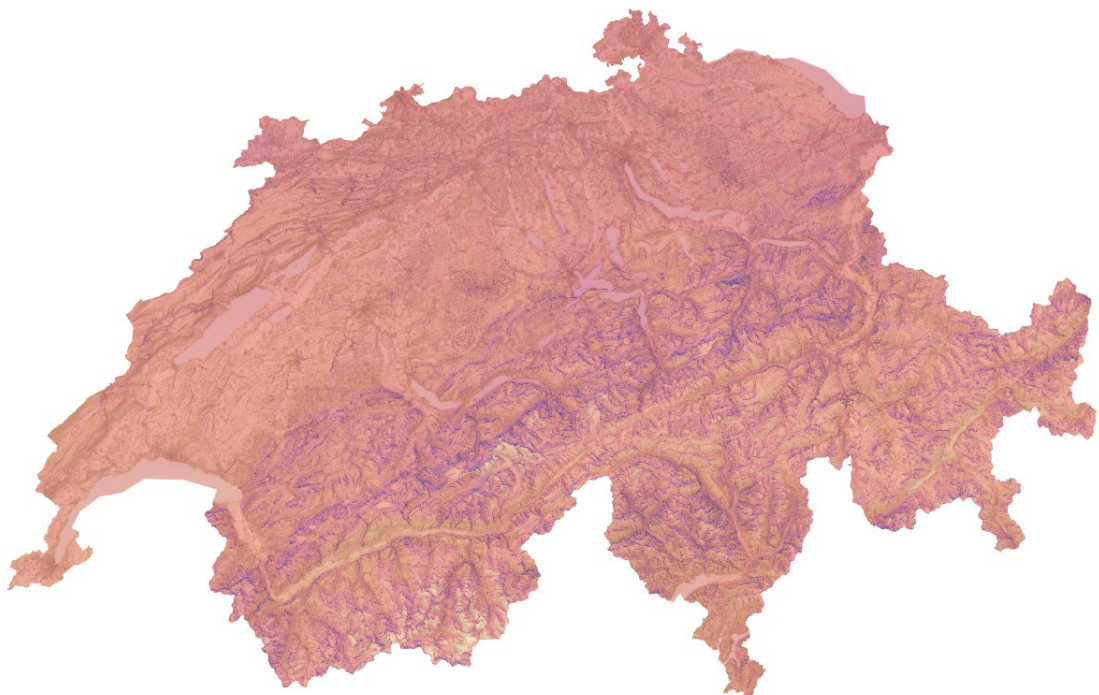




Bericht vom 14. Dezember 2023

Hoch aufgelöste Einstrahlungsdaten für die ganze Schweiz

Dokumentation der Berechnungsmethoden und der Datenlieferung





Datum: 14. Dezember 2023

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Firma Meteotest AG
Fabrikstrasse 14, 3012 Bern
www.meteotest.ch

Autor/in:

Michael Schmutz, Meteotest AG, michael.schmutz@meteotest.ch
Jan Remund, Meteotest AG, jan.remund@meteotest.ch

BFE-Bereichsleitung: Leo-Philipp Heiniger, leo.heiniger@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Leo-Philipp Heiniger, leo.heiniger@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/403002-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Methoden und Datensätze	5
2.1	Meteonorm	5
2.2	Berechnung der PV-Produktion	6
2.3	Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche	7
2.4	Berechnung des topografischen Horizontes	7
2.5	Berechnungspunkte und Ausgaberraster	9
2.6	Aggregationszeiträume und Einheiten	11
2.7	Dateinamen	11
2.8	Kartenbeispiele	11

1 Einleitung

Meteotest hat im Jahr 2018 eine erste Solar-Potenzialstudie für Gebäude und Freiflächen für Swissolar durchgeführt. Darin enthalten war auch eine grobe Schätzung des Potenzials von alpinen PV-Anlagen. Im Herbst 2022 hat Meteotest die Datengrundlage und GIS-Analyse aufdatiert und für diverse Kunden hoch aufgelöste Strahlungsdaten und GIS-Analysen erstellt. Diese umfassen Einstrahlungsdaten sowie Ausschlusskriterien für alpine und nicht alpine Anlagen. Die Grundlage der Daten ist die Globalstrahlungskarte der Meteonorm 8.1.

