

# Die Rolle und das Potential der Wasserkraft für die Energiezukunft

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



# Gliederung

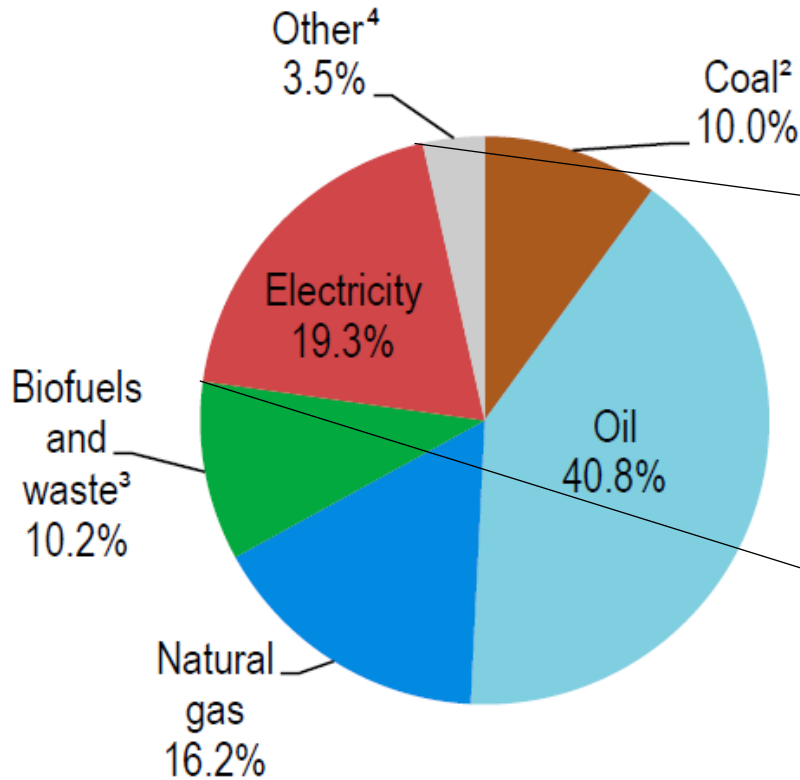
## *Die Rolle und das Potential der Wasserkraft für die Energiezukunft*

- Rolle der Wasserkraft auf verschiedenen Skalen
- Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft
- Versorgungssicherheit, Speicher und Potential
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Auswirkungen Klimawandel
- Zusammenfassung

# Rolle der Wasserkraft weltweit

Gesamtenergie, Elektrizität und Wasserkraftanteil (Stand 2020/21)

Gesamtenergieverbrauch nach Quelle

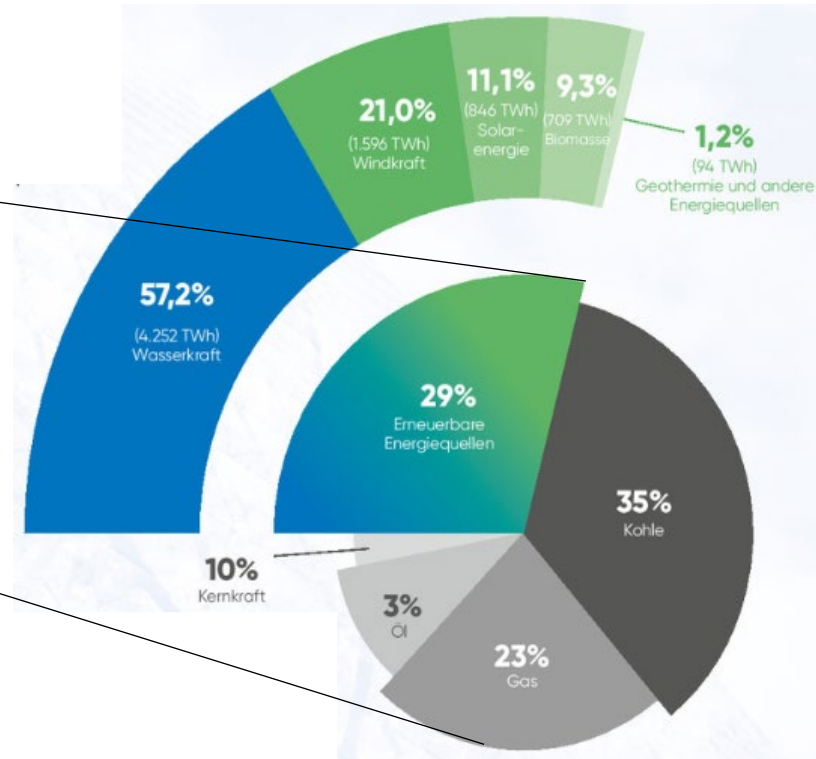


Quelle: IEA, World Energy Balances, 2020

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

1) million tonnes of oil equivalent

Anteil an Elektrizitätserzeugung



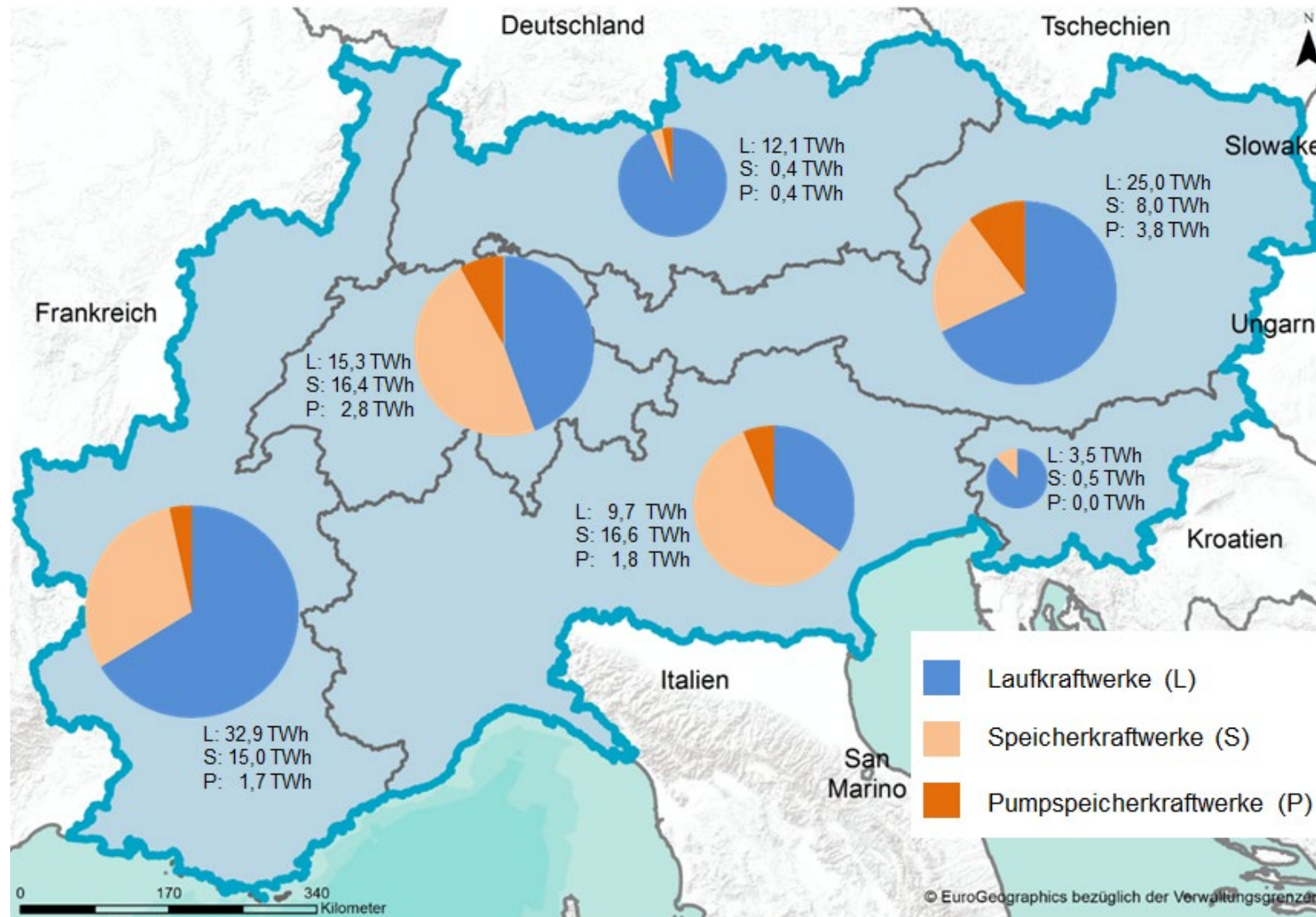
Quelle: IEA, World Energy Outlook 2021

**25'850 TWh**

→ Wasserkraft ist weltweit bedeutendste erneuerbare Energieform

# Rolle der Wasserkraft im Alpenraum

## 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 %

# Rolle der Wasserkraft und Kraftwerkspark Schweiz

- Anteil der Elektrizität an Gesamtenergie: 27% (2022) → 38-46% in 2050 (Anderson et al. 2011)
- Aktuell ~1550 WKA in der Schweiz (SCCER-SoE 2020)
- Wasserkraft zeitweise 100%, heute noch knapp 60% der Produktion
- **~90/10-Regel** zum Kraftwerkspark:
  - **89% der Produktion stammen von 12% der Anlagen ( $P > 10$  MW)**
  - 97% der Produktion stammen von 27% der Anlagen ( $P > 1$  MW)
  - 0.8% der Produktion stammen von 57% der Anlagen (WKA mit  $P < 300$  kW)
- Wertschöpfung ~3 Mrd. CHF pro Jahr und 5'000 Vollzeitstellen



