

Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

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



Gliederung

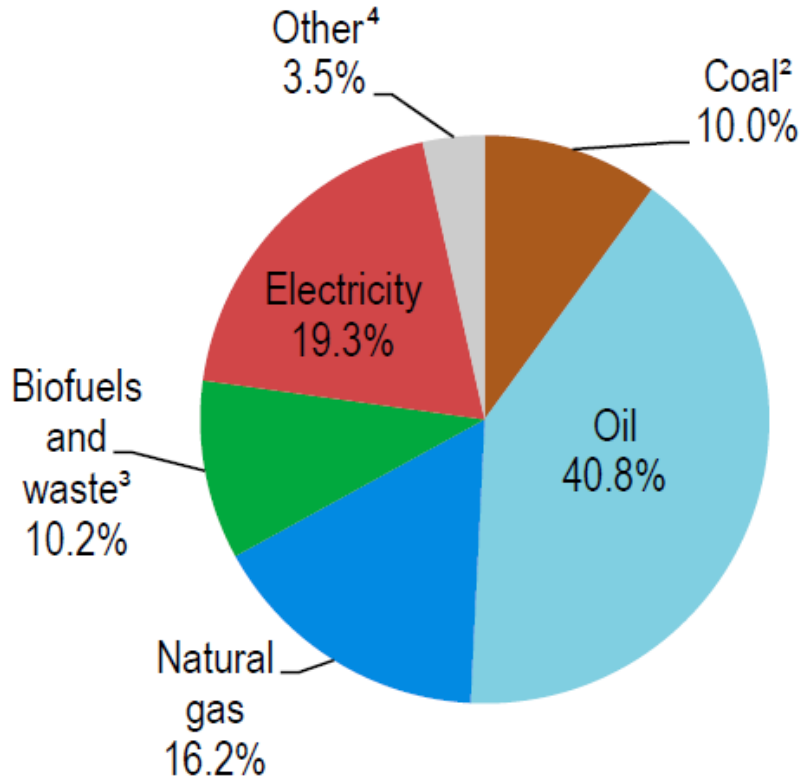
Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

- 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

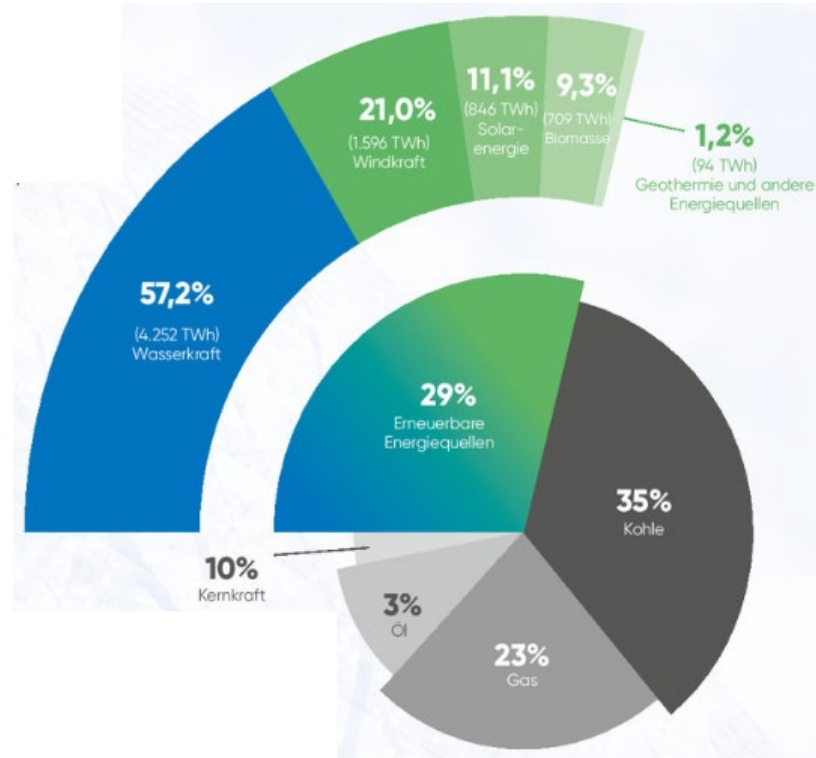


Quelle: *IEA, World Energy Balances, 2020*

9 938 Mtoe¹

1) million tonnes of oil equivalent

Anteil an Elektrizitätserzeugung



Quelle: *IEA, World Energy Outlook 2021*

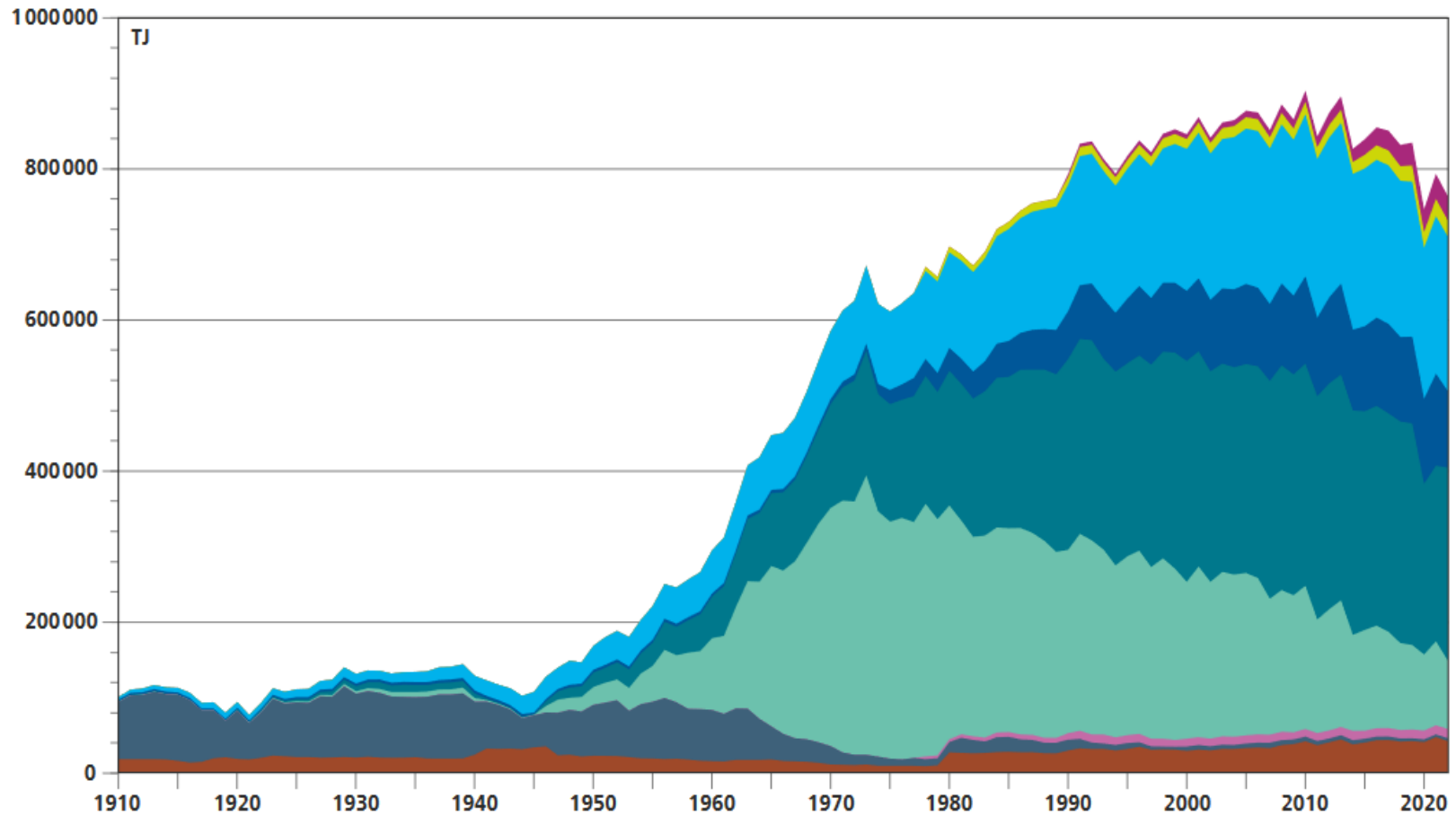
25'850 TWh

→ Wasserkraft ist weltweit bedeutendste erneuerbare Energieform

→ ohne Wasserkraftnutzung weltweit 37% mehr CO₂-Emissionen

Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

Bsp. Schweiz: Endenergieverbrauch 1910-2022 nach Energieträger



2022

2050

27%

38-46% (?)

Quelle: Anderson et al. (2011)

Quelle: BFE (2020)

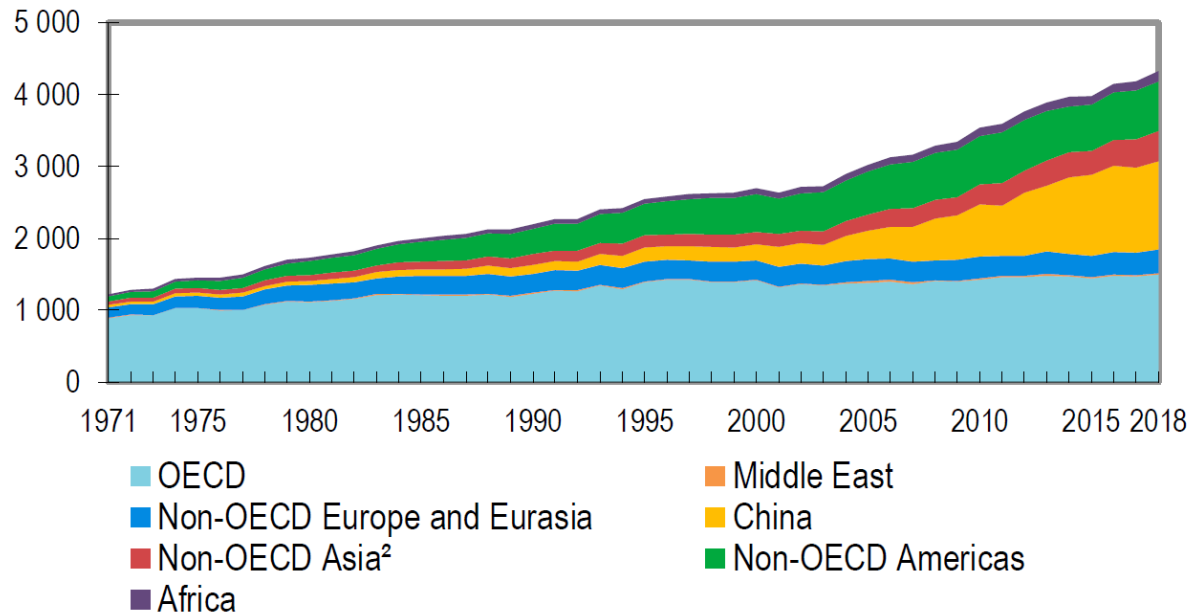
- Übrige erneuerbare Energien
Autres énergies renouvelables
- Fernwärme
Chaleur à distance
- Elektrizität
Electricité
- Gas
Gaz
- Treibstoffe
Carburants
- Erdölbrennstoffe
Combustibles pétroliers
- Industrieabfälle
Déchets industriels
- Kohle
Charbon
- Holz
Bois

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

Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein

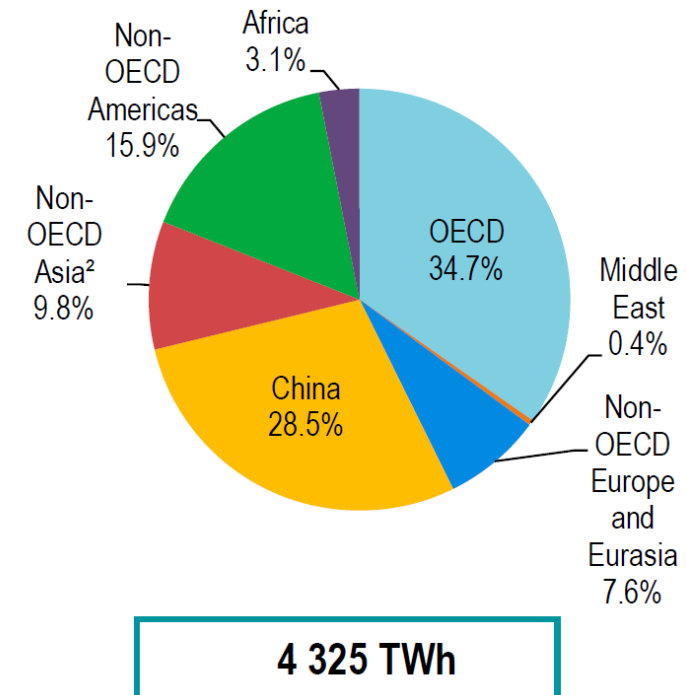
Wasserkraft: Regionale Verteilung und Anteile an Stromproduktion weltweit

Weltweite Stromerzeugung aus Wasserkraft¹ von 1971 bis 2018 nach Regionen (TWh)



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

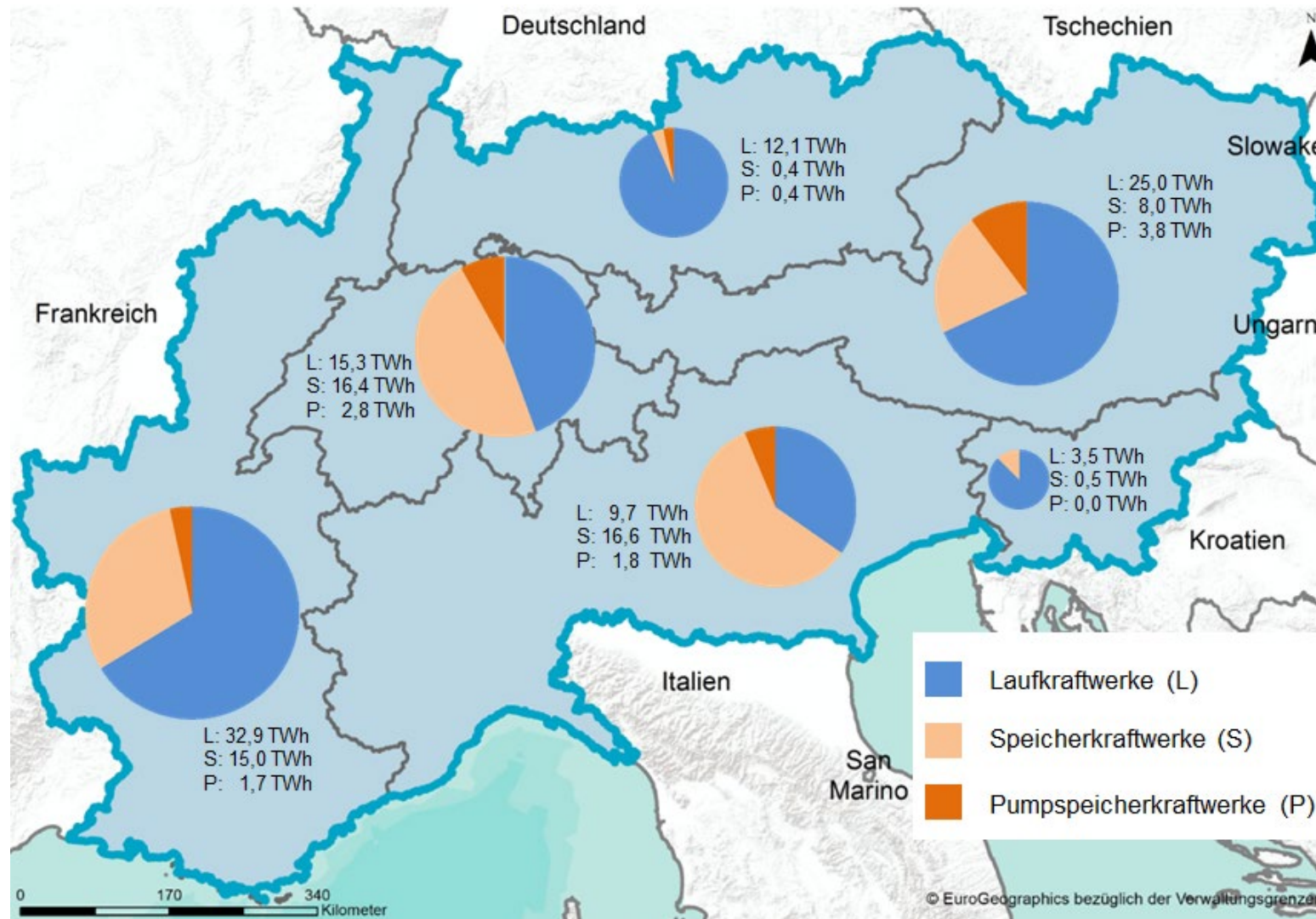
Regionale Anteile an der Stromerzeugung aus Wasserkraft 2018¹



