

Spatiotemporal Evolution of Material Metabolism and Environmental Impact of Wind Power Systems

Abstract: Global wind capacity has increased significantly from 7.5 GW in 1997 to 744 GW in 2020, driven by a global consensus and commitments to transition to renewable energy and achieve carbon neutrality by 2050. This expansion highlights challenges related to waste management, resource circularity, and environmental issues arising from the expected wave of decommissioned wind farms in the coming decades, due to their waste volume, geographical variability, and the complexities in the collection and transportation of material waste.

This study uncovers the spatiotemporal evolution of material metabolism and the environmental impacts of wind power systems in both global and Brazilian contexts. By integrating Material Flow Analysis, Geographic Information Systems, and Spatial Data Analysis, it models the spatiotemporal evolution of material metabolism and environmental impacts of global wind power systems up to 2020 at both the wind farm and municipal levels. Focusing on Brazil, the study employs a GIS-based Multi-Criteria Decision-Making approach to conduct the first nationwide study for onshore wind farm site selection, assessing potential sites for installation. Moreover, the study anticipates, in a spatiotemporal framework, the material waste and environmental impacts from the wind power systems in Brazil up to 2050, based on the spatial allocation of annual wind capacity across the obtained site suitability map under three scenarios.

The findings from both the global overview and the focused Brazilian case study could provide local legislators, regulators, and developers with insights into when, where, and how much waste material will be generated from end-of-life wind power systems. These insights could further enhance end-of-life management practices and facilitate the development of circular economy strategies for waste materials from wind power systems.

Rumtidsudviklingen af materiale metabolisme og miljøpåvirkning af vindkraftsystemer

Resumé: Den globale vindkapacitet er steget markant fra 7,5 GW i 1997 til 744 GW i 2020, drevet af en global konsensus og forpligtelser til at overgå til vedvarende energi og opnå kulstofneutralitet inden 2050. Denne udvidelse fremhæver udfordringer relateret til affaldshåndtering, ressourcecirkularitet og miljømæssige problemer, der opstår fra den forventede bølge af nedlagte vindmølleparker i de kommende årtier, på grund af deres affaldsvolumen, geografiske variabilitet og kompleksiteter i indsamling og transport af materialeaffald.

Denne undersøgelse afdækker den rumtidsmæssige udvikling af materialestofskifte og de miljømæssige påvirkninger af vindkraftsystemer i både globale og brasilianske sammenhænge. Ved at integrere Materialestrømsanalyse, Geografiske Informationssystemer og Rumlig Dataanalyse modellerer den den rumtidsmæssige udvikling af materialestofskifte og miljøpåvirkninger af globale vindkraftsystemer op til 2020 på både vindmøllefarm- og kommunalt niveau. Med fokus på Brasilien anvender undersøgelsen en GIS-baseret beslutningstagningstilgang med flere kriterier for at gennemføre den første landsdækkende undersøgelse for udvælgelse af steder til vindmøllefarme på land, vurderer potentielle steder for installation. Desuden forudser undersøgelsen, i en rumtidsmæssig ramme, materialeafaldet og de miljømæssige påvirkninger fra vindkraftsystemerne i Brasilien op til 2050, baseret på den rumlige tildeling af årlig vindkapacitet på det opnåede egnedetskort under tre scenarier.

Resultaterne fra både det globale overblik og det fokuserede brasilianske casestudie kunne give lokale lovgivere, regulatorer og udviklere indsigt i, hvornår, hvor og hvor meget affaldsmateriale der vil blive genereret fra vindkraftsystemer ved deres levetids ende. Disse indsigter kunne yderligere forbedre praksis for håndtering af livets ende og facilitere udviklingen af cirkulære økonomistrategier for affaldsmaterialer fra vindkraftsystemer.