

# Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

Prof. Dr. Robert Boes  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie  
und Glaziologie (VAW), ETH Zürich



# Gliederung

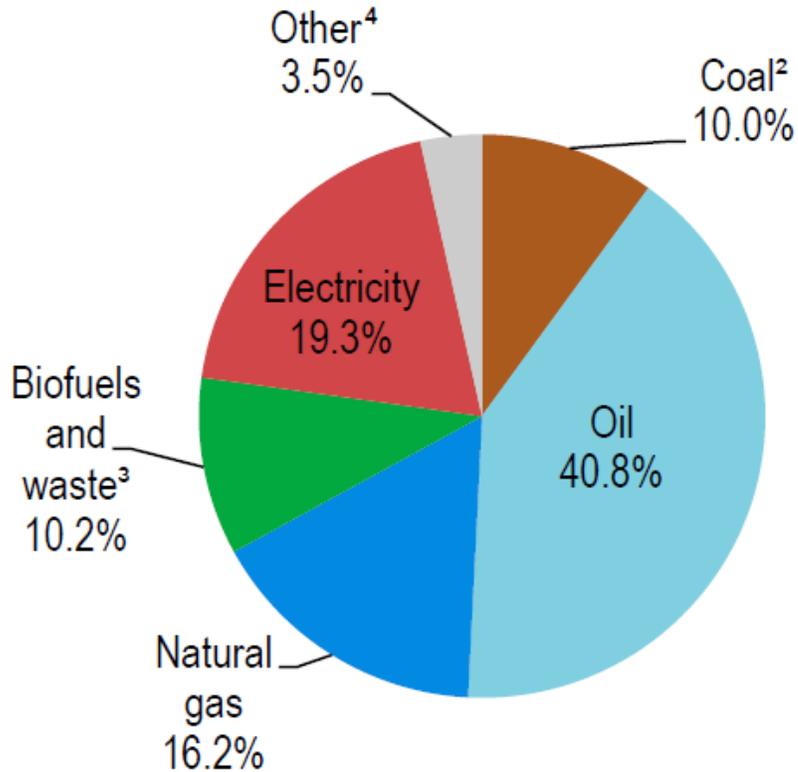
## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Talsperren für Wasserkraftspeicher
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

# Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

## Gesamtenergie, Elektrizität und Wasserkraftanteil weltweit (Stand 2020/21)

**Gesamtenergieverbrauch nach Quelle**

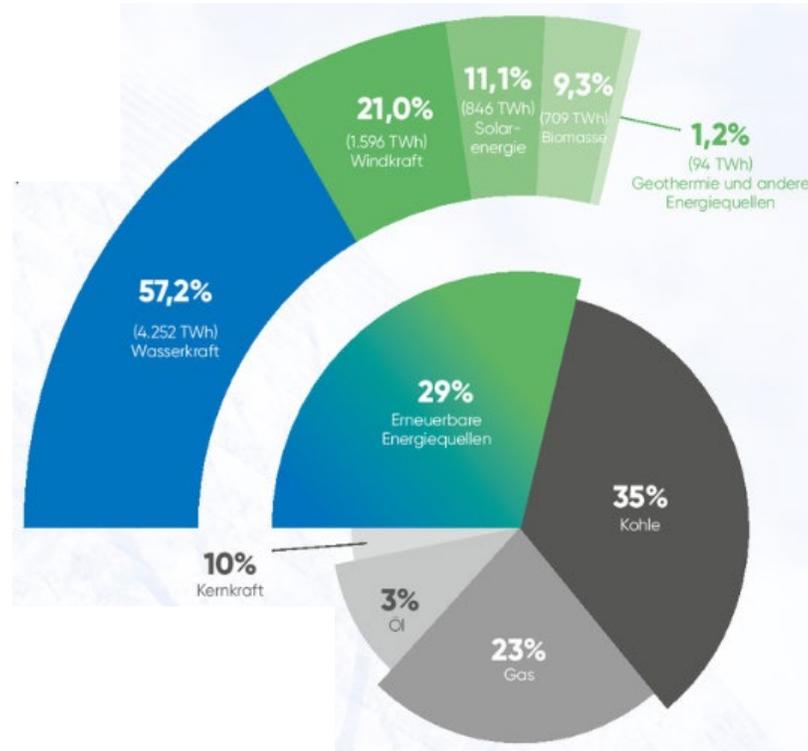


Quelle: *IEA, World Energy Balances, 2020*

**9 938 Mtoe<sup>1</sup>**

1) million tonnes of oil equivalent

**Anteil an Elektrizitätserzeugung**



Quelle: *IEA, World Energy Outlook 2021*

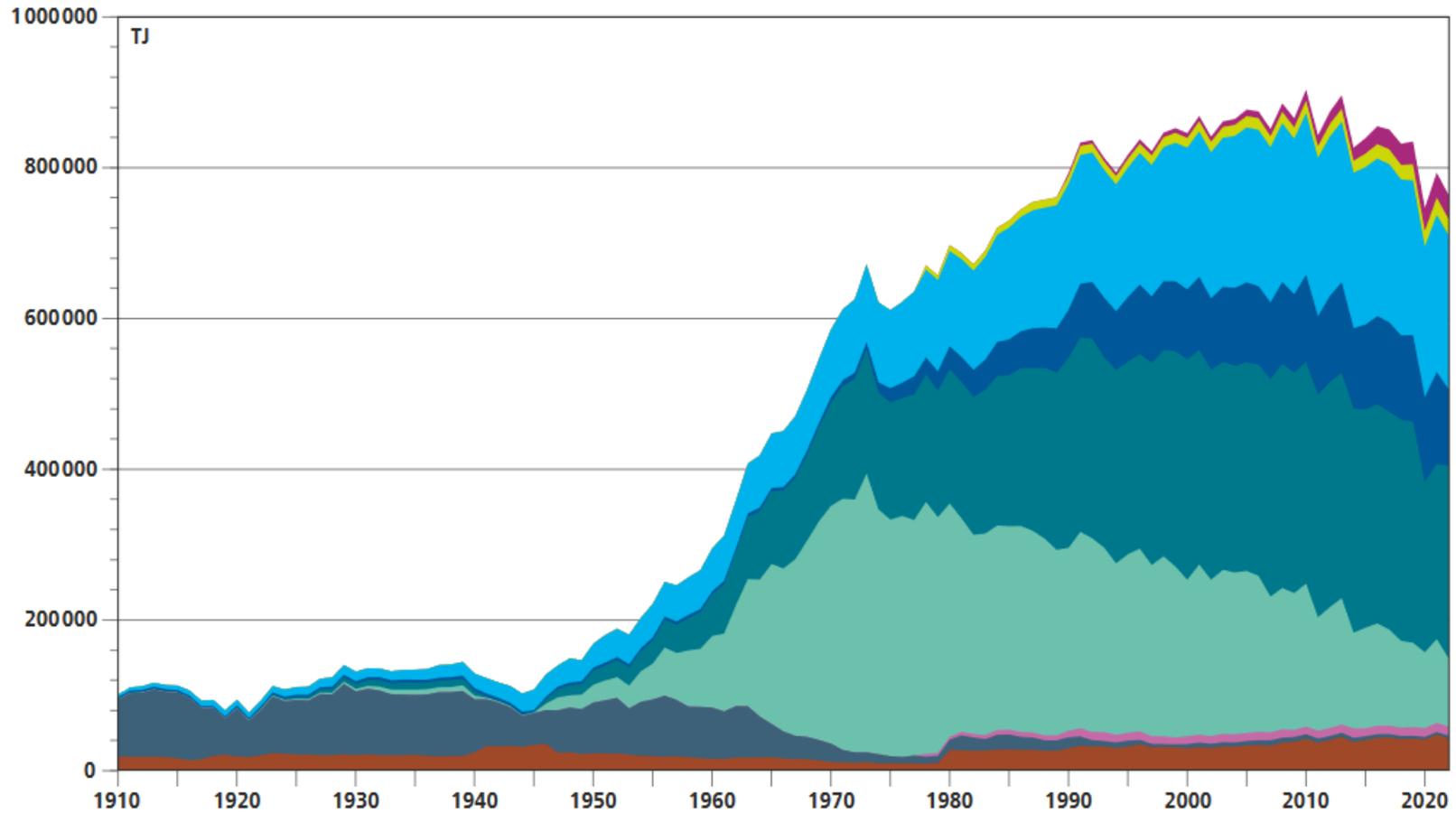
**25'850 TWh**

→ Wasserkraft ist weltweit bedeutendste erneuerbare Energieform

→ ohne Wasserkraftnutzung weltweit 37% mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen

# Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

Bsp. Schweiz: Endenergieverbrauch 1910-2022 nach Energieträger



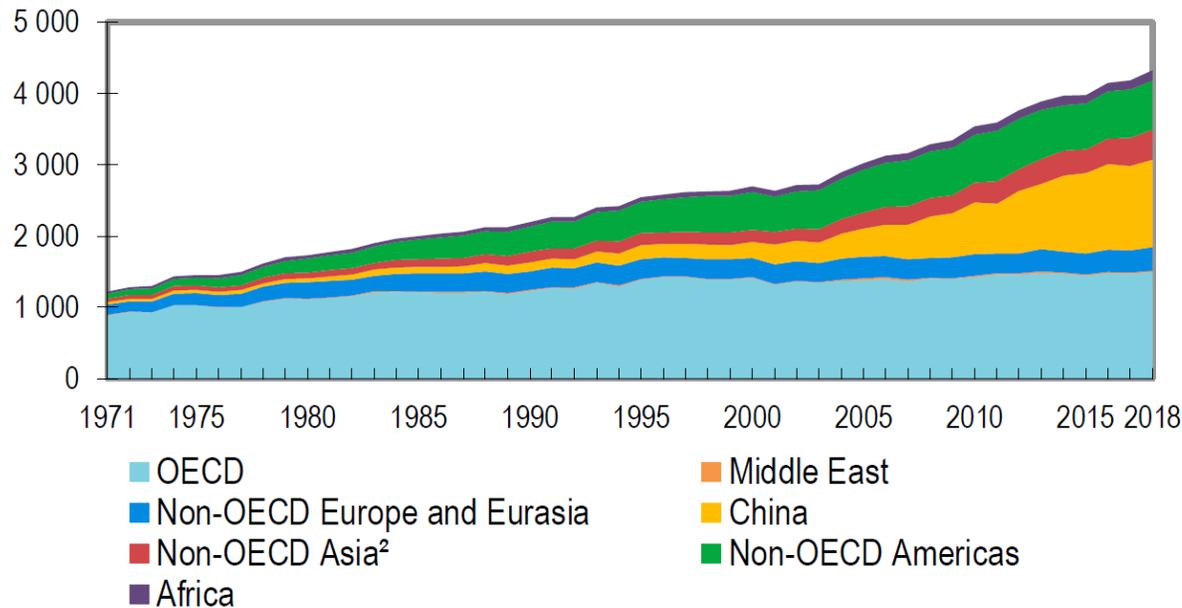
- |  |   |   |
|--|---|---|
| Übrige erneuerbare Energien<br>Autres énergies renouvelables | Gas<br>Gaz                                  | Industrieabfälle<br>Déchets industriels |
| Fernwärme<br>Chaleur à distance                              | Treibstoffe<br>Carburants                   | Kohle<br>Charbon                        |
| Elektrizität<br>Electricité                                  | Erdölbrennstoffe<br>Combustibles pétroliers | Holz<br>Bois                            |

**Energie ist mehr als Strom, aber Strom wird immer wichtiger!**

# Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

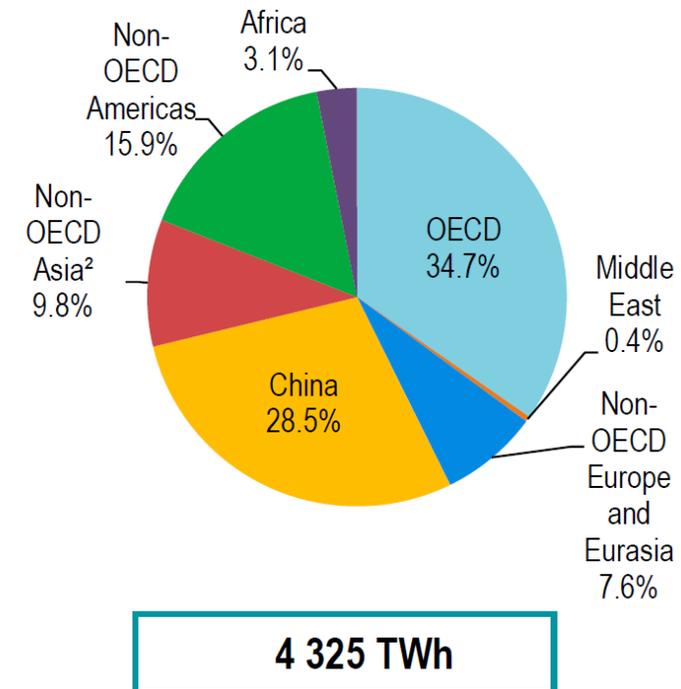
## Wasserkraft: Regionale Verteilung und Anteile an Stromproduktion weltweit

Weltweite Stromerzeugung aus Wasserkraft<sup>1</sup> von 1971 bis 2018 nach Regionen (TWh)



1. Includes electricity production from pumped storage.
2. Non-OECD Asia excludes China

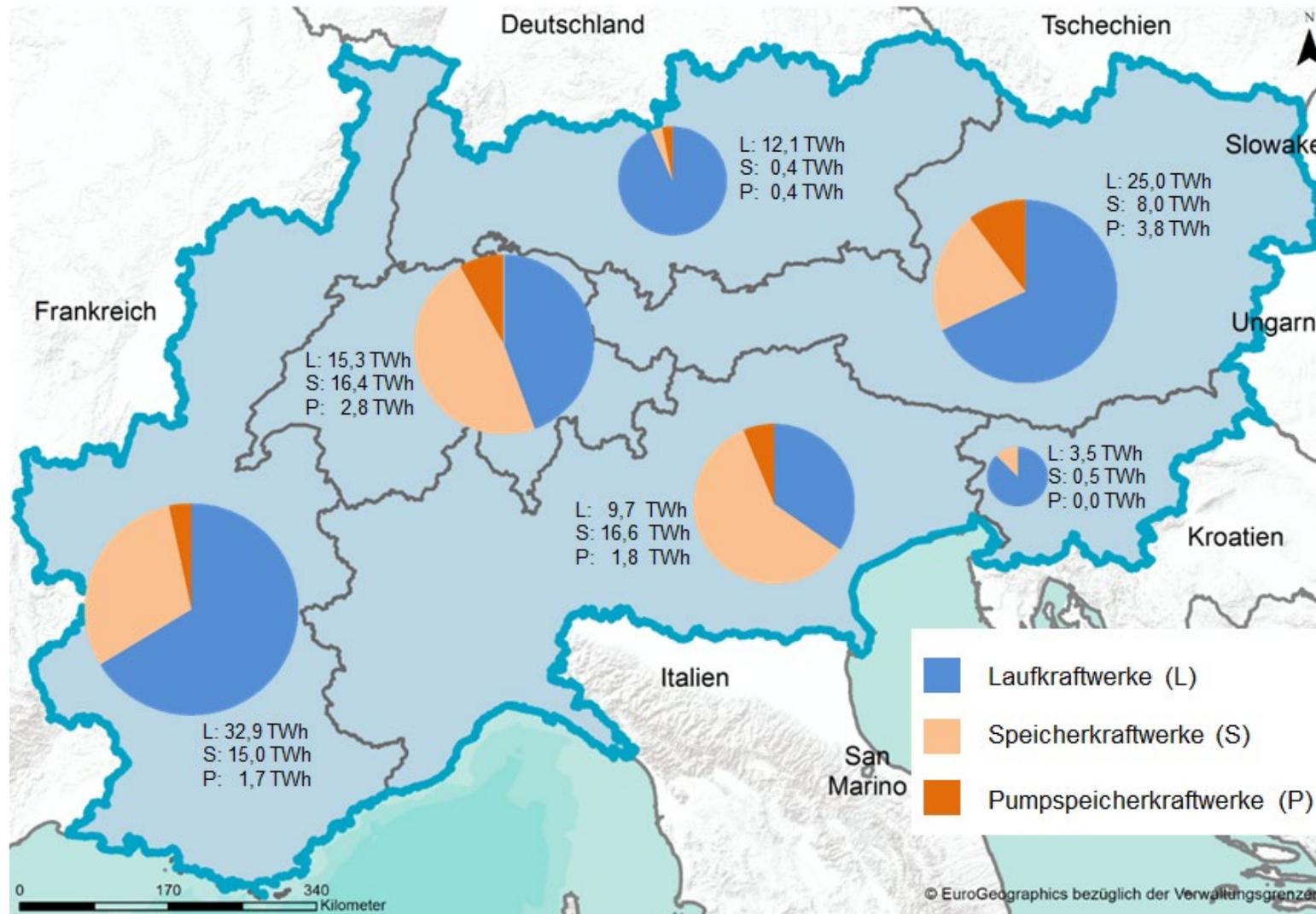
Regionale Anteile an der Stromerzeugung aus Wasserkraft 2018<sup>1</sup>



Quellen: IEA, World Energy Statistics, 2020; IEA, Renewables Information, 2020.

# Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

## Wasserkraftnutzung – Arbeitsvermögen nach Kraftwerkstyp im Alpenraum



### Total Alpenraum

**Anzahl Wasserkraftwerke (> 5 MW):** > 1000

davon  
 Lauf-Kraftwerke (KW) 59 %  
 Speicher-KW 33 %  
 Pumpspeicher-KW 8 %

**Installierte Leistung: > 62 GW,**  
 davon

Lauf-KW 32 %  
 (Pump-)Speicher-KW 68 %

**Arbeitsvermögen: 166 TWh/a**  
 davon

Lauf-KW 60 %  
 Speicher-KW 40 %

# Gliederung

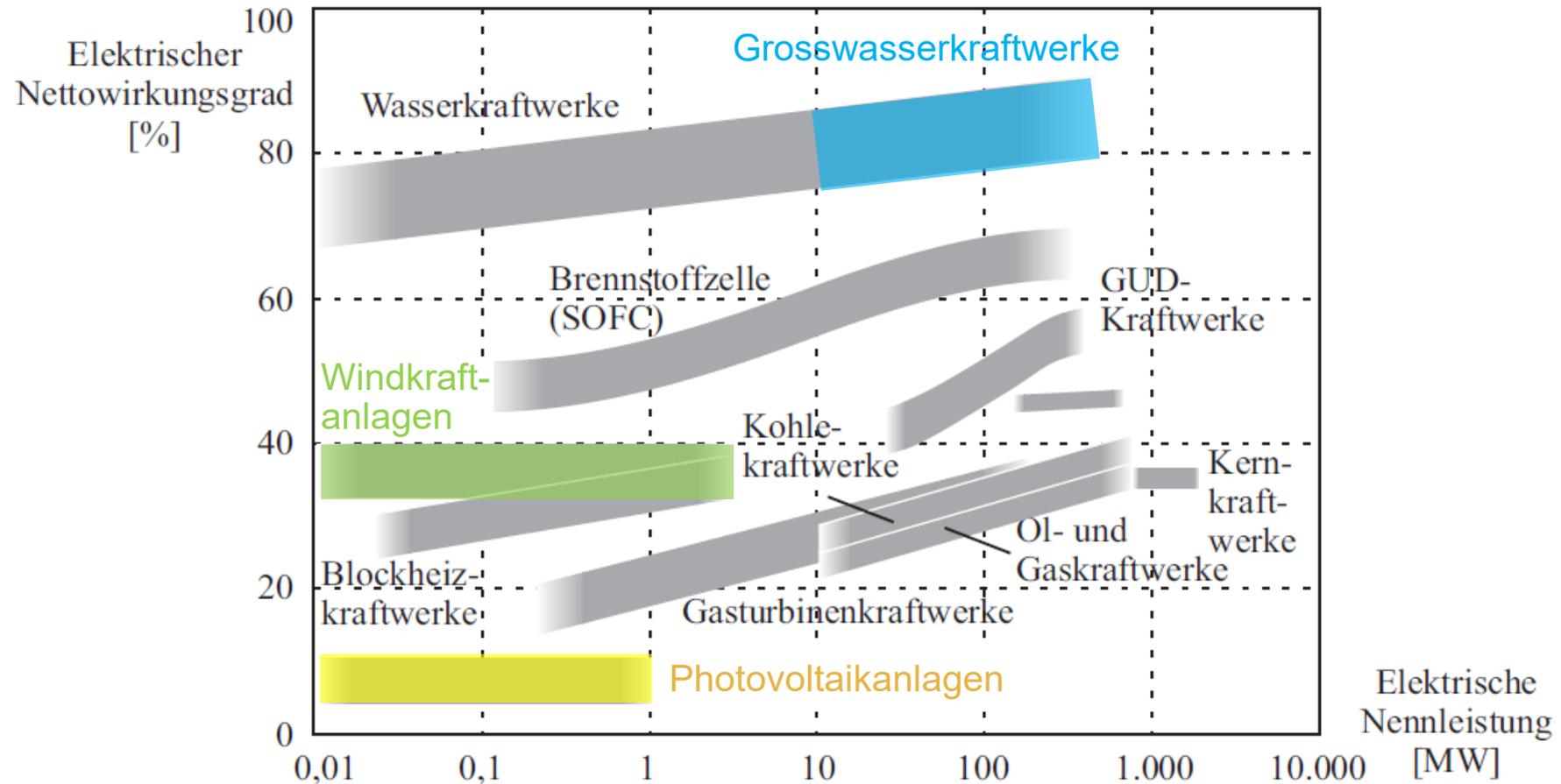
## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- **Trümpfe der Wasserkraft**
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Talsperren für Wasserkraftspeicher
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Energieeffizienz

- **Nettowirkungsgrade** in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung



Quelle: Giesecke et al. (2014)

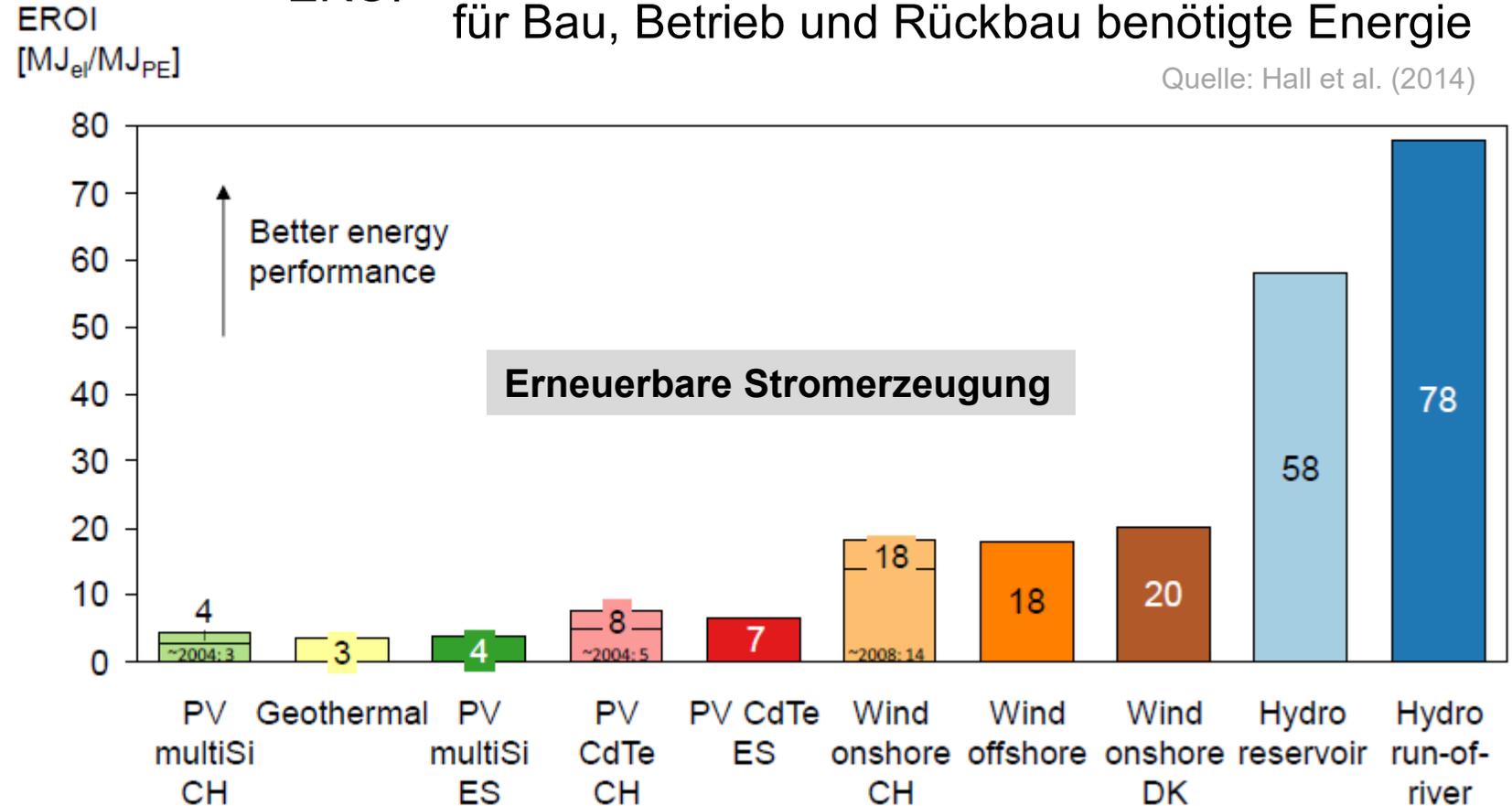
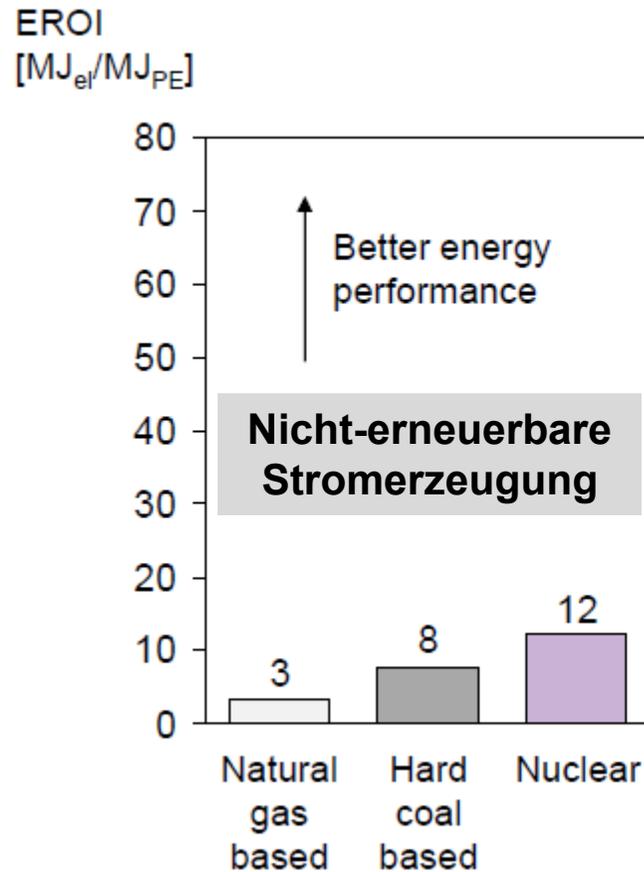
# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Bsp. Energieausbeute

- **Erntefaktor / Energy Return on Energy Investment (EROI)**

$$\text{EROI} = \frac{\text{über Anlagendauer erzeugte Energie}}{\text{für Bau, Betrieb und Rückbau benötigte Energie}}$$

Quelle: Hall et al. (2014)



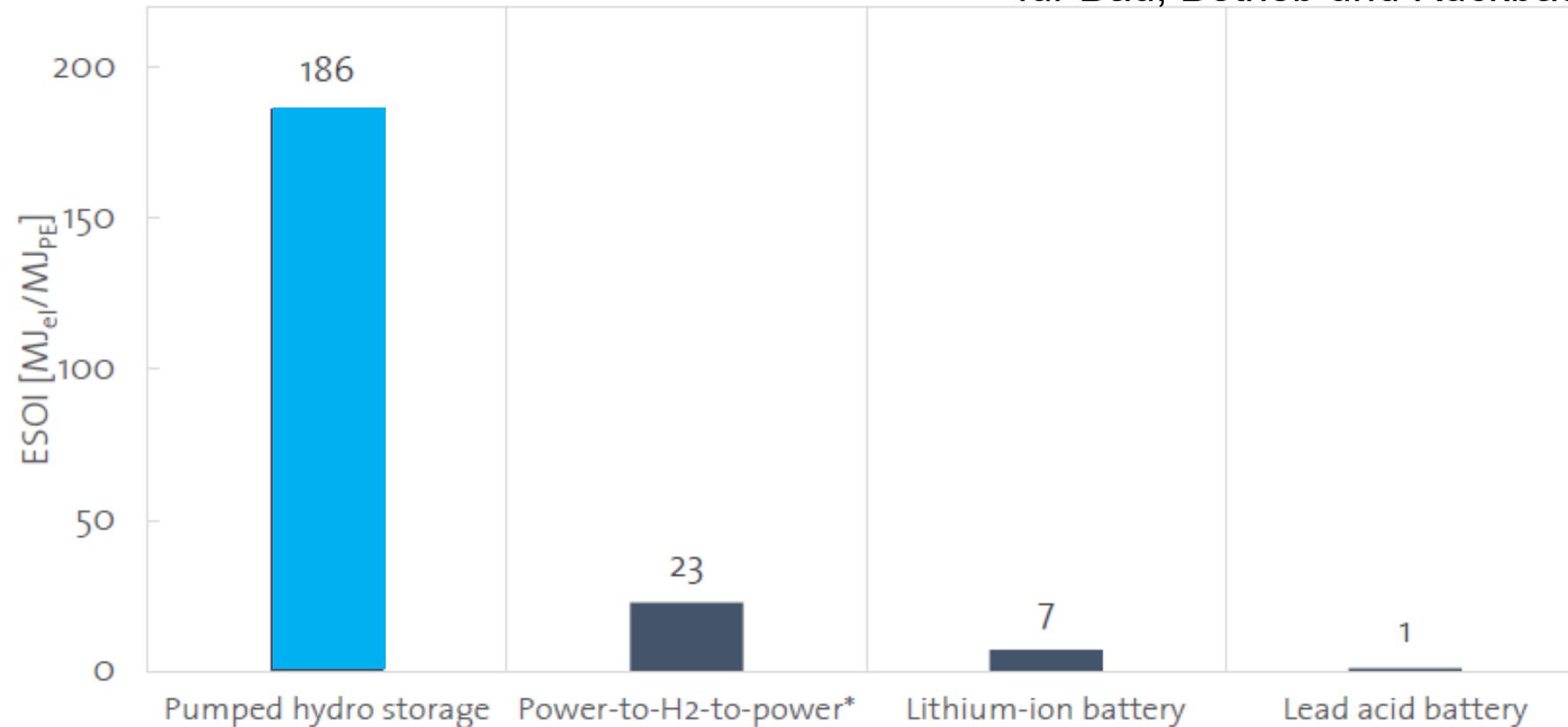
Quelle: Steffen et al. (2018)

# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

*Bsp. Energieausbeute*

- **Speicher-Erntefaktor / Energy Stored on Energy Invested (ESOI)**

$$\text{ESOI} = \frac{\text{über Anlagendauer gespeicherte Energie}}{\text{für Bau, Betrieb und Rückbau benötigte Energie}}$$