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

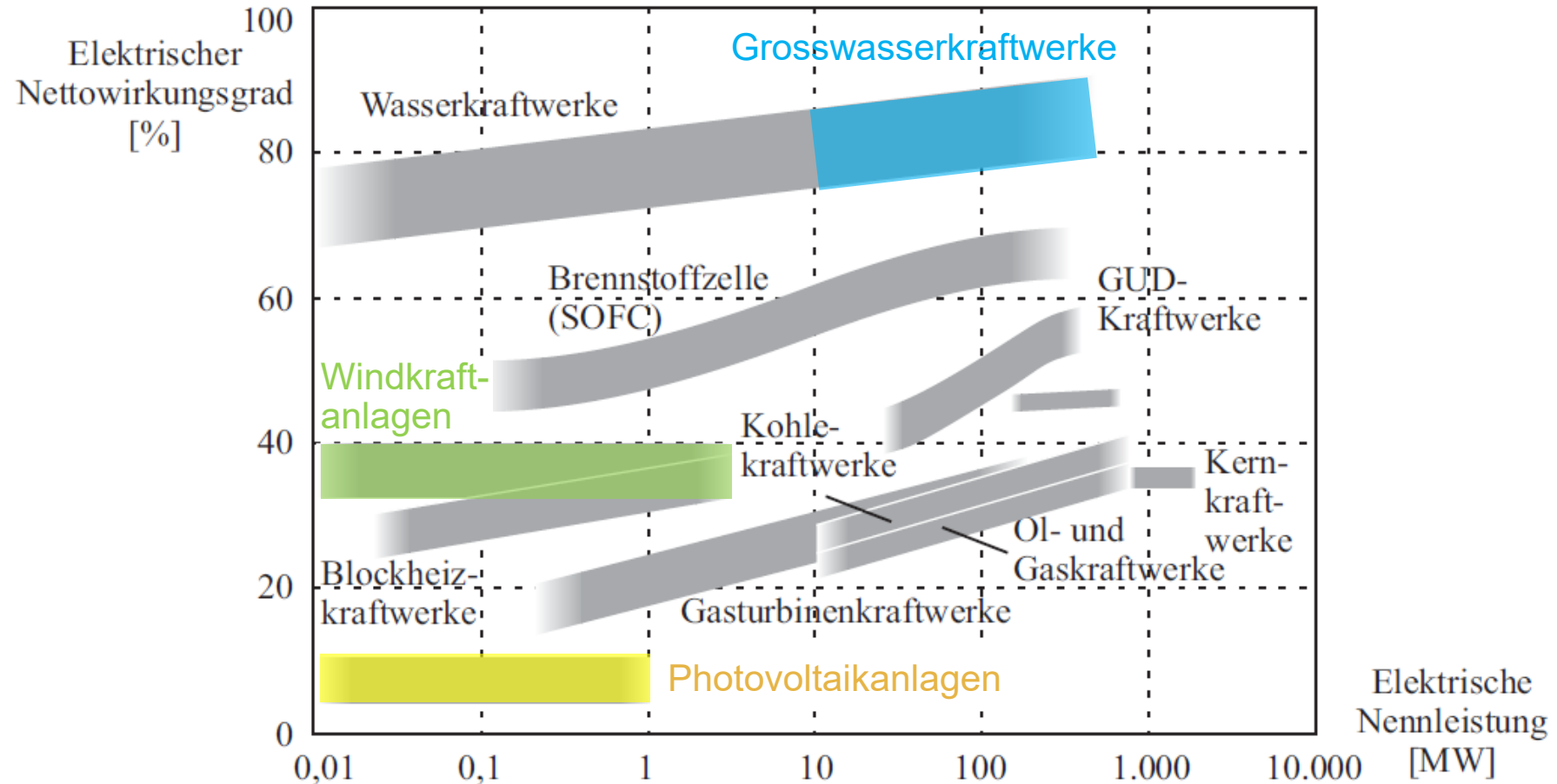
Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

- 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)

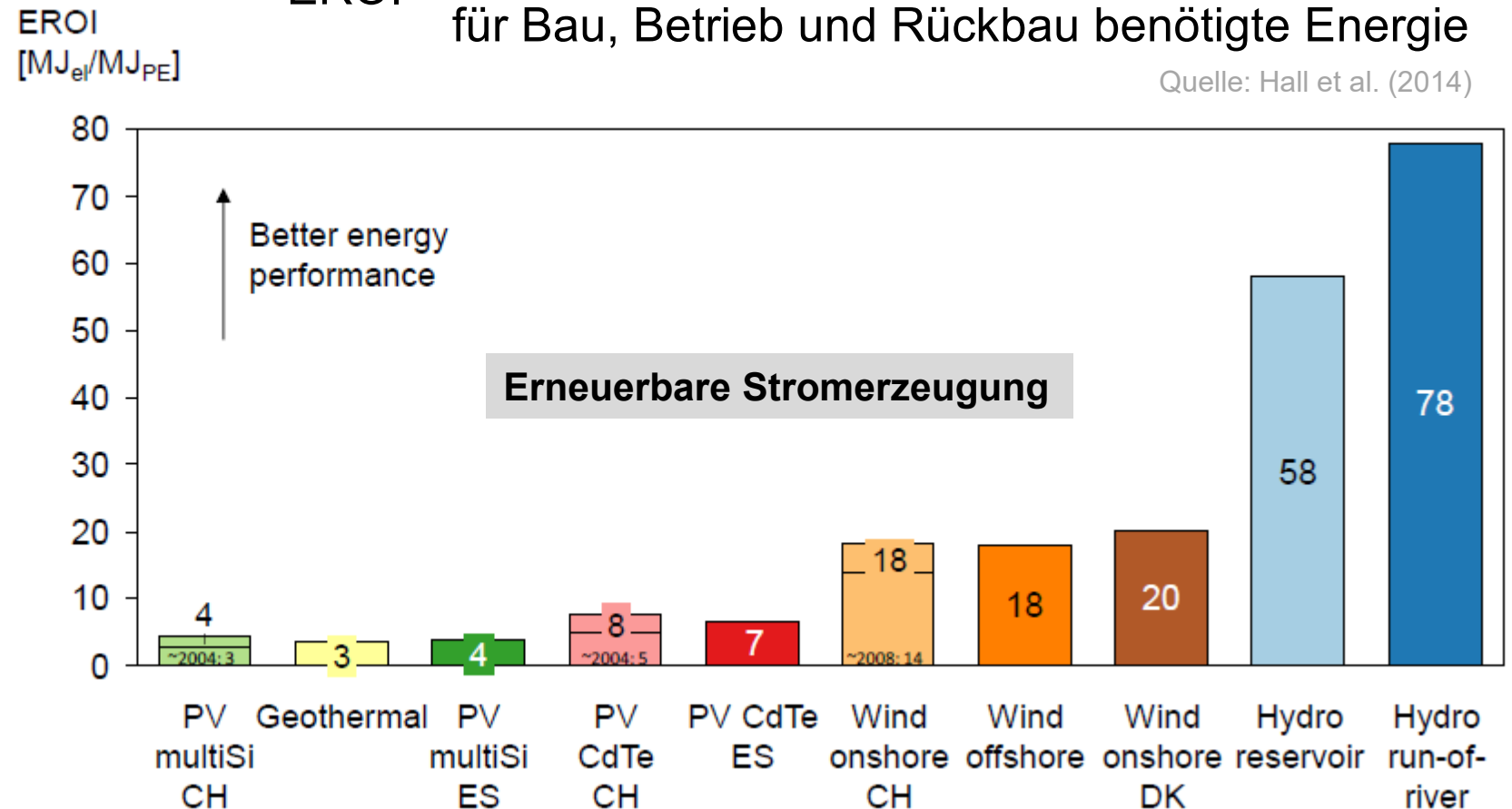
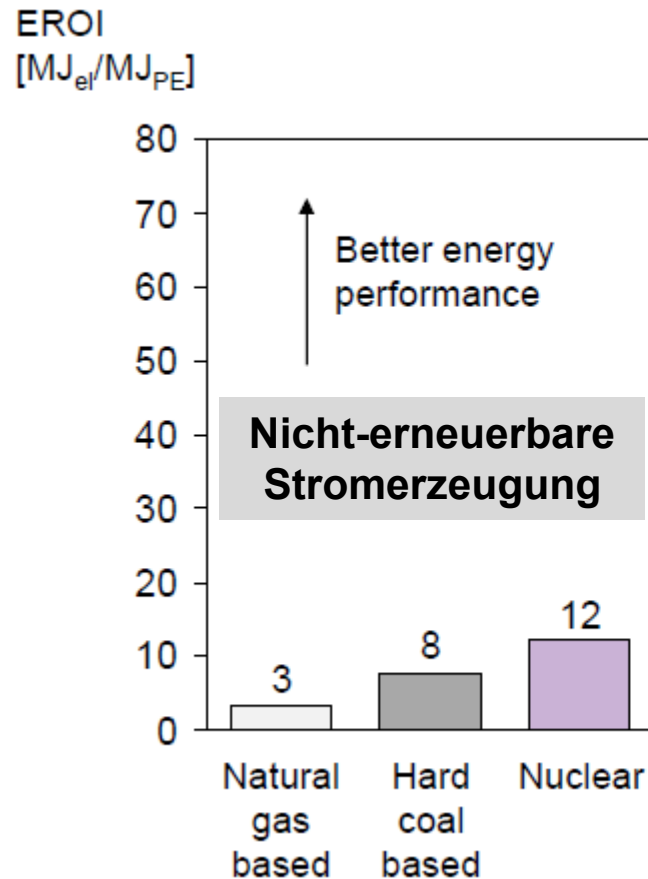
Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

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)



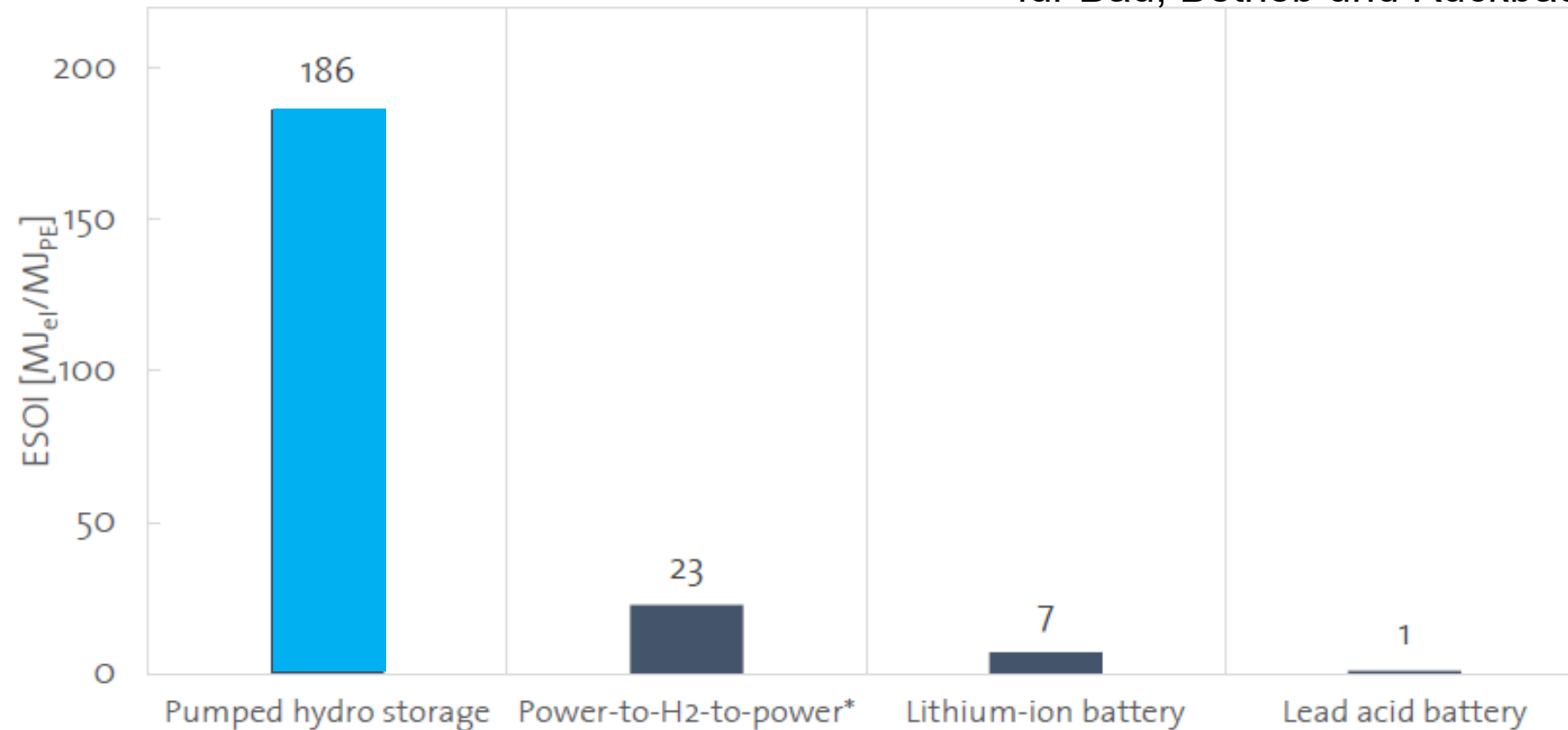
Quelle: Steffen et al. (2018)

Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

Bsp. Energieausbeute

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

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

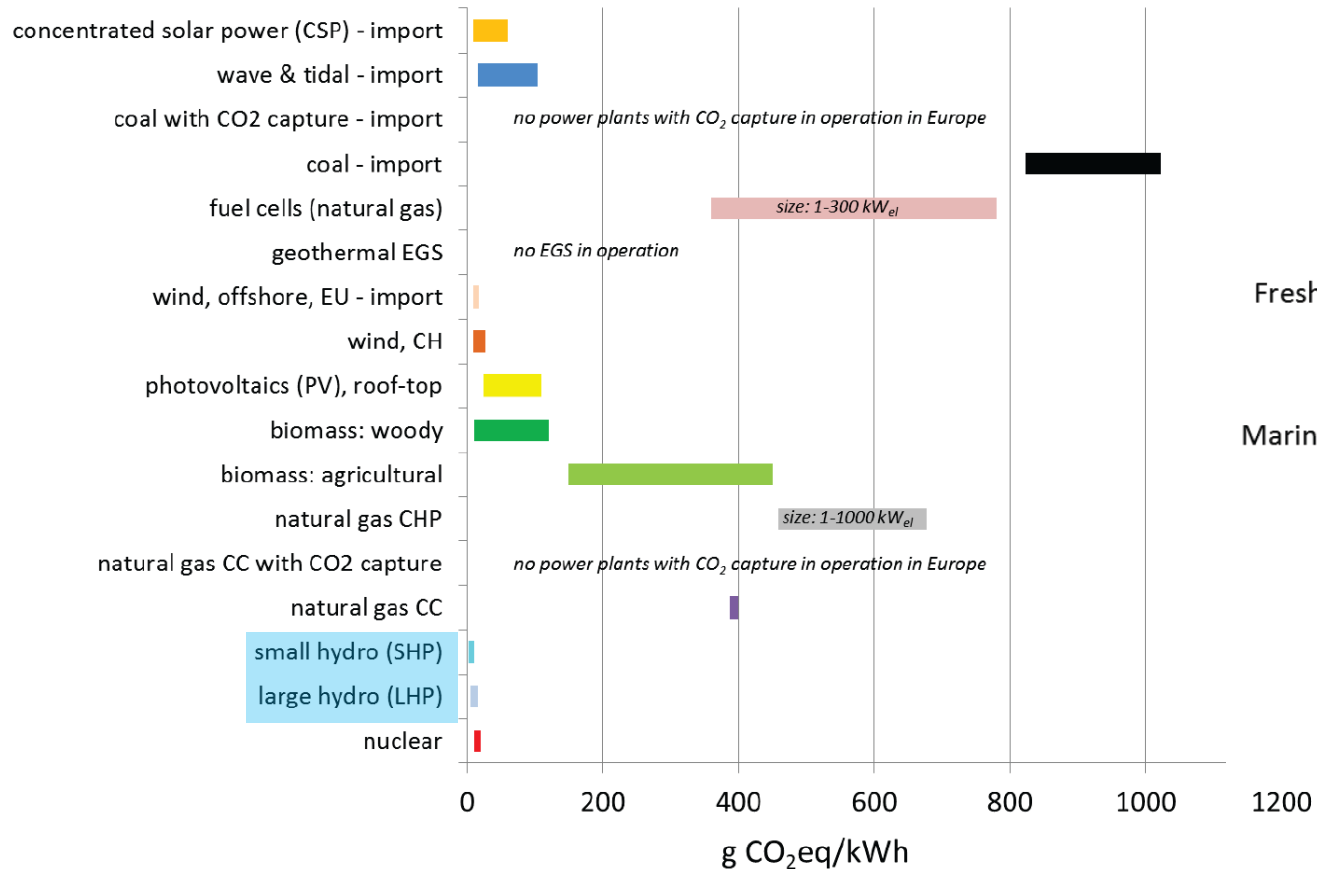


Quelle: Steffen *et al.* (2018)

Wasserkraftnutzung – Nachhaltigkeit

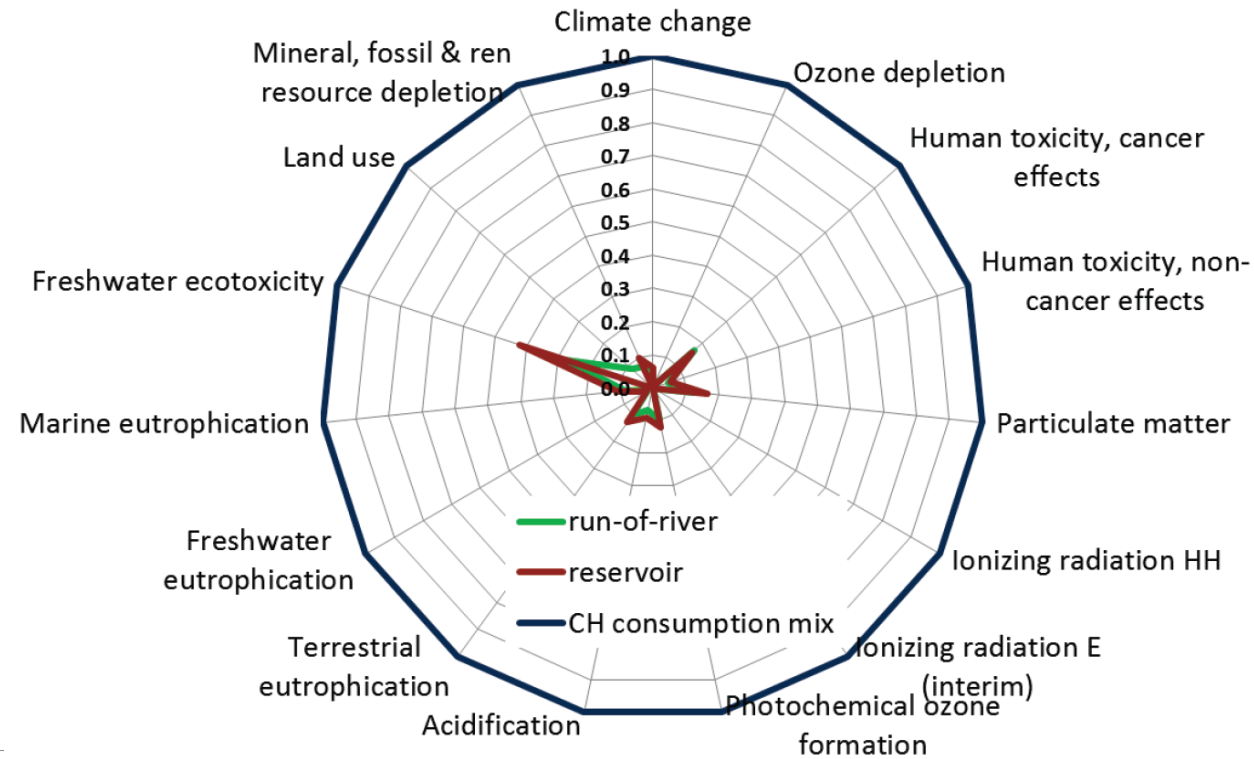
Umweltbilanz, Bsp. Schweiz

Treibhausgase (Greenhouse gases)



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

Ökobilanz (Ecological balance)



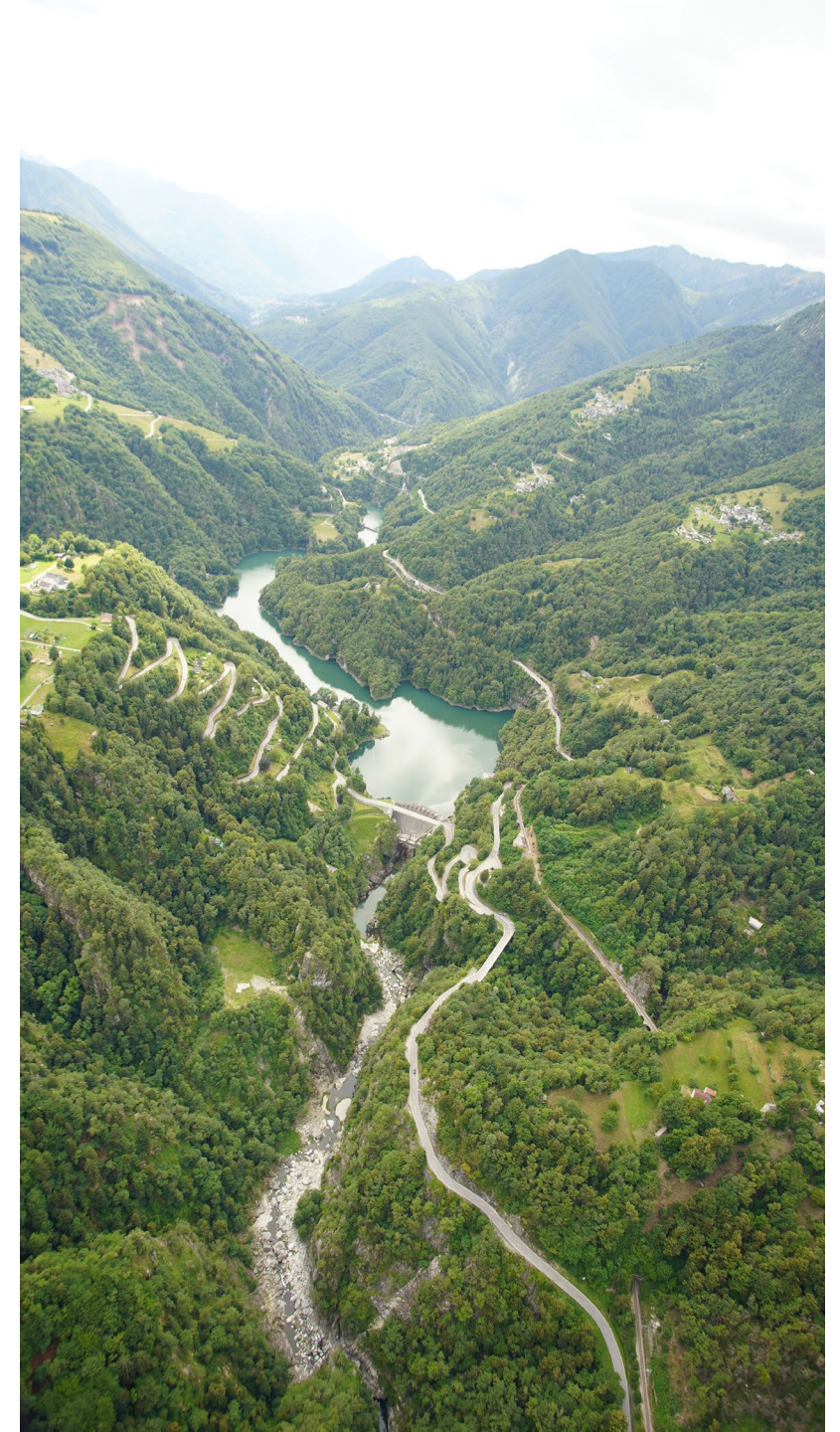
Vergleich der LCIA-Indikatoren für die Stromproduktion aus **Schweizer Speicher- und Laufkraftwerken** mit dem durchschnittlichen Schweizer-Mix (=1)

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

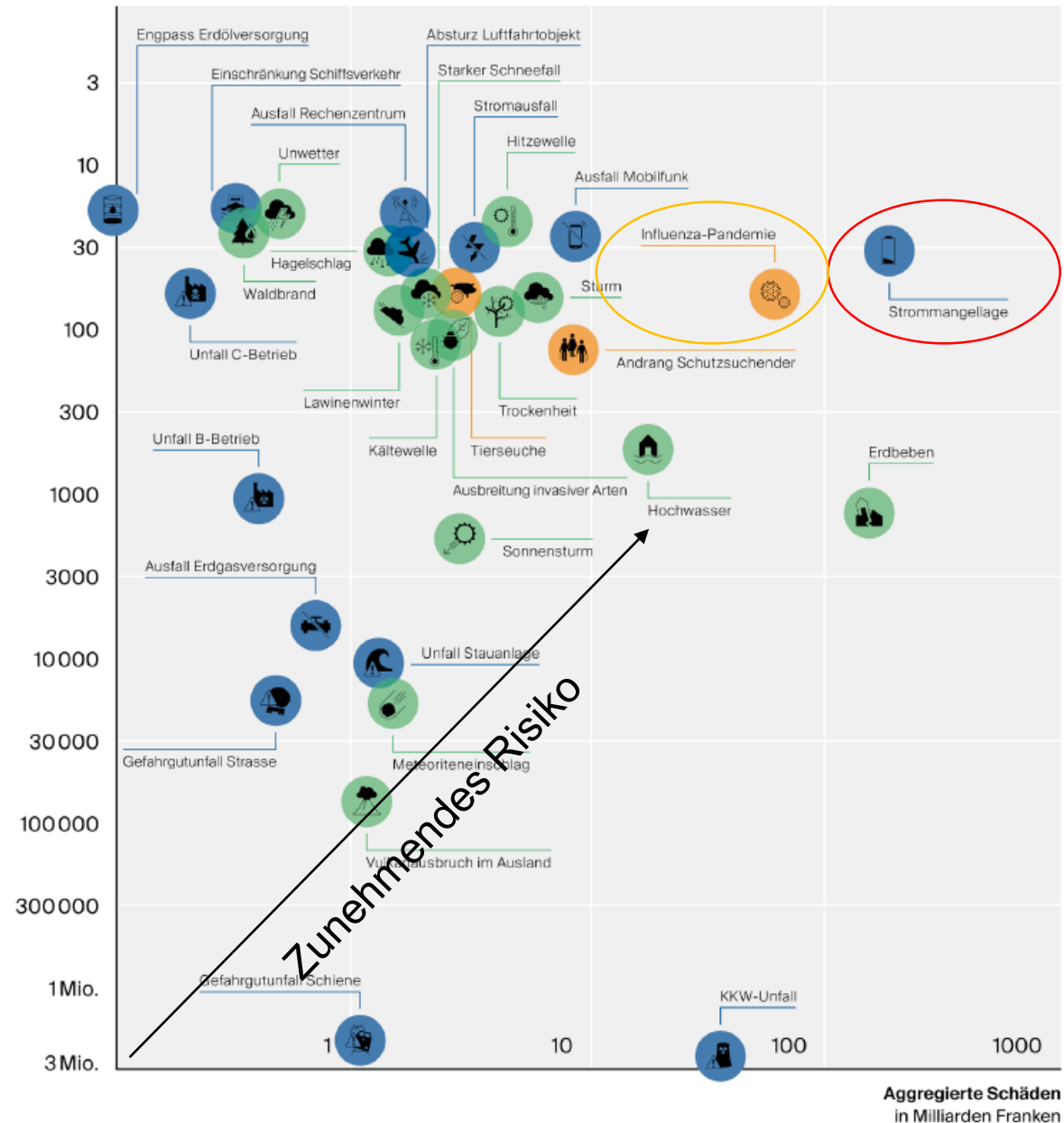
- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- **Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft**
- Talsperren für Wasserkraftspeicher
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

