



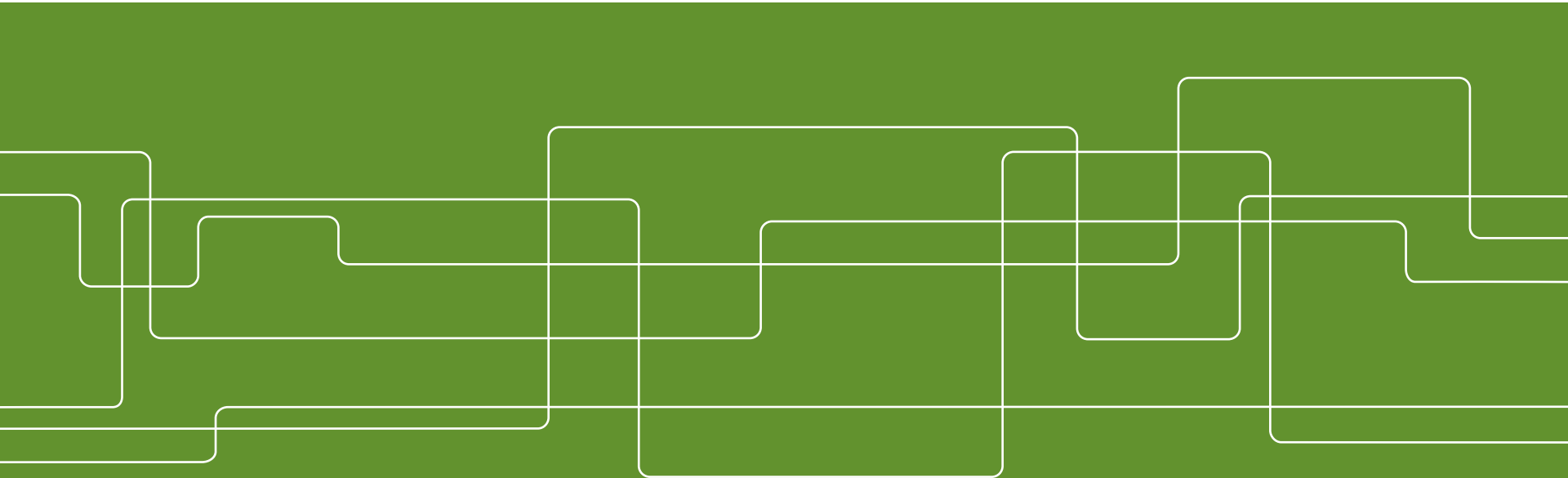
# Hur håller man balansen vid nära 100% förnybar elproduktion?

## SERO:s Årsstämma och seminarium

*8 och 9 april 2022 på Säröhus utanför Kungsbacka*

Lennart Söder  
Professor Elektriska Energisystem, KTH

<https://www.kth.se/profile/lisod>, [lsod@kth.se](mailto:lsod@kth.se)





Astrid Lindgren, 1947  
och bilderboken "Känner du Pippi Långstrump?"

**“Den som är väldigt stark måste också vara väldigt snäll”**

Astrid Lindgren, 1947  
och bilderboken ”Känner du Pippi Långstrump?”

**“Den som är väldigt stark måste också vara väldigt snäll”**



Lennart Söder,  
8 april, 2022



**“Med vindkraften som det största kraftslaget i Sverige så måste denna teknologi också bidra med systemtjänster.”**



# John F. Kennedy's Inaugural Address, January 20, 1961

**“Ask not what your country can do for you –  
ask what you can do for your country,”**



# John F. Kennedy's Inaugural Address, January 20, 1961

**“Ask not what your country can do for you –  
ask what you can do for your country,”**



Lennart Söder,  
8 april, 2022



**“Fråga inte hur kraftsystemet kan hjälpa vindkraften –  
fråga hur vindkraften kan hjälpa systemet”**



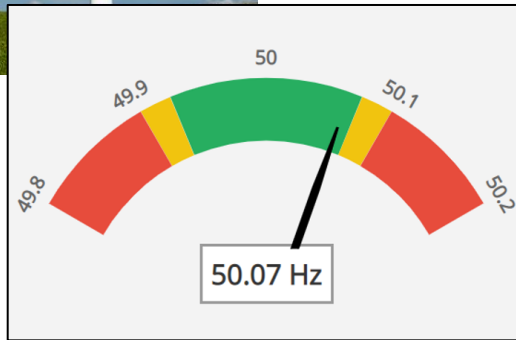
# Hur håller man balansen vid nära 100% förnybar elproduktion

## Tre olika områden

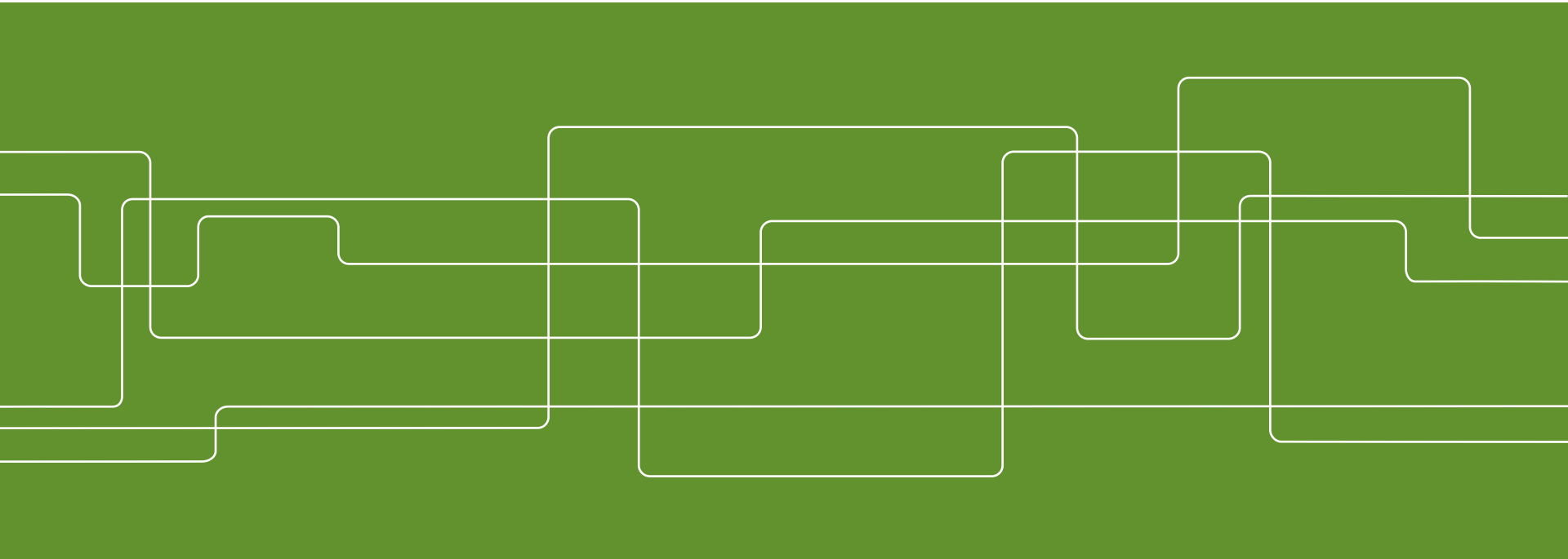
1. Att hålla timbalansen  
("energi")
2. Hålla balans inom timmen  
("effekt")
3. Håll spänning



