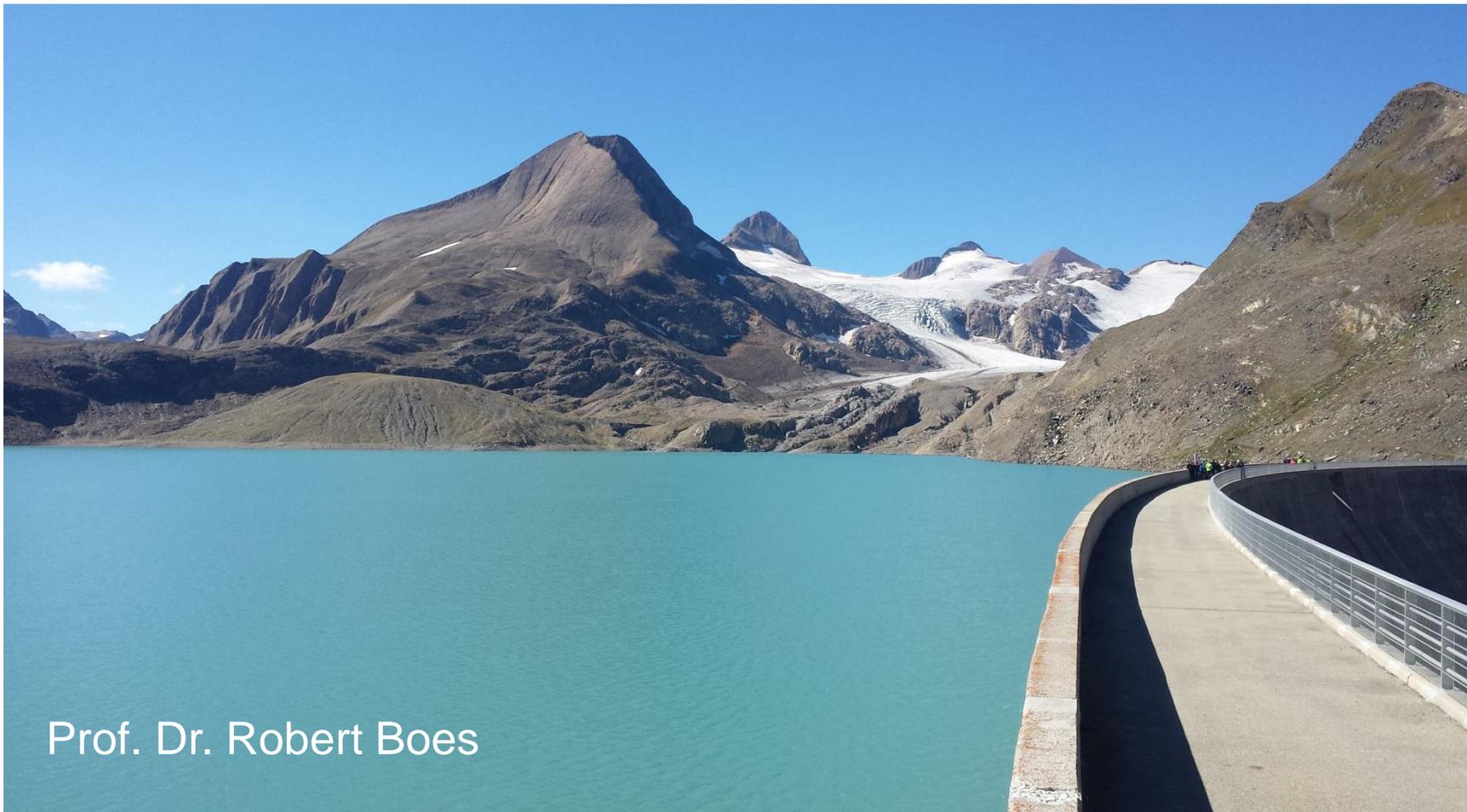


# Weissbuch für die Erstellung neuer, grosser Wasserkraftanlagen

---



Prof. Dr. Robert Boes



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

SCCER-SoE Jahreskonferenz, Sion, 12.09.2016

**ETH** zürich

# Inhalt

Weissbuch für die Erstellung neuer, grosser Wasserkraftanlagen

**Weissbuch** = Sammlung mit Vorschlägen zum Vorgehen in einem bestimmten Bereich

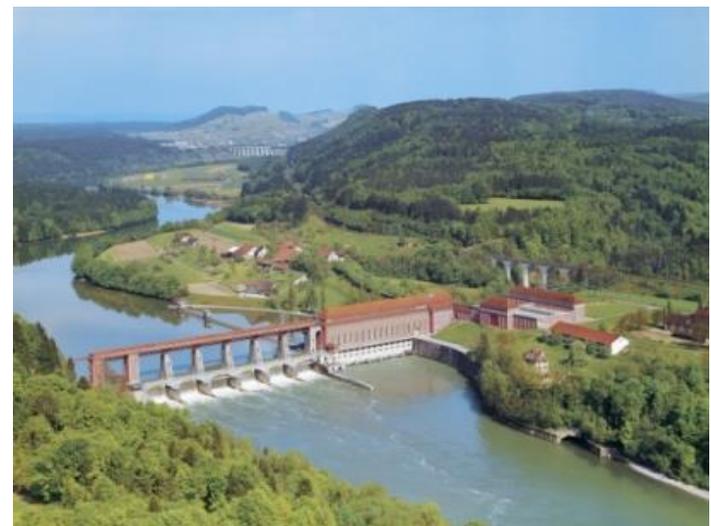
- **Einleitung**
- Rolle der Wasserkraft in der **Energiestrategie 2050**
- **Potential (Gross-)Wasserkraft**
  - Optimierung / Ausbau von Niederdruckanlagen
  - Ausbau bestehender Wasserkraftspeicher
  - Neubau periglaziale Wasserkraft
  - Sonstiger Neubau
- **Schlussfolgerungen**



