

Urban wind, kleine windmolens voor op gebouwen

Conclusie:

Wind- en zonne-energie vullen elkaar deels aan. In december en januari, wanneer de zonopbrengst laag is, waait het relatief vaak. De opbrengst van een windmolen neemt lineair toe met het frontale oppervlak en exponentieel (derde macht) met de windsnelheid. Over het algemeen zijn kleine windmolens relatief duur, terwijl de gemiddelde windsnelheid in Arnhem (<5 m/s) laag is. Op daken is de windsnelheid bovendien nog lager door verstoringen van omliggende gebouwen. We hebben de LCOE (Levelized Cost of Energy) berekend voor drie kleine windmolens, waarbij we een realistische schatting maakten van de jaarlijkse stroomopbrengst op daken in de stad op 10m hoogte. Onder die aannames varieerden de kosten van €3.7 tot ruim €11 per kWh. Of zoals een hoogleraar van de TU Delft het verwoordde: *“Als je in de stad woont en in windenergie wilt investeren, investeer mee in een grote windmolen buiten de stad.”*

Wat is het

Er zijn verschillende soorten kleine windmolens die geschikt zijn voor stedelijke gebieden:

- Horizontale-as turbines
- Verticale-as turbines

Een belangrijk voordeel van verticale-as turbines is dat de as altijd gunstig staat ten opzichte van de windrichting, terwijl horizontale-as turbines actief in de wind gedraaid moeten worden. Daarnaast hebben verticale-as turbines een lager zwaartepunt, wat gunstig is voor de stabiliteit. In stedelijke omgevingen fluctueert de windrichting vaak sterk, waardoor deze turbines beter kunnen presteren. Sommige windturbines hebben een vaste schaal en werken op basis van aerodynamische wrijving. Andere maken gebruik van het vleugeffect, waarbij het drukverschil tussen beide zijden van het blad zorgt voor de roterende beweging. Dit laatste principe maakt hogere toerentallen mogelijk, maar resulteert doorgaans in een lager koppel. In het algemeen geldt dat grotere windturbines een aanzienlijk voordeel hebben. Hoe groter en hoger het rotoroppervlak, hoe beter de energieopbrengst.

Wat kan het

De opbrengst van een windturbine is recht evenredig met het oppervlak dat de molen bestrijkt, en met de derde macht van de windsnelheid en het aantal uren dat de wind waait. In Arnhem is de wind relatief zwak, gemiddeld 5m/s op 100m hoogte. Op de Waddeneilanden is dit ruim 30% hoger wat resulteert 2.5 keer meer energie en dus 2.5 keer hogere opbrengst voor hetzelfde apparaat/dezelfde investering.

De wind is erg gevoelig voor verstoringen, vandaar dat windmolens op land altijd op erg hoge masten staan om zo min mogelijk last te hebben door verstoringen door bomen, gebouwen of andere obstakels.

Stand van de techniek

TRL 9

Er zijn erg veel aanbieders van kleine windturbines. De kleine horizontale-as turbines lijken zich te richten op maritieme toepassingen zoals zeilboten. Voor verticale windturbines valt op dat het een komen en gaan is van bedrijfjes die een toepassing ontwikkelen, een paar jaar actief zijn en dan weer verdwijnen. Dit is veelzeggend over de technische en commerciële haalbaarheid van deze technologie.

Nadere details - berekeningen

Cijfers uit projecten

Gem windsnelheid, stad 10m	2.3m/s
Betz limiet opbrengst	4.4Watt/m ² 39kWh/m ² /jaar
Opbrengst Archimedes 1.5m	46 kWh/jaar
Opbrengst Aeolos 3kW 8.6m ²	226 kWh/jaar
Opbrengst Eclectic D400 1.1m	110 kWh/jaar
LCOE Archimedes 1.5m	€7.97/kWh
LCOE Aeolos 3kW 8.6m ²	€3.70/kWh
LCOE Eclectic D400	€11.37/kWh

