

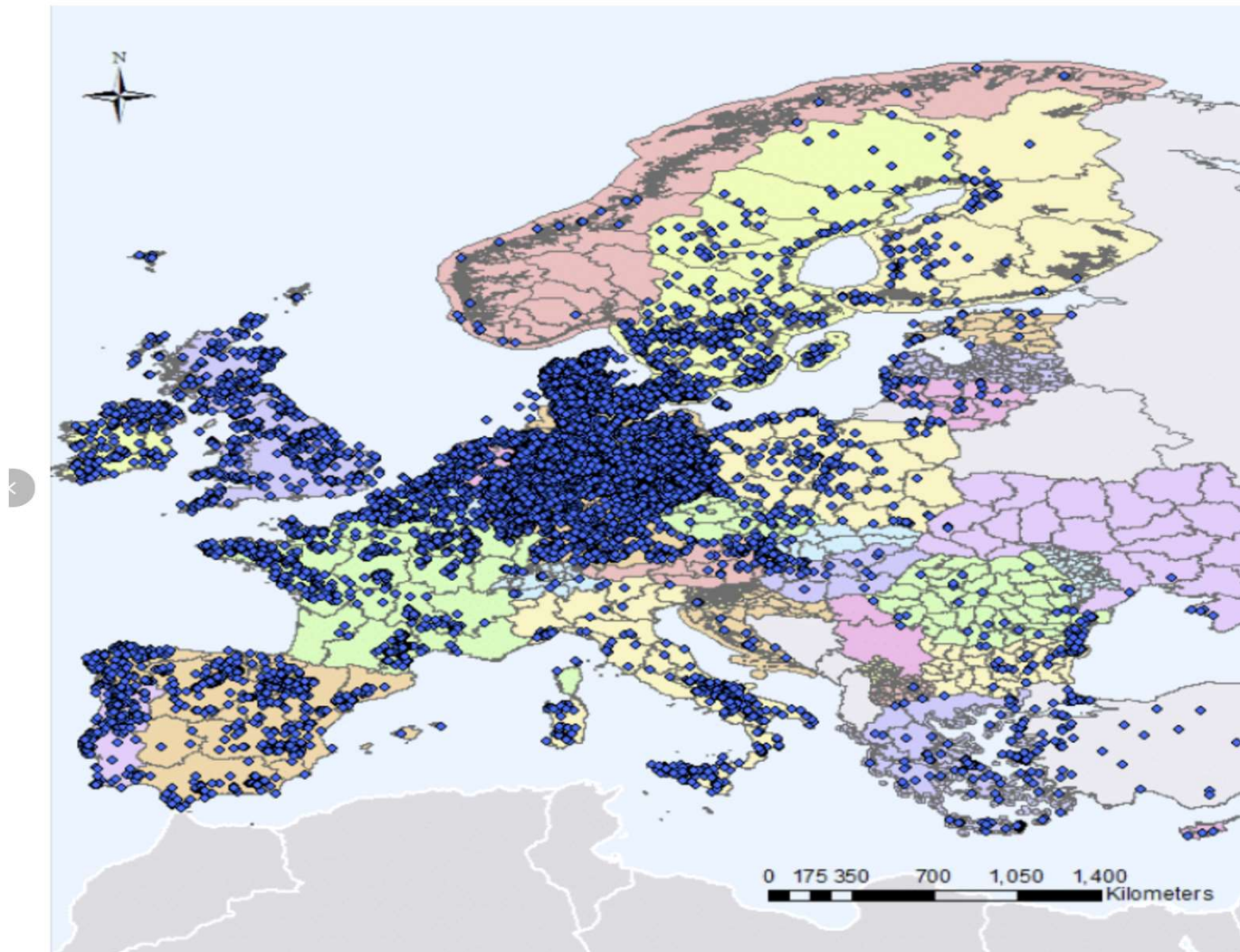
Hat Windenergie einen Effekt auf unseren Wasserhaushalt?



JA!

Aber kann man diesen quantifizieren?

Energiegewinnung durch Windkraft



Energiegewinnung durch Windkraft

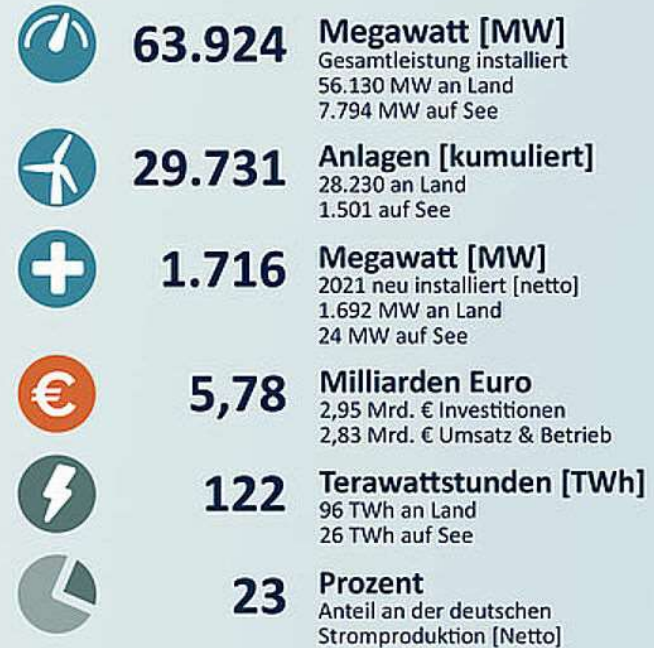
| Windkraft Weltweit | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|---------------|-------------|-----------------|
| Land | Installierte Leistung GW | Landesfläche km ² | KW / km ² | Einwohner | W/Einwohner | Niederschlag mm |
| Deutschland | 63 | 357.114 | 176 | 83.369.843 | 754 | 700 |
| Niederlande | 7 | 41.850 | 162 | 17.564.014 | 386 | 778 |
| Dänemark | 6 | 43.094 | 143 | 5.888.261 | 1050 | 703 |
| UK | 24 | 242.495 | 99 | 67.508.936 | 355 | 1220 |
| Spanien | 27 | 505.992 | 54 | 47.558.630 | 573 | 636 |
| Italien | 11 | 301.339 | 36 | 59.037.474 | 184 | 832 |
| Frankreich | 18 | 542.940 | 33 | 64.626.628 | 278 | 847 |
| Griechenland | 4 | 131.975 | 31 | 10.720.000 | 387 | 652 |
| China | 288 | 9.596.961 | 30 | 1.425.887.337 | 202 | 645 |
| Schweden | 10 | 450.295 | 22 | 10.549.347 | 930 | 624 |
| Polen | 7 | 312.696 | 21 | 39.857.145 | 166 | 600 |
| USA | 122 | 9.833.517 | 12 | 338.289.857 | 362 | 715 |
| Türkei | 9 | 783.562 | 12 | 85.341.241 | 109 | 593 |
| Indien | 39 | 3.287.263 | 12 | 1.417.173.173 | 27 | 1083 |
| Mexiko | 7 | 1.964.375 | 3 | 127.504.125 | 53 | 758 |
| Brasilien | 18 | 8.515.767 | 2 | 215.313.498 | 82 | 1716 |

Energiegewinnung durch Windkraft

INSTALLIERTE LEISTUNG



ZAHLEN & FAKTEN



Durchschnittliche Anlage 2021
Leistung 3.978 kW
Gesamthöhe 206 m
Rotordurchmesser 133 m

