

03. Juni 2019

**Windpotentialanalyse für
Windatlas.ch
Jahresmittelwerte der modellierten
Windgeschwindigkeit und
Windrichtung
Bericht zur Aktualisierung des
Windatlas von 2016**



energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Impressum**Datum:** 03.06.2019**Ort:** Bern**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmerin:

Meteotest AG, Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

Autoren:

Sara Koller, Meteotest

Tanja Humar, Meteotest

BFE-Vertragsnummer: SI/401394-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Das Bundesamt für Energie (BFE) publizierte im Jahre 2016 den Windatlas Schweiz in einer ersten Ausgabe. Der Windatlas Schweiz enthält Windgeschwindigkeitskarten auf fünf Höhenstufen: 50, 75, 100, 125 und 150 m über Grund. Diese Windgeschwindigkeitskarten basieren auf einer Computational Fluid Dynamics (CFD)-Windmodellierung ausgehend von der Topografie, der Rauigkeit und von Windmessungen.

Aufgrund von Rückmeldungen beispielsweise aus der Ostschweiz stellte sich nach der Publikation heraus, dass der Windatlas 2016 in dieser Region verglichen mit Messungen eher zu hohe Windgeschwindigkeiten ausweist. Daher hat das BFE entschieden, eine neue Ausgabe des Windatlas Schweiz erstellen zu lassen, welche zusätzliche Windmessungen in die Modellierung einbezieht.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Höhen- und Rauigkeitsdaten, welche als Grundlage für die CFD-Windmodellierung mit einer horizontalen Auflösung von 100 m dienten. Die Windfelder wurden mit dem CFD-Modell WindSim berechnet. Um die Randbedingungen für die Modellierung optimal zu bestimmen, wurden Sensitivitätsstudien zu verschiedenen Parametern durchgeführt.

Bei der aktuellen Version des Windatlas wurden 396 Windmessungen verwendet. Für den Windatlas von 2016 waren es hingegen 97 Windmessungen. Der grosse Zuwachs ist auf den Einbezug von bodennahen MeteoSchweiz- und IMIS-Messstationen zurückzuführen. Methodisch wurden die neuen Daten analog aufbereitet wie für den Windatlas von 2016. Das heisst, die Daten wurden bereinigt und langjährig abgeglichen.

Die modellierten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen wurden anhand von ausgewählten Klimatologien für jeden Naturraum validiert.

Die Unterschiede der Modellierungsergebnisse zwischen dem Windatlas 2016 und dem Windatlas 2019 werden aufgezeigt und die Gründe dafür erläutert. Zudem quantifiziert eine Analyse die Unsicherheit der berechneten Windgeschwindigkeiten, differenziert nach den verschiedenen Naturräumen der Schweiz.

Das BFE stellt den Windatlas 2019 der Öffentlichkeit auf www.windatlas.ch zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

1	Verwendung des Windatlas und seine Grenzen	6
2	Topografische Inputdaten für die Windmodellierung	10
2.1	Höhendaten.....	10
2.2	Bodenrauigkeit	12
3	Berechnung der Windfelder	14
3.1	Das CFD-Modell WindSim	14
3.2	Sensitivitätsstudien zur Bestimmung der Randbedingungen	14
3.3	Berechnung der Windfelder	15
4	Windstatistiken.....	17
4.1	Beschaffung der Winddaten.....	17
4.2	Bereinigung und langjähriger Abgleich der Winddaten.....	17
5	Windkarten.....	19
6	Einbindung des Windatlas Schweiz in die Bundesgeodateninfrastruktur	22
7	Validierung.....	23
7.1	Validierung der Windgeschwindigkeit	23
7.2	Validierung der Windrichtung.....	24
8	Windatlas 2019 versus Windatlas 2016	27
8.1	Vergleich mit dem Windatlas 2016	27
9	Unsicherheit	29

1 Verwendung des Windatlas und seine Grenzen

Für eine korrekte Interpretation der Resultate des Windatlas ist es wichtig, den Windatlas in Bezug zu Standortabklärungen bzw. Windgutachten im Rahmen von Projektentwicklungen zu setzen. Im Folgenden wird daher auf die Methodik, Genauigkeit, Grenzen und Zweck des Windatlas im Vergleich zu standortspezifischen Windgutachten eingegangen.

Windmessung versus Windressourcenkarte versus Windatlas

Die korrekte Durchführung von Windmessungen für die Planung von Windparks ist durch Normen (IEC 61400-12-1, Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 6: Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen") klar vorgegeben. Für die Planung eines Windparks im komplexen Gelände der Schweiz ist eine mindestens einjährige Windmessung im Projektgebiet mit Measnet-kalibrierten First-Class-Sensoren auf mindestens 2/3 der Nabenhöhe der zukünftigen Turbine absolute Pflicht. Windmessungen müssen zudem mit benachbarten permanenten Wetterstationen oder Reanalysedaten langjährig abgeglichen werden. Die resultierende langjährige Windstatistik entspricht der bestmöglichen Wahrheit am Standort der Messung.

Für die Extrapolation der Windmessung ins Gelände eines geplanten Windparks werden Windmodelle eingesetzt. Das Resultat einer solchen Windmodellierung ist eine Windressourcenkarte. Auf Basis einer Windressourcenkarte werden die Windbedingungen an den Standorten der Windturbinen explizit bestimmt, die Energieertragsrechnungen durchgeführt und die Wirtschaftlichkeit bestimmt. Die langjährige Windstatistik wird als Eingabe genutzt, um die Modellierung zu skalieren. Normalerweise werden solche Modellierungen mit einer horizontalen Auflösung von 25 m gerechnet, damit das Gelände möglichst genau wiedergegeben und die Windströmungen realitätsnah abgebildet werden können. In komplexem Gelände darf gemäss IEC-Norm (IEC 61400-12-1 und IEC 61400-1) die Skalierung eines Windfelds maximal zwei bis drei Kilometer Radius um den Standort der Windmessung erfolgen. In anderen Worten: Eine Windressourcenkarte deckt einen Bereich von maximal drei Kilometer um die Windmessung herum ab. Ausserhalb dieses Radius werden die Unsicherheiten zu gross, als dass Energieertragsrechnungen plausibel durchgeführt werden können.

Ein Windatlas dient der grossflächigen, möglichst homogenen Übersicht der Windbedingungen über eine ganze Region oder ein ganzes Land. Ungleich einer Windressourcenkarte steht bei dieser Anwendung weniger die absolute Genauigkeit an einem Punkt als die grossflächige homogene Verfügbarkeit der Angaben im Zentrum. Für eine grobe Einschätzung der Windbedingungen einer Region, wo höhere Windgeschwindigkeiten und wo tiefere Windgeschwindigkeiten herrschen, ist der Windatlas ein geeignetes Werkzeug. Aus diesem Grund werden die Daten eines Windatlas bevorzugt relativ und nicht absolut interpretiert. Der Zweck eines Windatlas ist die Identifikation von Gebieten innerhalb einer Region oder eines Landes, welche ein Potenzial für Windenergienutzung haben. Wenn aber genaue Werte gefordert sind, da zum Beispiel Energieerträge für eine Businessmodell berechnet werden, müssen unbedingt eine Messung, eine fundierte Datenanalyse und eine hochaufgelöste Windmodellierung durchgeführt werden. Dies ist absolut unumgänglich und diese Resultate sind viel höher zu werten als ein Windatlas.

Fazit: Ein Windatlas ist ungeeignet für die Standortentwicklung eines Windparks, die Werte sind zu ungenau, zu wenig belastbar und die Unsicherheiten zu hoch. Es ist zwingend, vor Ort eine Windmessung durchzuführen. Wenn an einem Standort eine Windmessung bzw. eine Windressourcenkarte vorliegt, sind diese Resultate in jedem Fall höher zu gewichten als die Resultate des Windatlas. Der IEC-Norm entsprechende Messungen repräsentieren eine Referenz für den Standort und seine nähere Umgebung. Diese Messungen dürfen unter keinen Umständen durch allfällige Abweichungen im Windatlas in Frage gestellt werden.

Eine Windressourcenkarte für die Schweiz?

Für die Erstellung eines Windatlas für die ganze Schweiz mit den oben beschriebenen Anforderungen an eine Windressourcenkarte, bräuchte man ein schweizweites Netz von den Windenergie-Normen entsprechenden Windmessungen mit einer Distanz von maximal sechs Kilometer zueinander. Diese Dichte an hochwertigen Messungen ist in der Schweiz und auch sonst nirgends auf der Welt gegeben. Im Windatlas 2019 wurden total 396 Windstatistiken herangezogen. Ein Grossteil dieser Messungen hält den oben genannten Anforderungen an Windressourcenkarten nicht stand. Viele Messungen wurden auf 5 bis 10 m über Grund erhoben und rechnerisch auf die Ausgabehöhen des Windatlas (50m, 75m, 100m, 125m, 150m) extrapoliert. Die Eigenschaften der Atmosphäre auf 5 m unterscheiden sich sehr stark von denjenigen auf 150 m über Grund.

Weiter müsste die Windmodellierung für die ganze Schweiz mit einer Auflösung von 25 m durchgeführt werden. Der Windatlas Schweiz 2019 wurde mit einer Auflösung von 100 m berechnet, also vier Mal gröber als es für eine Windressourcenkarte nötig ist. Der Zeit- und Rechenaufwand für diese Auflösung war bereits sehr beträchtlich. Der Aufwand für eine Modellierung eines 25 m aufgelösten Gitters für die gesamte Schweiz wäre unverhältnismässig und unrealistisch.

Fazit: Es ist technisch unmöglich, einen Windatlas zu erstellen, welcher der Genauigkeit einer Windressourcenkarte eines Projektentwicklers entspricht. Das Resultat einer Windmessung bzw. einer Windressourcenkarte von einem geplanten Windparkprojekt ist in jedem Fall klar höher zu gewichten als das Resultat des Windatlas.

Thermische Winde im Windatlas Schweiz

Für die Modellierung des Windatlas 2016 und des Windatlas 2019 wurde das Computational Fluid Dynamics Model WindSim verwendet. In komplexem Gelände konnten damit sehr gute Resultate erzielt werden. Da mit WindSim nur mittlere Bedingungen simuliert werden und die zeitliche Komponente in diesem Modell nicht berücksichtigt wird, können thermisch induzierte Windsysteme nicht beschrieben werden. Die Bedingungen beim Rhone-Knie beispielsweise können mit WindSim nicht richtig beschrieben werden, so dass diese Region im Windatlas verfälscht dargestellt wird. An Standorten wie das Rhone-Knie liegt eine sehr spezielle Windstatistik vor: entweder liegt kaum Wind vor oder der Talwind erreicht eine beträchtliche Stärke. Die Häufigkeitsverteilung hat zwei Maxima. Das Resultat ist, dass an solchen Standorten hohe Erträge bei verhältnismässig niedrigen mittleren Windgeschwindigkeiten erzielt werden können. Dieser Effekt konnte bereits mit allen früheren Windkarten und Windatlanten nicht abgebildet werden.

