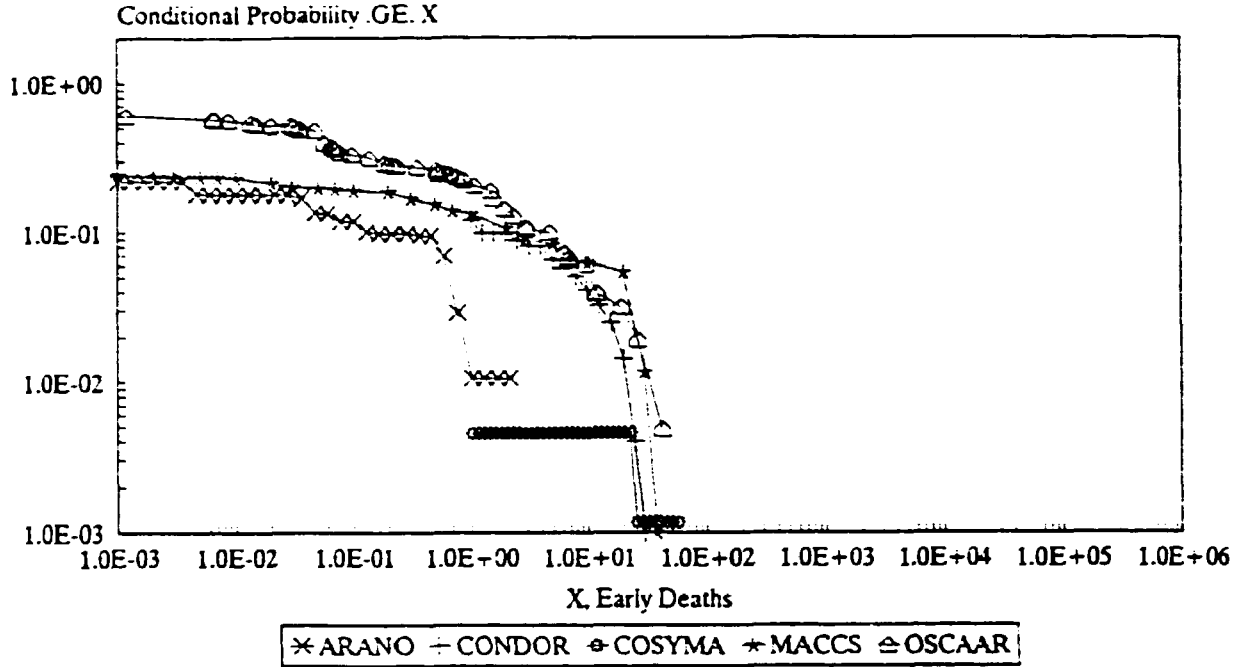
Lähde: Viite nro 5 s. 50.

FIGURE 5.3.1

Liite 5

b(i) Number of Early Deaths

Calculation C1

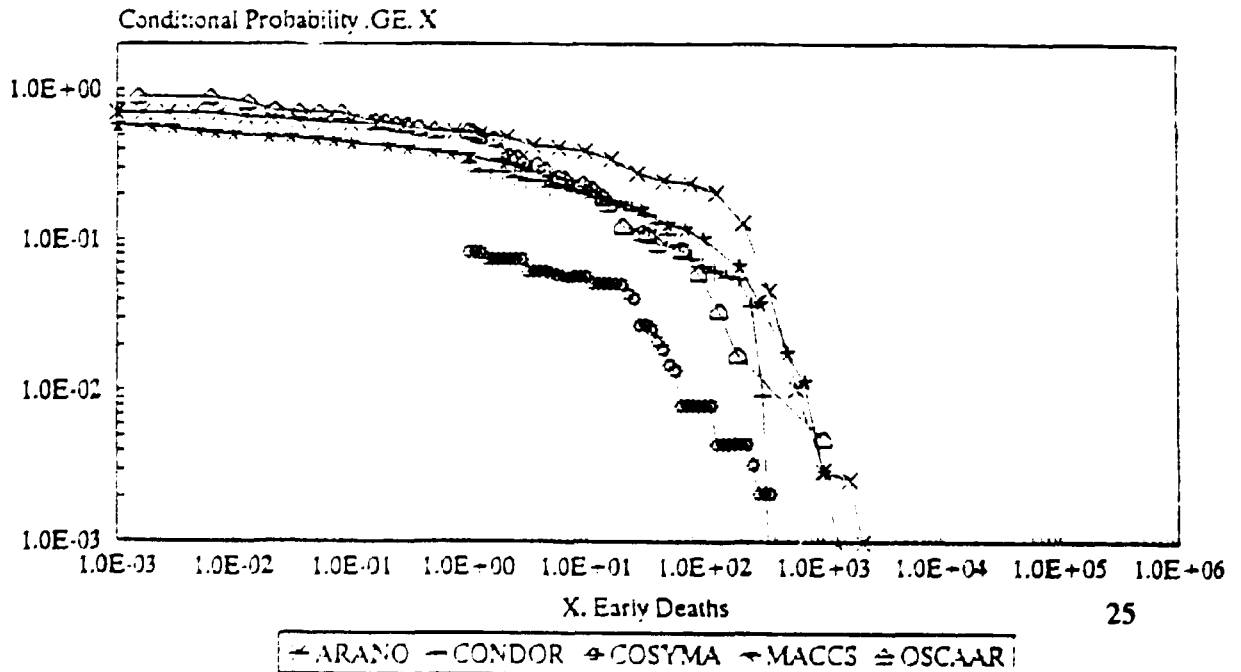


Lähde: Viite nro 5 s. 54.