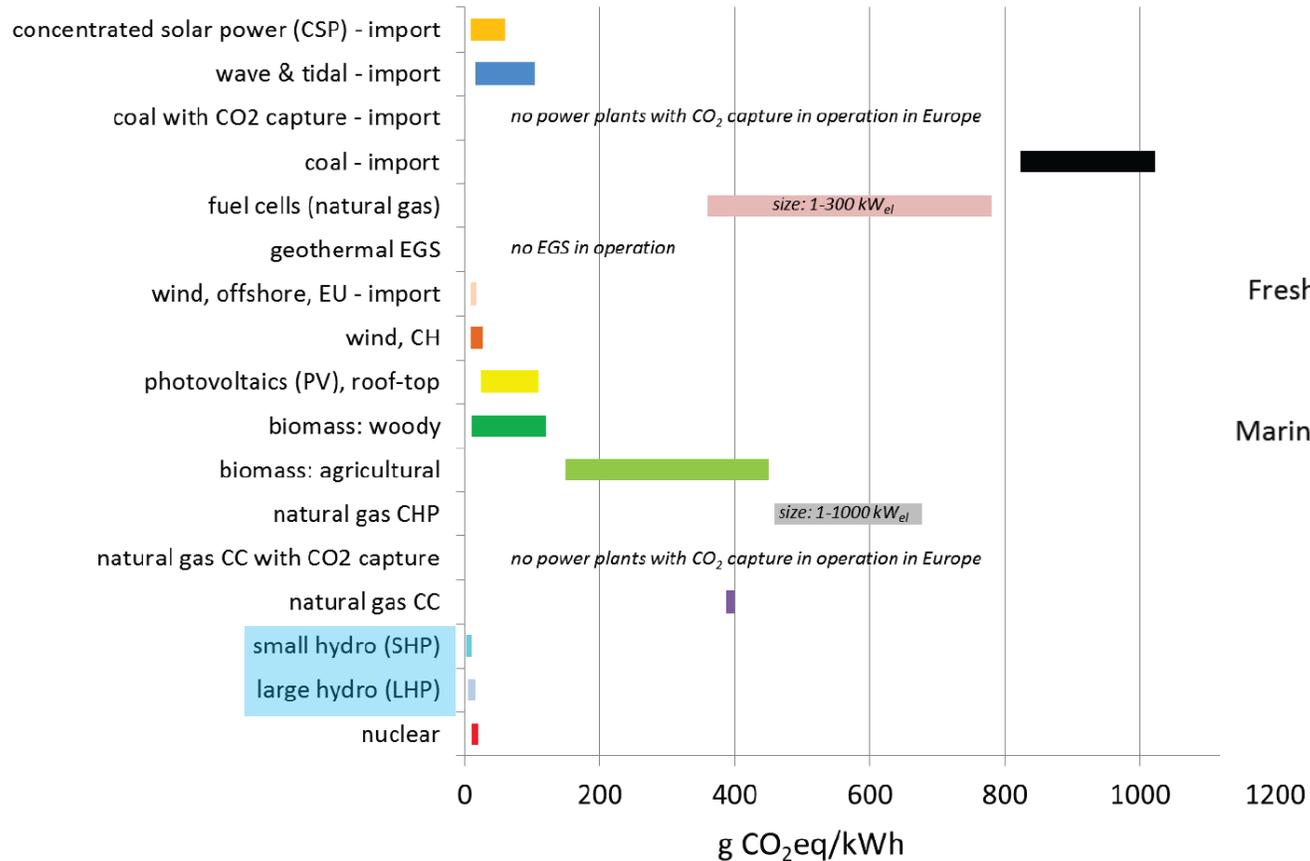


Quelle: Steffen *et al.* (2018)

# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

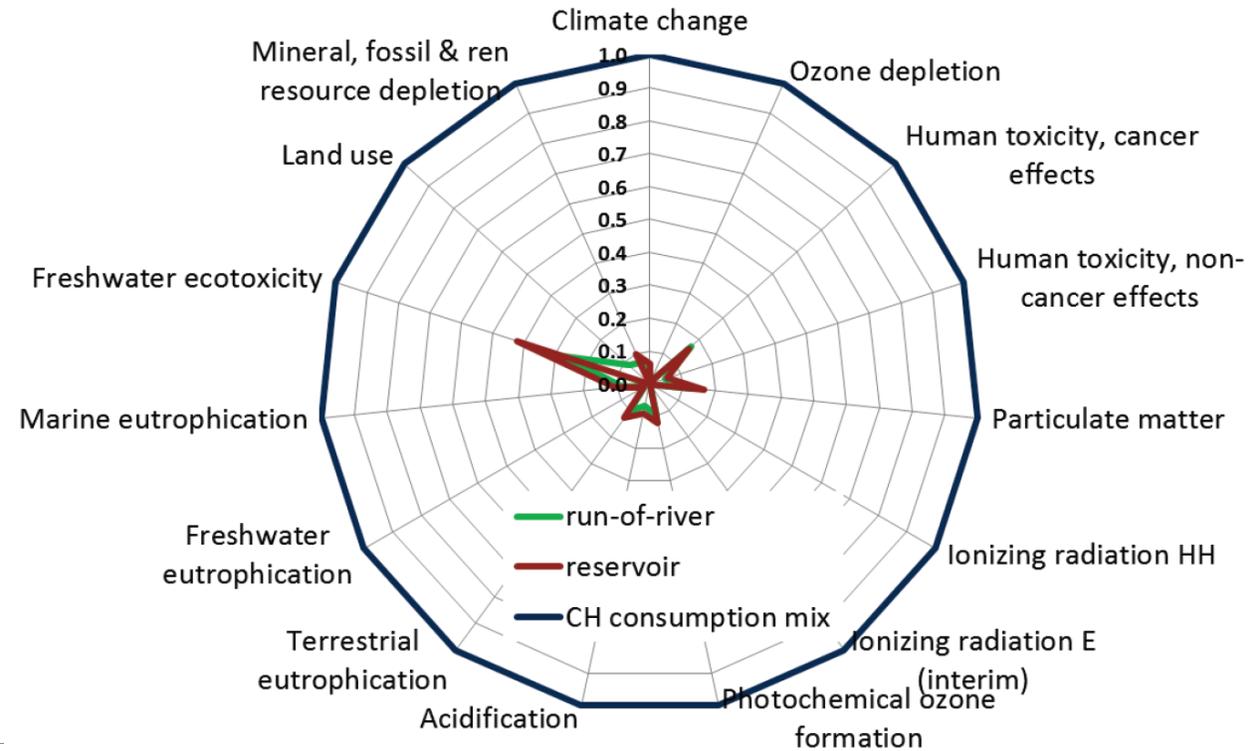
## Umweltbilanz, Bsp. Schweiz

### Treibhausgase (Greenhouse gases)



Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen aktueller Stromerzeugungstechnologien (ab Kraftwerk) für die Stromversorgung der Schweiz

### Ökobilanz (Ecological balance)



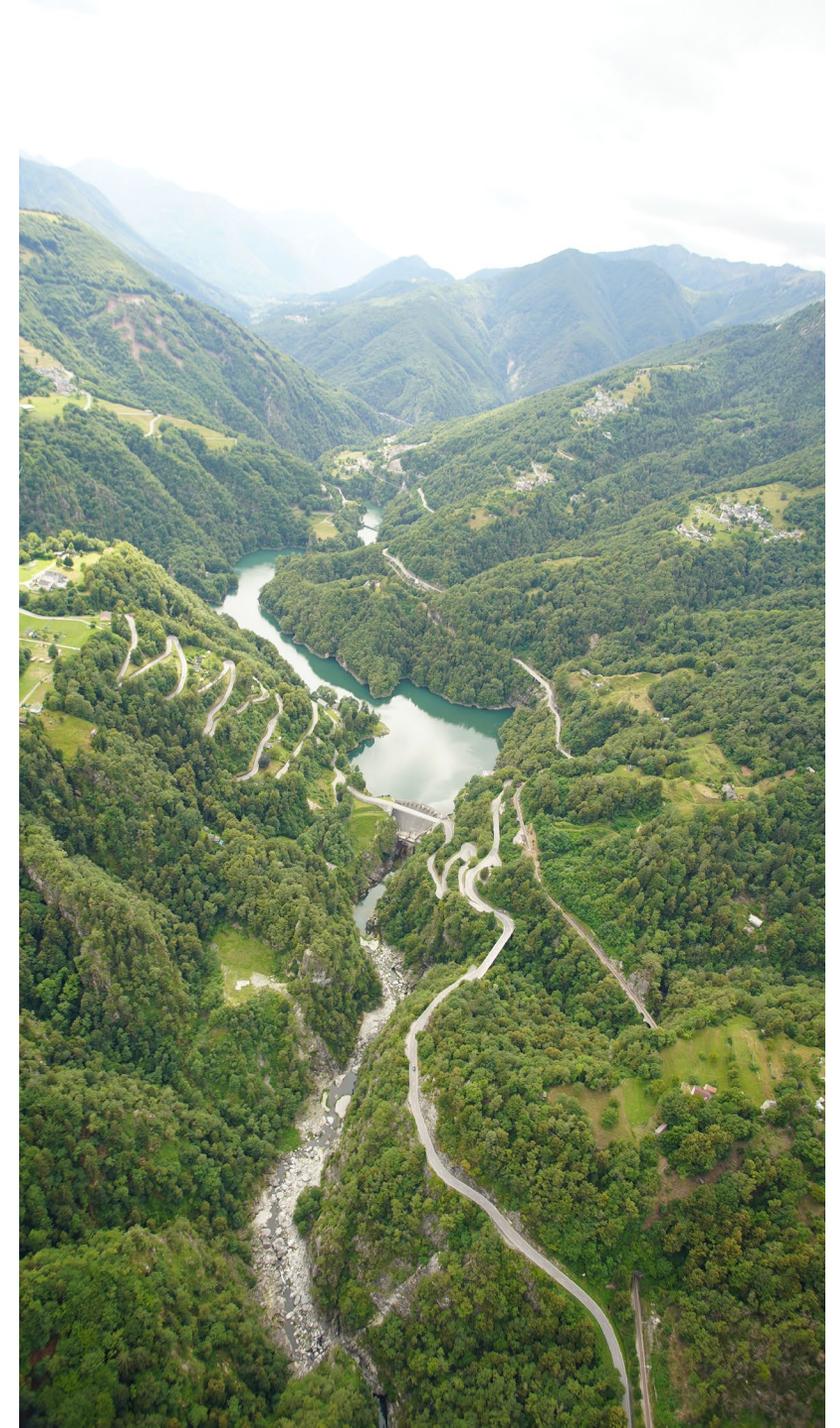
Vergleich der LCIA-Indikatoren für die Stromproduktion aus **Schweizer Speicher- und Laufkraftwerken** mit dem durchschnittlichen Schweizer-Mix (=1)

# Trümpfe der Wasserkraft

## Zwischenfazit

- hohe Energiedichte und hoher Wirkungsgrad ( $\eta \approx 90\%$ )
- hohe Verfügbarkeit ( $> 90\%$ )
- hohe Lebensdauer (baulich typisch 60 bis 90 Jahre)
- Höchste (Speicher-)Erntefaktoren (EROI bzw. ESOI)
- Gute Lebenszyklus-Bewertung (LCA)
- Sehr niedrige Treibhausgasemissionen (THG)

Fotos: G. Favre (2023)



# Gliederung

## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

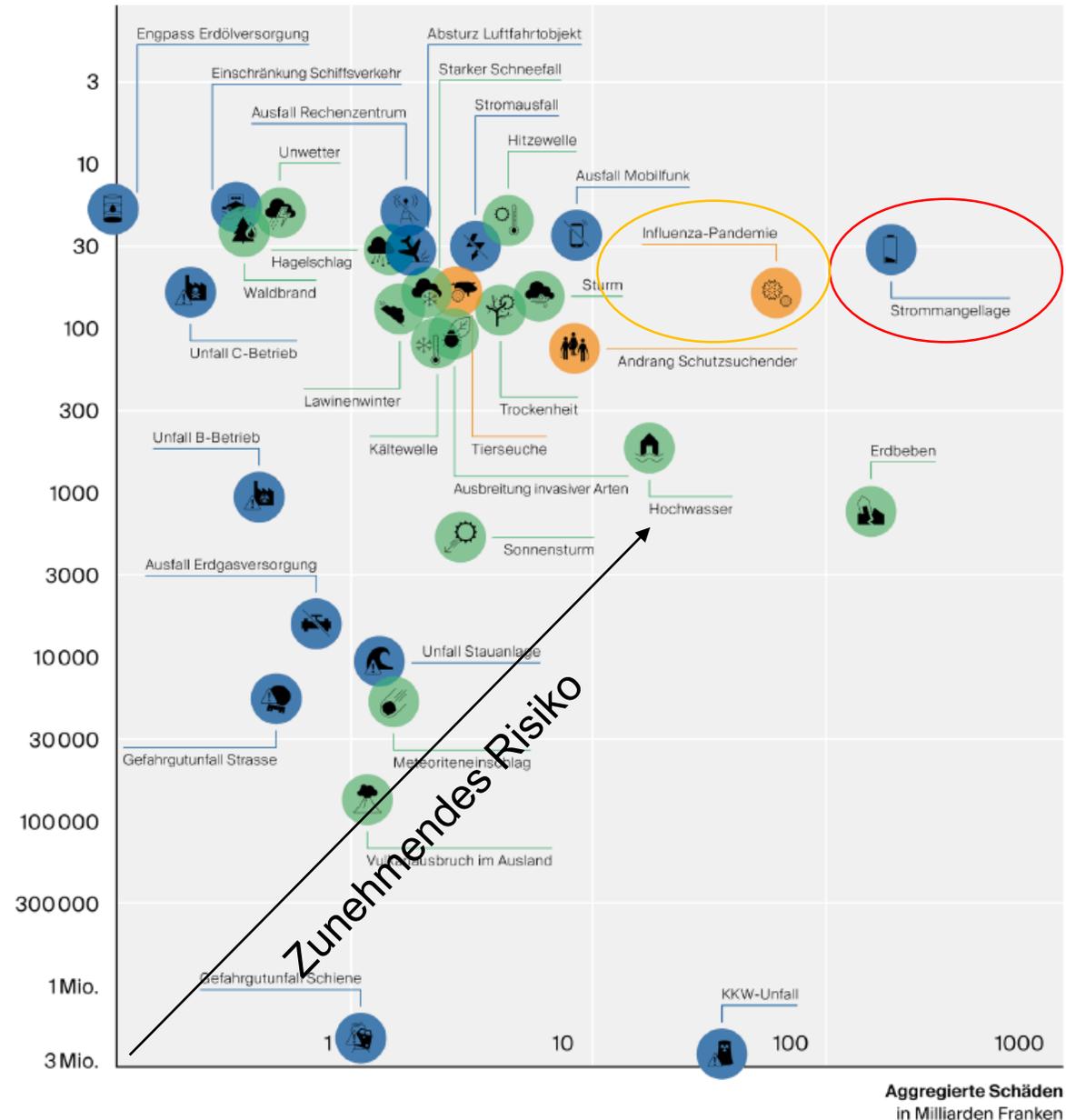
- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- **Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft**
- Talsperren für Wasserkraftspeicher
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

# Sicherheit der Stromversorgung

## Bsp. Schweiz

- Studie Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2020): Strommangellage als Risiko Nr. 1
  - Schw. Elektrizitätskommission (ElCom, 2020): Bei Verkettung unglücklicher Umstände können **Situationen mit nicht gelieferter Energie im Winterhalbjahr** nicht ausgeschlossen werden, insbesondere wenn die beiden grossen Kernkraftwerke nicht verfügbar sein sollten.
- Flexible Regelenergie (positiv und negativ) zur Verhinderung von Blackouts sehr wichtig
- Winterproduktion besonders wichtig
- Saisonale Umlagerung durch Speicherkraftwerke

