

Agri-Photovoltaik in der Schweiz – Rahmenbedingungen, Potentiale und Umsetzung in der Praxis



Agri-PV Lecturer Series –
Fraunhofer ISE, 14.11.2024

Foto: Matthias Baumann, ZHAW

Mareike Jäger

Leitung [Forschungsgruppe Regenerative Landwirtschaftssysteme](#), Dozentin

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, IUNR

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

mareike.jaeger@zhaw.ch

Agri-Photovoltaik – Anwendungsbeispiele aus der Schweiz



Source: Bioschmid
<https://agri-pv.bioschmid.ch/>



Projekt Solberry, Kanton Bern



PV-Weinberg im Kanton Glarus, Foto ZHAW

In der CH ca. 10 – 15 konkrete Agri-PV Projekte
entweder gerade am Entstehen oder noch im
Bewilligungsprozess – vor allem im Bereich der
Dauerkulturen (Obst und Beeren)

- Eine eher zögerliche Entwicklung – aktuell ca. 10 – 15 konkrete Agri-PV Projekte umgesetzt oder in Planung
- Forschung konzentriert sich auf die Spezialkulturen (Obst/Beeren)
- Herausfordernder Bewilligungsprozess
- Höhere Akzeptanz, wenn bestehende Infrastruktur ersetzt wird.
- Grosse Skepsis seitens Verwaltung und auch innerhalb der Landwirtschaft



Agri-PV Forschungsanlage in Conthey,
Agroscope/Insolight

Rechtliche Rahmenbedingungen

Regulatorien bezüglich Bodenbedeckungsgrad / Ertragsverlust in Frankreich, Deutschland und Italien

Regulatorische Anforderungen in der Agrarpolitik verschiedener Länder (einschliesslich maximaler Verlust an Anbaufläche und minimale relative Ernteerträge)

Land	Maximale verlorene Fläche*	Minimaler relativer Ernteertrag	Vertikale Mindestabstände	Max. Bodenbedeckungsgrad	Minimaler Energieertrag	Höhe der Agrarsubventionen	Referenz
Frankreich	Nicht definiert	100% (keine Reduktion erlaubt)	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	100% wenn GCR ≤ 30%, sonst keine Subventionen	Französisches Recht
Deutschland	Überdachte APV = 10% Vertikale APV = 15%	66%	Überdachte APV = 2,1m Vertikale APV = keine Angabe	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	85%	DIN Standard 91.434
Italien	30%	Nicht definiert	1,3m mit Tieren 2,1m mit Feldfrüchten	40%	60%	Nicht definiert	Ministerio della transizione ecologica (2022)

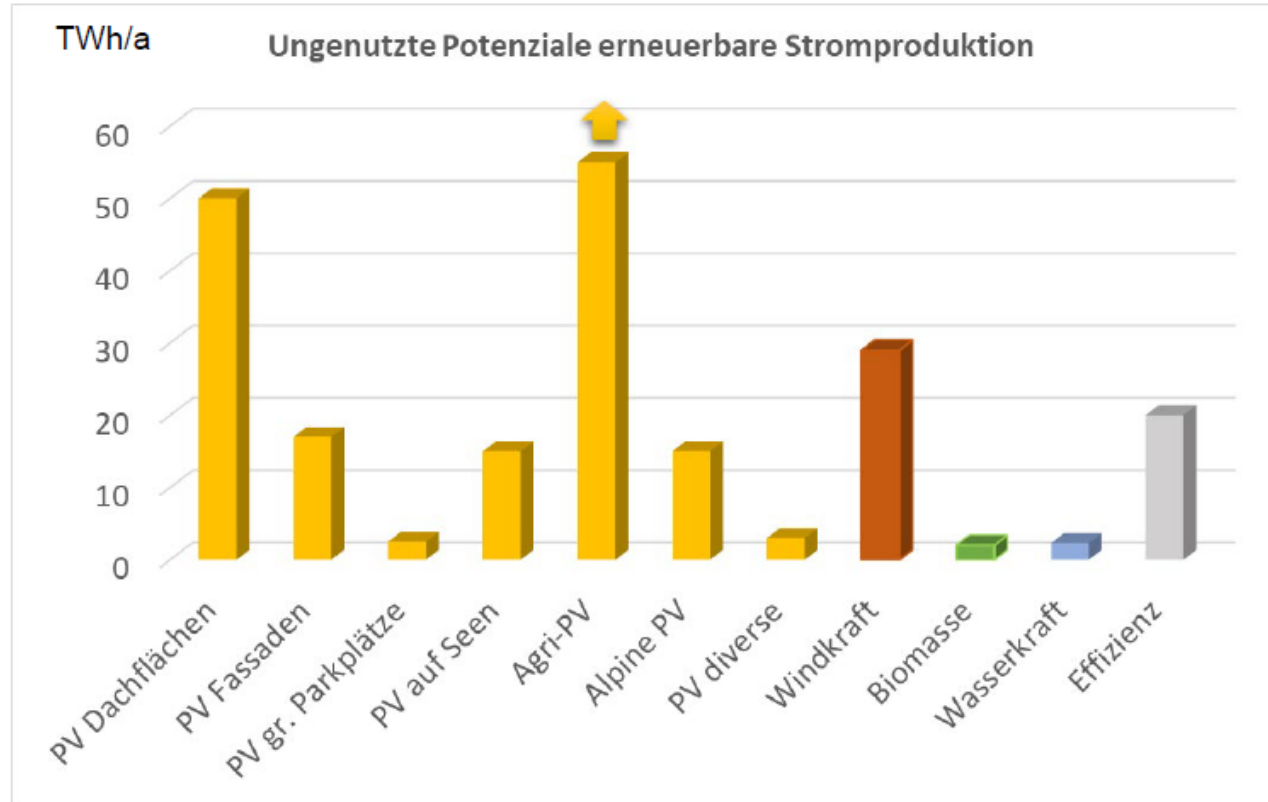
*Verlorene Fläche = Zonen, die aufgrund des APV Systems nicht mehr genutzt werden können (Pfostenreihen, Stützkonstruktionen, elektrische Systeme...)

Am 6. Juni 2024 hat die Schweizer Bevölkerung über ein neues Stromgesetz abgestimmt. Bis dahin war die Agri-PV nur auf Verordnungsebene geregelt. Neu wurde folgende, sehr schwammige, Gesetzesgrundlage geschaffen:

²Solaranlagen, die sich innerhalb von landwirtschaftlichen Nutzflächen nach Artikel 14 LBV befinden, gelten als standortgebunden, wenn sie:

- a. *neben der Stromproduktion die landwirtschaftlichen Interessen nicht beeinträchtigen und Vorteile für die landwirtschaftliche Produktion bewirken;
oder*
- b. *landwirtschaftlichen Versuchs- und Forschungszwecken dienen.*

Ungenutztes Potential zur erneuerbaren Stromproduktion und Stromeffizienz in der Schweiz



Datenquellen: BFE, EnergieZukunftSchweiz, eigene Berechnungen

- Heutiger Strombedarf: 60 TWh/a
- Strombedarf nach Dekarbonisierung/
Elektrifizierung:
ca. 80 bis 90 TWh/a
- Wasserkraft produzierte in den
letzten Jahren jeweils ca. 39 TWh/a
- **Zusatzbedarf von 40 bis 50 TWh/a**
(Ersatz AKW und Mehrbedarf
Dekarbonisierung)

Der Strombedarf für den AKW-Ersatz und die Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems kann in der Schweiz gedeckt werden, wenn die Energieträger effizient eingesetzt werden.

- **Grosse Potenziale**
ca. 55 TWh/a, falls mehr als 95 % aller Gebäude eine PV-Anlage hätten
- **Geringer Ausschöpfungsgrad der Potenziale**
 - aktuell in der Schweiz ca. 9 %
 - bestehende PV-Dachanlagen nutzen durchschnittlich nur 49% des Potenzials auf dem Dach. Gründe: Freiwilligkeit, Anreize für Eigenverbrauch, Fixierung auf zu rasches Payback, nicht-monetäre Motivation selten.
- **Politischer Wille für Obligatorium auf bestehenden Bauten fehlt**
 - Zu langsamer Ausbau der PV-Produktion -> PV auf Freiflächen erforderlich

Wie hoch ist das theoretische Potential der Agri-PV in der Schweiz?