Fazit: Berg- und Talwinde können vom Modell nicht realistisch abgebildet werden. Wegen der spezifischen Windverteilung kann vom mittleren Wind nicht auf den Ertrag geschlossen werden. Das Resultat einer Windmessung vor Ort hat in jedem Fall das klar höhere Gewicht, als das Resultat des Windatlas.

Einbezug bodennaher Messungen

Im Windatlas Schweiz 2016 wurden keine bodennahen Windmessungen (zum Beispiel von Wetterstationen) einbezogen. Man ging damals davon aus, dass der Fehler der horizontalen Extrapolation von hohen Windmessungen kleiner ist, als der Fehler aufgrund der vertikalen Extrapolation von bodennahen Messungen. Dies obwohl die horizontale Distanz manchmal das Maximum von 20 km überschritt. Eine Erkenntnis aus den Resultaten des Windatlas 2016 war, dass die Windbedingungen bei der horizontalen Extrapolation häufig überschätzt wurden. Daraus folgte die Annahme, dass die Unsicherheit sinkt, je mehr Messungen in die Berechnungen einbezogen werden können. Aus diesem Grund wurden im Windatlas 2019 auch bodennahe Messungen einbezogen, obwohl diese eigentlich nicht den Windenergie-Normen entsprechen.

Diese Annahme erwies sich als grundsätzlich richtig: Im Mittel über die gesamte Schweiz und insbesondere in wenig komplexen Gebieten konnte die Unsicherheit durch die zusätzlichen

Messungen gesenkt werden. Im komplexeren Gelände war dies aber nicht überall der Fall: Im Jura sind mehrere Standorte bekannt, bei denen die Validierung zeigte, dass die Bedingungen auf den Jurahöhen nicht korrekt wiedergegeben werden. Der Einbezug von bodennahen Messungen der MeteoSchweiz in Tallagen hat bei diesen Fällen auf Jurahöhen zu zu tiefen Werten im Windatlas geführt. Im extremsten Fall betrug die Abweichung zwischen der Messung und dem Windatlas 2 m/s.

Fazit: Die erhöhte Anzahl verfügbarer Windmessungen, u.a. auch von Wetterstationen, welche nicht den Windenergie-Normen entsprechen, hat die Genauigkeit im Windatlas 2019 im Mittel über die ganze Schweiz erhöht. Diese Massnahme hat insbesondere in Gebieten, in welchen der Windatlas 2016 deutlich zu hohe Werte zeigte, zu einer klar realistischeren Wiedergabe der Windbedingungen geführt. In komplexen Geländen, wie zum Beispiel auf den Jurahöhen, musste aber festgestellt werden, dass punktuell grosse Abweichungen zu den Messungen auftraten. Dies weil bodennahe Messungen von MeteoSchweiz-Stationen, welche sich in einem Tal in der Nähe befinden, im Modell die Bedingungen auf den Kretenlagen unterschätzen lassen. Das Resultat eines Standortgutachtens hat daher in jedem Fall das klar höhere Gewicht, als das Resultat des Windatlas.

Aussagekraft des Windatlas an Messpunkten

Für die homogene grossflächige Skalierung des Windatlas werden für jeden Punkt im 100x100-m-Gitter die umliegenden Windstatistiken im Umkreis von 50 km in Abhängigkeit der Distanz einbezogen. Wenn man im Windatlas die Windgeschwindigkeiten an Koordinaten eines bekannten Standorts auf einer Ausgabehöhe des Windatlas abfragt, können Abweichungen zu den Messungen auftreten, obwohl die Messung für die Skalierung des Windatlas einbezogen wurde. Dies hat damit zu tun, dass eine Koordinate durch eine 100x100m Zelle repräsentiert wird und darum nie zu 100% durch diese eine Klimatologie beeinflusst wird, sondern immer auch noch andere Klimatologien zu einem kleinen Prozentsatz einbezogen werden.

Hinzu kommt, dass nicht alle vorhandenen Windmessungen in den Windatlas eingeflossen sind, sondern dass eine Anzahl der Messungen für die Validierung des Windatlas verwendet wurde. Da alle zu Verfügung gestellten Messungen einer Vertraulichkeitsvereinbarung unterliegen, ist es nicht möglich, diese Standorte explizit zu nennen.

Fazit: Der im Windatlas an einem Messpunkt dargestellte Wert kann wegen der räumlichen Mittelung der modellierten Gitterzelle und dem Einfluss umliegender Windstatistiken vom effektiven Messwert abweichen. Dies ist der Anforderung an eine grossflächige homogene Verfügbarkeit der Windwerte in einem Windatlas geschuldet. Das Resultat einer Windmessung vor Ort hat in jedem Fall das höhere Gewicht, als das Resultat des Windatlas.

Unsicherheit des Windatlas

Die Bestimmung der Unsicherheiten des Windatlas ist im Schlussbericht dargelegt. Es handelt sich um Grössenordnungen von Unsicherheiten, an einzelnen Standorten können die Abweichungen deutlich grösser sein, als die im Bericht aufgeführten mittleren Werte.

Es ist nicht möglich, eine exakte Angabe der Unsicherheit zu machen, da die Schweiz eine heterogene Landschaft hat mit einer teilweise extrem komplexen Topografie, die Windstatistiken eine unterschiedliche Qualität und Höhe über Grund haben und eine ungleiche Dichteverteilung der Messstandorte je nach Naturraum aufweisen. Da die besten Windstatistiken für die Skalierung des Windatlas verwendet wurden, standen für eine tiefgehende Validierung nicht mehr genügend qualitativ ausreichende Windstatistiken zu Verfügung. Darum wurde nur eine Grössenordnung der Unsicherheit genannt und dies nur auf den unteren Ausgabehöhen des Windatlas. Für die Karten ab 100 m über Grund standen insgesamt wenig hohe Messungen zu Verfügung, so dass hier die Priorität auf der Verwendung im Windatlas lag und nicht auf der Validierung.



Fazit: Die berechneten Unsicherheiten basieren auf einer relativ dünnen Datengrundlage und stellen eine Grössenordnung dar. Es handelt sich um mittlere Unsicherheiten. An einzelnen Standorten können die Abweichungen deutlich grösser sein, als die im Windatlas aufgeführten Werte. Bei Standorten mit höheren Windgeschwindigkeiten soll die Unsicherheit als tendenziell höher als der ermittelte mittlere Wert betrachtet werden. Das Resultat einer Windmessung vor Ort hat in jedem Fall das höhere Gewicht, als das Resultat des Windatlas.

2 Topografische Inputdaten für die Windmodellierung

2.1 Höhendaten

Die Grundlage für das verwendete Höhenmodell ist das Digitale Höhenmodell DHM25¹ vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo. Für die Gebiete ausserhalb der Schweiz, welche nicht mit dem DHM25 abgedeckt sind, wurde das Höhenmodell SRTM verwendet. SRTM steht für Shuttle Radar Topography Mission. Diese Fernerkundungsdaten wurden im Februar 2000 per Radar aus dem Weltraum aufgezeichnet. Das Resultat ist ein flächendeckendes, homogenes digitales Geländemodell der gesamten Erde. Im vorliegenden Projekt wurde ein SRTM mit einer horizontalen Auflösung von 100 m verwendet (Quelle: CGIAR CSI²).

Um aus den beiden Höhenmodellen DHM25 und SRTM ein homogenes Modell zu erstellen, wurden folgende Schritte durchgeführt:

Die horizontale 25 m-Auflösung des DHM25 wurde in eine 100 m-Auflösung umgeschrieben. Dafür wurde das ArcGIS-Tool "Aggregate" und die "Mean"-Technik verwendet. Aus jeweils 16 25x25 m-Zellen wurde ein Durchschnittswert gebildet, welcher der neu gebildeten 100x100 m-Zelle zugeteilt wurde.

An den Randgebieten, in denen weniger als 16 25 m-Zellen des DHM25 vorlagen, wurden die äussersten Zellen abgeschnitten. Im Folgenden wird das neu erstellte Höhenmodell DHM100 (Abbildung 2) genannt.

Zwischen dem DHM100 und dem SRTM gibt es insbesondere bei Gebirgstälern grosse Unterschiede. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das SRTM-Höhenmodell in Gebieten mit starken Hangneigungen oft sehr ungenau ist. Durch diese Ungenauigkeiten entstehen beim Zusammensetzen der beiden Höhenmodelle Inkonsistenzen bei den Übergängen. Um die Übergänge vom DHM100 zum SRTM zu glätten, wurde ein 900 m breiter Übergangsbereich entlang der Schweizer Grenze definiert (siehe Abbildung 1). Dieser Übergangsbereich wurde wiederum in drei Teilbereiche aufgeteilt. Für jeden Teilbereich wurden DHM100 und SRTM gemäss den Faktoren in Tabelle 1 gewichtet. So konnte ein homogener Übergang vom DHM100 zum SRTM hergestellt werden.

Der Übergangsbereich befindet sich ausserhalb der Schweizer Grenze und hat nur einen marginalen Einfluss auf das Windfeld innerhalb der Schweiz. Ein unbereinigter Übergangsbereich hätte jedoch zu numerischen Problemen und Instabilitäten bei den Berechnungen der Windfelder geführt.

Tabelle 1: Gewichtung der Höhenmodelle im Übergangsbereich zwischen DHM100 und SRTM.

	innerer Bereich	Übergangsbereich (900 m)			äusserer Bereich
		Teilbereich I (300 m)	Teilbereich II (300 m)	Teilbereich III (300 m)	
DHM100	1	0.75	0.5	0.25	0
SRTM	0	0.25	0.5	0.75	1

¹ https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/height_models/dhm25

² <https://cg iarcsi. community/ data/ srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>

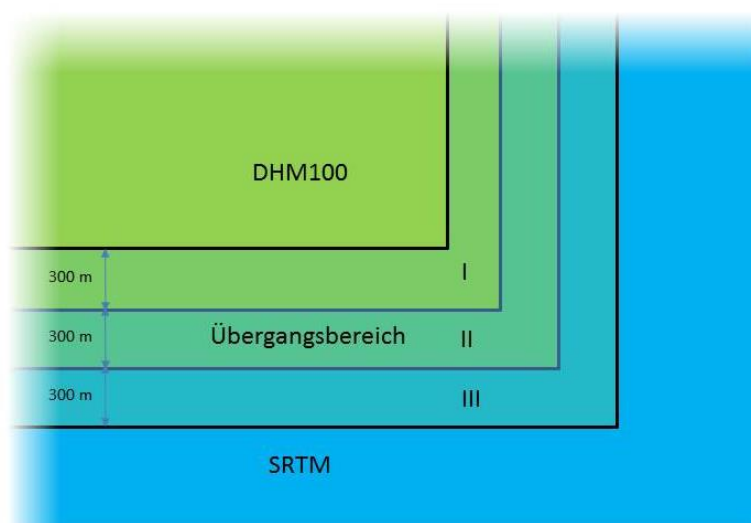


Abbildung 1: Übergangsbereich von DHM100 zu SRTM.

