

# Ákvarðanataka fyrir sjálfbæra nýtingu lághitajarðvarmakerfa

Doktorsverkefni úr Háskólanum í Reykjavík  
Varið í nóvember 2013

Silja Rán Sigurðardóttir

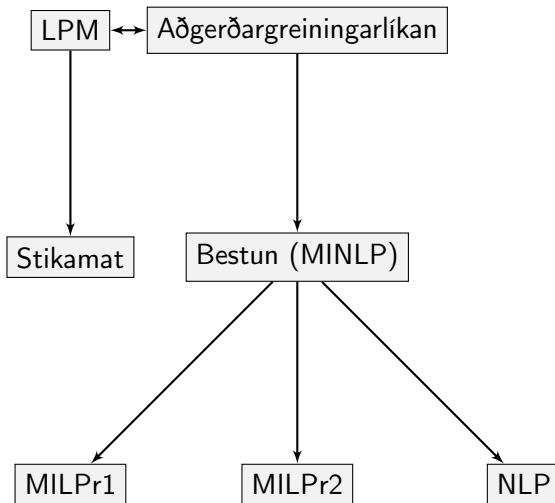


TÆKNI- OG VERKFRÆÐIDEILD  
SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Fagfundur veitna Samorku – Hótel Borgarnes 28.-29. maí 2015

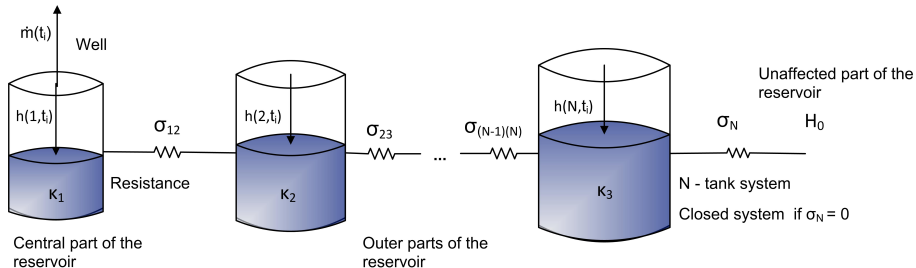
- Jarðvarmaorka er endurnýjanleg en takmörkuð auðlind.
- Áhrif þess að nýta láhitajarðvarmasvæði með sjálfbærni að leiðarljósi.
- *Hver er ákjósanlegasta leiðin til að mæta eftirspurn til lengri tíma (yfir 100 ár)?*
- Jarðvarmakerfinu þarf að lýsa með stærðfræðilegu líkani sem líkir eftir hegðun kerfisins á ásættanlegan hátt.
- Aðgerðargreiningarlíkan sem getur lýst mismunandi rekstrarsviðsmyndum

- Líkanagerð
  - Forðafræðilíkan: Lumped parameter model (LPM)
  - Aðgerðargreiningarlíkan: Blendin ólínuleg hreyfin bestun (MIDO, MINLP)
- (Lausnaraðferðir)
  - (MILP relaxation 1 and 2 and NLP relaxation)
- Niðurstöður
  - Stikamat með staðfestingu á gæðum stika forðafræðilíkansins
  - (Niðurstöður ítrekunarreikniritra aðgerðargreiningarlíkansins)
  - Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði
  - Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði ef gert er ráð fyrir árlegri aukningu í eftirspurn
- Ályktun og væntanlegar rannsóknir



# Líkanagerð

## Forðafræðilíkan (LPM)



- Markmiðið (markfallið) er að hámarka hagnað eða lágmarka frávik á milli framleiðslu og eftirspurnar
- Stöðubreytur (niðurdráttur):  $h_{1,i}$ ,  $h_{2,i}$  and  $h_{3,i}$
- Ákvörðunarbreytur:  $\dot{m}_i$  (framleiðsla, massaflæði) and  $y_i$  (dælufjöldi)
- $y$  er heiltala

- Núvirði tekna er ákvarðað með eftirfarandi jöfnu:

$$PV_{\text{Income}} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t \cdot \dot{m}_i \cdot C_{\text{Water}}}{\rho(1+r)^i}$$

- Núvirði kostnaðar við að bæta við dælu er reiknaður með jöfnunni:

$$PV_{\text{Pump}} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i C_{\text{Pump}}}{(1+r)^i}$$