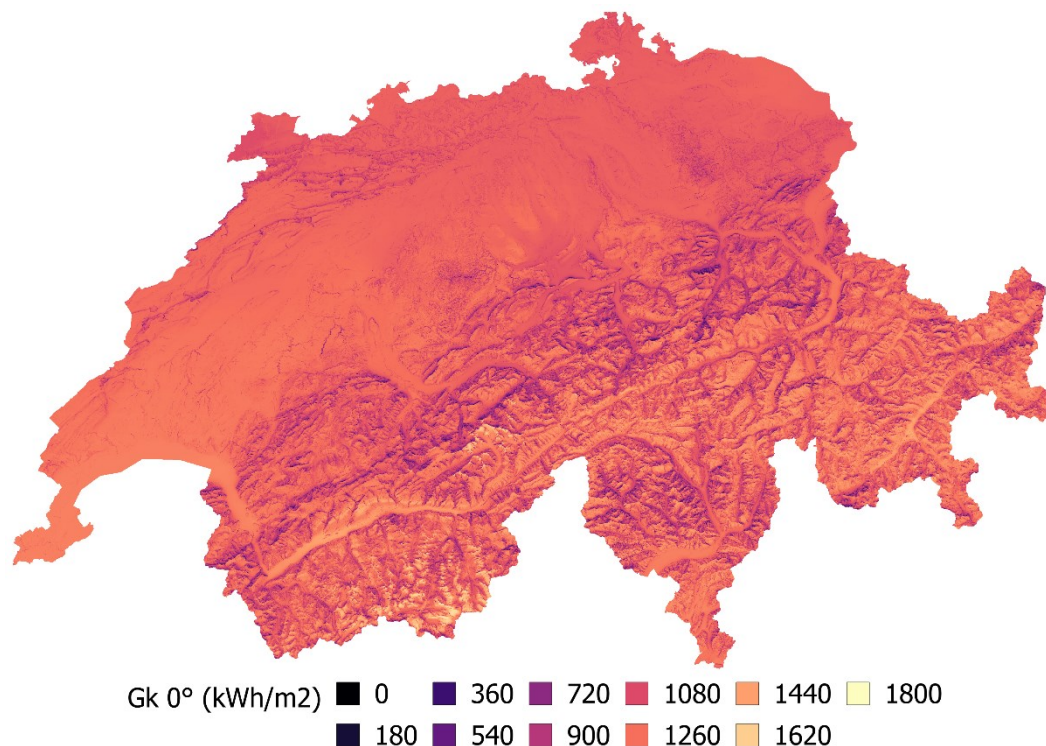


Abbildung 1: Jahressumme der Globalstrahlung.

Das Bundesamt für Energie (Leo-Philipp Heiniger und Martin Hertach) hat Meteotest (Jan Remund) angefragt, hoch aufgelöste Einstrahlungsdaten für die ganze Schweiz zu erstellen (vgl. Abbildung 1). Dieser Bericht beinhaltet die Dokumentation der Berechnungsmethoden und der Datenlieferung. Weiterführende Informationen bzgl. Berechnungsmethoden sind in der separaten Dokumentation der Software Meteonorm¹ verfügbar.

¹ <https://meteonorm.com/>

2 Methoden und Datensätze

2.1 Meteonorm

Für die Berechnung der Einstrahlungswerte wurde die Software Meteonorm v8.2² verwendet, welche von der Firma Meteotest entwickelt wird. Meteonorm ist eine globale Klimadatenbank und erzeugt genaue und repräsentative typische Meteorologische Jahre für jeden Standort auf der Erde. Detaillierte Informationen über die Funktionsweise und die verwendeten Modelle sind im Softwarehandbuch³ und im Theoriehandbuch⁴ beschrieben. Nachfolgend werden zusammenfassend die wichtigsten Methoden kurz beschrieben:

Die Klimadatenbank der Software Meteonorm beinhaltet für eine Vielzahl an Stationsstandorten die klimatologischen Monatsmittelwerte relevanter Klimaparameter wie Globalstrahlung oder Lufttemperatur. Aufgrund der hohen Dichte an Messstationen der MeteoSchweiz ist die Datenverfügbarkeit in der Schweiz von sehr hoher Qualität. Abbildung 2 zeigt die Stationspunkte mit (grün) und ohne (blau) Globalstrahlungsdaten. Stationen ohne Globalstrahlungsdaten werden für die Interpolation der Lufttemperatur verwendet. Meteonorm modelliert basierend auf den klimatologischen Monatsmittelwerte mit einem stochastischen Wettergenerator ein synthetisches Wettergeschehen in stündliche Auflösung, welches für die vorliegenden klimatischen Bedingungen repräsentativ ist. Dabei wird beispielsweise in Abhängigkeit der Lufttemperatur auch Schneefall simuliert, welcher sich durch seine höhere Albedo auch auf die Berechnung der Einstrahlung auf eine geneigte Fläche auswirkt. Der generierte Tagesgang der Lufttemperatur ist weiterhin auch für die Berechnung der PV-Produktion relevant.

