

ANNA VESTERLUND, SOFIA JONSSON  
PETRA LAGERKVIST, HENRIK RAMEBÄCK



**Anna Vesterlund, Sofia Jonsson, Petra  
Lagerkvist, Henrik Ramebäck**

# Karaktärisering av radiumstrålkällor

Åldersbestämning

|                        |                                                                                                       |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Titel                  | Karaktärisering av radiumstrålkällor - Åldersbestämning                                               |
| Title                  | Characterization of radium sources – Age determination                                                |
| Rapportnr/Report no    | FOI-R--4943--SE                                                                                       |
| Månad/Month            | Augusti                                                                                               |
| Utgivningsår/Year      | 2020                                                                                                  |
| Antal sidor/Pages      | 40                                                                                                    |
| ISSN                   | 1650-1942                                                                                             |
| Kund/Customer          | Försvarsdepartementet                                                                                 |
| Forskningsområde       | CBRN-frågor                                                                                           |
| FoT-område             | Inget FoT-område                                                                                      |
| Projektnr/Project no   | A404619                                                                                               |
| Godkänd av/Approved by | Niklas Brännström                                                                                     |
| Ansvarig avdelning     | CBRN-skydd och säkerhet                                                                               |
| Exportkontroll         | Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen. |

Bild/Cover: Shutterstock, Förfall av gammal behållare för radioaktivt material.

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

## Sammanfattning

Radiumstrålkällor, bestående av  $^{226}\text{Ra}$ , har historiskt sett använts inom områden som t.ex. industri och medicin. Eftersom radium förekommer i naturen var det bland de första radioaktiva ämnena som användes i praktiska tillämpningar, innan lagar och regler för strålskydd och kontroll av radioaktiva ämnen fanns på plats. Därför förekommer radiumstrålkällor relativt ofta i situationer då man återfunnit strålkällor utanför myndighetskontroll. Enligt IAEA:s databas över rapporterade incidenter rörande radioaktivt material, ITDB (Incident and Trafficking Database), rör 15 % av alla fall som rapporterats in mellan 1993 och 2019  $^{226}\text{Ra}$  [2020]. Om information om en återfunnen strålkälla saknas skulle dess ursprung kunna säkerställas genom att specifika egenskaper i materialet mäts, en karaktärisering av ämnet. Detta förutsätter dock att det finns data att jämföra med. En materialegenskap som kan ge relevant information är strålkällans ålder, dvs. hur lång tid som passerat sedan radiummaterialet senast genomgick en kemisk separation.

I det här arbetet har två metoder för åldersbestämning av slutna radiumstrålkällor utvecklats och testats på material från en radiumstrålkälla. I den ena metoden separeras bly från radium genom fastfasextraktion. Därefter kvantifieras  $^{210}\text{Pb}$  och  $^{226}\text{Ra}$  med ICP-MS. I den andra metoden mäts både  $^{210}\text{Pb}$  och  $^{226}\text{Ra}$  i samma prov med hjälp av gammaspektrometri. Mäteffektivitetsbestämningen för gammaspektrometri har i detta fall gjorts med enpunktskalibreringar för att erhålla minsta möjliga mätosäkerhet.

Resultaten visar att det är god överensstämmelse för den uppmätta åldern mellan de två mätmetoderna,  $46,9 \pm 1,7$  år med ICP-MS och  $41,7 \pm 3,3$  år med gammaspektrometri. Mätosäkerheten ( $k=2$ ) är ungefär hälften så stor med den masspektrometriska metoden. Den gammaspektrometriska metoden kan ge ett resultat inom några timmar efter att man löst upp materialet, medan den masspektrometriska analysen tar ett par dagar att genomföra.

Nyckelord: Radiumstrålkällor, masspektrometri, gammaspektrometri, åldersbestämning

## Summary

Sealed radium sources, containing  $^{226}\text{Ra}$ , have historically been used in areas such as industry and medicine. Since radium is naturally occurring, it was also one of the first radioactive elements that was used for practical applications, even before legislation and control of radioactive materials were implemented. Therefore, radium sources out of regulatory control, occasionally, are found. According to the IAEA database ITDB (Incident and Trafficking Database), 15% of the reported cases between 1993 and 2019 concern  $^{226}\text{Ra}$  [2020]. If no information regarding a seized radioactive material exists, the origin may be determined *via* measurements of specific characteristics. However, this requires data for comparison. One type of characteristic that may give important information is the age of the source, i.e. the time that has passed since the radium material was last chemically separated.

In this work, two methods for age determination of sealed radium sources have been developed and tested on material from a radium source. In one method lead is separated from radium using solid phase extraction followed by quantification of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{226}\text{Ra}$  using ICP-MS. In the other method,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{226}\text{Ra}$  are measured in the same sample using gamma spectrometry after dissolving the material. The measurement efficiencies in the gamma spectrometric measurement were determined by single-point calibrations to achieve as low measurement uncertainties as possible.

The results show that there is good agreement in the measured age between the two methods,  $46.9 \pm 1.7$  y using ICP-MS and  $41.7 \pm 3.3$  y using gamma spectrometry. The measurement uncertainty achieved with the mass spectrometric method is about half of the measurement uncertainty obtained using the gamma spectrometric method (1.7 y and 3.3 y,  $k=2$ , respectively). However, the gamma spectrometric method may deliver a result within a few hours after dissolution of the material, while the mass spectrometric analysis takes a few days.

**Keywords:** Sealed radium sources, mass spectrometry, gamma spectrometry, age determination

## Innehåll

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Inledning</b> .....                                                                                                             | <b>7</b>  |
| <b>Bakgrund</b> .....                                                                                                              | <b>7</b>  |
| Åldersbestämning.....                                                                                                              | 7         |
| <b>Material och metod</b> .....                                                                                                    | <b>9</b>  |
| Provupparbetning .....                                                                                                             | 9         |
| Kemisk separation .....                                                                                                            | 9         |
| Mätningar .....                                                                                                                    | 10        |
| Masspektrometri.....                                                                                                               | 10        |
| Gammaspektrometri.....                                                                                                             | 11        |
| <b>Resultat och diskussion</b> .....                                                                                               | <b>11</b> |
| <b>Slutsats</b> .....                                                                                                              | <b>12</b> |
| <b>Förslag på fortsatt arbete</b> .....                                                                                            | <b>12</b> |
| Masspektrometri.....                                                                                                               | 12        |
| Gammaspektrometri.....                                                                                                             | 12        |
| <b>Referenser</b> .....                                                                                                            | <b>13</b> |
| <b>Bilaga 1 - Osäkerhetsberäkning för åldersbestämning av <sup>226</sup>Ra-strålkällor via mätning med masspektrometri</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>Bilaga 2 - Osäkerhetsberäkning för åldersbestämning av <sup>226</sup>Ra-strålkällor via mätning med gammaspektrometri</b> ..... | <b>34</b> |



# Inledning

Strålkällor är vanligt förekommande i samhället. De används t.ex. medicinskt inom strålterapi, som nivåvakter inom industrin och som radiograferingskällor för att t.ex. kontrollera svetsfogar. Ibland händer det att strålkällor upphittas utan att man vet varifrån de kommer. Dessa herrelösa strålkällor kan vara borttappade, stulna eller kan på annat sätt ha kommit bort från den legala ägaren. För att kunna efterforska varifrån strålkällan kommer i de fall den inte kan identifieras, kan man undersöka om strålkällan har några inneboende signaturer. I ett tidigare arbete undersöktes möjligheterna att identifiera  $^{241}\text{Am}$ -strålkällor med hjälp av inneboende signaturer som kunde ses i ett högupplöst gammaspektrum [Vesterlund *et al.* 2015]. Studien visade att det finns ett antal särskiljande signaturer, exempelvis radioaktiva och icke-radioaktiva orenheter samt ålder på strålkällan.

$^{226}\text{Ra}$  är en naturligt förekommande radionuklid. Eftersom radium finns naturligt i uranrika berggrunder var det också en tidig källa för tillämpningar av radioaktivt material. Redan innan lagstiftning och kontrollfunktioner för radioaktivt material fanns på plats, cirkulerade radiumstrålkällor ute i samhället. Därför hittas också emellanåt radiumstrålkällor som glömts bort i förråd på industrier och företag [SSM 2009:23]. Som strålkällor har  $^{226}\text{Ra}$  historiskt sett varit vanligt i samhället. De har använts i medicinsk strålbehandling, i radiograferingsutrustning, som kalibreringskällor och som radongeneratorer [SSM 2009:23]. Ett annat användningsområde är som neutronkälla tillsammans med beryllium. Allt eftersom utvecklingen av partikelacceleratorer och reaktorer har fortskridit har radiumstrålkällor inom medicinska tillämpningar fasats ut till förmån för andra radionuklider men även för annan metodik som inte alls nyttjar radioaktiva ämnen.

Ett sätt att försöka identifiera en upphittad strålkällas ursprung är att mäta, för materialet, relevanta signaturer. En viktig signatur i de flesta radioaktiva material, inklusive kärnämnen, är åldern. Med ålder i detta sammanhang menas den tid som har passerat sedan materialet, i detta fall radium, genomgick den senaste kemiska separationen.

Syftet med detta arbete var att sätta upp två metoder för att bestämma ålder på slutna radiumstrålkällor genom att bestämma kvoten mellan  $^{226}\text{Ra}$  och  $^{210}\text{Pb}$  som kommer längre ner i sönderfallsskedjan. Åldern har bestämts med två olika mättekniker: gammaspektrometri och ICP-MS. Detta är två fundamentalt olika mättekniker som kan användas som komplement till varandra och för att stärka tilliten till mätresultaten. Den masspektrometriska mätningen kräver i regel en kemisk separation för att göra det möjligt att mäta  $^{210}\text{Pb}$  utan att kontaminera instrumentet med alltför höga halter  $^{226}\text{Ra}$ . Ett annat syfte med arbetet har varit att bestämma åldern med så låg mätosäkerhet som möjligt. Detta har bl.a. gjorts genom att referensmaterial med låg mätosäkerhet har använts. I den masspektrometriska analysen har extern kalibrering använts för kvantifiering av  $^{226}\text{Ra}$  och isotoputspädning för kvantifiering av  $^{210}\text{Pb}$ .

# Bakgrund

## Åldersbestämning

Åldersbestämning av radioaktivt material bygger på att man tittar på förhållandet mellan en modernuklid, i det här fallet  $^{226}\text{Ra}$ , och en dotternuklid. Radioaktivt sönderfall kan beskrivas som:



där  $\lambda_i$  är sönderfallskonstanten för nuklid  $X_i$ . Då halveringstiderna för mor och dotter är kända kan man genom att veta förhållandet mellan mor- och dotternuklid beräkna hur lång tid som har passerat sedan den senaste kemiska separationen med hjälp av uttrycket

$$t = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \ln \left( 1 - \left( 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \frac{A_2}{A_1} \right) \quad (2)$$

där  $A_i$  är aktiviteten för nuklid  $X_i$ . Uttrycket bygger på en härledning av Batemanekvationerna för successiva radioaktiva sönderfall [Bateman 1910]. För icke-radiometrisk mätningar som t.ex. masspektrometri kan ett motsvarande uttryck användas:

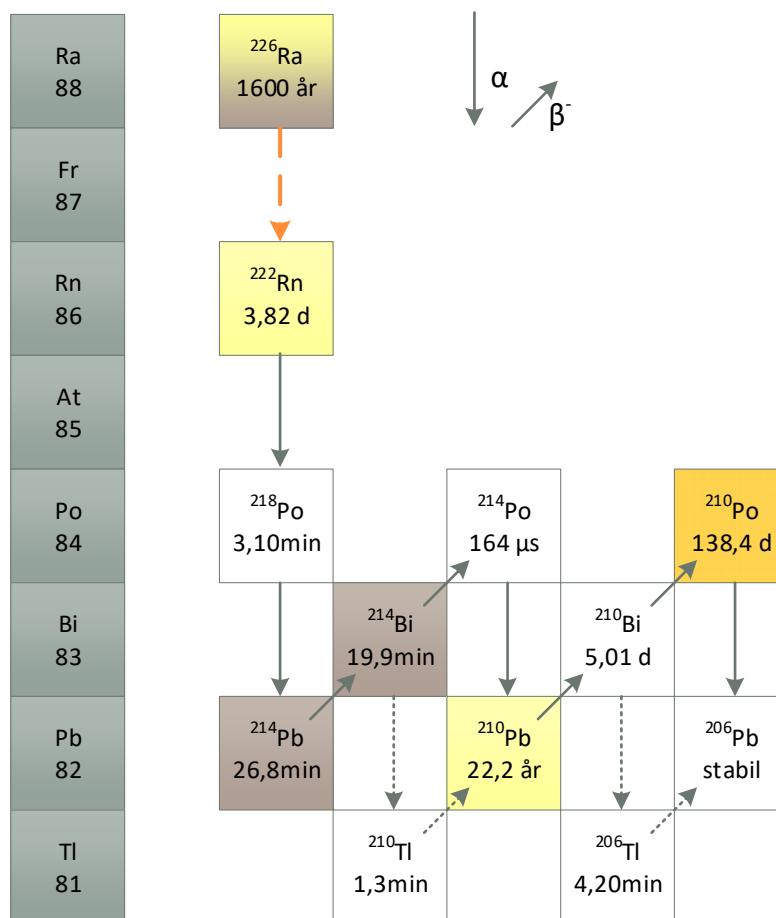
$$t = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \ln \left( 1 - \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (3)$$

där  $N_i$  är antalet atomer av nuklid  $X_i$ .