FIGURE 5.3.2

b(i) Number of Early Deaths

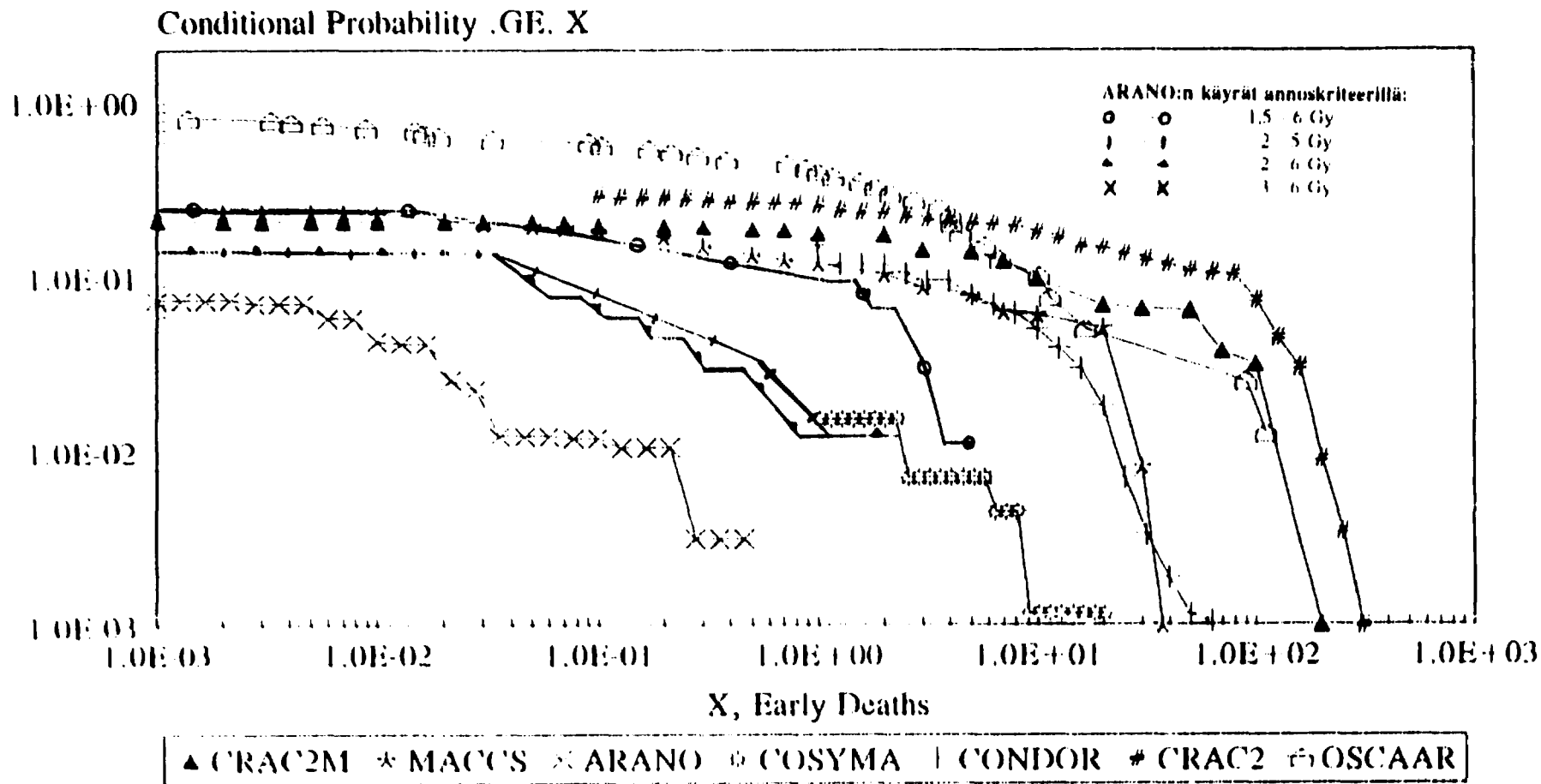
Calculation C3



Lähde: Viite nro 4 s. 38 ja viite nro 5 s. 55

b(i) Number of Early Deaths

Calculation C 1



Lähde: Results of the first calculation (C) s. 25; issue 2. (For discussion at the 3rd Ad-hoc Group meeting Paris 4th - 5th June 1992)