Die Referenzperiode für die Einstrahlungsdaten innerhalb der Schweiz dient der Zeitraum 2001 – 2020. Für die Temperaturdaten ist die Referenzperiode 2000-2019.

² <https://meteonorm.com/>

³ https://meteonorm.meteotest.ch/assets/downloads/mn82_software.pdf

⁴ https://meteonorm.meteotest.ch/assets/downloads/mn82_theory.pdf

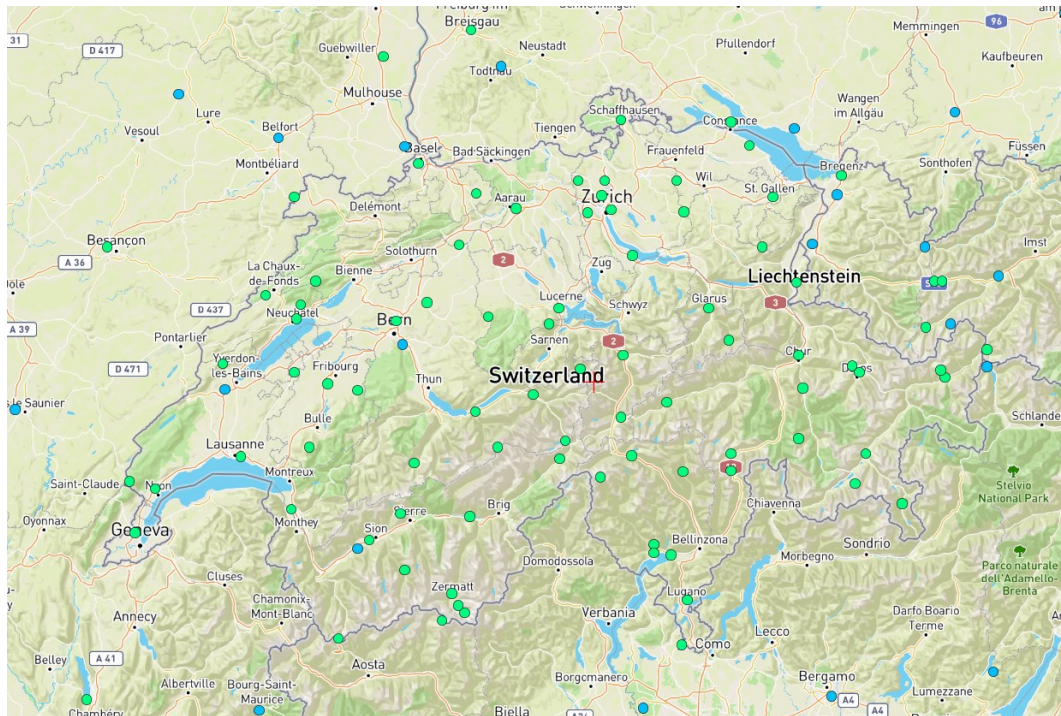


Abbildung 2: Messstationen mit (grün) und ohne (blau) Globalstrahlung in der Klimadatenbank der Software Meteonorm v8.2.

2.2 Berechnung der PV-Produktion

Die PV-Produktion wird für ein gut gewartetes kristallines Silizium-Modul mittlerer Grösse und einem effizienten Wechselrichter berechnet. In der Meteonorm erfolgt die Berechnung wie folgt:

Berechnung der Modultemperatur nach dem Ross Modell (Ross, 1976⁵) mit einem Ross-Koeffizienten $c_R = 0.03 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$ in Abhängigkeit der Einstrahlung auf die Modulebene G_k und der Lufttemperatur T_a zur Stunde h am Tag d :

$$T_{\text{Modul}} = G_k(d, h) * c_R + T_a(d, h)$$

Daraus leitet sich ein von der Modultemperatur abhängiger Effizienzfaktor t_c ab wobei ein Effizienzkoeffizient $\alpha = 0.005 \text{ K}^{-1}$ angenommen wird:

$$t_c = 1 - (T_{\text{Modul}} - 25) * \alpha$$

Schliesslich wird die PV-Produktion in den Einheiten kWh/kWp unter Verwendung eines Performance Ratio $r = 0.82$ und berechnet:

⁵ Ross, R.G. Interface design considerations for terrestrial solar cell modules. In Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, LA, USA, 15 November 1976; pp. 801–806.

$$\frac{PV(d, h)}{PV_{\text{installiert}}} = G_k(d, h) * r * t_c$$

Aufgrund der relativen Betrachtung zur installierten Leistung $PV_{\text{installiert}}$ muss die Moduleffizienz nicht berücksichtigt werden. Die Performance Ratio ist ein Qualitätsfaktor einer PV-Anlage und berechnet sich als Verhältnis zwischen Produktionsenergie und voraussichtlichem Energieertrag:

$$r = \frac{\text{Produktionsenergie}}{\text{Voraussichtlicher Energieertrag}} = 0.82$$

Darin enthaltene Verlustfaktoren sind beispielsweise die Verluste der Leitungen, Verluste im Wechselrichter oder die Verschmutzung der Photovoltaik Module. Damit die temperaturabhängige schwankende Effizienz der Module im Tages- und Jahresgang besser abgebildet wird, setzt die Meteonorm auf einen eher optimistischen (konstanten) Wert des Performance Ratio von 0.82 und berechnet die Temperaturabhängigkeit gemäss obiger Formel separat.

2.3 Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche

Meteonorm separiert die interpolierte Globalstrahlung mit dem Perez Modell (siehe Theoriehandbuch, Kapitel 7.7, S. 25) in die beiden Komponenten Diffusstrahlung und Direktstrahlung. Im vorliegenden Projekt wurden die folgenden Winkelkonfigurationen berechnet (vgl. Abbildung 3):

- 0° Neigung, Südausrichtung
- 30° Neigung, Südausrichtung
- 75° Neigung, Südausrichtung
- 90° Neigung, Südausrichtung

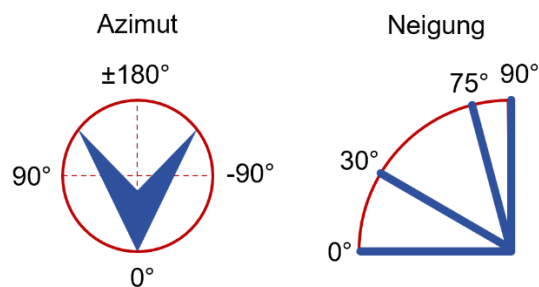


Abbildung 3: Winkelkonfigurationen für die Berechnung der Einstrahlung auf die geneigte Fläche (Azimut 0° = Süden).

2.4 Berechnung des topografischen Horizontes

Der Einfluss des Horizonts der einzelnen Berechnungspunkte wurde aus einem 10 m aufgelösten Höhenmodell der Schweiz und dem grenznahen Ausland abgeleitet. Es wurde dazu ein Mosaik aus SWISSAlti3D, DHM25 und SRTM Daten zusammengefügt und auf eine räumliche Auflösung von 10 m homogenisiert. Innerhalb der Schweiz wurde ausschliesslich SWISSAlti3D verwendet, für das grenznahe

Umland DHM25 und falls nicht verfügbar SRTM Daten. Für die Berechnung des natürlichen Horizontes wurden sämtliche Erhebungen im Umkreis von 30 km jedes Berechnungspunktes in 1°-Schritten abgetastet (vgl. Abbildung 4). Aus den maximalen Höhenwinkeln ergibt sich die für die Berechnung der Einstrahlung relevante Horizontlinie (Abbildung 5). Der Suchradius für die Horizontberechnung wurde aus Gründen der Berechnungseffizienz auf 30 km beschränkt. In den meisten Fällen liegen die Punkte mit relevanter Horizonteinschränkung in einer Distanz <30 km. Desweiteren ist der Höhenwinkel für weiter entfernt liegende Punkte sehr kleine (wenige Grad) und für die Strahlungsbilanz vernachlässigbar (wenig Energieeintrag bei Sonnenaufgang/-untergang).

