

Vindkraftprognoser med observationer från närliggande parker och advektion

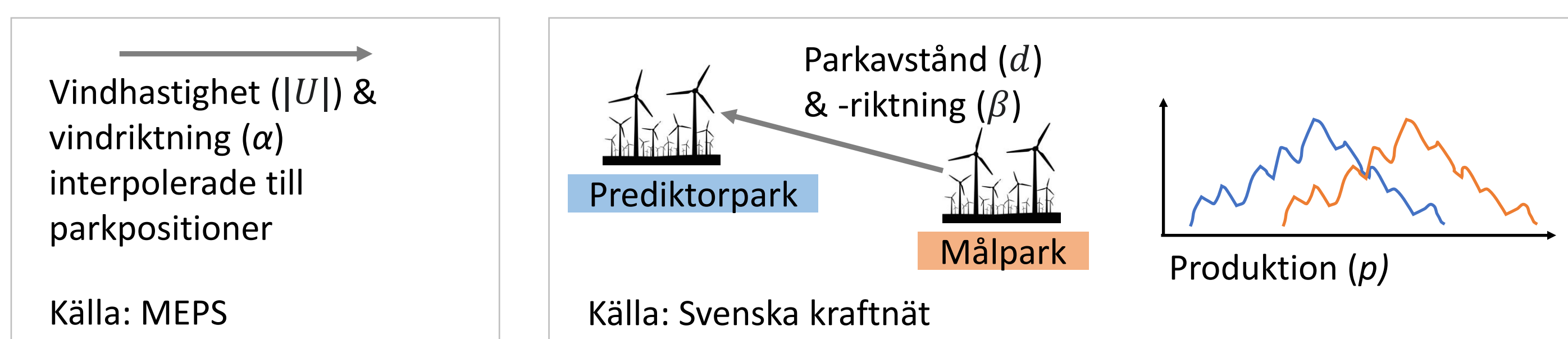
Olle Viotti^{1,2}, Johan Arnqvist¹, Erik Nilsson¹

¹Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala Universitet, Sverige, ²Enheten för Data Science, Svenska kraftnät | Korrespondens: Olle.Viotti@svk.se

Introduktion

Väderberoende energisystem kräver prognoser för att hålla elsystemet i balans. I detta arbete studerar vi möjligheten att använda produktionsdata från intilliggande vindkraftsparker för att förbättra prognoser med en horisont på 15 till 30 minuter. Deep-learning modeller med sådana spatio-temporala indata har visat lovande resultat. I den här studien använder vi en mycket enklare modell för att bättre förstå möjligheter och begränsningar med att nyttja data från intilliggande vindkraftsparker.