- Núvirði framleiðslukosntaðar (sem er ólínulegur) er reiknaður:

$$PV_{\text{Production}} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t \cdot C_{\text{Electric}} \cdot g \cdot (\dot{m}_i h_{1,i})}{(1+r)^i}$$

$$\underset{h_{j,i}, m_i, y_i}{\text{maximize}} \quad \text{PV}_{\text{Profit}} = \text{PV}_{\text{Income}} - \underbrace{\text{PV}_{\text{Production}}}_{\text{non-linear: } \dot{m} \cdot h_{1,i}} - \text{PV}_{\text{Pump}},$$

subject to

Constraint 1:

$$h_{j,i+1} = \left( \mathbf{K} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S} \right)^{-1} \left( \left( \mathbf{K} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{S} \right) h_{j,i} + \frac{\Delta t}{2} \underbrace{(\mathbf{u}_{i+1})}_{\dot{m}_{i+1}} + \underbrace{(\mathbf{u}_i)}_{\dot{m}_i} \right)$$

Constraint 2:  $0 \leq \dot{m}_i \leq \dot{m}_{e,i}$       Upper-and lower bounds

Constraint 3:  $0 \leq h_{1,i} \leq h_1^{\text{max}}$       Sustainability Constraint

Constraint 4:  $\underbrace{P_{\text{Power},j}}_{\text{non-linear: } \dot{m} \cdot h_{1,i}} (= g \cdot h_{1,i} \cdot \dot{m}_i) \leq P_{\text{Pump}} \sum_{m=1}^i y_m$

Initial values:  $h_{j,1} = \mathbf{h}_0, \quad \dot{m}_1 = m_0 \quad y_1 \geq 1$

where  $y_i \in \mathbb{Z}_+, \text{ and } h_{j,i}, \dot{m}_i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in \{1 \dots n\} \text{ and } \forall j \in \{1 \dots N\}$

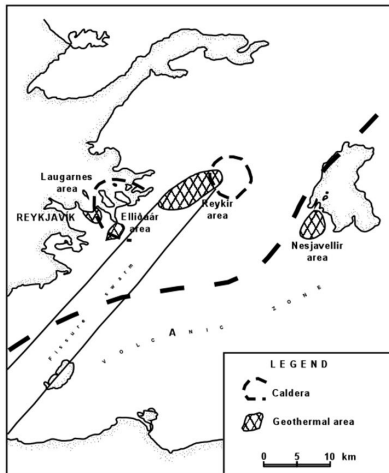


# Niðurstöður

Stikamat með staðfestingu á gæðum stika forðafræðilíkansins

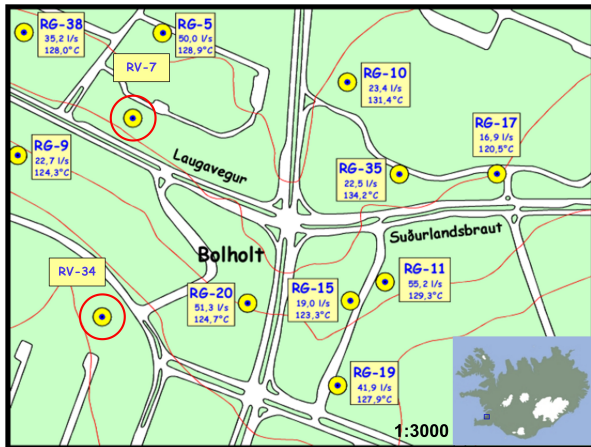
Myndin er tekin úr Gunnlaugsson et al.[2000]

- Laugarnes
- Elliðaár
- Reykir
- Reykjanes



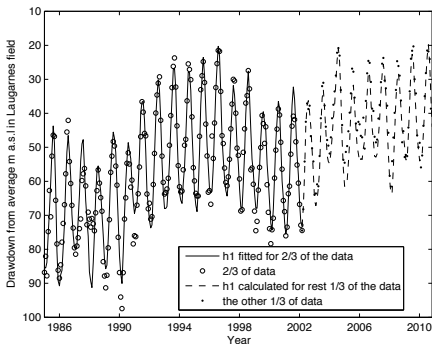
# Niðurstöður

Stikamat með staðfestingu á gæðum stika forðafræðilíkansins

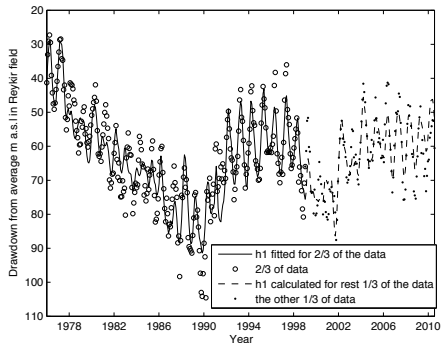


**Mynd:** Staðsetning vinnsluholna og viðmiðunarholna í Laugarnesi. Viðmiðunarholur eru merktar með rauðum hring. Sjá Ivarsson [2011].