Ergebnisse einer neuen Potentialanalyse von 2024

→ <https://doi.org/10.21256/zhaw-2649>



Methodologie für die räumliche Auswahl

Methodologie für die solaren Einstrahlungsbedingungen

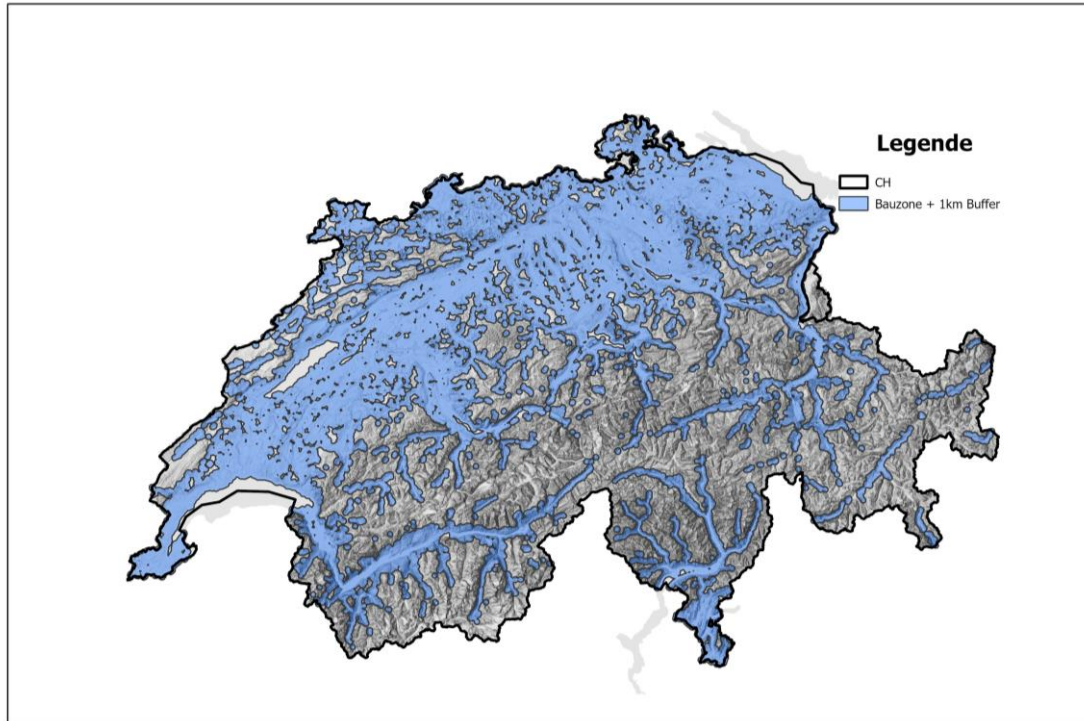
Schritt 1 - Pufferzone von 1000 Metern um das Siedlungsgebiet

In der Studie wurden nur Gebiete innerhalb eines Puffers von 1000 Metern um das Siedlungsgebiet berücksichtigt – in Anlehnung an Schweizer Vorgaben, die Agri-PV in der Nähe oder angrenzend an das Siedlungsgebiet sieht.



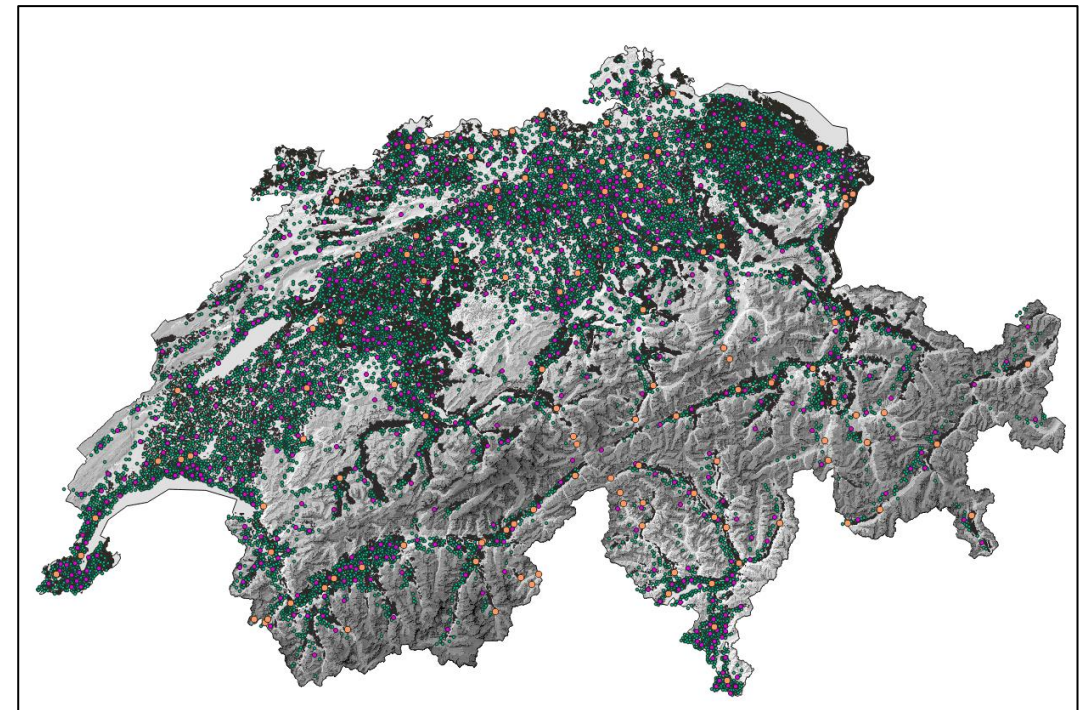
Kartenausschnitt mit Bauzonen (lila), 1000 m Puffer um Bauzonen (blau) und landwirtschaftlichen Flächen (gelb).

Dieser Puffer umfasst bereits einen beträchtlichen Teil der Schweizer Landesfläche und ...



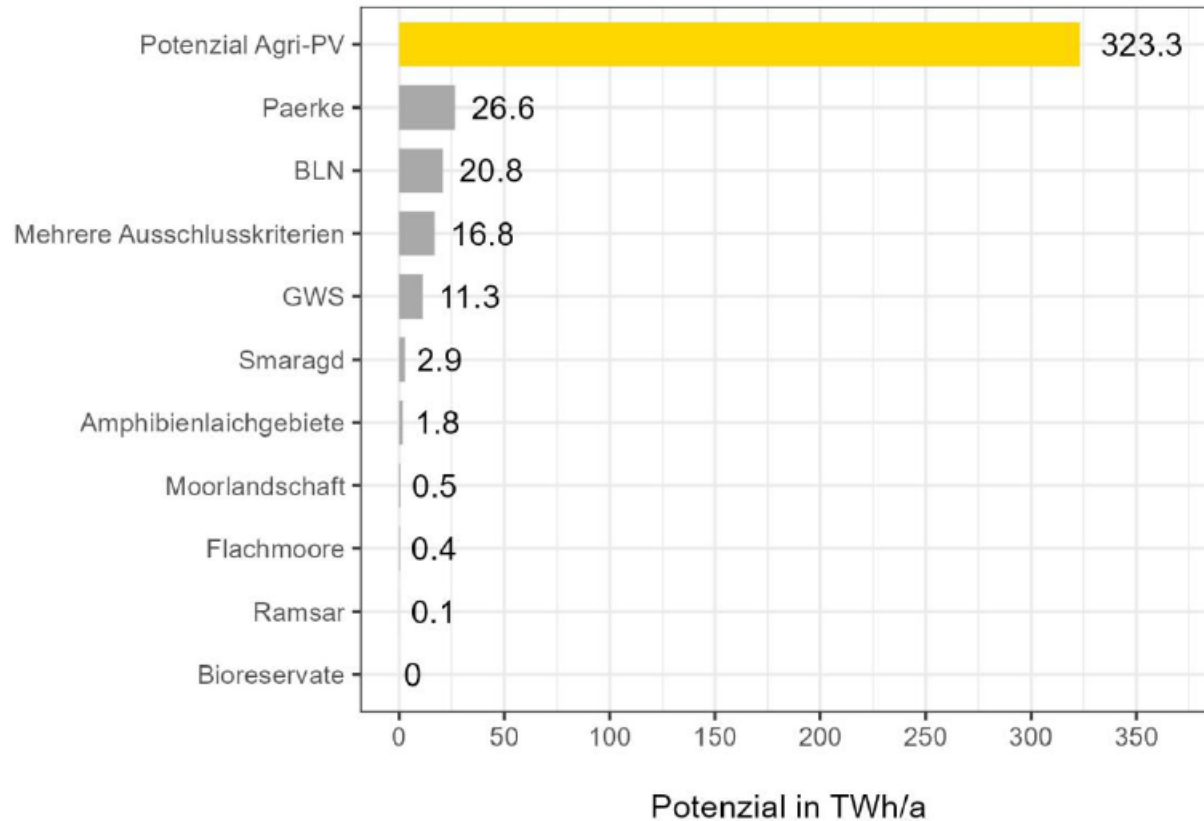
Nationale homogene Bauzonen. Quelle: Amt für Raumentwicklung

... entspricht dem Schweizer Stromverteilungsnetz. Die Punkte stellen Transformatoren des Übertragungs- und Verteilnetzes auf verschiedenen Spannungsebenen dar



