

# Konvergens av probabilistiska beräkningar

## 1 Bakgrund

I SR-PSU beräknades dos för beräkningsfall och scenarier som medelvärdet av dosen från ett stort antal parameterrealiseringar (s.k. probabilistiska beräkningar). Varje realisering byggde på en uppsättning parametrar som var och en dragits slumpvis från täthetsfunktioner som speglar respektive variabels naturliga variation och osäkerhet. I dessa beräkningar propagerar alltså parametervariation vidare till den beräknade dosen, och variabler som har en stor variation och en direkt påverkan på dosberäkningarna kommer att ha en stor effekt på spridningen i den beräknade dosen.

Osäkerheter i närzonen och geosfären har ofta hanterats med konservativa antaganden och olika beräkningsfall. Därför är parameterosäkerheter i närzonen främst knutna till Kd-värden, och de log-triangulära täthetsfunktionerna för dessa parametrar har en relativt begränsad spridning. Även i geosfären är parameterosäkerheterna främst kopplad till Kd-värden. Liksom för ytliga jordlager har log-normala täthetsfunktioner ansatts för Kd-värden i geosfären, men centralvärden har många gånger valts låga och den övre svansen av täthetsfördelningen har trunkerats (Crawford 2013). Ansatsen är försiktig då den underskattar dispersionen och det radioaktiva sönderfallet i berget, men den leder samtidigt till att spridningen av Kd-värden generellt sett är betydligt lägre i geosfären än i ytliga jordlager. I ytberäkningarna har Kd-värden ofta en direkt effekt på den beräknade dosen, men samtidigt kan många andra faktorer också ha en väsentlig påverkan på den beräknade dosen, t.ex. växtupptag, grundvattenflöde och gasutbyte (SKB 2014, avsnitt 10.9.2). Även dessa parametrar är många gånger förknippade med en avsevärd naturlig variation eller så kan de spegla betydande osäkerhet knuten till framtida ekosystems egenskaper.

Då biosfärsberäkningarna förväntades dominera propageringen av parametervariation till dosberäkningarna valde SKB att representera biosfärens parametrar med en storleksordning fler realiseringar än vad som bedömdes vara tillräckligt för närzons- och geosfärsberäkningarna. SKB's sensitivitetsanalys bekräftade att variationen i biosfärsparametrar dominerade variationen i den beräknade dosen för flera dosbidragande radionuklider (Appendix F i SKB 2015 och fråga 6 i *Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR – säkerhetsanalysmetodik SR-PSU*). Vidare beräknade SKB ett empiriskt 95 % konfidensintervall för medelvärdet av dosen vid den tidpunkt som gav högst dos (SKB 2015, avsnitt 5.1.1, "Uncertainty related to sample size"). Den övre gränsen för detta konfidensintervall var mindre än 10 % högre än det ursprungliga medelvärdet för dosen, och sannolikheten för att det sanna medelvärdet för den beräknade dosen ligger över denna gräns är låg. Då osäkerheten i medelvärdet var så begränsad bedömde SKB att ett större antal realiseringar, eller att en djupare analys av konvergens, inte var motiverade.

I detta PM visar SKB att det valda antalet realiseringar är tillräckligt för en god konvergens för den beräknade dosen. För en tydlig illustration av konvergens har tre dosbidragande radionuklider med olika egenskaper studerats (organiskt C-14, Mo-93 och Ni-59), och resultat av beräkningar från närzon och geosfär redovisas separat. Då antalet parameterrealiseringar som användes i säkerhetsanalysen är stort, har SKB även valt att jämföra resultaten från empiriska beräkningar med en analytisk skattning av konfidensintervallen för de undersökta responsvariablerna.

## 2 Metod

För att studera konvergens av dosberäkningarna har SKB valt att detaljstudera de beräkningar som gjorts i beräkningsfallet för global uppvärmning (CCM\_GW) för Jordbrukare på dikad myr (DM), som var den exponerade gruppen som fick högst dos (SKB 2015, avsnitt 5.1.1). För dessa beräkningar genererades 100 oberoende realiseringar för närzons- och geosfärsparametrar och 1000 oberoende realiseringar för biosfärsparametrar. För att öka transparensen, har analysen brutits upp i två huvudsteg: Först studeras konvergens för de kombinerade närzons- och geosfärsberäkningarna, och för detta ändamål studeras utsläppet från berget till biosfären ( $Bq\text{ år}^{-1}$ ), vilket baseras på beräkningar från 100 oberoende parameterrealiseringar. I ett andra steg studeras resultaten från hela beräkningskedjan, d.v.s. konvergens av den effektiva dosen ( $Sv\text{ år}^{-1}$ ). För dessa beräkningar användes var och en av de 100 uppsättningarna av närzons- och geosfärsparametrar 10 gånger, och kombineras slumpvis med en av de 1000 oberoende uppsättningarna av biosfärsparametrar (SKB 2015, avsnitt 5).

Det empiriska konfidensintervallet (i detta fall för en tidpunkt) motsvarar percentilerna för en population av utfall. För att studera hur konvergens av utfall påverkas av antal realiseringar ( $n$ ) har vi alltså genererat en population av  $N$  medelvärdesutfall för varje antal realiseringar genom att beräkna medelresponsen för vart och ett av  $N$  stycken bootstrap stickprov från de ursprungliga parameteruppsättningarna. Gränserna för ett 90 % konfidensintervall har sedan satts till värdet av den 5e och den 95e percentilen (av de  $N$  rangordnade medelvärdena). För närzons- och geosfärsberäkningar drogs 100 bootstrap prov ( $N=100$ ), medan 1000 bootstrap prov användes för beräkningarna av dos ( $N=1000$ ). Beräkningarna har upprepats för alla undersökta antal realiseringar (d.v.s.  $n = 1$  till 100 för medelvärdet av utsläpp från geosfären och  $n = 1$  till 1000 för medelvärdet av den effektiva dosen i biosfären).

Enligt centrala gränsvärdesatsen gäller att om man medelvärdesbildar över ett stort antal oberoende slumpmässiga variabler, eventuellt med olika sannolikhetsfördelningar, kommer fördelningen för medelvärdet att gå mot en normalfördelning. Då antalet dragningar av parameteruppsättningar var stort i de probabilistiska beräkningarna ( $n=100$  för *geosfären*, och  $n=1000$  för *biosfären*), är det alltså rimligt att förvänta sig att medelvärdet för responsen  $\bar{y}$  är normalfördelat, med en varians som motsvarar den för responsen  $y$  dividerad med antalet realiseringar ( $n$ ). Den övre gränsen för ett 90 % konfidensintervall,  $UCL_{90}$ , för medelvärdet av en responsvariabel kan alltså beräknas enligt:

$$UCL_{90} = \bar{y} + t_{0.95,n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ekv. 1}$$

Där  $t$  är  $t$ -värdet för  $n-1$  antal frihetsgrader, och  $s$  är standardavvikelsen för respons  $y$ , som skattats från utfallen från samtliga ursprungliga parameteruppsättningar. I detta PM anser vi att beräkningarna har en god konvergens om den övre gränsen för ett 90 % konfidensintervall för medelvärdet inte är mer än 10 % högre än medelvärdet. Då konfidensintervallet är symmetriskt runt medelvärdet, blir bredden av ett 90 % konfidensintervall,  $CI_{90}$ , följaktligen:

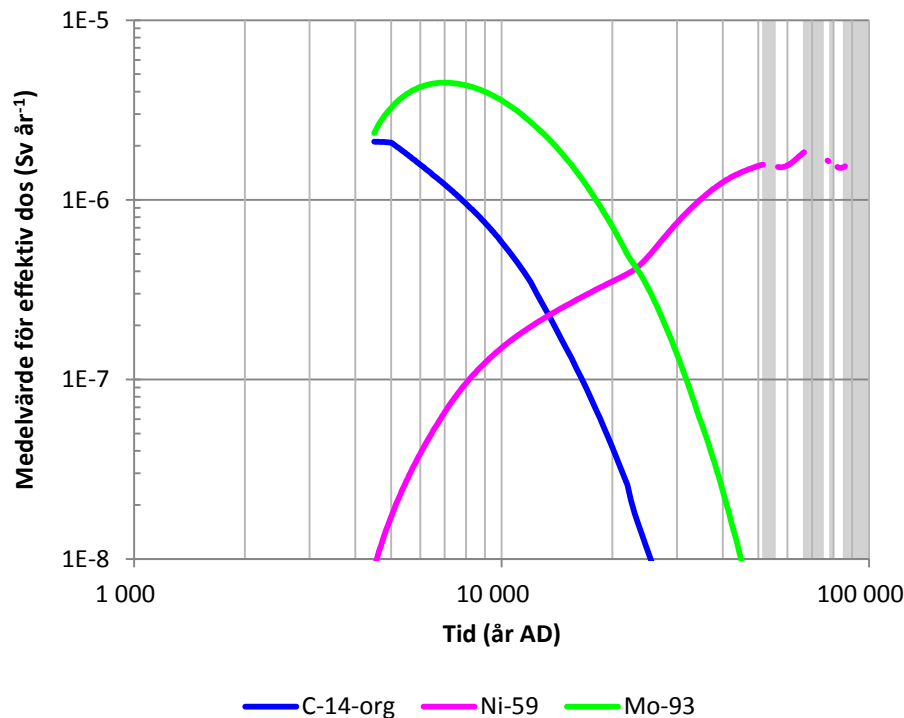
$$CI_{90} = 2 \cdot t_{0.95,n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ekv. 2}$$

Eftersom de tre dosbidragande radionukliderna C-14, Mo-93 och Ni-59 har olika egenskaper (t.ex. Kd-värden, halveringstid, och mekanismer för spridning och upptag i biosfären) har SKB valt att studera radionukliderna separat i detta PM. Graden av konvergens för totaldosen i CCM\_GW finns sedan tidigare redovisad i SKB (2015, avsnitt 5.1.1). För analys av utsläpp till biosfären har tidpunkten för det högsta medelvärdet för utsläppet valts för respektive radionuklid (benämns *geosfären* nedan), och på samma sätt har tidpunkten för det högsta medelvärdet av dosen använts för analyserna av hela beräkningskedjan (benämns *biosfären* nedan).

## 3 Resultat

### 3.1 Tidpunkt för högsta utsläpp och dos

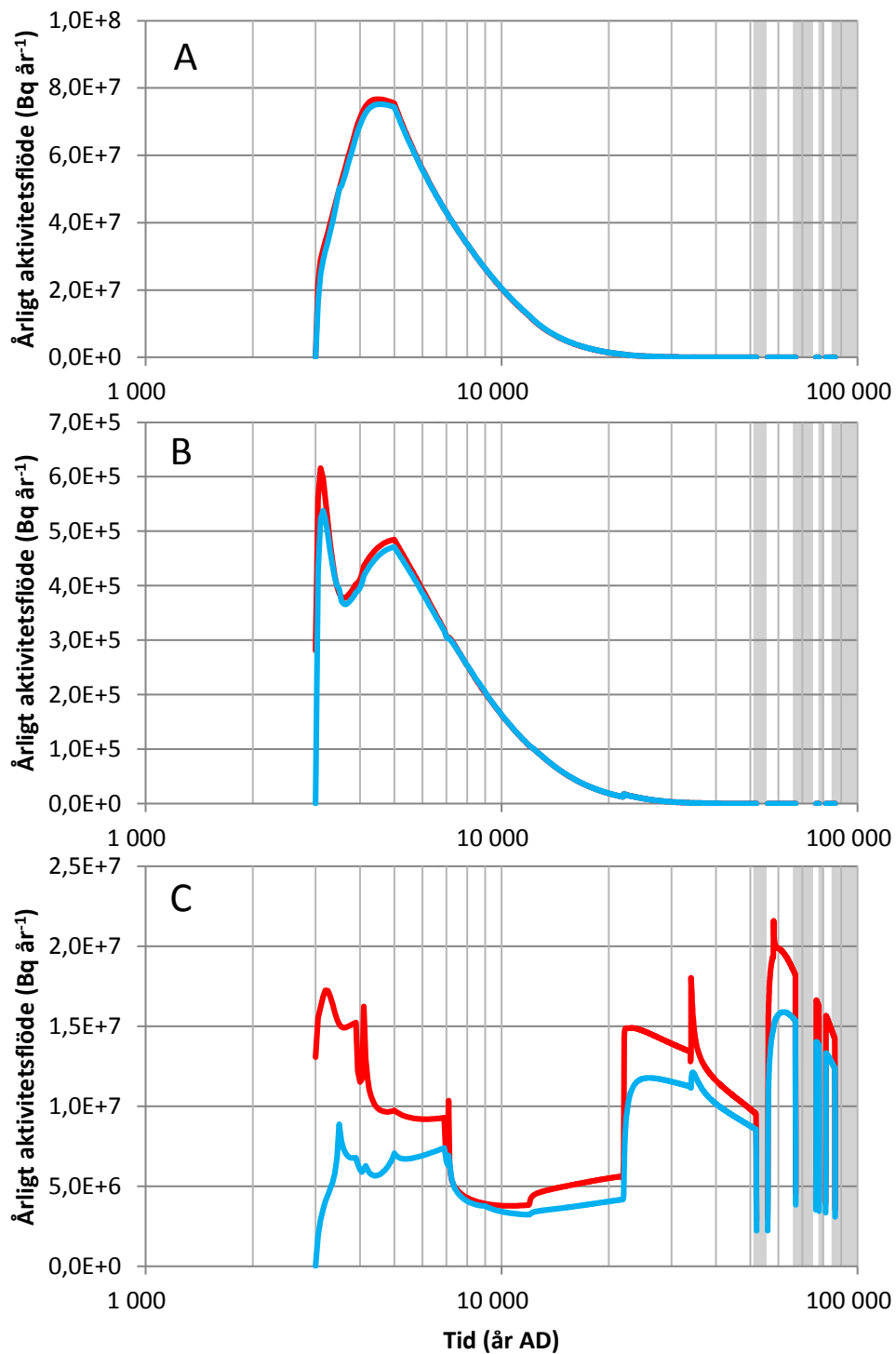
Jordbrukare på dikad myr fick den högsta dosen från samtliga undersökta radionuklider, men tidpunkten för den högsta dosen varierade mellan radionukliderna (Figur 3-1). För organiskt C-14 inträffade tidpunkten för den högsta dosen år 4500 e Kr, medan den för Mo-93 och Ni-59 inträffade år 6950 e Kr respektive år 66 500 e Kr. Dessa tidpunkter används i följande sektioner för att redovisa hur medelvärdet av dosen konvergerar som funktion av antalet realisationer.



