



r

SSI Rapport

SSI report

97:08 LENNART LINDBORG

*Storheter för
strålskyddsarbete*



Statens strålskyddsinstitut
Swedish Radiation Protection Authority

SSI-rapport 97:08

Date of issue: Juni 1997

ISSN 0282-4434

PRIS/PRIZE: 40 SEK

FÖRFATTARE/AUTHOR:

Lennart Lindborg

AVDELNING/DIVISION:

Miljöövervakning och mätning

TITEL/TITLE:

Storheter för strålskyddsarbete

SAMMANFATTNING/ABSTRACT:

ICRU har definierat särskilda mätbara (operativa) storheter för strålskyddsarbete. En konsekvens av att de operativa storheterna används blir att handburna dosmätare och persondosmätare i samma bestrålningssituation kan ge olika mätresultat. Skillnaderna varierar och orsakas av strålfältets geometri. Mätstorheterna har väl-dokumenterade relationer till ICRPs s k skyddstorheter t ex effektiv dos och ekvivalent dos till ett organ eller vävnad. Det är därför möjligt att uppskatta en organs dos eller en effektiv dos med ledning av ett uppmätt värde på t ex miljödosekvivalenten. ICRU och ICRP har nyligen sammanfattat relationerna i två viktiga gemensamt utgivna rapporter *Report 57* och *Publication 74*.

Denna rapport försöker med några exempel visa på värdet av att förstå storheterna och deras relationer och är i första hand tänkt att användas i utbildningssyfte.



Statens strålskyddsinstitut

Swedish Radiation Protection Institute

Adress: Statens strålskyddsinstitut; se-171 16 Stockholm; Sweden

Besöksadress: Karolinska sjukhusets område, Hus Z5.

Telefon: 08-7297100, Fax: 08-7297108

Innehållsförteckning

Inledning	2
Dosekvivalent	2
Skyddsstorheter	4
Operativa storheter	6
Relationer mellan de mätbara storheterna och skyddsstorheterna	11
Användningsområden för de operativa storheterna	16
Effektiv dos och sena skador	20
Referenser	21

Inledning

I praktiskt strålskyddsarbete används två grupper av storheter skyddsstorheter och mätbara storheter. Skyddsstorheterna (protection quantities) har definierats av internationella strålskyddskommissionen, ICRP, och finns beskrivna i kommissionens Publication 60 (ICRP, 1991). De används för att uppskatta sannolikheten för sena skador efter såväl extern som intern bestrålning och bör ligga till grund för författningsarbete. Storheterna kan beräknas, men kan inte enkelt mätas.

De mätbara storheterna, de så kallade operativa storheterna, har definierats av internationella kommissionen för strålningsmätningar och enheter, ICRU, i dess Report 39 (ICRU, 1985). De är avsedda för extern bestrålning. Relationer mellan skyddsstorheterna och de mätbara storheterna finns presenterade i många internationella publikationer.

I Publication 60 (ICRP, 1991) föreslås nya uppskattningar av sannolikheten för sena skador orsakade av strålning. Där föreslås också att en viktningsfaktor för strålning ska ersätta kvalitetsfaktorn vid beräkning av skyddsstorheter. I mätsammanhang behövs kvalitetsfaktorn. Den ges nu nya värden för framför allt neutroner.

De föreslagna ändringarna påverkar relationerna mellan skyddsstorheterna och de operativa storheterna särskilt för neutroner. Nyligen har de båda organisationerna, ICRP och ICRU, accepterat en rapport som sammanfattar kunskapen om storheterna och deras inbördes relationer. Rapporten finns i såväl ICRUs rapportserie, Report 57 (ICRU, 1996) som i ICRPs rapportserie Publication 74 (ICRP, 1996).

Syftet med den här rapporten är att informera om innehållet i de nya rapporterna vad gäller storheterna och deras inbördes relationer samt att med några exempel visa på hur informationen kan användas i strålskyddssammanhang.

Dosekvivalent

Det är väl känt att storheten absorberad dos, D , i vävnad i sig inte ger tillräcklig information för att sannolikheten för en biologisk skada i vävnad ska kunna bedömas. Ytterligare någon egenskap hos strålningen behöver vara känd. För de doser som förekommer vid exponering för joniserande strålning i yrkesarbete har ICRP tidigare infört en kvalitetsfaktor, Q , som hade uppgiften att väga dosen från en viss strålkvalitet så att produkten av dos och kvalitetsfaktor kom

att representera en lika stor sannolikhet för sena skador för alla strålkvaliteter. Produkten kallades **dosekvivalent, H** .

Dess definition ges av ICRU (ICRU, 1993) som produkten av den absorberade dosen i en punkt i vävnad och kvalitetsfaktorn i den punkten d v s

$$H = QD$$

Enheten är Jkg^{-1} . Enheten har fått den särskilda benämningen sievert, Sv, efter svensken Rolf Sievert. För att bestämma dosekvivalenten i ett organ integreras dosekvivalenten över alla punkter i organet. Formler för beräkningar ges i ICRU Report 51. Fortfarande är det denna storhet som ICRU utgår från.

Den fysikaliska egenskap som bäst kunnat kopplas till kvalitetsfaktorn har varit **den linjära energiöverföringen (L)** - också betecknad LET - hos de laddade partiklar som frigörs i vävnad vid bestrålning. ICRP angav i Publication 26 (ICRP, 1977) Q -värden vid fem olika LET-värden. För ett spektrum av strålning kunde ett effektivt värde på kvalitetsfaktorn i punkten beräknas. Om LET-fördelningen inte var känd, rekommenderade ICRP tre approximativa värden på den effektiva kvalitetsfaktorn. Värdet bestämdes av vilken primär (infallande) strålning som förelåg t ex fotoner eller neutroner.

I Publication 60 får denna approximativa uppskattning av kvalitetsfaktorn ett eget namn, viktningsfaktor för strålning, w_R , och den tilldelas delvis andra värden (Tabell 2). ICRP menar att w_R ger en tillräcklig noggrannhet vid beräkning av skyddsstorheter och w_R ersätter alltså kvalitetsfaktorn här.

För att göra storheten dosekvivalent mätbar på ett entydigt sätt behövs preciseringar. Vad sorts vävnad avses och hur stort föremål ska dosekvivalenten mätas i? Vilket djup ska dosekvivalenten bestämmas på i föremålet för att vara intressant? För att uppnå internationell samstämmighet om dessa saker har ICRU infört de operativa eller mätbara storheterna. De beskrivs bäst i Report 51 (ICRU, 1993). De operativa storheterna infördes i Sverige 1986 och ska vara allmänt använda sedan 1989. De används numer också inom i stort sett hela EU.

ICRP har senare valt att överge punktstorheten dosekvivalent. För att förenkla beräkningarna av de skyddsstorheter som definieras i Publication 60 har man valt att utgå från den **absorberade dosens medelvärde i ett organ eller vävnad, D_T** . Den dosen multipliceras sedan med en **viktningsfaktor för den infallande strålningen, w_R** . Produkten kallas **ekvivalent dos, H_T** (se avsnittet skyddsstorheter). Storheten utgör grunden för vidare beräkningar av den **effektiva dosen**.

Skyddsstorheterna

De viktigaste skyddsstorheterna är effektiv dos (effective dose), E , ekvivalent dos i ett organ eller vävnad (equivalent dose to an organ or tissue), H_T , och medeldos i ett organ eller vävnad (mean absorbed dose to an organ or tissue), D_T .

Effektiv dos, E , är en summa av viktade ekvivalenta doser, H_T , i vissa angivna vävnader och organ, T . Dessa anges tillsammans med sina viktningsfaktorer, w_T , i Tabell 1.

$$E = \sum w_T H_T$$

Värdena på w_T har utvecklats från en referenspopulation av lika många män som kvinnor av många olika åldrar. De kan användas vid beräkning av effektiv dos för personer som utsätts för strålning till följd av sitt arbete, en hel population och oavsett kön. För mer information hänvisas till Publication 60 (ICRP,1991).

Tabell 1. Viktningsfaktor för vävnad och organ, w_T .

Vävnad eller organ	w_T
gonader	0,20
röd benmärg	0,12
tjocktarm	0,12
lunga	0,12
magsäck	0,12
urinblåsa	0,05
bröst	0,05
lever	0,05
matstrupe	0,05
sköldkörtel	0,05
hud	0,01
benyta	0,01
övriga	0,05

Ekvivalent organ- eller vävnadsdos, $H_{T,R}$, är medelvärdet av den absorberade dosen i ett organ eller en vävnad, $D_{T,R}$, vilken multiplicerats med en viktningsfaktor, w_R , angiven för strålkvaliteten R . Förekommer bara en strålkvalitet är beteckningen, H_T . Viktningsfaktorn för skilda strålkvaliteter ges av ICRP och återges i Tabell 2.

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

När strålfältet är sammansatt av flera typer av strålning beräknas den ekvivalenta dosen i ett organ eller en vävnad som

$$H_T = \sum w_R D_{T,R}$$

Tabell 2. Viktningsfaktor för strålning, w_R . För detaljer hänvisas till Publication 60 (ICRP, 1991) och Report 57 (ICRU, 1996).