Toepassing voor Arnhem

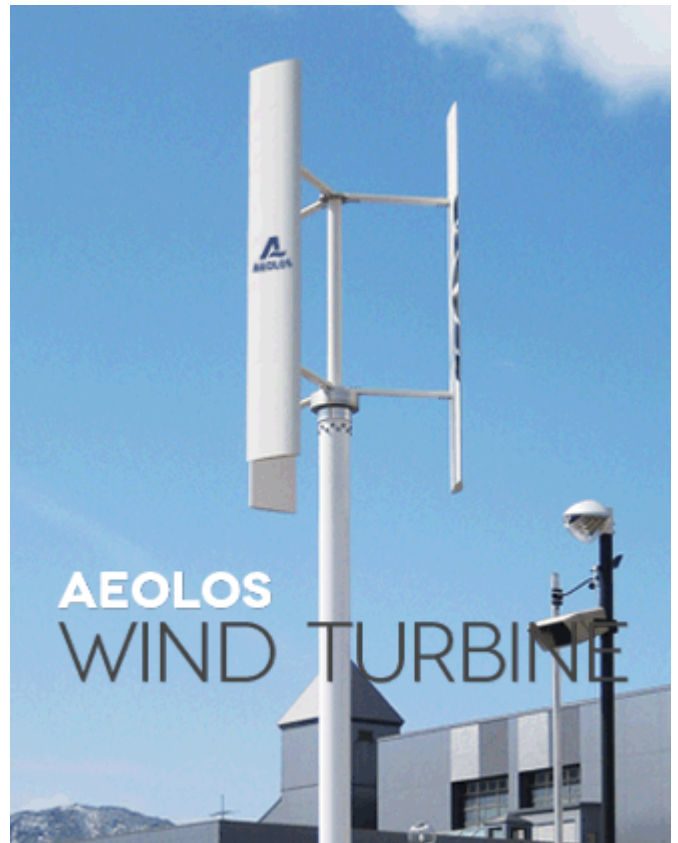
Locaties: Er zijn een paar hoge gebouwen met name in Arnhem Zuid (verst weg van de windverstorende hooggelegen delen van Arnhem) waar windmolens op het dak geplaatst zouden kunnen worden. De opgewekte stroom zal relatief duur zijn, en de installatie dient ook meer als educatief of illustratief voorbeeld gezien te worden

Dimensionering: Het aantal en grootte van de windmolens zal sterk afhangen van mate waarin de gebouwen de veroorzaakte trillingen kunnen opvangen.

- Windkaart NL:
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2018/12/Windsnelheid%20per%20gemeente%20SDE%20dece%20mber%202018.pdf>



Eclectic



Aeolos



Airturb



Archimedes

Wind energy:

In Arnhem, is de gemiddelde windsnelheid volgens RVO, gemeten op 100m hoogte < 6.75m/s, de laagste categorie.

<https://www.rvo.nl/files/file/2022-04/Windkaart-windsnelheid-per-gemeente-SDE-plus-plus-2022.pdf>

Een andere bron, https://nl.windfinder.com/windstatistics/arnhem_presikhaaf en grafiek, het gemiddelde over het jaar in Presikhaaf ligt ruim onder de 4kts (1kts komt overeen met 1.852km/u, en dus .514m/s).dus onder de 2m/s, dit komt overeen met het kaartje waar te zien is dat Arnhem (geel) zelfs in januari gemiddeld minder dan 3.5m/s windsterkte heeft.

De windsnelheid op dakhoogte is lager door de verstoringen van andere gebouwen, bomen en andere obstakels.

Hieronder de opzet van de berekening, voor het gemak uitgaande van 10m/s op 100m hoogte.

De berekening laat zien dat de beschikbare windenergie op 10m hoogte nog maar 25% is van die op 100m hoogte.

The reduction in effective wind energy at roof height compared to 100 meters higher depends on the **wind speed profile** and the **power law** for wind speed variation with height.

Wind Speed Profile:

Wind speed increases with height due to reduced ground friction. This relationship is commonly approximated by the **power law**:

$$V(h) = V_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

where:

- $V(h)$ = wind speed at height h ,
- V_{ref} = wind speed at reference height h_{ref} (e.g., 100 m),
- α = wind shear exponent (depends on surface roughness, typically 0.1 - 0.3 for urban areas).

For a **city environment**, α is around 0.25. If the reference wind speed at 100 m is 10 m/s, then at a roof height of 10 m:

$$V(10) = 10 \times \left(\frac{10}{100} \right)^{0.25} \approx 6.3 \text{ m/s}$$

Impact on Energy Production:

Wind power is proportional to the **cube of wind speed**:

$$P \propto V^3$$

Thus, the ratio of power at 10 m compared to 100 m is:

$$\left(\frac{6.3}{10} \right)^3 = 0.25$$

Conclusion:

At 10 m height (roof level) compared to 100 m, the available wind power is reduced by about 75%, meaning you only get 25% of the **energy output** that a turbine at 100 m would generate.

