



TEKNOLOGISK
INSTITUT

it's all about innovation





TEKNOLOGISK
INSTITUT

Måleusikkerhed, datahåndtering og dataanalyse i smarte systemer

Morten K Rasmussen, fysiker, mokr@teknologisk.dk



<https://dk.linkedin.com/in/mortenkrasmussen>

Morten K Rasmussen



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Fysik & nanoteknologi (Aarhus Universitet, Interdisciplinary Nanoscience Center, **iNANO**) 2011
- Center for Installation & Kalibrering, sektion for Metrologi
- Arbejder til dagligt bl.a. med måleteknologi og måleusikkerheds-analyse
- Rådgivning, undervisning og udvikling/support på tværs af kalibreringslaboratorierne
 - Opbygning af målesystemer, usikkerhedsbudgetter, kalibreringssoftware, dataopsamling, dataanalyse etc.
- Deltager i EU og nationale F&U projekter indenfor
 - Fundamental metrologi
 - Energi & Klima
 - Energilagring
 - Meteorologi i ekstreme miljøer fx på Arktis

Overblik



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Hvad menes der med smarte systemer
- Hvilke udfordringer og muligheder giver disse systemer
- Eksempel på et smart system
- Hvad kan data anvendes til
- Hvordan håndteres og valideres rådata
- Usikkerhedsberegning

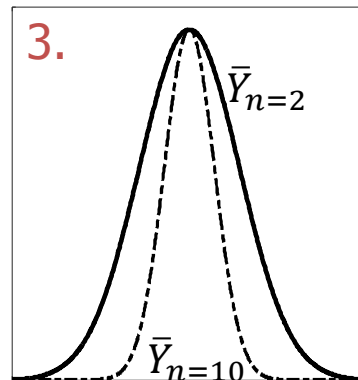
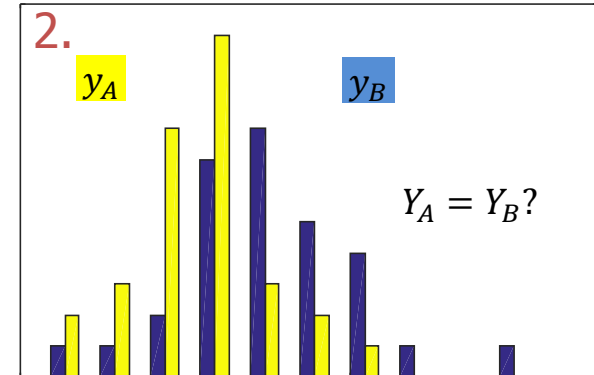
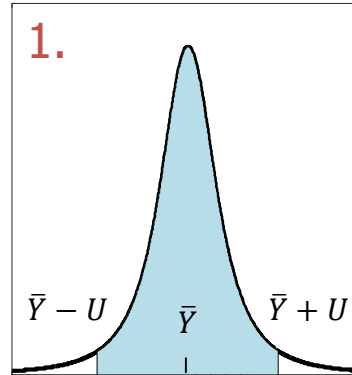


Motivation – usikkerhedsberegning



■ Usikkerhedsberegning

1. Hvor sikker er man på målerens visning?
2. Hvornår er to målinger forskellige?
3. hvad er den nødvendige stikprøve-størrelse? Hvor mange målinger er nødvendige? Loggefrekvens?

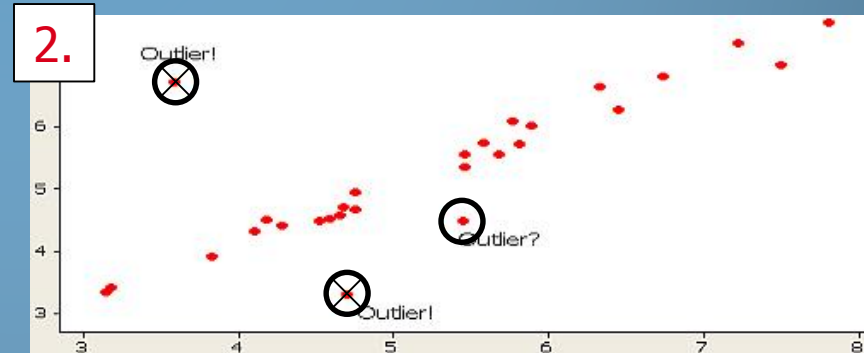
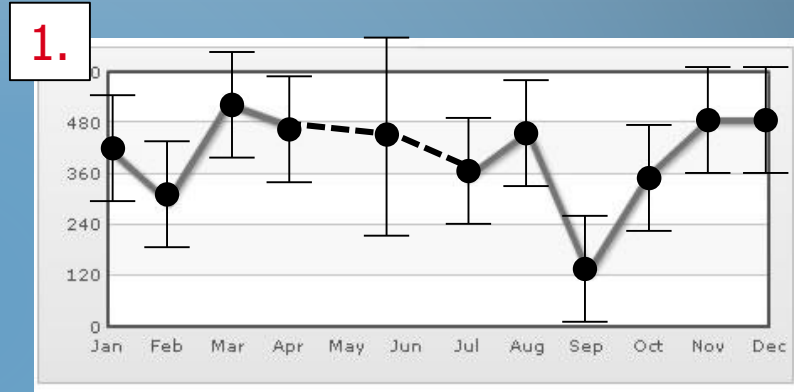
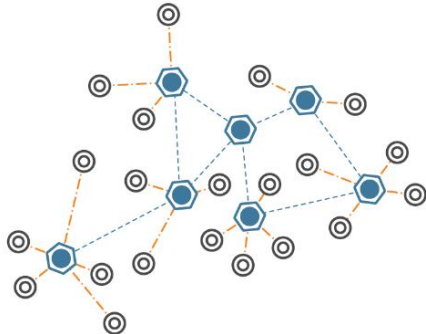


Motivation – estimering af usikkerhed og dataforædling



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Forædling og validering af rådata
 1. Tidsserie-data → målere falder ud
 2. Målere giver upålidelige værdier
- Databehandling
 - Veldefinerede beskrivende statistiske estimater
 - Machine learning (regression, clustering, outlier detection, neural network etc.)
 - Sensornetværk: selvkalibrering, in situ kalibrering etc.

