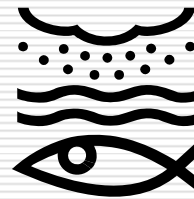


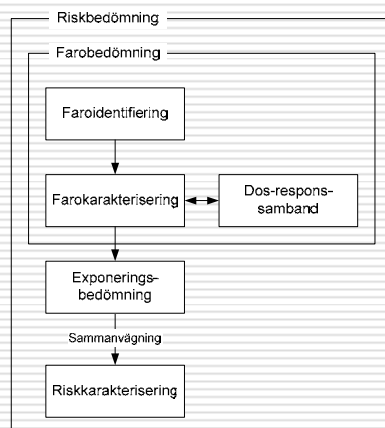
# Probabilistisk riskbedömning

En metod för att hantera osäkerhet och variabilitet

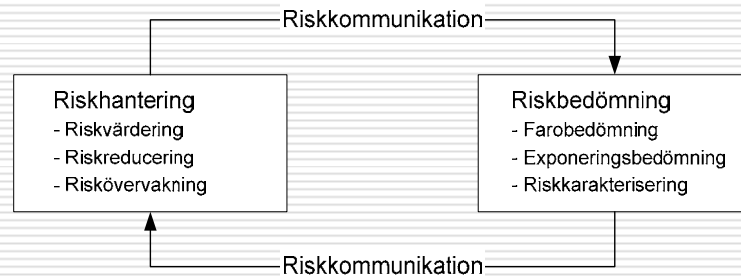
Tomas Öberg  
Högskolan i Kalmar  
Email: [tomas.oberg@hik.se](mailto:tomas.oberg@hik.se)



# Riskbedömningsprocessen



# Risikanalyprocessen



# Probabilistisk exponeringsbedömning

1. Problemformulering
  - Utveckla exponeringsscenario
  - Utveckla exponeringsmodeller
  - Datainsamling
2. Val av metod(er) för riskkarakterisering
  - Deterministisk
  - Probabilistisk
    - Intervall
    - Simulering, Monte Carlo
    - Probability bounds
3. Metodanpassningar
  - Beräkningsgång
4. Separation av osäkerhet och variabilitet i analysen
  - 2D-Monte Carlo
  - Fördelningar + intervall



## Exponeringsscenariot

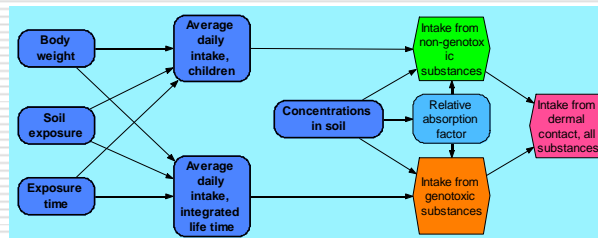
1. Riskkällan
2. Agens, ämne(n)
3. Tid och rum
4. Målpopulation(er)
5. Populationsegenskaper
6. Spridningsvägar
7. Exponeringshändelser
8. Intags-/upptagsvägar
9. Riskhanteringsåtgärder



5

## Exponeringsmodellen

1. Konceptuell beskrivning
2. Modellstruktur
3. Modellantaganden
4. Modellberoenden
5. Matematisk beskrivning
6. Beräkningsgång



6

## Datainsamling och dataanalys

---

1. Ämnesdata
2. Exponeringsfaktorer
  - Informationskällor
3. Relevans, representativitet
4. Beroende
5. Osäkerheter
6. Karakterisering, beskrivning



---

7

## Metodval

---

1. Deterministisk, som första steg
2. Enkel probabilistisk
  - Intervall
  - 1D-Simulering\*
3. Avancerad
  - Probability bounds
  - 2D-Simulering\*