Häufigkeit  
einmal in x Jahren

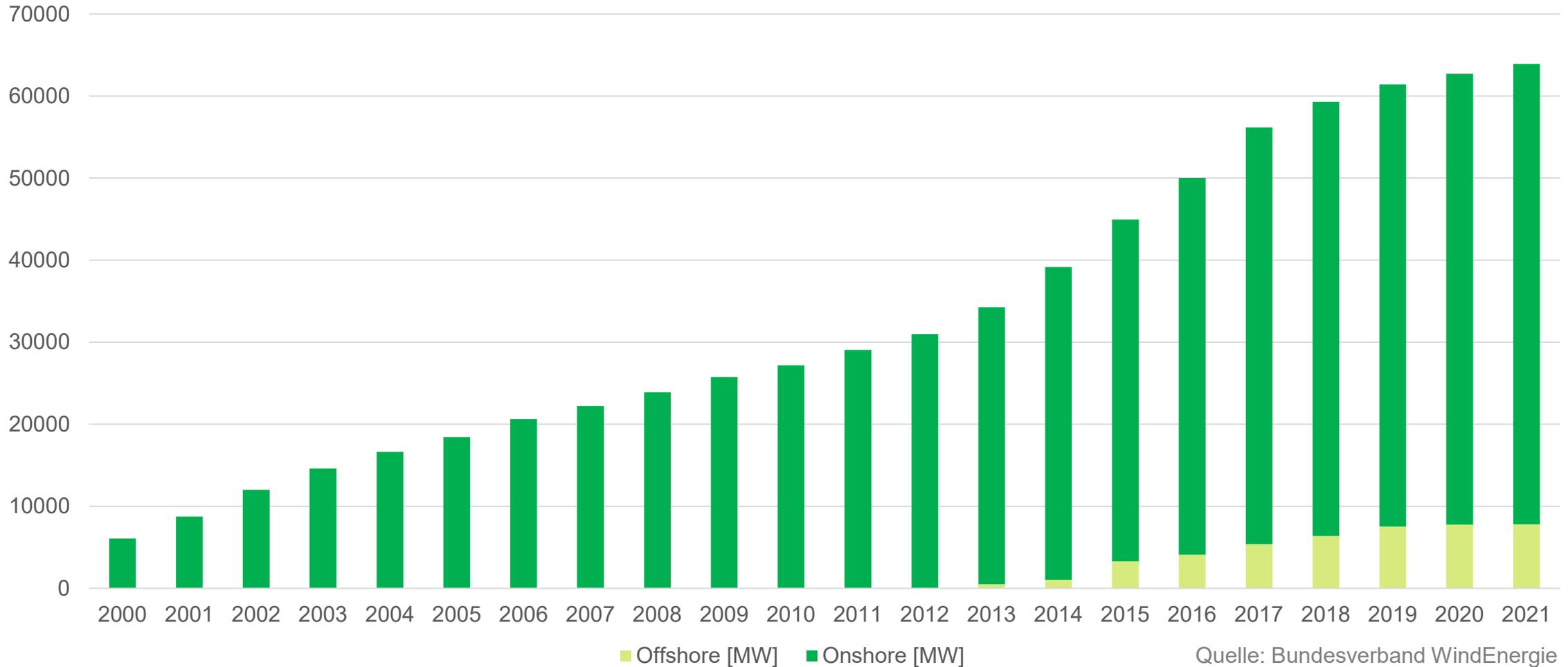


Quelle: BABS (2020)

# Energieeinspeisung aus Windkraft

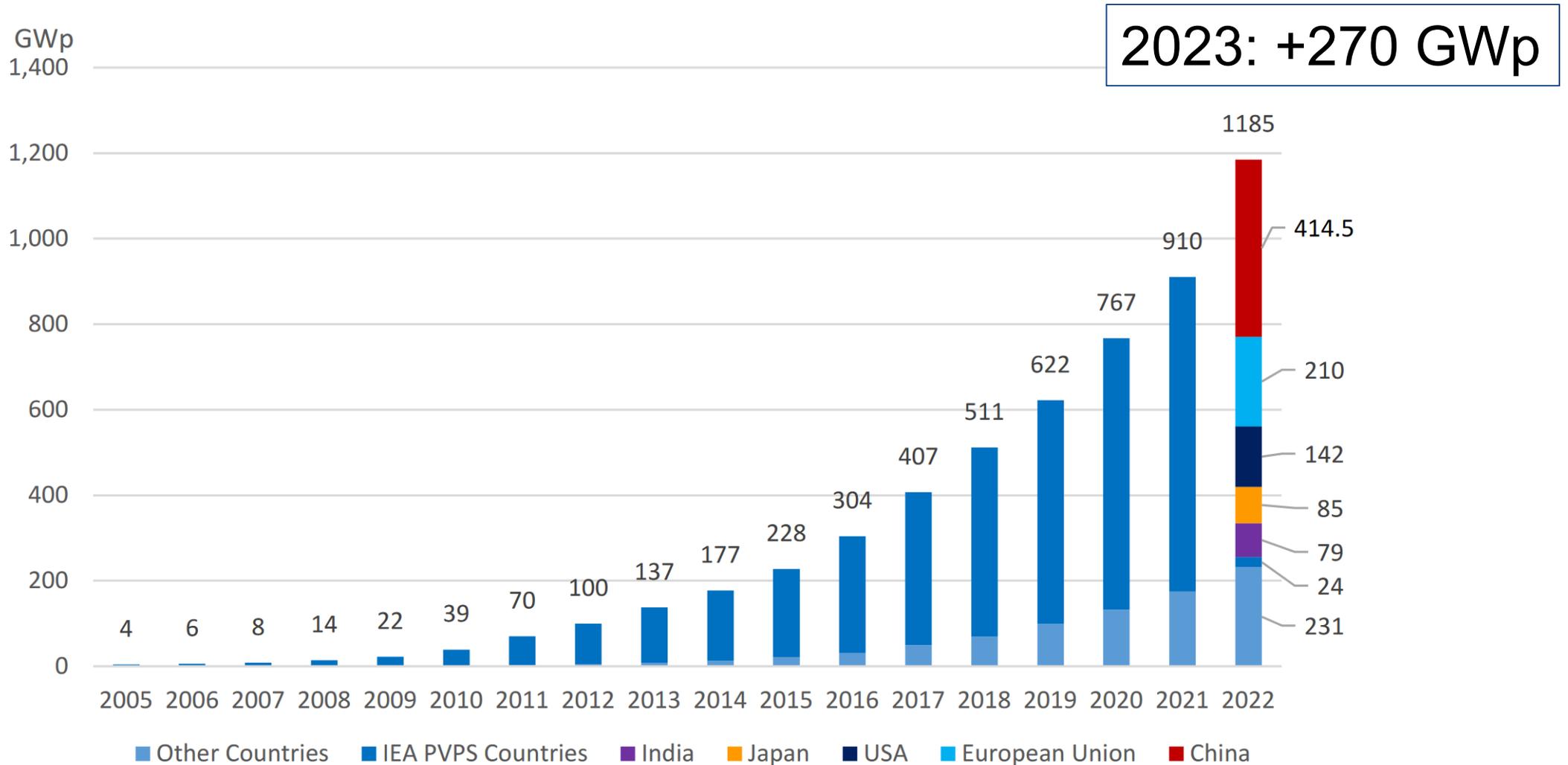
## Ausbau Windkraftanlagen in Deutschland 2000-2021

Entwicklung der installierten Windleistung (On- und Offshore)



# Energieeinspeisung aus Photovoltaik

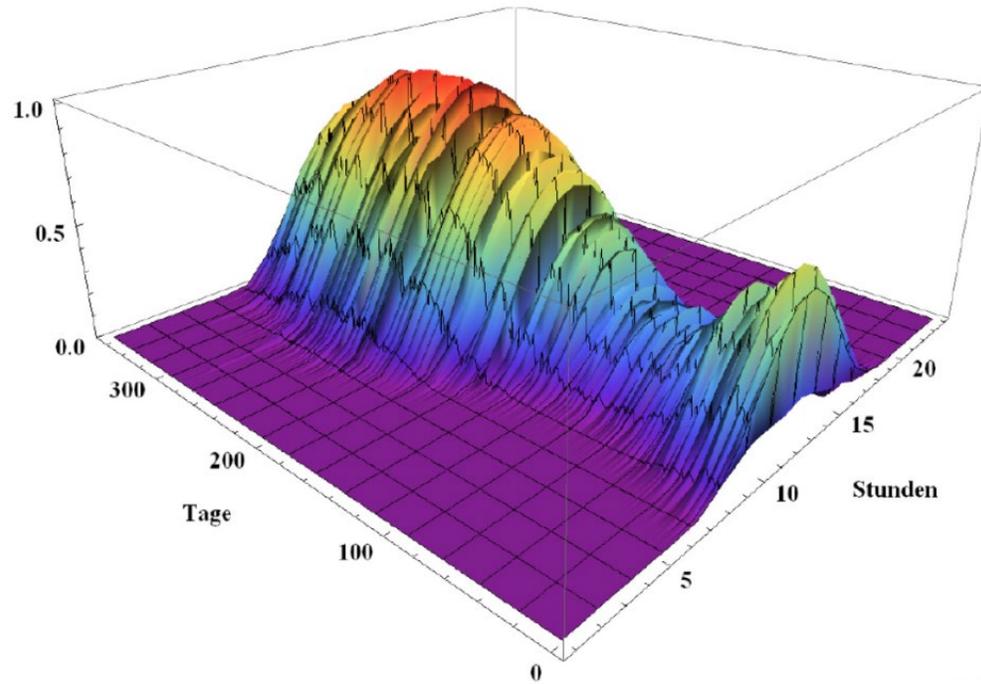
## Ausbau Solaranlagen weltweit von 2000 - 2022



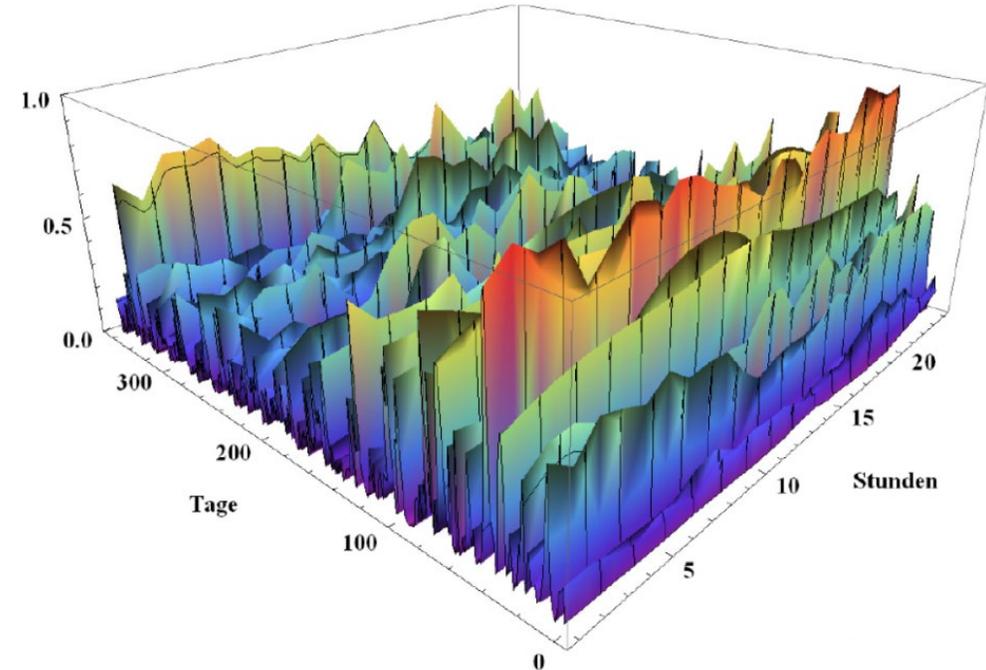
Source: IEA PVPS

# Volatilität der Energieeinspeisung aus Sonne und Wind

## Stromproduktion CH 2008



Sonne



Wind

Winter vs. Sommer  
Tag vs. Nacht

→ Energiespeicher

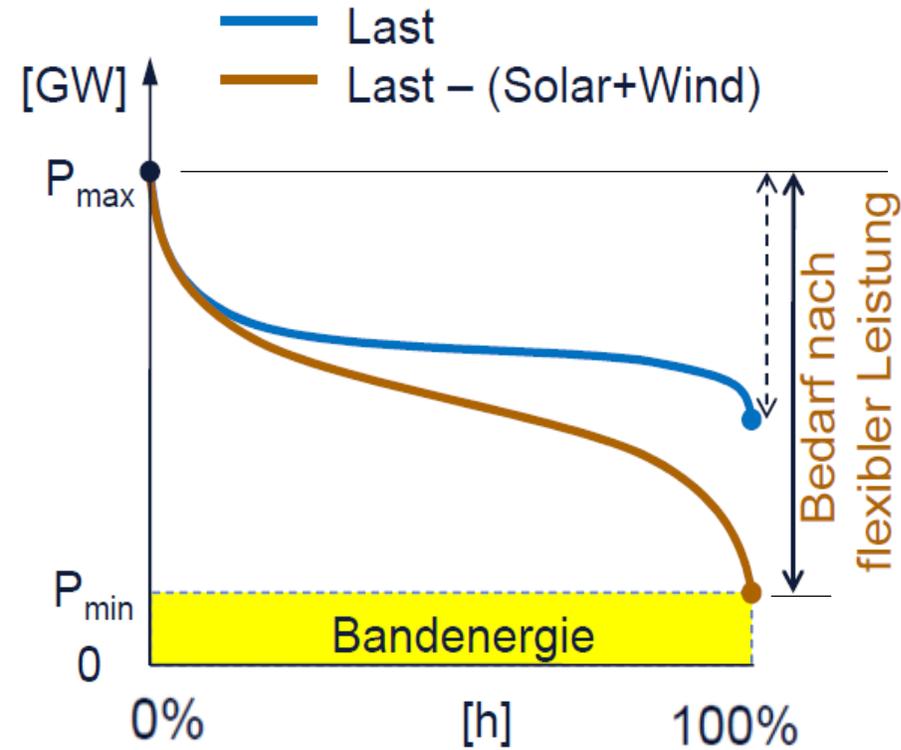
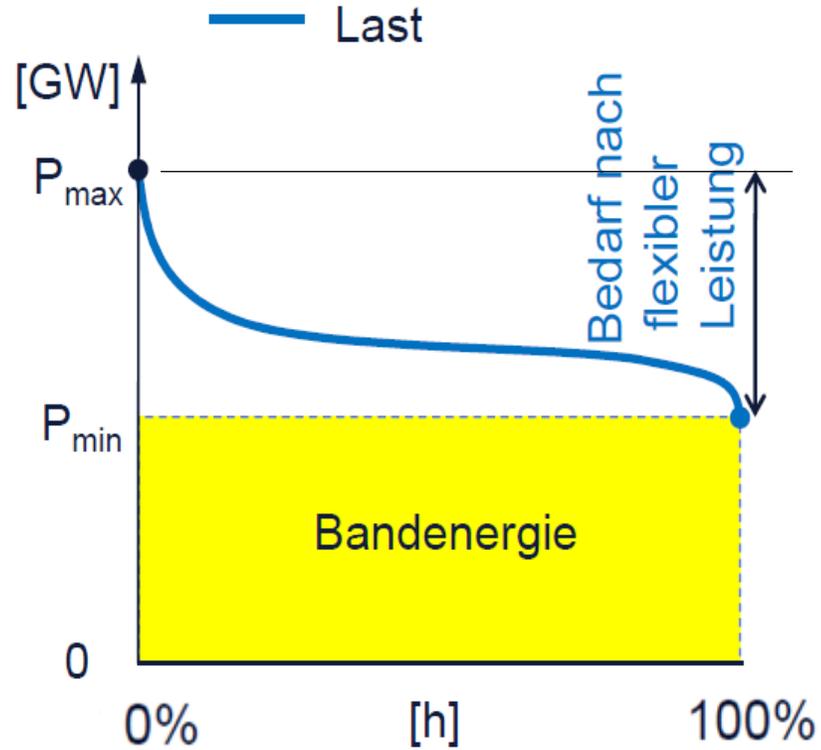
→ (Pump-)Speicherwasserkraft

→ Talsperren

Quelle: Prognos (2012)

