



Ein Joint Venture der
XSTATIK **REECH** **INFRA**
Renewable Energy Solutions DIGITAL

Alpine Photovoltaik

Freifläche und Infrastruktur.
Erfahrungsbericht.

Nationale PV-Tagung 2025, Bern

Andreas Hügli, Tamàs Szacsvay, REECH AG / ZENDRA AG
Juergen Sutterlueti, Gantner Instruments

02. April 2025



Tätigkeitsgebiete REECH



Produktentwicklung Montagesysteme



Produktentwicklung Winterstromlösungen

Alpine Freiflächen-PV

ZENDRA



Systemlösung für alpine Freiflächenanlagen ALPIN QUATTRO®

PV Fachplanung & Fachbauleitung



Konzeption & Fachplanung von photovoltaischen Energiesystemen

Alpine Infrastruktur-PV



Alpine PV-Anlagen an Staumauern und Strasseninfrastrukturen

R&D, Qualifikation und Moduldesign



PV Testcenter REECH AG: Qualifikation, QS & Schadensanalysen

Expertisen und Optimierung



Expertisen, Gutachten und Optimierung von Bestandesanlagen

Systemlösung für alpine Freiflächenanlagen

Business Ökosystem – Erfahrungen bündeln, gemeinsam Pionierarbeit leisten



ZENDRA

Ein Joint Venture der

XSTATIK

REECH

INFRADIGITAL

Spezialtiefbau,
Naturgefahren,
alpines Bauen

Photovoltaik,
Systemtechnik,
PV-Modultechnik

Geoinformatik,
digitales Bauen

Bündner Partner, Konsortium seit 2022, Gründung ZENDRA 2024

Systemlösung

Softwarelösung

Solarfeldplanung

Joint Development im Bereich
Messtechnik und Monitoring

+

Gantner
instruments

ZENDRA

4

Projekte PV an Staumauern

Wasserseite



Update Betriebsdaten Albigna Solar

Update Jahresbericht 2024

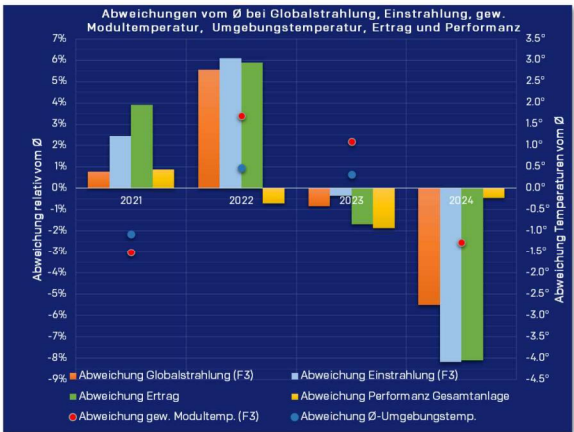
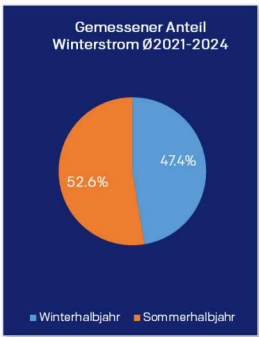
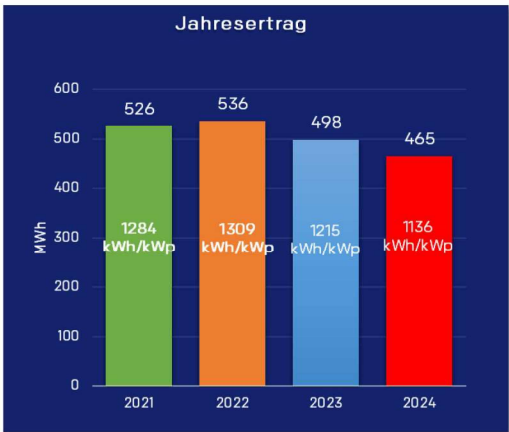
IBN September 2020
1'280 monofaziale G/G-Module in 5 Feldern
410 kWp
BFE-finanziertes Messprojekt



Schweizer Photovoltaik-Tagung 2025

Update Betriebsdaten Albigna Solar

Staudam PVA mit monofazialen Modulen, 2021 bis 2024



- ✓ Winterstromanteil sehr hoch; Ø spezifischer Winterstromertrag 585 kWh/kWp
- ✓ Störungsfreier Betrieb, nach anfänglichen Problemen mit Strangsicherungen
- ✓ Keine Auffälligkeiten an Modulen (Drohnen-thermografie, Labormessungen IV, EL)

Aktueller Bericht (2024) <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=72914&Load=true>

Projekte alpine Freifläche

Letzter Test und Designanpassung vor Serie & Baustart 2025

Start Ausführung 2025



Entwicklungsgeschichte und Fokusthemen

Konzeption, Logistik, Vormontage, Montage, Umweltthemen, Betriebserfahrung, Monitoring, Teambuilding



Sedrun Solar Testanlage G1, 03/2023

Neue Generation, Logistik, Montage, Verschattungseffekte, Monitoring, Wartungsthemen, Alpinmodul, Beweidung



Testanlage Tschers, ewz, G2, 11/2023

Digitales Bauen, Baulogistik, Vormontage, Bohren, Montage, Toleranzen, Monitoring Schneeverfrachtung, Einstrahlungssituation grösseres Tischfeld