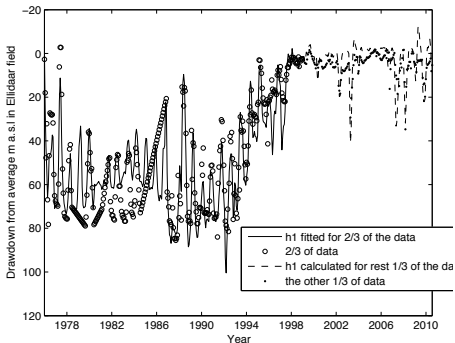
### Laugarnes. Þrjú tankar - opið líkan



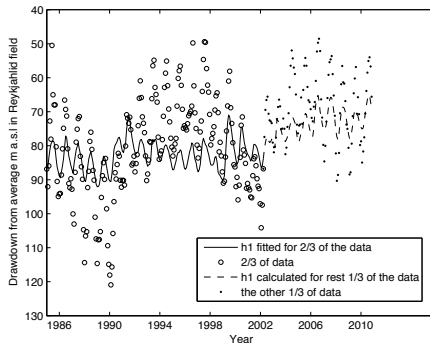
### Reykir. Tveir tankar - opið líkan



### Ellidaár. Tveir tankar - opið líkan

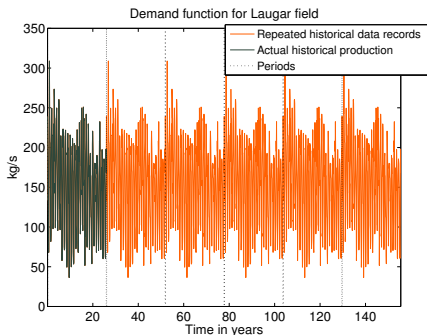


### Reykjahlíð. Þrjú tankar - opið líkan

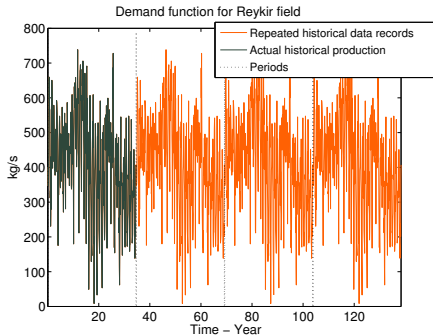


- Laugarnes og Reykir
- Eftirspurnarfallið er búið til með því að endurtaka söguleg gögn um framleiðslu sem til staðar eru fyrir svæðin.
- Sex sinnum fyrir Laugarnes og fjórum sinnum fyrir Reyki

### Laugarnes - Eftirspurn



### Reykir - Eftirspurn



# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði

Sviðsmyndir 1 and 2



TÆKNI- OG VERKFRÆÐIÐ  
SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Niðurstöður	Sviðsmynd 1 Laugarnes	Sviðsmynd 2 Reykir
Hagnaður, $PV_{\text{Profit}}$	\$20,113,517	\$53,287,276
Fjöldi dæla, $y$	1	3
Dælu bætt við	Í mánuði 1	Í mánuði 1, 7 and 130 (ár 10)
Hámarks niðurstráttur	98.2 m	92.2 m
Sjálfbærnischorða, $h_1^{\text{max}}$	751 m	286 m
Ítranir aðgerðargreiningarlíkans	1	1
Skekkja, $\mathcal{J}_{2,\text{Error}}$	0.0000472 %	0

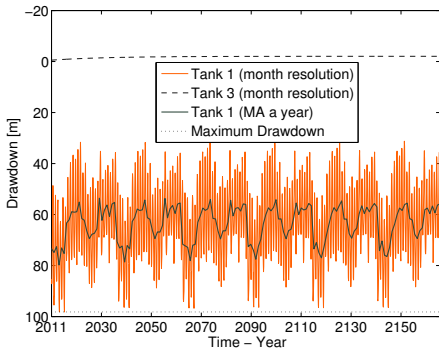
# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði  
Sviðsmyndir 1 and 2

