



## Osäkerhet i riskbedömningar

Vad gör vi åt det?

Tomas Öberg  
Högskolan i Kalmar  
Email: [tomas.oberg@hik.se](mailto:tomas.oberg@hik.se)



Presentation vid SWECO VIAKs konferens  
Under Ytan i Bålsta, 3-4 oktober 2007



## Två citat

□ *"When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of the meager and unsatisfactory kind."*

Lord Kelvin, 1824-1907, engelsk fysiker



□ *"Uncertainty is the only certainty there is, and knowing how to live with insecurity is the only security."*

John Allen Paulos, amerikansk matematiker



## Många sorters "osäkerhet"

- Stokastisk osäkerhet el. **variabilitet**
  - naturlig variation som inte kan reduceras, t.ex. skillnaderna i kroppsvikt mellan individer i en population
- Epistemisk osäkerhet el. **kunskaps-osäkerhet**
  - bristande kunskap som åtminstone i teorin kan åtgärdas, t.ex. mätfel
- Språklig osäkerhet



## Variabilitet (naturlig variation)

- Interindividuell
  - ålder, kön, olika livsstil, matvanor, kroppsbyggnad, sjukdomar och yrke är bara några av de faktorer som inverkar på de flesta miljö- och hälsorisker
  - vid en punktskattning behandlas alla lika genom att konstruera en slags "medelsvensson" eller en extremt exponerad och känslig individ.
- Spatial (rumslig) variabilitet
  - exempelvis utbredningen av en förorening i ett markområde
- Temporal (tidsmässig) variabilitet



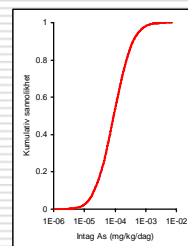
## Kunskapsosäkerhet

- Mätosäkerhet
- Modellosäkerhet
- Parametersäkerhet
- Scenariosäkerhet

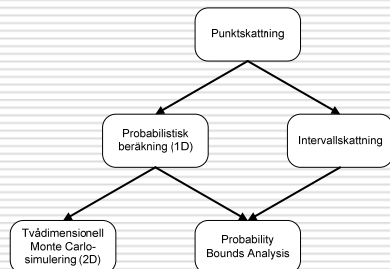


## Hur hanteras osäkerhet?

- Säkerhetsmarginaler, "worst case"
- Osäkerhetsintervall
  - konfidensintervall
  - max-min
- Specifika sannolikhetsfördelningar eller klasser av fördelningar



## Metoderna



## "Worst case"

- Det traditionella hanteringen av osäkerheter
  - lägger till säkerhetsmarginaler
  - väljer parameterskattningar som är medvetet försiktiga
- Osäkerheten är dock inte en del i själva beräkningen
- Med många variabler leder det ofta till realistiska och extrema riskuppskattningar



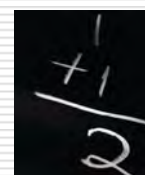
## Intervallskattning

- När vi rapporterar mätresultat
  - mätfel anges ofta som  $\pm$  ett intervall, uppskattat eller statistiskt beräknat
- När vi bedömer vad ett numeriskt värde kan vara
  - "expert opinion"
- Teoretisk (fysikalisk eller teknisk) begränsning



## Enkelt att räkna på

- Antag att  $x$  är  $3 \pm 5$  och  $y$  är  $5 \pm 2$ 
  - vi kan även skriva dessa som  $[-2, 8]$  och  $[3, 7]$
  - $x + y = [1, 15]$
  - $x - y = [-9, 5]$
  - $x * y = [-14, 56]$
  - $x/y = [-2/3, 8/3]$



## Ett räkneexempel

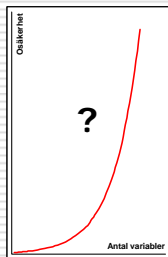
- Antag
  - att arsenikhalten ( $C$ ) i förorenad mark varierar i intervallet 10-100 mg/kg
  - att intaget av jord ( $J$ ) hos barn under 7 år varierar i intervallet 10-200 mg/dag
  - att vikten ( $W$ ) hos barn under 7 år varierar i intervallet 10-30 kg
- Hur kommer intaget av arsenik att variera?

