

# INDUSTRIËLE WARMTEBRONNEN

---

GEGEVENS T.B.V. DE WARMTETRANSITIE O.B.V. MONTE CARLO ANALYSES

JANUARI 2024

EINDRAPPORTAGE VAN EEN STUDIE UITGEVOERD ALS ONDERDEEL VAN HET PROGRAMMA  
“INTEGRAAL”, IN OPDRACHT VAN GASUNIE EN DE PROVINCIE ZUID-HOLLAND

UITGEVOERD DOOR SYTSE JELLES, [POST@SIJELLES.NL](mailto:POST@SIJELLES.NL), 06-5582 6333

---

# INHOUD

---

## **Samenvatting**

### **1. Inleiding**

### **2. Uitwerking**

- Datamodel voor bronparameters
- Monte Carlo simulaties

### **3. Voorbeelden van resultaten**

- Typische restwarmtebron
- Lagere kosten door selectie-effect
- Verschillen tussen systemen

### **4. Conclusies m.b.t. werkwijze en gebruikt model**

- Review door CE Delft
- Duiding resultaten & beperkingen

# SAMENVATTING

---

# SAMENVATTING

# I/4

## Wat is de aanleiding?

- Beschikbare gegevens over bronnen van restwarmte is ontoereikend voor berekeningen t.b.v. de warmtetransitie
- Veel van de benodigde informatie ontbreekt; beschikbare informatie is vaak geheim en/of onbetrouwbaar
- Informatie van verschillende herkomst is vaak niet goed vergelijkbaar
- Vermogen (MW) of leverbare warmte (GJ) van een bron zijn mede afhankelijk van kenmerken van het warmtenet, zoals temperaturen en inzetstrategie. GJ's of MW's worden vaak gegeven als op zichzelf staande waarden en zijn daardoor vrijwel onbruikbaar
- Ook gegevens over de kostprijs (€/GJ) van warmte ontbreken vaak of worden gegeven zonder de vereiste context
- De “prijs per GJ” is sterk afhankelijk van de benutting van een bron en die kan alleen in samenhang met het warmtenet en andere bronnen worden bepaald
- **Het is moeilijk om een betrouwbaar toekomstbeeld van de beschikbare restwarmte en de kosten hiervan te vormen**
- **Doel van dit project is het leggen van een basis voor betrouwbare informatie en toekomstbeelden over restwarmte**

# SAMENVATTING

---

# 2/4

## Wat zijn de resultaten?

- Er is een datamodel voor informatie over industriële warmtebronnen gemaakt. Hierin wordt beschreven welke gegevens prioriteit hebben bij inventarisatie van industriële warmtebronnen
- Er is een Excel-model voor statistische analyses ontwikkeld op basis van gegevens volgens het datamodel
- Er is een eerste dataset met bronscenario's voor Warming-UP Designtool gemaakt, gebaseerd op publiek beschikbare informatie over industriële warmtebronnen <sup>1</sup>
- Het model voor statistische analyses en de gehanteerde uitgangspunten zijn beoordeeld door CE Delft

# SAMENVATTING

# 3/4

## Wat zijn de conclusies?

- Het ontwikkelde datamodel voor industriële warmtebronnen maakt inschatting van bronvermogen en -kosten bij uiteenlopende kenmerken van warmtenetten mogelijk
- Uniforme kwaliteit van data over warmtebronnen is niet noodzakelijk
- De resultaten van het statistisch model zijn vanzelfsprekend gevoelig voor de gekozen uitgangspunten
- Het ontwikkelde model voor statistische analyses draagt bij aan het inzicht; resultaten zijn soms verrassend maar altijd verklaarbaar
- Door de combinatie van datamodel en statistisch model evolueert de kwaliteit van de toekomstbeelden naadloos mee met de betrouwbaarheid van broninformatie
- Het bijwerken van de toekomstbeelden n.a.v. aangepaste brondata is een kleine moeite

# SAMENVATTING

---

4/4

## Aanbevelingen

- Gebruik het ontwikkelde datamodel bij toekomstige inventarisaties van industriële warmtebronnen; pas het aan indien nodig
- Gebruik en ontwikkel het statistisch model voor het verkrijgen en verdiepen van inzicht in/begrip van warmtebronnen en -systemen
- Maak afspraken met het Data Safehouse om het statistisch model te gebruiken met vertrouwelijke brongegevens

# | INLEIDING

---

Probleemschets – gekozen oplossingen



# I INLEIDING

## PROBLEMSCHETS

---

I/3

### Beschikbare data warmtebronnen ‘rommelig’ en ontoereikend voor berekeningen t.b.v. warmtetransitie

- Data uit verschillende informatiebronnen vaak onderling niet vergelijkbaar/compatibel
- Verschillende informatiebronnen hebben vaak een verschillend detailniveau
- Bronvermogen en -kosten worden vaak gegeven zonder bijbehorende parameters van de afnamekant terwijl deze hier wel mede bepalend voor zijn <sup>1</sup>
- **Vaak is een nieuwe uitvraag nodig als uitgangspunten van warmtenetten veranderen**

### Van veel warmtebronnen is überhaupt weinig tot niets bekend

- Belangrijke karakteristieken (bijv. beschikbaar vermogen) zijn veranderlijk of onbekend
- Veel informatie kan niet worden gedeeld e/o gepubliceerd
- “Hardheid” van informatie loopt sterk uiteen
- **Het is moeilijk om een betrouwbaar toekomstbeeld van de beschikbare warmte te vormen**

# I INLEIDING

## GEKOZEN OPLOSSINGEN

---

2/3

### **1. Robuust datamodel voor bronnen**

- Basiskenmerken van bronnen die onafhankelijk zijn van de uitgangspunten van warmtenetten en eenduidig zijn voor alle bronnen/brontypen
- Naast parameterwaarden ook hun betrouwbaarheid
- Gefundeerde aannames als gegevens ontbreken