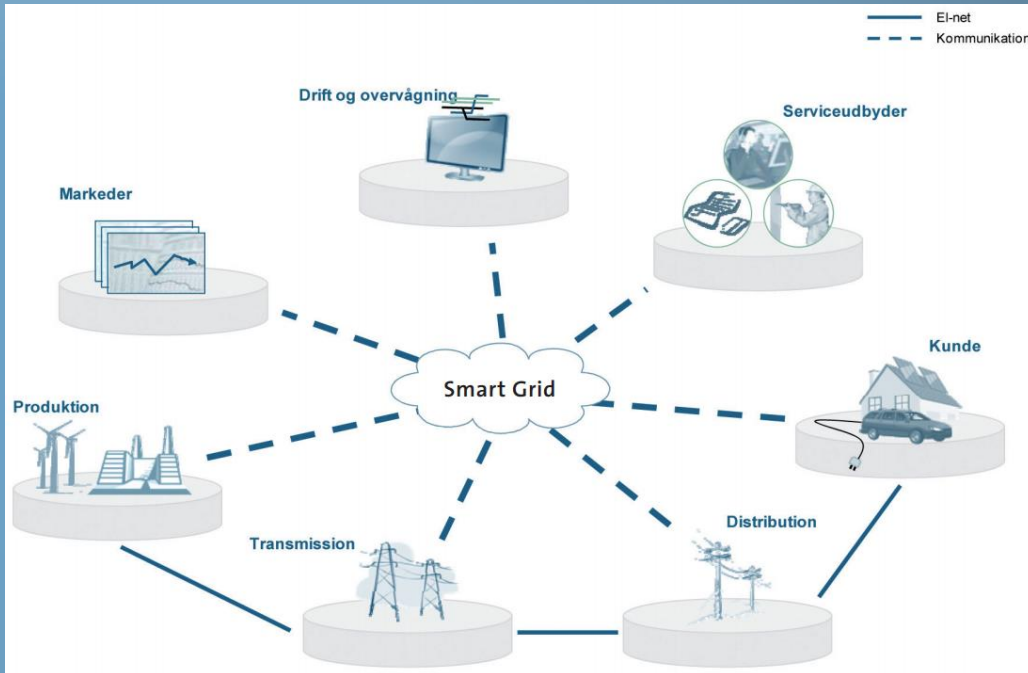


Smarte systemer



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Intelligente systemer, der kan integrere alle tilkoblede brugeres adfærd og handlinger – både dem der producerer, dem der forbruger, og dem der gør begge dele...
- For effektivt at kunne levere en bæredygtig, økonomisk og sikker forsyning...
- Fordele for forbrugere, miljø og samfund
 - Bedre systemstabilitet med højere leveringssikkerhed
 - Flere muligheder for billigere og mere effektivt at skabe balance i nettet
 - Hurtigere udbedring af fejl i nettet
 - Et reduceret behov for investeringer i nettet
 - Generelle energibesparelser og lavere priser til forbrugerne
 - Øget integration af vedvarende energy via fleksibiliteten i nettet, hvor en mindre tidsmæssig forskydning af forbruget ikke vil reducere forbrugernes komfort



Smart grid i Danmark, Energinet.dk

Smart Grid definition, www.smartgrids.eu

What's So Smart about the Smart Grid?, Booz&CO 2008

European Technology Platform SmartGrids, Europakommisionen, 2006

Elementer I smart-grid



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Sensorer (Smart Meters)
- Datakommunikation
- Datalagring, datahåndtering og dataadministration
- Datasikkerhed
- Datanalyse (big data, data mining, machine learning...)
- Evaluering og tilbagekobling
 - Forbrugsvisualisering
 - Produktionstilpasning
 - Driftsoptimering



Projektet - Driftoptimering af Smart Grid – fjernvarmesystemer for lavtemperatur



- 78 smart meters (energimålere) installeret
 - 65 husstandsmålere
 - 9 målere i omløbsskabe
 - 4 målere i to blandeskabe til de to områder
- I 2 testområder
 - Område 1: parcelhuse fra 1955 – 65 (radiatorer)
 - Område 2: Parcelhuse fra 1998 – 99 (gulvvarme)
- Data logget på minutbasis
- Data fra før og efter forskellige driftoptimeringer
- IT-Værtøjer:
 - TERMIS: Numerisk værktøj til hydraulisk og termodynamisk modellering og simulering af bl.a. tryk, temperatur og energi i forsyningsnettet for både frem- og returløb
 - Matlab: Matematik- og programmeringssoftware