# Stellenwert der Grosswasserkraft

- 100 Jahre Aufschwung und Konsolidierung zum Rückgrat der CH-Stromversorgung

- Rasanter Zubau Wasserkraft v.a. 1950-1970 aufgrund starkem Anstieg der Nachfrage
- Wasserkraft zeitweise 100%, heute noch 56% der Produktion; ~ 90/10-Regel zum Kraftwerkspark:
  - **90% der Produktion stammen von 14% der Anlagen ( $P > 10$  MW)**
  - 98% der Produktion stammen von 30% der Anlagen ( $P > 1$  MW)
  - 0.6% der Produktion stammen von 53% der Anlagen ( $P < 0.3$  MW)
- Volkswirtschaftliche Bedeutung: Wertschöpfung ~ CHF 2.4 Mrd. pro Jahr und 5'000 Vollzeitstellen



# Erwartetes Ausbaupotenzial Wasserkraft

Energiestrategie 2050: Schätzungen BFE (2012)

| in GWh/a  | Heutige Nutzungsbedingungen | Optimierte Nutzungsbedingungen |
|---|-----------------------------|--------------------------------|
| Neubauten Grosswasserkraft                        | 770                         | 1'430                          |
| Kleinwasserkraft                                  | 1'290                       | 1'600                          |
| Aus- und Umbauten, Erweiterungen Grosswasserkraft | 870                         | 1'530                          |
| Auswirkungen GSchG                                | -1'400                      | -1'400                         |
| <b>Total Wasserkraftpotenzial</b>                 | <b>1'530</b>                | <b>3'160</b>                   |
| <b>Total Grosswasserkraft *</b>                   | <b>380</b>                  | <b>1'700</b>                   |

\* unter der Annahme, dass Auswirkungen GSchG (Restwasserabgaben) zu 90 % auf Gross- und zu 10% auf Kleinwasserkraftanlagen verteilt sind, entsprechend dem heutigen Produktionsanteil

# Vergleich Ausbaupotenzialschätzungen

- **Regelarbeitsvermögen (RAV) 2015:** 36'175 GWh (100%)
- **Netto-Zu-/Ausbau bis 2050:**

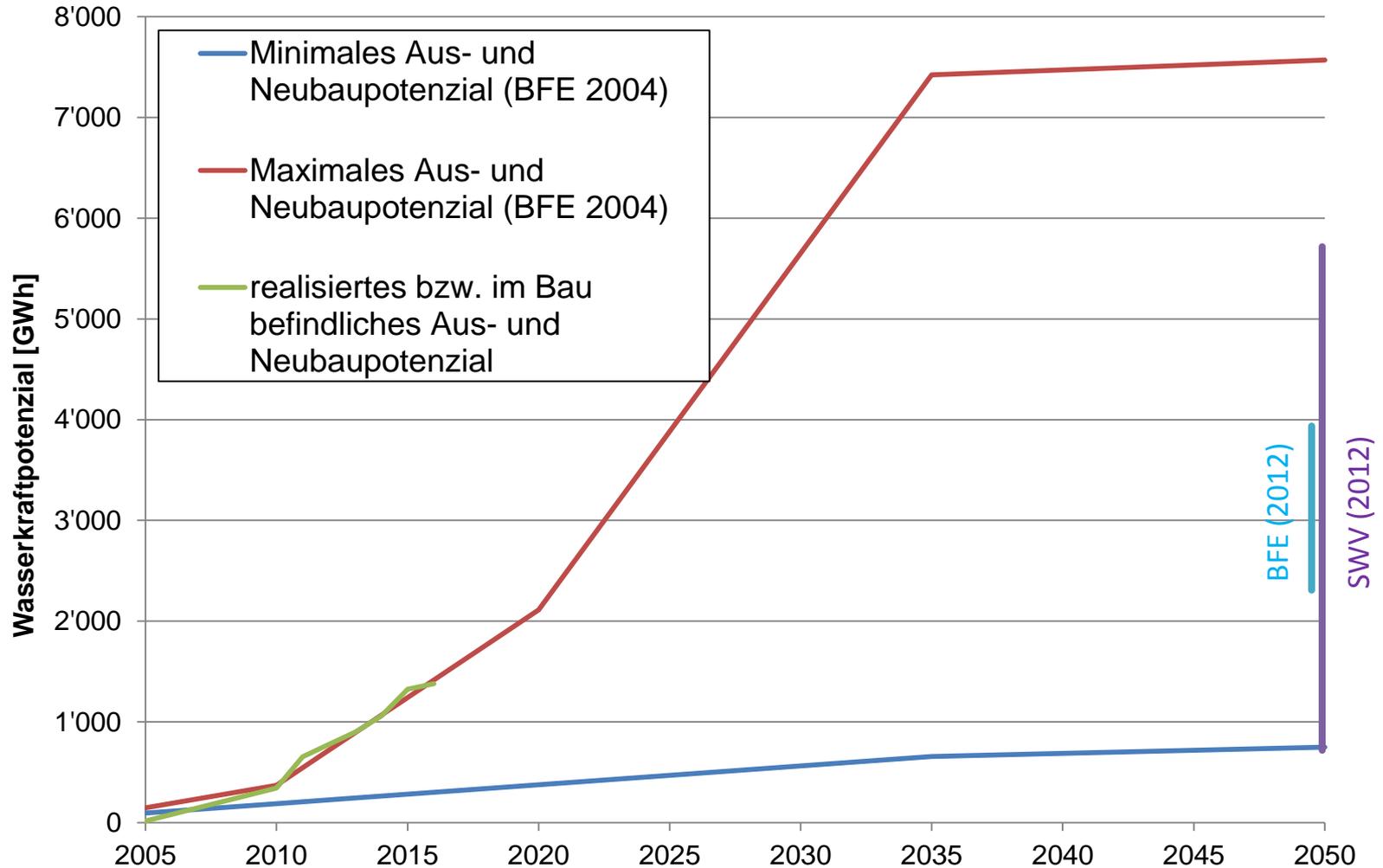
## **BFE (2012)**

- heutige Nutzungsbedingungen +1'530 GWh (+4.2%)
- optimierte Nutzungsbedingungen +3'160 GWh (+8.7%)

## **SWV (2012)**

- heutige Rahmenbedingungen ±0 GWh (±0%)
- optimierte Rahmenbedingungen +4'000÷5'000 GWh (+11÷14%)

# Vergleich Ausbaupotenzialschätzungen



Quelle: adaptiert nach Boes (2011)