Terawattstunde TWh
= 1.000 GWh
= 1 Mio. MWh
= 1 Mrd. kWh

Windkraft Bundesländer

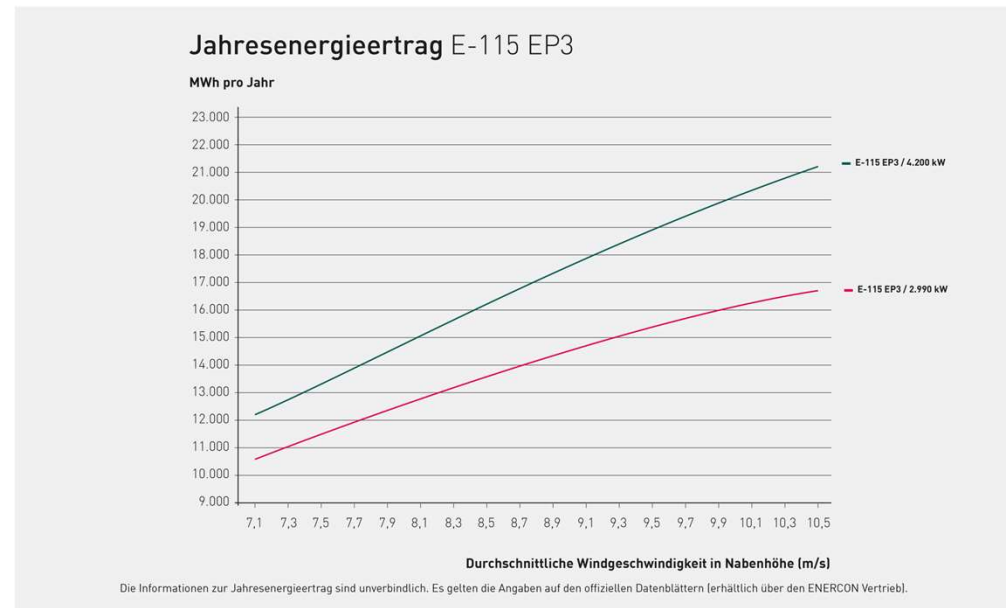
| Land | Installierte Leistung MW | Landesfläche km ² | KW / km ² | Einwohner | W/Einwoher | Niederschlag 20y av. |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|------------|------------|----------------------|
| Bremen | 201 | 419 | 480 | 680.130 | 296 | 736 |
| Schleswig Holstein | 7.015 | 15.800 | 444 | 2.922.005 | 2401 | 812 |
| Nordrhein-Westfalen | 6.388 | 23.295 | 274 | 17.924.591 | 356 | 851 |
| Brandenburg | 7.864 | 29.654 | 265 | 2.537.868 | 3099 | 584 |
| Sachsen-Anhalt | 5.318 | 20.456 | 260 | 2.169.253 | 2452 | 587 |
| Niedersachsen | 11.687 | 47.709 | 245 | 8.027.031 | 1456 | 753 |
| Saarland | 531 | 2.571 | 207 | 982.348 | 541 | 893 |
| Rheinland-Pfalz | 3.814 | 19.858 | 192 | 4.106.485 | 929 | 764 |
| Hamburg | 119 | 755 | 158 | 1.853.935 | 64 | 773 |
| Mecklenburg-VP | 3.567 | 23.295 | 153 | 1.611.160 | 2214 | 622 |
| Hessen | 2.304 | 21.115 | 109 | 6.295.017 | 366 | 710 |
| Thüringen | 1.739 | 16.202 | 107 | 2.108.863 | 825 | 715 |
| Sachsen | 1.263 | 18.449 | 68 | 4.043.002 | 312 | 780 |
| Baden-Württemberg | 1.730 | 35.747 | 48 | 11.124.642 | 156 | 939 |
| Bayern | 2.567 | 70.541 | 36 | 13.176.989 | 195 | 928 |
| Berlin | 23 | 891 | 26 | 3.677.472 | 6 | 586 |

Energiegewinnung durch Windkraft

Enercon E-115 EP3



| | |
|--------------------|----------------------------------|
| Nennleistung | 2.990 / 4.200 kW |
| Rotordurchmesser | 115,7 m (10.500 m ²) |
| Nabenhöhe in Meter | 67 / 92 / 122 / 135 / 149 |



Bei Nennleistung würden
26.192 MWh, bzw. 36.792 MWh produziert.
Entspricht etwa 8 m/s
bzw. knapp 30 km/h
(Nennleistung x Zeit = Energie)

Typische Ausbeute Windkraft ca. 21%

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit

Niedersachsen: 4,5 m/s

Ausbeute für Enercon Anlage ca. 5500 MWh

Betz'sche Gesetz

(Maximale Leistung einer Windkraftanlage)

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \cdot \frac{16}{27}$$

ρ = Luftdichte, r = Rotordurchmesser,

v = Luftgeschwindigkeit

Ertrag steigt mit der Geschwindigkeit hoch 3 an, d.h. die doppelte Geschwindigkeit sorgt für den 8-fachen Ertrag

BY vs. SH 5:1

BY vs. NS 4:1

BY vs. BE 2:1

Funktionsweise Windkraft

Kinetische Energie des Windes wird in elektrische Energie gewandelt

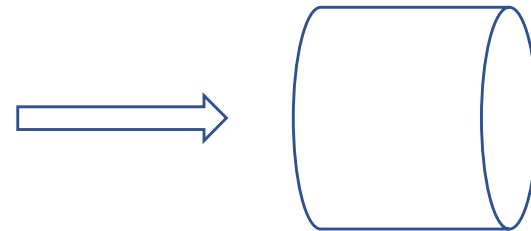
Betz'sche Gesetz

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \cdot \frac{16}{27}$$

$$\text{Kinetische Energie : } \frac{1}{2} mv^2$$

$$P = \frac{1}{2} mv^2 \cdot \frac{16}{27}$$

$$P = KE \cdot \frac{16}{27}$$



$$m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v \text{ (pro Sekunde)}$$

Energieerhaltungssatz

$$KE - P = KE' \qquad KE - \frac{16}{27} KE = KE'$$

$$\frac{11}{27} KE = KE'$$

$$\frac{11}{27} \cdot \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mv'^2$$

$$\frac{11}{27} \cdot v^2 = v'^2$$

$$\sqrt{\frac{11}{27}} \cdot v = v'$$

$$0,64 \cdot v = v'$$

$$\frac{v'}{v} = 0,64$$

**Ein Windrad reduziert die
Windgeschwindigkeit um
36%**

Typischer Winddurchfluss Enercon E-115 Pro Sekunde!

Rotorfläche: 10.500 m² ($\pi \cdot r^2$)

Leistung ca. 1,9 MW (Betz)

Vor der Anlage

Windgeschwindigkeit: 8 m/s

Windvolumen pro Sekunde: 84.000 m³ (Masse: 101 Tonnen)
($\pi \cdot r^2 \cdot v$)

Hinter der Anlage

Windgeschwindigkeit: 5,1 m/s

Windvolumen pro Sekunde: 53.760 m³ (Masse: 64 Tonnen)

Luftfeuchte

Wassergehalt pro kg Luft

| Temperatur | relative Luftfeuchte | | | | | |
|------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% |
| 20° C | 17,3 g | 15,6 g | 13,8 g | 12,1 g | 10,4 g | 8,7 g |
| 18° C | 15,4 g | 13,8 g | 12,3 g | 10,8 g | 9,2 g | 7,7 g |
| 16° C | 13,6 g | 12,3 g | 10,9 g | 9,5 g | 8,2 g | 6,8 g |
| 14° C | 12,1 g | 10,9 g | 9,7 g | 8,5 g | 7,2 g | 6,0 g |
| 12° C | 10,7 g | 9,6 g | 8,5 g | 7,5 g | 6,4 g | 5,3 g |
| 10° C | 9,4 g | 8,5 g | 7,5 g | 6,6 g | 5,6 g | 4,7 g |
| 8° C | 8,3 g | 7,5 g | 6,2 g | 5,8 g | 5,0 g | 4,1 g |
| 6° C | 7,3 g | 6,5 g | 5,8 g | 5,1 g | 4,4 g | 3,6 g |
| 4° C | 6,4 g | 5,7 g | 5,1 g | 4,5 g | 3,8 g | 3,2 g |
| 2° C | 5,6 g | 5,0 g | 4,5 g | 3,9 g | 3,3 g | 2,8 g |
| 0° C | 4,9 g | 4,4 g | 3,9 g | 3,4 g | 2,9 g | 2,4 g |
| -2° C | 4,1 g | 3,7 g | 3,3 g | 2,9 g | 2,5 g | 2,1 g |
| -4° C | 3,5 g | 3,2 g | 2,8 g | 2,5 g | 2,1 g | 1,8 g |
| -6° C | 3,0 g | 2,7 g | 2,4 g | 2,1 g | 1,8 g | 1,5 g |
| -8° C | 2,5 g | 2,3 g | 2,0 g | 1,8 g | 1,5 g | 1,3 g |
| -10° C | 2,1 g | 1,9 g | 1,7 g | 1,5 g | 1,3 g | 1,1 g |
| -14° C | 1,5 g | 1,4 g | 1,2 g | 1,1 g | 0,9 g | 0,8 g |
| -18° C | 1,1 g | 1,0 g | 0,9 g | 0,8 g | 0,6 g | 0,5 g |

Auswirkung auf Feuchtetransport

Typischer Wasserdurchfluss Enercon E-115 Pro Sekunde!