WKA Eglisau

Quellen:  
Stettler (2014),  
SWV (2016)

# Gliederung

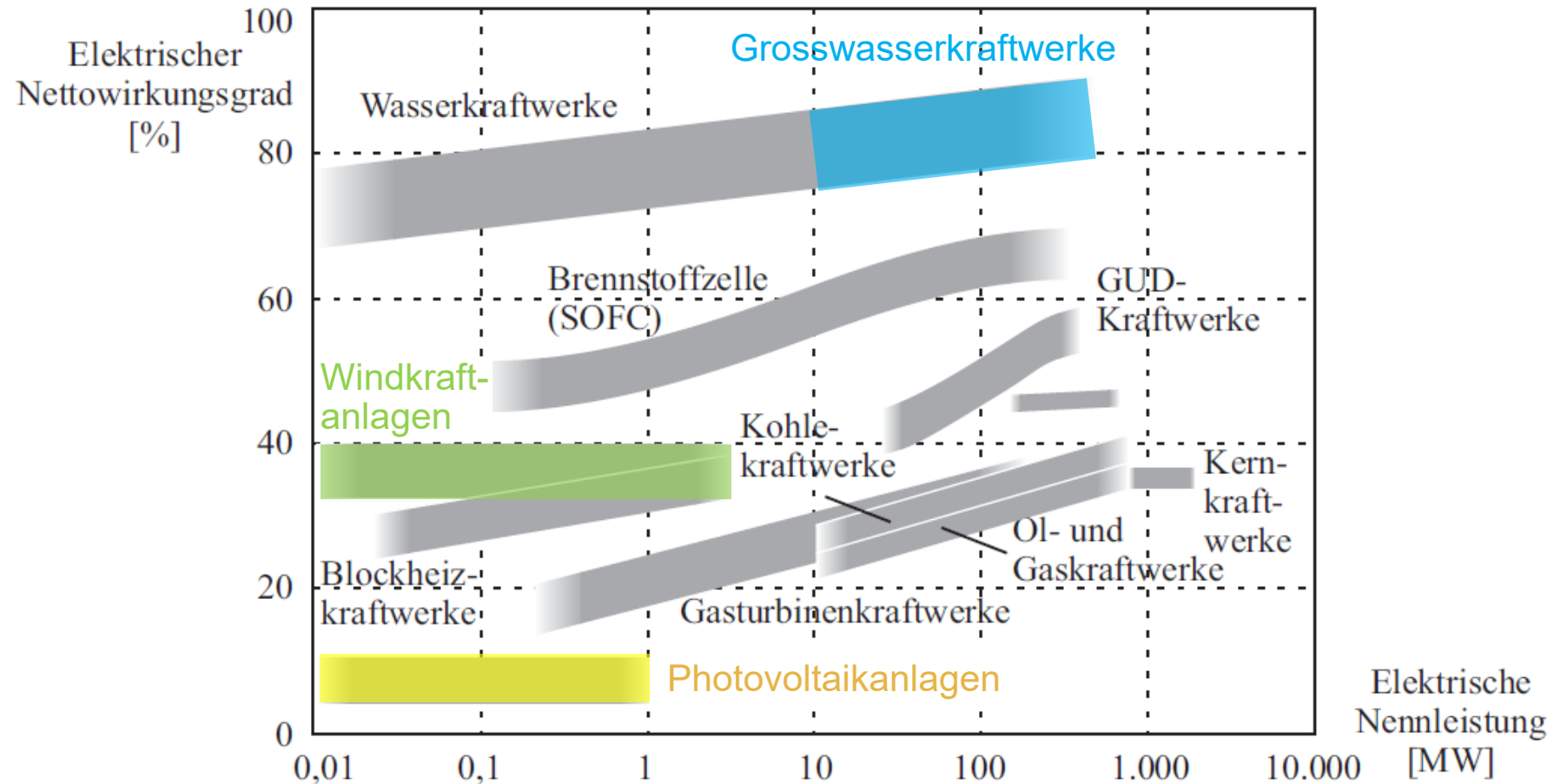
## *Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende*

- Rolle der Wasserkraft auf verschiedenen Skalen
- **Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft**
- Versorgungssicherheit, Speicher und Potential
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Auswirkungen Klimawandel
- Zusammenfassung

# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Energieeffizienz

- **Nettowirkungsgrade** in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung



Quelle: Giesecke et al. (2014)

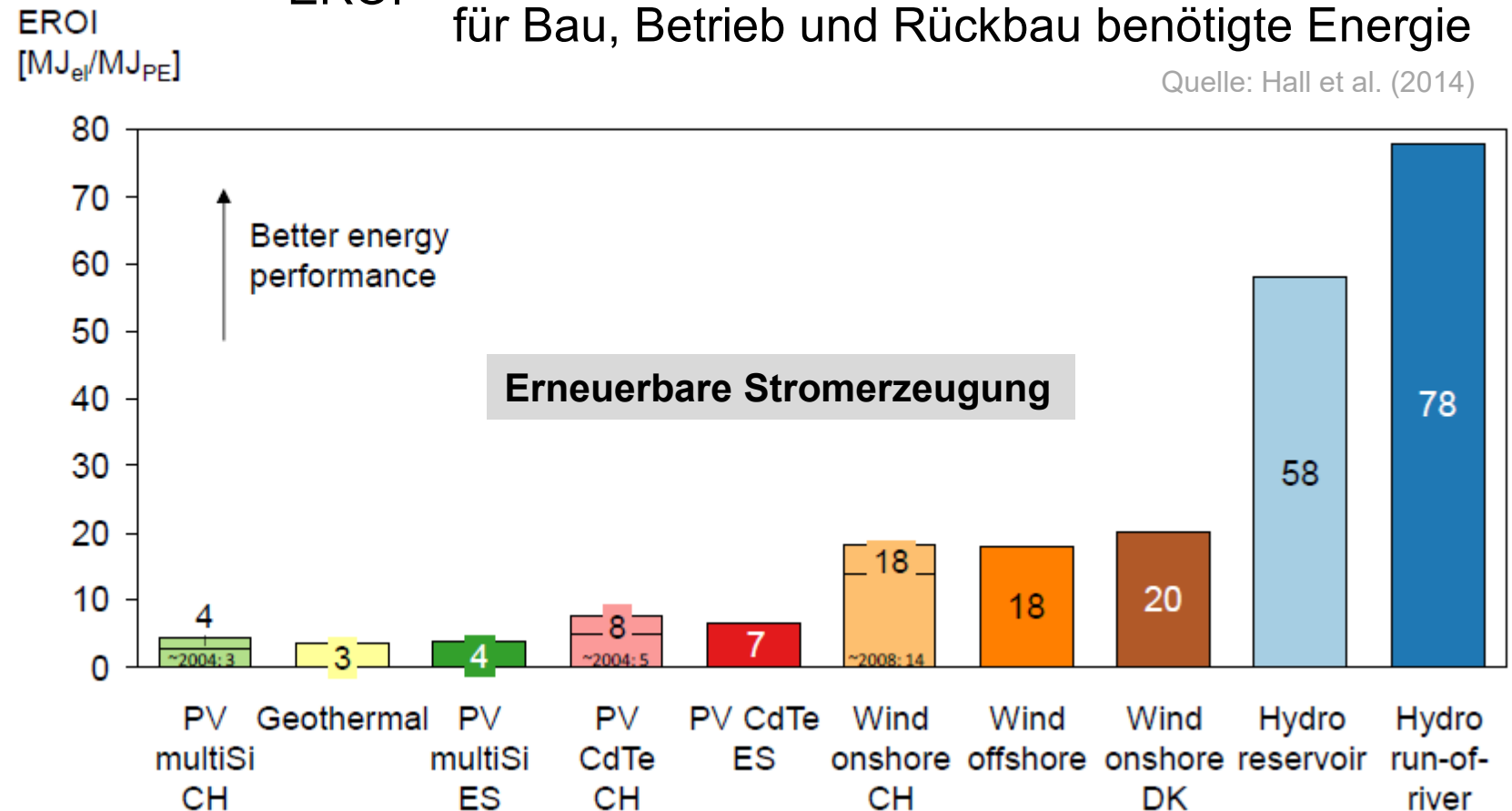
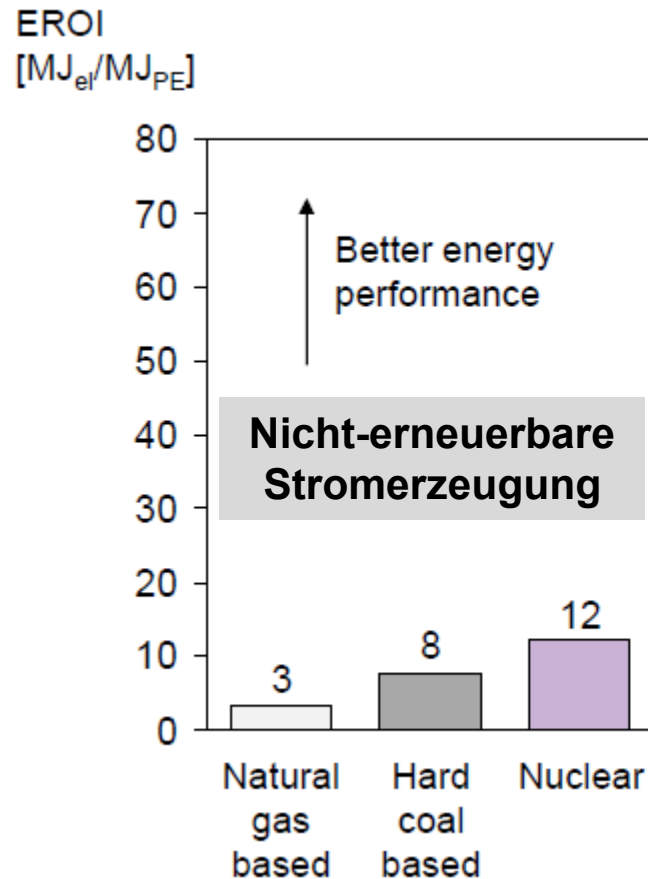
# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Energieausbeute Produktion