\*Monte Carlo eller LHS

---

8

## 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

---

9

## Variabilitet (naturlig variation)

---

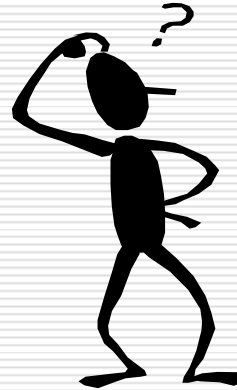
- Interindividuell
  - ålder, kön, olika livsstil, matvanor, kroppsbyggnad, sjukdomar och yrke är bara några av de faktorer som inverkar på de flesta miljö- och hälsorisker
  - vid en punktskattning behandlas alla lika genom att konstruera en slags "medelsvensson" eller en extremt exponerad och känslig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

---

10

## Kunskapsosäkerhet

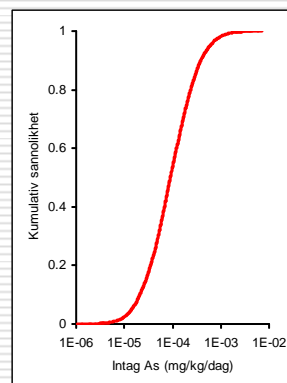
- Mätosäkerhet
- Modellosäkerhet
- Parameterosäkerhet
- Scenariosäkerhet



11

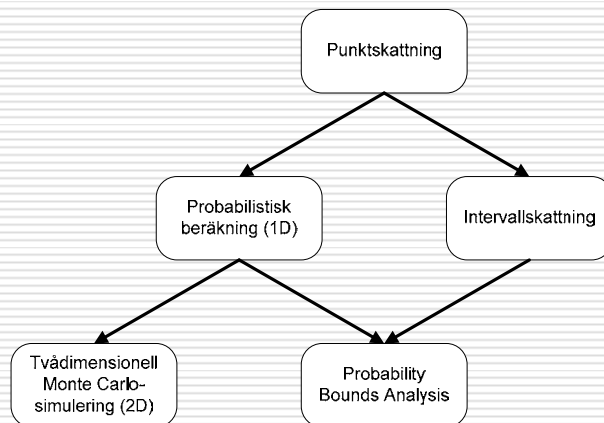
## Hur hanteras osäkerhet?

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



12

## Metoderna



13

## "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 orealistiska och extrema riskuppskattningar



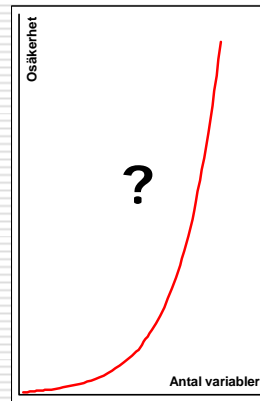
14





## 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!



19

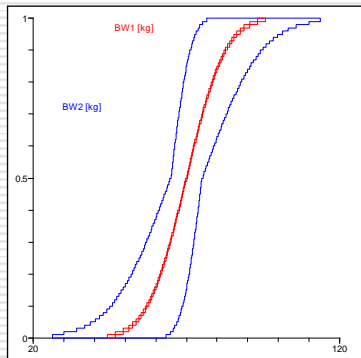
## Intervall är inte optimalt

- 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')

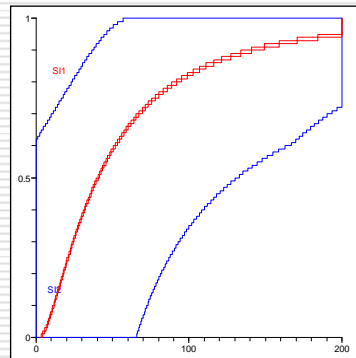
20



## P-boxar, två exempel



Normalfördelning: Medel = 70 och standardav = 10 kg, eller [65, 75] och [5, 15].