Liite 7

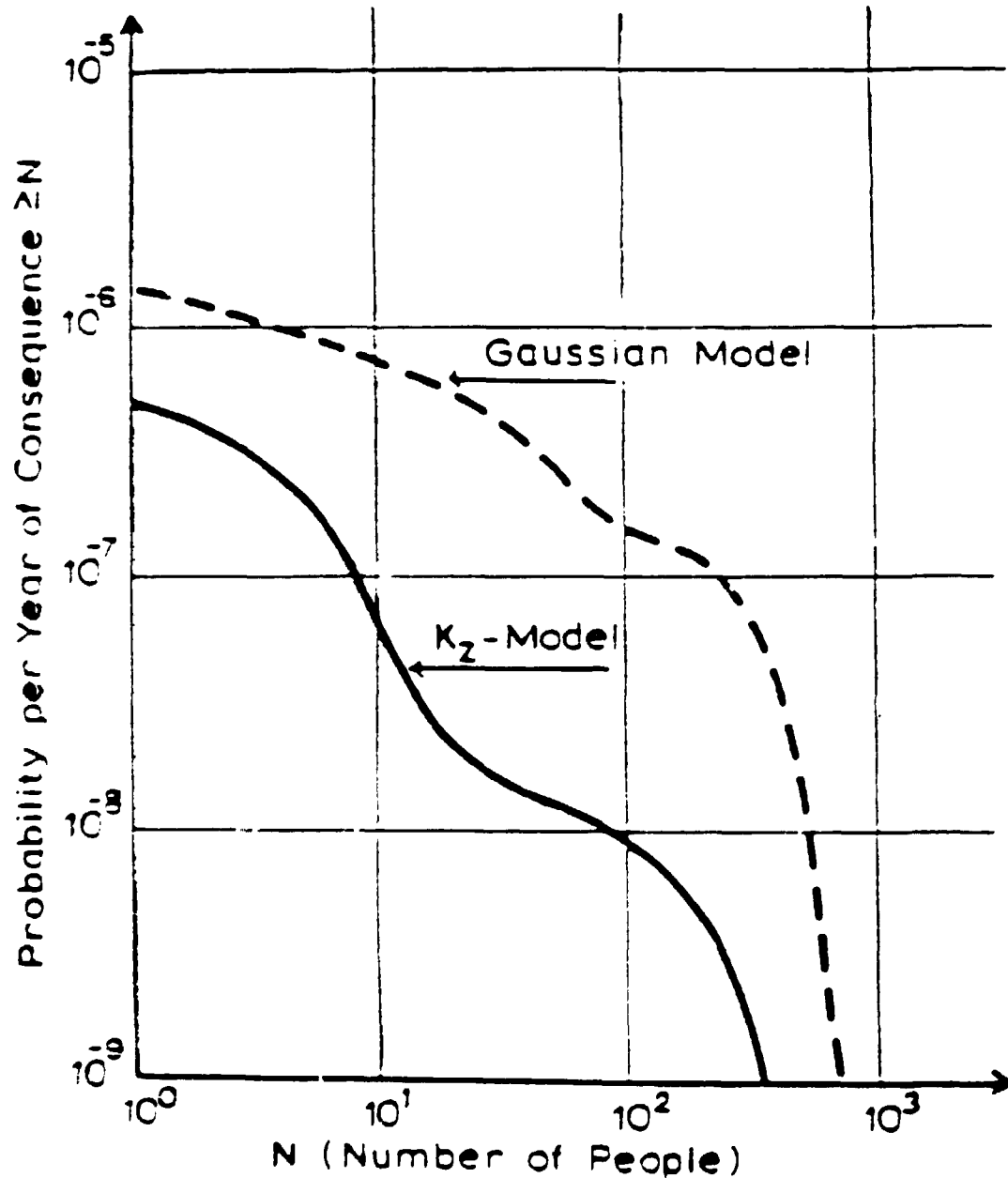
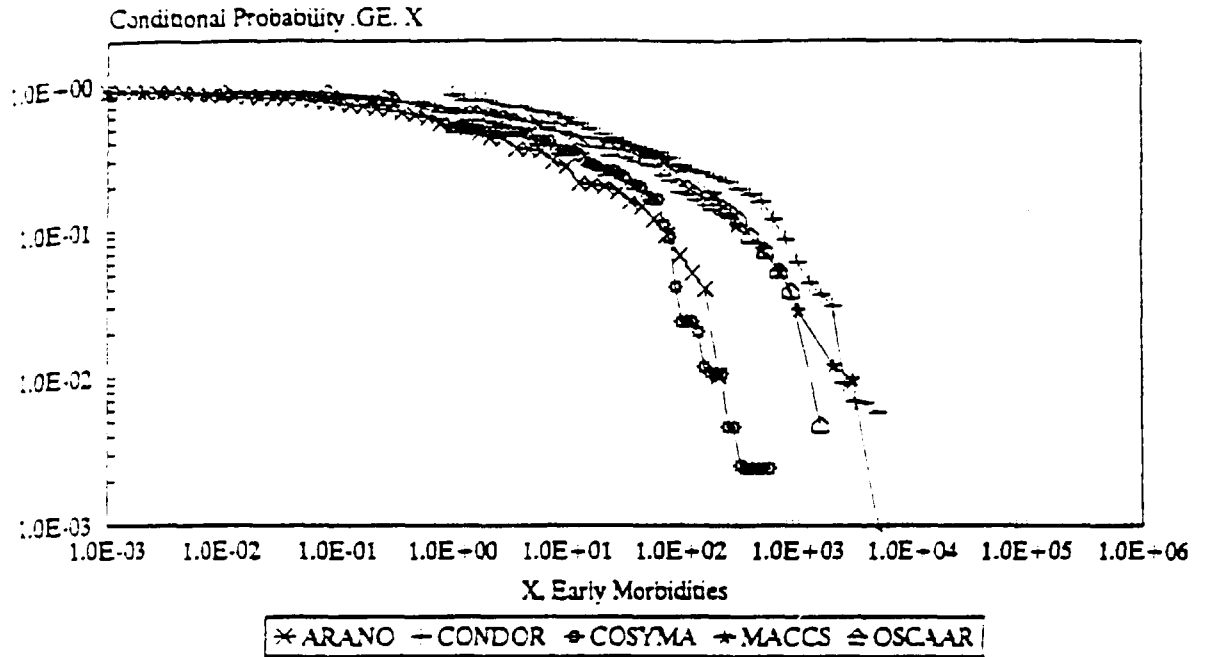


