

April 2025

# Leitfaden zu PV-Kraftwerken in den Alpen



Abbildung 1: Testanlage Tschers, Nandro-Solar, Abbildung von ewz, ZENDRA AG (November 2023)

**Autoren**

Frederik Gort, Swissolar  
Peter Toggweiler, Basler & Hofmann AG  
Peter Schwer, Basler & Hofmann AG  
Tamás Szacsuvay, REECH AG  
Andreas Hügli, REECH AG  
Jean Cattin, Planair SA

**Mit Beiträgen von**

Michael Lehning, Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Jürg Rohrer, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW  
Renata Trajkova, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW  
Christof Bucher, Berner Fachhochschule BFH  
Matthias Hügi, Berner Fachhochschule BFH  
Roman Polo, Green Energy Venture AG  
Ruedi Kriesi, IG Solalpine

Dieser Leitfaden wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

<b>Ausgabedatum</b>		<b>Änderungsbeschreibung</b>
April 2025	1.0	

**Disclaimer**

Dieser Leitfaden soll Projektplanerinnen und -entwicklern, Investorinnen sowie Vertretern der Behörden und weiteren Interessierten als Hilfe bei der Planung und Umsetzung von alpinen PV-Anlagen dienen. Massgeblich sind jedoch in jedem Fall die geltenden Gesetze und Verordnungen. Dieser Leitfaden ist nicht rechtsverbindlich und bindet die Behörden nicht.

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>1. Projektorganisation</b>	<b>6</b>
<b>2. Anspruchsgruppen</b>	<b>7</b>
2.1 Grundeigentümer:innen, Pächter:innen und Nutzer:innen	8
2.2 Ortsansässige Bevölkerung	8
2.3 Behörden und Verwaltung	9
2.3.1 Kommunale Behörden	9
2.3.2 Kantonale Behörden	9
2.3.3 Bundesämter und Bundesbehörden	10
2.4 Schutzorganisationen	10
2.5 Relevante Fachorganisationen	10
<b>3. Politische Rahmenbedingungen</b>	<b>11</b>
3.1 Rahmenbedingungen für Anlagen nach Art. 71a EnG	11
3.2 Zukünftige Rahmenbedingungen für alpine PV-Anlagen	13
<b>4. Standortbestimmungen</b>	<b>14</b>
4.1 Technische Parameter	15
4.1.1 Geologie, Topologie, Topografie	15
4.1.2 Naturgefahren	15
4.1.3 Mögliche Massnahmen gegen Naturgefahren	17
4.1.4 Statische Lasten	18
4.1.5 Windlasten	18
4.1.6 Infrastruktur Zufahrt und Netzanschluss	19
4.2 Parameter zu Natur-, Umwelt- und Landschaftsschutz	21
4.2.1 Sichtbarkeit, Raumwirkung	21
4.2.2 Reflexion und Blendung durch PV-Module	23
4.2.3 Standortbedingungen bezüglich Flora und Fauna	24
<b>5. Planung und Bau der PV-Anlage</b>	<b>25</b>
5.1 Geeignete Materialien	25
5.2 Ungehinderte bifaziale Nutzung	26
5.3 Empfehlung zu Neigung und Ausrichtung	26
5.4 Zweckmässiger Reihenabstand	26
5.5 Abstand zum Boden	28
5.6 Auslegungsverhältnis Wechselrichter	28
5.7 Kabelführung	32
5.8 Personen, Tiere und bestehende Nutzungen	32

5.9 Blitzschutz, Erdung	33
5.10 Vor- und Nachteile verschiedener Foundationstypen	34
5.11 Montagestrukturen	36
5.12 Anwendbare Normen und Richtlinien	41
5.12.1 Bauwesen	42
5.12.2 Elektrizität	42
5.13 Öffentliches Beschaffungswesen	42
<b>6. Umweltrelevante Themen</b>	<b>43</b>
6.1 Flora und Fauna	43
6.2 Checkliste umweltrelevante Themen	44
6.3 Begehungen vor Ort	46
6.4 Monitoring der Umweltfolgen	46
<b>7. Betrieb</b>	<b>47</b>
7.1 Betriebskosten	47
7.2 Zugangsbedarf, Arbeitssicherheit	47
7.3 Monitoring	48
7.4 Repowering	48
<b>8. Rückbau</b>	<b>49</b>
8.1 Berücksichtigung in der Planungs- und Bauphase	49
8.2 Vollständiger Rückbau	49
8.3 Co-Nutzungen	50
8.4 Ermittlung der Rückbaukosten	50
8.5 Umweltauswirkungen des Rückbaus	51
<b>9. Wirtschaftlichkeit und Beteiligungsmodelle</b>	<b>53</b>
9.1 Typische Kostenelemente	53
9.2 Beispiel einer Kostenverteilung	54
9.3 Beteiligungsmodelle	55
<b>10. Weiterführende Informationen</b>	<b>58</b>
10.1 Alpine PV competence	58
10.2 IG Solalpine	58
<b>11. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>12. Quellenverzeichnis</b>	<b>61</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BAB	Bauen ausserhalb Bauzonen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BR	Bundesrat
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EIV	Einmalvergütung
EN	Europäische Normen (CEN und CENELEC)
EnV	Energieverordnung
EnFV	Energieförderungsverordnung
ESTI	Eidgenössisches Starkstrominspektorat
GR	Graubünden
GIS	Geoinformationssystem
ha	Hektar
IEC	International Electrotechnical Commission
Kt	Kanton
UVB	Umweltverträglichkeitsbericht
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlage
NIN	Niederspannungs-Installationsnorm
NGO	Non-Governmental Organization (deutsch: Nichtregierungsorganisation)
NHG	Natur- und Heimatschutzgesetzes
NLV	Nennleistungsverhältnis
NREL	National Renewable Energy Laboratory (U.S. Department of Energy)
SCNAT	Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
slfp	Stiftung Landschaftsschutz Schweiz
SN	Schweizer Norm
SNG	Schweizer Guidelines
SNR	Schweizer normative Regel
STC	Standard Test Conditions
UBP	Umweltbelastungspunkte
USG	Umweltschutzgesetz
VSE	Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

# Einleitung

In den Weiten des Schweizer Mittellands entfaltet die Photovoltaik im Sommer ihre Strahlkraft, doch die Herausforderung besteht darin, auch während der kalten Jahreszeit den Energiebedarf decken zu können. Neben der Windenergie präsentiert sich die solare Energie aus alpinen Regionen als eine geeignete Alternative, um sich dieser Herausforderung zu stellen.

Der vorliegende Leitfaden führt durch die noch junge Welt der alpinen Freiflächen-Photovoltaikanlagen, um die Chancen und Herausforderungen dieser vielversprechenden Energiequelle zu beleuchten. Dabei zielt das Dokument darauf ab, die wesentlichen Themen im Zusammenhang mit dem Bau von alpinen PV-Anlagen aufzuzeigen. Das übergeordnete Ziel besteht darin, einen umfassenden, technisch fokussierten Leitfaden zu schaffen, der Planerinnen, Investoren, Bewilligungsbehörden und weiteren Entscheidungsträgern einen Überblick über die Herausforderungen verschafft und als Unterstützung bei der Konzeption solcher alpinen PV-Anlagen dient.

Informationen, die sich dabei nur auf Anlagen im Rahmen der dringlichen Massnahmen zur kurzfristigen Bereitstellung einer sicheren Stromversorgung im Winter (Art. 71a EnG) beziehen, werden jeweils in einem roten Kasten dargestellt. Alle anderen Angaben gelten für alpine Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Allgemeinen. Im Zusammenhang mit Art. 71a wird es voraussichtlich ab dem 1.1.2026 noch zu Anpassungen kommen. Es wird davon ausgegangen, dass die 10% Einspeiseregulierung bis Ende 2025 als Bedingung für die privilegierte Förderung gestrichen wird und das auch notwendige Netzverstärkungen von den bewilligungstechnischen Privilegien von Art. 71a profitieren können.

Dieser Leitfaden wurde von Fachexperten auf der Grundlage von bisherigen Erfahrungen und den Erkenntnissen von Fachveranstaltungen zu alpinen PV-Anlagen zusammengetragen. Weiter konnte durch Swissolar ein weitverzweigtes Netzwerk mit Know-how und Erfahrungen genutzt werden, und ergänzend wurde mit dem Forschungsteam von SWEET EDGE zusammengearbeitet. Durch den Leitfaden soll sichergestellt werden, dass zukünftig sämtliche Herausforderungen eines derartigen Projekts bei Entscheidungsprozessen berücksichtigt und von Beginn an in die Projektentwicklung integriert werden. Dies ermöglicht es, qualitativ hochwertige Projekte mit einer hohen Akzeptanz seitens der Bevölkerung zu realisieren.

Im Leitfaden werden auch Themen rund um die Umweltverträglichkeit von alpinen PV-Anlagen angeschnitten. Der Leitfaden soll jedoch nicht als Pflichtenheft für die Erstellung eines Umweltverträglichkeitsberichts (UVB) interpretiert werden. Zur Erstellung eines UVB kann das UVP-Handbuch (BAFU, 2009) des Bundes verwendet werden.

## 1. Projektorganisation

PV-Kraftwerke in den Alpen sind äusserst interdisziplinär und stellen hohe Anforderungen an die Rahmenbedingungen, etwa in Form von anspruchsvollem Gelände, extremem Wetter und vielfältigen Nutzungsanforderungen. Die Herausforderung besteht darin, Lösungen im Spannungsfeld zwischen Kostendruck, Stromertragsoptimierung, Robustheit und Umwelt-/Landschaftsschutz zu finden.

In der Projektentwicklungs- und Planungsphase müssen zahlreiche projektspezifische Entscheidungen getroffen werden, da verschiedene Anspruchsgruppen aufgrund der Projektgrösse einen hohen Informations- und Mitgestaltungsbedarf haben (siehe Kapitel 2 Anspruchsgruppen).

Bei einem Zusammenschluss mehrerer Projektparteien werden typischerweise Projektgesellschaften in der Form von einfachen Gesellschaften gegründet, deren strategische Steuerung ein Projektausschuss übernimmt.

Auch direkt von einzelnen juristischen Personen werden Projekte entwickelt. Unabhängig von der Form der Trägerschaft ist es empfehlenswert, dass die Gesamtprojektleitung von Vertreter:innen mit Entscheidungskompetenzen übernommen wird, um in der Planungsphase agil und effizient zu sein. In einer Projektorganisation sind typischerweise die in Tabelle 1 beschriebenen Rollen vertreten.

**Tabelle 1:**  
**Typische Rollenverteilung und Projektorganisation von alpinen PV-Anlagen**

<b>Rolle</b>	<b>Aufgabe</b>	<b>Team</b>
Gesamtprojektleitung	Überwachung und Organisation aller Phasen des Projekts, Budgetverantwortung, Stakeholdermanagement, Zeit- und Risikomanagement, Reporting etc.	Kernteam
Energiewirtschaft	Konsolidierte Kostenrechnung, Stromgestehungskosten nach Förderung, Portfoliobetrachtungen Stromproduktion und -kosten	Kernteam
Kommunikation	Kommunikation mit Anspruchsgruppen wie: Grundeigentümer, Stimmbürger Standortgemeinde, kommunale und kantonale Behörden, BFE, Umwelt- und Landschaftsschutzorganisationen, Alpengenossenschaften, Bergbahnbetriebe, Medien etc.	Kernteam
Projektleitung Technik	Übernimmt die Koordination der technischen Fachbereiche, Konsolidierung Gesuche Bauen ausserhalb Bauzonen (BAB) und Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI), Kosten PVA und Erschliessung	Kernteam
Fachplanung Elektro Wechselstrom (AC)	Planung Trafostationen, Netzanschluss und Energieabführung, Blitzschutz (AC), ESTI-Gesuch	Kernteam
Fachplanung Solar	Die Fachplanung Solarfeld ist sehr interdisziplinär und wird aus einer Kombination von klassischen Fachplanungsexperten wie Photovoltaik, Baustatik und Baumethodik erbracht. Layoutentwicklung Solarfeld, Montagetechnik, PV-Module, Gleichstrom (DC)-Elektrik, Ertragssimulationen, Wartungs- und Rückbaukonzepte, Koordination mit anderen Fachplanern, Teilaspekte Logistik, alpines Bauen, Konzepte für Wartung, Repowering und Rückbau	Kernteam
Fachteam Verankerung und Statik	Auslegung Unterkonstruktion, Montagestruktur, Verankerung, allfällige Foundationen, Teilaspekte Logistik, alpines Bauen, Rückbaukonzepte	Kernteam
Fachplanung Schutzbauten	Planung allfälliger Schutzbauten (Steinschlag- und Lawinenschutz)	Kernteam
Fachplanung Bau	Bauliche Erschliessung, Unterkünfte, Montage- und Umschlagplätze, Grabenplanung im Solarfeldperimeter, Grabenplanung für die Energieableitung, Stationenbau, Teilaspekte Logistik, Rückbaukonzepte	Kernteam
Fachplanung Logistik	Logistikkonzept	Kernteam
Umweltbaubegleitung	Beratung zur Minimierung der Umweltauswirkungen, Überwachung und Begleitung der Bau- und ggf. Betriebsphase	Kernteam
Umweltfachbüro	Erarbeitung des Umweltverträglichkeitsberichts	Erweitertes Team und/oder externe Dienstleister
Spezialist:in Planungs- und Bewilligungsverfahren	Beratung im Zusammenhang mit den diversen Planungs- und Bewilligungsverfahren	Erweitertes Team und/oder externe Dienstleister
Geologie	Bodenbeschaffenheit und -eignung, Rutschungen, Auszugsversuche, Beurteilung Naturgefahren, Steinschlag und Massnahmen	Erweitertes Team und/oder externe Dienstleister
Naturgefahren, Schnee und Wind	Lawinengutachten, Schneegutachten, Windgutachten	Erweitertes Team und/oder externe Dienstleister
Landschafts-expertinnen/-experten	Beurteilung der Auswirkung auf und Integration in das Landschaftsbild	Erweitertes Team und/oder externe Dienstleister

## 2. Anspruchsgruppen

Verlassene Bergtäler, Schutthalden und abgelegene Bergabhänge scheinen auf den ersten Blick wie ungenutzte Gebiete, die problemlos für alpine PV-Anlagen genutzt werden könnten. Dies ist jedoch ein Irrtum! In der Schweiz gibt es praktisch kein Gebiet, das nicht bereits in irgendeiner Form genutzt wird oder unter Schutz steht. Daher ist es in der ersten Planungsphase von entscheidender Bedeutung, sorgfältig zu prüfen, welche Nutzungen und Schutzinteressen bereits im Projektgebiet vorhanden sind. Im Kontext alpiner PV-Anlagen können folgende Nutzungen und Schutzinteressen als nicht abschliessende Liste genannt werden:

**Tabelle 2:**  
**Nutzungs- und Schutzinteressen und ihre Bezugsthemen bei alpinen PV-Anlagen**

Nutzungs- und Schutzinteressen	Bezugsthemen
Alpwirtschaft	Bewirtschaftung, Flächenbeiträge, Vergütung, Einschränkungen während Bau- und Betriebszeit, Sicherheit der Tiere, Verbesserung der Erschliessung
Sommer- und Wintertourismus (Gastronomie)	Einschränkungen während Bau- und Betriebszeit, Benutzung der Seilbahnen oder sonstiger Infrastrukturen während Tourismuszeiten, Vermarktung, Lärm vs. Bergruhe, Sichtbarkeit und potenziell abschreckende Wirkung auf Gäste
Landschaftsschutz	Einfluss auf Landschaftsbild im Nah-, Mittel- und Fernbereich, Einbettung in Strukturen und Kontext, Blendeinwirkung auf Orte in der Umgebung
Natur- und Umweltschutz	Beeinflussung Flora und Fauna, Störung während der Bauzeit, Einfluss durch die Veränderung der Einstrahlung auf Bodenniveau, Einfluss auf nahegelegene Schutzgebiete (z.B. Zuströmbereiche, Verkehr, PV-Tourismus), Ausgleichsmassnahmen
Historische Verkehrswege	Beeinträchtigung IVS-Objekte
Militär	Einschränkungen während Bau- und Betriebszeit (z.B. Konflikt mit Schiessplatz), gemeinsame Nutzung von Technikgebäuden, Nutzung militärischer Infrastrukturen für die Erschliessung
Infrastrukturen (Quellen, Wasserfassungen, Leitungen, Erschliessungswege, Eisenbahnen)	Beeinträchtigung der bestehenden Infrastruktur (Wegezustand) durch Bau und Betrieb, gemeinsame Erschliessung, Einfluss durch gebohrte Verankerungen in der Nähe von Grundwasserschutzzonen (Verschmutzung), Streuströme
Netzbetreiber	Netzanschlusspunkt (NAP), Kosten, Schnittstellen, Projektierung und Bau der Anschlussleitung und ihrer Nebenanlagen bis zum NAP, allfällige Netzverstärkung

Die Nutzungen werden in der Regel von den entsprechenden Interessengruppen oder den Personen, die davon profitieren, vertreten. Es ist ratsam, die Nutzer:innen frühzeitig und effektiv in den Prozess einzubeziehen, um spätere Widerstände zu vermeiden. Kommunikation ist bei alpinen PV-Anlagen von ausserordentlicher Wichtigkeit. Der Einbezug von Interessengruppen erfolgt möglicherweise nicht unmittelbar zu Beginn der Projektkonzeption oder der Machbarkeitsprüfungen, da diese oft vertraulich durchgeführt werden. Dabei ist es sehr wichtig, dass auch Umweltbelange frühzeitig berücksichtigt werden.

Sobald die erste Machbarkeitsprüfung abgeschlossen ist, sollte das Projekt zügig den kommunalen und kantonalen Behörden und anderen relevanten Interessengruppen vorgestellt werden. Im Verlauf des gesamten Projektentwicklungszyklus werden, wie in Tabelle 2 dargestellt, nach und nach weitere Interessengruppen einbezogen.

Form, Umfang, Häufigkeit und Tiefgang der kommunizierten Information hängen von diversen Faktoren ab und erfordern Fingerspitzengefühl und Einfühlungsvermögen. Es ist wichtig, dass sich die Projektanten genau überlegen, welche Anspruchsgruppen in welcher Projektphase eingebunden werden sollen und ob sie aktiv mitgestalten können oder lediglich informiert werden. Da projektspezifische und lokale Gegebenheiten variieren, gibt es keine universelle Lösung im Umgang mit den Anspruchsgruppen. Um Vertrauen zu schaffen und die Glaubwürdigkeit des Projektträgers zu stärken, sollten bei der Information zum Projekt die folgenden Fragen beantwortet werden können:

- Wer ist die Trägerschaft während Planung, Bau und Betrieb?
- Welche Werte / Verbundenheit mit der Region weisen die Träger:innen auf?
- Wie kann das Projekt in einer realistischen Darstellung aussehen?
- Hier kann erwähnt werden, dass es v.a. in der frühen Phase einige Parameter gibt, die ändern können, z.B. Flächenausdehnung, Route Anschlussstrasse
- Wie werden Fragen und Bedürfnisse der Stakeholder aufgenommen und berücksichtigt?
- Welche Vor- und Nachteile ergeben sich für Nachbarinnen und Nachbarn, Gemeinde, Region?
- Wie verläuft das Verfahren, wo sind Mitgestaltungsmöglichkeiten?

Es gilt zu beachten, dass die Vergütung von Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern und Standortgemeinden oft sehr früh angesprochen wird, im frühen Entwicklungsstadium aber meist noch nicht schlüssig beantwortet werden kann. Nachfolgend sind Kommentare zu einigen der wichtigsten Anspruchsgruppen aufgeführt.

## 2.1 Grundeigentümer:innen, Pächter:innen und Nutzer:innen

Sowohl Grundeigentümer als auch Pächterinnen und oder Nutzer sind direkt von der Anlage betroffen. Eine frühzeitige Absprache ist daher elementar für das Gelingen eines Projekts. Es wird empfohlen, bereits frühzeitig eine schriftliche Vereinbarung zu treffen, um die Erwartungshaltung der jeweiligen Parteien einordnen zu können. Meistens wird dies in Form einer vertraglichen Vereinbarung über Rechte, Pflichten und allfällige Vergütungen festgehalten.

Werden PV-Anlagen auf fremdem Grund und Boden geplant und gebaut, sind die Eigentumsrechte und das Akzessionsprinzip zu beachten. Art. 667 ZGB besagt, dass das Eigentum von Grund und Boden auch die darauf stehenden Bauten und Anlagen umfasst, vorbehaltlich anderer gesetzlicher Bestimmungen. Für Standorte, an denen die PV-Grossanlage nicht auf eigenen Grundstücken gebaut wird, empfiehlt es sich, dies mittels im Grundbuch eingetragenen Dienstbarkeiten, oder noch besser einem Baurecht, zu sichern.

## 2.2 Ortsansässige Bevölkerung

Die ortsansässige Bevölkerung muss in einem erweiterten Kontext betrachtet werden. Nicht nur angrenzende Häuser, sondern auch die gesamte Region können von einer Anlage profitieren, sich beeinträchtigt fühlen oder Ansprüche geltend machen. Nebst der dauernd wohnhaften Bevölkerung können zudem weitere Anspruchsgruppen wie Ferienhausbesitzer:innen, Campingplätze, Veranstalter:innen von Kultur- und Tourismusaktivitäten oder Jagd- und Sportgemeinschaften betroffen sein.

Nachbargemeinden oder -Talschaften, die z.B. visuell betroffen sind oder deren Interessen durch die Anlage anderweitig tangiert werden (z.B. Zufahrten, Baulärm etc.) müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Im Allgemeinen geht es beim Einbezug der lokalen Bevölkerung vorwiegend um die Themen Kommunikation, Bedürfnisse, mögliche Vorbehalte und Bedingungen.

## 2.3 Behörden und Verwaltung

Diverse Behörden auf verschiedenen Ebenen werden am Verfahren einer alpinen PV-Anlage beteiligt sein. Aus diesem Grund können eine frühzeitige Information und allenfalls das Einholen einer unverbindlichen Stellungnahme während der Machbarkeitsprüfung oder der darauffolgenden Planung wertvoll sein. In Bezug auf die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist gemäss Art. 10b Abs. 3 Umweltschutzgesetz (USG) eine Voruntersuchung zur Vorbereitung des Umweltverträglichkeitsberichts (UVB) zwingend. Eine solche Voruntersuchung kann z.B. im Rahmen einer unverbindlichen Stellungnahme erfolgen.

### 2.3.1 Kommunale Behörden

Die kommunale Behörde bereitet das Geschäft «Zustimmung der Standortgemeinde» vor, dass vor dem Genehmigungsverfahren ablaufen muss. Sie ist für die politische Meinungsbildung in der Gemeinde verantwortlich und hat grossen Einfluss darauf. Die kommunalen Behörden sind meistens in Bezug auf die Abgabe des Baugesuchs, Stellungnahmen informeller Art, Meldeverfahren und die Durchführung des Baugesuchs zuständig. Es gibt jedoch kantonale Unterschiede betreffend die Zuständigkeiten, sodass keine generell gültigen Aussagen gemacht werden können.

Für Anlagen gestützt auf Art. 71a EnG wird die Bewilligung durch den Kanton erteilt.

Ortskenntnisse und Erfahrung der kommunalen Behörden, nicht zuletzt im Zusammenhang mit Akzeptanzfragen, können wertvolle Informationen zur frühzeitigen Einschätzung der Realisierungschancen und zur Verbesserung der Planung liefern. Auch wenn die Bearbeitung des UVB und des Baugesuches (PVA) danach bei kantonalen Stellen stattfinden wird, sollten die kommunalen Behörden insbesondere bei Projektanpassungen und bei der Kommunikation nicht vergessen gehen.

In einigen Kantonen, wie z.B. dem Kanton Bern, muss die Gemeinde immer für eine Stellungnahme (Amts- oder Fachbericht) eingeladen werden und ist damit Verfahrensbeteiligte. In vielen Bereichen ist die lokale Behörde indirekt auch die Interessensvertretung der Wohnbevölkerung.

### 2.3.2 Kantonale Behörden

Die Kantone und speziell ihre Behörden haben eine zentrale Rolle bei der Projektbeurteilung, respektive -bewilligungen einer alpinen PV-Anlage. Ihre Dienststellen beurteilen die für die Baubewilligung (PVA) und die Plangenehmigung (Anschlussleitung) erforderlichen Unterlagen sowie den Umweltverträglichkeitsbericht. Stand August 2024 haben zwei Kantone einen Leitfaden bzw. ein Merkblatt zum Thema alpine PV-Anlagen herausgegeben. Einerseits hat der Kanton Bern das [«Merkblatt Alpine Photovoltaik-Grossanlagen»](#) (AUE-BE, 2023) veröffentlicht, und andererseits hat Graubünden den [«Leitfaden Bewilligungsverfahren für Photovoltaik-Grossanlagen»](#) (ARE & AEV GR, 2023) publiziert.

In den Dokumenten werden die Abläufe und Anforderungen hinsichtlich des Bewilligungsverfahrens für PV-Grossanlagen nach Artikel 71a EnG erläutert. Da die Verfahren kantonal unterschiedlich geregelt sind, wird in diesem Leitfaden lediglich auf die entsprechenden Dokumente verwiesen.