Data



Metod

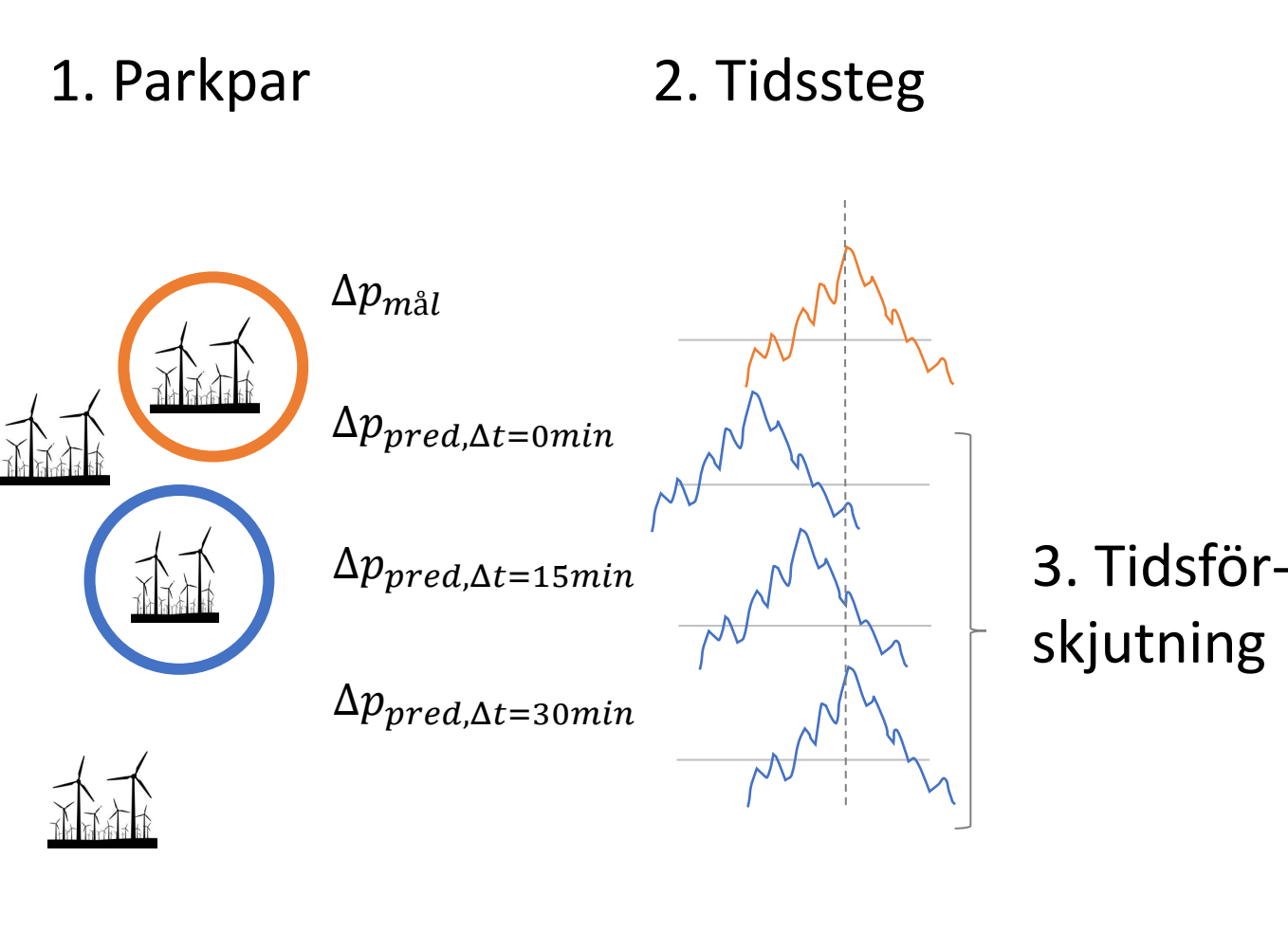
NWP-data - För en tidpunkt hos målparken och en tidsförskjutning (Δt) hos prediktorparken definieras:

- Normaliserad riktning: $\theta = \alpha - \beta$
- Normaliserad tidsförskjutning: $\ell = \frac{\Delta t}{\tau}$,
där $\tau = \frac{d}{|U|}$

Produktionsdata – Normaliseras till kapacitetsfaktorn $\in [0,1]$ och medelvärdesbildas över 15 minuter:

- Produktionsdifferensen: $\Delta p_t = p_t - p_{t-1}$
- Produktionsdifferenserna Δp hos mål- och prediktorpark korreleras med varandra, grupperade efter θ och ℓ .

Produktionsdifferenserna från varje parkpar, tidssteg och tidsförskjutning studeras.