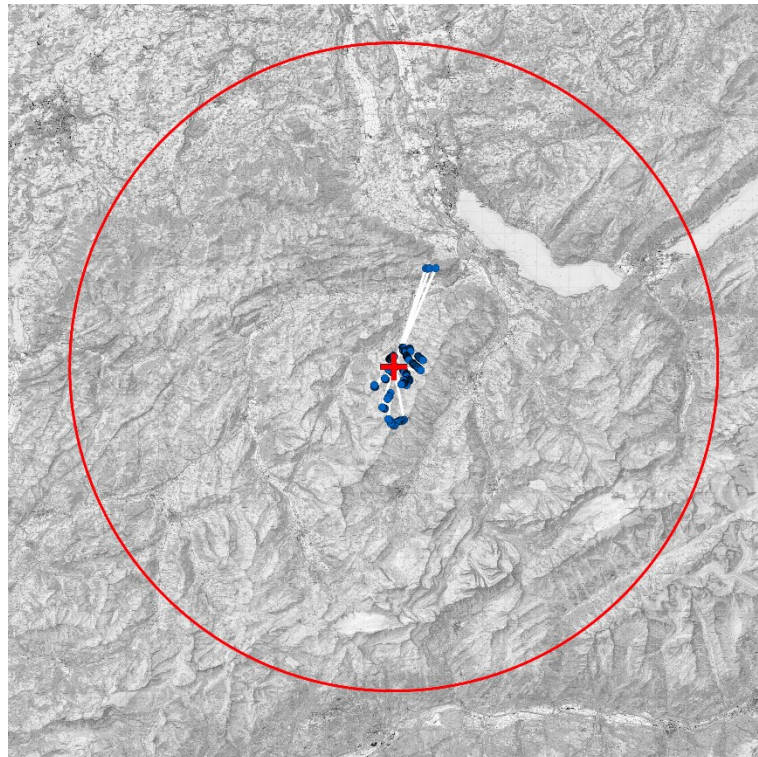


Abbildung 4: Darstellung der Punkte (blau) mit maximaler Horizonteinschränkung für einen Punkt (rotes Kreuz) im alpinen Raum. Der rote Kreis markiert den maximalen Suchradius von 30 km.

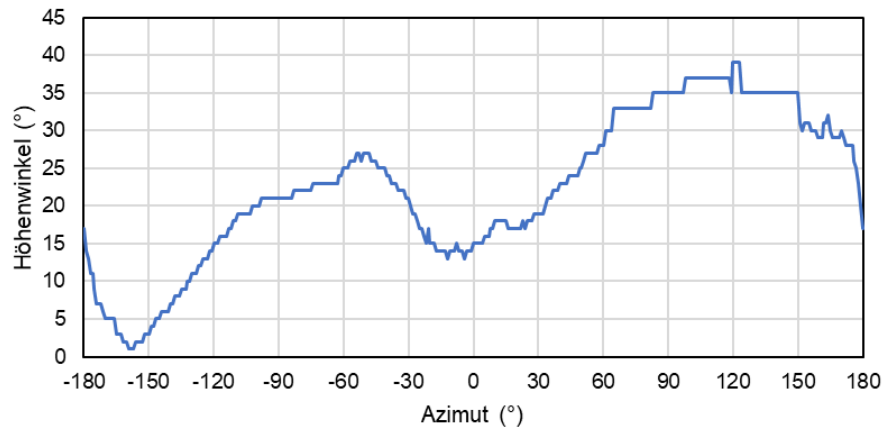


Abbildung 5: Darstellung der Horizontlinie in Abhängigkeit des Azimuts (0°=Süd, -90=Ost, 90=West, -180/180=Nord).

2.5 Berechnungspunkte und Ausgaberraster

Für die Berechnung der Einstrahlungsdaten wurde ein Punktraster mit einem Abstand von 50 m in x-Richtung und y-Richtung innerhalb der Schweizer Landesgrenzen definiert. Bei einer Fläche der Schweiz von rund 41'291 km² wurden so insgesamt 16'622'905 Berechnungspunkte festgelegt. Die Berechnungspunkte definieren die Zellmitte der Rasterzellen des Ausgaberrasters, wobei das Ausgaberraster ist wie folgt definiert ist (LV95):

X_{min}: 2473000
Y_{min}: 1069250
X_{max}: 2839500
Y_{max}: 1304250
X_{delta}: 50 m
Y_{delta}: 50 m

In Abbildung 6 ist das Ausgaberraster mit den Eckkoordinaten graphisch dargestellt. Abbildung 7 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus dem Ausgaberraster mit überlagerten Berechnungspunkten in der Zellmitte.