# Wasserkraftpotential in der Schweiz

## Neubau/Erweiterungen grosser Kraftwerke

Realisierungswahrscheinlichkeit gemäss BFE

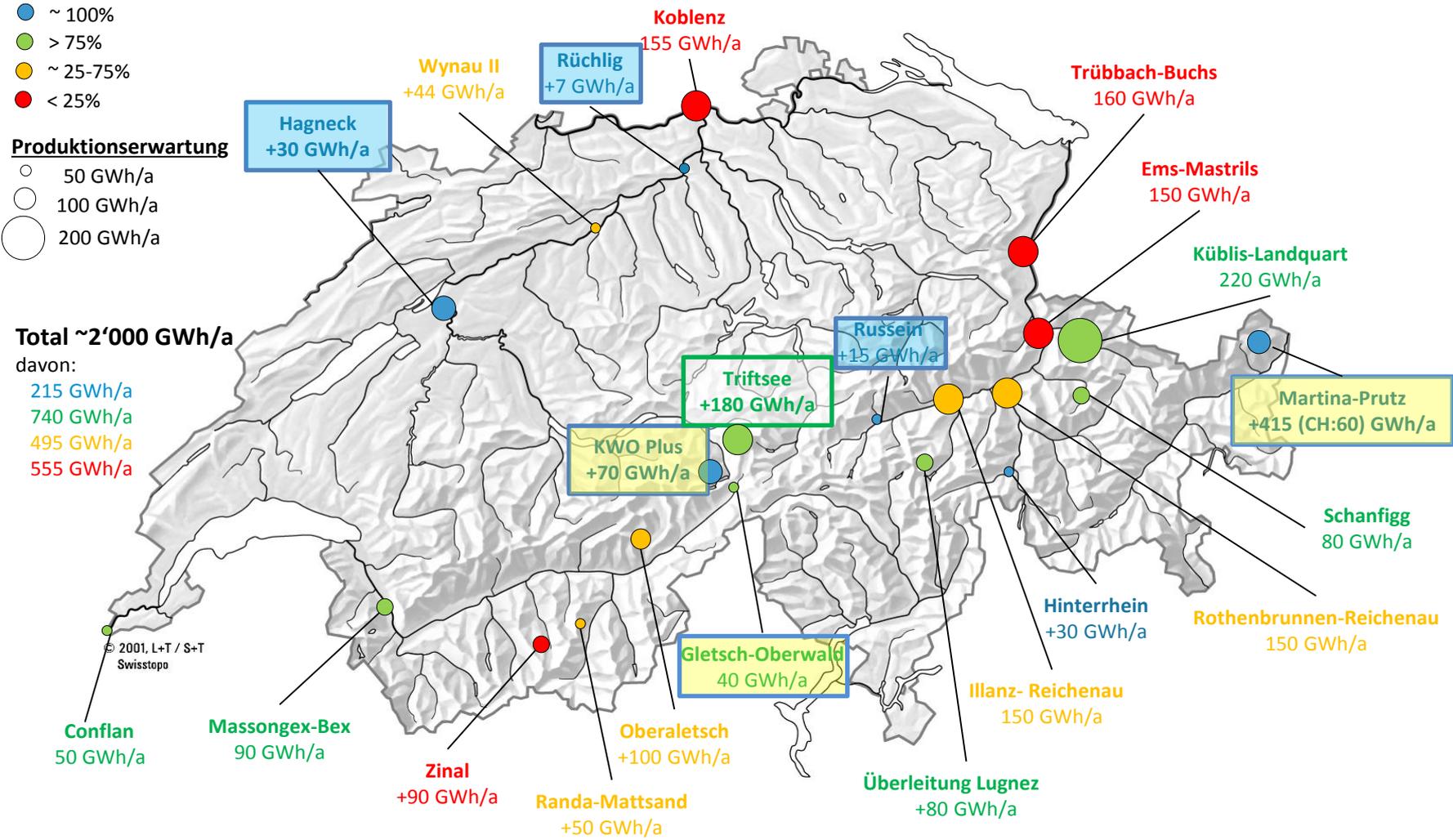
- ~ 100%
- > 75%
- ~ 25-75%
- < 25%

Produktionserwartung

- 50 GWh/a
- 100 GWh/a
- 200 GWh/a

Total ~2'000 GWh/a

- davon:
- 215 GWh/a
  - 740 GWh/a
  - 495 GWh/a
  - 555 GWh/a



© 2001, L+T / S+T  
Swisstopo

Karte: Darstellung nach SWV; Datenquelle: BFE (2012), Ergänzungen SWV (2013), VAW (2014+2016)

# Anlagenoptimierungen / Ausbau Niederdruckanlagen

- Bsp. KW Rheinfelden: alt 185 GWh, neu 600 GWh (+224 %)



# Anlagenoptimierungen / Ausbau Niederdruckanlagen

- **Verbleibendes Potenzial** zur Steigerung des Regelarbeitsvermögens (RAV) **bedeutender bestehender grosser Niederdruckkraftwerke** (bei Grenzkraftwerken nur CH-Anteil berücksichtigt)