Sedrun Solar, erste 20 Tische, G4, 11/2024


Neue Generation, Logistik, Montage, Wartungsthemen, Arbeitssicherheit, Beweidung



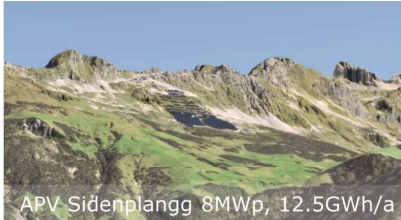
ZENDRA Testanlage Plantahof G3, 07/2024



Sedrun Solar 19.3MWp, 29GWh/a



Madrisa Solar 11MWp, 17GWh/a



APV Sidenplangg 8MWp, 12.5GWh/a

Bau und Betrieb

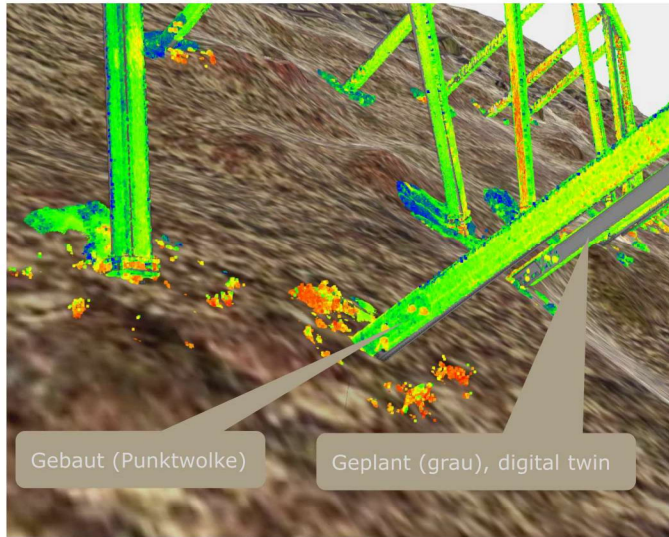




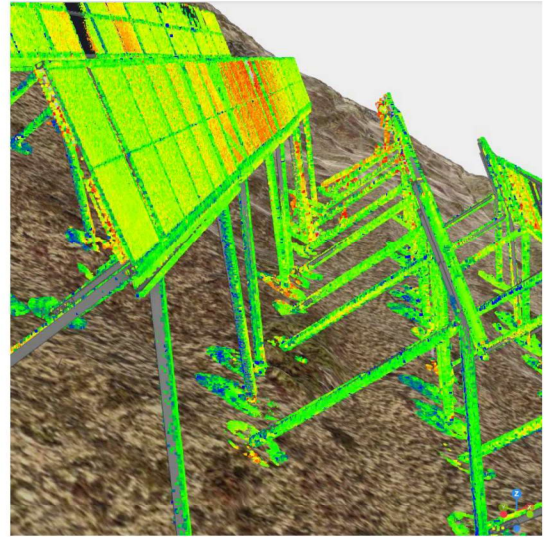


Toleranzen Ankerpositionen

Fokus Einhaltung der Verschattungswinkel



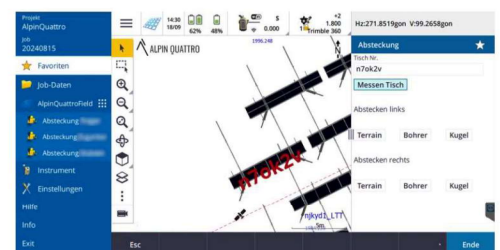
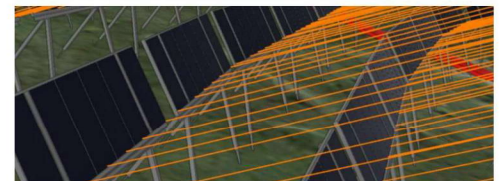
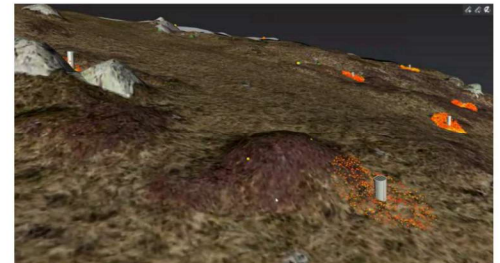
Bau erstes Modulfeld der Sedrun Solar AG mit 20 Tischen des Typs ALPIN QUATTRO ® (Quelle: Sedrun Solar, ZENDRA, CRESTAGEO)