- **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)

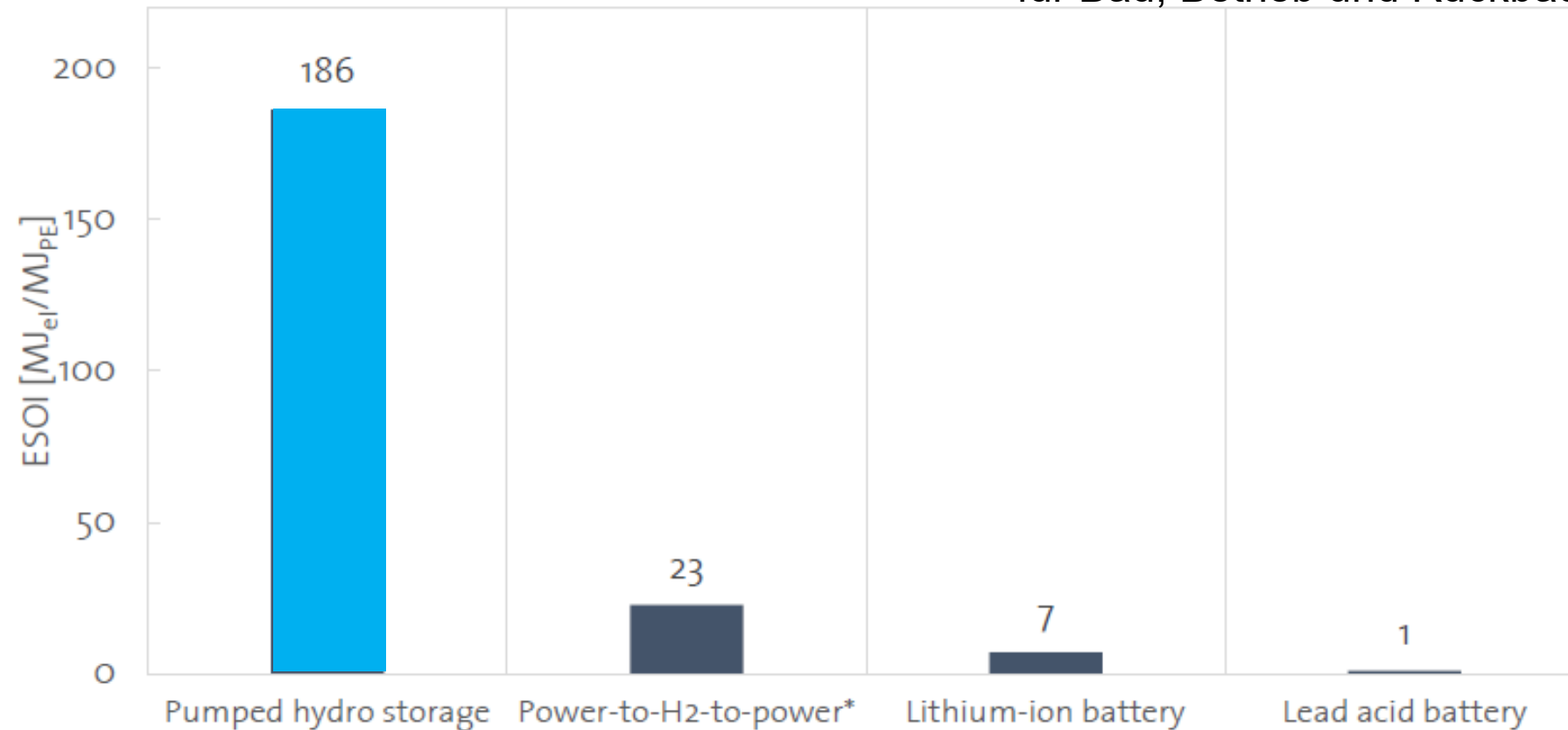


# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Energieausbeute Speicherung

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

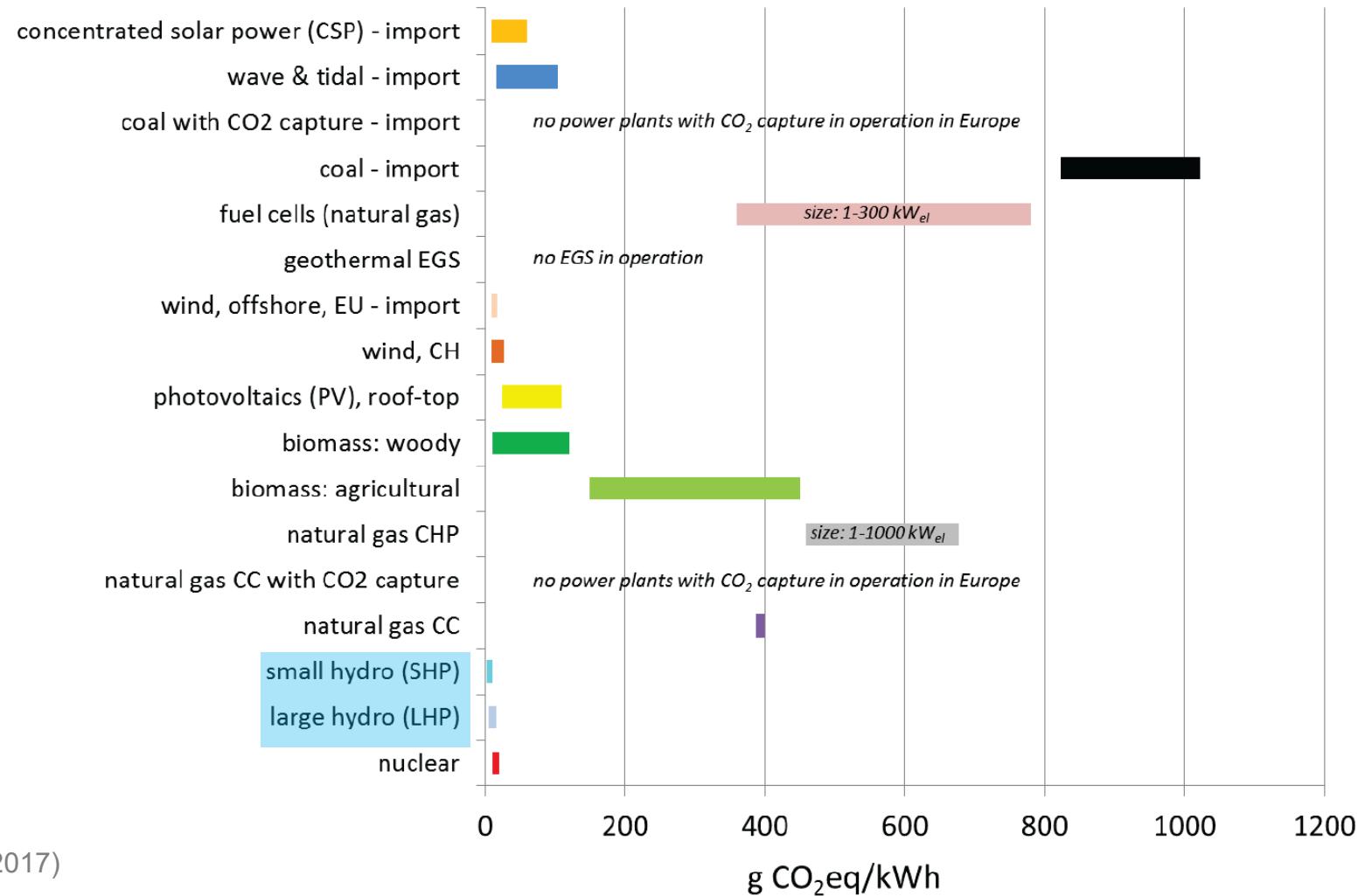
$$\text{ESOI} = \frac{\text{über Anlagendauer gespeicherte Energie}}{\text{für Bau, Betrieb und Rückbau benötigte Energie}}$$