The **wind shear exponent** (α) varies depending on terrain roughness. The value of 0.25 is a typical estimate for urban environments based on empirical studies.

Typical Values of Wind Shear Exponent (α)

Terrain Type	Wind Shear Exponent (α)
Open water / Smooth ice	0.10
Grassland / Cropland	0.15
Suburban Areas	0.20
Urban Areas (high buildings)	0.25 - 0.30

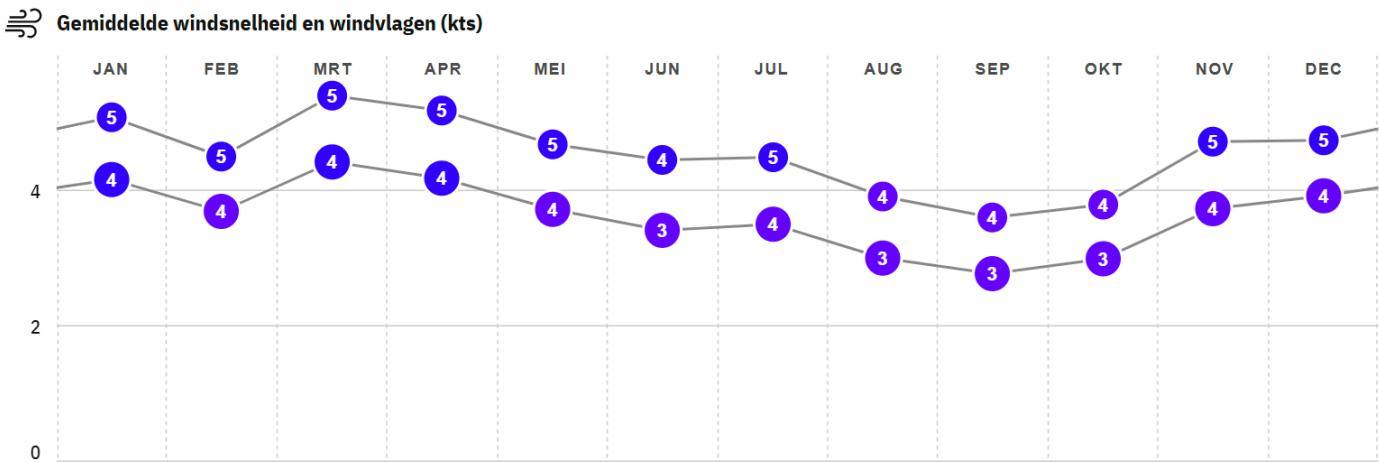
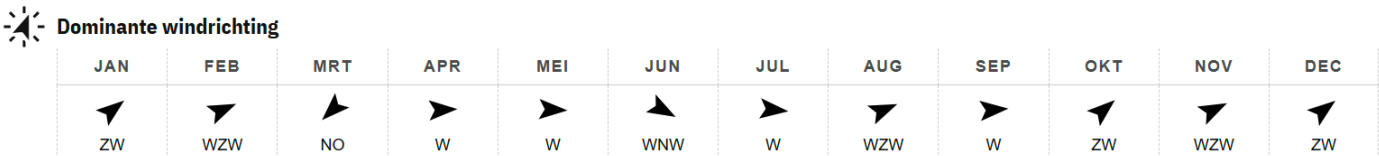
Sources for Wind Shear Exponent:

- **Engineering textbooks on wind energy** (e.g., "Wind Energy Explained" by Manwell, McGowan & Rogers)
- **The IEC 61400-1 Standard** for wind turbine design
- **Research papers on urban wind flow**, which analyze wind profiles over cities

The value 0.25 is a commonly used approximation for dense urban areas, where buildings and other obstacles create significant surface roughness.

Would you like a calculation with a different α value, or do you need references for a specific application? 😊

Maandelijkse windsnelheidsstatistieken en windrichtingen voor Arnhem / Presikhaaf



Langjarig gemiddelde 1981-2010

Gemiddelde maandelijkse windsnelheid januari