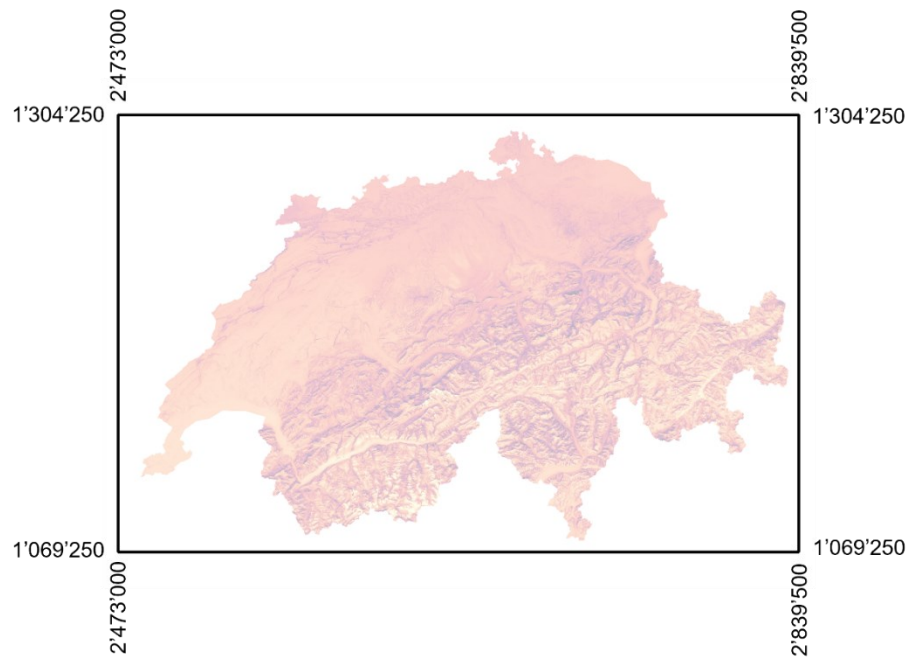


Abbildung 6: Ausdehnung des Ausgaberrasters (LV95).

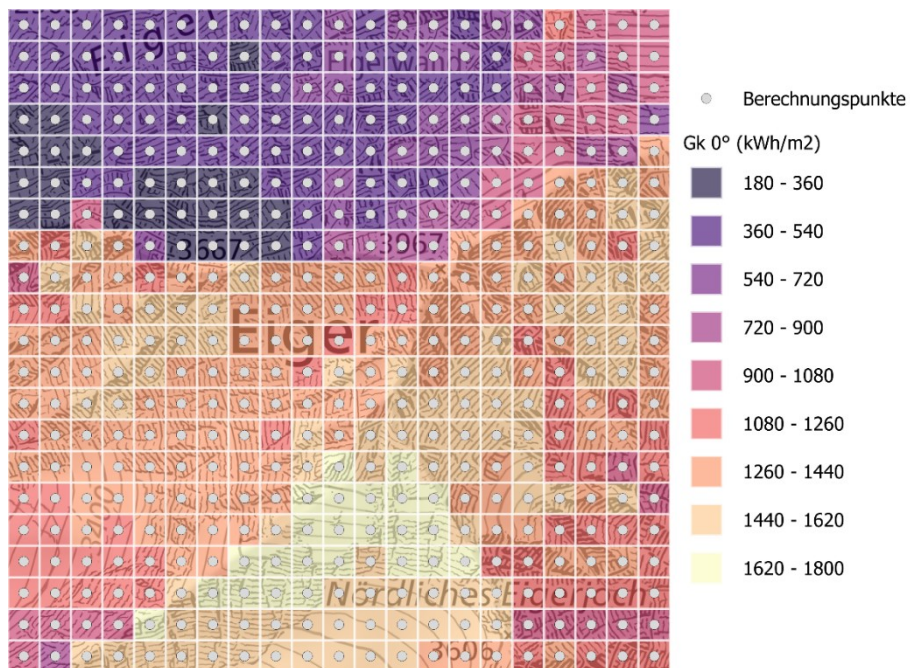


Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Ausgaberraster mit überlagerten Berechnungspunkten in der Zellmitte.

2.6 Aggregationszeiträume und Einheiten

Die Ergebnisse der Berechnung mit Meteonorm werden für jeden Berechnungspunkt als Monatswerte abgespeichert. Es werden die folgenden Aggregationszeiträume ausgegeben:

Monatssumme (Summe pro Monat Januar bis Dezember)

Jahressumme (Summe aller Monate Januar bis Dezember)

Wintersumme (Summe aller Monate Oktober bis März)

Für die jeweiligen Aggregationszeiträume wird die Einstrahlungssumme in den Einheiten kWh/m² und die PV-Produktionssumme in den Einheiten kWh/kWp angegeben.

2.7 Dateinamen

Die Datensätze sind nach der folgenden Konvention benannt:

VARIABLENNAME_Ausrichtung**AZIMUT**_Neigung**NEIGUNG**_AGGREGATION.tiff

In Tabelle 1 sind die möglichen Werte der **PLATZHALTER** aufgelistet.