Strålslag	w_R
fotoner, alla energier	1
elektroner och myoner, alla energier*	1
neutroner,	
energi < 10 keV	5
10 keV ≤ energi ≤ 100 keV	10
100 keV < energi ≤ 2 MeV	20
2 MeV < energi ≤ 20 MeV	10
20 MeV < energi	5
protoner (dock ej rekyloprotoner)	
2 MeV < energi	5
alfapartiklar, fissionsfragment, tunga atomkärnor	20

*Värdet gäller inte Augerelektroner som absorberas i DNA

Viktningsfaktorn för strålning, w_R , bestäms av ICRP. Syftet med storheten är att modifiera dosen så att produkten $\sum w_R D_{T,R}$ bildar en ny storhet, som kan förväntas ge samma sannolikhet för sena skador oberoende av strålslaget. Viktningsfaktorn är baserad på huvudsakligen biologiska experiment och har en stor osäkerhet. Värdet på viktningsfaktorn för strålning (w_R) ska väljas utifrån hur strålfältet ser ut när det faller in mot kroppen. Den modifiering, som strålfältet genomgår när det bromsas i kroppen, försummas alltså. ICRP motiverar det med att osäkerheten i riskuppskattningarna, som ligger till grund för viktningsfaktorerna, är så stora att en förfining inte är försvarbar.

Nu ges inte w_R för alla strålkvaliteter. I de fall där den saknas säger ICRP att en bra approximation fås om medelvärdet av kvalitetsfaktorn beräknas i en punkt på 10 mm djup i den sk ICRU-sfären, se avsnittet 4. Medelvärdet beräknas som

$$w_R \approx Q = D^{-1} \int Q(L) D(L) dL$$

där $D(L)dL$ är den absorberade dosen i en punkt på 10 mm djup orsakade av partiklar med längdenenergiöverföring (L) mellan L och $L + dL$, och $Q(L)$ är kvalitetsfaktorn vid L i punkten på 10 mm djup.

Viktningfaktor för vävnad och organ, w_T , bestäms också av ICRP. Om ett stort antal människor var och en bestrålas och får samma absorberade dos och dosen är lika stor i alla delar av kroppen, så anger w_T den relativa sannolikheten för att en sen skada ska uppstå i organet T . Även w_T har stor osäkerhet.

Medeldos, D_T , i ett organ eller vävnad, T , anges av ICRP som kvoten mellan den totalt absorberade energin i organet dividerad med organets massa.

Operativa storheter

Mätbara storheter har definierats av ICRU och kallas också för operativa storheter (operational quantities). De har en väl dokumenterad relation till t ex effektiv dos, något som är viktigt. Storheterna presenterades första gången av ICRU i Report 39 (ICRU, 1985), vilken senare har ersatts av Report 51 (ICRU, 1993). Ytterligare två ICRU rapporter om de operativa storheterna har publicerats nämligen Report 43 (ICRU, 1988) och Report 47 (ICRU, 1992).

Det finns flera operativa storheter. De viktigaste är miljödosekvivalenten (ambient dose equivalent), H^* , riktningsdosekvivalenten (directional dose equivalent, H') och persondosekvivalenten (personal dose equivalent, H_p). I ICRUs Report 39 definierades en individdosekvivalent för genomträngande strålning och en för strålning med kort räckvidd. De två har slagits samman och fått benämningen persondosekvivalent.

En avsikt med de operativa storheterna var att deras värden skulle överstiga värdet av den effektiva dosen. Om man därför i brist på värdet för den effektiva dosen, istället använder värdet för t ex miljödosekvivalenten, så överskattar man den effektiva dosen. Är värdet för miljödosekvivalenten klart under en åtgärdsnivå angiven för effektiv dos, finns det förmodligen ingen anledning att förfina beräkningarna och bestämma den effektiva dosen.

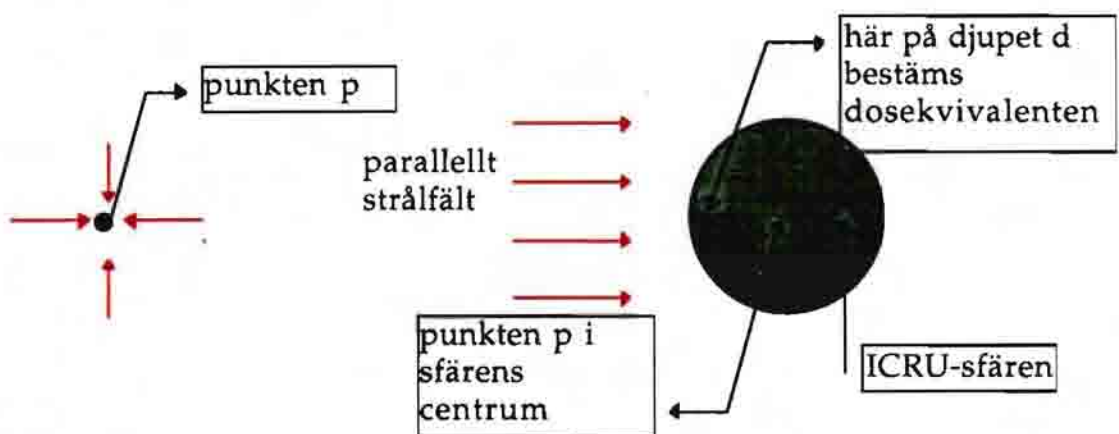
I grunden är syftet att de operativa storheterna ska bestämma dosekvivalenten i människokroppen. I definitionerna har ICRU behövt en förenklad beskrivning av människokroppen. Det visar sig att en god approximation utgörs i mätsammanhang av en sfär med diametern 30 cm om den har en kroppslig sammansättning. ICRU har bestämt att sfären ska bestå av 76,2 % (viktsprocent) syre, 11,1 % kol, 10,1 % väte och 2,6 % kväve. Den sfären brukar kallas för ICRU-

sfären och ingår i definitionerna av miljö- och riktning-dosekvivalenterna. För praktisk verksamhet - inte minst i kalibreringsarbete - rekommenderar ICRU att sfären ersätts med ett rätblock med samma sammansättning vars dimensioner är 30cmx30cmx15cm.

ICRU inför också termen *expanderat strålfält* (expanded field). Innebörden är att ett strålfälts fluens-, riktning- och energifördelning i den punkt (fritt i luft), i vilken man vill bestämma dosekvivalenten, alla förutsätts vara desamma över ICRU-sfärens volym (eller den del av sfären från vilken dosbidrag når punkten på djupet d). När termen *expanderat och parallellt infallande strålfält* (expanded and aligned field) används gäller dessutom att strålfältet faller in från en riktning och är parallellt.

Miljödosekvivalenten, $H^*(d)$, i en punkt p i ett strålfält är den dosekvivalent, som skulle ha åstadkommit av det motsvarande expanderade och parallella och ensriktade strålfältet, på ett djup, d , i ICRU-sfären. Punkten (på djupet d) ska ligga på en radie som är riktad mot strålfältet (Figur 1). ICRU rekommenderar att djupet 10 mm används, om inte särskilda skäl finns.

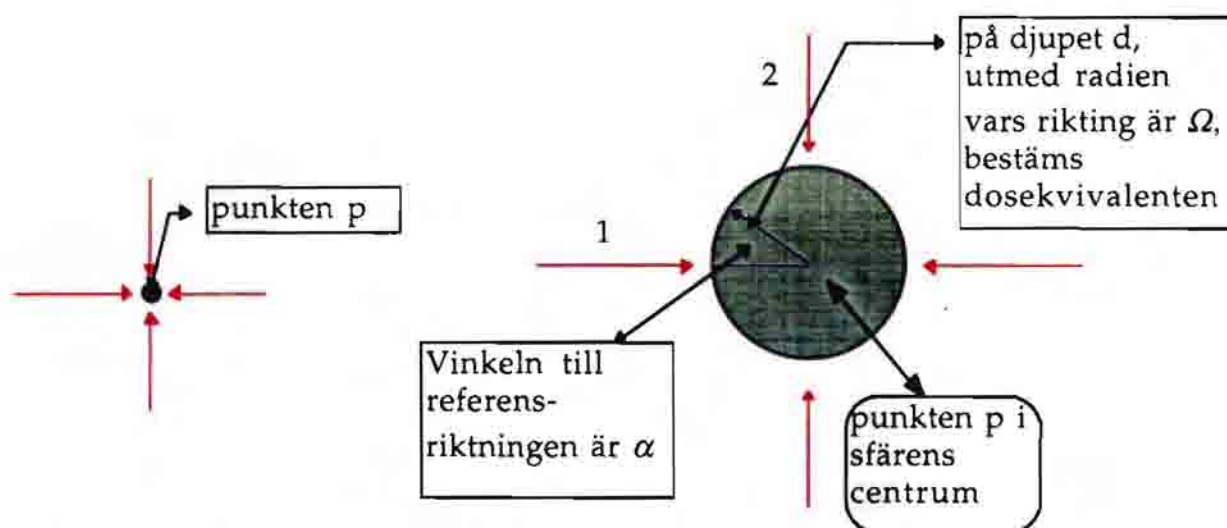
En mätsituation, som den till höger i figuren, förekommer sällan i praktiken, men den kan konstrueras för kalibreringsändamål. En mätsituation som den till vänster är däremot vanlig. För att ett instrument ska mäta rätt i båda situationerna måste instrumentet ha en *lika stor känslighet för strålning oberoende av infallsriktning* (isotrop känslighet). Detta är ett viktigt krav på instrument som ska mäta miljödosekvivalent. Exempel på detektorer som kan mäta miljödosekvivalenten är jonkamrar och GM-rör. Även passiva detektorer kan göra detta (Carlsson et al 1996).