Toleranzen Ankerpositionen

Fokus Einhaltung der Verschattungswinkel

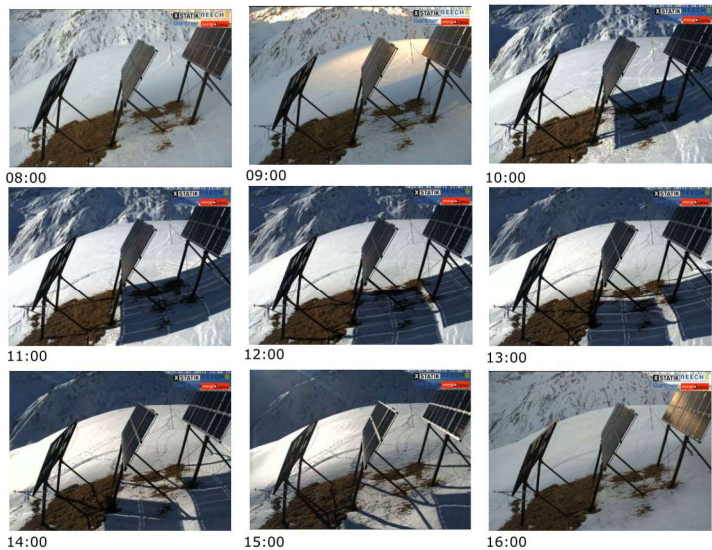
- Genauigkeit der Ankerpositionen (XYZ) ist zentral für die Vermeidung der Eigenverschattung (Einhaltung des Verschattungswinkels)
- Lagekorrektur der Reihen kaum möglich
- Digitales Geländemodell (DGM): inhomogene Genauigkeit aufgrund beschränkter Vegetationsdurchdringung des LiDAR-Verfahrens
- Für effiziente Bau- und Montageprozesse ist die Kenntnis über die (lokale) Differenz des digitalen Geländemodells zur realen Topographie wichtig
- Einmessen und Kontrolle der Ankerposition mit ALPIN QUATTRO ® Field App, Rückmeldung Einstellmasse über Rechenmodell



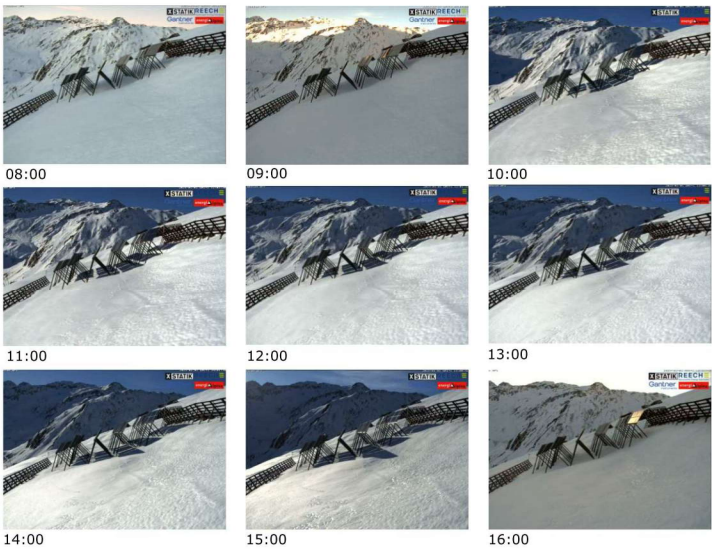


Betrieb: Vergleich Tischfeldgrößen

Sonniger Tag, 1. Januar 2025 (Winter)



Tageszeitraffer kleines Tischfeld
Testanlage SedrunSolar

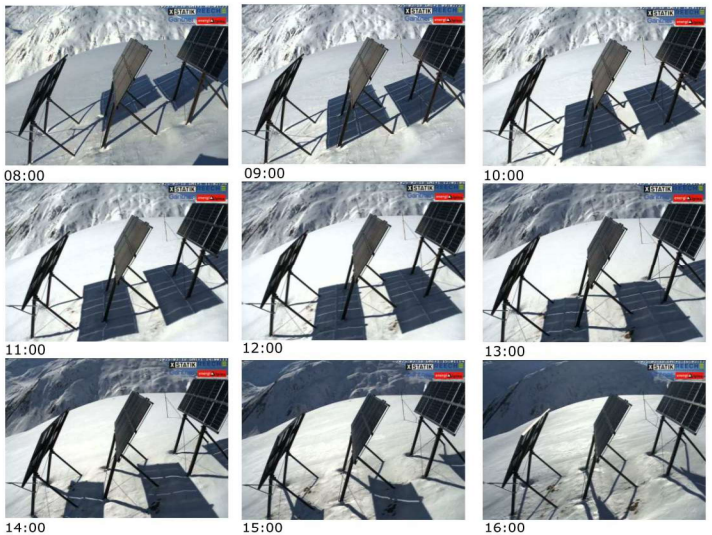


Tageszeitraffer grösseres Tischfeld (20 Tische)
SedrunSolar erste 20 Tische

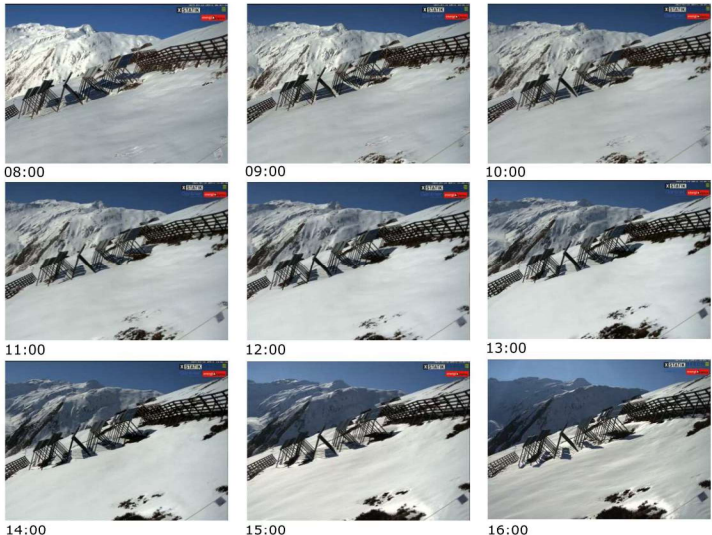


Betrieb: Vergleich Tischfeldgrößen

Sonniger Tag, 18. März 2025 („frühes“ Frühjahr)