Transformatoren des Übertragungs- und Verteilnetzes auf verschiedenen Spannungsebenen. Quelle: Gupta et al., 2021, Applied Energy, Countrywide PV hosting capacity and energy storage requirements for distribution networks: Der Fall der Schweiz

Schritt 2 - Festlegung von Ausschlussgebieten

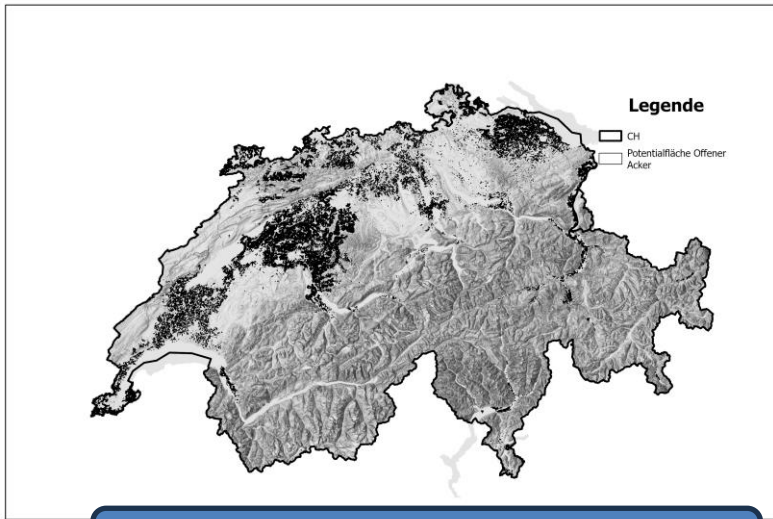


- Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN)
- RAMSAR und SMARAGD Naturschutzgebiete
- Naturpärke
- Moore (Hoch- und Flachmoore)
- Amphibienschutzgebiete
- Nationalpark
- Biosphärenreservate
- UNESCO-Welterbe Naturstätten
- Trockenwiesen und -weiden
- Gewässerschutzzonen S1 bis S3

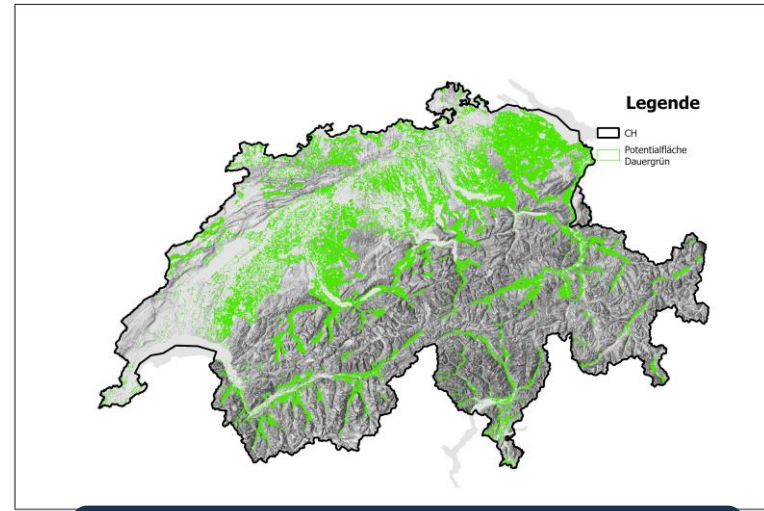
Ausschlusskriterien verringern Agri-PV-Ertrag um 81,2 TWh/Jahr

Räumliche Verteilung des aufgrund der definierten Ausschlusskriterien ausgeschlossenen Ertragspotenzials von Agri-PV Anlagen in der Schweiz in GWh/a.

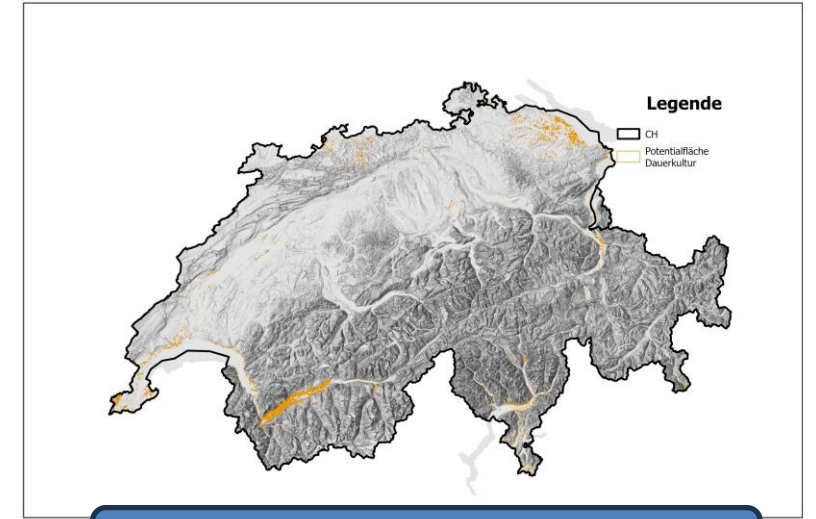
Schritt 3 - Zuweisung des Managementsystems



Offene Ackerfläche



Dauergrünland

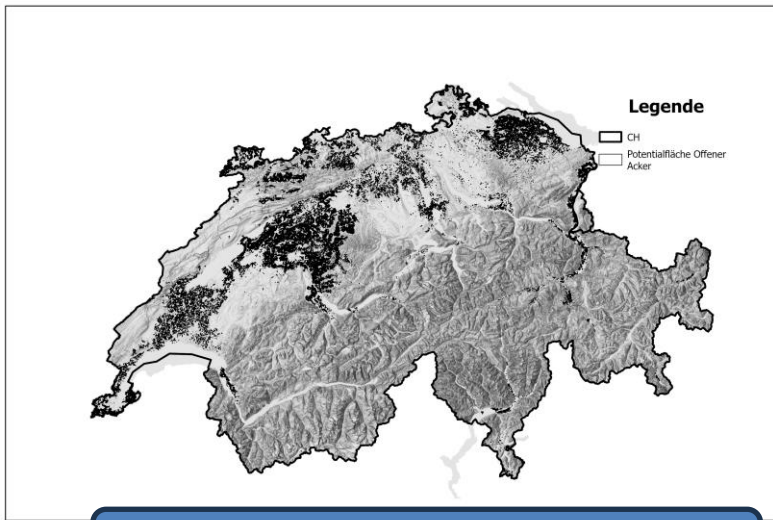


Dauerkulturen

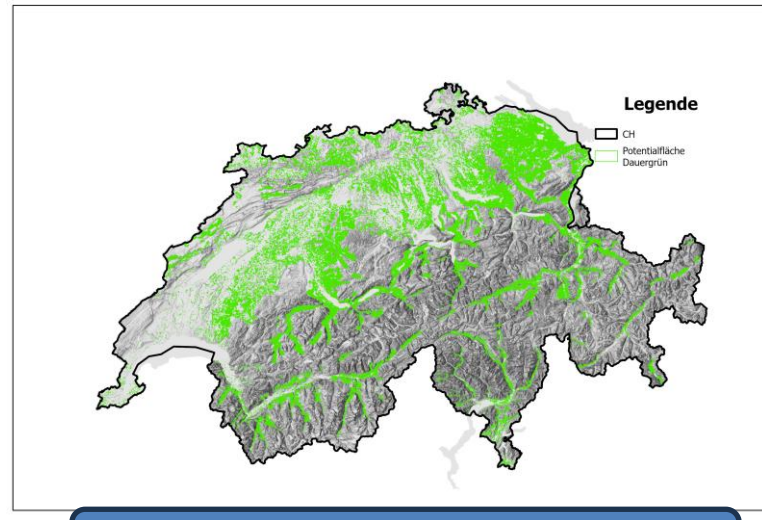
Landwirtschaftliche Flächen* innerhalb des 1000-Meter-Puffers, denen ein Bewirtschaftungsstatus auf der Grundlage der darauf angebauten Kulturen zugewiesen wurde.