Temperatur 9 °C, Luftfeuchte 50%
Wassergehalt pro kg Luft ca. 4,5 g

Vor der Anlage

Windmasse pro Sekunde: 101 Tonnen - 454 Liter Wasser

Hinter der Anlage

Windmasse pro Sekunde: 64 Tonnen - 290 Liter Wasser

Differenz pro Sekunde: 164 Liter Wasser
86 Liter/MW
309.600 Liter/MWh = 310 Tonnen

Enercon E-115

pro Jahr

Nennleistung: 3 MW

Theoretische Energie pro Jahr:

$$3 \text{ MW} \cdot 24\text{h} \cdot 365\text{t} = 26.280 \text{ MWh}$$

Typische Ausbeute: 21%

5.519 MWh

Wassermassedifferenz = 1.710.000 Tonnen

Deutschland

Installierte Leistung: 65 GW

Rotorfläche 250 km²

200 m x 1250 km

ca. 4 km²
Rotorfläche
pro GW
Leistung

Theoretische Energie pro Jahr:

$65 \text{ GW} \cdot 24\text{h} \cdot 365\text{t} = 569.400 \text{ GWh}$

Typische Ausbeute: 21%

120.000 GWh (2021 – 121.000 GWh)

Wassermassedifferenz = 37 Mrd. Tonnen (m³)

37 km³

Pro GW Installierte Leistung: 0,57 km³

Vergleichswerte

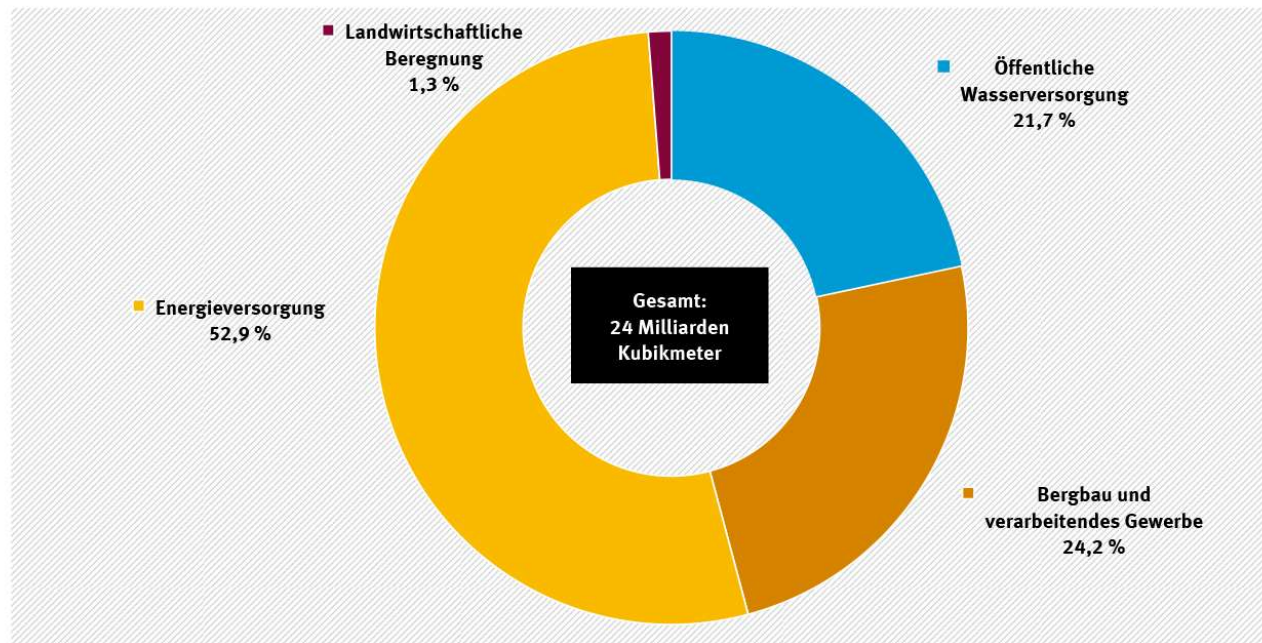
Wassermassedifferenz durch WK > 37 km³

Volumen Bodensee: 50 km³

Jährlicher Niederschlag: ca. 275 km³

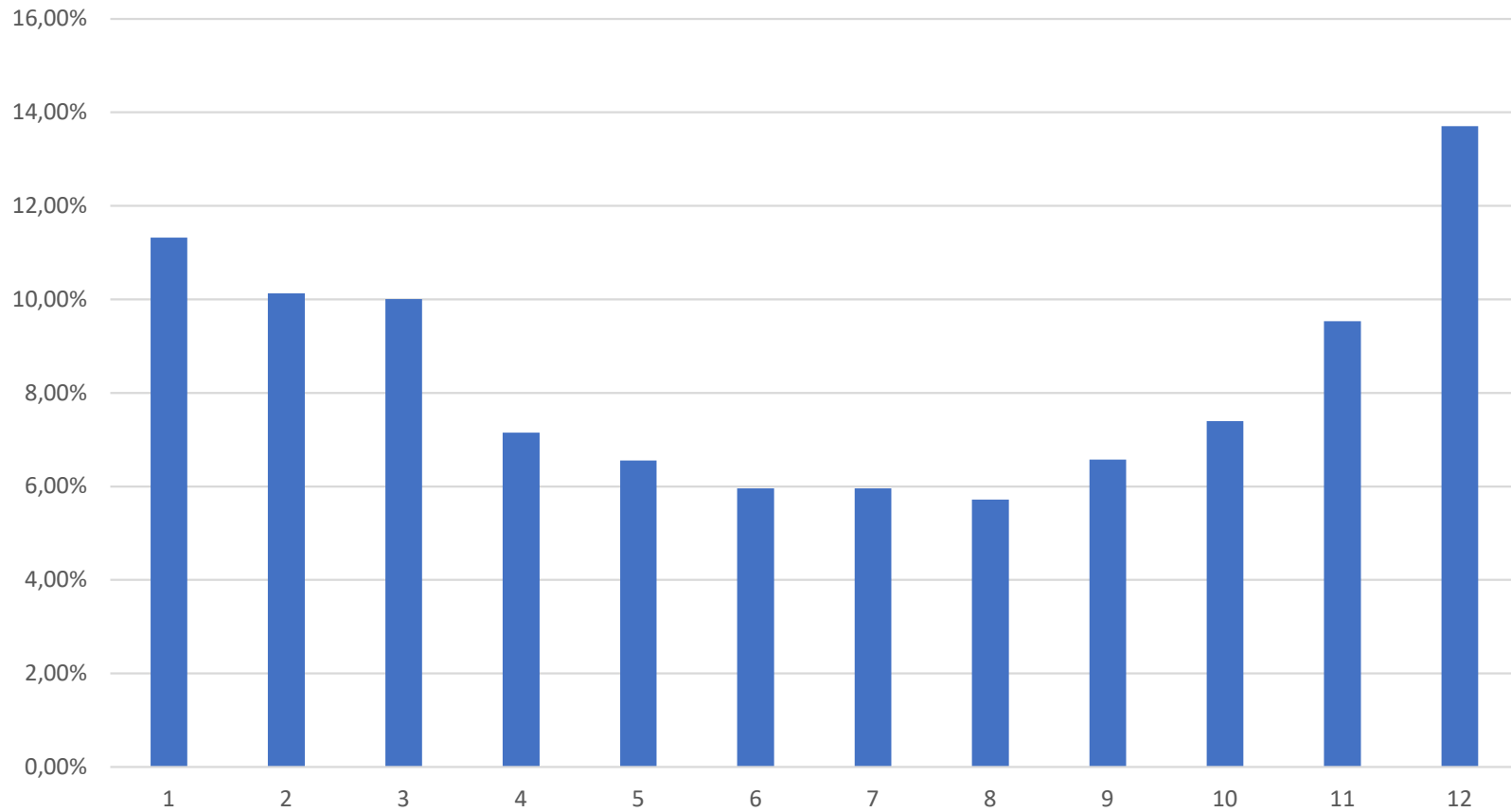
Durchfluss Rhein: 2300 m³/s = 73 km³/Jahr

Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, Bergbau und verarbeitendes Gewerbe, der Energieversorgung und der Landwirtschaft 2016