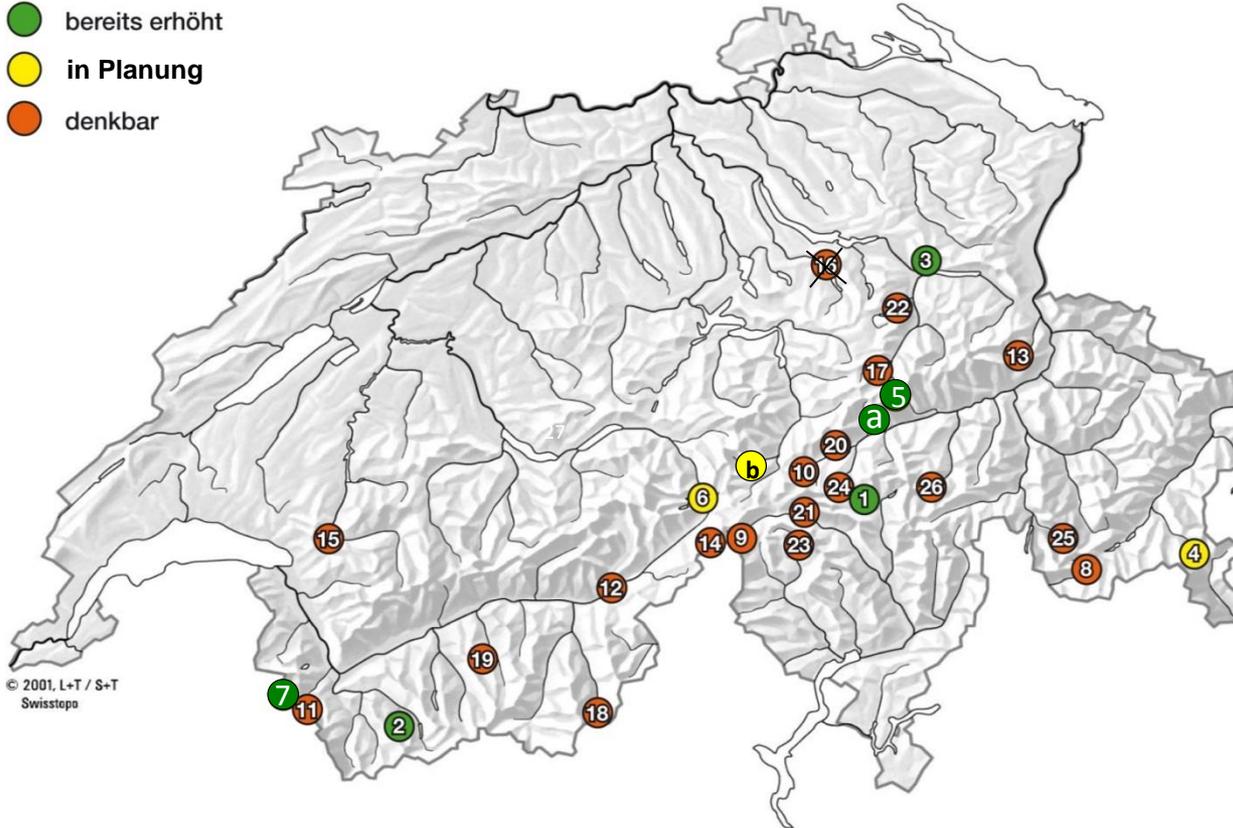
| Fluss bzw. Kraftwerke (KW) | RAV 2011          | RAV der seit 1999 erneuerten KW | Verbleibendes RAV für Ausbauten | Zunahme um ... % | Verbleibendes Potenzial |
|----------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------|
|                            | [GWh]             |                                 |                                 |                  | [GWh]                   |
| Rhein                      | 3190              | 1280                            | 1910                            | 19 <sup>1)</sup> | 363                     |
| Aare                       | 2550              | 1120                            | 1430                            | 21 <sup>2)</sup> | 300                     |
| Bremgarten / Reuss         | 106               | -                               | 106                             | 8 <sup>3)</sup>  | 8                       |
| Rhone <sup>4)</sup>        | 648 <sup>5)</sup> | 628                             | 20                              | 8 <sup>3)</sup>  | 2                       |
| <b>Total</b>               |                   |                                 |                                 |                  | <b>rund 670</b>         |

- 1) Mittelwert der seit 1999 am Rhein umgebauten Anlagen (ohne KW Rheinfelden, da dies quasi einem Neubau entspricht)
- 2) Mittelwert der seit 1999 an der Aare umgebauten Anlagen (ohne KW Ruppoldingen, da dies quasi einem Neubau entspricht)
- 3) Mittelwert der am KW Chancy-Pougny und KW Verbois (Rhone) seit 1999 durch Umbauten erzielten Produktionssteigerung
- 4) KW Chancy-Pougny, KW Verbois und KW Seujet
- 5) Bezugsjahr 2013

# Ausbau Wasserkraftspeicher durch Sperrenerhöhungen

Erhöhung vorhandener Talsperren um  $\leq 10\%$

- bereits erhöht
- in Planung
- denkbar



© 2001, L+T / S+T  
Swisstopo

## Bereits erhöht bzw. Neubau:

- 1 Luzzone (17 m)
- 2 Mauvoisin (13.5 m)
- 3 Muslen (5 m)
- 5 Muttsee (neu, 35 m)
- 7 Vieux-Emosson (20 m)
- a Barcuns (5 m)

## In Planung:

- 4 Lago Bianco N/S
- 6 Spitalamm/Seeuferegg (101 hm<sup>3</sup>)
- 6 Göscheneralp (76 hm<sup>3</sup>)

## Denkbar:

- 8 Albigna (70 hm<sup>3</sup>)
- 9 Cavagnoli (29 hm<sup>3</sup>)
- 10 Curnera (40.8 hm<sup>3</sup>)
- 11 Emosson (227 hm<sup>3</sup>)
- 12 Gebidem (9.2 hm<sup>3</sup>)
- 13 Gigerwald (33.4 hm<sup>3</sup>)
- 14 Gries (18 hm<sup>3</sup>)
- 15 Hongrin (52 hm<sup>3</sup>)
- 16 ~~In den Schlagen/  
Hünernerattdamm~~
- 17 Limmern (92 hm<sup>3</sup>)
- 18 Mattmark (100 hm<sup>3</sup>)
- 19 Moiry (77 hm<sup>3</sup>)
- 20 Nalps (44.5 hm<sup>3</sup>)
- 21 Piora (47.5 hm<sup>3</sup>)
- 22 Rhodannenberg (39.8 hm<sup>3</sup>)
- 23 Sambucco (64 Mio. m<sup>3</sup>)
- 24 Santa Maria (67 hm<sup>3</sup>)
- 25 Valle di Lei (197 hm<sup>3</sup>)
- 26 Zervreila (100 hm<sup>3</sup>)

**Aktuelle Preisdifferenz Sommer-Winter führt nicht zu ausreichender Wirtschaftlichkeit**

Karte: Darstellung SWV; Quellen: BFE (2004), EPFL (2012), VAW (2016)

# Ausbau Wasserkraftspeicher durch Sperrenerhöhungen

Erhöhung vorhandener Talsperren um  $\leq 10\%$

**Erhöhung von** rund 20 bestehenden **Talsperren** um ca. 10% brächte **zusätzlich** rund

- +370 hm<sup>3</sup> Stauraumvolumen (+25%)
- **+2'000 GWh Energie im Winterhalbjahr**

