



## Bestemmelse af uranindtag

Jensen, Per Hedemann; Søgaard-Hansen, J.; Ulbak, K.

*Published in:*  
Miljø og Sundhed

*Publication date:*  
2001

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Jensen, P. H., Søgaard-Hansen, J., & Ulbak, K. (2001). Bestemmelse af uranindtag. *Miljø og Sundhed*, (16), 8-14.

---

### General rights

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

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

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

---

# Bestemmelse af uranindtag

Af Per Hedemann Jensen<sup>1</sup>, Jens Søgaard-Hansen<sup>1</sup>, Kaare Ulbak<sup>2</sup>

---

## Indledning

Uran har været anvendt til fredelige formål i mange årtier. Det bliver brugt i brændselselementer i kernekraftværker, som afskærmning af kraftige kilder i anlæg til strålingsterapi og som kontravægt i flyvemaskiner. Uran har også været anvendt til at forøge effekten af projektiler, der har været brugt mod kampvogne i Golfkrigen og i krigen i Kosovo. Uranforstærkede projektiler bruges på grund af urans høje massefylde ( $19 \text{ g/cm}^3$ ) og dets metalliske egenskaber og ikke fordi det er svagt radioaktivt. Brugen af sådanne projektiler har skabt bekymring hos nogle af de soldater, der har været udstationeret i områder, hvor disse projektiler har været anvendt.

Uran er relativt harmløst at håndtere i fast form. Det giver anledning til en svag ekstern bestråling, når det befinder sig uden for kroppen. Risikoen for skadelige virkninger som følge af indtag af uran i kroppen er ringe selv ved relativt store optag i organismen (1). Denne artikel fokuserer på bestemmelsen af indtag af uran i kroppen ved måling af urankoncentrationen i urinprøver (*in vitro* målinger) og måling af tilbageholdt uran i kroppen (*in vivo* målinger). Formålet hermed er at vurdere, om et indtag har fundet sted og i givet fald at kunne bestemme strålingsdoser og eventuelle toksiske virkninger herfra.

## Naturligt forekommende uran og udarmet uran

Uran er et tungmetal, og i naturen findes det overalt i større eller mindre koncentrationer.

Isotopsammensætningen i naturligt forekommende uran er 99.2745%  $^{238}\text{U}$ , 0.7200%  $^{235}\text{U}$  og 0.0055%  $^{234}\text{U}$ . Alle tre isotoper er radioaktive med en halveringstid på henholdsvis 4.5 milliarder år, 704 millioner år og 246000 år. Når de tre uranisotoper henfalder, udsendes der alfa- og gammastråling. De udsendte gammafotoner er lavenergetiske. Aktivitetsindholdet i 1 mg naturligt uran er 25.6 Bq.

Den gennemsnitlige koncentration i jorden er omkring 3 ppm (parts per million). I de øverste 30 cm af en stor dansk parcelhusgrund befinder der sig derfor omkring 1 kg uran, som er på en tungtopløselig kemisk form. Da uran er så almindeligt forekommende, findes det også i den føde, vi indtager, og i den luft vi, indånder. Stort set hele vores indtag af uran sker med føden, og i gennemsnit er det årlige indtag herfra omkring 0.5 mg (2). Den årlige effektive dosis herfra udgør omkring 0.006 mSv, der er en beskedent andel af de ca. 3 mSv, vi årligt modtager i gennemsnit fra alle naturligt forekommende strålingskilder.