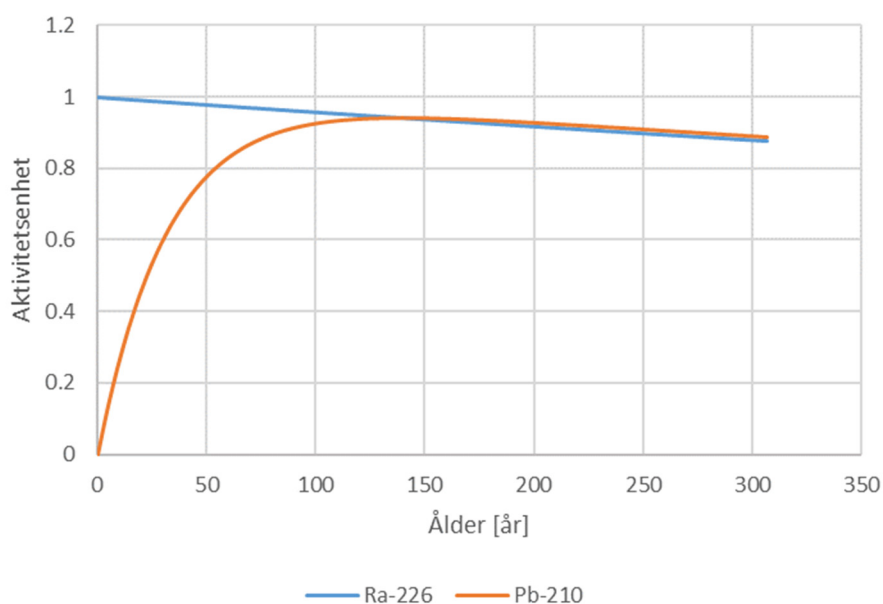
Vid en åldersbestämning av ett radioaktivt material finns ett antal villkor som måste uppfyllas:

1. Man måste anta att den kemiska separationen vid separationstillfället var fullständig med avseende på nukliderna i sönderfallsskedjan, dvs. att vid tiden  $t_0$  fanns bara modernukliden,  $^{226}\text{Ra}$  i detta fall, i materialet.
2. Materialet måste under inväxttiden vara i ett slutet system, dvs. moder- och dotternukliderna får inte ha läckt ut eller kommit in i materialet.
3. Det får inte ha gått så lång tid sedan separationen att moder- och dotternuklider uppnått radioaktiv jämvikt.

$^{226}\text{Ra}$  sönderfaller via ett antal kortlivade nuklider till  $^{210}\text{Pb}$  som är någorlunda långlivad (22,2 år), se figur 1. De kortlivade radionukliderna  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  och  $^{214}\text{Po}$  uppnår snabbt sekulär jämvikt med modernukliden  $^{226}\text{Ra}$  och kan därför inte användas för åldersbestämning medan  $^{210}\text{Pb}$  fungerar bra om materialet är yngre än ca 4-5 halveringstider, dvs. ca 100 år, se figur 2.



Figur 1. Sönderfallsskedja för  $^{226}\text{Ra}$ .



**Figur 2.** Inväxt av  $^{210}\text{Pb}$

Ett problem med åldersbestämning av  $^{226}\text{Ra}$ -strålkällor är att  $^{226}\text{Ra}$  sönderfaller till ädelgasen  $^{222}\text{Rn}$ , som kommer att emanera såvida inte materialet kapslas in. Detta torde inte vara något problem så länge strålkällan är intakt, men så fort strålkällan öppnas kan klockan störas då det finns en möjlighet att  $^{222}\text{Rn}$  kan hinna emanera och sönderfalla utanför det ursprungliga materialet. Detta innebär i sin tur att det i det fallet inte kommer att ske någon vidare inväxt av  $^{210}\text{Pb}$  i det radioaktiva materialet och åldern på strålkällan kommer att underskattas.

## Material och metod

### Provupparbetning

Det radiummaterial som använts i detta arbete kommer från en radiumstrålkälla avsedd för medicinskt bruk. Hur denna källa öppnades finns beskrivet i Matyshkin *et al.* [2016]. En andel av det radiumsulfat som fanns i strålkällan löstes upp i en basisk EDTA-lösning. Denna lösning späddes till en lösning med ca 1000 Bq  $^{226}\text{Ra}/\text{ml}$  som sedan användes för mätning med mass- och gammaspektrometri. För den masspektrometriska mätningen separerades bly.

### Kemisk separation

För att undvika blykontamination från omgivningen i proverna gjordes separationerna så rena som möjligt. Därför var all plast som användes syradiskad, salpetersyran var subdestillerad och den ammoniumoxalat som användes var av spårmetallkvalitet (CAS 6009-70-7, Sigma-Aldrich, Steinheim, Tyskland).

För isotoputspädningsanalys av bly spikades 1 ml prov (ca 1000 Bq  $^{226}\text{Ra}$ ) med ca 20 ng NIST SRM 3182. NIST SRM 3182 är ett blyreferensmaterial som är certifierat för blykoncentration. Alla pipetteringar av prov och spik vägdes in. Den totala provmängden var 1,2 ml och matrisen var 1 M  $\text{HNO}_3$ . Även prover utan isotopspik bereddes samt spikade och ospikade blanker. Pb-resin (Triskem International, Bruz, Frankrike) sattes på en vakuumbox (Biotage, Uppsala, Sverige). På resinen sattes syradiskade reservoarar (Biotage, Uppsala, Sverige). Resinen sköljdes med 10 ml ammoniumoxalat för att få bort

så mycket bly som möjligt. Efter detta sköljdes resinen med totalt 9 ml 1 M HNO<sub>3</sub> uppdelat på tre fraktioner, varpå proven sattes till kolonnerna. Rören med prover sköljdes med 3x1 ml 1 M HNO<sub>3</sub>. Sköljlösningen sattes också till kolonnerna. Därefter sköljdes resinen med 5 ml 1 M HNO<sub>3</sub>. Bly eluerades till sist med 6 ml 0,1 M ammoniumoxalat.

## Mätningar

### Masspektrometri

ICP-MS-mätningarna gjordes med en Element 2 (Thermo Scientific, Bremen, Tyskland). Instrumentet optimerades med avseende på maximal intensitet och minimal oxidbildning inför varje mättag med en 1 ppb tunelösning (ICP Multi element standard solution Certipur XXIII, Merck Millipore, Darmstadt, Tyskland). Som provintroduktion användes en Twister spraykammare och en Conikal nebulizer (båda Glass Expansion, Melbourne, Australien). All utvärdering och alla beräkningar gjordes off-line. Dödtiden bestämdes enligt metoden av Appelblad *et al.* [2000] baserat på mätningar av lutetium. Inställningar för den masspektrometriska mätmetoden återfinns i tabell 1.

**Tabell 1.** Mätinställningar för de masspektrometriska mätningarna.

|                                |                                                                                                                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Isotoper vid mätning av bly    | <sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb, <sup>210</sup> Pb, <sup>226</sup> Ra                    |
| Isotoper vid mätning av radium | <sup>103</sup> Rh, <sup>115</sup> In, <sup>118</sup> Sn, <sup>185</sup> Re, <sup>208</sup> Pb, <sup>210</sup> Pb, <sup>226</sup> Ra |
| Massfönster                    | 5 %                                                                                                                                 |
| Samples per peak               | 100                                                                                                                                 |
| Detektorläge                   | Counting                                                                                                                            |
| Antal scan                     | 300                                                                                                                                 |

### Radium

Bestämningen av radium gjordes med extern kalibrering. För kalibreringskurvan användes en radiumstandard, NIST SRM 4967A (NIST, Gaithersburg, Maryland, USA), som spädades till 25 pg g<sup>-1</sup>, 125 pg g<sup>-1</sup>, 225 pg g<sup>-1</sup>, 325 pg g<sup>-1</sup> och 425 pg g<sup>-1</sup> och mättes enligt metod i tabell 1. Till alla lösningar tillsattes rodium, indium och rhenium som intern standard för att se vilken av dessa som mest betedde sig som analyten radium.

Kalibreringskurvan utvärderades med linjär regression där mätdata viktades med  $1/s_y^2$ , där  $s_y$  är mätsäkerheten i mätsignalen [Sayago och Asuero 2004]. Viktningen är på detta sätt multiplikativ.

### Bly

Koncentrationen <sup>210</sup>Pb bestämdes med masspektrometrisk isotoputspädningsanalys (IDMS). För att kunna använda NIST SRM 3128, som enbart är certifierad för totalkoncentration bly, för isotoputspädningsanalys måste sammansättningen av bly bestämmas. För att göra detta användes NIST SRM 981, som är certifierad för blyisotopkvoter, för att bestämma korrektionsfaktor för massfraktionering [Russell *et al.* 1983]. Genom att bestämma isotopsammansättningen av bly i NIST SRM 3128 kunde koncentrationerna för varje blyisotop i materialet beräknas. Den naturligt förekommande isotopen <sup>208</sup>Pb användes sedan som isotopspik i bestämningen av <sup>210</sup>Pb-koncentrationen.

Vid mätningen av <sup>210</sup>Pb användes åter NIST SRM981 för att bestämma korrektionsfaktor för massfraktionering av blyisotoperna. Då eluenten (0,1 M ammoniumoxalat) gav stora störningar på mätsignalen och tenderade att täppa igen provintroduktionssystemet spädades alla mätlösningar med 2 % HNO<sub>3</sub> till dubbla volymen. För att minimera risken för minnes-effekter av bly mellan proverna aspirerades EDTA i 10 minuter följt av 2 % HNO<sub>3</sub> i 5 minuter mellan varje prov.

## Gammaspektrometri

Gammaspektrometriska mätningar genomfördes med en HPGe-detektor, *High Purity Germanium*, (Ortec, TN, USA) med en tunn kontakt och ett kolfiberfönster för att minimera attenueringen mellan prov och detektorkristall vid låga fotonenergier. All elektronik var analog och Gammavision (Ortec, TN, USA) användes för mätning och utvärdering.

### Kalibrering

För mätning av  $^{210}\text{Pb}$  vid 46 keV och  $^{226}\text{Ra}$  vid 186 keV med gammaspektrometri genomfördes enpunktskalibreringar. För kalibrering vid 46 keV användes NIST SRM4337 och för kalibrering vid 186 keV användes NIST SRM4967A. Kalibreringsgeometrin var identisk med provgeometrin (Cerbo 60, Noax lab) och alla mätningar genomfördes direkt på detektorns *endcap*. Interferens från  $^{235}\text{U}$  vid 186 keV behöver inte beaktas eftersom materialet kan betraktas som fritt från  $^{235}\text{U}$ .

Vid mätning med gammaspektrometri i en fix mätgeometri och vid en fix energi beror mäteffektiviteten bl.a. av provets densitet. Vid mätning av låga energier, som t.ex. 46 keV från  $^{210}\text{Pb}$ , kommer även provets kemiska sammansättning att inverka på mäteffektiviteten. Gammafotoner kommer vid låga energier att i större utsträckning absorberas i provet, självabsorption, speciellt om provet innehåller en stor andel atomer med högt atomnummer. Vid mätning av  $^{210}\text{Pb}$  med gammaspektrometri kan attenueringen skilja sig åt beroende på vilken syrastyrka prov och kalibreringslösningen har. Därför bereddes kalibreringslösningen för  $^{210}\text{Pb}$  i samma syrastyrka som provet (1 M  $\text{HNO}_3$ ). För  $^{226}\text{Ra}$ , vars gammafotoner har en högre energi, gör inte syrastyrkan inte någon signifikant skillnad och i kalibreringslösningen för  $^{226}\text{Ra}$  var syrastyrkan (0,1 M  $\text{HNO}_3$ ).

Provet bereddes genom att 1 ml av den spädda lösningen (ca 1000 Bq) överfördes till en Cerbo 60 (Noax lab) och späddes till 60 ml med 1 M  $\text{HNO}_3$ . Provet mättes i ca 3,5 h direkt på detektorns *endcap*.