### 2.3.3 Bundesämter und Bundesbehörden

Auch die nationalen Behörden sind im Thema Alpin-PV involviert, allen voran:

- Bundesamt für Energie BFE (Gesetzgebung, Förderung)
- Bundesamt für Umwelt BAFU (umweltrelevante Fragen)

Meist ist eine direkte Kommunikation mit diesen Dienststellen für den Projektplaner oder die Projektplanerin im Rahmen des Bewilligungsverfahrens nicht nötig. Bezüglich der Rahmenbedingungen oder übergeordneten Fragestellungen sind zum Beispiel Fachverbände wie Swissolar regelmässig im Kontakt mit den Bundesbehörden und können die Interessen der involvierten Fachleute an geeigneter Stelle einbringen.

Das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) ist für die Bewilligungen des Aus- oder Neubaus von elektrischen Anlagen für den Netzanschluss, wie beispielsweise Mittel- oder Hochspannungsleitungen und Transformatorenstationen, zuständig. Es ist ein Plangenehmigungsverfahren erforderlich. In streitigen Fällen, das heisst, wenn das Inspektorat Einsprachen nicht erledigen oder Differenzen mit den beteiligten Bundesbehörden nicht ausräumen konnte, hat das Bundesamt für Energie (BFE) über das Gesuch zu entscheiden. Die frühzeitige Einbindung des Netzbetreibers und des ESTI im Zusammenhang mit Netzanschluss und Netzkapazitäten ist zentral. In diesem Zusammenhang wird auch empfohlen, bei der ElCom rechtzeitig eine Stellungnahme in Bezug auf den voraussichtlichen Netzanschlusspunkt einzuholen. Bei der Bestimmung des Netzanschlusspunkts sind neben den technischen und finanziellen Aspekten auch zwingende rechtliche Vorgaben zu berücksichtigen, wie zum Beispiel die Bestimmungen zum Schutz der Moore und Moorlandschaften.

Die Dokumente für die beiden Verfahren (kantonales Verfahren für alpine PV-Anlagen sowie Plangenehmigungsverfahren für die Anschlussleitungen und weitere elektrische Anlagen) sind inhaltlich aufeinander abzustimmen. So können eine sachliche Koordination der beiden Verfahren sichergestellt und Widersprüche vermieden werden. Weiter sollten die beiden Plangenehmigungsgesuche beim Kanton und beim ESTI möglichst gleichzeitig eingereicht werden, damit die Behörden die Publikationen und öffentlichen Auflagen der beiden Gesuche koordinieren können. Da der Bedarf für elektrische Erschliessungsanlagen jeweils ausgewiesen werden muss, ist in Kauf zu nehmen, dass das ESTI bzw. das BFE mit der Erteilung der Plangenehmigung für die Anlagen der elektrischen Erschliessung zuwartet, bis eine Genehmigung für die PV-Anlage oder zumindest eine günstige Prognose für eine solche Genehmigung vorliegt. Eine Übersicht über die Koordination der Verfahren im Kanton Bern findet sich beispielsweise im [Merkblatt](#) des Kantons (AUE-BE, 2023).

### 2.4 Schutzorganisationen

Die in Bezug auf alpine PV-Anlagen wichtigsten Schutzorganisationen sind:

- Stiftung Landschaftsschutz
- Pro Natura
- WWF
- Schweizer Alpen-Club (SAC)
- Weitere Schutzorganisationen zu speziellen Themen (Birdlife, Mountain Wilderness etc.)

Die Schutzorganisationen spielen eine bedeutende Rolle und sollten deshalb frühzeitig in die Planung einbezogen werden. Im Rahmen des UVB ist es wichtig, ihre Fachkenntnisse zu berücksichtigen, da sie durch ihre Expertise dazu beitragen können, Projekte zu verbessern und ihre Akzeptanz zu fördern. Die Schutzorganisationen haben somit einen entscheidenden Einfluss auf den Zeitplan. Weiter ist darauf zu achten, die lokalen Sektionen der Schutzorganisationen einzubeziehen, da sie oft über ein fundiertes Verständnis der lokalen Gegebenheiten verfügen.

### 2.5 Relevante Fachorganisationen

Als wichtigste Fachorganisationen sind zu nennen:

- Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie (Swissolar)
- Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE)
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA)
- Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik (Electrosuisse)
- Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF)

Je nach Standort und Projekt sind weitere Fachorganisationen bzw. Bundesämter bezüglich konkreter Fragen zu involvieren wie z.B.:

- Landwirtschaftliche Beratungs- oder Forschungsinstitutionen
- Organisationen zu den Themen Denkmalschutz, Tourismus, Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), lokale Luftfahrtorganisationen (Gleitschirm, Helikopter)
- Dachverbände mit Bezug zu Freizeitmobilität (Wanderwege, Ski-Routen, Mountainbike-Routen etc.)
- Militär

## 3. Politische Rahmenbedingungen

### 3.1 Rahmenbedingungen für Anlagen nach Art. 71a EnG

Das eidgenössische Parlament hat im Herbst 2022, mit Art. 71a des EnG, die gesetzlichen Grundlagen für alpine PV-Anlagen vereinfacht. Im Rahmen des sogenannten «Solarexpress» wird der Bau solcher Systeme durch den Bund bis Ende 2025 unterstützt. Detaillierte Informationen zu den teilweise kantonal unterschiedlichen Rahmenbedingungen sind in den kantonalen Publikationen und Websites ([Wallis](#), [Bern](#), [Graubünden](#)) aufgeführt. Nachstehend wird eine Zusammenfassung der Kernpunkte gegeben.

Gemäss Art. 71a EnG gelten folgende befristete Regeln für alpine PV-Anlagen und ihre Anschlussleitungen, solange die Gesamtproduktion aus den Anlagen schweizweit 2 TWh pro Jahr nicht überschreitet.

- Der Bedarf der Anlagen ist ausgewiesen, sie gelten als standortgebunden und sind von nationalem Interesse
- Es besteht keine Planungspflicht
- Interesse an der Realisierung geht anderen nationalen, regionalen und lokalen Interessen grundsätzlich vor (grösstmögliche Schonung ist zu beachten, siehe auch Kapitel 4.2.3)
- Ausgeschlossen sind Anlagen in: Mooren und Moorlandschaften, Biotopen von nationaler Bedeutung und Wasser- und Zugvogelreservaten

Für PV-Grossanlagen nach Art. 71a gelten folgende Bedingungen:

- Die jährliche Mindestproduktion beträgt 10 GWh
- 500 kWh/kW werden im Winterhalbjahr produziert
- Die Baubewilligung ist durch den Kanton zu erteilen
- Die Zustimmung der Gemeinde sowie der Grundeigentümer:innen müssen vorliegen
- Es besteht eine Rückbaupflicht / Pflicht zur Wiederherstellung der Ausgangslage

Förderung:

- Die Einmalvergütung (EIV) entspricht den zu erwartenden ungedeckten Kosten, jedoch max. 60 Prozent der voraussichtlichen anrechenbaren Investitionskosten
- Um von diesen privilegierten Förderbedingungen zu profitieren, muss die Anlage bis zum 31.12.2025 mindestens 10 Prozent der erwarteten Produktion der gesamten geplanten Anlage oder 10 GWh Elektrizität pro Jahr ins Stromnetz einspeisen.

Der Bundesrat (BR) hat in der Energieförderungsverordnung (EnFV) die Grundsätze zur einzel-fallweisen Festlegung der Einmalvergütung geregelt. Für den Vollzug ist das BFE zuständig. Die Netzverstärkungen sind Teil der Systemdienstleistungen.

Weitere Punkte sind in der Energieverordnung (EnV) und der Energieförderungsverordnung (EnFV) geregelt, wie zum Beispiel:

- Zur PV-Anlage gehören auch die Anschlussleitungen sowie Bauten und Installationen, die für den Bau oder den Betrieb notwendig sind.
- Fruchtfolgeflächen sind für Projekte nach Art. 71a EnG ausgeschlossen.
- Die Schwelle zur Erreichung der 2 TWh basiert auf rechtskräftig bewilligten Anlagen. Nach Erreichen der Schwelle können keine weiteren Anlagen zugelassen werden.
- Die EnV kommt zum Einsatz, wenn keine andere Zuständigkeitsregelung festgelegt wurde.

Das BFE hat verschiedene Dokumente im Zusammenhang mit PV-Grossanlagen publiziert:

- [Fördergesuch für PV-Grossanlagen](#) (BFE, 2024a)
- [Preisszenarien für EIV und Investitionsbeiträge](#) (BFE, 2024b)
- [Leitfaden Wirtschaftlichkeitsbewertung](#) (BFE, 2024c)
- [Vorlage Wirtschaftlichkeitsbewertung](#) (BFE, 2024d)
- [Vorlage zur Auflistung der Investitionskosten](#) (BFE, 2024e)
- [Wegleitung zur Ertragsberechnung für PV-Grossanlagen](#) (BFE, 2024f)
- [Wegleitung zur Auflistung der Investitionskosten](#) (BFE, 2024g)
- [Erläuternder Bericht zu den Verordnungsbestimmungen zu Art. 71a EnG](#) (UVEK, 2024)

In Abbildung 2 wird das Subventionsverfahren für Anlagen nach Art. 71a EnG von der Einreichung des Subventionsgesuchs bis zur Meldung der Produktionsdaten beschrieben.

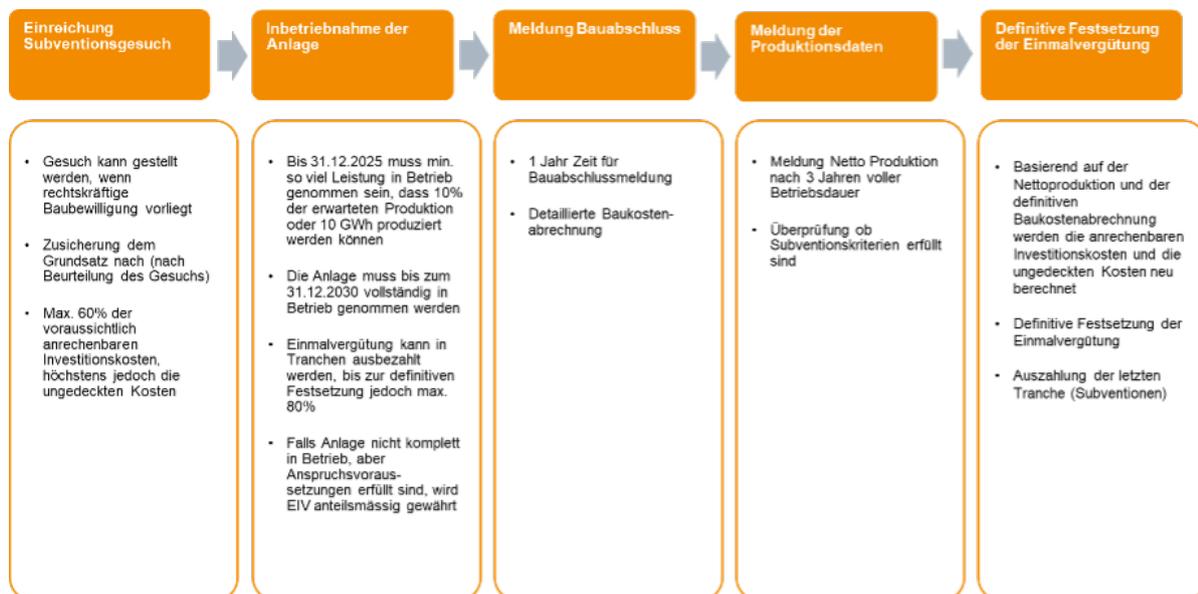


Abbildung 2: Ablauf des Subventionsverfahrens. © Swissolar (August 2024)

Der Solar-Express, der den Bau von PV-Grossanlagen privilegiert, gilt nur für Anlagen die bis zum 31. Dezember 2025 öffentlich aufgelegt werden (vgl. Art. 71a Abs. 6 EnG).

### 3.2 Zukünftige Rahmenbedingungen für alpine PV-Anlagen

Für alle PVA, die nicht in den Anwendungsbereich des Solarexpress fallen, und für alle Grossanlagen, die nach dem 31. Dezember 2025 öffentlich aufgelegt werden, wurden mit der Annahme des Bundesgesetzes über eine sichere Stromversorgung vom 29. September 2023 (sog. Mantelerlass, BBl 2023 2301) neue rechtliche Rahmenbedingungen für die Realisierung von freistehenden Solaranlagen geschaffen. Der Struktur eines Mantelerlasses folgend sind die gesetzlichen Grundlagen auf verschiedene Erlasse verteilt: Solaranlagen von nicht nationalem Interesse werden neu in Art. 24ter nRPG speziell geregelt (die Bestimmung soll in der RPV noch präzisiert werden). Solaranlagen von nationalem Interesse werden hingegen im neuen Energiegesetz definiert, die Bewilligungsvoraussetzungen ergeben sich teilweise aus dem Stromversorgungsgesetz (Art. 12 nEnG i. V. m. Art. 9a nStromVG). Die Tragweite der Bestimmungen lässt sich folglich nur im Zusammenspiel verschiedener Erlasse erkennen.

Der Mantelerlass differenziert ausdrücklich zwischen drei Kategorien von Solaranlagen auf freien Flächen:

#### **1. Solaranlagen von nationalem Interesse von Gesetzes wegen (Art. 12 EnG)**

Für diese Anlagen müssen im Richtplan Eignungsgebiete festgelegt werden, und sie gelten in diesen Eignungsgebieten als standortgebunden und grundsätzlich vorrangig. Um als Solaranlage von nationalem Interesse zu gelten, muss die mittlere erwartete Produktion der Anlage im Winterhalbjahr mindestens 5 GWh betragen.

#### **2. Solaranlagen von nationalem Interesse im Einzelfall (mit zentralem Beitrag; Art. 13 EnG)**

Es handelt sich dabei um Solaranlagen, die aufgrund ihrer Grösse und Bedeutung unter der Schwelle für Anlagen von nationalem Interesse liegen, denen der Bundesrat aber wegen ihres zentralen Beitrags zur Erreichung der Ausbaurichtwerte ausnahmsweise ein nationales Interesse im Sinne von Artikel 12 EnG zuerkennen kann.

#### **3. Solaranlagen nicht von nationalem Interesse (Art. 24ter und/oder Art. 24 RPG)**

Diese Anlagen können mit der neuen Gesetzgebung unter bestimmten Umständen als standortgebunden gelten, es muss aber in jedem Fall eine uneingeschränkte Interessenabwägung vorgenommen werden, und in Bezug auf die Planungspflicht gelten die generellen Bestimmungen des RPG.

Alpine Solaranlagen können grundsätzlich je nach Ausgestaltung unter jede dieser Kategorien fallen. Die Bewilligung setzt voraus, dass die Voraussetzungen für eine der Kategorien erfüllt sind. Rechtlich betrachtet bestehen viele unstrittene und offene Fragen, die von der Rechtsprechung geklärt werden müssen. Zu der neuen Gesetzgebung gehören Ausführungsbestimmungen auf Verordnungsstufe, die gewisse Voraussetzungen konkretisieren. Insbesondere verbleibt Klärungsbedarf bei Anlagen von nationalem Interesse im Einzelfall (Art. 13 EnG). Es gilt, dass sie den gleichen Status wie Anlagen von nationalem Interesse erhalten. Unklar ist, was das genau bedeutet.

RPG frühestens per 1.1.2026.

## 4. Standortbestimmungen

Nur eine umfassende Analyse der Standortbedingungen sorgt letztlich für fundierte Entscheide während eines Projekts. Dies gilt insbesondere bei Betroffenheit von national prioritären Lebensräumen und Arten, für die die Schweiz eine besondere Verantwortung trägt. Ohne Kenntnis der Gegebenheiten läuft ein Projekt Gefahr, dass es früher oder später zurückgeworfen wird. Dies kann sich in unerwarteten Änderungen am Projektumfang oder Problemen bei der Zustimmung äussern, was in jedem Fall zu Verzögerungen führt.

Standorte für alpine PV-Anlagen können anhand verschiedener Eignungs- und Vorbehaltskriterien beurteilt und eingestuft werden. In den folgenden Unterkapiteln sind typische Parameter aufgeführt, die z.B. im Rahmen einer Standortbewertung in Betracht gezogen werden:

- Gute Eignung für die Energiegewinnung (Einstrahlung)
- Infrastruktur für Transporte und Netzanschluss
- Kapazität Netzanschluss
- Schutzobjekte und Inventare (Naturschutz, Landschaftsschutz, Gewässerschutz etc.)
- Schneegutachten
- Gefahrenzonen (Untergrund, Schnee, Wasser etc.)
- Zu erwartende Windlasten (Windgutachten)
- Grobtopografie, Feintopografie und Qualität Baugrund
- Bericht Naturgefahren
- Bestehende Vorbelastung durch aktuelle Nutzungen
- Anzahl der «Störungen» im Gelände, die eine gute Integration in der Landschaft erschweren (Gewässer, Felsblöcke, geologischer und hydrologischer Bericht
- Sozioökonomische Aspekte
- Fruchtfolgeflächen
- Konflikte mit raumplanerischen Zielen oder bestehender Nutzung (Skigebiete, Naturparks etc.)
- Möglichkeiten für Reversibilität

Es ist wichtig, dass die Projektziele klar definiert sind, wobei eine Priorisierung der Ziele erfolgen sollte, um bei Konflikten abwägen zu können. Meistens geschieht die Priorisierung hauptsächlich aufgrund der Vorgaben des Gesetzgebers bzw. der Förderungen, sodass diese Themen letztlich die höchste Gewichtung bekommen. Im Folgenden werden einige der für die Projektplaner:innen wichtigsten Kriterien von potenziellen Standorten in Bezug auf alpine PV-Anlagen aufgezeigt:

### **Grundkriterien:**

- Mindestprojektfläche, -grösse (machbar, netto nach Abzug Richtung/Neigung/ Geologie/ Naturgefahren/Umwelt)
- Hinreichender Energieertrag (Jahresertrag und Winteranteil) gem. Vorgaben von Gesetz und Verordnung (Vorgaben zur Berechnung siehe BFE)
- Einfache/schnelle Realisierbarkeit (Erschliessung/Netzverfügbarkeit)
- Akzeptanz bei Grundeigentümerinnen, Grundeigentümern und Standortgemeinde

Die Anforderung, dass die Anlage bis Ende 2025 mindestens in dem Umfang ans Stromnetz angeschlossen sein muss, dass 10% des erwarteten Stromertrags produziert werden kann, führt ggf. dazu, dass eine maximale Grösse als Oberziel nicht mehr realisierbar wird

### **Zusatzkriterien:**

- Geringste Umweltauswirkungen (Minimierung der Umweltauswirkungen durch angemessene Wahl des Standorts und später des Perimeters im Sinne des USG)
- Maximaler Nutzen für die Region
- Beste Wirtschaftlichkeit

Abhängig von der Ausgestaltung der Nachfolgelösung zu Art. 71a EnG müssen andere/weitere Bedingungen beachtet werden.

## 4.1 Technische Parameter

In diesem Kapitel werden verschiedene Parameter zu den technischen Standortbedingungen wie Geologie, Naturgefahren, Windlasten usw. beschrieben.

### 4.1.1 Geologie, Topologie, Topografie

Aufgrund der Rahmenbedingungen des Gesetzgebers sind bereits eine ganze Reihe von Gebieten aus- bzw. einzuschliessen: Weitere Kriterien mit grossem Einfluss auf die technische und v.a. auch wirtschaftliche Machbarkeit sind:

**Einstrahlungsverhältnisse/Exposition:** Mindestertrag im Winterhalbjahr ( $> 500 \text{ kWh/kW}$ ) bedingt Ausrichtung von ca.  $45^\circ$  ab Süd und typischerweise einen Standort, der über ca. 1400 m ü. M. liegt oder nebfrei ist.

**Mindestproduktion/Fläche:** In der Regel sind mindestens 7 MW an Leistung nötig, um die geforderten 10 GWh/Jahr zu erreichen. Je nach Einstrahlungsverhältnissen, Feintopografie und Ausschlusszonen innerhalb des Perimeters (Felspartien, Gewässer etc.) bedingt dies mindestens 10–20 ha Fläche. Im Laufe der Planung wird die nutzbare Fläche üblicherweise eher geringer, entsprechend sollte der Untersuchungsperimeter in der Machbarkeitsphase nicht zu knapp gewählt werden.

**Hangneigung:** Eine grössere Hangneigung bringt bei Südhängen den Vorteil mit, dass der minimale Reihenabstand verkleinert werden kann, wodurch die beanspruchte Fläche sinkt. Jedoch nehmen die Lasten aus dem Schneedruck ab ca.  $30^\circ$  Neigung stark zu. Ebenfalls steigen die Errichtungskosten durch schwierige Montagebedingungen rasch an. Ausserdem nimmt auch das Risiko von Lawinen deutlich zu.

**Baugrund:** Instabiler, sehr weicher oder quellfähiger Untergrund (Ton, Gips, moorige Böden) führt zu aufwendigeren Fundierungslösungen, was eine Verschlechterung hinsichtlich Kosten und Umweltauswirkungen bedeutet.

**Gewässerabstände:** Je nachdem ist eine Gewässerfestsetzung nötig, um den Bereich entsprechend einzuschränken.

**Feintopografie:** Herausfordernd oder auszuschliessen sind Zonen mit grossen Blöcken, kleinen Felspartien, Runsen, Mulden und Vernässungen.

### 4.1.2 Naturgefahren

Ein zentrales Thema im alpinen Raum sind Naturgefahren, weshalb möglichst früh von Expertinnen und Experten Abklärungen gemacht werden sollten. Die Erfahrungen zeigen, dass viele Projekte vor allem wegen Naturgefahren redimensioniert werden mussten.

Ein Einbezug von Gefahrenbereichen bedingt entweder eine erhöhte Risikobereitschaft des späteren Betreibers (bzw. seiner Versicherung), die Elimination der Gefahrenquelle oder die Errichtung von Schutzmassnahmen. Die beiden letztgenannten Punkte sind aber häufig kostenintensiv, und zudem ist nicht sicher, ob die Bewilligungsbehörden und Verbände flankierende umfassende Schutzbauten akzeptieren.

Nicht zu vergessen sind Naturgefahren entlang der Zufahrtsstrasse, der Netzanbindung oder in höher liegenden Gebieten mit Reichweiten bis ins Gebiet des Projekts. Sind vom Projekt Gefahrenzonen tangiert, werden während der Bauzeit wie auch des Betriebs und der Rückbauphase Sicherheitskonzepte und Massnahmen nötig, um Personen und Material zu schützen.

**Lawinen:** Neben dem reinen Anrissgebiet, das üblicherweise  $> 30^\circ$  aufweist, ist zu beachten, dass die Sturzbahn und auch das Auslaufgebiet bis weit in Zonen mit Gefällen  $< 30^\circ$  laufen können. Bei Modellierungen wird unterschieden in Trocken- und Nassschneelawinen. Ihre Reichweite ist unterschiedlich. Neben den bewegten Schneemasen entsteht auch eine Druckwelle in der Luft, deren Ausdehnung nicht identisch ist mit den von Schnee betroffenen Arealen. Eine Sicherung gegen grössere Elementarereignisse ist oft nur mit aufwendigen, teuren Massnahmen und manchmal auch gar nicht möglich. Eine frühzeitige Abklärung, ob die Bewilligungsfähigkeit des Projekts dadurch gefährdet ist, ist empfehlenswert.

**Sturzprozesse:** Je grösser die Sturzmasse, desto weiter ist der Auslaufbereich. Steilheit und Beschaffenheit der Sturzbahn sind mitentscheidend für die Reichweite.

**Rutschungen:** Rutscht das Gebiet als gesamtes und nur sehr langsam, ist eine detaillierte Abklärung vor Einbezug des Perimeters ins Untersuchungsgebiet nötig. Alle anderen Rutschungen, speziell auch Gefährdungen von oberhalb, sind kritisch und ein Ausschlusskriterium für die betroffenen Bereiche.

**Hochwasser, Murgang:** Zu beachten ist, dass diese auch weit ausserhalb vom Anlagenperimeter entstehen können.

**Auftauender Permafrost:** Beim Schmelzen von Permafrost-Eis infolge klimatischer Veränderungen kann der darunterliegende Boden instabil werden. Das wiederum kann zu verschiedenen Phänomenen wie Kriechbewegungen oder auch den oben beschriebenen Sturzprozessen und Rutschungen führen.

**Schneeablagerungen:** Alpine PV-Anlagen, insbesondere wenn sie auf Freiflächen in Reihen aufgestellt werden, sind anfällig für die Bildung von lokalen Schneeanstimmungen und sich ausbreitenden Schneedünen. Es ist also von Vorteil, das Design mit Hinblick auf Schneeanstimmungen zu optimieren. Dazu dienen «Computational Fluid Dynamics» (CFD)-Simulationen, die zusätzlich zum Wind den Transport von Schnee beinhalten (Hames, et al., 2021).