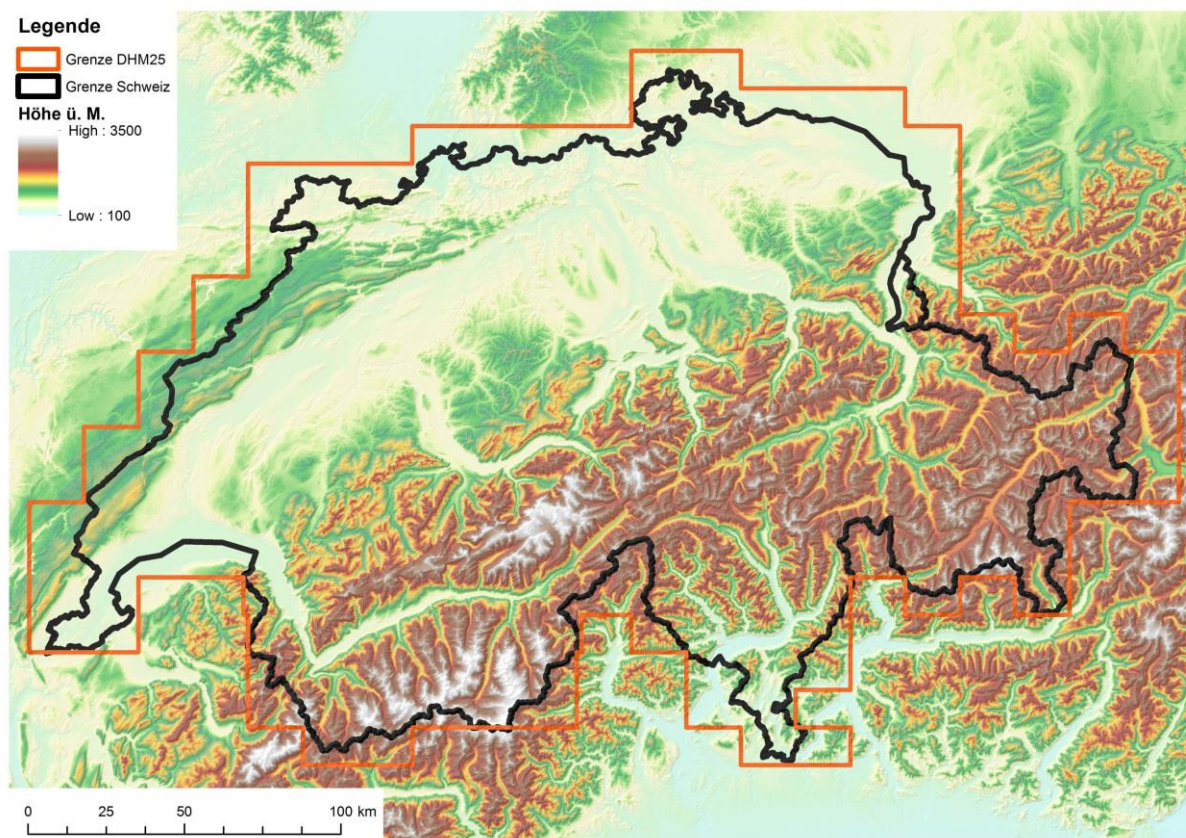


Abbildung 2: Das aus den Datensätzen DHM100 und SRTM zusammengesetzte bereinigte Höhenmodell.

2.2 Bodenrauigkeit

Als Grundlage für die Rauigkeitsdaten innerhalb der Schweiz dienten die Primärflächen des Vector25-Datensatzes³ des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo. Vector25 ist das digitale Landschaftsmodell der Schweiz und wird jährlich nachgeführt. Für Gebiete ausserhalb der Schweiz, welche nicht vom Vector25-Datensatz abgedeckt werden, wurden die CORINE⁴-Daten verwendet. Das Projekt 'CORINE Land Cover' (Coordination of Information on the Environment) stellt einheitliche und dadurch vergleichbare Daten der Bodenbedeckung in Europa zu Verfügung. Die vorerst letzte Aktualisierung des Datensatzes erfolgte im Jahr 2012.

Tabelle 2: Eine Auswahl von Vector25-Klassen, sowie die zugeordnete CORINE-Klasse und die Rauigkeitslänge.

Vector25		CORINE		Rauigkeitslänge [cm]
ID	Beschreibung	Klasse	Beschreibung	
Z_Fels	Fels	332	Fels	20
Z_Fluss	Fluss	511	Fluss	2
Z_Gebue	Gebüsch	324	Gebüsch	50
Z_Geroel	Geröll	333	Gebiete mit wenig Vegetation	2
Z_Glet	Gletscher	335	Gletscher	5
Z_ObstAn	Obstanlage	222	Obst/Beerenobstbestände	50
Z_Reben	Reben	221	Reben	20
Z_See	See	512	See	2
Z_Siedl	Siedlung	112	urbanes Gebiet	100
Z_SumGeb	Sumpf und Gebüsch	322	Heiden und Moorheiden	10
Z_Sumpf	Sumpf	322	Heiden und Moorheiden	10
Z_SumWa	Sumpf in Wald	313	Mischwald	150
Z_SumWaO	Sumpf in offenem Wald	312	Nadelwald	10
Z_Uebrig	Übriges Gebiet	231	Wiesen und Weiden	2
Z_Wald	Wald	313	Mischwald	150
Z_WaldOf	Wald offen	312	Nadelwald	100

Den einzelnen Klassen des Vector25-Datensatzes wurde eine Rauigkeitslänge entsprechend den CORINE-Daten zugeordnet (Tabelle 2). Eine Reihe von CORINE-Landnutzungsklassen, wie beispielsweise die Klasse "Wiesen und Weiden", ist im Vector25-Datensatz nicht vertreten. In solchen Fällen wurde das Verbreitungsmuster der beiden Datensätze sorgfältig miteinander verglichen. Zudem wurden Luftbildaufnahmen zur Überprüfung hinzugezogen. Die Analysen

³ https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/digital_maps/vector

⁴ https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-11882/20871_read-48836

zeigten, dass sich beispielsweise die Vector25-Klasse "Z_Uebrig" weitgehend mit der CORINE-Klasse "Wiesen und Weiden" deckt. Deshalb wurde der Vector25-Klasse "Z-Uebrig" die entsprechende Rauigkeitslänge (2 cm) zugeordnet. Auf diese Weise konnte jeder Vector25-Klasse eine entsprechende CORINE-Klasse zugeordnet und damit ein homogener Datensatz erstellt werden.

Der mit den CORINE-DATEN ergänzte vektorielle Landnutzungs-Datensatz Vector25 wurde in eine Rasterdatei mit einer horizontalen Auflösung von 25 m umgeschrieben. Mit dem ArcGIS "Resample"-Tool wurde die Auflösung dann auf 100 m umgerechnet. Dabei wurde die "Majority"-Technik angewendet. Das heisst, dass jedes 100 m-Raster den Rauigkeitslängenwert erhält, welcher bei den meisten der 16 umfassenden 25 m-Rasterzellen auftritt. Abbildung 3 zeigt das Resultat der Umrechnungen. als Grundlage für die Berechnung der Windfelder verwendet worden ist.

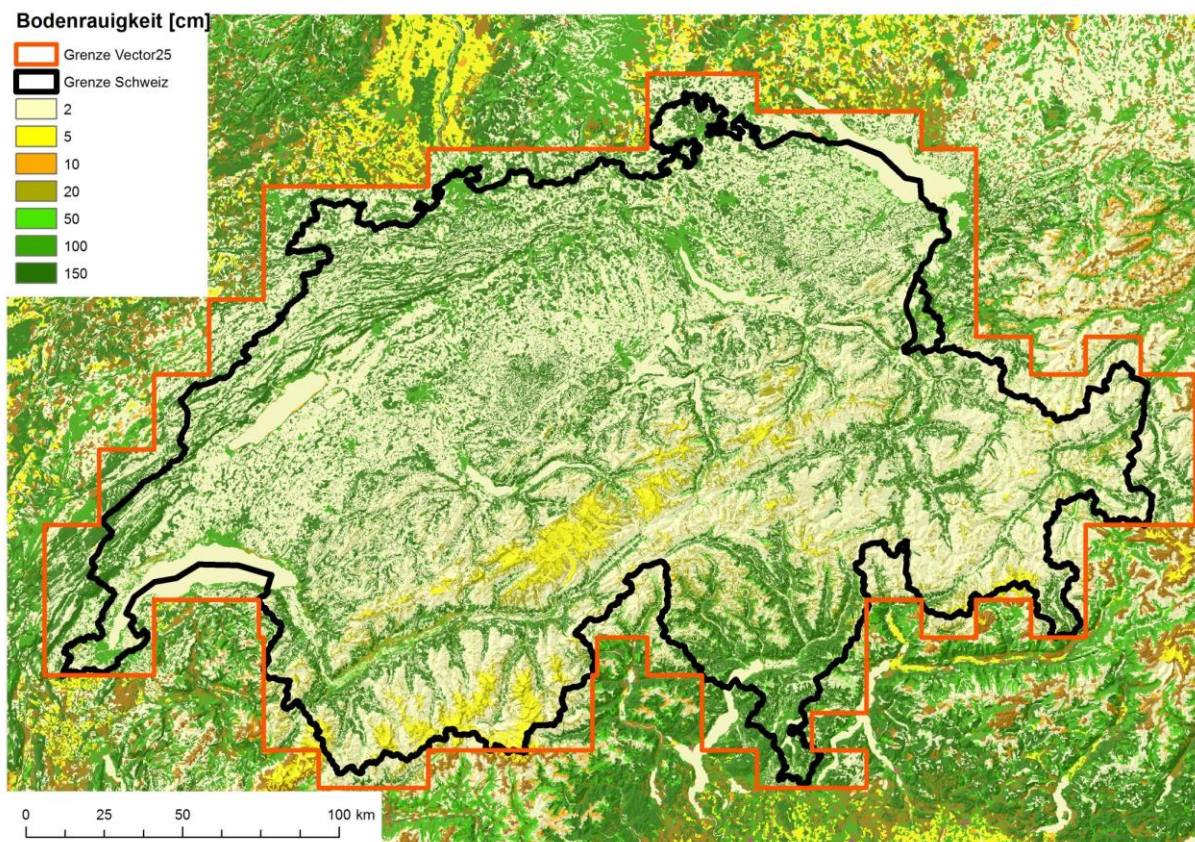


Abbildung 3: Bodenrauigkeitsmodell, zusammengesetzt aus den Datensätzen Vector25 und CORINE land cover.