## Resultat och diskussion

För att bestämma vilken intern standard,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{103}\text{Rh}$  eller  $^{185}\text{Re}$ , som passade bäst för att följa variationen i mätningen av radium med ICP-MS mättes samma referensprov, en av punkterna i kalibreringskurvan, vid tre tillfällen under mätsekvensen. Genom att jämföra kvoterna för varje isotop mellan olika mätningar får man en uppfattning om vilken av dessa isotoper som följer variationen i radiumsignalen bäst.  $^{185}\text{Re}$  visade sig vara det bästa valet och är också den isotop som ligger närmast i massa. Alla mätningar av  $^{226}\text{Ra}$  korrigerades därför med  $^{185}\text{Re}$  som intern standard.

Den beräknade åldern för materialet med de två olika metoderna återfinns i tabell 2. Resultatet för den masspektrometriska mätningen är ett medelvärde av två replikat med samma relativa osäkerhet (3,4 %,  $k=2$ ). Resultaten för de två teknikerna stämmer överens inom osäkerheterna med täckningsfaktor 3, vilket motsvarar ett konfidensintervall på 99,7 %.

**Tabell 2.** Beräknad strålkällaålder uppmätt med de två teknikerna.

|            | Masspektrometri | $U_c$ , $k=2$ | Gammaspektrometri | $U_c$ , $k=2$ |
|------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------|
| Ålder [år] | 46,9            | 1,7           | 41,7              | 3,3           |

Det dominerande mätosäkerhetsbidraget för de masspektrometriska mätningarna kommer från osäkerheterna i halveringstiderna för  $^{226}\text{Ra}$  och  $^{210}\text{Pb}$ , se bilaga 1. Även mätosäkerheten i dödtiden förklarar en betydande del av den sammanlagda mätosäkerheten. För den gammaspektrometriska mätningen dominerar osäkerheten i den certifierade  $^{210}\text{Pb}$ -kalibreringslösningen ( $u=1,2$  %,  $k=1$ ) och osäkerheten i topparean för  $^{210}\text{Pb}$ , se bilaga 2. Den senare skulle kunna minskas genom längre mättid.

## Slutsats

Arbetet har visat att man med både masspektrometri och gammaspektrometri kan bestämma ålder på en radiumstrålkälla. För att få en korrekt ålder måste dock de mätningar som krävs göras i nära anslutning till strålkällans öppnande då klockan ( $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ ) avstannar och på sikt går baklänges om radon emanerar från radiummaterialet. Åldersbestämningen med masspektrometri ger en lägre mätosäkerhet jämfört med gammaspektrometri men kräver relativt mycket arbete i form av kemisk separation och mätningar av både radium och bly i separata prover.

## Förslag på fortsatt arbete

### Masspektrometri

Eftersom det, med masspektrometri, var svårt att mäta  $^{210}\text{Pb}$  med en 0,1 M ammonium-oxalatmatris skulle separationsmetoden behöva optimeras genom att t.ex. sänka ammoniumoxalatkoncentrationen och på så sätt minska risken för att provintroduktionen täpps igen av saltet. Andra alternativ är att byta eluent eller att utvärdera andra typer av provintroduktion som är konstruerade för att klara av högre salthalter.

För den masspektrometriska mätningen skulle ytterligare ett referensmaterial för bly behöva användas som kvalitetskontroll för mätningen.

### Gammaspektrometri

Självabsorption i prover vid gammaspektrometrisk mätning av  $^{210}\text{Pb}$  i olika typer av provmatriser skulle behöva utvärderas ytterligare [Cutshall *et al.* 1983, Iurian *et al.* 2018, Jodlowski 2016]. En jämförelse mellan olika metoder för korrektion och en grundlig utvärdering av den medföljande mätosäkerheten skulle vara värdefull för framtida mätningar av  $^{210}\text{Pb}$  i alla möjliga typer av provmatriser.

## Referenser

- Appelblad P och Baxter D (2000) A model for calculating deadtime and mass discrimination correction factors from inductively coupled plasma mass spectrometry calibration curves, *J. Anal. At. Spectrom.* 15, 557-560.
- Bateman H (1910) The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radio-active transformations, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 15, 423-427.
- Bergman C, Kartläggning av fast avfall innehållande radioaktiva ämnen från icke kärntekniska verksamheter, SSM 2009:23.
- Cutshall N, Larsen I och Olsen C (1983) Direct analysis of  $^{210}\text{Pb}$  in sediment samples: Self-absorption corrections, *Nucl. Inst. Meth.* 206, 309-312.
- Incident and Trafficking Database (ITDB), <http://www-ns.iaea.org/security/itdb.asp>, informationen hämtad mars 2020.
- Iurian A, Millward G, Sima O, Taylor A och Blake W (2018) Self-attenuation corrections for Pb-210 in gamma-ray spectrometry using well and coaxial HPGe detectors, *Appl. Rad. Isot.* 134, 151-156.
- Jodlowski P (2016) A revision factor to the Cutshall self-attenuation correction in  $^{210}\text{Pb}$  gamma-spectrometry measurements, *Appl. Rad. Isot.* 109, 566-569.
- Matyshkin A, Ebin B, Tyumentsev M, Allard S, Skarnemark G, Ramebäck H och Ekberg C (2016) Disassembly of old radium sources and conversion of radium sulfate into radium carbonate for subsequent dissolution in acid, *J Radioanal. Nucl. Chem.* 310, 589-595.
- Russell W A, Papanastassiou D A och Tombrello T A (1978) Ca isotope fractionation on the Earth and other solar system materials, *Geochim. Cosmochim. Acta* 42, 1075-1090.
- Sayago A och Asuero A (2004) Fitting Straight Lines with Replicated Observations by Linear Regression: Part II. Testing for Homogeneities of Variances, *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 34, 133-146.



# Bilaga 1 - Osäkerhetsberäkning för åldersbestämning av $^{226}\text{Ra}$ -strålkällor via mätning med masspektrometri

## Modellekvation

### {Mätning av Ra}

#### {Dödtidskorrigering}

$$I_{\text{cal.Blk.corr}} = I_{\text{cal.Blk.meas}} / (1 - I_{\text{cal.Blk.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal1.corr}} = I_{\text{cal1.meas}} / (1 - I_{\text{cal1.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal2.corr}} = I_{\text{cal2.meas}} / (1 - I_{\text{cal2.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal3.corr}} = I_{\text{cal3.meas}} / (1 - I_{\text{cal3.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal4.corr}} = I_{\text{cal4.meas}} / (1 - I_{\text{cal4.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal5.corr}} = I_{\text{cal5.meas}} / (1 - I_{\text{cal5.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} = I_{\text{cal.Blk.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal.Blk.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal1.IS.corr}} = I_{\text{cal1.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal1.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal2.IS.corr}} = I_{\text{cal2.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal2.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal3.IS.corr}} = I_{\text{cal3.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal3.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal4.IS.corr}} = I_{\text{cal4.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal4.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{cal5.IS.corr}} = I_{\text{cal5.IS.meas}} / (1 - I_{\text{cal5.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{a.corr}} = I_{\text{a.meas}} / (1 - I_{\text{a.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{a.IS.corr}} = I_{\text{a.IS.meas}} / (1 - I_{\text{a.IS.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{a.Blk.corr}} = I_{\text{a.Blk.meas}} / (1 - I_{\text{a.Blk.meas}} * \tau);$$

$$I_{\text{a.Blk.IS.corr}} = I_{\text{a.Blk.IS.meas}} / (1 - I_{\text{a.Blk.IS.meas}} * \tau);$$

#### {Kalibreringskurva, $y=a+bx$ }

$$I_{\text{cal1}} = (I_{\text{cal1.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{cal1.IS.corr}} / m_{\text{cal1.IS}})) - I_{\text{cal.Blk.corr}};$$

$$I_{\text{cal2}} = (I_{\text{cal2.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{cal2.IS.corr}} / m_{\text{cal2.IS}})) - I_{\text{cal.Blk.corr}};$$

$$I_{\text{cal3}} = (I_{\text{cal3.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{cal3.IS.corr}} / m_{\text{cal3.IS}})) - I_{\text{cal.Blk.corr}};$$

$$I_{\text{cal4}} = (I_{\text{cal4.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{cal4.IS.corr}} / m_{\text{cal4.IS}})) - I_{\text{cal.Blk.corr}};$$

$$I_{\text{cal5}} = (I_{\text{cal5.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{cal5.IS.corr}} / m_{\text{cal5.IS}})) - I_{\text{cal.Blk.corr}};$$

#### {Beräknad koncentration i provet}

$$I_{\text{a}} = I_{\text{a.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{a.IS.corr}} / m_{\text{a.IS}}) -$$

$$I_{\text{a.Blk.corr}} * (I_{\text{cal.Blk.IS.corr}} / m_{\text{cal.Blk.IS}}) / (I_{\text{a.Blk.IS.corr}} / m_{\text{a.Blk.IS}});$$

$$C_{\text{a.s}} = ((I_{\text{a}} - a) / b);$$

$$C_{\text{Ra226}} = C_{\text{a.s}} * m_{\text{tot}} / m_{\text{Raprov}};$$

### {Mätning av Pb}

#### {Massfraktionering}

$$I_{\text{korr.mb208}} = I_{\text{meas.mb208}} / (1 - \tau * I_{\text{meas.mb208}}) - I_{\text{bl.mb208}};$$

$$I_{\text{korr.mb206}} = I_{\text{meas.mb206}} / (1 - \tau * I_{\text{meas.mb206}}) - I_{\text{bl.mb206}};$$

$$r_{\text{mb208.mb206}} = I_{\text{korr.mb208}} / I_{\text{korr.mb206}};$$

$$K = R_{208.206} / r_{\text{mb208.mb206}};$$

$$\beta_{\text{exp}} = \ln(K) / \ln(206/208);$$

#### {Mätning av prov}

$$I_{\text{korr.208}} = I_{\text{meas.208}} / (1 - \tau * I_{\text{meas.208}}) - I_{\text{bl.208}};$$

$$I_{\text{korr.210}} = I_{\text{meas.210}} / (1 - \tau * I_{\text{meas.210}}) - I_{\text{bl.210}};$$

***{Masskvot Pb210/Pb208}***

$$R_{210,208} = (I_{\text{korr},210}/I_{\text{korr},208}) * (208/210)^{\beta_{\text{exp}}} * (210/208);$$

***{Koncentration Pb210 i stamlösningen}***

$$C_{\text{Pb}208,\text{Sp}1} = C_{\text{Pb}208} * m_{\text{Sp}1}/m_{\text{tot},\text{Sp}1};$$

$$C_{\text{Pb}208,\text{Sp}2} = C_{\text{Pb}208,\text{Sp}1} * m_{\text{Sp}2}/m_{\text{tot},\text{Sp}2};$$

$$m_{\text{Pb}210} = R_{210,208} * m_{\text{Pb}208};$$

$$m_{\text{Pb}208} = C_{\text{Pb}208,\text{Sp}2} * m_{\text{spik}};$$

$$C_{\text{Pb}210} = m_{\text{Pb}210}/m_{\text{Pbprov}};$$

***{Ålder}***

$$C_{\text{Ra}226,\text{mol}} = C_{\text{Ra}226}/M_{\text{Ra}226};$$

$$C_{\text{Pb}210,\text{mol}} = C_{\text{Pb}210}/M_{\text{Pb}210};$$

$$\lambda_{\text{Ra}226} = \ln(2)/(t_{\text{halfRa}226} * 365.25 * 24 * 3600);$$

$$\lambda_{\text{Pb}210} = \ln(2)/(t_{\text{halfPb}210} * 365.25 * 24 * 3600);$$

$$t = ((1/(\lambda_{\text{Ra}226} - \lambda_{\text{Pb}210})) * \ln(1 - ((\lambda_{\text{Pb}210}/\lambda_{\text{Ra}226}) - 1) * (C_{\text{Pb}210,\text{mol}}/C_{\text{Ra}226,\text{mol}}))) / (3600 * 24 * 365.25);$$