Figur 1. Miljödosekvivalenten ska bestämmas i punkten p i strålfältet (röda pilar) till vänster. Enligt definitionen centreras då ICRU-sfären i punkten p och strålfältet ändras till ett parallellt mot sfären infallande fält, vilket också expanderas över sfären, se höger del av figuren. Dosekvivalenten bestäms därefter på djupet d utmed en radie som är motsatt strålriktningen.

Riktningdosekvivalenten, $H'(d, \Omega)$, i en punkt p i ett strålfält är den dosekvivalent, som orsakas av ett expanderat strålfält, i ICRU-sfären på ett djup, d . Punkten ska ligga på en radie, vars riktning, Ω , anges.

Om ekvivalenta dosen i huden ska bestämmas används djupet 0,07 mm, ska ögats linsdos bestämmas passar djupet 3 mm bättre, medan 10 mm djup är relevant för djupare organ.



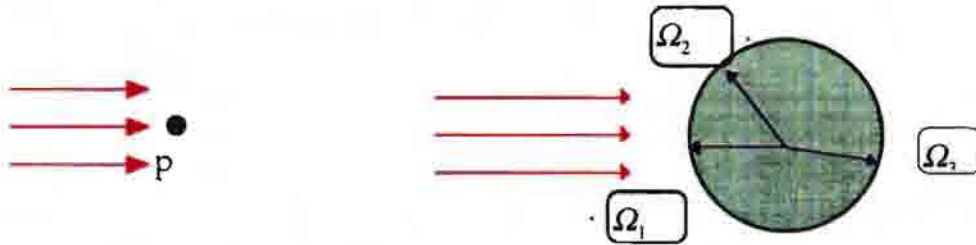
Figur 2. Till vänster visas punkten p i vilken riktningdosekvivalenten ska bestämmas. Strålfältet (röda pilar) faller in från fyra riktningar. Till höger visas ICRU-sfären, centrerad i punkten p , med det expanderade strålfältet. Mätpunkten ligger på en radie vars riktning är Ω . Riktningen kan anges som en vinkel α till en referensriktning, som väljs på något sätt.

I Figur 2 får punkten på djupet d i sfären framför allt sitt dosbidrag från strålfältets komponenter 1 och 2.

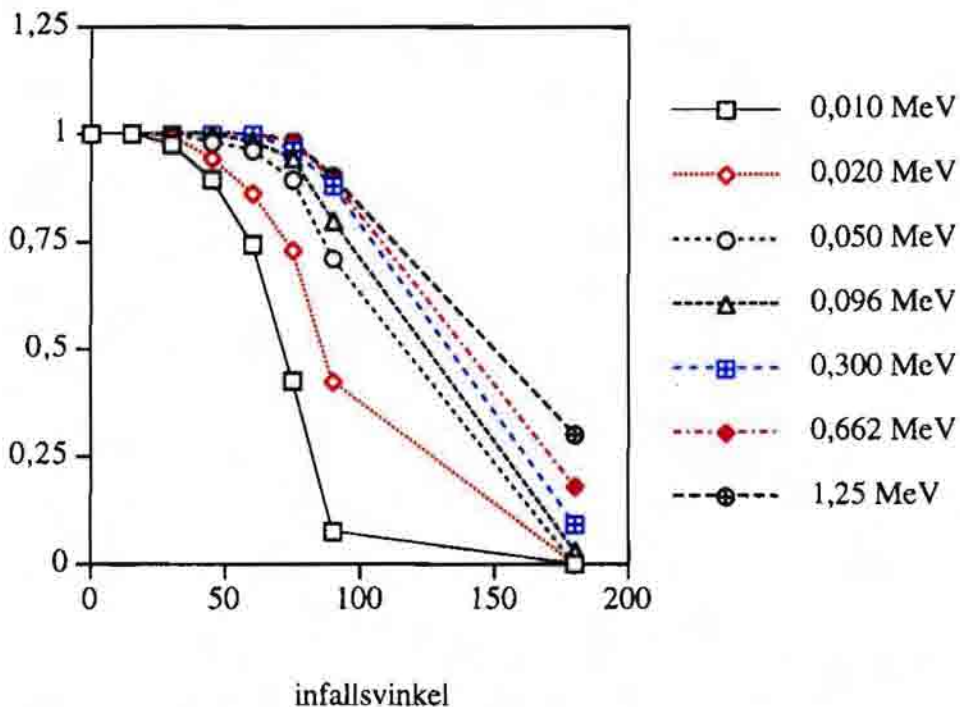
I Figur 3 kommer strålningen från enbart ett håll. I det här fallet är det lätt att inse att riktningdosekvivalenten bestämd utmed riktningen Ω_1 är större än riktningdosekvivalenten utmed Ω_2 , som i sin tur är större än den utmed riktningen Ω_3 . Man inser också att värdet på riktningdosekvivalenten i den här bestrålnings-situationen och utmed referensriktningen Ω_1 blir lika med värdet av miljödosekvivalenten, d v s $H'(d, \Omega_1) = H^*(d)$.

En detektor som ska mäta riktningdosekvivalenten ska därför visa ett mätvärde som varierar med strålningens infallsvinkel. Detta

riktningsberoende ska överensstämma med det i punkten på djupet d i sfären utmed riktningen Ω när Ω antar alla värden. I Figuren 4a ges för fotoner riktningdosekvivalenten på djupet 0,07 mm för varierande vinkel α , $H'(0,07,\alpha)$, relativt värdet för referensriktningen ($\alpha = 0^\circ$). Figur 4b visar motsvarande samband för djupet $d=10$ mm. Data till figurerna är tagna från ICRU:s Report 57. Rapportens värden har beräknats under förutsättningen att elektronjämvikt råder i punkten på djupet d . För $d=10$ mm är detta rimligt uppfyllt för fotoner med energier upp till 3 MeV.

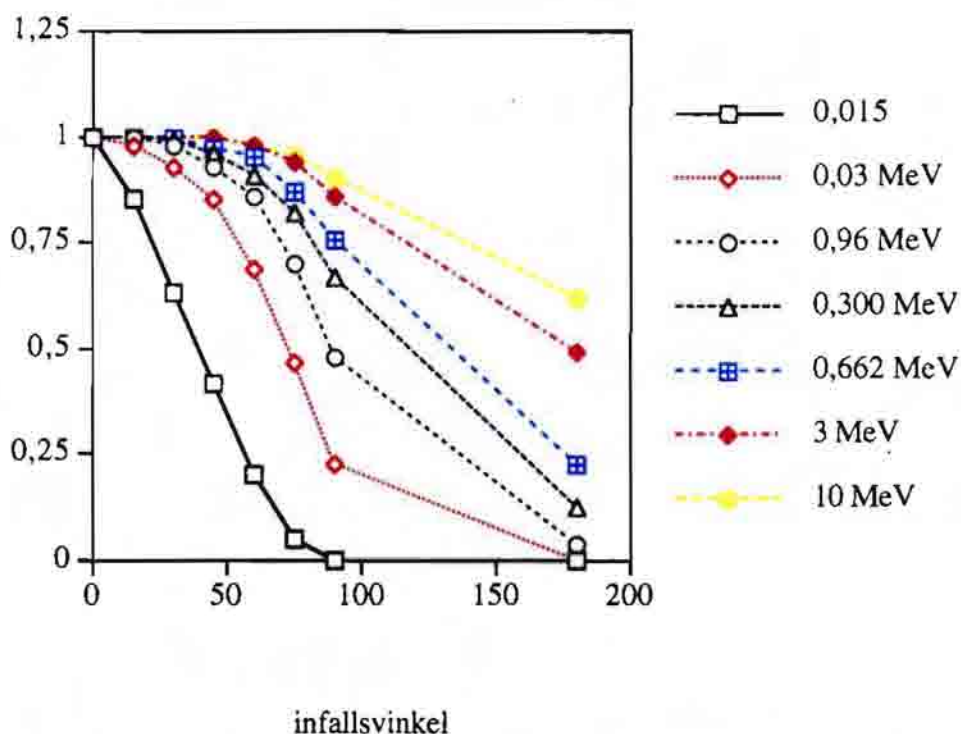


Figur 3. Strålfältet (röd markering) infaller parallellt mot punkten p i figurens vänstra del. På grund av att strålfältet dämpas i ICRU-sfären kommer dosekvivalenten bestämd på djupet d utmed de tre riktningarna Ω_1 , Ω_2 och Ω_3 att bli olika stor.



Figur 4a. y-axeln visar kvoten mellan $H'(0,07, \alpha)$ och $H'(0,07, 0^\circ)$ för olika fotonenergier som funktion av infallsvinkeln. Punkterna har sammanbundits med räta linjer för att göra det enklare se vilka punkter som hänger samman.

Exempel på detektorer som har lämpliga egenskaper för att mäta riktningsdosekvivalenten på djupet 0,07 mm är GM-rör med ett tunt ändfönster. Riktningsdosekvivalenten på 10 mm djup är mer sällan rapporterad men kan göras med t ex spektrometrar som skärmas så att huvudsakligen strålning rakt framifrån mäts (Clark, 1996).



