

Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraft

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



Gliederung

Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraft

- Rolle der Wasserkraft in Schweiz
- Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?
- Randbedingungen und Methodik
- Resultate: Auswirkungen des Klimawandels auf
 - Abflüsse
 - Produktion Laufkraftwerke
 - Produktion Speicherkraftwerke
- Zusammenfassung

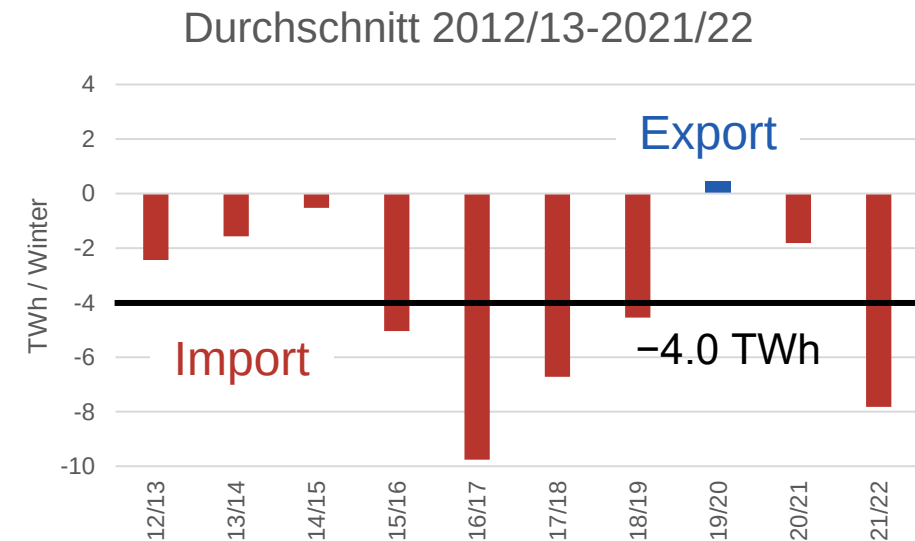
Wasserkraft als Rückgrat der Schweizer Stromversorgung

Produktion

- **nominales Jahresarbeitsvermögen**
35.85 TWh/Jahr (mittlere Produktionserwartung 2021/22, nach Abzug des Verbrauchs der Speicherpumpen, mit Kleinwasserkraft)
- **vorübergehend höhere Produktion**
u.a. wegen Abschmelzen der Gletscher
→ **58 % der Netto-Stromerzeugung**
(~ 66 TWh/Jahr im Mittel 2013-2022)
- davon i.M. 16.6 TWh (43 %) im Winterhalbjahr (Okt.-März)

Speicherung

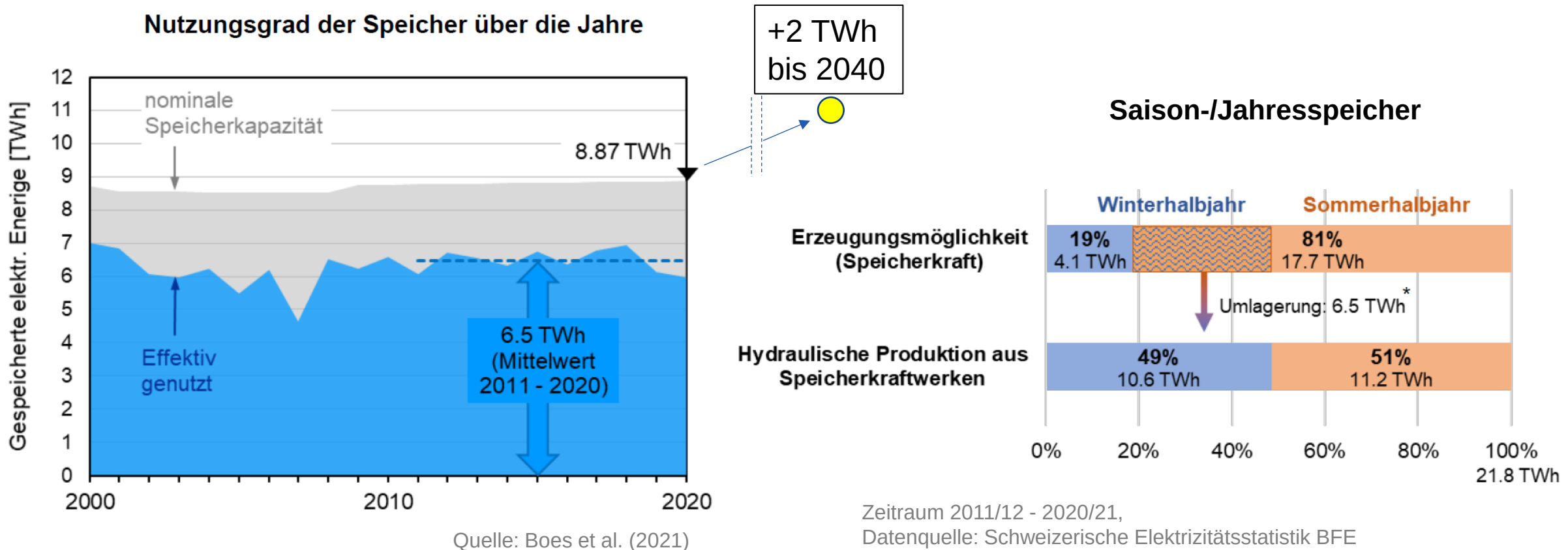
- im Winter grösserer Strombedarf bei geringerer Produktion
- **8.9 TWh nominaler Energieinhalt** der Speicherseen (Stand 2023)
- Dennoch Stromimporte im Winterhalbjahr erforderlich



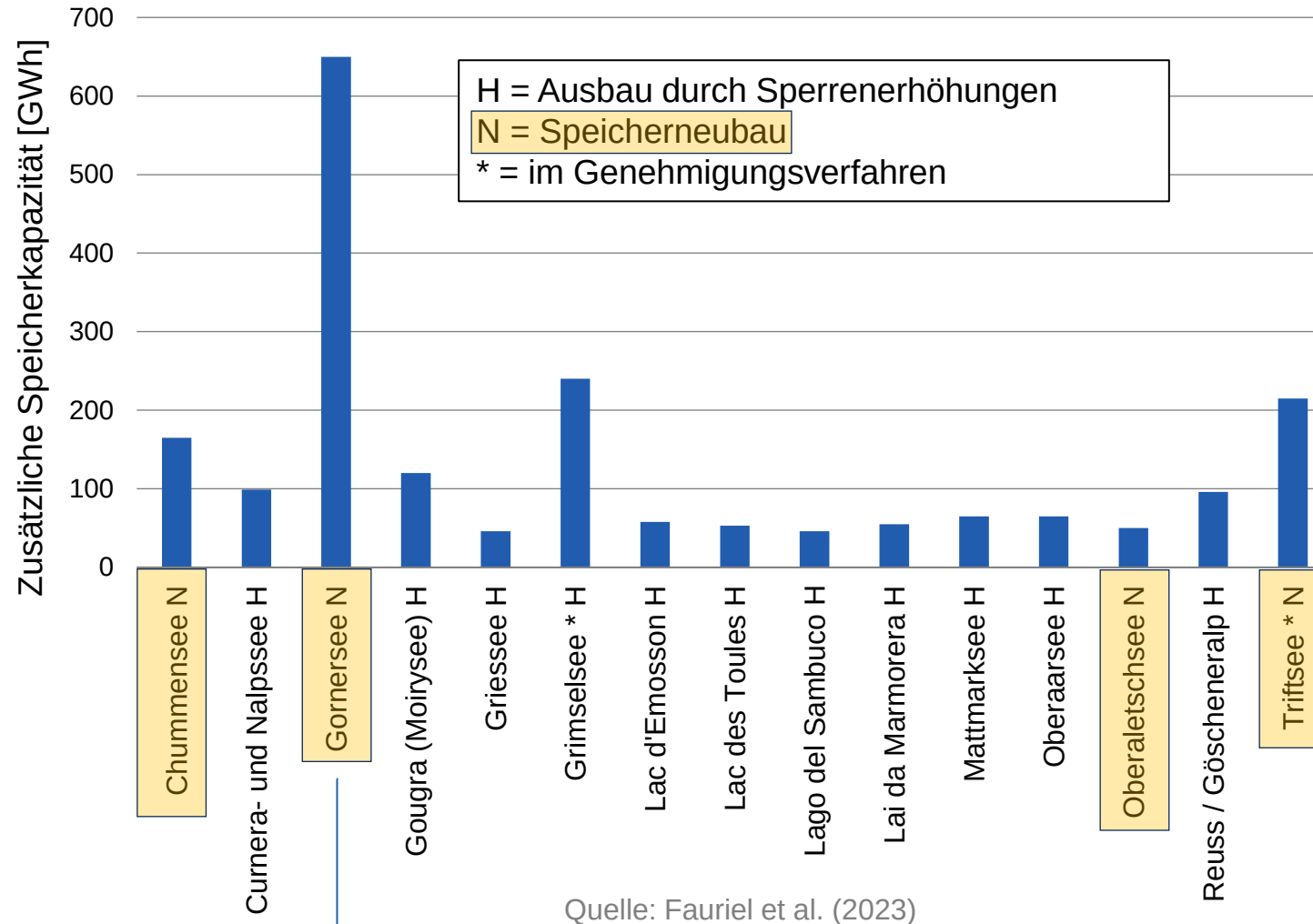
Datenquelle: Elektrizitäts-Statistik BFE