### **2. Gebruik Monte Carlo simulaties**

- Groot aantal herhaalde berekeningen o.b.v. steekproeven voor parameters
- Gebruik makend van betrouwbaarheid van parameterwaarden

# I INLEIDING

## BEOOGDE VOORDELEN VAN GEKOZEN OPLOSSINGEN

---

3/3

### **Robuust datamodel warmtebronnen**

- Het bronvermogen kan voor iedere aanvoer- en retourtemperatuur van het warmtenet worden (her)berekend
- De kostprijs van warmte kan voor iedere (inzet)situatie worden berekend
- Geen nieuwe uitvraag nodig bij gewijzigde uitgangspunten warmtenet of bronnen- / inzetstrategie

### **Gebruik Monte Carlo simulaties**

- Meer mogelijkheden om evenwichtige scenario's te maken
- Meer inzicht in samenhang tussen vermogen, kosten en CO<sub>2</sub>
- Beter begrip van kansen en risico's
- Informatie die (on)betrouwbaar is wordt ook als zodanig behandeld

**Met de combinatie van datamodel en Monte Carlo analyses kunnen betrouwbaardere toekomstscenario's worden ontwikkeld die mee-evolueren met de kennis over warmtebronnen**

# 2 UITWERKING

---

Datamodel voor warmtebronnen – Monte Carlo simulaties

# 2 UITWERKING

## DATAMODEL VOOR RESTWARMTEBRONNEN

1/6

### Het bruikbare vermogen van een bron is afhankelijk van de temperatuur in het warmtenet

- Het maximale vermogen dat een restwarmtebron kan leveren is afhankelijk van het gevoerde proces. In principe volstaat hiervoor een waarde in MW
- Welk deel van het bronvermogen bruikbaar is voor een warmtenet, is afhankelijk van kenmerken van zowel bron als warmtenet
- Met de juiste gegevens over de bron kan het bruikbare vermogen worden (her)berekend o.b.v. (gewijzigde) uitgangspunten voor het warmtenet (zonder nieuwe uitvraag)

### Minimaal<sup>1</sup> benodigde gegevens om het bronvermogen te bepalen

- Minimaal en maximaal (90%-interval) vermogen dat aan het proces kan worden onttrokken
- Temperaturen:
  - Aanvoer ( $T_{a,bron}$ ): verwacht (90%-interval); eventueel max haalbare T met aanpassingen
  - Retour ( $T_{r,bron}$ ): gewenste waarde, maximaal en minimaal aanvaardbare waarde
- Verwacht vermogen ( $P_{th,bron}$ ), behorend bij de verwachte  $T_{a,bron}$  en de gewenste  $T_{r,bron}$
- Beschikbaarheid in uren/jaar; beknopte beschrijving van het productiepatroon