## Kvantitetslista

| Quantity                     | Unit | Definition                                                         |
|------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------|
| $I_{\text{cal.Blk.corr}}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringsblank                     |
| $I_{\text{cal.Blk.meas}}$    | cps  | Mätsignal, kalibreringsblank                                       |
| $\tau$                       | s    | Dödtid                                                             |
| $I_{\text{cal1.corr}}$       | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringspunkt 1                   |
| $I_{\text{cal1.meas}}$       | cps  | Mätsignal, kalibreringspunkt 1                                     |
| $I_{\text{cal2.corr}}$       | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringspunkt 2                   |
| $I_{\text{cal2.meas}}$       | cps  | Mätsignal, kalibreringspunkt 2                                     |
| $I_{\text{cal3.corr}}$       | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringspunkt 3                   |
| $I_{\text{cal3.meas}}$       | cps  | Mätsignal, kalibreringspunkt 3                                     |
| $I_{\text{cal4.corr}}$       | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringspunkt 4                   |
| $I_{\text{cal4.meas}}$       | cps  | Mätsignal, kalibreringspunkt 4                                     |
| $I_{\text{cal5.corr}}$       | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, kalibreringspunkt 5                   |
| $I_{\text{cal5.meas}}$       | cps  | Mätsignal, kalibreringspunkt 5                                     |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.corr}}$ | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringsblank   |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringsblank                     |
| $I_{\text{cal1.IS.corr}}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 1 |
| $I_{\text{cal1.IS.meas}}$    | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 1                   |
| $I_{\text{cal2.IS.corr}}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 2 |
| $I_{\text{cal2.IS.meas}}$    | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 2                   |
| $I_{\text{cal3.IS.corr}}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 3 |
| $I_{\text{cal3.IS.meas}}$    | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 3                   |
| $I_{\text{cal4.IS.corr}}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 4 |

| Quantity            | Unit | Definition                                                                  |
|---------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $I_{cal4.IS.meas}$  | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 4                            |
| $I_{cal5.IS.corr}$  | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 5          |
| $I_{cal5.IS.meas}$  | cps  | Mätsignal av internstandard, kalibreringspunkt 5                            |
| $I_{a.corr}$        | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, Ra-226 i provet                                |
| $I_{a.meas}$        | cps  | Mätsignal, Ra-226 i provet                                                  |
| $I_{a.IS.corr}$     | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal från internstandard i provet                    |
| $I_{a.IS.meas}$     | cps  | Mätsignal från internstandard i provet                                      |
| $I_{a.Blk.corr}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal, Ra-226 i blankprovet                           |
| $I_{a.Blk.meas}$    | cps  | Mätsignal, Ra-226 i blankprovet                                             |
| $I_{a.Blk.IS.corr}$ | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal från internstandard i blankprovet               |
| $I_{a.Blk.IS.meas}$ | cps  | Mätsignal från internstandard i blankprovet                                 |
| $I_{cal1}$          | cps  | Mätsignal från kalibreringspunkt 1, korrigerad för internstandard och blank |
| $m_{cal.Blk.IS}$    | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringsblank                    |
| $m_{cal1.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringspunkt 1                  |
| $I_{cal2}$          | cps  | Mätsignal från kalibreringspunkt 2, korrigerad för internstandard och blank |
| $m_{cal2.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringspunkt 2                  |
| $I_{cal3}$          | cps  | Mätsignal från kalibreringspunkt 3, korrigerad för internstandard och blank |
| $m_{cal3.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringspunkt 3                  |
| $I_{cal4}$          | cps  | Mätsignal från kalibreringspunkt 4, korrigerad för internstandard och blank |
| $m_{cal4.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringspunkt 4                  |
| $I_{cal5}$          | cps  | Mätsignal från kalibreringspunkt 5, korrigerad för internstandard och blank |
| $m_{cal5.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i kalibreringspunkt 5                  |
| $I_a$               | cps  | Mätsignal Ra-226, korrigerad för internstandard och blank                   |
| $m_{meas.IS}$       | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i provet                               |

| Quantity          | Unit | Definition                                                           |
|-------------------|------|----------------------------------------------------------------------|
| $m_{a.Blk.IS}$    | g    | Massa internstandardlösning tillsatt i blankprovet                   |
| $c_{a.s}$         | g/g  | Koncentration Ra-226 i provet                                        |
| $a$               |      | Kalibreringskurvans skärningspunkt                                   |
| $b$               |      | Kalibreringskurvans lutning                                          |
| $c_{Ra226}$       | g/g  | Koncentration Ra-226 i stamlösningen                                 |
| $m_{tot}$         | g    | Provets totala massa                                                 |
| $m_{Raprov}$      | g    | Massa stamlösning uttagen för spädning                               |
| $I_{korr.mb208}$  | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal för Pb-208 i massfraktioneringsmätningen |
| $I_{meas.mb208}$  | cps  | Mätsignal för Pb-208 i massfraktioneringsmätningen                   |
| $I_{bl.mb208}$    | cps  | Mätsignal för Pb-208 i blankprovet för massfraktioneringsmätningen   |
| $I_{korr.mb206}$  | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal för Pb-206 i massfraktioneringsmätningen |
| $I_{meas.mb206}$  | cps  | Mätsignal för Pb-206 i massfraktioneringsmätningen                   |
| $I_{bl.mb206}$    | cps  | Mätsignal för Pb-206 i blankprovet för massfraktioneringsmätningen   |
| $r_{mb208.mb206}$ |      | Beräknad kvot Pb-208/Pb-206 i massfraktioneringsmätningen            |
| $K$               |      | Massfraktioneringskorrektionsfaktor                                  |
| $R_{208.206}$     |      | Certifierad kvot Pb-208/Pb-206 i massfraktioneringsmätningen         |
| $\beta_{exp}$     |      | Massfraktionering/massenhet                                          |
| $I_{korr.208}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal i provet, Pb-208                         |
| $I_{meas.208}$    | cps  | Mätsignal i provet, Pb-208                                           |
| $I_{bl.208}$      | cps  | Mätsignal i blankprovet, Pb-208                                      |
| $I_{korr.210}$    | cps  | Dödtidskorrigerad mätsignal i provet, Pb-210                         |
| $I_{meas.210}$    | cps  | Mätsignal i provet, Pb-210                                           |
| $I_{bl.210}$      | cps  | Mätsignal i blankprovet, Pb-210                                      |
| $R_{210.208}$     |      | Den beräknade kvoten Pb-210/Pb-208 i provet                          |

| Quantity                 | Unit  | Definition                                                |
|--------------------------|-------|-----------------------------------------------------------|
| $c_{\text{Pb208.Sp1}}$   | g/g   | Koncentration Pb-208 i spädning 1, NIST SRM3128           |
| $c_{\text{Pb208}}$       | g/g   | Koncentration Pb-208 i stamlösning, NIST SRM3128          |
| $m_{\text{Sp1}}$         | g     | Massa av stamlösning, NIST SRM3128 uttaget för spädning 1 |
| $m_{\text{tot.Sp1}}$     | g     | Total massa spädning 1, NIST SRM3128                      |
| $c_{\text{Pb208.Sp2}}$   | g/g   | Koncentration Pb208 i spädning 2, NIST SRM3128            |
| $m_{\text{Sp2}}$         | g     | Massa av spädning 1, NIST SRM3128 uttaget för spädning 2  |
| $m_{\text{tot.Sp2}}$     | g     | Total massa spädning 2, NIST SRM3128                      |
| $m_{\text{Pb210}}$       | g     | Massa uppmätt Pb-210 i provet                             |
| $m_{\text{Pb208}}$       | g     | Massa tillsatt Pb-208 i provet                            |
| $m_{\text{spik}}$        | g     | Massa tillsatt av spädning 2                              |
| $c_{\text{Pb210}}$       | g/g   | Koncentration Pb-210 i Ra-226-stamlösningen               |
| $m_{\text{Pbprov}}$      | g     | Massa uttaget prov av stamlösning för blymätning          |
| $c_{\text{Ra226.mol}}$   | mol/g | Koncentration Ra-226 i stamlösning i mol/g                |
| $M_{\text{Ra226}}$       | g/mol | Molmassa Ra-226                                           |
| $c_{\text{Pb210.mol}}$   | mol/g | Koncentration Pb-210 i stamlösning i mol/g                |
| $M_{\text{Pb210}}$       | g/mol | Molmassa Pb-210                                           |
| $\lambda_{\text{Ra226}}$ | s-1   | Sönderfallskonstant för Ra-26                             |
| $t_{\text{halfRa226}}$   | y     | Halveringstid för Ra-226                                  |
| $\lambda_{\text{Pb210}}$ | s-1   | Sönderfallskonstant för Pb-210                            |
| $t_{\text{halfPb210}}$   | y     | Halveringstid för Pb-210                                  |
| $t$                      | år    | Materialets ålder                                         |

## Osäkerhetsbudgetar

### I<sub>cal1</sub> - Mätsignal från kalibreringspunkt 1, korrigerad för internstandard och blank

| Quantity                     | Value                       | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| I <sub>cal.Blk.corr</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal.Blk.meas</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          | normal       | -1.0                    | -1.6 cps                 | 0.0 %  |
| $\tau$                       | 25.00·10 <sup>-9</sup> s    | 4.8 % (rel)          | normal       | 1.0·10 <sup>9</sup>     | 1.3 cps                  | 0.0 %  |
| I <sub>cal1.corr</sub>       | 32219.0 cps                 | 0.19 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal1.meas</sub>       | 32193.1 cps                 | 0.19 % (rel)         | normal       | 1.0                     | 61 cps                   | 39.3 % |
| I <sub>cal.Blk.IS.corr</sub> | 394.228·10 <sup>3</sup> cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal.Blk.IS.meas</sub> | 390.381·10 <sup>3</sup> cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 0.083                   | 25 cps                   | 6.7 %  |
| I <sub>cal1.IS.corr</sub>    | 393.943·10 <sup>3</sup> cps | 0.091 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal1.IS.meas</sub>    | 390.101·10 <sup>3</sup> cps | 0.077 % (rel)        | normal       | -0.083                  | -25 cps                  | 6.5 %  |
| m <sub>cal.Blk.IS</sub>      | 0.101100 g                  | 0.15 % (rel)         | normal       | -320·10 <sup>3</sup>    | -48 cps                  | 23.6 % |
| m <sub>cal1.IS</sub>         | 0.100600 g                  | 0.15 % (rel)         | normal       | 320·10 <sup>3</sup>     | 48 cps                   | 23.8 % |
| I <sub>cal1</sub>            | 32058.1 cps                 | 98.0 cps             |              |                         |                          |        |

### I<sub>cal2</sub> -Mätsignal från kalibreringspunkt 2, korrigerad för internstandard och blank

| Quantity                     | Value                       | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| I <sub>cal.Blk.corr</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal.Blk.meas</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          | normal       | -1.0                    | -1.6 cps                 | 0.0 %  |
| $\tau$                       | 25.00·10 <sup>-9</sup> s    | 4.8 % (rel)          | normal       | 27·10 <sup>9</sup>      | 33 cps                   | 0.6 %  |
| I <sub>cal2.corr</sub>       | 166.506·10 <sup>3</sup> cps | 0.11 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal2.meas</sub>       | 165.816·10 <sup>3</sup> cps | 0.10 % (rel)         | normal       | 1.0                     | 170 cps                  | 16.1 % |
| I <sub>cal.Blk.IS.corr</sub> | 394.228·10 <sup>3</sup> cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                          |        |

| Quantity                     | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | $390.381 \cdot 10^3$ cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 0.43                    | 130 cps                  | 9.3 %  |
| $I_{\text{cal2.IS.corr}}$    | $395.470 \cdot 10^3$ cps | 0.091 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal2.IS.meas}}$    | $391.599 \cdot 10^3$ cps | 0.077 % (rel)        | normal       | -0.43                   | -130 cps                 | 8.9 %  |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$      | 0.101100 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $-1.6 \cdot 10^6$       | -250 cps                 | 32.5 % |
| $m_{\text{cal2.IS}}$         | 0.100800 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $1.6 \cdot 10^6$        | 250 cps                  | 32.7 % |
| $I_{\text{cal2}}$            | $165.466 \cdot 10^3$ cps | 431 cps              |              |                         |                          |        |

 **$I_{\text{cal3}}$  - Mätsignal från kalibreringspunkt 3, korrigerad för internstandard och blank**

| Quantity                     | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $I_{\text{cal.Blk.corr}}$    | 24.80 cps                | 6.5 % (rel)          |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal.Blk.meas}}$    | 24.80 cps                | 6.5 % (rel)          | normal       | -1.0                    | -1.6 cps                 | 0.0 %  |
| $\tau$                       | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s  | 4.8 % (rel)          | normal       | $70 \cdot 10^9$         | 84 cps                   | 1.5 %  |
| $I_{\text{cal3.corr}}$       | $265.050 \cdot 10^3$ cps | 0.095 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal3.meas}}$       | $263.305 \cdot 10^3$ cps | 0.089 % (rel)        | normal       | 1.0                     | 240 cps                  | 12.5 % |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.corr}}$ | $394.228 \cdot 10^3$ cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | $390.381 \cdot 10^3$ cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 0.69                    | 210 cps                  | 9.7 %  |
| $I_{\text{cal3.IS.corr}}$    | $395.753 \cdot 10^3$ cps | 0.088 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal3.IS.meas}}$    | $391.875 \cdot 10^3$ cps | 0.073 % (rel)        | normal       | -0.68                   | -190 cps                 | 8.4 %  |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$      | 0.101100 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $-2.6 \cdot 10^6$       | -390 cps                 | 34.1 % |
| $m_{\text{cal3.IS}}$         | 0.101500 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $2.6 \cdot 10^6$        | 390 cps                  | 33.8 % |
| $I_{\text{cal3}}$            | $265.049 \cdot 10^3$ cps | 674 cps              |              |                         |                          |        |