# Att hålla timbalanser

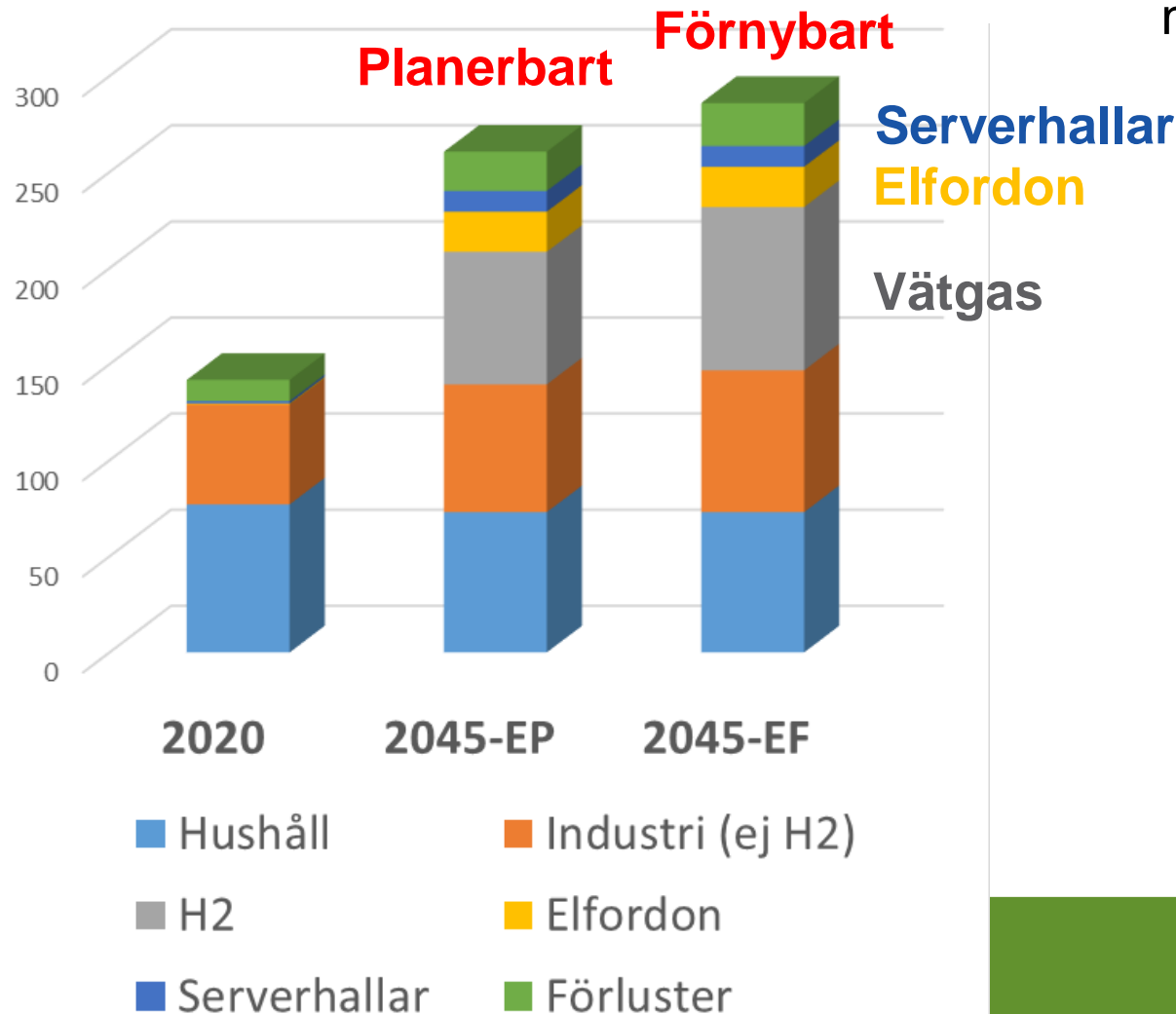


8 april, 2022



# Två scenarier för framtiden: Elektrifiering

## Antagen konsumtion

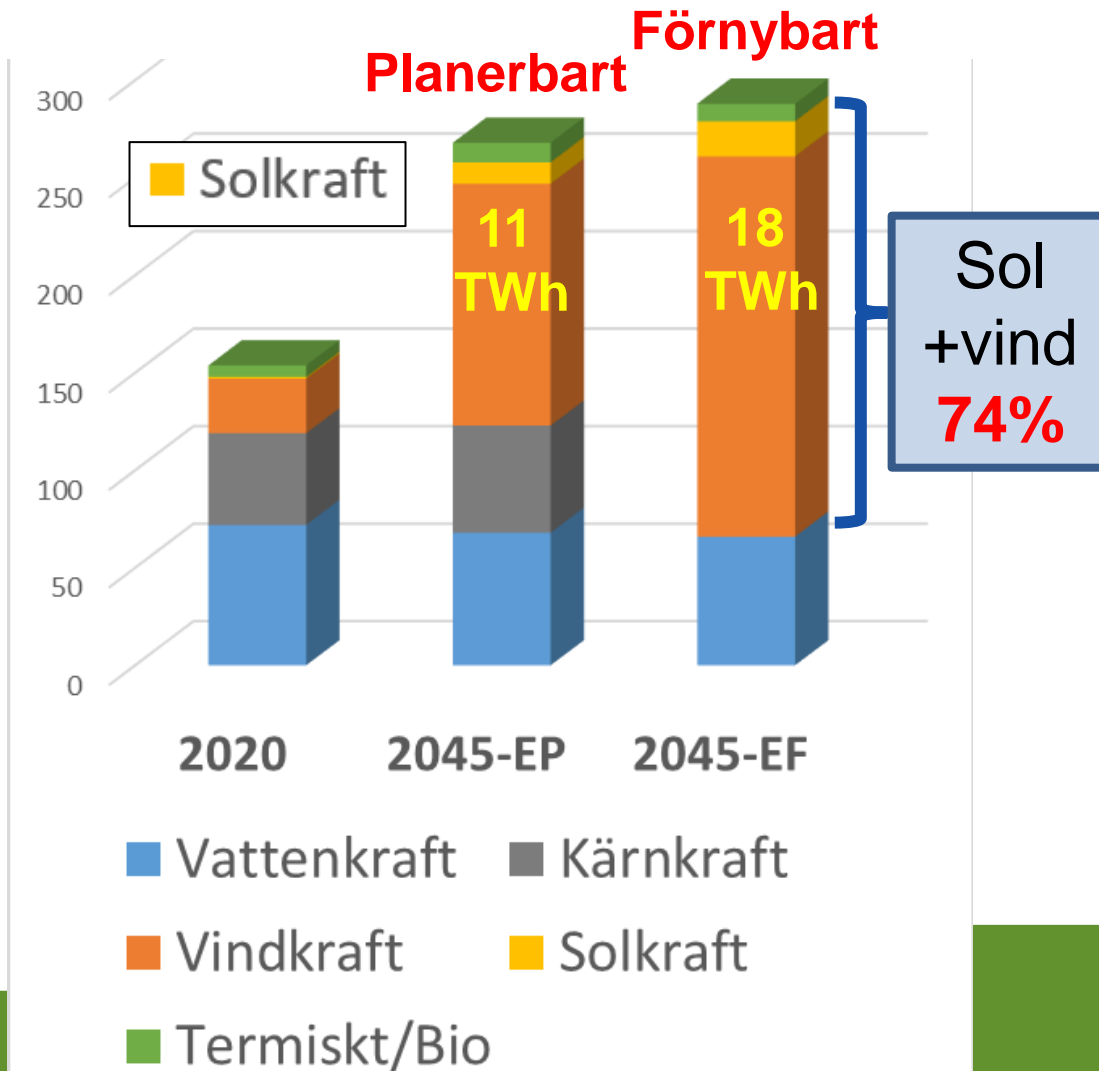


”Långsiktig marknadsanalys”, maj 2021





## Produktion resultat/antaganden



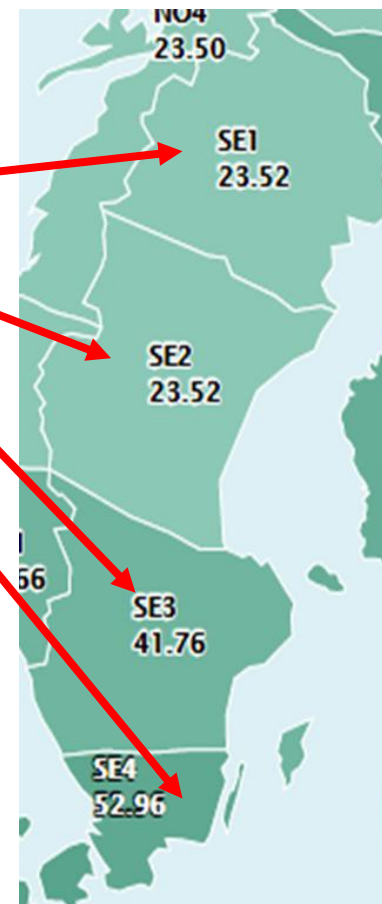
”Långsiktig marknadsanalys”, maj 2021



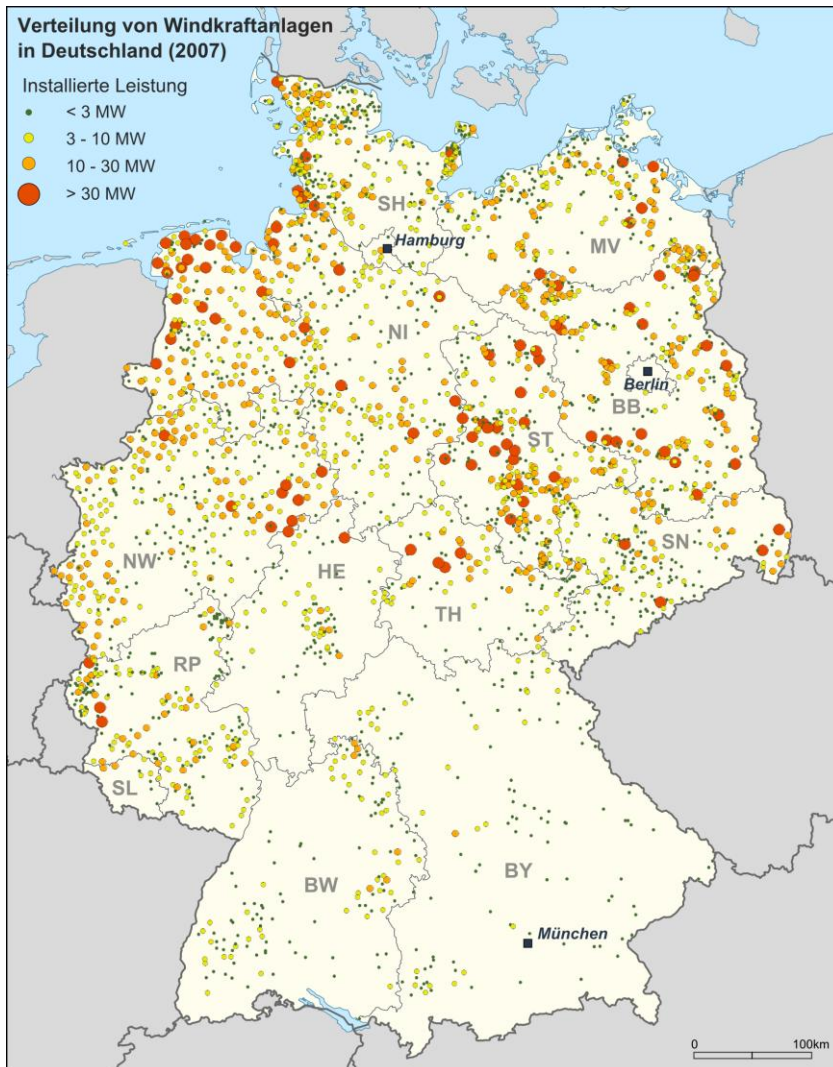
# Ansökningar om ny vindkraft i Sverige

## Skickade till SvK – från 18 mars - 2021

	On-shore [MW]	Off-shore [MW]
SE1	4 500	0
SE2	12 000	13 000
SE3	1 500	10 000
SE4	1 000	25 000
Total	<b>19 000</b>	<b>48 000</b>
Energy (3000h)	<b>57 TWh/year</b>	<b>144 TWh/year</b>

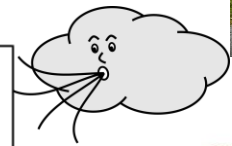


# Vind- och solkraft i Tyskland (2020)



	Tyskland	Sverige
TWh vind	<b>131</b>	27,4
TWh sol	<b>50,6</b>	1,1
Yta km <sup>2</sup>	357 588	450 295
Invånare milj	83	10

# Om lager (= planerbarhet/flexibilitet)



1) Primär källa:  
Bränsle, inflöde,  
vind etc

2) Bränsle Lager-1:  
T.ex. kol, vatten  
reservoar, avfall

3) Elektrisk generering

4) Elektrisk transmission  
och distribution

5) Elektrisk konsumtion

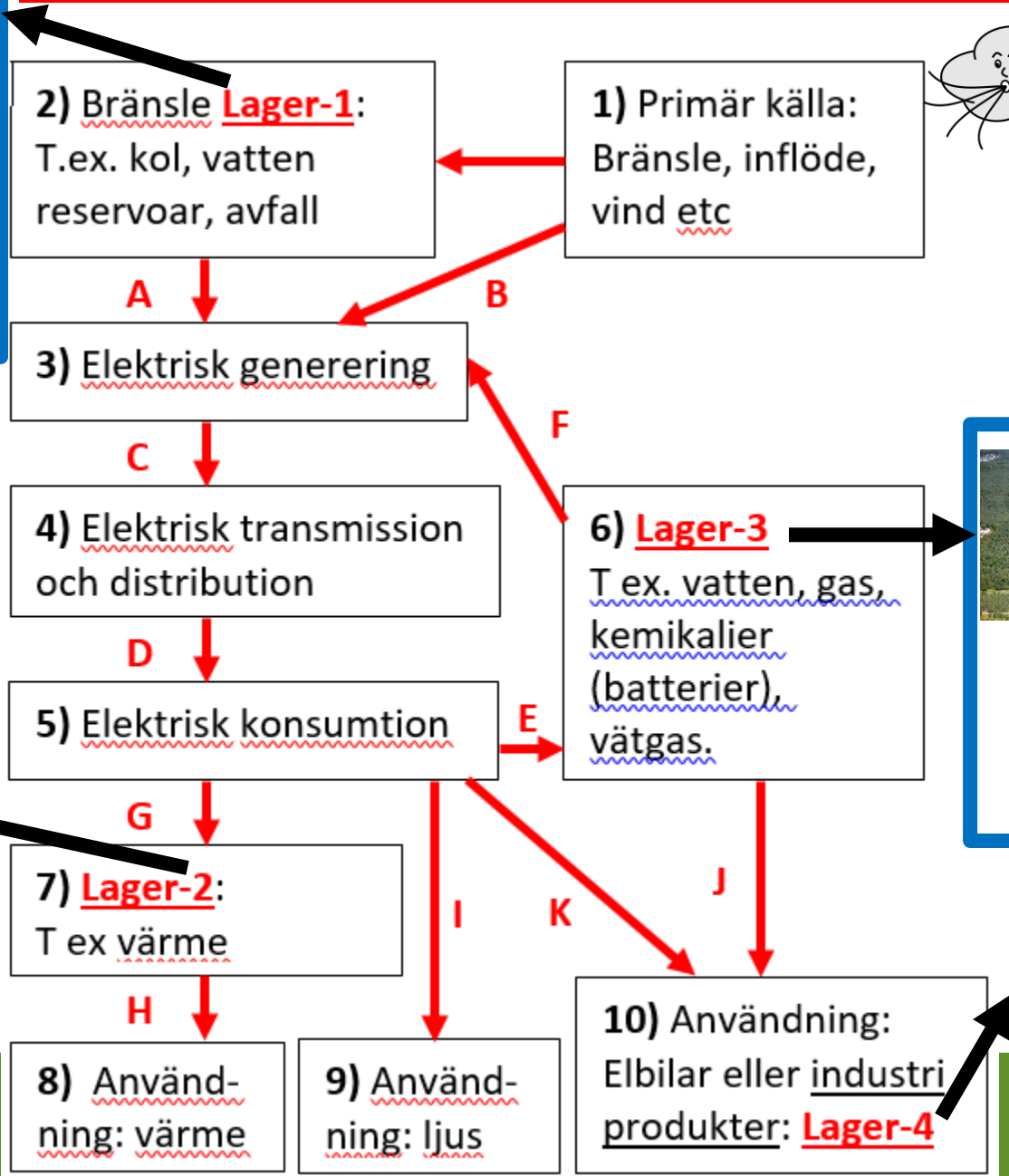
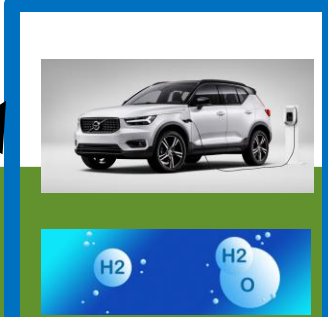
7) Lager-2:  
T ex värme