FIG. 7. Complementary cumulative probability distribution for the number of people exceeding bone marrow dose of 300 rem due to a BWR2 release.

Liite 8

b(vi) Number of Early Morbidities from Hypothyroidism

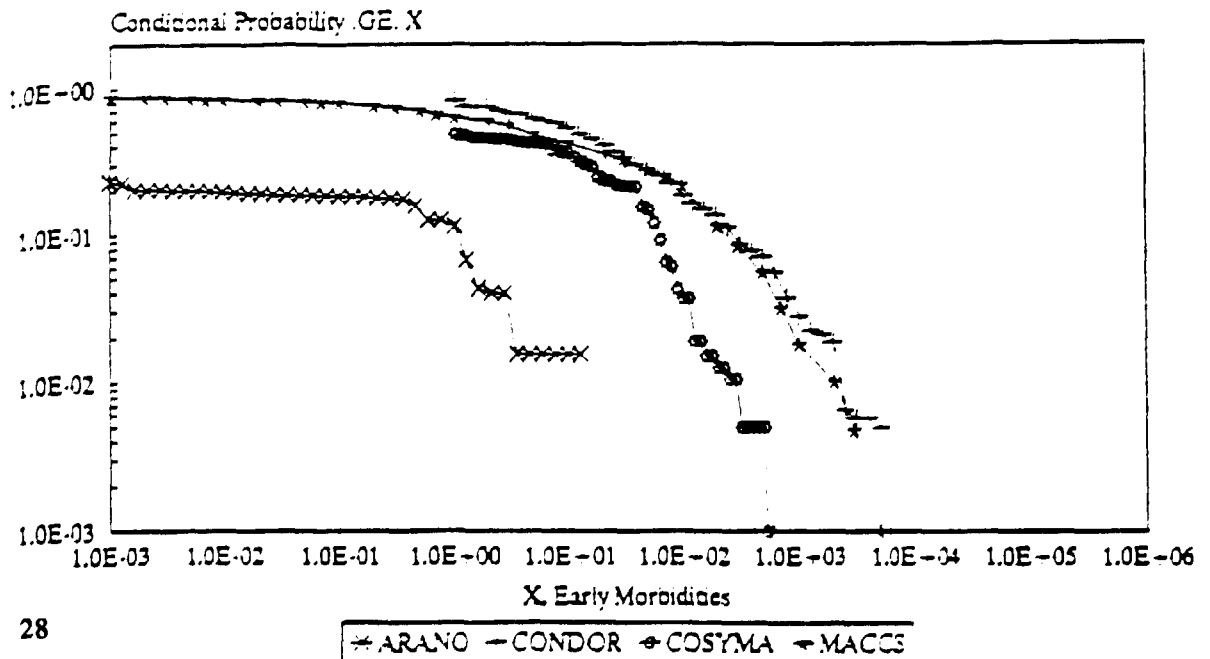
Calculation C1



Lähde: Viite nro 5 s. 59.