**I<sub>cal4</sub> - Mätsignal från kalibreringspunkt 4, korrigerad för internstandard och blank**

| Quantity                     | Value                       | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| I <sub>cal.Blk.corr</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal.Blk.meas</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          | normal       | -1.0                    | -1.6 cps                 | 0.0 %  |
| $\tau$                       | 25.00·10 <sup>-9</sup> s    | 4.8 % (rel)          | normal       | 150·10 <sup>9</sup>     | 180 cps                  | 3.3 %  |
| I <sub>cal4.corr</sub>       | 387.248·10 <sup>3</sup> cps | 0.094 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal4.meas</sub>       | 383.535·10 <sup>3</sup> cps | 0.081 % (rel)        | normal       | 1.0                     | 310 cps                  | 10.4 % |
| I <sub>cal.Blk.IS.corr</sub> | 394.228·10 <sup>3</sup> cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal.Blk.IS.meas</sub> | 390.381·10 <sup>3</sup> cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 0.99                    | 300 cps                  | 9.8 %  |
| I <sub>cal4.IS.corr</sub>    | 398.414·10 <sup>3</sup> cps | 0.087 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| I <sub>cal4.IS.meas</sub>    | 394.484·10 <sup>3</sup> cps | 0.072 % (rel)        | normal       | -0.98                   | -280 cps                 | 8.2 %  |
| m <sub>cal.Blk.IS</sub>      | 0.101100 g                  | 0.15 % (rel)         | normal       | -3.8·10 <sup>6</sup>    | -570 cps                 | 34.2 % |
| m <sub>cal4.IS</sub>         | 0.101300 g                  | 0.15 % (rel)         | normal       | 3.8·10 <sup>6</sup>     | 570 cps                  | 34.1 % |
| I <sub>cal4</sub>            | 383.913·10 <sup>3</sup> cps | 974 cps              |              |                         |                          |        |

**I<sub>cal5</sub> - Mätsignal från kalibreringspunkt 5, korrigerad för internstandard och blank**

| Quantity                     | Value                       | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|-------|
| I <sub>cal.Blk.corr</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          |              |                         |                          |       |
| I <sub>cal.Blk.meas</sub>    | 24.80 cps                   | 6.5 % (rel)          | normal       | -1.0                    | -1.6 cps                 | 0.0 % |
| $\tau$                       | 25.00·10 <sup>-9</sup> s    | 4.8 % (rel)          | normal       | 280·10 <sup>9</sup>     | 340 cps                  | 6.2 % |
| I <sub>cal5.corr</sub>       | 532.141·10 <sup>3</sup> cps | 0.10 % (rel)         |              |                         |                          |       |
| I <sub>cal5.meas</sub>       | 525.154·10 <sup>3</sup> cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 1.0                     | 420 cps                  | 9.6 % |
| I <sub>cal.Blk.IS.corr</sub> | 394.228·10 <sup>3</sup> cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                          |       |
| I <sub>cal.Blk.IS.meas</sub> | 390.381·10 <sup>3</sup> cps | 0.078 % (rel)        | normal       | 1.4                     | 420 cps                  | 9.6 % |

| Quantity                  | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $I_{\text{cal5.IS.corr}}$ | $394.842 \cdot 10^3$ cps | 0.082 % (rel)        |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{cal5.IS.meas}}$ | $390.982 \cdot 10^3$ cps | 0.067 % (rel)        | normal       | -1.4                    | -360 cps                 | 7.0 %  |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$   | 0.101100 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $-5.3 \cdot 10^6$       | -790 cps                 | 33.8 % |
| $m_{\text{cal5.IS}}$      | 0.101300 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $5.3 \cdot 10^6$        | 790 cps                  | 33.7 % |
| $I_{\text{cal5}}$         | $532.34 \cdot 10^3$ cps  | 1360 cps             |              |                         |                          |        |

**cRa226 - Koncentration Ra-226 i stamlösningen**

| Quantity                     | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution  | Index  |
|------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------|
| $\tau$                       | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s  | 4.8 % (rel)          | normal       | $6.8 \cdot 10^{-3}$     | $8.2 \cdot 10^{-12}$ g/g  | 0.9 %  |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.corr}}$ | $394.228 \cdot 10^3$ cps | 0.092 % (rel)        |              |                         |                           |        |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | $390.381 \cdot 10^3$ cps | 0.078 % (rel)        | normal       | $60 \cdot 10^{-15}$     | $19 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 4.7 %  |
| $I_{\text{a.corr}}$          | $293.338 \cdot 10^3$ cps | 0.098 % (rel)        |              |                         |                           |        |
| $I_{\text{a.meas}}$          | $291.202 \cdot 10^3$ cps | 0.090 % (rel)        | normal       | $81 \cdot 10^{-15}$     | $21 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 6.2 %  |
| $I_{\text{a.IS.corr}}$       | $394.730 \cdot 10^3$ cps | 0.090 % (rel)        |              |                         |                           |        |
| $I_{\text{a.IS.meas}}$       | $390.872 \cdot 10^3$ cps | 0.076 % (rel)        | normal       | $-60 \cdot 10^{-15}$    | $-18 \cdot 10^{-12}$ g/g  | 4.4 %  |
| $I_{\text{a.Blk.corr}}$      | 45.48 cps                | 4.8 % (rel)          |              |                         |                           |        |
| $I_{\text{a.Blk.meas}}$      | 45.48 cps                | 4.8 % (rel)          | normal       | $-79 \cdot 10^{-15}$    | $-170 \cdot 10^{-15}$ g/g | 0.0 %  |
| $I_{\text{a.Blk.IS.corr}}$   | $391.215 \cdot 10^3$ cps | 0.090 % (rel)        |              |                         |                           |        |
| $I_{\text{a.Blk.IS.meas}}$   | $387.426 \cdot 10^3$ cps | 0.076 % (rel)        | normal       | $9.3 \cdot 10^{-18}$    | $2.7 \cdot 10^{-15}$ g/g  | 0.0 %  |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$      | 0.101100 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $-230 \cdot 10^{-9}$    | $-35 \cdot 10^{-12}$ g/g  | 16.4 % |
| $I_{\text{a}}$               | $292.341 \cdot 10^3$ cps | 0.26 % (rel)         |              |                         |                           |        |
| $m_{\text{meas.IS}}$         | 0.100900 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $230 \cdot 10^{-9}$     | $35 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 16.4 % |
| $m_{\text{a.Blk.IS}}$        | 0.098700 g               | 0.15 % (rel)         | normal       | $-36 \cdot 10^{-12}$    | $-5.4 \cdot 10^{-15}$ g/g | 0.0 %  |

| Quantity            | Value                                | Standard Uncertainty              | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution         | Index  |
|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------------|--------|
| $c_{a,s}$           | $240.465 \cdot 10^{-12} \text{ g/g}$ | 0.34 % (rel)                      |              |                         |                                  |        |
| a                   | -553                                 | 30 % (rel)                        | normal       | $-80 \cdot 10^{-15}$    | $-13 \cdot 10^{-12} \text{ g/g}$ | 2.5 %  |
| b                   | $1.21803 \cdot 10^{15}$              | 0.21 % (rel)                      | normal       | $-19 \cdot 10^{-24}$    | $-49 \cdot 10^{-12} \text{ g/g}$ | 33.1 % |
| $m_{\text{tot}}$    | 10.118600 g                          | $1.5 \cdot 10^{-3} \%$ (rel)      | normal       | $2.3 \cdot 10^{-9}$     | $350 \cdot 10^{-15} \text{ g/g}$ | 0.0 %  |
| $m_{\text{Raprov}}$ | 0.103900 g                           | 0.14 % (rel)                      | normal       | $-230 \cdot 10^{-9}$    | $-34 \cdot 10^{-12} \text{ g/g}$ | 15.5 % |
| $c_{\text{Ra226}}$  | $23.4184 \cdot 10^{-9} \text{ g/g}$  | $85.8 \cdot 10^{-12} \text{ g/g}$ |              |                         |                                  |        |

 **$\beta_{\text{exp}}$  - Massfraktionering/massenhet**

| Quantity                 | Value                            | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $\tau$                   | $25.00 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  | 4.8 % (rel)          | normal       | $88 \cdot 10^6$         | 0.11                     | 49.5 % |
| $I_{\text{korrr.mb208}}$ | $1.57119 \cdot 10^6 \text{ cps}$ | 0.20 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas.mb208}}$  | $1.51339 \cdot 10^6 \text{ cps}$ | 0.068 % (rel)        | normal       | $71 \cdot 10^{-6}$      | 0.073                    | 23.8 % |
| $I_{\text{bl.mb208}}$    | 1709.29 cps                      | 0.56 % (rel)         | normal       | $-66 \cdot 10^{-6}$     | $-630 \cdot 10^{-6}$     | 0.0 %  |
| $I_{\text{korrr.mb206}}$ | $727.313 \cdot 10^3 \text{ cps}$ | 0.11 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas.mb206}}$  | $715.106 \cdot 10^3 \text{ cps}$ | 0.071 % (rel)        | normal       | $-150 \cdot 10^{-6}$    | -0.075                   | 25.0 % |
| $I_{\text{bl.mb206}}$    | 809.92 cps                       | 0.70 % (rel)         | normal       | $140 \cdot 10^{-6}$     | $810 \cdot 10^{-6}$      | 0.0 %  |
| $r_{\text{mb208.mb206}}$ | 2.16027                          | 0.14 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| K                        | 1.00363                          | 0.14 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $R_{208,206}$            | 2.168100                         | 0.018 % (rel)        | normal       | -48                     | -0.019                   | 1.6 %  |
| $\beta_{\text{exp}}$     | -0.375                           | 0.149                |              |                         |                          |        |

**R<sub>210,208</sub> - Den beräknade kvoten Pb-210/Pb-208 i provet**

| Quantity                  | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $\tau$                    | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s  | 4.8 % (rel)          | normal       | -43000                  | $-52 \cdot 10^{-6}$      | 53.3 % |
| $I_{\text{kor. mb208}}$   | $1.57119 \cdot 10^6$ cps | 0.20 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas. mb208}}$  | $1.51339 \cdot 10^6$ cps | 0.068 % (rel)        | normal       | $-14 \cdot 10^{-9}$     | $-14 \cdot 10^{-6}$      | 4.1 %  |
| $I_{\text{bl. mb208}}$    | 1709.29 cps              | 0.56 % (rel)         | normal       | $13 \cdot 10^{-9}$      | $130 \cdot 10^{-9}$      | 0.0 %  |
| $I_{\text{kor. mb206}}$   | $727.313 \cdot 10^3$ cps | 0.11 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas. mb206}}$  | $715.106 \cdot 10^3$ cps | 0.071 % (rel)        | normal       | $29 \cdot 10^{-9}$      | $15 \cdot 10^{-6}$       | 4.3 %  |
| $I_{\text{bl. mb206}}$    | 809.92 cps               | 0.70 % (rel)         | normal       | $-28 \cdot 10^{-9}$     | $-160 \cdot 10^{-9}$     | 0.0 %  |
| $r_{\text{mb208. mb206}}$ | 2.16027                  | 0.14 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| K                         | 1.00363                  | 0.14 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $R_{208,206}$             | 2.168100                 | 0.018 % (rel)        | normal       | $9.4 \cdot 10^{-3}$     | $3.8 \cdot 10^{-6}$      | 0.3 %  |
| $I_{\text{kor. 208}}$     | $803.62 \cdot 10^3$ cps  | 0.22 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas. 208}}$    | $984.96 \cdot 10^3$ cps  | 0.12 % (rel)         | normal       | $-27 \cdot 10^{-9}$     | $-32 \cdot 10^{-6}$      | 20.5 % |
| $I_{\text{bl. 208}}$      | $206.209 \cdot 10^3$ cps | 0.17 % (rel)         | normal       | $26 \cdot 10^{-9}$      | $8.8 \cdot 10^{-6}$      | 1.6 %  |
| $I_{\text{kor. 210}}$     | 16382.1 cps              | 0.14 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $I_{\text{meas. 210}}$    | 16382.0 cps              | 0.14 % (rel)         | normal       | $1.3 \cdot 10^{-6}$     | $28 \cdot 10^{-6}$       | 15.9 % |
| $I_{\text{bl. 210}}$      | 6.667 cps                | 5.9 % (rel)          | normal       | $-1.3 \cdot 10^{-6}$    | $-500 \cdot 10^{-9}$     | 0.0 %  |
| $R_{210,208}$             | 0.0206553                | $71.0 \cdot 10^{-6}$ |              |                         |                          |        |