*Figur 3-1 Årlig effektiv medeldos från organisk C-14, Ni-59 och Mo-93 (n=1000) som en funktion av tid i beräkningsfallet för global uppvärmning (CCM\_GW). Den mest exponerade gruppen utgörs i samtliga fall av jordbrukare på dikad myr. De grå fälten motsvarar perioder med kontinuerlig permafrost.*

Utfloppet av organisk C-14 och aktivitet från förvaret (närzonen) och berget (geofären) var mycket likartade och transporten genom berget fördröjde tidpunkten för toppflödet med endast 50 år (Figur 3-2a). Detsamma gällde för Mo-93 (Figur 3-2b). Anledningen till den marginella fördröjningen är att sorptionen i berget av dessa två radionuklider är mycket liten (eller obefintlig), samtidigt som flödes hastigheten av grundvatten i berget är hög relativt transportsträckan till ytan. Året med det högsta aktivitetsflödet ut från geosfären valdes för att studera konvergens. För organiskt C-14 inträffar detta år 4550 e Kr, medan motsvarande år för Mo-93 är 3150 e Kr. Ni-59 har en viss sorption i berget och toppen för flödet från geosfären inträffar nästan fyra tusen år senare än toppen för flödet från närzonen (Figur 3-2c). Tidpunkten för det maximala utfloppet till ytan, år 61 950 e Kr, valdes för att studera konvergens av Ni-59 flödet i geofärsberäkningarna.

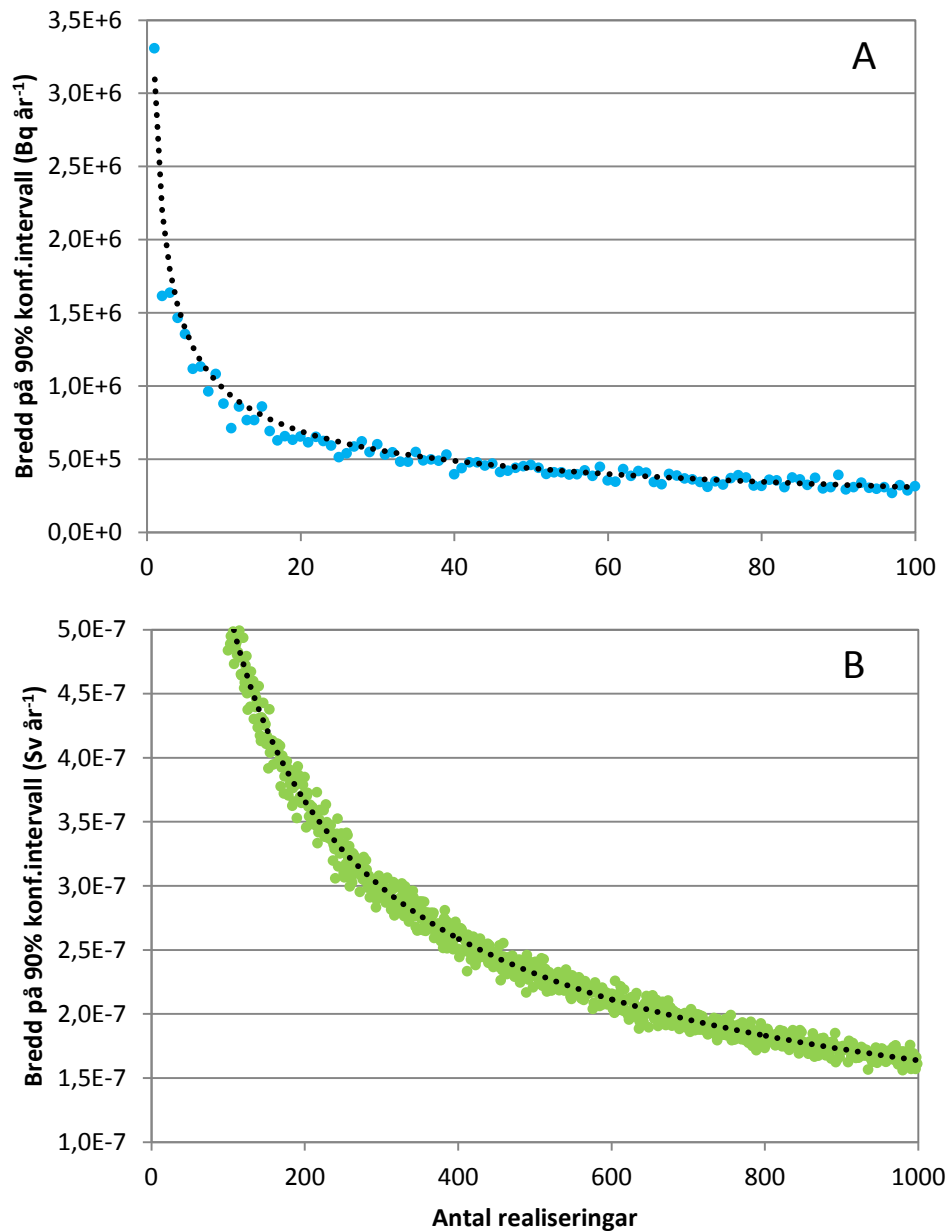
Konvergens av probabilistiska beräkningar



Figur 3-2. Årligt flöde av aktivitet från närzon (röd) och geosfär (blå) ( $n=100$ ) som funktion av tid i beräkningsfallet för global uppvärmning (CCM\_GW). A) organisk C-14, B) Mo-93 och C) Ni-59. De grå fälten motsvarar perioder med kontinuerlig permafrost.

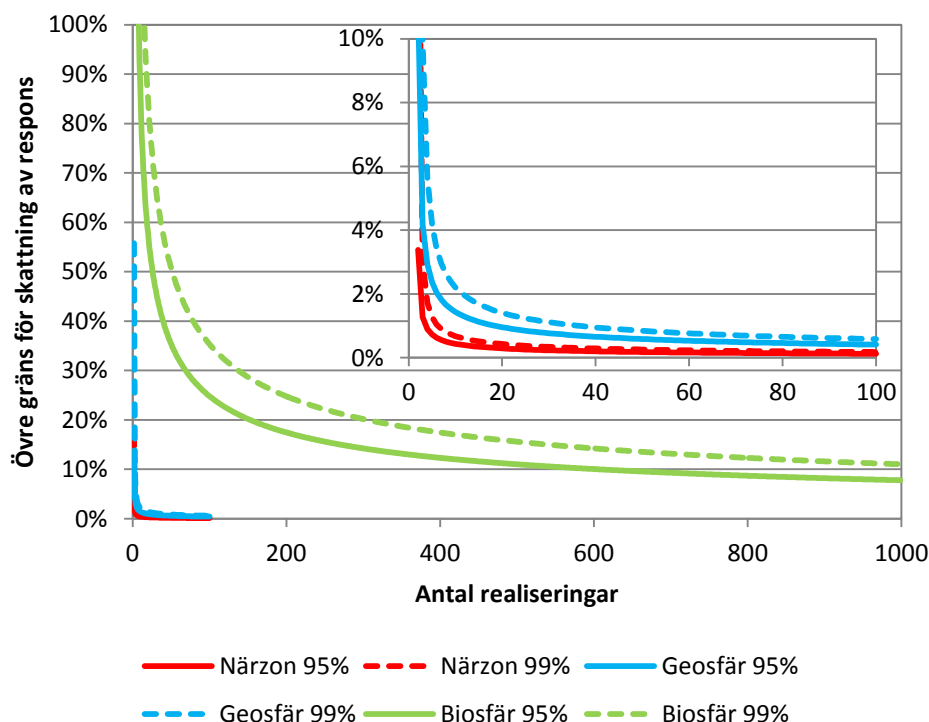
## 3.2 Organisk C-14 - konvergens för beräkningar