# Zunahme des Bedarfs an flexibler Speicherkapazität

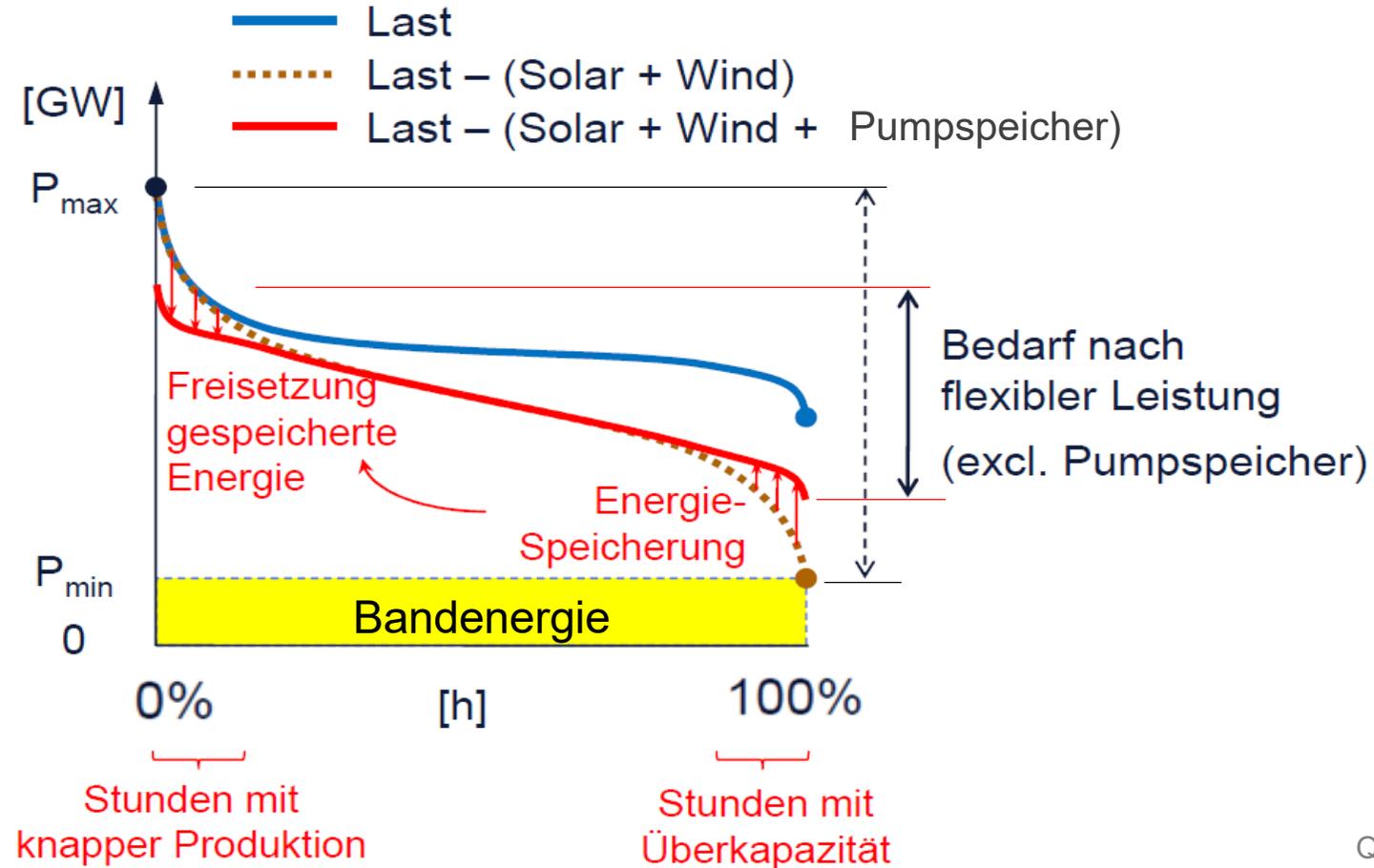
*Effekt der zunehmenden Integration erneuerbarer Energiequellen*



Quelle: Poncet, Alpiq (2012)

# Flexible Speichermöglichkeit: Pumpspeicherkraftwerke (PSW)

*Ausgleich von Energiedargebot und -bedarf*



Quelle: Poncet, Alpiq (2012)

# (Pump-)Speicherwasserkraft

*Sehr gute Regelbarkeit, große Flexibilität*

- **Schnelle Bereitstellung großer Leistungen** (Turbinenbetrieb)
- **Schnelle Aufnahme überschüssiger Leistungen** (Pumpbetrieb)

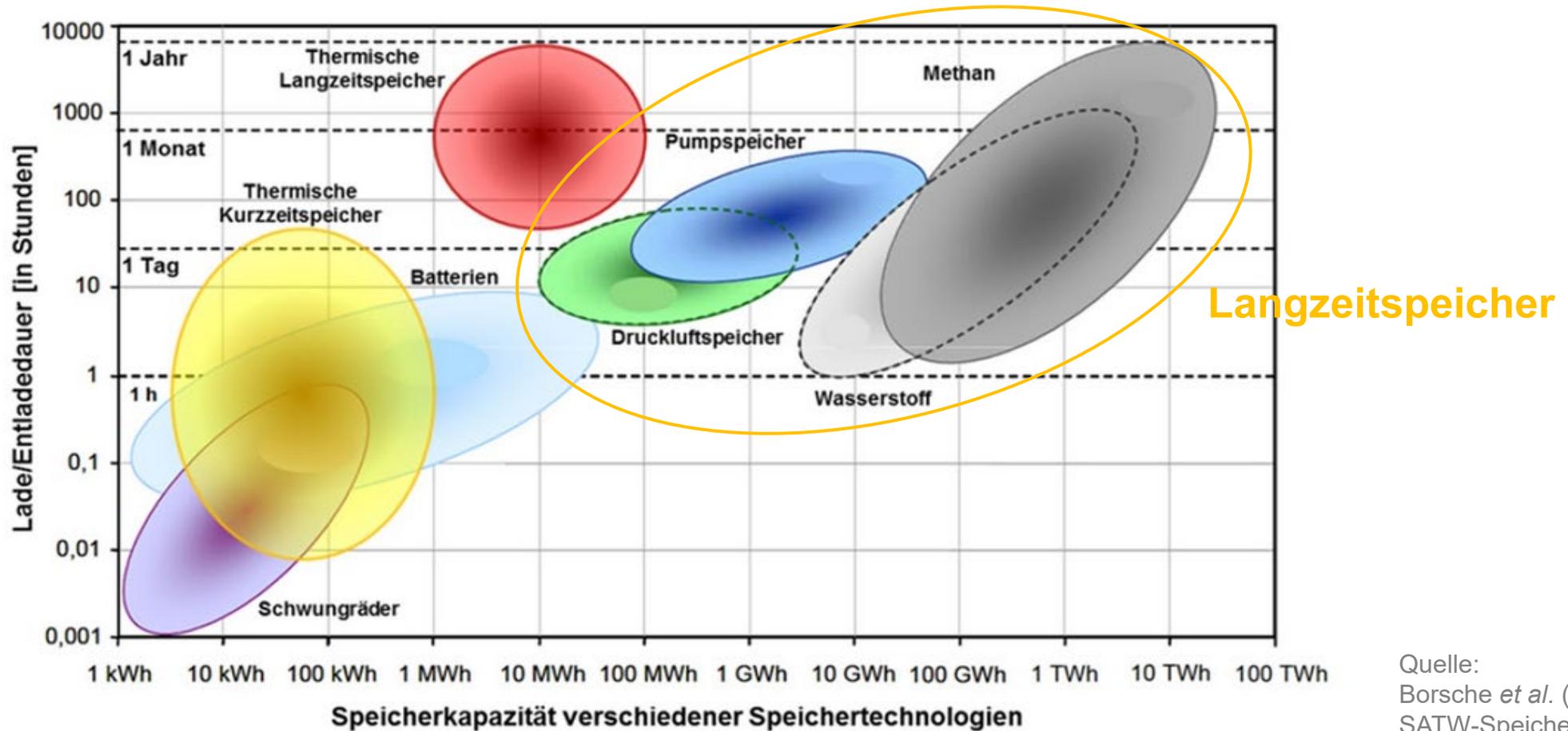
|  | Thermische Kraftwerke | Gasturbinen | Wasserkraft (Standard) | Wasserkraft (neue Technologie) |
|--|-----------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|
| Leistungsgradient (%/min)  | 2 - 4                 | 8 - 12      | 50 - 100               | 100% in < 30s                  |
| Minimallast (% von $P_N$ )   | 40                    | 40          | 40 (F), 20 (K,P)       | 0 - 5 (alle Typen)             |
| Anfahrzeit   | 2 - 5 h               | < 15 min    | < 10 min               | < 5 min                        |
| Reduktion der Lebensdauer (infolge vermehrter Lastwechsel, Teillast) | stark                 | stark       | merklich               | akzeptabel                     |

F: Francis, K: Kaplan, P: Pelton

Quelle: adaptiert von Sick, ANDRITZ Hydro (2013)

# Speicherkapazitäten und Lade-/Entladedauern

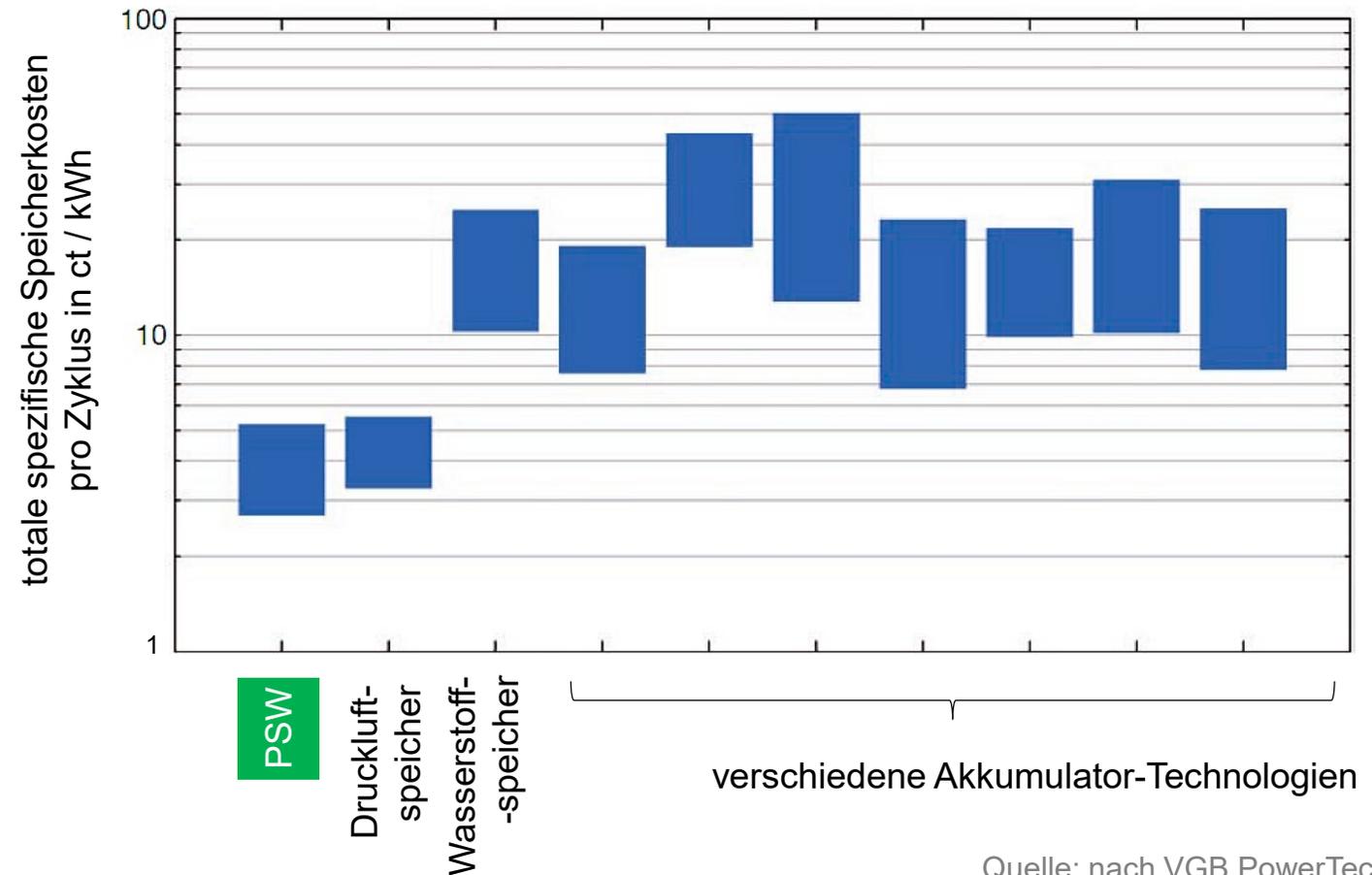
- **Großtechnisch** ausgereifteste Energiespeichertechnologie



Quelle:  
Borsche *et al.* (2016),  
SATW-Speicherstudie

# Spezifische Speicherkosten

- PSW derzeit grösste technisch ausgereifteste Energiespeichertechnologie
- PSW derzeit günstigste Speichertechnologie



Quelle: nach VGB PowerTech (2010)

# Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft

## Zwischenfazit

- **Schnelle Bereitstellung großer Leistungen** (Turbinenbetrieb)
- **Schnelle Aufnahme überschüssiger Leistungen** (Pumpbetrieb)
- **(meist) Saisonspeicher** für Umlagerung Sommer in Winter
- **Stunden-/Tagesspeicher** für Einlagerung überschüssiger Energie mit PSW
- **Großtechnisch** ausgereifteste Energiespeichertechnologie («**Batteriefunktion**»)
- **Derzeit günstigste Speichertechnik auf großen Skalen**
- **Größte und ausgereifteste Energiespeichertechnologie**
  - wichtig zur Integration der neuen Erneuerbaren im großen Umfang
  - 1 TWh flexible Wasserkraft ermöglicht den Bau von mind. 3.5 TWh intermittierender Wind- oder Solarenergie (EU Hydropower Alliance, 2023)
  - **Wegbereiter einer erfolgreichen Energiewende**



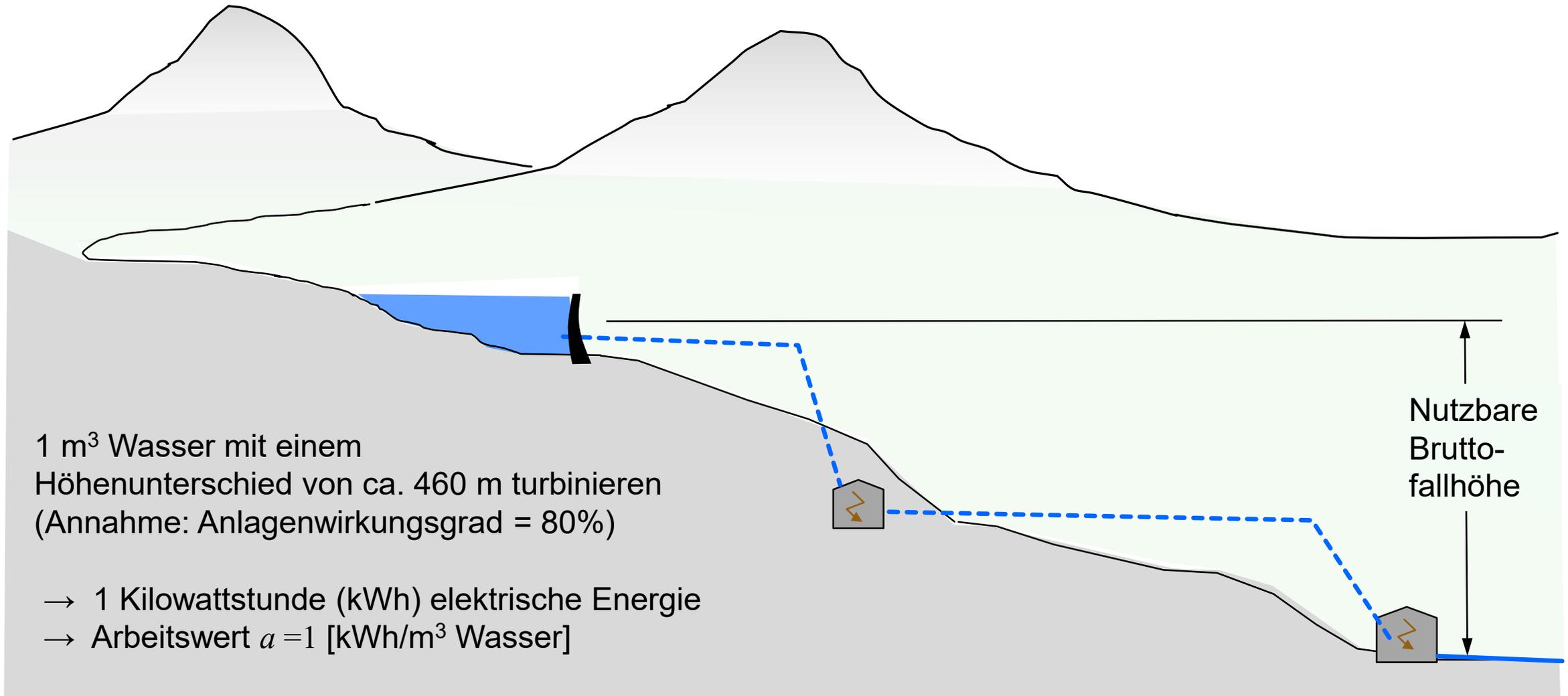
Foto: G. Favre (2023)