**CRa226.mol - Koncentration Ra-226 i stamlösning i mol/g**

| Quantity                     | Value                        | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution    | Index  |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| $\tau$                       | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s      | 4.8 % (rel)                 | normal       | $30 \cdot 10^{-6}$      | $36 \cdot 10^{-15}$ mol/g   | 0.9 %  |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.corr}}$ | $394.228 \cdot 10^3$ cps     | 0.092 % (rel)               |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | $390.381 \cdot 10^3$ cps     | 0.078 % (rel)               | normal       | $270 \cdot 10^{-18}$    | $82 \cdot 10^{-15}$ mol/g   | 4.7 %  |
| $I_{\text{a.corr}}$          | $293.338 \cdot 10^3$ cps     | 0.098 % (rel)               |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{a.meas}}$          | $291.202 \cdot 10^3$ cps     | 0.090 % (rel)               | normal       | $360 \cdot 10^{-18}$    | $94 \cdot 10^{-15}$ mol/g   | 6.2 %  |
| $I_{\text{a.IS.corr}}$       | $394.730 \cdot 10^3$ cps     | 0.090 % (rel)               |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{a.IS.meas}}$       | $390.872 \cdot 10^3$ cps     | 0.076 % (rel)               | normal       | $-270 \cdot 10^{-18}$   | $-79 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 4.4 %  |
| $I_{\text{a.Blk.corr}}$      | 45.48 cps                    | 4.8 % (rel)                 |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{a.Blk.meas}}$      | 45.48 cps                    | 4.8 % (rel)                 | normal       | $-350 \cdot 10^{-18}$   | $-760 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 0.0 %  |
| $I_{\text{a.Blk.IS.corr}}$   | $391.215 \cdot 10^3$ cps     | 0.090 % (rel)               |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{a.Blk.IS.meas}}$   | $387.426 \cdot 10^3$ cps     | 0.076 % (rel)               | normal       | $41 \cdot 10^{-21}$     | $12 \cdot 10^{-18}$ mol/g   | 0.0 %  |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$      | 0.101100 g                   | 0.15 % (rel)                | normal       | $-1.0 \cdot 10^{-9}$    | $-150 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 16.4 % |
| $I_{\text{a}}$               | $292.341 \cdot 10^3$ cps     | 0.26 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{meas.IS}}$         | 0.100900 g                   | 0.15 % (rel)                | normal       | $1.0 \cdot 10^{-9}$     | $150 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 16.4 % |
| $m_{\text{a.Blk.IS}}$        | 0.098700 g                   | 0.15 % (rel)                | normal       | $-160 \cdot 10^{-15}$   | $-24 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 0.0 %  |
| $c_{\text{a.s}}$             | $240.465 \cdot 10^{-12}$ g/g | 0.34 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| a                            | -553                         | 30 % (rel)                  | normal       | $-350 \cdot 10^{-18}$   | $-59 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 2.5 %  |
| b                            | $1.21803 \cdot 10^{15}$      | 0.21 % (rel)                | normal       | $-85 \cdot 10^{-27}$    | $-220 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 33.1 % |
| $m_{\text{tot}}$             | 10.118600 g                  | $1.5 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | $10 \cdot 10^{-12}$     | $1.5 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 0.0 %  |

| Quantity               | Value                          | Standard Uncertainty       | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution    | Index  |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| $m_{\text{Raprov}}$    | 0.103900 g                     | 0.14 % (rel)               | normal       | $-1.0 \cdot 10^{-9}$    | $-150 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 15.5 % |
| $M_{\text{Ra226}}$     | 226.0254085 g/mol              |                            |              |                         |                             |        |
| $c_{\text{Ra226.mol}}$ | $103.610 \cdot 10^{-12}$ mol/g | $379 \cdot 10^{-15}$ mol/g |              |                         |                             |        |

**CPb210.mol - Koncentration Pb-210 i stamlösning i mol/g**

| Quantity                 | Value                    | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution    | Index  |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| $\tau$                   | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s  | 4.8 % (rel)          | normal       | $-2.3 \cdot 10^{-6}$    | $-2.8 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 41.4 % |
| $I_{\text{korrr.mb208}}$ | $1.57119 \cdot 10^6$ cps | 0.20 % (rel)         |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{meas.mb208}}$  | $1.51339 \cdot 10^6$ cps | 0.068 % (rel)        | normal       | $-750 \cdot 10^{-21}$   | $-770 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 3.2 %  |
| $I_{\text{bl.mb208}}$    | 1709.29 cps              | 0.56 % (rel)         | normal       | $700 \cdot 10^{-21}$    | $6.7 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 0.0 %  |
| $I_{\text{korrr.mb206}}$ | $727.313 \cdot 10^3$ cps | 0.11 % (rel)         |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{meas.mb206}}$  | $715.106 \cdot 10^3$ cps | 0.071 % (rel)        | normal       | $1.6 \cdot 10^{-18}$    | $790 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 3.4 %  |
| $I_{\text{bl.mb206}}$    | 809.92 cps               | 0.70 % (rel)         | normal       | $-1.5 \cdot 10^{-18}$   | $-8.6 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 0.0 %  |
| $r_{\text{mb208.mb206}}$ | 2.16027                  | 0.14 % (rel)         |              |                         |                             |        |
| K                        | 1.00363                  | 0.14 % (rel)         |              |                         |                             |        |
| $R_{208.206}$            | 2.168100                 | 0.018 % (rel)        | normal       | $510 \cdot 10^{-15}$    | $200 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 0.2 %  |
| $I_{\text{korrr.208}}$   | $803.62 \cdot 10^3$ cps  | 0.22 % (rel)         |              |                         |                             |        |
| $I_{\text{meas.208}}$    | $984.96 \cdot 10^3$ cps  | 0.12 % (rel)         | normal       | $-1.4 \cdot 10^{-18}$   | $-1.7 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 15.9 % |
| $I_{\text{bl.208}}$      | $206.209 \cdot 10^3$ cps | 0.17 % (rel)         | normal       | $1.4 \cdot 10^{-18}$    | $470 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 1.2 %  |
| $I_{\text{korrr.210}}$   | 16382.1 cps              | 0.14 % (rel)         |              |                         |                             |        |

| Quantity                      | Value                          | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution    | Index  |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| $I_{\text{meas},210}$         | 16382.0 cps                    | 0.14 % (rel)                | normal       | $68 \cdot 10^{-18}$     | $1.5 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 12.3 % |
| $I_{\text{bl},210}$           | 6.667 cps                      | 5.9 % (rel)                 | normal       | $-68 \cdot 10^{-18}$    | $-27 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 0.0 %  |
| $C_{\text{Pb}208,\text{Sp}1}$ | $5.42124 \cdot 10^{-6}$ g/g    | 0.17 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $C_{\text{Pb}208}$            | $5.24800 \cdot 10^{-3}$ g/g    | 0.095 % (rel)               | normal       | $210 \cdot 10^{-12}$    | $1.1 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 6.0 %  |
| $m_{\text{Sp}1}$              | 0.107600 g                     | 0.14 % (rel)                | normal       | $10 \cdot 10^{-12}$     | $1.5 \cdot 10^{-15}$ mol/g  | 12.8 % |
| $m_{\text{tot},\text{Sp}1}$   | 104.161500 g                   | $140 \cdot 10^{-6}$ % (rel) | normal       | $-11 \cdot 10^{-15}$    | $-1.6 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 0.0 %  |
| $C_{\text{Pb}208,\text{Sp}2}$ | $55.8235 \cdot 10^{-9}$ g/g    | 0.17 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{Sp}2}$              | 1.060700 g                     | 0.014 % (rel)               | normal       | $1.0 \cdot 10^{-12}$    | $160 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 0.1 %  |
| $m_{\text{tot},\text{Sp}2}$   | 103.008900 g                   | $150 \cdot 10^{-6}$ % (rel) | normal       | $-11 \cdot 10^{-15}$    | $-1.6 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 0.0 %  |
| $m_{\text{Pb}210}$            | $240.412 \cdot 10^{-12}$ g     | 0.39 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{Pb}208}$            | $11.6392 \cdot 10^{-9}$ g      | 0.18 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{spik}}$             | 0.208500 g                     | 0.072 % (rel)               | normal       | $5.3 \cdot 10^{-12}$    | $800 \cdot 10^{-18}$ mol/g  | 3.4 %  |
| $C_{\text{Pb}210}$            | $232.484 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 0.39 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{Pbprov}}$           | 1.034100 g                     | 0.015 % (rel)               | normal       | $-1.1 \cdot 10^{-12}$   | $-160 \cdot 10^{-18}$ mol/g | 0.1 %  |
| $M_{\text{Pb}210}$            | 209.9841883 g/mol              |                             |              |                         |                             |        |
| $C_{\text{Pb}210,\text{mol}}$ | $1.10715 \cdot 10^{-12}$ mol/g | $4.32 \cdot 10^{-15}$ mol/g |              |                         |                             |        |

**t - Materialets ålder**

| Quantity | Value                   | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|----------|-------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $\tau$   | $25.00 \cdot 10^{-9}$ s | 4.8 % (rel)          | normal       | $-240 \cdot 10^6$       | -0.29 år                 | 13.9 % |

| Quantity                     | Value                           | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index |
|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|-------|
| $I_{\text{cal.Blk.IS.corr}}$ | $394.228 \cdot 10^3$ cps        | 0.092 % (rel)               |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{cal.Blk.IS.meas}}$ | $390.381 \cdot 10^3$ cps        | 0.078 % (rel)               | normal       | $-260 \cdot 10^{-6}$    | -0.081 år                | 1.1 % |
| $I_{\text{a.corr}}$          | $293.338 \cdot 10^3$ cps        | 0.098 % (rel)               |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{a.meas}}$          | $291.202 \cdot 10^3$ cps        | 0.090 % (rel)               | normal       | $-350 \cdot 10^{-6}$    | -0.093 år                | 1.4 % |
| $I_{\text{a.IS.corr}}$       | $394.730 \cdot 10^3$ cps        | 0.090 % (rel)               |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{a.IS.meas}}$       | $390.872 \cdot 10^3$ cps        | 0.076 % (rel)               | normal       | $260 \cdot 10^{-6}$     | 0.078 år                 | 1.0 % |
| $I_{\text{a.Blk.corr}}$      | 45.48 cps                       | 4.8 % (rel)                 |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{a.Blk.meas}}$      | 45.48 cps                       | 4.8 % (rel)                 | normal       | $340 \cdot 10^{-6}$     | $750 \cdot 10^{-6}$ år   | 0.0 % |
| $I_{\text{a.Blk.IS.corr}}$   | $391.215 \cdot 10^3$ cps        | 0.090 % (rel)               |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{a.Blk.IS.meas}}$   | $387.426 \cdot 10^3$ cps        | 0.076 % (rel)               | normal       | $-41 \cdot 10^{-9}$     | $-12 \cdot 10^{-6}$ år   | 0.0 % |
| $m_{\text{cal.Blk.IS}}$      | 0.101100 g                      | 0.15 % (rel)                | normal       | 1000                    | 0.15 år                  | 3.7 % |
| $I_{\text{a}}$               | $292.341 \cdot 10^3$ cps        | 0.26 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $m_{\text{meas.IS}}$         | 0.100900 g                      | 0.15 % (rel)                | normal       | -1000                   | -0.15 år                 | 3.7 % |
| $m_{\text{a.Blk.IS}}$        | 0.098700 g                      | 0.15 % (rel)                | normal       | 0.16                    | $24 \cdot 10^{-6}$ år    | 0.0 % |
| $c_{\text{a.s}}$             | $240.465 \cdot 10^{-12}$<br>g/g | 0.34 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| a                            | -553                            | 30 % (rel)                  | normal       | $350 \cdot 10^{-6}$     | 0.059 år                 | 0.6 % |
| b                            | $1.21803 \cdot 10^{15}$         | 0.21 % (rel)                | normal       | $84 \cdot 10^{-15}$     | 0.22 år                  | 7.6 % |
| $m_{\text{tot}}$             | 10.118600 g                     | $1.5 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | -10                     | $-1.5 \cdot 10^{-3}$ år  | 0.0 % |
| $m_{\text{Raprov}}$          | 0.103900 g                      | 0.14 % (rel)                | normal       | 980                     | 0.15 år                  | 3.5 % |
| $I_{\text{korrr.mb208}}$     | $1.57119 \cdot 10^6$ cps        | 0.20 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{meas.mb208}}$      | $1.51339 \cdot 10^6$ cps        | 0.068 % (rel)               | normal       | $-70 \cdot 10^{-6}$     | -0.071 år                | 0.8 % |
| $I_{\text{bl.mb208}}$        | 1709.29 cps                     | 0.56 % (rel)                | normal       | $64 \cdot 10^{-6}$      | $620 \cdot 10^{-6}$ år   | 0.0 % |