8) Användning: värme

9) Användning: ljus

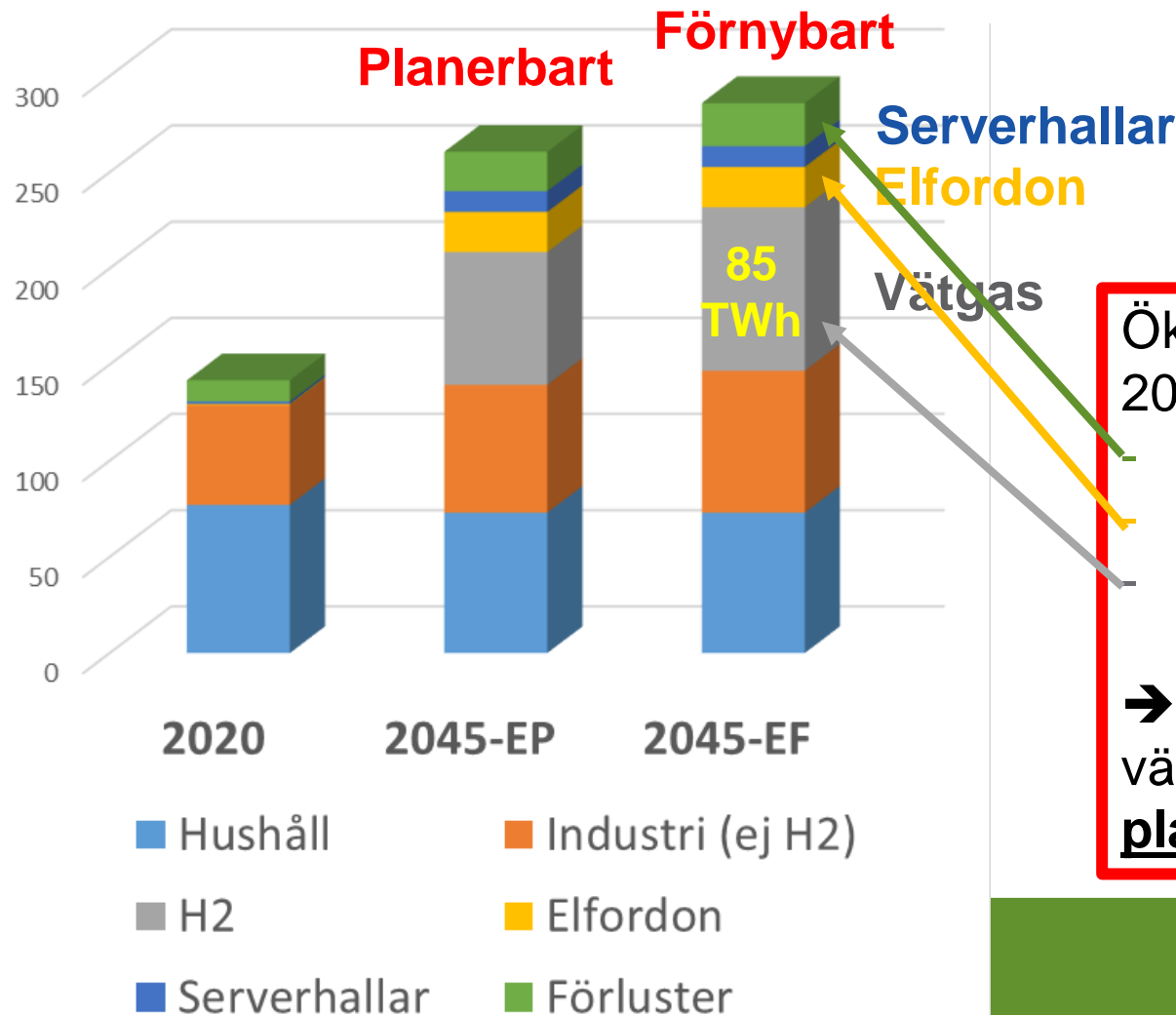
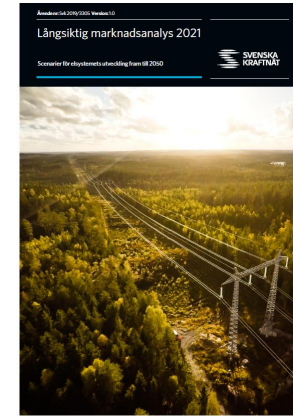
6) Lager-3  
T ex. vatten, gas,  
kemikalier  
(batterier),  
vätgas.

10) Användning:  
Elbilar eller industri  
produkter: Lager-4



# Två scenarier för framtiden: Elektrifiering

## Antagen konsumtion



Ökad elförbrukning 2020-2045-EF: 144 TWh

- Del av förluster
- 21 TWh: fordon
- 85 TWh: vätgas

→ 79% av ökningen är vätgas eller elfordon, dvs planerbart

## HYBRIT – Elsystemintegration och flexibilitet

Tobias Rehnholm

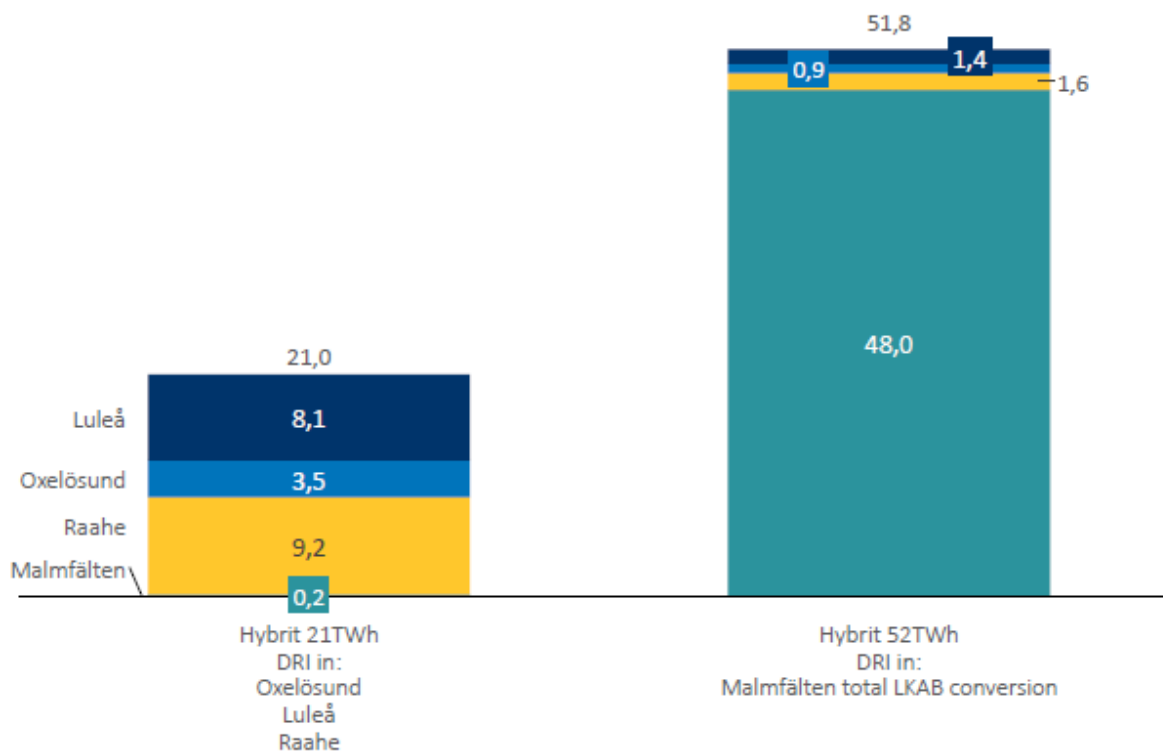


A joint venture between SSAB, LKAB and Vattenfall

2020-12-11

1

## Scenarieanalys med marknadsåterkoppling



### Flexibilitetsantaganden

#### Hybrit 21TWh

- 180% elektrolysrkapacitet
- 7 dagars vätgaslager

#### Hybrit 52TWh

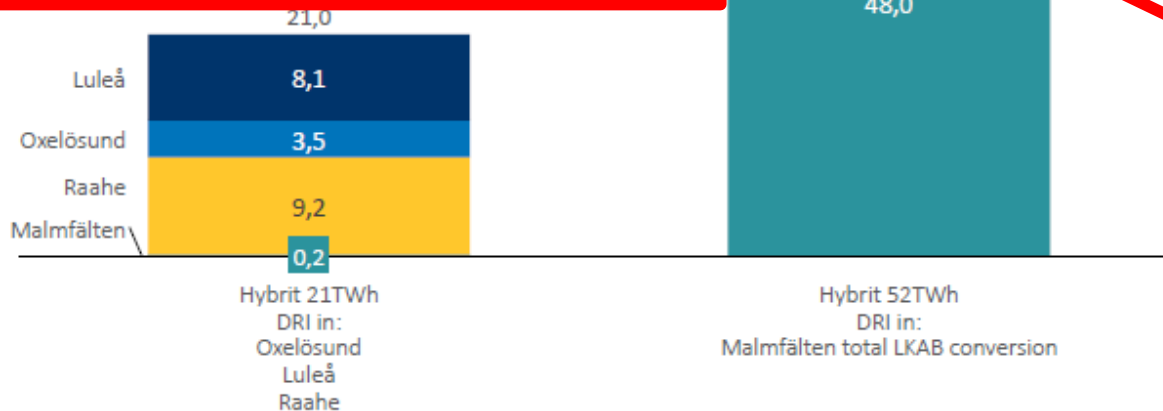
- 180% elektrolysrkapacitet
- 14 dagars vätgaslager

Elkonsumtion är kompenserad med 100% vind

## Scenarieanalys med marknadsåterkoppling

### Hybrit 52 TWh

- 180% elektrolysör kapacitet →  $1.8 \cdot 52 \text{TWh} / 8760 \text{h} =$   
**10685 MW** (om allt är elektrolys)
- **14 dagars vätgaslager**



#### Flexibilitetsantaganden

##### Hybrit 21TWh

- 180% elektrolysrkapacitet
- 7 dagars vätgaslager

##### Hybrit 52TWh

- 180% elektrolysrkapacitet
- 14 dagars vätgaslager

Elkonsumtion är kompenserad med 100% vind





# John F. Kennedy's Inaugural Address, January 20, 1961

**“Ask not what your country can do for you –  
ask what you can do for your country,”**



Lennart Söder,  
8 april, 2022



**“Fråga inte hur kraftsystemet kan hjälpa vindkraften –  
fråga hur vindkraften kan hjälpa systemet”**

# Några detalj-kommentarer om antaganden/resultat: sidan 10

”Långsiktig marknadsanalys”, maj 2021

	-400	2025				2035				2045			
		SF	FM	EP	EF	SF	FM	EP	EF	SF	FM	EP	EF
■ EI till vätgas	-2	-6	-8	-24	-39	-11	-16	-69	-85				
■ Övrig elanv	-145	-156	-159	-176	-177	-163	-172	-197	-201				
■ Solkraft	3	15	7	8	11	28	8	11	18				
■ Vindkraft hav	1	2	7	14	34	6	29	39	113				
■ Vindkraft land	48	55	58	68	69	76	88	85	98				
■ Övrig termisk	11	9	8	11	10	9	8	10	9				
■ Kärnkraft	51	37	36	47	47	0	14	55	0				
■ Vattenkraft	68	69	68	68	67	68	67	68	66				
Total prod	182	187	185	215	238	187	215	269	304				
Total elanv	-148	-161	-167	-200	-216	-174	-188	-266	-286				
Spill	0	-1	-1	0	-1	-7	-6	-1	-16				
◊ Balans	34	25	17	15	20	6	21	2	2				