I såkaldt udarmet uran er indholdet af  $^{235}\text{U}$  reduceret i forhold til indholdet af  $^{235}\text{U}$  i naturligt forekommende uran. Udarmet uran fremkommer som et spildprodukt fra den berigingsproces, hvor indholdet af  $^{235}\text{U}$  øges (beriget uran) til brug for fremstillingen af brændselselementer til kernekraftreaktorer. Den procentvise sammensætning kan eksempelvis være 99.798%  $^{238}\text{U}$ , 0.200%  $^{235}\text{U}$  og 0.002%  $^{234}\text{U}$ . Aktivitetsindholdet i 1 mg udarmet uran med denne sammensætning er 17.2 Bq, dvs. omkring 65% af aktiviteten i 1 mg naturligt forekommende uran. Hvis udarmet uran er fremstillet af oparbejdet uran fra kernekraftværker kan det indeholde spormængder af både

---

<sup>1</sup> Forskningscenter Risø

<sup>2</sup> Statens Institut for Strålehygiejne

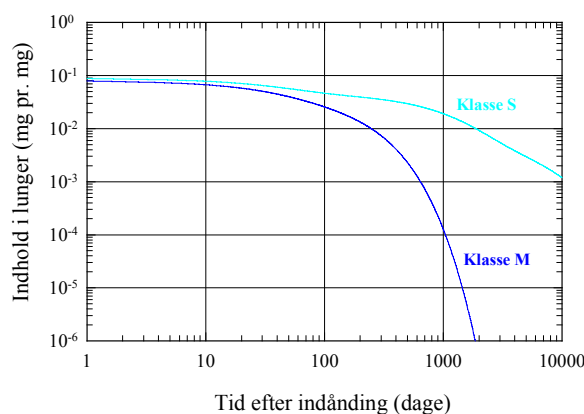
---

$^{236}\text{U}$  og  $^{239}\text{Pu}$  (plutonium). Den ekstra strålingsdosis fra indtag af denne slags uran er imidlertid marginal ( $< 1\%$ ) sammenlignet med strålingsdosis fra uran, der ikke indeholder  $^{236}\text{U}$  og  $^{239}\text{Pu}$  (3).

### Urans omsætning i kroppen

Efter indånding af uranpartikler vil en brøkdel heraf blive transporteret fra lungerne til blodbanen med en hastighed, der er bestemt af opløseligheden af den kemiske forbindelse, de indåndede uranpartikler optræder i. Der anvendes tre forskellige absorptions- eller opløselighedsklasser F (fast), M (medium) og S (slow)

til at beskrive den biokinetiske transport fra lunger over blodbane til de enkelte organer. Efter indånding af lettere opløselige uranforbindelser (klasse F og M) vil en stor del af optaget via blodbanen transporteres til knogler, nyrer og lever. Tungtopløselige uranpartikler (klasse S) forbliver i længere tid i lungerne efter indånding, og en væsentlig mindre brøkdel når knogler og nyrer. Fra organerne udskilles det optagne uran med urinen. Figur 1 viser tilbageholdelsesfunktioner for indåndet uran i klasse M (moderat opløseligt) og S (tungtopløseligt). Tilbageholdelsesfunktionen for lungerne beskriver den relative tilbageholdelse i lungerne som funktion af tiden.



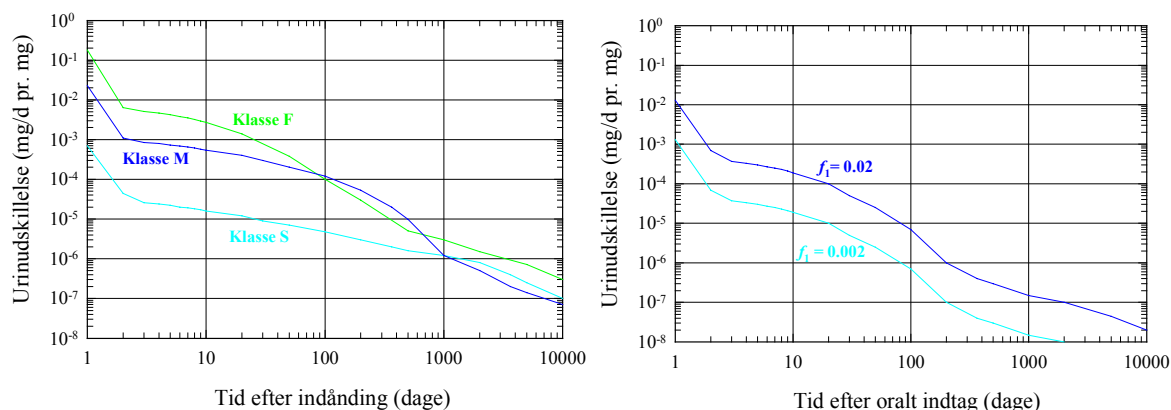
Figur 1. Tilbageholdelse i lungerne af indåndet uran i opløselighedsklasse M og S som funktion af tiden efter indåndingen. Funktionerne angiver indholdet i lungerne i mg pr. mg indtaget.