b(vi) Number of Early Morbidities from Hypothyroidism

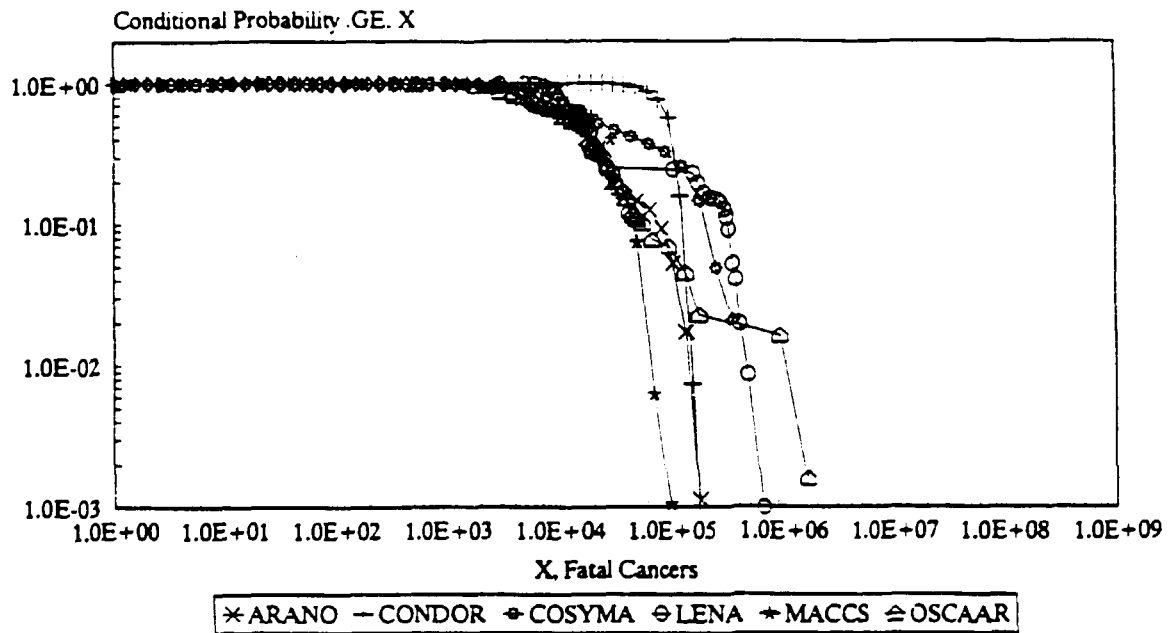
Calculation C5



Liite 9

b(ii) Number of Fatal Cancers (summed over all types)

Calculation C3

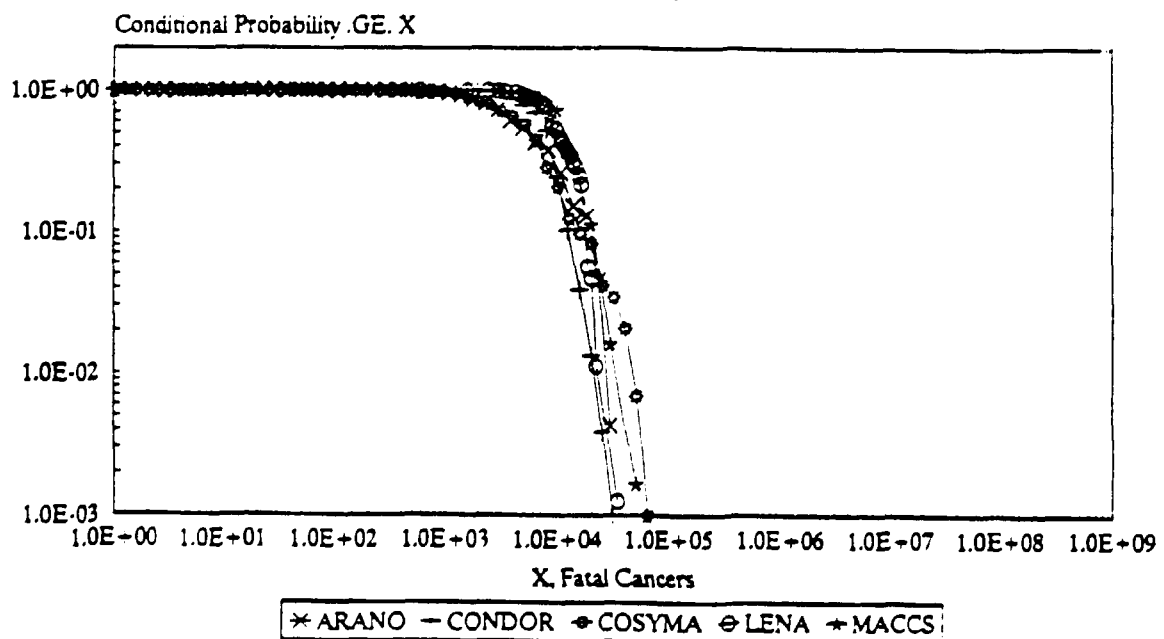


Lähde: Viite nro 5 s. 64.