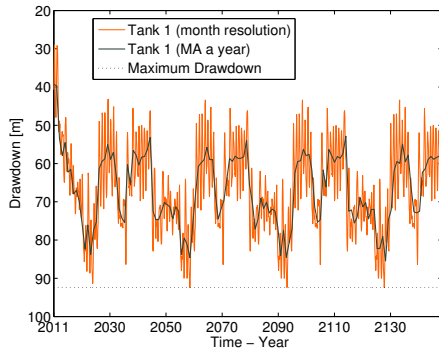


- Framleiðslan takmarkast hvorki af fjárhagslegum eða öðrum eðlisfræðilegum og/eða ápreiðanlegum þáttum hér

Sviðsmynd 1: Laugarnes - Niðurdráttur



Sviðsmynd 2: Reykir - Niðurdráttur



# Niðurstöður

## Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði

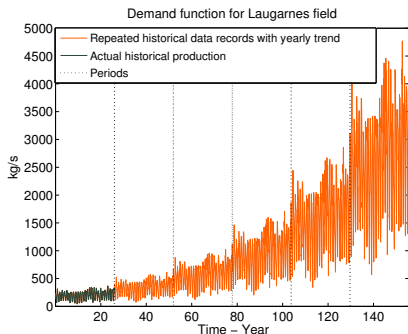
### Aukin árleg eftirspurn



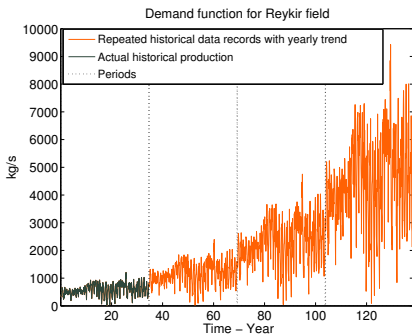
TÆKNI- OG VERKFRÆÐEILD  
SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

- Eftirspurnarfallið er búið til með því að endurtaka söguleg gögn um framleiðslu sem til staðar eru fyrir svæðin með **2% árlegri aukningu**
- Sex sinnum fyrir Laugarnes og fjórum sinnum fyrir Reyki

Laugarnes - Eftirspurn



Reykir Eftirspurn





# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði

Aukin árleg eftirspurn



Svæði	Sviðsmynd	Markfall	Skorðu bætt við líkan	Skorða tekin í burtu úr líkani
Laugarnes	Sviðsmynd 3	max	$PV_{\text{Profit}}$	
	Sviðsmynd 4	max	$\text{Profit} _{r=0}$	
	Sviðsmynd 5	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$
	Sviðsmynd 6	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$
	Sviðsmynd 7	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$ $y_i \leq 5$
Reykir	Sviðsmynd 8	max	$PV_{\text{Profit}}$	
	Sviðsmynd 9	max	$\text{Profit} _{r=0}$	
	Sviðsmynd 10	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$
	Sviðsmynd 11	max	$PV_{\text{Profit}}$	$h_{1,i} \leq h_1^{\text{max}}$
	Sviðsmynd 12	max	$\text{Profit} _{r=0}$	$h_{1,i} \leq h_1^{\text{max}}$
	Sviðsmynd 13	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$ $h_{1,i} \leq h_1^{\text{max}}$
	Sviðsmynd 14	min	$\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_i)$	$\text{Profit} \geq 0$ $y_i \leq 5$

# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði  
Aukin árleg eftirspurn (Sviðsmynd 3 - Laugarnes)



Núvirtur hagnaður er hámarkaður

Max  $PV_{Profit}$

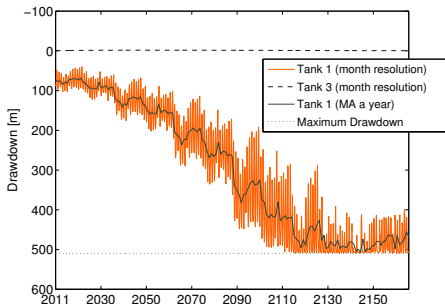
$PV_{Profit} = 28.92m\$$

Halli í framleiðslu = 31%

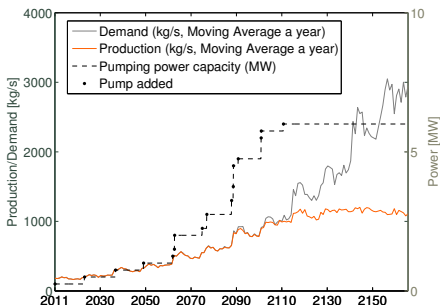
Hámarks niðurdráttur = 510 m = *fjárhagslega fólgin sjálfbærni skorða*

(*Sjálfbærnis skorða = 751 m*)

Niðurdráttur



Eftirspurn/Framleiðsla



# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði  
Aukin árleg eftirspurn (Sviðsmynd 5 - Laugarnes)