Quelle: Steffen *et al.* (2018)

# Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

## Treibhausgasemissionen, Bsp. Schweiz



Quelle:  
Bauer, Hirschberg (eds.) *et al.* (2017)

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

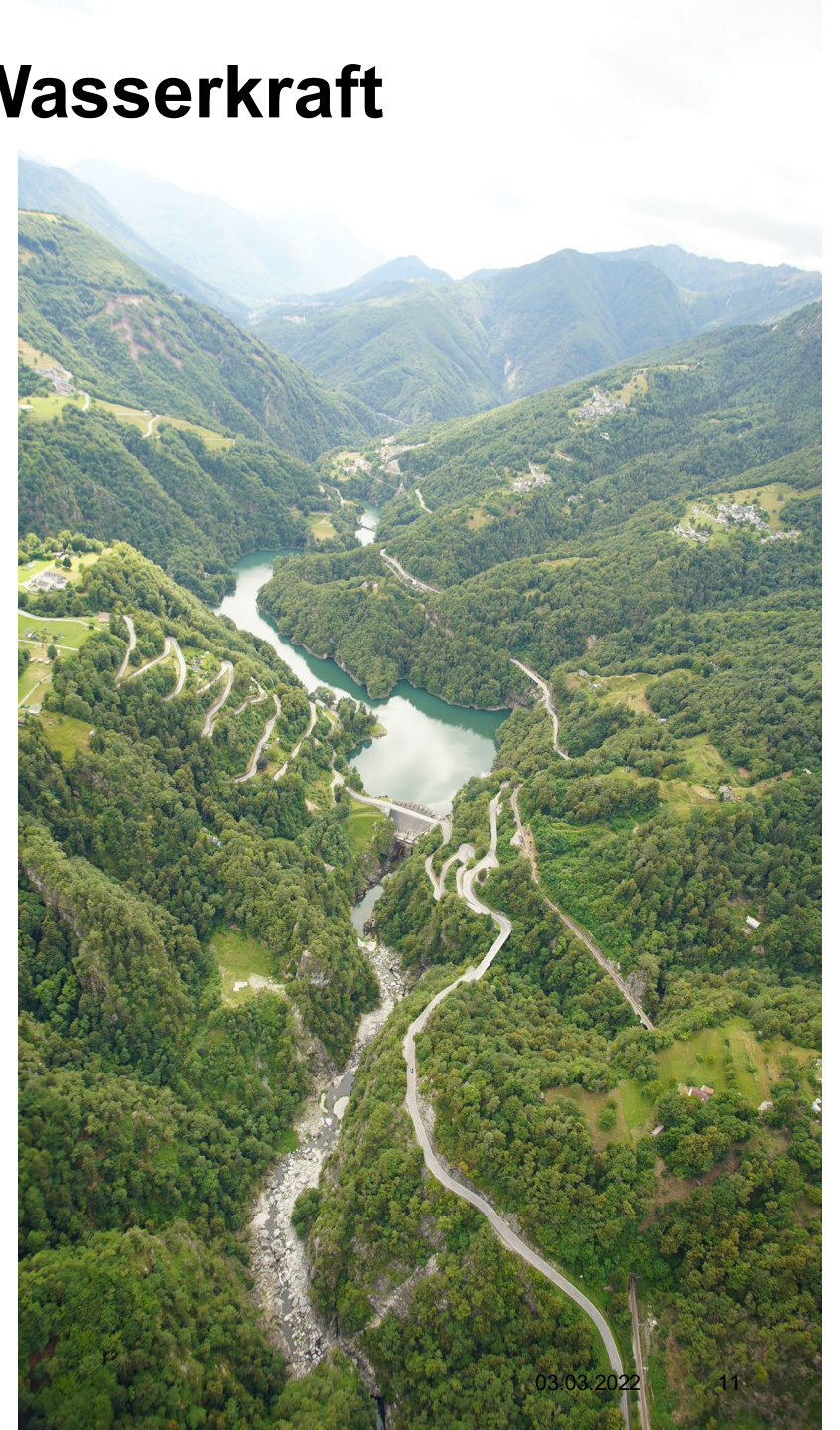
# Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft

## 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)

### ABER:

- Wasserkraft unterbindet i.d.R. das Fließgewässer-kontinuum für Gewässerorganismen und Sediment
- z.T. verringerte Wasserführung (bei Ausleitkraftwerken)
- z.T. Schwall-Sunk-Auswirkungen unterhalb Speicher-KW
- ökolog. Fussabdruck: Gross-WK besser als Klein(st)-WK



# Gliederung

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

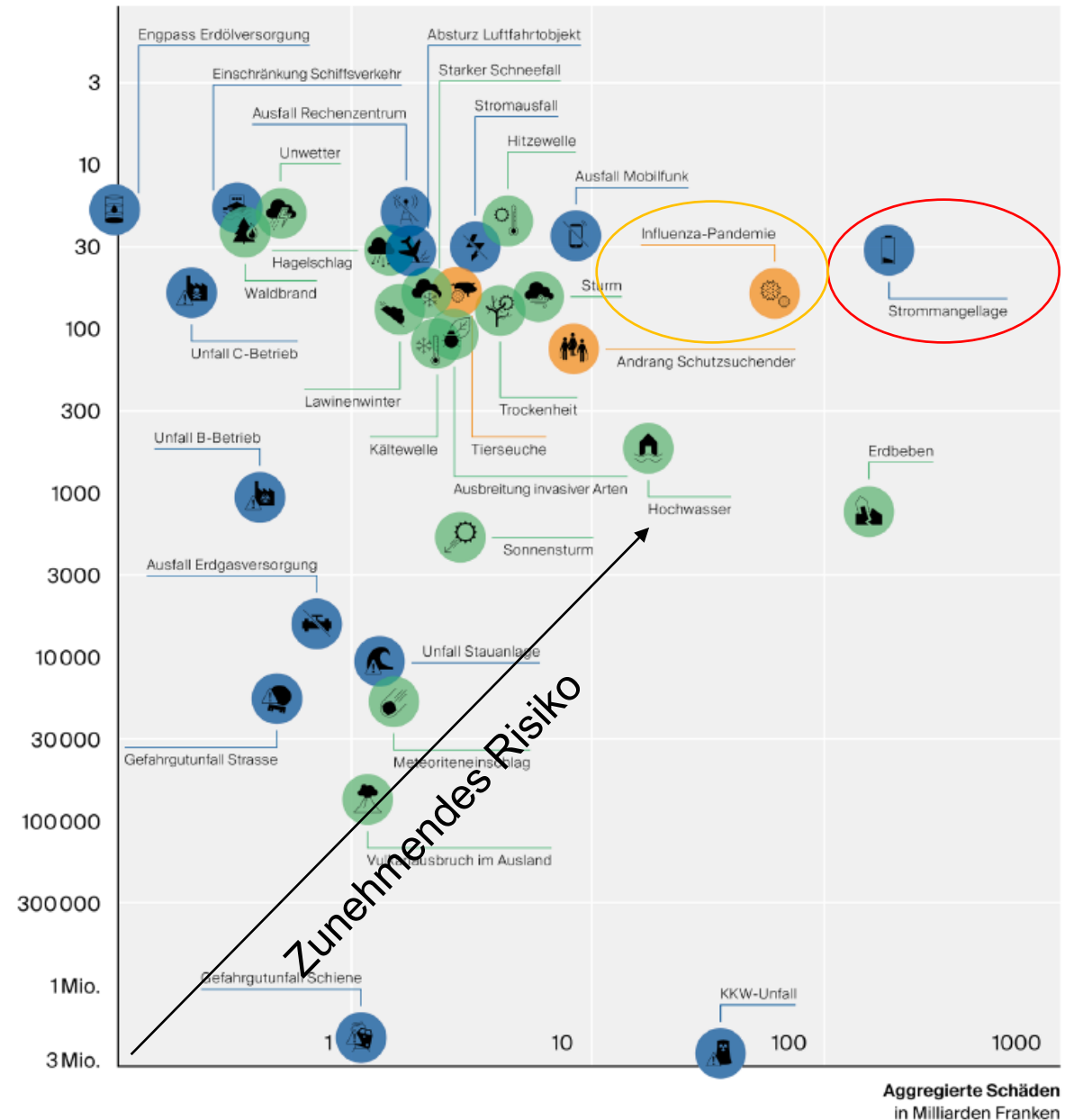
- Rolle der Wasserkraft auf verschiedenen Skalen
- Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft
- **Versorgungssicherheit, Speicher und Potential**
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- Auswirkungen Klimawandel
- Zusammenfassung