# Några detalj-kommentarer om antaganden/resultat: sidan 10

	-400	2025				2035				2045			
		SF	FM	EP	EF	SF	FM	EP	EF	SF	FM	EP	EF
■ El till vätgas		-2	-6	-8	-24	-39	-11	-16	-69	-85			
■ Övrig elanv		-145	-156	-159	-176	-177	-163	-172	-197	-201			
■ Solkraft		3	15	7	8	11	28	8	11	18			
■ Vindkraft hav		1	2	7	14	34	6	29	39	113			
■ Vindkraft land		48	55	58	68	69	76	88	85	98			
■ Övrig termisk		11	9	8	11	10	9	8	10	9			
■ Kärnkraft		51	37	36	47	47	0	14	55	0			
■ Vattenkraft		68	69	68	68	67	68	67	68	66			
Total prod		182	187	185	215	238	187	215	269	304			
Total elanv		-148	-161	-167	-200	-216	-174	-188	-266	-286			
Spill		0	-1	-1	0	-1	-7	-6	-1	-16			
○ Balans		34	25	17	15	20	6	21	2	2			

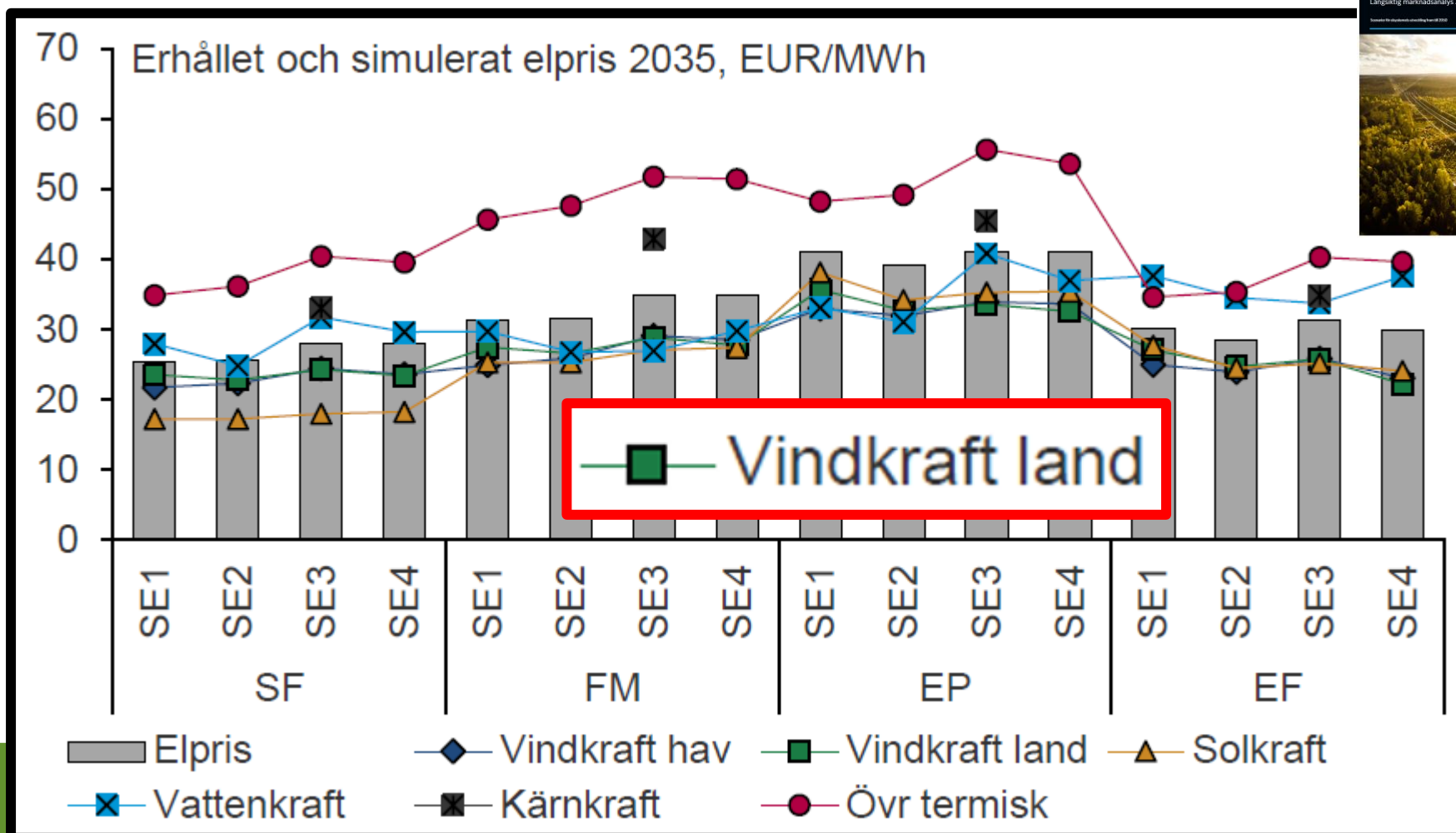
**85 TWh/år:**  
**El till vätgas**

**16 TWh/år**  
**Spill**



# Vem betalar för vad + vad får man betalt för ?

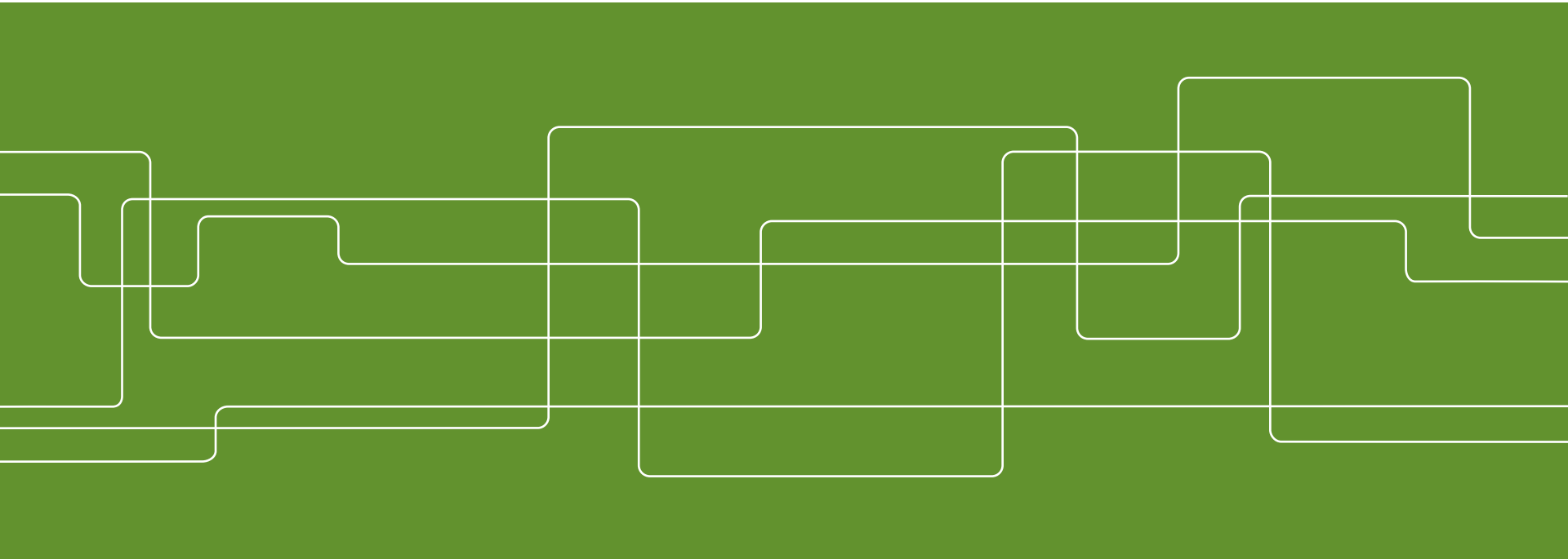
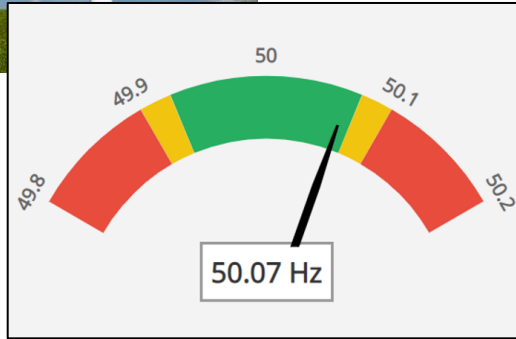
Exemplet vindkraft i Sverige: Värdet på **producerad el**



# Systemtjänster

**Hålla balans  
inom timmen**

**8 april, 2022**





# Examensarbete från KTH – Svensk Vindenergi, våren 2021



DEGREE PROJECT IN ELECTRICAL ENGINEERING,  
SECOND CYCLE, 30 CREDITS  
*STOCKHOLM, SWEDEN 2021*

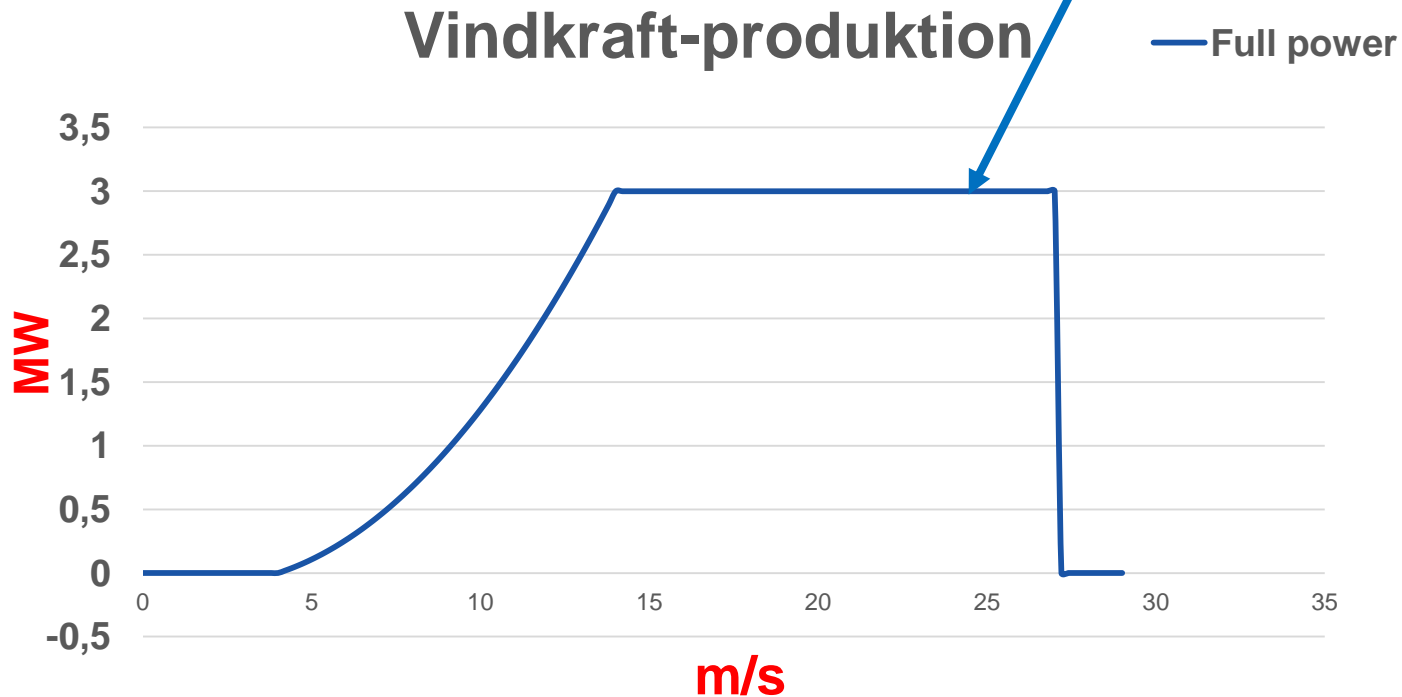
## **The potential of wind power on the Swedish ancillary service markets**