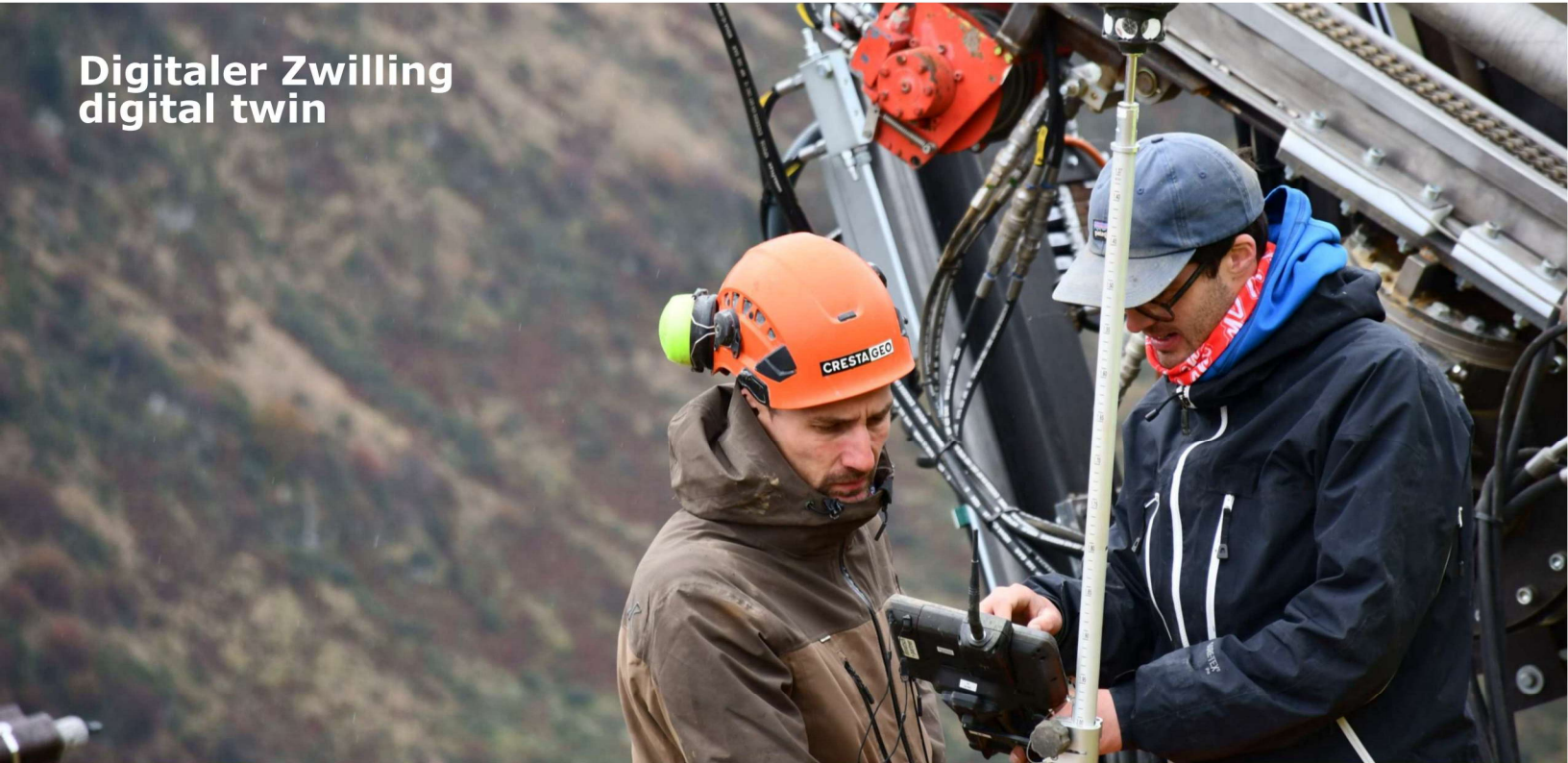


Tageszeitraffer kleines Tischfeld
Testanlage SedrunSolar



Tageszeitraffer grösseres Tischfeld (20 Tische)
SedrunSolar erste 20 Tische

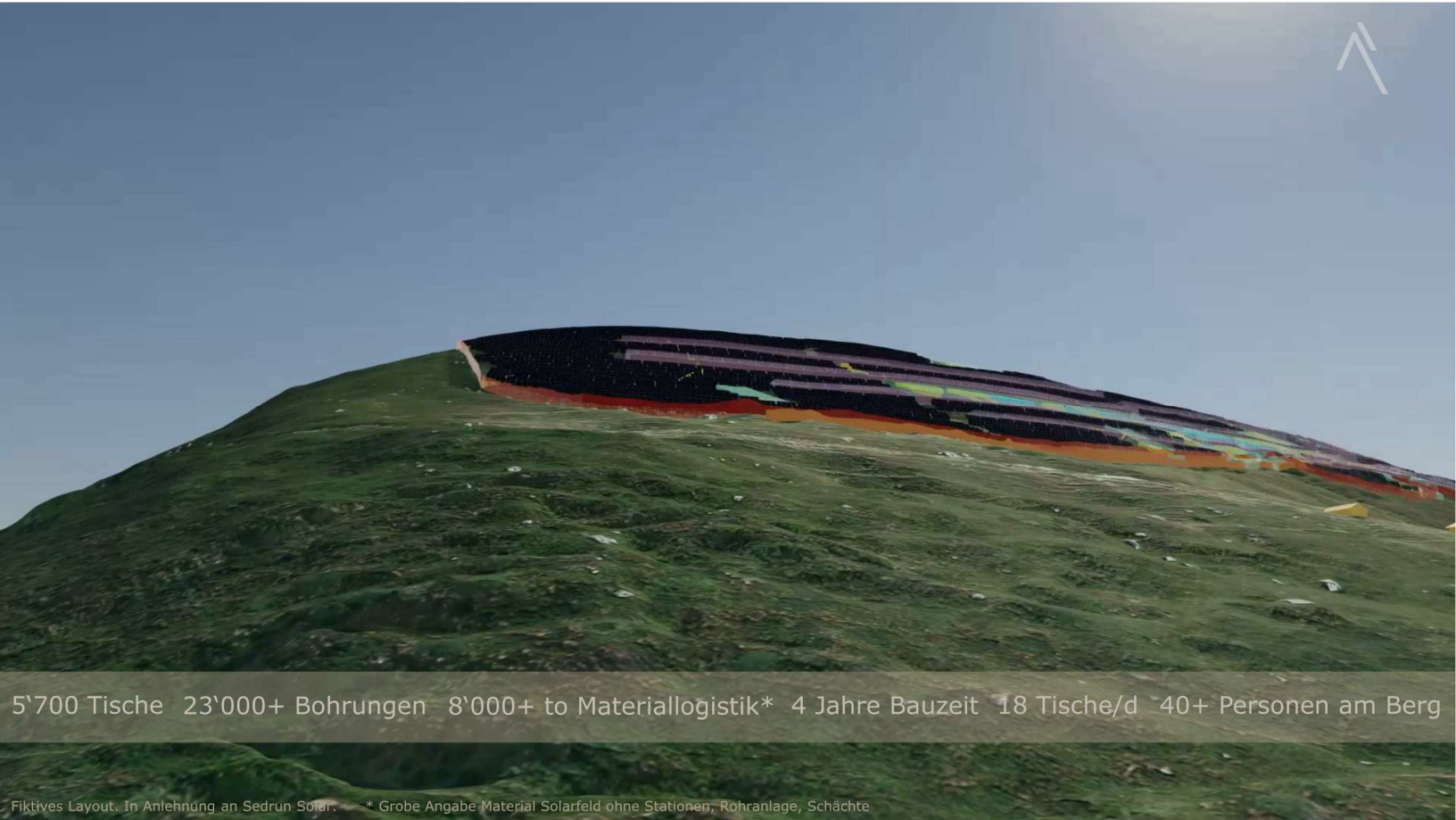
Digitaler Zwilling
digital twin



Schweizer Photovoltaik-Tagung 2025

ZENDRA

16



5'700 Tische 23'000+ Bohrungen 8'000+ to Materiallogistik* 4 Jahre Bauzeit 18 Tische/d 40+ Personen am Berg

Fiktives Layout. In Anlehnung an Sedrun Solar. * Grobe Angabe Material Solarfeld ohne Stationen, Rohranlage, Schächte

Herausforderungen alpine Solaranlagen

Als Teil des Programms «Solarexpress»



Alpine Gegebenheiten:



komplexes Gelände



**grosse Umwelt-
einwirkungen**



kurze Bauzeiten



grosse Stückzahlen

dies verlangt nach:



**auf die Position im Gelände
optimierte Tischkonfiguration**
Algorithmus, der Ertrag und Baukosten von
mehreren tausend Tischen automatisiert optimiert



**genauer Vorplanung und
effiziente Baustellenprozesse**
Vermeidung von Verzögerungen während den
Baumonaten im Gelände



datengestützten Betrieb
Ermöglichung effizienter Wartungseinsätze
und Optimierung des Ertrags



digital twin. Eine Datenquelle.

Datenlandschaft AQ digital twin

Planung – Bau - Betrieb



- AR-unterstützte Begehungen
- Visualisierungen

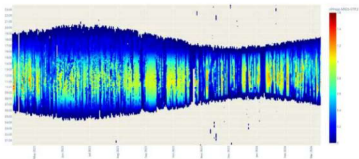
- Koordination Planer & Spezialisten
- Qualitätssicherung, Früherkennung von Fehlern



Abstecken, Überprüfen (Bau)