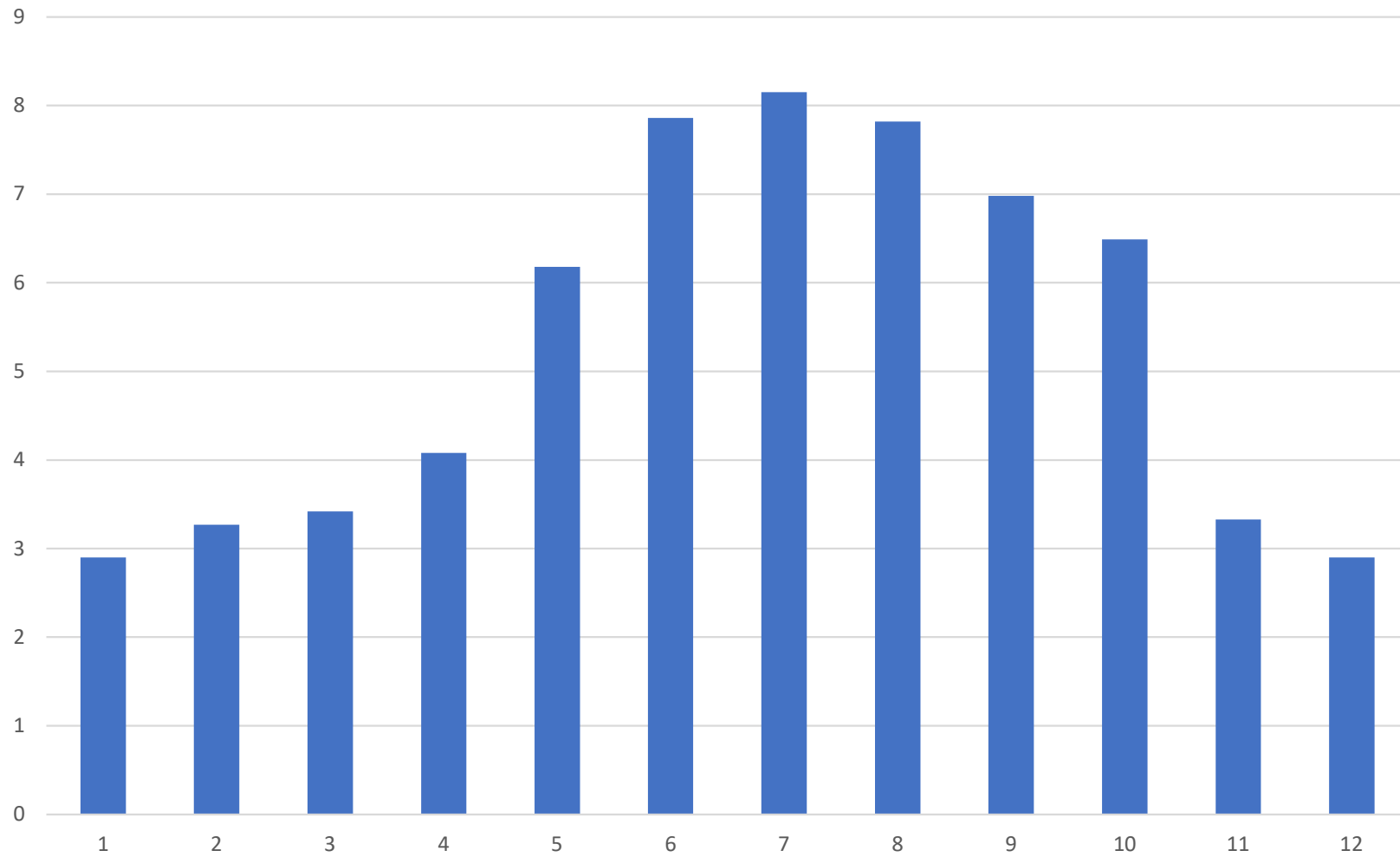


Quelle: Statistisches Bundesamt, Fachserie 19, R. 2.1.1 und 2.2, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge

Ausbeute Windkraft per Monat typisches Jahr

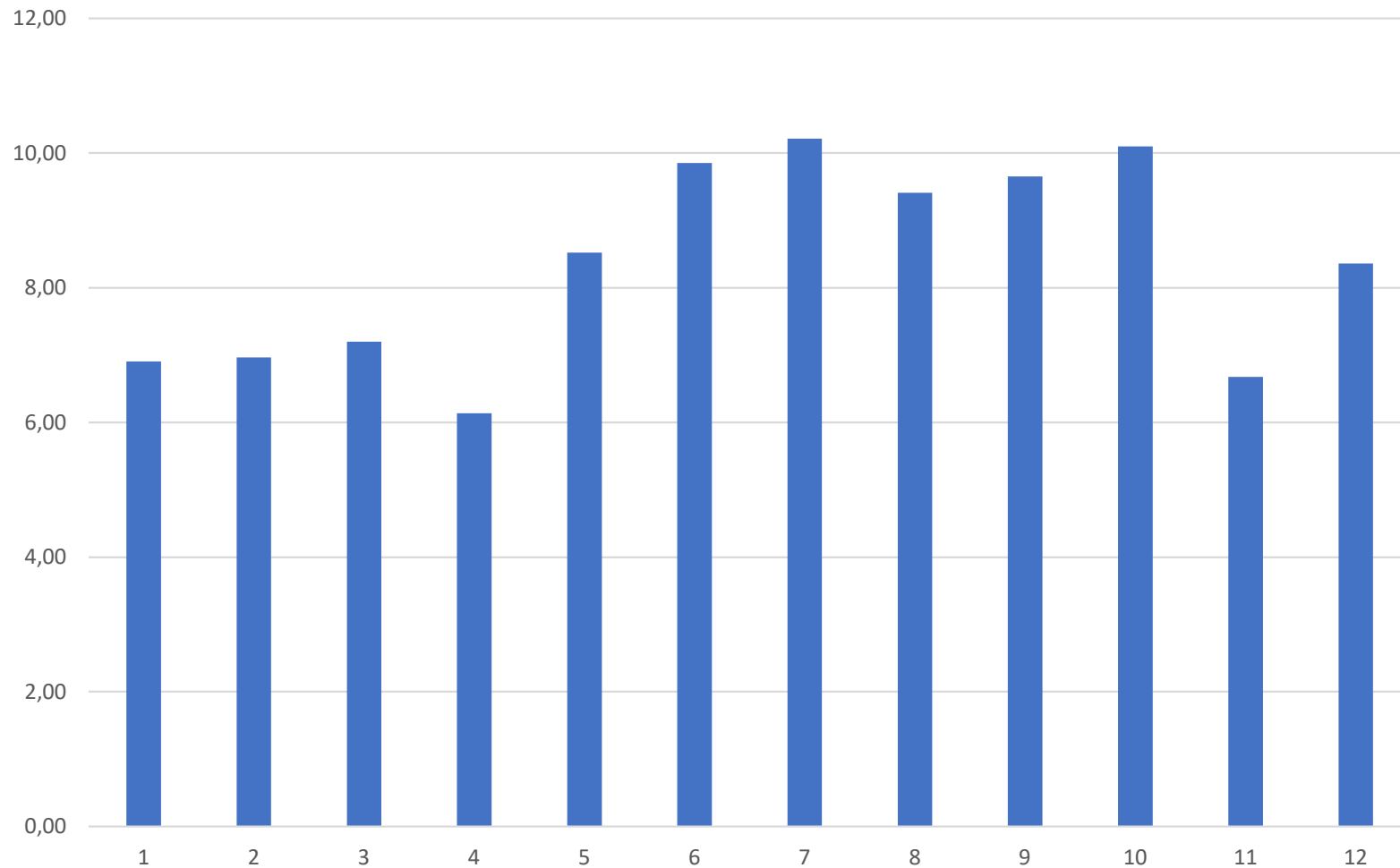


Wassergehalt g/kg



Auswirkung auf Feuchtetransport

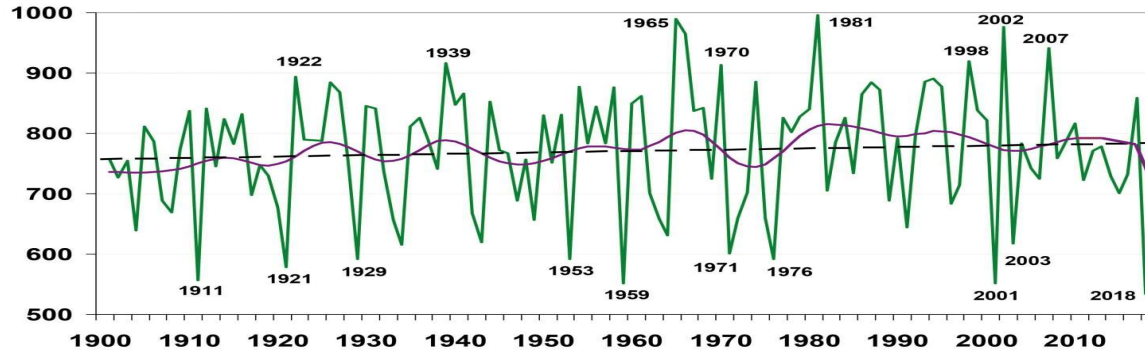
Produkt Luftfeuchte und Windertrag



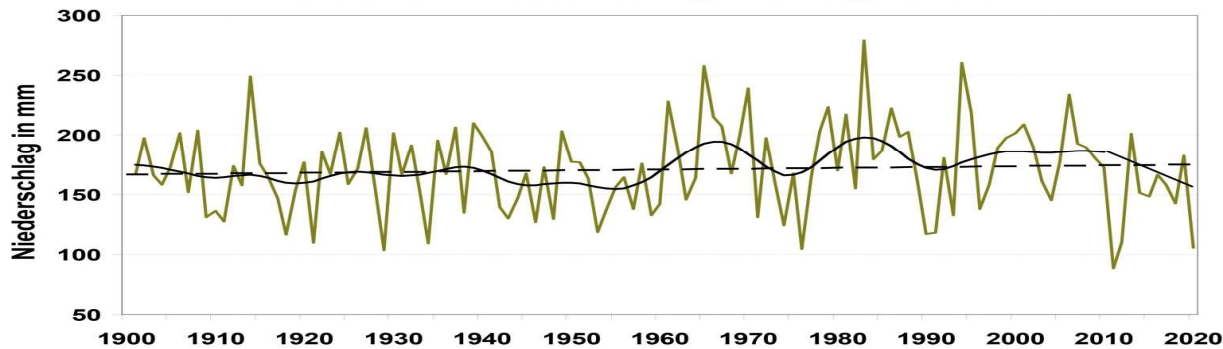
Niederschlag

Abb. 1-3

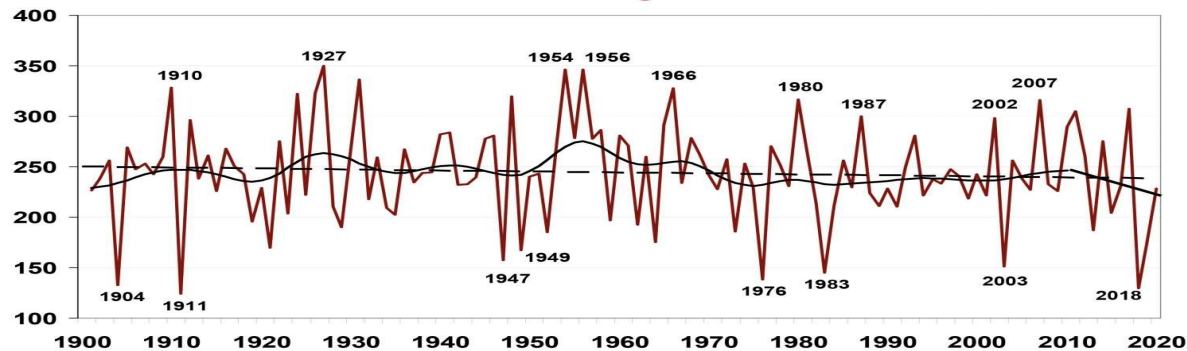
Deutschland - Niederschlag, Jahr, 1901 - 2019



Deutschland - Niederschlag, Frühling, 1901 - 2020



Deutschland - Niederschlag, Sommer, 1901 - 2020

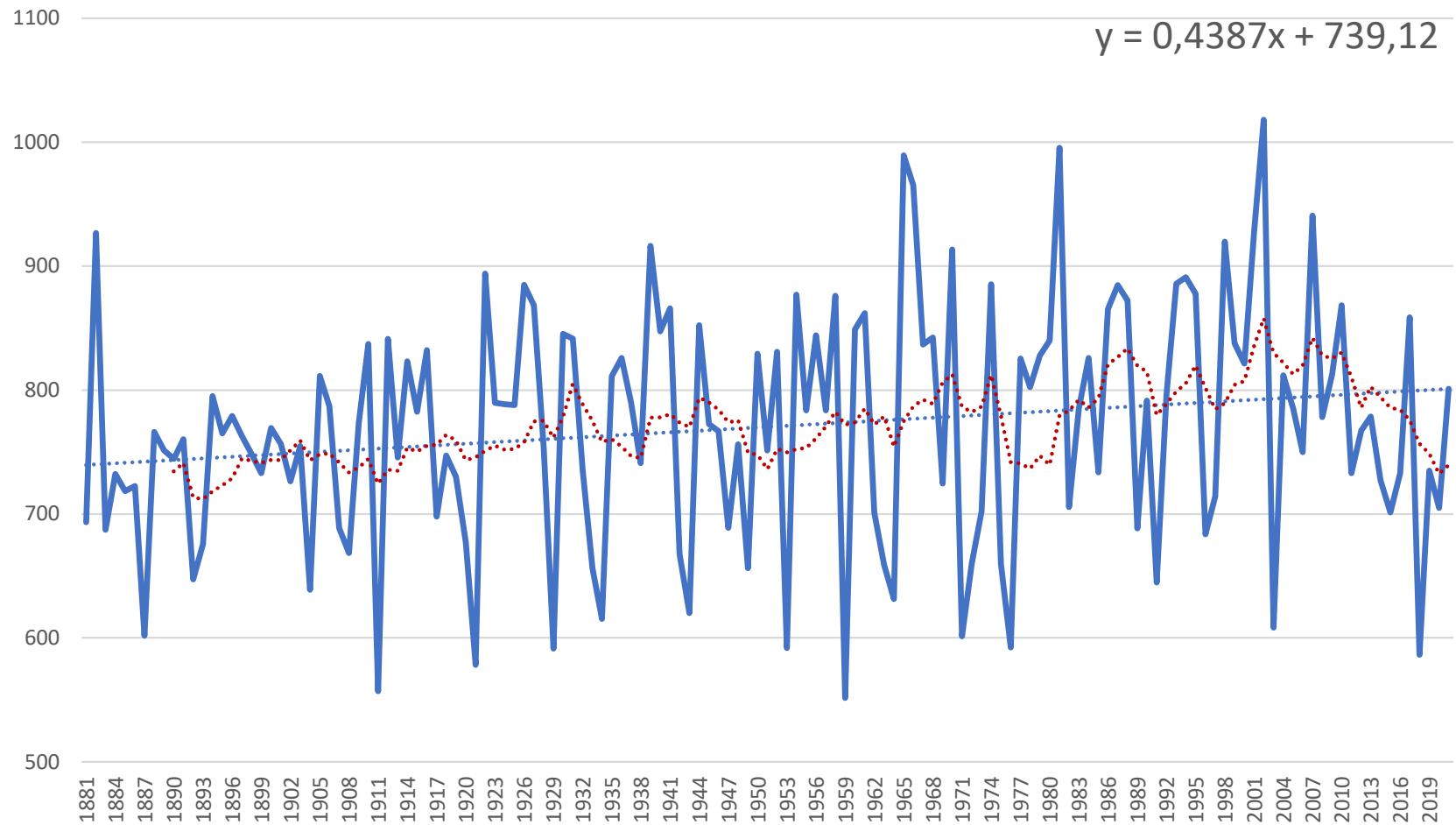


Niederschlag in Deutschland. Jährliche Summe 1901-2019 sowie für Frühling und Sommer 1901-2020 (Daten: Deutscher Wetterdienst).

Aus: Schönwiese (2020): Klimatologie Ulmer Verlag, Stuttgart.

Auswirkung auf Feuchtetransport

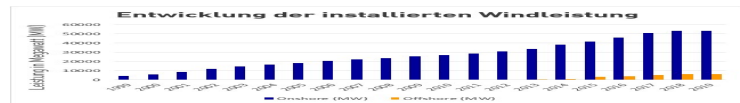
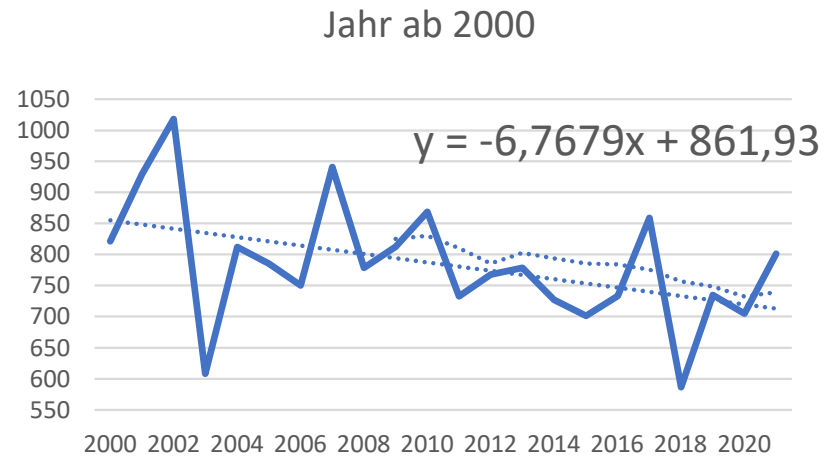
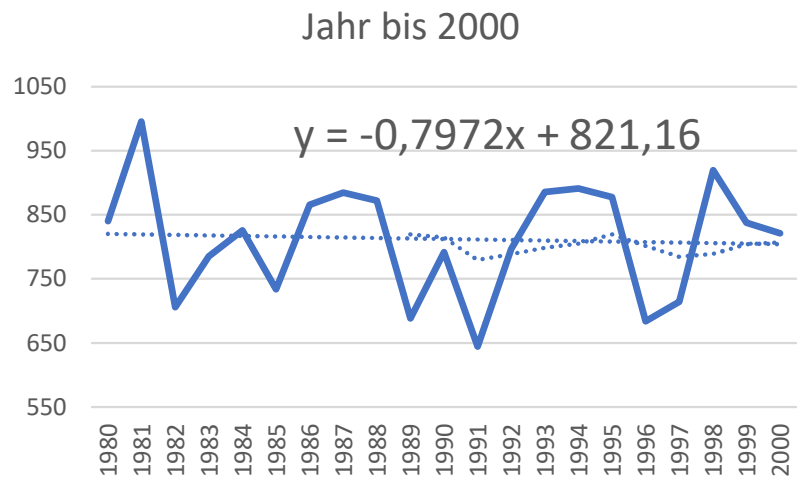
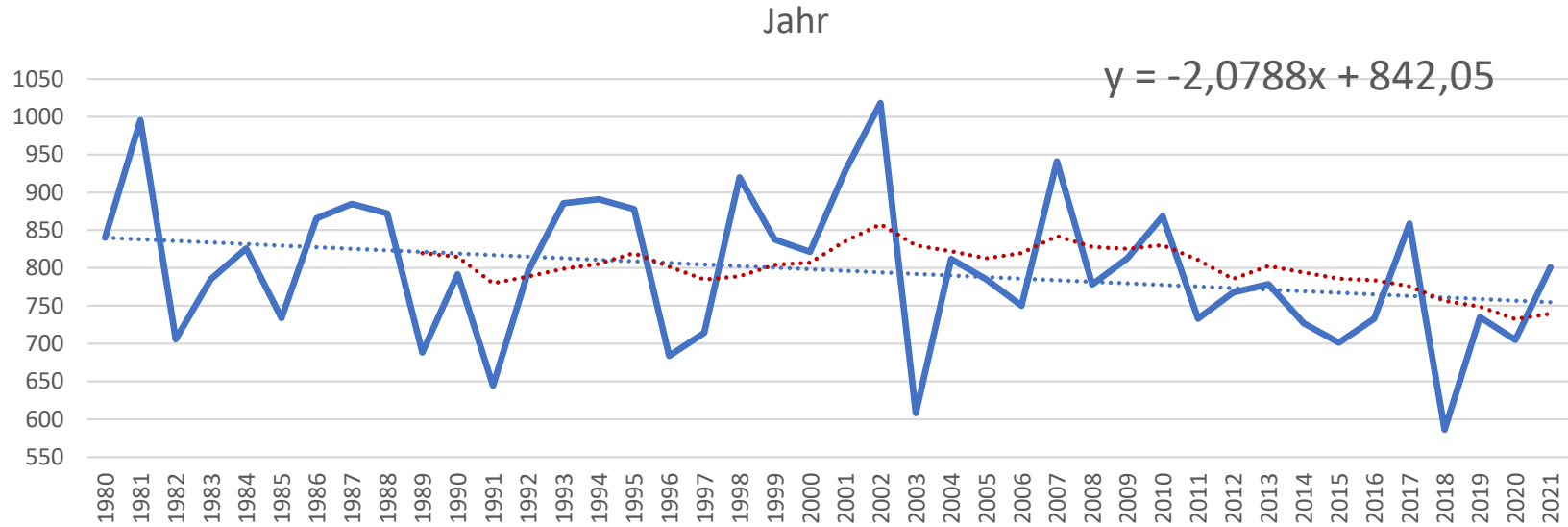
Niederschlag 1880-2020