Figur 4b. y-axeln visar kvoten mellan $H'(10, \alpha)$ och $H'(10, 0^0)$ som funktion av vinkeln α för några olika fotonenergier. Punkterna är förbundna med räta linjer.

Persondosekvivalenten, $H_p(d)$, är dosekvivalenten i mjuk vävnad på ett lämpligt djup, d , under en angiven punkt på kroppen. För hud används djupet 0,07 mm och 3 mm används för ögonlins. För hårdare strålning används djupet 10 mm.

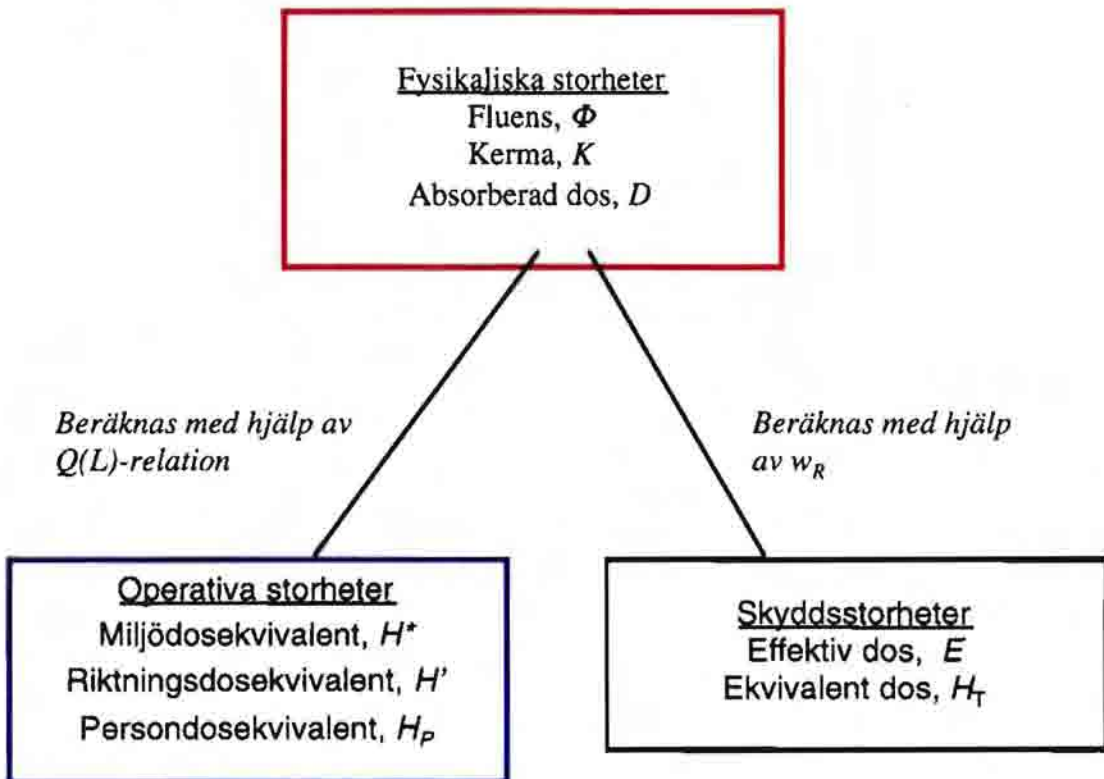
Persondosekvivalenten skiljer sig från de två andra storheterna genom att den inte är definierad för ICRU-sfären utan som dosekvivalenten i kroppen hos individen som utsätts för strålningen. Dess värde kommer alltså att påverkas av om t ex personen är liten eller stor liksom av var dosmätaren är placerad på kroppen. Det går därför inte att visa en generell relation mellan persondosekvivalent och t ex effektiv dos.

Medan det går att åstadkomma bra kalibreringsuppställningar för de två andra storheterna, blir det svårare för persondosekvivalenten. ICRUs förslag är att kalibrering utförs med dosmätarna fästa på ett plexiglasfantom med dimensionerna 30cmx30cmx15cm.

Internationella standardiseringsorganisationen, ISO, har istället föreslagit ett fantom med samma dimensioner, men där enbart väggarna är av plexiglas och där fantomet är fyllt av vatten. För högre fotonenergier, som de från en ^{137}Cs - och ^{60}Co -strålkälla, anger också ISO att plexifantomet är tillräckligt vävnadsekvivalent. Detaljer om fantomet finns i en kommande ISO-standard. Den innehåller också fantom för extremitetsdosimetri. Beträffande kalibreringssituationen anger ISO-standarderna att avståndet som kalibreringen ska utföras på ska vara det från strålkällan till persondosmätarens effektiva mät punkt. Vid SSIs dosimetrilaboratorium har fram till 1996 avståndet räknats fram till fantomets yta. Vår avsikt är att följa standarden när den väl har beslutats. Den föreslagna ISO-standarderna anger omvandlingskoefficienter mellan luftkerma och dosekvivalenterna för en lång rad strålfält, vilka används i kalibreringsarbete bl a vid SSI.

Relationer mellan de mätbara storheterna och skyddsstorheterna

Såväl de operativa storheterna som skyddsstorheterna beräknas utifrån fysikaliska storheter. Figur 5 illustrerar hur storheterna är besläktade. Report 57 (ICRU, 1996) och Publication 74 (ICRP, 1996) ger omvandlingskoefficienter mellan olika storheter.



Figur 5. Relationer mellan de fysikaliska storheterna, de operativa storheterna och skyddsstorheter. Från ICRU Report 57.

För att förstå relationerna mellan de operativa storheterna och effektiv dos, är det viktigt att inse att relationerna beror av bestrålningsgeometrin. Om en person får hela kroppen bestrålad framifrån i ett röntgenstrålfält, så blir - för samma absorberade dos fritt i luft - den effektiva dosen ca 30 % högre, jämfört med om bestrålningen hade skett bakifrån. Det beror på att de organ, vars doser ingår i beräkningen av effektiva dosen, framför allt ligger i den främre halvan av kroppen.

I Report 57 har man för de fysikaliska och de operativa storheterna gjort beräkningar av relationerna till effektiv dos för flera geometrier. I dessa förutsätts att hela människan blir bestrålad av ett brett planparallellt strålfält. De vanligaste geometrierna är:

- bestrålning framifrån vinkelrätt mot kroppen, AP,
- bestrålning bakifrån vinkelrätt mot kroppen, PA,
- bestrålning från ena sidan vinkelrätt mot kroppen, LAT (om bestrålningen är från vänster blir beteckningen, LLAT, om bestrålningen är från höger, RLAT),
- bestrålning med ett parallellt fält vinkelrätt mot kroppens längdriktning, medan kroppen roterar med konstant hastighet runt sin längdaxel, ROT och
- bestrålning i ett fält där partikelfluensen per rymdvinkel är oberoende av riktningen, ISO.

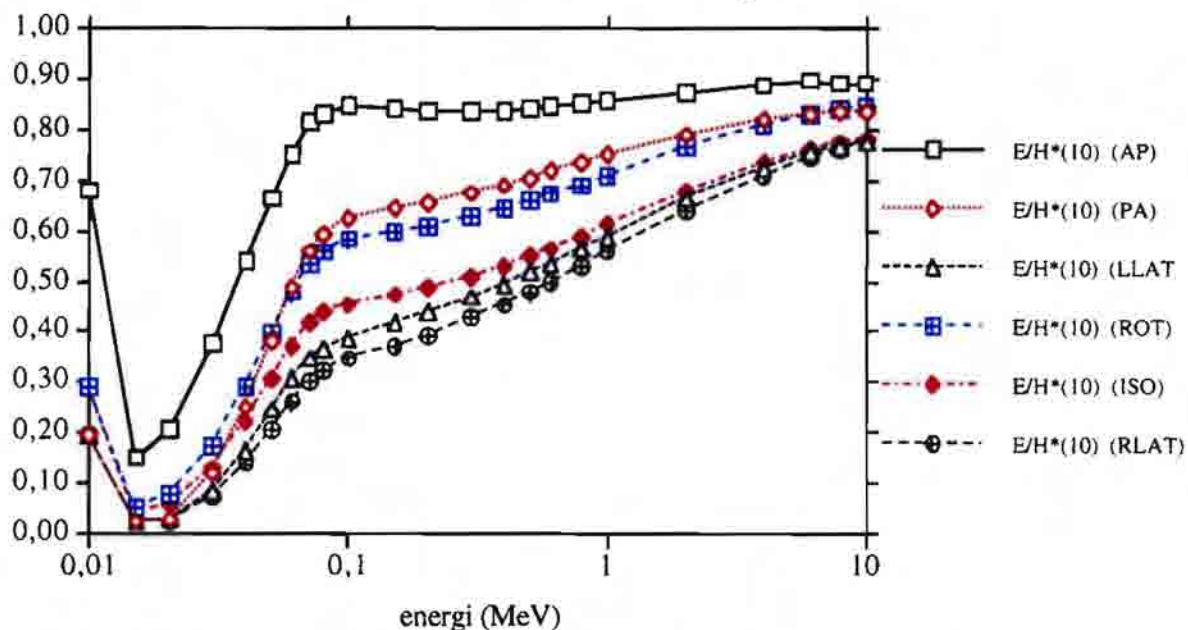
De tre första geometrierna kan sägas approximera situationer där en person arbetar i närheten av en utbredd strålkälla och har kroppen *hela tiden* i någon av de angivna geometrierna. Om personen däremot *vandrar runt* i strålfältet på ett slumpmässigt sätt beskrivs relationen bättre av rotationsgeometrin. Den är också tillämpbar om man bestrålas från en plan eller utspridd strålkälla, t ex markbeläggning efter ett nedfall. Den isotropa bestrålningen föreligger om t ex strålkällan utgörs av en radioaktiv gas som omger personen.