Modell

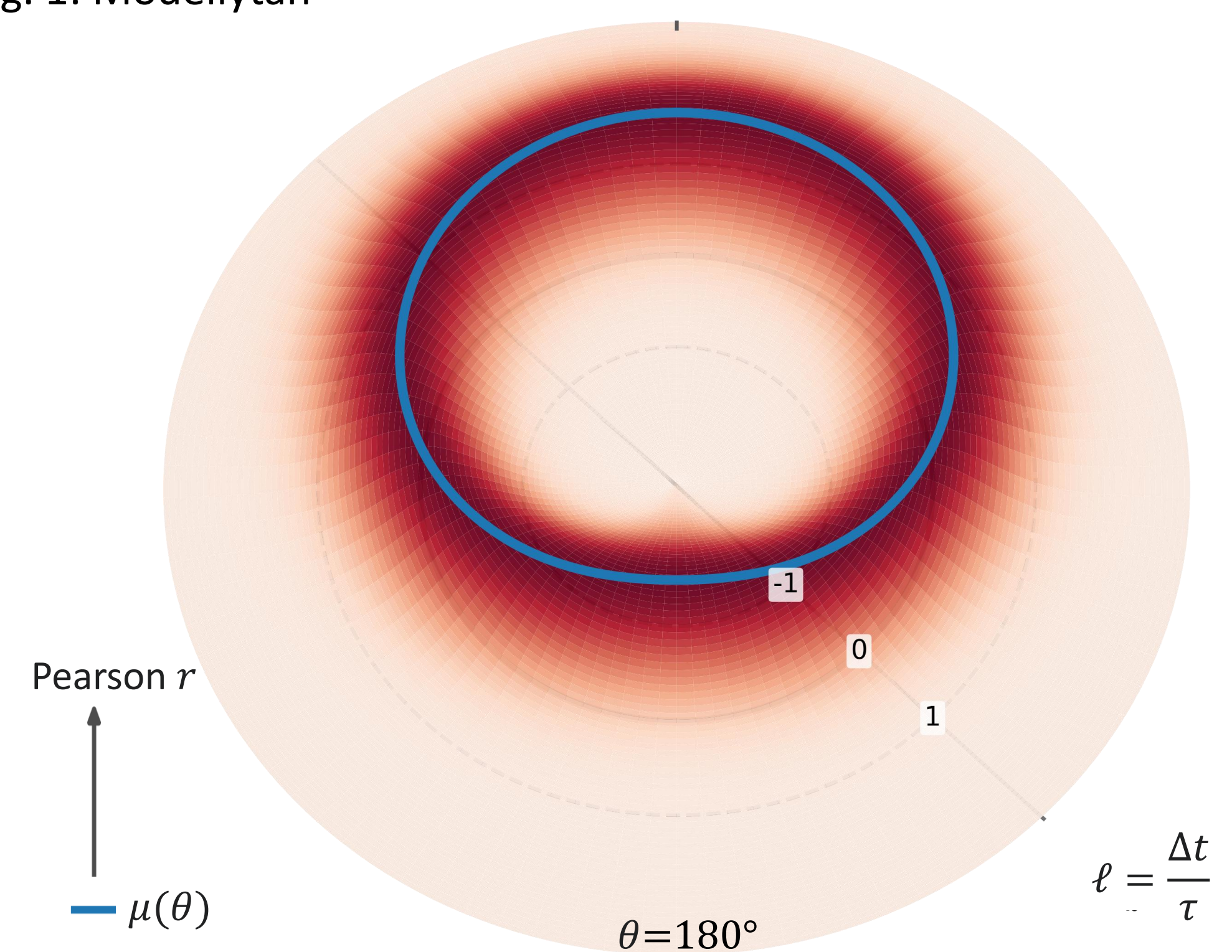
Modellen är mycket enkel och bygger på Taylors hypotes: Vinden på en viss höjd antas advektera mindre strukturer oförändrade nedströms. Med hjälp av vindstyrka och riktning, samt parkernas inbördes positioner, beräknas korrelationen utifrån förväntad advektionstid mellan prediktorpark och målpark.