Fjernvarme-distributionsnettet

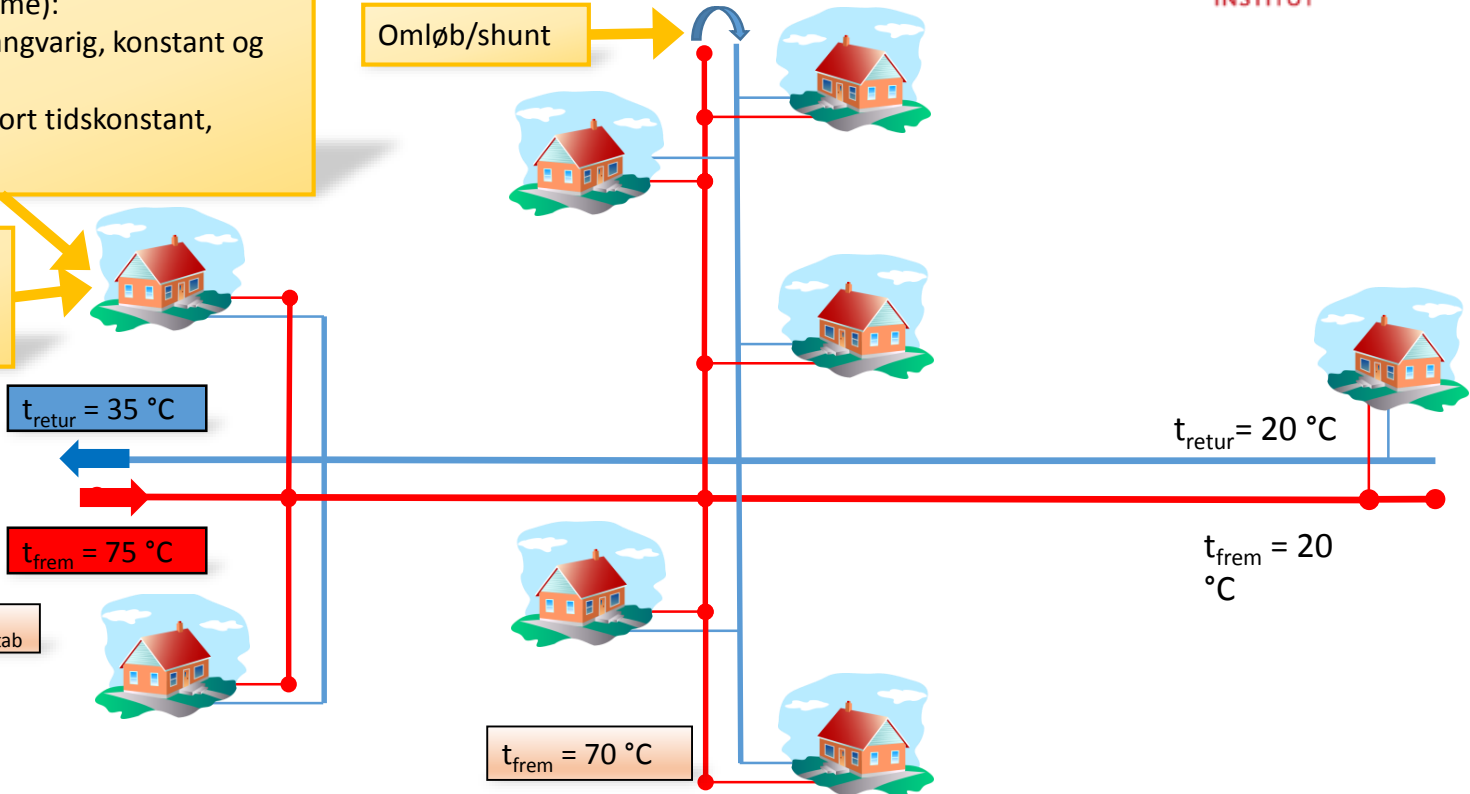


Energiforbrug (fjernvarme):

- Rumopvarmning (langvarig, konstant og vejrafhængigt)
- Varmt brugsvand (kort tidskonstant, vejruafhængigt)

Omløb/shunt

Energi til opvarmning:
Afkøling af fjernvarme-
vandet



$$P_{\text{total}} = P_{\text{varme}} + P_{\text{pumpe}}$$

$$P_{\text{varme}} = \Delta t \cdot c \cdot Q_{\text{masse}}$$

$$P_{\text{varme}} = \sum p_{\text{forbrug}} + \sum p_{\text{varmetab}}$$

$$P_{\text{pumpe}} = \frac{Q \cdot \Delta p_{\text{tot}}}{\eta}$$

Anvendelse af de mange data



TEKNOLOGISK

- Visualisering
 - Forbrug af varme-energi
 - Gennemsnitlig fjernvarmeafkøling
 - Hvornår der er forbrug
 - Benchmarking – anonymiseret sammenligning med andre kunder
- Driftoptimering:
 - Forbrugsvisualisering
 - Kundevejledning
 - Bedre kendskab til forbrugsmønstre
 - bedre produktionsplanlægning
 - bedre drift af distributionsnettet
- Inkorporering af VE-kilder
 - Sol, vind etc.

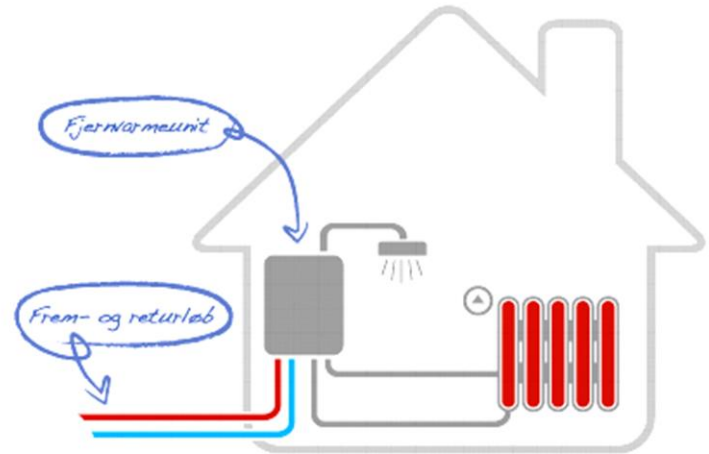


Projektets hovedformål



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- At udvikle håndterings-, modellerings- og analyseværktøjer
 - Verifikation af målerdata for at sikre kvaliteten af inputdata til videre analyser.
 - Etablere en simuleringsmodel og –metode i TERMIS baseret på validerede minutdata.
 - Analysere og estimere usikkerheden på outputtet fra TERMIS
 - Udvikle værktøjer og metoder til at analysere driftsoptimeringer og logningsintervallets indflydelse på resultaterne.