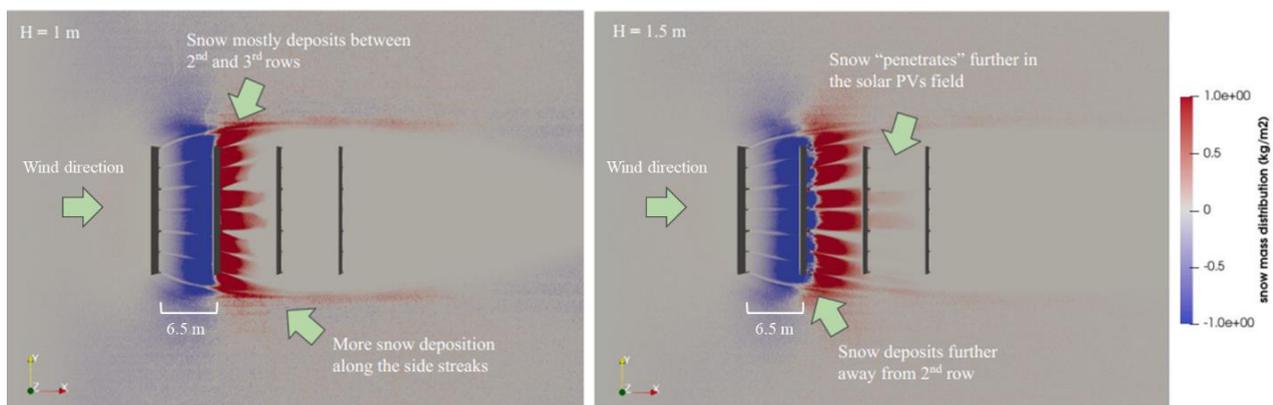


Abbildung 3: Schneeablagerung in kg/m<sup>2</sup> im Zusammenhang mit vertikal aufgeständerten PV-Modulen.  
© WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)

Abbildung 3 zeigt die Schneeablagerung zwischen den Reihen von vertikal aufgeständerten PV-Modulen in Abhängigkeit von der Aufständerungshöhe mit Blick von oben. In den roten Bereichen bleibt dabei mehr und in den blauen Bereichen weniger Schnee liegen, als dies ohne die PV-Module der Fall wäre. Die Grafik zeigt, dass insbesondere zwischen der zweiten und dritten Reihe ein möglicher Ausgangspunkt von Dünenbildung liegt. Zudem ist die Schneeablagerung seitlich entlang der PV-Anlage erhöht.

Mit einem Schneefangzaun, wie er in *Abbildung 4* ganz links dargestellt ist, könnte zwar dem Ablagerungsproblem entgegengewirkt werden, allerdings schafft man so Folgeprobleme in Bezug auf Vieh- und Wilddurchlässigkeit sowie die Gestaltung der Gesamtanlage.

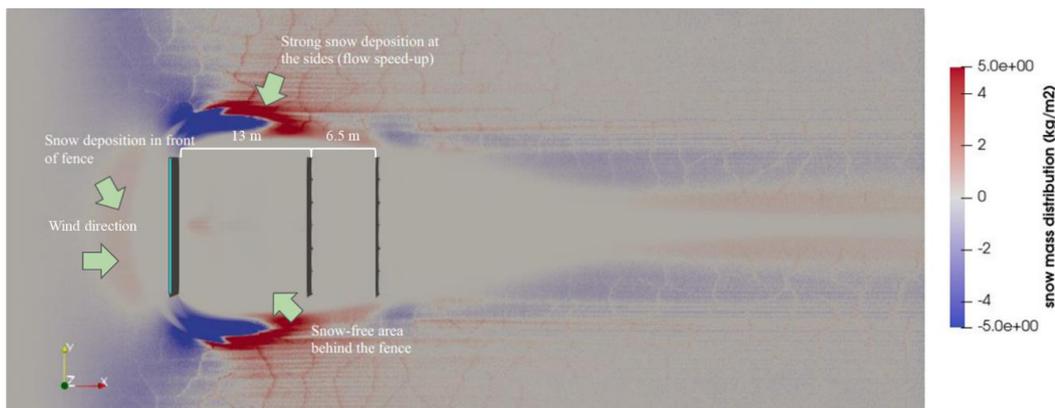


Abbildung 4: Schneeeablagerung in kg/m<sup>2</sup> im Zusammenhang mit vertikal aufgeständerten PV-Modulen und einem vorgelagerten Schneefangzaun.  
© WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)

Die Auswirkungen von Schneeeablagerungen sollten auf keinen Fall unterschätzt werden. Im Extremfall können Verwirbelungseffekte zu einer lokal massiv höheren Schneeeansammlung führen, was wiederum die PV-Anlage darunter aufgrund von Drucklast oder Verschiebungen beschädigen kann.

#### 4.1.3 Mögliche Massnahmen gegen Naturgefahren

Um den vielzähligen Naturgefahren im alpinen Raum zu begegnen, gibt es heute diverse Massnahmen, die zum Schutz von Bauten bereits seit vielen Jahren im Einsatz sind. Im Folgenden werden einige davon aufgelistet:

##### **Steinschlag**

- Netze und Palisaden (nur bis zu bestimmten Grössen wirksam)
- Vorgängige Räumung oder Sprengung (bevor gebaut wird oder das Gestein als Block zu Tale rollt)
- Umlenkmassnahmen
- Schutzwaldstreifen (nur unterhalb Waldgrenze und langfristig)
- Objektschutz (schwierig, da oft Springen der Steine)

##### **Murgang und Hochwasser**

- Umlenkmassnahmen
- Rückhaltebecken
- Schutzdämme
- Objektschutz (bergseitige Verstärkung, Kolkschutz, einfacher bei Hochwasser, da weniger mitgeführtes Material und geringere Dichte)

##### **Lawinen**

- Lawinenverbauungen im Anrissgebiet
- Sprengturm im Anrissgebiet zur frühzeitigen Vermeidung extremer Schneemengen.  
Sprengungen vom Helikopter aus nicht genügend, da bei Schlechtwetter keine Flüge
- Dämme zum Ablenken oder Bremsen
- Erhöhung Rauigkeit Geländeoberfläche (Baumstämme, Schutzwald)
- Umlenkbauten
- Objektschutz (Lawinenkeile, verstärkte Pfosten)

Wichtig im ganzen Thema ist die Definition der zugrunde gelegten Wahrscheinlichkeit der Naturgefahren-Ereignisse. Je höher die Jährlichkeit (oder Wiederkehrperiode), desto grösser das Ausmass eines Ereignisses und entsprechend weniger Gebiet wird verschont bzw. desto grössere Kräfte treten auf. Eine Lawine mit 100 Jahren Wiederkehrperiode ist grösser und hat eine grössere Reichweite als diejenige, die durchschnittlich einmal pro 50 Jahre niedergeht.

Beim neuen Themengebiet der alpinen PV-Anlagen ist noch nicht immer klar geregelt, wer die zugrunde liegende Wiederkehrperiode festlegt. Die meisten Kantone fordern mittlerweile die Berücksichtigung eines 100-jährlichen Ereignisses. Folgende Akteure müssen diesbezüglich beachtet werden und haben jeweils eigene Interessen und Massstäbe.

- Gebäudeversicherung (z.B. für Trafostation/Wechselrichtergebäude)
- Betriebsversicherung PV-Kraftwerk
- Planer:innen/Betreiber:innen (Basis für die planenden Ingenieurinnen und Ingenieure in Bezug auf anzunehmende Lasten)
- Behörden (z.B., wenn Personenschutz nötig ist oder bei Richtlinien für Bauten, die mehrheitlich durch den Bund finanziert sind, was bei einem Förderbeitrag von bis zu 60 Prozent auftreten kann)
- Verwendete Komponenten (Lebensdauer PV-Module, elektrotechnische Komponenten etc.)

Bei der Betriebsversicherungen können Planer:innen/Betreiber:innen bewusst mehr Risiko in Kauf nehmen und z.B. Ausschlüsse oder Deckungsreduktionen in Kauf nehmen. Bei gesetzlichen Vorgaben gibt es diesen Spielraum nicht oder nur beschränkt.

Zu beachten ist auch, dass viele Kantone bereits Gefahrenzonierungen kennen. Häufig beschränken sich diese nur auf Bauzonen oder das Umfeld bestehender Bauten (z.B. Seilbahnstationen). Divergierende Resultate zu den projektspezifischen Gutachten sind möglich, da die angewendete Methodik und die Jährlichkeit unterschiedlich sind. Eine Klärung mit dem zuständigen Amt für Naturgefahren oder der kantonalen Leitbehörde für die Bewilligung von alpinen PV-Anlagen und den zugehörigen Infrastrukturanlagen ist ratsam. Auch bei dieser Thematik können die bereits bestehenden kantonalen Leitfäden und Merkblätter der Kantone [Bern](#) und [Graubünden](#) herangezogen werden.

#### 4.1.4 Statische Lasten

Die Montagestruktur und die Module müssen auf den statischen Druck durch die Schneedecke und den dynamischen Druck durch Lawinen dimensioniert werden. Diese Faktoren sind standortspezifisch. Je nach Geländehöhe über Meer sind die zu erwartenden Schneemengen und Windverhältnisse zu berücksichtigen. Zudem haben die verschiedenen Montagestrukturen unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf die Aufnahmefähigkeit von statischen Lasten. Es wird auf die Norm SIA 261/1 und Kapitel 5.10 Montagestrukturen verwiesen, wobei die Erstellung eines standortspezifischen Gutachtens empfohlen wird.

#### 4.1.5 Windlasten

Anhand der Windlastkarte im Anhang zur SIA-Norm 260 kann ein erster Eindruck zu den vor Ort wirkenden Windkräften gewonnen werden. Die Werte der Windlastkarte müssen im Rahmen des Vorgehens nach SIA 260/261 noch mit diversen Faktoren kombiniert werden, um als Basis für die Dimensionierung zu dienen. Zudem ist zu beachten, dass für Bauwerke über 2000 m ü. M. und für Bauwerke an Lagen mit aussergewöhnlichen Schnee- und Windverhältnissen die Bestimmungen der SIA 261/1 nicht direkt anwendbar sind. Die SIA-Karte ist in Bezug auf die Windlasten sehr grob und mit grossen Wertebereichen versehen, entsprechend ist es unumgänglich, ein standortspezifisches Windlastgutachten erstellen zu lassen. Ebenfalls von Relevanz ist der Eurocode EN 1991-1-4.

Die Qualität der Aussage eines Gutachtens ist abhängig von den vorhandenen Informationen zum Wind vor Ort. Ist im Projektgebiet keine Messstation vorhanden, müssen die Werte auf Basis von umliegenden Stationen extrapoliert werden. Dies kann beispielsweise auch mittels einer CFD-Modellierung geschehen. Die Extrapolation vermindert die Präzision der Aussage. Eine Windmessung am Standort lohnt sich insbesondere, wenn ihre Resultate noch ins Design der Unterkonstruktion und in die Modulwahl einfließen können (z.B. auch für spätere Etappen).

Für die Bemessung der Konstruktion ist nicht ein Wind-Mittelwert entscheidend, sondern die maximale Böenspitze. Auch hier spielt es eine Rolle, welche Jährlichkeit zugrunde gelegt wird. Die maximale Böe einmal in 100 Jahren wird deutlich stärker sein als diejenige, die einmal in 50 Jahren erwartet werden muss. Durch Abschattungseffekte können die Windlasten innerhalb des PV-Felds deutlich kleiner sein als an den exponierten Randbereichen. Die alpine Topografie und z.B. Schneeverfrachtungen können die Strömungsbedingungen im Feld stark beeinflussen. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass kritische Resonanzen in den Tragstrukturen entstehen. Für das Projekt Engadin Solar ([www.engadin.solar](http://www.engadin.solar)) wurde ein standortspezifisches Windgutachten für eine vertikale Anordnung von Solarmodulen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt oben die Druckverteilung des Windes (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) und unten die Verteilung der Windgeschwindigkeit (in  $\text{m}/\text{s}$ ) aus der Simulation dieses Projekts. Die Farbe Rot steht dabei für einen Überdruck bzw. eine hohe Windgeschwindigkeit und Blau für einen Unterdruck oder auch eine tiefe Windgeschwindigkeit.

#### Pressure distribution



#### Wind speed distribution



Abbildung 5 Druckverteilung und Windgeschwindigkeit für vertikal aufgeständerte PV-Module.  
© WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)

### 4.1.6 Infrastruktur Zufahrt und Netzanschluss

**Erschliessung bis zum Perimeter:** Von Vorteil ist es, Gebiete zu wählen, die bereits mit einer Strasse oder einem guten Forstweg erschlossen sind. Sehr enge Kurven, steile Steigungen auf unbefestigter Fahrbahn oder enge Tunneln können erhöhte Anforderungen stellen. Alternativ zur Erschliessung mit Strassen und Wegen ist ein Antransport per Helikopter möglich. Dies wird heute schon praktiziert, z.B. im Seilbahnbau, für Hochspannungsmasten und Lawinenverbauungen. Als weitere Möglichkeit sind bestehende oder neue Bahnen, speziell Seilbahnen zu nennen. Temporäre Seilbahnen werden bereits im Forstwesen eingesetzt, aber auch zur Erschliessung alpiner Baustellen (z.B. beim Kraftwerk Linth-Limmern).

Nachfolgend werden verschiedene Erschliessungsmöglichkeiten in Bezug auf ihre Vor- und Nachteile analysiert. Oft ist es sinnvoll, eine Kombination verschiedener Erschliessungen zu nutzen. Eine Kostenbetrachtung wurde nicht durchgeführt, da diese stark standortabhängig ist. In Bezug auf die Umweltbelastung muss immer eine ganzheitliche Betrachtung erfolgen. Es empfiehlt sich ein Variantenvergleich mittels einer Ökobilanzierung, z.B. anhand der Methode der ökologischen Knappheit, die einen gesamtheitlichen Vergleich in Umweltbelastungspunkten (UBP) ermöglicht.

**Tabelle 3**

**Vor- und Nachteile verschiedener Erschliessungsmöglichkeiten von alpinen PV-Anlagen**

	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Bestehende Strassen, Wege	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dauerhafte Erschliessung</li> <li>– Wetterunabhängig</li> <li>– Geringe Umweltauswirkungen</li> <li>– Synergien mit anderen Nutzungen (Unterhalt)</li> <li>– Gut kombinierbar mit Verlegung von Kabel-Netzanschluss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Evtl. gesperrt bis in Frühsommer wegen Schnee oder Lawinengefahr</li> <li>– Meistens nicht für benötigte Transportmengen und Frequenz ausgelegt</li> <li>– Evtl. Instandstellung nach Abschluss der Arbeiten nötig</li> <li>– Evtl. unzureichende Breite bzw. Traglasten für Schwertransporte</li> </ul>
Aus-/Neubau Strassen, Wege	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dauerhafte Erschliessung</li> <li>– Wetterunabhängig</li> <li>– Gut und günstig kombinierbar mit Verlegung von Kabel-Netzanschluss</li> <li>– Verbesserung Infrastruktur kann Vorteil für bestehende Nutzer:innen sein (Anwohnerinnen/Bau-ern etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Baumassnahmen</li> <li>– Gesamtheitliche Beurteilung des Ausbaus ist Bestandteil des Projekts</li> <li>– Projektzeitplan muss Bau berücksichtigen</li> <li>– Zusätzlicher Eingriff in Natur und Landschaft</li> <li>– Rückbaupflicht gilt auch für Strassen;</li> </ul>
Helikopter	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schnell</li> <li>– Kann im Winter oder bei Schnee eingesetzt werden</li> <li>– Kein Eingriff in Landschaft</li> <li>– Schonung von Boden und Strassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lärmbelastung; Störungen Wildtiere</li> <li>– Niedriges Lastlimit</li> <li>– Limitierte Verfügbarkeit (v.a. Schwerlasthelikopter)</li> <li>– Witterungsabhängig</li> <li>– Nicht zu viele Helis parallel einsetzbar (limitierter Luftraum)</li> </ul>
Bestehende Seilbahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Einfach verfügbar</li> <li>– Kein Ausbau (Bewilligung)</li> <li>– Kann im Winter oder bei Schnee eingesetzt werden</li> <li>– Kein neuer Eingriff in Landschaft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Limit bez. Gewicht, Volumen, Leistung und Personen</li> <li>– Lieferpunkt Seilbahn nicht optimal</li> <li>– Touristische und militärische Nutzung verringert die Verfügbarkeit</li> </ul>
Neue (temporäre) Seilbahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kann im Winter oder bei Schnee eingesetzt werden</li> <li>– Schonung von Boden und Strassen</li> <li>– Geringe Umweltauswirkungen, da nur temporär</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Evtl. Bewilligungsvorbehalte</li> <li>– Eingriff in Landschaft und Wildlebensraum</li> <li>– Rückbaupflicht</li> </ul>

### **Erschliessung innerhalb des Perimeters**

Bereits bestehende Wege innerhalb des Perimeters erleichtern die Logistik und reduzieren die Umweltbeeinträchtigungen deutlich. Wo diese Zugänge nicht vorhanden sind, müssen Möglichkeiten gefunden werden, wie die Geräte für die Bauarbeiten der Fundationen wie auch die Unterkonstruktionen und Module auf ihre jeweilige Position kommen. Umweltrelevante Abklärungen hinsichtlich der temporären und definitiven Einwirkungen u.a. auf den Boden und die Vegetation gilt es zu treffen.

## **4.2 Parameter zu Natur-, Umwelt- und Landschaftsschutz**

In diesem Kapitel werden verschiedene Standortparameter zu Natur-, Umwelt- und Landschaftsschutz beschrieben, wie beispielsweise die Sichtbarkeit und die Raumwirkung oder die Standortbedingungen für Flora und Fauna.

### **4.2.1 Sichtbarkeit, Raumwirkung**

Die visuelle Auswirkung der geplanten alpinen PV-Anlagen auf die Umgebung ist nicht zu bestreiten, denn in jedem Fall ist es eine Veränderung gegenüber dem Status quo. Je nach persönlicher Einstellung muss der Anblick einer grossen PV-Anlage jedoch nicht zwingend mit negativen Assoziationen verbunden sein. Technikaffine Personen werden hier anders urteilen als Liebhaber:innen naturnaher Kulturlandschaften. Zudem können je nach Betrachtungsstandort die Meinungen derselben Person für dasselbe Projekt variieren. Eine Covisibilität von einer Richtung zusammen mit Vorbelastungen wie Staumauer, Gondelbahn oder Skipiste wird anders wahrgenommen als die Beurteilung aus einer anderen Richtung, wo die Anlage im Vordergrund vor einem wilden Gletscher steht. Als neues Objekt tritt die Installation in eine Landschaft mit einer Reihe von natürlichen, ästhetischen, historischen und gesellschaftlichen Werten ein und erzeugt eine Raumwirkung. Die Bewertung dieser Wirkung ist nicht einfach, und wegen der subjektiven Wahrnehmung gibt es keine perfekte Lösung. Eine objektive Beurteilung mit allgemein akzeptierten Kriterien ist daher schwierig. Anerkannte Methoden existieren, z.B. im [«Leitfaden Landschaftsästhetik»](#) des BAFU, und sollen angewendet werden (BAFU, 2001).

Die Anordnung der Module und Reihen ist entscheidend in Bezug auf die Energieerzeugung, insbesondere im Winter. Dies hat letztlich auch einen Einfluss auf die Verkabelung, sowohl bei Gleichstrom wie auch bei Wechselstrom, und die harmonische Integration in die Berglandschaft. Die Unterkonstruktion, das Gelände und die optimalen energetischen Voraussetzungen sind weitere kritische Parameter in Bezug auf die Anordnung der Solarmodule und Modulreihen. Die Auswirkung von Modulneigung und Ausrichtung auf die Energieproduktion der PVA wird im Abschnitt 5.3 dargestellt.

Die Gestaltung und Aufteilung der Stützen, der Befestigung und der Modulreihen ist stark abhängig von der gewählten Unterkonstruktion und kann nicht im Generellen beurteilt werden. Zu berücksichtigen sind jedoch immer die folgenden Aspekte:

- Layout des Parks
- Statik je nach gewählter Lösung
- Gräben für die Rohre
- Standort der Wechselrichter und Elektrokomponenten

Seitens der Umweltschutzorganisationen werden die Nähe zu bestehenden visuellen Belastungen wie Staumauern, Seilbahnen oder Strassen etc. positiv gewertet, wohingegen das Platzieren in unerschlossenen Gegenden negativ gewertet wird.

Im Unterschied zu Windkraftanlagen folgen die Bauten bei den alpinen PV-Anlagen meistens der Geländeoberfläche und sind unbewegt. Durch unterschiedliche Ausrichtungen werden sie unterschiedlich hell beschienen, was ein weniger monolithisches Erscheinungsbild erzeugt. Diese Aspekte erleichtern eine Integration bzw. das «Verschwinden» im Hintergrund bei zunehmender Distanz. Es gibt aber Anordnungen, die störender wirken können als andere. Hier gilt es die Charakteristiken im Gelände bzw. die Landschaftstypologie zu berücksichtigen. Ein homogener, gerader Balken von PV-Modulen über feingliedriger Topografie wirkt wuchtig, eine inhomogene Anordnung auf eher terrasserter Umgebungstopografie mit horizontalen Leitlinien hingegen eher hektisch.

Planerische und technische Rahmenbedingungen erlauben nicht immer perfekte Lösungen, dennoch empfiehlt es sich aufgrund der komplexen Verhältnisse und der sensiblen Umgebung solcher Grossprojekte, die Hilfe von Fachleuten (z.B. Landschaftsplaner:innen) beizuziehen. Hinweise zu dieser Thematik können aus dem Positionspapier [«Katalog von Anforderungen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Alpenraum»](#) der Stiftung Landschaftsschutz Schweiz (slfp) abgeleitet werden (slfp, 2023).

### **Werkzeuge für die Beurteilung**

Dank digitalen Tools können heute Projekte mit verhältnismässig wenig Aufwand visualisiert werden. Es gibt dabei verschiedene Möglichkeiten wie Fotomontagen, Sichtbarkeitskarten oder sogar virtuelle Flüge durch die zukünftige Anlage. Als praktikabel und aussagekräftig für die Planung haben sich vor allem die ersten beiden Instrumente erwiesen. Für die Fotomontagen empfiehlt es sich, die Aufnahmepunkte mit der Gemeinde, Tourismusverbänden oder kantonalen Stellen abzustimmen. Einerseits sollen die Resultate für das Bewilligungsgesuch, andererseits aber auch für die weitere Kommunikation genutzt werden können. Eine gute Qualität ist entscheidend, denn das menschliche Auge ist kritisch. Unstimmigkeiten z.B. bei Proportionen werden rasch erkannt und können leicht zu Misstrauen bei den Betrachterinnen und Betrachtern führen.

Es ist zu bedenken, dass das Wetter und die Farben des Untergrundes/Hintergrundes je nach Jahreszeiten variieren. Im Weiteren sollten Fotomontagen nicht nur die Sicht aus der Distanz wiedergeben, sondern auch die Sicht aus der unmittelbaren Nähe der Anlage, wie z.B. von Wanderwegen aus.

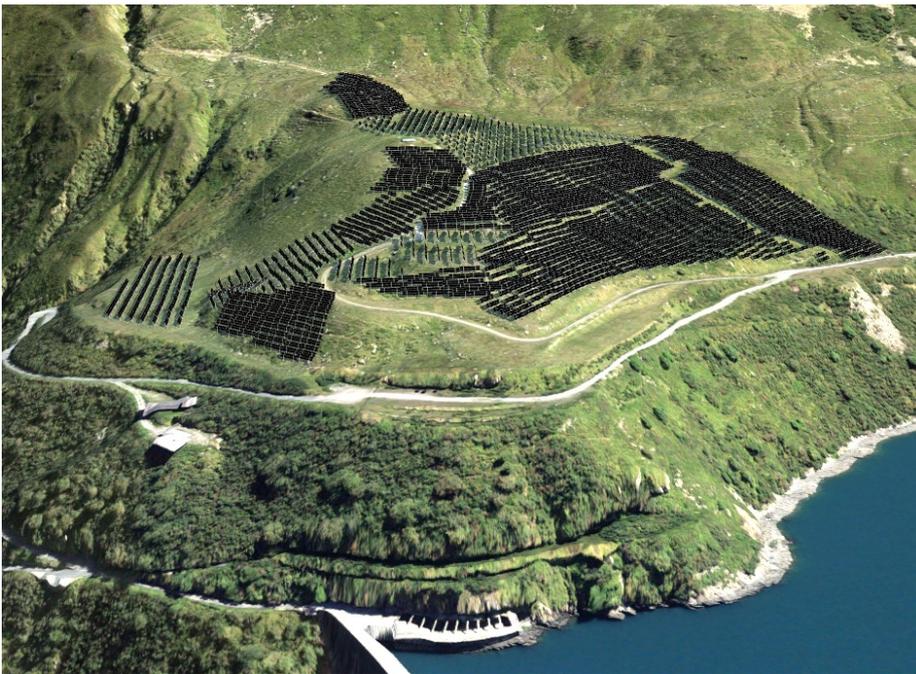


Abbildung 6: Visualisierung Projekt NalpSolar. © Basler & Hofmann AG (Juli 2023)

Um den Betrachtenden eine rasche Erfassung der Gesamtsituation zu ermöglichen, ist es sinnvoll, bestehende Infrastrukturanlagen (z.B. Lawinverbauungen, Liftanlagen von Skigebieten, Gebäude, Strassen und Wanderwege) wie auch allfällige Schutzgebiete und Betriebsbauten in den Visualisierungen darzustellen.