## Räkneexempel forts.

- Intaget av arsenik kan beräknas enligt  $I_{As} = C * J / W$
- Räknereglerna för intervallskattning, steg för steg:
  1.  $I_{As} = ([10, 100] * [10, 200]) / [10, 30] * 10^{-6}$  mg/kg/dag
  2.  $I_{As} = ([10 * 10, 100 * 200]) / [10, 30] * 10^{-6}$  mg/kg/dag
  3.  $I_{As} = ([100, 20000]) / [10, 30] * 10^{-6}$  mg/kg/dag
  4.  $I_{As} = ([100, 20000] * [1/30, 1/10]) * 10^{-6}$  mg/kg/dag
  5.  $I_{As} = [100/30, 20000/10] * 10^{-6}$  mg/kg/dag
  6.  $I_{As} = [3.3, 2000] * 10^{-6}$  mg/kg/dag
- I en mer komplicerad modell är det förstås inte lika enkelt att handräkna, men principerna är desamma

## Vad är skillnaden mot "worst case"?

- Intervallskattning är delvis samma sak, men nu kompletterat med "best case"
- Den principiella skillnaden är att vi tydliggör osäkerheten
- När vi ser osäkerheten kan vi göra något åt den!

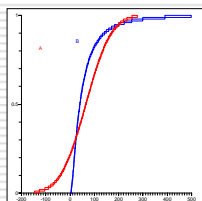


## Intervall är inte optimalt

- All tillgänglig information kommer inte till användning
  - centralmått (medelvärde, median, typvärde)
  - spridning (percentiler, standardavvikelse)
  - form (positiva värden, symmetri, unimodal)
- Probabilistiska metoder, ett alternativ
  - precisa parametriska fördelningar (normal, lognormal, osv)
  - empiriska fördelningar
  - klasser av fördelningar ('p-box')

## Valet av fördelningar är kritiskt

- Metoder
  - grafiskt
  - statistiska test
  - expertbedömning
- Osäkerheten i valet av fördelning utvärderas sällan
  - svårt att genomföra när simuleringar utförs genom slumpmässigt urval från parametriska fördelningar (Monte Carlo)

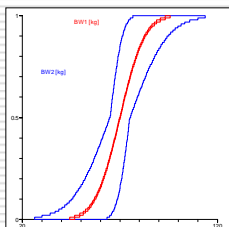


Exempel: Intag av jord: medel=64 och stdav=82 mg/dag, normal resp. log-normalfördelning

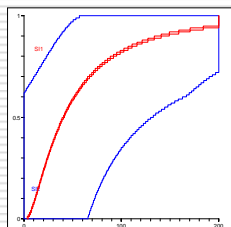
## "Probability bounds analysis"

- En kombination av intervall och fördelningar
  - använder all tillgänglig information, men inga antaganden utöver det
- Möjliga fördelningar innesluts
  - P-box: En klass av fördelningsfunktioner  $F(x)$  omsluten av två kumulativa fördelningsfunktioner  $F_1(x)$  och  $F_2(x)$  så att  $F_1(x) \leq F(x) \leq F_2(x)$  för alla  $x$ .
- Konvergerar till en parametrisk fördelning när alla osäkerhet är eliminerad
- Snabba beräkningsalgoritmer finns tillgängliga

## P-boxar, två exempel



Normalfördelning: Medel = 70 och standardav = 10 kg, eller p-box posmeanstdev(65, 82), max=200.