# Gliederung

## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

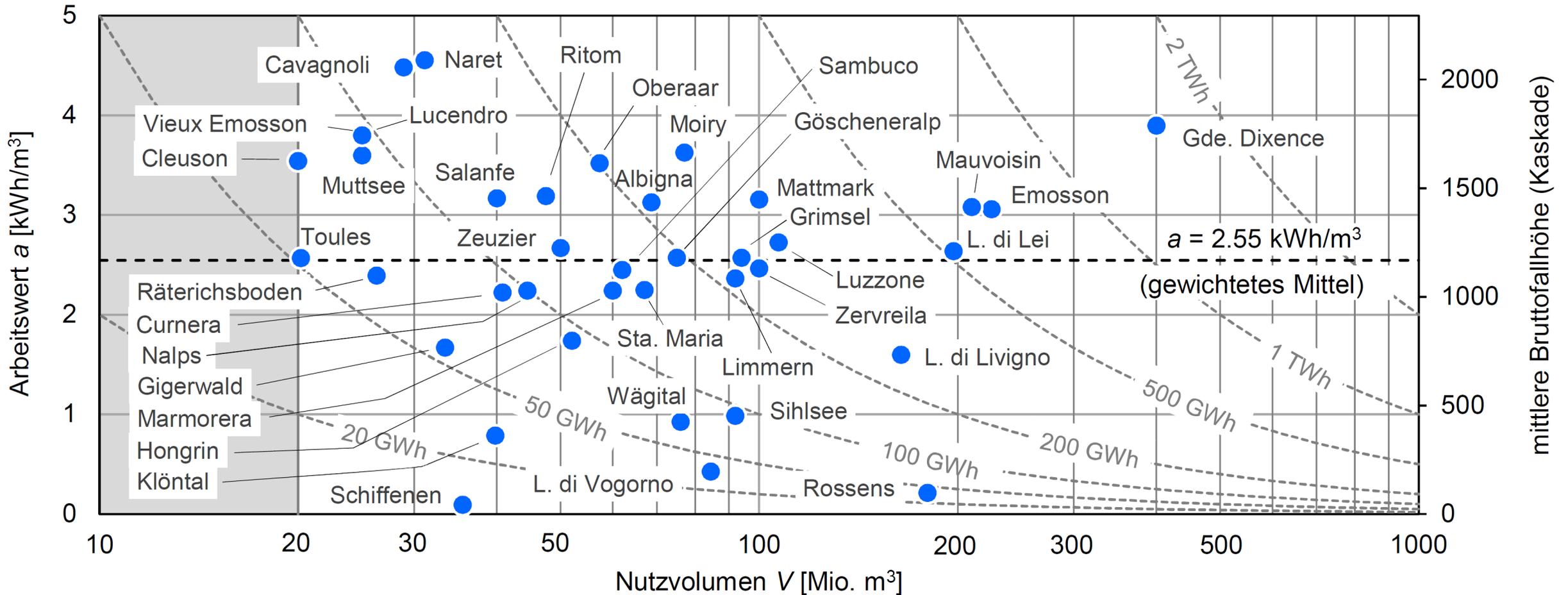
- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- **Talsperren für Wasserkraftspeicher**
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

# Stauseen als Energiespeicher



# Talsperren und Speicherwasserkraftwerke als «Grossbatterien»

## Bsp. Schweiz

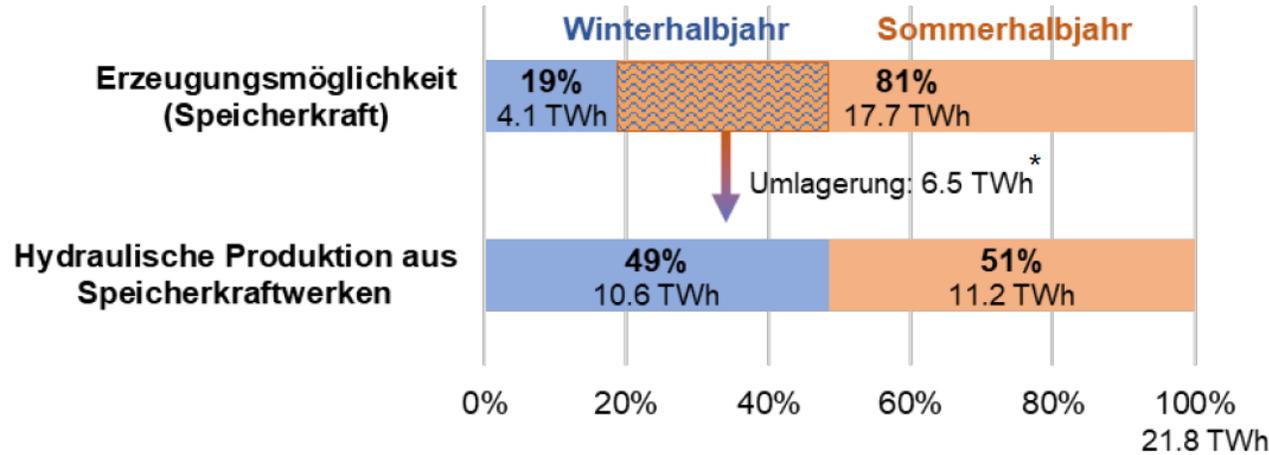


Quelle: Felix et al., Wasser, Energie, Luft, 2020, 1, 1-10

# Speicherwasserkraft

Nutzung der (Saison-)Speicher: Bsp. Schweiz

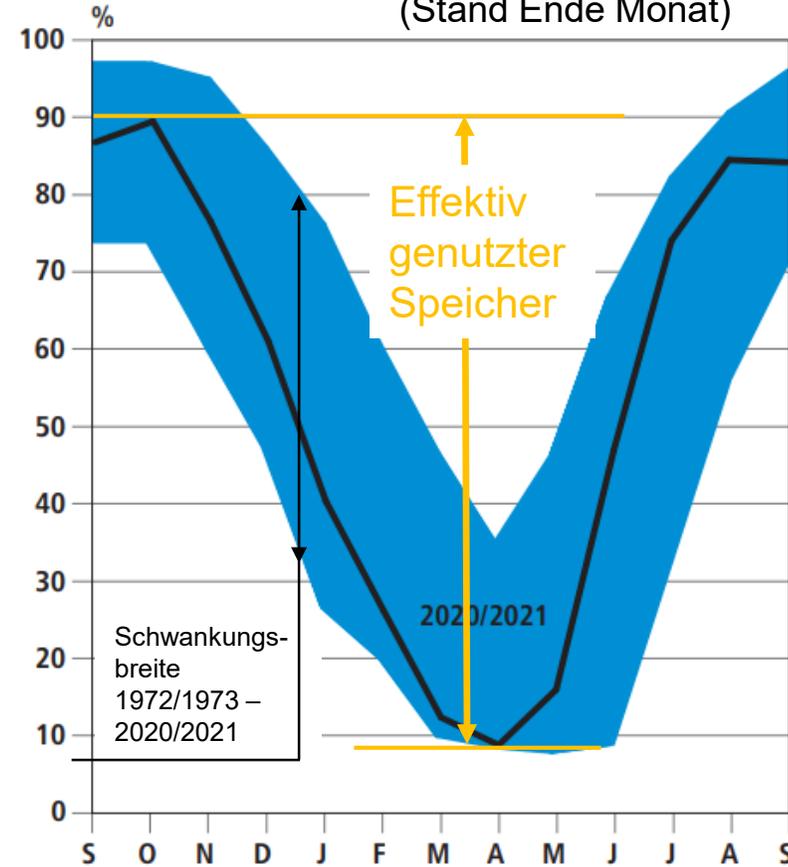
## Saison-/Jahresspeicher



Zeitraum 2011/12 - 2020/21,  
Datenquelle: Schweizerische Elektrizitätsstatistik BFE

## Speicherinhalt im Jahresverlauf

(Stand Ende Monat)

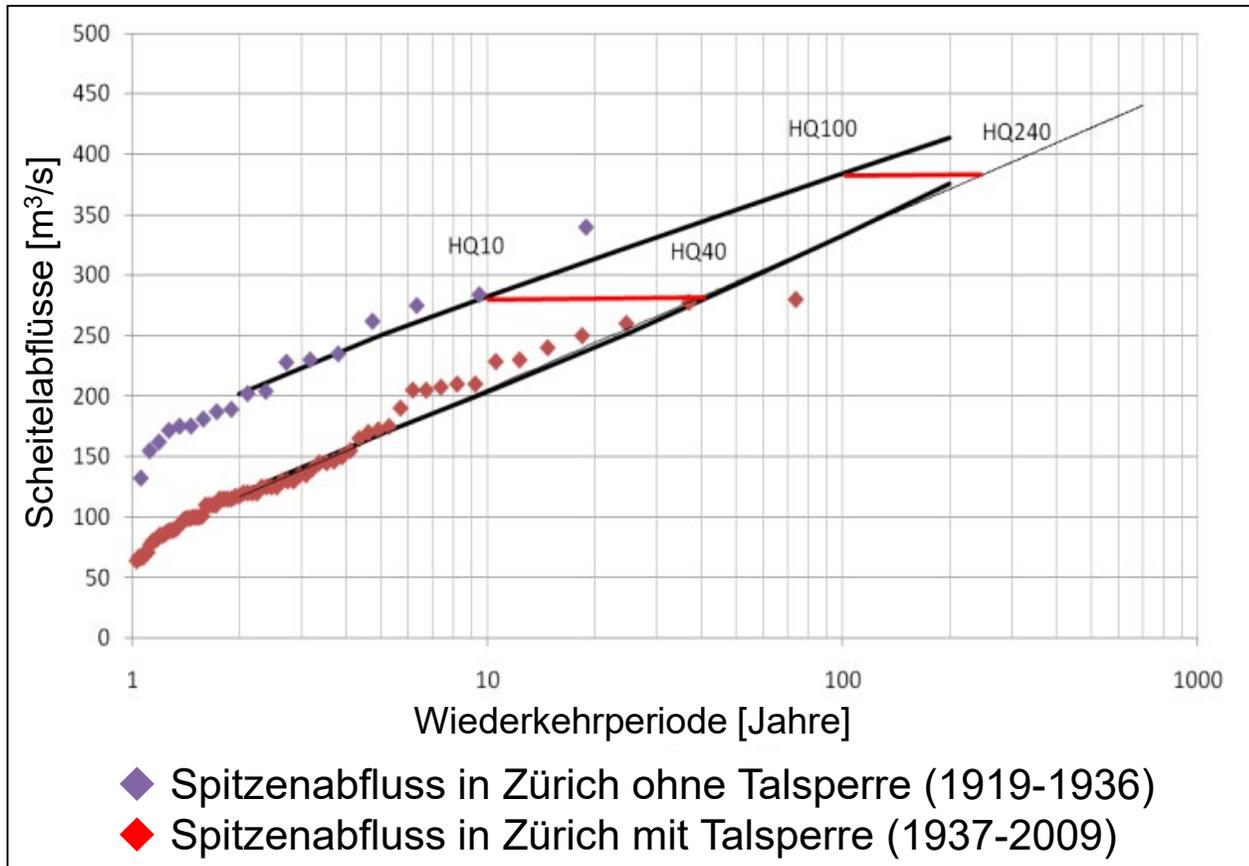


Quelle: BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021

# Talsperren – mehr als Energiespeicher

*Bsp. Hochwasserschutz*

auch reine Energiespeicher dämpfen Hochwasserabflüsse



Quelle: S. Speiser (2010), Projektarbeit, VAW, ETH Zurich

## Sihlsee (Kanton Schwyz, Schweiz)



Gewichtsstaumauer "In den Schlagen" (Foto: M. Fuchs)

# Talsperren als Mehrzweckspeicher

*Bsp. Hochwasserschutz*

bisher nur wenige Wasserkraft-Speicherseen mit offizieller Hochwasserschutz-Funktion



Speicher **Mattmark**  
(Kanton Wallis, Schweiz):

Hochwasserentlastungswehr wurde um 2 m angehoben zur Schaffung eines HW-Retentionsvolumens von 3.6 Mio. m<sup>3</sup>

Foto: Kraftwerke Mattmark AG

# Mehrzweckspeicher: Nutzungsarten

- **Energie:** Wasserkraft & PV-Anlagen
- **Hochwasserschutz**
- **Bewässerung**
- Trinkwasserversorgung
- Löschwasserversorgung
- Beschneigungswasser
- Freizeit & Tourismus
- Fischerei
- Ökologie