**HANNES WIKLUND**

KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

# Vindkraften kan bidra till primär-reglering (FCR)

Ekonomi → Vindkraft körs ofta på maximal produktion



# Vindkraften kan bidra till primär-reglering (FCR)

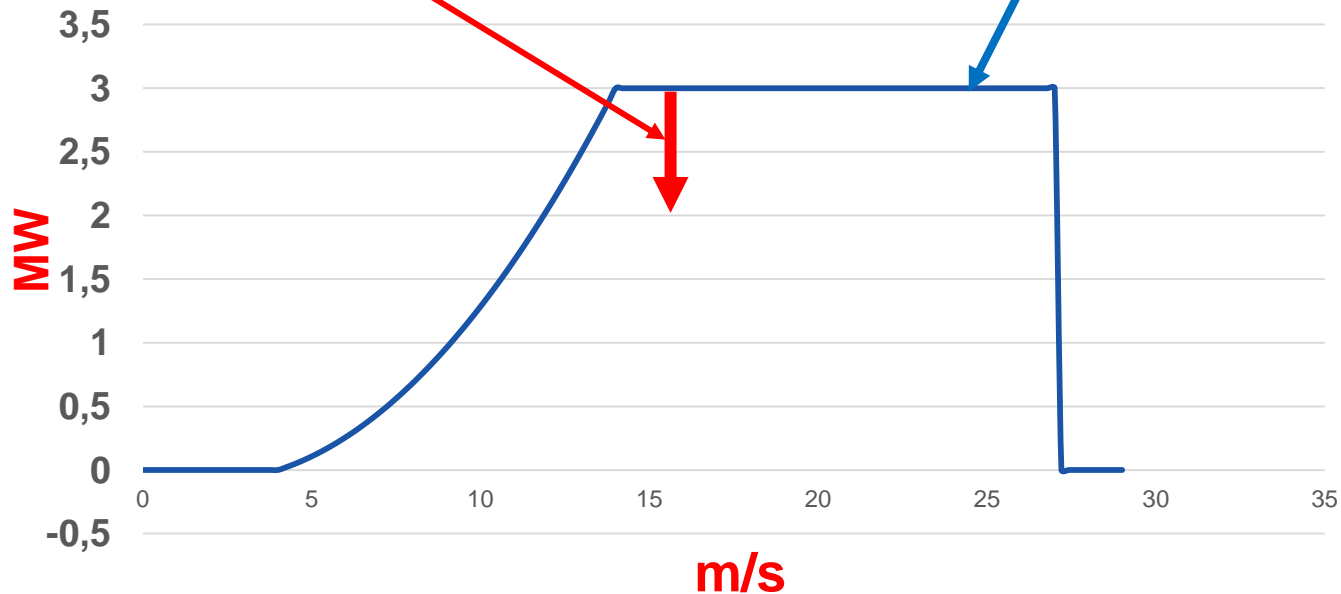
Ekonomi → Vindkraft körs ofta på maximal produktion

Möjligt att erbjuda ned-reglering av produktion

Vid ökad frekvens

Vindkraft-produktion

— Full power



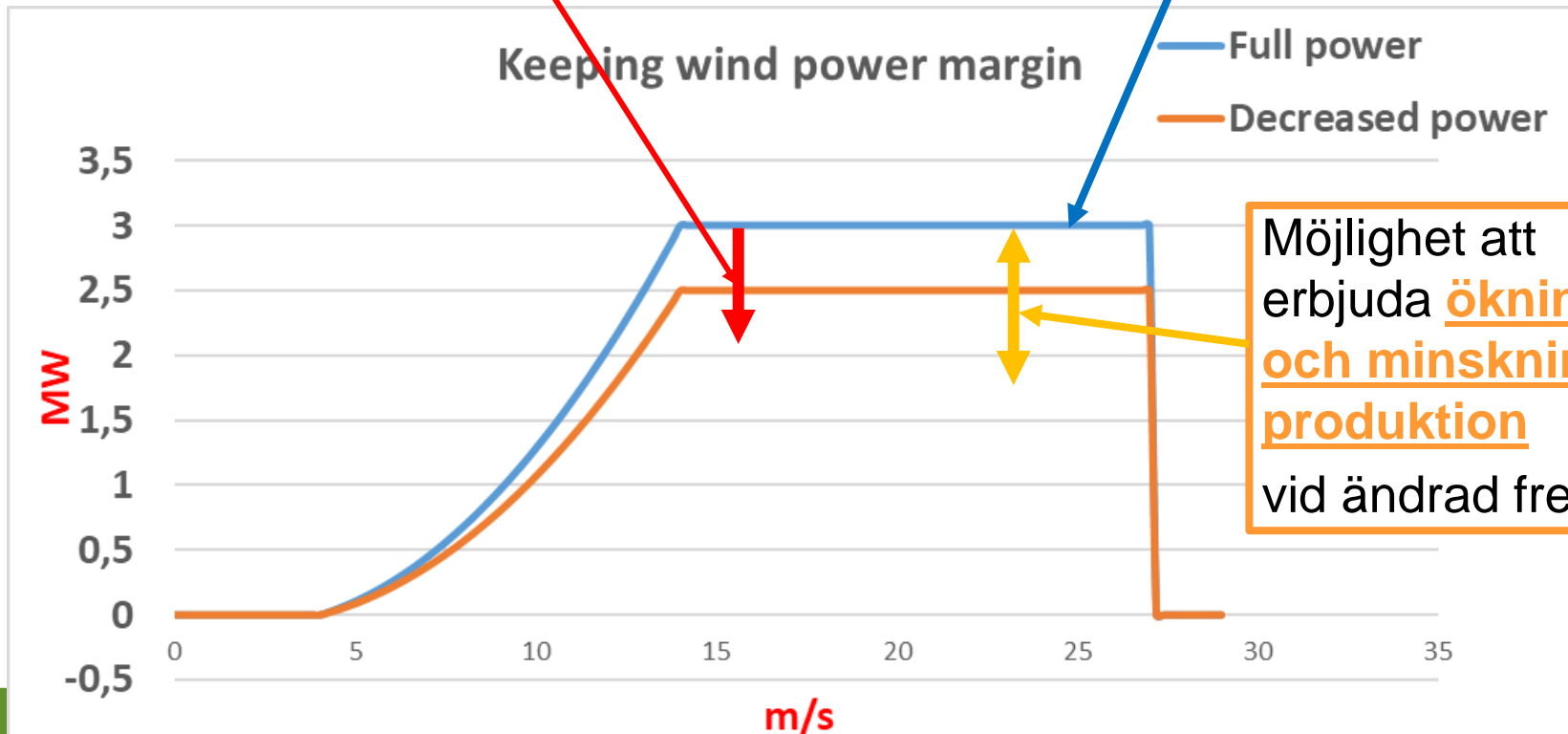


# Vindkraften kan bidra till primär-reglering (FCR)

Ekonomi → Vindkraft körs ofta på maximal produktion

Möjligt att erbjuda ned-reglering av produktion

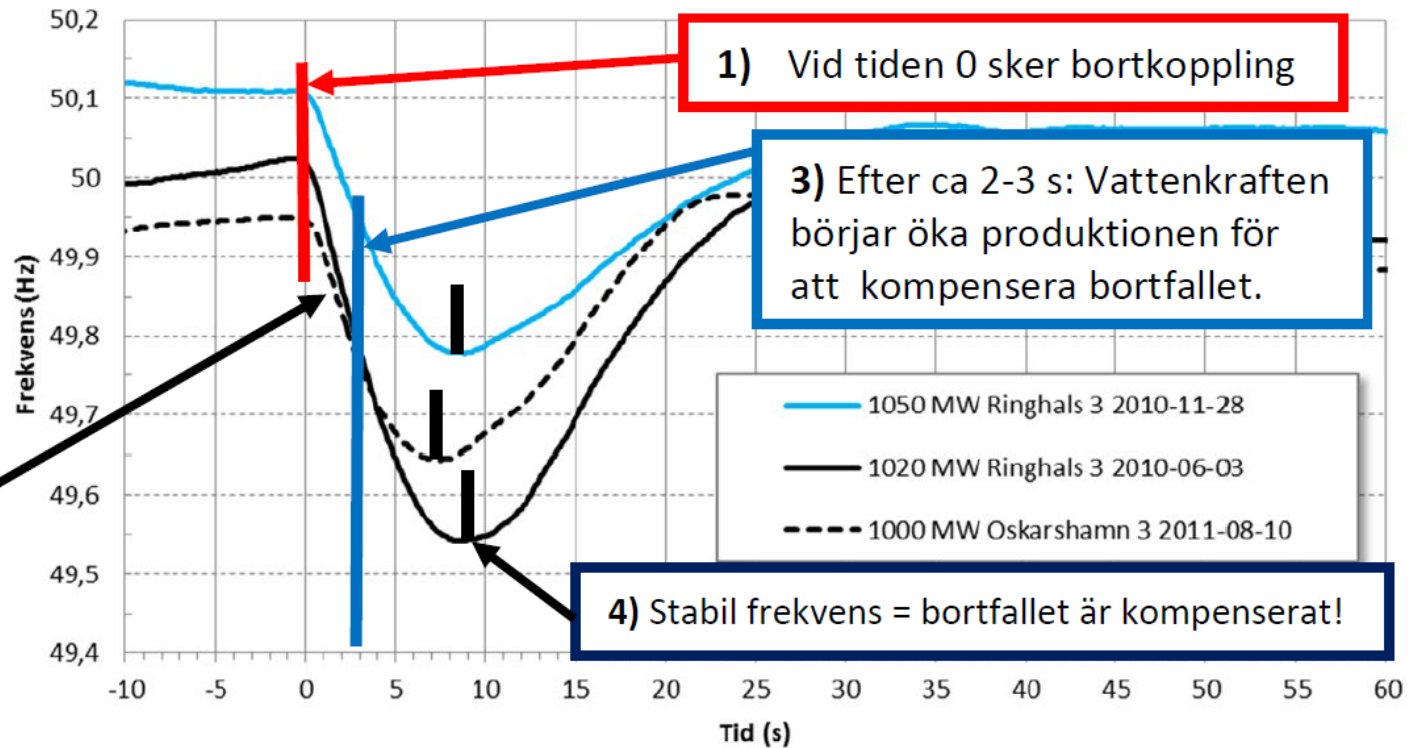
Vid ökad frekvens



Möjlighet att erbjuda ökning och minskning av produktion vid ändrad frekvens

# Utmaningen med svängmassa: 3 verkliga svenska kärnkrafts-bortfall

2) Momentan kompensation kommer från energi från roterande komponenter. Då minskar deras rotations-hastighet och frekvensen i elnätet dalar