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

23

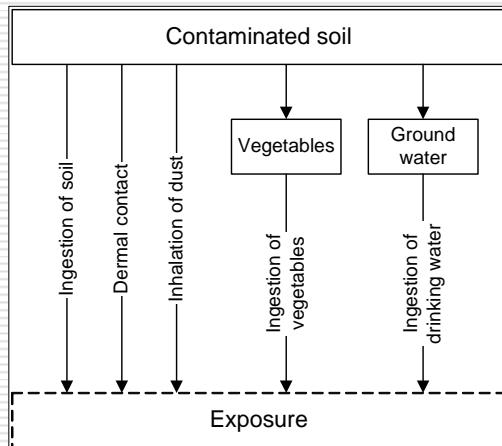
## En fallstudie

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



24

## Exponeringsmodellen



25

## 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

26



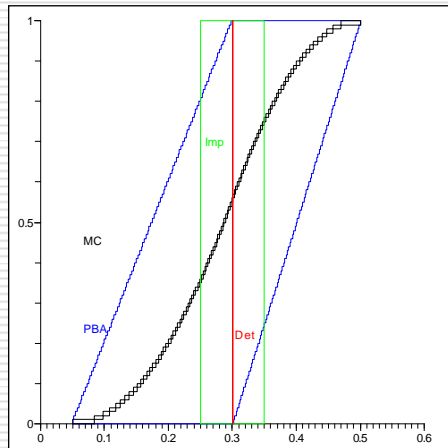
Variables	Symbol	Det.	Det. with error	Monte Carlo	PBA	PBA with error
<b>General</b>						
Concentration in soil 0-1 m, mg/kg	$C_s$	4.95	4.95	LN(3.1,1.0)	LN(3.1,1.0)	LN(3.1,1.0)
Concentration in soil total, mg/kg	$C_t$	17.4	17.4	LN(6.9,5.7)	LN(6.9,5.7)	LN(6.9,5.7)
Body weight child, kg	BW	15	[14.5,15.5]	N(18.2,66), min=5, max=25	symmeanstddev(18.2,66), min=5, max=25	symmeanstddev(18.2,66), min=5, max=25
<b>Transport to groundwater</b>						
Distribution soil-water, $\text{dm}^3/\text{kg}$	$K_d$	100	[50,150]	100	100	[50,150]
Soil water content, $\text{dm}^3/\text{dm}^3$	$\theta_w$	0.3	[0.25,0.35]	triangular(0.05,0.3,0.5)	minmaxmode(0.05,0.5,0.3)	minmaxmode(0.05,0.5,0.3)
Soil bulk density, $\text{kg}/\text{dm}^3$	$\rho_b$	1.5	[1.45,1.55]	triangular(0.25,1.2,1.6)	minmaxmode(0.25,1.6,1.2)	minmaxmode(0.25,1.6,1.2)
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)	posmeanstddev(0.85,0.61)	posmeanstddev(0.85,0.61)
Fractional consumption, stem and leaf	$f_{stem}$	0.5	[0.45,0.55]	LN(0.38,0.13), max=1	posmeanstddev(0.38,0.13), max=1	posmeanstddev(0.38,0.13), max=1
Dry to fresh weight stem and leaf, kg/kg	$r_{stem}$	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)	posmeanstddev(0.35,0.33)	posmeanstddev(0.35,0.33)
Fractional consumption, root	$f_{root}$	$1 - f_{stem}$	$1 - f_{stem}$	$1 - f_{stem}$	$1 - f_{stem}$	$1 - f_{stem}$
Dry to fresh weight root, kg/kg	$r_{root}$	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	posmeanstddev(65.82), max=200	posmeanstddev(65.82), max=200
Exposure time, day	$t_{ex}$	365	365	365	365	365