b(vii) Number of Fatal Cancers from doses for all Pathways except

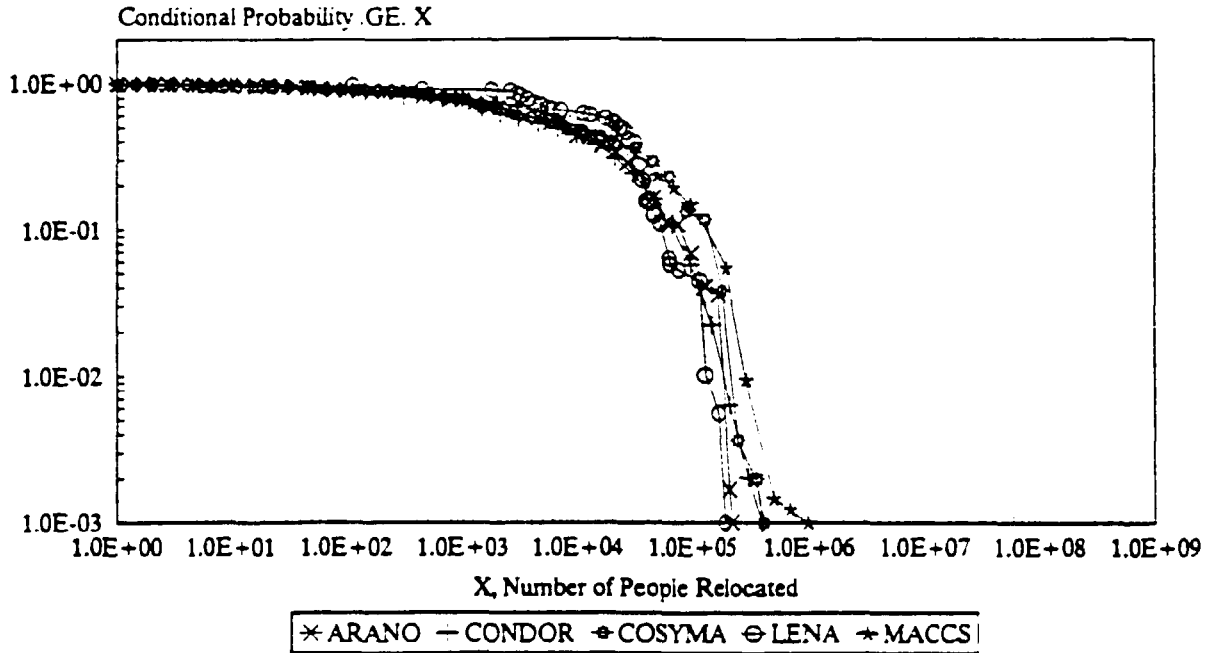
Ingestion

Calculation C5



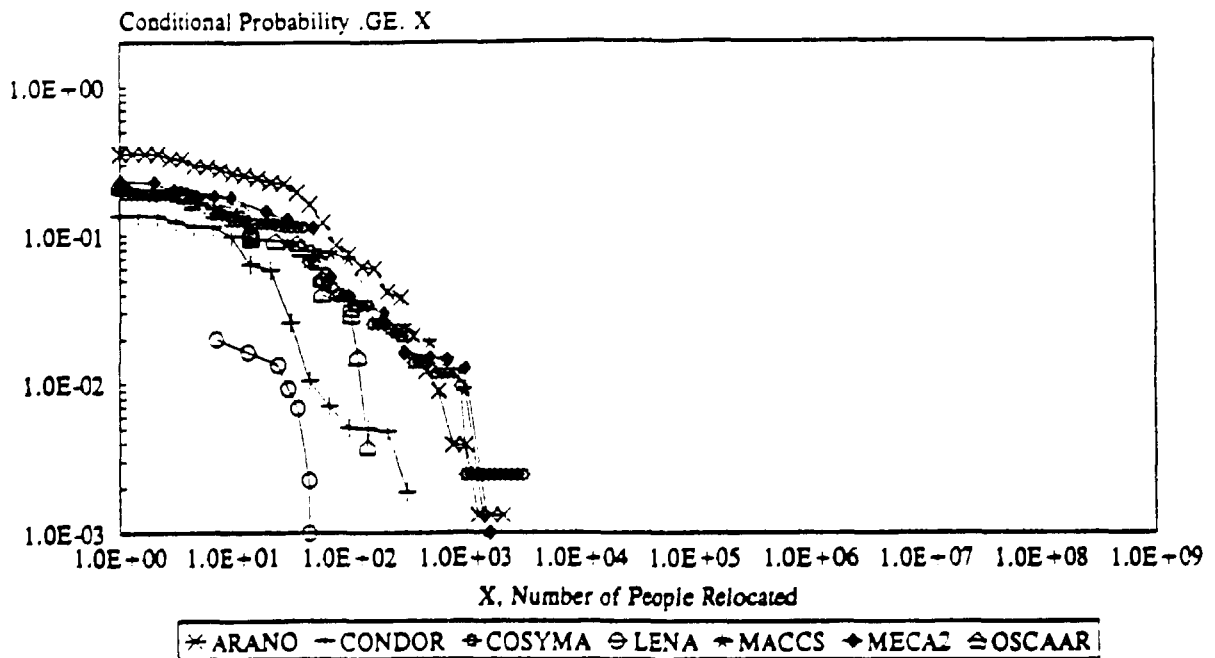
Lähde: Results of the 5th calculation (C5) s. 18; issue 2. (For discussion at the 4th Ad-hoc Group meeting Paris 28th - 29th January 1993)