Zukünftige Rolle der Wasserkraft

- Der Wert der Wasserkraft liegt vor allem in der Speicherkapazität (kurz- bis langfristig) und Flexibilität (positive und negative Regelfähigkeit, Pumpspeicher)
- 1 TWh flexible Wasserkraft ermöglicht den Bau von mindestens 3.5 TWh intermittierender Windkraft oder PV (EU Hydropower Alliance / Statkraft)



Ziele: 15 prioritäre Projekte des «Runder Tisch Wasserkraft»



- Verwaltung, NGO, Projektentwickler, Betreiber, Behörden, Dachverbände
- 33 potenzielle Projekte
- Ziel: 2 TWh zusätzlich im Winter
- Screening: biologische Vielfalt, Landschaft und Energie



Mehrzweckspeicher Gornerli (Fotomontage)
(© Alpiq)

Gliederung

Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraft

- Rolle der Wasserkraft in Schweiz
- **Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?**
- Randbedingungen und Methodik
- Resultate: Auswirkungen des Klimawandels auf
 - Abflüsse
 - Produktion Laufkraftwerke
 - Produktion Speicherkraftwerke
- Zusammenfassung

Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

- Wichtige Parameter für die Wasserkraft:
 - Niederschlag und Temperatur

Niederschlag

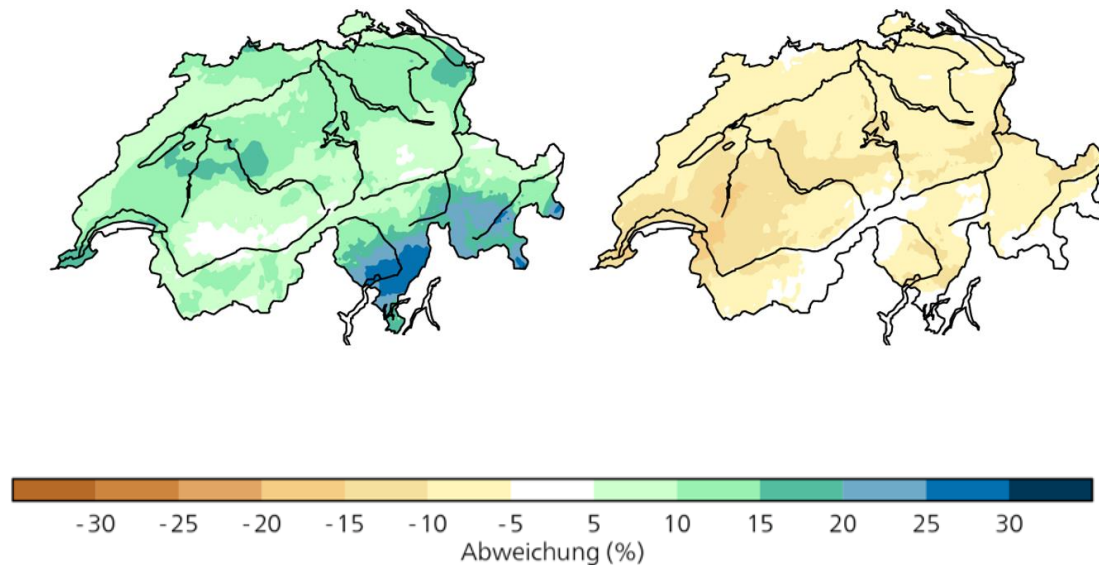
Abweichung von der Normperiode 1981-2010

2060

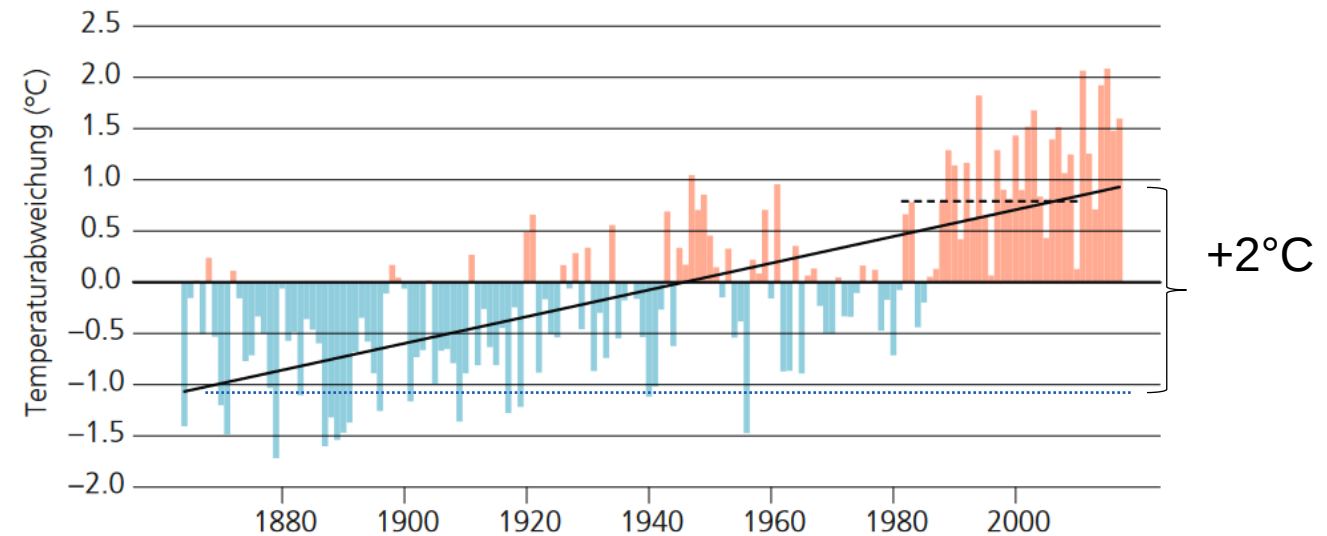
RCP2.6

Winter

Sommer



Quelle: Klimaszenarien CH2018



Jahresmitteltemperatur 1864–2017

Abweichung vom Durchschnitt der Jahre 1961–1990 im Schweizer Mittel

■ Jahre über dem Durchschnitt 1961–1990

■ Jahre unter dem Durchschnitt 1961–1990

— Linearer Trend 1864–2017

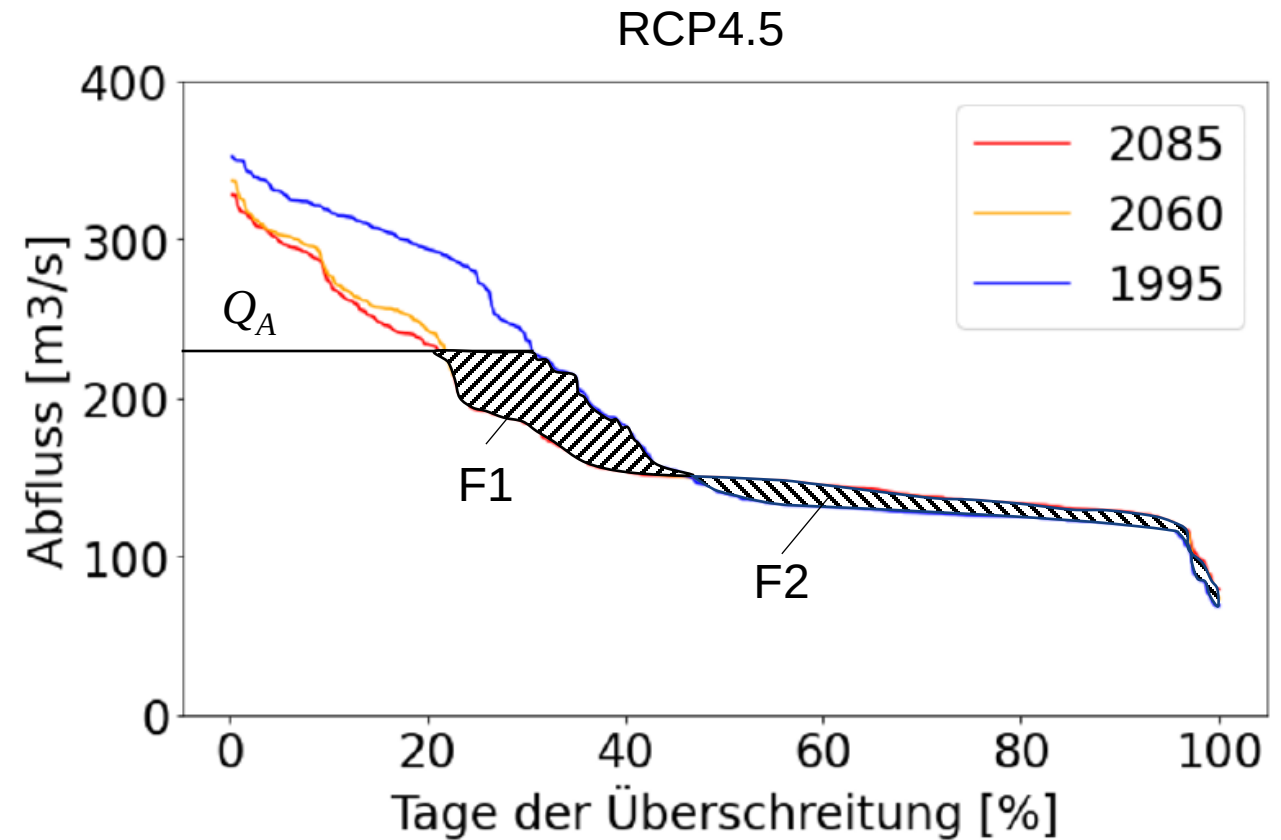
----- Durchschnitt 1981–2010

Quelle: BAFU

Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

■ Wichtige Parameter für die Wasserkraft:

- Niederschlag und Temperatur
- Abflüsse in Fließgewässern
- Sediment
- Schwimmstoffe
- Naturgefahren
-



angepasst nach Aehle & Cavelti (2023), Bachelorarbeit VAW, ETH Zürich

Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

- Wichtige Parameter für die Wasserkraft:
 - Niederschlag und Temperatur
 - Abflüsse in Fließgewässern
 - Sediment
 - Schwimmstoffe
 - Naturgefahren
 -

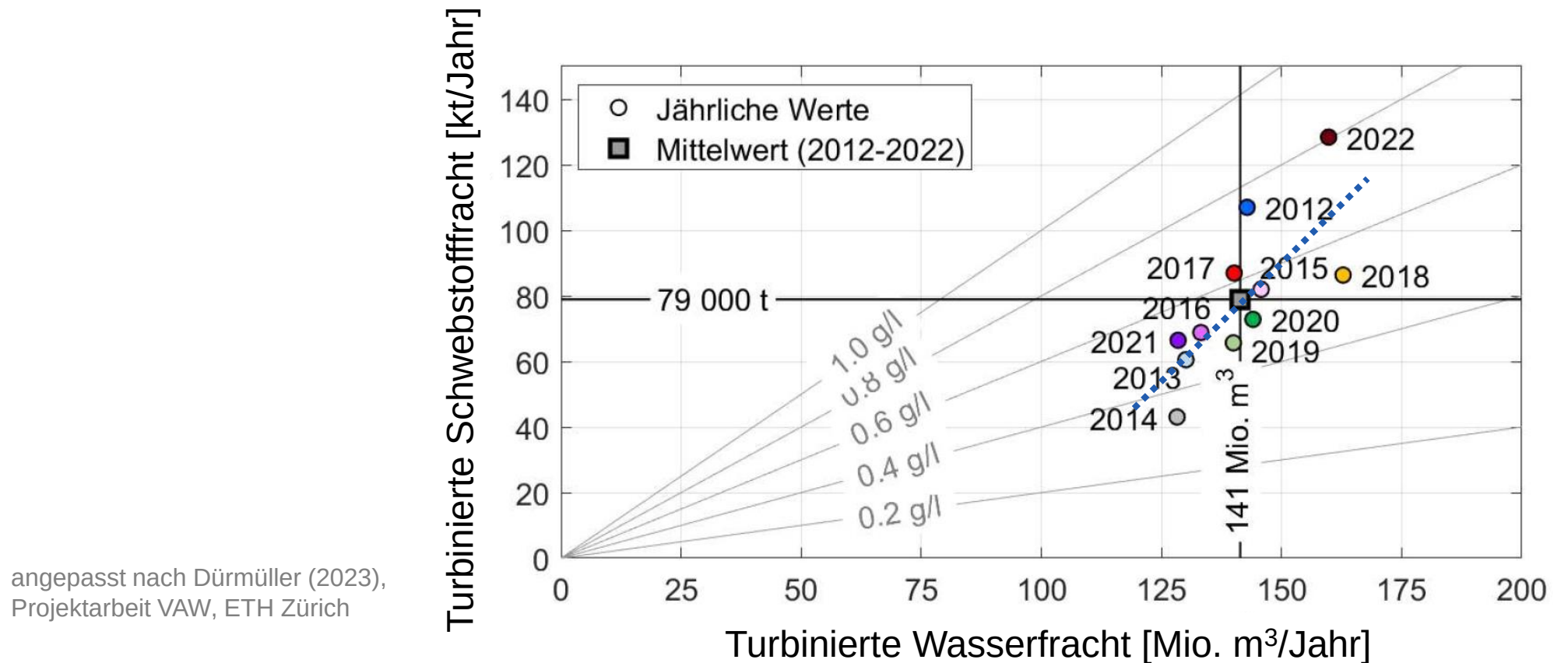


Foto: D. Ehrbar, VAW

Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

Sediment

- Entwicklung der Sedimentfrachten: Bsp. Fieschergletscher (Wallis)



Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

- Wichtige Parameter für die Wasserkraft:
 - Niederschlag und Temperatur
 - Abflüsse in Fließgewässern
 - Sediment
 - Schwimmstoffe
 - Naturgefahren
 -



Foto: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich

Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?

■ Wichtige Parameter für die Wasserkraft:

- Niederschlag und Temperatur
- Abflüsse in Fließgewässern
- Sediment
- Schwimmstoffe
- Naturgefahren
-

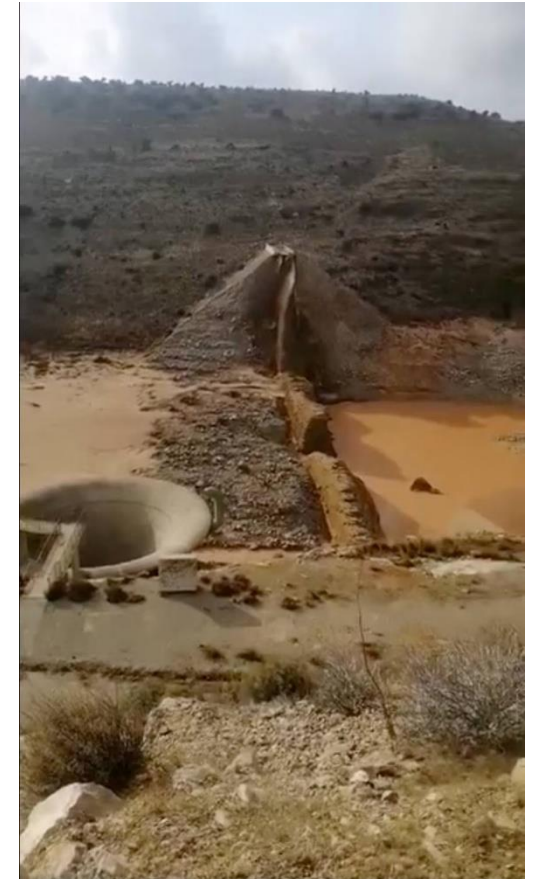
→ diverse Parameter betrieblich wichtig und von Interesse

ABER

→ **nutzbare Abflüsse** sind entscheidend für Produktion



Foto: H.-R. Burgener (2009)



Quelle:
<https://www.thenationalnews.com/world/2023/09/13/libya-floods-why-did-the-derna-dams-fail/>

Gliederung

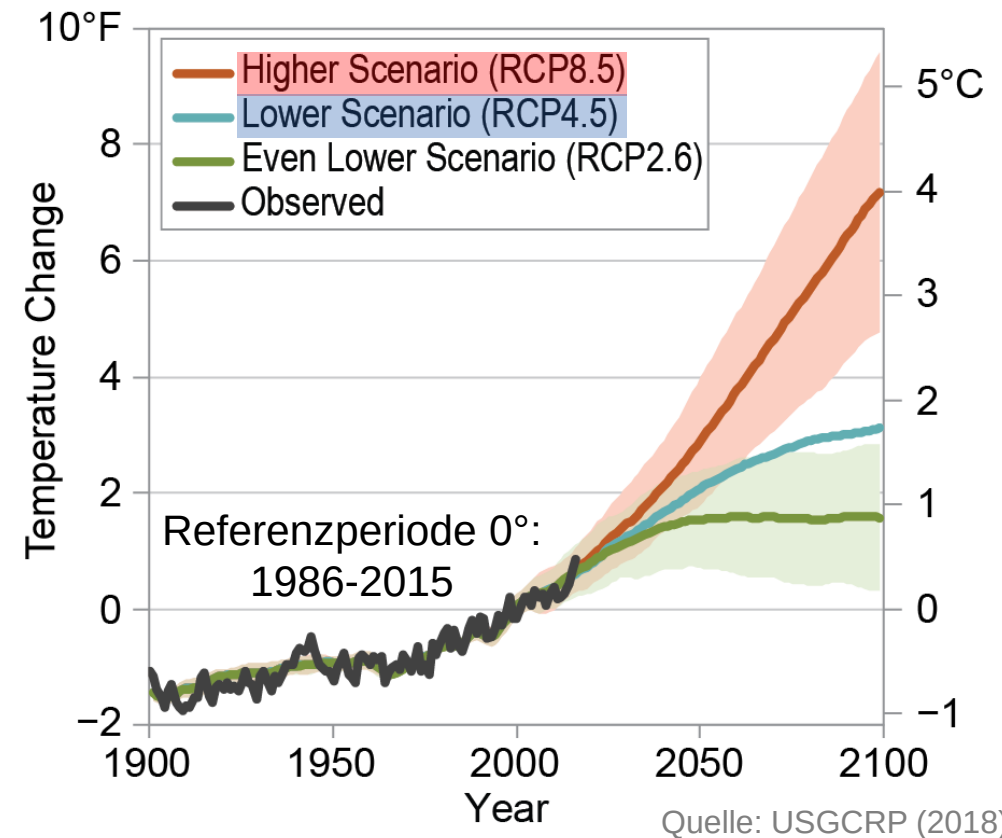
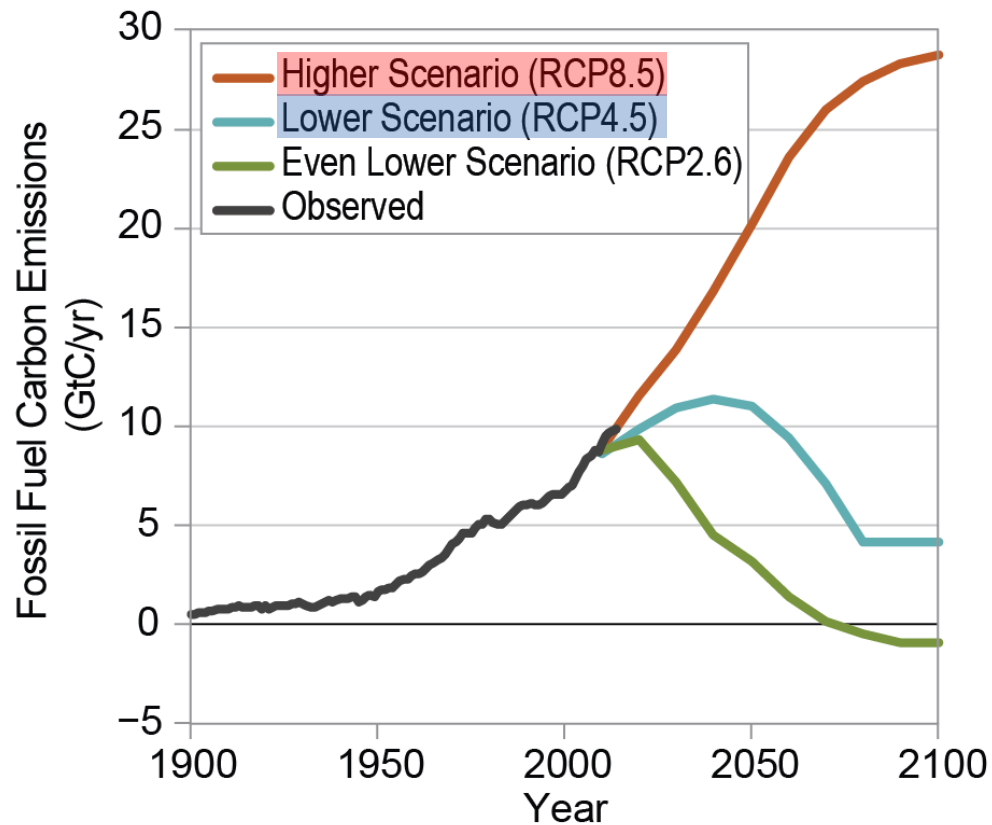
Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraft

- Rolle der Wasserkraft in Schweiz
- Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?
- **Randbedingungen und Methodik**
- Resultate: Auswirkungen des Klimawandels auf
 - Abflüsse
 - Produktion Laufkraftwerke
 - Produktion Speicherkraftwerke
- Zusammenfassung

Randbedingungen und Methodik

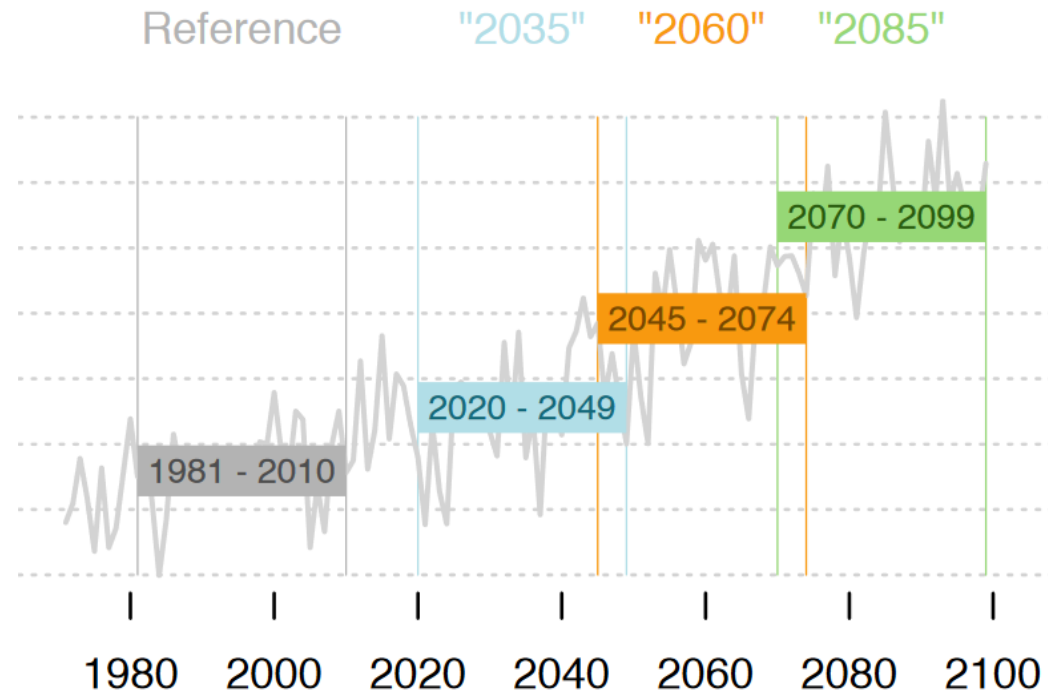
- zwei Klimaszenarien (RCP4.5 vs. RCP8.5) berücksichtigt
→ begrenzter Klimaschutz vs. kein Klimaschutz

*Beobachtete und prognostizierte Veränderungen von
Kohlenstoffemissionen und Temperatur*



Randbedingungen und Methodik

- zwei Klimaszenarien (RCP4.5 vs. RCP8.5) berücksichtigt
→ begrenzter Klimaschutz vs. kein Klimaschutz
- zwei Betrachtungsperioden (2060 vs. 2085)
→ Referenzperiode 1981-2010 (“1995”), “jüngere Vergangenheit”
vs. “Mitte des Jahrhunderts” 2045-2074 (“2060”) vs. “Ende des Jh.” 2070-2099 (“2085”)



Randbedingungen und Methodik

- zwei Klimaszenarien (RCP4.5 vs. RCP8.5) berücksichtigt
→ begrenzter Klimaschutz vs. kein Klimaschutz
- zwei Betrachtungsperioden (2060 vs. 2085)
→ Referenzperiode 1981-2010 (“1995”), “jüngere Vergangenheit”
vs. “Mitte des Jahrhunderts” 2045-2074 (“2060”) vs. “Ende des Jh.” 2070-2099 (“2085”)
- Unterschiedliche Klimaregionen



Randbedingungen und Methodik

- zwei Klimaszenarien (RCP4.5 vs. RCP8.5) berücksichtigt
→ begrenzter Klimaschutz vs. kein Klimaschutz
- zwei Betrachtungsperioden (2060 vs. 2085)
→ Referenzperiode 1981-2010 (“1995”), “jüngere Vergangenheit”
vs. “Mitte des Jahrhunderts” 2045-2074 (“2060”) vs. “Ende des Jh.” 2070-2099 (“2085”)
- Unterschiedliche Klimaregionen
- Einfluss Vergletscherungsgrad: stark vs. schwach bzw. unvergletscherte EZG



Fotos: G. Favre (2023)

Randbedingungen und Methodik

- zwei Klimaszenarien (RCP4.5 vs. RCP8.5) berücksichtigt
→ begrenzter Klimaschutz vs. kein Klimaschutz
- zwei Betrachtungsperioden (2060 vs. 2085)
→ Referenzperiode 1981-2010 (“1995”), “jüngere Vergangenheit”
vs. “Mitte des Jahrhunderts” 2045-2074 (“2060”) vs. “Ende des Jh.” 2070-2099 (“2085”)
- Unterschiedliche Klimaregionen
- Einfluss Vergletscherungsgrad: stark vs. schwach bzw. unvergletscherte EZG
- Kraftwerkstyp: Speicher- vs. Laufwasserkraft (Speichervolumen <25% der Winterabflussfracht)



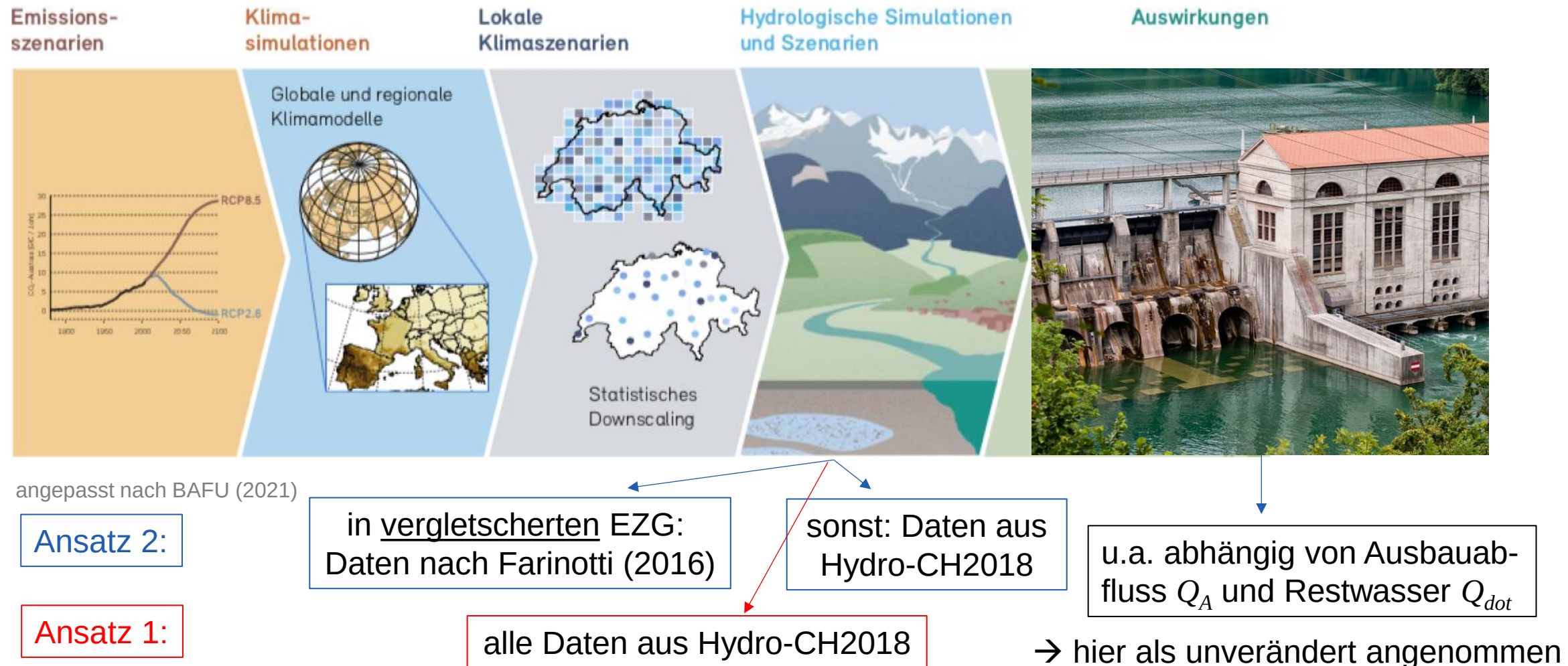
Foto: G. Favre (2023)