27



Variables	Symbol	Det.	Det. with error	Monte Carlo	PBA	PBA with error
<b>Dermal uptake</b>						
Dermal soil exposure, $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$	SE	5100	[5050,5150]	LN(2000,990), max=7400	posmeanstddev(2000,990), max=7400	posmeanstddev(2000,990), max=7400
Exposed skin area, $\text{m}^2$	A	0.28	[0.275,0.285]	LN(0.18,0.017), max=0.24	posmeanstddev(0.18,0.017), max=0.24	posmeanstddev(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	$t_{da}$	80	[75,85]	80	80	[75,85]
<b>Inhalation uptake</b>						
Concentration of respirable dust indoors, $\text{mg}/\text{m}^3$	$C_{d,ind}$	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	$f_{d,ind}$	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	$f_{t,ind}$	0.88	[0.875,0.885]	uniform(0.75,1)		
Concentration of respirable dust outdoors, $\text{mg}/\text{m}^3$	$C_{d,out}$	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	$f_{d,out}$	0.5	[0.45,0.55]	0.5	minmax(0.75,1)	minmax(0.75,1)
Fraction of time spent outdoors	$f_{t,out}$	$1 - f_{t,ind}$	$1 - f_{t,ind}$	$1 - f_{t,ind}$	$1 - f_{t,ind}$	$1 - f_{t,ind}$
Breathing rate, $\text{m}^3/\text{day}$	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	$t_{id}$	365	365	365	365	365
<b>Intake from vegetables</b>						
Daily consumption of vegetables, kg/day	$R_{ig}$	0.15	[0.145,0.155]	N(0.13,0.04), min=0	symmeanstddev(0.13,0.04), min=0	symmeanstddev(0.13,0.04), min=0
Fraction of consumed vegetables grown on site	$f_g$	0.3	[0.25,0.35]	triangular(0.0,0.13,0.3)	minmaxmode(0.0,0.3,0.13)	minmaxmode(0.0,0.3,0.13)
Exposure time, day	$t_{ig}$	365	365	365	365	365
<b>Intake with drinking water</b>						
Daily water consumption, $\text{dm}^3/\text{day}$	WC	1	[0.5,1.5]	N(0.87,0.49), min=0.1, max=3	symmeanstddev(0.87,0.47), min=0.1, max=3	symmeanstddev(0.87,0.47), min=0.1, max=3
Exposure time, day	$t_{iw}$	365	365	365	365	365

## Exempel: Vattenhalt i jord



$Det. = 0.3$   
 $Imp. = [0.25, 0.35]$ , avrundning  
 $MC = triangular(0.05, 0.3, 0.5)$   
 $PBA = minmaxmode(0.05, 0.5, 0.3)$