Liite 10 c(iii) Total Number of People Relocated
Calculation C5



Lähde: Results of the 5th calculation (C5) s. 20; issue 2. (For discussion at the 4th Ad-hoc Group meeting Paris 28th - 29th January 1993)

c(iii) Total Number of People Relocated
Calculation C6

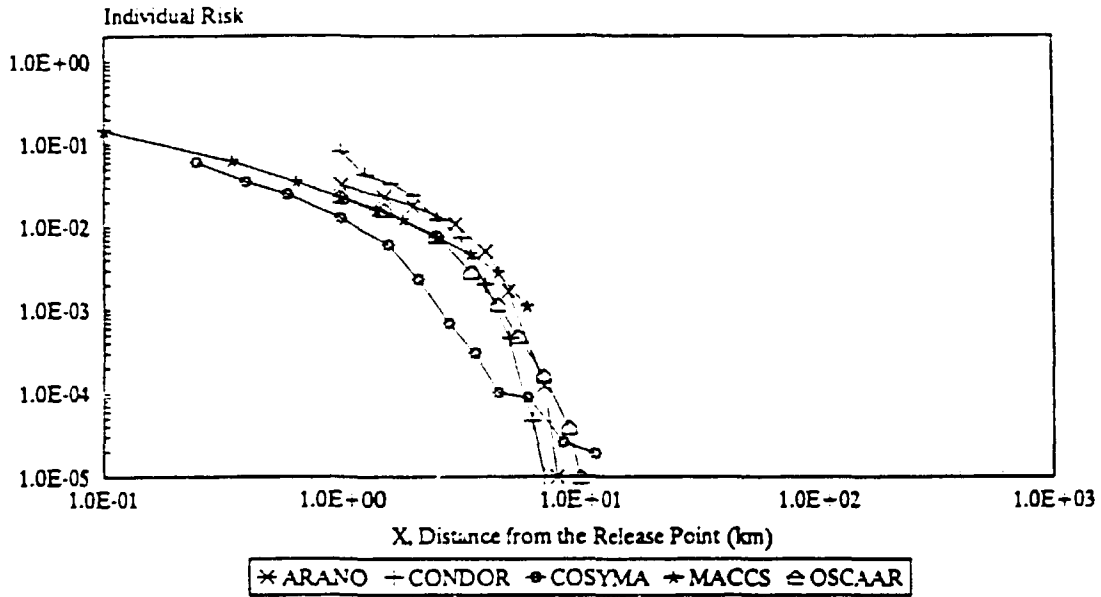


Lähde: Results of the 6th calculation (C6) s. 20; issue 2. (For discussion at the 4th Ad-hoc Group meeting Paris 28th - 29th January 1993)