# Sicherheit der Stromversorgung

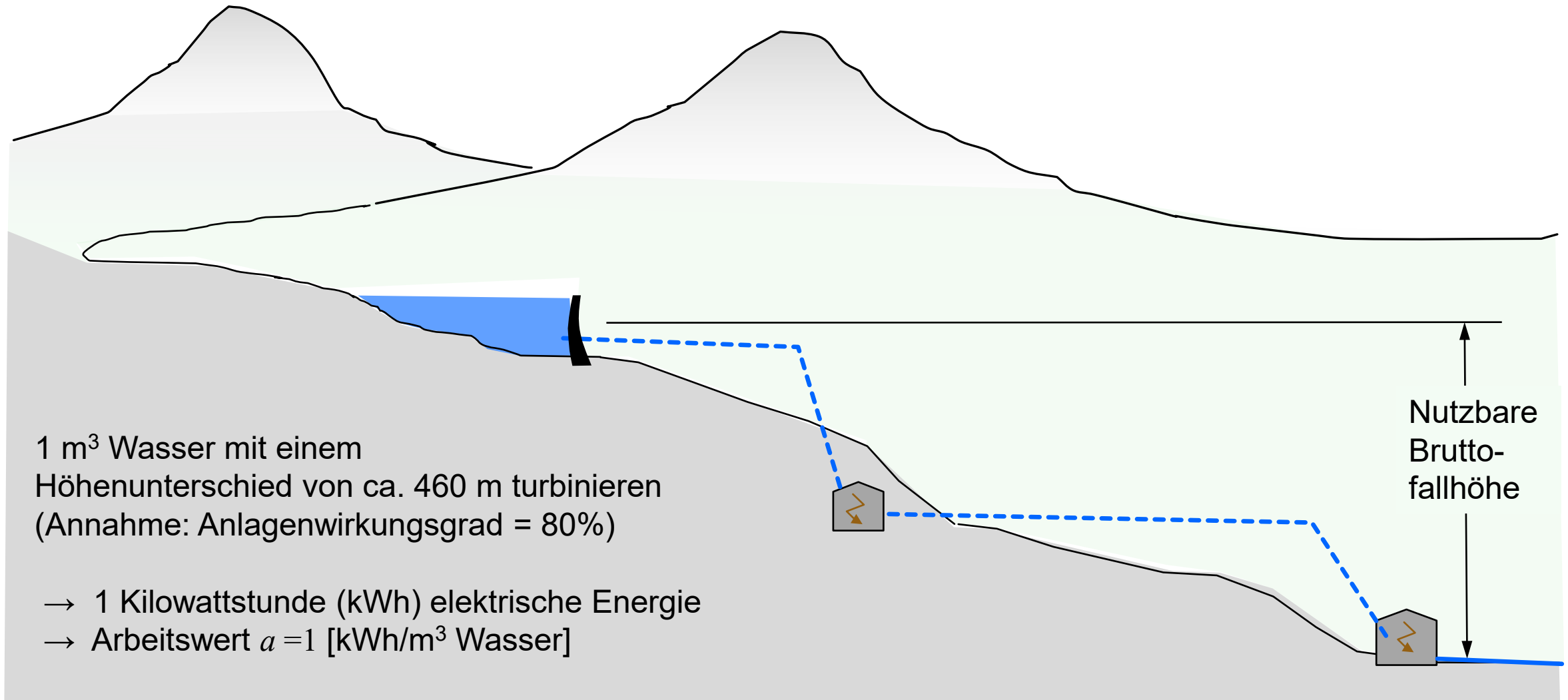
## Bsp. Schweiz

- 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  
→ Pumpspeicher
- **Winterproduktion besonders wichtig**  
→ **Saisonale Umlagerung durch Speicher-KW**

