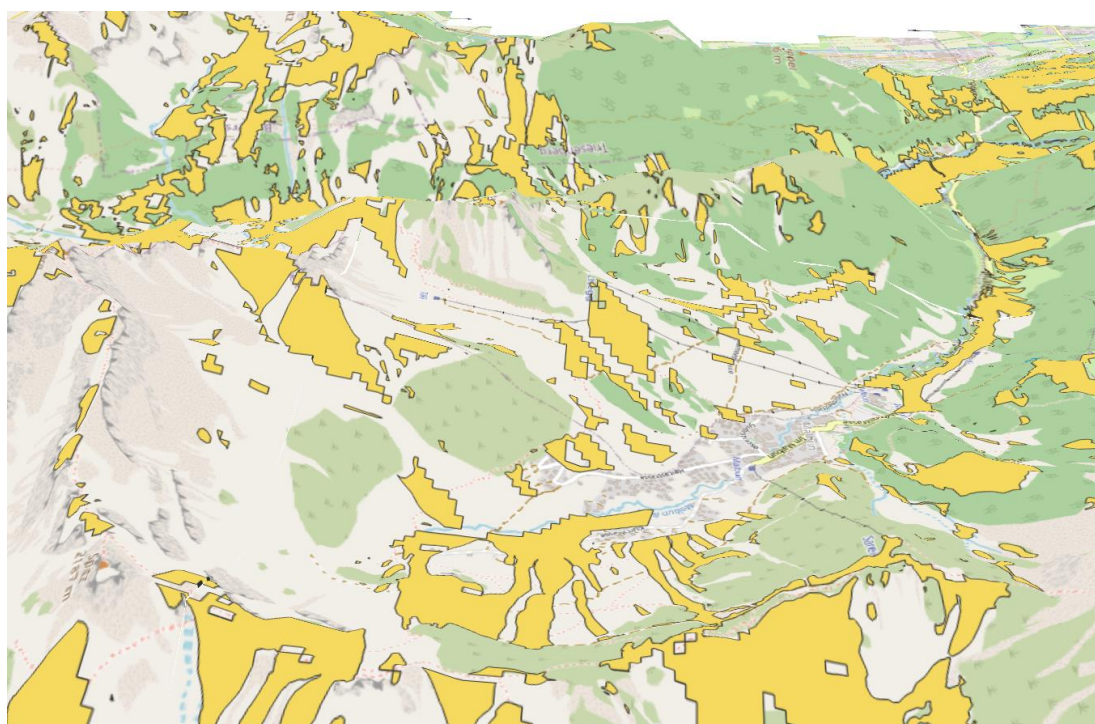


POTENTIALANALYSE FREIFLÄCHEN- PHOTOVOLTAIKANLAGEN IM ALPINEN RAUM LIECHTENSTEIN

PHASE 1: FLÄCHENPOTENTIALERMITTLUNG



Version 1.0, 24. Januar 2023



Impressum

Auftraggeber Ministerium für Inneres, Wirtschaft und Umwelt
Vertreten durch Regierungschef-Stellvertreterin Sabine Monauni
Peter-Kaiser-Platz 1
Postfach 684
LI-9490
Vaduz
Liechtenstein

Auftragnehmer Lenum AG
Gewerbeweg 15
LI-9490 Vaduz
www.lenum.com

**Netzwerkpartner/
Subunternehmer** Energy Science Center (ESC)
ETH Zürich, SOI B 1.2
Sonneggstrasse 28
8006 Zürich

Verteiler Auftraggeber

Version 2.0, 24. Januar 2023

Verfasser Gerwin Frick
Dr. Marius Schwarz

Dateiname pv165_be_230111_Bericht_PA_PV_Alpin_FL.docx





1. ZUSAMMENFASSUNG	4
2. AUSGANGSLAGE	6
2.1 Energieverbrauch und Stromproduktionspotentiale	6
2.2 Herausforderungen Photovoltaik	8
2.3 Alpine Photovoltaikanlagen - ein Beitrag zur Winterstromlücke!	9
3. PHOTOVOLTAIK INSTALLATIONSFLÄCHENPOTENTIAL IM ALPIN BEREICH IN LIECHTENSTEIN	12
3.1 Methodik	12
3.2 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 1 «weiche Ausschlusskriterien»	14
3.3 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 2 «strikte Ausschlusskriterien»	15
3.4 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 3 «sehr strikte Ausschlusskriterien»	16
3.5 Übersicht über alle Szenarien	17
3.6 Weiteres Vorgehen	18
ANHANG	



1. ZUSAMMENFASSUNG

Liechtenstein hat eine Eigenversorgungsquote im Energiebereich von 12.6%. 7.3% (35'000 kW_p, 30'000 MWh je Jahr) des Strombedarfes wird dabei durch Photovoltaik bereitgestellt. Aufgrund der Elektrifizierung in den Bereichen Mobilität und Wärme wird Elektrizität aus heutiger Sicht die zentrale Rolle in der Energieversorgung Liechtensteins einnehmen. Photovoltaik hat in Liechtenstein das grösste Potential für die inländische Stromerzeugung und wird einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Energie- und die klimapolitischen Ziele in Liechtenstein zu erreichen.

Auf der Grundlage von georeferenzierten Ausschlusskriterien wie Hangausrüstung, Hangneigung, Höhenlage, Steinschlag, Lawinen etc. wurde das Installationsflächenpotential für Photovoltaikanlagen in 3 Ausschluss-szenarien identifiziert:

		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
		weiche Ausschlusskriterien	strikte Ausschlusskriterien	sehr strikte Ausschlusskriterien
Flächenpotential	km ²	12.903	5.073	0.050
	MW _p	2'151	846	8
Minimalfläche > 6'000 m² (≈ 1 MW_p)	km ²	11.602	4.240	0.008
	MW _p	1'934	707	1
Minimalfläche > 60'000 m² (≈ 10 MW_p)	km ²	8.351	2.053	-
	MW _p	1'392	342	-
Minimalfläche > 180'000 m² (≈ 30 MW_p)	km ²	5.739	1.008	-
	MW _p	957	168	-

Tab. 1.1.: Photovoltaikflächenpotentiale Szenarien 1-3 (weich bis sehr strikt)

Die Auswertungen zeigen, dass Liechtenstein durchaus alpine Flächen hat, welche für Photovoltaikanlagen in Frage kommen könnten. So ist unter Berücksichtigung der weichen Ausschlusskriterien gemäss Tabelle 1.1 eine für die Erstellung von Photovoltaikanlagen im alpinen Raum Liechtenstein geeignete Fläche von 12.9 km² vorhanden. Dies würde einem theoretischen Photovoltaikpotential von rund 2'150 MW_p entsprechen. Da alpine Photovoltaikfreiflächenanlagen nur ab einer Grösse von mindestens ca. 1 MW_p sinnvoll sind, wurden 3 Minimalflächenkategorien (> 6'000 m², ca. 1 MW_p / > 60'000 m², ca. 10 MW_p / > 180'000 m², ca. 30 MW_p) definiert und die entsprechenden Flächenpotentiale in der Tabelle 1.1 ausgewiesen.

Geht man davon aus, dass 60 MW_p (knapp 1/3 von Szenario 2 und einer Minimalfläche > 180'000 m²) alpine Photovoltaik installiert werden



könnten, so würde eine Fläche von rund 0.36 km² bzw. rund 0.2% der Landesfläche benötigt. Im alpinen Bereich kann im optimalen Fall mit bis zu Faktor 2 mehr Stromertrag gegenüber dem Mittelland gerechnet werden. Mit 60 MW_p installierter alpiner Photovoltaikleistung könnten in Liechtenstein gut 100'000 MWh je Jahr (knapp 25% des Strombedarfs 2021) und davon rund 50'000 MWh im Winterhalbjahr erneuerbar und heimisch produziert werden. Das theoretisch ausgewiesene Potential ist noch bedeutend grösser.

Fazit und weiteres Vorgehen

Photovoltaikanlagen im alpinen Bereich können nicht nur die Eigenverbrauchsquote Liechtensteins erhöhen, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zur Deckung der Winterstromlücke leisten.

In einem weiteren Schritt gilt es das theoretische Flächenpotential auf ein realistisches herunterzubrechen. Wir empfehlen daher auf der Grundlage der evaluierten Installationsflächen 2-4 am besten geeignete Flächen zu identifizieren.

Dabei sollten weiteren Kriterien und die Meinung von lokalen Fachleuten im Bereich Bevölkerungs- und Umweltschutz herangezogen werden. Für diese am besten geeigneten Flächen können dann detailliertere Untersuchungen mit folgenden Schwerpunkten durchgeführt werden:

- Machbarkeit Photovoltaikanlage
- Machbarkeit Netzanschluss
- Dimensionierung der Anlage
- Stromertragssimulation
- Kostenschätzung
- Wirtschaftlichkeitsrechnung
- Abklärungen gesetzliche Grundlagen wie Bewilligungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit



2. AUSGANGSLAGE

2.1 Energieverbrauch und Stromproduktionspotentiale

In Liechtenstein wurde gemäss Energiestatistik 2021 gut 1.23 TWh Energie verbraucht. Dabei macht Elektrizität mit 34% gefolgt von Heizöl/Gas (31%) und Benzin/Diesel (19%) den grössten Verbrauch aus. Die Eigenversorgungsquote liegt dabei bei 12.6%! Der Energieverbrauch im Bereich Mobilität beinhaltet zudem nur den an Liechtensteiner Tankstellen abgesetzten Benzin/Diesel-Anteil. Hochrechnungen über gefahrene Autokilometer im Energiekataster Liechtenstein zeigen auf, dass der Energieverbrauch im Mobilitätsbereich noch bedeutend höher ist.