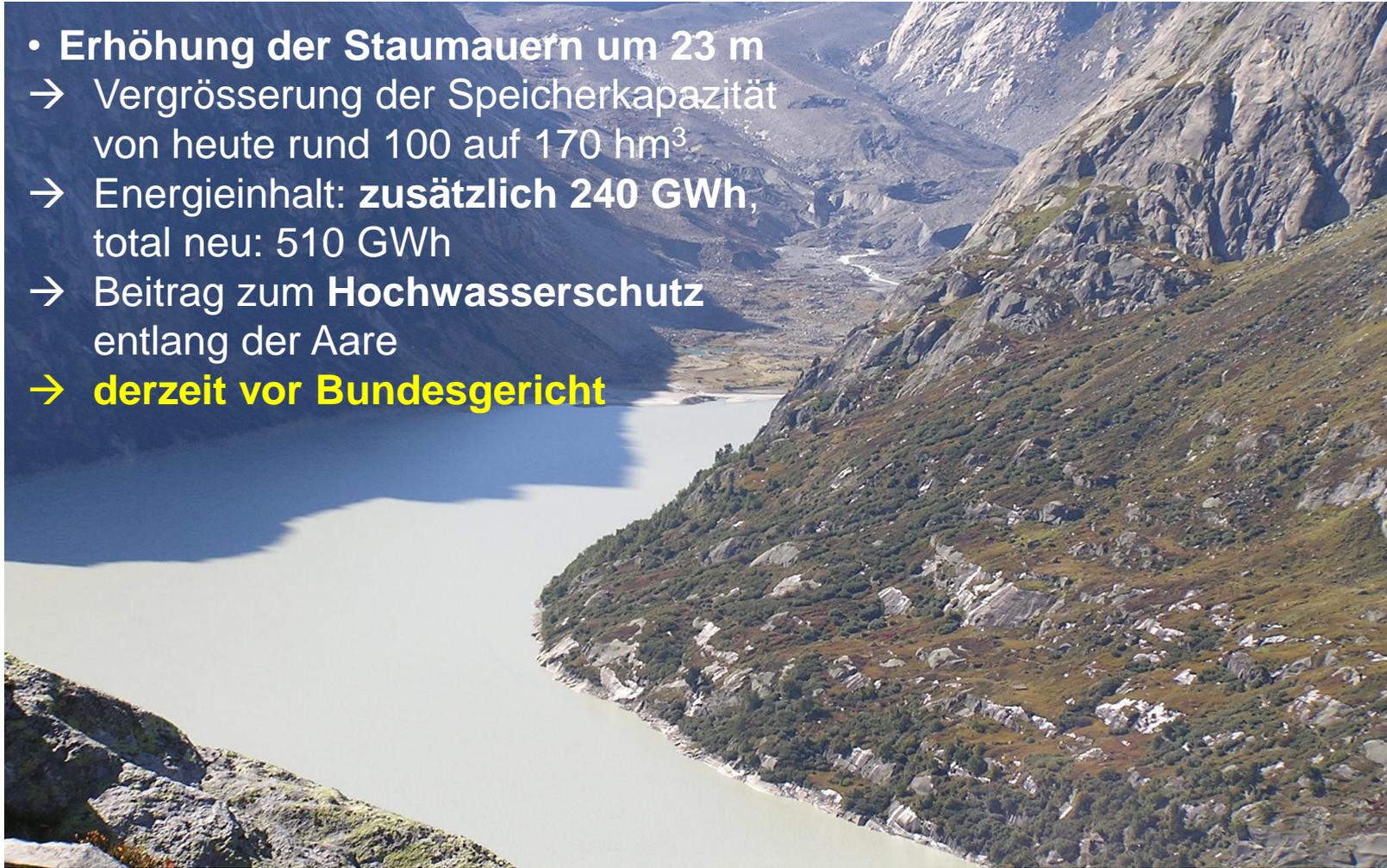
## **Stromdefizit im Winterhalbjahr (saisonaler Effekt)**

- Deckung der Lücke durch
    - Importe,
    - neue Gaskombi-Kraftwerke oder
    - **zusätzliche saisonale Speicher**
- Im **Bestszenario** («Neue Energiepolitik») müssen **rund 3'000 GWh** bereitgestellt werden

# Ausbau Wasserkraftspeicher durch Sperrenerhöhungen

Widerstände am Bsp. Grimsensee: Moorschutz

- Erhöhung der Staumauern um 23 m
  - Vergrößerung der Speicherkapazität von heute rund 100 auf 170 hm<sup>3</sup>
  - Energieinhalt: **zusätzlich 240 GWh**, total neu: 510 GWh
  - Beitrag zum **Hochwasserschutz** entlang der Aare
  - **derzeit vor Bundesgericht**



Quellen: KWO (2012), Stettler (2014)

# Neubau periglaziale Wasserkraft

## Neue Speicherseen infolge Gletscherrückgang



Rhonegletscher ca. 1900



Rhone



# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherseen infolge Gletscherrückgang

## Rückzug Triftgletscher 1948 bis 2006



# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherseen: Bsp. Triftgletscher

- Triftspeicher zur Erweiterung des Kraftwerksystems der KWO
- 85 hm<sup>3</sup> resp. 215 GWh Speichervolumen
- 180 GWh zusätzliche hochwertige Energieproduktion durch höhergelegte Fassungen