I figurerna 6 och 7 visas relationer mellan miljödosekvivalent på 10 mm djup och effektiv dos för olika foton- och neutronenergier och för olika geometrier. Figurerna har gjorts med hjälp av tabeller i Report 57.

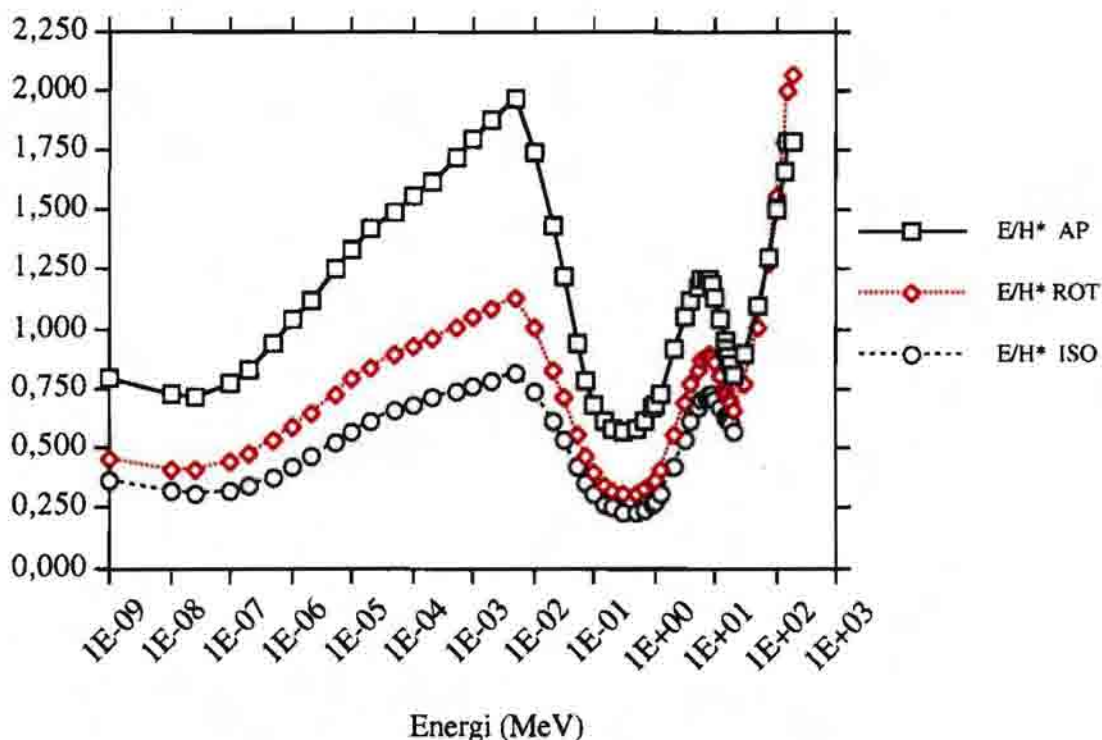
Figur 6 visar att för fotoner överstiger värdet på effektiva dosen alltid värdet på miljödosekvivalenten (kvoten är mindre än ett). Figuren visar också att för vissa energier och geometrier innebär approximationen $E \approx H^*(10)$ en kraftig överskattning av E . Vid t ex fotonenergin 100 keV och rotationsgeometri, så är överskattningen en faktor två.

För neutroner (Figur 7) är värdet på miljödosekvivalenten i vissa energiintervall lägre än effektiva dosen. Det gäller framför allt vid bestrålning framifrån (AP) i energiintervallet 1 eV till omkring 40

keV, men också vid riktigt höga neutronenergi. Det är ovanligt att man utsätts för neutronstrålning av enbart en energi. ICRP och ICRU har därför bedömt att den effektiva dosen i praktiken kan



Figur 6. y-axeln visar kvoten mellan effektiv dos och miljödosekvivalent på 10 mm djup som funktion av fotonenergin. De olika kurvorna visar relationen för olika bestrålningsgeometrier.



Figur 7. y-axeln visar kvoten mellan effektiv dos och miljödosekvivalent på 10 mm djup för olika monoenergetiska neutronenergi. Tre olika bestrålningsgeometrier finns med: framifrån (AP), rotationsgeometri (ROT) och isotropi (ISO).

uppskattas med hjälp av miljödosekvivalenten på 10 mm djup också för neutroner. Den mest oklara situationen uppstår vid riktigt höga neutronenergier, vilka förekommer ombord på flygplan och runt vissa högenergiacceleratorer.

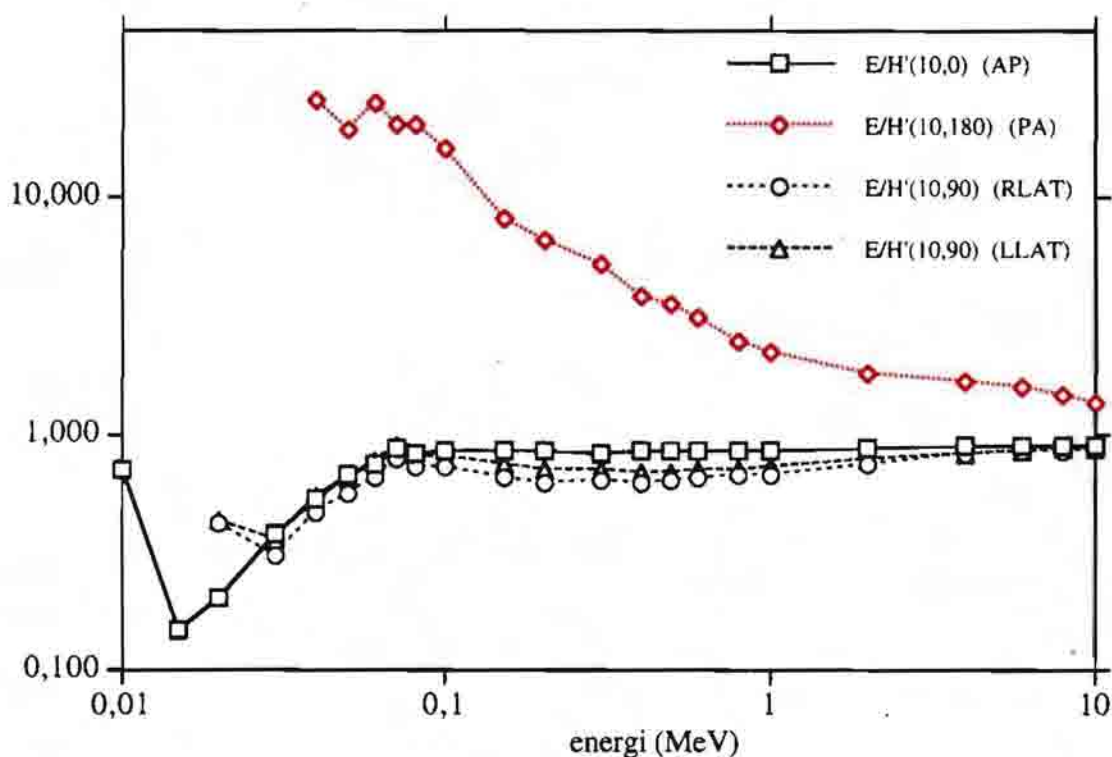
Som tidigare sagts kan inte en generell relation anges mellan persondosekvivalent och effektiv dos, eftersom persondosekvivalenten är beroende av vem som bär dosmätaren och hur dosmätaren bärs. För att få en uppfattning om egenskaperna hos $H_p(10)$ kan man studera kvoten mellan effektiv dos och riktningdosekvivalent, $E/H'(10,\alpha)$, för olika fotonenergier och bestrålningsgeometrier. Figur 8 visar sådana relationer. Data till figuren har beräknats med ledning av tabeller i Report 57 och ett förenklat förfarande. En liknande figur finns i ICRUs Report 43 (1988). Om man approximerar personen med ICRU-sfären så visar figuren $E/H_p(10)$. Kvotens värde ligger då mellan 0,6 och 0,9 för fotonenergier mellan 50 keV och 10 MeV för AP- och LAT-geometrierna. För $E/H^*(10)$ ligger kvotens värde mellan 0,6 och 0,9 endast för fotonenergier mellan 0,5 MeV och 10 MeV, Figuren 6.

Om man antar att $H_p(10)$ kan approximeras med $H'(10, \alpha)$ så blir innebörden att persondosekvivalenten är en bra storhet för att uppskatta den effektiva dosen, E , vid olika bestrålningsgeometrier. Det finns dock ett viktigt undantag nämligen PA-geometrin, vilket framgår av Figur 8. Om man bär dosmätaren på bröstet, samtidigt som bestrålningen sker rakt bakifrån, så kommer $H_p(10)$ att underskatta den effektiva dosen. Vid låga fotonenergier blir underskattningen mycket stor.