Das Folgende Diagramm zeigt auf, dass der Energieverbrauch 2021 in Liechtenstein sich zu 34% aus Elektrizität, zu 31% Wärme aus fossilem Erdgas und Heizöl, zu 19% aus fossiler Mobilität (Benzin/Diesel) und zu 16% aus erneuerbaren Energiequellen zusammensetzt. Aufgrund der aktuell vorhandenen bezahlbaren Technologien ist die Elektrifizierung in den Bereichen Wärmebereitstellung (Substitution von fossilen Öl- und Gasheizungen durch elektrisch betriebene Wärmepumpen) und Mobilität (Substitution von Benzin- und Dieselfahrzeuge durch elektrische Antriebe) bereits spürbar. In Zukunft wird daher der «Energieträger Strom» die zentrale Rolle bei der Energieversorgung in Liechtenstein einnehmen.

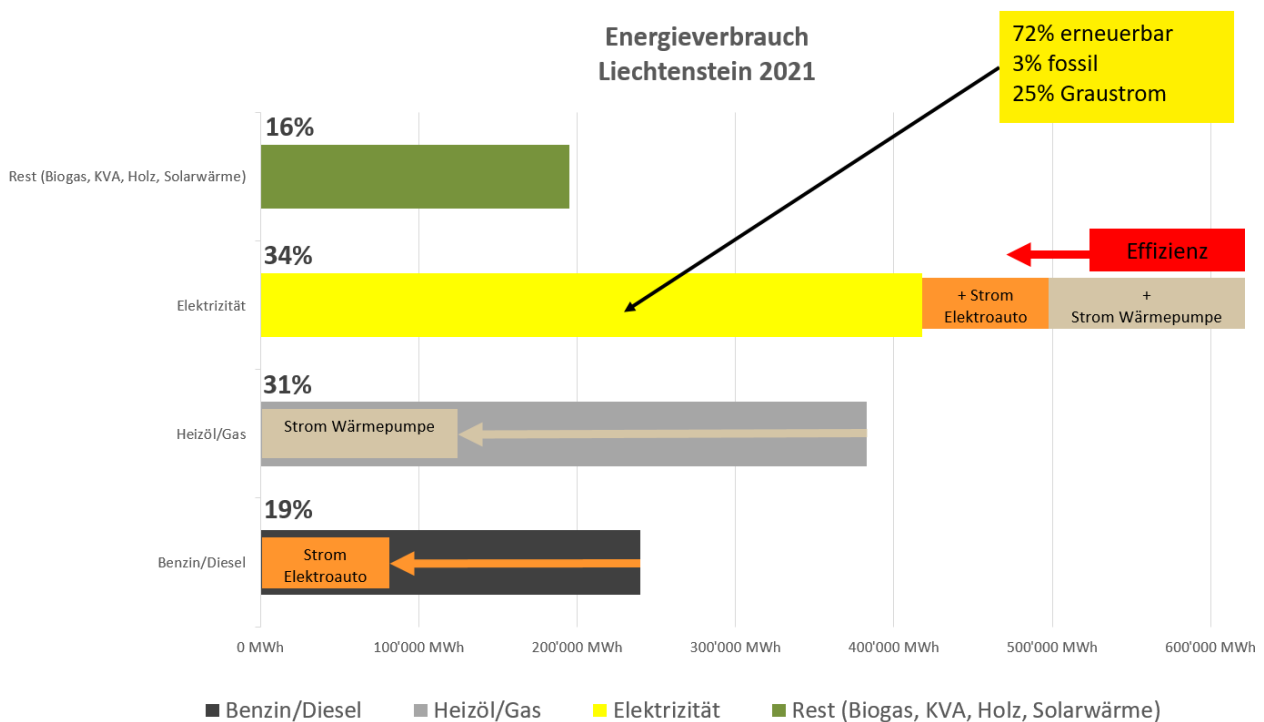


Diagramm 2.1: Energieverbrauch Liechtenstein 2021 und Szenarien Elektrifizierung Wärme/Mobilität

Um die Energiewende unter Einhaltung der Ziele der Klimastrategie Liechtenstein anzugehen und die Energieabhängigkeit vom Ausland zu reduzieren, braucht es einen massiven Ausbau an erneuerbarer Inlandstromproduktion. Aktuell wird in Liechtenstein Wasserkraft-, Biomasse (Holzvergasung in Malbun) und Photovoltaikstrom erneuerbar produziert. Hinsichtlich erneuerbarer Stromproduktion hat Liechtenstein aus heutiger Sicht folgende Potentiale:

- Windenergie
- Wasserkraft (Rheinkraftwerk)
- Biomasse (Biogasanlage oder Holzheizkraftwerk)
- Geothermie
- Sonnenenergie (Photovoltaik)

Dabei hat Photovoltaik in Liechtenstein das grösste Potential und ist hinsichtlich Akzeptanz auf Dach- und versiegelten Freiflächen gut realisierbar. Im Bereich Fassaden und unversiegelten Freiflächen fehlt weitgehend sowohl die Akzeptanz wie auch bei Letzteren die entsprechenden gesetzlichen Grundlagen. Im Jahr 2021 wurde 7.3% des Strombedarfs mit Photovoltaik gedeckt. Die hierfür notwendige Photovoltaikmodulfläche entspricht 0.1% der Landesfläche. Hätte man im Jahr 2021 buchhalterisch 100% des Strombedarfes mit Photovoltaik gedeckt, so wären rund 209 ha, was 1.3% der Landesfläche entspricht benötigt worden.

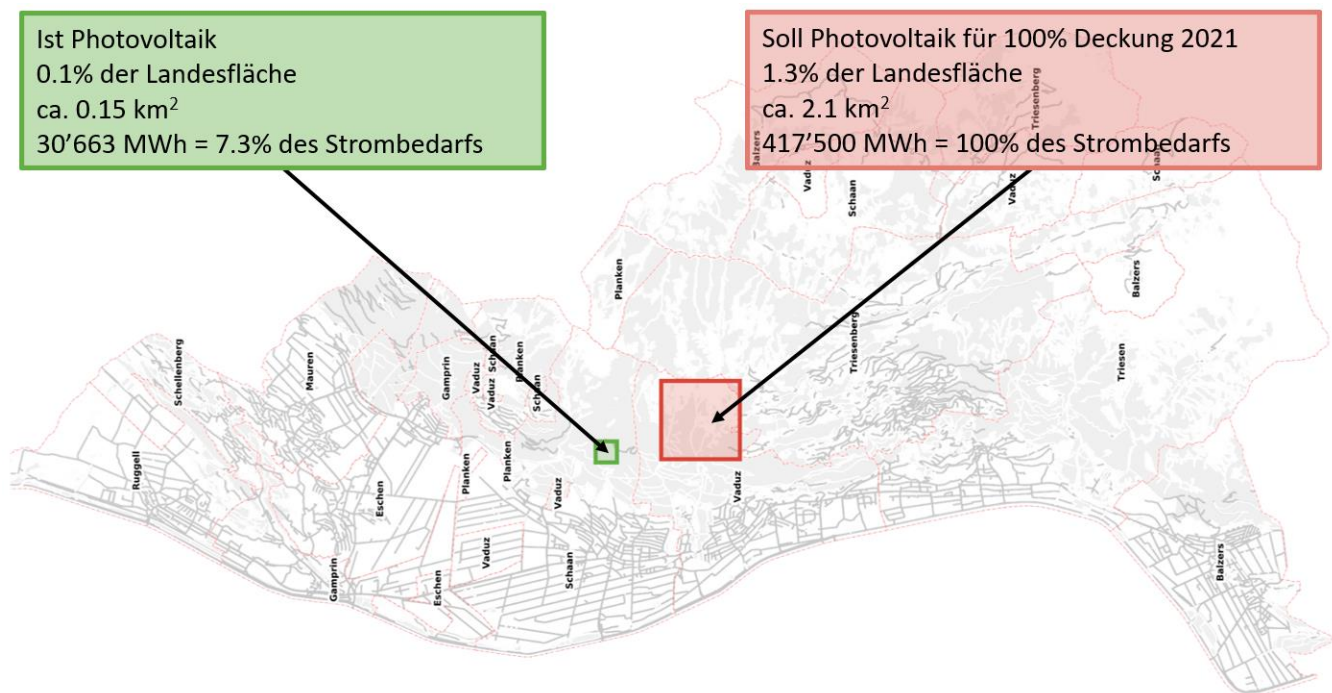


Abb. 2.1.: «Ist-Photovoltaikflächen und «Soll-Photovoltaikflächen» für buchhalterische 100% Deckung

2.2 Herausforderungen Photovoltaik

Photovoltaik ist aus ökologischer Sicht, hinsichtlich Akzeptanz und Umweltverträglichkeit aus momentaner Sicht eine der geeignetsten Technologien, um die Energiewende zu schaffen. Es gibt aber zwei Herausforderungen, die es in Zukunft zu lösen gibt:

Tag – Nacht und Schlechtwetter Problematik

Photovoltaikanlagen liefern dann Elektrizität, wenn die Sonne scheint. In der Nacht und während Schlechtwetterphasen geht der Stromertrag gegen Null. Typische Wohnstromverbrauchsprofile zeigen Spitzen in den Morgen- und Abendstunden. An sonnigen Sommertagen wird wiederum mehr Strom produziert als benötigt wird. Folgende Graphik zeigt einen typischen Tagesverlauf Photovoltaikstromertrag im Vergleich zum Strombedarf bei einem Wohngebäude auf.