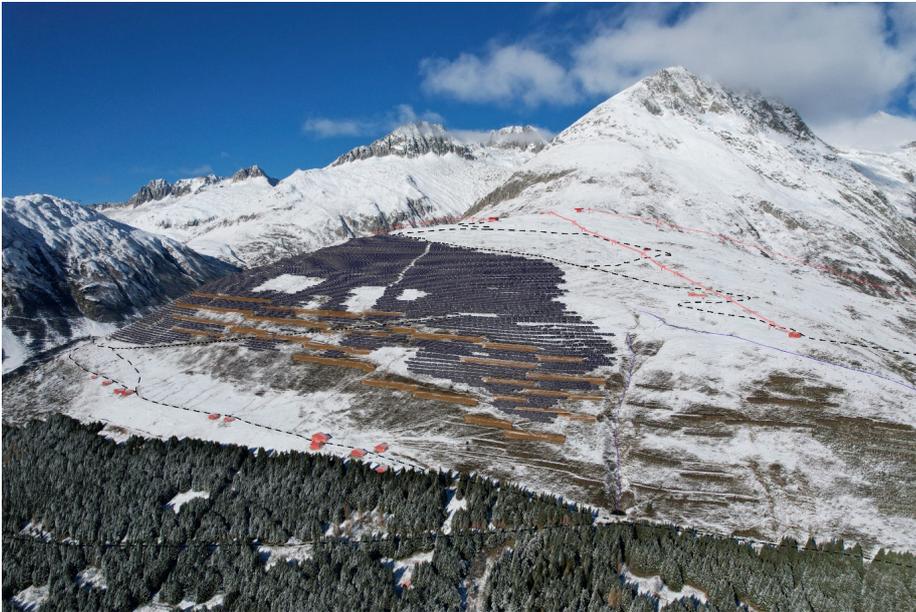


Abbildung 7: Visualisierung Projekt SedrunSolar, Gemeinde Tujetsch. © energia alpina, ZENDRAAG (Oktober 2023)

#### 4.2.2 Reflexion und Blendung durch PV-Module

Die Reflexionseffekte des Sonnenlichts auf PV-Modulen können je nach spezifischen geometrischen Konfigurationen als Belästigung der Bevölkerung im Sinne von Kapitel 6.1 der [«Vollzugshilfe Lichtemissionen»](#) betrachtet werden. Im Dokument finden sich Hinweise zur Beurteilung, Messung und Prognose einer möglichen belästigenden Blendung (BAFU, 2021).

Das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Bern hat mit Unterstützung von BAFU, Energie-Schweiz, der Konferenz Kantonalen Energiedirektoren sowie Swissolar eine kostenfreie und offen zugängliche Web-Applikation für Blendungsanalysen bereitgestellt. Mit der Web-Anwendung [Blendtool](#) lassen sich Blendungen durch sonnenreflektierende Oberflächen analysieren und kritische Blendereignisse frühzeitig erkennen. So können Planungs- und Installationsfirmen sowie andere Interessierte bereits in frühen Projektphasen Abklärungen vornehmen und ggf. Massnahmen ergreifen. Das [Blendtool](#) hilft somit, das Ausmass und die Relevanz einer möglichen Blendeinwirkungen auf Orte in der Umgebung der Anlage zu bewerten (Kanton Bern, 2023).

### 4.2.3 Standortbedingungen bezüglich Flora und Fauna

Die Erstellung einer alpinen PV-Anlage hat Einfluss auf die ansässige Flora und Fauna. Für die Perimeterwahl müssen im Zusammenhang mit dem UVB frühzeitig die wichtigsten Umweltbelange identifiziert und berücksichtigt werden.

Gemäss den gesetzlichen Vorgaben werden bereits folgende Gebiete ausgeschlossen:

- Moore und Moorlandschaften nach Art. 78 Abs. 5 der Bundesverfassung
- Biotope von nationaler Bedeutung nach Art. 18a Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG)
- Wasser und Zugvogelreservate nach Art. 11 des Jagdgesetzes

Bei Anlagen in Objekten nach Art. 5 NHG (Inventare von Objekten von nationaler Bedeutung) bleibt bei einer Abweichung von der ungeschmälernten Erhaltung die Pflicht zur grösstmöglichen Schonung unter Einbezug von Wiederherstellungs- oder Ersatzmassnahmen bestehen. Wenn die zuständige kantonale Fachstelle des betroffenen Schutzbereiches eine erhebliche Beeinträchtigung des Inventarobjekts nicht ausschliessen kann, ist ein Gutachten der zuständigen Bundeskommission Eidgenössische Natur- und Heimatschutzkommission (ENHK) einzuholen.

Der Art. 71a EnG gesteht den grossen Anlagen zwar eine Standortgebundenheit sowie ein grundsätzlich vorrangiges nationales Interesse zu, mit denen diverse Umweltbelange «übersteuert» werden können.

Aus folgenden Gründen sollte bei der Projektplanung dennoch grösstmögliche Rücksicht auf Schutzaspekte genommen werden:

- Das Tangieren oder Zerstören von Schutzobjekten wird Diskussionen auslösen und kann die Akzeptanz solcher Projekte bei Behörden, Verbänden oder der Bevölkerung gefährden.
- Verminderung des Risikos von Einsparungen
- Imageschaden

Eine frühzeitige Identifizierung von Schutzgebieten auf nationaler, kantonaler, regionaler und kommunaler Ebene ist wichtig. Dies ist heute dank Geoinformationssystemen (GIS) wie z.B. [map.geo.admin.ch](https://map.geo.admin.ch), [open-data.swiss](https://open-data.swiss) oder kantonalen GIS-Abfragen relativ einfach umsetzbar. Ebenfalls sind Waldnutzung und Grundwasserschutzzonen als zentrale Umweltplanungselemente zu betrachten. Weiter gilt es, das Vorkommen von Tieren und Pflanzen abzuklären, die auf der Roten Liste oder der Liste prioritärer Arten geführt werden. Informationen über Tiere und Pflanzen können auch von nationalen Datenzentren für Flora und Fauna, Wildhütern, Naturschutzvereinen oder Jägern bereitgestellt werden. Hinweise zu Kriterien im Bereich Biodiversität oder Landschaft, die zur Ausscheidung konfliktarmer Energieproduktionsgebiete verwendet werden können, sind im [Kriterienkatalog](#) der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) zu finden (SCNAT, 2024).

Bei den Perimeter-Kartierungen von Flora und Fauna im Rahmen der UVB sind im Zusammenhang mit den genauen Anforderungen, beispielsweise in Bezug auf die zu untersuchenden Jahreszeiten, die kantonalen Fachstellen beizuziehen.

## 5. Planung und Bau der PV-Anlage

### 5.1 Geeignete Materialien

Die Bedingungen in den Alpen stellen höhere Anforderungen an die Auswahl der verwendeten Produkte als in tieferen Lagen. Dabei sind insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- Statische mechanische Belastung: Belastung durch diverse Schneelastwirkungen
- Dynamische mechanische Belastung: Druck und Sog durch Wind
- Erhöhte UV-Belastung: Degradation des Verkapselungsmaterials und der Zelleistung
- Belastung durch grosse Temperaturschwankungen

Generell dürften mehrheitlich bifaziale PV-Module verwendet werden, um von der hohen Albedo profitieren zu können. Diese Module bauen in der Regel auf einer Glas-Glas-Architektur auf und verringern im Vergleich zu Glas-Backsheet-Modulen die mechanischen Einwirkungen auf die Solarzellen. Diese Modultechnologie, die hier als Standard für alpine PV-Anlagen betrachtet wird, hat mechanische Eigenschaften, die von folgenden Punkten abhängen:

- Verwendete Materialien: Dickere Gläser und eine geeignete Auswahl des Einkapselungsmaterials erhöhen die tolerierbaren mechanischen Einwirkungen.
- Modulgrösse: Eine Erhöhung der Modulgrösse verringert die tolerierbaren mechanischen Einwirkungen.
- Steifigkeit des Rahmens: Ein höherer Modulrahmen oder allenfalls auch ein Stahlrahmen kann die Steifigkeit des Moduls erhöhen.
- Die zulässigen mechanischen Einwirkungen auf ein Modul sind in der Regel im Datenblatt oder in der Montageanleitung angegeben. Eine Belastungsprüfung (Mechanical Load) der finalen Montageart inkl. PV-Modul wird empfohlen.

Bei der Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit der Module ist die Art der Montage wichtig, insbesondere die Anzahl und die Position der Befestigungspunkte. Geeignete Montagearten werden im Allgemeinen vom Hersteller angegeben, und er spezifiziert, welche mechanischen Belastungen bei welcher Montageart zulässig sind. Es wird empfohlen, einen Rahmen zu verwenden, auf dem Schneeablagerungen abrutschen und sich nicht in Form von Eis/Anfrierungen am Rahmen kumulieren können.

Die Materialien sind im Gebirge intensiverer UV-Strahlung ausgesetzt als in tiefen Lagen. Dies bewirkt eine erhöhte Belastung der exponierten Kunststoffteile, was zu vorzeitiger Alterung bzw. Degradation führen kann. Dies betrifft Anschlussdosen, Kabel, Steckverbindungen, aber auch das Einkapselungsmaterial von PV-Modulen. Eine vorzeitige Degradation kann zu Funktionsstörungen (z.B. Isolationsfehler), Beschädigung der Module (Delamination) oder Leistungsreduktion (z.B. aufgrund Vergilbung des Einkapselungsmaterials) führen. Kunststoffteile sollen daher vor einer direkten Exposition geschützt werden, oder eine geeignete Materialisierung aufweisen. Ferner sind spezifische UV-Belastungs-Tests während der Auswahlphase der Module empfehlenswert.

Aufgrund der höheren Einstrahlung und Albedo im Gebirge kann der Modulstrom bei schönem Wetter an einem Tag über mehrere Stunden hinweg deutlich über dem STC-Wert liegen. Bei der Auswahl der elektrischen Komponenten und Leiter (auch im Modul, wie bei z.B. Bypassdioden) ist dies zu berücksichtigen, um Schäden zu vermeiden. Als Richtwert kann das Nennleistungsverhältnis zwischen AC und DC des Wechselrichters herangezogen werden. Wenn beispielsweise der Faktor für den Wechselrichter auf einen Wert von 1,2 ausgelegt wird, sollte dieser Faktor auch für die Berechnung der weiteren Komponenten verwendet werden.

Eine spezifische IEC-Norm für die erhöhten Materialansprüche alpiner Standorte gibt es noch nicht. Es empfiehlt sich daher, die wesentlichen Belastungstests nach IEC 61215 und IEC 61730 mit erhöhten Belastungen bzw. erhöhten Prüfdauern durchzuführen. Weiter ist sicherzustellen, dass die Module und auch die weiteren Betriebsmittel für den Einsatz auf der Höhe des Projektstandortes zugelassen sind (typisch 2'000 bis 3'000 m.ü.M.). Die Standardfreigaben gehen typischerweise bis 2'000 m.ü.M.

Es gibt keine besonderen Anforderungen an die Wahl der Zelltechnologie. Für den Fall, dass der untere Teil der Module eine länger dauernde Bedeckung mit Schnee erfahren kann (wie in Kapitel 5.5 beschrieben), sollten Module gewählt werden, die den Verlust durch Teilabschattung minimieren, und die Verschaltung sollte dies ebenfalls berücksichtigen.

## 5.2 Ungehinderte bifaziale Nutzung

Ein Vorteil von hoch gelegenen Anlagen ist die hohe Albedo, die durch die Schneedecke in den Wintermonaten verursacht wird. Um die Produktion zu maximieren, müssen die Strukturen so konzipiert werden, dass die Verschattung und insbesondere die Teilverschattung der Modulrückseite auf ein Minimum reduziert wird.

## 5.3 Empfehlung zu Neigung und Ausrichtung

Die Wahl von Ausrichtung und Neigung der Module sowie der Abstand zwischen den Reihen stellen einen Kompromiss zwischen der Maximierung des Flächenertrags und der Maximierung des spezifischen Ertrags dar. Vorhandene Rahmenbedingungen und Ziele (wie z.B. der Winterstromertrag, die angestrebte Gesamtproduktion und die Eigenschaften des Geländes) spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Die optimale Ausrichtung und Neigung der PV-Module hängt von den Eigenschaften des Standorts ab (naher und ferner Schatten, Geländeeigenschaften, Wahl der Reihenoptimierung) und muss standortspezifisch ermittelt werden. Im Allgemeinen ist die optimale Ausrichtung nach Süden. Die optimale Neigung hängt von der zu optimierenden Variable ab. Um den jährlichen Ertrag einer Anlage zu optimieren, die nach Süden ohne Verschattung ausgerichtet ist, ist eine Neigung von ca.  $36^\circ$  am besten geeignet. Um jedoch den winterlichen Ertrag zu optimieren, ist eine Neigung von ca.  $\geq 60^\circ$  am besten. Da alpine PV-Anlagen mit Fokus auf Winterstromerzeugung gebaut werden, dürfte die optimale Neigung daher generell bei  $60^\circ$  und höher liegen, was bei entsprechendem Fallraum eine weitestgehende Freiheit von Schneebedeckung ermöglicht.

Bei der Mehrheit der Anlagen mit Modultischen dürften die Tische (zumindest in steilerem Gelände) entlang der Höhenlinien errichtet werden. Dabei sind die Frontseiten der Module im Wesentlichen in Fallrichtung ausgerichtet. Der Verschattungswinkel zwischen den Modulreihen hängt von der Hangneigung, der Modulneigung und vom Reihenabstand ab. Für die Festlegung des optimalen Reihenabstandes, die in Kapitel 5.4 beschrieben wird, ist in erster Linie die Hangneigung massgebend.

Falls die Montagestruktur die Möglichkeit dazu bietet, kann eine azimutabhängige Modulneigung (ggf. sektorenweise) Vorteile in Bezug auf den spezifischen Ertrag bringen.

## 5.4 Zweckmässiger Reihenabstand

Bei der Festlegung eines optimalen Reihenabstandes zur Erreichung der Projektziele im Hinblick auf Gesamtleistung und Ertrag spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle. Die Verwendung eines Verschattungswinkels wie in Abbildung 8 dargestellt ist dabei von grosser Bedeutung.

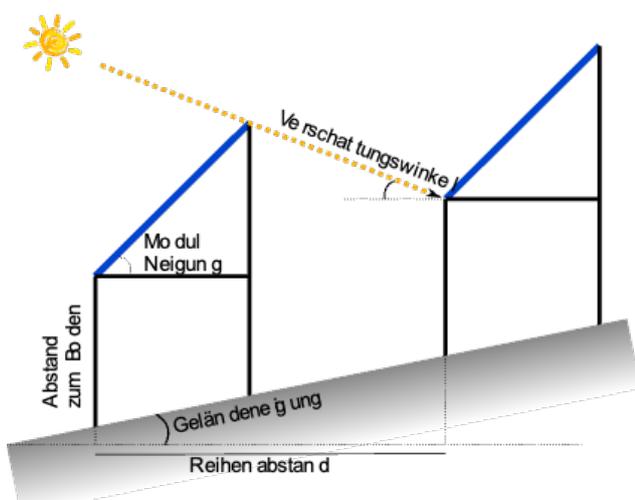


Abbildung 8: Verschattungswinkel, Abstand zum Boden, Modulneigung, Geländeneigung und Reihenabstand bei alpinen PV-Anlagen. Abbildung von Basler & Hofmann AG (2024)

Weitere relevante Parameter in Bezug auf den Reihenabstand sind:

- Modul- und Hangneigung. Je höher die Neigung des Geländes, desto enger können die Reihen bei gleichem Verschattungswinkel stehen. Der Einfluss der Modulneigung ist etwas geringer.
- Ausrichtung des Geländes. Bei von Süden abweichender Ausrichtung wird aufgrund des tieferen Sonnenstandes ein etwas höherer Reihenabstand optimal sein.
- Homogenität des Höhenlinienbildes
- Erforderlicher Gesamtjahresertrag in Bezug auf die verfügbare Landfläche
- Erforderlicher spezifischer Winterstromertrag
- Tolerierbare gegenseitige Verschattung der Modulreihen (z.B. im Hinblick auf entstehende Teilverschattung der Module mit entsprechender thermischer Belastung sowie geringerem spezifischem Ertrag)
- Nah- und Fernhorizont; Zeiten, in denen sich die Sonne unter dem Horizont befindet, müssen bei der Festlegung des Reihenabstandes nicht berücksichtigt werden.

Für nach Süden ausgerichtete Modulreihen dürfte der optimale Verschattungswinkel ca. 10–17° betragen. Dies ermöglicht einen guten spezifischen Ertrag sowohl auf die installierte Leistung als auch auf die überbaute Landfläche bezogen und einen moderaten Anteil an Teilverschattung.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Ertrag und die jährliche Energieproduktionsdichte sowie die Energieproduktionsdichte im Winterhalbjahr für bifaziale Module. Die Module sind entweder nach Süden oder 45° West ausgerichtet, der Horizont wurde vernachlässigt, und der Standort befinden sich auf flachem Gelände auf dem Weissfluhjoch.

**Hinweis:** Diese Abbildungen vernachlässigen eine mögliche Ablagerung von Schnee auf den Modulen. Es wird in jedem Fall empfohlen, die Module mit einer Mindestneigung von 60° zu installieren, damit der Schnee schnell abrutschen kann und somit die Ausfalltage aufgrund von Schnee minimiert werden, die sich negativ auf die tatsächliche Winterproduktion auswirken können.

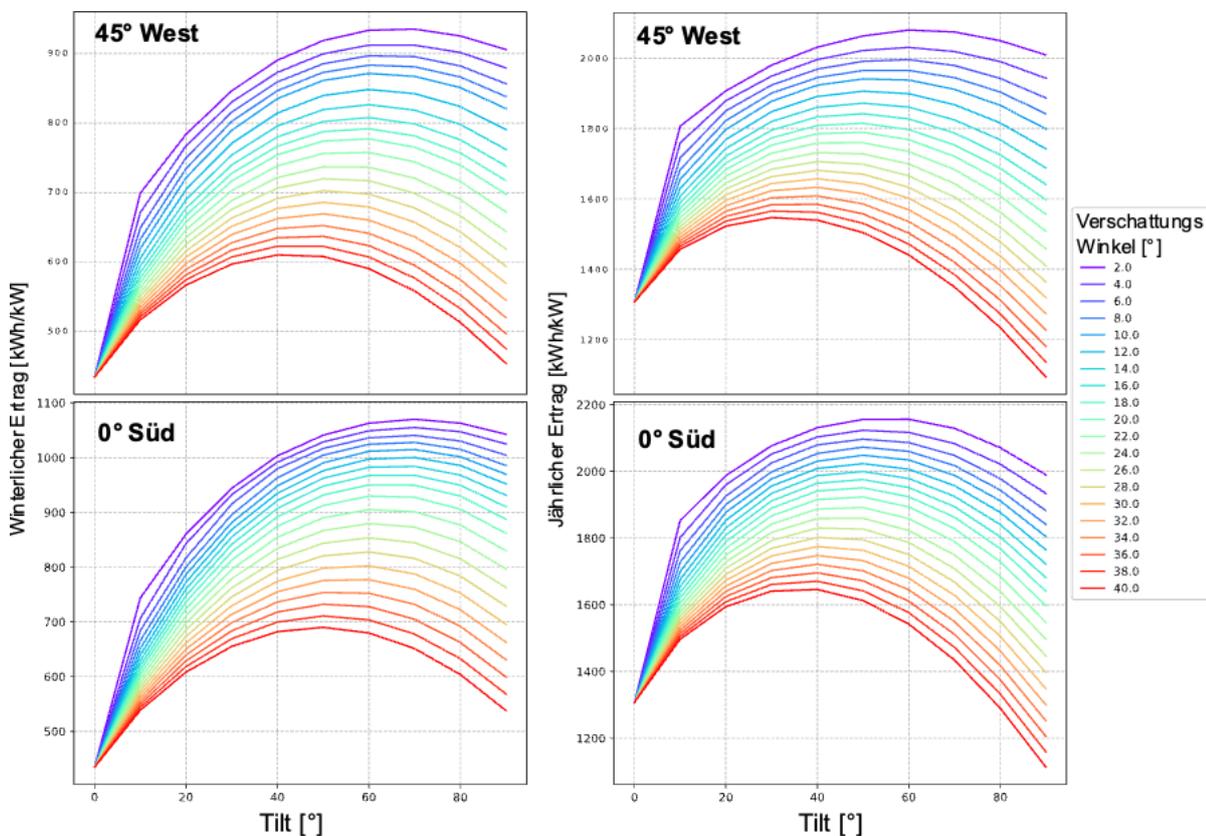


Abbildung 9: Winterhalbjährlicher und jährlicher Ertrag als Funktion der Modulneigung (Tilt) und des Verschattungswinkels für bifaziale, nach Süden oder 45° West ausgerichtete Module auf fla-chem Gelände (PVsyst Simulation am Standort: Weissfluhjoch). Abbildung von Planair SA (2024)

## 5.5 Abstand zum Boden

In den Wintermonaten bildet die Schneeschicht, die vom Modul abrutscht, einen Wall am Fuss der Anlage, der sich zum Teil zur ursprünglichen Schneedecke addiert. Die Höhe der Unterkante der Module ist daher auf die zu erwartenden Schneehöhen abzustimmen, damit die Module einerseits frei von Schnee bleiben und andererseits – bei grösserer Hangneigung – nicht von Kriechschnee mitgerissen werden. Die erforderliche Modulhöhe hängt von der Neigung des Geländes (Fallraum) und dem Anstellwinkel der Module ab. Je vertikaler die Module installiert werden, desto weniger Schnee wird sich anlagern und abrutschen. Ebenfalls zu beachten sind Schneeverwehungen, die wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben zu wesentlich mächtigeren Schneeanstimmungen führen können.

In Regionen und Höhenlagen mit erheblichen zu erwartenden Schneehöhen wird in Bezug auf den Schnee ebenfalls ein Bodenabstand von mindestens 2,5 m empfohlen, der jedoch an die spezifischen Bedingungen des Ortes angepasst werden muss.

Darüber hinaus kann es an manchen Standorten erforderlich sein, eine bestimmte Höhe (ca. 2,4 m) über dem Boden zu erreichen, um den Durchgang von Vieh und Wildtieren zu gewährleisten. Weiter ist es wichtig, dass Maschinen und Fahrzeuge für bestehende Nutzungen wie z.B. Landwirtschaft weiterhin unter der Konstruktion agieren können.



Abbildung 10: Testanlage NalpSolar nach Design von Basler & Hofmann AG. Version für steiles Gelände mit erhöhter Belastung. Abbildung von Axpo AG

## 5.6 Auslegungsverhältnis Wechselrichter

Aufgrund der intensiven Strahlung in der Höhe, des Albedoeffekts, kalter Temperaturen und ggf. der Verwendung bifazialer Module sollten die Wechselrichter im Verhältnis zur normierten DC-Leistung der Vorderseite grösser dimensioniert werden als bei einer Anlage im Mittelland. Abbildung 11 zeigt Ergebnisse der Testanlage «SedrunSolar» von energia alpina und ZENDRA AG sowie eine «Heatmap» der normalisierten PV-Modulleistung. Es ist gut ersichtlich, dass die Modulleistung (STC) häufig überschritten wird (orange und rote Bereiche).