Återupprepade dragningarna av parameteruppsättningar visade att de empiriska konfidensintervallen för utflödet av organiskt C-14 från berget, och för den resulterande dosen, minskade kontinuerligt med antalet realiseringar (Figur 3). Vid 100 realiseringar var bredden av konfidensintervallet för utflödet från geosfären två storleksordningar mindre än medelvärdet (Figur 3-2a och 3-3a), och resultatet var likartade för utflödet från närzonen (Appendix 1). Den relativa bredden av konfidensintervallet för den beräknade dosen var klart större, och vid 1000 upprepningar var den ungefär en storleksordning mindre än medelvärdet för dosen (Figur 3-1 och 3-3b).



Figur 3-3. Bredden på ett 90 % konfidensintervall för medelvärdet av flöde och dos från organiskt C-14 som en funktion av antal parameterrealiseringar beräknade för fallet för global uppvärmning (CCM\_GW). A) Konfidensintervall för utflödet av aktivitet från berget (geosfären). B) Konfidensintervall för den effektiva dosen (biosfären). I figuren kontrasteras bredden av det empiriska konfidensintervallet (färgade punkter) med den från den analytiska beräkningen (streckad linje).

## Konvergens av probabilistiska beräkningar



Figur 3-4. Övre gräns för skattningen av det sanna medelvärdet vid olika konfidensnivåer som en funktion av antalet realisationer för organiskt C-14. För närzonen (röd) och geosfären (blå) är responsen aktivitetsflöde ( $Bq\text{ år}^{-1}$ ), medan dosresponsen i biosfären (grön) är effektiv dos ( $Sv\text{ år}^{-1}$ ). Gränsen är uttryckt som procent av medelvärdet beräknat med samtliga tillgängliga parameter realisationer (100 för närzon och geosfär, och 1000 för biosfären). Linjerna representerar två olika konfidensnivåer för att det sanna medelvärdet inte överstiger den övre gränsen för skattningen. Den heldragna linjen representerar en 95 procentig säkerhet, medan den streckade linjen motsvarar en 99 procentig säkerhet. Den infällda bilden är en förstoring av resultaten för närzon och geosfär.

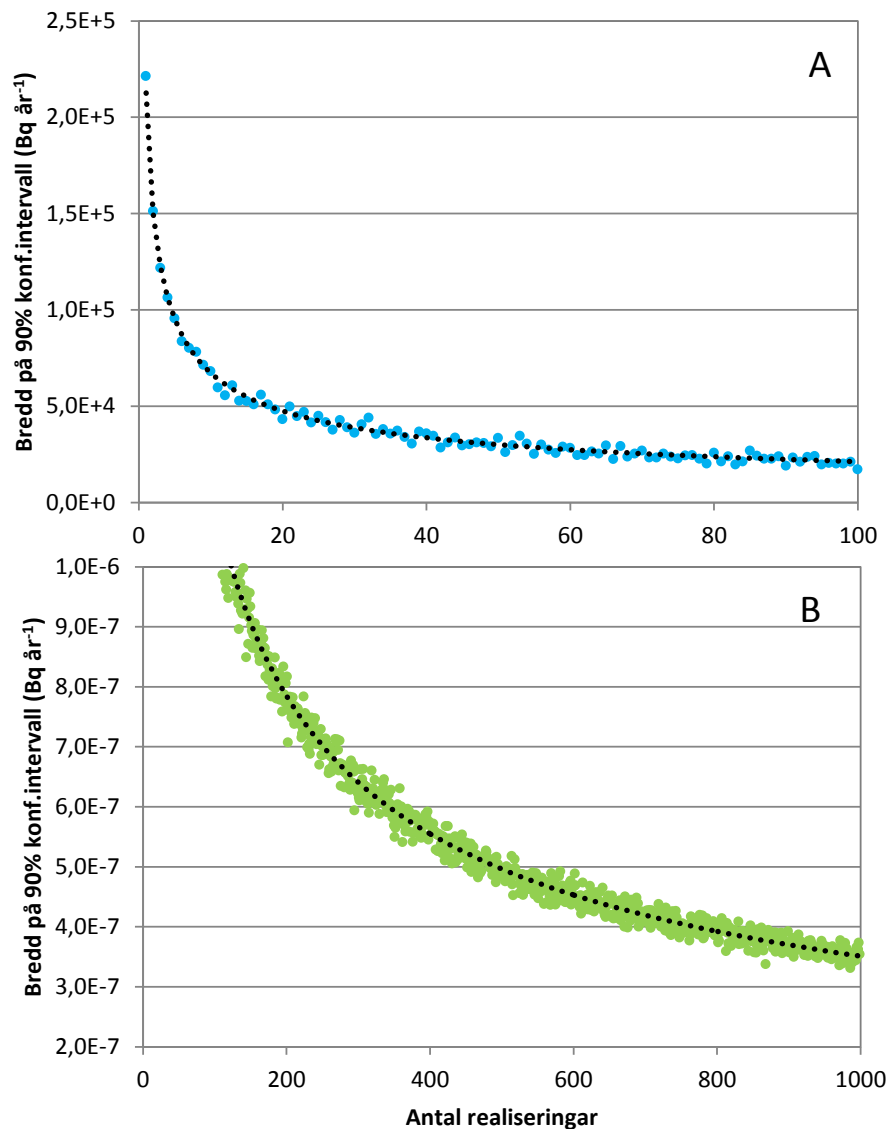
Medelvärdet för flödet av aktivitet från berget var approximativt normalfördelade vid 10 eller fler realiseringar, och detsamma gällde medelvärdet för den beräknade dosen vid 100 eller fler realiseringar (data är inte redovisade för C-14, men medelvärdets konvergens mot normalfördelning visas för Mo-93 i Appendix 2). De analytiska uttrycken (ekvation 1 och 2) gav därför en bra och balanserad skattning för konfidensintervallets bredd och övre gräns. Detta kan ses i figur 3-3 där den streckade linjen faller i mitten av punktsvärmen. Hur den övre gränsen för skattningarna av radionuklidflöden och dos påverkas av antalet parameterrealiseringar undersöktes därför med hjälp av det analytiska uttrycket för två olika konfidensnivåer (95 och 99 %, Figur 3-4).