Häufigkeit  
einmal in x Jahren

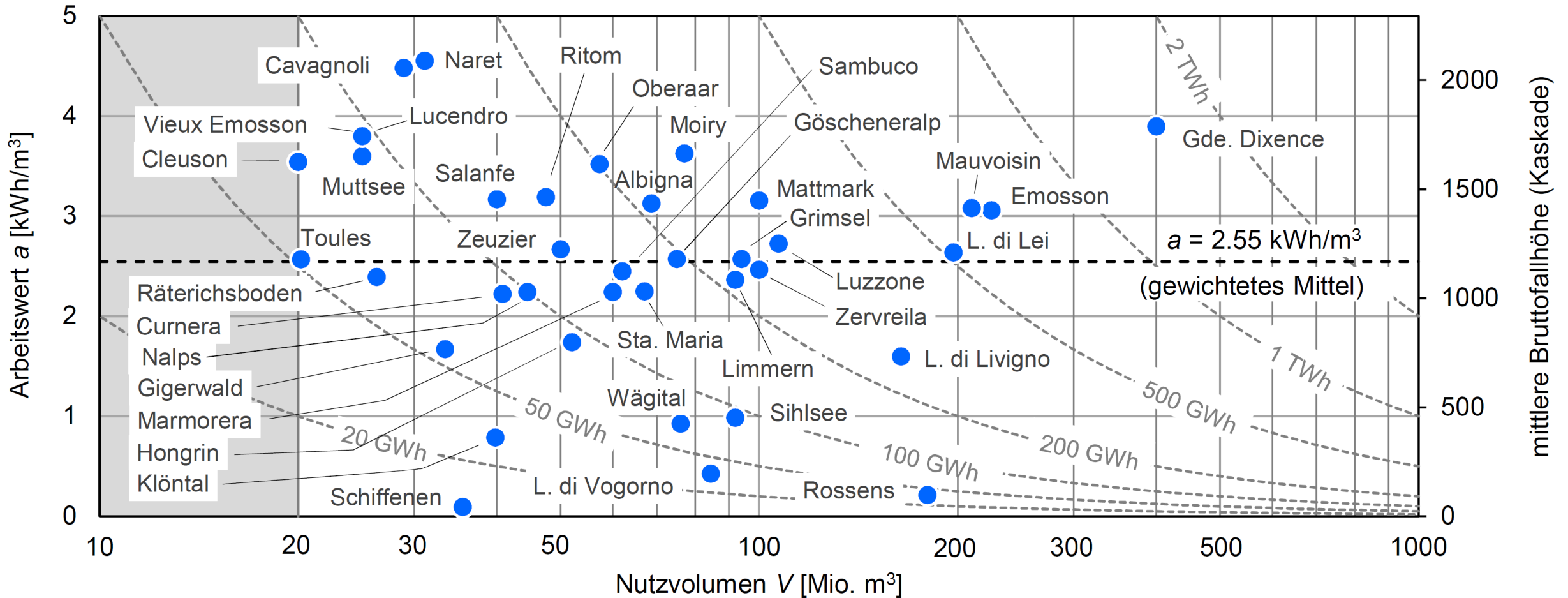


# Stauseen als Energiespeicher



# Talsperren und Speicherwasserkraftwerke als «Grossbatterien»

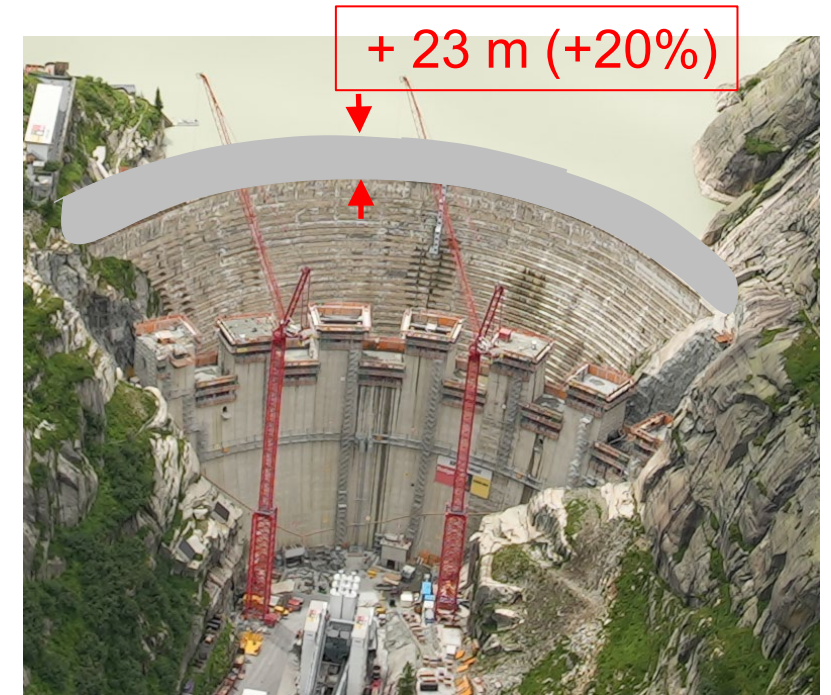
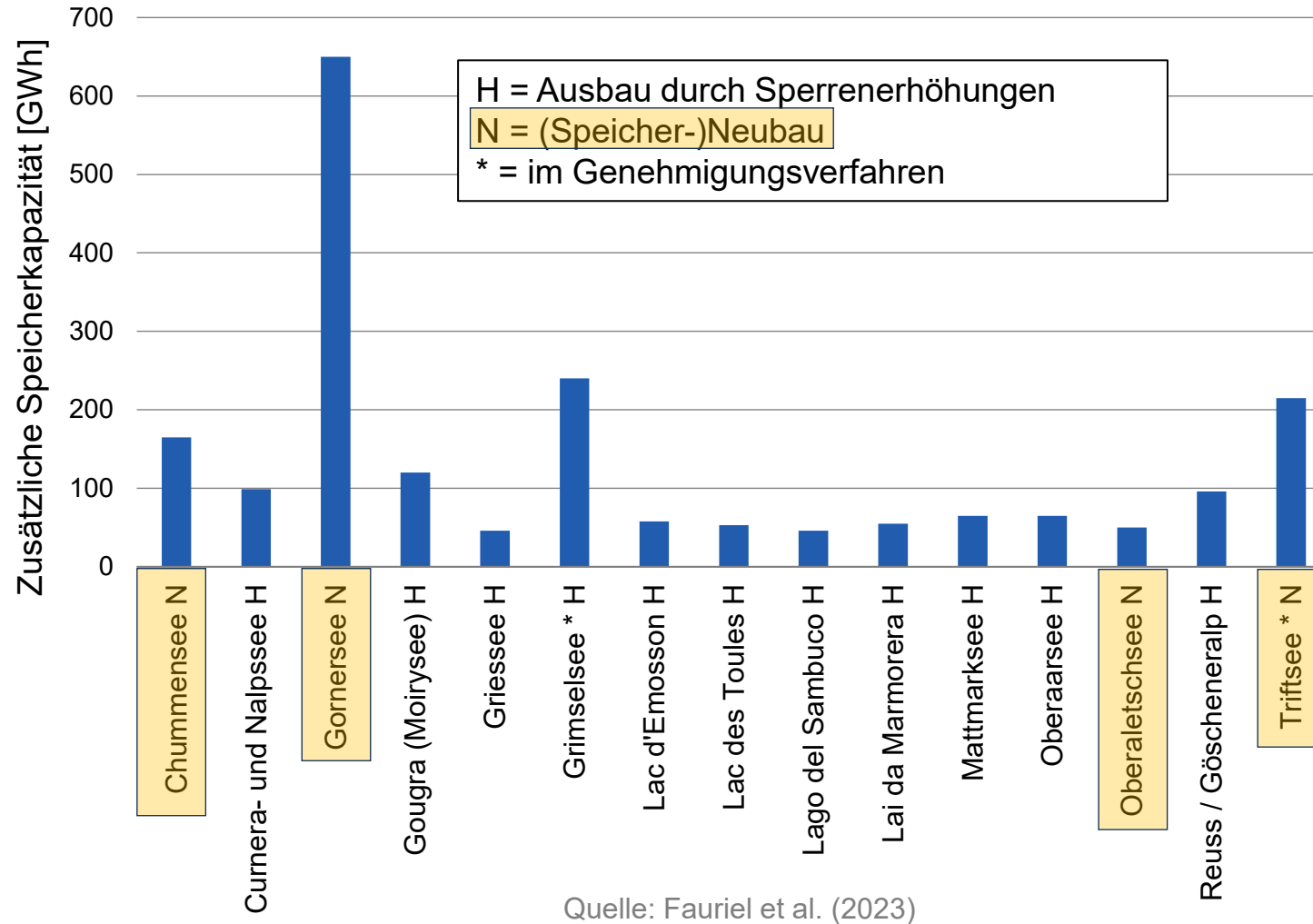
## Bsp. Schweiz



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

# Potenzial und Ziele CH: 15 prioritäre Projekte

+2 TWh (+ ~25 %) durch Aus- und Neubauten des «Runden Tisch Wasserkraft»



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



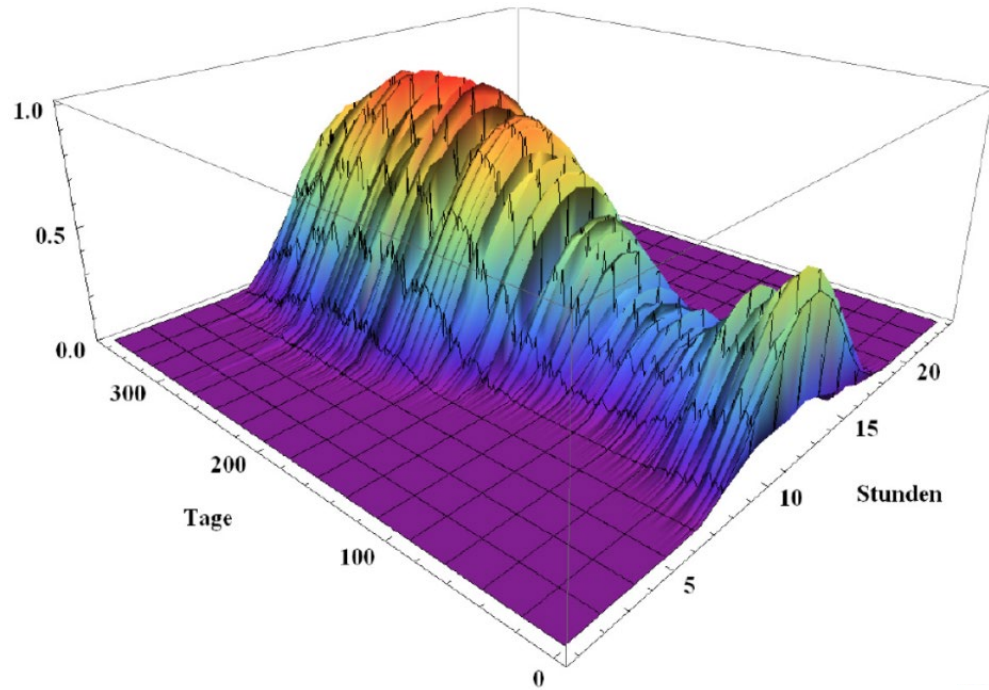
# Gliederung

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

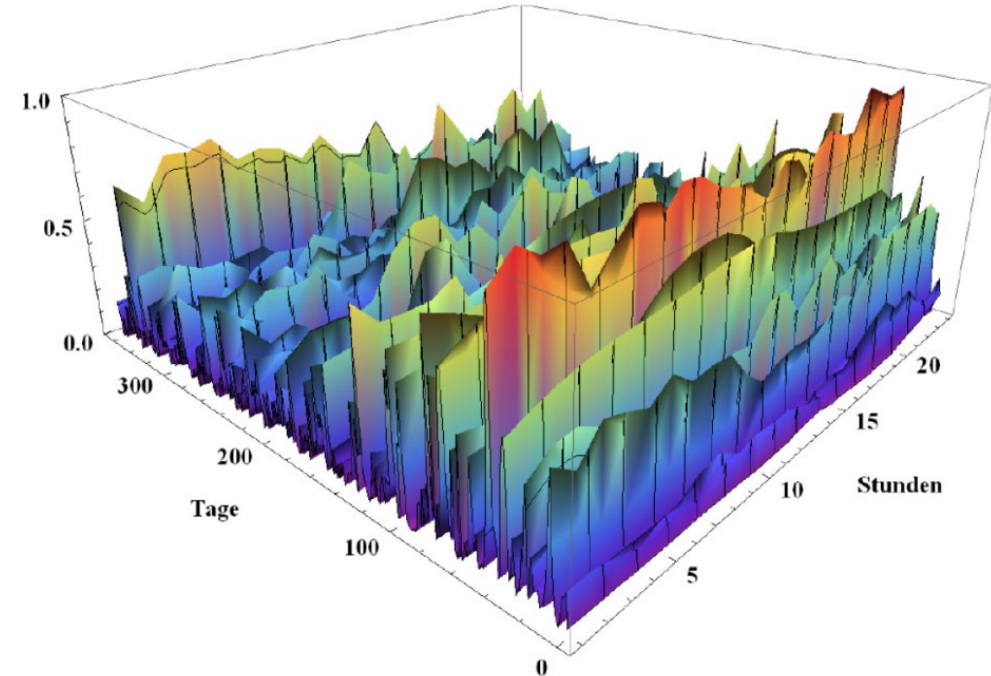
- Rolle der Wasserkraft auf verschiedenen Skalen
- Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft
- Versorgungssicherheit, Speicher und Potential
- **Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft**
- Auswirkungen Klimawandel
- Zusammenfassung