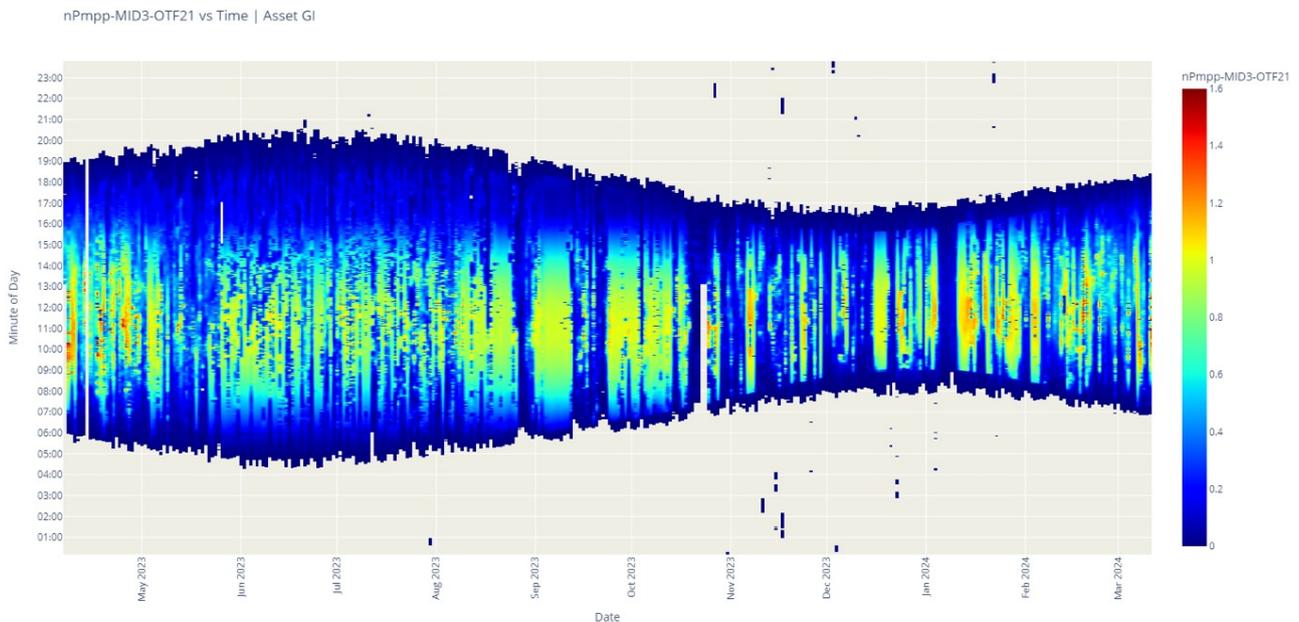


Abbildung 11: «Heatmap» der normalisierten Leistung eines PV-Moduls (mittlerer Tisch der Test-anlage SedrunSolar) im Zeitraum April 2023 bis März 2024. Minütliche IV-Kennlinien-Messung. Abbildung von energia alpina, ZENDRA AG, gantner instruments (April 2024)

Die Testanlage in Sedrun verfügt über drei Tische zu je acht im Querformat montierten bifazialen Glas-Glas-Modulen (108 Halbzellen). Die mittels einer minütlichen IV-Kennlinien-Messung getrackten Module befinden sich in der Mitte des mittleren Tisches (rot markiert, obere und untere Reihe)



Abbildung 12: Erste 20 Modultische der Sedrun Solar mit bifazialen Glas-Glas-Modulen (108 und 144 Halbzellen). Abbildung von Sedrun Solar AG, ZENDRA AG (November 2024)

Eine angemessene Dimensionierung des AC-/DC-Verhältnisses (Verhältnis zwischen der AC-Leistung des Wechselrichters und der DC-Nennleistung der Module) muss des Weiteren Neigung, Ausrichtung, Reihenabstand, Aufstellhöhe und Verschaltung der Module berücksichtigen. Eine zu knappe Auslegung des Wechselrichters kann insbesondere im Winter zu deutlichen Ertragseinbußen durch Abregelung führen. Für Standorte im Mittelland wird ein Nennleistungsverhältnis zwischen AC und DC von ungefähr 0,8 vorgeschlagen. Es ist bekannt, dass dieser Wert bei PV-Kraftwerken in den Alpen deutlich grösser sein muss, aber es bestehen bisher wenig Erfahrungen und Kenntnisse, wie hoch der Wert konkret sein soll. Eine optimale Dimensionierung AC/DC dürfte sich bei hochalpinen, bifazialen PV-Anlagen im Bereich von 1,1 bis 1,3 bewegen und ist unter Beachtung projektspezifischer Rahmenbedingungen festzulegen. Für konkretere Aussagen sind weitere Messungen und Auswertungen notwendig. Die Spannweite der aktuellen Ausgangslage zur Dimensionierung zeigen die zwei nachstehend gezeigten Ergebnisse der Berner Fachhochschule (BFH) und der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW). Die von der BFH berechneten Werte basieren auf Meteonorm und dem Auslegetool PVsyst. Die ZHAW verwendet Messungen der Versuchsanlage «Totalp» und berechnet daraus die Produktionsverluste in Abhängigkeit vom Nennleistungsverhältnis (NLV) AC/DC. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen deutlich die unterschiedlichen Verluste in Bezug auf das NLV. Weil für alpine PV-Anlagen die Produktion im Winterhalbjahr relevant ist, wird dies explizit gezeigt.

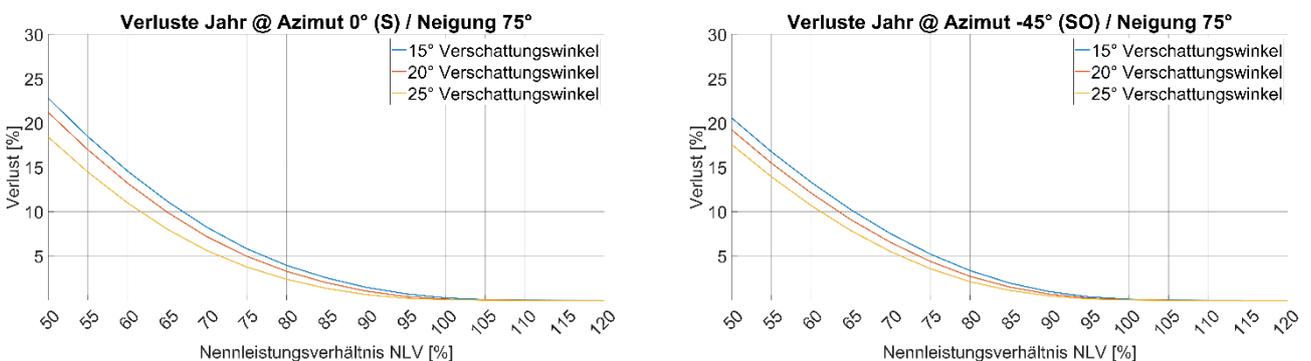


Abbildung 13: Berechnung der Produktionsverluste pro Jahr für fix montierte Reihen mit bifazialen Modulen und 75° Neigung, links mit der Ausrichtung gegen Süden und rechts mit der Ausrichtung gegen Südosten. Abbildung von BFH mit PVsyst und Wetterdaten von Meteonorm (Januar 2024)

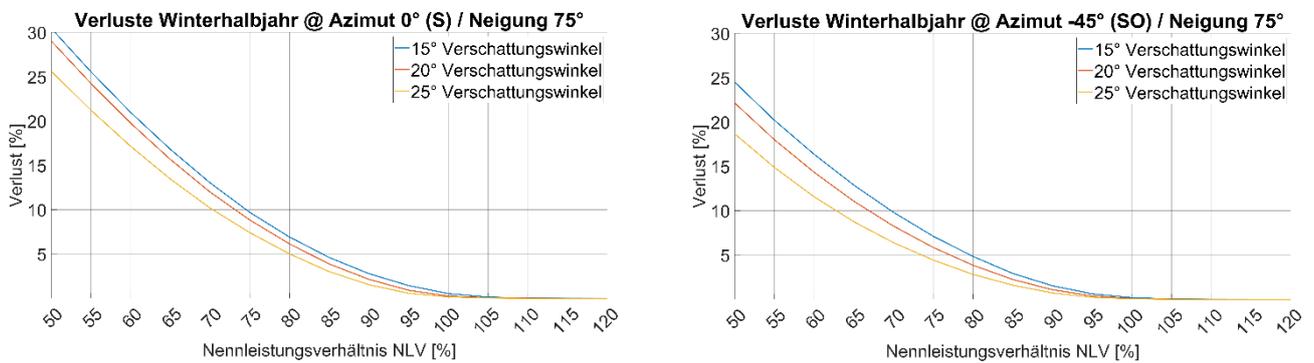


Abbildung 14: Berechnung der Produktionsverluste pro Winterhalbjahr für fix montierte Reihen mit bifazialen Modulen und 75 ° Neigung, links mit der Ausrichtung gegen Süden und rechts mit der Ausrichtung gegen Südosten. Abbildung von BFH mit PVsyst und Wetterdaten von Meteonorm (Januar 2024)

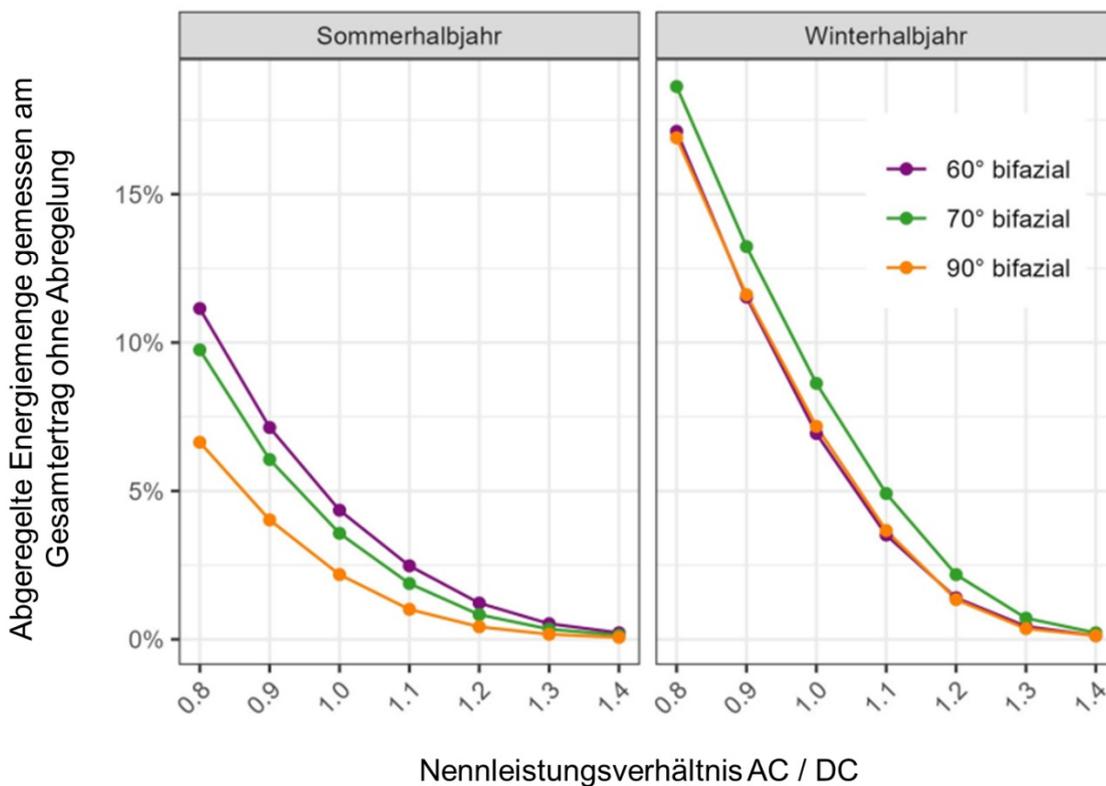


Abbildung 15: Berechnung der Produktionsverluste (abgeregelte Energiemenge) pro Winterhalbjahr für fix montierte, nach Süden ausgerichtete, bifaziale Solarmodule mit drei unterschiedlichen Neigungen. Links für das Sommerhalbjahr und rechts für das Winterhalbjahr. Abbildung von ZHAW basierend auf Messdaten der Testanlage Totalp (Januar 2024)

Der komplette [«Erkenntnisbericht zur Versuchsanlage Davos»](#) der ZHAW ist online einsehbar (Anderegg, Strel, & Rohrer, 2023).

Die unterschiedlichen Beträge bei den abgeregelten Energiemengen lassen sich teilweise wie folgt erklären:

- Auf der Totalp in Davos sind die Solarmodule in einer Reihe angeordnet, somit gibt es keine Reihenverschattung, und die Umgebung ist frei besonnt.
- Die Auswertungen der Totalp wurden mit zeitlich hoch aufgelösten Messwerten (10-Sekunden-Intervall) durchgeführt, die Simulationen der BFH hingegen basieren auf Stundenmittelwerten, wodurch eine starke Glättung der Maximalwerte zu erwarten ist.

- Die Berechnungen der BFH simulieren ein grosses Solarfeld mit mehreren Reihen mit drei verschiedenen Abständen. Dadurch ist der Boden vor und hinter einer Reihe erheblich beschattet, wodurch die Leistung und der Energieertrag vermindert werden.

Inwiefern Simulationen die Situation in der Realität bei extremen Umgebungsbedingungen korrekt abbilden können, muss anhand von Messungen erst noch validiert werden. Andererseits ist es ebenfalls schwierig, auf Basis einer kleinen Testanlage die Auswirkungen der Reihenverschattung korrekt zu berücksichtigen. Wie weit zusätzliche Gründe für die Abweichungen relevant sind, müssen weitere Untersuchungen zeigen. In jedem Fall ist es unerlässlich, die standort- und projektspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen, auch lokale Messungen können weiterhelfen.

## 5.7 Kabelführung

Rohre und Kabeltrassen, die für oberirdisch zugängliche Kabelführungen verwendet werden, müssen aus UV-beständigem Material bestehen und dürfen nicht von Wildtieren oder Vieh beschädigt werden können. Es ist auf eine möglichst zugfreie Verlegung der Kabel in Bezug auf thermische Dilatation, Gravitation und Bewegungen der Kabeltrassen zu achten. Eine direkte Verlegung von Kabeln ins Erdreich ist nur für Kabel zulässig, die dafür explizit freigegeben sind.

## 5.8 Personen, Tiere und bestehende Nutzungen

Das Gebiet, in dem alpine PV-Anlagen installiert werden, wird in der Regel für die Öffentlichkeit zugänglich sein. Allfällige Wander- oder Verkehrswege sowie Besucherpfade durch die Anlage sollen daher klar gekennzeichnet sein. Gleichzeitig ist der Hinweis anzubringen, dass der Rest der Anlage nicht betreten werden darf und die Berührung elektrischer Komponenten wegen Hochspannung unbedingt zu vermeiden ist. Dieser Leitfaden empfiehlt die klare Markierung einer offiziellen Route für Besucherinnen und Wanderer.

Eine intuitive Lösung wäre das Umzäunen des gesamten Perimeters, denn Zäune können verschiedenen Zwecken dienen, unter anderem:

- **Schutz der Anlage:** Anlagen vor unbefugtem Eindringen schützen und Vandalismus oder Diebstahl verhindern
- **Schutz vor Wildtieren:** Wildtiere daran hindern, Komponenten, insbesondere Kabel und Halterungen, zu beschädigen
- **Sicherheit der Öffentlichkeit:** unbefugten Zugang zu Bereichen verhindern, die für die Öffentlichkeit gefährlich sind, wie z.B. elektrische Geräte
- **Standortabgrenzung:** Grenzen des Standorts klären, um Konflikte mit umliegenden Aktivitäten wie Wandern oder Skifahren zu vermeiden

Generell sollten einzelne Elemente mit geeigneten Massnahmen gesichert werden. Das weitläufige Einzäunen der PV-Anlage ist aus verschiedenen Gründen nicht empfehlenswert. Einerseits führen die Zäune zu einer Beeinträchtigung der lokalen Fauna, von Wanderwegen und anderen Alpinsportarten, und andererseits muss beachtet werden, dass im alpinen Gebiet stark variierende Umweltbedingungen, insbesondere im Winter, eine gewöhnliche Umzäunung nicht möglich machen.

Grundsätzlich müssen die Anlagen mittels angemessener Massnahmen derart geschützt und ausgestaltet werden, dass von ihnen keine Verletzungsgefahr für Menschen und Tiere ausgeht. Sensible Teile der Anlagen dürfen nicht ohne Weiteres berührbar sein, insbesondere elektrische Kabel oder Schaltelemente. Anlagenteile, die durch Tierverbiss gefährdet sein können, müssen ebenfalls entsprechend geschützt werden.

Wie in Kapitel 2 Anspruchsgruppen beschrieben wird, besteht in den allermeisten Gebieten bereits eine Nutzung. In Bezug auf die Gestaltung der PV-Anlage ist es daher von grosser Bedeutung, gewisse Aspekte dieser Nutzung ebenfalls in die Planung einfließen zu lassen. Wird das Gebiet beispielsweise im Sommer als Weide für die Viehzucht genutzt, ist es wichtig, die Montagestruktur genügend hoch zu gestalten, sodass die Tiere sich frei darunter bewegen können. Auch die Spurbreiten und Höhen von möglichen Fahrzeugen und Maschinen für bestehende Nutzungen müssen mitberücksichtigt werden. Es gibt ggf. weitere mögliche Synergien mit der bestehenden Nutzung wie z.B. die Integration von Wassertränken oder Wasserzuleitungen in die Tragstruktur der PV-Anlage.

## 5.9 Blitzschutz, Erdung

Aufgrund der Höhenlage und der Ausdehnung der Anlage ist mit Blitzeinschlägen zu rechnen. Die elektrischen Installationen sind somit gegen Überspannungen zu schützen. Ebenfalls erforderlich ist eine Erdung der metallischen Montagestrukturen zum Schutz vor Stromschlag bei Berührung. Für die Auslegung von Blitzschutz und Erdung sind entsprechende Fachleute beizuziehen.

**Risikoanalyse:** Planung und Ausführung von Blitzschutzanlagen müssen risikobezogen ausgeführt werden. Abgesehen von Gipfellagen ist im Alpenraum eine mittlere Einschlagwahrscheinlichkeit zu erwarten. Die nachstehende Karte zeigt die Häufigkeit der Blitzeinschläge bezogen auf 1 km<sup>2</sup> pro Jahr.

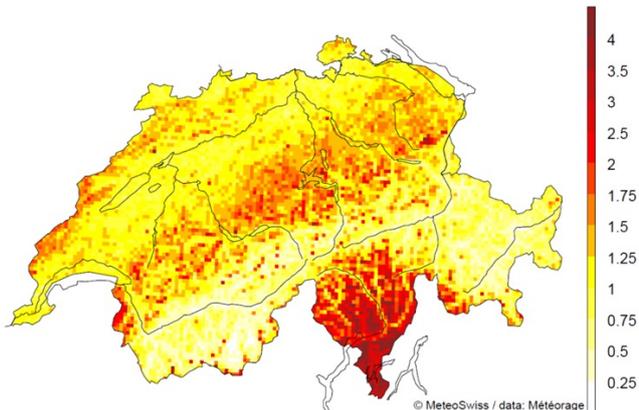


Abbildung 16: Anzahl Blitzeinschläge pro Jahr und Quadratkilometer in der Schweiz für die Periode 2000 bis 2020. Nur die Hauptblitze, ohne Nebenblitze. Abbildung von © MeteoSchweiz (April 2024)

Für den zentralen Alpenbogen gelten die Werte 1–2 Blitzeinschläge pro Jahr. Dies ist vergleichbar mit dem schweizerischen Mittelland. Das Tessin und die Voralpen hingegen verzeichnen deutlich mehr Einschläge pro Jahr. Was sich im Vergleich zum Mittelland deutlich unterscheidet, ist die Gefahr von oberflächlich abfließenden Erdungsströmen. Damit ist vor allem bei Situationen mit trockenen Felsformationen zu rechnen. Es sind standortspezifische Erdungs- und Blitzschutzmassnahmen zu treffen.

**Schutzziele:** Oberste Priorität haben der Schutz von Lebewesen, zudem sind die technischen Anlagen gegen Überspannungen verursacht durch Blitzeinschläge und Schalthandlungen zu schützen. Kleinere, räumlich begrenzte Materialschäden im Bereich von direkten Einschlägen können in Kauf genommen werden. Geschützt werden müssen, soweit wie angemessen möglich, die Anlage als Gesamtes, die Wechselrichter, das Betriebsgebäude einschliesslich Installationen und Kommunikationseinrichtung, die Trafostationen und der Netzanschluss. Bei Gewittern und Blitzeinschlägen bleibt im Zusammenhang mit Schritt- und Berührungsspannungen ein Restrisiko. Dieses kann im Zusammenhang mit dem Schutz von Personen mittels Beschilderung reduziert werden.

**Lösungsansätze:** Für den Blitz- und Überspannungsschutz gibt es zahlreiche Schutzmassnahmen, die unabhängig vom Standort eingesetzt werden können. Trennsysteme mit Fangstangen sind aufgrund der grossen Ausdehnung der Solarmodulfelder von PVA in der Regel nicht realisierbar. Deshalb wird die Lösung der Vermaschung und zahlreicher, im Solarfeld verteilter Erdungen als für viele Fälle geeignete Lösung betrachtet. Der Blitzstrom soll so nahe wie möglich beim Einschlagpunkt in den Boden abgeleitet werden. Bei den typischerweise vielen Metallstützen kann das einfach realisiert werden, indem jede Stütze lokal als Erder dient.

Wenn, zum Beispiel als Folge von trockenen Felsformationen, die Fundamenterdung bei den Stützen ungenügend sein kann, ist der Potenzialausgleich zwischen den einzelnen Stützen durch blitzstromtragfähige Verbindungen auszuführen.

Allfällige im Solarmodulfeld verteilt angebrachte Überspannungsableiter sind mit einem Fernmeldekontakt für die Überwachung ihres Zustands auszurüsten.

Aufgrund fehlender Erfahrungswerte vergleichbarer Anlagen im alpinen Raum und der Tatsache, dass Bodenbeschaffenheit sowie Topologie stark variieren, ist eine abschliessende Planung des Blitzschutzes schwierig. Eine allfällige Nachbesserung kann in diesem Lernprozess nicht ausgeschlossen werden.

## 5.10 Vor- und Nachteile verschiedener Foundationstypen

Jede Unterkonstruktion der PV-Panels muss in der Erde verankert werden, um die auftretenden Lasten aus Schnee und Wind aufzunehmen. Im Allgemeinen kann gesagt werden: Je steiler das Gelände, desto anspruchsvoller die Arbeiten für die ausführenden Fachkräfte, aber auch desto höher die Anforderungen an die Geräte und Maschinen.

Für alpine PV-Anlagen kommen die folgenden Systeme mit ihren Vor- und Nachteilen in Frage:

### **Erdschrauben**

Vorteile	Nachteile
Schnelle, günstige Montage	Aufnahme von Momenten limitiert
Einfacher Rückbau	Limitiert in Bezug auf Bodentypen (Bei felsigem Untergrund kommt die Methode rasch an ihre Grenzen)
Geringe Lärmbelastung (ausser, wenn vorgebohrt werden muss)	Verzicht auf Verzinkung führt zu deutlich grösserem Materialaufwand / grösseren Maschinen
	Limitierte Anzahl von Grössen
	Verfügbarkeit grosser Mengen an grossen Schrauben gegeben?

### **Zementfundation**

Vorteile	Nachteile
Ermöglicht Reduktion der Stützenanzahl	Transport Zement (Ortsbeton meistens keine Option) führt zu Lärm- und Umweltbelastungen
Von Seilbahnen und anderen Bauten bekannt	Visuelle Belastung (wenn nicht überdeckt)
	Aushub → Transport, Deponie
	Nach Rückbau wird Füllmaterial benötigt → Transport
	Eingriff für Umwelt meist höher als Mikropfähle, Felsanker, Erdschrauben

## Ramppfähle



Abbildung 17: Maschine für das Rammen von Profilen. © R&L Co., Ltd. <http://www.rlsolar.jp> (April 2024)

Vorteile	Nachteile
Schnelle, günstige Montage	Rasch Probleme in Boden mit Blöcken oder anstehendem Felsen
Einfacher Rückbau	Rammen grösserer Profile in Steilgelände ist eine Herausforderung
Verzinkung kann weggelassen oder auf oberstes Stück limitiert werden	Verzicht auf Verzinkung führt zu deutlich grösserem Materialaufwand / grösseren Maschinen

Auf Landwirtschafts- und sonstigen Flächen im Aussenbereich werden PV-Module üblicherweise mittels verzinkter Stahlprofile im Boden verankert, um die Profile besser gegen Umwelteinflüsse und Korrosion zu schützen. Von diesen Berührflächen der Stahlprofile kann Zink jedoch über Korrosionsprozesse in den Boden gelangen. Alpine Ökosysteme sind einmalig, aber auch sehr empfindlich, insbesondere auch die Böden. Um die alpinen Böden möglichst zu schonen, wird empfohlen, auf verzinkte Stahlprofile zu verzichten.

## Mikropfählung/Bohranker/Felsanker



Abbildung 18: Bohrbagger Morath BB7000-7FP zur Mikropfählerstellung. © Gasser Felstechnik AG (April 2024)

Vorteile	Nachteile
Wenig sichtbarer Eingriff	Benötigt ebenfalls Mörtel/Beton/Injektionsmasse. Benötigtes Materialvolumen von Untergrund abhängig
Erprobte Methode im Bauwesen (Lawinenverbauung)	Rückbaubarkeit gut, sofern unter der Oberfläche abgetrennt werden kann. Vollständiger Rückbau sehr aufwendig und umweltbelastend (Loch, Aushubmaterial, Rekultivierung). Die Rückbauoptionen sind von den Pfahllängen abhängig.

## 5.11 Montagestrukturen

Dieses Kapitel soll einen Überblick über mögliche Montagestrukturen geben. Die Liste ist dabei keineswegs abschliessend, sondern eine Zusammenstellung der Autorenschaft. Die Erläuterungen zur Beschreibung der Systeme, aber auch die Vorteile und Herausforderungen wurden grösstenteils von den Systemlieferanten übernommen. Aufgrund der oft noch fehlenden Erfahrungen mit den Systemen im alpinen Raum ist es zurzeit schwierig, die angegebenen Vor- und Nachteile zu quantifizieren.

Bekannt sind heute typischerweise die folgenden drei Montagestrukturen für alpine PV-Anlagen:

- Tischsysteme
- Seilsysteme
- Vertikale Systeme

In diesem Kapitel werden jeweils zwei Systeme aus den jeweiligen Kategorien genauer betrachtet.

**System:** ALPIN QUATTRO®

**Anbieter:** ZENDRA AG



Abbildung 19: ALPIN QUATTRO® Generation 4: Vorinstallation von 20 ALPIN QUATTRO® Tischen im Projekt SedrunSolar. Abbildung von Sedrun Solar AG, ZENDRAAG (Dezember 2024)

Die Systemlösung ALPIN QUATTRO® ist eine logistikoptimierte, robuste und alpintaugliche Montagestruktur für bifaziale PV-Module mit 108 oder 144 Halbzellen (Zellgeneration M10). Die minimalinvasive Verankerung mit vier kurzen Pfählen pro Tisch vermeidet Bodenschäden und erlaubt einen flexiblen Einsatz von Bohrequipen mit leichtem Bohrgerät zur Sicherung des Baufortschritts. Die identische Tischgrösse der beiden Konfigurationen für kleine und grosse PV-Module ermöglicht eine hohe Flexibilität in der Modulbeschaffung, da die Layoutplanung bei Änderung des Modulformats unverändert bleibt.