Parametervariation i ytsystemet dominerar helt variationen i dosrespons för organisk C-14<sup>1</sup>, och detta lyser igenom i analysen av konvergens. Eftersom det är få parametrar som påverkar utflödet av organisk C-14 från närzon och geosfären kan vi redan vid 20 realiseringar säga, med 95 procentig säkerhet, att det sanna medelvärdet för utflödet från geosfären inte blir mer än 1 procent högre än det skattade medelvärdet (blå linje i Figur 3-4). För 100 realiseringar är konvergens exceptionellt god och sannolikheten att utflödet underskattats med mer än 1 % är mindre än en på hundra. För dosberäkningarna (grön linje i Figur 3-4) krävs å andra sidan 600 realiseringar för en god konvergens. Det vill säga den grad av realiseringar där vi kan säkerställa, med en 95 procentig sannolikhet, att det sanna medelvärdet inte är mer än 10 % högre än det beräknade medelvärdet. Med 1000 realiseringar kan vi konstatera, med en 95 procentig säkerhet, att det sanna medelvärdet inte är mer än 8 % högre än den beräknade dosen.

<sup>1</sup> Detta framgår av sensitivitetsanalysen av dosen till jordbrukare på dikad mark som redovisas under fråga 6 i Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR – säkerhetsanalysmetodik SR-PSU.

### 3.3 Mo-93 - konvergens för beräkningar

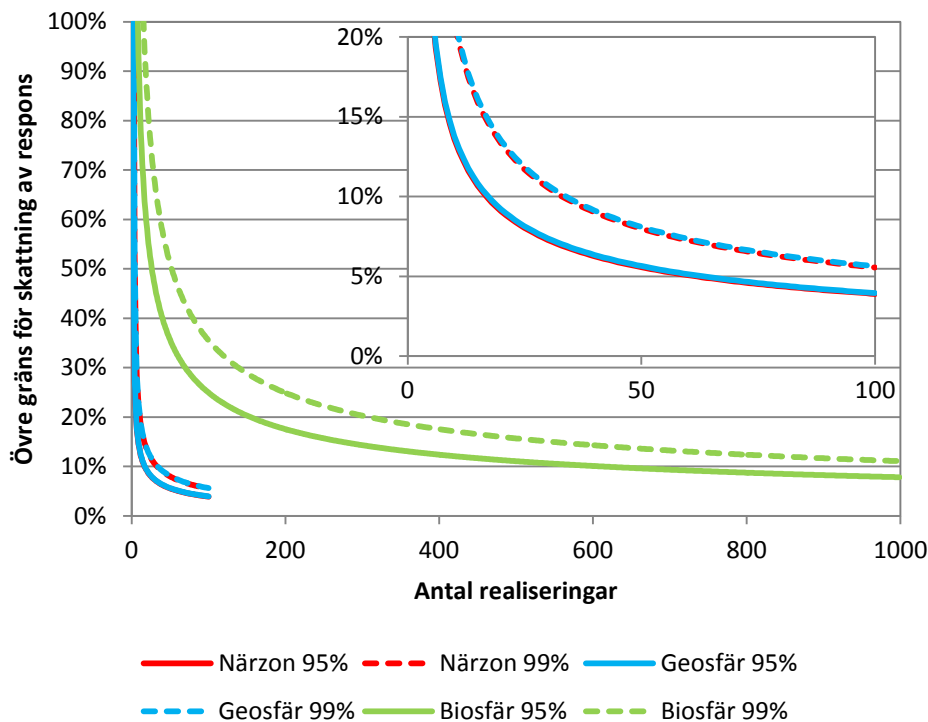
De empiriska konfidensintervallen för utflödet från berget och dosen av Mo-93 minskade kontinuerligt med antalet realiseringar (Figur 3-5). Vid 100 realiseringar var bredden av konfidensintervallet för utflödet från geosfären en tjugondel av medelvärdet (Figur 3-2b och 3-5a), och resultatet var likartat för utflödet från närzonen (Appendix 1). Den relativa bredden av konfidensintervallet för den beräknade dosen (i biosfären) var klart större för samma antal dragningar (ca 5 ggr, Figur 3-1 och 3-5b). Vid 1000 upprepningar var bredden av konfidensintervallet (relativt medelvärdet) emellertid i samma storlekordning för dos- som för geosfärsberäkningar (vid n=100).



Figur 3-5 Bredden på ett 90 % konfidensintervall för medelvärdet av flöde och dos från organiskt Mo-93 som en funktion av antal parameterrealiseringar beräknade för fallet för global uppvärmning (CCM\_GW). A) Konfidensintervall för utflödet av aktivitet från berget (geosfären). B) Konfidensintervall för den effektiva dosen (biosfären). I figuren kontrasteras bredden av det empiriska konfidensintervallet (färgade punkter) med den från den analytiska beräkningen (streckad linje).



## Konvergens av probabilistiska beräkningar



Figur 3-6. Övre gräns för skattningen av det sanna medelvärdet vid olika konfidensnivåer som en funktion av antalet realisationer för Mo-93. För närzonen (röd) och geosfären (blå) är responsen aktivitetsflöde ( $Bq\text{ år}^{-1}$ ), medan dosresponsen i biosfären (grön) är effektiv dos ( $Sv\text{ år}^{-1}$ ). Gränsen är uttryckt som procent av medelvärdet beräknat med samtliga tillgängliga parameter realisationer (100 för närzon och geosfär, och 1000 för biosfären). Linjerna representerar två olika konfidensnivåer för att det sanna medelvärdet inte överstiger den övre gränsen för skattningen. Den heldragna linjen representerar en 95 procentig säkerhet, medan den streckade linjen motsvarar en 99 procentig säkerhet. Den infällda bilden är en förstoring av resultaten för närzonen och geosfären.