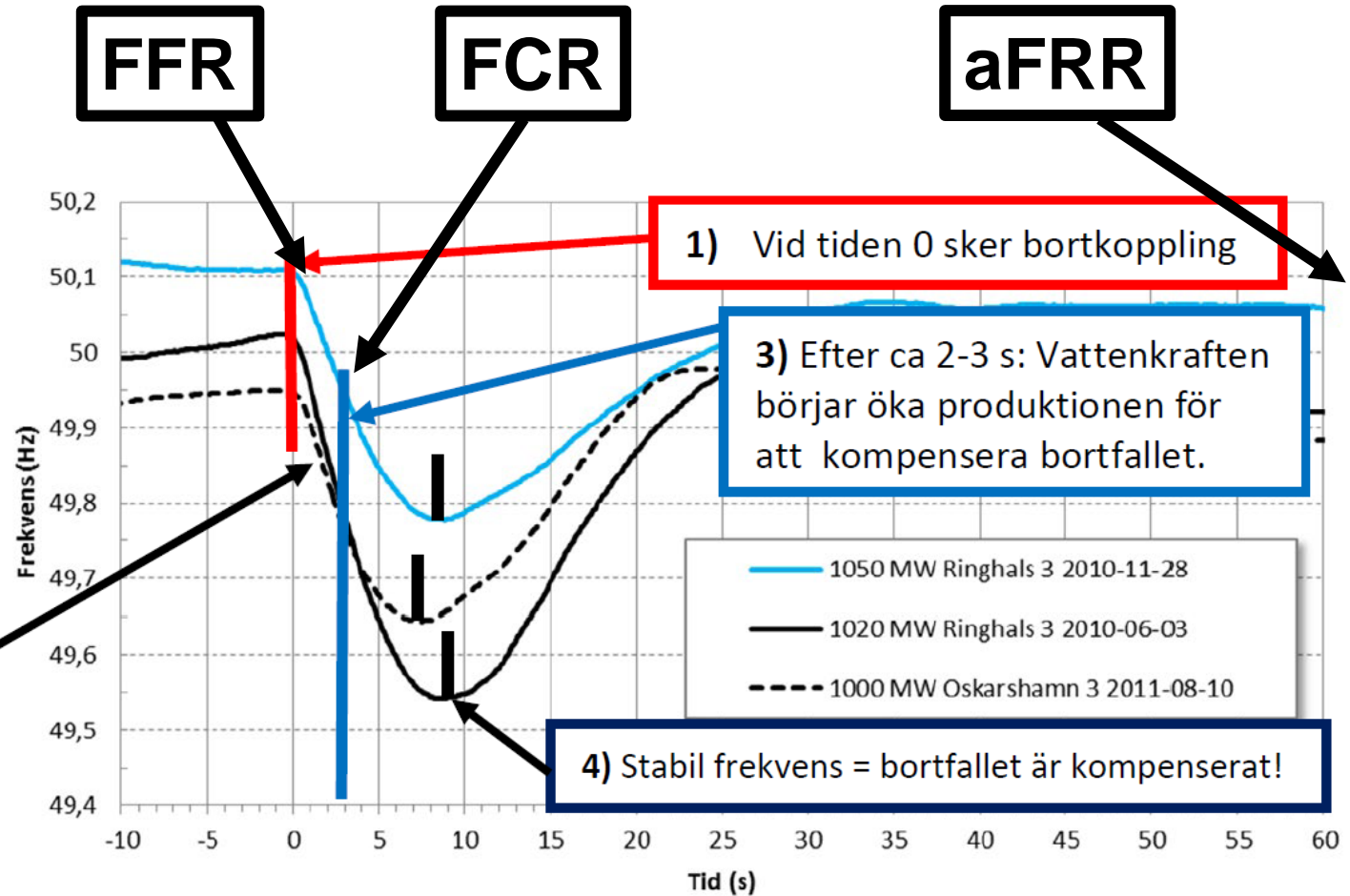


Stödtjänst	Syfte
<p><b>FFR:</b> (Snabb frekvensreserv, Fast Frequency Reserve)</p>	<p>Automatisk stödtjänst som hanterar de inledningsvis snabba och djupa (transienta) frekvensförändringar som kan uppstå vid fel vid låg nivå av rotationsenergi i det nordiska kraftsystemet</p>
<p><b>FCR-N:</b> (Frekvenshållningsreserv normaldrift, Frequency Containment Reserve - Normal)</p>	<p>Automatisk stödtjänst som stabiliserar frekvensen vid små förändringar i förbrukning eller produktion</p>
<p><b>FCR-D upp:</b> (Frekvenshållningsreserv störd drift uppreglering, upwards Frequency Containment Reserve - Disturbance)</p>	<p>Automatisk stödtjänst som stabiliserar frekvensen vid driftstörningar (uppreglering)</p>
<p><b>FCR-D ned:</b> (Frekvenshållningsreserv störd drift nedreglering, downwards Frequency Containment Reserve - Disturbance)</p>	<p>Automatisk stödtjänst som stabiliserar frekvensen vid driftstörning (nedreglering)</p>
<p><b>aFRR:</b> (automatisk Frekvensåterställningsreserv, automatic Frequency Restoration Reserve)</p>	<p>Automatiskt aktiverad stödtjänst som återställer frekvensen till 50 Hz</p>
<p><b>mFRR:</b> (manuell Frekvensåterställningsreserv, manual Frequency Restoration Reserve)</p>	<p>Manuell stödtjänst som avlastar de automatiska stödtjänsterna och återställer frekvensen till 50 Hz</p>

# Systemtjänst-marknad - Krav

Krav	FCR-N	FCR-D	aFRR	FFR
Typ av reglering	Symmetrisk	Upp-reglering	Upp- och nedreglering	Upp-reglering
Aktiverande frekvens	49.9-50.1 Hz	Under 49.9 Hz	Vid avvikelse från 50 Hz	49.5, 49.6, or 49.7 Hz
Aktivierings-tid	63 % i 60 s och 100 % i 3 min	50 % i 5 s och 100 % i 30 s	100 % i 120 s	0.7, 1.0, eller 1.3 s
Kompense-ring	<b>Effekt:</b> Pay-as-bid <b>Energi:</b> Regler-priser	<b>Effekt:</b> Pay-as-bid	<b>Effekt:</b> Pay-as-bid <b>Energi:</b> Regler-priser	<b>Effekt:</b> Marginal-pris

# Utmaningen med svängmassa: 3 verkliga svenska kärnkrafts-bortfall



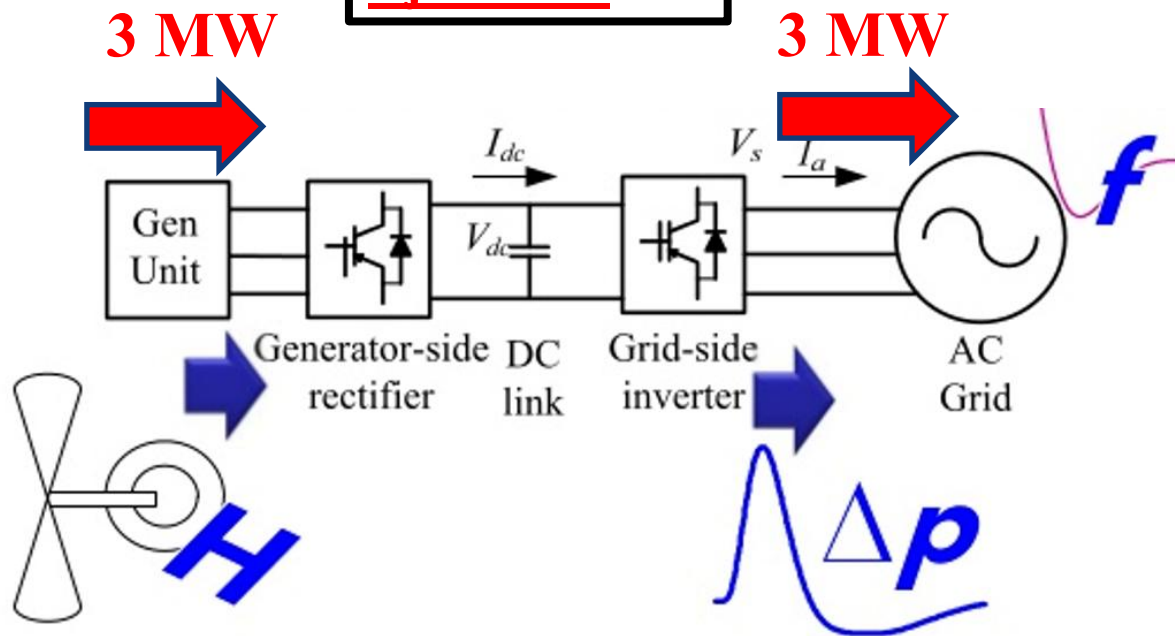
# Vindkraft: "syntetisk svängmassa" (= FFR) - 1

Syftet med "syntetisk svängmassa" är att ta ut extra energi från rörliga delar i vindkraftverket.

**Mekanisk effekt:**

**Initialt set-up:  
Ej använd**

**Elektrisk effekt:**



# Vindkraft: "syntetisk svängmassa" (= FFR) - 2

Syftet med "syntetisk svängmassa" är att ta ut extra energi från rörliga delar i vindkraftverket.