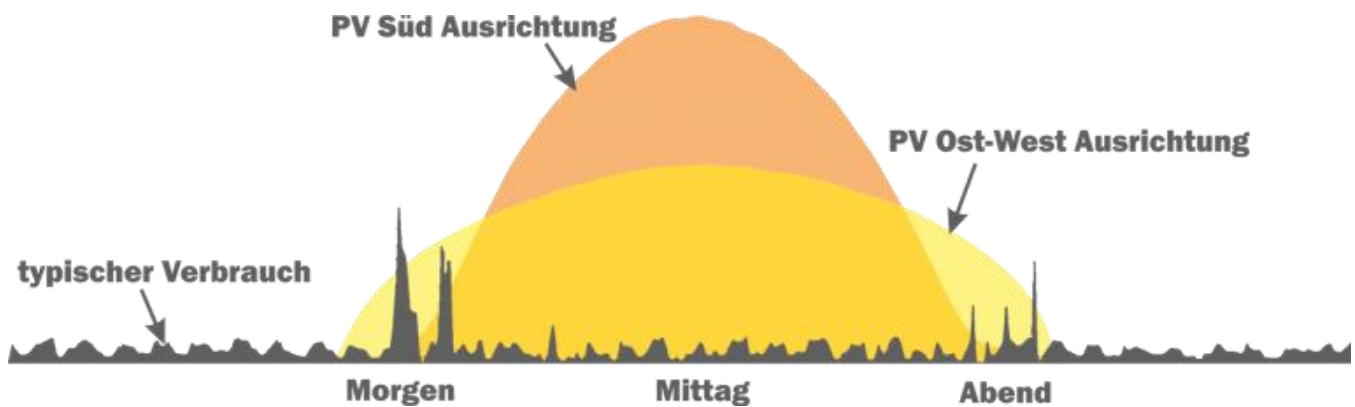


Abb. 2.2: Typischer Tagesverlauf Wohnen (Photovoltaikstromertrag – Strombedarf)

Dieser Problematik kann durch folgende Massnahmen/Technologien aufgefangen werden und ist bereits heute Stand der Technik:

- Ost-West Ausrichtung anstelle Süd Ausrichtung
- Kurzzeitspeicher (z.B. Batterie)
- Eigenverbrauchsoptimierung

Sommer - Winter Problematik

Photovoltaikanlagen liefern im Mittelland im Jahresverlauf rund 75% Stromertrag im Sommerhalbjahr und nur ca. 25% im Winterhalbjahr.

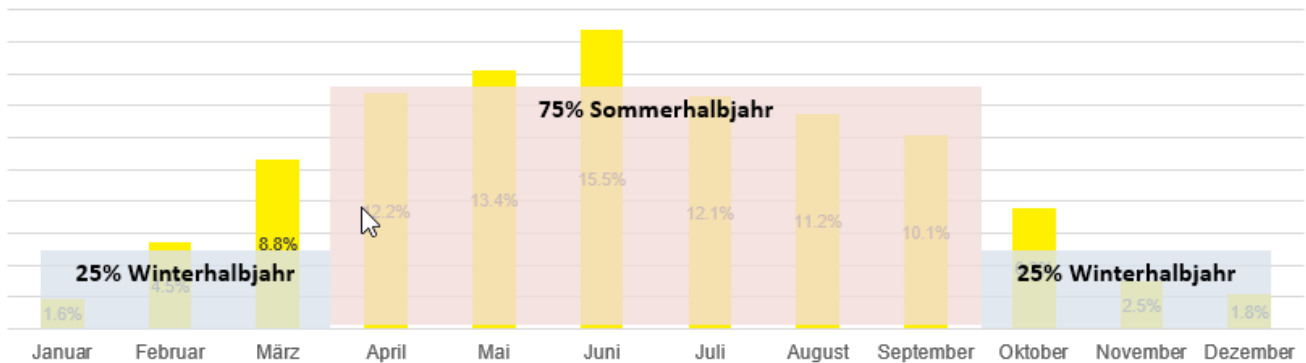


Abb. 2.3.: Typischer Jahresverlauf Photovoltaikstromertrag Winter-Sommer

Dieser Sommer-Winter Problematik kann durch folgende Massnahmen/Technologien entgegengewirkt werden:

- Windenergie (Im Allgemeinen haben wir mehr Wind im Winter wie im Sommer!)
- Ergänzung der Dachphotovoltaikanlagen durch Fassadenanlagen
- Langzeitspeicher (thermische, potenzielle, kinetische oder chemische Energiespeicher)
- Alpine Photovoltaikanlagen

2.3 Alpine Photovoltaikanlagen - ein Beitrag zur Winterstromlücke!

Alpine Photovoltaikanlagen können einen wesentlichen Beitrag zur Deckung der Winterstromlücke leisten. Alpine Photovoltaikanlagen haben folgende Vorteile:

- Weniger Nebel
- Höherer Wirkungsgrad aufgrund tieferer Temperaturen
- Reflexion durch Schnee (Albedo Effekt)
- Dünnere Atmosphäre => intensivere Sonneneinstrahlung
- Bifaziale Module können eingesetzt werden, diese erzeugen auch auf der Modulrückseite Energie

Diese Vorteile sind nicht nur theoretischer Natur, sondern wurden in der Versuchsanlage Davos Totalp auf 2400 m.ü.M. auch gemessen. Dabei hat sich gezeigt, dass ein mit 70° Neigung südaufgeständertes bifaziales Modul den doppelten spezifischen Jahresertrag (1'874 kWh je kW_p und Jahr) wie ein im Mittelland (Wädenswil) südausgerichtetes Modul mit 20 bzw. 30° Neigung (902 kWh je kW_p und Jahr) aufweist. Zudem zeigte die Messung auch, dass der Stromertrag in den Wintermonaten (872 kWh/kW_p) nur minimal vom Stromertrag in den Sommermonaten (981 kWh/kW_p) abweicht.



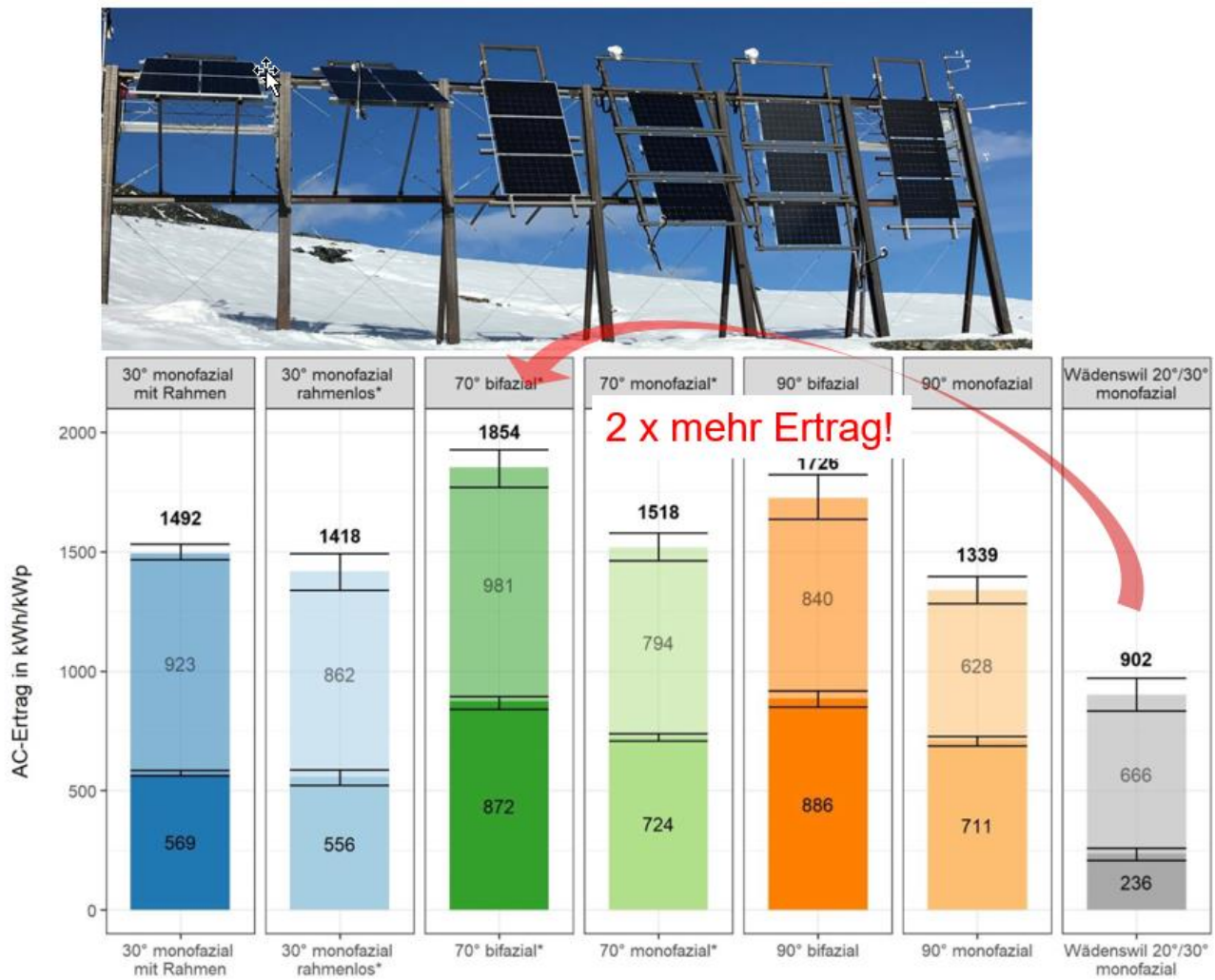


Abb. 2.4: Messstation Davos Totalp auf 2040 m.ü.M.: Mittelwerte 2018-2021. Winterhalbjahrerträge dunkel eingefärbt. Doppel T-Balken sind Min/Max Werte für Winterhalbjahr und gesamtes Jahr. (Quelle: ZHAW Wädenswil – IUNR - Forschungsgruppe Erneuerbare Energie)