Längs varje normaliserad vindriktning θ antas en gaussisk profil med sin topp vid normaliserad tidsförskjutning $\ell = \mu(\theta)$, och toppens läge antas variera som en cosinus med riktningen. Korrelationen r kan med denna modell beskrivas av Ekvation 1 och Figur 1.

$$r(\ell, \theta) = A \exp\left(-\frac{(\ell - \mu(\theta))^2}{2\sigma^2}\right) + C, \quad \mu(\theta) = b \cos(\theta - \varphi) \quad (\text{Ekv. 1})$$

A är den högsta korrelationen över bakgrundsnyvån C
 σ är den gaussiska profilens bredd
 b är amplituden av $\mu(\theta)$.
 φ är den riktning där förskjutningen är störst
 $\mu(\theta)$ beskriver hur den normaliserade tidsförskjutningen med högst korrelation varierar med normaliserad riktning

Fig. 1: Modelltytan



Resultat

Beräkningar för 2025 med vindparker inom 15 – 50 km och vindar tagna från 925 hPa visar att högst korrelationer återfinns vid positiva tidsförskjutningar då vinden blåser från prediktor- mot målpark. För parkpar tvärs vindriktningen är korrelationen högst för samtida värden. Strukturerna färdas snabbare än vinden på 925 hPa - den optimala tidsförskjutningen når aldrig 1 utan som mest $b = 0.59$. Korrelationsryggen är bred i förhållande till advektionstiden vilket kan tolkas som att strukturerna inte är frusna, utan utvecklas under transporten. Korrelationerna är låga, i genomsnitt 0.08. Resultat för vindar från andra nivåer visas i Figur 3.