**Mekanisk effekt:**

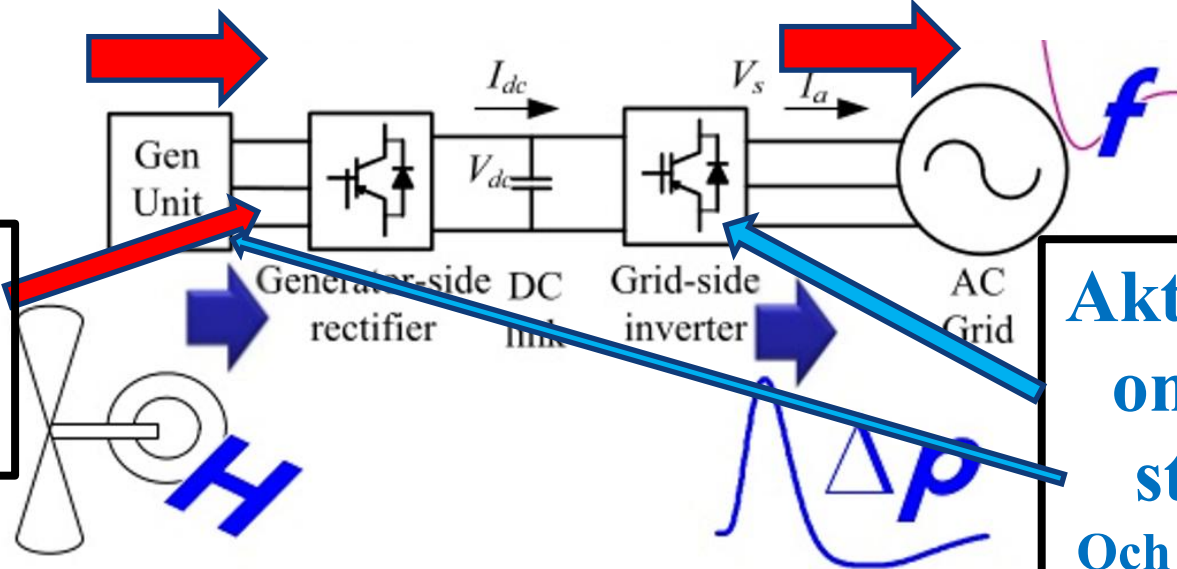
**Nu används svängmassan**

**Elektrisk effekt:**

**3 MW**

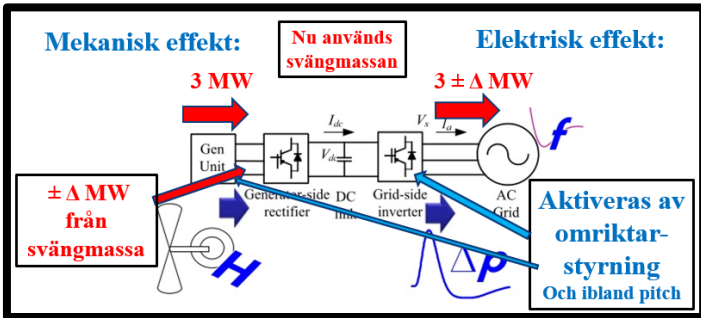
**$3 \pm \Delta \text{ MW}$**

**$\pm \Delta \text{ MW}$   
från  
svängmassa**



**Aktiveras av omriktarstyrning  
Och ibland pitch**

# Vindkraft: "syntetisk svängmassa" (= FFR) - 3

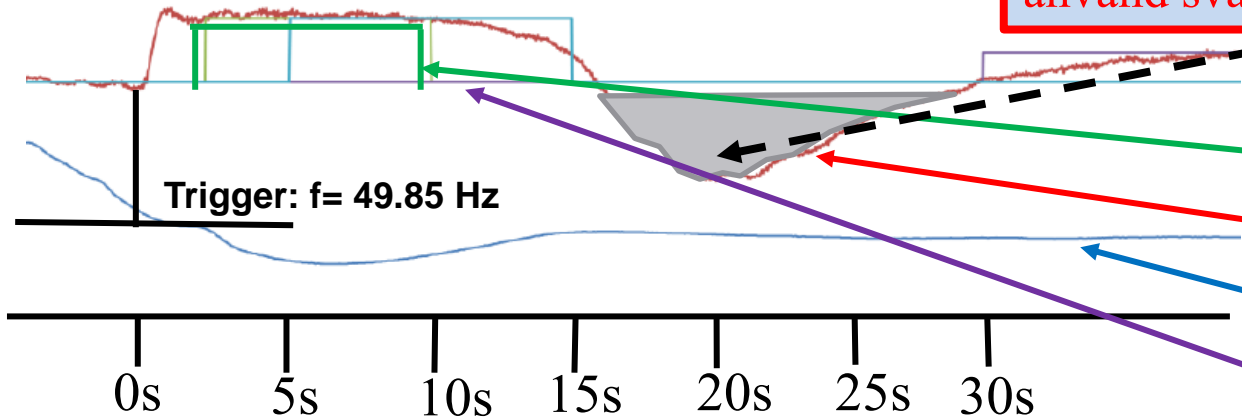


**Test från verkligheten på Irland:**

**Utmaning:** Hur ska omriktaren styras?

Real test in Ireland

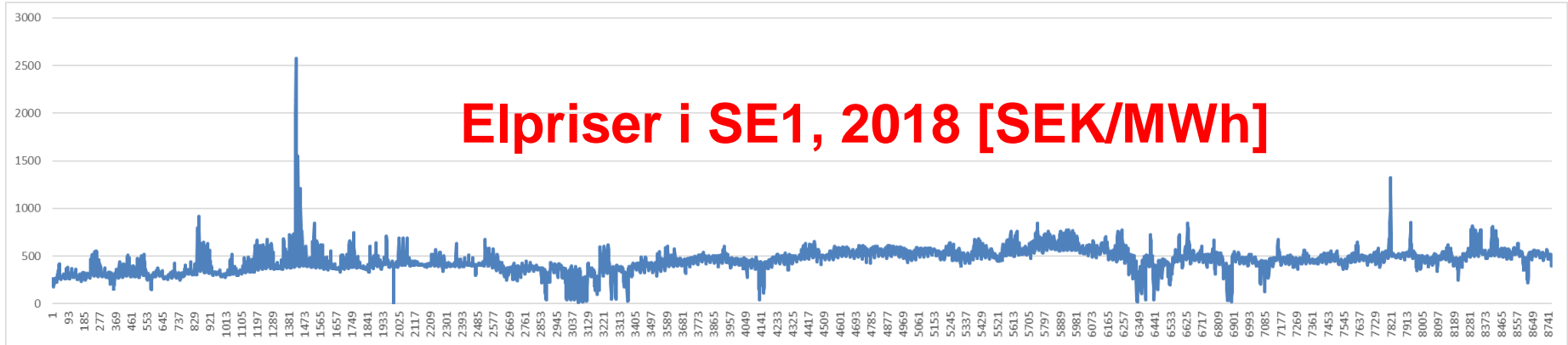
**Exempel:** Inom en viss tid måste använd svängmassa återställas.



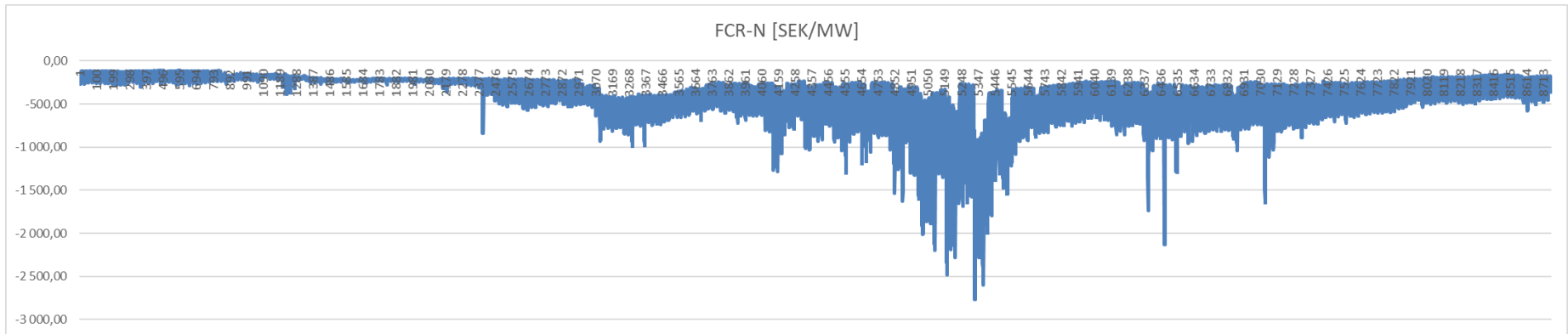
- Krav på FFR-svar**
- MW produktion - ändring**
- Freakvens (Hz)**
- Effekt från vinden [MW]**



# Elpriser och FCR-N-priser under 2018

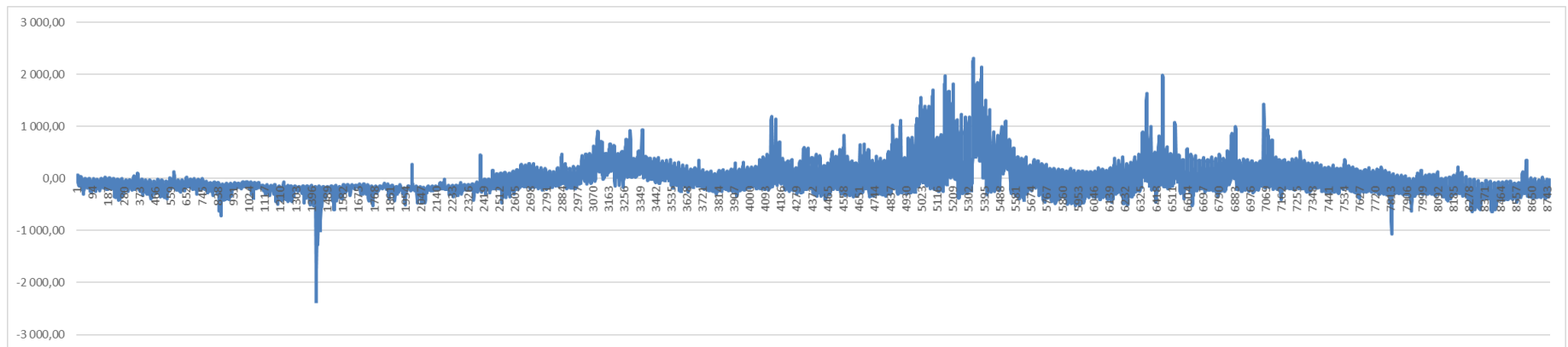


## Reglerpriser, FCR-N, 2018 [SEK/MW]



# Elpriser och FCR-N-priser under 2018

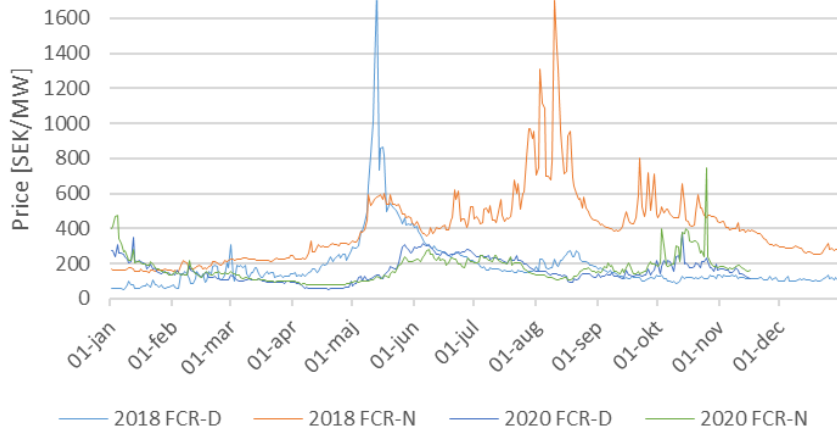
**[FCR-N-pris] – [Elpris], 2018**



**FCR-N-priset var HÖGRE än Elpriset under 2451 timmar**

# Marknad för systemtjänster - Pris

Daily average FCR price



**Andel av timmarna då priset överstiger Nordiska systempriset.**

	FCR-N	FCR-D	aFRR Ner	FFR
<b>2018</b>	27.9 %	7.1 %	1.8 %	n/a
<b>2020</b>	72.6 %	68.5 %	34.6 %*	33.5 %**

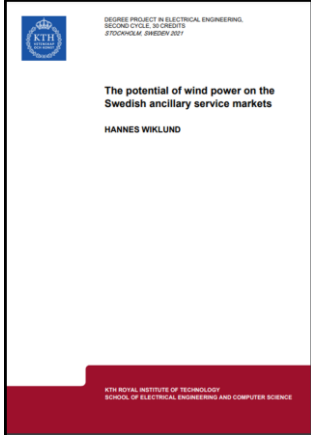
\*Data inkluderar 7295 första timmarna av året

\*\*Bara aktuellt för 10 sommar-veckor

# Marknad för systemtjänster– Intervjuer

	<b>FFR - krav</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>
<b>Aktiverings- tid [s]</b>	<b>0.7-1.3</b>	1	1.3	1.3	1
<b>Varaktighet [s]</b>	<b>5 eller 30</b>	5-30	Studier pågår	5	5
<b>Repeter- barhet</b>	<b>&lt; 15 minutes</b>	Ja	<1 min	Ja	Ja
<b>Overshoot</b>	<b>35 %</b>	Tester behövs	Ja	Ja	-

- **Intervjuer med 4 tillverkare av vindkraftverk**
- **Enbart mjukvara behöver uppdateras**
- **Inget extra slitage**
- **Vissa frågetecken om mer specifika krav**



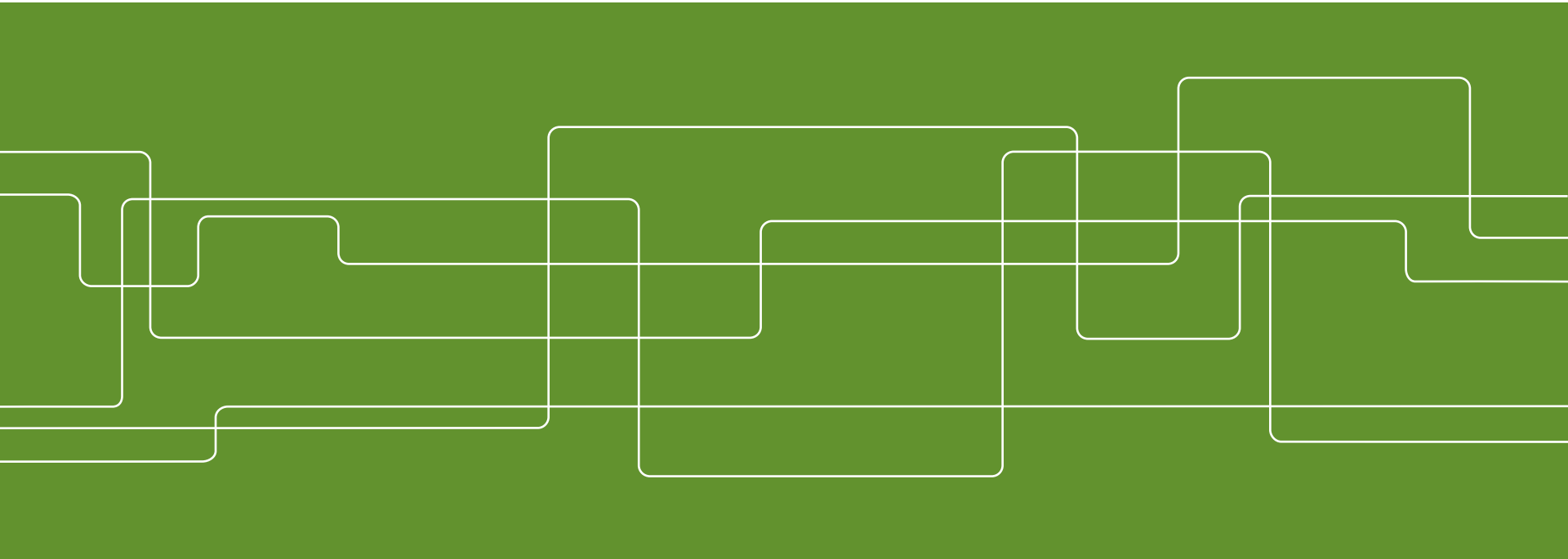
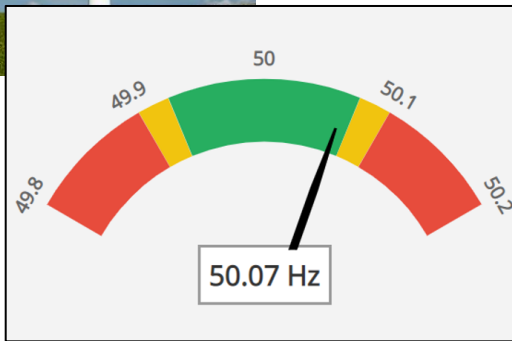
## Slutsatser från denna studie