Foto: TIWAG

Randbedingungen und Methodik

■ Modellierungskette für Abflussprognosen



Gliederung

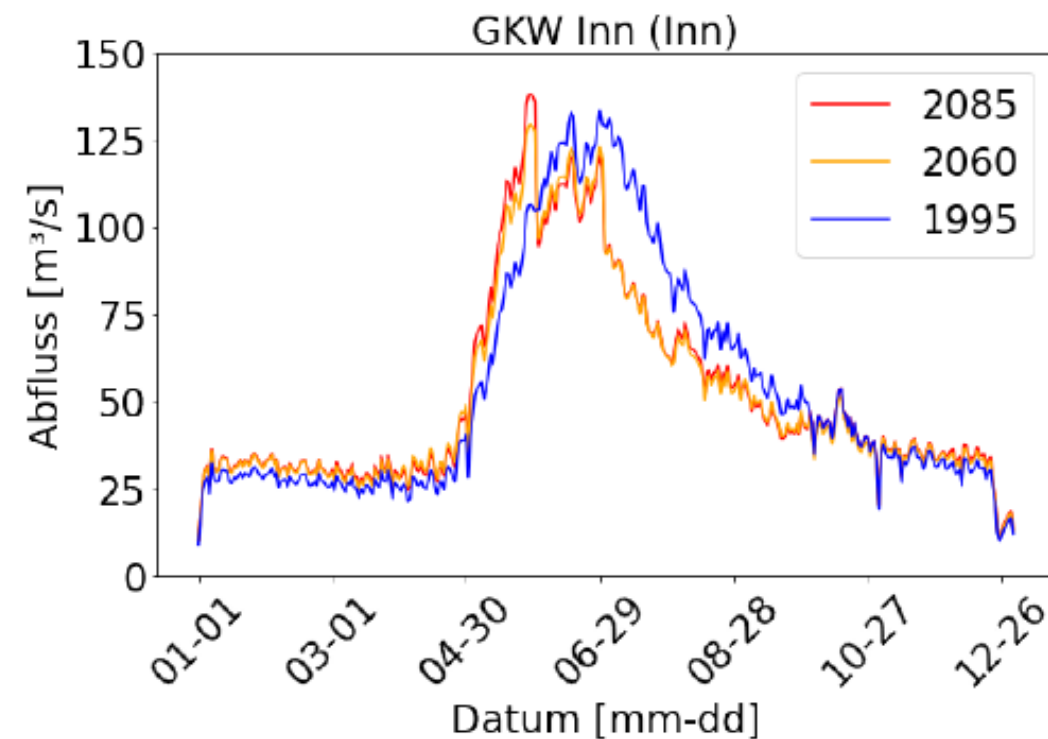
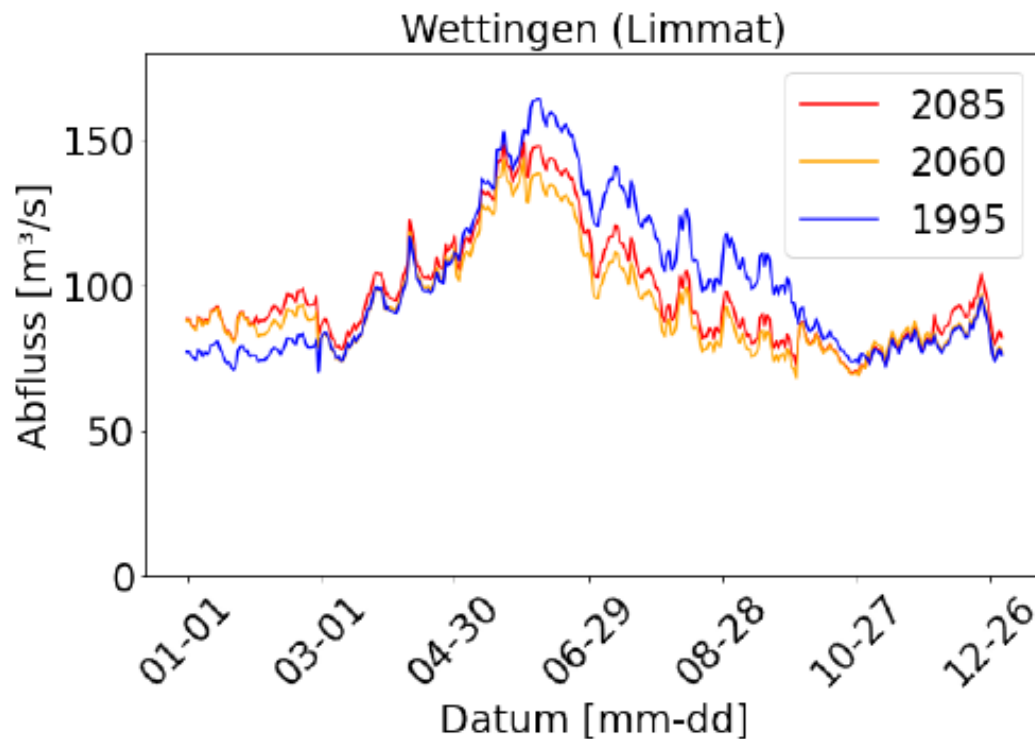
Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraft

- Rolle der Wasserkraft in Schweiz
- Klimawandel: Was beeinflusst die Wasserkraft?
- Randbedingungen und Methodik
- **Resultate: Auswirkungen des Klimawandels auf**
 - **Abflüsse**
 - **Produktion Laufkraftwerke**
 - **Produktion Speicherkraftwerke**
- Zusammenfassung

Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Ende 21. Jahrhundert

Einfluss *Klimaregion*

- Bsp. für schwach vergletscherte EZG: Limmat (Mittelland) und Inn (alpin), RCP4.5

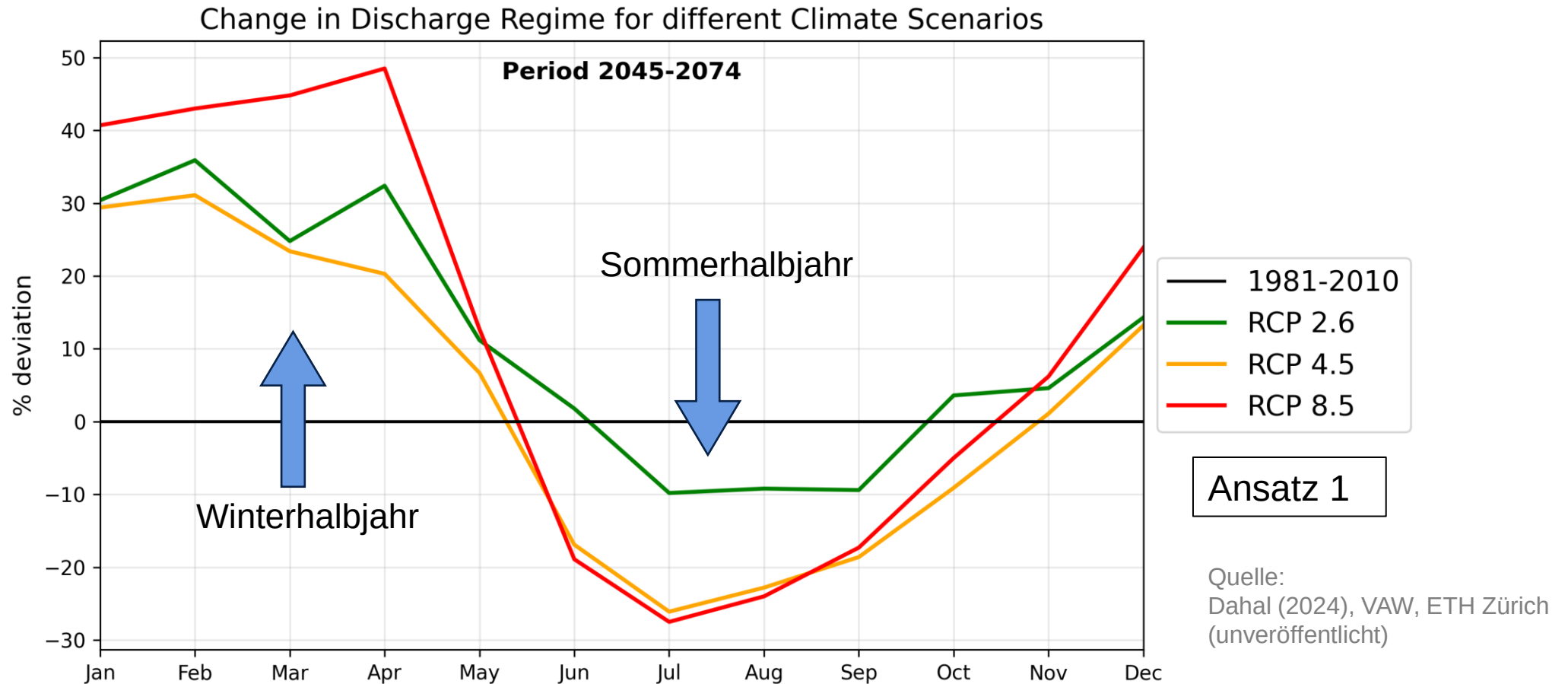


Quelle: Aehle & Cavelti (2023), Bachelorarbeit VAW, ETH Zürich

Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Mitte 21. Jahrhundert

Einfluss *Klimaszenario*

- Bsp. für schwach vergletscherte EZG: Albula (Speicher Solis, Graubünden)