| Quantity                 | Value                       | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|-------|
| $I_{\text{korrr.mb206}}$ | $727.313 \cdot 10^3$ cps    | 0.11 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{meas.mb206}}$  | $715.106 \cdot 10^3$ cps    | 0.071 % (rel)               | normal       | $140 \cdot 10^{-6}$     | 0.073 år                 | 0.9 % |
| $I_{\text{bl.mb206}}$    | 809.92 cps                  | 0.70 % (rel)                | normal       | $-140 \cdot 10^{-6}$    | $-790 \cdot 10^{-6}$ år  | 0.0 % |
| $r_{\text{mb208.mb206}}$ | 2.16027                     | 0.14 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| K                        | 1.00363                     | 0.14 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $R_{208.206}$            | 2.168100                    | 0.018 % (rel)               | normal       | 47                      | 0.019 år                 | 0.0 % |
| $I_{\text{korrr.208}}$   | $803.62 \cdot 10^3$ cps     | 0.22 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{meas.208}}$    | $984.96 \cdot 10^3$ cps     | 0.12 % (rel)                | normal       | $-130 \cdot 10^{-6}$    | -0.16 år                 | 4.1 % |
| $I_{\text{bl.208}}$      | $206.209 \cdot 10^3$ cps    | 0.17 % (rel)                | normal       | $130 \cdot 10^{-6}$     | 0.044 år                 | 0.3 % |
| $I_{\text{korrr.210}}$   | 16382.1 cps                 | 0.14 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $I_{\text{meas.210}}$    | 16382.0 cps                 | 0.14 % (rel)                | normal       | $6.2 \cdot 10^{-3}$     | 0.14 år                  | 3.2 % |
| $I_{\text{bl.210}}$      | 6.667 cps                   | 5.9 % (rel)                 | normal       | $-6.2 \cdot 10^{-3}$    | $-2.5 \cdot 10^{-3}$ år  | 0.0 % |
| $c_{\text{Pb208.Sp1}}$   | $5.42124 \cdot 10^{-6}$ g/g | 0.17 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $c_{\text{Pb208}}$       | $5.24800 \cdot 10^{-3}$ g/g | 0.095 % (rel)               | normal       | 19000                   | 0.097 år                 | 1.5 % |
| $m_{\text{Sp1}}$         | 0.107600 g                  | 0.14 % (rel)                | normal       | 950                     | 0.14 år                  | 3.3 % |
| $m_{\text{tot.Sp1}}$     | 104.161500 g                | $140 \cdot 10^{-6}$ % (rel) | normal       | -0.98                   | $-150 \cdot 10^{-6}$ år  | 0.0 % |
| $c_{\text{Pb208.Sp2}}$   | $55.8235 \cdot 10^{-9}$ g/g | 0.17 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $m_{\text{Sp2}}$         | 1.060700 g                  | 0.014 % (rel)               | normal       | 96                      | 0.014 år                 | 0.0 % |
| $m_{\text{tot.Sp2}}$     | 103.008900 g                | $150 \cdot 10^{-6}$ % (rel) | normal       | -0.99                   | $-150 \cdot 10^{-6}$ år  | 0.0 % |
| $m_{\text{Pb210}}$       | $240.412 \cdot 10^{-12}$ g  | 0.39 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $m_{\text{Pb208}}$       | $11.6392 \cdot 10^{-9}$ g   | 0.18 % (rel)                |              |                         |                          |       |
| $m_{\text{spik}}$        | 0.208500 g                  | 0.072 % (rel)               | normal       | 490                     | 0.073 år                 | 0.9 % |
| $c_{\text{Pb210}}$       | $232.484 \cdot 10^{-12}$    | 0.39 % (rel)                |              |                         |                          |       |

| Quantity                 | Value                                   | Standard<br>Uncertainty | Distribution | Sensitivity<br>Coefficient | Uncertainty<br>Contribution | Index  |
|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|--------|
|                          | g/g                                     |                         |              |                            |                             |        |
| $m_{\text{Pbprov}}$      | 1.034100 g                              | 0.015 % (rel)           | normal       | -99                        | -0.015 år                   | 0.0 %  |
| $M_{\text{Ra226}}$       | 226.0254085<br>g/mol                    |                         |              |                            |                             |        |
| $M_{\text{Pb210}}$       | 209.9841883<br>g/mol                    |                         |              |                            |                             |        |
| $\lambda_{\text{Ra226}}$ | $13.7278 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ | 0.44 % (rel)            |              |                            |                             |        |
| $t_{\text{halfRa226}}$   | 1600.00 y                               | 0.44 % (rel)            | normal       | 0.064                      | 0.45 år                     | 33.1 % |
| $\lambda_{\text{Pb210}}$ | $988.06 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  | 0.54 % (rel)            |              |                            |                             |        |
| $t_{\text{halfPb210}}$   | 22.230 y                                | 0.54 % (rel)            | normal       | -2.6                       | -0.31 år                    | 15.3 % |
| t                        | 46.201 år                               | 0.783 år                |              |                            |                             |        |

**Resultat**

| Quantity               | Value                         | Expanded Uncertainty       | Coverage factor | Coverage     |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------|
| $I_{\text{cal1}}$      | 32060 cps                     | 200 cps                    | 2.00            | 95% (normal) |
| $I_{\text{cal2}}$      | $165.47 \cdot 10^3$ cps       | 860 cps                    | 2.00            | 95% (normal) |
| $I_{\text{cal3}}$      | $265.0 \cdot 10^3$ cps        | 1300 cps                   | 2.00            | 95% (normal) |
| $I_{\text{cal4}}$      | $383.9 \cdot 10^3$ cps        | 1900 cps                   | 2.00            | 95% (normal) |
| $I_{\text{cal5}}$      | $532.3 \cdot 10^3$ cps        | 2700 cps                   | 2.00            | 95% (normal) |
| $c_{\text{Ra226}}$     | $23.42 \cdot 10^{-9}$ g/g     | $170 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 2.00            | 95% (normal) |
| $\beta_{\text{exp}}$   | -0.37                         | 0.30                       | 2.00            | 95% (normal) |
| $R_{210,208}$          | 0.02066                       | $140 \cdot 10^{-6}$        | 2.00            | 95% (normal) |
| $c_{\text{Pb210}}$     | $232.5 \cdot 10^{-12}$ g/g    | $1.8 \cdot 10^{-12}$ g/g   | 2.00            | 95% (normal) |
| $c_{\text{Ra226.mol}}$ | $103.61 \cdot 10^{-12}$ mol/g | $760 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 2.00            | 95% (normal) |
| $c_{\text{Pb210.mol}}$ | $1.1071 \cdot 10^{-12}$ mol/g | $8.6 \cdot 10^{-15}$ mol/g | 2.00            | 95% (normal) |
| t                      | 46.2 år                       | 1.6 år                     | 2.00            | 95% (normal) |

## Bilaga 2 - Osäkerhetsberäkning för åldersbestämning av $^{226}\text{Ra}$ -strålkällor via mätning med gammaspektrometri

### Modellekvation

#### *{Kalibreringsösningarna}*

$$m_{\text{Pb210}} = m_{\text{refPb}} - m_{\text{T1}};$$

$$m_{\text{Ra226}} = m_{\text{refRa}} - m_{\text{T2}};$$

$$A_{\text{Pb210}} = m_{\text{Pb210}} \cdot S_{\text{refPb}};$$

$$A_{\text{Ra226}} = m_{\text{Ra226}} \cdot S_{\text{refRa}};$$

#### *{Enpunktskalibrering, $\psi$ =Cps per Bq}*

$$R_{\text{Pb210}} = N_{\text{Pb210}} / t_{\text{Pb210}} - N_{\text{bgPb}} / t_{\text{bg}};$$

$$R_{\text{Ra226}} = N_{\text{Ra226}} / t_{\text{Ra226}} - N_{\text{bgRa}} / t_{\text{bg}};$$

$$\psi_{\text{Pb210}} = R_{\text{Pb210}} / A_{\text{Pb210}};$$

$$\psi_{\text{Ra226}} = R_{\text{Ra226}} / A_{\text{Ra226}};$$

#### *{Gammamätning prov}*

$$R_{\text{provPb}} = N_{\text{ProvPb}} / t_{\text{Prov}} - N_{\text{bgPb}} / t_{\text{bg}};$$

$$R_{\text{provRa}} = N_{\text{ProvRa}} / t_{\text{Prov}} - N_{\text{bgRa}} / t_{\text{bg}};$$

#### *{Aktivitetsbestämning med enpunktskalibrering}*

$$A_{\text{ProvPb}} = R_{\text{provPb}} / \psi_{\text{Pb210}};$$

$$A_{\text{ProvRa}} = R_{\text{provRa}} / \psi_{\text{Ra226}};$$

#### *{Ålder}*

$$\lambda_{\text{Ra}} = \ln(2) / t_{\text{halvRa}};$$

$$\lambda_{\text{Pb}} = \ln(2) / t_{\text{halvPb}};$$

$$t = (1 / (\lambda_{\text{Ra}} - \lambda_{\text{Pb}})) \cdot \ln(1 - (1 - \lambda_{\text{Ra}} / \lambda_{\text{Pb}}) \cdot (A_{\text{ProvPb}} / A_{\text{ProvRa}}) \cdot k_{\text{geo}});$$

### Kvantitetslista

| Quantity           | Unit | Definition                                     |
|--------------------|------|------------------------------------------------|
| $m_{\text{Pb210}}$ | g    | massa referenslösning, Pb-210                  |
| $m_{\text{refPb}}$ | g    | massa brutto, burk med referenslösning, Pb-210 |
| $m_{\text{T1}}$    | g    | Tara, burk med lock, Pb-210                    |
| $m_{\text{Ra226}}$ | g    | massa, referenslösning, Ra-226                 |
| $m_{\text{refRa}}$ | g    | massa brutto, burk med referenslösning, Ra-226 |
| $m_{\text{T2}}$    | g    | Tara, burk med lock, Ra-226                    |
| $A_{\text{Pb210}}$ | Bq   | Tillsatt aktivitet i kalibreringsprov, Pb-210  |
| $S_{\text{refPb}}$ | Bq/g | Specifik aktivitet i referenslösning, Pb-210   |
| $A_{\text{Ra226}}$ | Bq   | Tillsatt aktivitet i kalibreringsprov, Ra-226  |
| $S_{\text{refRa}}$ | Bq/g | Specifik aktivitet i referenslösning, Ra-226   |
| $R_{\text{Pb210}}$ | cps  | Räknehastighet i kalibreringsprov, Pb-210      |
| $N_{\text{Pb210}}$ | cts  | Topparea, kalibreringsprov, Pb-210             |
| $t_{\text{Pb210}}$ | s    | Mättid, kalibreringsprov, Pb-210               |

| Quantity       | Unit            | Definition                                           |
|----------------|-----------------|------------------------------------------------------|
| $N_{bgPb}$     | cts             | Topparea, bakgrund, Pb-210                           |
| $t_{bg}$       | s               | Mättid för bakgrunden                                |
| $R_{Ra226}$    | cps             | Räknehastighet i kalibreringsprov, Ra-226            |
| $N_{Ra226}$    | cts             | Topparea Ra-226                                      |
| $t_{Ra226}$    | s               | Mättid, kalibreringsprov, Ra-226                     |
| $N_{bgRa}$     | cts             | Topparea, bakgrund, 186 keV                          |
| $\psi_{Pb210}$ | cps/Bq          | Mäteffektivitet, Pb-210 vid 46 keV                   |
| $\psi_{Ra226}$ | cps/Bq          | Mäteffektivitet, Ra-226 vid 186 keV                  |
| $R_{provPb}$   | cps             | Räknehastighet, Pb-210 i provet                      |
| $N_{ProvPb}$   | cts             | Topparea Pb-210 i provet                             |
| $t_{Prov}$     | s               | Provets mättid                                       |
| $R_{provRa}$   | cts             | Räknehastighet, Ra-226 i provet                      |
| $N_{ProvRa}$   | cts             | Topparea Ra-226 i provet                             |
| $A_{ProvPb}$   | Bq              | Beräknad aktivitet Pb-210 i provet                   |
| $A_{ProvRa}$   | Bq              | Beräknad aktivitet Ra-226 i provet                   |
| $\lambda_{Ra}$ | s <sup>-1</sup> | Sönderfallskonstant för Ra-226                       |
| $t_{halvRa}$   | år              | Halveringstid för Ra-226                             |
| $\lambda_{Pb}$ | s <sup>-1</sup> | Sönderfallskonstant för Pb-210                       |
| $t_{halvPb}$   | år              | Halveringstid för Pb-210                             |
| $t$            | år              | Ålder                                                |
| $k_{geo}$      |                 | Korrektionsfaktor för provets placering på detektorn |