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

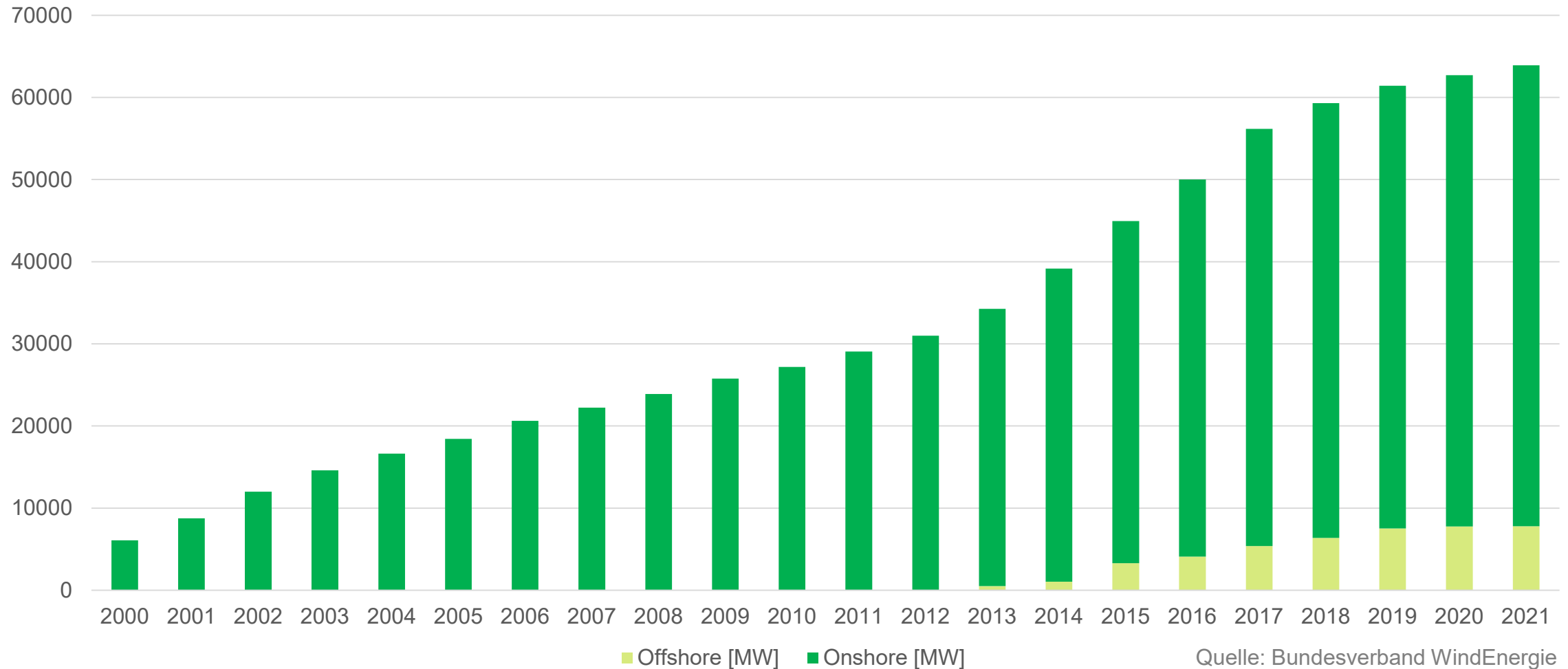


Quelle: BABS (2020)

Energieeinspeisung aus Windkraft

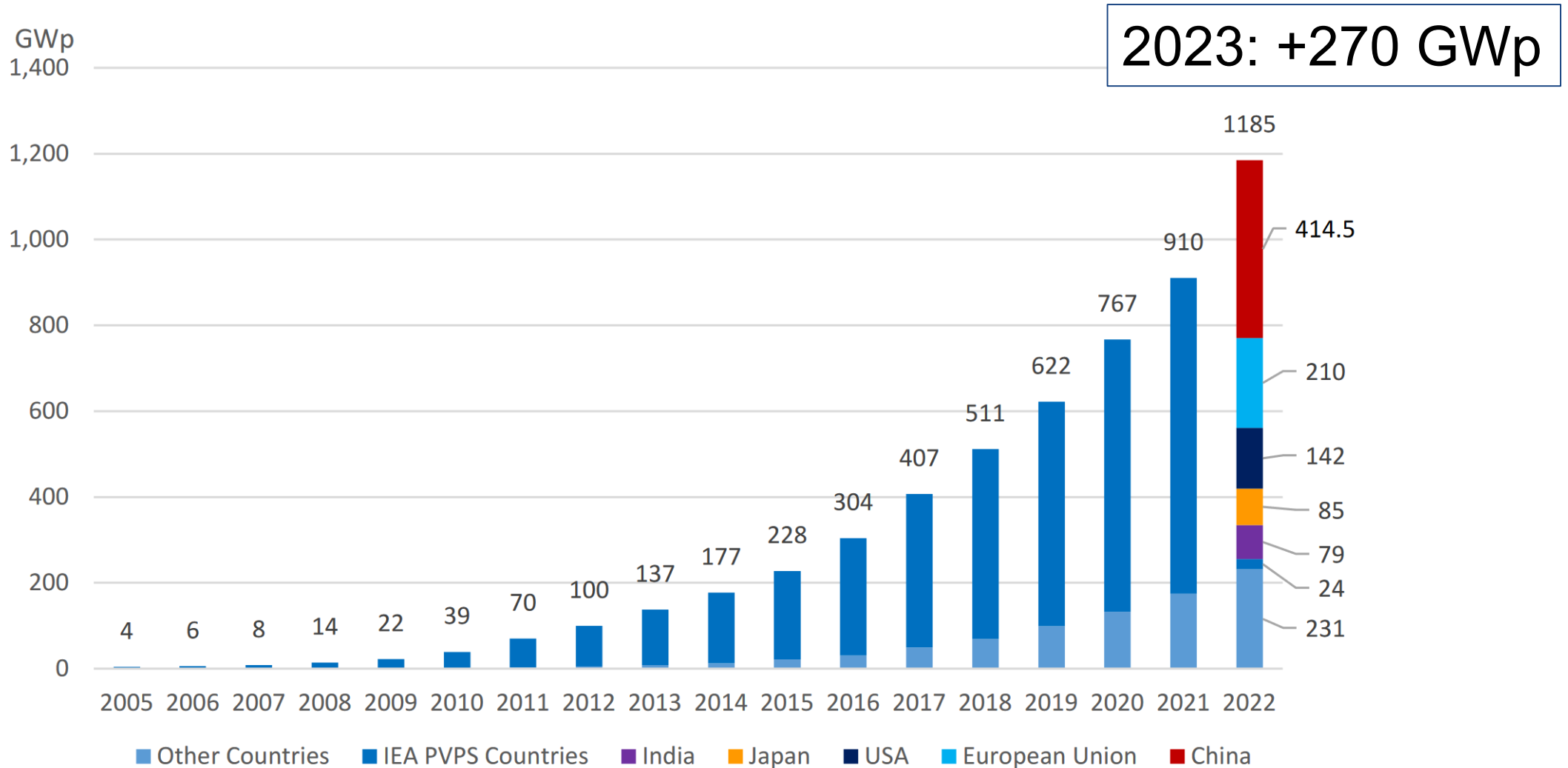
Ausbau Windkraftanlagen in Deutschland 2000-2021

Entwicklung der installierten Windleistung (On- und Offshore)



Energieeinspeisung aus Photovoltaik

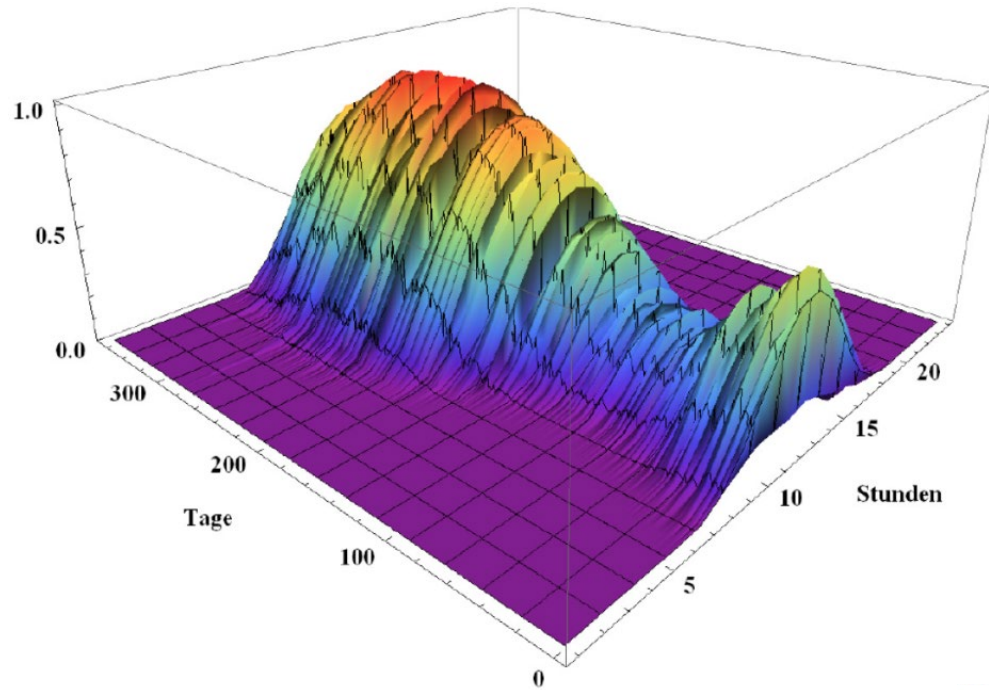
Ausbau Solaranlagen weltweit von 2000 - 2022



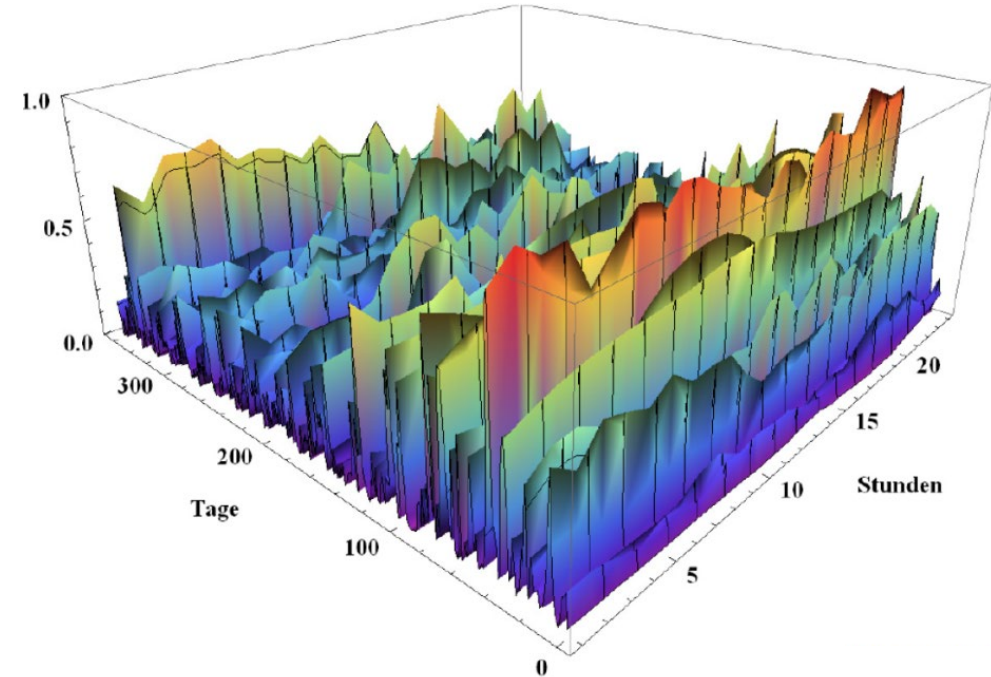
Source: IEA PVPS

Volatilität der Energieeinspeisung aus Sonne und Wind

Stromproduktion CH 2008



Sonne



Wind

Winter vs. Sommer
Tag vs. Nacht

→ Energiespeicher

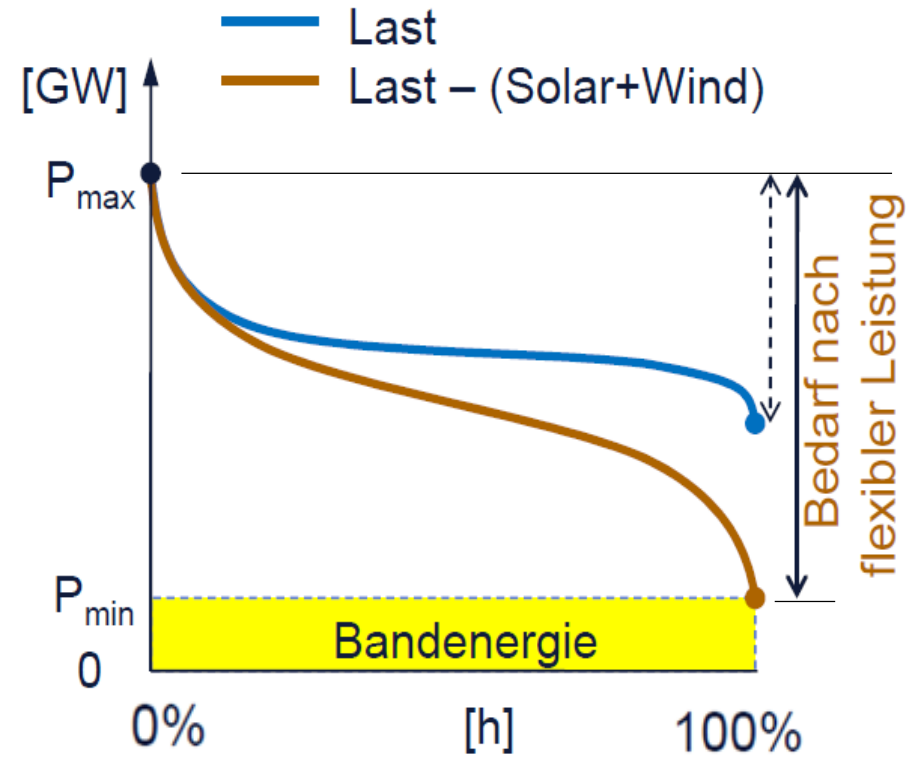
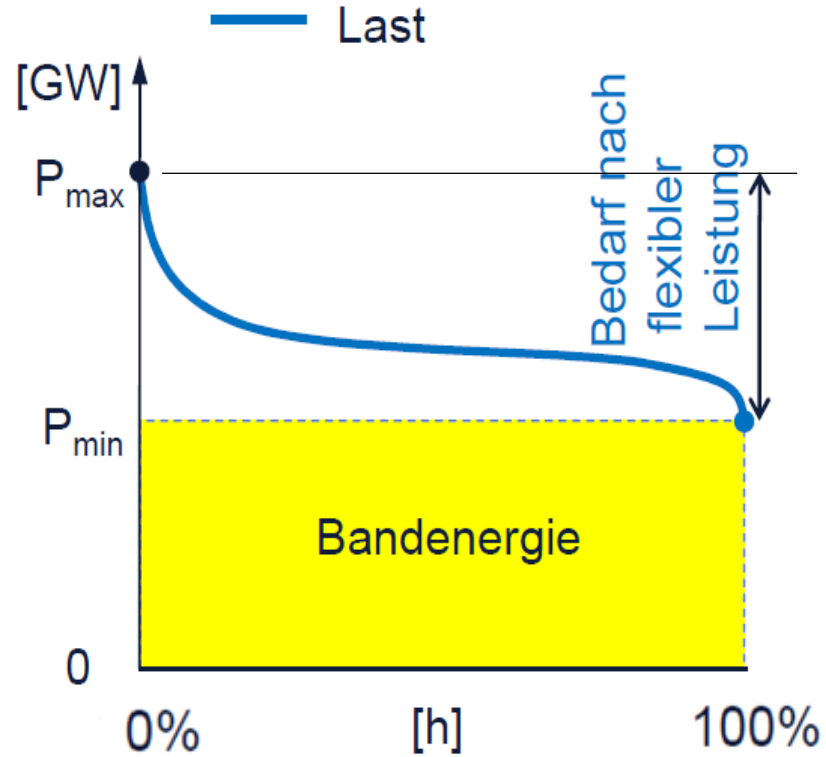
→ (Pump-)Speicherwasserkraft