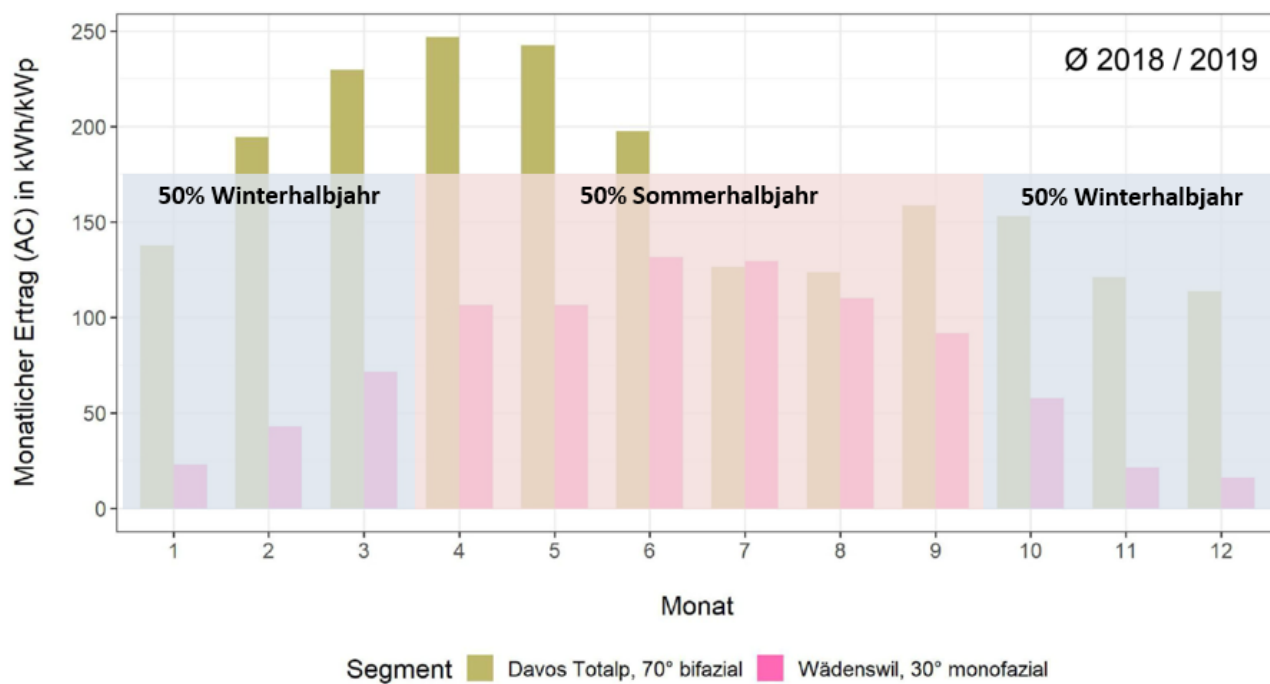


Abb. 2.5.: Messstation Davos Totalp auf 2040 m.ü.M.: Vergleich Winter-Sommerhalbjahr Davos - Wädenswil

3. PHOTOVOLTAIK INSTALLATIONSFLÄCHEN- POTENTIAL IM ALPIN BEREICH IN LIECH- TENSTEIN

In dieser ersten Phase wurde anhand von Ausschlusskriterien die Flächen in Liechtenstein evaluiert, welche für alpine Photovoltaikfreiflächenanlagen in Frage kommen könnten.

3.1 Methodik

Für Photovoltaikfreiflächenanlagen im alpinen Raum in Liechtenstein wurden in dieser Studie folgende einschränkende Kriterien berücksichtigt.

- **Hangausrichtung:** An Nordhängen machen Photovoltaikanlagen aufgrund des Sonnenlaufes wenig Sinn. (Anhang A1)
- **Hangneigung:** Je steiler das Gelände, umso anspruchsvoller ist die Installation einer Photovoltaikanlage. (Anhang A2)
- **Höhenlage:** Die in Kapitel 2.3 erwähnten Vorteile von alpinen Photovoltaikanlagen gelten vor allem für höhere Lagen. (Anhang A3)
- **Steinschlaggebiete:** Steinschläge würden die Photovoltaikanlagen beschädigen. (Anhang A4)
- **Lawinengebiete:** Da Freiflächenphotovoltaikanlagen allenfalls auch eine Lawenschutzfunktion übernehmen können, wurden Lawinengebiete nicht a priori ausgeschlossen. (Anhang A5)
- **Gebäudepufferzone:** Pufferzone um bestehende Gebäude. (Anhang A6)
- **Strassennähe:** Berücksichtigung von Gebieten, die nicht zu weit weg von «befahrbaren» Strassen liegen. (Anhang A7)
- **Ungeeignetes Land:** Zu dem nicht geeigneten Land werden Gebiete mit folgender Bodendeckungen gezählt: Zusammenhängendes und nicht zusammenhängendes städtisches Gefüge, Industrie- und Gewerbebezonen, Mineralienabbaugebiete, nicht bewässertes Ackerland, kleine komplexe Anbaustrukturen, hauptsächlich landwirtschaftlich genutzte Flächen, Wald, Moore und Heideland, Übergangswald und -gebüsch, Binnensümpfe und Wasserlauf Rhein. (Anhang A8)
- **Geeignetes Land:** Als geeignetes Land sind Weiden, Naturwiesen, kahle Felsen und spärlich bewachsene Flächen ausgewiesen. (Anhang A8)

Für die Evaluation der möglichen Installationsflächen im alpinen Bereich wurden folgende 3 Szenarien an «Ausschlusskriterien» definiert:



	Szenario 1 weiche Ausschlusskriterien	Szenario 2 strikte Ausschlusskriterien	Szenario 3 sehr strikte Ausschlusskriterien
Hangausrichtung	Nordhänge	Nordhänge	Nordhänge
Steinschlag	Steinschlaggebiete	Steinschlaggebiete	Steinschlaggebiete
Höhenlage	< 800 m.ü.M.	< 1500 m.ü.M.	< 2000 m.ü.M.
Hangneigung	> 40°	> 30°	> 30°
Bodenbedeckung	ungeeignetes Land	ungeeignetes Land	ungeeignetes Land
Gebäudepufferzone	-	100 m Radius	100 m Radius
Lawinengebiet	-	-	Lawinengebiet
Strassennähe	-	-	keine Strasse in 500 m Nähe

Tab. 3.1.: Ausschlusskriterien Szenarien 1-3 (weich bis sehr strikt)

Um die in Frage kommenden Installationsflächen zu ermitteln, wurden auf der Grundlage vorhandener Geoinformationssysteme räumliche Analysen durchgeführt und so für alle 3 Szenarien die möglichen Photovoltaikinstallationsflächen ermittelt. Für die benötigten Geoinformationen wurden einerseits aus offiziellem Kartenmaterial der Schweizerischen Eidgenossenschaft (<https://map.geo.admin.ch/>) in welchem auch Liechtenstein abgebildet ist und andererseits Kartenmaterial aus den Geodaten des Amtes für Bevölkerungsschutz (Steinschlaggebiete, Lawinen und Lawinenstützwerke) und des Amtes für Umwelt (Wald) herangezogen.

Für eine erste Abschätzung der ungefähr installierbaren Leistung pro m² wurden die Kenndaten des Projektes «Gondosolar» (<https://www.gondosolar.ch/>) herangezogen. Hier sind auf einer Fläche von rund 100'000 m² 18'000 kW_p geplant, was ungefähr einer Fläche von 6 m² je kW_p ergibt.



3.2 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 1 «weiche Ausschlusskriterien»

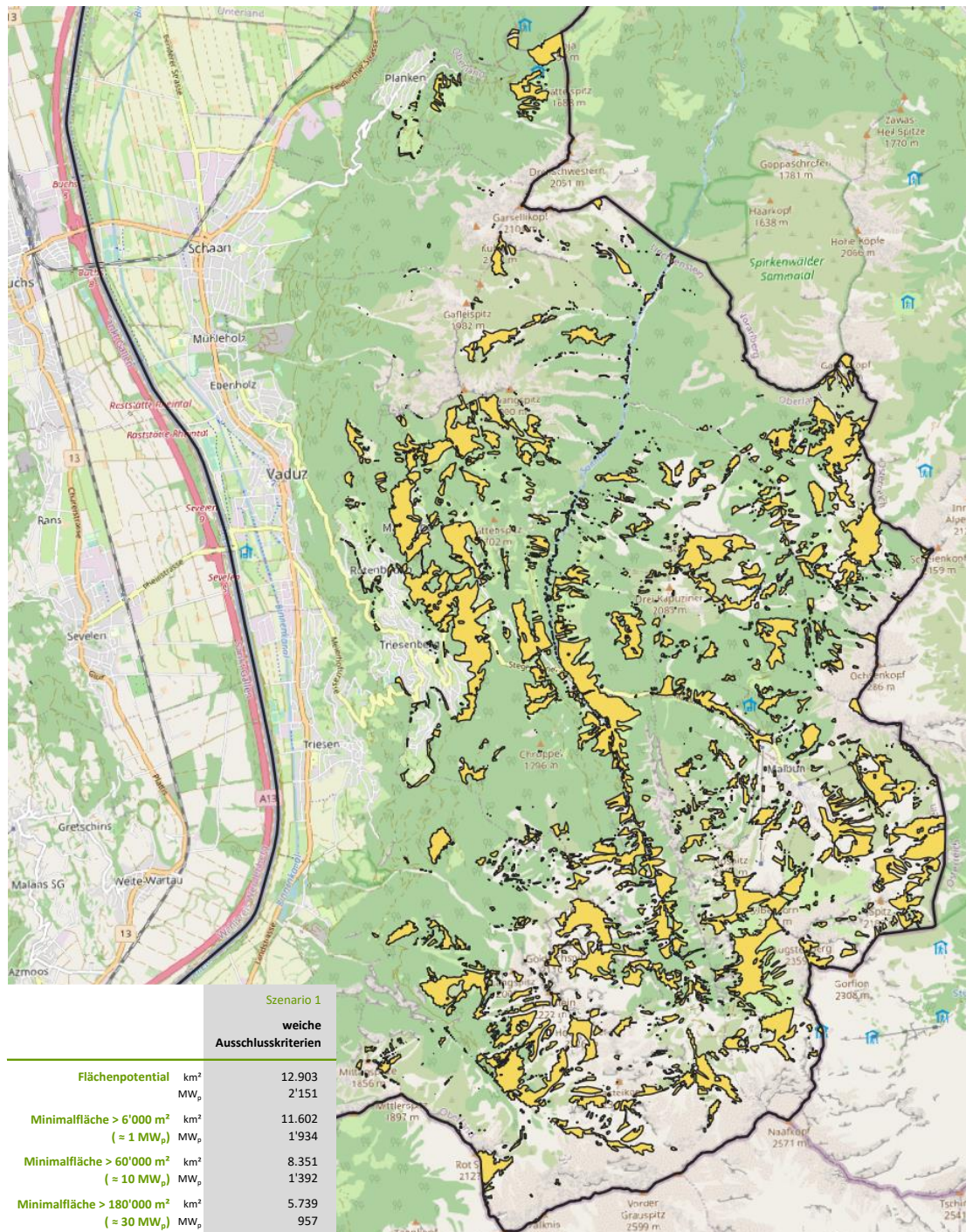


Abb. 3.1.: Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 1 «weiche Ausschlusskriterien»