#### **Vorteile des Systems:**

- Konfigurierbares Komplettsystem mit digitaler Planungs- und Bauunterstützung
- Kompatibel für Helikopter- und Seilbahnlogistik
- Entkoppelter Montageprozess für Tragwerk (Primärstruktur) und den vormontierten Modultisch (Sekundärstruktur) zur Reduktion des Wetterrisikos
- Integrierter Niveausgleich im Verankerungssystem

#### **Herausforderungen des Systems:**

- Einhalten von maximalen Windgeschwindigkeiten für die Endmontage des vormontierten oberen Teils der Montagestruktur (Modultisch, Sekundärstruktur)
- Im Falle von grossen Geländeunebenheiten werden diese durch unterschiedliche Stützenlängen ausgeglichen (benötigt digitalen Planungs- und Bauprozess)
- Bauhöhe erfordert ein integriertes Wartungs- und Sicherheitskonzept (z.B. Modulaustausch) und die fachgerechte Verwendung der Wartungstools

**System:** GEV Alpin Solar System

**Anbieter:** Green Energy Venture AG



Abbildung 20: Rendering GEV Alpin Solar System. Abbildung von Green Energy Venture AG (September 2023)

Das durch Green Energy Venture entwickelte System wurde speziell für alpine Gebiete mit Sömmerungsbetrieb entwickelt. Es ist 100 Prozent beton- und zinkfrei und minimiert so den Einfluss auf die Natur. Bei der Systementwicklung wurde die Thematik Doppelnutzung fokussiert, sodass eine Alpbewirtschaftung weiterhin möglichst uneingeschränkt realisiert werden kann. Der in Gstaad verbaute Prototyp dient der Validierung für den zuverlässigen Langzeiteinsatz des finalen Systems.

**Vorteile des Systems:**

- Kein Verbau von Beton notwendig
- Sömmerungsbetrieb weiterhin möglich: Kühe können sich ungestört innerhalb und unterhalb der Anlage bewegen
- Hohe Lastaufnahme (Naturgefahren) möglich

**Herausforderungen des Systems:**

- Limitierte Anpassungsfähigkeit in stark kuppertem Gelände
- Verhältnismässig hohe Anzahl an Stützen erfordert viele Verankerungen

**System:** Kompaktsolareseil-System KSS

**Anbieter:** Inauen-Schätti AG



Abbildung 21: Demonstrationsanlage des Kompaktsolareseil-Systems auf dem Firmengelände der Inauen-Schätti AG.  
Abbildung von Inauen-Schätti AG (April 2024)

Die innovative Seilkonstruktion ermöglicht eine Optimierung der Stützenanzahl und dadurch einen minimalen Eingriff in die Natur. Das Abspannungs- und Lastverteilungskonzept an den Stützen und Seilen ist gut geeignet im Gebirge, bei hohen Windlasten und generell in unstemem Gelände. Aufgrund der grosszügigen Bodenabstände ist eine alpwirtschaftliche Nutzung weiterhin möglich, und die Bewegungsfreiheit der Tiere wird nur minimal beeinträchtigt.

**Vorteile des Systems:**

- Schnelle und kostensparende Modulmontage durch innovatives Aufhängesystem, das gegenüber anderen Systemen weniger Bohrarbeiten und zudem keine hochpräzise Positionierung der Bohrungen benötigt
- Keine Betonfundamente, was den Rückbau der Anlage erleichtert
- Durchdachtes Konzept zur Integration der PV-Module und Wechselrichter sowie für die Überwachung und den Unterhalt

**Herausforderungen des Systems:**

- Montage erfordert Systemspezialisten
- Stützen sind in einer Linie zu positionieren, wobei Bautoleranzen berücksichtigt werden können
- Starke Neigungsänderungen in Längsrichtung (System wurde für Neigungen bis 45° konstruiert)

**System:** Solar Wings

**Anbieter:** Bartholet Maschinenbau AG



Abbildung 22: Visualisierung System Solar Wings auf einer Hochebene. Abbildung von Bartholet Maschinenbau AG (April 2024)

Das System Solar Wings wurde für den Einsatz auf Industriebenen, Parkplätzen, Landwirtschaftsflächen, Felswänden und Hochebenen entwickelt. Die Module werden mittels einer seilbasierten Tragkonstruktion befestigt. Zusätzlich kann ein Steuerseil die Module entlang einer Achse der Sonneneinstrahlung nachführen. Bei starkem Wind kann das System eine Position einnehmen, die die Windkräfte auf die Konstruktion verringert. Die Akkumulation von Schnee kann durch eine Schneeabwurfposition verhindert werden.

**Vorteile des Systems:**

- Substanzieller Mehrertrag dank Sonnennachführung möglich
- Sehr leichte Bauweise ermöglicht es, grosse Distanzen ohne Stützen zu überwinden
- Die Bodenfläche unter der Installation kann uneingeschränkt genutzt werden

**Herausforderungen des Systems:**

- Montage erfordert Systemspezialisten
- Zugang zu Solarmodulen im Betrieb bedingt gutes Wartungskonzept
- Anpassungen der Stützenhöhen bei grösseren Querneigungen

**System:** HELIOPLANT®

**Anbieter:** ehoch2 energy engineering und i.n.n. Ingenieurgesellschaft für Naturraum-Management GmbH & Co KG in der Planung sowie PROTEC-S in der Ausführung



Abbildung 23: System HELIOPLANT®. Abbildung von ehoch2 energy engineering e.U. (Februar 2024)

Entwickelt für das Hochgebirge, eignet sich HELIOPLANT® besonders aufgrund der Schneefreihaltung und der damit resultierenden Winterstromerzeugung für die herausfordernden Höhenlagen. Die Konstruktion wurde so entwickelt, dass die Windverhältnisse im Gebirge genutzt und die damit verbundenen Schneeverfrachtungen gesteuert werden. Die Reflexion durch den Kolk wirkt sich zudem positiv auf den Energieertrag aus. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtungen wird die Energie gleichmässiger über den Tag verteilt als bei Linienanlagen, sodass Leistungsspitzen zur Mittagszeit reduziert werden können.

**Vorteile des Systems:**

- Weitgehende Schneefreihaltung durch Kolkeffekt (wirkt auch als Lawinenschutz) und damit optimierte Energieerzeugung
- Keine Betonfundamente notwendig und einfache Rückbaufähigkeit sichergestellt
- Anpassung an das Landschaftsbild durch das baumartige Design
- Hohe Flexibilität bei der Fundierung und Montage (Standort, Neigung und Abstandswahl)

**Herausforderungen des Systems:**

- Lösung der Eigenverschattung bedingt Einzelmoduloptimierung
- Leitungsführung zwischen den Montagestrukturen

**System:** ALX 250

**Anbieter:** Turn2watt SA



Abbildung 24: Visualisierung von ALX 250 Alpin. Abbildung von Turn2watt SA (Oktober 2023)

Das vertikale und bifaziale «ALX 250»-System besteht aus einer modularen und rezyklierten Aluminiumstruktur, wobei jedes Element ein Kreuz mit vier Modulen ist. Dank eines Kolkeffekts durch den Wind wird eine Schneedecke auf den Modulen vermieden, was wiederum Schäden und Produktionsverluste minimiert. Fundamentschrauben oder Mikropfähle werden verwendet, um die «Kreuze» zu verankern, sodass sie der Windlast besser standhalten können. Die Rahmenstruktur ermöglicht die Anpassung an verschiedene Modulgrössen, Bodenabstände und Geländeneigungen. Eine «Linien-Version» ist ebenfalls realisierbar, um den Energieertrag lokal zu erhöhen.

**Vorteile des Systems:**

- Keine festen Fundamente, vollständige Demontage möglich und Wiederverwendung von Bodenschrauben
- Flexibilität bei der Installation und Ausrichtung je nach Gelände
- Leichtes System, das mit einem Minimum an Ausrüstung und Maschinen installiert werden kann

**Herausforderungen des Systems:**

- Moduloptimierung wird bei Modulen in der Nähe von «Kreuzen» notwendig
- Potenziell komplexe Installation auf sehr unebenem Gelände
- Verhältnismässig viele Stützen/Verankerungen pro installierte Leistung

## 5.12 Anwendbare Normen und Richtlinien

Aufgrund des noch jungen Themengebiets von PV im Alpenraum sind noch nicht alle Fragen bezüglich der Einhaltung von Vorschriften und Normen abschliessend geklärt. Die technischen Themen sind jedoch grösstenteils bekannt. Aufbau der relevanten Normen:

- IEC, International Electrotechnical Commission
- EN, Europäische Normen (CEN und CENELEC)
- SN, Schweizer Normen
- SNR, Schweizer normative Regel
- SNG, Schweizer Guidelines

Alle Normen von diesen Organisationen gelten, soweit anwendbar, auch in der Schweiz. Sofern zu einem bestimmten Fachgebiet eine SN vorhanden ist, hat diese gegenüber ähnlichen internationalen Normen Vorrang. Viele Schweizer Normen basieren auf internationalen Normen und sind weitestgehend harmonisiert. In den folgenden Abschnitten werden die relevanten Normen, aufgeteilt in die verschiedenen Themengebiete, dargestellt.

### 5.12.1 Bauwesen

Für das Bauwesen gelten die SIA-Normen, die ihrerseits vielfach auf europäischen Normen basieren.

Für PV-Kraftwerke in den Alpen sind insbesondere relevant:

- SIA 260, Grundlagen der Projektierung von Tragwerken
- SIA 261, Einwirkungen auf Tragwerke
- SIA 261/1, Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen

(Für Bauwerke über 2000 m ü. M. und für Bauwerke an Lagen mit aussergewöhnlichen Schnee- und Windverhältnissen sind die Bestimmungen der SIA 261/1 nicht anwendbar. Zur Festlegung der Schneelasten sind objektspezifische Untersuchungen notwendig.)

In den Normen finden sich Vorgaben für die statische Dimensionierung von Tragkonstruktionen für CH-spezifische Wind- und Schneelasten. Konkrete Angaben zu Solaranlagen und Solarkraftwerken sind jedoch noch nicht vorhanden.

### 5.12.2 Elektrizität

Für den Schutz vor Risiken und Gefahren im Umgang mit Elektrizität gelten zahlreiche Normen, Gesetze, Verordnungen, Vorschriften und Richtlinien, die die drei Bereiche Leben, Güter und Betriebssicherheit umfassen. Im Bereich Elektrizität ist die Niederspannungs-Installationsnorm (NIN) SN 411000 die wichtigste Norm. Darin eingebettet ist der Teil Photovoltaik im Kapitel 7.12, das zwar vorwiegend das Themengebiet Hausinstallationen umfasst, jedoch trotzdem relevant ist.

Vonseiten ESTI ist insbesondere die Weisung Nr. 220 «Anforderungen an Energieerzeugungsanlagen» für alpine PV-Anlagen von Relevanz (ESTI, 2021). Zudem sind die Branchendokumente des VSE, wie z.B. die Branchenempfehlung «Netzanschluss für Energieerzeugungsanlagen an das Mittel- und Hochspannungsnetz (NA/EEA-NE3-5 – CH 2022)», zu beachten (VSE, 2022).

Von der International Electrotechnical Commission (IEC) gibt es für PV-Kraftwerke die Technische Spezifikation IEC TS 62738, «Ground-mounted PV power plants – Design guidelines and recommendations». Weiter sind viele andere IEC-, EN- und SN-Normen relevant, die aber nicht explizit auf PV-Kraftwerke ausgerichtet sind. Typische Beispiele dazu sind die Normen IEC 61215 und IEC 61730 für Solarmodule und die IEC 62109 für Solar-Wechselrichter. Auf der Swissolar-Website werden die für PV relevanten Normen und Vorschriften genauer erläutert (Swissolar, 2024).

Zu beachten sind die technischen Anschlussbedingungen des zuständigen Verteilnetzbetreibers, insbesondere bezüglich Übergabestation, Messung, Schutz und Fernsteuerung. Bezüglich dieser Themen und des Netzanschlusses ist frühzeitig mit dem zuständigen Verteilnetzbetreiber Kontakt aufzunehmen. Eine Verteilnetzleitung oder eine Transformatorenstation in der Nähe der Anlage ist kein Indikator für einen einfachen Netzanschluss.

Neben den erwähnten technischen Normen und Regeln kommen auch aus anderen Gebieten zahlreiche Vorschriften zur Anwendung. Nicht abschliessende Beispiele dafür sind:

- Umweltrecht
- Bau- und Bodenrecht
- Brandschutz (VKF-Brandschutzvorschriften 2015)
- Arbeitsrecht
- Gesundheitsschutz
- Immissionsschutz

## 5.13 Öffentliches Beschaffungswesen

Vonseiten der Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren-Konferenz (BPUK) wurde die Erstellung eines Rechtsgutachtens zu beschaffungsrechtlichen Fragen im Zusammenhang mit der Realisierung von PV-Anlagen («Solar-Express») beauftragt. Das Dokument wurde im August 2023 publiziert (Badertschert Rechtsanwälte AG, 2023).

## 6. Umweltrelevante Themen

Für PV-Anlagen über 5 MW, die nicht an Gebäuden angebracht sind, muss ein UVB als Teil der Bewilligungsunterlagen erstellt werden. Im UVB sind alle eng zusammengehörenden Anlageteile gesamthaft zu beurteilen. Dazu zählen u.a. auch der Netzanschluss oder eine neue langfristig angelegte Erschliessung. Unterliegt bloss ein Teil der Gesamtanlage der UVP, so sind auch die anderen Teile der Anlage in die UVP einzubeziehen. Zu beurteilen sind neben dem Ausgangszustand auch die Bauphase, die Betriebsphase und der Rückbau.

Im Rahmen des UVB werden die umweltrelevanten Themen zusammengestellt, analysiert und beurteilt. Es werden zur Vermeidung, Verminderung oder zum Ersatz der Beeinträchtigungen Massnahmen vorgeschlagen. In diesem Sinne ist die Erarbeitung eines Bewilligungsdossiers für die Ersatzmassnahmen vorzusehen, das dem Bewilligungsdossier für die Anlage beigelegt wird. Dabei sind insbesondere die landschaftliche, die technische und die finanzielle Machbarkeit zu gewährleisten. Der UVB beinhaltet eine Synthese, die das Zusammenwirken der einzelnen untersuchten Aspekte und Einwirkungen gesamthaft beurteilt.

Auch wenn das Energiegesetz Art. 71a für die Anlage und auch die Anschlussleitung eine Standortgebundenheit und ein grundsätzliches überwiegendes nationales Interesse begründet, sollte nicht vergessen werden, dass dennoch Varianten für beispielsweise die Logistik, die Fundamente oder auch die Stützen geprüft werden müssen (siehe Leitfaden Graubünden). Dazu müssen die relevanten Umweltaspekte aller Varianten mindestens auf Stufe Machbarkeit evaluiert werden.

### 6.1 Flora und Fauna

Im Unterschied zu Anlagen im Mittelland stehen alpine PV-Anlagen auf Flächen, die hinsichtlich Rekultivierung und Wiederansiedlung von Vegetation deutlich empfindlicher sind. Durch die kurze Vegetationsperiode und die harschen Klimabedingungen kann sich die Vegetation deutlich langsamer erholen bzw. Flächen wiederbesiedeln. Ein Projekt bedeutet also speziell für die Flora einen spürbaren Eingriff, und entsprechend wird ein Schwerpunkt auf der Beurteilung der Auswirkungen des Projekts beim Thema Bodenschutz liegen. Aus diesem Grund wird auch in diesem Leitfaden in Bezug auf umweltrelevante Themen insbesondere auf die Flora und Fauna eingegangen.

Es empfiehlt sich bei den Planungen zur Baustelleninstallation und -erschliessung sowie den eingesetzten Maschinen und Geräten, der verkürzten Vegetationsperiode ausreichend Gewicht beizumessen. Nicht zu vergessen ist auch die erhöhte Empfindlichkeit des Bodens auf Erosion durch Wasser und Schnee, sobald die Vegetationsschicht gestört wurde.

Je nach Bodenbeschaffenheit sind zur Beurteilung von Auswirkungen des Projekts im Zusammenhang mit Sanierung und Rückbau weitere Untersuchungen in Bezug auf die Bodenverdichtung durchzuführen.

Die PV-Anlage führt zu einer neuen Beschattung der Oberfläche. Als Folge daraus dauert es länger, bis der Schnee darunter geschmolzen ist. Es resultieren dadurch eine kürzere Vegetationsperiode, weniger Bodenaustrocknung und veränderte Windverhältnisse in Bodennähe. Ob diese Effekte eine Verschlechterung oder eine Verbesserung darstellen (z.B. im Kontext von schneeärmeren Wintern, heisseren Sommern in Zukunft), muss standortspezifisch analysiert werden.

Nach Art. 18 Abs. 1ter NHG müssen bei Eingriffen in schutzwürdige Lebensräume Ersatzmassnahmen geleistet werden. Mit der Erteilung einer Baubewilligung ist der Verursacher zu bestmöglichen Schutz-, Wiederherstellungs- oder ansonsten zu ökologisch gleichwertigen Ersatzmassnahmen verpflichtet. Diese Massnahmen müssen angemessen sein, und sie müssen nach der Praxis des Bundesgerichts zum Zeitpunkt der Bewilligung der Anlage verbindlich festgelegt werden.

Aspekte, die im Zusammenhang mit der Flora auf Basis der bisherigen Projekterfahrungen und Untersuchungen besonders berücksichtigt werden müssen (nicht abschliessend):

- Rote Liste gefährdeter Arten
- Rekultivierung mit Aussaat heimischer, standortgerechter Saaten
- Je nach Stand der Gewässerfestlegung ist ein Rodungsgesuch nötig auch für «Gestrüpp»
- Auswirkungen auf aquatische Lebensräume (z.B. anmoorige Bereiche oder Flachmoore), unter anderem auch in angrenzenden Gebieten (Beeinflussung Wasserhaushalt) berücksichtigen
- Massnahmen zur Vermeidung des Einschleppens von Neophyten vorsehen

Für die Fauna ist speziell die Bauphase ein relevanter Eingriff. Nebst der Habitatsveränderung durch Bodenbewegungen, neue Strukturen und Abtragen von Vegetation sind die Lärmbelastung, Abgase und erhöhtes Verkehrsaufkommen als negative Effekte zu nennen. Nicht alle Tierarten sind dabei gleich empfindlich. Zudem spielt es ebenfalls eine Rolle, welche Bedeutung das Projektgebiet im Netzwerk der Lebensräume der Umgebung spielt. Ist es zum Beispiel das einzige Brut-/Balzgebiet weit und breit oder eines von vielen?

Da es in der Schweiz noch keine flächenmässig vergleichbaren PV-Anlagen im alpinen Raum gibt, existieren wenig Erfahrungen hinsichtlich der Rückkehr der Fauna nach Abschluss der Bauarbeiten. Die Rückkehr hängt vor allem davon ab, ob sich Tiere mit den neuen Strukturen arrangieren können. Das Thema Monitoring von Flora und Fauna ist stark standortabhängig, und allfällige Massnahmen sind mit den Behörden zu klären. Ein frühzeitiger Kontakt mit der örtlichen Wildhüterschaft ist empfehlenswert, um die standortspezifischen Herausforderungen abzuklären.

Einige Aspekte aus den bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen zur Fauna in diversen Projekten (nicht abschliessend):

- Erhöhte Aufmerksamkeit für rote Liste gefährdeter Arten
- Empfindlich und daher gut abzuklären: Rauhfußshühner (Brutperiode kann zu Einschränkungen der Bauzeit führen)
- Auswirkungen auf aquatische Lebensräume (z.B. anmoorige Bereiche oder Flachmoore), unter anderem auch in angrenzenden Gebieten (Beeinflussung Wasserhaushalt) berücksichtigen

## 6.2 Checkliste umweltrelevante Themen

Neben der Flora und Fauna sind noch viele weitere umweltrelevante Themen zu berücksichtigen. Im Rahmen des UVB sind die folgenden Themengebiete zu beurteilen:

**Tabelle 4:**  
**Checkliste umweltrelevanter Themen, die im Rahmen einer UVB zu berücksichtigen sind**

Umweltbereiche	Beurteilungsschwerpunkte (nicht abschliessend)
Luftreinhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Baustellenlogistik, insb. Bautransporte, Materialbewirtschaftung, Definition Massnahmenstufen</li> <li>– Relevante Anlageteile in der Betriebsphase</li> </ul>
Lärm	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Baustellenlogistik, Definition der Massnahmenstufen</li> <li>– Industrie- und Gewerbelärm des Technikgebäude (z.B. Lüftung)</li> </ul>
Erschütterungen / abgestrahlter Körperschall	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Evtl. Baubetrieb</li> </ul>
Nichtionisierende Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– DC- und AC-Leitungen</li> <li>– Spezifische Anlageteile des Technikgebäude</li> </ul>

Reflexion / Blendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mögliche Blendeinwirkung auf Umgebung</li> </ul>
Grundwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Situation planerischer Grundwasserschutz im Variantenstudium bzw. im Projekt abklären</li> <li>– Baustellenlogistik und Baubetrieb; Erarbeiten von Massnahmen zum Schutz der Vorkommen</li> <li>– Diffuse oder betriebsbedingte Verschmutzung in der Betriebsphase</li> </ul>
Oberflächengewässer und aquatische Ökosysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Projektspezifisch abzuklären; insbesondere einzuhaltende Gewässerabstände, Gewässerquerungen (Bautechnik, Massnahmen etc.)</li> <li>– Baustellenbetrieb und Verschmutzungsrisiken</li> <li>– Allfällige Drainagewirkung der elektrischen Leitungen auf abwärts liegende Feuchtbiotope</li> </ul>
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Baustellenentwässerung</li> <li>– Evtl. Entwässerung Technikgebäude</li> </ul>
Boden	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sachgerechter Umgang mit Boden beim Bauen, insb. Erhalt der geringmächtigen Bodenschichten</li> <li>– Rekultivierung und Folgepflege</li> <li>– Eintrag von Schadstoffen (z.B. Korrosionsschutz) während der Betriebsphase</li> </ul>
Altlasten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Projektspezifisch abzuklären; Auswirkungen des Bauvorhabens auf Altlastenstandorte</li> </ul>
Abfälle / Materialbewirtschaftung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Welche Abfälle fallen im Projekt an?</li> <li>– Korrekte Entsorgung der anfallenden Kubaturen (verwerten, ablagern, behandeln)</li> </ul>
Umweltgefährdende Organismen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aufgrund der Höhenlage der PVA i.d.R. von untergeordneter Bedeutung, Fokus Netzanschluss</li> </ul>
Störfallvorsorge	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Von untergeordneter Bedeutung, Betrieb ist nicht der Störfallverordnung StfV unterstellt, Mengenschwellen Bau- und Betriebsphase prüfen</li> </ul>
Wald	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Waldrechtliche Einordnung, Einhaltung der Waldabstände</li> <li>– Rodungsrelevanz / nachteilige Nutzungen notwendig, ausarbeiten der notwendigen Dokumente</li> </ul>

<p>Flora, Fauna, Lebensräume</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aufnahme der relevanten Artgruppen im Projektperimeter</li> <li>– Aufnahme der Lebensraumtypen im Projektperimeter mit Fokus schützenswerte Lebensraumtypen</li> <li>– Beurteilung des Bauvorhabens hinsichtlich der Einflüsse auf bestehende Habitate heimischer Tierarten mit Schwerpunkt geschützte Arten gem. NHV-Anhang 3 / Rote-Liste-Arten. Mitberücksichtigung der schützenswerten Lebensraumtypen gem. Anhang 1 NHV</li> <li>– Erarbeiten von Schutz-, Wiederherstellungs- oder angemessenen Ersatzmassnahmen</li> <li>– Rekultivierung Fokus auf standorttypische Lebensräume (Definition Ziellebensraum, evtl. Begrünungsmethode)</li> <li>– Zeitpunkte und Form der Erhebungen sind von den kantonalen Umweltstellen zu definieren</li> </ul>
<p>Landschaft und Ortsbild (inkl. Lichtimmissionen)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sichtbarkeit</li> <li>– Eingliederung der Anlageteile in die Landschaft / Gestaltung / Materialisierung, Farbgebung</li> <li>– Ortsbildschutz ist projektspezifisch abzuklären auch hinsichtlich Sichtbarkeit der Anlage aus einem Ortsbildschutzgebiet</li> <li>– Einfluss des Bauvorhabens auf bestehende Nutzungen (Sömmerung, Tourismus etc.)</li> <li>– Sind Beleuchtungen vorgesehen (Bau- und Betriebsphase)?</li> </ul>
<p>Kulturdenkmäler, Archäologie und historische Verkehrswege</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Projektspezifisch abzuklären</li> </ul>

Für Projektanten besteht die Möglichkeit, anhand einer UVP-Voruntersuchung bereits vor der effektiven Einreichung des UVB erste Aussagen zu spezifischen Fragestellungen und möglicherweise kritischen Themen zu erhalten.