# 2 UITWERKING

## DATAMODEL VOOR RESTWARMTEBRONNEN

2/6

### De “prijs van warmte” (€/GJ) van een bron is vaak een nietszeggende waarde

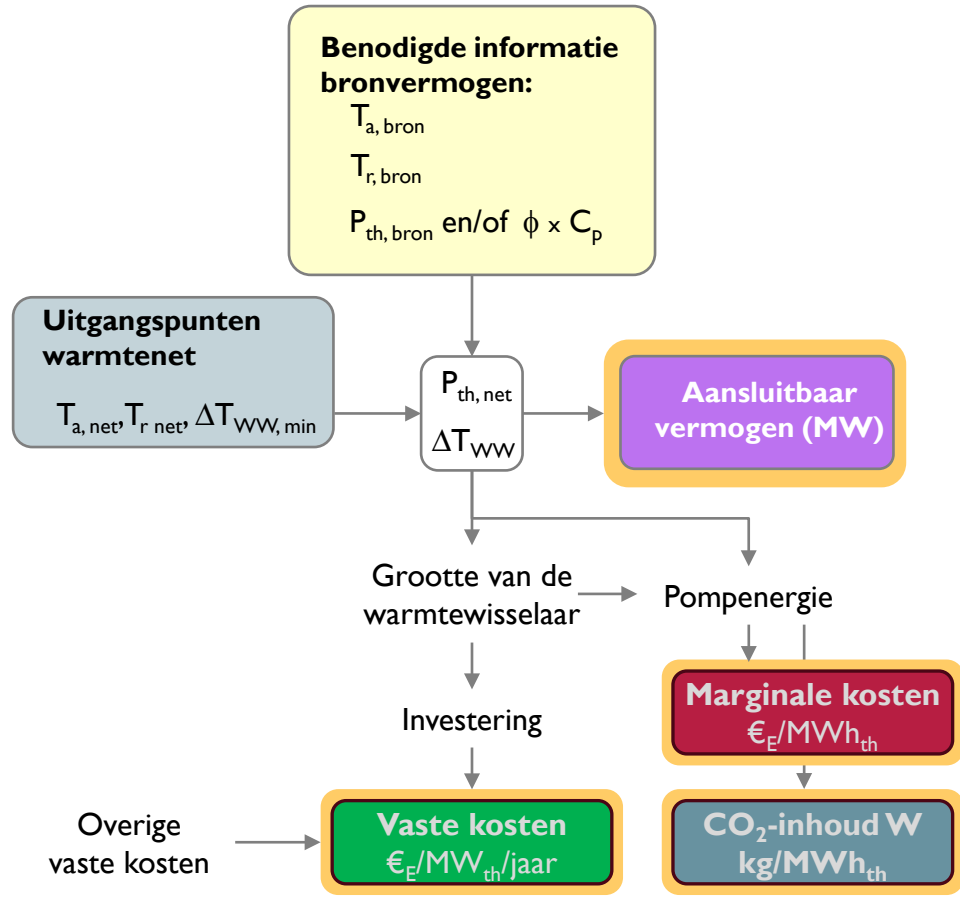
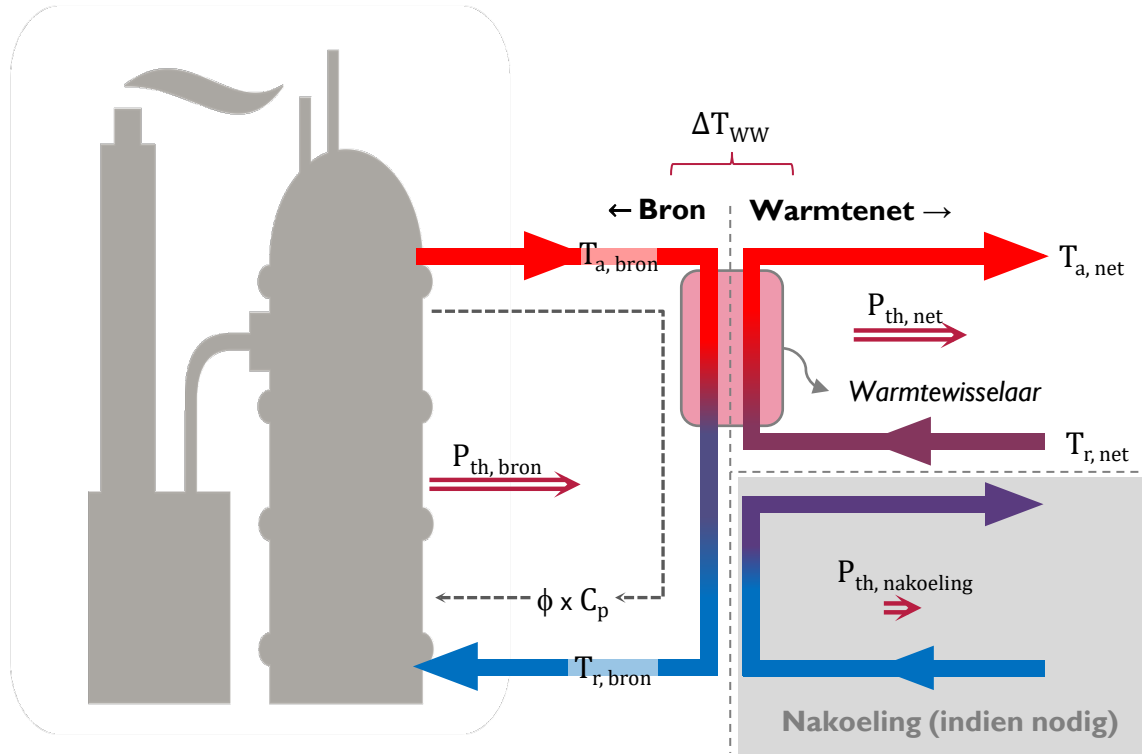
- De kosten van restwarmte worden gedomineerd door investeringen
- De resulterende prijs van warmte is sterk afhankelijk van de inzet van de bron
- De inzet van een bron is de uitkomst van een optimalisatie o.b.v. alle beschikbare bronnen
- Met de kostenstructuur van een bron kunnen de kosten van warmte wel goed worden berekend, voor (gewijzigde) uitgangspunten voor het net, rekening houdend met andere bronnen

### Minimaal benodigde gegevens om de kosten van warmte te bepalen

- De gegevens t.b.v. het bronvermogen
- Uitgaande van een installatie waarmee het verwachte vermogen ( $P_{th, bron}$ ) kan worden geleverd:
  - De totaal benodigde investering (€, incl. bandbreedte)<sup>1</sup>
  - Het aandeel van de warmtewisselaar in de totale investering
  - Jaarlijkse onderhoudskosten (€/jaar; evt. als % van de investering)
  - Kosten voor bedrijfsvoering (€/jaar)
  - Benodigde pompenergie (kW)

# 2 UITWERKING DATAMODEL VOOR RESTWARMTEBRONNEN (VERMOGEN)

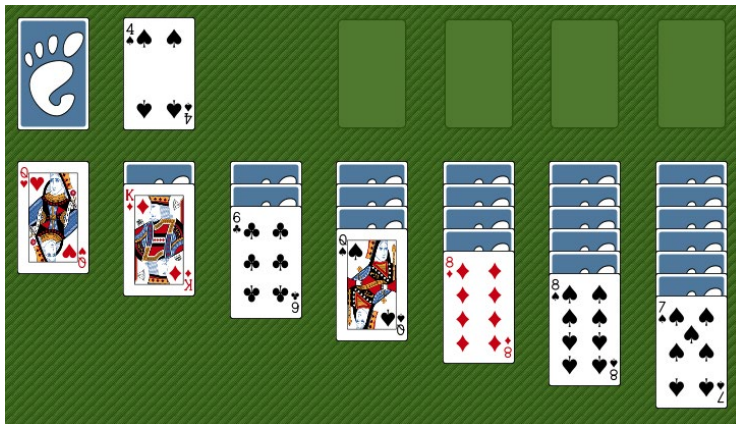
3/6



## 2 UITWERKING MONTE CARLO SIMULATIES

4/6

**Vraag: Hoe groot is de kans dat je een potje Patience uitspeelt?**



- De kaarten en spelregels zijn bekend en het spel is niet heel moeilijk
- Toch is het *onmogelijk* om deterministisch de kans te berekenen dat een goede speler een potje (met goed geschudde kaarten) uitspeelt