3.3 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 2 «strikte Ausschlusskriterien»

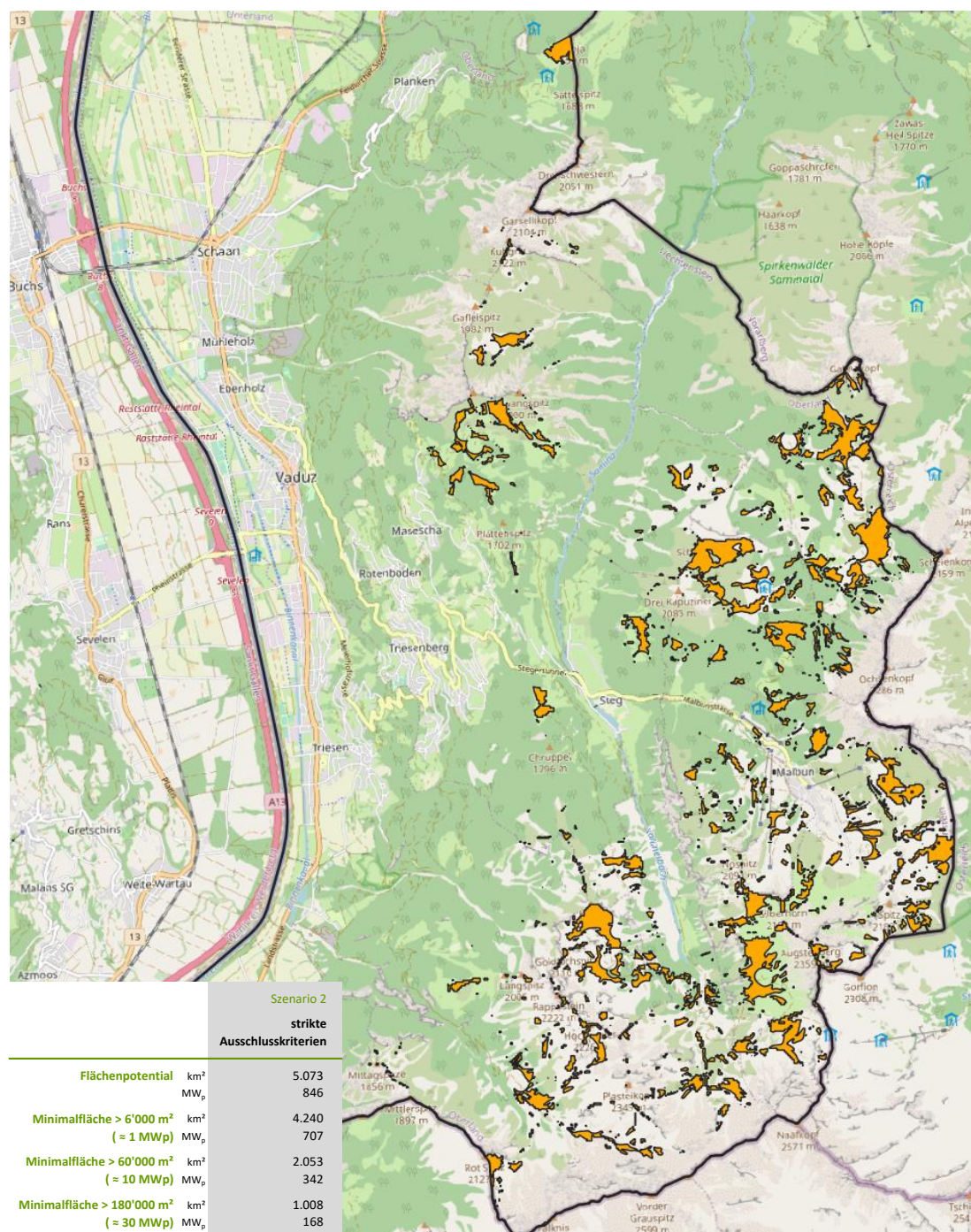


Abb. 3.2.: Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 2 «strikte Ausschlusskriterien»

3.4 Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 3 «sehr strikte Ausschlusskriterien»

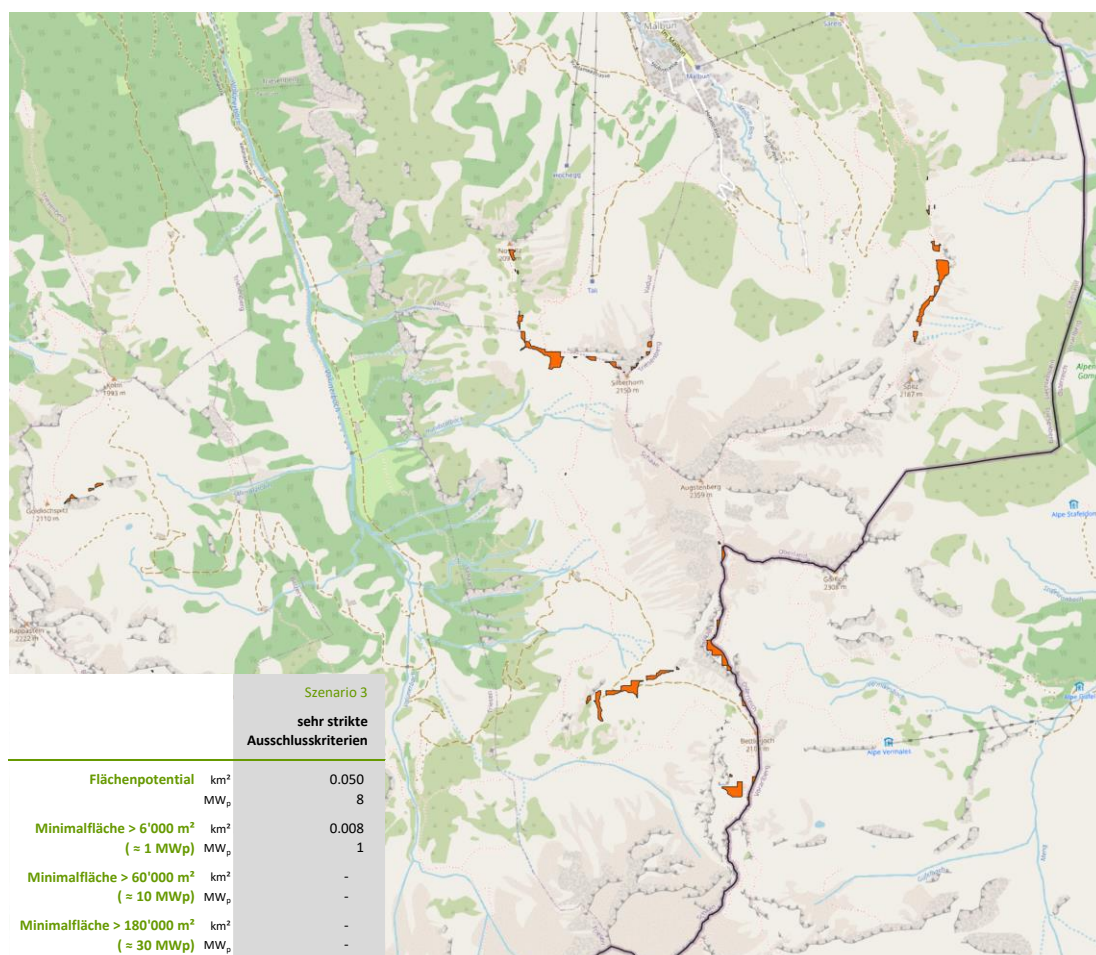


Abb. 3.3.: Alpines Photovoltaikinstallationsflächenpotential nach Szenario 3 «sehr strikte Ausschlusskriterien»

3.5 Übersicht über alle Szenarien

Im Überblick ergeben sich damit für alle 3 Szenarien folgende Photovoltaikinstallationsflächenpotentiale im alpinen Bereich Liechtenstein:

		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
		weiche Ausschlusskriterien	strikte Ausschlusskriterien	sehr strikte Ausschlusskriterien
Flächenpotential	km ²	12.903	5.073	0.050
	MW _p	2'151	846	8
Minimalfläche > 6'000 m²	km ²	11.602	4.240	0.008
(≈ 1 MW_p)	MW _p	1'934	707	1
Minimalfläche > 60'000 m²	km ²	8.351	2.053	-
(≈ 10 MW_p)	MW _p	1'392	342	-
Minimalfläche > 180'000 m²	km ²	5.739	1.008	-
(≈ 30 MW_p)	MW _p	957	168	-

Tab. 3.2.: Photovoltaikflächenpotentiale Szenarien 1-3 (weich bis sehr strikt)

Die Auswertungen zeigen, dass Liechtenstein durchaus alpine Flächen hat, welche für Photovoltaikanlagen in Frage kommen könnten. So ist unter Berücksichtigung der weichen Ausschlusskriterien gemäss Tabelle 3.2 eine für die Erstellung von Photovoltaikanlagen im alpinen Raum Liechtenstein geeignete Fläche von 12.9 km² vorhanden. Dies würde einem theoretischen Photovoltaikpotential von rund 2'150 MW_p entsprechen. Da alpine Photovoltaikfreiflächenanlagen nur ab einer Grösse von mindestens ca. 1 MW_p sinnvoll sind, wurden 3 Minimalflächenkategorien (> 6'000 m², ca. 1 MW_p / > 60'000 m², ca. 10 MW_p / > 180'000 m², ca. 30 MW_p) definiert und die entsprechenden Flächenpotentiale ausgewiesen. Bei einem aktuellen Strombedarf von knapp 420'000 MWh je Jahr deckt Liechtenstein im Jahr 2021 mit gut 35.3 MW_p vor allem im Mittelland installierter Photovoltaikleistung gut 7% (30'000 MWh bzw. rund 850 kWh/kW_p) des Strombedarfes ab. Geht man als Rechenbeispiel einmal davon aus, dass gemäss Szenario 2 «strikte Ausschlusskriterien» Grossanlagen ab 180'000 m² knapp 1/3 der Leistung (ca. 60 MW_p) installiert werden könnte (z.B. 4 Gebiete/Anlagen mit je 15 MW_p), so würde eine Fläche von rund 0.36 km² bzw. rund 0.2% der Landesfläche benötigt. Im alpinen Bereich kann im optimalen Fall mit bis zu Faktor 2 mehr Stromertrag (1'700 kWh/kW_p) gegenüber dem Mittelland (FL 850 kWh/kW_p) gerechnet werden. Damit könnten mit 4 grossen alpinen Photovoltaikanlagen in Liechtenstein gut 100'000 MWh je Jahr (knapp 25% des Strombedarfes 2021) und davon rund 50'000 MWh im Winterhalbjahr erneuerbar und heimisch produziert werden.