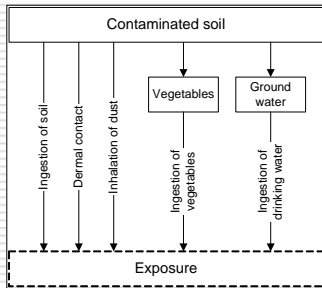
Lognormal(65, 82), max=200, el p-box posmeanstdev(65, 82), max=200.

## En fallstudie

- Ett område förorenat av metallindustri under två sekler
- Kadmium valdes i den här utvärderingen
  - TDI  $\approx$  intaget, metodvalet har betydelse
- Känslig markanv som scenario
- Exponering av barn



## Exponeringsmodellen



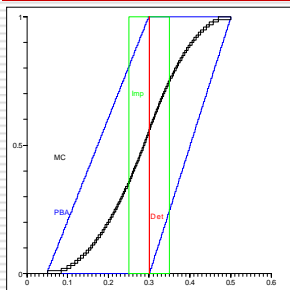
## Parametersättning

- Deterministisk
  - Naturvårdsverket (remissutgåvan)
- Probabilistiska metoder
  1. Exposure Factors Handbook (U.S. EPA)
  2. Exposure Factors Sourcebook for European Populations (ECETOC)
  3. Reviderade CSOIL parameter set
  4. Statistik från SCB och Livsmedelsverket

Variables	Symbol	Det.	Det. with error	Monte Carlo	PBA	PBA with error
<b>General</b>						
Concentration in soil 0.1 m, mg/kg	$C_s$	4.95	4.95	LN(3.1,1.0)	LN(3.1,1.0)	LN(3.1,1.0)
Concentration in soil total, mg/kg	$C_t$	17.4	17.4	LN(6.9,5.7)	LN(6.9,5.7)	LN(6.9,5.7)
Body weight child, kg	BW	15	[14.5,15.5]	N(18.2,66), min=5, max=25	symmeansiddev(18.2,66), min=5, max=25	symmeansiddev(18.2,66), min=5, max=25
<b>Transport to groundwater</b>						
Distribution soil-water, dm <sup>3</sup> /kg	$K_d$	100	[50,150]	100	minmaxmode(0.05,0.3)	[50,150]
Soil water content, dm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>	$\theta_w$	0.31	[0.25,0.35]	triangular(0.05,0.3,0.5)	minmaxmode(0.05,0.3)	LN(0.9,5.7)
Soil bulk density, kg/dm <sup>3</sup>	$\rho_b$	1.5	[1.45,1.55]	triangular(0.25,1.2,1.6)	minmaxmode(0.25,1.6,1.2)	LN(6.9,5.7)
Dilution soil-groundwater	$DF_{gw}$	0.08	[0.022,0.27]	0.08	0.08	[0.022,0.27]
<b>Transport to plants</b>						
Bioconcentration stem and leaf, (mg/kg dry)/(mg/kg soil)	$BCF_{stem}$	0.7	[0.65,0.75]	LN(0.85,0.61)	posmeansiddev(0.85,0.61)	posmeansiddev(0.85,0.61)
Fractional consumption, stem and leaf	$f_{stem}$	0.5	[0.45,0.55]	LN(0.38,0.13), max=1	posmeansiddev(0.38,0.13), max=1	posmeansiddev(0.38,0.13), max=1
Dry to fresh weight stem and leaf, kg/kg	$f_{stem}$	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117
Bioconcentration root, (mg/kg dry)/(mg/kg soil)	$BCF_{root}$	0.15	[0.145,0.155]	LN(0.35,0.33)	posmeansiddev(0.35,0.33)	posmeansiddev(0.35,0.33)
Fractional consumption, root	$f_{root}$	1- $f_{stem}$	1- $f_{stem}$	$f_{root}$	1- $f_{stem}$	1- $f_{stem}$
Dry to fresh weight root, kg/kg	$f_{root}$	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202
<b>Direct oral intake</b>						
Daily soil intake, mg/kg	SI	150	[145,155]	LN(65.82), max=200	posmeansiddev(65.82), max=200	posmeansiddev(65.82), max=200
Exposure time, day	$t_e$	365	365	365	365	365