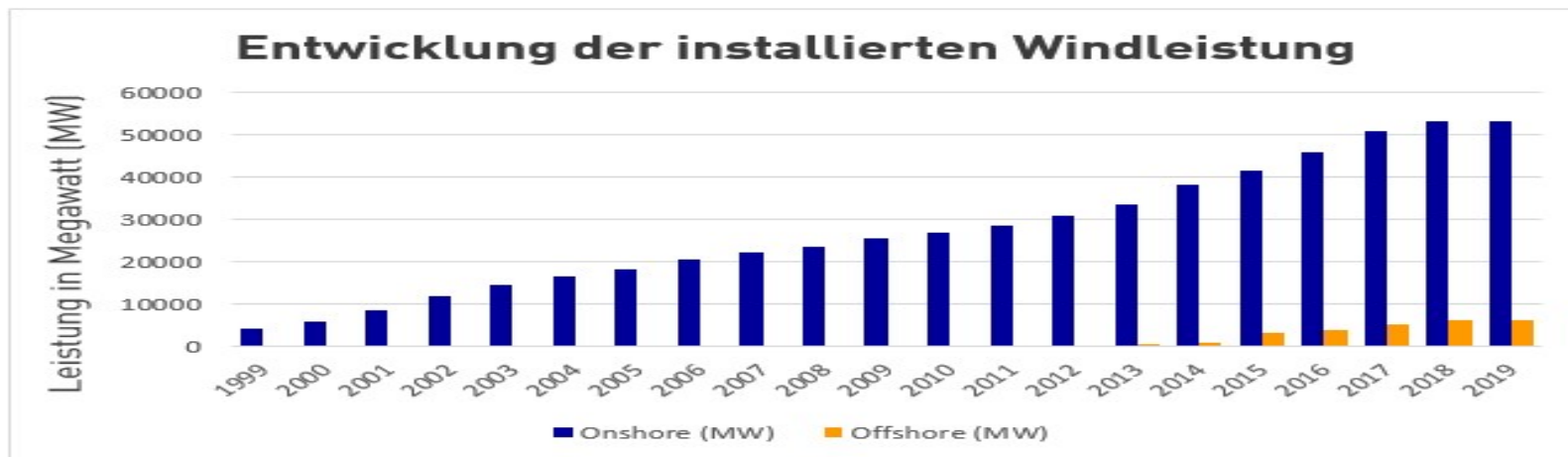
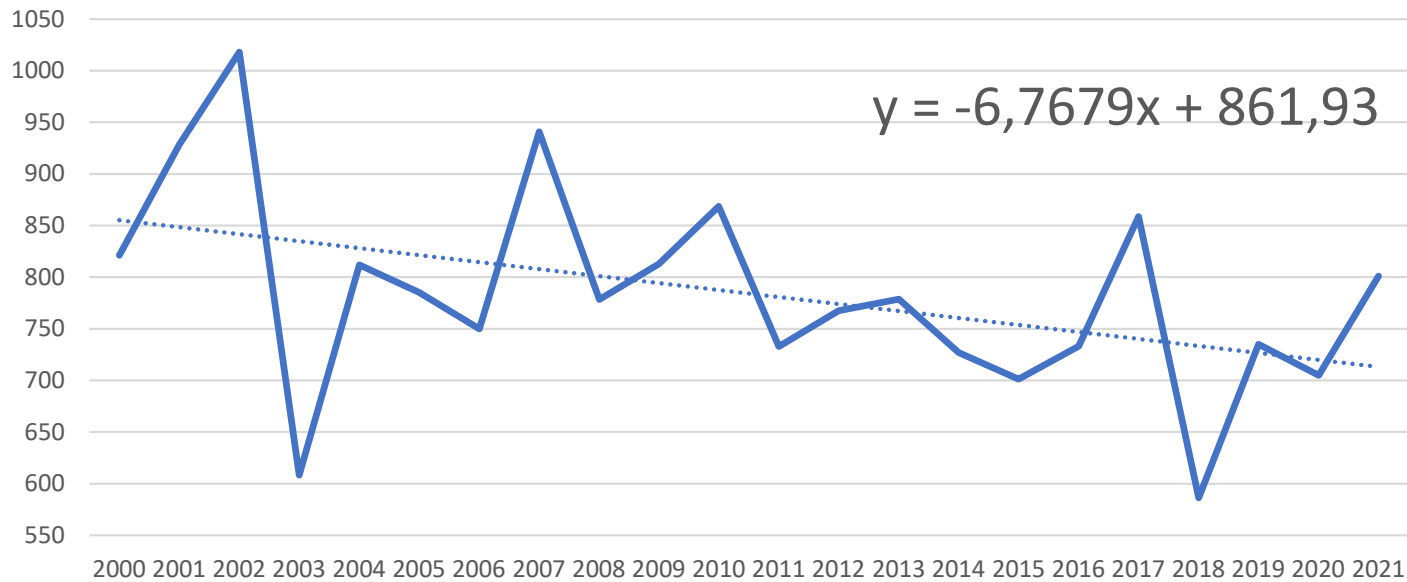
Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