3.6 Weiteres Vorgehen

In einem weiteren Schritt gilt es das theoretische Flächenpotential auf ein realistisches herunterzuberechnen. Wir empfehlen daher auf der Grundlage der evaluierten Installationsflächen 2-4 der am besten geeigneten Flächen zu identifizieren.

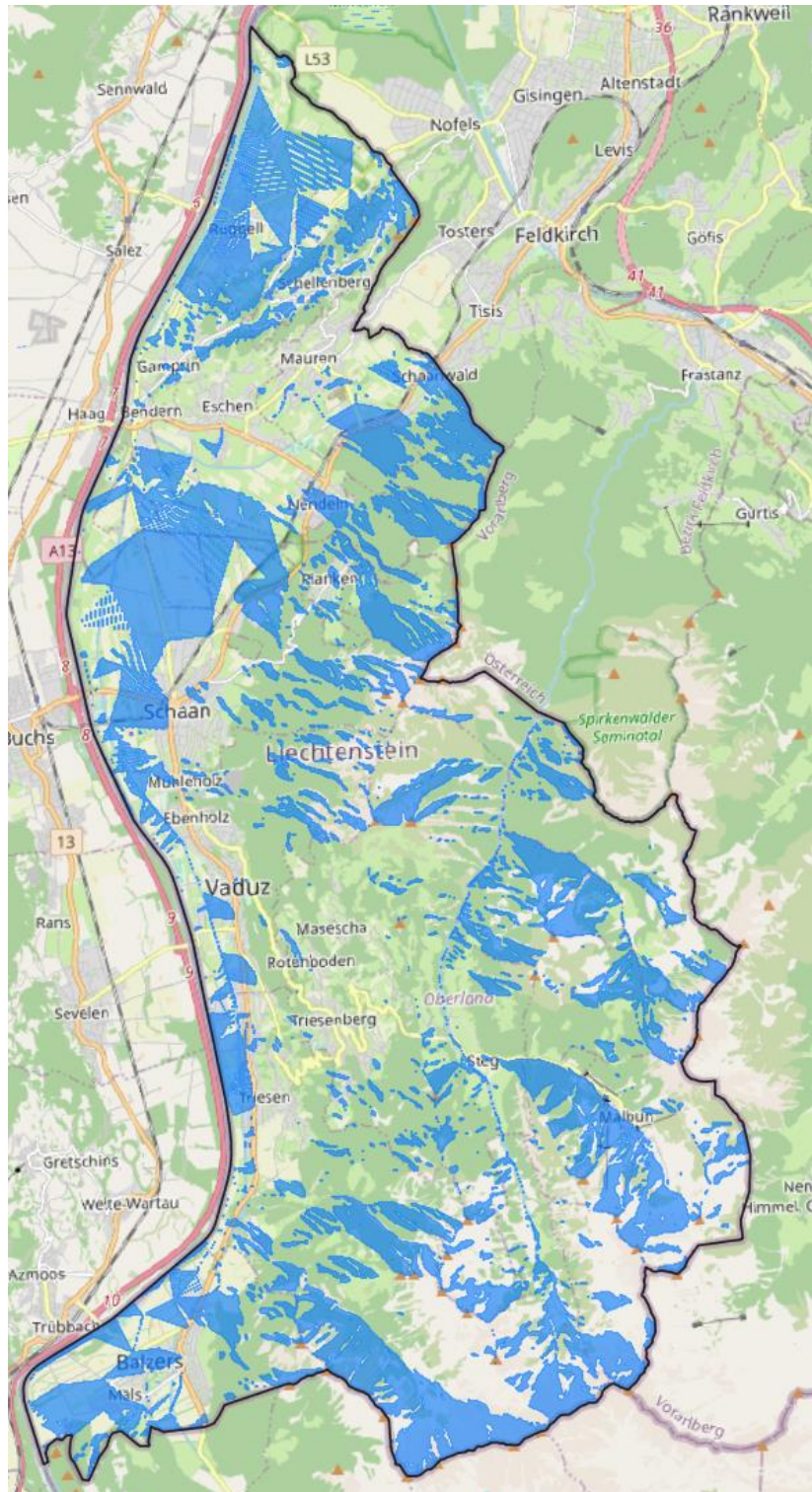
Dabei sollten weiteren Kriterien und die Meinung von lokalen Fachleuten im Bereich Bevölkerungs- und Umweltschutz herangezogen werden. Für diese am besten geeignete Flächen können dann detailliertere Untersuchungen mit folgenden Schwerpunkten durchgeführt werden:

- Machbarkeit Photovoltaikanlage
- Machbarkeit Netzanschluss
- Dimensionierung der Anlage
- Stromertragssimulation
- Kostenschätzung
- Wirtschaftlichkeitsrechnung
- Abklärungen gesetzliche Grundlagen wie Bewilligungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit

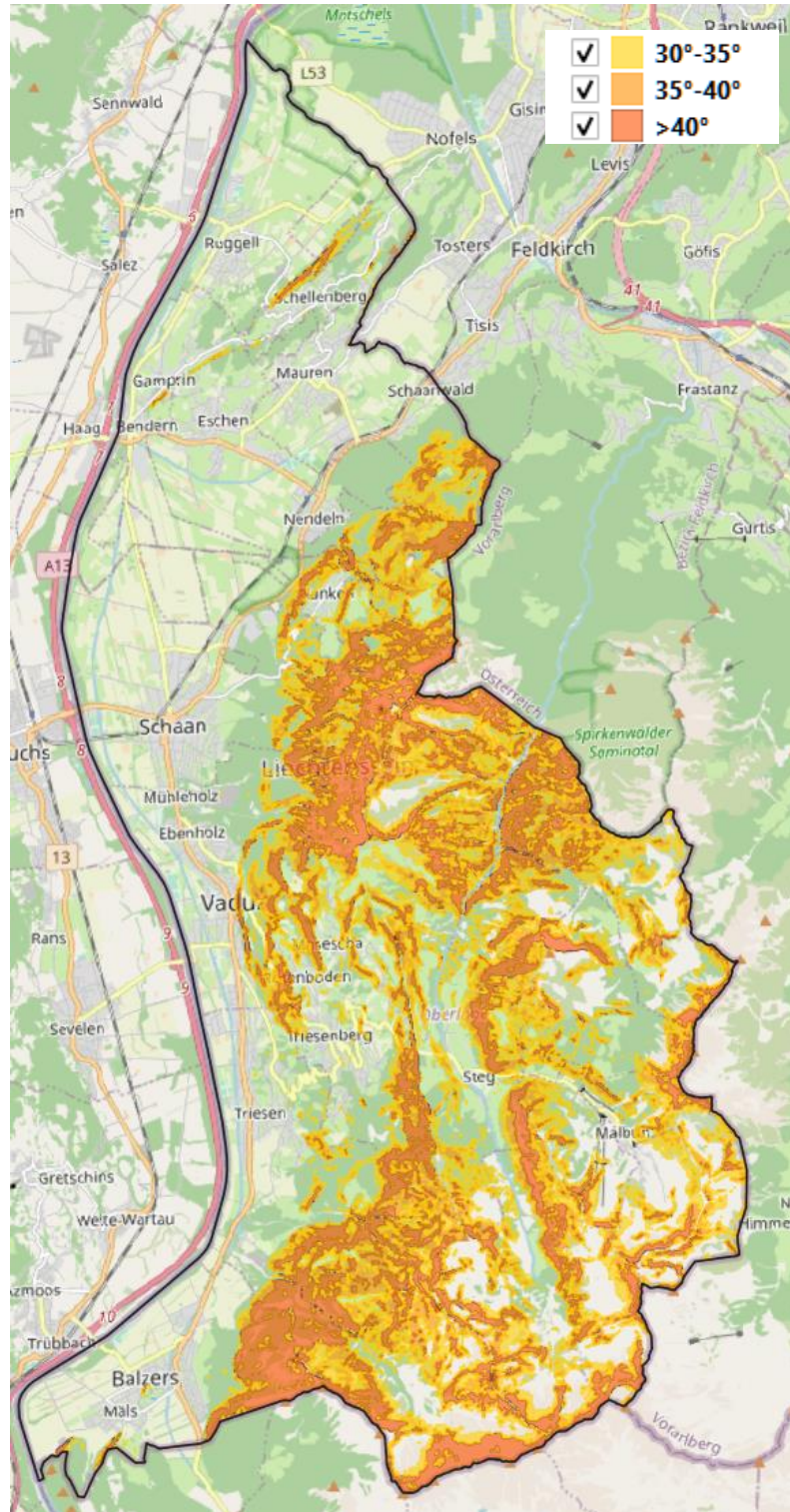


ANHANG

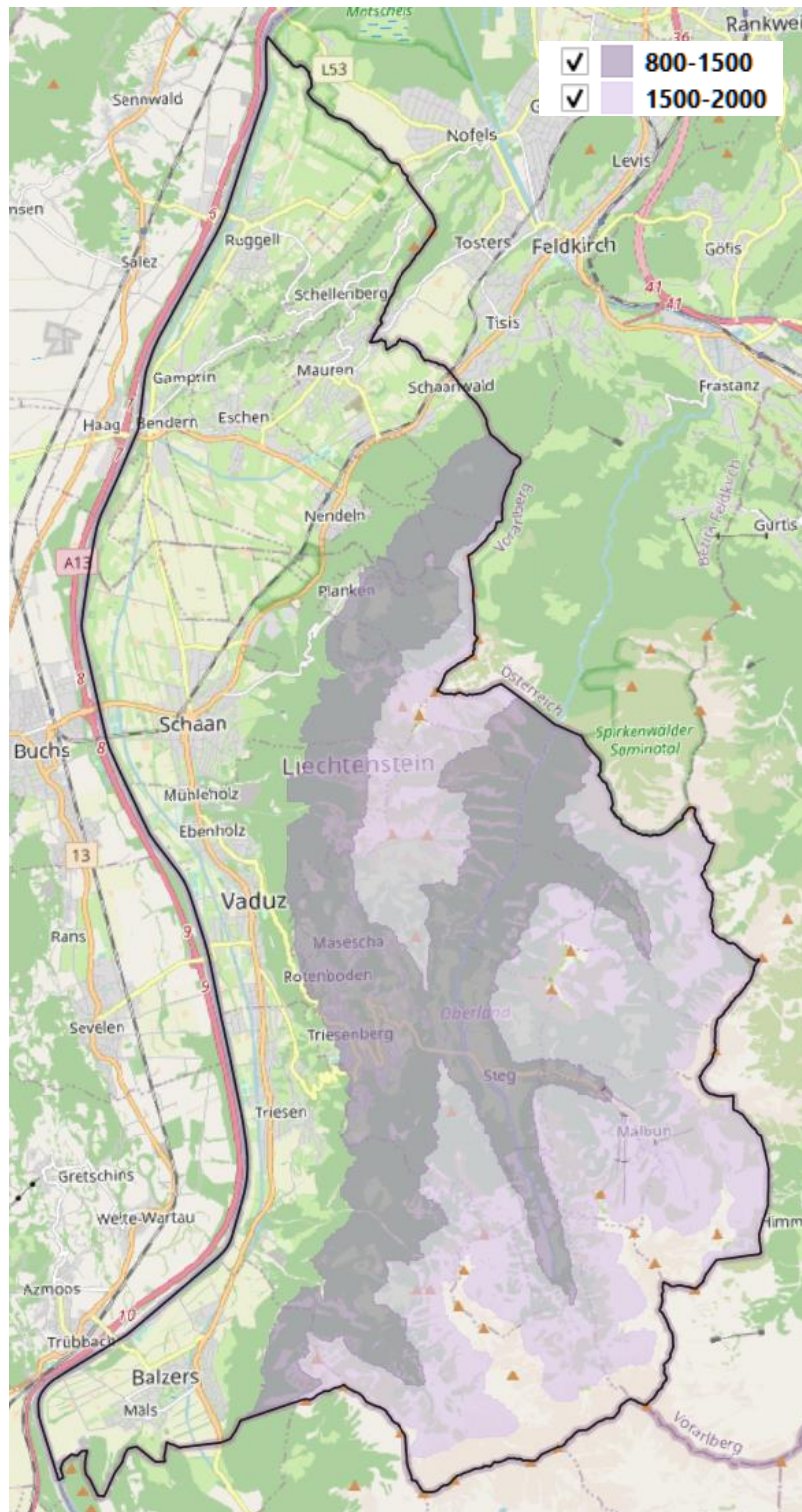
A1 Ausschlussgebiete Nordhänge



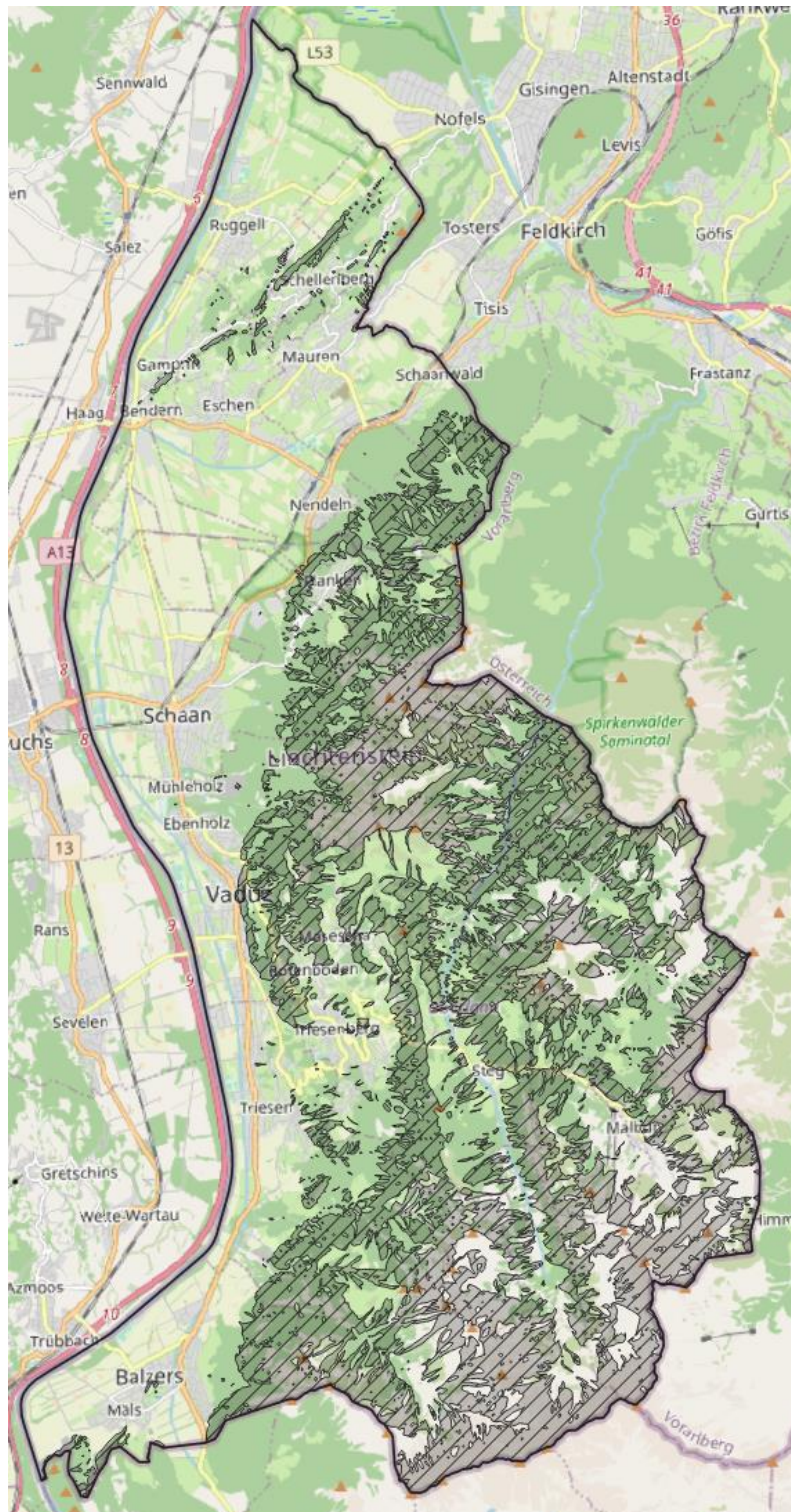
A2 Ausschlussgebiete Hangneigung > 40° und > 30°



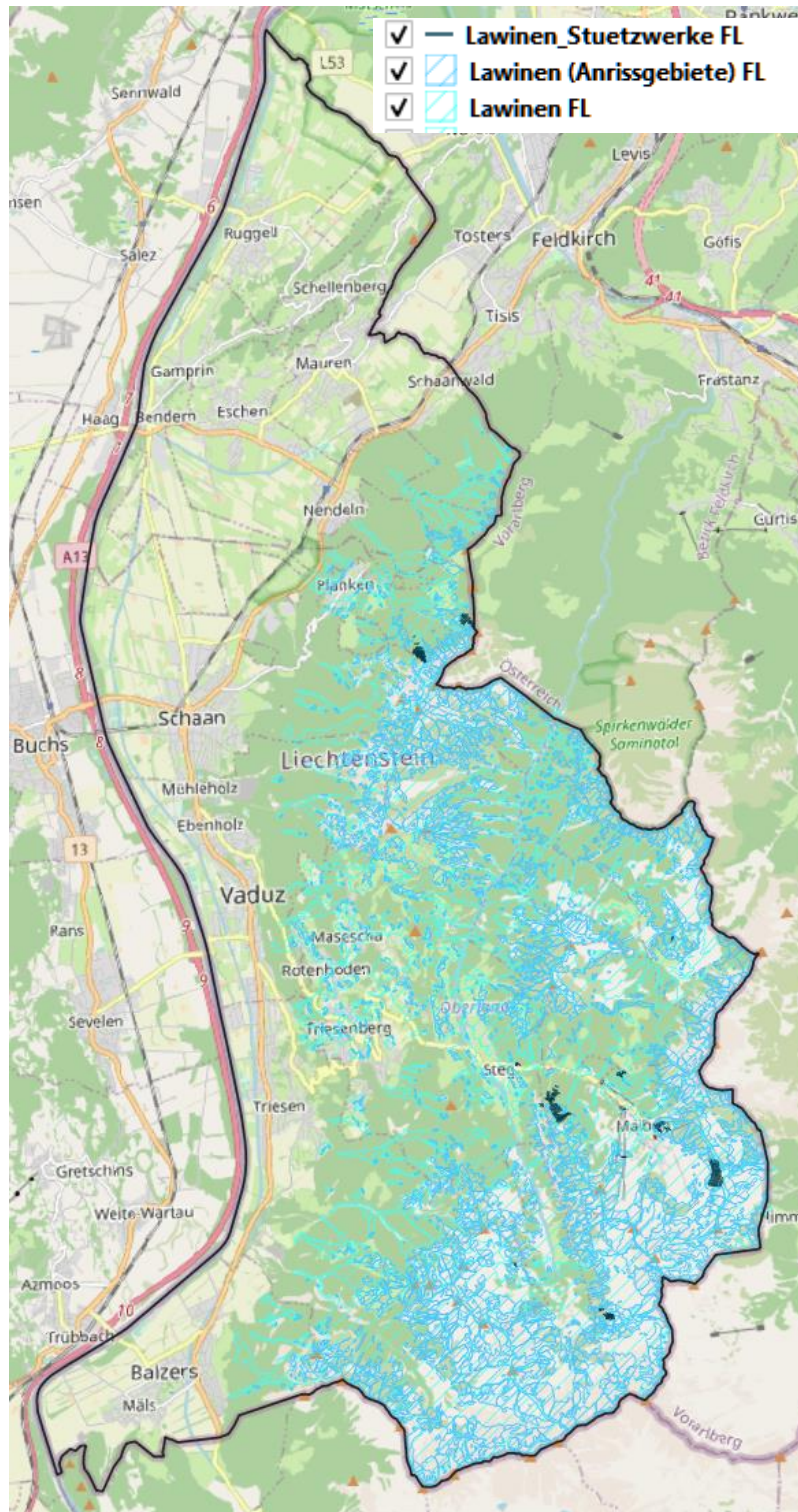
A3 Ausschlussgebiete Höhenlage (< 800 / < 1500 / < 2000 m.ü.M.)