### 6.3 Begehungen vor Ort

Die benötigten Arbeiten zur Erstellung des UVB sind möglichst früh zu analysieren, v.a. wegen der beschränkten Zugänglichkeit im Winter und der reduzierten schneefreien Periode. Die Planung und Beauftragung der Feldaufnahmen ist daher frühzeitig in die Wege zu leiten. Im schlimmsten Fall können versäumte Feldarbeiten ein Jahr Verzögerung bedeuten, weil ein Umweltbereich nicht abschliessend beurteilt werden konnte. Für die Beurteilung bilden die jeweiligen Anlageperimeter den Beurteilungsumfang und sollten vor Beginn der Aufnahmen bekannt und fixiert sein. Eine frühzeitige Besprechung mit den zuständigen Behörden und Stakeholdern kann Sicherheit bezüglich des Umfangs der Aufnahmen geben, denn diese sind artspezifisch und projektabhängig.

### 6.4 Monitoring der Umweltfolgen

Angesichts des innovativen Charakters dieser Anlagen und aufgrund fehlender evidenzbasierter Erkenntnisse, wie sich Flora und Fauna in und um alpine PV-Anlagen entwickeln, verlangen sowohl Nichtregierungsorganisationen (NGO) als auch kantonale Stellen die Einrichtung eines Monitorings der Auswirkungen der Anlage auf Flora und Fauna. Das Monitoringprogramm ist in der Regel mit den zuständigen kantonalen Stellen abzustimmen und in den Genehmigungsunterlagen zu beschreiben.

# 7. Betrieb

## 7.1 Betriebskosten

Um einen reibungslosen Betrieb von Photovoltaikanlagen zu gewährleisten, sind regelmässige Wartungen erforderlich, die über die gesamte Lebensdauer des Projekts Betriebskosten verursachen. Diese Kosten ermöglichen es, den Ertrag des Kraftwerks zu steigern, daher gibt es einen Kompromiss zwischen der Häufigkeit der Wartungen und den durch mangelnde Wartung verursachten Energieverlusten. Weitere Betriebskosten sind Versicherung, Monitoring, allfällige Pachtzinsen, Vermarktung, Energiebezug, Kommunikationskosten, Steuern, technische und kaufmännische Betriebsführung usw.

Die detaillierte Berechnung der Betriebs- und Wartungskosten für grosse Anlagen hängt von vielen Annahmen ab und wird unter anderem in der Studie des National Renewable Energy Laboratory (NREL) [«Model of Operation-and-Maintenance Costs for Photovoltaic Systems»](#) ausführlich beschrieben (NREL, 2020). Zudem gibt es im Dokument einen Link zu einem Rechner auf der Grundlage von Werten des US-Marktes. Die Studie gibt Grössenordnungen an, allerdings bringen die alpinen Bedingungen zusätzliche Einschränkungen im Vergleich zu den Bedingungen im Flachland mit sich.

Die folgenden Besonderheiten der alpinen Umgebung können zu einem beschleunigten Verschleiss der Komponenten führen und erfordern daher besondere Aufmerksamkeit:

- Temperaturzyklen
- Wind
- Feuchtigkeit und Kälte: Korrosion, Versprödung von Materialien
- Höhere Bestrahlung, insbesondere UV-Strahlung: beschleunigte Alterung von Polymeren, insbesondere von Materialien zur Verkapselung von Modulen und Degradation bestimmter Zelltypen
- Schneeanlagerungen: starke mechanische Belastung der Module und Strukturen
- Steinschlag, Lawinen: lokal begrenzte Schäden an den Anlagen
- Wildtiere: Schäden an Polymerkomponenten, sofern diese nicht unzugänglich gemacht werden
- Eingeschränkte oder zu bestimmten Zeiten nicht mögliche Zugänglichkeit

Bisher gibt es keine quantitativen Studien über die Wartungskosten unter diesen Bedingungen, die von Projekt zu Projekt sehr unterschiedlich sein können. Eine grobe Schätzung legt nahe, dass die Betriebskosten von gut gebauten PV-Kraftwerken in den Alpen, in Bezug auf die Investitionskosten, ähnlich sind wie bei Anlagen im Flachland. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung für das Fördergesuch beim Bundesamt für Energie sind die anrechenbaren Kosten für den Anlagenbetrieb, den Unterhalt sowie weitere betriebliche Aufwendungen auf jährlich maximal 1 Prozent der anrechenbaren Investitionskosten begrenzt.

## 7.2 Zugangsbedarf, Arbeitssicherheit

Photovoltaikanlagen in alpinen Gebieten können sich an schwer zugänglichen Orten befinden und bergen durch die Bergwelt besondere Gefahren.

Ein Zugang kann in zwei Hauptebenen unterteilt werden:

1. Allgemeiner Zugang: Vom Verkehrsnetz des Tals (öffentliche Verkehrsmittel, Strassennetz) zu einem Zugangspunkt zu den Einrichtungen, z.B. über eine Bergstrasse, eine Piste, eine Seilbahn, einen Helikopter oder Ähnliches
2. Spezifischer Zugang: Von einem Zugangspunkt zu den Anlagen zu bestimmten Teilen, z.B. über Wege zwischen den Modulreihen oder Pfade, die mit leichten motorisierten Maschinen für den Transport von Material oder Personal befahrbar sind

Ein Zugang bedient die folgenden Rollen:

- Sicherer Zugang von Personen zum Standort oder zu Teilen der Anlage
- Transport von Material und Ausrüstung

Der Zugang zum Standort wird für die folgenden Aktivitäten benötigt:

- Inspektion und Wartung: Erfordert den Transport von Ausrüstung und Ersatzteilen.
- Austausch defekter oder vorbeugender Komponenten
- Technische, pädagogische oder touristische Besuche

Der Zugang muss zumindest die Kontrolle, die Wartung und allfällige Reparaturen des Kraftwerks während eines Teils des Jahres ermöglichen. Für einmalige Bedürfnisse, wie den Austausch einer massiven Komponente (zentraler Wechselrichter, Struktur), kann ein Helikoptereinsatz wirtschaftlicher sein als die jährliche Wartung einer Zufahrtsstrasse zu dem betreffenden Punkt.

Die Häufigkeit und Reihenfolge des Austauschs von Komponenten kann für die meisten Systeme mit Kraftwerken im Flachland verglichen werden. Eine diesbezüglich aufschlussreiche Forschungsarbeit findet sich im IEA-PVPS-Dokument [«The Use of Advanced Algorithms in PV Failure Monitoring»](#) (Rapaport, et al., 2022). Von grosser Bedeutung ist dabei der einfache und sichere Zugang zu den PV-Modulen.

Die Sicherheit von Angestellten und Besucherinnen oder Besuchern muss ebenfalls gewährleistet sein. Die Sicherheitsvorschriften umfassen sowohl die Sicherheit in einem grossen Solarkraftwerk, beschrieben in Kapitel 7 des NREL-Leitfadens [«Best practices for operation and maintenance of photovoltaic and energy storage systems»](#) (NREL, 2018), als auch die Sicherheit bei Arbeiten in den Bergen, wobei hier die Suva-Vorschriften, allen voran die [«Gebirgsbaustellen-Checkliste»](#) (SUVA, 2022), zu erwähnen sind.

### 7.3 Monitoring

Das Monitoring ist in der alpinen Umgebung aufgrund des schwierigen Zugangs zu den betreffenden Standorten von zusätzlichem Interesse. Es ermöglicht die Überwachung des Kraftwerks in Echtzeit und verfolgt folgende Ziele:

- Quantifizierung der Leistung und der zeitlichen Verschlechterung des Kraftwerks
- Identifizierung von Verlusten
- Vorbeugende Identifizierung von Fehlern und Problemen

Die Optimierung durch regelmässige Wartung kann besonders wichtig sein, wenn eine Subvention an einen bestimmten Ertrag geknüpft ist, wie es in der Schweiz mit der 500-kWh/kW-Regelung für den Winterertrag der Fall ist.

Ein Monitoringsystem mit geeigneten Messgeräten und einer ausreichenden Abtastfrequenz ermöglicht eine automatische Echtzeitdiagnose typischer Fehler. Es ist elementar für eine schnelle Entscheidungsfindung und minimiert so die Anzahl Anreisen zum Standort sowie die Ausrüstung, die im Falle einer Reparatur transportiert werden muss.

Zu den Besonderheiten von Standorten in alpiner Umgebung im Vergleich zu Kraftwerken im Flachland gehören die Wetterbedingungen und bestimmte Naturgefahren in den Bergen, für die bestimmte spezifische Monitoringmassnahmen ergriffen werden können:

- Sensorkonfiguration gemäss IEC 61724-1
- Messung der Schneehöhe mit Markierung an Strukturen im Bereich von Webcams
- Vereinzelte visuelle Kontrollen mittels Webcams (Schneebedeckung von Modulen und Sensoren)
- Redundanz des Monitoringsystems zur Begrenzung der Vor-Ort-Besuche
- Zusätzliche Messung der Rückseiteneinstrahlung
- Windmessung und Modultemperatur
- Alpine Freiflächenanlagen weisen meist mehrere Orientierungen (Azimut) auf, was bei der Wahl der Monitoringmassnahmen berücksichtigt werden muss.

## 7.4 Repowering

Die Entscheidung, ob ein Repowering eines Kraftwerks sinnvoll ist, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Lebensdauer und Resteffizienz der aktuellen Komponenten
- Lebensdauer, Effizienz und Preis der auf dem Markt zugänglichen Komponenten
- Möglichkeit, neue Module auf der Unterkonstruktion zu befestigen ohne teure Anpassungen
- Kosten der Repowering-Arbeiten
- Entwicklung des gesetzlichen Rahmens und der Fördermassnahmen
- Entwicklung der Energiekosten und der Art der Preisgestaltung
- Graue Energie und Umweltauswirkungen der neuen Komponenten und der Arbeiten

Im Allgemeinen wird das Repowering eines Kraftwerks in den Bergen demjenigen eines Kraftwerks im Flachland ähnlich sein, wobei die gleichen Herausforderungen wie bereits beim Bau berücksichtigt werden müssen. Diese Herausforderungen sind wiederum stark von der Wahl der expliziten Montagestruktur abhängig, siehe Kapitel 5.10. Eine zusätzliche Schwierigkeit bringen sicherlich die generell schlechte Zugänglichkeit und die Montagehöhe der PV-Module mit sich, die ggf. den Einsatz von Hebebühnen erfordern.

## 8. Rückbau

### 8.1 Berücksichtigung in der Planungs- und Bauphase

Eine lange Lebensdauer der Unterkonstruktion mit einmaligem oder mehrmaligem Ersatz der PV-

Module ist ökologisch sinnvoll. Kommt die Anlage in die Nähe ihrer geplanten Lebensdauer, sind verschiedene Optionen, wie z.B. ein weiteres Repowering oder eine Umnutzung/Co-Nutzung, noch vor einem Rückbau denkbar. Ein Repowering würde die Ökobilanz verbessern, es muss jedoch geprüft werden, ob die Statik noch ausreicht und eine Genehmigung zum Weiterbetrieb erlangt werden kann.

Irgendwann stehen jedoch die Ausserbetriebnahme und der Rückbau an. Idealerweise wird bereits in der Planung Weitsichtigkeit bewiesen, z.B. indem Folgendes bedacht wird:

- Einfache Demontage auch nach 30–60 Jahren möglich (Korrosion)
- Etappierter Rückbau möglich
- Entfernung Foundationen sinnvoll machbar
- Analoger Schutz des Bodens wie bei der Errichtung möglich
- Geschickte Nutzung von Synergien mit Erschliessungsarbeiten z.B. der Gemeinde oder des Skigebiets führen zu einer Win-win-Situation während des Betriebs, je nachdem aber auch dazu, dass Teile der Erschliessungsanlagen anstatt rückgebaut übernommen werden.
- Ist eine Umnutzung/Co-Nutzung sinnvoll, gewünscht und gesetzlich möglich?

Im Kanton Graubünden muss beispielsweise zusammen mit dem Baugesuch ein Rückbaukonzept eingereicht werden, um darzulegen, welche Schritte nötig sind und wie diese finanziert werden sollen. Analoge Anforderungen sind auch in anderen Kantonen zu erwarten.

## 8.2 Vollständiger Rückbau

Das Energiegesetz Art. 71a Abs. 5 regelt den Rückbau der PV-Installation folgendermassen:

Die Anlagen werden bei endgültiger Ausserbetriebnahme vollständig zurückgebaut und die Ausgangslage wiederhergestellt.

Diese Bedingung ist für den unterirdischen Teil der Anlage (Verankerungen) schwierig umzusetzen. Entweder entstehen grössere Flurschäden (Komplettentfernung Betonfundamente oder Mikropfähle bzw. Felsanker), oder es verbleibt ein Teil im Boden. Es wird angeregt, mit den Bewilligungsbehörden bereits im Zuge des Rückbaukonzepts zu besprechen, ob und bis wohin ein Rückbau aus Umweltsicht überhaupt sinnvoll ist. Speziell die Rekultivierung der Bodenoberfläche, die in alpinen Höhen sehr lange dauert, verschlechtert die Ökobilanz von flächenintensiven Rückbaumethoden.

Die Rückbaupflicht gilt auch für die Testanlage – Art. 9b der EnV:

3 Nach Abschluss der Versuchstätigkeit hat sie die Testanlage vollständig zurückzubauen und die Ausgangslage umgehend wiederherzustellen. Sie hat dies gegenüber der zuständigen Behörde zu belegen.

## 8.3 Co-Nutzungen

Speziell in der Nähe zu bestehenden Infrastrukturen oder Dörfern ist es möglich, dass die Erschliessungsanlagen der PV-Anlage (Kabelrohre, Strassen, Wege) zum Zeitpunkt des Rückbaus gemeinsam genutzt werden, da im Rahmen der Errichtung des PV-Projekts kommunale Erschliessungsprojekte miteinbezogen wurden, z.B. Strom-/Wasser-/Telekomanbindung von Weilern oder Alpen. Oder es entstanden Mitnutzungen während der Betriebszeit. Hier ist frühzeitig vor Erreichen des Rückbauzeitpunktes mit den Behörden und aktuellen oder potenziellen neuen Nutzerinnen und Nutzern Kontakt aufzunehmen und die Situation zu klären bzw. Art und Umfang des Rückbaus zu bestimmen.

## 8.4 Ermittlung der Rückbaukosten

Während die Rückbaukosten für einen aktuellen oder in naher Zukunft liegenden Zeitpunkt mit relativ geringen Unsicherheiten bestimmt werden können, so ist es kein einfaches Unterfangen, diese Kosten für einen Zeitpunkt der Ausserbetriebnahme in über 30 Jahren vorauszusagen. Es kann nur geschätzt werden, wo die Kosten zu diesem Zeitpunkt liegen werden für:

- Abtransport (Treibstoffkosten)
- Demontage (Lohnkosten, Gerätekosten)
- Entsorgung der verschiedenen Materialien

Auch die möglichen zukünftigen Erträge für Werkstoffe wie Altmetall (Stahl, Kupfer oder Aluminium) sind schwierig abzuschätzen. Als Anhaltspunkt kann der aktuelle Wert der Rückbaukosten dienen, ergänzt mit den zu erwartenden Erhöhungen oder Minderungen. Tabelle 5 zeigt eine mögliche Auflistung für die Abschätzung der zukünftigen Rückbaukosten.

**Tabelle 5**  
**Abschätzung der Rückbaukosten einer alpinen PV-Anlage**

Kosten bei Rückbau	Einnahmen bei Rückbau
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kosten für Demontage der Anlage.</li> <li>– Etwa gleiche Kosten wie bei der Montage, exkl. Planung, Genehmigung und Materialkosten.</li> </ul>	Restwert der Anlagenteile/Erschliessungsanlagen, die übergeben oder weitergenutzt werden können.
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kosten Rückbau allfälliger Fundamente</li> <li>– Etwa gleiche Kosten wie bei der Erstellung, exkl. Planung, Genehmigung und Materialkosten</li> </ul>	Potenzieller Erlös aus Materialverwertung (z.B. Altmetalle)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kosten Rückbau der Erschliessung</li> <li>– (Netz- und Logistikerschliessung)</li> <li>– Etwa gleiche Kosten wie beim Bau, exkl. Planung, Genehmigung und Materialkosten</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Planung/Vorbereitung Rückbau</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kosten für Entsorgung Material</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rekultivierungskosten</li> </ul>	

Der Abschätzung liegen diverse Vereinfachungen zugrunde, z.B. dass die Errichtung einer Strasse etwa gleich viel kostet wie ihr Rückbau. Im Einzelfall kann es hier Differenzen geben, die einbezogen werden müssen.

### **Rückbaureserve**

Das Anlegen einer finanziellen Rückbaureserve als Auflage in der Bewilligung ist z.B. im Leitfaden Graubünden vorgesehen. Die Herausforderung liegt darin zu bestimmen, wie hoch der Anteil der Rückbaureserve am Tag 1 sein muss und welchen Anteil die Projektträger während der Betriebsdauer weiter aufbauen dürfen. Je nachdem, wie der Betrag gesichert ist, kann mit einer Verzinsung gerechnet werden, die über den Zinseszinsseffekt bis in über 30 Jahren einen substanziellen Beitrag erreichen kann. Schon geringe Änderungen eines Verzinsungsfaktors oder der Indexierung der verschiedenen Kostenbestandteile (Material, Treibstoffe, Löhne) können das Resultat massgeblich beeinflussen.

Hier einige Anregungen für die Gestaltung der Rückbaubürgschaft basierend aus Erfahrungen, z.B. aus anderen Erzeugungstechnologien:

- Verschiedene Arten der finanziellen Sicherheit vorsehen: Je nach Projektträger sind die Möglichkeiten unterschiedlich. Es gibt nicht nur die klassische Bankbürgschaft, sondern z.B. Bürgschaftsversicherungen anerkannter Versicherungsgesellschaften.
- Doppelspurigkeit vermeiden: Nicht, dass der Kanton, die Gemeinde und der Grundeigentümer je eine auf ihn/sie ausgestellte Sicherheit bekommen müssen.
- Da die Baustellen sich über mehrere Jahre ziehen können, kann eine Staffelung der Beträge sinnvoll sein.
- Die Entwicklung der Kosten in 20–30 Jahren ist ungewiss. Anstatt einer unsicheren Prognose kann hier eine periodische (z.B. alle 5–8 Jahre, ab 20 Jahren alle 3–5 Jahre) unabhängige Prüfung und Anpassung des Bürgschaftsbetrags vorgesehen werden.

## 8.5 Umweltauswirkungen des Rückbaus

Die folgende Tabelle bewertet qualitativ die Umweltauswirkungen im Rahmen des Rückbaus. Im Einzelfall kann es Abweichungen geben.

**Tabelle 6**  
**Qualitative Bewertung der Umweltauswirkungen verschiedener Bestandteile im Rahmen des Rückbaus**

	Umweltauswirkungen Rückbau	Weiteres, Alternativen
PV-Panel	Flurschäden durch Maschinen/ Fahrzeuge erfordern eine Rekultivierung	Teilweise Wiedergewinnung von Material im Recycling
Unterkonstruktion	Flurschäden durch Maschinen/ Fahrzeuge erfordern eine Rekultivierung	Metall kann wiederverwertet werden
Fundation	Flurschäden durch Maschinen/Fahrzeuge erfordern eine Rekultivierung; Beton auf Deponie	Entfernen nur bis unter Oberboden evtl. ökologischer
Elektrokabel, Kommu- nikationskabel (Metall)	Gering. Ausziehen aus Gestell und Rohren	Metall kann wiederverwertet werden
Erdungsleiter	Flurschäden	
Glasfaserkabel	Gering. Ausziehen aus Gestell und Rohren	Entsorgung im Tal
Elektrokomponenten	Keine	Entsorgung im Tal. Teilweise Wiedergewinnung von Material im Recycling (z.B. Kupfer)
Gebäude für Trafo/ Wechselrichter	Abreißen Gebäude, entfer- nen Fundament, Rekultivieren	Umnutzung?
Container für Trafo/ Wechselrichter	Abtransport Container. Rückbau Fundamentierung, Rekultivierung	
Kabeltrasse (z.B. Rohre im Boden)	Ausgraben der Rohre oder Rohrblöcke. Rekultivieren	Weiternutzungsmöglichkeiten? Weiterentwicklung für kommunale oder regionale Infrastrukturverbesserung.

**Ohne Betrachtung der Entsorgung der Materialien/Bauteile (im Tal)**

		<b>Repowering PV-Anlage</b>
<b>Kabel benutzt bestehende Infrastrukturen</b>	Keine bis gering	
<b>Ausbauten Zuwegung</b>	Sehr standortspezifisch	Nachnutzung/Co-Nutzung vorhanden/geplant/verboten? Je mehr Ausbau nötig war, desto aufwendiger der Rückbau. Standortgebundenheit entfällt mit Ende der Anlage.
<b>Meteostation</b>	Gering. Foundation entfernen	Weiternutzung z.B. als interkantonale Mess- und Informationssystem (IMIS)-Station von SLF
<b>Schutzbauten</b>	Entfernung verstärkte Pfosten bis umfangreichen Rückbau von Dämmen und Bauten	Je nach Nachnutzung kann Schutzbaute weiterhin sinnvoll sein.
<b>Testanlage</b>	Gering. Stützen und ggf. Foundationen entfernen	

## 9. Wirtschaftlichkeit und Beteiligungsmodelle

### 9.1 Typische Kostenelemente

Die Kostenelemente einer Standard-PV-Anlage sind im Allgemeinen gut bekannt und werden in den [Preisbeobachtungsstudien](#) des BFE detailliert aufgeführt (BFE, 2023).

Die folgende Tabelle listet Kostenkategorien auf und gibt einen Hinweis darauf, wie sich diese Kosten für eine alpine PV-Anlage zusammensetzen.

**Tabelle 7:**  
**Beschreibung der Kostenkategorien für eine generische alpine PV-Anlage**

<b>Kostenkategorien</b>	<b>Beschreibung und Einfluss des Projekts</b>
PV-Module	Hängt von der Technologiewahl ab. Der Stückpreis der Module ist generell höher als bei Standardsystemen im Mittelland.
Wechselrichter	Hängt von der Technologiewahl ab. Es wird erwartet, dass die spezifischen Kosten für Wechselrichter niedriger sind, da die Grösse der Projekte den Einsatz von leistungsstarken Wechselrichtern oder Zentralwechselrichtern ermöglicht.
Unterkonstruktion	Hängt von der Wahl des Systems ab. Da die Montagesysteme einige Meter über dem Boden montiert werden und den alpinen Bedingungen standhalten müssen, sind die Kosten für das Montagesystem entsprechend höher.
Elektromaterial	Die spezifischen Kosten für die elektrische Grundausstattung (AC-, DC-, Überspannungsschutz, Potenzialausgleich, DC-Kabel) werden ähnlich hoch sein wie bei einer Standardinstallation.

Baustellenabsicherung	Alpine PV-Anlagen benötigen in der Regel keine Gerüste, wodurch diese Kostenkategorie reduziert wird. Verbleibende Kosten für den erforderlichen Personenschutz, je nach der geplanten Montagelösung, müssen aber berücksichtigt werden.
Arbeitskosten	Die Arbeitskosten sind grundsätzlich höher, werden aber stark variieren, da sie unter anderem von den folgenden Parametern abhängen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Installationsgeschwindigkeit (in kWp/Tag/Person)</li> <li>– Zugänglichkeit des Geländes und verwendete Maschinen</li> <li>– Zugangsmöglichkeiten und Logistik</li> <li>– Gräben für Kabel</li> <li>– Arbeitsplattform</li> </ul>
Verwaltung und Planung	Obwohl die Netto-Planungskosten hoch sind, wird erwartet, dass die grosse Projektgrösse zu niedrigeren spezifischen Planungs- und Managementkosten führt als bei einfacheren, aber kleineren Projekten.
Logistik und Transport	Die Logistikkosten werden hauptsächlich durch den Standort respektive die Art der Materialanlieferung (Zufahrtsstrassen, Seilbahn, Helikopter) bestimmt.
Netzanschluss	Diese Kategorie hängt stark von den Möglichkeiten des bestehenden Netzes, der Entfernung und dem Gelände ab. Hinzu kommen insbesondere die Kosten für mögliche Transformatoren, AC-Kabel und Kabelverlegungsarbeiten.
Sonstiges	Es können je nach Projekt unterschiedliche Zusatzkosten anfallen, wie beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Umweltverträglichkeitsstudien</li> <li>– Kosten für Ersatzmassnahmen/Ausgleichsmassnahmen und eventuelles Monitoring im Sinne des NHG</li> <li>– Wetterbedingte Verzögerungen bei der Installation</li> <li>– Komplexität des Geländes und der Fundamente</li> <li>– Komplexität des Zugangs</li> <li>– Zusätzliche Sicherheitsmassnahmen</li> </ul>

## 9.2 Beispiel einer Kostenverteilung

Abbildung 25 zeigt die geschätzte Kostenverteilung für eine generische, alpine PV-Anlage mit einer Grösse von ca. 10 MW. Die Aufteilung der Kosten und die Höhe der einzelnen Kategorien können je nach den Besonderheiten des Projekts stark variieren.