Liite 11

f(i) Adult Individual Risk of Early Death as a Function of Distance

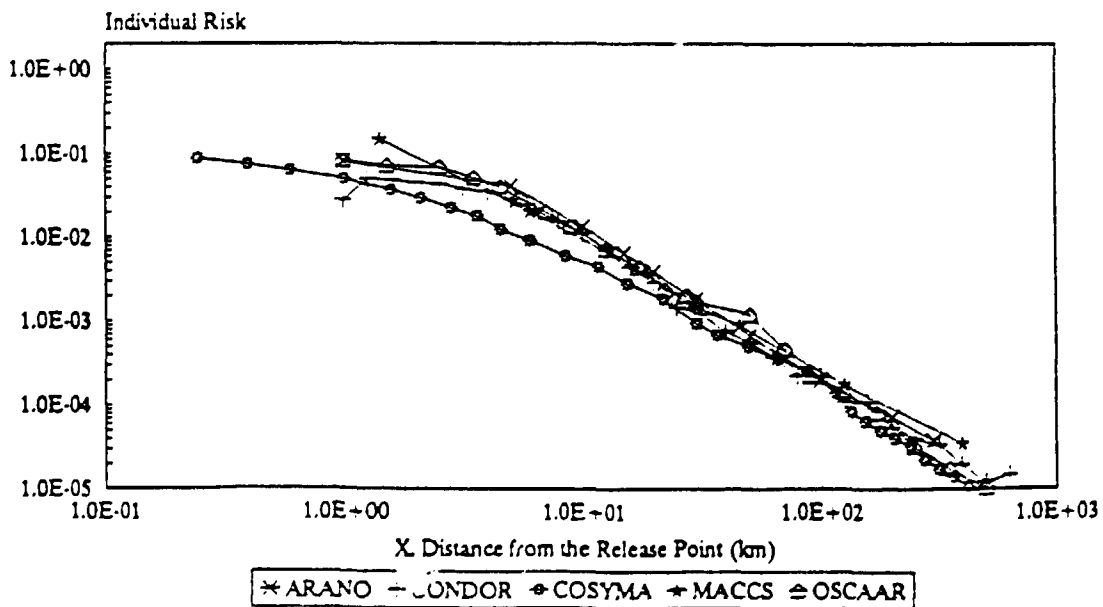
Calculation C3



Lähde: Results of the 3rd calculation (C3) s. 20; issue 4. (For discussion at the 4th Ad-hoc Group meeting Paris 28th - 29th January 1993)

f(ii) Adult Individual Risk of Fatal Cancer as a Function of Distance

Calculation C3



Lähde: Results of the 3rd calculation (C3) s. 20; issue 4. (For discussion at the 4th Ad-hoc Group meeting Paris 28th - 29th January 1993)

STUK-YTO-TR-sarjan julkaisut

STUK-YTO-TR 63 Wallin K, Rintamaa R, Valo M (VTT). Pienillä taivutussauvoilla mitatun murtumissitkeyden pätevyys.

STUK-YTO-TR 62 Sandberg J, Virolainen R. Comparison of the core damage probability by the SPSA computer program and by analytical methods - a simplified loss of offsite power. Validation of the SPSA program.

STUK-YTO-TR 61 Holmberg J, Pulkkinen U. Regulatory decision making by decision analyses.

STUK-YTO-TR 59 Okkonen T. A Synthesis of Hydrogen Behaviour in Severe Reactor Accidents.

STUK-YTO-TR 58 Simola K, Hänninen S (VTT). Olkiluodon ydinvoimalaitoksen suojausautomaation laiteketjun vanheneminen.

STUK-YTO-TR 57 Ikonen K (VTT). Murtumissitkeyden laskeminen pienen taivutuspaikkin kokeesta.

STUK-YTO-TR 56 Lévai F, Dési S (University of Budapest), Tarvainen M (STUK), Arlt R (IAEA). Use of high energy gamma emission tomography for partial defect verification of spent fuel assemblies. Final report on the Task FIN A98 on the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 55 Tiitta A (VTT), Kaita K, Tarvainen M. SFAT geometry verification measurements at the TVO KPA-STORE. Interim report on Task FIN A563 of the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 54 Järvinen J, Mikkanen M (Ekono Oy). Kokemuksia ohjelmoitavan automaation luotettavuudesta.

STUK-YTO-TR 53 Pulkkinen U (VTT). Ohjelmoituun automaatioon perustuvien turvallisuustoimintojen luotettavuusanalyysi.

STUK-YTO-TR 52 Haapanen P, Maskuniitty M (VTT). Ohjelmoitavan automaation diversiteetti- ja testausvaatimukset.

STUK-YTO-TR 51 Nissilä M, Reunanen M, Vuori M (VTT). Ydinlaitosten varoventtiilien määräaikaistestaus. Perusteita, käytäntöjä ja vaatimuksia.

STUK-YTO-TR 50 Barck H (VTT). Röntgenkuvien arkistoitavuus.

STUK-YTO-TR 49 Sarkimo M (VTT). Akustinen emissio ydinvoimalaitoksen suojakuoren testauksessa.

STUK-YTO-TR 48 Paloniemi E, Salparanta L (VTT). Jänneterästen kunnon tarkastus.

STUK-YTO-TR 47 Sillanpää J, Särkiniemi P (VTT). Ultraäänitestauksen menetelmäkokeet ja henkilöstön pätevänti ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastuksissa.

STUK-YTO-TR 46 Niiranen T. Vaativien rakennusteknisten kohteiden suunnittelun ja rakentamisen valvonta.

STUK-YTO-TR 45 Hänninen S, Laakso K (VTT). Experience based reliability centered maintenance - An application on motor operated valve drives.

STUK-YTO-TR 44 Eurasto T, Sandberg J, Marttila J. The Leningrad Nuclear Power Plant - A general description.

STUK-YTO-TR 43 Hellmuth K-H, Lindberg A, Tullborg E-L. Water-rock interaction in a high-FeO olivine rock in nature.

Täydellisen listan STUK-YTO-TR-sarjan julkaisuista saa Säteilyturvakeskuksen kirjastosta, PL 268, 00101 HELSINKI

Julkaisujen myynti: Säteilyturvakeskus, ydin-
turvallisuusosasto, puh. 708 2384

ISBN 951-47-8860-5
ISSN 0785-9325

Painatuskeskus Oy, Pikaopisto
Annankatu 44, Helsinki 1994