Hvis uran indtages oralt, vil en stor brøkdel passere lige igennem mave-tarmkanalen og udskilles med afføringen. Kun en lille del på omkring 2% eller mindre vil via tarmvæggen optages i blodbanen og transporteres herfra videre til kroppens organer, hovedsageligt til knogleoverflader og nyrer, og udskilles herfra med urinen.

Figur 2 viser udskillelsesfunktioner for indåndet uran i klasse F (letopløseligt), M (moderat opløseligt) og S (tungtopløseligt) samt for oralt indtaget uran med en optagsfaktor,  $f_1$ , på henholdsvis 0.2% (tungtopløseligt) og 2% (mode-

rat opløseligt) (4). Udskillelsesfunktionerne beskriver den relative udskillelsesrate med urinen som funktion af tiden. Det fremgår af figur 2, at udskillelsen sker hurtigere efter et oralt indtag sammenlignet med indånding.

Biokinetikken for materialer, der er optaget i kroppen, afhænger primært af grundstof og den kemisk-fysiske form af det indtagne grundstof. Det betyder, at den relative fordeling af de forskellige uranisotoper i kroppens organer efter et indtag er ens, og at udskillelses- og tilbageholdelsesfunktioner for de forskellige uranisotoper er identiske.



Figur 2. Udskillelsesfunktioner for urinudskillelse for indåndet uran i opløselighedsklasse F, M og S og for oralt indtaget uran for en optagsfaktor til blodbanen via mave-tarmkanalen på 2% og 0.2%. Funktionerne angiver den daglige udskillelse i mg/dag pr. mg indtaget.

### Indtag og kropsindhold af naturligt uran i mennesket

Det naturlige indhold af uran i jord og vand medfører, at der optages uran i planter og dyr og endvidere, at der er uran i luften (2). Indholdet i fødevarer, herunder i drikkevand, varierer og er generelt størst i korn- og fiskeprodukter. Typiske fødevarerindhold af  $^{238}\text{U}$  er i størrelsesordenen 1 - 30 mBq/kg. I enkelte typer af mineralvand kan indholdet være 1000 mBq/kg.  $^{238}\text{U}$ -aktiviteten i luften over jordoverfladen er typisk 1 - 2  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Ud fra en typisk kostsammensætning kan man beregne, at det gennemsnitlige indtag af  $^{238}\text{U}$  via føden for europæere er af størrelsesordenen 5 Bq/år svarende til en vægtmængde af naturligt uran på ca. 0.5 mg/år. Indtaget via indånding er væsentligt lavere og af størrelsesordenen  $\mu\text{g}/\text{år}$ . Ud fra variationen i målte fødevarerindhold samt variationen i enkeltindividens kostsammensætning kan det konkluderes, at individuelle indtag af uran kan variere med flere størrelsesordener.

På grundlag af de beregnede indtag via fødevarer kan det beregnes, at den daglige udskillelse af naturligt uran med urinen er af størrelsesordenen 0.3 mBq/d svarende til en urinkoncen-

tration på ca. 0.01  $\mu\text{g}/\text{liter}$ . Dette er i overensstemmelse med, hvad der måles på ikke eksponerede tyske personer (5). Disse målinger viser også, at der er individuelle variationer på mindst en faktor 10. På grundlag af de beregnede indtag via indånding kan det estimeres, at indholdet af aktivitet i lungerne er i størrelsesordenen 10 mBq svarende til en uranmængde af størrelsesordenen 0.5  $\mu\text{g}$ . Dette er i overensstemmelse med, hvad der er målt *in vitro* på lungevæv (2). Det totale kropsindhold af naturligt uran er af størrelsesordenen 4 - 40  $\mu\text{g}$  (0.1 - 1 Bq).