In zwei Regionen gab es im Übergangsbereich der beiden Landnutzungsmodelle Unstimmigkeiten. Dies führte zu unrealistischen Inhomogenitäten. Die Landnutzung wurde in diesen Regionen manuell überprüft und basierend auf Luftbildern ein realistischer Wert für die Landnutzung festgelegt.

3 Berechnung der Windfelder

Die Modellierung von Windströmungen in komplexem Gelände ist sehr anspruchsvoll. Realistische Resultate können nur erreicht werden, wenn nichtlineare, dreidimensionale Strömungsphänomene berücksichtigt werden, wie zum Beispiel Rückströmungen oder Wirbelbildungen.

3.1 Das CFD-Modell WindSim

Die mathematische Beschreibung der Strömung in komplexem Gelände beruht auf nichtlinearen Differentialgleichungen (Reynolds Averaged Navier Stokes-Gleichungen). Die Gleichungen müssen vereinfacht werden, um sie lösen zu können. Einige Modelle (z.B. das häufig eingesetzte Modell WASP⁵) reduzieren die Gleichungen auf ein lineares Gleichungssystem. Dieses ist zwar einfach zu lösen, erfasst aber wichtige Strömungseffekte nicht, so dass die Modelle für komplexes Gelände nicht geeignet sind^{6,7}. Eine Alternative stellen so genannte CFD (Computational Fluid Dynamics) Modelle dar, die nichtlineare Ansätze zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse nutzen. Die Lösung der Gleichungen erfolgt in diesen Modellen iterativ, das heisst durch wiederholte, immer genauere Berechnungen. CFD-Modelle sind daher rechenzeitintensiv, ermöglichen aber eine relativ genaue Beschreibung der Strömungsverhältnisse in komplexem Gelände.

Meteotest verwendet seit dem Jahr 2003 die Software WindSim⁸, welche auf einem CFD-Modell beruht. Von Beginn weg war Meteotest in engem Kontakt mit den Entwicklern von WindSim. So auch während den Berechnungen für den Windatlas Schweiz. Das Modell konnte auf die speziellen Anforderungen, welche ein grossflächiger Windatlas Schweiz mit sich bringt, optimiert werden.

3.2 Sensitivitätsstudien zur Bestimmung der Randbedingungen

Die Randbedingungen stellen für eine Modellierung wichtige Parameter dar. Für drei charakteristische Regionen (Jura, Voralpen, Alpen) wurden diesbezüglich Sensitivitätsstudien durchgeführt. Es galt herauszufinden, welches numerisches Lösungsverfahren, welches Turbulenzschema und welche Waldparameterisierung die Realität am besten wiedergeben. Die Sensitivitätsstudien wurden für Standorte mit qualitativ hochstehenden Windmessungen durchgeführt. Dies ermöglichte einen Vergleich der berechneten und gemessenen Werte. Tabelle 3 zeigt die Resultate der Sensitivitätsstudien, welche dann für die Modellierung des ganzen Windatlas Schweiz verwendet worden sind.

⁵ www.wasp.dk

⁶ z.B. Moreno, P.; Gravdahl, A. and Romero, M., 2003: Wind flow over complex terrain: application of linear and CFD models. (http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/0306_ewec/ecotecnia.doc).

⁷ G. Gerdes, B. Schwenk und T. Pahlke, 1997: Ergebnisse von WASP in mässig strukturiertem Gelände. DEWI Magazin, 11, S. 39-43, 1997.

⁸ www.windsim.com

Tabelle 3: Parameter und die zugehörigen Werte, die als Randbedingungen für die CFD-Modellierung eingeflossen sind.

Parameter	Wert
Horizontale Gitterweite [m]	100 x 100
Vertikales Gitter [m]	variabel
Anzahl Zellen im vertikalen Gitter	54
Höhe des Modelldachs [m]	18'000
Atmosphärische Stratifizierung	neutral
Höhe der planetaren Grenzschicht [m]	500
Windgeschwindigkeit oberhalb der planetaren Grenzschicht [m/s]	10
Turbulenzparametrisierung	Standard k-epsilon
Numerisches Lösungsverfahren	General Collocated Velocity method (GCV)
Waldmodul	deaktiviert
Smoothing	deaktiviert

3.3 Berechnung der Windfelder

Bei der Modellierung mit WindSim werden dreidimensionale Windfelder für einzelne Gitterpunkte berechnet. Voraussetzung sind ein Höhenmodell und eine Bodenrauigkeit (siehe Kapitel 2.1 und 2.2). Danach muss das Gitter über dem Höhenmodell definiert werden, wobei eine horizontale und eine vertikale Auflösung gewählt werden kann. Für die horizontale Auflösung wurde ein regelmässiges Gitter mit 100 m Seitenlänge gewählt. Für die vertikale Auflösung wurde ein "gestrecktes" Gitter mit 54 Zellen bis zum Modelldach verwendet. Das heisst, die Modellebenen sind bodennah dünn und wachsen mit jeder Modellebene gegen Modelldach an. In den untersten 150 m über Grund sind sieben Modellebenen angesiedelt (Tabelle 4).

Das dreidimensionale Modellgitter wird aus zwölf 30°-Sektoren angeströmt. Als Ergebnis erhält man für jede Anströmrichtung und für jeden Gittermittelpunkt Angaben zum mittleren Windvektor, zur Turbulenz und zur Windscherung.

Tabelle 4: Höhe der untersten sieben Modellebenen.

Vertikale Modellebenen	1	2	3	4	5	6	7
Höhe über Grund [m]	9.4	28.1	46.9	65.6	84.4	103.1	121.9

Es ist nicht möglich mit einem CFD-Modell das ganze Gebiet der Schweiz in einem Stück zu berechnen. Darum wurde die Schweiz in 14 Modellgebiete aufgeteilt, deren Ränder sich überlappen (Abbildung 4). Für alle 14 Windfelder wurden die gleichen Randbedingungen der Modellierung verwendet.

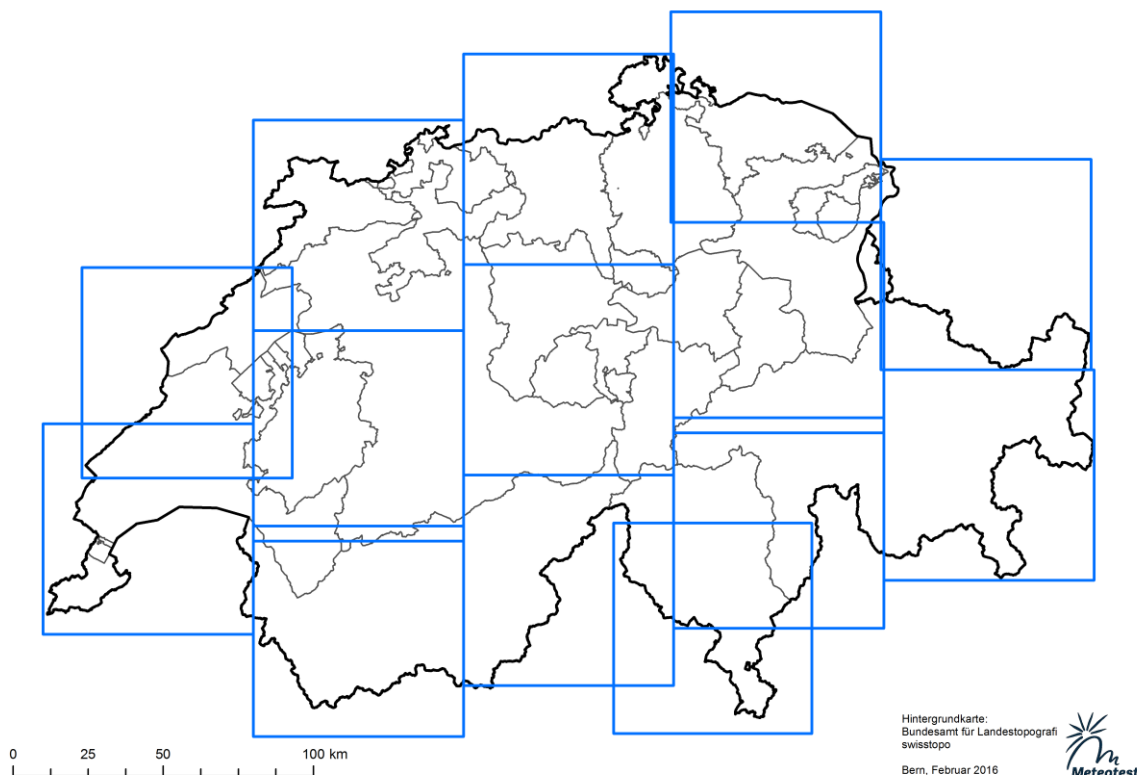


Abbildung 4: Einteilung des Schweizer Landesgebiets in 14 Modellgebiete.

Bei zwei Modellgebieten divergierte die Windfeldrechnung aufgrund des komplexen Geländes. Zur Lösung wurde in den Problemregionen ein lokales Smoothing angewendet.

Eine CFD-Modellierung liefert statische, zeitunabhängige Windfelder. Dies bedeutet, dass tageszeitabhängige Phänomene, welche thermisch induziert sind, nicht abgebildet werden können.

Bei der Berechnung der Windfelder in den einzelnen Modellgebieten fiel auf, dass je nach Komplexität des Geländes der Impuls mit zunehmender Distanz zum Einströmrand stark abnahm. Nach Rücksprache mit dem Softwarehersteller WindSim konnten die Randbedingungen am Modelldach so angepasst werden, dass kontinuierlich Impuls im Sinne eines geostrophischen Windes zugeführt wurde. Dies ermöglichte einen gleichmässigen Impulsfluss. Dennoch ergaben sich Unterschiede am Ein- und Ausströmrand. Mit kleineren Modellgebieten hätte diese Schwäche behoben werden können. Eine Neuberechnung des gesamten Gebietes mit kleineren Kacheln wäre extrem zeitaufwändig gewesen, weshalb darauf verzichtet werden musste.

Die vierzehn Modellgebiete wurden zusammengefügt, indem die zwölf sektorielle Windfelder einzeln interpoliert wurden.

Die Randeffekte der interpolierten Modellkacheln sind teilweise (Abbildung 5 bis Abbildung 9) zu erkennen. Besonders auf den Karten ab 100 m über Grund sind sie deutlicher sichtbar, da dort die höheren Windgeschwindigkeiten in einen Farbbereich zu liegen kommen, der sich stark abhebt.