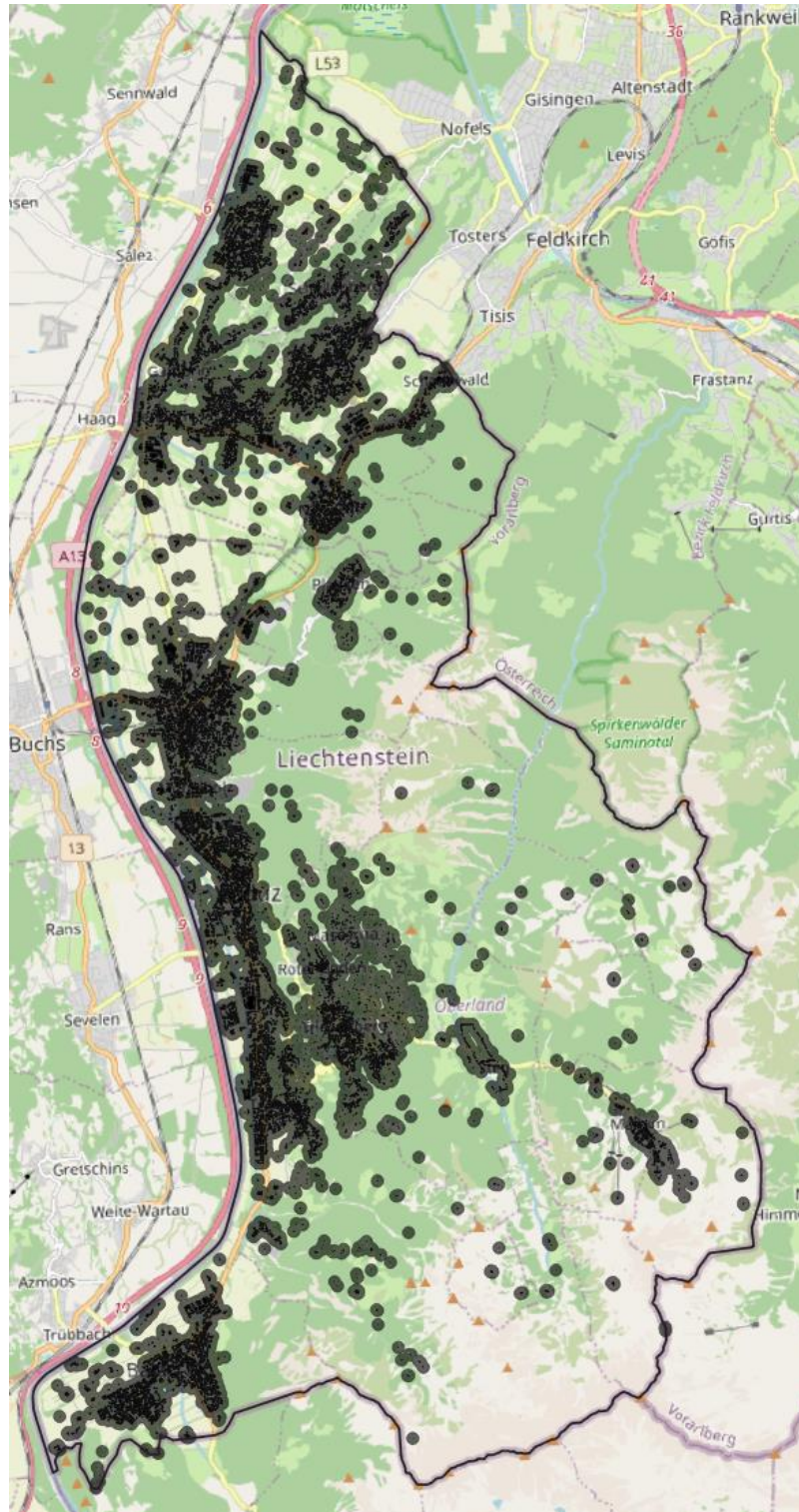
A4 Ausschlussgebiete Steinschlag



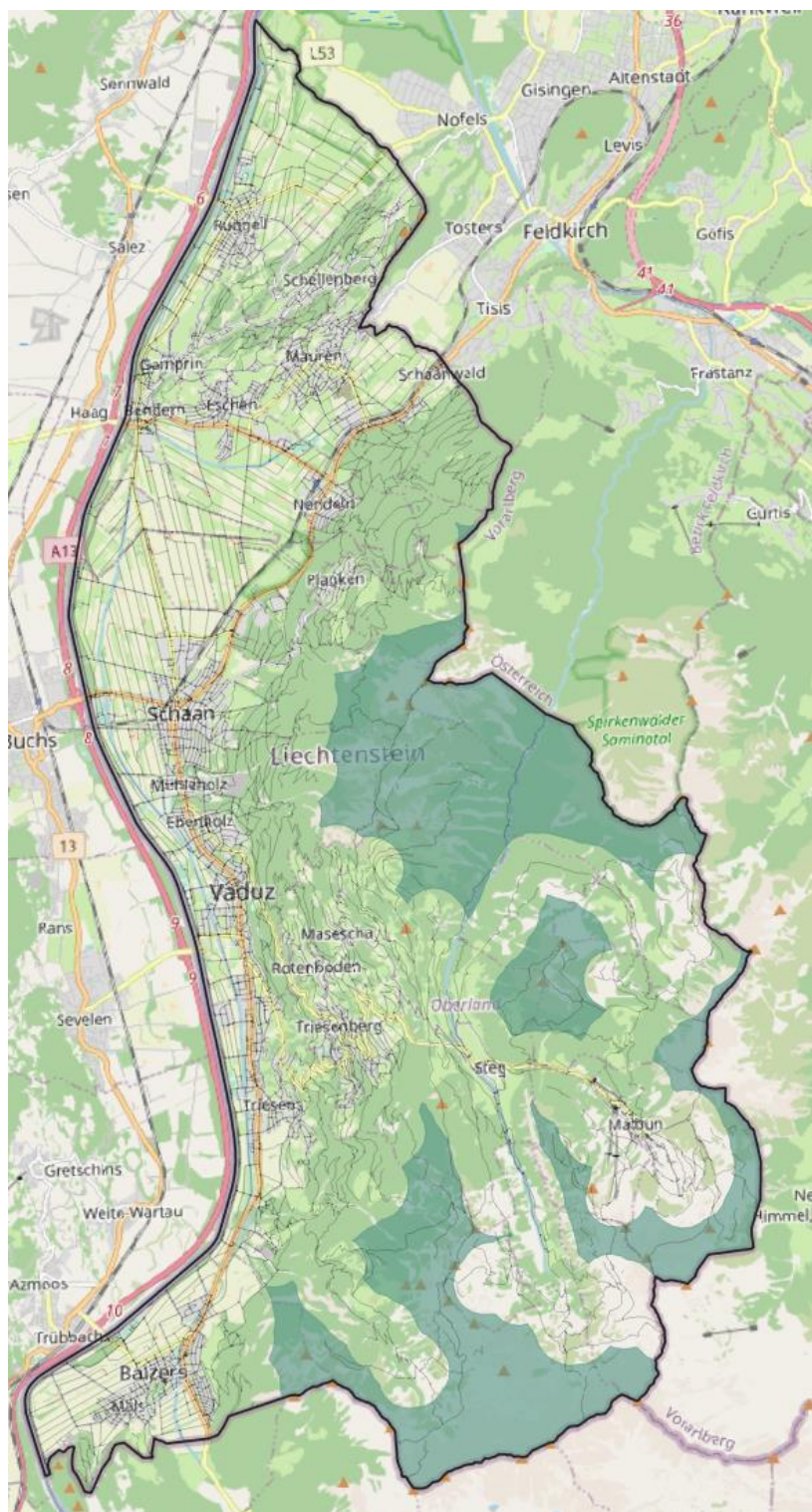
A5 Ausschlussgebiete Lawinen



A6 Ausschlussgebiete Gebäudepufferzone 100 m Radius



A7 Ausschlussgebiete Strassennähe (keine Strasse im
Umkreis von 500 m)



A8 Ausschlussgebiete ungeeignetes Land