# Volatilität der Energieeinspeisung aus Sonne und Wind

## Stromproduktion CH 2008



Sonne



Wind

Winter vs. Sommer  
Tag vs. Nacht

→ Energiespeicher

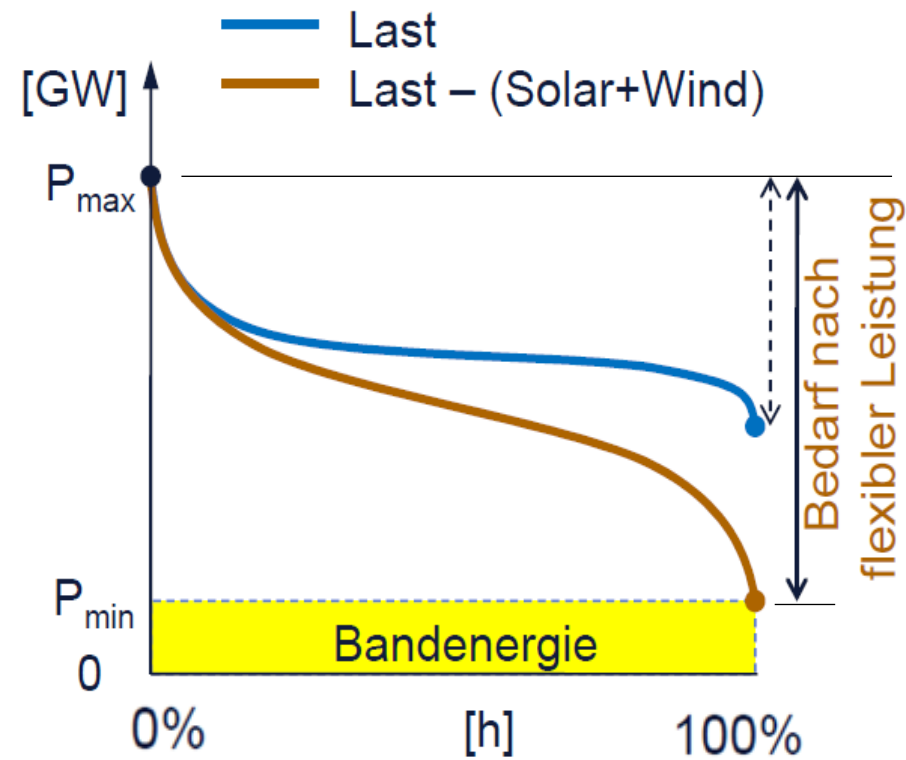
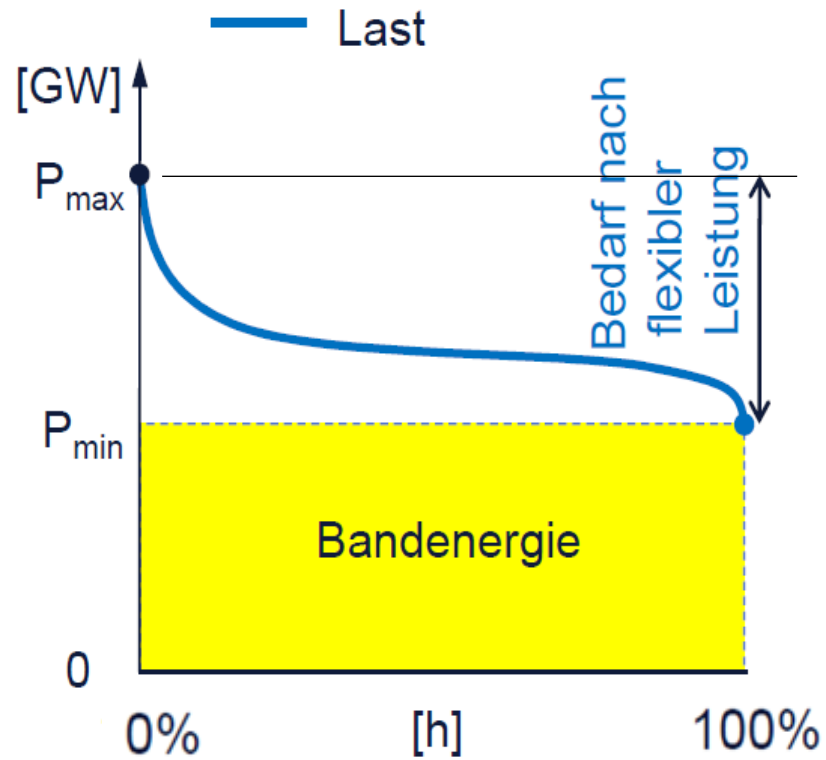
→ (Pump-)Speicherwasserkraft

→ Talsperren

Quelle: Prognos (2012)

# Zunahme des Bedarfs an flexibler Speicherkapazität

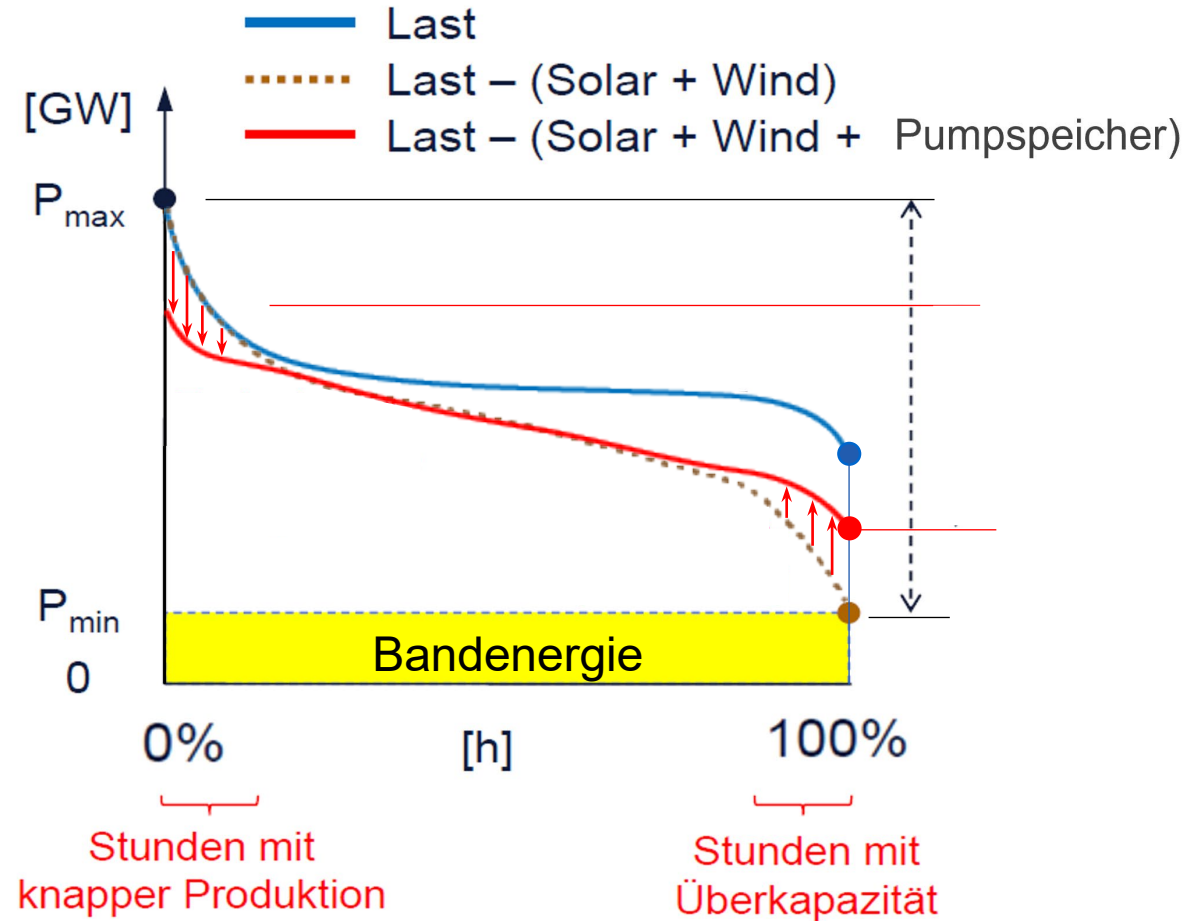
*Effekt der zunehmenden Integration erneuerbarer Energiequellen*



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)