Grundlage für PV-Simulation
und Ertragsprognosen



digital twin
ALPIN QUATTRO ®
Eine Datenquelle



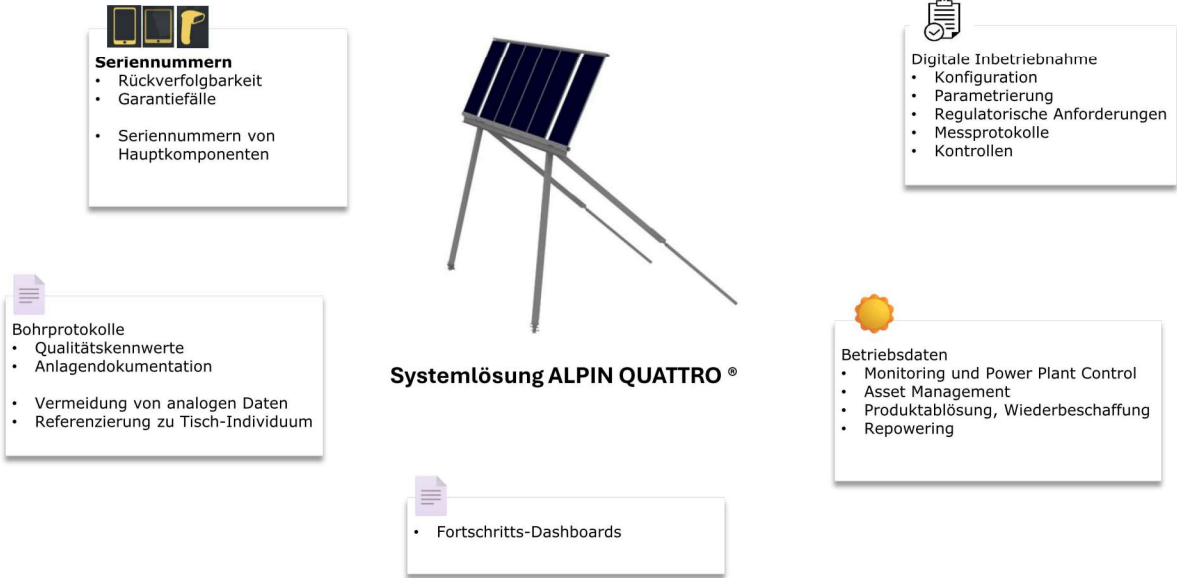
IBN



- Reports
- Materialauszüge
- Konfigurationslisten



Datenrückfluss AQ digital twin



Evaluation Bewirtschaftung und Doppelnutzung Testanlage Tschers, Surses und Testanlage Plantahof, Landquart



Testanlage Tschers, Surses: Beweidung am 02.07.2024 (Quelle: ewz, X STATIK, REECH, ZENDRA)



Beobachtungen Beweidung Sommer 2024
Landwirtschaftliche Schule Plantahof, Landquart (09/2024)



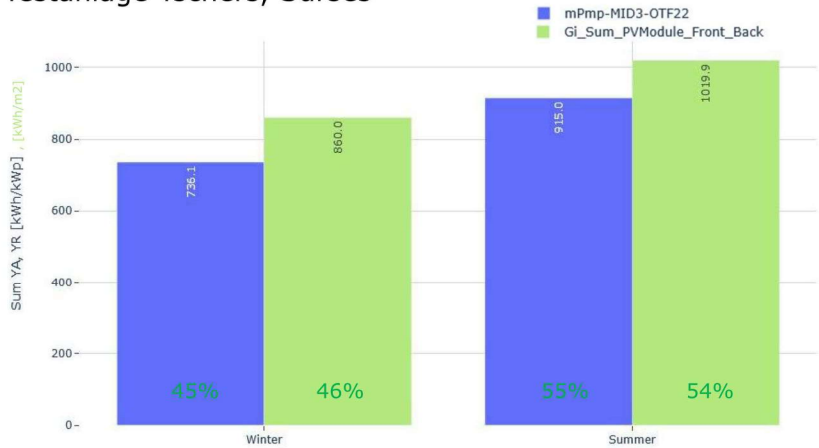
Sensorik Testanlagen

Hinweis: alle in dieser Präsentation dargestellten normierten Resultate beziehen sich auf die Nennleistungsangabe des Modulherstellers (Name Plate, Datenblatt)

- Windrichtung und -geschwindigkeit (Ultraschall)
- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Niederschlag (Radar)
- Einstrahlung in Modulebene (c-Si Referenzzellen), auf Vorder- und Rückseite
- Albedomessung (Gh, Gr: Pyranometer)
- Modultemperatur (Vorder- und Rückseite)
- Minütlicher, synchronisierter IV-Scan
- Autarke Stromversorgung
- Messintervall 1min, 1Hz, 10Hz

Saisonaler Vergleich Jahr 2024

Testanlage Tschers, Surses



Bezugsperiode 01/2024 bis 12/2024, Filter: Gh > 0W/m2

Standort 1 (46.556144, 9.535712):
Testanlage Tschers (Surses) der ewz
Azimut 0°S, Modulneigung 65°, Verschattungswinkel 15°, 2'130m.ü.M.

(Quelle: ewz, ZENDRA, Gantner Instruments)

YA: Array Yield, gemessen am PV-Modul (Earray)
Jahr gesamt: 1'651 kWh/kWp (bezogen auf P_{nenn} 560 Wp)

PVSyst 7.4 Simulation (Earray) liegt bei rund 1'660kWh/kWp (Wetter: Mehrjahresmittel)

Kumulierte Einstrahlung Vorder- und Rückseite (c-Si Referenzzelle)
Jahr gesamt: 1'879 kWh/m2



Messplatz mit Solitec SOLID Alpin Prototyp 560Wp (seit 11/2023)

Einfluss Rückseitenverschattung

minütlicher IV-Scan, April 2024 bis März 2025



MID3: 1'649kWh/kWp
MID5 (verschattet): 1'569kWh/kWp
Verschattungseffekt -4.9% am Modul