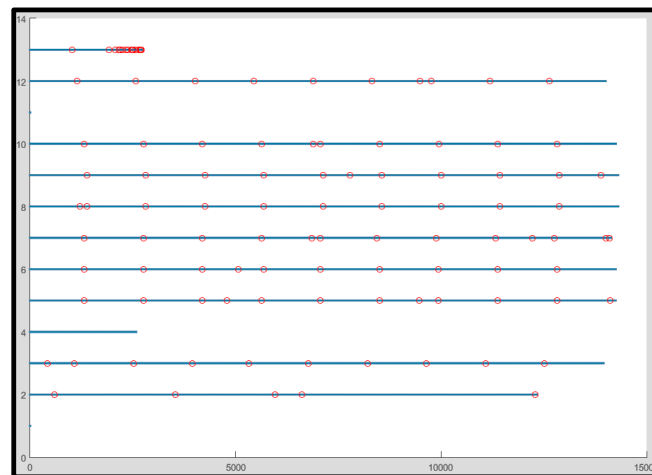
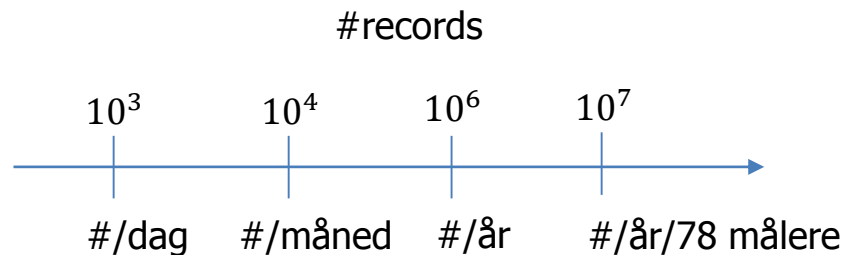


Datamængde og anvendelighed



TEKNOLOGISK
INSTITUT

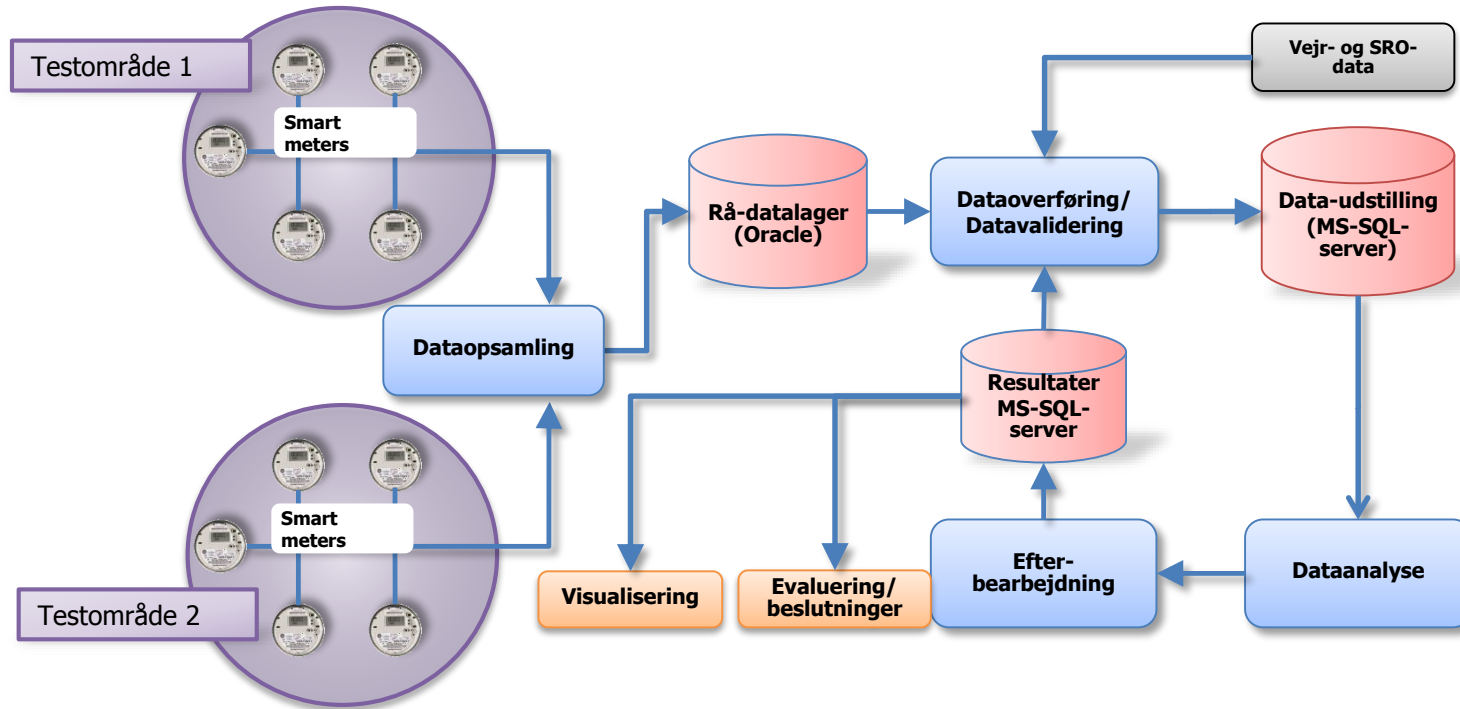
- Hvordan håndteres denne datamængde?
 - 1 datalinje (record) per minut
 - → 41 mio. linjer per år for 78 målere
 - (Excel 1 mio. linjer)
 - → database / distributed storage
- Hvordan skal data forædles, gøres konsistente
 - Der skal udvikles algoritmer
 - Anvendes eksisterende software?
- Hvor mange data skal der til?
 - Kan logningsintervallet nedsættes til en time?
 - Databehandlingen kan tage meget lang tid at køre på en enkelt maskine → parallel processing
 - Det kommer an på usikkerheden på den relevante parameter