Tabelle 1: Werte der Platzhalter für die Namensgebung

Platzhalter	Wert
VARIABLENNAME	Globalstrahlung, PVProduktion
AZIMUT	0
NEIGUNG	0, 30, 75, 90
AGGREGATION	Jahressumme, Monatssumme[01..12], Wintersumme

2.8 Kartenbeispiele

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 8, Abbildung 11, Abbildung 10, Abbildung 9) sind exemplarisch die Jahressummen der solaren Einstrahlung für die vier berechneten Neigungen abgebildet.

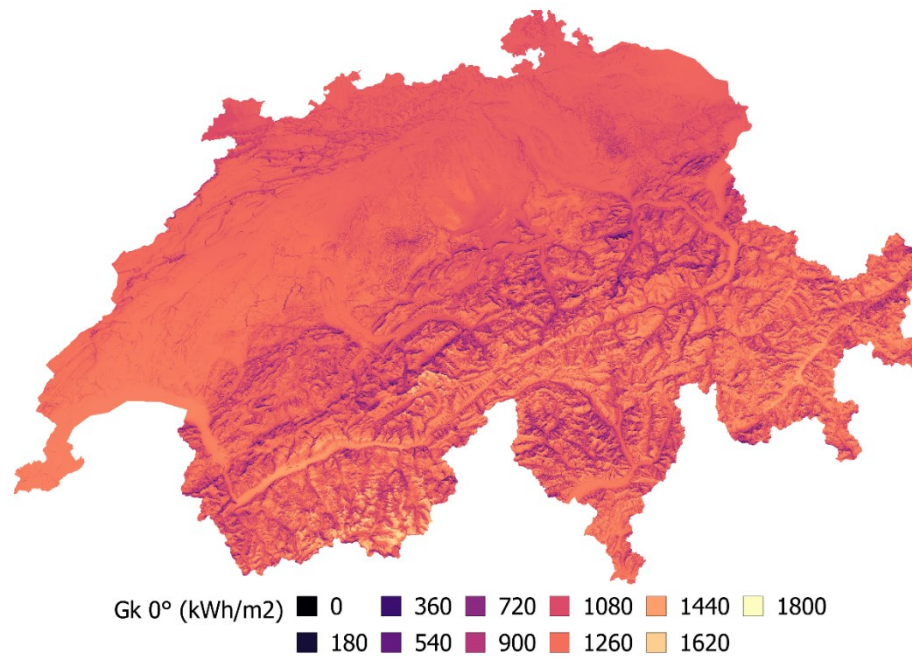


Abbildung 8: Jahressumme der solaren Einstrahlung auf einer horizontalen Fläche (Globalstrahlung).

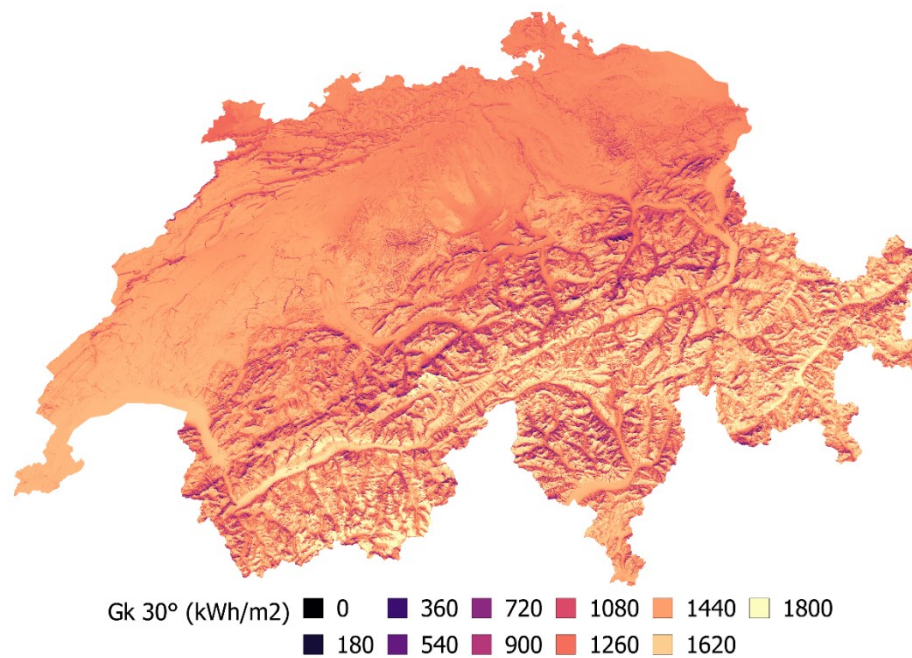


Abbildung 9: Jahressumme der solaren Einstrahlung auf einer Fläche mit 30° Neigung.