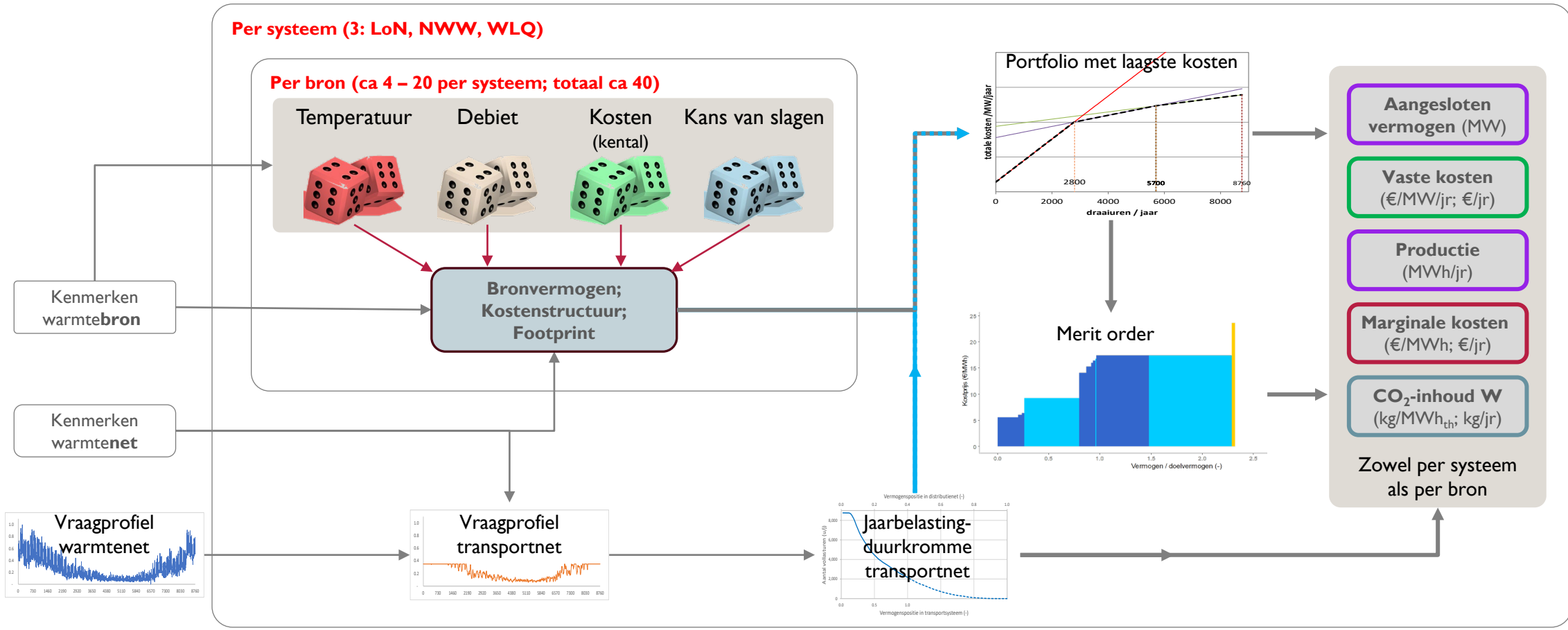
**Oplossing: Monte Carlo simulaties**

- Speel een stuk of 1,000 potjes en bereken het aandeel uitgespeelde potjes
- Veel toegepast voor vraagstukken met veel onzekere factoren die gezamenlijk de uitkomst bepalen
- Vaak beter dan “what-if” of eenvoudige hoog/midden/laag benadering
- Zeer bekende toepassing: diffusie van neutronen in plutonium in een atoomwapen (door Ulam en von Neumann)
- Vrediger toepassing: Bepaling van de meest waarschijnlijke locaties van zoekgeraakte schepen (Kustwacht V.S.)