* Die LN basieren auf dem Modell "Identifizierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen 153". (BLW, 2023)

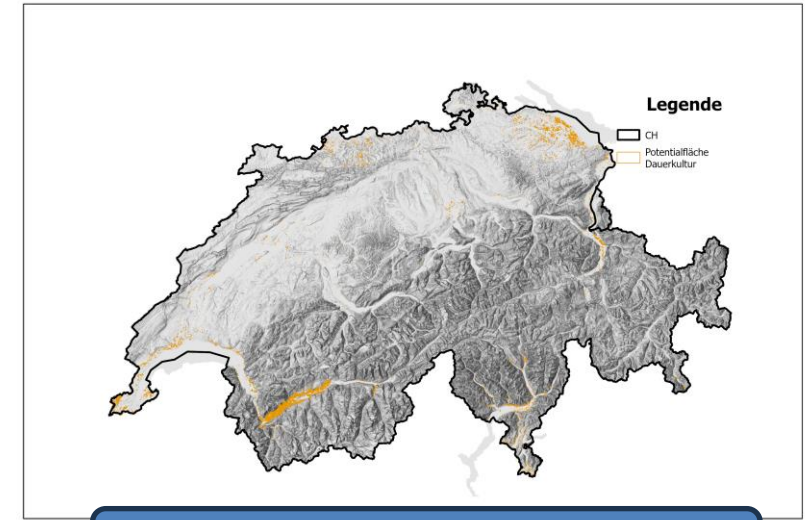
Schritt 4 - Zuweisung eines Agri-PV-Referenzsystems



Offene Ackerfläche



Dauergrünland



Dauerkulturen



Ackerland: nicht nachgeführte bifaziale Module in 5,5 m Höhe, Neigungswinkel 20%



Grasland: bifaziale, vertikale Module in Ost-West-Anordnung



Dauerkulturen: Anlage mit halbtransparenten bifazialen Modulen

Schritt 5 - Ertragssimulation für die Referenzsysteme

Ertragssimulation basierend auf einem Referenzstandort mit typischen Einstrahlungsbedingungen (1163 kWh/m²/Jahr) —————> führt zum jährlichen PV-Ertrag für jeden Anlagentyp



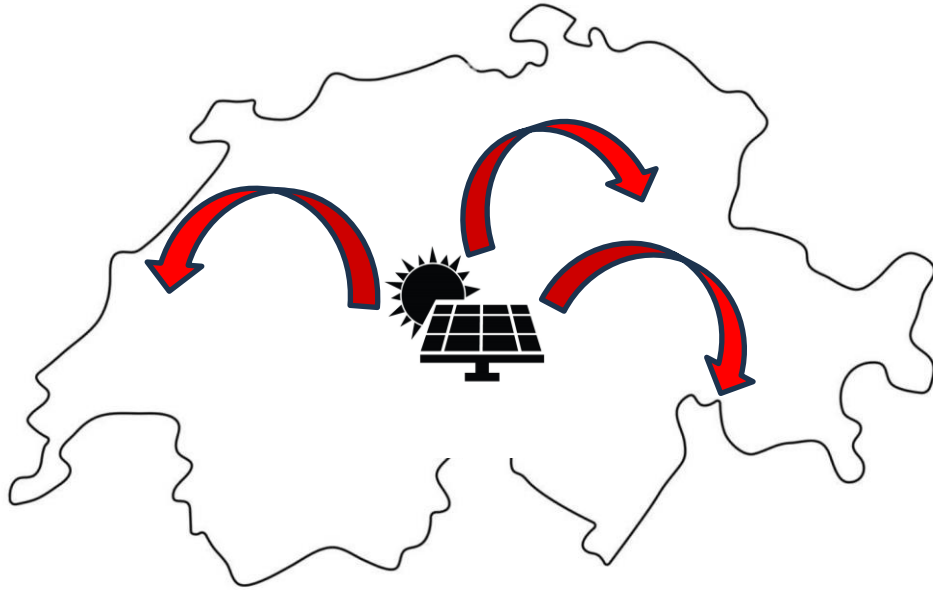
Ackerbau: Nennleistung: 612 kWp, spezifische Jahresleistung 1200 kWh/kWp, **Flächenertrag von 735 MWh/ha/Jahr.**



Dauergrünland: Nennleistung von 293 kWp/ha. Spezifische Jahresleistung: 1000 kWh/kWp, **Flächenertrag von 293 MWh/ha/Jahr.**



Dauerkulturen: Nennleistung: 737 kWp/ha. Spezifische Jahresleistung von 1170 kWh/kWp, **Flächenertrag von 862 MWh/ha/Jahr.**



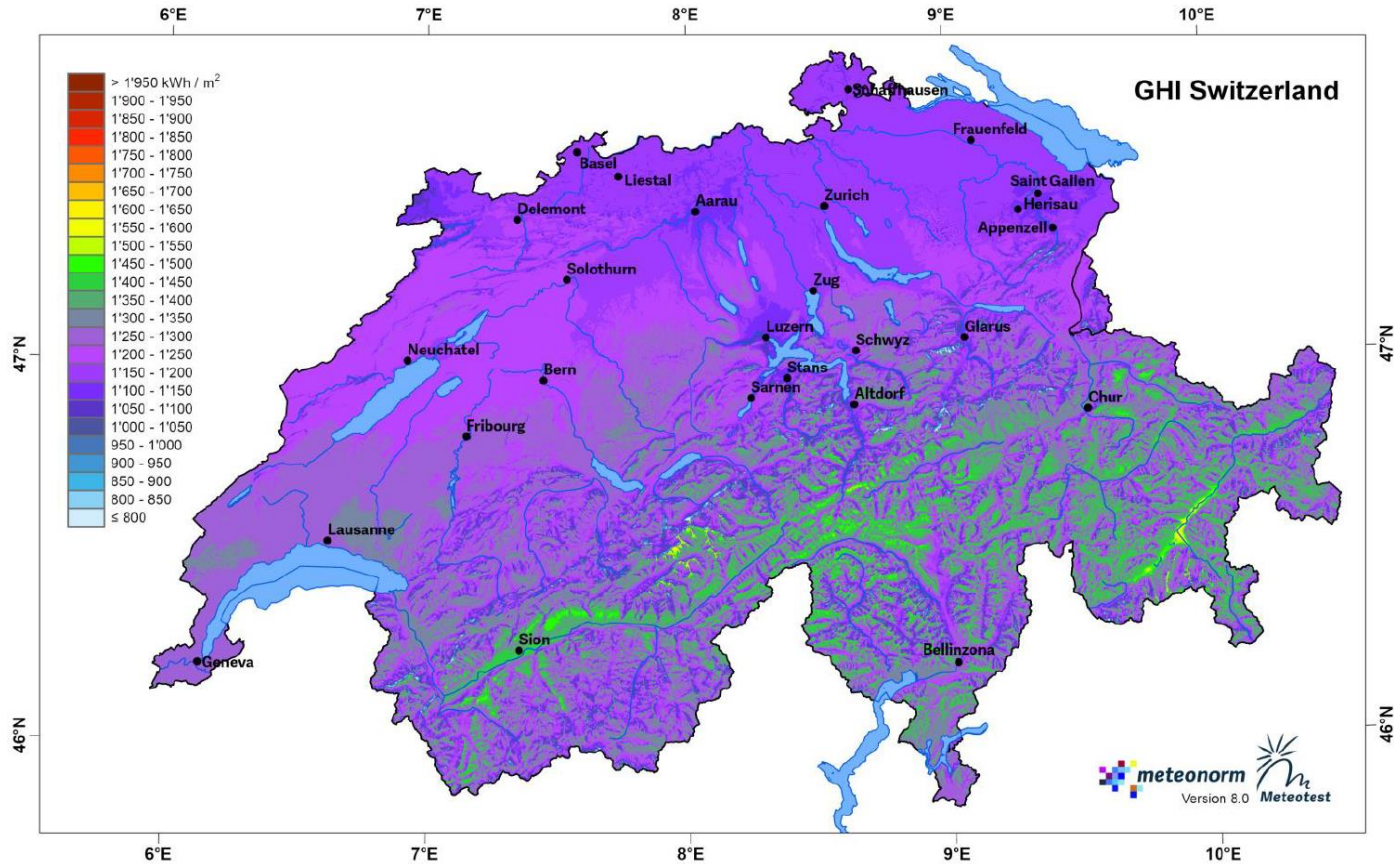
Lineare Skalierung der Jahreserträge der APV-Flächen innerhalb der Pufferzone (E_{APV}) unter Berücksichtigung von:

- **Horizontaler Einstrahlung ($E_{horizontal}$) auf der Fläche in einem typischen meteorologischen Jahr (TMY)**
- **Einstrahlung am Referenzstandort (E_{Ref})**
- **Feldgröße (A), Kulturart und Jahreserträge des korrespondierenden APV-Systems (E_{FL})**