Dataflow – håndtering af data



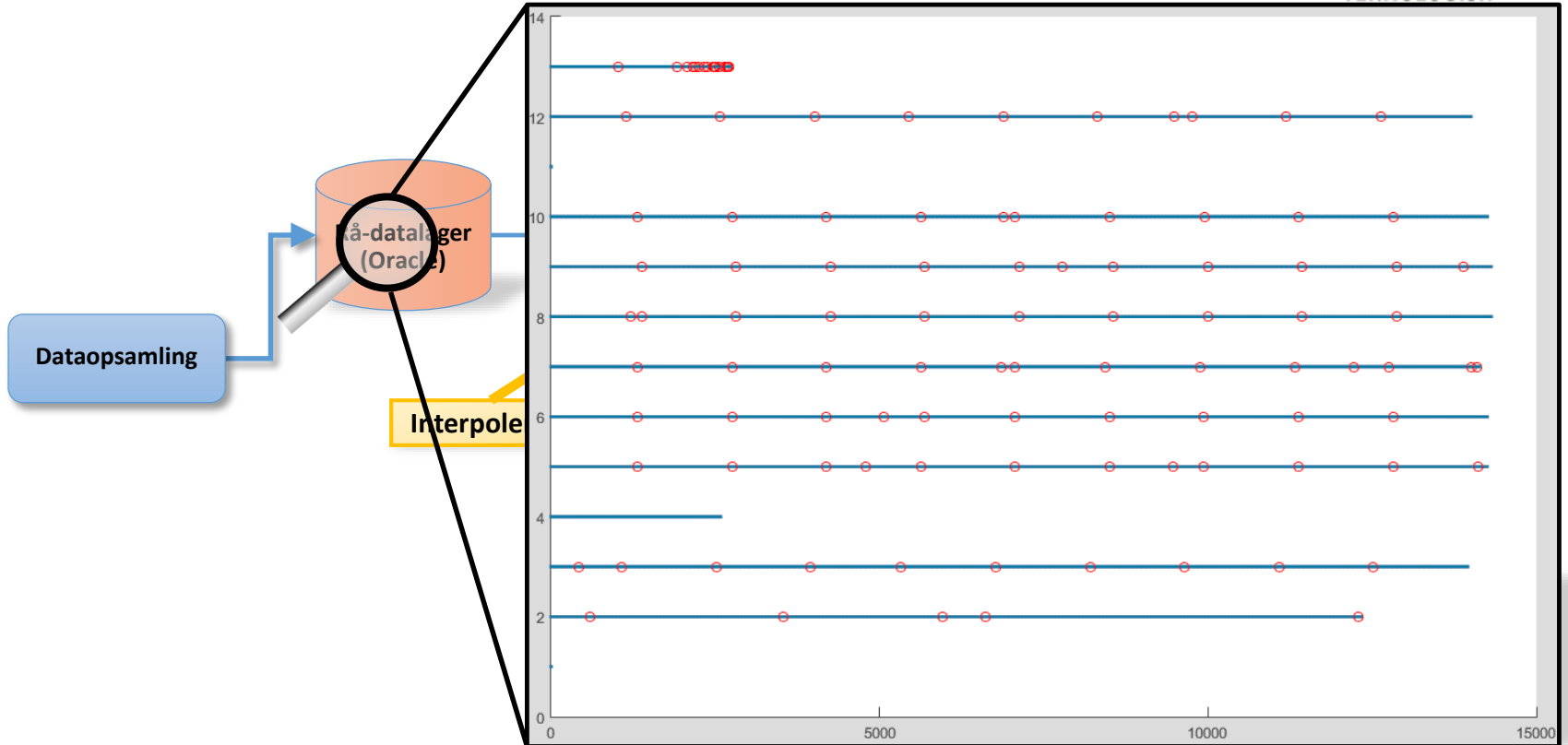
TEKNOLOGISK
INSTITUT



Databehandling og validering af data

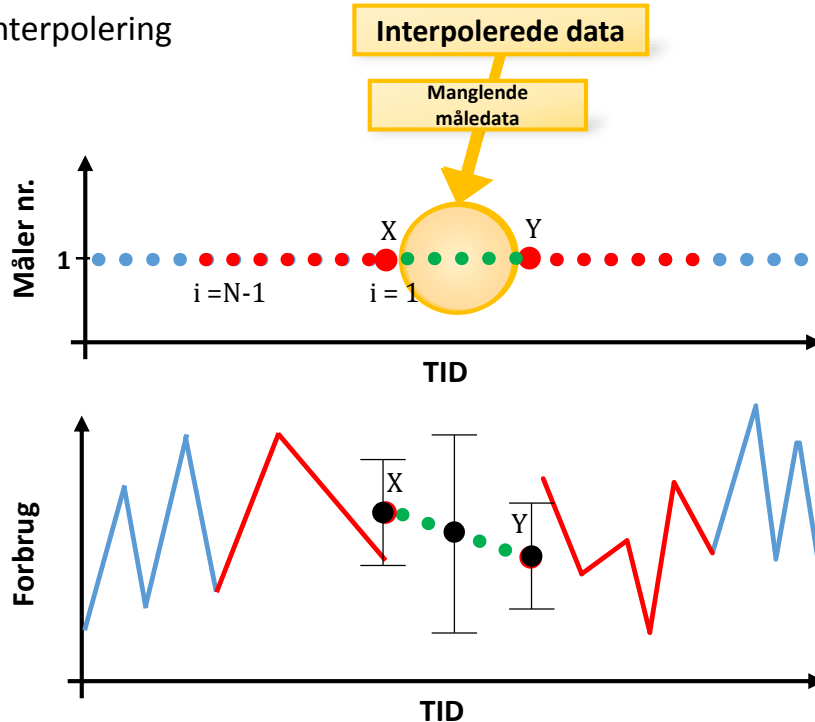


TEKNOLOGISK



Databehandling og validering af data

Interpolering



Vægtning af hvert punkt afhængigt af hvor langt det er fra hullet:

$$W_i = 1 - \frac{i}{N} \quad x_i = \text{data punkter}$$

Vægtet gennemsnit $X = \frac{\sum xW_i}{\sum W_i}$

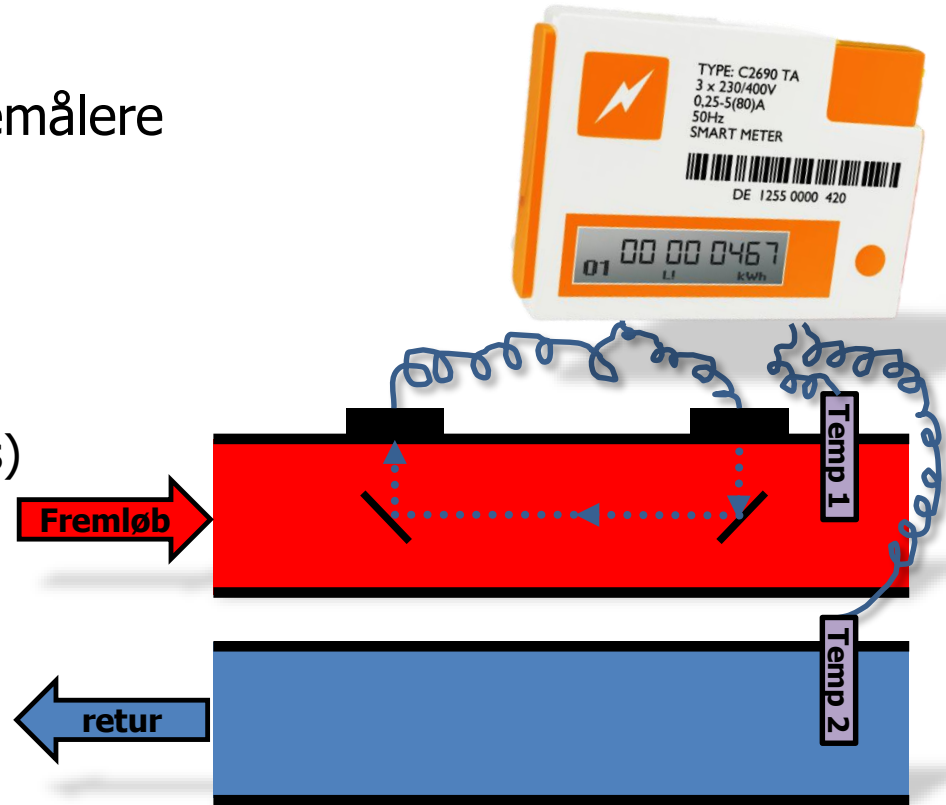
- Denne metode er
 - Simpel og nem at implementere
 - Robust
 - Giver stabile statistiske estimater
- Hvad med usikkerheden?
 - Variationer omkring interpolationen
 - Interpolationens udstrækning
 - Historiske data

Målerdata - nøjagtighed



TEKNOLOGISK

- I henhold til EN-1434 varmemålere
 - Flow sensor
 - Temperaturfølere (differenstemperatur)
 - Beregnerdel
 - Temperaturfølere (enkeltvis)



Målerdata – nøjagtighed - Maksimale tilladelige fejl (EN 1434)



TEKNOLOGISK
INSTITUT

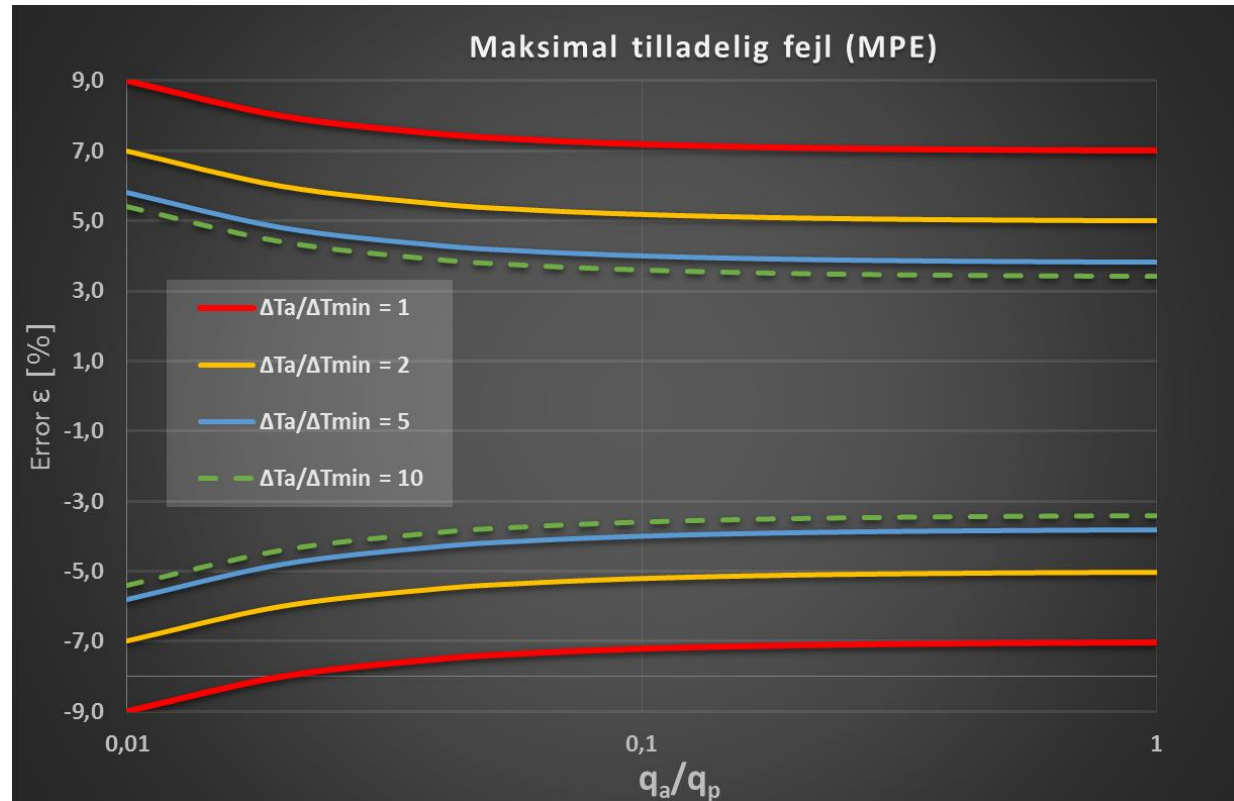
Flow Sensor:	$\varepsilon_F = \pm \left(2 + 0,02 \cdot \frac{q_p}{q_a} \right) [\%]$	ε_F : Procentuel maksimal fejl på flowsensor q_a : Aktuelt flow q_p : Maksimum flow
Temperaturfølere (par):	$\varepsilon_D = \pm \left(0,5 + 3 \cdot \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_a} \right) [\%]$	ε_D := Procentuel maksimal fejl på afkøling ΔT_a := Aktual temperaturforskel ΔT_{min} := Mindste målbare temperaturforskel
Beregnerdel:	$\varepsilon_C = \pm \left(0,5 + \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_a} \right) [\%]$	ε_C : Procentuel maksimal fejl på regner ΔT_a : Aktual temperaturforskel ΔT_{min} : Mindste målbare temperaturforskel
Temperaturføler:	$\pm 2 \text{ K}$	