## Osäkerhetsbudgetar

### $\psi_{\text{Pb210}}$ : Mäteffektivitet, Pb-210 vid 46 keV

| Quantity              | Value                        | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution   | Index  |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|--------|
| $m_{\text{Pb210}}$    | 0.099700 g                   | 0.21 % (rel)                |              |                         |                            |        |
| $m_{\text{refPb}}$    | 10.556700 g                  | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | -0.074                  | $-11 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq | 0.9 %  |
| $m_{\text{T1}}$       | 10.457000 g                  | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | 0.074                   | $11 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  | 0.9 %  |
| $A_{\text{Pb210}}$    | 593.47 Bq                    | 1.2 % (rel)                 |              |                         |                            |        |
| $S_{\text{refPb}}$    | 5952.5 Bq/g                  | 1.2 % (rel)                 | normal       | $-1.2 \cdot 10^{-6}$    | $-88 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq | 58.4 % |
| $R_{\text{Pb210}}$    | 4.3506 cps                   | 0.99 % (rel)                |              |                         |                            |        |
| $N_{\text{Pb210}}$    | 11725 cts                    | 0.99 % (rel)                | normal       | $630 \cdot 10^{-9}$     | $73 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  | 39.7 % |
| $t_{\text{Pb210}}$    | 2695.0 s                     |                             |              |                         |                            |        |
| $N_{\text{bgPb}}$     | 328 cts                      | 69 % (rel)                  | normal       | $-300 \cdot 10^{-12}$   | $-66 \cdot 10^{-9}$ cps/Bq | 0.0 %  |
| $t_{\text{bg}}$       | $5.709638 \cdot 10^6$ s      |                             |              |                         |                            |        |
| $\psi_{\text{Pb210}}$ | $7.331 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq | $115 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  |              |                         |                            |        |

### $\psi_{\text{Ra226}}$ : Mäteffektivitet, Ra-226 vid 186 keV

| Quantity           | Value       | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution    | Index  |
|--------------------|-------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------|
| $m_{\text{Ra226}}$ | 0.201800 g  | 0.11 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $m_{\text{refRa}}$ | 10.907900 g | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | -0.023                  | $-3.4 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq | 0.9 %  |
| $m_{\text{T2}}$    | 10.706100 g | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | 0.023                   | $3.4 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  | 0.9 %  |
| $A_{\text{Ra226}}$ | 497.38 Bq   | 0.61 % (rel)                |              |                         |                             |        |
| $S_{\text{refRa}}$ | 2464.7 Bq/g | 0.60 % (rel)                | normal       | $-1.9 \cdot 10^{-6}$    | $-27 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  | 59.5 % |

| Quantity       | Value                         | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution   | Index  |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|--------|
| $t_{bg}$       | $5.709638 \cdot 10^6$ s       |                             |              |                         |                            |        |
| $R_{Ra226}$    | 2.2693 cps                    | 0.48 % (rel)                |              |                         |                            |        |
| $N_{Ra226}$    | 55181 cts                     | 0.48 % (rel)                | normal       | $83 \cdot 10^{-9}$      | $22 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq  | 38.7 % |
| $t_{Ra226}$    | 24316.46 s                    |                             |              |                         |                            |        |
| $N_{bgRa}$     | 17.0 cts                      | 410 % (rel)                 | normal       | $-350 \cdot 10^{-12}$   | $-25 \cdot 10^{-9}$ cps/Bq | 0.0 %  |
| $\psi_{Ra226}$ | $4.5625 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq | $35.5 \cdot 10^{-6}$ cps/Bq |              |                         |                            |        |

**A<sub>ProvPb</sub>: Beräknad aktivitet Pb-210 i provet**

| Quantity     | Value                   | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $m_{Pb210}$  | 0.099700 g              | 0.21 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| $m_{refPb}$  | 10.556700 g             | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | 6100                    | 0.92 Bq                  | 0.8 %  |
| $m_{T1}$     | 10.457000 g             | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | -6100                   | -0.92 Bq                 | 0.8 %  |
| $A_{Pb210}$  | 593.47 Bq               | 1.2 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| $S_{refPb}$  | 5952.5 Bq/g             | 1.2 % (rel)                 | normal       | 0.10                    | 7.3 Bq                   | 52.6 % |
| $R_{Pb210}$  | 4.3506 cps              | 0.99 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| $N_{Pb210}$  | 11725 cts               | 0.99 % (rel)                | normal       | -0.052                  | -6.0 Bq                  | 35.8 % |
| $t_{Pb210}$  | 2695.0 s                |                             |              |                         |                          |        |
| $N_{bgPb}$   | 328 cts                 | 69 % (rel)                  | normal       | $670 \cdot 10^{-9}$     | $150 \cdot 10^{-6}$ Bq   | 0.0 %  |
| $t_{bg}$     | $5.709638 \cdot 10^6$ s |                             |              |                         |                          |        |
| $R_{provPb}$ | 4.4730 cps              | 0.52 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| $N_{ProvPb}$ | 56038 cts               | 0.52 % (rel)                | normal       | 0.011                   | 3.2 Bq                   | 10.0 % |
| $t_{Prov}$   | 12528.0 s               |                             |              |                         |                          |        |
| $A_{ProvPb}$ | 610.2 Bq                | 10.1 Bq                     |              |                         |                          |        |

**A<sub>ProvRa</sub>: Beräknad aktivitet Ra-226 i provet**

| Quantity            | Value                   | Standard Uncertainty        | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| m <sub>Ra226</sub>  | 0.201800 g              | 0.11 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| m <sub>refRa</sub>  | 10.907900 g             | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | 4100                    | 0.62 Bq                  | 0.6 %  |
| m <sub>T2</sub>     | 10.706100 g             | $1.4 \cdot 10^{-3}$ % (rel) | normal       | -4100                   | -0.62 Bq                 | 0.6 %  |
| A <sub>Ra226</sub>  | 497.38 Bq               | 0.61 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| S <sub>refRa</sub>  | 2464.7 Bq/g             | 0.60 % (rel)                | normal       | 0.34                    | 5.0 Bq                   | 36.6 % |
| t <sub>bg</sub>     | $5.709638 \cdot 10^6$ s |                             |              |                         |                          |        |
| R <sub>Ra226</sub>  | 2.2693 cps              | 0.48 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| N <sub>Ra226</sub>  | 55181 cts               | 0.48 % (rel)                | normal       | -0.015                  | -4.0 Bq                  | 23.8 % |
| t <sub>Ra226</sub>  | 24316.46 s              |                             |              |                         |                          |        |
| N <sub>bgRa</sub>   | 17.0 cts                | 410 % (rel)                 | normal       | $26 \cdot 10^{-6}$      | $1.8 \cdot 10^{-3}$ Bq   | 0.0 %  |
| t <sub>Prov</sub>   | 12528.0 s               |                             |              |                         |                          |        |
| R <sub>provRa</sub> | 3.8012 cts              | 0.62 % (rel)                |              |                         |                          |        |
| N <sub>ProvRa</sub> | 47621 cts               | 0.62 % (rel)                | normal       | 0.017                   | 5.1 Bq                   | 38.5 % |
| A <sub>ProvRa</sub> | 833.13 Bq               | 8.26 Bq                     |              |                         |                          |        |

**t: Ålder**

| Quantity            | Value                      | Standard Uncertainty         | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|---------------------|----------------------------|------------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| m <sub>Pb210</sub>  | 0.099700 g                 | 0.21 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| m <sub>refPb</sub>  | 10.556700 g                | 1.4·10 <sup>-3</sup> % (rel) | normal       | 850                     | 0.13 år                  | 0.6 %  |
| m <sub>T1</sub>     | 10.457000 g                | 1.4·10 <sup>-3</sup> % (rel) | normal       | -850                    | -0.13 år                 | 0.6 %  |
| m <sub>Ra226</sub>  | 0.201800 g                 | 0.11 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| m <sub>refRa</sub>  | 10.907900 g                | 1.4·10 <sup>-3</sup> % (rel) | normal       | -420                    | -0.063 år                | 0.1 %  |
| m <sub>T2</sub>     | 10.706100 g                | 1.4·10 <sup>-3</sup> % (rel) | normal       | 420                     | 0.063 år                 | 0.1 %  |
| A <sub>Pb210</sub>  | 593.47 Bq                  | 1.2 % (rel)                  |              |                         |                          |        |
| S <sub>refPb</sub>  | 5952.5 Bq/g                | 1.2 % (rel)                  | normal       | 0.014                   | 1.0 år                   | 37.9 % |
| A <sub>Ra226</sub>  | 497.38 Bq                  | 0.61 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| S <sub>refRa</sub>  | 2464.7 Bq/g                | 0.60 % (rel)                 | normal       | -0.034                  | -0.51 år                 | 9.5 %  |
| R <sub>Pb210</sub>  | 4.3506 cps                 | 0.99 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| N <sub>Pb210</sub>  | 11725 cts                  | 0.99 % (rel)                 | normal       | -7.2·10 <sup>-3</sup>   | -0.84 år                 | 25.8 % |
| t <sub>Pb210</sub>  | 2695.0 s                   |                              |              |                         |                          |        |
| N <sub>bgPb</sub>   | 328 cts                    | 69 % (rel)                   | normal       | 93·10 <sup>-9</sup>     | 21·10 <sup>-6</sup> år   | 0.0 %  |
| t <sub>bg</sub>     | 5.709638·10 <sup>6</sup> s |                              |              |                         |                          |        |
| R <sub>Ra226</sub>  | 2.2693 cps                 | 0.48 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| N <sub>Ra226</sub>  | 55181 cts                  | 0.48 % (rel)                 | normal       | 1.5·10 <sup>-3</sup>    | 0.41 år                  | 6.2 %  |
| t <sub>Ra226</sub>  | 24316.46 s                 |                              |              |                         |                          |        |
| N <sub>bgRa</sub>   | 17.0 cts                   | 410 % (rel)                  | normal       | -2.6·10 <sup>-6</sup>   | -180·10 <sup>-6</sup> år | 0.0 %  |
| R <sub>provPb</sub> | 4.4730 cps                 | 0.52 % (rel)                 |              |                         |                          |        |
| N <sub>ProvPb</sub> | 56038 cts                  | 0.52 % (rel)                 | normal       | 1.5·10 <sup>-3</sup>    | 0.44 år                  | 7.2 %  |
| t <sub>Prov</sub>   | 12528.0 s                  |                              |              |                         |                          |        |
| R <sub>provRa</sub> | 3.8012 cts                 | 0.62 % (rel)                 |              |                         |                          |        |

| Quantity              | Value                                 | Standard Uncertainty | Distribution | Sensitivity Coefficient | Uncertainty Contribution | Index  |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| $N_{\text{ProvRa}}$   | 47621 cts                             | 0.62 % (rel)         | normal       | $-1.8 \cdot 10^{-3}$    | -0.52 år                 | 10.0 % |
| $\lambda_{\text{Ra}}$ | $433.22 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ | 0.44 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $t_{\text{halvRa}}$   | 1600.00 år                            | 0.44 % (rel)         | normal       | $380 \cdot 10^{-6}$     | $2.7 \cdot 10^{-3}$ år   | 0.0 %  |
| $\lambda_{\text{Pb}}$ | 0.031181 s <sup>-1</sup>              | 0.54 % (rel)         |              |                         |                          |        |
| $t_{\text{halvPb}}$   | 22.230 år                             | 0.54 % (rel)         | normal       | 1.9                     | 0.22 år                  | 1.8 %  |
| $k_{\text{geo}}$      | 1.00105                               | 0.11 % (rel)         | rectangular  | 85                      | 0.091 år                 | 0.3 %  |
| t                     | 41.75 år                              | 1.66 år              |              |                         |                          |        |

## Resultat

| Quantity              | Value                                | Expanded Uncertainty               | Coverage factor | Coverage     |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------|--------------|
| $\Psi_{\text{Pb210}}$ | $7.33 \cdot 10^{-3} \text{ cps/Bq}$  | $230 \cdot 10^{-6} \text{ cps/Bq}$ | 2.00            | 95% (normal) |
| $\Psi_{\text{Ra226}}$ | $4.563 \cdot 10^{-3} \text{ cps/Bq}$ | $71 \cdot 10^{-6} \text{ cps/Bq}$  | 2.00            | 95% (normal) |
| $A_{\text{ProvPb}}$   | 610 Bq                               | 20 Bq                              | 2.00            | 95% (normal) |
| $A_{\text{ProvRa}}$   | 833 Bq                               | 17 Bq                              | 2.00            | 95% (normal) |
| t                     | 41.7 år                              | 3.3 år                             | 2.00            | 95% (normal) |

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)