→ Talsperren

Quelle: Prognos (2012)

Zunahme des Bedarfs an flexibler Speicherkapazität

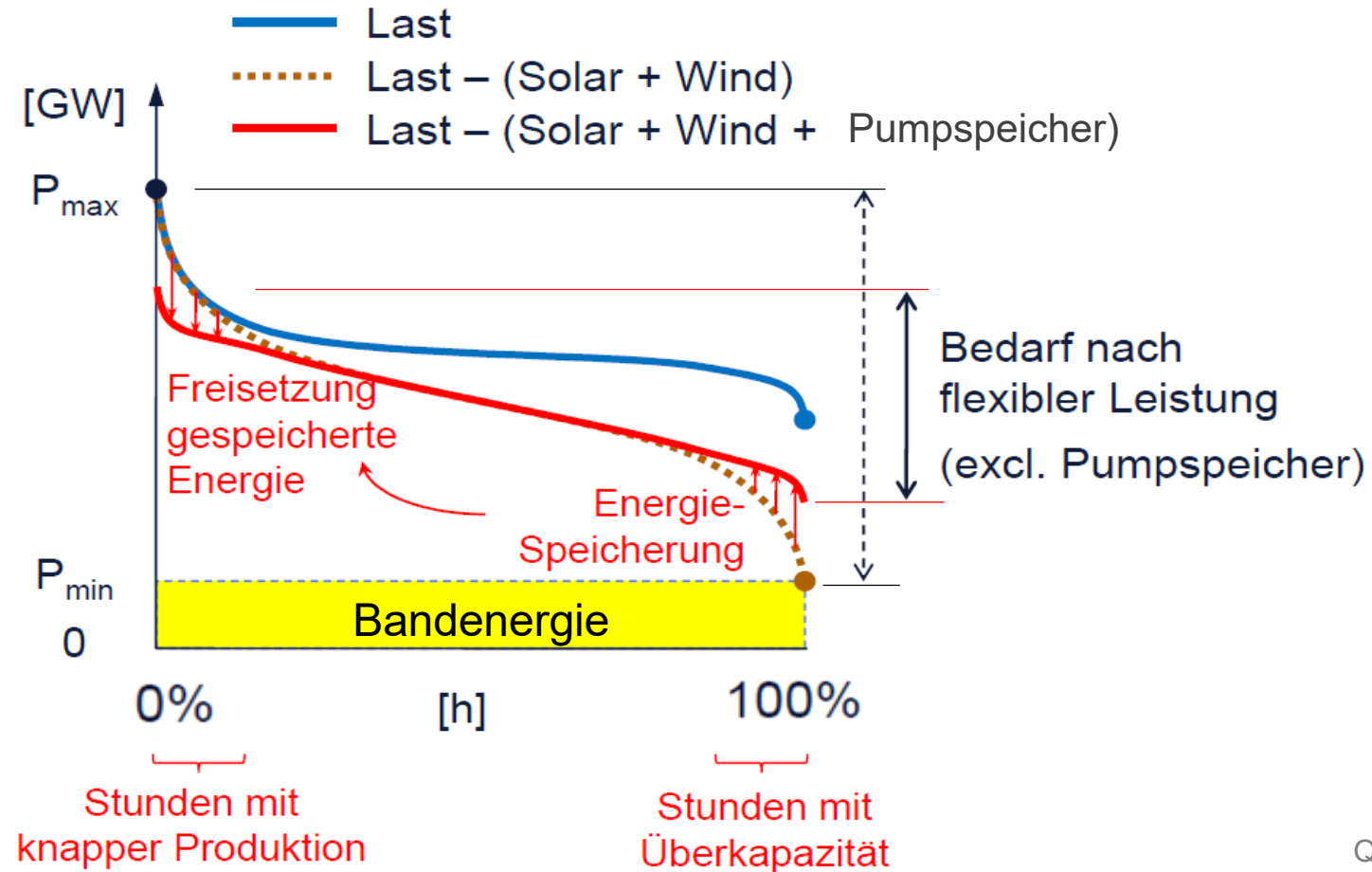
Effekt der zunehmenden Integration erneuerbarer Energiequellen



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)

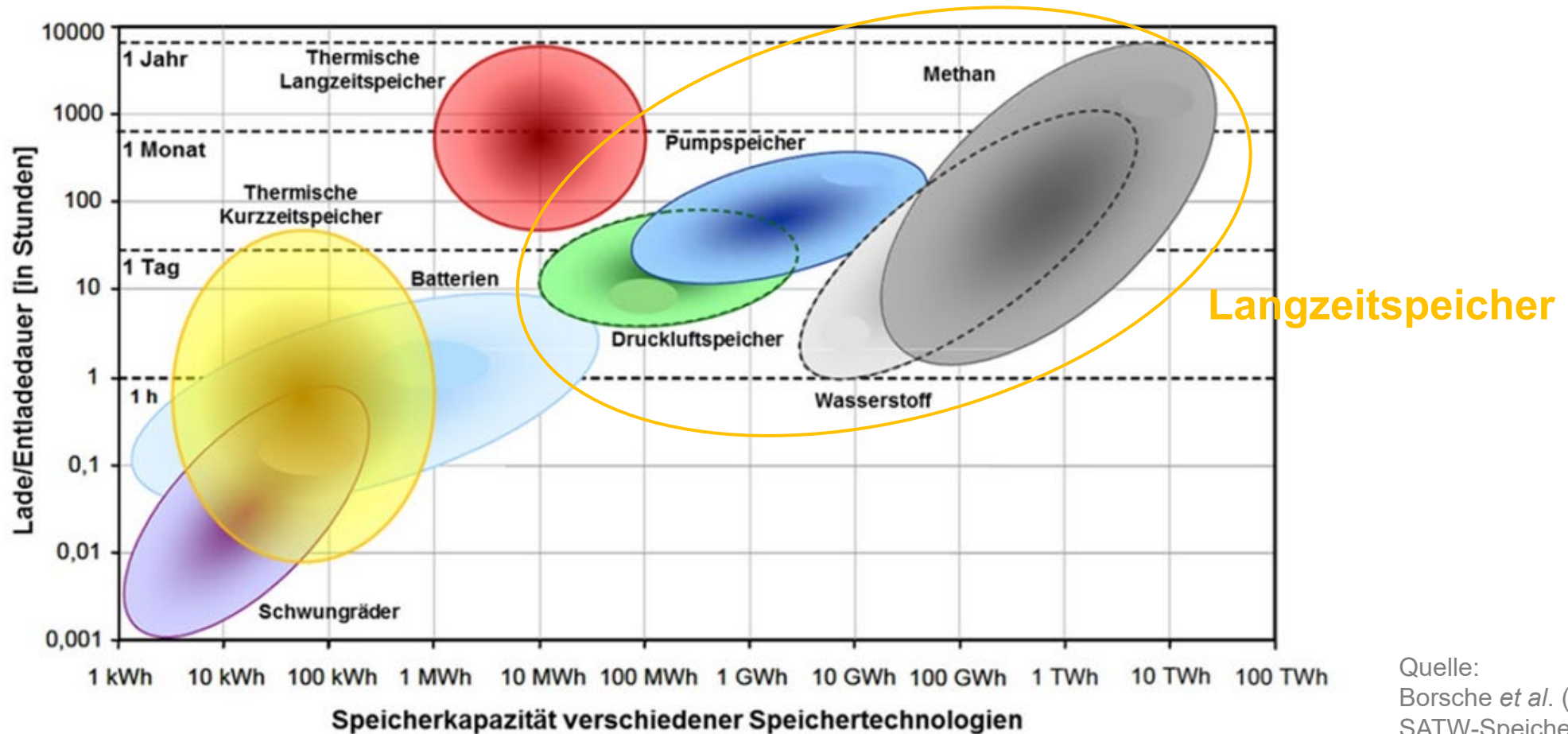
	Thermische Kraftwerke	Gasturbinen	Wasserkraft (Standard)	Wasserkraft (neue Technologie)
Leistungsgradient (%/min)	2 - 4	8 - 12	50 - 100	100% in < 30s
Minimallast (% von P_N)	40	40	40 (F), 20 (K,P)	0 - 5 (alle Typen)
Anfahrzeit	2 - 5 h	< 15 min	< 10 min	< 5 min
Reduktion der Lebensdauer (infolge vermehrter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

F: Francis, K: Kaplan, P: Pelton

Quelle: adaptiert von Sick, ANDRITZ Hydro (2013)

Speicherkapazitäten und Lade-/Entladedauern

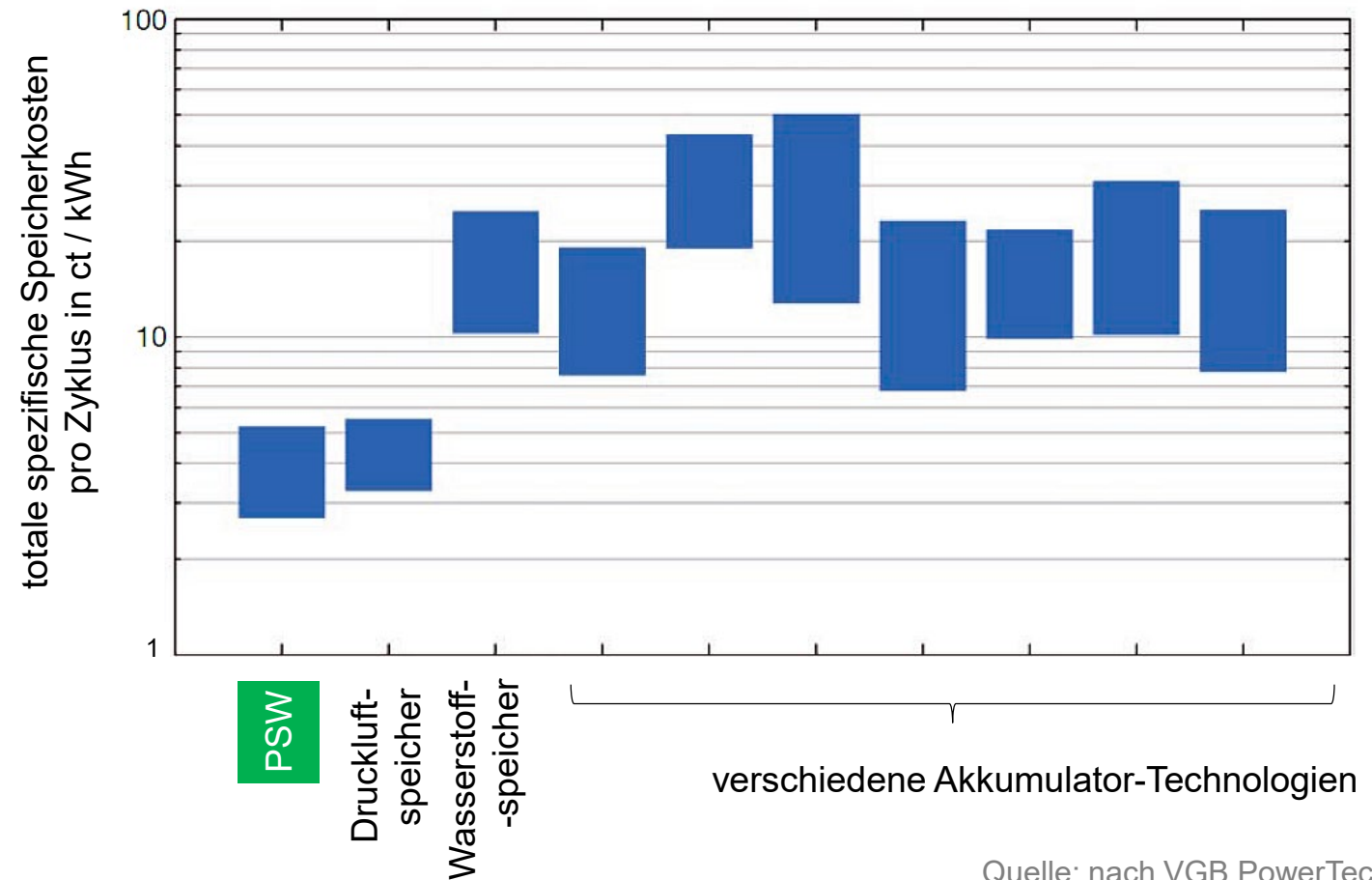
- **Großtechnisch** ausgereifteste Energiespeichertechnologie