Situation heute



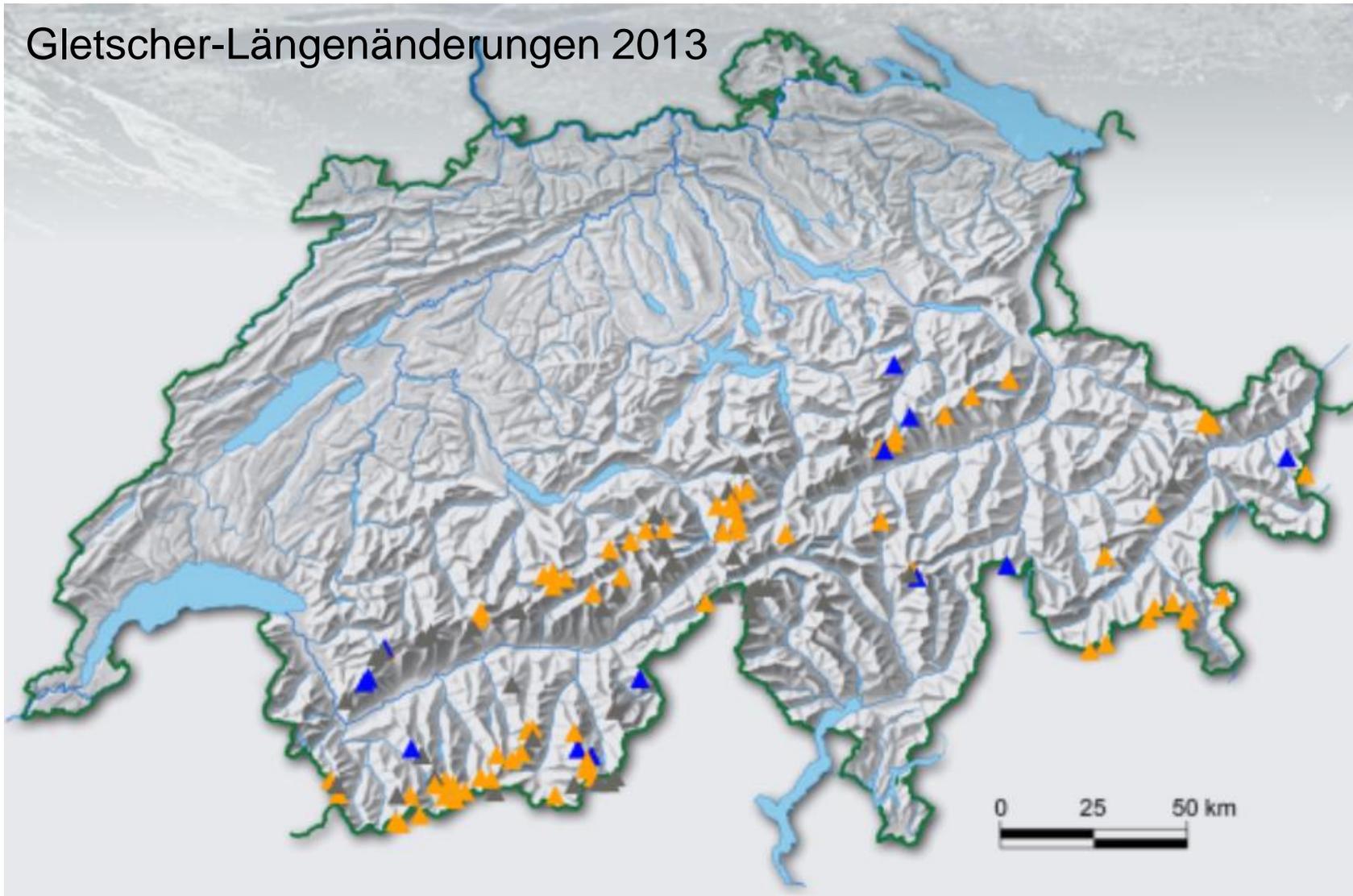
Zukunft?

Quelle: KWO (2016)

# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherseen: Gesamtbetrachtung Wasserkraftpotential

Gletscher-Längenänderungen 2013



▲ vorstossend ▲ schwindend

Quelle: <http://glaciology.ethz.ch/messnetz/?locale=de>

# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherseen: Bsp. Wallis

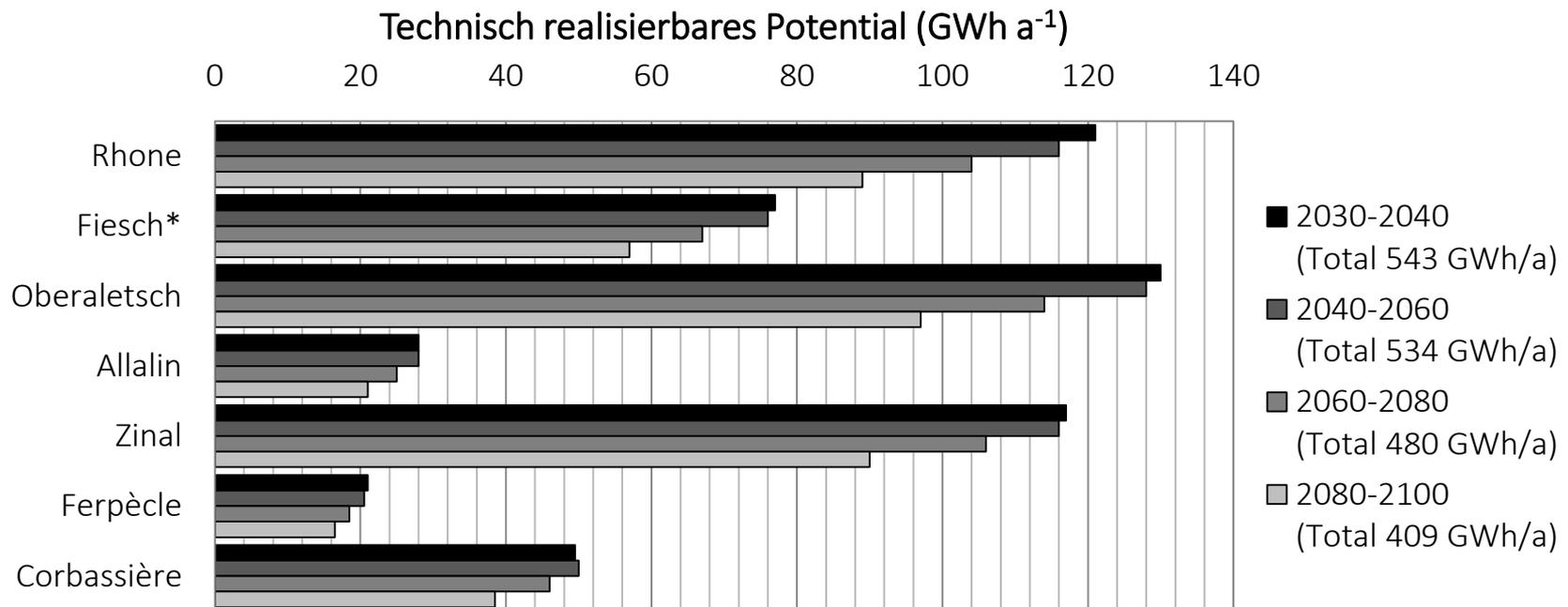
- Betrachtung von 53 Gletscher
- Berücksichtigung der bestehenden Anlagen



# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherkraftwerke: *Technisch realisierbares Potential Wallis*