$$E_{APV} = \frac{E_{horizontal}}{E_{Ref}} * E_{FL} * A$$

Methodik der Einstrahlungsbedingungen

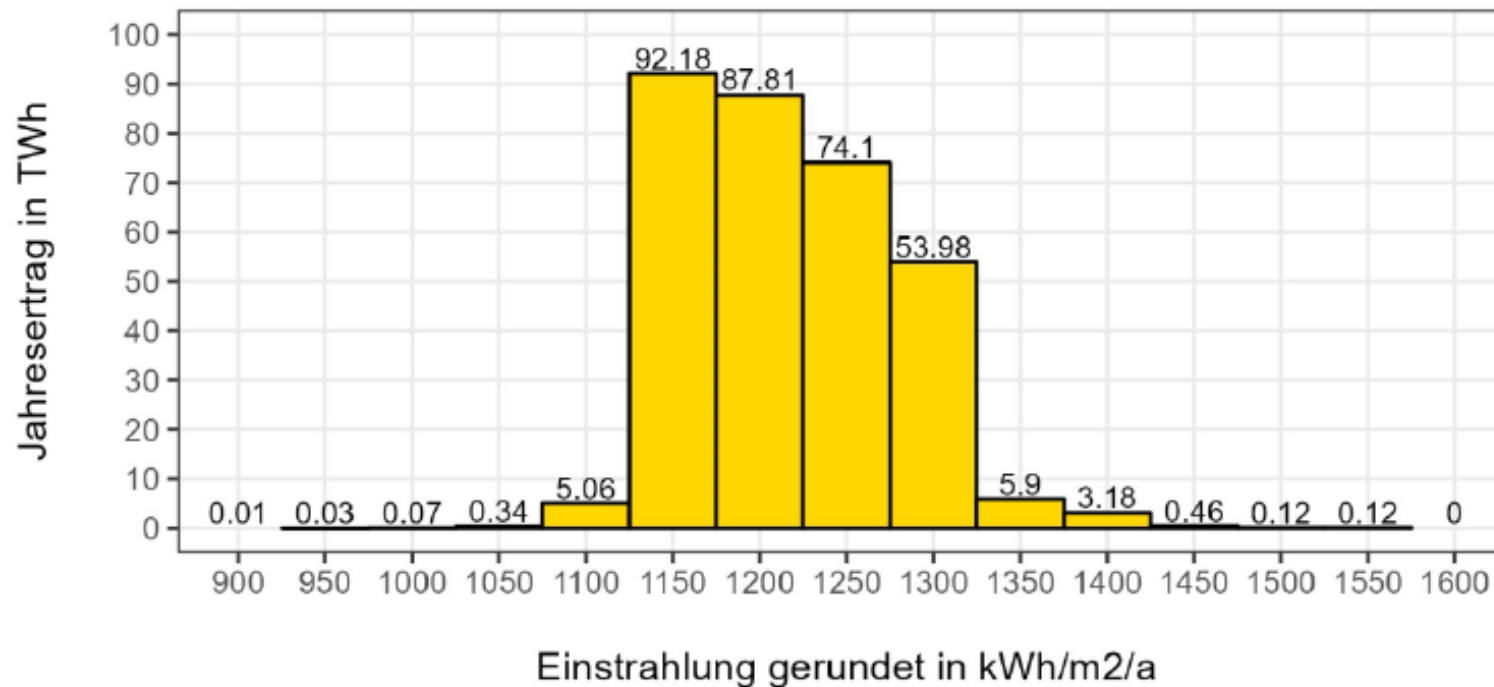
Einstrahlung Meteonorm - jährlich und saisonal



Einstrahlungswerte Meteonorm - jährlich und saisonal

- Datenquelle für die Einstrahlung: Rasterdatensatz (Auflösung 100m) in einem typischen meteorologischen Jahr (TMY), generiert mit Meteonorm 8 (Meteotest 22)
- Ermöglicht die Aufteilung der Stromerträge auf das Sommer- und Winterhalbjahr
- Der Rasterdatensatz von Meteonorm Version 8 stimmt mit den Messungen der Schweizer Meteo-Stationen gut überein, mit Abweichungen von nur 1 bis 2%.

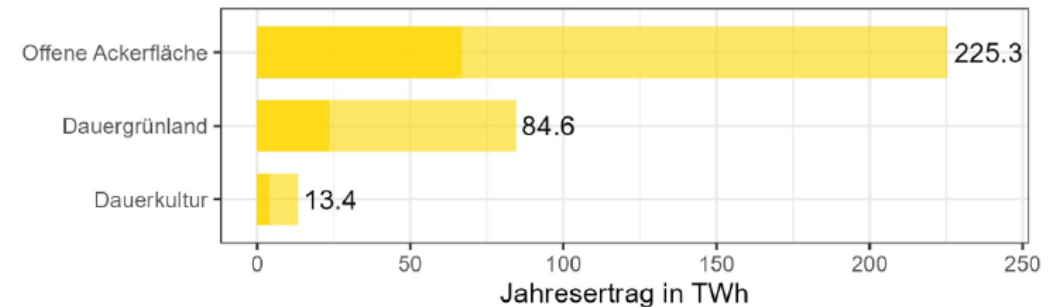
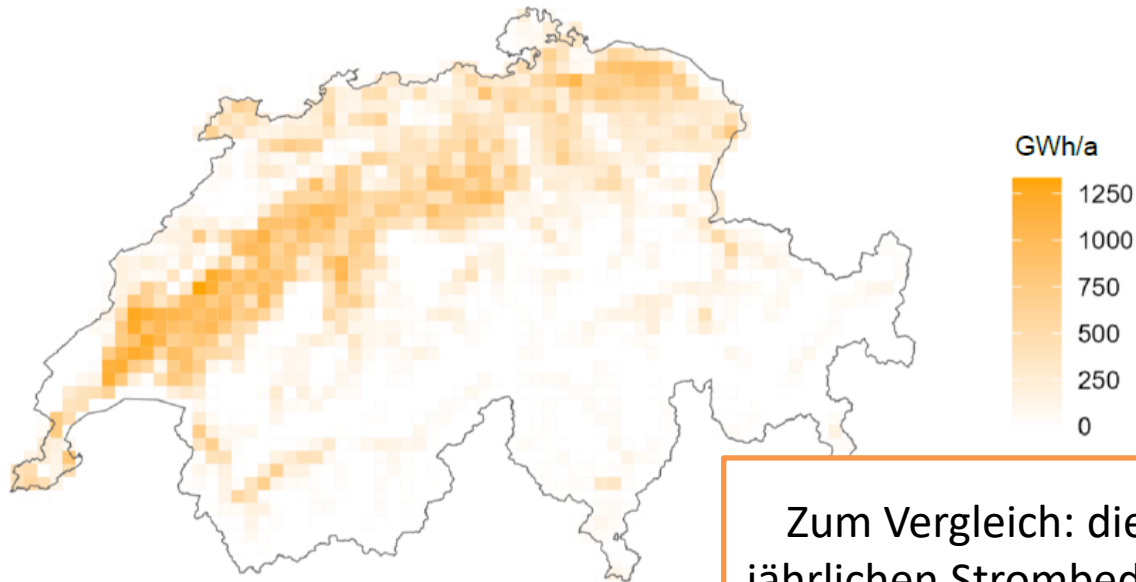
92% der Schweizer Landwirtschaftsflächen erreichen mindestens Einstrahlungsbedingungen von 1150 kWh/m²/Jahr



Verteilung des Ertragspotenzials der Agri-PV gruppiert nach der horizontalen Einstrahlung auf die Bodenfläche. Es wurden Klassen mit einer Bandbreite von 50 kWh/m²/a gebildet. Mittelwert 1234 kWh/m²/a, Median 1222 kWh/m²/a, Standardabweichung 93 kWh/m²/a.

Das Agri-PV-Potenzial erstreckt sich über eine Fläche von 583'499 ha und deckt damit 56 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ab

Der gesamte potenzielle Agri-PV-Stromertrag beläuft sich auf 323 TWh/Jahr



Zum Vergleich: die Schweiz hat einen jährlichen Strombedarf von etwa 60 TWh

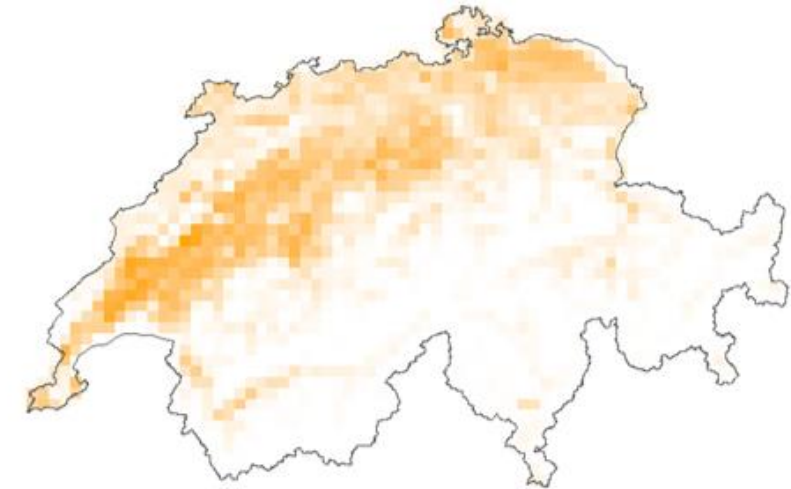
Geografische Verteilung des theoretischen Potenzials in GWh/a für Agri-PV unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, inkl. Flächen mit Anbau von Mais. Das Potenzial wurde in einem Raster mit einer Zellgrösse von 5 km x 5 km summiert. Der grösste Anteil am Potenzial liegt im Mittelland.

Theoretisches Potenzial von Agri-PV in der Schweiz pro Bewirtschaftungsstatus unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien inkl. Berücksichtigung von Flächen mit Anbau von Mais. Das Potenzial im Winterhalbjahr ist dunkel dargestellt, das Potenzial im Sommerhalbjahr hell.