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**



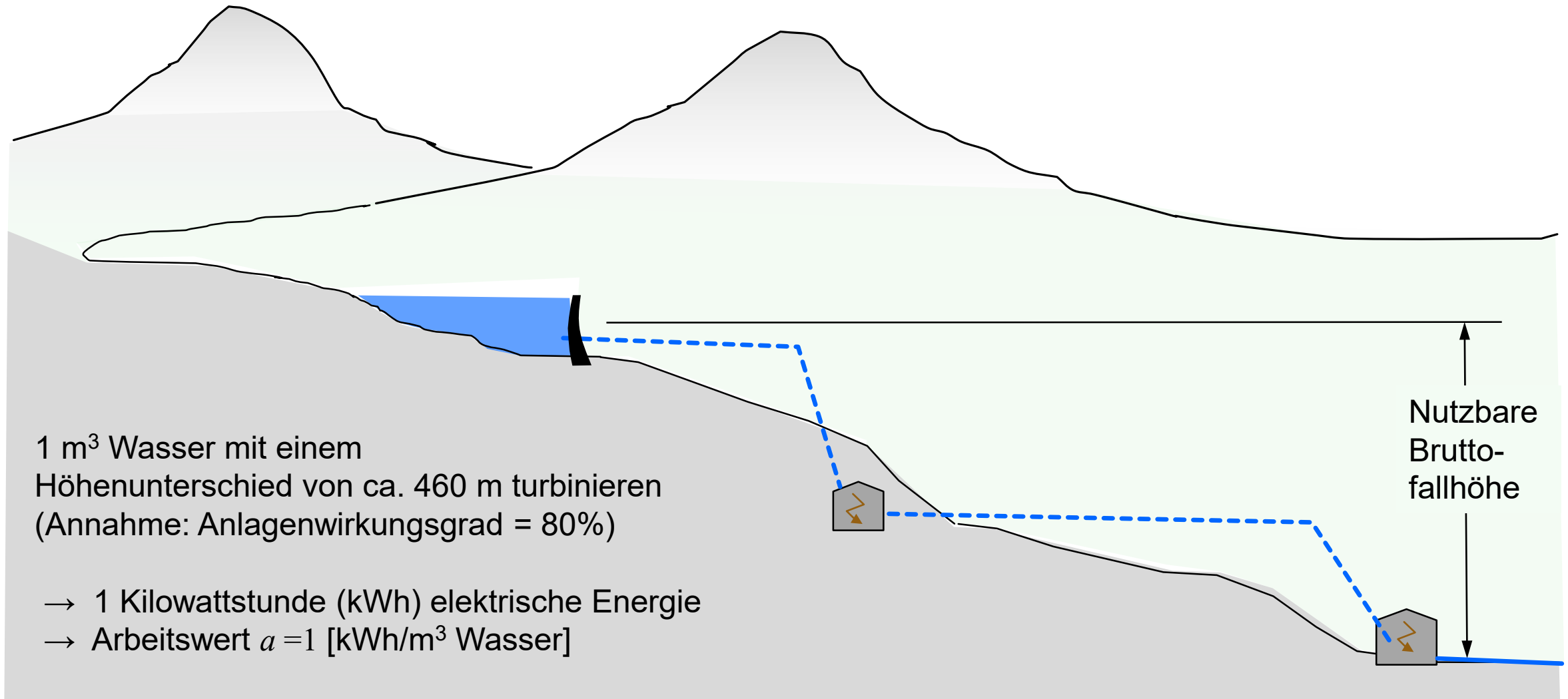
Foto: G. Favre (2023)

Gliederung

Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

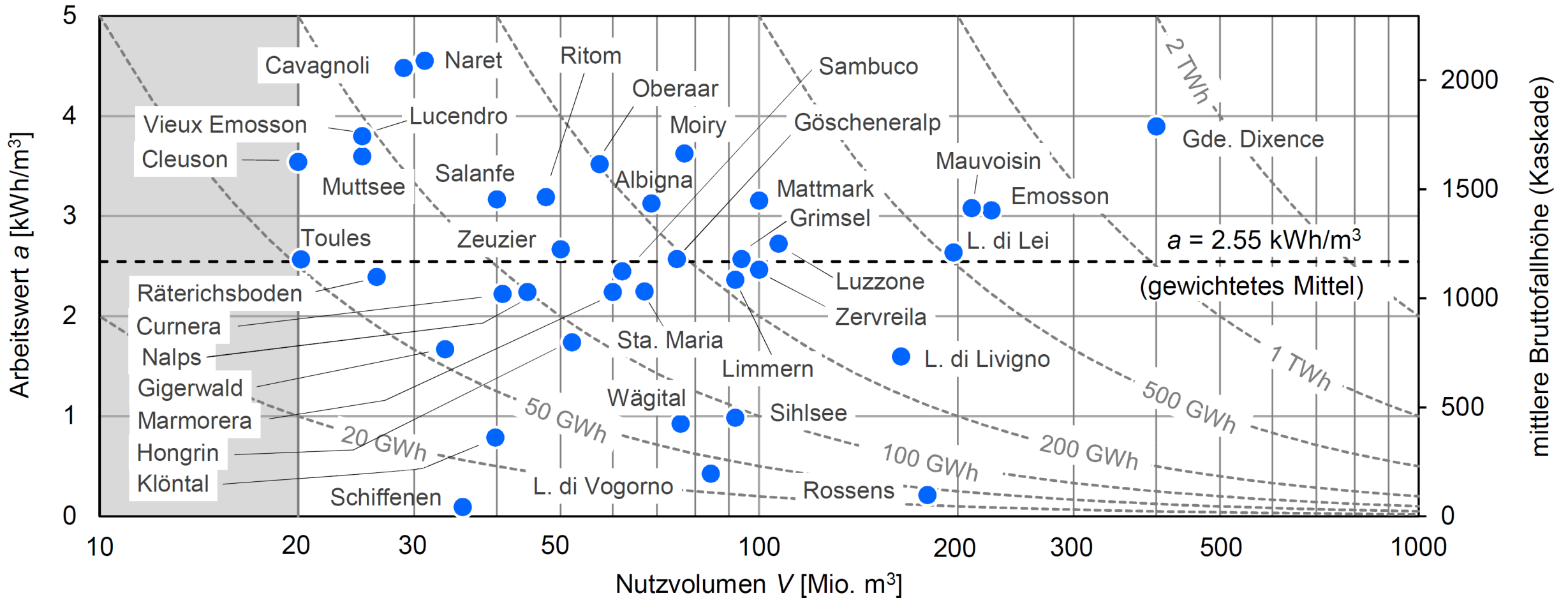
- Energie und Elektrizität: Rolle der Wasserkraft allgemein
- Trümpfe der Wasserkraft
- Rolle der flexiblen (Pump-)Speicherwasserkraft
- **Talsperren für Wasserkraftspeicher**
- Herausforderungen für eine nachhaltige Wasserkraft
- Zusammenfassung

Stauseen als Energiespeicher



Talsperren und Speicherwasserkraftwerke als «Grossbatterien»

Bsp. Schweiz

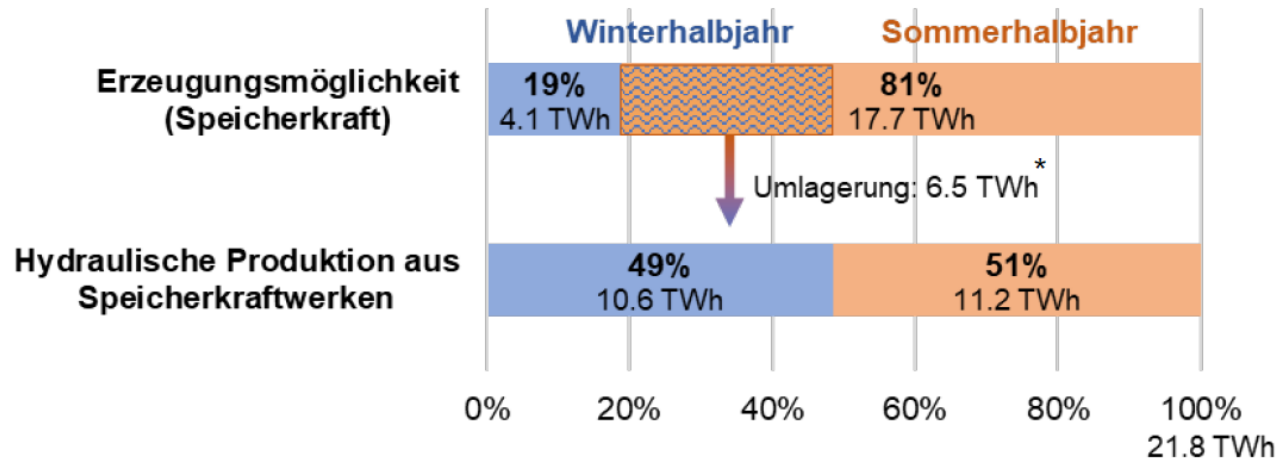


Quelle: Felix et al., Wasser, Energie, Luft, 2020, 1, 1-10

Speicherwasserkraft

Nutzung der (Saison-)Speicher: Bsp. Schweiz

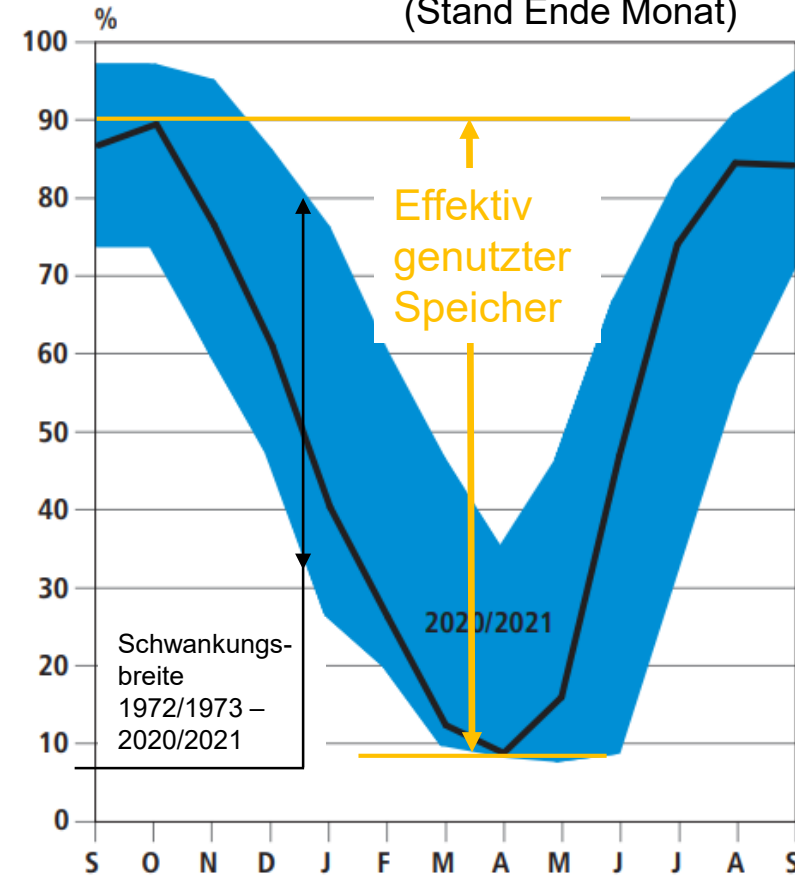
Saison-/Jahresspeicher



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

Speicherinhalt im Jahresverlauf

(Stand Ende Monat)

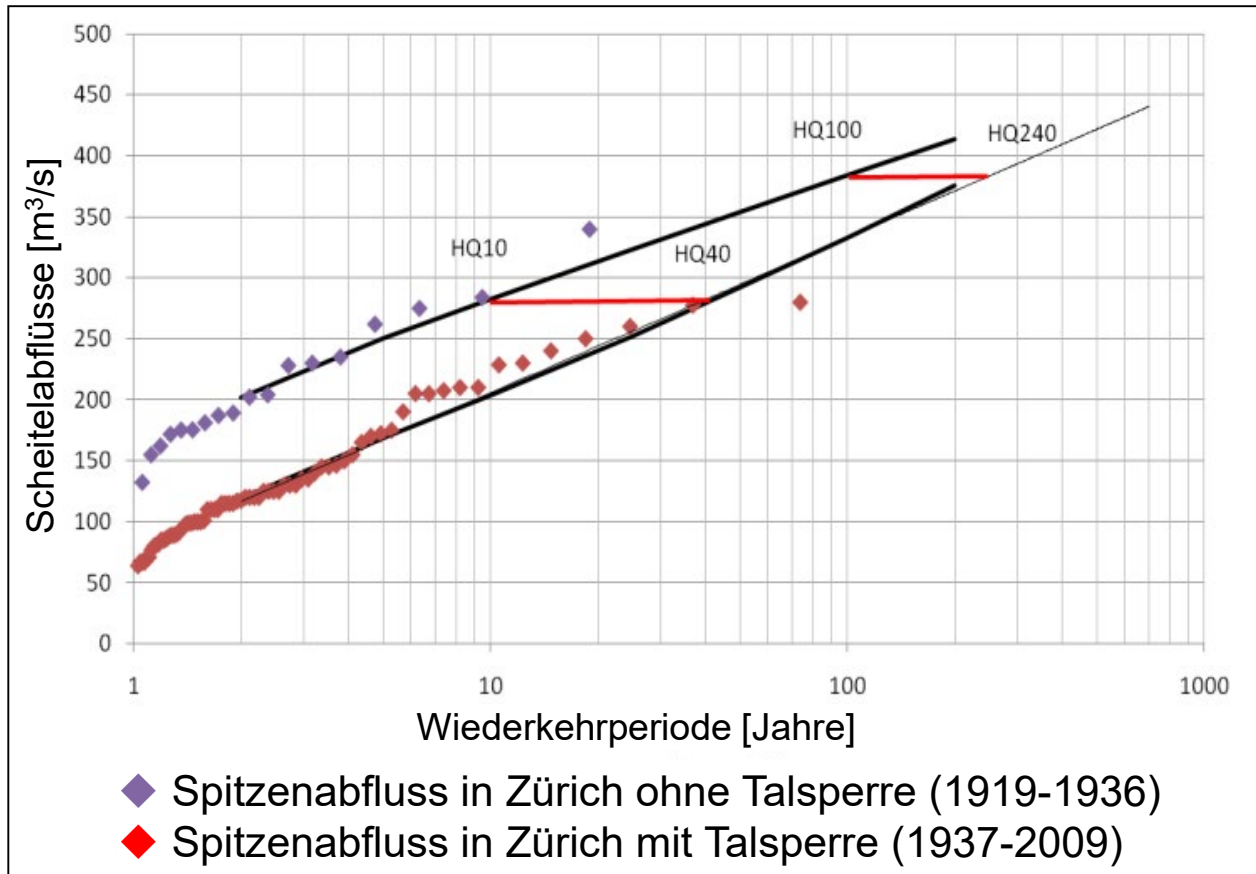


Quelle: BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021

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. m³

Foto: Kraftwerke Mattmark AG

Mehrzweckspeicher: Nutzungsarten

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



Hochwasserrückhaltebecken Orden
(Kanton Graubünden, Schweiz)