Variables	Symbol	Det.	Det. with error	Monte Carlo	PBA	PBA with error
<b>Dermal intake</b>						
Dermal soil exposure, mg/in <sup>2</sup> /day	SE	5100	[5050,5150]	LN(2000,900), max=7400	posmeansiddev(2000,900), max=7400	posmeansiddev(2000,900), max=7400
Exposed skin area, m <sup>2</sup>	A	0.28	[0.275,0.285]	LN(0.18,0.017), max=0.24	posmeansiddev(0.18,0.017), max=0.24	posmeansiddev(0.18,0.017), max=0.24
Relative dermal absorption	$f_{da}$	0.14	[0.135,0.145]	0.14	0.14	[0.135,0.145]
Exposure time, day	$t_e$	80	[75,85]	80	80	[75,85]
<b>Inhalation intake</b>						
Concentration of respirable dust indoors, mg/m <sup>3</sup>	$C_{ind}$	0.052	[0.0515,0.0525]	triangular(0.037,0.069, 0.1)	minmaxmode(0.037,0.1,0.069)	minmaxmode(0.037,0.1,0.069)
Fraction of dust indoors from contaminated area	$f_{ind}$	0.8	[0.75,0.85]	triangular(0.5,0.65, 0.8)	minmaxmode(0.5,0.65,0.8)	minmaxmode(0.5,0.65,0.8)
Fraction of time spent indoors	$f_{in}$	0.88	[0.875,0.885]	uniform(0.75,1)	minmaxmode(0.05,0.075,0.1)	minmaxmode(0.05,0.075,0.1)
Concentration of respirable dust outdoors, mg/m <sup>3</sup>	$C_{out}$	0.07	[0.065,0.075]	triangular(0.05,0.075, 0.1)	minmaxmode(0.05,0.075,0.1)	minmaxmode(0.05,0.075,0.1)
Fraction of dust outdoors from contaminated area	$f_{out}$	0.5	[0.45,0.55]	0.5	minmax(0.75,1)	minmax(0.75,1)
Fraction of time spent outdoors	$f_{out}$	1- $f_{in}$	1- $f_{in}$	1- $f_{in}$	1- $f_{in}$	1- $f_{in}$
Breathing rate, m <sup>3</sup> /day	BR	7.6	[7.55,7.65]	7.6	7.6	[7.55,7.65]
Lung retention	LR	0.75	[0.745,0.755]	0.75	0.75	[0.745,0.755]
Exposure time, day	$t_e$	365	365	365	365	365
<b>Intake from vegetables</b>						
Daily consumption of vegetables, kg/day	$R_v$	0.15	[0.145,0.155]	N(0.13,0.04), min=0	symmeansiddev(0.13,0.04), min=0	symmeansiddev(0.13,0.04), min=0
Fraction of consumed vegetables grown on site	$f_s$	0.3	[0.25,0.35]	triangular(0.0,0.13, 0.3)	minmaxmode(0.0,0.13,0.3)	minmaxmode(0.0,0.13,0.3)
Exposure time, day	$t_e$	365	365	365	365	365
<b>Intake with drinking water</b>						
Daily water consumption, dm <sup>3</sup> /day	WC	1	[0.5,1.5]	N(0.87,0.49), min=0.1, max=3	symmeansiddev(0.87,0.47), min=0.1, max=3	symmeansiddev(0.87,0.47), min=0.1, max=3
Exposure time, day	$t_e$	365	365	365	365	365