- Intervjuerna visar att det finns en teknisk möjlighet för vindkraftverk att delta på marknader för system-tjänster, men vissa frågetecken kring specifika krav finns.
- Praktisk erfarenhet behövs för att utvärdera de krav som är specifika för de svenska systemtjänst-marknaderna
- En ökad lönsamhet kan uppnås genom en vindkraftspark som verkar på marknaderna för system-tjänster
- Perioder med låga spotpriser innebär särskilt goda möjligheter att öka vinsten
- Nedreglering är den mest lönsamma formen av sidotjänst som finns tillgänglig för en vindkraftspark, men uppreglering och symmetriska bud kan vara lönsamma i vissa situationer

# Systemtjänster

## Håll spänning

8 april, 2022

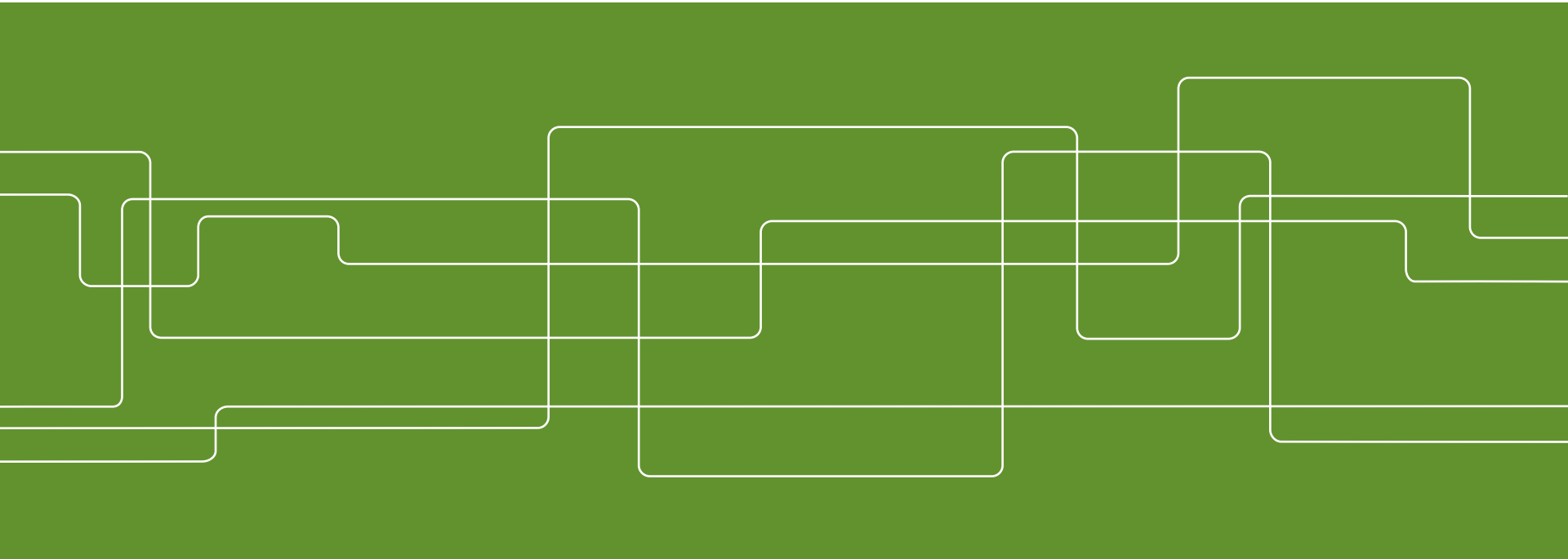




# Nysäter-klustret

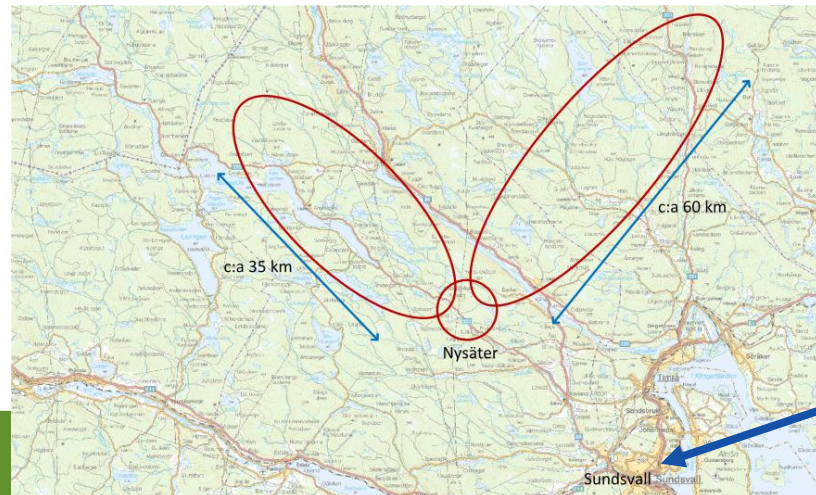
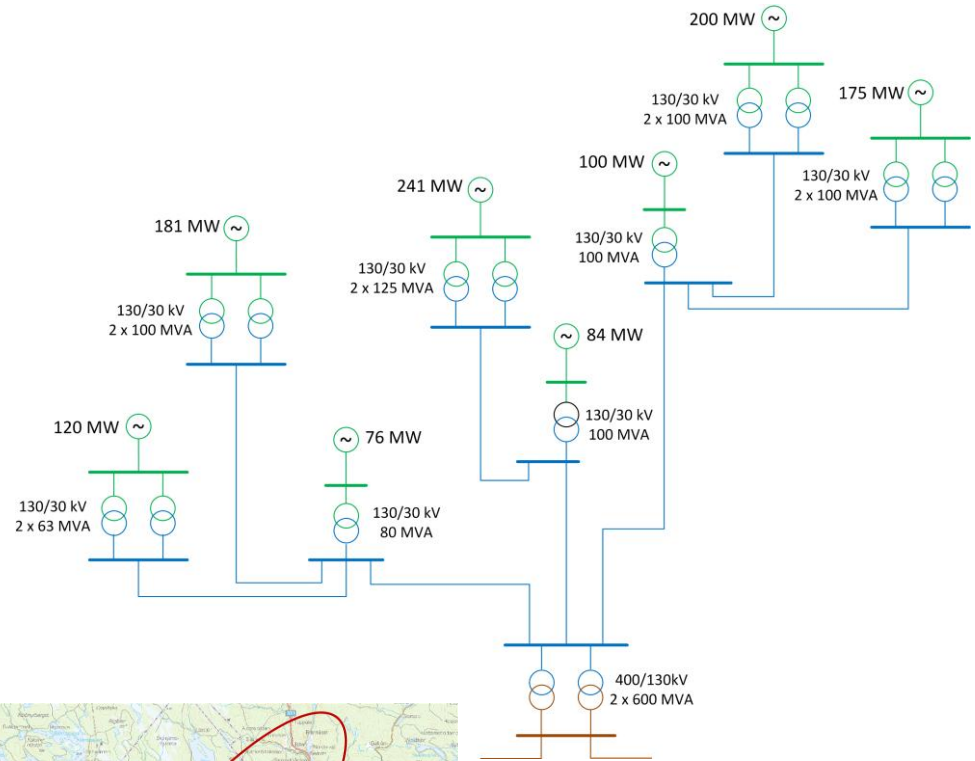
Ett nytt sätt att reglera reaktiv effekt

Bilder från EoN: Ingemar Leisse. 2017-05-18



# Fakta och enlinjeschema för Nysäter-klustret

- 8 vindkraftparker
- 1200 MW installerad effekt
- 1 ny stamnätsstation
- 8 nya regionnätsstationer
- 144 km 130 kV ledningar
- Byggstart etapp 1 2017

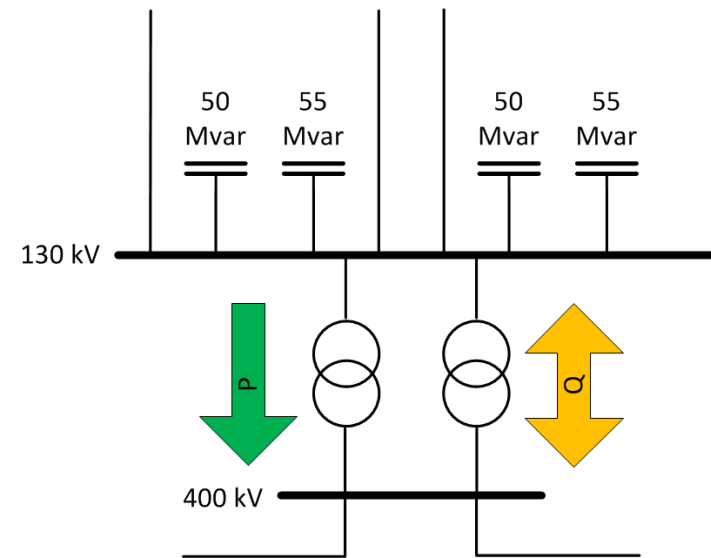


**Sundsvall**



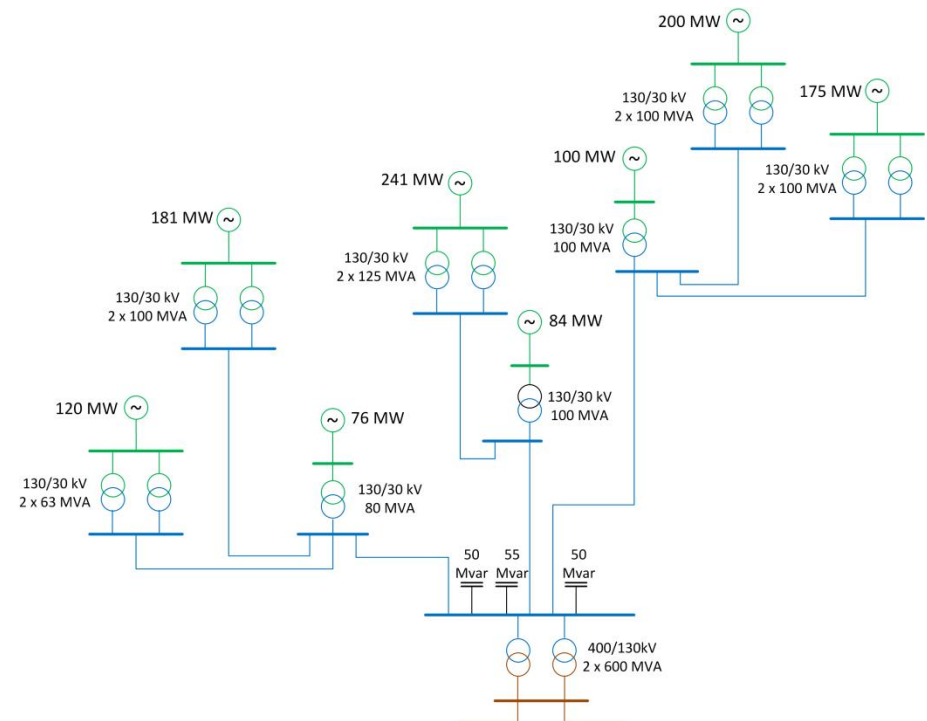
# Krav i anslutningspunkten till stamnätet

- Stamnätsstation Nysäter på 400 kV sidan
- Aktiv effekt 0-1200 MW
- **Normaldrift 0 Mvar  $\pm$ 5 Mvar**
- **Vid behov  $\pm$ 10 procent av den aktuella aktiva effekten (ca  $\pm$ 120 Mvar)**
- Totalt behov av reaktiv effekt i Nysäterkluster ca 510 Mvar (620 Mvar)
- Ca 390 Mvar (500 Mvar) från förluster i 400/130 kV transformatorer, 130 kV ledningar, (130/30 kV transformatorer)
- Ca 120 Mvar till stamnätet



# Sammanfattning

- Vindkraftparkerna för aktiv styrning av reaktiv effekt
- Mindre behov av shuntkondensatorer och kontinuerligt reglering
- Nollutbyte av reaktiv effekt vid maximal produktion
  - Totalt behov c:a 510 Mvar
  - Vindkraftparkerna c:a 355 Mvar
  - Shuntkondensatorer c:a 155 Mvar
- Maximalt utnyttjat spänningsband 6,3 kV i 130 kV nätet
- Krav i anslutningspunkten till stamnätet uppfylls
- Lösningen tekniskt och ekonomiskt fördelaktig



# Om Svenska Kraftnäts ekonomi