### Målemetoder til bestemmelse af uranindtag

Måling af uran i urinprøver er den mest anvendte metode til bestemmelse af indtag, og den kan benyttes ved både indånding og orale indtag. Den klassiske metode er at måle på de alfa-partikler, som udsendes, når uranisotoperne henfalder. Metoden kræver radiokemisk separation af uranen i urinprøven, og metoden er tidskrævende. Måles der på den samlede udsendelse af alfa-partikler (gross-alfa måling), kan den samlede aktivitet bestemmes og heraf den samlede vægtmængde, når forholdet mellem uranisotoperne er kendt. En relativt ny metode er ICPMS (Inductively Coupled Plas-

ma Mass Spectrometry), der gør det muligt massespektrometrisk at adskille uranatomer fra andre atomer og måle meget små total vægtmængder af uran. Bestemmelse af vægtmængden af de enkelte uranisotoper med denne metode kræver også et kendt isotopforhold, fordi opløsningsevnen er for ringe til en separat isotopbestemmelse.

Ved alfa-spektrometriske målinger bestemmes også energien af de udsendte alfa-partikler, og herved kan aktiviteten af de enkelte isotoper bestemmes hver for sig uden at kende isotopforholdet. En videreudvikling af ICPMS metoden gør det muligt at måle vægtindholdet af de enkelte uranisotoper (HR ICPMS (High Resolution ICPMS)). ICPMS metoderne er mere nøjagtige og hurtigere end de tilsvarende alfa-målinger, og de stiller mindre krav til prøvetilberedningen.

*In vivo* måling af uranindhold i kroppen baserer sig på måling af den svage gammastråling, der udsendes fra uran. Metoden benyttes kun i de tilfælde, hvor aktiviteten sidder i lungerne, dvs. når uran er indtaget ved indånding. *In vivo* målinger stiller store krav til detektorfølsomhed og til afskærmning mod baggrundsstrålingen.  $^{235}\text{U}$ -indholdet bestemmes her direkte ved måling af gammastrålingen fra  $^{235}\text{U}$ , mens  $^{238}\text{U}$ -indholdet bestemmes indirekte ved måling på gammastrålingen fra datterproduktet  $^{234}\text{Th}$ .

De forskellige målemetoders følsomhed for bestemmelse af uranindhold i urin og i lunger afhænger bl.a. af de enkelte metoders mindste detekterbare mængde, usikkerheden på selve målingen samt baggrundsindholdet af uran i kroppen. Tabel 1 viser disse parametre for de forskellige målemetoder.

Målemetode	Mindste detekterbare mængde	Relativ usikkerhed
ICPMS urinprøve	0.001 µg total uran	50%
HR ICPMS urinprøve	0.0001 µg $^{235}\text{U}$	
	0.0001 µg $^{238}\text{U}$	
Total alfa-analyse urinprøve	4 mBq total uran	
Alfa-spektrometri urinprøve	4 mBq $^{235}\text{U}$	
	4 mBq $^{238}\text{U}$	
Gamma-spektrometri lunger	10 Bq $^{235}\text{U}$	
	100 Bq $^{238}\text{U}$	

Tabel 1. Mindste detekterbare uranmængde i 1 liter urinprøver og i lunger samt den relative usikkerhed (standardafvigelse) på målingerne i området omkring den mindste detekterbare mængde.