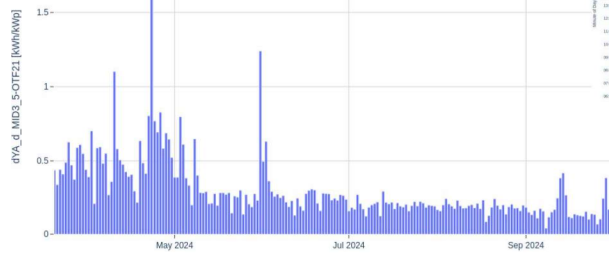
unverschattetes DUT „MID3“

teilverschattetes DUT „MID 5“,
Simulation Träger, Distanz 12cm



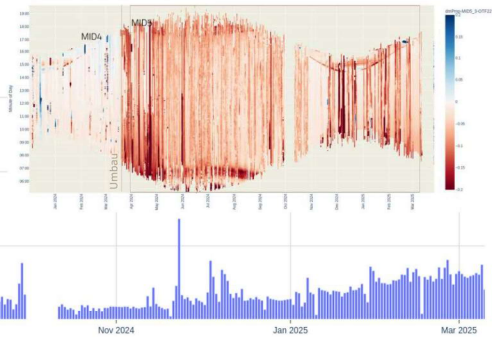
Verschattungskulisse auf Modulrückseite, Testanlage Tschers (144HC Alpin, Portrait) Azimut 0° S, Neigung: 65° (OTF22) Quelle: ewz, ZENDRA, Gantner Instruments

YA (Array-Yield) der Modulpositionen MID3 und MID5 (April-Dezember)



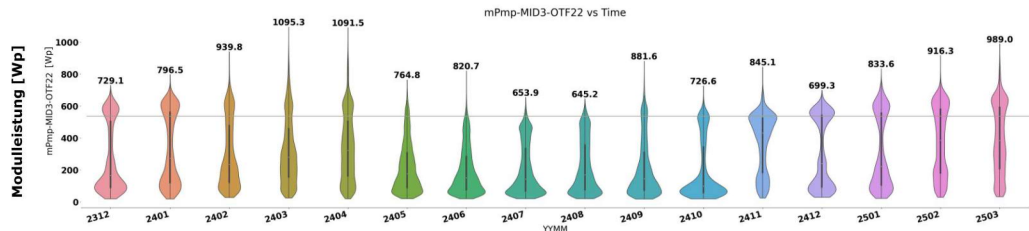
Differenz YA (Array-Yield) zwischen Ertrag MID3 und MID5

Differenz MID5-MID3



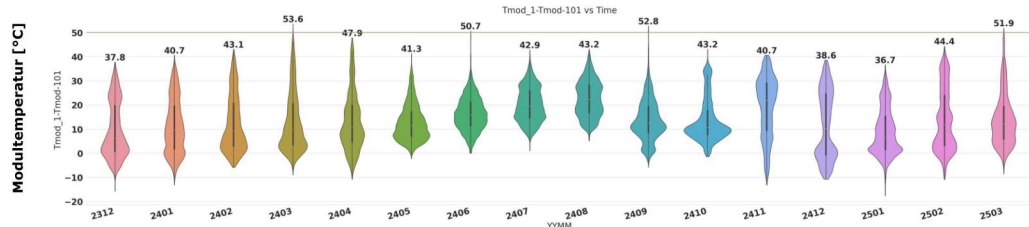
Modulleistungs- und Modultemperaturverteilung

im Jahresverlauf, Dezember 23 bis März 25



P_{norm_STC} 560Wp

Leistungsmessung nach Monat an Prototyp Alpinmodul 144HC, Solitek SOLID Alpin 560Wp Testanlage Tschers (Surses) der ewz: Azimut 0°S, Modulneigung 65°, Filter Gh > 50W/m2



50°

Mittels Pt100 gemessene Modultemperatur auf Modulvorderseite nach Monat, Testanlage Tschers (Surses) der ewz: Azimut 0°S, Modulneigung 65° (Quelle: ewz, ZENDRA, Gantner Instruments)

Notwendigkeit für alpinkaugliche Moduldesigns

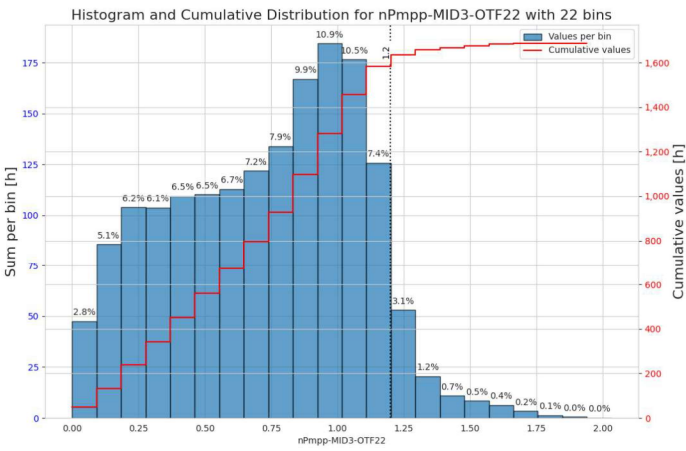
Tiefe Modultemperaturen minimieren das Risiko für gewisse Degradationsmechanismen (z.B. LeTID)

Forschung?



Abschätzung Abregelungsverluste (Clipping)

Standort Testanlage Tschers, Surses



Bezugsperiode 2024, Filter: Gh > 0W/m2, normalisierte Leistung (Name Plate)

Standort 1 (46.556144, 9.535712):
Testanlage Tschers (Surses) der ewz
Azimut 0°S, Modulneigung 65°, Verschattungswinkel 15°, 2'130m.ü.M.