29

## 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

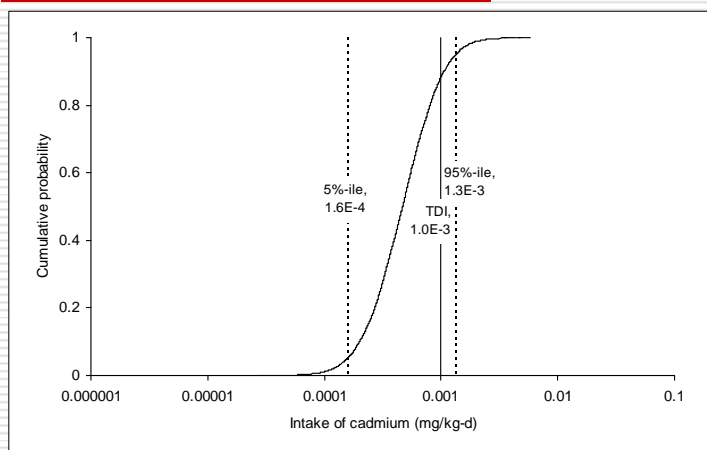
30

## 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

31

## Monte Carlo-simulering



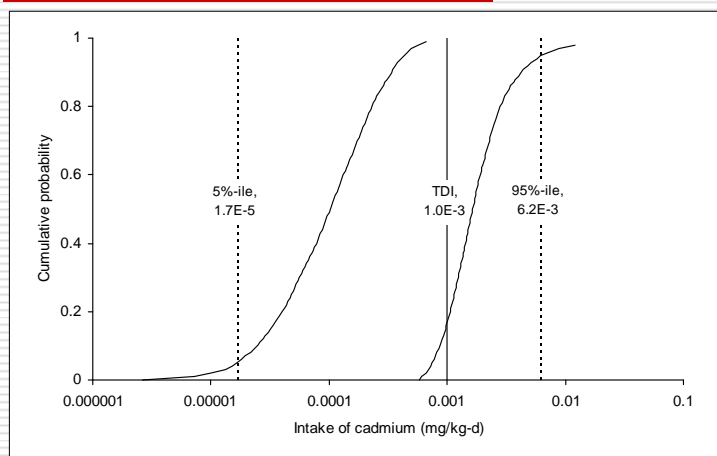
32

## 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 ( $r_s>0.2$ )

33

## Probability bounds analysis



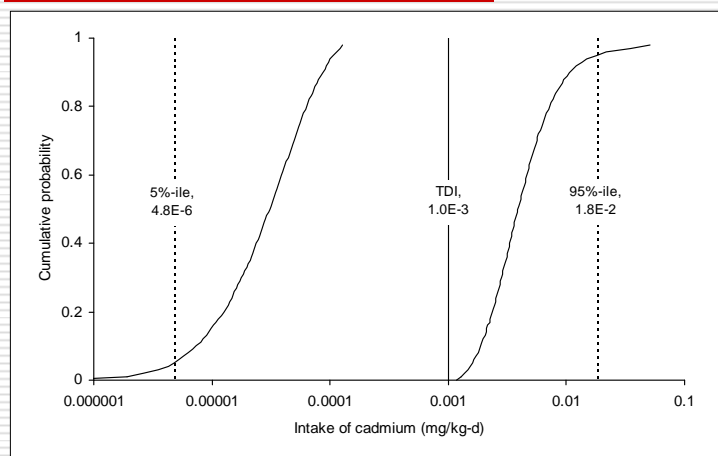
34

## 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)

35

## PBA med avrundningsfel



36

## 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?

---

37

## PBA med avrundningsfel, forts.

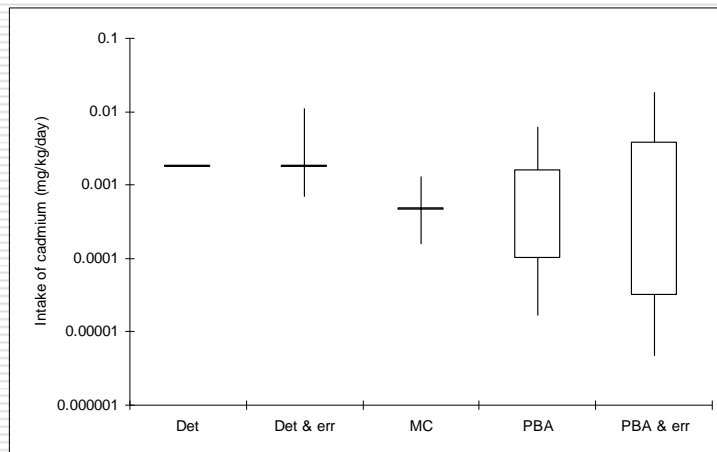
---

- 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

---

38

## Summering av beräknings- jämförelsen



39

## 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

40

## 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
    - Hållbar Sanering-programmet
    - Projekt åt Stockholm Stad
  - Observera också att det endast är kunskapsosäkerheten som kan minskas
- 

41

## Exponeringsfaktorer

---

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> Svenska data för<ul style="list-style-type: none"><li>■ ålderssamman-sättning</li><li>■ flyttmönster</li><li>■ kroppsvikt</li><li>■ aktivitetsmönster</li><li>■ livsmedelsintag och hemodlat</li><li>■ dricksvatten och egna brunnar</li><li>■ bostadsrelaterade faktorer</li><li>■ mark/jord</li></ul></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li><input type="checkbox"/> Parametrar<ul style="list-style-type: none"><li>■ medelvärde</li><li>■ standardav</li><li>■ kurtosis</li><li>■ skevhet</li></ul></li><li><input type="checkbox"/> Percentiler<ul style="list-style-type: none"><li>■ 1-99%</li></ul></li><li><input type="checkbox"/> Osäkerhet för parametrar och percentiler<ul style="list-style-type: none"><li>■ 95% konfidens-intervall genom bootstrapping</li></ul></li></ul> |
|--|--|
- 

42

## 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

---

43

## Till sist

---

- Beslutsfattande bör vara riskinformerat snarare än riskbaserat
- Vetenskaplig osäkerhet bör betraktas som kunskap
- Vi underskattar 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

---

44