Frávik á milli framleiðslu og eftirspurnar er lágmarkað

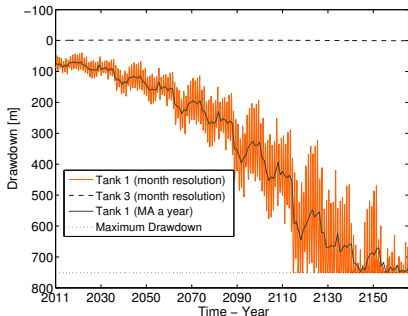
Min Deviation

$$PV_{\text{Profit}} = 8.61 \$m$$

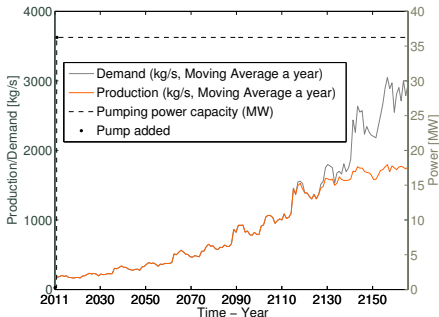
Halli í framleiðslu = 15%

Hámarks niðurdráttur = 751m = sjálfbærniskorða

Niðurdráttur



Eftirspurn/Framleiðsla



# Niðurstöður

Bestun langtímanýtingar á jarðvarmasvæði  
Aukin árleg eftirspurn (Sviðsmynd 7 - Laugarnes)



Frávik á milli framleiðslu og eftirspurnar er lágmarkað þar sem ekki má bæta við meira en 5 dælum í einu

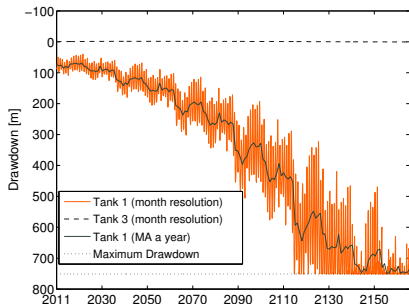
Min Frávik - max 5 dælur í einu

$PV_{Profit} = 28.37m\$$

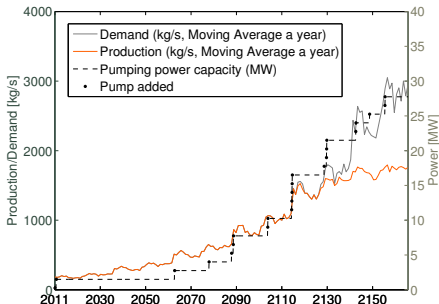
Halli í framleiðslu = 15%

Hámarks niðurdráttur = 751m = sjálfbærniskorða

Niðurdráttur



Niðurdráttur/framleiðsla



- Forðafræðilíkan og aðgerðargreiningarlíkan voru tengt saman á farsælan hátt
- Það er ekki hægt að ganga út frá því að ásættanlegt fá stikamat fyrir forðafræðilíkanið - þó svo að ástættanleg gögn séu til staðar.
- Ef núvirtur hagnaður er hámarkaður er fjárhagslega fólgin sjálfbærnis skorða í kerfinu
- Ákjósanlegasta sviðsmyndin fyrir Laugarnes og Reyki er að lágmarka frávík á milli eftirspurnar og framleiðslu með sem framleiðsla er aukin í jöfnum áföngum
- Líkanið margbreytileg nálgun sem gefur möguleika á að skoða margar mismunandi rekstrarsviðsmyndir.

- Aðlaga markfall og skorður aðgerðargreiningarlíkansins þörfum hitaveitna og orkufyrirtæka.
- Skoða fleiri jarðvarmasvæði.
- Setja fram líkan sem tengir mörg jarðvarmasvæði saman.
- Nota aðlögunarbestun (adaptive optimization) með því að auka í áföngum það gagnamagn sem stuðst er við í stikamati.
- Nota slembna stika með Monte Carlo hermun eða öðrum slembnum aðferðum sem aðgerðargreiningin býður upp á.
- Innleiða þessa nálgun fyrir háhitajarðvarmakerfi

# Ákvarðanataka fyrir sjálfbæra nýtingu lághitajarðvarmakerfa

Doktorsverkefni úr Háskólanum í Reykjavík  
Varið í nóvember 2013

Silja Rán Sigurðardóttir



TÆKNI- OG VERKFRÆÐIDEILD  
SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

Fagfundur veitna Samorku – Hótel Borgarnes 28.-29. maí 2015