Total:
$$\varepsilon_E = \pm \left(\left(2 + \frac{0,02}{\frac{q_a}{q_p}} \right) + \left(0,5 + \frac{1}{\frac{\Delta T_a}{\Delta T_{min}}} \right) + \left(0,5 + \frac{3}{\frac{\Delta T_a}{\Delta T_{min}}} \right) \right) = \pm \left(3 + \frac{0,02}{\frac{q_a}{q_p}} + \frac{4}{\frac{\Delta T_a}{\Delta T_{min}}} \right) [\%]$$

Målerdata – nøjagtighed som funktion af flow



TEKNOLOGISK
INSTITUT

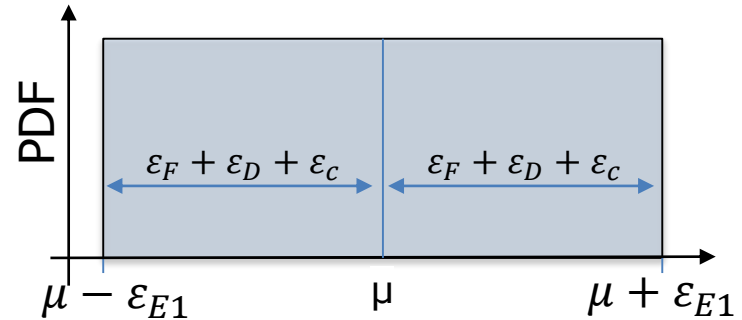


Målerdata - usikkerhed



- Aritmetisk sum (worst case): 100 % konfidens

$$\varepsilon_{E1} = \pm(\varepsilon_F + \varepsilon_D + \varepsilon_c) [\%]$$

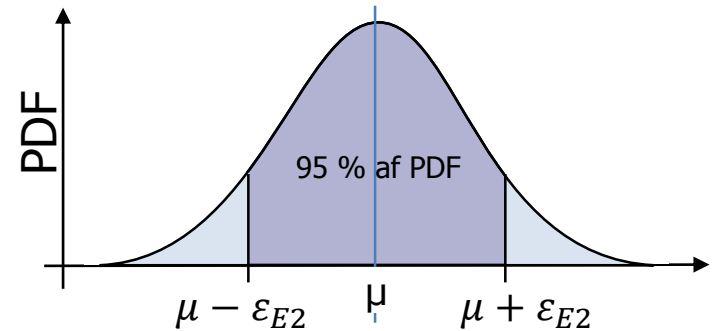


- Pythagorisk sum (af varianser iht. GUM): 95 % konfidens

$$\varepsilon_{E2} = \pm 2 \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_F}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_D}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2} [\%]$$

- Antager ingen korrelation,
- Og at resultatet er normalfordelt

$$\begin{array}{c} \square + \square = \triangle \\ \varepsilon_F + \varepsilon_D, \varepsilon_c = \varepsilon_E \end{array}$$

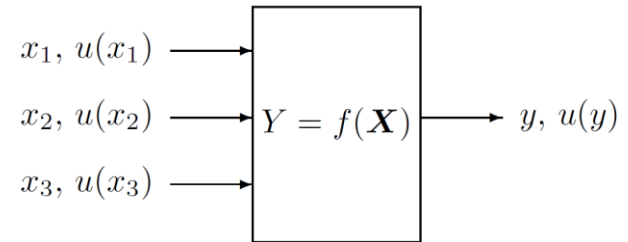
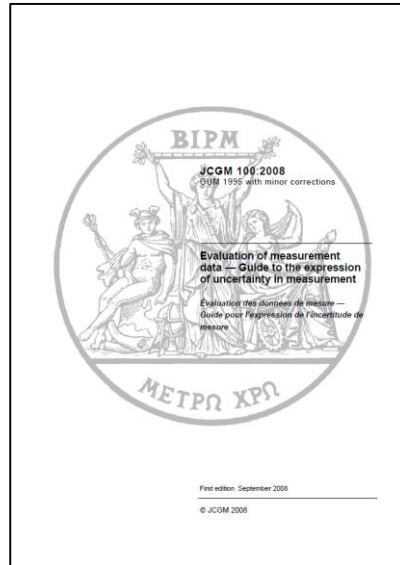


Estimering af usikkerhedsparametre



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- GUM 1995 / EA 4-02 / DANAK AB11 mm.
 - **Problemer med denne tilgang:**
 - Kræver en matematisk model som kan beskrives vha. et analytisk udtryk
 - Linearisering er ikke altid hensigtsmæssig
 - Beror på andre forsimplede antagelser omkring input og output parametre



Propagering af usikkerheder

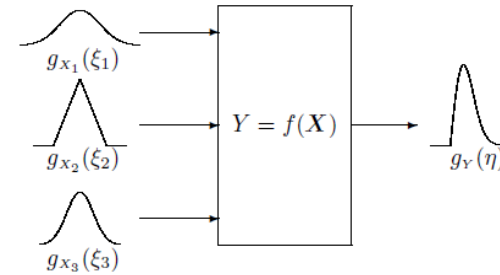
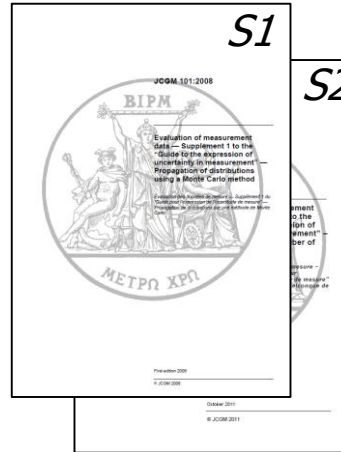
$$x, u(x) \rightarrow \boxed{f = X^2} \rightarrow y, u(y)$$