Agri-PV Potential verteilt auf die Kantone

Kanton	Potenzial in TWh/a	Anteil am Gesamtpotenzial in %	Potenzial in TWh/WH
Bern	59.6	18.4	17.7
Waadt	50.2	15.5	15.1
Freiburg	34.4	10.6	10.3
Zürich	25.9	8.0	7.4
Luzern	21.6	6.7	6.3
Aargau	21.1	6.5	6.0
Thurgau	20.4	6.3	5.7
St.Gallen	16.9	5.2	4.8
Solothurn	10.2	3.2	2.9
Wallis	9.4	2.9	2.9
Graubünden	9.4	2.9	2.9
Jura	9.4	2.9	2.7
Basel-Landschaft	6.1	1.9	1.7
Genf	5.1	1.6	1.5

Theoretisches Potenzial der Agri-PV pro Kanton unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, inkl. Flächen mit Anbau von Mais. Gezeigt sind Kantone mit einem Potenzial > 5 TWh/a, die vollständige Liste kann der Tabelle 8 im Anhang entnommen werden. WH = Winterhalbjahr (Jan-Mär und Okt-Dez).



Die grossen Agrarkantone (z.B. Waadt, Bern...) haben logischerweise das grösste Agri-PV Potential

Agri-PV Analysetool für Gemeinden

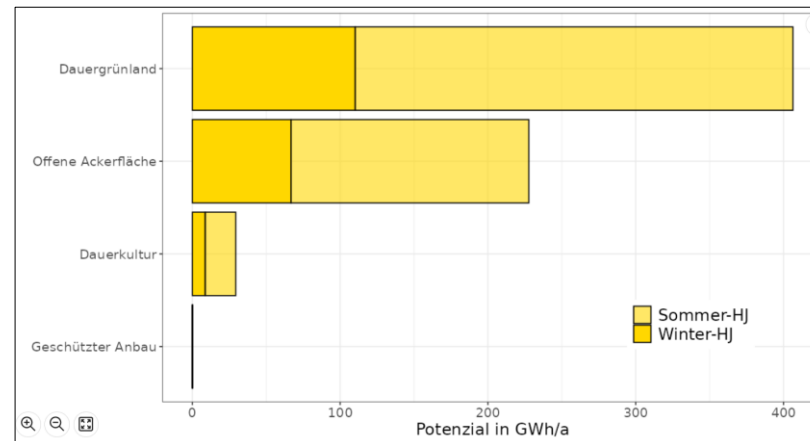
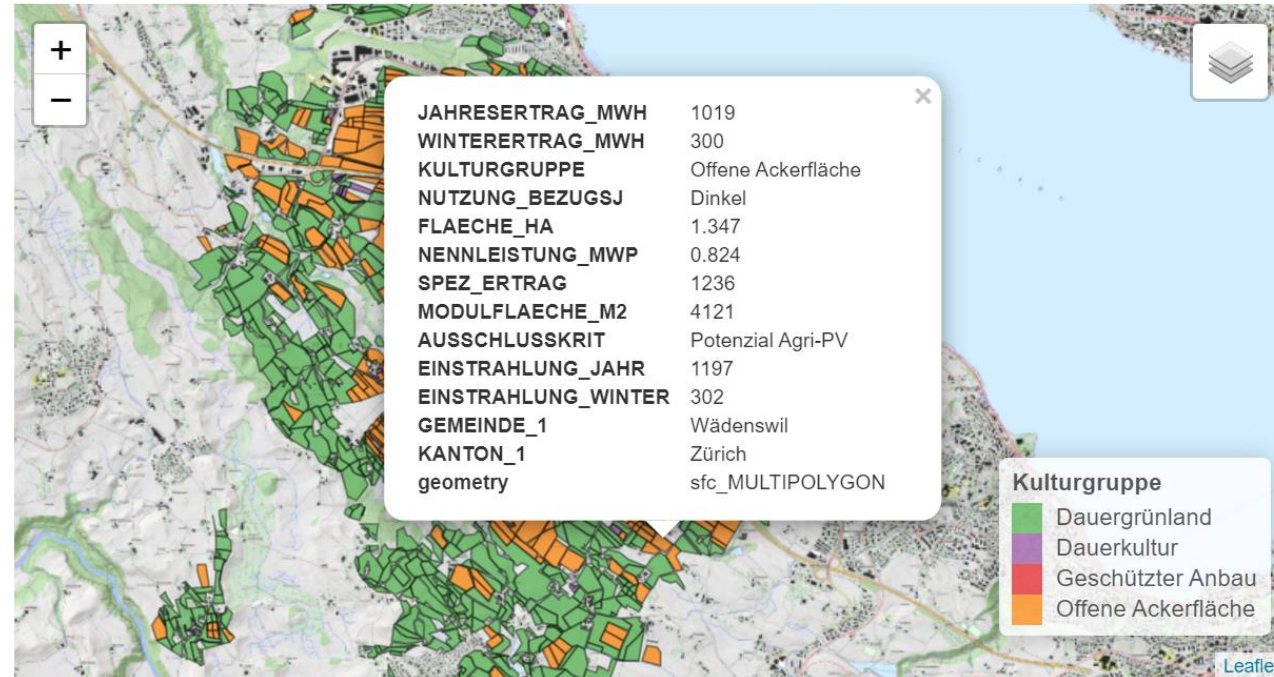
Wähle eine Gemeinde:

Wädenswil

Ausschluss von Flächen, die nationale Schutzkriterien tangieren?

Nein

ZHAW - Forschungsgruppe Erneuerbare Energien



Auch wenn das Potential enorm ist – 56% der Landwirtschaftsfläche auf Agri-PV umzustellen ist unrealistisch und die Agri-PV muss auch nicht alle Probleme lösen.

Aber:

Soll die Agri-PV ungefähr 10% des für 2050 prognostizierten Energiebedarfs decken (ca. 80 TWh/Jahr), müssten ca. 1% Ackerfläche oder Dauerkulturfläche (≈ 10.000 ha) oder 2.5% Dauergrünlandfläche auf Agri-PV Nutzung umgestellt werden.