Fig. 2: Resultat för Sverige 2025, 925 hPa

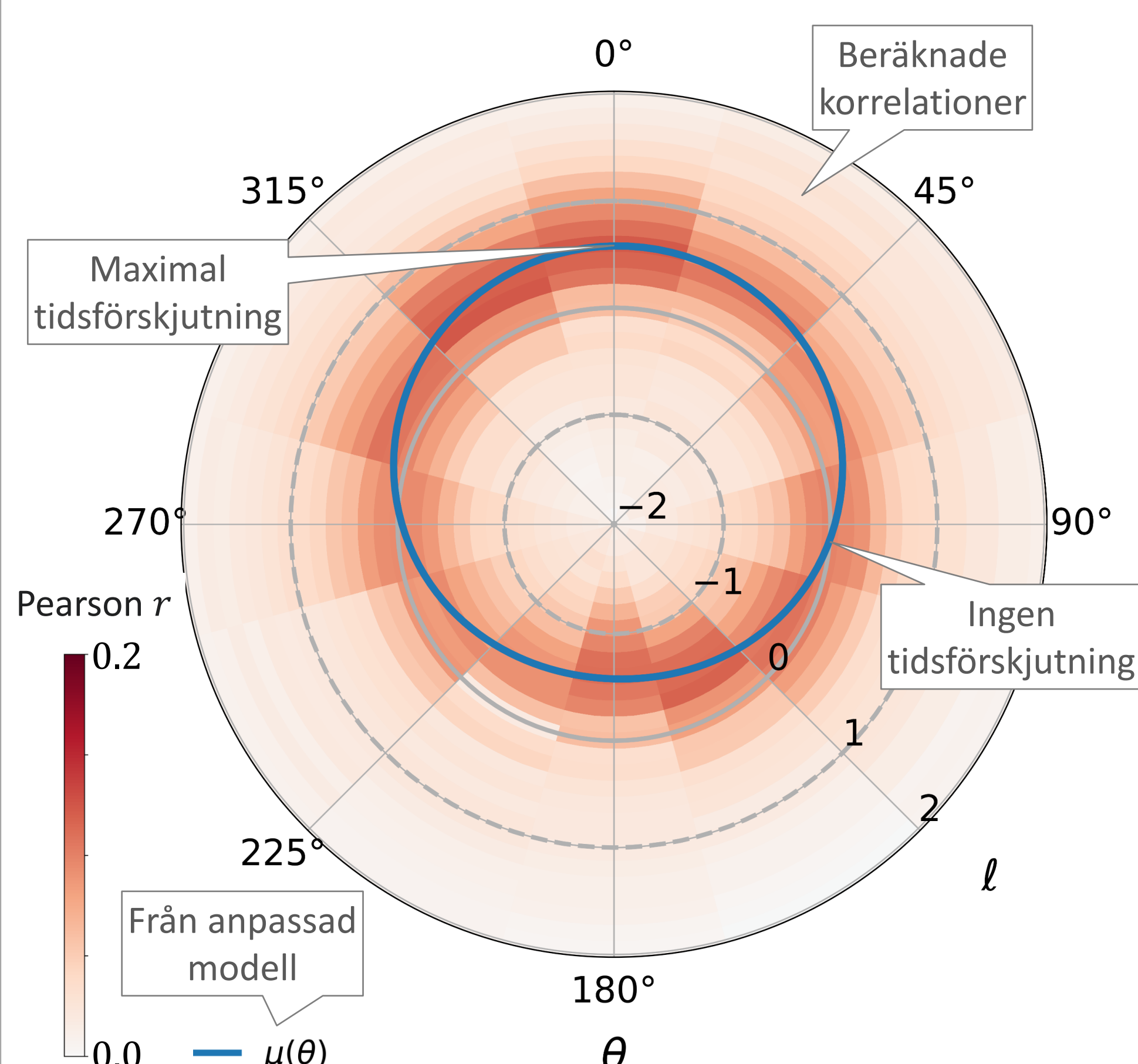
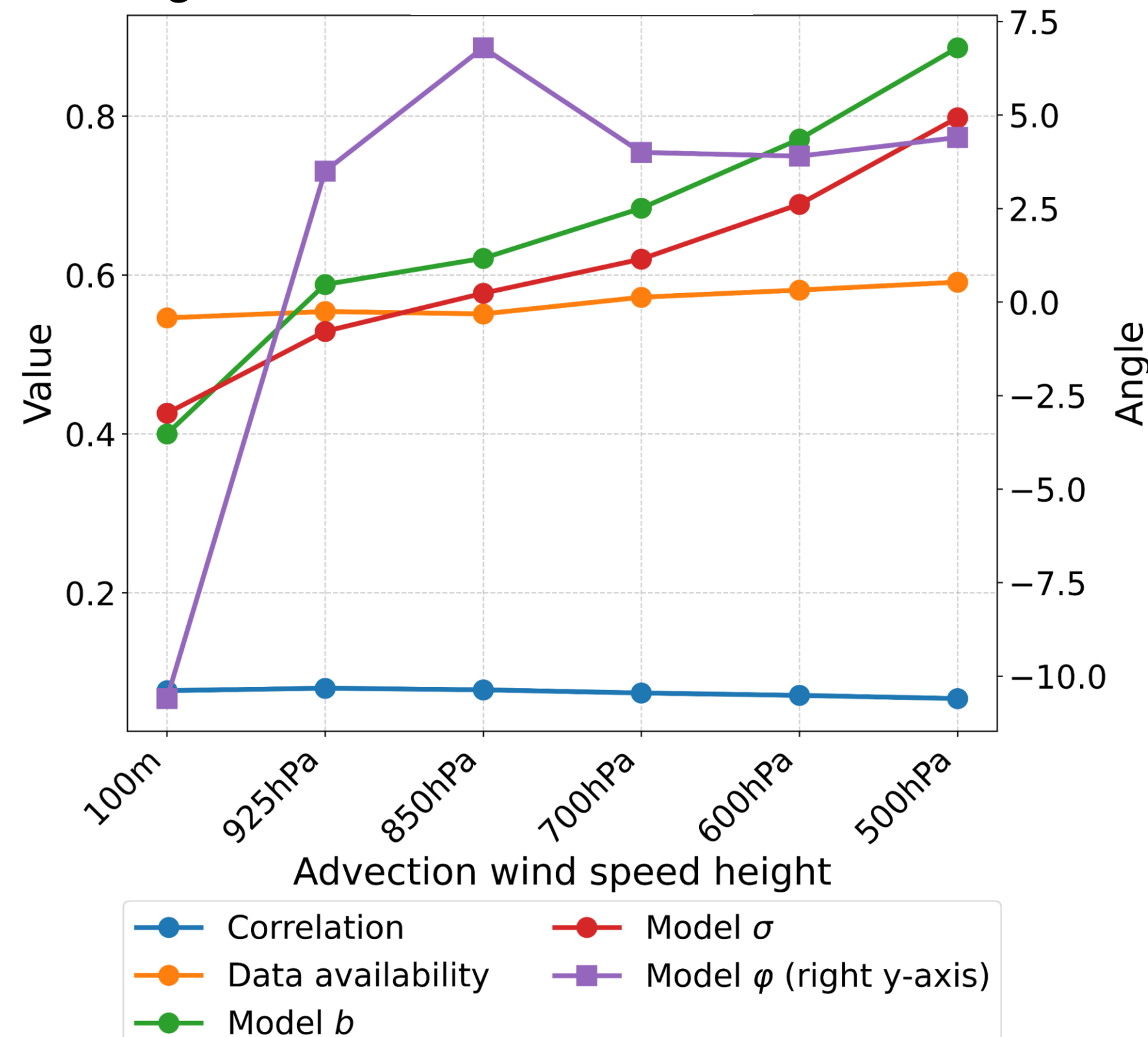