- Berücksichtigung der Abflussentwicklung bis 2100
- Rückgang des Potenzials von 2030 bis 2100 um ca. 25%
- Flexibilität von bestehenden Anlagen durch neue Stufen erhöht
- ***technisch realisierbares Potential: ca. 0.4÷0.5 TWh/a (7 Anlagen)***



Quelle: Fallegger, Masterarbeit ETH Zürich (2014)

# Neubau periglaziale Wasserkraft

## Ausgewählte Speicherkraftwerke ohne Pumpbetrieb

| Gletscher        | RAV<br>[GWh/a]     |                   | Speicher-<br>volumen<br>[hm <sup>3</sup> ] | Sperren-<br>höhe [m] | Speicher-<br>inhalt °<br>[GWh] | Bemer-<br>kungen |
|------------------|--------------------|-------------------|--|----------------------|--------------------------------|------------------|
|                  | 2050               | 2090              |  |                      |                                |                  |
| Rhone (VS)       | 116                | 89                | 28   | 40                   | 45                             | 1)               |
| Fiescher (VS)    | +76                | +57               | 44   | 80-100               | 55                             | 2)               |
| Oberaletsch (VS) | 128                | 97                | 55   | 40                   | 75                             | 3)               |
| Allalin (VS)     | 28                 | 21                | 5  | 15                   | 5                              | 4)               |
| Zinal (VS)       | 116                | 90                | 13   | 80                   | 10                             | 5)               |
| Ferpècle (VS)    | +21                | +17               | 2  | 20                   | 1                              | 6), 7)           |
| Corbassière (VS) | 51                 | 39                | 14   | 30                   | 15                             | 8)               |
| Grindelwald (BE) | 123 <sup>9)</sup>  | 90 <sup>10)</sup> | 72   | 150                  | 80                             | 11)              |
| Hüfifirn (UR)    | +220 <sup>9)</sup> | 170               | 56   | 225                  | 155                            | 12)              |
| Trift (BE)       | +180               | +153              | 85   | 167                  | 215                            | 13)              |
| <b>Total</b>     | <b>~1060</b>       | <b>~820</b>       | <b>374</b>                                 | <b>-</b>             | <b>~650 (~ +7%)</b>            |                  |

° i.d.R. auf 5 GWh gerundet

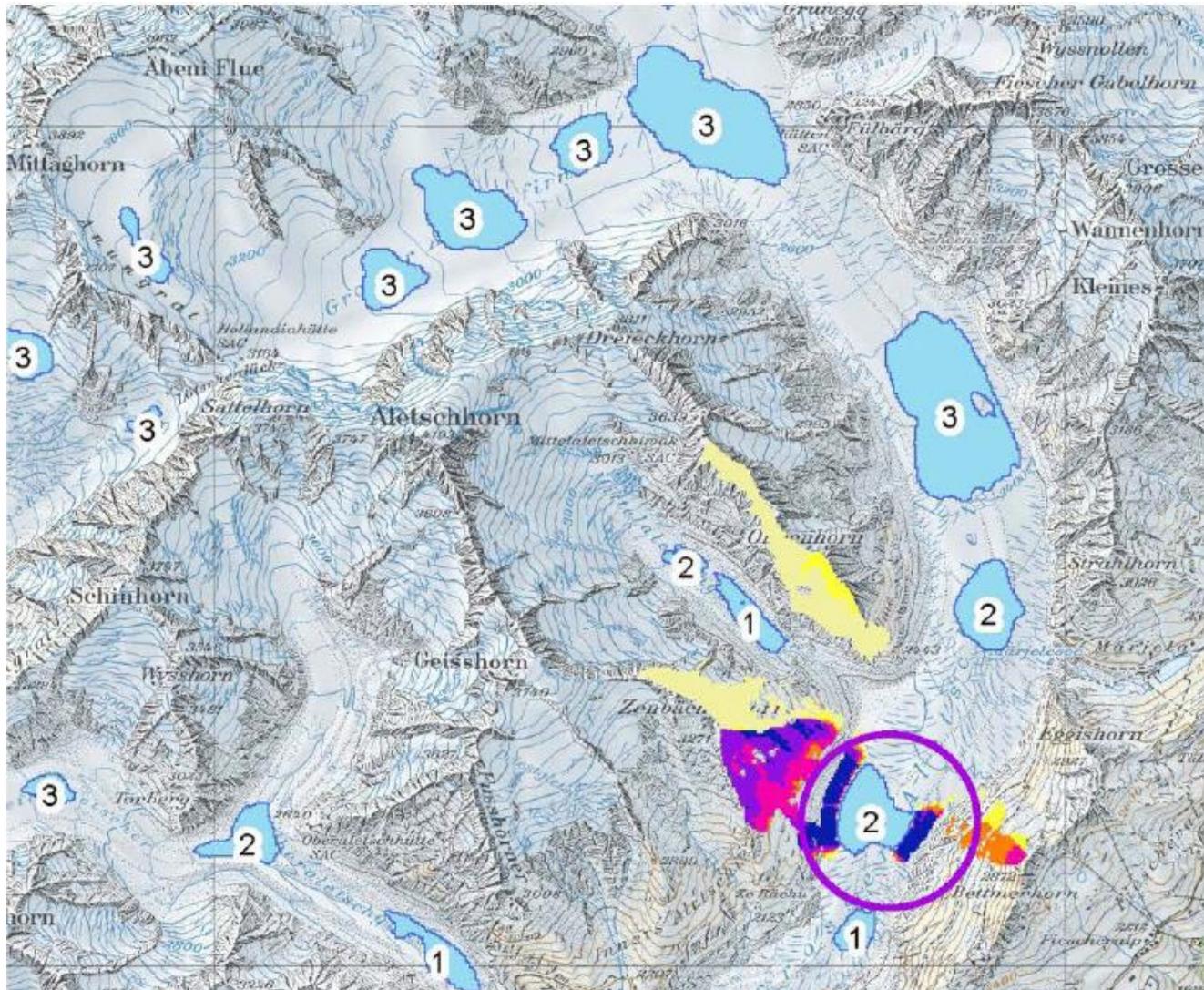
- 1) Mit Beileitung vom Muttgletscher
- 2) Ergänzt bestehendes Laufkraftwerk
- 3) Auch gut als PSW mit Gebidem geeignet
- 4) Auch gut als PSW mit Mattmark geeignet
- 5) Mit Beileitung vom Weisshorn- und Mominggletscher
- 6) Mit Beileitung vom Mont Miné-Gletscher