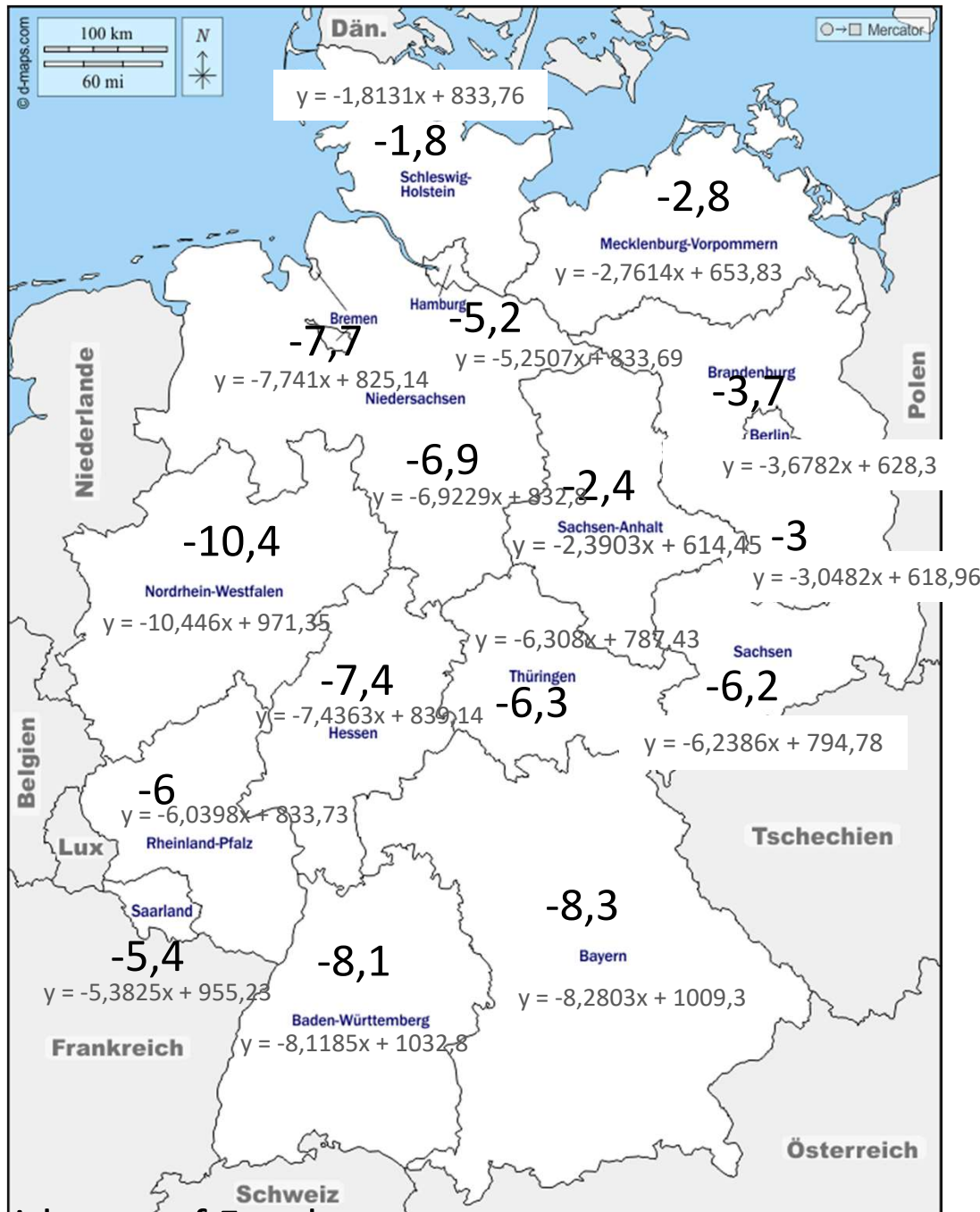
Auswirkung auf Feuchtetransport



Niederschlag ab 2000



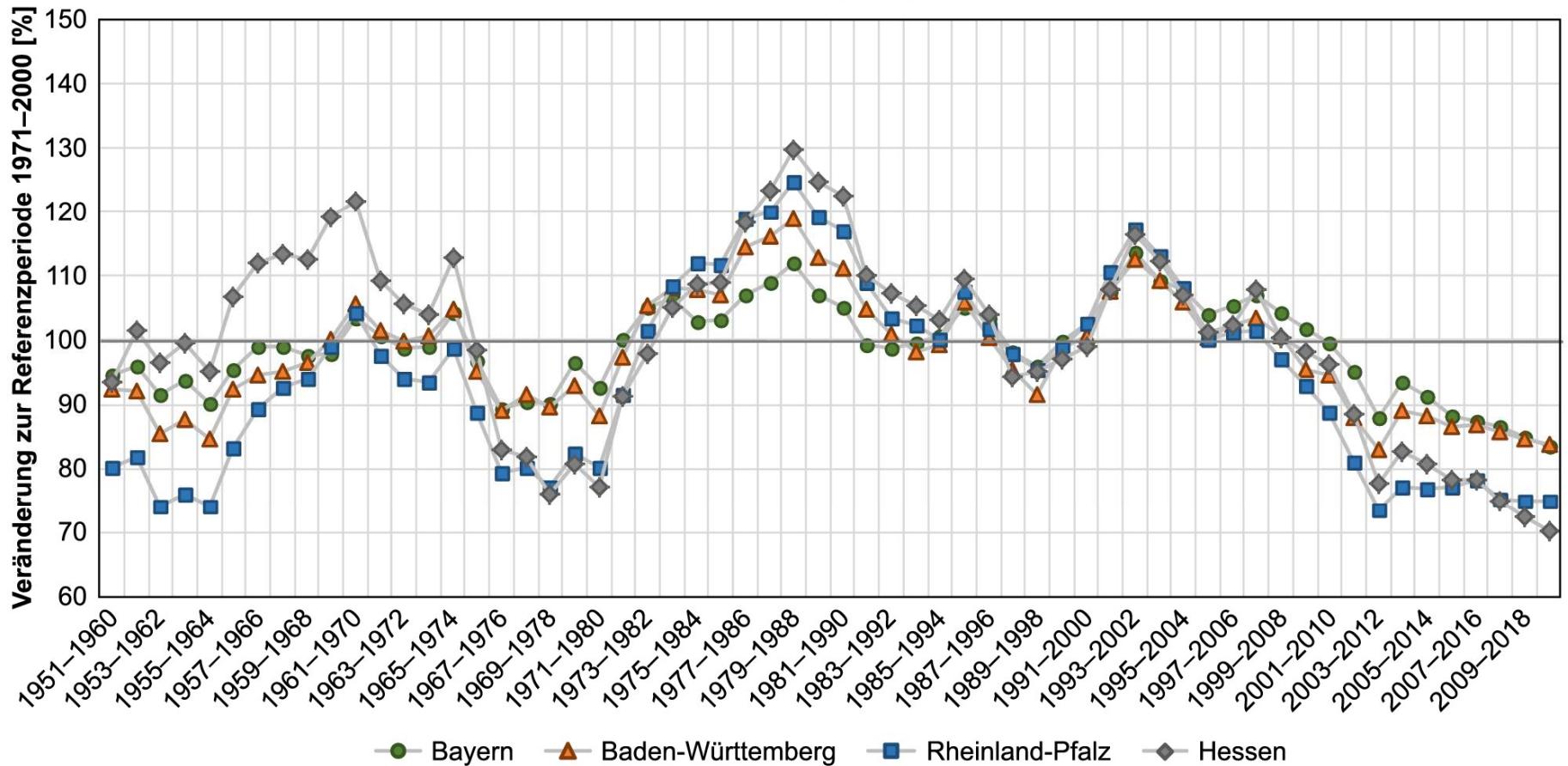
Rückgang Niederschlag p.a. ab 2000



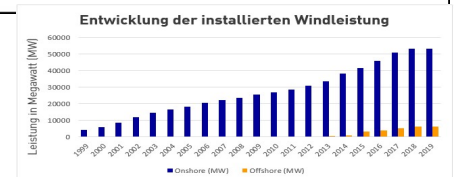
| Land | Steigung |
|------------------------|----------|
| Nordrhein-Westfalen | -10,4 |
| Bayern | -8,3 |
| Baden-Württemberg | -8,1 |
| Bremen | -7,7 |
| Hessen | -7,4 |
| Niedersachsen | -6,9 |
| Thüringen | -6,3 |
| Sachsen | -6,2 |
| Rheinland-Pfalz | -6 |
| Saarland | -5,4 |
| Hamburg | -5,2 |
| Berlin | -3,7 |
| Brandenburg | -3 |
| Sachsen-Anhalt | -2,4 |
| Mecklenburg-Vorpommern | -2,8 |
| Schleswig-Holstein | -1,8 |