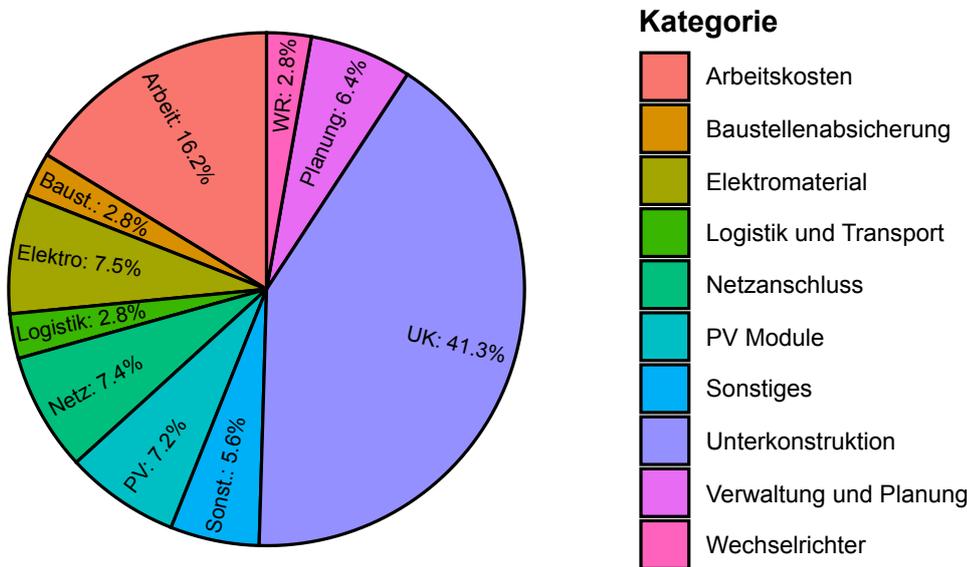


Abbildung 25: Kostenverteilung nach Kategorien für ein generisches Projekt. Abbildung von Planair SA (November 2024)

## 9.3 Beteiligungsmodelle

Ob und in welcher Form Grundeigentümer, Pächterinnen und Gemeinden finanziell am wirtschaftlichen Nutzen von alpinen PV-Anlagen beteiligt werden sollen, wird intensiv diskutiert. Bei einem Beteiligungsmodell geht es nicht wie beim Wasserzins um die Vergütung für die Nutzung der Sonne als Ressource. Es geht darum, ob und wie lokale Partner am wirtschaftlichen Nutzen der erstellten Anlagen beteiligt werden. Dies kann z.B. in Form eines Baurechtszinses, einer Beteiligung oder der Zusicherung von zusätzlichen Arbeitsplätzen erfolgen.

Die Höhe und Art der Beteiligung ist aus guten Gründen sehr umstritten. Die Stromkosten aus alpinen PV-Anlagen werden ohne Berücksichtigung der Subventionen sicher nicht günstig sein. Aufgrund fehlender Erfahrung sind heute die genauen Baukosten unbekannt und noch weniger die künftigen Stromtarife. Weiter variieren die Baukosten mit der Zugänglichkeit auch je nach Standort sehr stark. Für eine fixe Vorgabe fehlt also heute die Erfahrung.

Es wird grundsätzlich empfohlen, die Basisentschädigung für den Winterstrom und den Sommerstrom zu differenzieren, da der primäre Grund von alpinen PV-Anlagen darin besteht, einen vergleichsweise hohen Winterstromanteil zu liefern. Es gibt bereits Kantone, die Ansätze bezüglich der Entschädigung von Gemeinden kommunizieren, wie z.B. der Kanton Graubünden im [«Leitfaden Bewilligungsverfahren für Photovoltaik-Grossanlagen nach Art. 71a EnG»](#).

Bei der Art möglicher Vergütungen/Entschädigungen und auch bei der Ausgestaltung der Zahlungszeitpunkte und -höhen gibt es diverse unterschiedliche Möglichkeiten. In den folgenden beiden Tabellen werden einige dieser Möglichkeiten aufgelistet und kurz erläutert.

**Tabelle 8**  
**Möglichkeiten der Entschädigung von Gemeinden, Eigentümerinnen und Pächtern beim Bau von alpinen PV-Anlagen.**

Art der Vergütung	Beispiel	Übliche Anwendung	Kommentar
Unternehmerische Beteiligung	Anteil am Aktienkapital	Für Gemeinden bei aktivem Beteiligungswunsch Für Grundeigentümer und Pächter unüblich.	Einsicht und Mitbestimmung im Projekt Es resultieren unternehmerische Risiken
Erbringung von Gegenleistungen	Projekt finanziert Wegausbau/-unterhalt; Fonds für energetische Massnahmen im Dorf; Sponsoring	Für Gemeinden/Grundeigentümer/(Pächter) Wasserkraft, Windkraft	Optimal, wenn Projekte mit Synergien (z.B. Leerrohre für kommunale Versorgung) vorliegen. Achtung, diese Kosten sind typischerweise bei BFE-Förderung nicht anrechenbar.
Steuern (PV-bezogene Steuer/ Konzessionsabgabe)	Betrag für produzierte Energie	Für Gemeinden «Solarzins»	Bedingt gesetzliche Grundlage, die vom Kanton geprüft wird
Parkgesellschaft	Steuern auf Gewinn und Gesellschaftskapital	Für Gemeinden	Gesellschaft muss Sitz in Gemeinde haben. Ausgleichsmechanismen, wenn mehrere Gemeinden betroffen.
Baurechtszins (Für Gebäude und PV-Anlage)	Regelmässige Vergütung eines festgelegten Betrags	Für Grundeigentümer	Festlegung des Zinses und des Zahlungsrhythmus
Vergütung für Dienstbarkeiten (Wegerechte, Kabeltrasse, Niederhaltung Wald etc).	Betrag pro Distanz oder Fläche	Für Grundeigentümer	–
Vergütung für Nutzungseinschränkungen, Kompensation	Jährlicher Betrag pro Distanz oder Fläche	Für Grundeigentümer, Pächter, (Gemeinde)	Einmalige Sachen, Bauschäden, kleine Beträge
Förderung der Alpwirtschaft	Elektrifizierung; Renovation Alphütten; Erneuerung Wasserversorgungen; Bau von Viehunterständen	Für Grundeigentümer, Pächter, (Gemeinde)	Solche Massnahmen fördern zudem die Akzeptanz der Anlage. Achtung, diese Kosten sind typischerweise bei BFE-Förderung nicht anrechenbar.

Neben den verschiedenen Vergütungsarten gibt es auch in Bezug auf die Zeitpunkte der Zahlungen und die Vergütungshöhen unterschiedliche Optionen, die in der folgenden Tabelle beschrieben werden.

**Tabelle 9**  
**Möglichkeiten bei der Ausgestaltung der Vergütungskonditionen für alpine PV-Anlagen**

Ausgestaltung der Vergütung	Indexierung/ Abstufung	Beispiel	Übliche Anwendung	Kommentar
Fixvergütung (einmalig)	Nein	Betrag	Einfache Dienstbarkeiten/Nutzungseinschränkungen/Kompensationen	Einfach und gut kommunizierbar
Fixvergütung (jährlich)	Möglich	Betrag/Fläche; Betrag/Leistung	Einfache Dienstbarkeiten/Nutzungseinschränkungen/Kompensationen	Einfach und gut kommunizierbar
Flexible Vergütung (an Energieertrag geknüpft)	Möglich	Betrag/Energie	Wasserkraft; «Solarrappen»	Einfach und gut kommunizierbar
Flexible Vergütung (an finanziellen Ertrag geknüpft)	Indexierung über Vermarktungspreis enthalten; Abstufung möglich	Anteil der Einspeisevergütung; Anteil des Gewinns der Projektgesellschaft	Windkraft	Komplexere Berechnung und Risiko von starken Schwankungen der Vergütung
Mischformen	Möglich	Betrag/Energie, aber mindestens leistungsbasierter Minimalwert	Windkraft (Projekte mit starken Produktionsschwankungen); Risikominimierung durch Untergrenze	Komplexere Berechnung; Absicherung der Strompreisisiken für Gemeinde/ Grundeigentümer/ Pächter möglich

Fragestellungen bei der Ausgestaltung der Vergütungskonditionen:

- Wird der Betrag einmalig kumuliert bezahlt oder wiederkehrend (üblicherweise alle Jahre)?
- Wird zwischen Sommerstrom und Winterstrom unterschieden?
- Ist die Vergütung indexiert? Koppelung Vergütung z.B. an Teuerungsindex, Strompreis index oder andere Modalität.
- Gibt es eine zeitliche Abstufung? Z.B. tieferer Ansatz für die ersten 10 Jahre, während denen die Fremdkapitallast grösser ist, danach dann höherer Ansatz.

Aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Baukosten und der einzuhaltenden Frist für die teilweise Einspeisung (31.12.2025) empfiehlt sich ein flexibler Ansatz oder sogar die Unterscheidung der Vergütung in Fall A (inkl. Subventionen nach Art. 71a EnG) und Fall B (bei Nichterhalt der Bundessubventionen).

Je nach Ansatz ist eine vorgängige juristische Prüfung dringend zu empfehlen hinsichtlich rechtlicher Zulässigkeit. Speziell, wenn der Vergütungsberechtigte eine öffentliche oder quasiöffentliche Trägerschaft ist. Hier kann das [Rechtsgutachten](#) zu beschaffungsrechtlichen Fragen im Zusammenhang mit der Realisierung von PV-Anlagen (Solar-Express) der Badertscher Rechtsanwälte AG weiterhelfen.

## 10. Weiterführende Informationen

### 10.1 Alpine PV competence

Mit dem Projekt Alpine PV competence hat sich ein Hochschul-Konsortium aus den Schweizer PV-Kompetenzzentren ZHAW, BFH, SUPSI und OST zusammengeschlossen. Ziel des Konsortiums ist es, durch den gezielten Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen den einzelnen Projektteams sowie mit verschiedenen Umsetzungspartnern und Branchenfachleuten eine zentrale Wissensbasis aufzubauen. Das Ergebnis ist die Website [alpine-pv.ch](http://alpine-pv.ch), auf der wissenschaftliche Erkenntnisse und angewandtes Know-how im Bereich der alpinen PV-Anlagen effizient zusammengetragen und organisiert werden. Weiter werden Informationen über den Projektfortschritt von alpinen PV-Anlagen in der ganzen Schweiz laufend gesammelt und aktualisiert.

### 10.2 IG Solalpine

Die Interessengemeinschaft IG Solalpine ist ein nicht gewinnorientierter Verein, der sich für den Bau von Photovoltaikanlagen im Schweizer Alpenraum und an Standorten mit hoher Winterbesonnung einsetzt. Sie vermittelt zwischen Elektrizitätsversorgungsunternehmen, Gemeinden, Grundstückseigentümern und lokalen Gemeinde-EW und arbeitet mit NGOs und Politik zusammen, um günstige Rahmenbedingungen für alpine PV-Anlagen zu schaffen. Die Einhaltung hoher Qualitätsstandards steht im Fokus. Ergebnisse aus Aktivitäten der Interessengemeinschaft und Informationen zur alpinen PV werden auf der Website [www.solalpine.ch](http://www.solalpine.ch) und in den Medien veröffentlicht.

# 11. Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Testanlage Tschers, Nandro-Solar, Abbildung von ewz, ZENDRA AG (November 2023)	1
<b>Abbildung 2:</b> Ablauf des Subventionsverfahrens. Abbildung von Swissolar (August 2024)	12
<b>Abbildung 3:</b> Schneeablagerung in kg/m <sup>2</sup> im Zusammenhang mit vertikal aufgeständerten PV-Modulen. Abbildung von WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)	16
<b>Abbildung 4:</b> Schneeablagerung in kg/m <sup>2</sup> im Zusammenhang mit vertikal aufgeständerten PV-Modulen und einem vorgelagerten Schneefangzaun. Abbildung von WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)	17
<b>Abbildung 5:</b> Druckverteilung und Windgeschwindigkeit für vertikal aufgeständerte PV-Module. Abbildung von WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Januar 2024)	19
<b>Abbildung 6:</b> Visualisierung Projekt NalpSolar. Abbildung von Basler & Hofmann AG (Juli 2023)	22
<b>Abbildung 7:</b> Visualisierung Projekt SedrunSolar, Gemeinde Tujetsch. Abbildung von energia alpina, ZENDRA AG (Oktober 2023)	23
<b>Abbildung 8:</b> Verschattungswinkel, Abstand zum Boden, Modulneigung, Geländeneigung und Reihenabstand bei alpinen PV-Anlagen. Abbildung von Basler & Hofmann AG (2024)	26
<b>Abbildung 9:</b> Winterhalbjährlicher und jährlicher Ertrag als Funktion der Modulneigung (Tilt) und des Verschattungswinkels für bifaziale, nach Süden oder 45° West ausgerichtete Module auf flachem Gelände (Standort: Weissfluhjoch). Abbildung von Planair SA (2024)	27
<b>Abbildung 10:</b> Testanlage NalpSolar nach Design von Basler & Hofmann AG. Version für steiles Gelände mit erhöhter Belastung. Abbildung von <a href="https://www.axpo.com/ch/de/about-us/solaroffensive.html">https://www.axpo.com/ch/de/about-us/solaroffensive.html</a>	28
<b>Abbildung 11:</b> «Heatmap» der normalisierten Leistung eines PV-Moduls (mittlerer Tisch der Testanlage SedrunSolar) im Zeitraum April 2023 bis März 2024. Minütliche IV-Kennlinien-Messung. Abbildung von energia alpina, ZENDRA AG, gantner instruments (April 2024)	29
<b>Abbildung 12:</b> Erste 20 Modultische der Sedrun Solar mit bifazialen Glas-Glas-Modulen (108 und 144 Halbzellen). Abbildung von Sedrun Solar AG, ZENDRA AG (November 2024)	30
<b>Abbildung 13:</b> Berechnung der Produktionsverluste pro Jahr für fix montierte Reihen mit bifazialen Modulen und 75° Neigung, links mit der Ausrichtung gegen Süden und rechts mit der Ausrichtung gegen Südosten. Abbildung von BFH mit PVsyst und Wetterdaten von Meteonorm (Januar 2024)	30
<b>Abbildung 14:</b> Berechnung der Produktionsverluste pro Jahr für fix montierte Reihen mit bifazialen Modulen und 75° Neigung, links mit der Ausrichtung gegen Süden und rechts mit der Ausrichtung gegen Südosten. Abbildung von BFH mit PVsyst und Wetterdaten von Meteonorm (Januar 2024)	31

<b>Abbildung 15:</b>	31
Berechnung der Produktionsverluste (abgeregelte Energiemenge) pro Winterhalbjahr für fix montierte, nach Süden ausgerichtete, bifaziale Solarmodule mit drei unterschiedlichen Neigungen. Links für das Sommerhalbjahr und rechts für das Winterhalbjahr. Abbildung von ZHAW basierend auf Messdaten der Testanlage Totalp (Januar 2024)	
<b>Abbildung 16:</b>	33
Anzahl Blitzeinschläge pro Jahr und Quadratkilometer in der Schweiz für die Periode 2000 bis 2020. Nur die Hauptblitze, ohne Nebenblitze. Abbildung von © MeteoSchweiz (April 2024)	
<b>Abbildung 17:</b>	35
Maschine für das Rammen von Profilen. Abbildung von R&L Co., Ltd. <a href="http://www.rlsolar.jp">http://www.rlsolar.jp</a> (April 2024)	
<b>Abbildung 18:</b>	36
Bohrbagger Morath BB7000-7FP zur Mikropfahlerstellung. Abbildung von Gasser Felstechnik AG (April 2024)	
<b>Abbildung 19:</b>	37
ALPIN QUATTRO® Generation 2, am Bsp. der Testanlage Tschers, Nandro-Solar. Abbildung von ewz, ZENDRA AG (November 2023)	
<b>Abbildung 20:</b>	38
Rendering GEV Alpin Solar System. Abbildung von Green Energy Venture AG (September 2023)	
<b>Abbildung 21:</b>	39
Demonstrationsanlage des Kompaktsolareseil-Systems auf dem Firmengelände der Inauen-Schätti AG. Abbildung von Inauen-Schätti AG (April 2024)	
<b>Abbildung 22:</b>	40
Visualisierung System Solar Wings auf einer Hochebene. Abbildung von Bartholet Maschinenbau AG (April 2024)	
<b>Abbildung 23:</b>	41
Visualisierung System HELIOPLANT®. Abbildung von ehoch2 energy engineering e.U. (September 2023)	
<b>Abbildung 24:</b>	42
Visualisierung von ALX 250 Alpin. Abbildung von Turn2watt SA (Oktober 2023)	
<b>Abbildung 25:</b>	55
Kostenverteilung nach Kategorien für ein generisches Projekt. Abbildung von Planair SA (November 2024)	

## 12. Quellenverzeichnis

Abegg, A., Streiff, O., & Trajkova, R. (2023). Energie im Konflikt mit dem Natur- und Heimatschutz. Von digitalcollection.zhaw.ch: <https://digitalcollection.zhaw.ch/server/api/core/bitstreams/ceae93fc-f081-4edd-b634-5b7989f3c667/content> abgerufen

Anderegg, D., Strelbel, S., & Rohrer, J. (2023). Alpine Photovoltaik Versuchsanlage Davos Totalp : Erkenntnisse aus 5 Jahren Betrieb. Von digitalcollection.zhaw.ch: <https://digitalcollection.zhaw.ch/items/88b49084-5ac3-4aba-8fac-29792fc47ea3> abgerufen

ARE & AEV GR. (Oktober 2023). Leitfaden Bewilligungsverfahren für Photovoltaik-Grossanlagen nach Art. 71a EnG. Von Amt für Raumentwicklung & Amt für Energie und Verkehr Graubünden: [https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/are/BAB/Leitfaden%20Solarexpress\\_de.pdf](https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/are/BAB/Leitfaden%20Solarexpress_de.pdf) abgerufen

AUE-BE. (2023). Merkblatt Alpine Photovoltaik-Grossanlagen Kanton Bern. Von Amt für Umwelt und Energie BE, [www.weu.be.ch](http://www.weu.be.ch): <https://www.weu.be.ch/de/start/themen/energie/photovoltaik-grossanlagen.html> abgerufen

Badertschert Rechtsanwälte AG. (2023). Rechtsgutachten zu beschaffungsrechtlichen Fragen im Zusammenhang mit der Realisierung von Photovoltaik-Anlagen („Solar- Express“). Von bpuk.ch: [https://www.bpuk.ch/fileadmin/Dokumente/bpuk/public/de/dokumentation/berichte-gutachten-konzepte/oeffentliches-beschaffungswesen/D\\_Rechtsgutachten\\_zu\\_beschaffungsrechtlichen\\_Fragen\\_im\\_Zusammenhang\\_mit\\_der\\_Realisierung\\_von\\_Photovoltaik-Anlagen\\_Solar-Expres](https://www.bpuk.ch/fileadmin/Dokumente/bpuk/public/de/dokumentation/berichte-gutachten-konzepte/oeffentliches-beschaffungswesen/D_Rechtsgutachten_zu_beschaffungsrechtlichen_Fragen_im_Zusammenhang_mit_der_Realisierung_von_Photovoltaik-Anlagen_Solar-Expres) abgerufen

BAFU. (2001). Landschaftsästhetik - Wege für das Planen und Projektieren. Von Bundesamt für Umwelt, [bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/landschaft/publikationen-studien/publikationen/landschaftsaesthetik.html> abgerufen

BAFU. (2009). UVP-Handbuch. Richtlinie des Bundes für die Umweltverträglichkeitsprüfung. Von Bundesamt für Umwelt, [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/uvp/publikationen/publikationen/uvp-handbuch.html> abgerufen

BAFU. (2021). Vollzugshilfe Lichtemissionen. Von Bundesamt für Umwelt, [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch): [https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektromog/fachinformationen/lichtemissionen--lichtverschmutzung-/vollzugshilfe.html#:~:text=Vollzugshilfe%20\(2021\)&text=Zu%20diesem%20Zweck%20soll%20sie,Verminderung%20von%20Lichtemissionen%20zu%20treffen.](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektromog/fachinformationen/lichtemissionen--lichtverschmutzung-/vollzugshilfe.html#:~:text=Vollzugshilfe%20(2021)&text=Zu%20diesem%20Zweck%20soll%20sie,Verminderung%20von%20Lichtemissionen%20zu%20treffen.) abgerufen

BFE. (2023). Preisbeobachtungsstudien. Von Bundesamt für Energie, [bfe.admin.ch](http://bfe.admin.ch): <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/suche?keywords=&q=Photovoltaik+preisbeobachtungsstudie&from=&to=&nr=> abgerufen

BFE. (2024a). Gesuch um Einmalvergütung für eine PV-Grossanlage nach Art. 71a EnG. Von Bundesamt für Energie, [bfe.admin.ch](http://bfe.admin.ch): <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11715> abgerufen

BFE. (2024b). Preisszenarien für Einmalvergütungen und. Von Bundesamt für Energie, [bfe.admin.ch](http://bfe.admin.ch): <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11481> abgerufen

BFE. (2024c). Leitfaden zur Excel-Vorlage «Wirtschaftlichkeitsbewertung für PV-Grossanlagen». Von Bundesamt für Energie. [bfe.admin.ch](http://bfe.admin.ch): <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11753> abgerufen

BFE. (2024d). Excel Vorlage Wirtschaftlichkeitsbewertung PV-Grossanlagen. Von Bundesamt für Energie, [bfe.admin.ch](http://bfe.admin.ch): <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11416> abgerufen

BFE. (2024e). Vorlage zur Auflistung der Investitionskosten. Von Bundesamt für Energie, bfe.admin.ch: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11391> abgerufen

BFE. (2024f). Vorgaben zur Berechnung des Energieertrags für Photovoltaik-Grossanlagen. Von Bundesamt für Energie, bfe.admin.ch: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11417> abgerufen

BFE, B. f. (2023). Preisbeobachtungsstudien. Von bfe.admin.ch: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/suche?keywords=&q=Photovoltaik+preisbeobachtungsstudie&from=&to=&nr=> abgerufen

ESTI. (2021). ESTI Weisung Nr. 220 / Version 0621 Anforderungen an Energieerzeugungsanlagen. Von Eidgenössisches Starkstrominspektorat, esti.admin.ch: [https://www.esti.admin.ch/inhalte/ESTI\\_220\\_0621.pdf](https://www.esti.admin.ch/inhalte/ESTI_220_0621.pdf) abgerufen

Hames, O., Jafari, M., Wagner, D. N., Raphael, I., Clemens-Sewall, D., Polashenski, C., . . . Lehning, M. (2021). Modelling the small-scale deposition of snow onto structured Arctic sea ice during a MOSAiC storm using snowBedFoam 1.0. Von Infoscience.epfl.ch: <https://infoscience.epfl.ch/server/api/core/bitstreams/0ef855a2-3de2-4db1-82f5-72abd63775dc/content> abgerufen

Kanton Bern, B. E. (2023). Blendtool. Von blendtool.ch: <https://blendtool.ch/> abgerufen

NREL. (2018). Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition. Von National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73822.pdf> abgerufen

NREL. (2020). Model of Operation-and-Maintenance Costs for Photovoltaic Systems. Von National Renewable Energy Laboratory, nrel.gov.ch: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74840.pdf> abgerufen

Rapaport, S., Green, M., Graniero, P., Ulbrich, C., Louwen, A., & Jahn, U. (2022). The Use of Advanced Algorithms in PV Failure Monitoring. Von www.researchgate.net: [https://www.researchgate.net/publication/365626918\\_The\\_Use\\_of\\_Advanced\\_Algorithms\\_in\\_PV\\_Failure\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/365626918_The_Use_of_Advanced_Algorithms_in_PV_Failure_Monitoring) abgerufen

SCNAT. (April 2024). <https://scnat.ch/de>. Von Akademie der Naturwissenschaften Schweiz: [https://sap.scnat.ch/de/projects/erneuerbare\\_energien/uuid/i/b2a3c6d1-2d4b-50d5-8daf-019123be49df-Tabelle\\_der\\_Kriterien\\_zur\\_Ausscheidung\\_konfliktarmer\\_Energieproduktionsgebiet](https://sap.scnat.ch/de/projects/erneuerbare_energien/uuid/i/b2a3c6d1-2d4b-50d5-8daf-019123be49df-Tabelle_der_Kriterien_zur_Ausscheidung_konfliktarmer_Energieproduktionsgebiet) abgerufen

slfp. (2023). Katalog von Anforderungen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Alpenraum Fokusthema Landschaftsschutz. Von Stiftung Landschaftsschutz Schweiz, www.sl-fp.ch: <https://www.sl-fp.ch/de/stiftung-landschaftsschutz-schweiz/dokumentation/positionspapiere-116.html> abgerufen

SUVA. (2022). Gebirgsbaustellen Checkliste. Von Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, www.suva.ch: <https://www.suva.ch/de-ch/download/checklisten/gebirgsbaustellen/gebirgsbaustellen--67154.D?lang=de-CH> abgerufen

Swissolar. (2024). Normen und Vorschriften. Von www.swissolar.ch: <https://www.swissolar.ch/de/wissen/planung-umsetzung/normen-und-vorschriften> abgerufen

UVEK. (2024). Erläuternder Bericht zu den Verordnungsbestimmungen Art 71a EnG. Von Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation, bfe.admin.ch: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11413> abgerufen

VSE. (2022). Netzanschluss für Energieerzeugungsanlagen an das Mittel- und Hochspannungsnetz (NA/EEA-NE3-5 – CH 2022). Von Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, www.strom.ch: <https://www.strom.ch/de/shop/netzanschluss-fuer-energieerzeugungsanlagen-das-mittel-und-hochspannungsnetz-naeea-ne3-5-ch> abgerufen