- 7) ca. 13% des Abflussvolumens werden heute durch die Grande Dixence SA genutzt
- 8) Auch gut als PSW mit Mauvoisin geeignet
- 9) In 2040
- 10) In 2100
- 11) Oberer und unterer Grindelwaldgletscher
- 12) Mit Beileitung vom Brunnifirn
- 13) Mit Beileitung Stein- und Wendengletscher

Quellen: nach Fallegger bzw. Iten, Masterarbeiten ETH Zürich (2014) bzw. KWO (2016)

# Neubau periglaziale Wasserkraft

Naturgefahren durch neue glaziale Seen: Bsp. Aletschgletscher



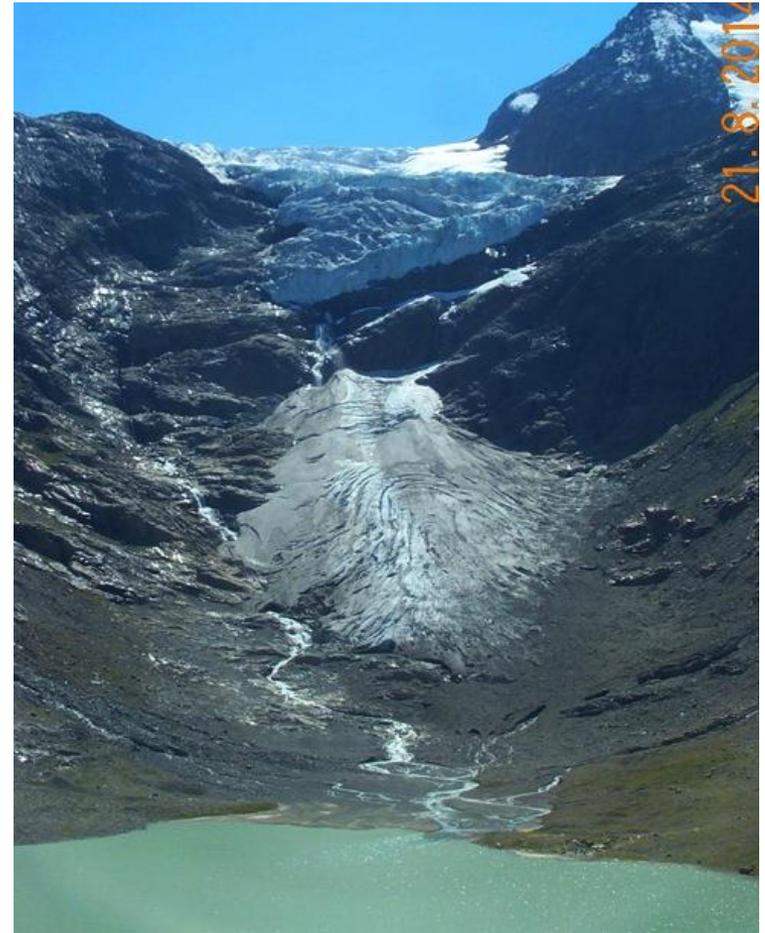
Quelle: NELAK (2013)

# Neubau periglaziale Wasserkraft

Neue Speicherseen: Mehrzweckanlagen → u.a. Naturgefahrenprävention

- Hanginstabilitäten
- Lawinen
- Felsabbrüche
- Eisabbrüche
- Impulswellen

Triftgletscher



Gletschersee Grindelwald

**Talsperre kann Speicher für die Wasserkraft und Flutwellenschutz optimal kombinieren**

# Gesamtübersicht Potenzial Grosswasserkraft

| [GWh]  | Jahres-RAV                 |                          | Speicher-RAV                | Bemerkungen   |
|--|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|---|
|  | 2050                       | 2090                     |                             |   |
| Optimierung / Ausbau von Niederdruckanlagen        | +670                       | +690                     | -                           | Annahme: Erhöhung um 3% wegen mehr Abfluss im Winter                              |
| Ausbau Wasserkraftspeicher durch Sperrenerhöhungen | -                          | -                        | +2'000                      | RAV bleibt ohne KW-Ausbau quasi unverändert                                       |
| Neubau periglaziale Wasserkraft                    | +1060                      | +820                     | +650                        | -   |
| Minderproduktion aus Restwasserbestimmungen        | - 1300                     | -1300                    | -                           | Hier unter Annahme günstiger Randbedingungen (Mittel aus BFE, 2012 und SWV, 2012) |
| Sonstige Grosskraftwerke (Neu-/Ausbau)             | +720                       | +720                     | -                           | nach BFE (2012) und SWV (2013) mit P>75%  |
| <b>Total</b>                                       | <b>+1'150<br/>(+3.2 %)</b> | <b>+930<br/>(+2.6 %)</b> | <b>+2'650<br/>(~ +30 %)</b> | Nur bei günstigen Bedingungen (Bezugsjahr 2015)                                   |
| <b>BFE (2012)</b><br>heutige Bedingungen           | <b>+380</b>                | -                        | -                           | -   |
| Optimierte Bedingungen                             | <b>+1'700</b>              |                          |                             |   |

# Schlussfolgerungen

- **Elektrizitätserzeugung aus Wasserkraft** soll im Rahmen der Energiestrategie 2050 gesteigert werden
- Schätzungen des **verbleibenden Potenzials** variieren **zwischen  $\pm 0$  und +5'000 GWh/a**, je nach Rahmenbedingungen
- **Grosse Unsicherheiten** bzgl. Produktionsminderung **infolge Restwassererhöhungen**
- **Reine Ausbauten** und Optimierungen mit **beschränktem Potenzial**
- **Neubauten im periglazialen Hochgebirge** mit **grösstem Potenzial**
- **Erhöhungen bestehender Speicher plus neue Speicher**: Steigerung des Speichervolumens (Energieäquivalent) um  $\sim 30\%$   $\rightarrow$  deckt grossteils benötigte Winterenergie für Szenario «neue Energiepolitik»



**Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

[boes@vaw.baug.ethz.ch](mailto:boes@vaw.baug.ethz.ch)

**ETH** zürich