4 Windstatistiken

Die Windfelder der CFD-Modellierung entsprechen der theoretischen Strömung gemäss der Topographie und der Rauigkeit. Diese Information muss skaliert werden, damit realistische Bedingungen abgebildet werden können. Die Skalierung der Windfelder wird anhand von Windmessreihen vorgenommen.

4.1 Beschaffung der Winddaten

Es wurden einerseits öffentlich zugängliche Windmessungen (z.B. SwissMetNet, IMIS und Messnetze kantonaler Ämter) und andererseits Windmessungen aus Windenergieprojekten genutzt. Die Datensätze, welche bereits für den Windatlas 2016 verwendet wurden, wurden unter wenigen Ausnahmen auch für die Aktualisierung herangezogen. Die Schweizer Windenergieakteure wurden wiederum angefragt, ihre neuen Windmessungen für die Skalierung des Windatlas 2019 zu Verfügung zu stellen. Die Windmessungen aus Windenergieprojekten wurden freundlicherweise von vielen Projektentwicklern zur Verfügung gestellt. Schriftliche Einverständniserklärungen liegen vor. Es wurde jedoch vereinbart, die Standorte der verwendeten Windstatistiken geheim zu halten.

Für den Windatlas 2019 konnten insgesamt 396 langjährig abgegliche Klimatologien in die Berechnung des Windatlas Schweiz einbezogen werden. In Tabelle 5 ist die Anzahl Klimatologien pro Naturraum für den neuen und den bisherigen Windatlas ersichtlich, welche für die Erstellung des Windatlas Schweiz zu Verfügung gestellt wurden.

Ein Schwachpunkt des Windatlas 2016 war die starke Variation der räumlichen Dichte der Klimatologien. Da viele Windenergieprojekte im Jurabogen angesiedelt sind, war die Dichte der Messungen in dieser Region sehr hoch, während sie in der Süd- und Ostschweiz tief war. Durch den Einbezug der IMIS- und SwissMetNet-Daten konnte die ungleiche Verteilung behoben werden, so dass die Skalierung auch im hochkomplexen Gebiet der Alpen verlässlicher ist.

Tabelle 5: Anzahl der Windstatistiken pro Naturraum resp. Lage, die zur Erstellung des Windatlas 2019 benutzt werden konnten.

Naturraum	Anzahl Klimatologien 2019	Anzahl Klimatologien 2016
Jura	50	32
Mittelland	64	15
Voralpen	17	7
Alpen	265	43

4.2 Bereinigung und langjähriger Abgleich der Winddaten

Die Qualität der langjährigen Windstatistiken hat massgeblichen Einfluss auf die Berechnung der Windressourcen. Daher wird zunächst geprüft, ob alle Messungen für die Berechnung geeignet sind. Im Windatlas 2016 wurden Messungen mit einer Mindestdauer von sechs Monaten und einer Mindestmesshöhe von 20 m über Grund verwendet. Um für den Windatlas 2019 auf eine grössere

Anzahl Klimatologien zurückgreifen zu können, wurden Messungen unterhalb von 20 m Messhöhe, wie beispielsweise die IMIS-Daten, welche standardmässig auf 5 m über Grund erhoben werden, ebenfalls einbezogen. Tests haben gezeigt, dass eine Extrapolation der Messungen anhand des logarithmischen Windprofils und einer Rauigkeitslänge von 0.1 m von 5 m über Grund auf 50 m über Grund in relativ flachem Gelände bessere Resultate zeigen, als wenn an diesem Standort keine Klimatologie verwendet wurde. Aus diesem Grund wurden Messungen, welche auf einer Höhe kleiner 50 m erhoben wurden, standardmässig auf 50 m extrapoliert.

Die überwiegende Anzahl der Messdaten sind Messungen des SwissMetNet- und IMIS-Netzwerks und weisen eine Dauer von rund 10 Jahren auf. Die Messungen mit grösserer Messhöhe stammen von Windenergieprojekten und weisen eine Dauer von mindestens einem Jahr auf. In Tabelle 6 ist die Anzahl Messungen (Klimatologien) pro Messhöhe aufgeführt, welche für die Erstellung des Windatlas Schweiz herangezogen wurden.

Die vertikale Abdeckung der Klimatologien bis 100 m über Grund ist gut. Oberhalb 100 m über Grund wird sie jedoch spärlich. Das CFD-Modell extrapoliert die Windgeschwindigkeit der Inputklimatologie auf der Messhöhe mit dem logarithmischen Windprofil auf die Ausgabehöhen des Windatlas Schweiz. Da es sich beim logarithmischen Windprofil um die Annahme einer neutralen atmosphärischen Stratifizierung handelt, kann die tatsächliche Windscherung am Messstandort von der Realität abweichen.

Tabelle 6: Anzahl der langjährig abgeglichenen Windstatistiken, die zur Gewichtung der Windfelder benutzt wurden.

Messhöhe	Anzahl Klimatologien
50 m	339
60 m	9
70 m	7
80 m	13
90 m	7
100 m	15
160 m	1
180 m	1
190 m	1
200 m	2
260 m	1

Die erhaltenen Messdaten wurden bereinigt und langjährig abgeglichen. Für die langjährige Abschätzung wurde eine mindestens zehnjährige vollständige Datenreihe einer permanenten Meteorstation der MeteoSchweiz verwendet. Es wurde der lineare Pearson-Korrelationskoeffizient für die Messungen mit den Daten von 139 permanenten Meteorstationen der MeteoSchweiz berechnet. Die Daten der Stationen mit den besten Korrelationen wurden auf Nähe zum Messstandort, Konsistenz sowie Lückenlosigkeit des Datensatzes geprüft.

Die bereinigten und langjährig abgeglichenen Klimatologien wurden am Messstandort in das Modell eingefügt und die Daten gemäss der Modellierung vertikal und horizontal in das Gelände extrapoliert.

5 Windkarten

Der Windatlas 2019 wurde für die fünf Höhen 50 m, 75 m, 100 m, 125 m und 150 m über Grund erstellt. Die Abbildung 5 bis Abbildung 9 zeigen die Karten der modellierten Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit auf den fünf Höhen über Grund.

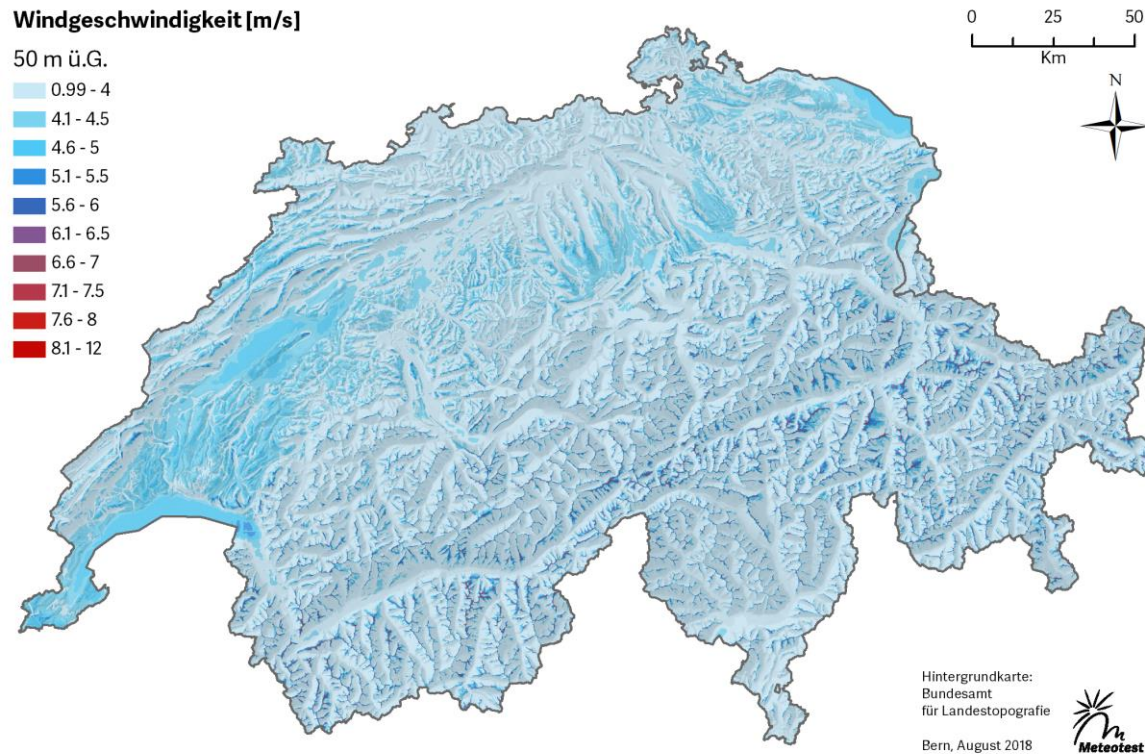


Abbildung 5: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe über Grund.

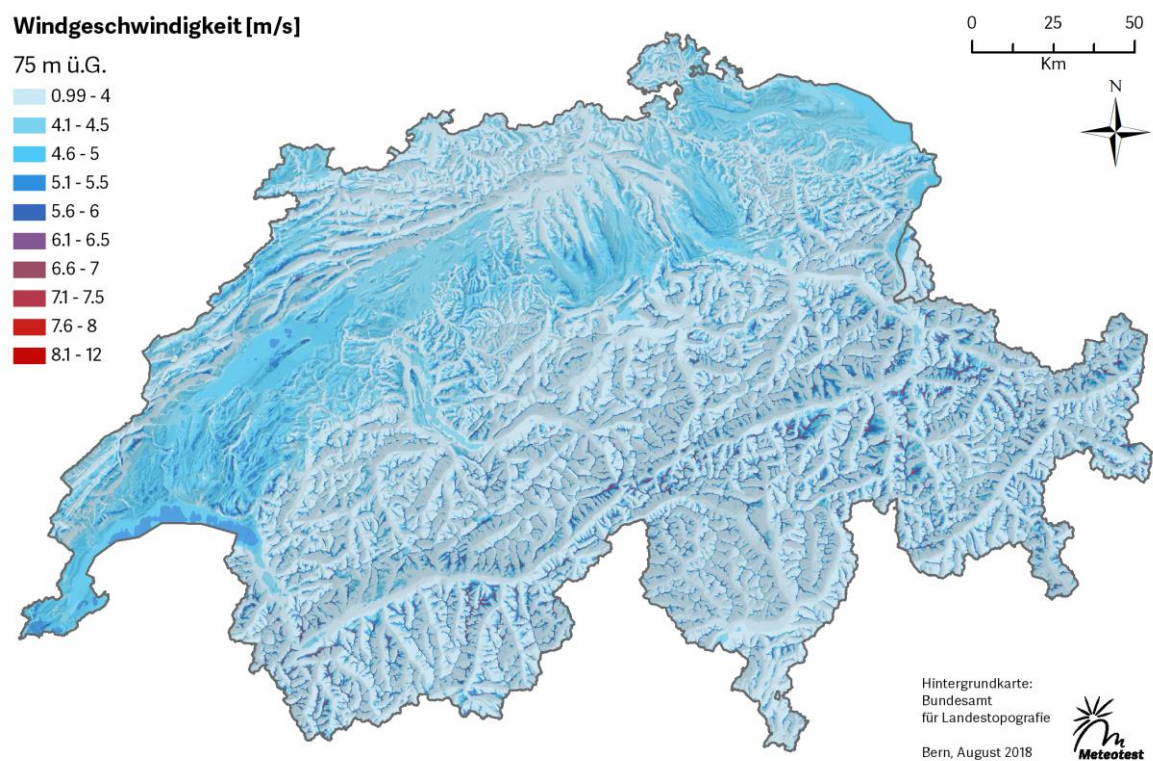


Abbildung 6: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit in 75 m Höhe über Grund.