## Exempel: Vattenhalt i jord



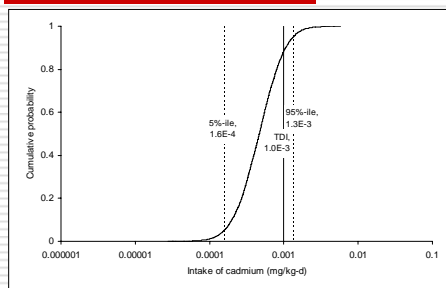
## Utvärdering

1. Deterministisk punktskattning
2. Deterministisk punktskattning med avrundningsfel
3. Monte Carlo-simulering (1-D)
4. Probability bounds analysis (PBA)
5. Probability bounds analysis (PBA) med avrundningsfel

## Deterministisk beräkning

- Punktskattning
  - $1.8 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
- Deterministisk med avrundningsfel
  - $6.9 \times 10^{-4}$  to  $1.1 \times 10^{-2}$  mg/kg/dag
- Jämför detta med det tolerabla dagliga intaget (TDI)
  - $1.0 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
  - 31% under till 1000% över

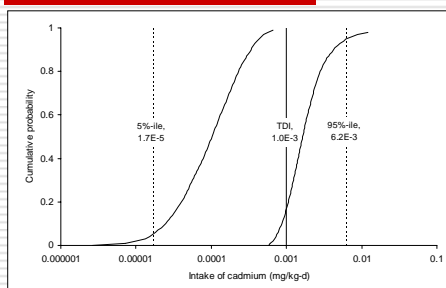
## Monte Carlo-simulering



## Monte Carlo-simulering, forts.

- Percentiler
  - 5:e  $1.6 \times 10^{-4}$  mg/kg/dag
  - 50:e  $4.7 \times 10^{-4}$  mg/kg/dag
  - 95:e  $1.3 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
- Känslighetsanalys (Spearman's rangkorrelation)
  - totalkoncentration av förorening ( $r_s=0.54$ )
  - genomsnittlig vattenkonsumtion ( $r_s=0.37$ )
  - andel av konsumerade grönsaker som odlas på platsen ( $r_s=0.33$ )
  - tre andra variabler relaterade till intag, markkoncentration och kroppsvikt ( $r_s>0.2$ )

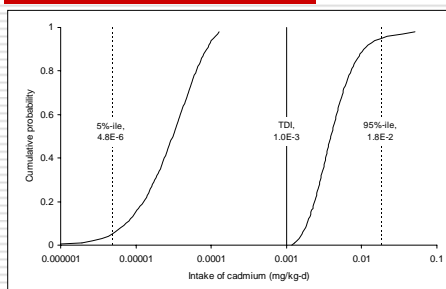
## Probability bounds analysis



## PBA forts.

- Percentiler
  - lägsta 5:e  $1.7 \times 10^{-5}$  mg/kg/dag
  - 50:e  $1.0 \times 10^{-4}$  to  $1.6 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
  - högsta 95:e  $6.2 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
- Känslighetsanalys ('pinching'), gav samma resultat som MC-simuleringen
- Visar liksom MC och PBA att vi kan plocka bort flera exponeringsvägar (oral, dermal och inhalation)

## PBA med avrundningsfel



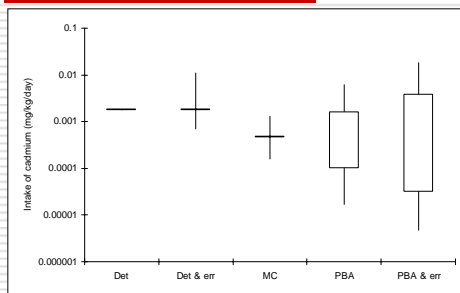
## PBA med avrundningsfel, forts.

- Percentiler
  - lägsta 5:e  $4.8 \times 10^{-6}$  mg/kg/dag
  - 50:e  $3.1 \times 10^{-5}$  to  $3.9 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
  - högsta 95:e  $1.8 \times 10^{-2}$  mg/kg/dag
- Beräkningarna (MC & PBA) har hittills gjorts med antagande om oberoende mellan ingångsvariablerna
- Vad händer om detta antagande är fel?