Estimering af usikkerhedsparametre

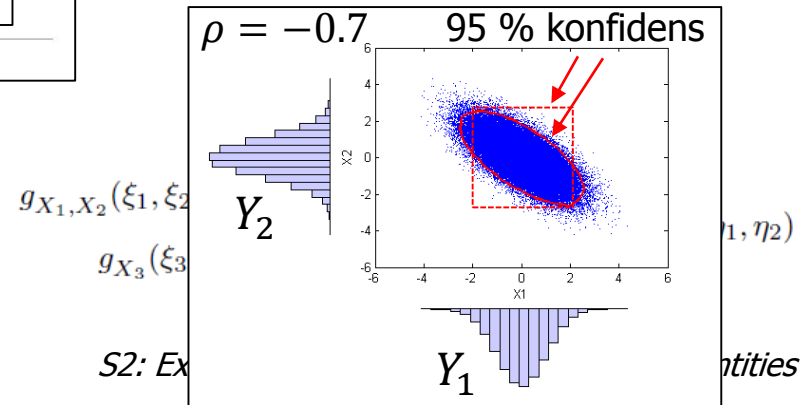


Vha. en Monte Carlo metode

- GUM supplement 1
 - Numerisk metode der er mere valid
 - Ingen linearisering
 - Relevante fordelinger for input og output anvendes
 - Analytisk modelfunktion ikke nødvendigt
- GUM supplement 2
 - Generaliserer konceptet til vilkårligt antal output-parametre



S1: Propagering af fordelinger

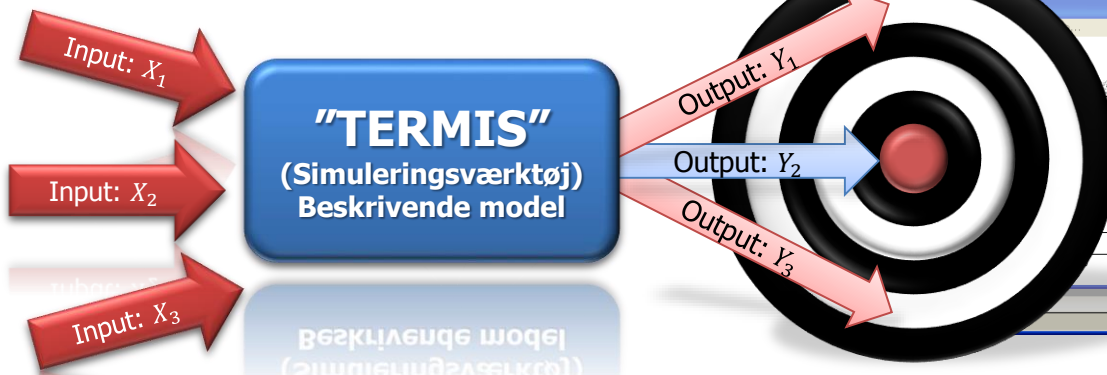
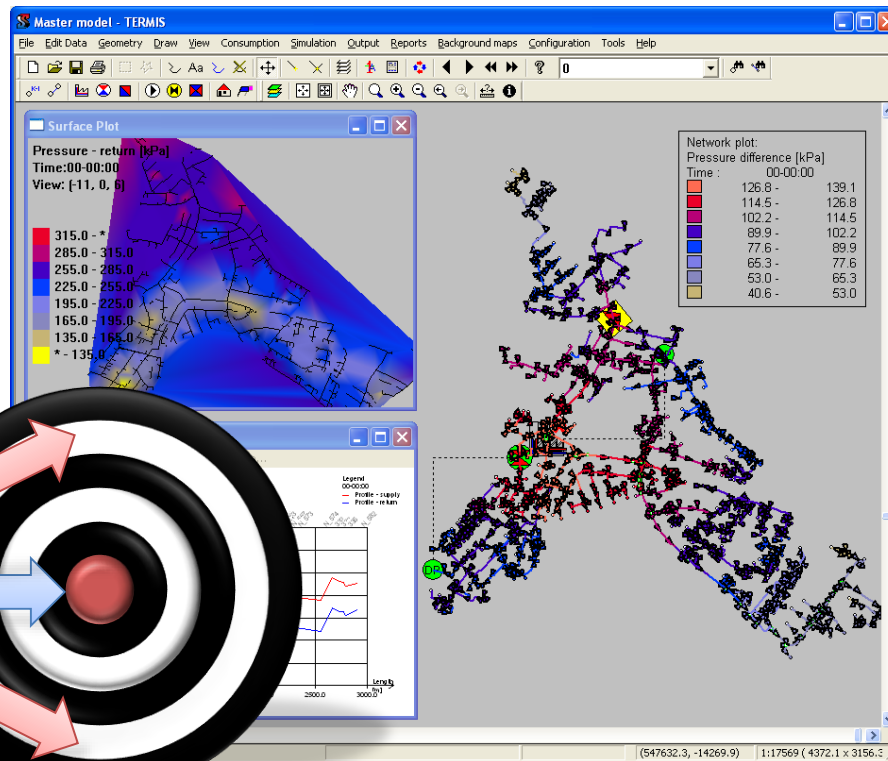


Analyse og estimering af usikkerheden på outputtet fra TERMIS®



TEKNOLOGISK
INSTITUT

- Inputdata
 - Målerdata: Tryk, temperatur, effekt, flow...
- Output:
 - Fx varmetab, tryktab, temperatur...
- Usikkerheder på input:
 - Fx **effekt** (flow, differensstemperatur, ...)
- Usikkerheder på output
 - For bedre at kunne evaluere resultater
 - Bedre beslutningsgrundlag



The end

**TEKNOLOGISK
INSTITUT**