Tabel 2 giver en oversigt over de omtalte metoders følsomhed for måling af naturligt uranindhold udover baggrundsindholdet og måling af indhold af udarmet uran, baseret på bestemmelse af isotopforholdet mellem  $^{235}\text{U}$  og  $^{238}\text{U}$ . For målingerne på urinprøver sætter variationen i det naturlige indhold af uran begrænsning

gen for hvor små forøgelse, der kan måles. Det er i nedenstående beregninger antaget, at indholdet af naturligt uran i urin er højst 0.1 µg/liter. Ved måling af uranindhold i lungerne er det naturlige indhold, der er af størrelsesordenen 1 µg, uden betydning for målefølsomheden.

Prøve	Målemetode	Mindste detekterbare mængde (ud over baggrund)	
		Total uran	Udarmet uran
Urin (1 liter)	ICPMS	0.2 µg/l	-
Urin (1 liter)	HR ICPMS	0.2 µg/l	0.05 µg/l
Urin (1 liter)	Alfa-spektrometri	0.2 µg/l	30 µg/l
Lunger ( <i>in vivo</i> )	Gamma-spektrometri	8000 µg	70000 µg

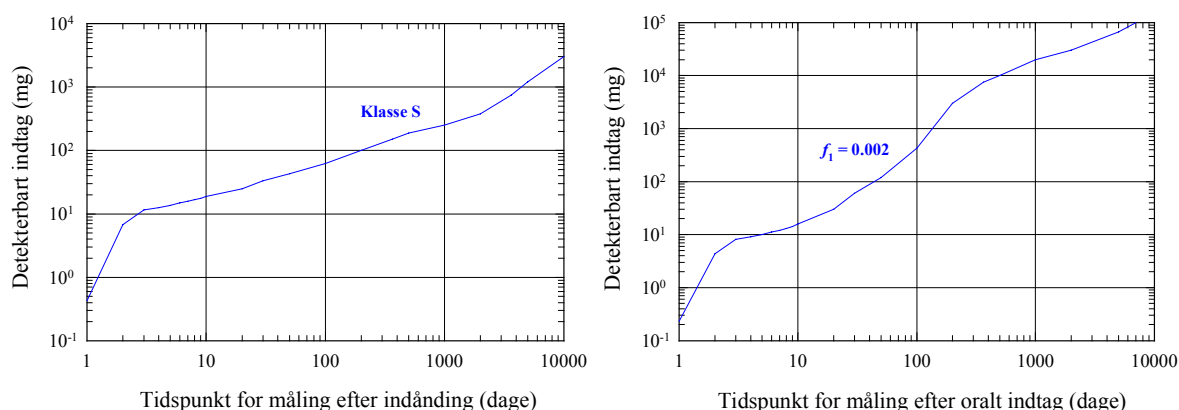
Tabel 2. Forskellige målemetoders følsomhed ved bestemmelse af uranindhold ud over det naturligt forekommende i urin og lunger. For urinprøve-målingerne er den mindste detekterbare mængde af total uran bestemt af variationerne i baggrundsindholdet af total uran.

### Bestemmelse af uranindtag

På grundlag af udskillelsen af uran med urinen og/eller tilbageholdelsen af uran i lungerne efter indånding kan et uranindtag i princippet bestemmes. Der er imidlertid store usikkerheder forbundet med bestemmelsen heraf, fordi det er nødvendigt at gøre en række antagelser vedrørende eksempelvis indtagsvej (indånding eller oralt indtag), partikelstørrelsefordeling, opløselighedsklasse (kemisk-fysiske form) og tidspunkt for indtaget. Et andet problem er, at alle mennesker udskiller uran med urinen som følge af indtag af uran med føden.

Måles der uran i lungerne, er indtaget sket ved indånding, men for at bestemme indtaget er det nødvendigt at kende/gætte på de øvrige indtagsparametre.