## PBA med avrundningsfel, forts.

- Vi har testat att ta bort antagandet om oberoende mellan flera av ingångsvariablerna
- Percentiler
  - lägsta 5:e  $1.7 \times 10^{-6}$  mg/kg/dag
  - 50:e  $1.3 \times 10^{-5}$  to  $9.4 \times 10^{-3}$  mg/kg/dag
  - högsta 95:e  $6.7 \times 10^{-2}$  mg/kg/dag
- P-boxen vidgas betydligt, men mindre än en 10-potens
- Den dominerande osäkerheten återfinns i valet av ingångsfördelningar

## Summering av beräkningsjämförelsen



## Är osäkerheten överdriven?

- En rimlig fråga, men svaret är nej!
- Metoden utgår från den information som är tillgänglig för bedömaren
  - P-boxar innehåller inga antagande om fördelningar men
  - en sannolikhetsfördelning kan inneslutas med olika detaljeringsgrad
- och
- när osäkerheten minskar så konvergerar PBA till samma resultat som MC-simuleringen

## Hur minskar vi osäkerheten?

- Genom att skaffa oss bättre information
  - de scenario vi vill beskriva
  - hur vi bygger modeller
  - de faktorer vi stoppar in i modellerna
- Den sista punkten har vi själva bearbetat
  - slutrapport till Hållbar Saneringsprogrammet lämnades 2007-10-01
- Observera också att det endast är kunskapsosäkerheten som kan minskas

## Exponeringsfaktorer

- Svenska data för
  - ålderssammansättning
  - flyttmönster
  - kroppsvikt
  - aktivitetsmönster
  - livsmedelsintag och hemodlat
  - dricksvatten och egna brunnar
  - bostadsrelaterade faktorer
  - mark/jord
- Parametrar
  - medelvärde
  - standardav
  - kurtosis
  - skevhet
- Percentiler
  - 1-99%
- Osäkerhet för parametrar och percentiler
  - 95% konfidensintervall genom bootstrapping

## Kan vi förbättra hanteringen av osäkerhet?



- Det är inte tillräckligt att bara anpassa teoretiska fördelningar!
- Bättre att
  - utvärdera en hel serie av rimliga fördelningar
  - utvärdera ingångsvariabler som bara anges med en siffra åtminstone för avrundningsfel
- Att bara fokusera på den högsta skattningen av risk är inte meningsfullt!
- Bättre att
  - redovisa informationen i dess helhet
  - erkänna vetenskapens begränsningar

## Till sist



- Beslutsfattande bör vara riskinformerat snarare än riskbaserat
- Vetenskaplig osäkerhet bör betraktas som kunskap
- Vi undskattar ofta lekmäns förmåga att förstå osäkerhet
- Osäkerhet kan också vara en fördel, eftersom det ger ett "förhandlingsfönster"
- Detaljregleringar och strikta riktlinjer för beslutsfattande kan begränsa möjligheterna att föra en meningsfull riskdialog

## Mer information



- Rapporter (som PDF från [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se)):
  - Filipsson, M., Bergbäck, B., Öberg, T. *Exponeringsfaktorer vid riskbedömning*. Rapportutkast, 2007.
  - Öberg, T., Sander, P., Bergbäck, B. *Probabilistisk riskbedömning fas 2*. Rapport 5621. Naturvårdsverket, 2006.
  - Öberg, T. *Probabilistisk riskbedömning fas 1*. Rapport 5532. Naturvårdsverket, 2006.
- Artiklar (från författaren):
  - Sander, P., Bergbäck, B., Öberg, T. *Risk Analysis* **26**, 1363-1375 (2006)
  - Sander, P., Öberg, T. *Journal of Soils and Sediments* **6**, 55-61 (2006).
  - Öberg, T., Bergbäck, B. *Journal of Soils and Sediments* **5**, 213-224 (2005).