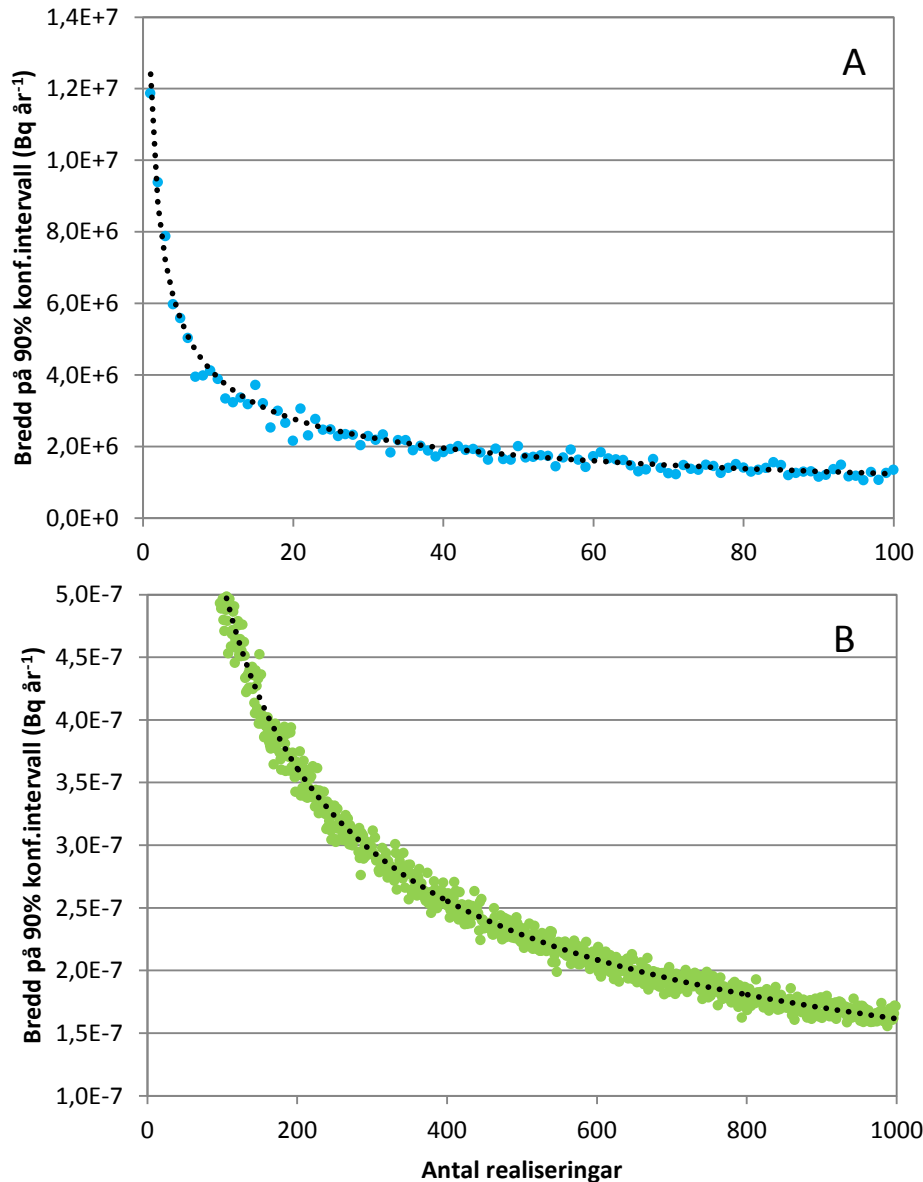
Liksom för C-14, var medelvärdet för flödet av aktivitet från berget approximativt normalfördelat vid 10 eller fler realiseringar, och detsamma gällde medelvärdet för den beräknade dosen vid 100 eller fler realiseringar (Appendix 2), och det analytiska uttrycket för konfidensintervallets bredd överensstämde väl med de empiriska skattningarna (Figur 3-5ab). Följaktligen undersöktes sambandet mellan antalet parameterrealiseringar och den övre gränsen för skattningarna av radionuklidflöden med det analytiska uttrycket för två olika konfidensnivåer (95 och 99 %, Figur 3-6).

För Mo-93 dominerade parametervariation i ytsystemet variationen i dosrespons, men variation i närzonen har också en viss betydelse (SKB 2015, Appendix F). Detta avspeglas i resultaten där konvergens för medelvärdet av utflödet från berget är god vid 60 realiseringar (blå linje i Figur 3-6), medan det för dosberäkningarna krävs 700 realiseringar för en motsvarande grad av konvergens (grön linje i Figur 3-6). Att kurvorna för närzonen och geosfären nästan helt överlappar (röd och blå linje) beror på att variationen i det beräknade utflödet från berget framförallt orsakas av variation i  $K_d$ -värde för cementen i förvaret (SKB 2015, Appendix F). För 100 realiseringar är konvergens för flödet från berget mycket god, och sannolikheten att medelvärdet underskattats med mer än 4 % är mindre än fem procent. Med 1000 realiseringar förbättras är konvergens för dosberäkningarna ytterligare något (jämfört med 700 realiseringar), och vi kan konstatera att sannolikheten för att det sanna medelvärdet är mer än 8 % högre än den beräknade dosen är låg (d.v.s. 5 %).



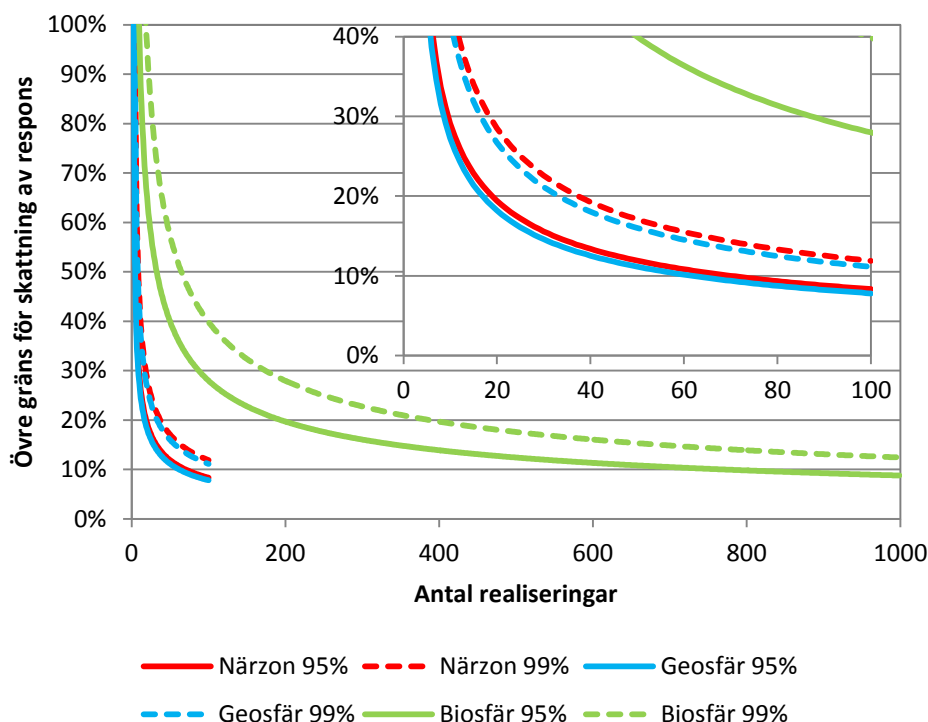
### 3.4 Ni-59 - konvergens för beräkningar

De empiriska konfidensintervallen för utflödet från berget och dosen av Ni-59 minskade med antalet realiseringar (Figur 7). Vid 100 realiseringar var bredden av konfidensintervallet en storleksordning mindre än medelvärdet för utflödet från geosfären (Figur 3-2 och 3-7a), och resultat var likartat för utflödet från närzonen (Appendix 1). Den relativa bredden av konfidensintervallet för den beräknade dosen (i biosfären) var ca tre gånger högre för samma antal dragningar (Figur 3-1 och 3-7b). Vid 1000 upprepningar var bredden av konfidensintervallet (relativt medelvärdet) för dosen emellertid i samma storleksordning för dos- som för geosfärsberäkningar (vid n=100).