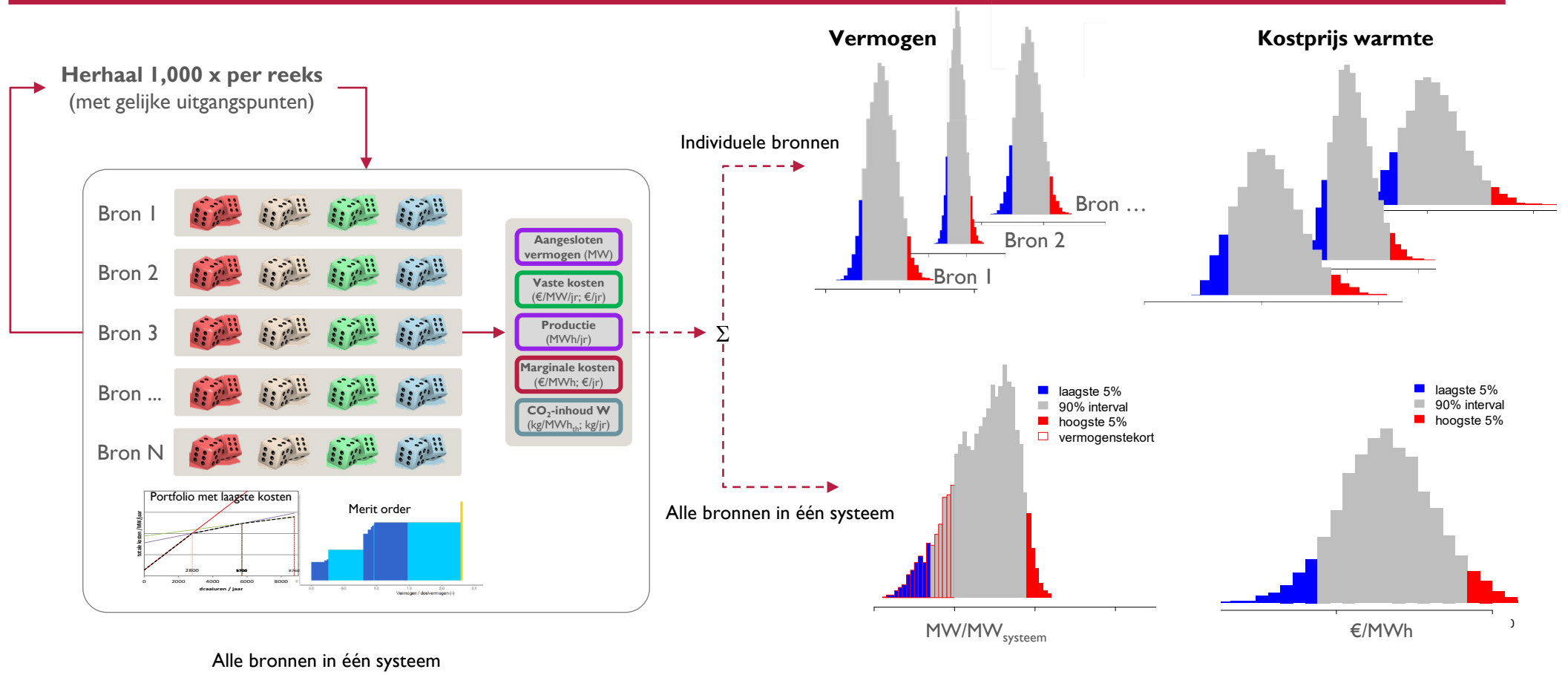
# 2 UITWERKING MONTE CARLO SIMULATIES

5/6



# 2 UITWERKING MONTE CARLO SIMULATIES

6/6



# 3

## VOORBEELDEN VAN RESULTATEN

---

Steekproeven typische restwarmtebron – Steekproeven warmtesystemen – Lagere kosten door selectie-effect – Verschillen tussen systemen

# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN

## OPMERKINGEN VOORAF

---

1/7

### Belangrijk om te weten

- De hierna volgende resultaten en inzichten...
  - ... dienen als voorbeeld van het soort inzichten dat kan worden verkregen met de ontwikkelde werkwijze en rekenmodellen
  - ... dragen bij aan het inzicht in samenhang tussen beschikbaar vermogen, kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van warmtebronnen
  - ... dragen bij aan beter begrip van kansen en risico's (bijv. tekort aan bronnen, hoge kosten)
- In de meeste voorbeelden worden geen getallen getoond. Eventueel resterende kwantitatieve resultaten (getallen) zijn niet representatief
- Eventueel getoonde (verschillen tussen) kenmerken van bronnen en transportsystemen zijn illustratief
- Neem geen (investerings)besluiten o.b.v. deze analyses

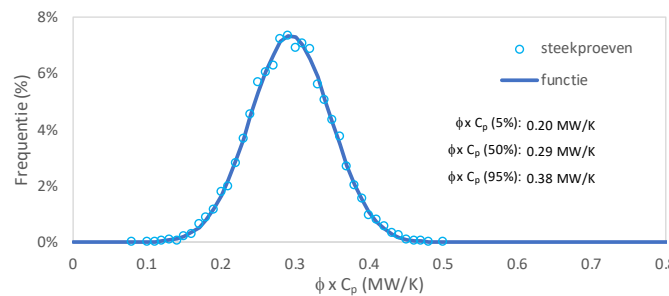
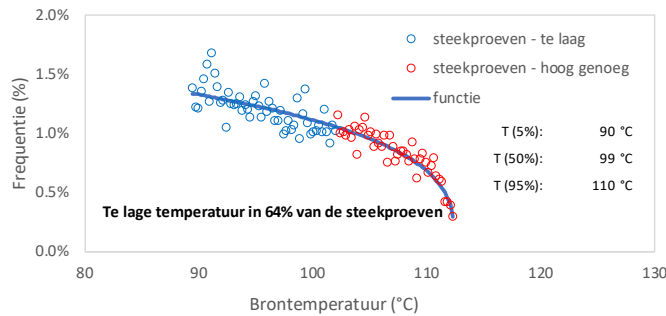
# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN STEEKPROEVEN VOOR EEN TYPISCHE RESTWARMTEBRON 2/7

10,000 x

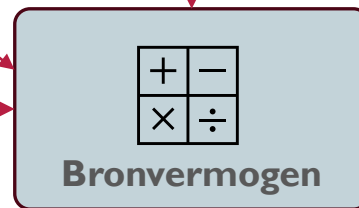
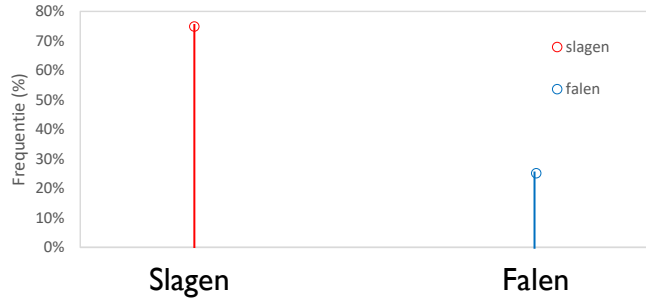
Temperatuur



Debiet<sup>1</sup>



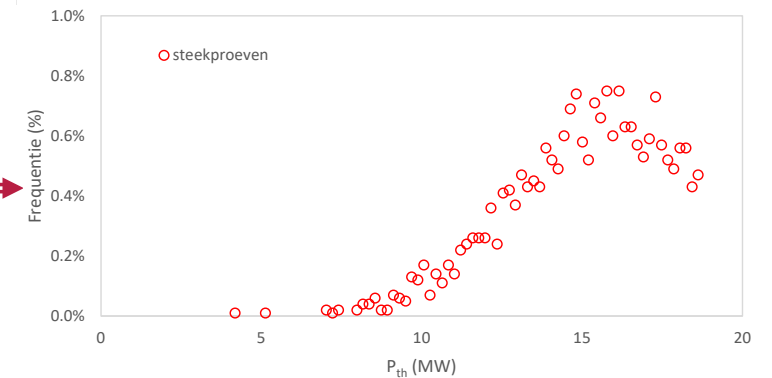
Kans van slagen



De grafieken illustreren dat de steekproeven (ieder rondje staat voor 100 steekproeven) het verwachte patroon (“functie”, aangegeven als getrokken lijn) volgen → de gebruikte steekproefmethode werkt

In 27% van de steekproeven is er bruikbaar vermogen. Dit is direct verklaarbaar o.b.v. de uitgangspunten:

- In 36% van de steekproeven is de temperatuur hoog genoeg (minimaal 2°C hoger dan het warmtenet)
- 75% van de steekproeven “slaat”
- 75% van 36% = 27%<sup>2</sup>