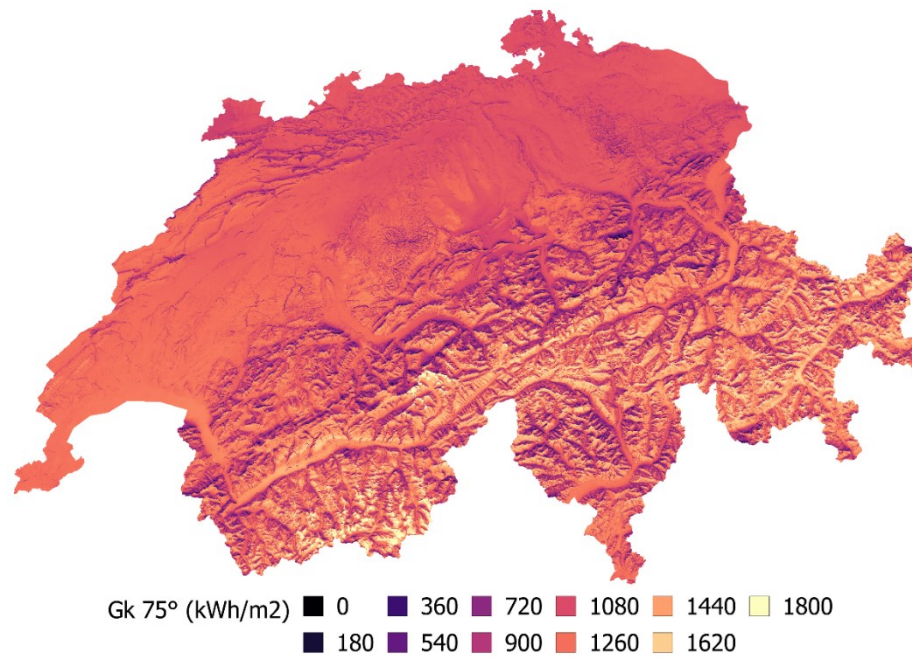


Abbildung 10: Jahressumme der solaren Einstrahlung auf einer Fläche mit 75° Neigung.

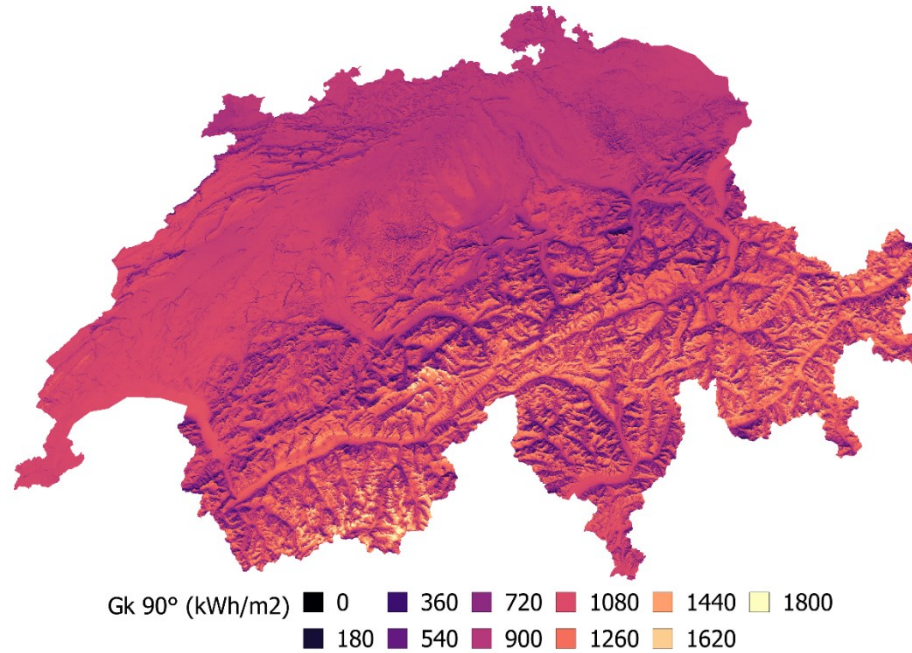


Abbildung 11: Jahressumme der solaren Einstrahlung auf einer Fläche mit 90° Neigung.