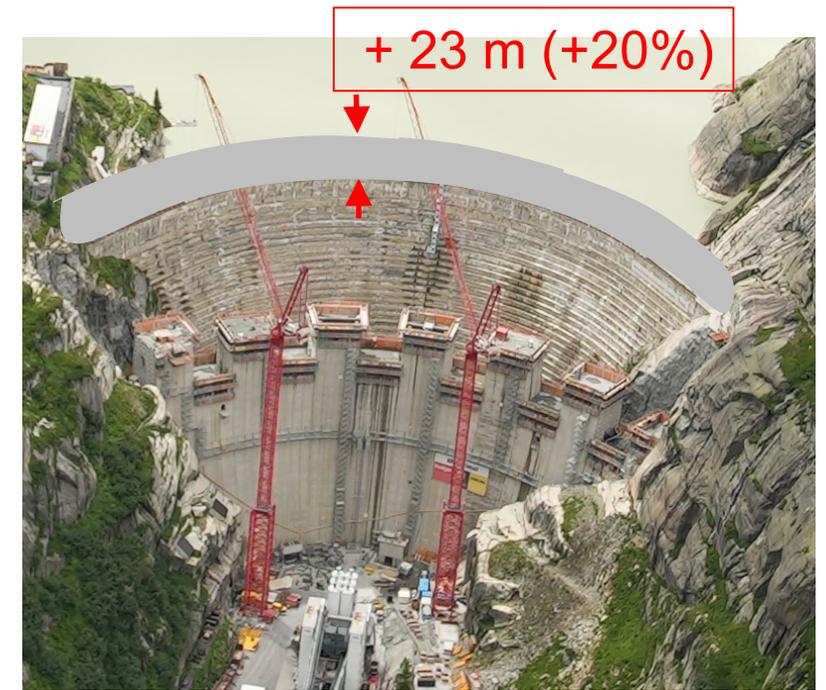
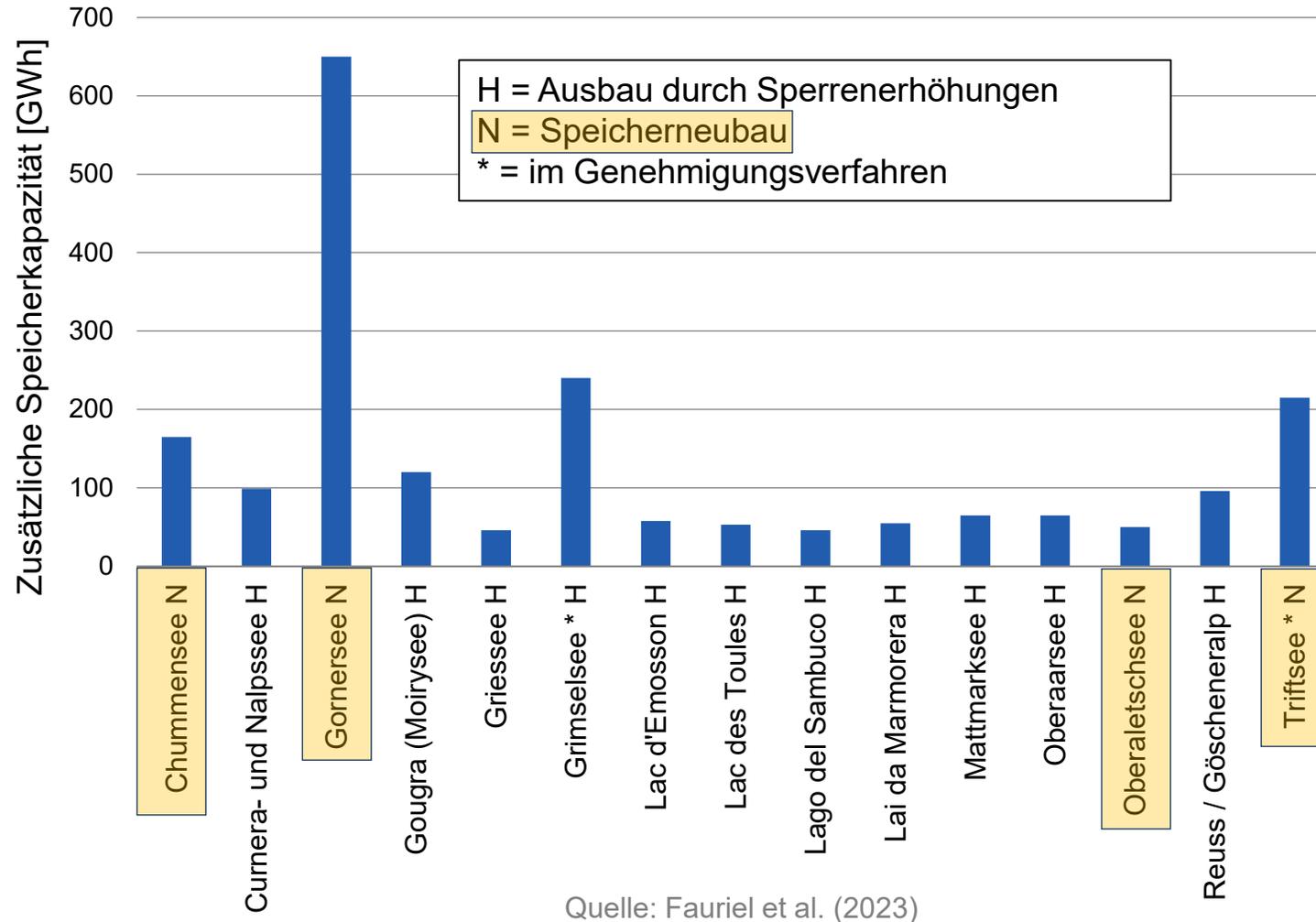
Foto:  
R. Neidhart, ewz



Foto:  
G. Favre (2023)

# Ziele CH: 15 prioritäre Projekte des «Runden Tisch Wasserkraft»

## +2 TWh (+ ca. 25 %) durch Aus- und Neubauten



Talsperre Spitalamm/Grimsel  
 (Kanton Bern) (Foto: R. Boes, 2019)

# Gliederung

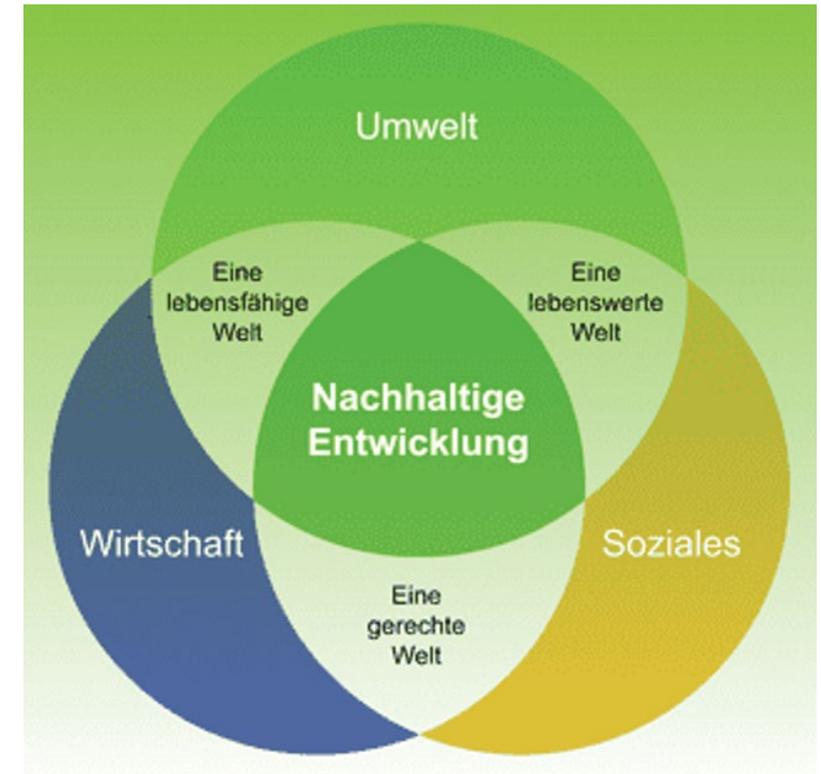
## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Talsperren für Wasserkraftspeicher
- **Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft**
- Zusammenfassung

# Herausforderungen

## *Wasserkraft und Nachhaltigkeit*

- **Gesellschaft / Soziales**
  - Akzeptanz («Floriani-/NIMBY-Prinzip»)
  - Konflikte um die Nutzung von Wasserressourcen
  - Partikularinteressen (z.B. Energie vs. Tourismus)
  - ...
- **Ökonomie / Wirtschaft**
  - Lange Genehmigungsverfahren
  - Sehr kapitalintensiv
  - Lange Amortisationszeiten
  - Auswirkungen des Klimawandels immer noch unsicher
  - ...



Quelle: <https://thesustainablepeople.com/das-drei-saeulen-modell-der-nachhaltigkeit/>

# Herausforderungen

## Wasserkraft und Nachhaltigkeit

- **Ökologie / Umwelt:**

Wasserkraft und Talsperren können sich negativ auf die Wasserführung und die aquatischen Ökosysteme von Fließgewässern auswirken:

- Hydrologie

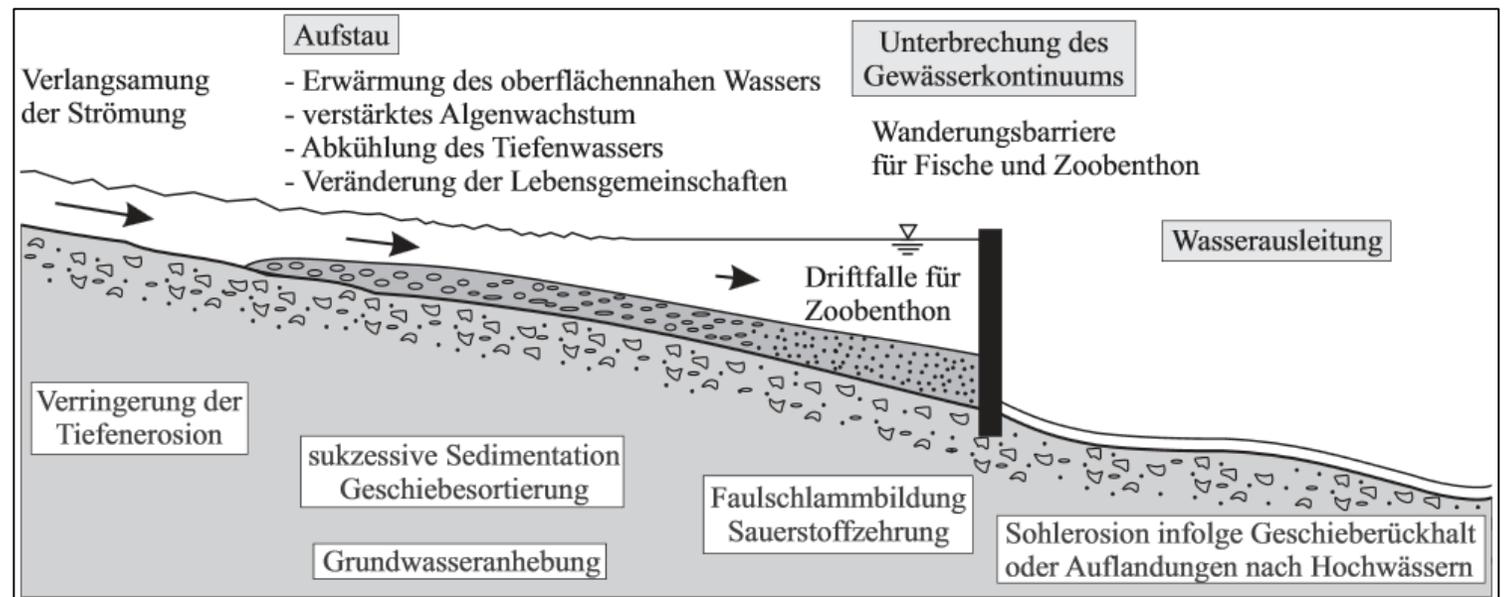
- Ggf. Restwassermengen
- Änderungen Abflussregime
- Auswirkungen auf Hydrographen:
  - großräumige saisonale Abflussverlagerungen
  - ggf. Schwall/Sunk bzw. sog. *Thermopeaking*

- Barrierewirkungen

- Sedimente
- Fischfauna

*Auswirkungen von Stauanlagen und Talsperren auf grundlegende biophysikalische Prozesse in Flüssen*

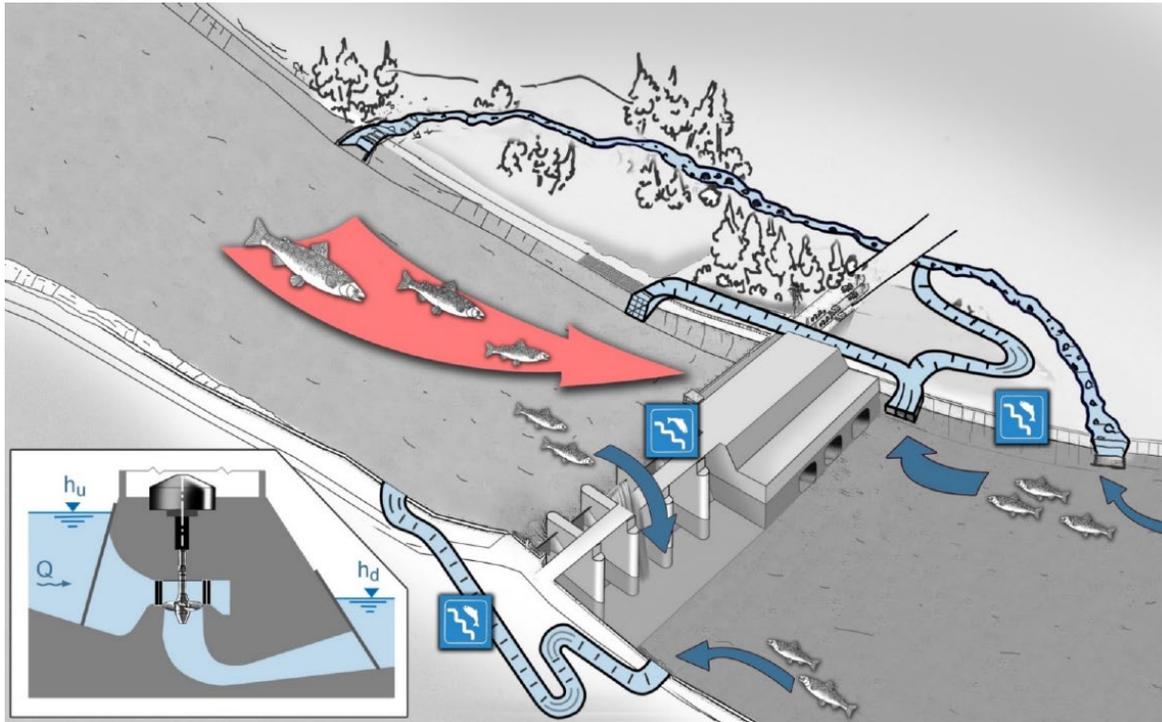
Quelle: nach Jorde (1996) in Giesecke et al. (2014)



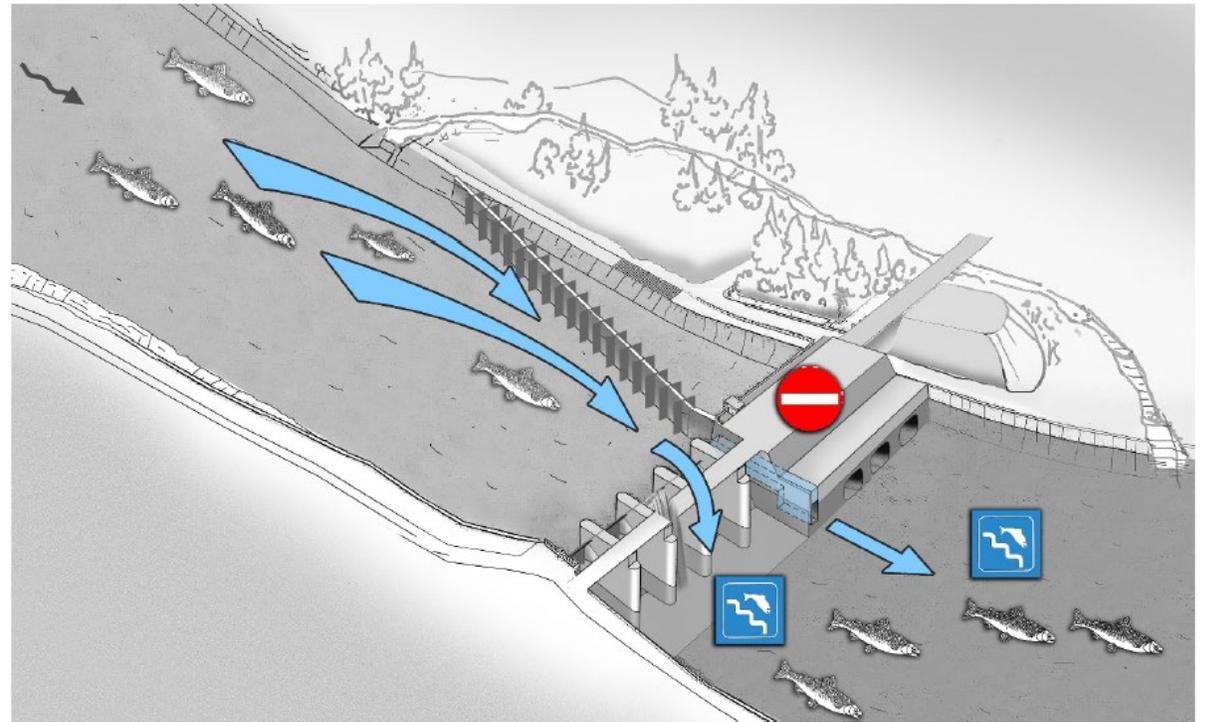
# Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