Uranindtaget kan bestemmes på grundlag af den målte urankoncentration i urinen og de viste udskillelsesfunktioner på figur 2. Efter indånding af en relativt stor mængde uran på eksempelvis 10 mg vil aktivitetsmængden af uran i en døgn-urinprøve 10 år efter indåndingen være omkring 0.003 µg, jf. figur 2. På figur 3 er vist, hvor stort et indtag af tungtopløseligt uran skal være for at kunne detekteres



Figur 3. Indånding og oralt indtag af tungtopløseligt uran, der kan detekteres i en urinprøve ved en målefølsomhed på 0.2 µg uran pr. liter urin, ved måling af urinprøver på forskellige tidspunkter efter indtaget.

i en urinprøve med en målefølsomhed på 0.2 µg uran pr. liter urin. Det fremgår af figur 3, at hvis målingen foretages tre måneder efter indtaget, skal man have indåndet ca. 70 mg eller have spist ca. 400 mg. Grunden til, at et oralt indtag her skal være omkring seks gange større end en tilsvarende indåndet mængde for at give det samme signal i en urinprøve efter tre måneder, er en hurtigere udskillelse fra mave-tarmkanalen end fra lungerne, jf. figur 2.

For at kunne detektere et indtag af udarmet uran er det nødvendigt også at måle forholdet mellem <sup>235</sup>U og <sup>238</sup>U for at bestemme, hvor stor en del af det målte uran, der består af udarmet uran. Tabel 3 giver en illustration af, hvor meget beregnede indtag kan afhænge af, hvilke værdier indtagsparametrene tillægges. Der er foretaget beregninger ud fra en forhøjet urankoncentration i urin på 0.2 µg/l, henholdsvis et uranindhold i lungerne på 8000 µg.

”Måleresultat”	Beregnet indtag og anvendte indtagsparametre		Beregnet indtag og anvendte indtagsparametre	
0.2 µg uran pr. liter urin	5 mg	iv = oralt, t = 30d, opl = let	7500 mg	iv = oralt, t = 365d, opl = tungt
5000 µg uran i lunger	50 mg	iv = inhalation, t = 30d, opl = tungt (S), AMAD = 1 µm	3000 mg	iv = inhalation, t = 365d, opl = let (F), AMAD = 10 µm

Tabel 3. Beregning af indtag ud fra en forhøjet urankoncentration i urin på 0.2 µg/l henholdsvis et uranindhold i lunger på 8000 µg og valgte værdier af indtagsparametrene: indtagsvej (iv), tid siden indtag (t), opløselighed (opl) og partikelstørrelsefordeling (AMAD). De beregnede indtag er, jævnfør tabel 1, de mindste indtag der kan ”ses”.

Det ses i tabellen, at værdien af indtagsparametre har stor betydning i beregningen af den indtagne mængde. Det er tiden mellem indtag og måling, der har den største indflydelse på beregningen af indtaget. Successive målinger, fordelt over lang tid, kan give information om udskillelsesfunktionen eller tilbageholdelsesfunktionen og således nedbringe usikkerheden ved valget af indtagsparametre. Usikkerheden på beregnede indtag har ud over bidrag fra valget af parameterværdier også bidrag fra usikkerheden i de biokinetiske modeller og fra måleusikkerhed.

### Strålingsdoser og kemisk toksicitet af uranindtag

Strålingsdoser til kroppens organer kan beregnes ud fra indtagets størrelse, den kemisk-fysiske form af uranforbindelsen, isotopforholdet og i tilfælde af indånding partikelstørrelsesfor-

delingen. Strålingsdoser pr. indåndet aktivitetmængde er stort set uafhængig af hvilken uranisotop, der er tale om. Når uran optræder i en tungtopløselig form, fås de største indåndingsdoser til åndedrætsorganerne. Når uran optræder i lettere opløselige former, f.eks. på metallisk form, fås de største strålingsdoser til knogleoverflade og nyrer, uanset indtagsmåde. De akkumulerede ækvivalente doser efter indånding af 1 mg (17.2 Bq) udarmet uran i opløselighedsklasse S (tungtopløseligt) kan eksempelvis beregnes for lunger og knoglemarv til henholdsvis 1.9 mSv og 1.3 µSv. Den akkumulerede effektive dosis er 0.15 mSv (1). Indåndingsdoserne afhænger også af partikelstørrelsen af de indåndede uranpartikler. De angivne doser er beregnet for en partikelstørrelsesfordeling (AMAD) på 1 µm.