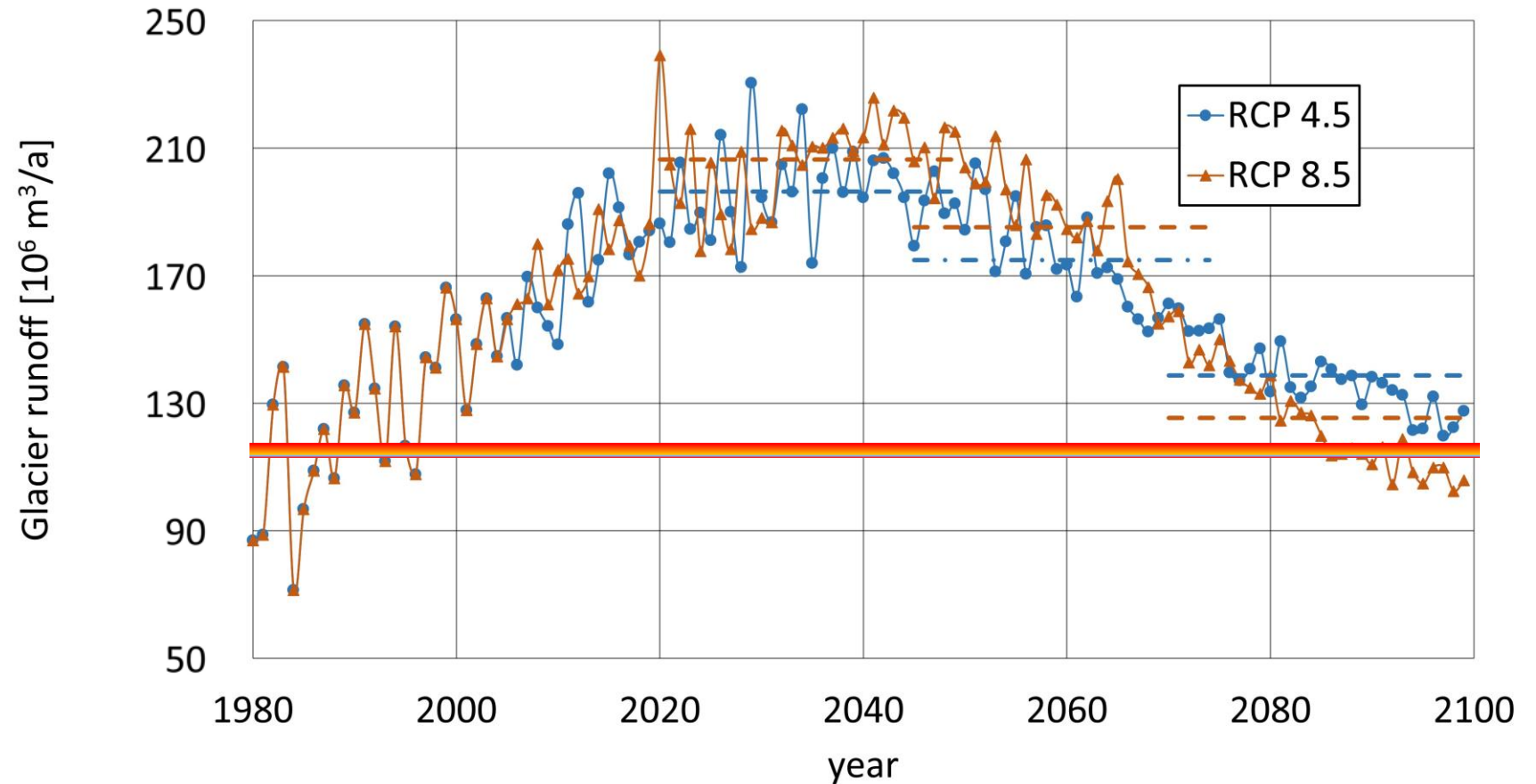


Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Ende 21. Jahrhundert

Einfluss *Klimaszenario*

- Bsp. für stark vergletschertes EZG: Speicher Mauvoisin (Wallis), Ansatz 2

Gemäss Schaepli et al. (2019) Abnahme der CH-Jahresproduktion bis 2080 infolge **Eismassenverlust** um rund 1 TWh/Jahr (bezogen auf 1990)

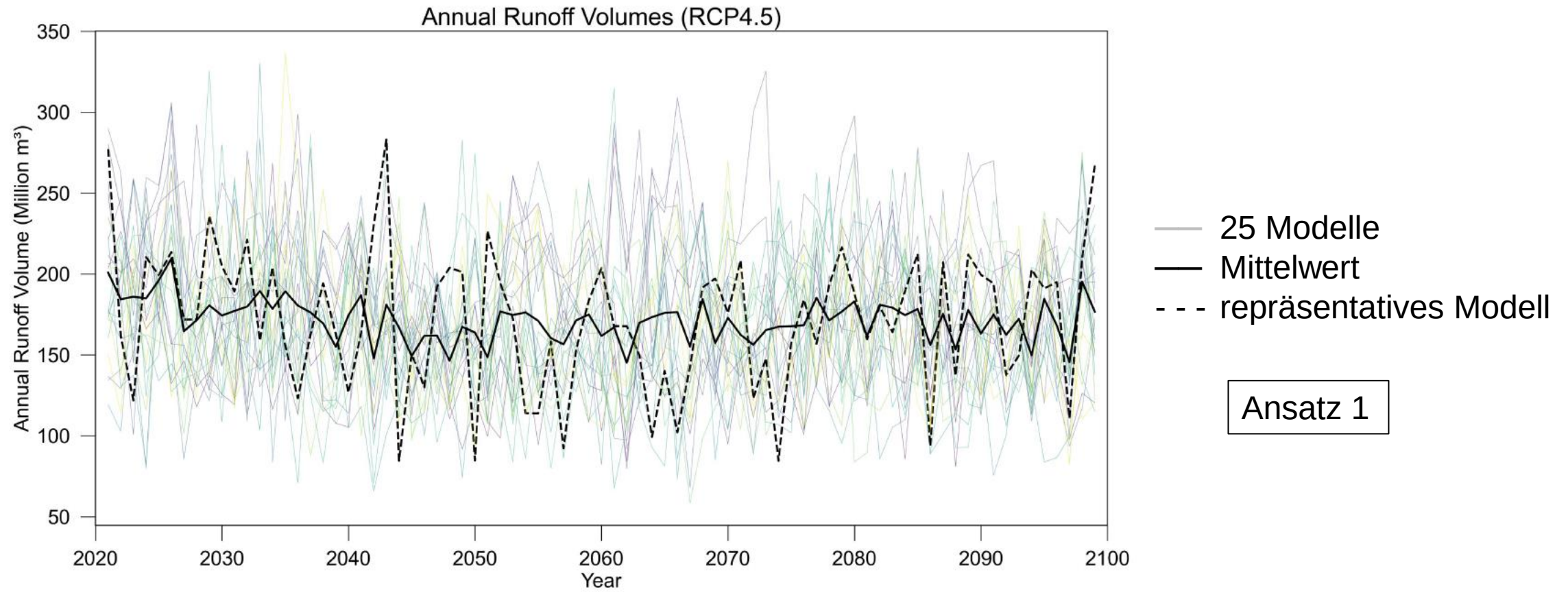


Quelle: Nyfeler (2024), Masterarbeit VAW, ETH Zürich

Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Ende 21. Jahrhundert

Einfluss Modellunsicherheiten (-bandbreiten)

- Bsp. für schwach vergletschertes EZG: Tamina (Speicher Gigerwald (SG))