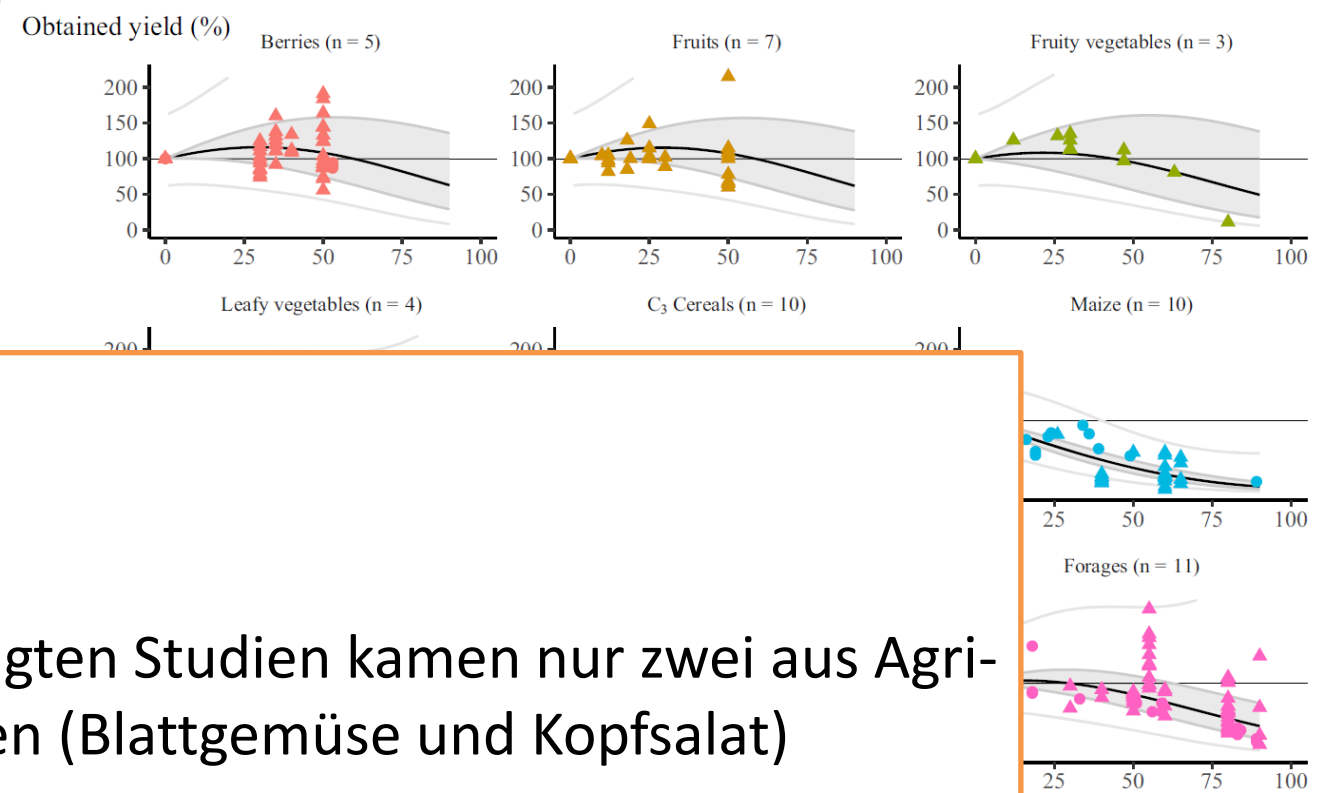
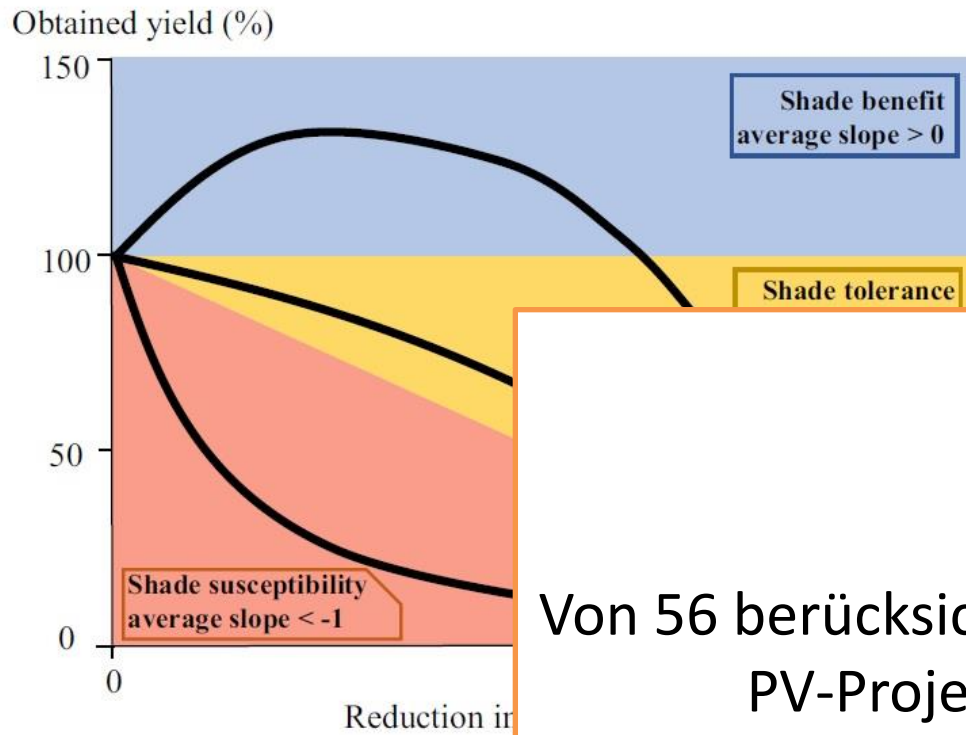
Source: Matthias Baumann, ZHAW

Was bedeuten die Ergebnisse nun für die Schweizer Landwirtschaft und die landwirtschaftlichen Erträge?

Wo Licht ist, ist auch Schatten!



Meta-Analyse Auswirkung von Beschattung auf Erträge



Von 56 berücksichtigten Studien kamen nur zwei aus Agri-PV-Projekten (Blattgemüse und Kopfsalat)

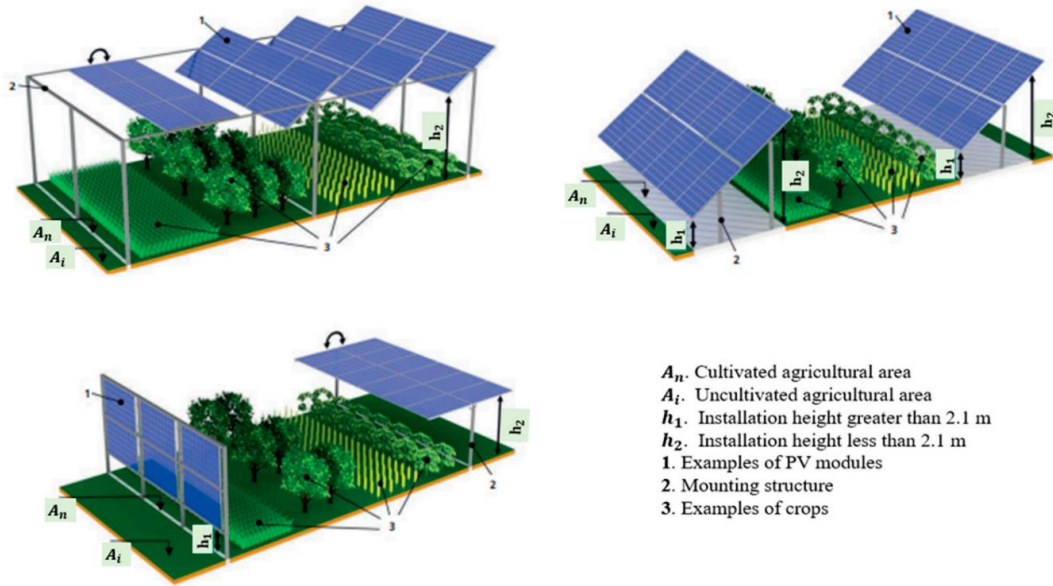
Erträge können bis zu einem ... (Shade benefit)

Andere Kulturarten zeigen sich ... (Shade tolerance): Grünland und Blattgemüse

Die dritte Gruppe zeigt einen Ertragsrückgang, der überproportional zur Beschattung ist (shade susceptibility): Getreide, Mais, Wurzel- und Knollengemüse und Körnerleguminosen

Laub et al. (2022)

Verschiedene Agri-PV Anwendungen, verschiedene GCR



A_n . Cultivated agricultural area
 A_i . Uncultivated agricultural area
 h_1 . Installation height greater than 2.1 m
 h_2 . Installation height less than 2.1 m
 1. Examples of PV modules
 2. Mounting structure
 3. Examples of crops

Trommsdorf, 2021

**GCR = Ground CoverageRatio/Bodenbedeckungsrate
 = Bodenbedeckungsfläche mit Modulen (evtl.
 multipliziert mit dem Transmissionsgrad der Module,
 bei semitransparenten Modulen)
 Grosser Einfluss auf die Verschattung der Fläche**

Ungefähre Beziehung zwischen GCR von 2 verschiedenen Agri-PV Systemen mit und dem durchschnittlichen jährlichen Beschattungsgrad der Kultur (unter Annahme einer optimalen Ausrichtung der Paneele)

	Bodenbedeckungsgrad	
		30%
Paneelen-Typ	Durchschnittliche jährliche Verschattung	
Fest, geneigt oder vertikal	35%	65%
Solar Tracking	40%	70%
Adaptives Agrar-Tracking	20 – 40%	40 – 70%

Verändert nach: Dupraz, C. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforest Syst* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00906-3>

Gleichmässige Verschattung (homogen) versus scharfen Übergängen zwischen Licht und Schatten
Way und Percy (2012) wiesen nach, dass die Spaltöffnungen zwischen 10- 60 Minuten brauchen, um sich nach einem Übergang zwischen Schatten und Licht wieder vollständig zu öffnen.