Figur 7 Bredden på ett 90% konfidensintervall för medelvärdet av flöde och dos från organiskt Ni-59 som en funktion av antal parameterrealiseringar beräknade för fallet för global uppvärmning (CCM\_GW). A) Konfidensintervall för utflödet av aktivitet från berget (geosfären). B) Konfidensintervall för den effektiva dosen (biosfären). I figuren kontrasteras bredden av det empiriska konfidensintervallet (färgade punkter) med den från den analytiska beräkningen (streckad linje).

Konvergens av probabilistiska beräkningar



Figur 3-8. Övre gräns för skattningen av det sanna medelvärdet vid olika konfidensnivåer som en funktion av antalet realisationer för Ni-59. För närzonen (röd) och geosfären (blå) är responsen aktivitetsflöde ( $Bq\text{ år}^{-1}$ ), medan dosresponsen i biosfären (grön) är effektiv dos ( $Sv\text{ år}^{-1}$ ). Gränsen är uttryckt som procent av medelvärdet beräknat med samtliga tillgängliga parameter realisationer (100 för närzonen och geosfären, och 1000 för biosfären). Linjerna representerar två olika konfidensnivåer för att det sanna medelvärdet inte överstiger den övre gränsen för skattningen. Den heldragna linjen representerar en 95 procentig säkerhet, medan den streckade linjen motsvarar en 99 procentig säkerhet. Den infällda bilden är en förstoring av resultaten för närzonen och geosfären.

I likhet med resultaten för C-14 och Mo-93, var medelvärdet för flödet av aktivitet från berget approximativt normalfördelat vid 10 eller fler realiseringar, och detsamma gällde medelvärdet för den beräknade dosen vid 100 eller fler realiseringar (data finns inte redovisade för Ni-59, men medelvärdets konvergens mot normalfördelning visas för Mo-93 i appendix 2). Det analytiska uttrycket för konfidensintervallets gav därför en god beskrivning av de empiriska skattningarna (Figur 3-7). Följaktligen undersöktes sambandet mellan antalet parameterrealiseringar och den övre gränsen för skattningarna av radionuklidflöden och med det analytiska uttrycket för två olika konfidensnivåer (95 och 99 %, Figur 3-8).

Parametervariation i både närzonen och ytsystemet bidrar till variationen i dosrespons för Ni-59, men bidraget från ytsystemet är klart större än det från närzonen (SKB 2015, Appendix F). Detta avspeglas i analysresultaten där det t.ex. krävs 60 realiseringar för en god konvergens av utflödet från geosfären (blå linje i Figur 8), men det krävs 750 realiseringar för samma konvergens av dosberäkningarna (grön linje i Figur 3-8). Att kurvorna för närzonen och geosfären (röd och blå kurva) följer varandra kan förklaras av att variationen i det beräknade utflödet framförallt orsakas av variation i cementens  $K_d$ -värde (SKB 2015, Appendix F). För 100 realiseringar förbättras konvergens för utflödet från berget något och sannolikheten att det underskattats med mer än 8 % är mindre än fem procent. Även konvergens för dosberäkningarna förbättras av 250 ytterligare dragningar, och vid 1000 realiseringar kan vi konstatera att sannolikheten för det sanna medelvärdet är mer än 9 % högre än den beräknade dosen är låg (d.v.s. 5 %).

## 4 Slutsats

Genom att använda återupprepade dragningarna av slumpvis genererade parameteruppsättningar har vi i detta PM visat att konvergensen för den beräknade dosen är god. Detta betyder att sannolikheten för att det verkliga medelvärdet är mer än 10 % högre än de beräknade medelvärdena är låg (mindre än 5%). Vidare visar vi att beräkningar av konfidensintervall under antagande om att medelvärdet är normalfördelat ger balanserade skattningar som stämmer väl överens med de empiriska resultaten. Som SKB tidigare visat tenderar parametervariationen i ysystemet att dominera variationen av den beräknade dosen. Detta tillsammans med faktumet att variationen propagerar i systemet betyder att konvergens i aktivitetsflödet från närzon och geosfär sker vid ett mindre antal dragningar. För de undersökta radionukliderna fann vi en god (eller extremt hög) konvergens för utflödet av radionuklider från berget redan vid 60 parameterrealiseringar. De utförda kompletterande beräkningarna stödjer SKB's tidigare presenterade resultat för konvergensen av den beräknade dosen (SKB 2015, "Uncertainty related to sample size" i avsnitt 5.1.1) och visar att den metodik som använts för probabilistiska beräkningar är rimlig och ger tillförlitliga resultat som inte underskattar den beräknade dosen.

## Referenser

**Crawford J, 2013.** Quantification of rock matrix  $K_d$  data and uncertainties for SR-PSU. SKB R-13-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014.** Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

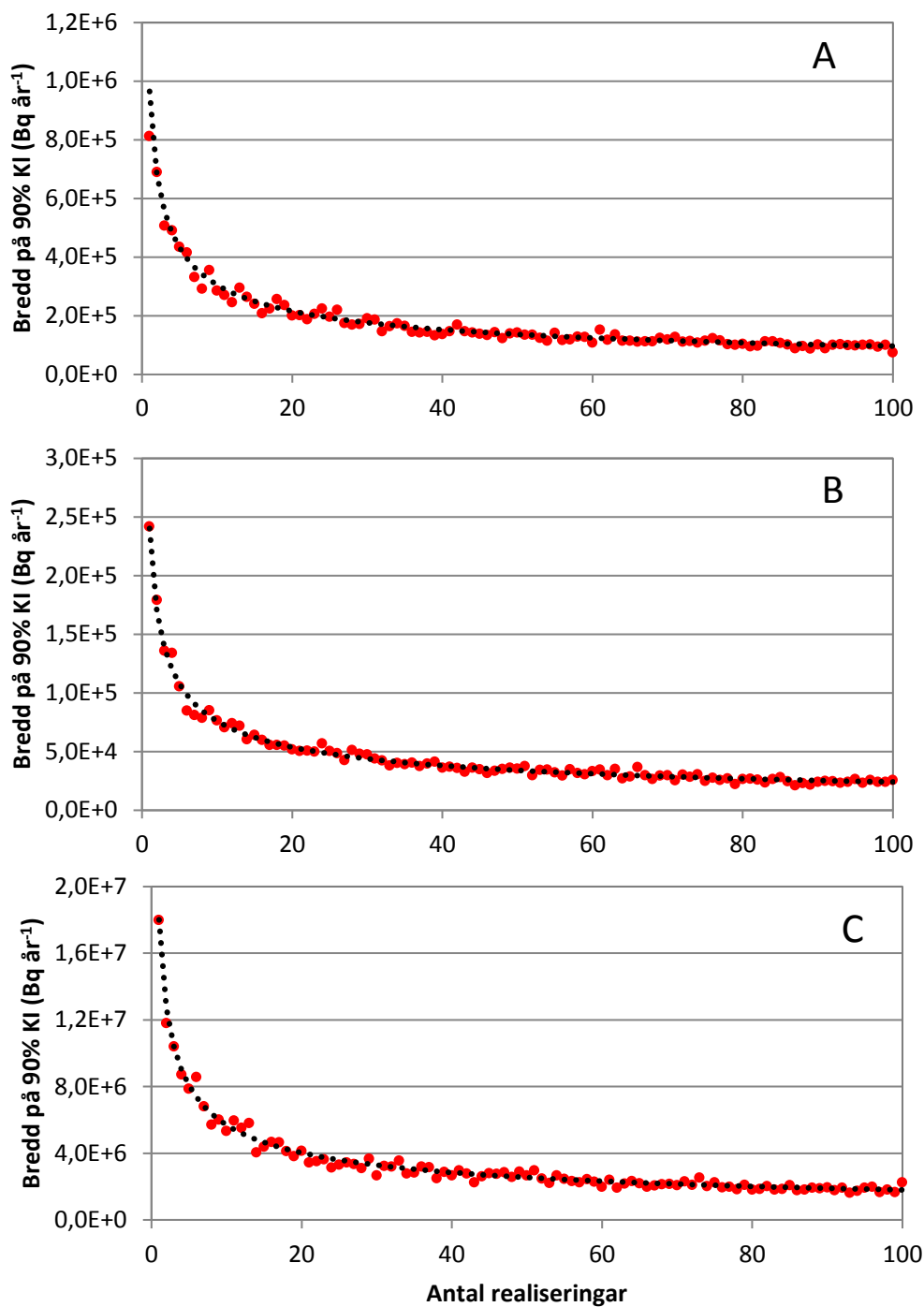
**SKB, 2015.** Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