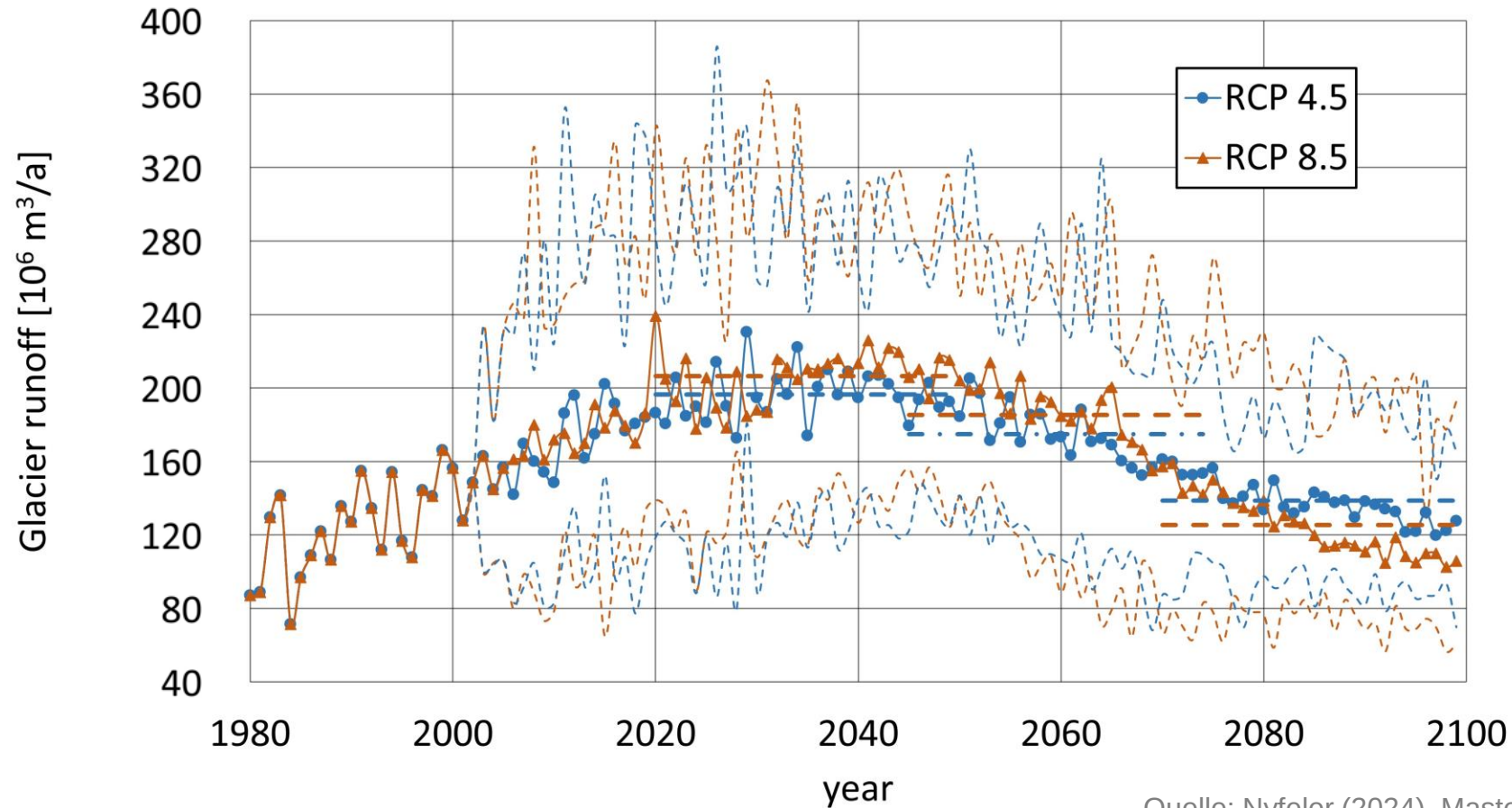


Quelle: Dahal (2024), VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht)

Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Ende 21. Jahrhundert

Einfluss *Modellunsicherheiten* (-bandbreiten)

- Bsp. für stark vergletschertes EZG: Speicher Mauvoisin (Wallis), Ansatz 2

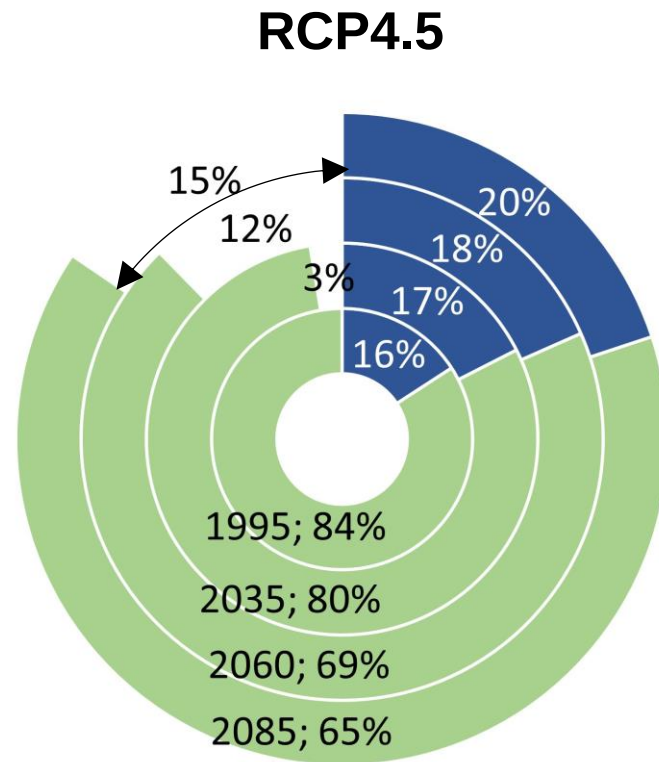


Quelle: Nyfeler (2024), Masterarbeit VAW, ETH Zürich

Resultate: Entwicklung der Abflüsse bis Ende 21. Jahrhundert

Jahreszeitliche Verteilung

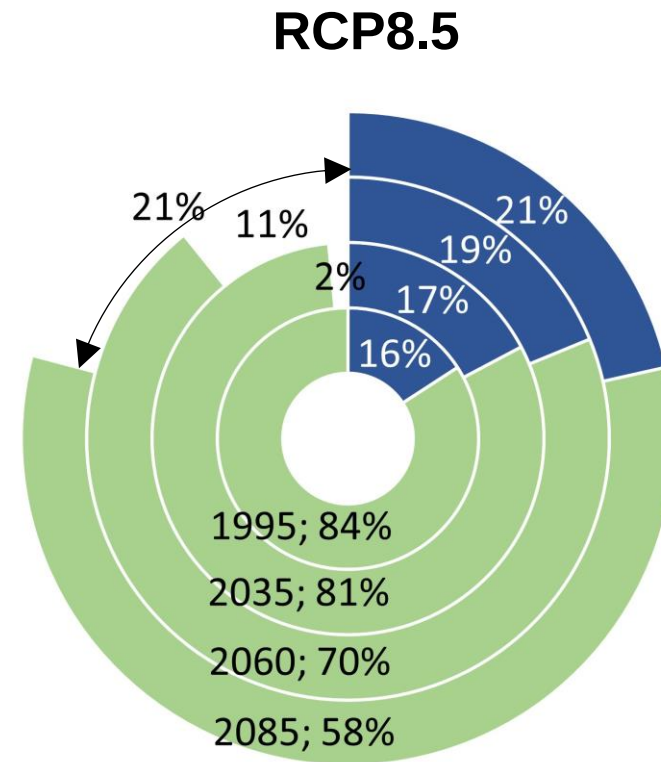
- Bsp. für hochgelegene, vergletscherte EZG im Wallis (2400 – 3100 m üM)