*Bsp. Fischschutz und Fischabstieg*

ohne Maßnahmen: hohe Wahrscheinlichkeit von Turbinenpassagen



Gegenmaßnahme:  
Fischleitrechen-Bypass-System



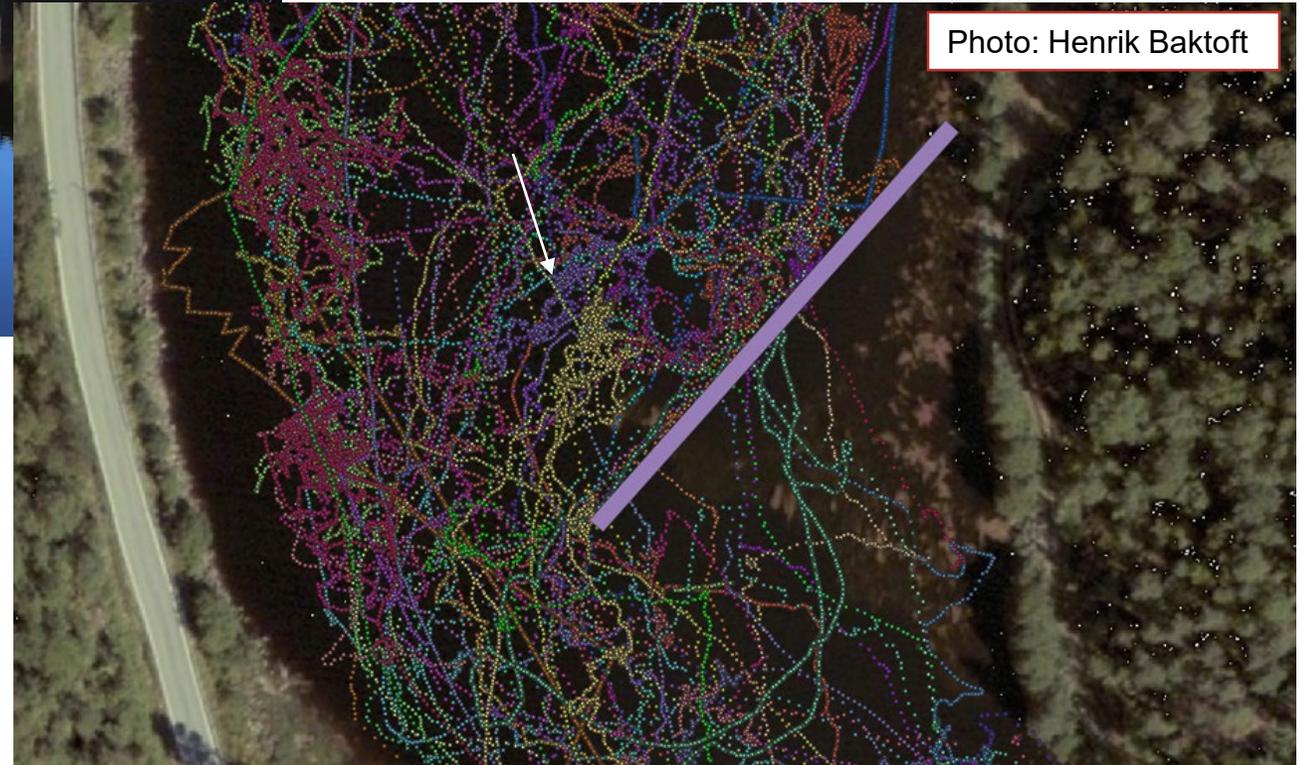
# Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

*Bsp. Fischschutz und Fischabstieg*

## Fischleitrechen am Fluss Mandal (Norwegen)



Pilotanlage eines MBR-Fischleitrechens für Lachse am Kraftwerk Laudal



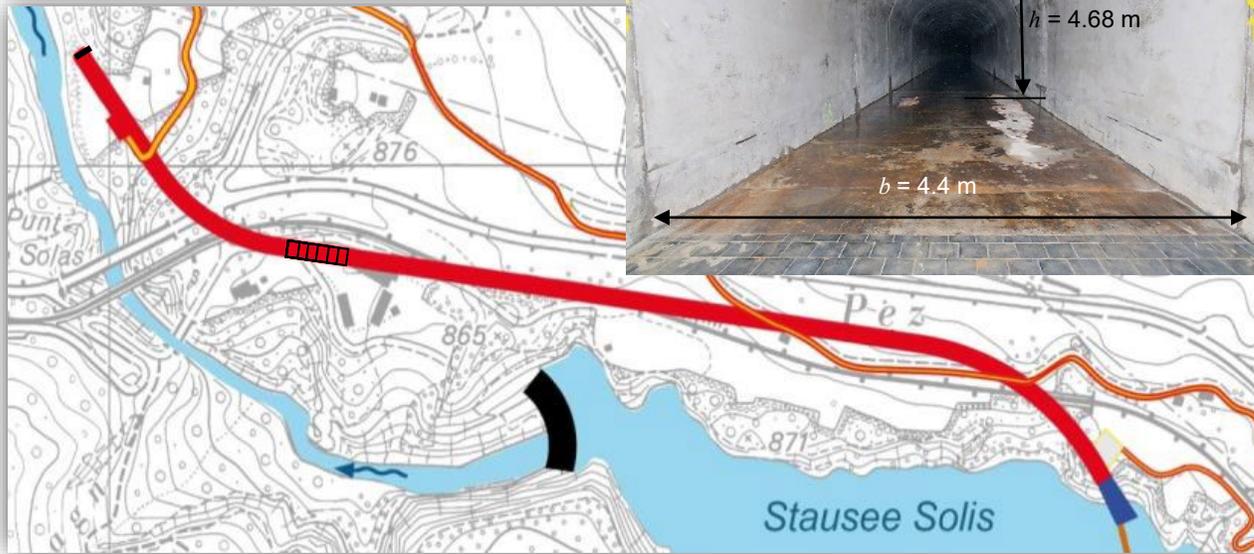
Quelle:  
<https://storymaps.arcgis.com/stories/f9e8c4ff1c8849fb874176adbb17fb0b>

# Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

Bsp. Wiederherstellung des Geschiebe-/Sedimentkontinuums

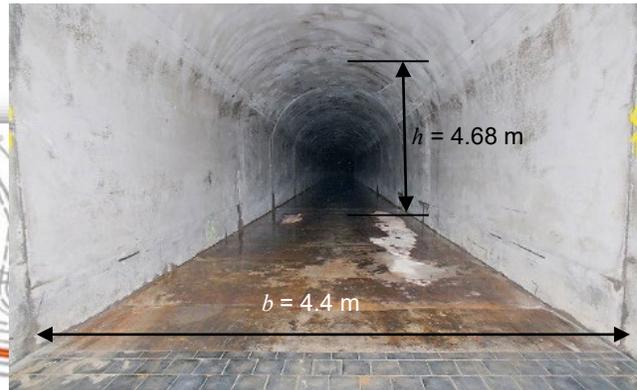
## Sedimentumleitstollen Solis (Kanton Graubünden, Schweiz)

Grundriss



Quelle: ewz

Querschnitt



Auslaufbauwerk



Quelle: VAW

# Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

Bsp. Wiederherstellung des Geschiebe-/Sedimentkontinuums

**Stauraumverlandung**

Nutzvolumen

- Verringerung des Absetzens (Erhöhung der Turbulenz, z. B. durch Wasser- oder Luftstrahlen)

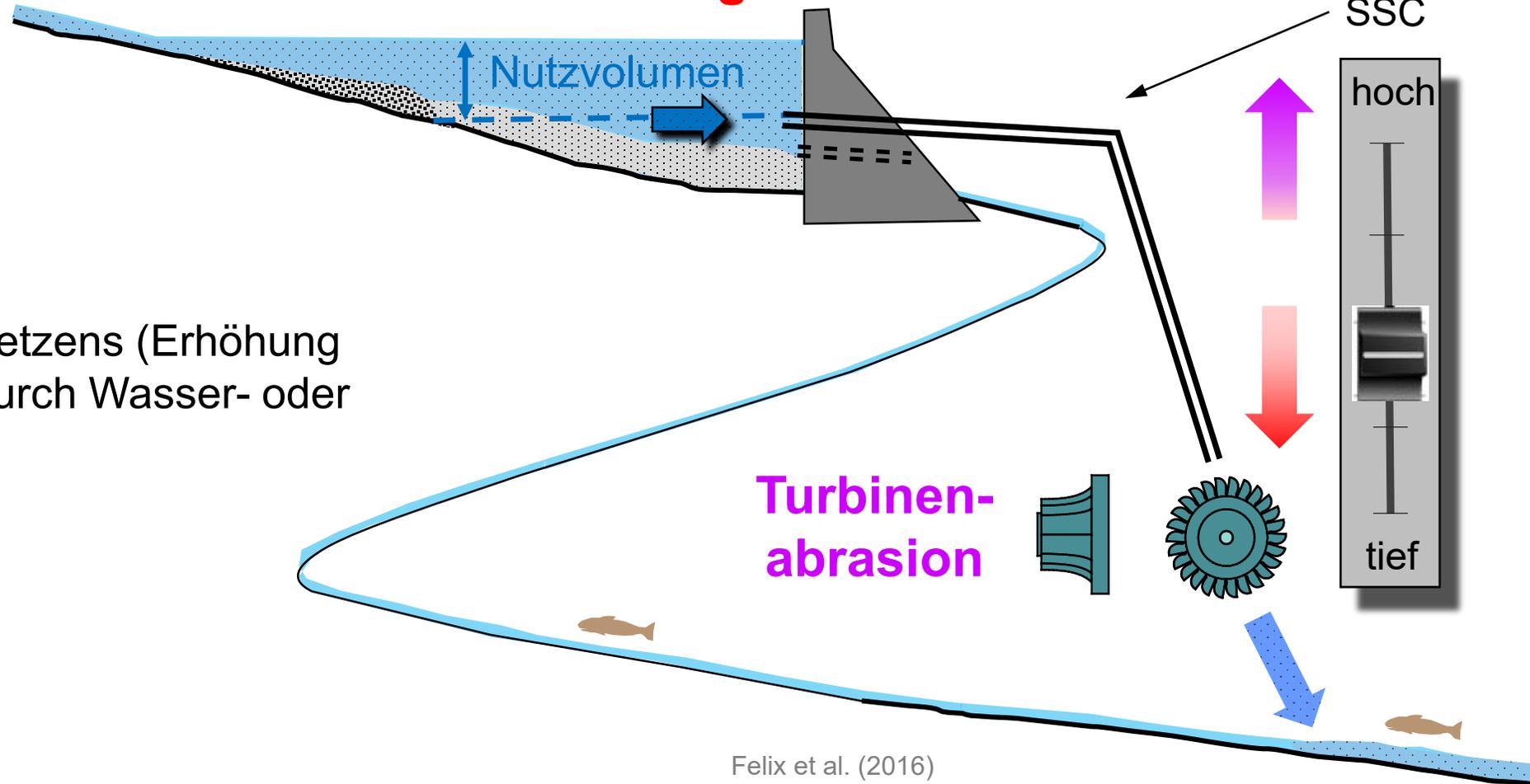
**Turbinen-  
abrasion**

SSC

hoch

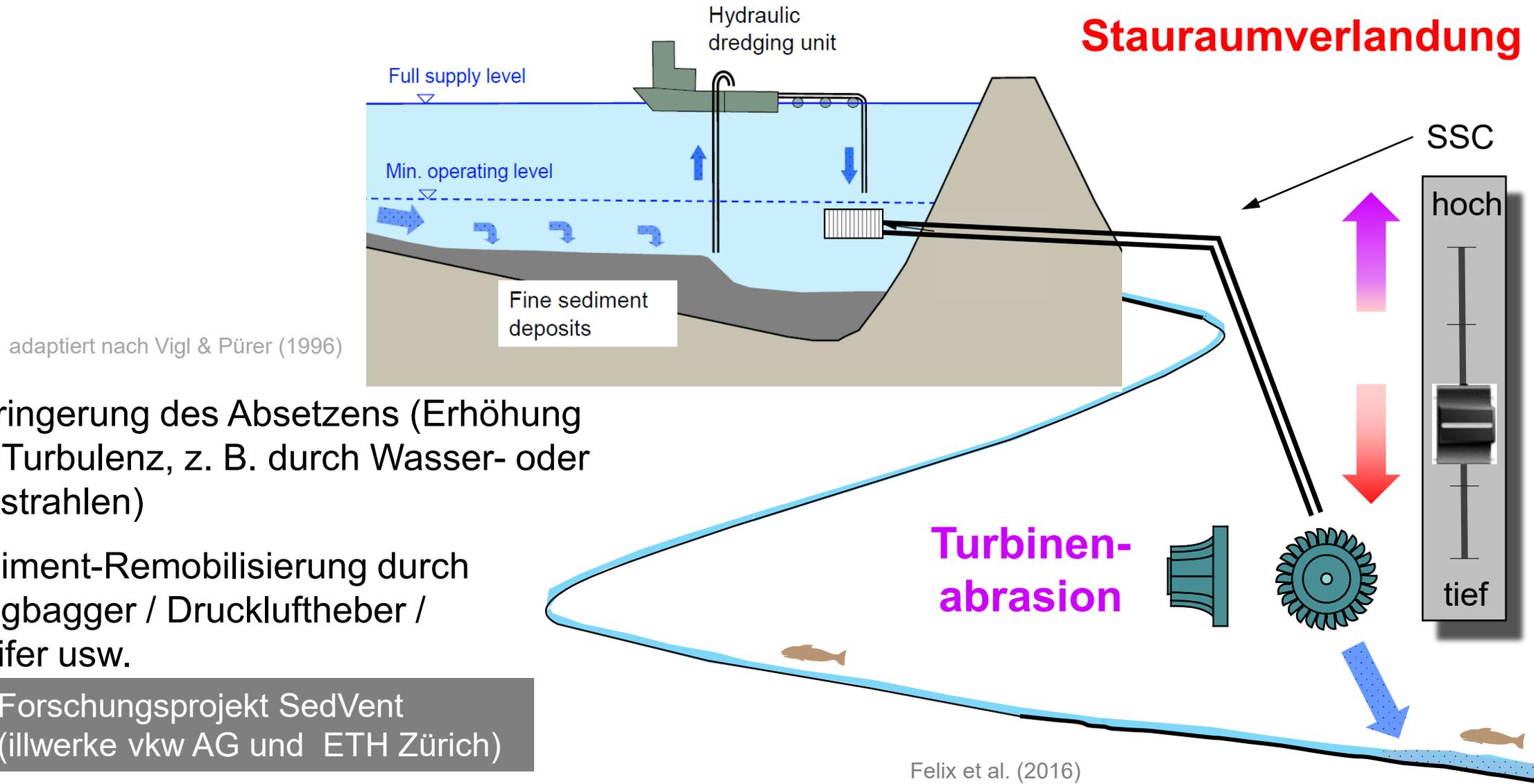
tief

Felix et al. (2016)



# Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

Bsp. Wiederherstellung des Geschiebe-/Sedimentkontinuums



- Verringerung des Absetzens (Erhöhung der Turbulenz, z. B. durch Wasser- oder Luftstrahlen)
- Sediment-Remobilisierung durch Saugbagger / Druckluftheber / Greifer usw.

→ Forschungsprojekt SedVent  
(Illwerke vkw AG und ETH Zürich)

# Zusammenfassung

- **Wasserkraft (WK)** ist eine **klimafreundliche, effiziente, flexible und speicherbare Energiequelle**
- Sie ist **wichtigste erneuerbare Energiequelle in den Alpen und weltweit**
- **(Pump-)Speicher-WK** ist auf großen Skalen die aktuell **ausgereifteste und günstigste Energiespeichertechnologie**
- Talsperren sind sehr bedeutend für die **Energieversorgung** und die **Wasserwirtschaft**, insbesondere bei sich wandelndem Klima
- **WK hat negative Auswirkungen auf aquatische Ökologie**, u.a. durch Unterbrechung des Kontinuums für Sediment und Gewässerorganismen
- Neuartige Lösungen aus F&E helfen, diese **negativen Umweltauswirkungen abzumildern**
- Die **WK** spielt eine **zentrale Rolle für eine erfolgreiche Energiewende**



**Danke für die  
Aufmerksamkeit!**