Man kan också förnuftsmässigt inse att slutsatsen är rimlig. Kroppen skärmar strålningen så att olika organ får olika stora doser beroende på strålningens energi. Eftersom organen ligger på olika ställen i kroppen kommer strålningens riktningfördelning också att ha betydelse för hur stor den effektiva dosen blir. En storhet som känner av såväl skärmning som riktningfördelning bör kunna uppskatta den effektiva dosen bättre.

Just för persondosekvivalent innehåller Report 57 ganska lite data. Man kan förvänta sig ett antal internationella publikationer med bättre data mycket snart.

Som redovisats tidigare är inte avsikten att en persondosmätare ska kalibreras fästad på en sfär utan på ett rätblock. Relationerna i Figur 8 gäller om sfären används. Figuren ger därför inte den kvantitativa sanningen, men kvalitativt stämmer ändå slutsatsen att persondosekvivalenten, mätt med en bra dosmätare och buren på ett relevant sätt, kan ge en bra uppskattning av den effektiva dosen för fotoner. (Se Report 57 och Clark, 1996, för ytterligare diskussioner av relationerna).

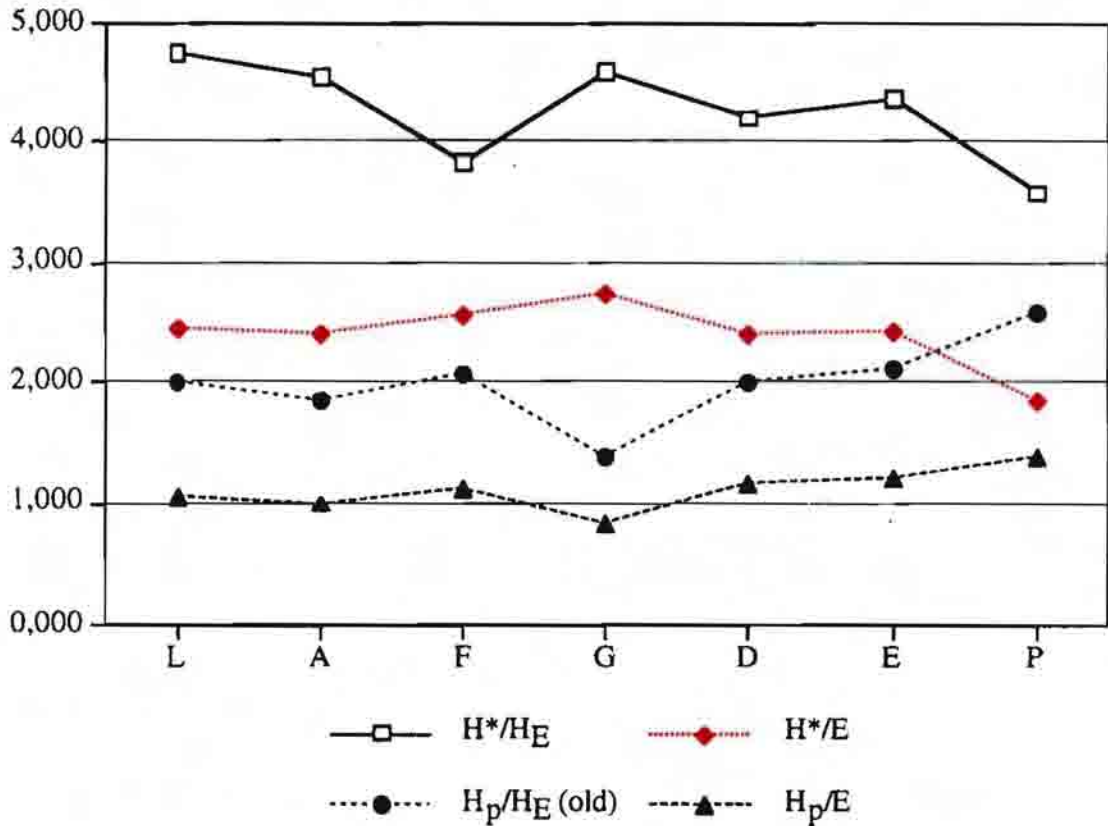


Figur 8. Figurens y-axel visar $E/H'(10,\alpha)$ vid olika fotonenergier och olika bestrålningsgeometrier. Punkterna är beräknade på ett förenklat sätt med hjälp av data från Report 57.

För neutroner gäller att i energiintervallet 1 eV till omkring 40 keV kommer $H_p(10)$ att underskatta E vid bestrålning framifrån, i Figuren 7 kan $E/H^*(10)$ och AP-geometrin bytas ut mot $E/H_p(10, 0^\circ)$. Det är emellertid sällan som man utsätts för monoenergetisk strålning.

Figur 9 visar värden för olika neutronspektra, som uppmätts i några punkter L, A, F och G innanför inneslutningen till en tryckvattenreaktor på Ringhals. Punkterna D, E och F är mätpositioner intill en transportbehållare uppställd på CLAB och fylld med använt reaktorbränsle (Klein och Lindborg, 1997). $H_p(10)$ kunde beräknas eftersom förutom neutronfluens också strålningens riktningsfördelning hade bestämts på experimentell väg. Figurens blå kurva visar kvoten $H_p(10)/E$. Beräkningarna har tagit hänsyn till de senaste av ICRU föreslagna bromsförmågevärdena för protoner och tyngre partiklar och de nya Q-värdena som rekommenderas av ICRP. För dessa neutronfält blir överensstämmelsen mellan $H_p(10)$ och E mycket god. Den gröna kurvan visar samma relation utan beaktande av ICRP 60 och ICRUs nya värden, d v s $H_p(10)/H_E$, där H_E är föregångaren till effektiv dos. Den röda kurvan visar $H^*(10)/E$. Miljödosekvivalenten överskattar den effektiva dosen i dessa fält cirka 2,5 gånger. Sambandet stöder antagandet att miljödosekvivalenten i praktiska fält inte innebär en

underskattning av den effektiva dosen. Slutligen visar den svarta kurvan kvoten mellan miljödosekvivalent och effektiv dosekvivalent, H_E , före ICRUs och ICRPs senaste rekommendationer. Här överskattades H_E med en faktor 4 av $H^*(10)$.



Figur 9. Experimentella bestämningar av neutrondosekvivalenter i ett antal positioner vid ett kärnkraftverk, L, A, F, och G, samt mätningar runt en transportbehållare för använt kärnbränsle, D, E och P (Klein och Lindborg 1997). Se texten för förklaring.

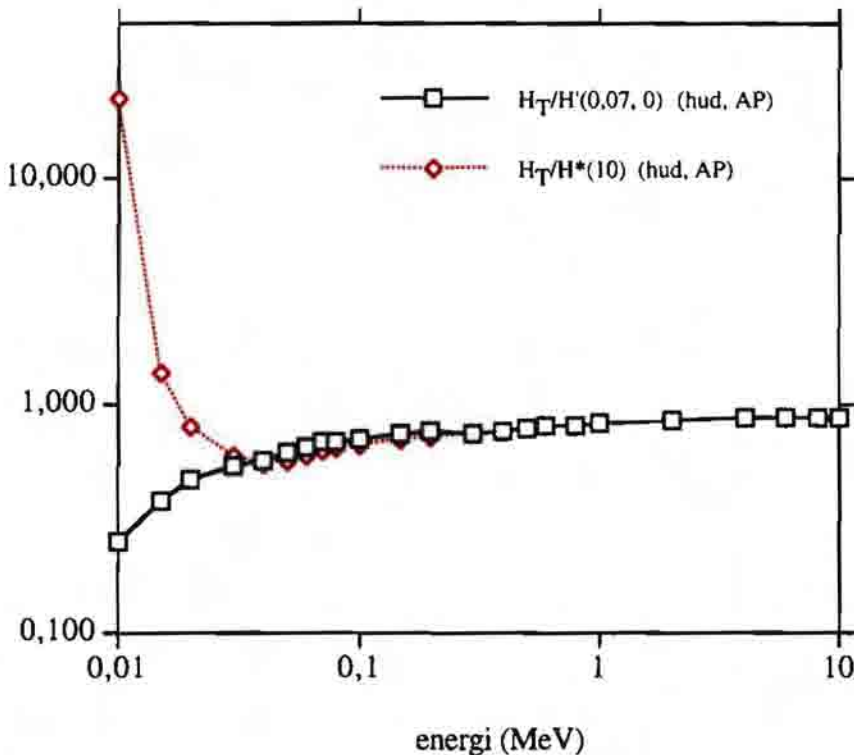
Förändringen från den svarta till den röda linjen i figuren liksom mellan den gröna och blå linjen är framför allt orsakad av att definitionen av effektiv dos, E , skiljer sig från den för effektiv dosekvivalent, H_E , på ett par punkter och att relationen mellan Q och L har ändrats av ICRP.