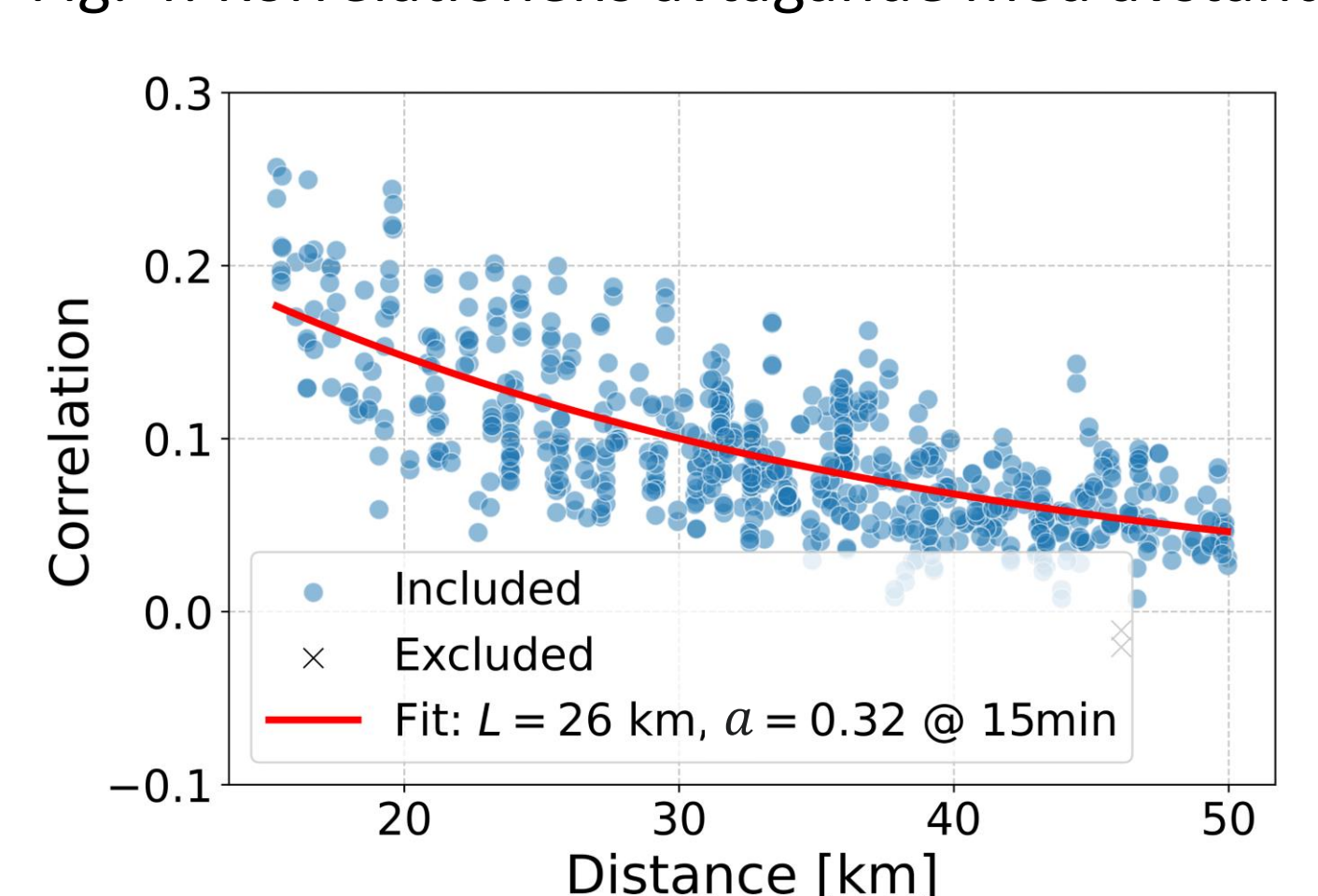
Fig. 3: Resultat för vindar från olika nivåer