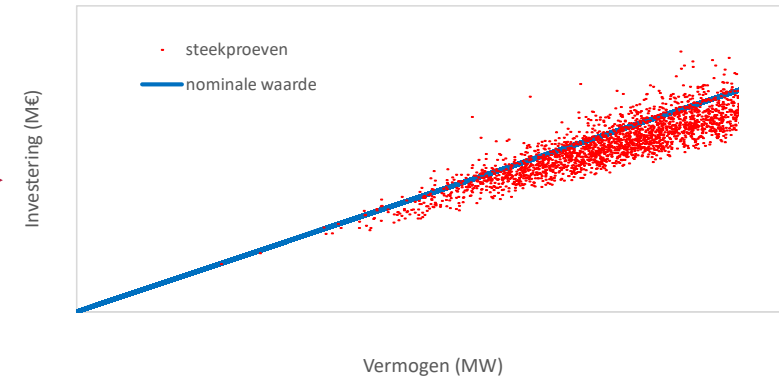
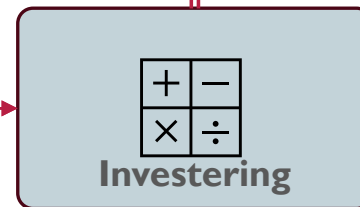
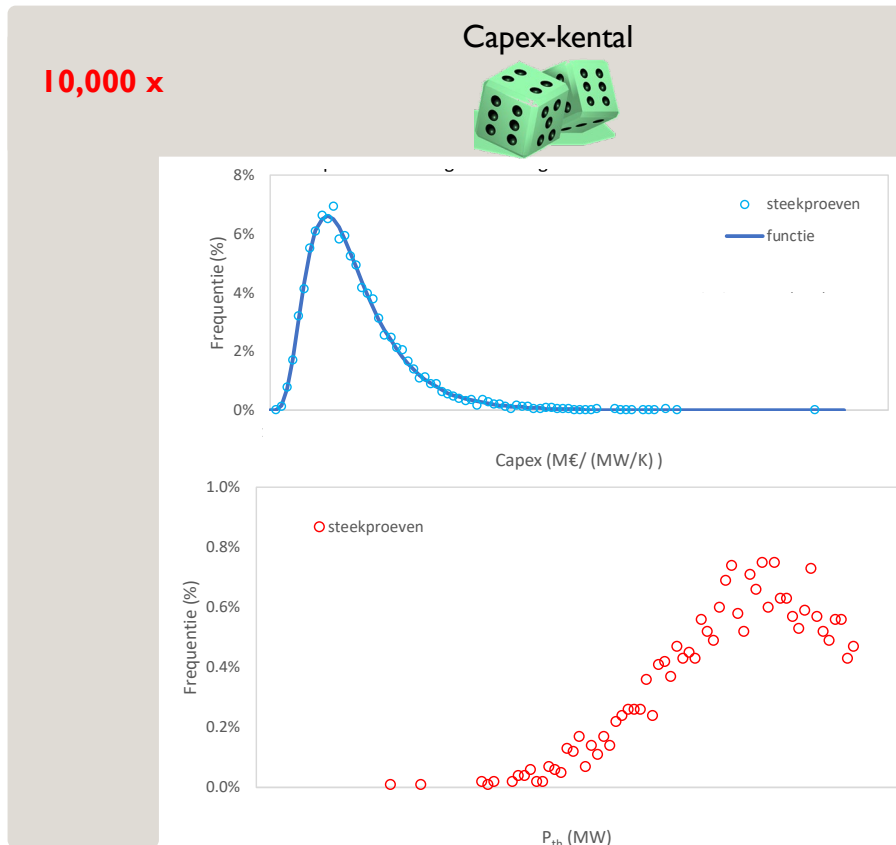


<sup>1</sup>Voor bronnen van aftapwarmte wordt gerekend met het stroomdebiet ( $\phi$ , in t/u); voor restwarmtebronnen wordt gerekend met koelwaterdebiet x warmtecapaciteit ( $\phi \times C_p$ , in MW/K); beiden worden aangeduid als debiet

<sup>2</sup>Om dit percentage te berekenen heb je geen Monte Carlo aanpak nodig. Het toont wel dat de uitkomsten verklaarbaar zijn.

# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN STEEKPROEVEN VOOR EEN TYPISCHE RESTWARMTEBRON

3/7



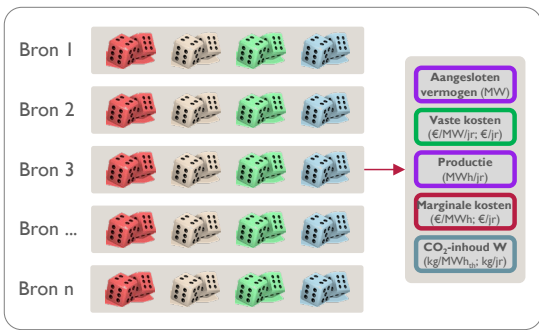
In 78% van de steekproeven met een vermogen > 0 is de investering voor een bron lager dan nominaal. Dit percentage is hoger dan verwacht o.b.v. de input, maar wel te verklaren:

- De investering wordt bepaald door het debiet, het vermogen door het debiet en temperatuur
- De nominale temperatuur van de bron is 2°C lager dan de aanvoertemperatuur van het warmtenet; steekproeven met een T lager dan nominaal vallen af
- Steekproeven met een temperatuur > nominaal en daarmee relatief lage investering/vermogen blijven over