Indtag af store mængder uran er kemisk toksisk og kan specielt påvirke nyrefunktionen på

---

samme måde som andre tungmetaller som bly og cadmium. Den kemisk toksiske effekt er uafhængig af isotopsammensætningen af uran, men stærkt afhængig af den kemiske forbindelse. De opløselige uranforbindelser er de mest kemisk toksiske og kan medføre højere urankoncentration i nyrevævet end de tungtopløselige forbindelser (4). Kemisk toksiske virkninger kan forhindres ved at respektere arbejdshygiejniske grænseværdier til begrænsning af indtag ved indånding. De arbejdshygiejniske grænseværdier tillader et kontinuert indtag via indånding af opløselige (og tungtopløselige) uranforbindelser på omkring 1 mg/dag (6). Ved engangsindtag vurderes det, at indtaget af opløselige uranforbindelser skal være mindst en størrelsesorden større (ca. 10 mg) for at kunne give en kemisk toksisk effekt. Indtag ved spisning skal være endnu større end indtag ved indånding for at give de samme giftvirkninger i nyrene.

## Konklusioner

Ved indtag af uran ved indånding eller spisning udskilles det meste hurtigt fra kroppen. Det, der bliver tilbage i kroppen efter den hurtige udskillelse, udskilles meget langsomt fra kroppen. Det bliver derfor vanskeligere at bestemme et indtag ud fra måling af den udskilte uran i urinen, jo længere tid der forløber mellem indtag og måling. Det naturlige indtag af uran med føden medfører herudover en varierende baggrundskoncentration i urinen, der gør det vanskeligt at bestemme små indtag. Beregninger af indtag ud fra et forøget uranindhold i urinen er helt afhængig af den viden, der er til rådighed vedrørende indtaget, specielt er indtagstidspunktet her helt afgørende. Er der gået mere end et år efter et indtag, vil selv de mest følsomme metoder til måling af uran i urinprøver kun kunne afsløre indtag, der er på mange hundrede milligram uran. Den mest følsomme metode er højopløselig massespektrometri (HR ICPMS). Ved en forhøjet urankoncentration i urinen kan denne metode samtidigt afgøre, om der har været udarmet uran i indtaget. Følsom-

heden ved måling af uranindhold i lunger er ikke generet af et højt baggrundsindhold i lungerne, men er alene begrænset af måleudstyrets følsomhed. Lungemålinger er at foretrække, når der er tale om indtag ved indånding af tungtopløselige uranforbindelser, og når der er gået lang tid (år) mellem indtag og måling. Kun ved meget store indtag, kan det ved lungemålinger afgøres, om der har været udarmet uran i indtaget.

## Referencer

1. Hedemann Jensen P, Søgaard-Hansen J, Ulbak K. Kræftisiko efter indtag af uran. Ugeskrift for Læger 2001;163:1411-1417.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the UN General Assembly. United Nations, New York, 2000.
3. European Commission. The Opinion of the Group of Experts established according to Article 31 of the Euratom Treaty - Depleted Uranium. DIRECTORATE-GENERAL ENVIRONMENT Directorate C - Nuclear safety and civil protection. ENV.C 4 - Radiation protection, Luxembourg 6 March 2001.
4. Individual monitoring for internal exposure of workers. ICRP Publication 78, 1997.
5. Roth P, Werner E, Paretzke H. Research into Urinary Excretion of Uranium, GSF Report 3/01, 2001.
6. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71, 1995.



Bibliografisk information:

Per Hedemann Jensen, Jens Søgaard-Hansen og Kaare Ulbak:  
Bestemmelse af uranindtag

Miljø og Sundhed, Formidlingsblad nr. 16, maj 2001, side 8-14.  
Sundhedsministeriets Miljømedicinske Forskningscenter.