Höjden som svarar mot advektionsriktning ligger mellan 100 m och 925 hPa, där φ byter tecken. Optimal tidsförskjutning b ökar med höjden men är < 1 för samtliga undersökta vindnivåer. Strukturerna färdas alltså snabbare än någon av de undersökta vindarna upp till 500 hPa.

Att enbart studera tidpunkter med en produktionsdifferens på minst 0,05 i absolutbelopp hos prediktorparken höjer korrelationen från 0,08 till 0,11, men resulterar i en fjärdedel av antalet datapunkter. Genom att också kräva en ihållande ramp under ett antal efterföljande tidpunkter kan korrelationer över 0,2 nås på ytterligare bekostnad av datatillgänglighet samt förlorad framförhållning.

Fig. 4: Korrelationens avtagande med avstånd



Korrelationen och den prediktiva kraften avtar med avståndet mellan parkerna som $a \cdot e^{-d/L}$ med $a = 0.32$ och längdskalan $L = 26 \text{ km}$ för en tidsupplösning på 15 minuter, se Figur 4. Experiment visar att b och σ är relativt stabila ($\pm 0,05$) för avstånd över 15 km men ökar för kortare avstånd.

Slutsats

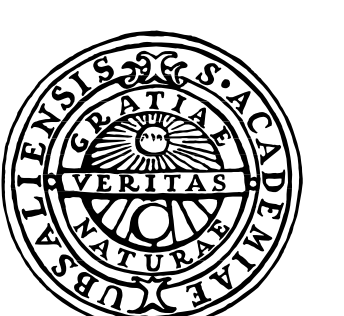
- **Förväntade trender syns** – strukturerna förflyttar sig i advektionens riktning, men med en högre hastighet.
- Signalen är svag men reell. En minskning av kvadratfelet med ca $r^2 \approx 0,6 \%$ kan förväntas per parkpar, jämfört med persistens ($\Delta p = 0$), och mer när flera uppströms parker kombineras.
- **Tidpunkter med ramper har högre korrelation** och sammanfaller med situationer som är svåra för balansering av elnätet.
- Korrelationen mellan parkerna **sjunker med avstånd** ($L = 26 \text{ km}$) samtidigt som framförhållningen ökar, vilket begränsar metoden till korta horisonter.

I samarbete med



Referenser

- ¹ Qu, K., Xue, S., Zheng, X., Yan, D. & Cao, H. Learning dynamic inter-farm dependencies for wind power forecasting via adaptive sparse graph attention network. Renew. Energy 258, 124969 (2026).
- ² Bentsen, L. Ø., Warakagoda, N. D., Stenbro, R. & Engelstad, P. Spatio-Temporal Wind Speed Forecasting using Graph Networks and Novel Transformer Architectures. arXiv (2022) doi:10.48550/arxiv.2208.13585.



UPPSALA
UNIVERSITET