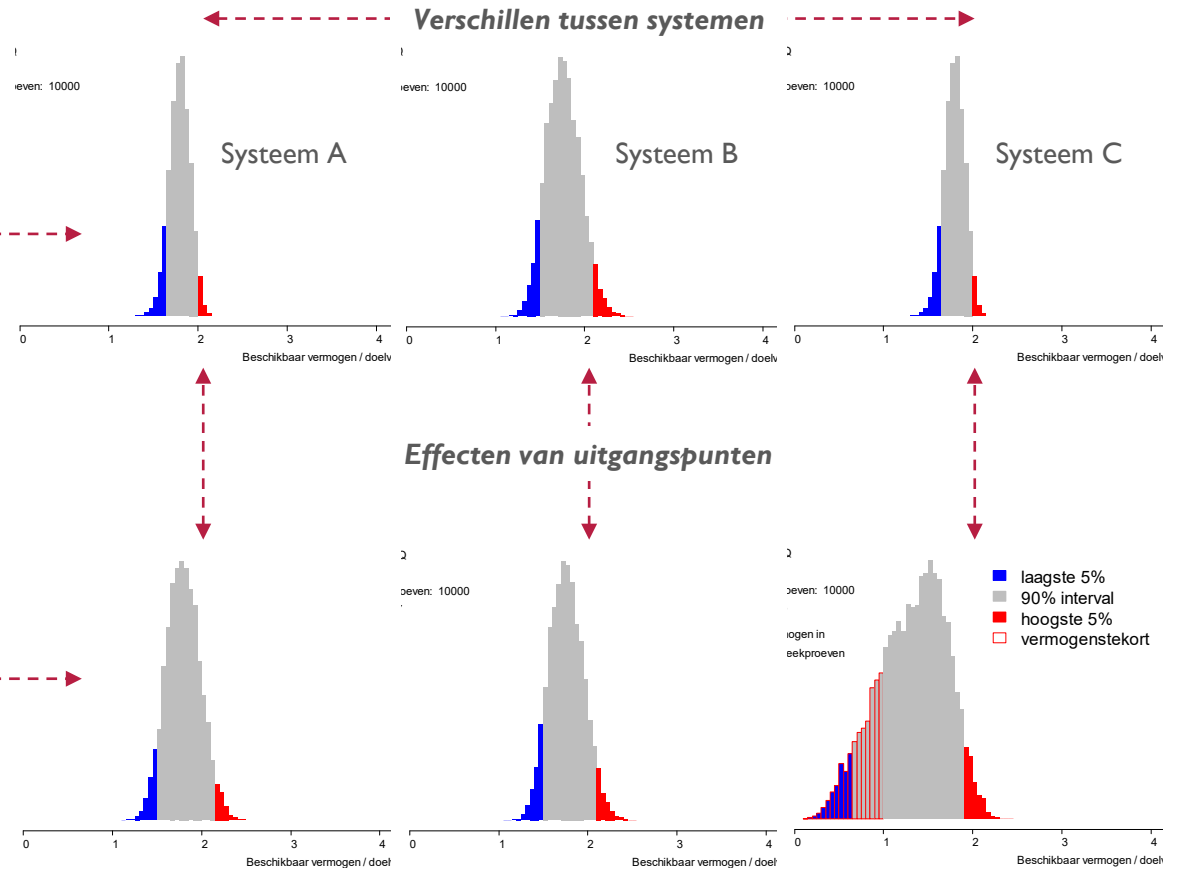
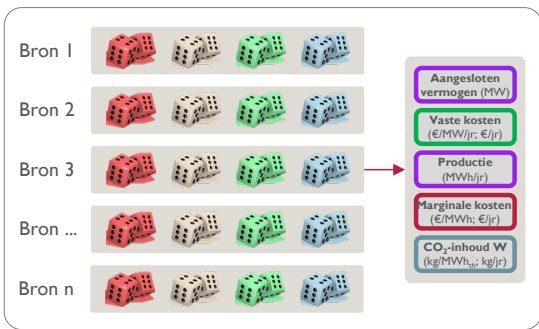
# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN STEEKPROEVEN VOOR WARMTESYSTEMEN

4/7

## Reeks met uitgangspunten X



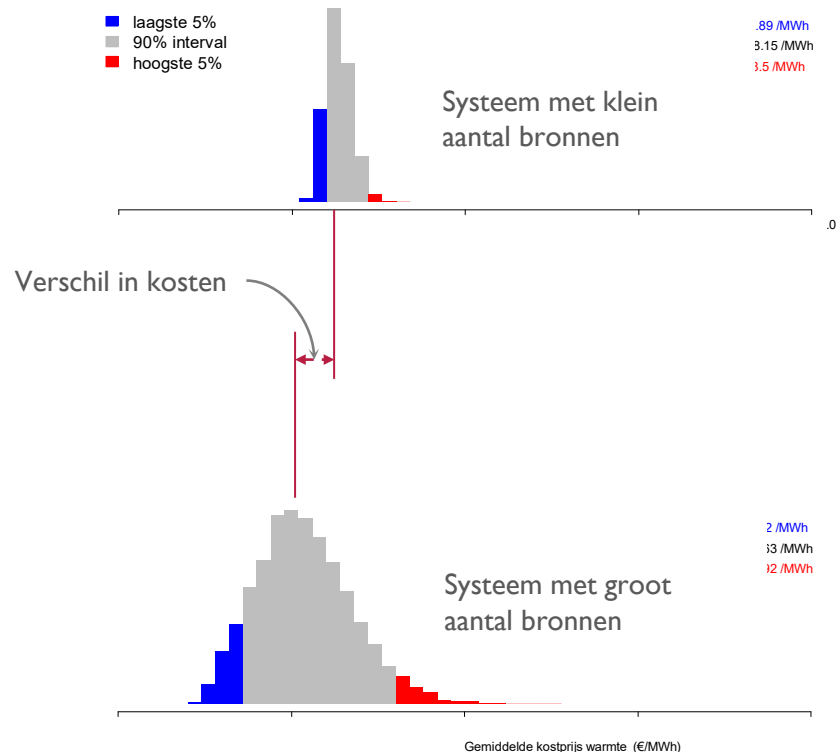
## Reeks met uitgangspunten Y



# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN

## LAGERE KOSTEN DOOR SELECTIE-EFFECT

5/7



In de berekeningen wordt bij iedere steekproef voor ieder systeem de goedkoopste bronnenmix samengesteld.