Foto:
R. Neidhart, ewz

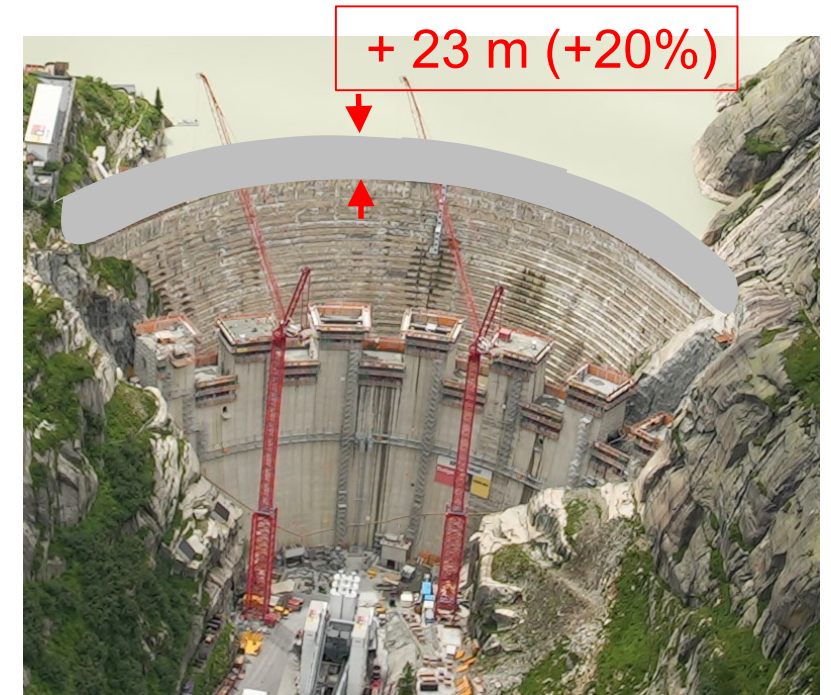
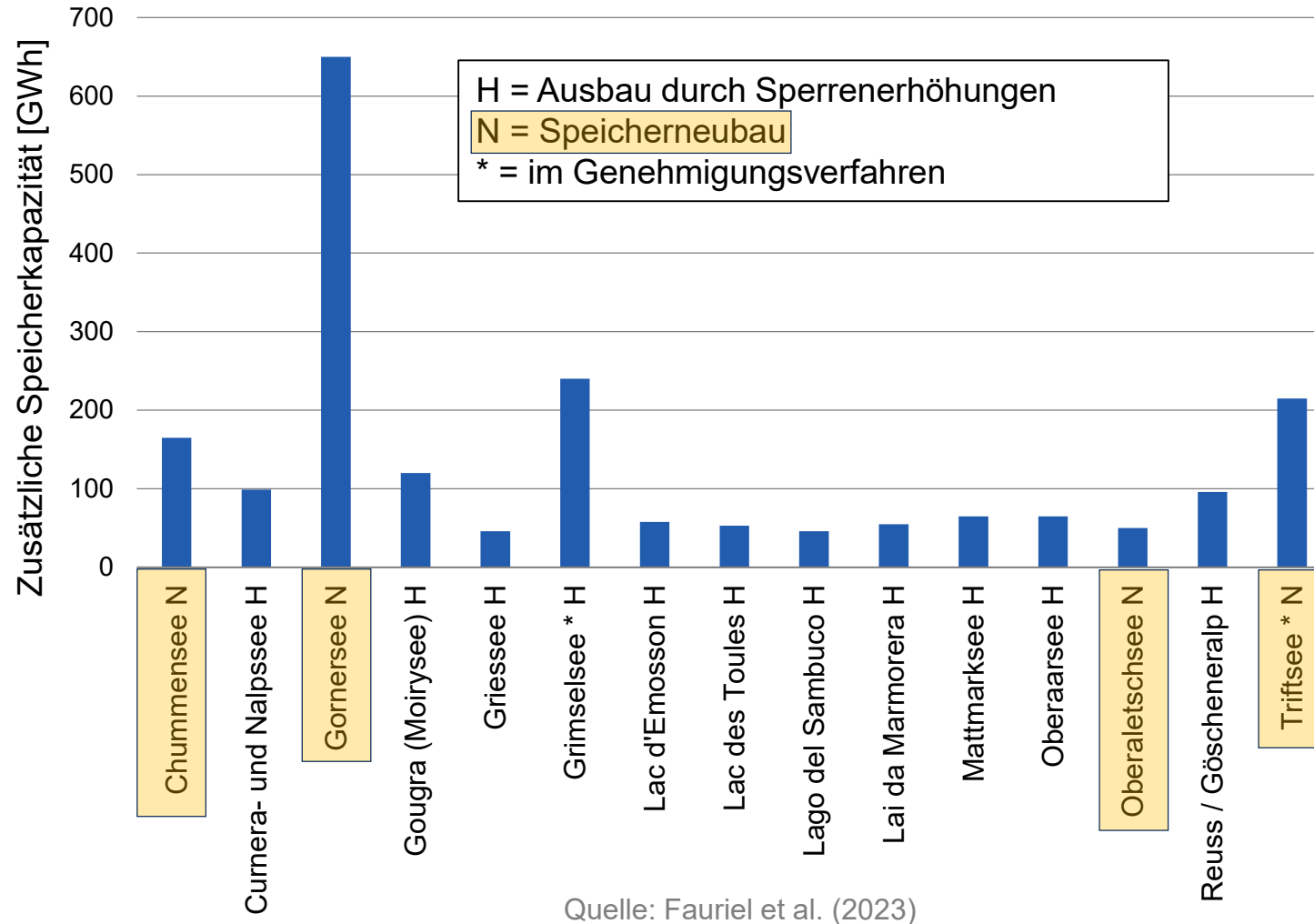


Schwimmende PV-Anlage,
Speicher Les Toules (Kanton Wallis, Schweiz)

Foto:
G. Favre (2023)

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

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



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

Gliederung

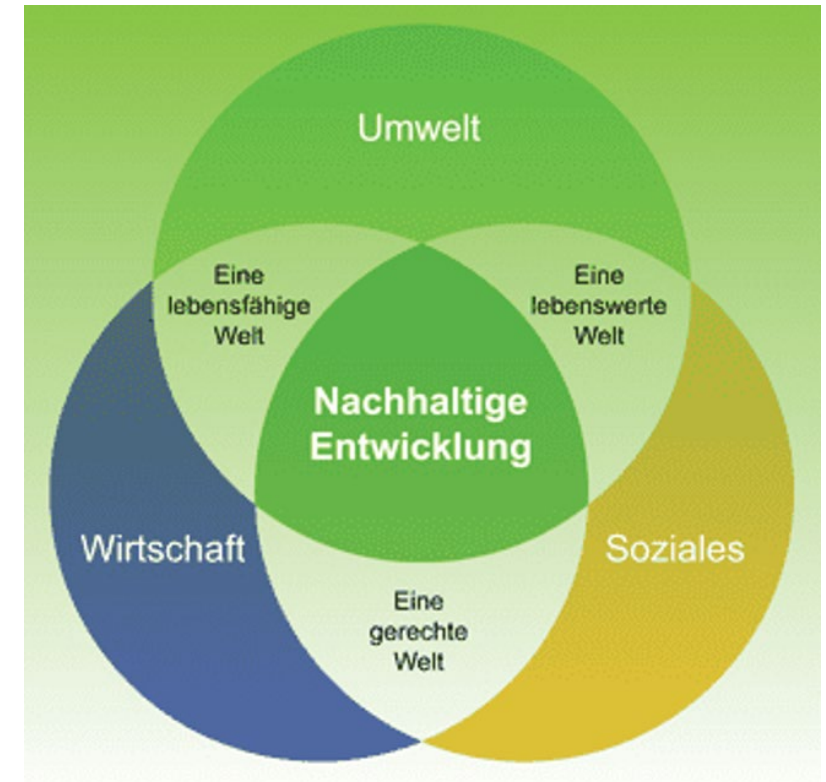
Wasserkraft und Talsperren als Wegbereiter für eine erfolgreiche Energiewende

- 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

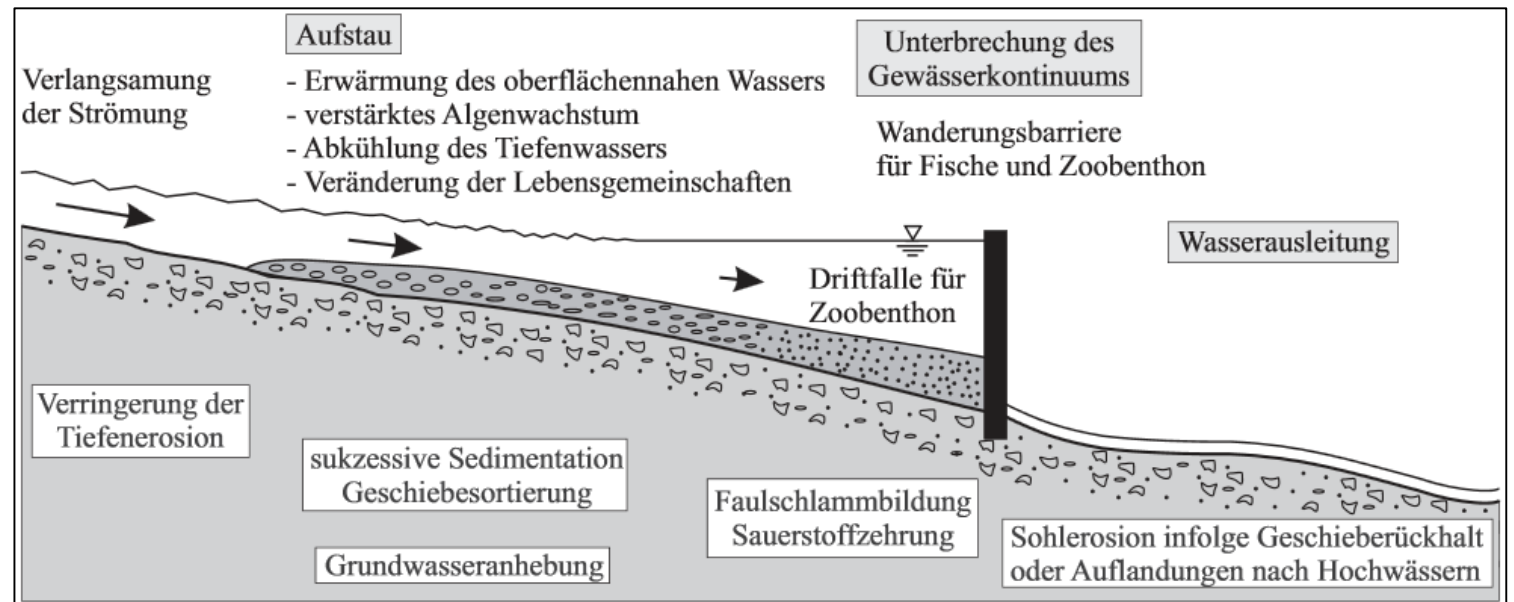
- Ggf. Restwassermengen
- Änderungen Abflussregime
- Auswirkungen auf Hydrographen:
 - großräumige saisonale Abflussverlagerungen
 - ggf. Schwall/Sunk bzw. sog. *Thermopeaking*

- Barrierewirkungen

- Sedimente
- Fischfauna

Auswirkungen von Stauanlagen und Talsperren auf grundlegende biophysikalische Prozesse in Flüssen

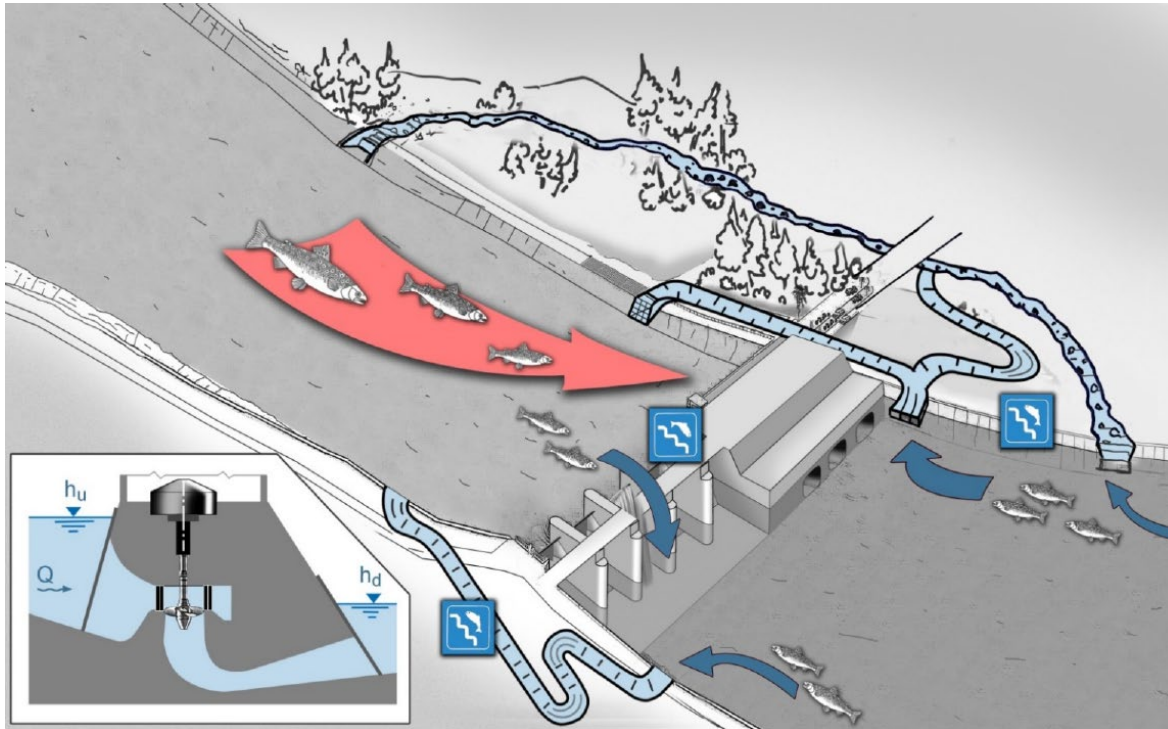
Quelle: nach Jorde (1996) in Giesecke et al. (2014)



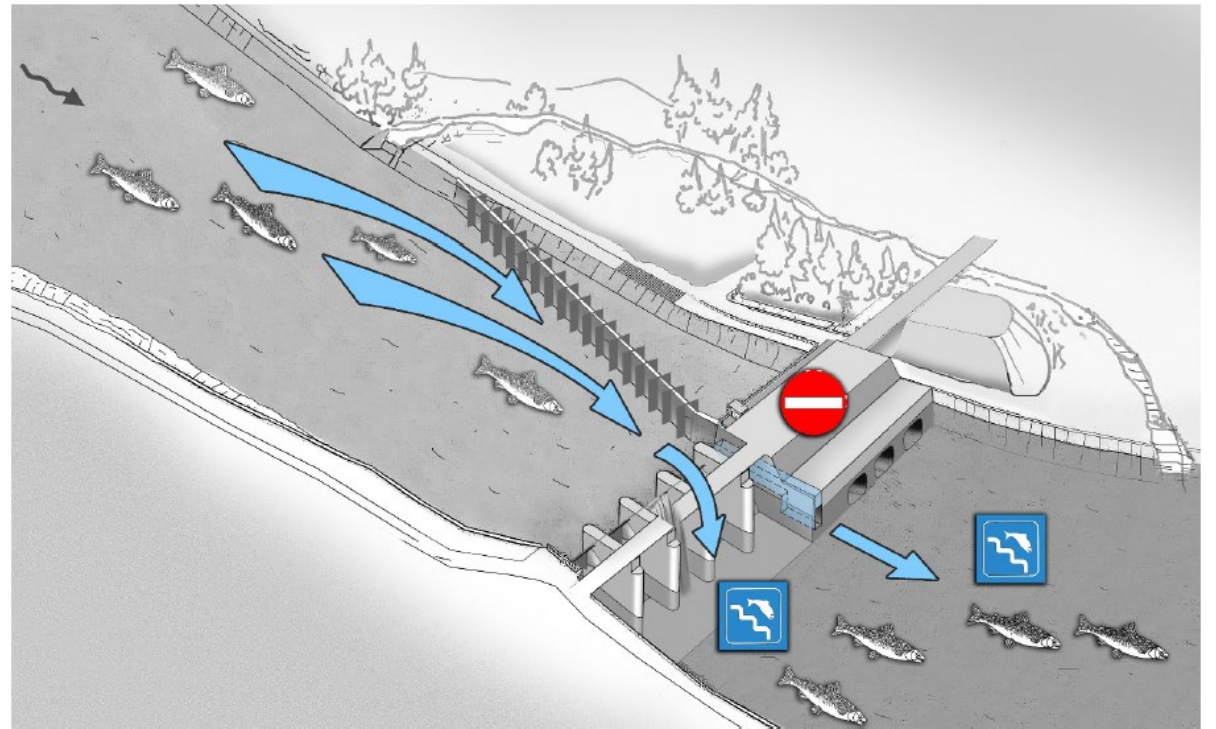
Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