### Dokument i ansökan

*Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR – säkerhetsanalysmetodik SR-PSU.* SKBdoc 1564154 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

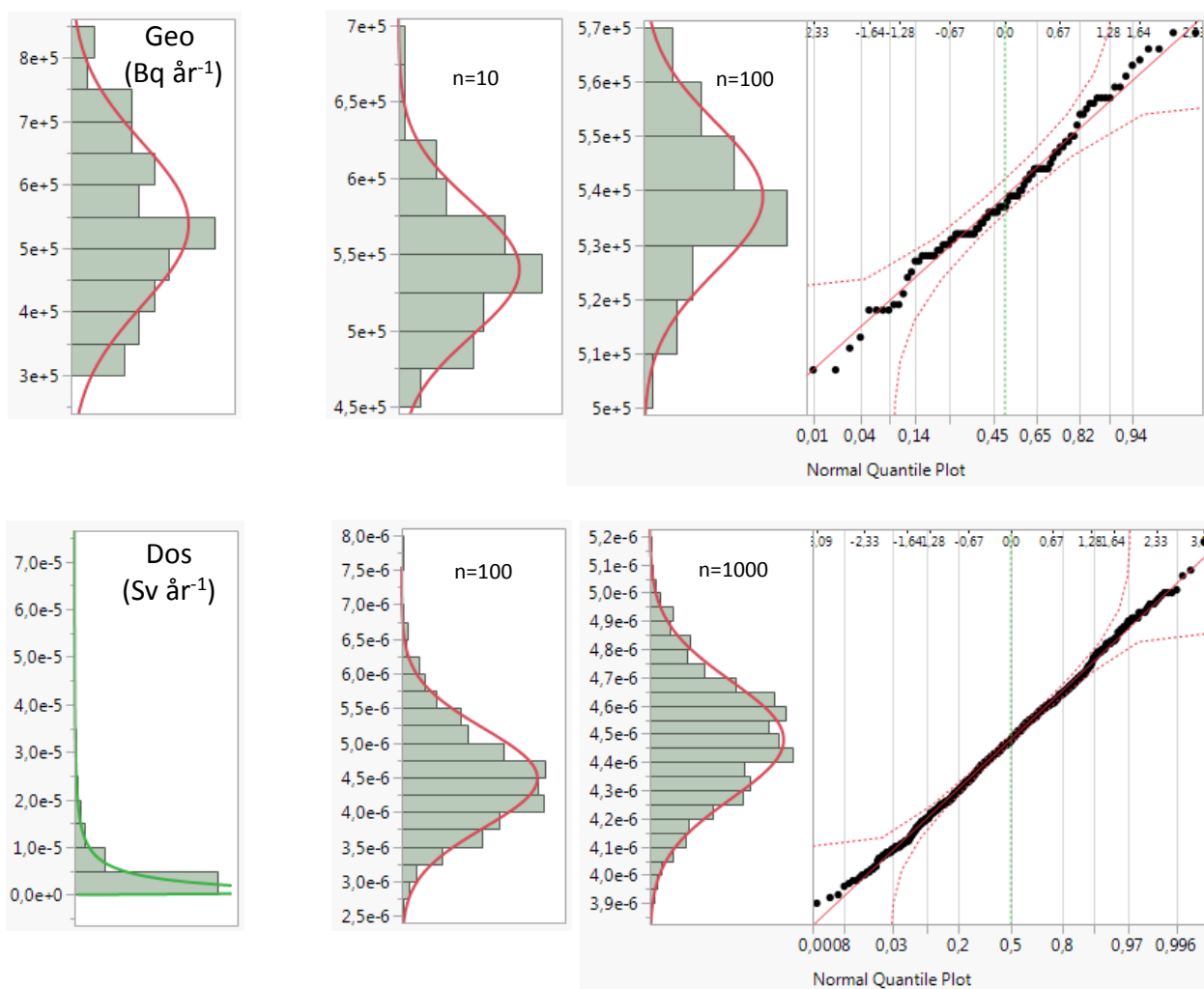
## Appendix 1

Bredden på ett 90 % konfidensintervall (KI) för medelvärdet av flödet av radionuklider från närzonen som en funktion av antal parameterrealiseringar. Beräkningarna är gjorda för fallet för global uppvärmning (CCM\_GW) och omfattar de tre radionukliderna: organisk C-14 år 4500 e Kr (A), Mo-93 år 3100 e Kr (B) och Ni-59 år 58 100 e Kr (C). I figuren kontrasteras bredden av det empiriska konfidensintervallet (färgade punkter) med den analytiska beräkningen som gäller under antagandet att medelvärdet är normalfördelat (streckad linje).



## Appendix 2

Fördelningar för respons och medelvärdet av responsen, som funktion av antal realisationer ( $n$ ), för Mo-93. Aktivitetsflödet från geosfären (Geo) visas i den övre panelen, medan den årliga effektiva dosen redovisas i den nedre panelen. Till vänster visas den ursprungliga fördelningen av responsvariabeln ( $y$ ). I mitten visas fördelningen av medelvärdet vid  $n$  antal dragningar ( $\bar{y}$ ). Till höger visas en normal-kvantil-plot för det högsta antalet dragningar som använts i analysen. Den röda kurvan visar den normalfördelning som bäst passar data, medan den gröna kurvan visar en log-normal fördelning. Y-axeln på normal-kvantil-plotten motsvarar de observerade värdena (d.v.s.  $\bar{y}$  från  $n$  dragningar), medan x-axeln visar den kumulativa normalfördelningen skalade som kvantiler (ovan) eller percentiler (under). Om medelvärdet är normalfördelat bör punkterna falla längs den diagonala linjen i plotten. Samtliga figurer har gjorts med programmet JMP<sup>2</sup>. Observera att skalan på responsvariabeln minskar från höger till vänster inom respektive panel.



<sup>2</sup> JMP®, Version 13.0.0. SAS Institute Inc., Cary, NC, 1989-2007.