Wanneer een systeem kan putten uit een groot aantal potentiële bronnen zijn er meer keuzemogelijkheden. Bovendien is de kans dat alle potentiële bronnen tegelijkertijd heel duur zijn relatief klein.

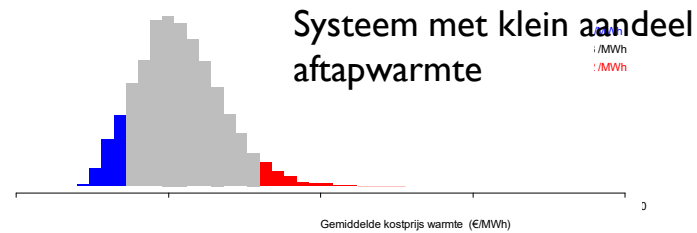
Een systeem met een groot aantal potentiële bronnen heeft daardoor (in theorie althans) een kostenvoordeel. Dit voordeel wordt duidelijk in de resultaten.

Bij een groot aantal bronnen kunnen de gemiddelde kosten van warmte zelfs (substantieel) lager zijn dan de nominale kostprijs.



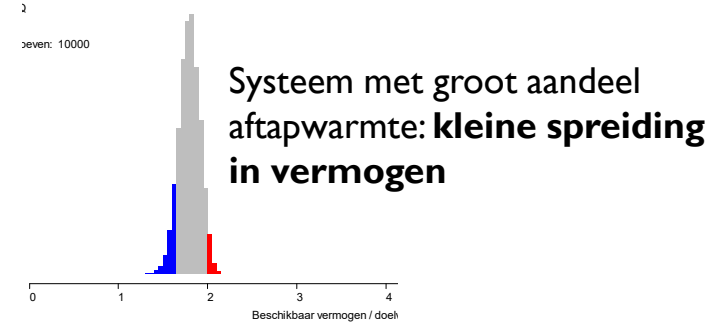
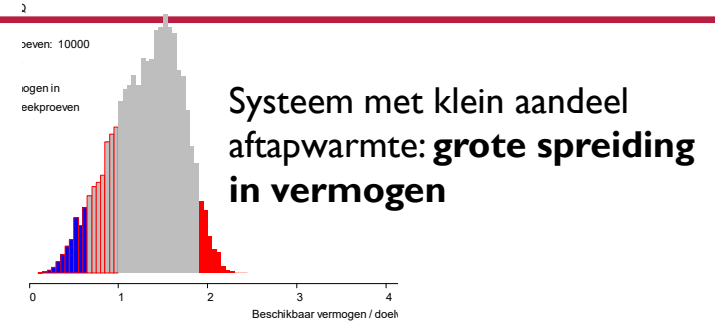
# 3 VOORBEELDEN VAN RESULTATEN VERSCHILLEN TUSSEN SYSTEMEN – AANDEEL AFTAPWARMTE

6/7



Restwarmte gaat principieel niet ten koste van een (waardevol) product. Aftapwarmte wel: dit gaat ten koste van productie van elektriciteit (de zgn. E-derving).

Voor een warmtesysteem dat (volledig) afhankelijk is van aftapwarmte zijn de kosten van warmte daardoor hoger.



Aftapwarmte wordt gemaakt uit stoom. Daardoor is de temperatuur altijd hoog genoeg voor de meeste systemen. Hierdoor is de onzekerheid over het vermogen van aftapbronnen beduidend lager dan van restwarmtebronnen.

# 4

## CONCLUSIES M.B.T. WERKWIJZE EN GEBRUIKT MODEL

---

Review door CE Delft – Duiding resultaten & beperkingen

## 4 CONCLUSIES M.B.T. WERKWIJZE EN GEBRUIKT MODEL I/2

### BELANGRIJKSTE CONCLUSIES REVIEW DOOR CE DELFT<sup>1</sup>

---

- *De modellering is geïmplementeerd zoals beschreven*
- *Het model is robuust ontworpen om, gegeven de bestaande onzekerheid, op basis van huidige informatie én met name bij voortschrijdend inzicht incrementeel betere inzichten te genereren over de spreiding van uitkomsten.*
- *Een kanttekening is dat het model redelijk gevoelig is voor modelinputs. Aangezien het model op korte termijn gebruikt zal worden om een eerste prijsdataset te genereren is het wenselijk om een tweetal aanpassingen/ onderzoeken te doen: ...*

...

- *Actualiseer de kostenkengetallen voor uitkoppeling [...]*
- *Stel scenario's op met beperktere bronbeschikbaarheid dan gemodelleerd met de knock-out functionaliteit. Overweeg ook grotere onzekerheid over bronvermogens [...]*

De aanbevelingen zijn overgenomen. Details hierover en een uitgebreidere reflectie op het memo worden opgenomen in een apart document

# 4 CONCLUSIES M.B.T. WERKWIJZE EN GEBRUIKT MODEL 2/2

## DUIDING RESULTATEN & BEPERKINGEN

---

### **Wel verrassende, maar geen onverklaarbare observaties**

- Alle opvallende resultaten (verschillen tussen systemen, effecten van individuele parameters, correlaties tussen systemen etc.) kunnen worden verklaard o.b.v. uitgangspunten en werkwijze

### **Beperkingen**

- De berekeningen van het optimale portfolio en inzet van bronnen veronderstellen volledige kennis, regie en onbeperkte (zowel min als max) inzet van bronnen; de realiteit is anders

- Werkwijze is robuust, maar de invloed van uitgangspunten is groot
- De berekeningen worden gemaakt o.b.v. 8760 uur beschikbaarheid van de bronnen; er wordt ook geen rekening gehouden met evt. vereiste redundantie
- De berekening van de benodigde investering is vatbaar voor verbetering. Hiervoor is verbeterde kennis van de installatie en de belangrijkste kostenposten vereist