Användningsområden för de operativa storheterna

Av de tre operativa storheterna är det enkelt att förstå att persondosekvivalenten är den storhet som en persondosmätare ska ange. Miljö- respektive riktningdosekvivalenten ska båda användas för handburna eller fast monterade dosmätande instrument. När riktningdosekvivalenten mäts är det viktigt att

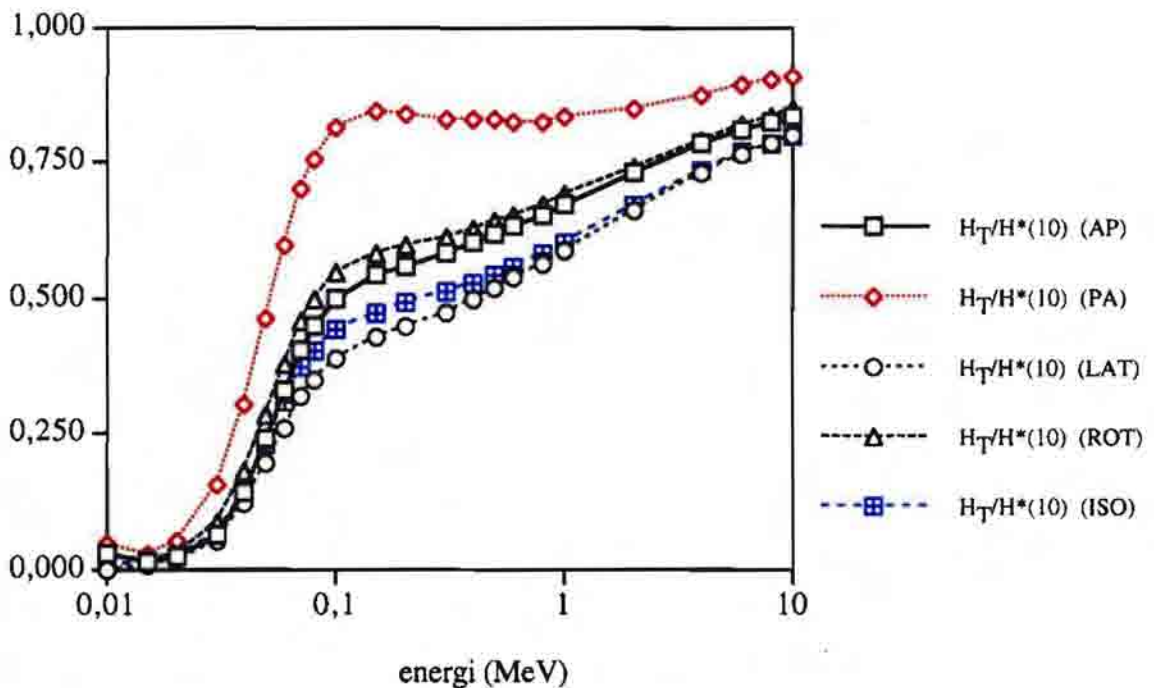
veta varifrån strålningen kommer. Om man mäter med ett instrument som bestämmer den storheten, men vänder instrumentet fel, kan dosekvivalenten bli underskattad. Miljödosekvivalenten är därför den bästa storheten, när man mäter i en okänd situation eller när bestrålnings- eller arbetsgeometrin är okänd eller varierar. När man däremot har dosnivån klar för sig men eftersträvar en noggrannare uppskattning av den effektiva dosen kan riktningsdosekvivalenten vara till hjälp.

För mjuk fotonstrålning med energier under framför allt 15 keV samt betastrålning, kan huddos och eller linsdos bli gränssättande på en arbetsplats. För att uppskatta de ekvivalenta doserna till dessa vävnader är mätningar av riktningsdosekvivalenten på djupen 0,07 mm respektive 3 mm lämpliga. Figuren 10 visar kvoten mellan ekvivalent dos till huden (huddos), H_T och $H'(0,07, 0^\circ)$ för olika fotonenergier. Figuren visar att riktningsdosekvivalenten hela tiden överskattar huddosen, H_T . Figuren visar också kvoten mellan H_T och $H^*(10)$. Relationen visar att för energier under ungefär 20 keV underskattas huddosen som väntat av miljödosekvivalenten. Underskattningen kan bli mycket stor och just för låga fotonenergier är inte $H^*(10)$ rätt storhet. Man skulle kunna använda $H^*(0,07)$ eller när strålkällans plats är känd $H'(0,07, 0^\circ)$,

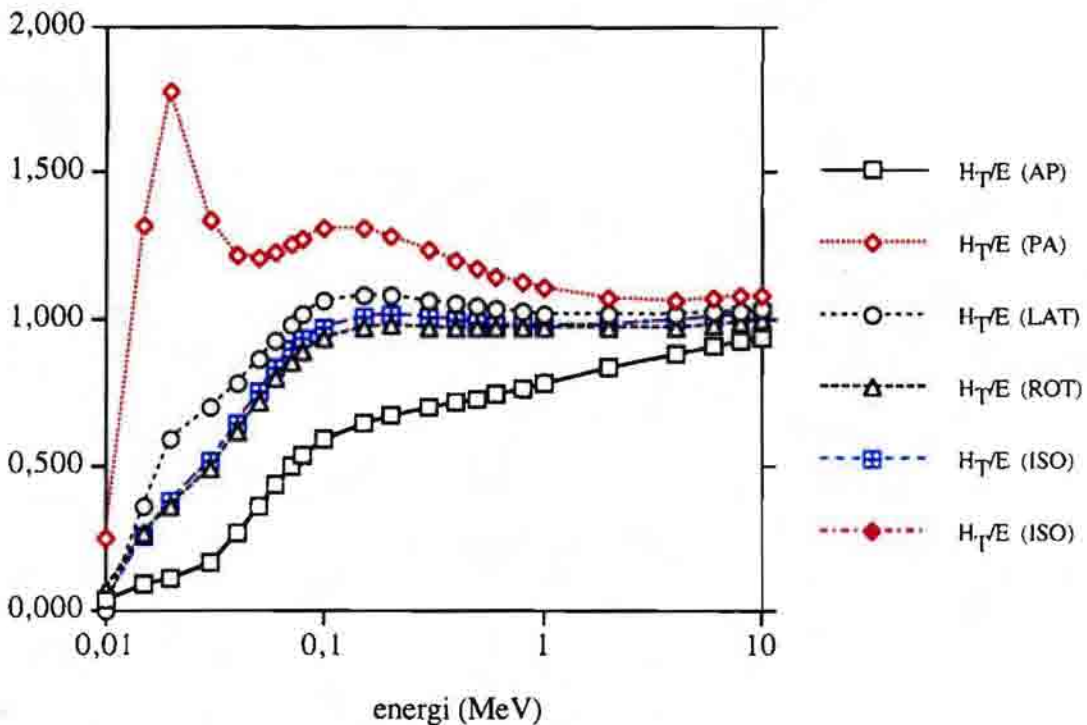


Figur 10. För AP-bestrålning och fotoner visas utmed y-axeln kvoten mellan ekvivalent dos till huden och riktningsdosekvivalenten på 0,07 mm, $H_T/H'(0,07, 0^\circ)$. Kvoten mellan huddos och miljödosekvivalent på 10 mm, $H_T/H^*(10)$ visas också. Det förutsätts att elektronjämvikt råder i luften framför sfären.

Figurerna 11 och 12 får slutligen exemplifiera hur de operativa storheternas kända relationer kan användas. Om miljödosekvivalenten har bestämts på en arbetsplats där fotonstrålning förekommer och man vill uppskatta den ekvivalenta organdosen till röd benmärg, H_T , så kan den uppskattas med hjälp av uppgifterna i Report 57. I Figur 11 har kvoten mellan $H_T/H^*(10)$ som funktion av fotonenergin angetts för några bestrålningsgeometrier. Om fotonenergin är 100 keV och personen bestrålas rakt framifrån så blir $H_T \approx 0,5H^*(10)$. Vill vi gå vidare och veta hur stor H_T är i förhållande till den effektiva dosen, E , så visas kvoten mellan dessa storheter i Figur 12. För samma geometri och energi är $H_T \approx 0,5E$. För övriga geometrier blir däremot kvoten nära ett. För riktigt låga fotonenergier och bestrålning bakifrån (PA-geometri), så uppstår ett maxvärde vid 20 keV. Det är tveksamt om det är sant. Två små tal har delats med varandra. Vid dessa låga energier är osäkerheterna i de beräknade värdena väsentligt större än högre upp. I Report 57 finns motsvarande information för alla de organ ICRP har gett viktningsfaktorer för.



Figur 11. Ekvivalenta dosen till röd benmärg relativt miljödosekvivalenten visas utmed y-axeln för olika bestrålningsgeometrier och för fotonenergier.



Figur 12. Ekvivalenta dosen till röd benmärg relativt effektiva dosen visas utmed y-axeln för olika bestrålningsgeometrier och för olika fotonenergier.

Effektiv dos och sena skador

Arbete med joniserande strålning ska kunna bedrivas så att enbart sk stokastiska eller slumpmässiga skador ska kunna uppstå. Dessa kan vara av olika slag. ICRP har uppskattat sannolikheterna för dödsfall i cancer, insjuknande i cancer som kan botas och allvarliga ärftliga effekter. ICRP har också försökt gradera det men, som de två senare skadetyperna kan orsaka. En cancer som man enkelt kan bota, ger mindre bekymmer än en cancer där behandlingsmöjligheterna är mer besvärande. En ärftlig skada, som om den inträffar, leder till många förlorade levnadsår, är mer besvärande än en där antalet förlorade år är litet. Med faktorer för sådana bedömningar viktas de uppskattade *nominella sannolikhetskoefficienterna* (nominal probability coefficients) och de nya vägda sannolikheterna kallas för *men, förfång* eller *detriment* (detriment).