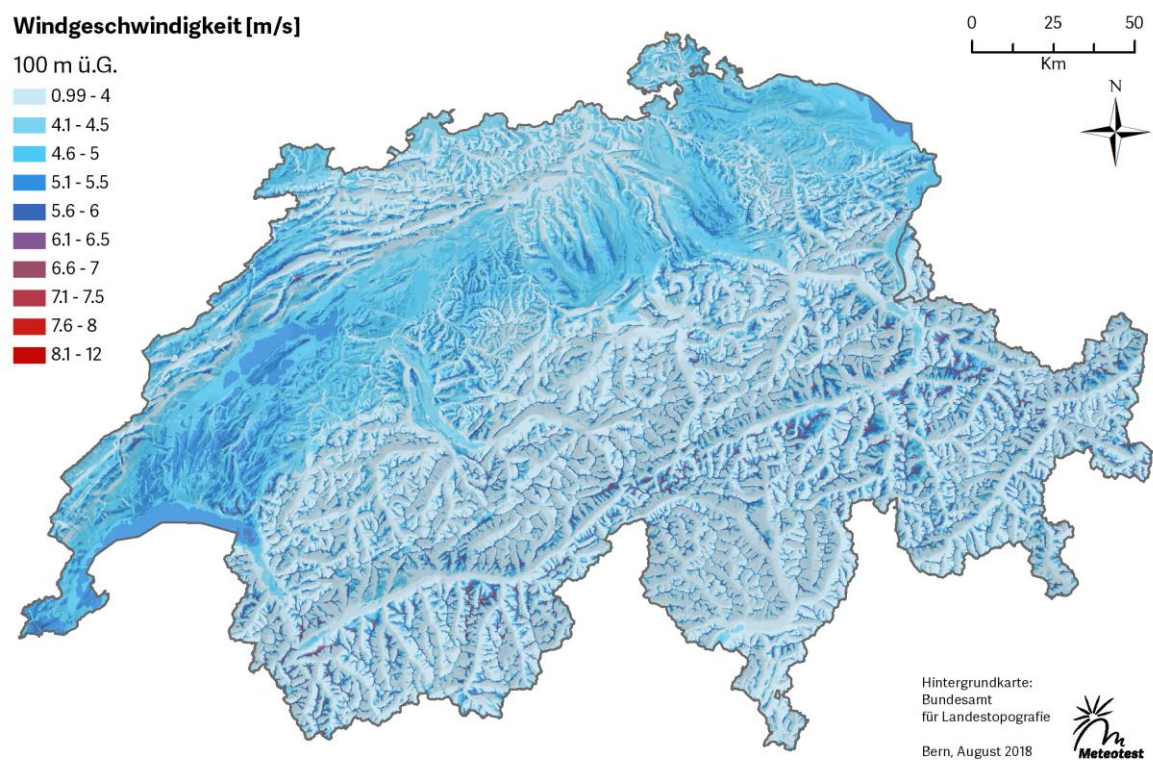


Abbildung 7: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe über Grund.

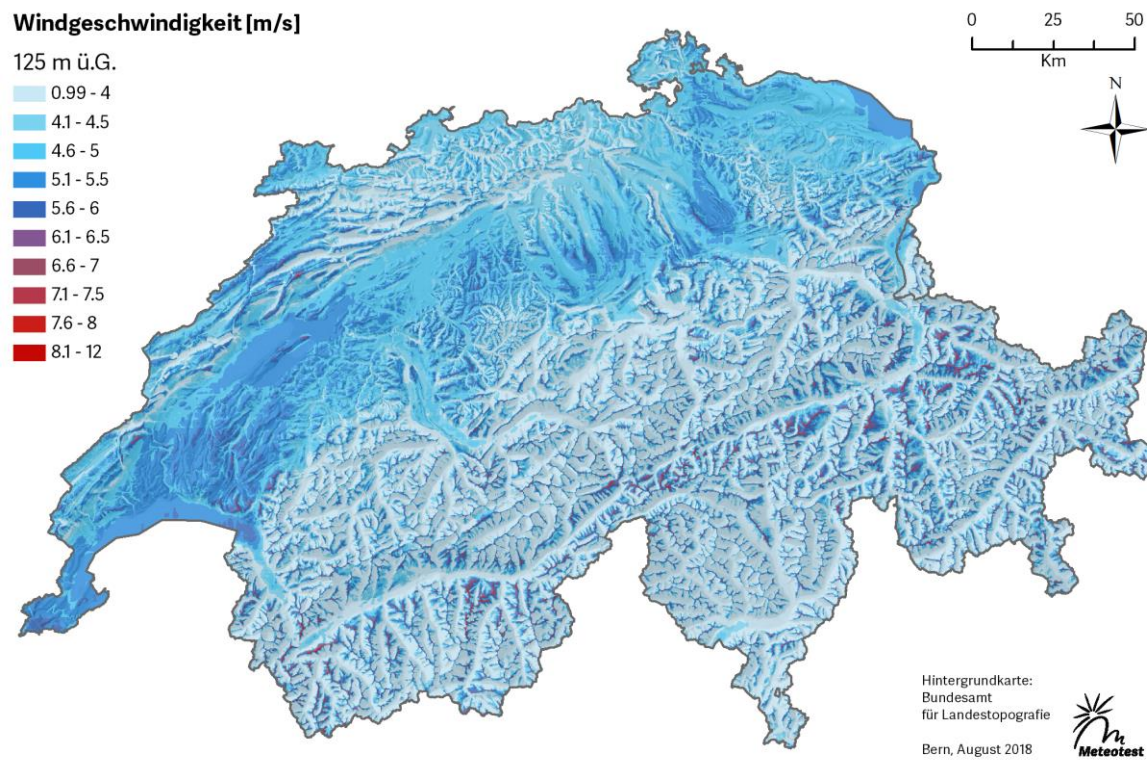


Abbildung 8: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit in 125 m Höhe über Grund.

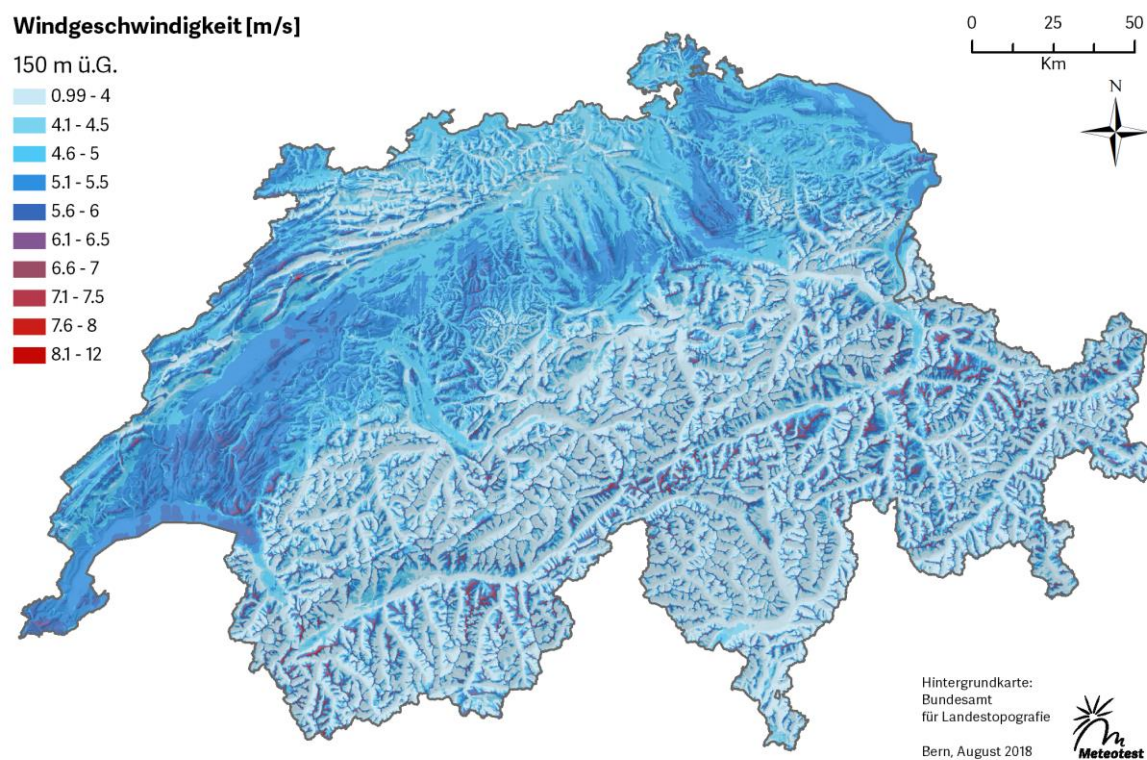


Abbildung 9: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit in 150 m Höhe über Grund.

6 Einbindung des Windatlas Schweiz in die Bundesgeodateninfrastruktur

Der Windatlas Schweiz wird in die Bundesgeodateninfrastruktur BGDI integriert. Jede der fünf Höhenstufen (Abbildung 5 bis Abbildung 9) ist als Kartenlayer im Kartenviewer des Bundes <http://map.geo.admin.ch> verfügbar.

Die Karten beinhalten für jedes 100 m x 100 m Raster die modellierten Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit und die Weibullparameter A und k. Zusätzlich wird für jeden 30°-Windrichtungssektor die mittlere Windgeschwindigkeit, die Häufigkeit, wie auch die A- und k-Parameter der Weibullverteilung in Form einer Windrose und Datentabelle dargestellt.