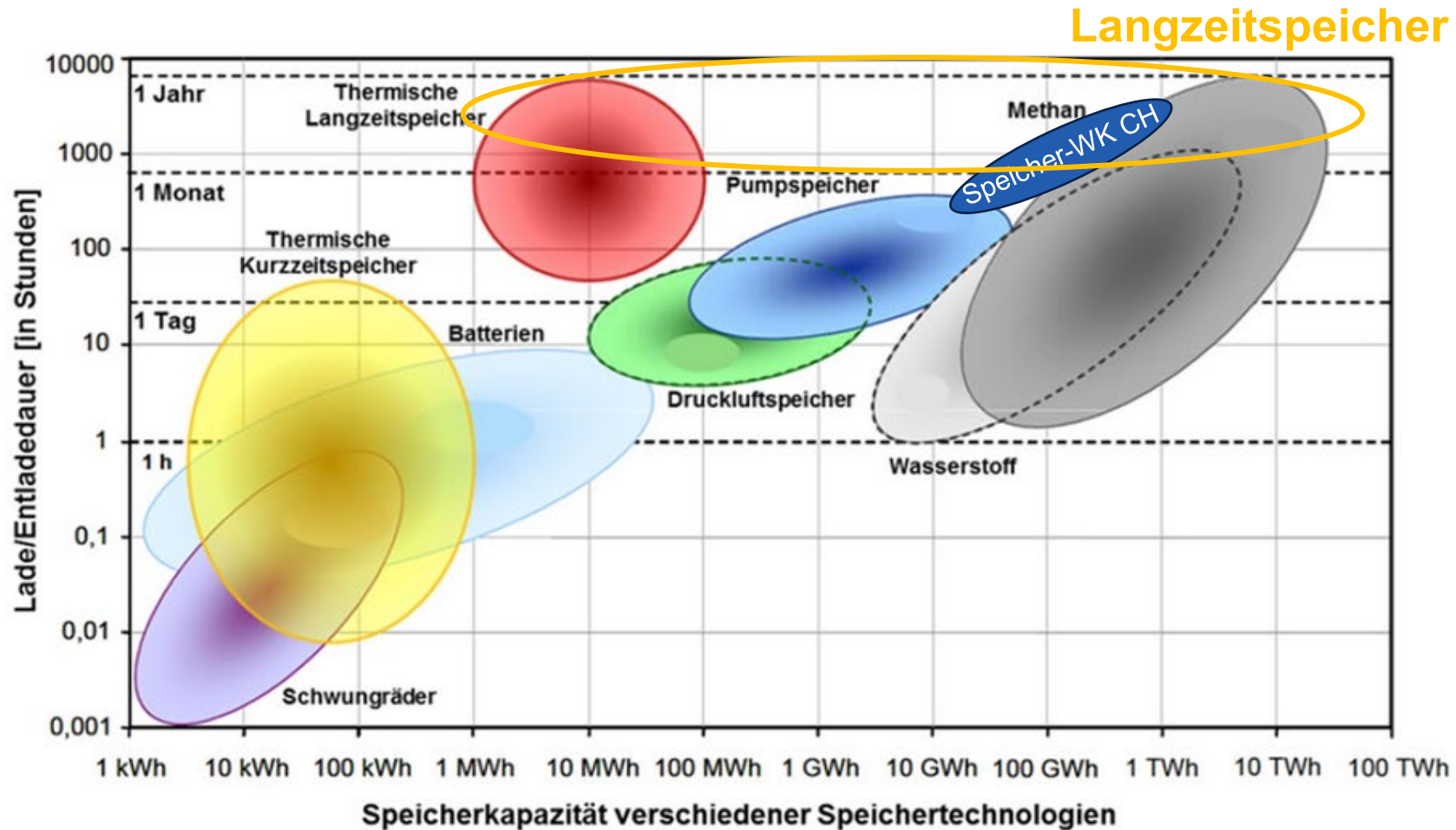
	Thermische Kraftwerke	Gasturbinen	Wasserkraft (Standard)	Wasserkraft (neue Technologie)
Leistungsgradient (%/min)	2 - 4	8 - 12	50 - 100	100% in < 30s
Minimallast (% von $P_N$ )	40	40	40 (F), 20 (K,P)	0 - 5 (alle Typen)
Anfahrzeit	2 - 5 h	< 15 min	< 10 min	< 5 min
Reduktion der Lebensdauer (infolge vermehrter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

F: Francis, K: Kaplan, P: Pelton

Quelle: adaptiert von Sick, ANDRITZ Hydro (2013)

# Speicherkapazitäten und Lade-/Entladedauern

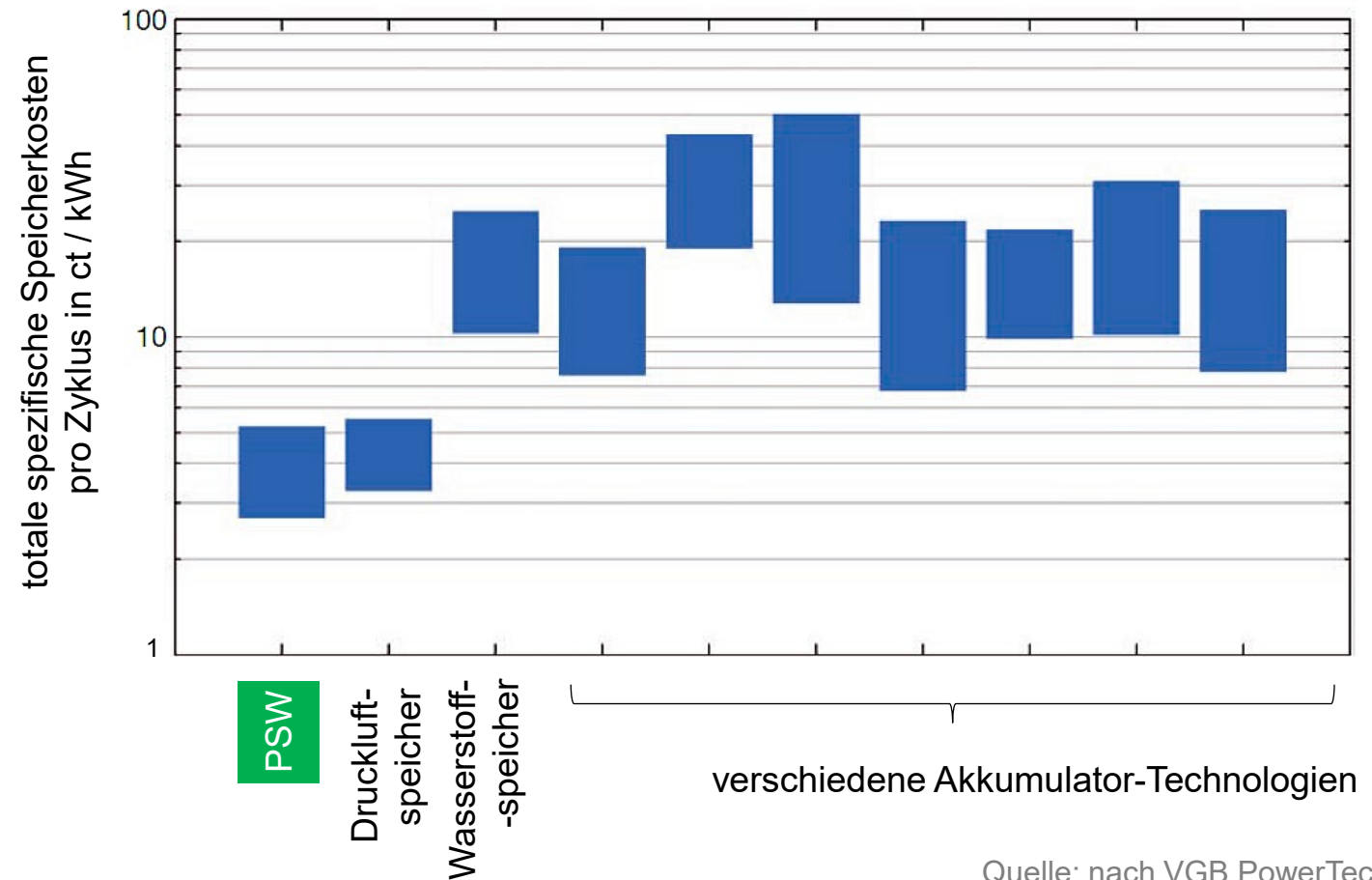
- **Großtechnisch** ausgereifteste Energiespeichertechnologie



Quelle:  
angepasst nach  
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

## *Die Rolle und das Potential der Wasserkraft für die Energiezukunft*

- Rolle der Wasserkraft auf verschiedenen Skalen
- Trümpfe und negative Auswirkungen der Wasserkraft
- Versorgungssicherheit, Speicher und Potential
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- **Auswirkungen Klimawandel**
- Zusammenfassung

# Auswirkungen Klimawandel

- **Einfluss des Klimawandels** auf Wasserkraft insbesondere bei Wasserzuflüssen, Sedimentfrachten und Naturgefahren
- **Laufwasserkraft:**
  - **Zunahme der Winterproduktion, Abnahme der Jahresproduktion**
  - Produktion ändert nicht linear mit Zufluss
  - Erlöse ändern nicht notwendigerweise linear mit Produktion
- **Speicherwasserkraft:**
  - praktisch unveränderte Speicherkapazitäten (ausser bei starker Verlandung)
  - jedoch **in den meisten Fällen Abnahme der Jahresproduktion**
  - **in stark vergletscherten EZG** noch weitere **Zunahme der Jahresproduktion**,
  - dort **Produktionsspitze Mitte bis Ende des Jahrhunderts**, je nach Eismächtigkeit
  - nur in Einzelfällen werden sich Speicher im hydrologischen Regeljahr nicht mehr ganz durch natürlichen Zufluss füllen

Quelle: nach Boes (2023), Vortrag bei der Hydrosuisse Fachtagung Wasserkraft, Olten

# Zusammenfassung

- **Wasserkraft (WK)** ist eine **klimafreundliche, effiziente, flexible und speicherbare Technologie** und **zentral für die Energiewende**
- **WK wichtigste erneuerbare Energiequelle in den Alpen und weltweit**
- **(Pump-)Speicher-WK** ist auf großen Skalen die aktuell **ausgereifteste** und **günstigste Energiespeichertechnologie**
- **Speicher-WK** ist bedeutend für die flexible **Energieversorgung**, vor allem **im Winter** (derzeit knapp 11 TWh Produktion im Winterhalbjahr)
- 15 Speicherwasserkraftprojekte sollen **bis 2040 +2 TWh an Speicherkapazität** bereitstellen («Runder Tisch Wasserkraft»)
- **Gross-WK** hat i.d.R. **spez. geringere ökolog. Auswirkungen als Klein-WK**
- **Klimawandel hat begrenzte Auswirkungen auf WK**



**Danke für die  
Aufmerksamkeit!**