Uppskattningar av den här arten är av naturliga skäl osäkra. Det kan nämnas att när Publication 60 skrevs hade fortfarande inga ärftliga skador hos människa kunnat observeras, som med säkerhet varit orsakade av joniserande strålning. Studier över cancerincidensen hos de överlevande (80000 personer) efter bombningarna av Hiroshima och Nagasaki utgör vår viktigaste information om risken för cancer efter exponering för joniserande strålning. Studier

visar på ett statistiskt signifikant (på 95 % nivån) överskott av cancerfall efter doser över 0,2 Sv. Överskott med lägre signifikans kan finnas ner till 0,05 Sv. I strålskyddsarbetet vill vi bedöma men eller förfång (detriment) förknippade med doser som ofta är lägre än en tiondel av dessa värden.

I Japan gavs hela dosen under ett enda kort ögonblick. De doser som förekommer i arbete där förhöjda nivåer av joniserande strålning förekommer har en väsentligt lägre dosrat (doshastighet). Man vet att en lägre rat ger en mindre biologisk verkan för låg-LET strålning. ICRP har därför halverat riskkoefficienter som bestämts efter bestrålning med höga doser av låg-LET strålning för att göra dem tillämpbara vid låga rater. De här exemplen kan få illustrera några av de svårigheter som ICRP har hanterat för att komma fram till de nominella sannolikhetskoefficienterna. Precisionen i koefficienterna ska därför inte överskattas.

Den storhet som enligt ICRP bäst kan korreleras till förfång eller men (detriment) är effektiv dos. I Publication 60 anges för vuxna, som i sitt arbete utsätts för joniserande strålning, det sammanlagda förfånget (detrimentet) till $0,056 \text{ Sv}^{-1}$. För en population som innehåller alla åldrar anges uppskattningen till $0,073 \text{ Sv}^{-1}$. Noggrannheten i talen är inte så stor att den motiverar att två siffror anges. I en population där alla åldrar är representerade förväntar sig ICRP en större skadefrekvens och den relativa skillnaden mellan talen bedöms som realistisk. Sannolikhetskoefficienten för dödsfall i cancer för de två grupperna uppges till $0,04 \text{ Sv}^{-1}$ respektive $0,05 \text{ Sv}^{-1}$.

Ett exempel får illustrera möjligheter och begränsningar med de angivna siffrorna. Om en genomsnittlig arbetare erhållit 5 mSv i effektiv dos, så blir den förväntade sannolikheten för dödsfall i cancer $0,005 \times 0,04 = 0,0002$. Det talet gäller inte i ett enskilt fall. Koefficienten 0,04 är ett medelvärde för män och kvinnor av olika åldrar och är tänkt att gälla för alla nationaliteter. Det finns betydande skillnader mellan individer och värdet blir inte relevant för en enskild person. Uppgiften kan ändå fylla en funktion genom att den kan jämföras med andra risker på en arbetsplats som uttrycks på ett likvärdigt sätt.

Om 10000 arbetare vardera får 5 mSv varje år under sitt yrkesverksamma liv (50 år), så kan man förvänta sig att antalet personer som dör i cancer till följd av sin yrkesbestrålning blir $0,005 \times 0,04 \times 50 \times 10000 = 100$. Talet får här en mer konkret innebörd, eftersom det appliceras på en så stor grupp av människor att medelvärdesbildningen bakom koefficienten blir meningsfull. Talet är dock fortfarande förknippat med en betydande osäkerhet.

Tack

Rapporten har vunnit i klarhet tack vare kommentarer från många personer. Ett särskilt tack till Bo Lindell för tålmodig vägledning och värdefulla kommentarer beträffande avsnitten som berör ICRPs verksamhet. Bo Nilsson vid Institutionen för Medicinsk Fysik, Stockholm, Robert Finck, Olle Gullberg, Jan-Erik Grindborg och Göran Samuelson, SSI, har alla läst rapporten och föreslagit förbättringar, som jag tackar för.

Referenser

C. A. Carlsson, G. Alm Carlsson, E. Lund, G. Matscheko and H. B. L. Pettersson, An Instrument for Measuring Ambient Dose Equivalent, *H*(10) Radiat. Prot. Dosim.* Vol.67, No.1, pp 33-39 (1996).

M. J. Clark. Measurement of Spectral and Angular Distribution of External Radiations in the Workplace and Implications for Personal Dosimetry, in *European Advances in Radiological Protection*, EUR 16951, 1996.

ICRP, International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74, *Annals of the ICRP* Vol. 26, No. 3/4 (Pergamon Press, New York), 1996.

ICRP, International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the ICRP, Publication 60, *Annals of the ICRP* Vol. 21, No. 1-3 (Pergamon Press, New York), 1991.

ICRP, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the ICRP, Publication 26, *Annals of the ICRP* Vol. 1, No. 3 (Pergamon Press, New York), 1977.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 57 Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, Bethesda, MD, 1996.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 51 Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, Bethesda, MD, 1993.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 47 Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, Bethesda, MD, 1992.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 43 Determination of Dose Equivalents from External Radiation sources-Part 2, Bethesda, MD, 1988.

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 39 Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, Bethesda, MD, 1985.

H. Klein och L Lindborg, Personlig korrespondens, 1997.

SSI-rapporter

**97:01 Utvärdering av radonavskiljare -
-Effekt på radon i dricksvatten från bergbor-
rade brunnar**

Anders Lindén 100 kr

**97:02 Mätningar av ¹³⁷Cs och ⁹⁰Sr i kon-
sumtionsmjölk mellan 1991 och 1996**

Miljöövervakning och Mätning 40 kr

**97:03 Radiation Protection in connection
with the Decommissioning of Nuclear
Plants**

*Div. of Occupational and Medical Exposure. Div.
of Waste Management and Environmental Pro-
tection* 40 kr

97:04 Magnetfält i elektriska lok

*Gert Anger SSI, André Berglund, Kjell Hansson-
Mild, Arbetslivsinstitutet, Umeå* 60 kr

97:05 Publikationer 1996

Statens strålskyddsinstitut gratis

**97:06 Kalibrerings- och normalieverksam-
heten vid riksmätplatsen under 1996**

*Riksmätplats 06, SSI
Jan-Erik G., Olle G., Göran S.,* 40 kr

**97:07 The Swedish Radiation Protection
Institute's Proposed Regulations concerning
the Final Management of Spent Nuclear
Fuel or Nuclear Waste**

Swedish Radiation Protection Institute

97:08 Storheter för strålskyddsarbete

Miljöövervakning och mätning 40 kr



STATENS STRÅLSKYDD SINSTITUT, SSI, är central tillsynsmyndighet på strålskyddsområdet. Myndighetens verksamhetsidé är att verka för ett gott strålskydd för människor och miljö nu och i framtiden.

SSI är ansvarig myndighet för det av riksdagen beslutade miljömålet *Säker strålmiljö*.

SSI sätter gränser för stråldoser till allmänheten och för dem som arbetar med strålning, utfärdar föreskrifter och kontrollerar att de efterlevs. Myndigheten inspekterar, informerar, utbildar och ger råd för att öka kunskaperna om strålning. SSI bedriver också egen forskning och stöder forskning vid universitet och högskolor.

SSI håller beredskap dygnet runt mot olyckor med strålning. En tidig varning om olyckor fås genom svenska och utländska mätstationer och genom internationella varnings- och informationssystem.

SSI medverkar i det internationella strålskyddssamarbetet och bidrar därigenom till förbättringar av strålskyddet i främst Baltikum och Ryssland.

Myndigheten har idag ca 110 anställda och är belägen i Stockholm.

THE SWEDISH RADIATION PROTECTION AUTHORITY, SSI, is the government regulatory authority for radiation protection. Its task is to secure good radiation protection for people and the environment both today and in the future.

The Swedish parliament has appointed SSI to be in charge of the implementation of its environmental quality objective *Säker strålmiljö* ("A Safe Radiation Environment").

SSI sets radiation dose limits for the public and for workers exposed to radiation and regulates many other matters dealing with radiation. Compliance with regulations is ensured through inspections.

SSI also provides information, education, advice, carries out its own research and administers external research projects.

SSI maintains an around-the-clock preparedness for radiation accidents. Early warning is provided by Swedish and foreign monitoring stations and by international alarm and information systems.

The Authority collaborates with many national and international radiation protection endeavours. It actively supports the on-going improvements of radiation protection in Estonia, Latvia, Lithuania, and Russia.

SSI has about 110 employees and is located in Stockholm.



Statens strålskyddsinstitut
Swedish Radiation Protection Authority

Adress: Statens strålskyddsinstitut; S-171 16 Stockholm

Besöksadress: Solna strandväg 96

Telefon: 08-729 71 00, Fax: 08-729 71 08

Address: Swedish Radiation Protection Authority

SE-171 16 Stockholm; Sweden

Visiting address: Solna strandväg 96

Telephone: + 46 8-729 71 00, Fax: + 46 8-729 71 08

www.ssi.se