Detaillierte Informationen zum Geodatenmodell sind in folgendem Dokument enthalten:

Dokumentation Geodatenmodell

Windatlas Schweiz: Jahresmittelwerte der modellierten Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Version 1.0, 04.04.2016

Download: <http://www.bfe.admin.ch/geoinformation>

7 Validierung

Die qualitativ besten Messungen, deren Standorte möglichst gleichmässig die Fläche der Schweiz abdecken, wurden für die Erstellung des Windatlas Schweiz verwendet. Die Validierung der Resultate wurde ebenfalls mit qualitativ hochstehenden Messungen durchgeführt, wenn in der Region genügend Messungen zu Verfügung standen. Ansonsten musste für die Validierung auf qualitativ weniger hochstehende Messungen (kürzere Messperioden, Sensorausfälle, etc.) zurückgegriffen werden. Da bei der Datenmenge des Windatlas Schweiz ein Cross-Validation-Verfahren sehr zeitintensiv ist, wurden die Messungen an den Validierungsstandorten nur für die Validierung benutzt und später nicht für die Gewichtung der Windkarte verwendet.

Die WindSim-Resultate wurden an 62 Standorten auf 50 m bis 100 m über Grund validiert. Dafür wurden die Messungen wie bei der Aufbereitung der Klimatologien für die Erstellung des Windatlas Schweiz bereinigt und langjährig abgeglichen. In Tabelle 7 ist die Anzahl Validierungspunkte nach Naturraum für den neuen und den bisherigen Windatlas aufgelistet und gegliedert.

Tabelle 7: Anzahl der Windstatistiken pro Naturraum, die zur Validierung des Windatlas Schweiz benutzt werden konnten.

Naturraum	Anzahl Validierungspunkte 2019	Anzahl Validierungspunkte 2016
Jura	8	8
Mittelland	8	12
Voralpen	1	3
Alpen	45	11

7.1 Validierung der Windgeschwindigkeit

Die kleinste Abweichung der Windgeschwindigkeit zwischen WindSim-Rechnung und Messung beträgt im Windatlas 2019 0.07 m/s und die maximale Abweichung 2.92 m/s. Im Mittel beträgt die Abweichung 0.67 m/s.

Gemäss der Aufgabenstellung des BFE werden exemplarisch für jeden Naturraum in Tabelle 8 die Validierungsergebnisse für jeweils einen repräsentativen Standort vorgestellt. In der Tabelle 8 sind zudem die absoluten Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Windgeschwindigkeiten angegeben.

Die Breite der Differenzen widerspiegelt einerseits den unterschiedlichen Grad der Komplexität des Geländes und andererseits die Verfügbarkeit, Qualität und Höhe der Messungen. Die hohe Dichte der Klimatologien minimiert die Fehler, die durch die Komplexität des Geländes zustande kommen. Die Ergebnisse im Bereich der Alpen sind mit grösserer Unsicherheit behaftet, obwohl relativ viele Messungen zur Berechnung der Windressourcen zu Verfügung standen. Eine Windfeldmodellierung von 100 m x 100 m Auflösung ist nur beschränkt mit einer Punktmessung an einem Messmasten vergleichbar, da das Gelände bei der Windfeldmodellierung geglättet wird.

Tabelle 8: Absolute Abweichung der mittleren Windgeschwindigkeit (v_{mean}) zwischen den langjährigen Windstatistiken und den berechneten Windressourcen.

Naturraum	v_{mean} gemessen	v_{mean} Windatlas	absolute Differenz
Jura	4.9 m/s	4.8 m/s	0.1 m/s
Mittelland	4.1 m/s	3.8 m/s	0.3 m/s
Voralpen	5.5 m/s	5.6 m/s	0.1 m/s
Alpen	4.1 m/s	2.8 m/s	1.3 m/s

7.2 Validierung der Windrichtung

Die Validierung der Windrichtung wird ebenfalls anhand von Messungen in den vier Naturräumen dargestellt, Abbildung 10 bis Abbildung 13. Im Allgemeinen ist bei den modellierten Windrosen die Tendenz zu einer über alle Sektoren ausgeglicheneren Windrose zu sehen. Die Hauptwindrichtungen werden aber gut widergegeben. Dies zeigt, dass WindSim die Abbildung der Strömungsverhältnisse gelingt.

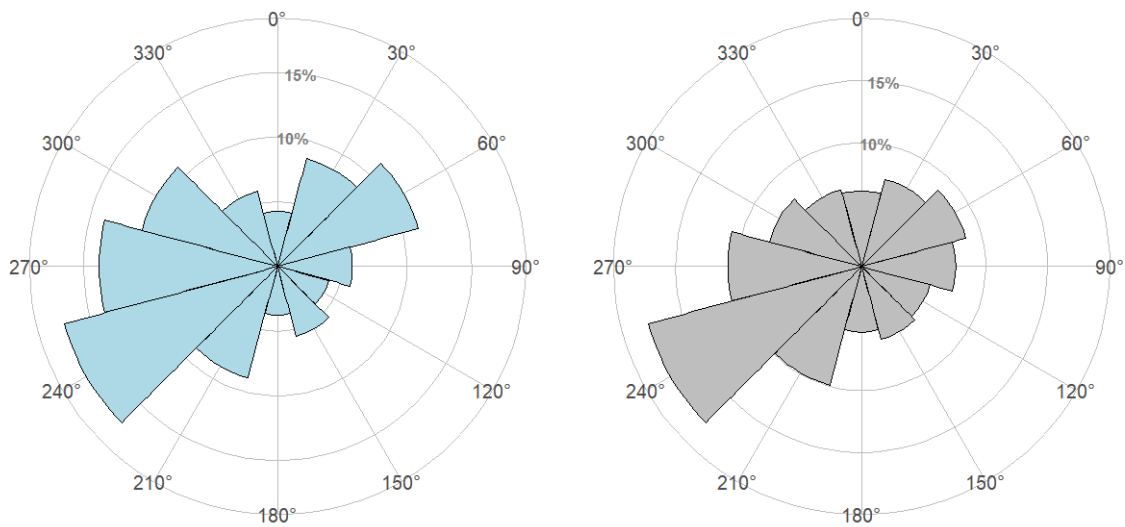


Abbildung 10: Vergleich einer Windrose einer Windmessung (links) und der modellierten Windrose (rechts) im Jura.

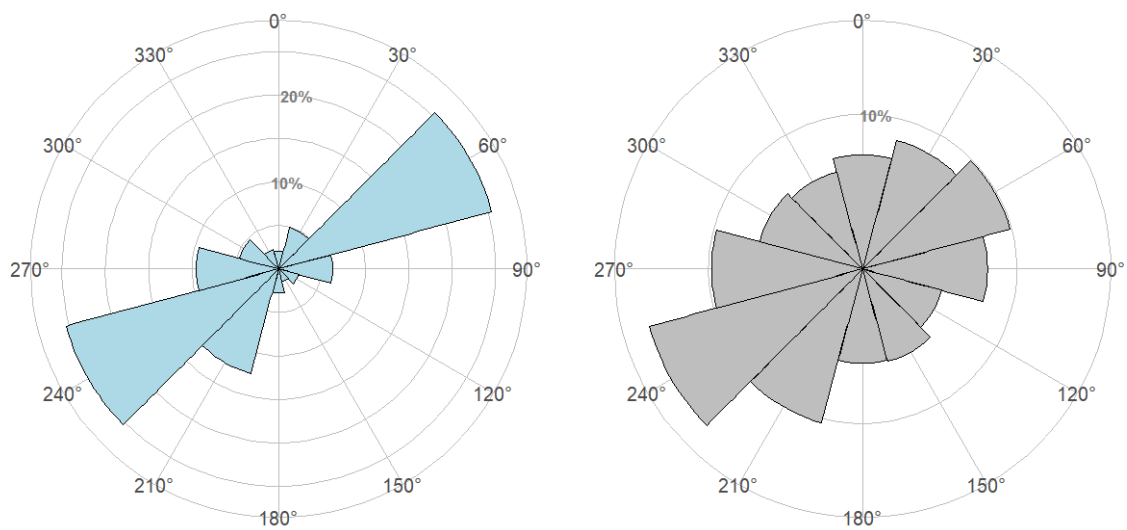


Abbildung 11: Vergleich einer Windrose einer Windmessung (links) und der modellierten Windrose (rechts) im Mittelland.

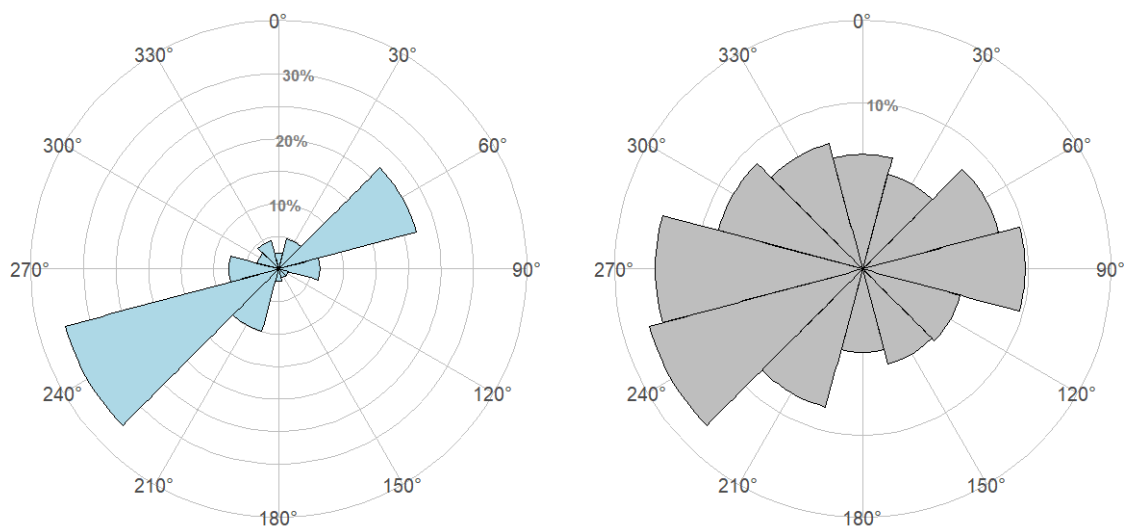


Abbildung 12: Vergleich einer Windrose einer Windmessung (links) und der modellierten Windrose (rechts) in den Voralpen.



Abbildung 13: Vergleich einer Windrose einer Windmessung (links) und der modellierten Windrose (rechts) in den Alpen.