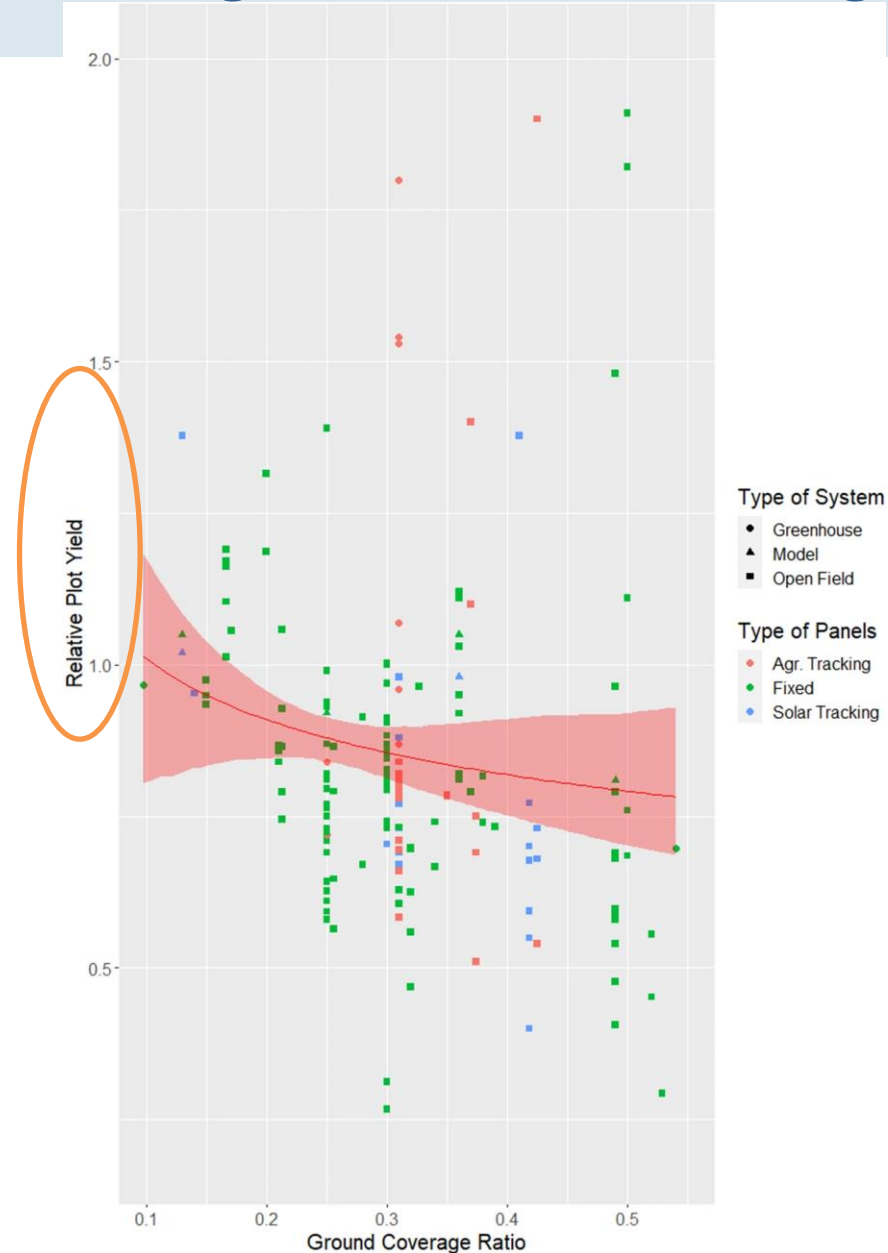


Förderlich für homogene Lichtverteilung in APV-Systemen:

- Hohe Paneele über dem Boden = grosser Abstand zum Pflanzendach
- Unscharfe Positionierung der Paneele (Quincunx, kariert etc.)
- Semitransparente Paneele

Meta-Analyse Auswirkung von GCR auf Erträge

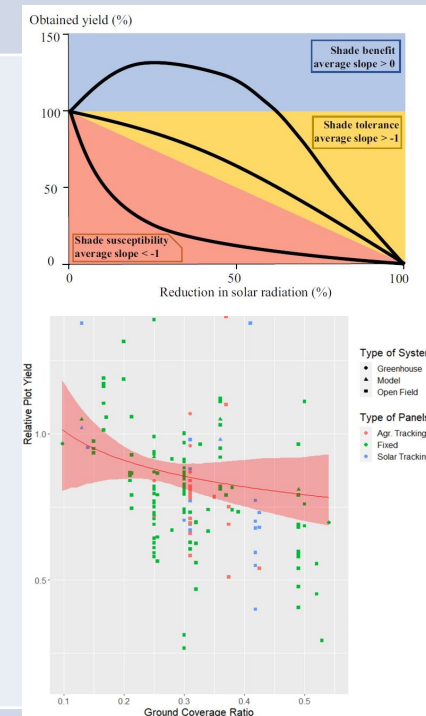
Abbildung 12: Abnahme des relativen Flächenertrags in der Agri-PV in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad (GCR) (unter Verwendung aller verfügbarer Daten) Anpassung: $RPY = aGCR^b$ mit $a = 0,7128$ und $b = -0,1515$



RPY = relativer
Parzellenertrag =
jegliche Veränderung
des Ernteertrags pro
bebautem m^2
RFY = Relativer
Feldertrag =
RPY * Verlorene Fläche

Veränderung des RPY* von Kulturpflanzen, abgeleitet aus der Synthese von Laub et al. (2022) für 25% und 50% Beschattung

Kultur	n	25% Verschattung (bei GCR 20%)	50% Verschattung bei GCR 45%)
Beeren	5	+15%	0%
Kern-Steinobst	7	+10%	0%
Fruchtgemüse	3	+5%	-5%
Blattgemüse	4	0%	-25%
C3 Getreide	10	-20%	-45%
Mais	10	-40%	-60%
Wurzelgemüse	2	-25%	-50%
Körnerleguminosen	14	-30%	-60%
Futtergras	11	0%	-25%
Gewichteter Durchschnitt (nach n)	66	-14%	-35%



*Die RPY-Änderungen wurden vom Autor aus den angepassten Kurven abgeleitet (Grafik 12)

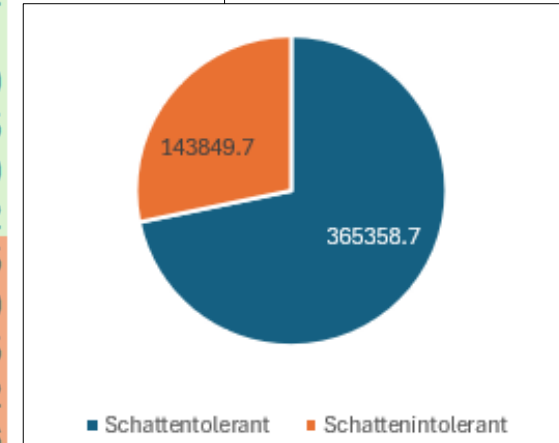
Verteilung des Potentials auf die Kulturengruppen

Nutzung	Potenzial in TWh/a	Potenzial in TWh/WH	Winterstromanteil in %
Offene Ackerflächen	225.3	66.9	29.7
... <i>Kunstwiesen</i>	64.4	19.2	29.9
... <i>Winterweizen (ohne Futterweizen)</i>	42.6	12.6	29.6
... <i>Silo- und Grünmais</i>	26.4	7.8	29.6
... <i>Wintergerste</i>	15.4	4.6	29.6
... <i>Winterraps zur Speiseölgewinnung</i>	14.5	4.3	29.6
... <i>Körnermais</i>	10.6	3.1	29.5
... <i>Andere offene Ackerflächen</i>	51.4	15.2	29.6
Dauergrünland	84.6	23.7	28.0
... <i>Dauerwiesen (ohne Weiden)</i>	68.8	19.3	28.0
... <i>Weiden</i>	15.7	4.4	27.8
... <i>Übrige Grünflächen</i>	0.2	0.0	27.2
Dauerkultur	13.4	4.1	30.7
... <i>Reben</i>	5.8	1.2	31.6
... <i>Obstanlagen (Äpfel)</i>	3.1	0.9	30.1
... <i>Obstanlagen (Steinobst)</i>	1.3	0.4	29.4
... <i>Obstanlagen (Birnen)</i>	0.6	0.2	30.1
... <i>Andere Dauerkulturen</i>	2.3	0.6	30.1
Total	323.3	94.6	29.2

Theoretisches Potenzial der Agri-PV in der Schweiz unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien mit Aufteilung nach Bewirtschaftungsstatus und Kulturen (kursiv). Es sind die Kulturen mit dem höchsten Potenzial gezeigt, die restlichen wurden unter «Andere» zusammengefasst. WH = Winterhalbjahr vom Jan-Mär und Okt-Dez.

Übertragung auf die Schweizer Potentialfläche (grob)

KULTURGRUPPE	Kultur	Jahresertrag in TWh	Fläche in ha
Dauergrünland	Weiden	15.712	51382.2
Dauergrünland	Wiesen	68.822	224661
Dauerkultur	Obstanlagen (Birnen)	0.588	633.9
Dauerkultur	Obstanlagen (Steinobst)	1.276	1393.5
Dauerkultur	Obstanlagen (Äpfel)	3.073	3343.9
Offene Ackerfläche	Kunstpiesen (ohne Weiden)	64.359	83944.2
Offene Ackerfläche	Körnermais	10.576	13925.5
Offene Ackerfläche	Silo- und Grünmais	26.419	34850.9
Offene Ackerfläche	Wintergerste	15.42	20310.5
Offene Ackerfläche	Winterraps zur Speiseölgewinnur	14.512	18977.2
Offene Ackerfläche	Winterweizen (ohne Futterweizer	42.585	55785.6
		Schattentolerant	365358.7 72%
		Schattenintolerant	143849.7 28%
		Gesamt	509208.4



Ackerbau: GCR 0.36



Dauergrünland: GCR 0.2



Dauerkulturen: GCR 0.39

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Illustration of the planned Agri-PV research facility at the ZHAW campus with dynamic dual-axis orientation of the modules

Vielen Dank an die Forschungsgruppe Erneuerbare Energien für die spannende Zusammenarbeit und dem Bundesamt für Energie für die Finanzierung der Studie!