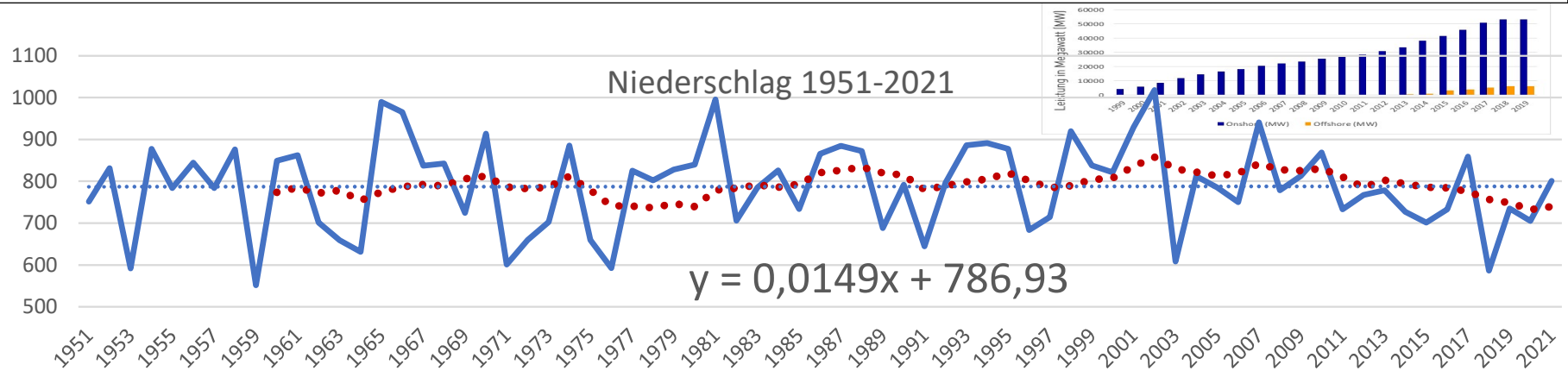
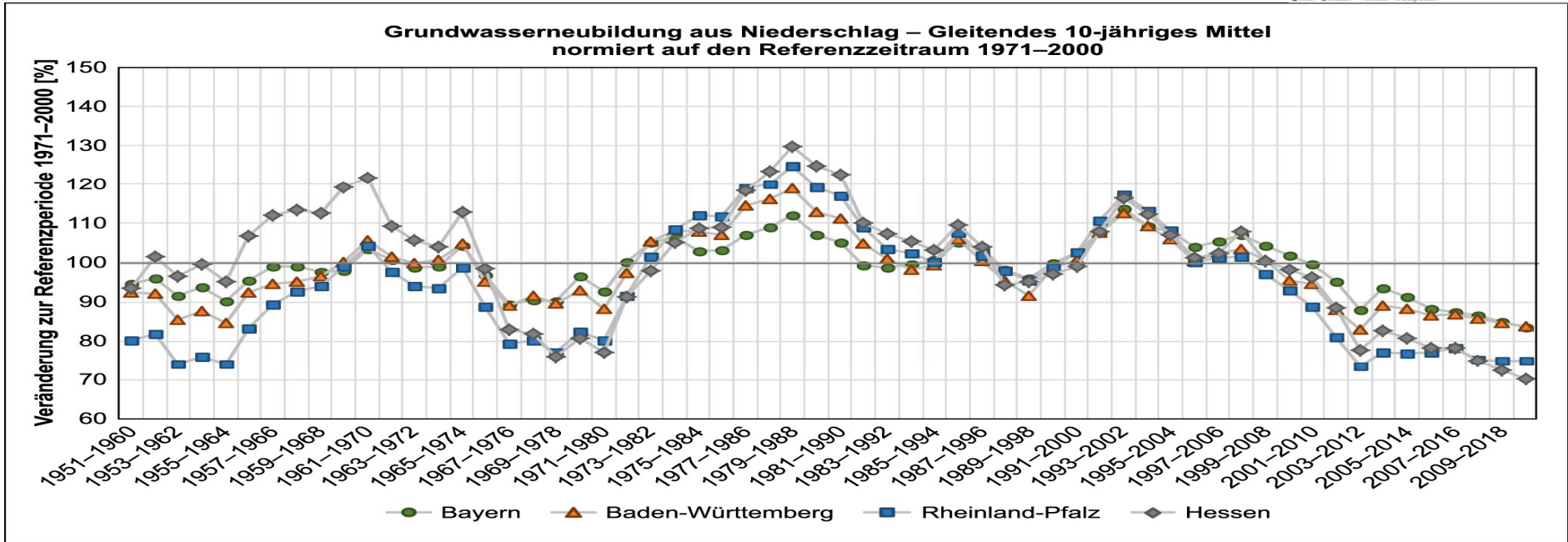
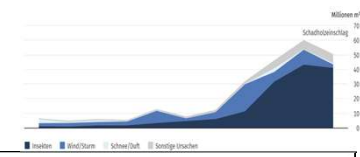
Auswirkung auf Feuchtetransport

Grundwasserneubildung aus Niederschlag – Gleitendes 10-jähriges Mittel
normiert auf den Referenzzeitraum 1971–2000



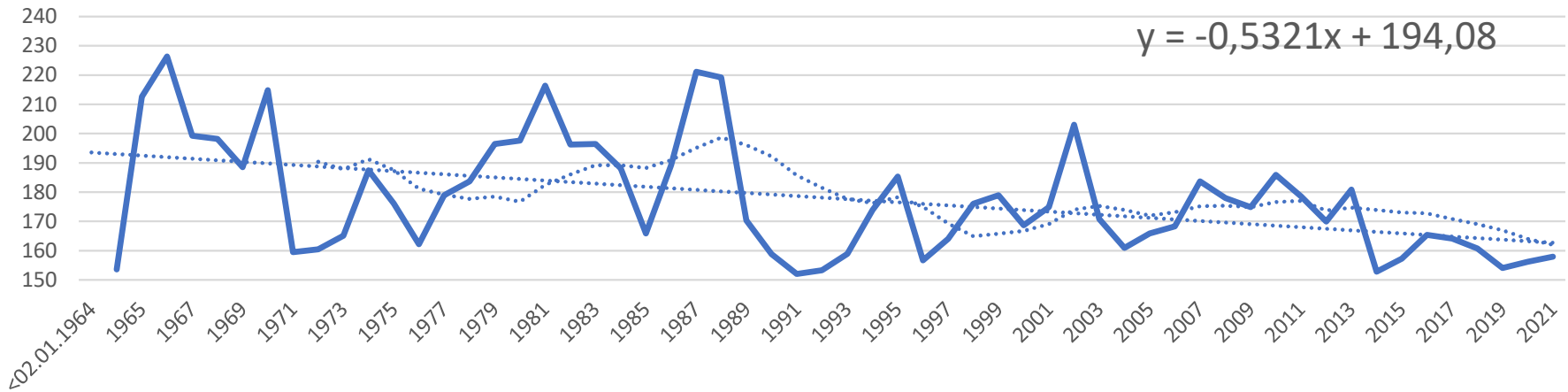
Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion
Hydrogeologie (2021) 26:33–45



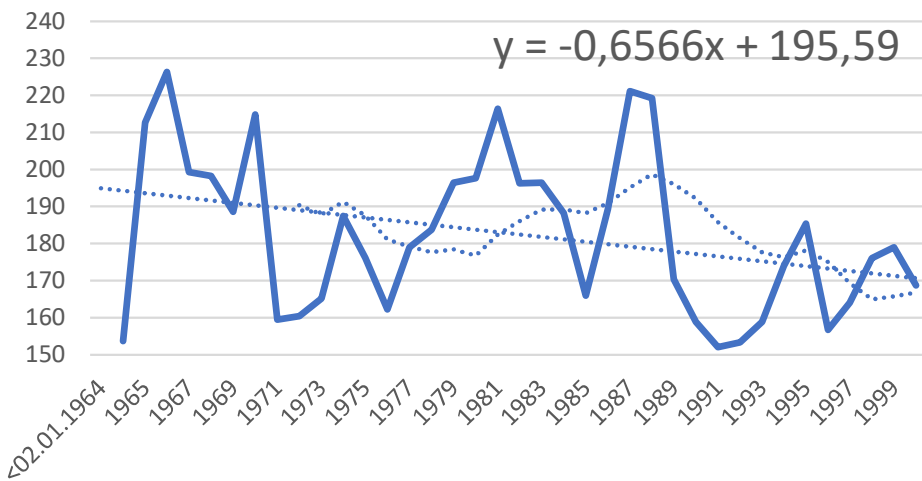


Trendline Gleitendes 10-jähriges Mittel
Auswirkung auf Feuchtetransport

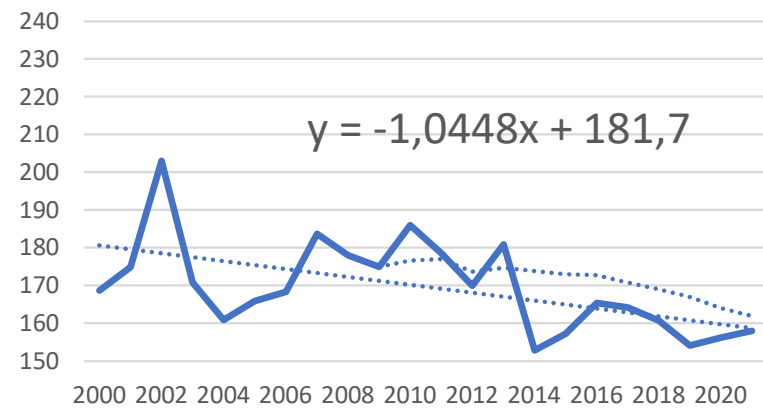
Pegelstand Main



1964-2000



2000-2021



Beobachtungen

- Senkung des Niederschlags von 850 auf 730 mm seit 2000 (Lineare Progression).
- Senkungsgerade deutlich steiler abwärts ab 2000
- Differenz von 120 mm entspricht 43 km^3 .
- 43 km^3 entsprechen 15% des Gesamtniederschlags
- Alle Rechnungen fanden mit 50% Luftfeuchte statt, Wert ist üblicher Weise deutlich höher.
- Windräder wurden idealisiert, d.h. Wandlungsverluste wurden auf Null gesetzt
- CO_2 Anstieg seit 2000 – 50 ppm (11%)
- Gesamtanstieg Klimagase $< 2\%$

Fazit

- Die Untergrenze von gebremstem Wasser durch Windkraftanlagen liegt bei 37 km^3
- Der Gesamtniederschlag ist seit 2000, dem großflächigen Ausbau der Windkraft um 43 km^3 gesunken.
- Der Temperaturanstieg verläuft linear zum Ausbau der Windkraft