8 Windatlas 2019 versus Windatlas 2016

8.1 Vergleich mit dem Windatlas 2016

Als Ausgangslage für die Aktualisierung des Windatlas wurden die Windfelder des Windatlas 2016 verwendet. Die Windfelder der CFD-Modellierung entsprechen der theoretischen Strömung gemäss der Topographie und der Rauigkeit. Bei der Modellierung für den Windatlas 2019 wurde die gleiche Methodik verwendet wie 2016. Als grosser Unterschied zum Windatlas 2016 wurden beim Windatlas 2019 vier Mal mehr Klimatologien für die Skalierung der Windfelder einbezogen, wodurch räumlich eine stark verbesserte Abstützung erreicht werden konnte.

In der südlichen Zentralschweiz und im östlichen Wallis sind die Windgeschwindigkeiten in der Version von 2019 sehr ähnlich mit jenen in der Version von 2016.

In den folgenden Regionen sind die Windgeschwindigkeiten in der Version von 2019 jedoch deutlich tiefer gegenüber den Windgeschwindigkeiten in der Version von 2016:

- Kantone Genf und Waadt
- Teile von Neuenburg
- Westliches Wallis
- Misox im Kanton Graubünden
- Nördliche Region des Kantons Graubünden
- Südlicher Teil des Kantons St. Gallen
- Kanton Thurgau

In den übrigen Regionen der Schweiz gibt es in den Versionen von 2019 und 2016 Unterschiede von 0 m/s bis maximal 0.5 m/s, wobei die Version von 2016 die Windgeschwindigkeiten eher überschätzt hat.

Im Mittel sind die Windgeschwindigkeiten im neuen Windatlas 2019 0.42 m/s (50 m) bis 0.55 m/s (150 m) tiefer als im Windatlas 2016. Deutlich tiefer ist der Windatlas 2019 in der West- und Ostschweiz. Es war bekannt, dass die Werte vom Windatlas 2016 in diesen Regionen zu hoch ausfielen. In der Abbildung 14 ist ein Vergleich der beiden Windkarten für den Ausschnitt nördlich von Lausanne gezeigt. Die zu hohen Windgeschwindigkeiten des Windatlas 2016 wurden in der Aktualisierung nach unten korrigiert. Aus Gründen des Datenschutzes wird hier keine Differenzkarte gezeigt.

Erläuterungen zur Verwendung des Windatlas und seine Grenzen sind im Kapitel 1 gegeben.

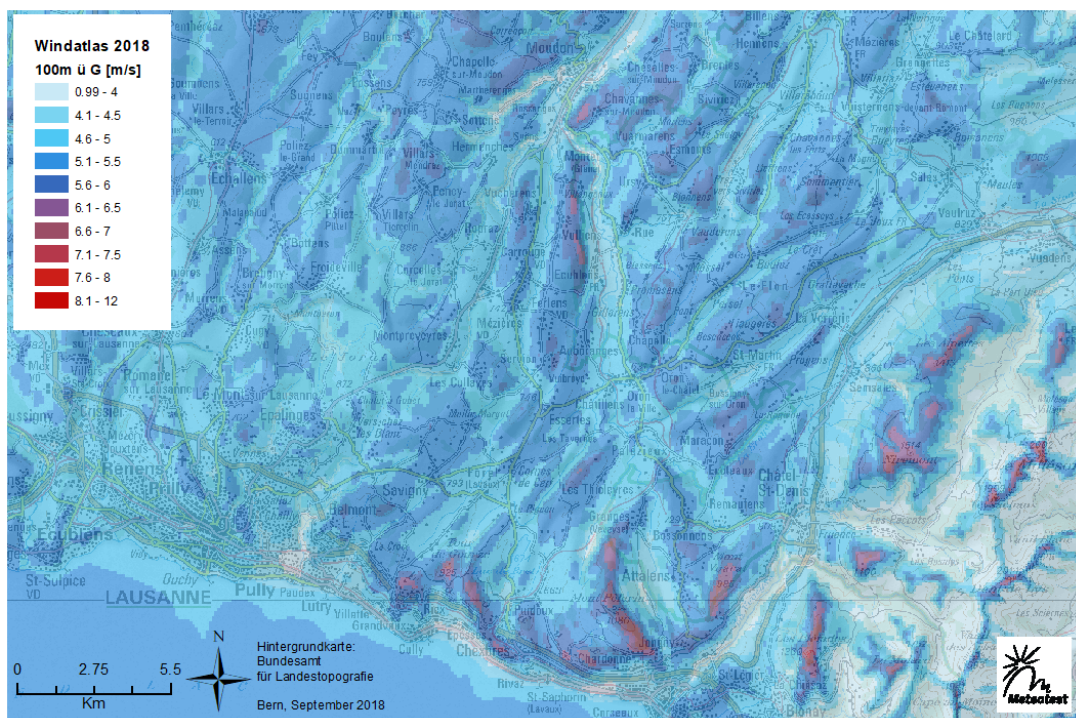
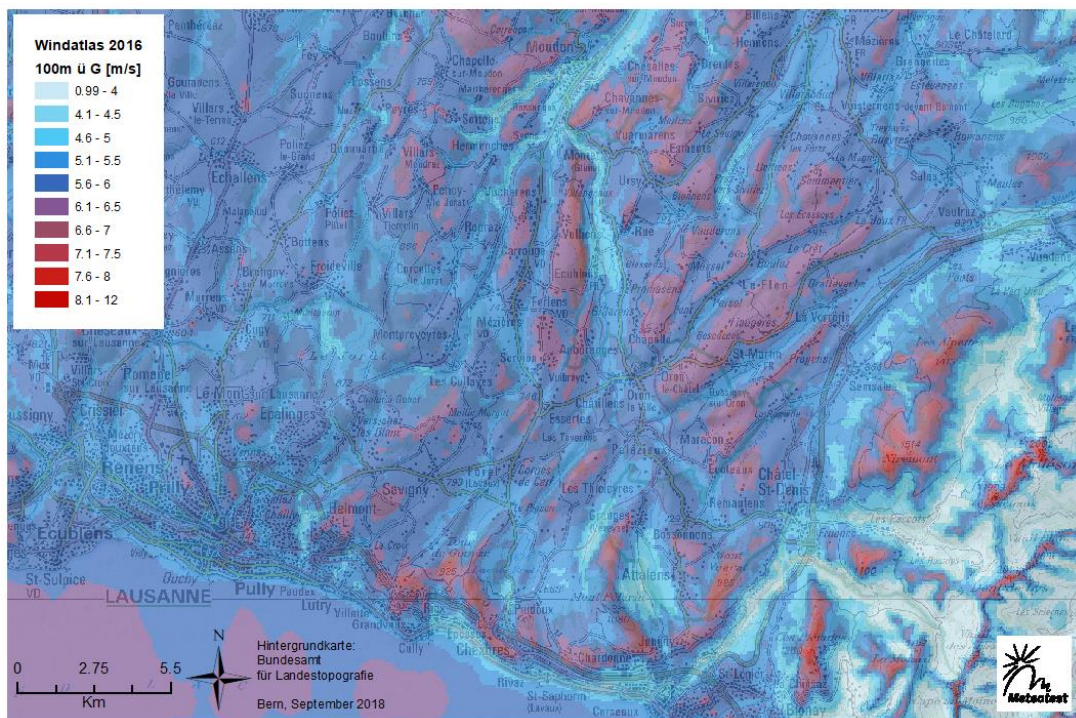


Abbildung 14: Vergleich des Windatlas 2016 (oben) mit dem Windatlas 2019 (unten). Der Ausschnitt zeigt die Windgeschwindigkeiten auf 100 m über Grund in der Region nordöstlich von Lausanne.

9 Unsicherheit

Der Windatlas Schweiz ist das Resultat einer Modellierung. Modelle sind grundsätzlich vereinfachte Abbilder der Wirklichkeit und darum mit Unsicherheiten behaftet. Aus diesem Grund sind die Informationen im Windatlas Schweiz als grobe Einschätzung der Windverhältnisse zu verstehen. In gewissen Regionen ist der Atlas sehr genau, in anderen Regionen sind deutlich zu wenige Messungen verfügbar, um die Karte zu validieren. Bei Interesse an einer Standortentwicklung ist eine Messung vor Ort in jedem Fall unumgänglich.

Aufgrund der unterschiedlichen Komplexität des Geländes in der Schweiz und der ungleichen Abdeckung der verwendeten Klimatologien werden die Unsicherheitsangaben für die einzelnen Naturräume differenziert angegeben.

Die Grössenordnung der Unsicherheiten sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Angaben gelten für die Karten auf 50 m, 75 m und 100 m. Für die Karten ab 100 m Höhe über Grund stehen wenig hohe Messungen für die Modellierung zu Verfügung, wodurch die Windmodellierung einerseits weniger gut gestützt wird und auch die Validierung nicht mehr möglich ist. Dies resultiert in einer höheren Unsicherheit der Ergebnisse. Aufgrund Schwierigkeiten bei der Interpolation der Modellgebiete im Norden der Schweiz, muss dort mit etwas höheren Unsicherheiten gerechnet werden.

Tabelle 9: Grössenordnung der Unsicherheit in Abhängigkeit des Naturraums.

Naturraum	Grössenordnung der Unsicherheit 2019	Grössenordnung der Unsicherheit 2016
Jura	+/- 0.5 m/s	+/- 0.5 m/s
Mittelland	+/- 0.7 m/s	+/- 0.8 m/s
Voralpen	+/- 0.5 m/s	+/- 1.0 m/s
Alpen	+/- 1.3 m/s	+/- 1.5 m/s

Anmerkung zu den Weibull-Parametern A und k

Um die Windressourcen eines Standortes zu beschreiben, ist die Angabe der mittleren Windgeschwindigkeit nicht ausreichend, da die Häufigkeiten der verschiedenen Windgeschwindigkeitsklassen entscheidend sind.

Eine Möglichkeit die Verteilung der Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen zu beschreiben ist die Weibull-Verteilung. Anhand der zwei Parameter A (Skalierungsfaktor, charakterisierende Windgeschwindigkeit der Zeitreihe) und k (Formparameter, beschreibt die Form der Verteilung), kann die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitsklassen für viele Standorte angenähert werden.

Für Standorte, an denen tageszeitenabhängige thermische Effekte eine Rolle spielen, kann die Weibull-Verteilung nicht verwendet werden um die Häufigkeitsverteilung abzubilden. Die im Windatlas für jede 100 m Rasterzelle dargestellten Windgeschwindigkeiten basieren auf einer Windmodellierung, welche eine mittlere Windgeschwindigkeit liefert und versucht die Häufigkeitsverteilung mittels einer Weibull-Verteilung anzunähern. Um die thermisch bedingten Effekte abbilden zu können, müsste für jede Rasterzelle eine Zeitreihe zur Verfügung stehen, was die Dimension des CH-Windatlas übersteigt.

Aus diesem Grund ist bei der Nutzung der Weibull-Parameter zur Bestimmung eines Energieertrages Vorsicht geboten.