Bsp. Fischschutz und Fischabstieg

ohne Maßnahmen: hohe Wahrscheinlichkeit von Turbinenpassagen



Gegenmaßnahme:
Fischleitrechen-Bypass-System



Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

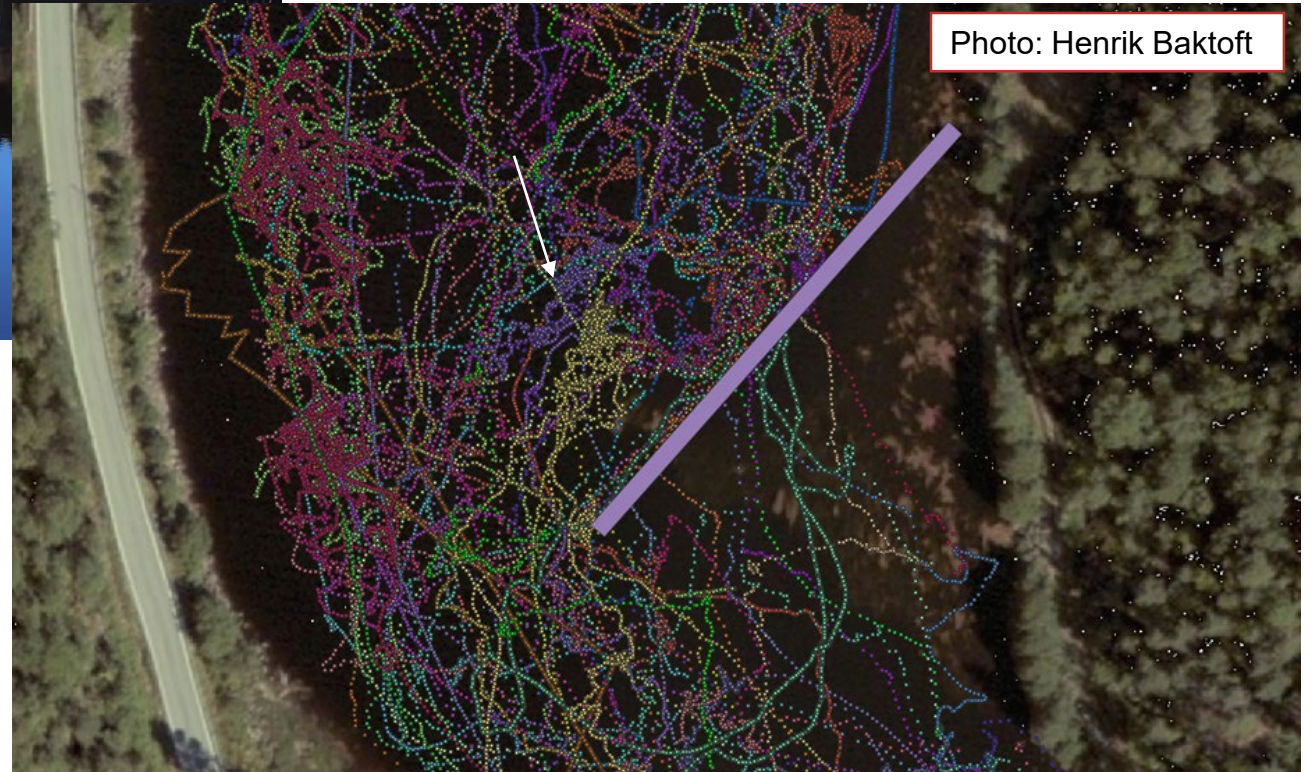
Bsp. Fischschutz und Fischabstieg

Fischleitrechen am Fluss Mandal (Norwegen)



Pilotanlage eines MBR-Fischleitrechens für Lachse am Kraftwerk Laudal

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

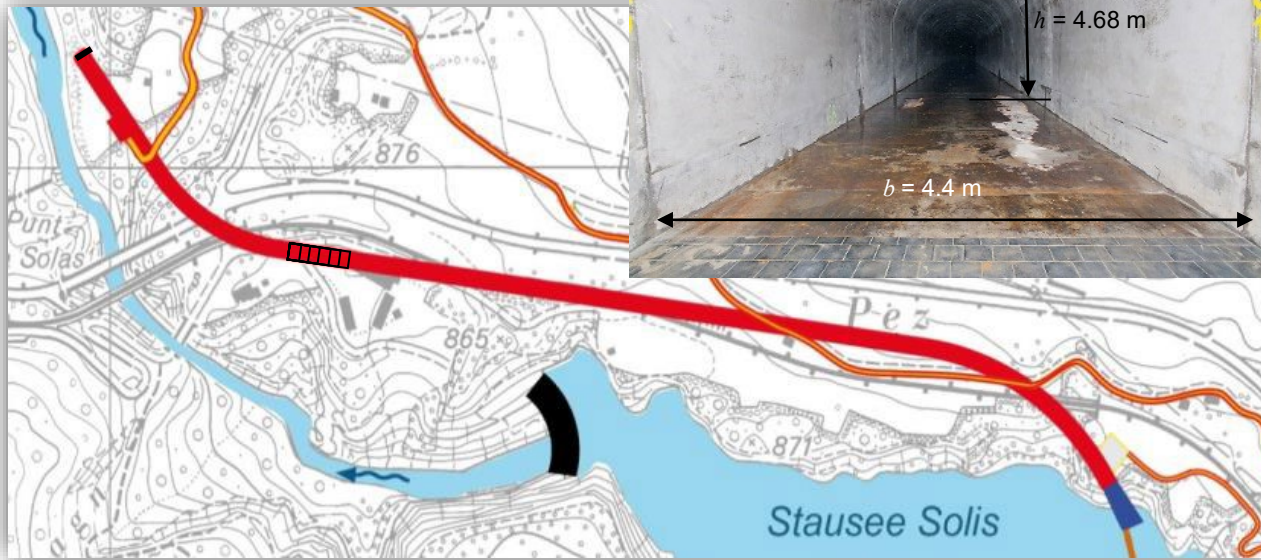


Ausgleichs- und Minderungsmaßnahmen: VAW-Forschung

Bsp. Wiederherstellung des Geschiebe-/Sedimentkontinuums

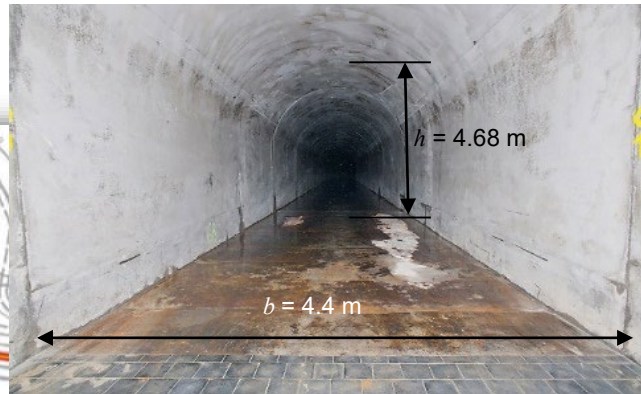
Sedimentumleitstollen Solis (Kanton Graubünden, Schweiz)

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)

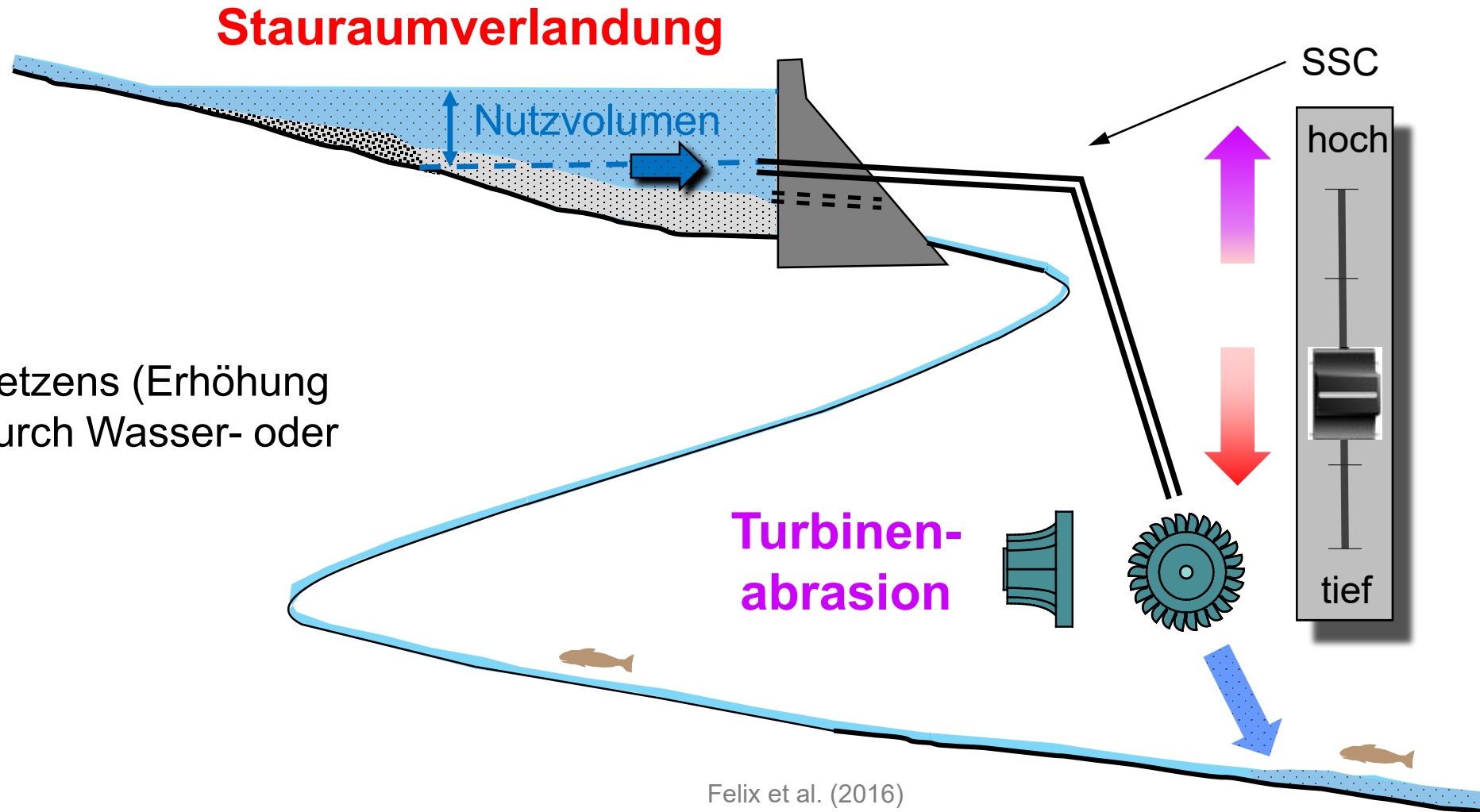
**Turbinen-
abrasion**

SSC

hoch

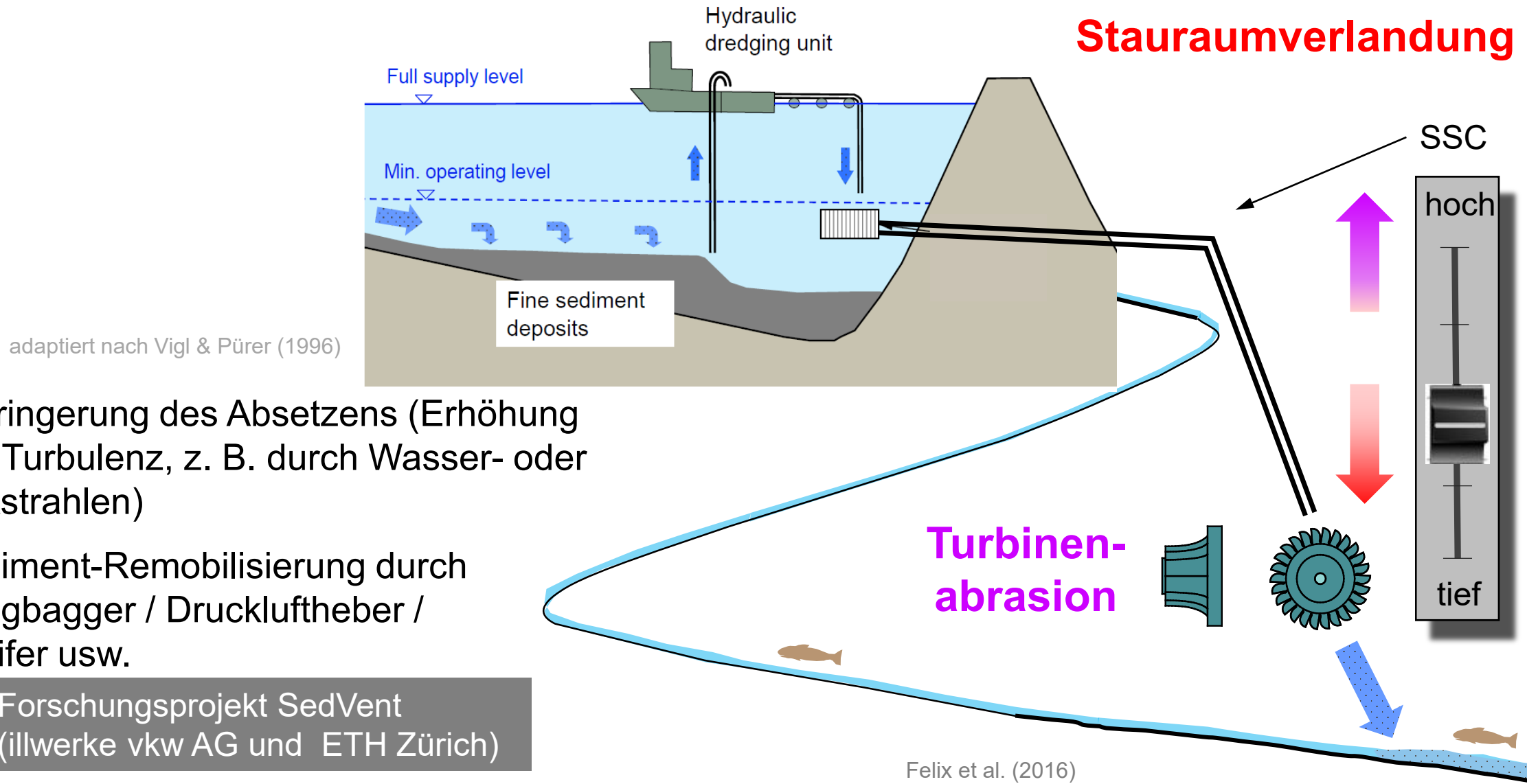
tief

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!**