(Quelle: ewz, ZENDRA, Gantner Instruments)

DC.Limit	rel_loss_dc_limit_mPmp-MID3-OTF22
0	100.0 %
1	77.7 %
2	61.0 %
3	47.8 %
4	36.9 %
5	27.8 %
6	20.2 %
7	13.9 %
8	8.8 %
9	4.9 %
10	2.3 %
11	1.0 %
12	0.4 %
13	0.2 %
14	0.1 %
15	0.0 %
16	0.0 %
17	0.0 %

Verlust im Jahresertrag nach AC/DC-Verhältnis

Period	DC.Limit	rel_loss_dc_limit_mPmp-MID3-OTF22
2023-12	1.000000	2.40%
2024-01	1.000000	4.10%
2024-02	1.000000	4.20%
2024-03	1.000000	5.30%
2024-04	1.000000	5.30%
2024-05	1.000000	0.70%
2024-06	1.000000	0.30%
2024-07	1.000000	0.10%
2024-08	1.000000	0.10%
2024-09	1.000000	1.60%
2024-10	1.000000	0.90%
2024-11	1.000000	1.00%
2024-12	1.000000	1.30%
2025-01	1.000000	4.40%
2025-02	1.000000	5.20%
2025-03	1.000000	6.50%

Nach Monat bei Faktor 1.0

Period	DC.Limit	rel_loss_dc_limit_mPmp-MID3-OTF22
2023-12	1.200000	0.00%
2024-01	1.200000	0.10%
2024-02	1.200000	0.50%
2024-03	1.200000	1.60%
2024-04	1.200000	1.50%
2024-05	1.200000	0.00%
2024-06	1.200000	0.00%
2024-07	1.200000	0.00%
2024-08	1.200000	0.00%
2024-09	1.200000	0.20%
2024-10	1.200000	0.10%
2024-11	1.200000	0.10%
2024-12	1.200000	0.00%
2025-01	1.200000	0.20%
2025-02	1.200000	0.30%
2025-03	1.200000	1.10%

Nach Monat bei Faktor 1.2

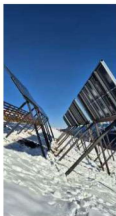


Online Performance- und Degradationsanalysen

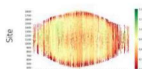
Monitoring Systeme für den Betrieb von alpinen Freiflächenanlagen

Performance Analyse

auf Ebene WR und Standort mittels MPM



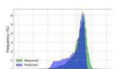
PRdc



Delta PRdc



PRdc (Meas, pred)



Delta PRdc

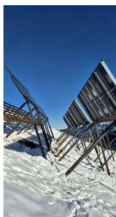


- MPM Analyse für alpine PV
- Effizientere O&M
- Schnelles Feedback
- Minimale Aufwendungen in Betriebsführung

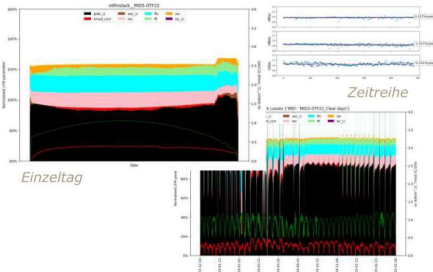
MPM: Online Soll vs. Ist Vergleich auf Basis eines «Mechanistic Performance»-Modells. Berechnung mit Einstrahlung, Modultemperatur und Windgeschwindigkeit. **Auch wichtig für standortbezogene day-ahead Ertragsprognosen.**

Degradationsüberwachung

auf Modulebene, mittels LFM (Loss Factor Model)



Minütliche IV-Kennlinienmessung auf Einzelmodulen (z.B. nach Typ, Lieferant, Lieferlos). Messtechnik analog Testanlagen.



Filterung nach Wetter-Typen. Darstellung Langzeitverhalten einzelner Modulparameter in Stack Charts.

- Ziel: Reduktion des Aufwandes für aufwändige Offline-Messungen in Labors
- Degradationsanalysen brauchen Zeitreihen
- Grundlage für allfällige Fehleranalysen

Fazit

Keine alpinen Solaranlagen ohne (sehr viel) Innovation

Durchgängige, datenbasierte Prozesse für «Planung - Bau – Betrieb»

Sicherstellung der Positioniergenauigkeit der Tische ist zentral zur Einhaltung des Verschattungswinkels

Testanlagen und Staudammanlagen liefern wertvolle Betriebserfahrung bis die Grossanlagen Daten liefern

Starke Teams und gute, lösungsorientierte Zusammenarbeit

... ein spannender Sommer steht bevor

Quelle: Sedrun Solar

Schweizer Photovoltaik-Tagung 2025

ZENDRA

28

ZENDRA

Ein Joint Venture der X STATIK, REECH und InfraDigital
Mit der Systemlösung ALPIN QUATTRO®

www.zendra.ch

Alpine Freiflächen-Photovoltaik

Gemeinsam Pionierarbeit leisten

Erfahrungen austauschen

Methoden und Prozesse weiterentwickeln

Arbeitsplätze und Wertschöpfung schaffen



Kontaktiere uns
Andreas Hügli
ahuegli@zendra.ch

ZENDRA