Ansatz 1

Quelle:
Nyfeler (2024), Masterarbeit
VAW, ETH Zürich

■ winter ■ summer

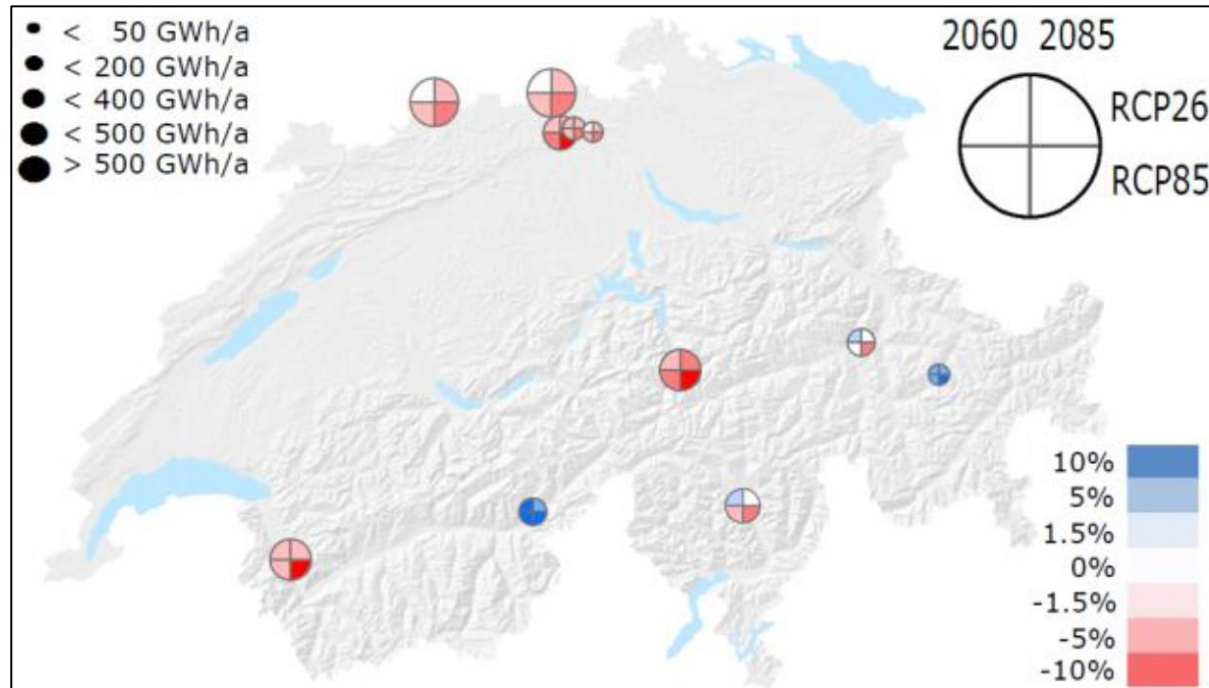


■ winter ■ summer

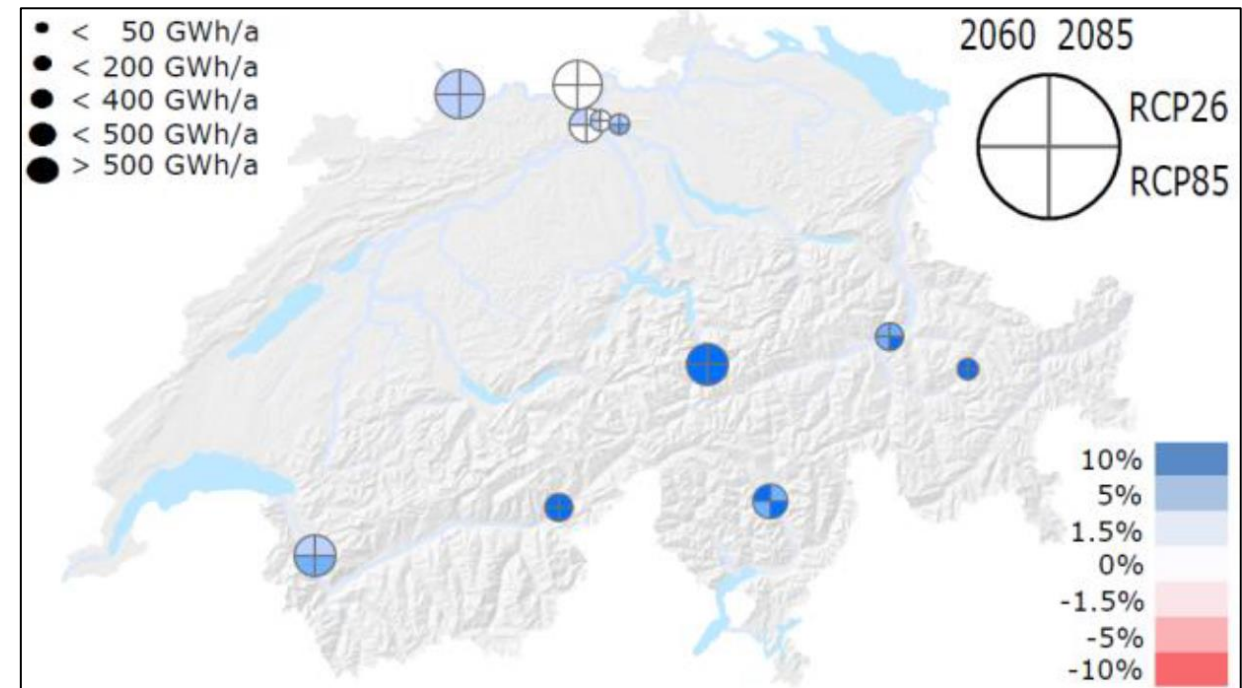
Resultate: Auswirkungen Klimawandel auf Laufwasserkraft

Relative Änderungen in der Produktion

Kalenderjahr



Winterhalbjahr



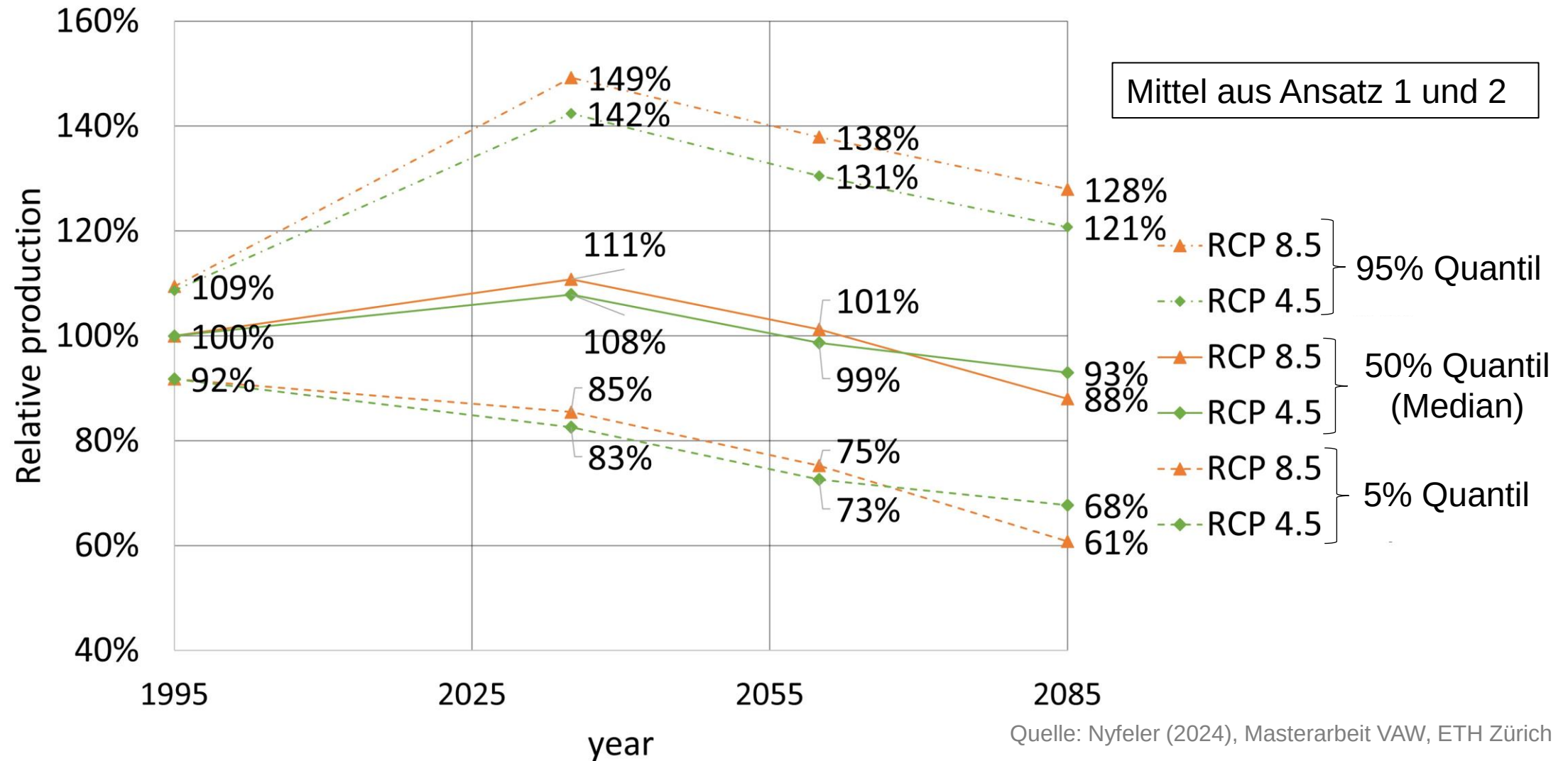
Gemäss Wechsler et al. (2023) gilt für 21 Laufkraftwerke mit 5.9 TWh/Jahr:

Quelle: SCCER-SoE (2019)

- Zunahme der Winterproduktion (4 bis 9 %)
 - Abnahme der Sommerproduktion (-2 bis -22 %)
 - Abnahme der Jahresproduktion (-2 bis -7 %)
- } bis Ende des Jahrhunderts (2085)

Resultate: Auswirkungen Klimawandel auf Speicherwasserkraft

Relative Änderungen in der Produktion



Zusammenfassung

- **Einfluss des Klimawandels** auf Wasserkraft insbesondere hinsichtlich Wasserzuflüsse, Sedimentfrachten und Naturgefahren
- Wasserkraftproduktion ändert nicht linear mit Zuflussfracht
- Erlöse ändern nicht linear mit Produktion
- **Laufwasserkraft** (für RCP 2.6 und 8.5 und CH-Kraftwerkspark als Ganzes):
 - Zunahme der Winterproduktion, Abnahme der Jahresproduktion ab Mitte Jahrhundert
- **Speicherwasserkraft** (für RCP 4.5 und 8.5):
 - praktisch unveränderte **Speicherkapazitäten** (ausser bei starker Verlandung)
 - **i.d.R. Zunahme der Winterzuflüsse, Abnahme der Sommerzuflüsse**
 - Leichte **Zunahme der Jahresproduktion bis ca. 2040**, dann **bis 2060 Rückgang auf Niveau 1995**, Abnahme bis Ende Jahrhundert um **ca. 10%** gegenüber 1995
 - **in stark vergletscherten EZG keine Abnahme der Jahresproduktion bis 2085**,
 - **in mässig vergletscherten EZG Abnahme der Jahresproduktion erst nach 2055**

An aerial photograph of a large concrete dam situated in a deep, mountainous valley. The dam is curved, following the shape of the valley. Behind the dam, a large reservoir of deep blue water is visible. The surrounding slopes are covered in dense green forest, with some rocky outcrops and paths visible. The lighting suggests a bright, sunny day.

**Danke für die
Aufmerksamkeit!**

Foto: G. Favre (2023)