



Bewertung der Studie «Etude comparative des vitesses de vent et du productible», November 2016 von Ennova

Impressum

Auftraggeber Kontaktperson Adresse	Direktion für Raumentwicklung, Infrastruktur, Mobilität und Umwelt Elena Trigo Rue des Chanoines 17 1701 Fribourg
Datum Aktuelle Version Ältere Versionen	15.01.2026 bewertung_studie_plan_directeur_cantonal_v5.docx bewertung_studie_plan_directeur_cantonal_v4.docx bewertung_studie_plan_directeur_cantonal_v3.docx bewertung_studie_plan_directeur_cantonal_v2.docx bewertung_studie_plan_directeur_cantonal.docx
Projekt Datei	wind_evaluation_plan_directeur_FR_25 bewertung_studie_plan_directeur_cantonal_v5
Erstellt durch Kontrolliert durch Genehmigt durch	Sara Koller 15.01.2026 Beat Schaffner 29.10.2025 Beat Schaffner
Gewährleistung	Meteotest gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fachgerechte Auftragsbearbeitung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässigen wegbedungen.

Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Einleitung	6
2.1	Hintergrund des Auftrages	6
2.1.1	Ziel der Studie von Ennova zur Bewertung des Windenergiepotenzials	7
2.1.2	Hintergrund der Studie von Ennova	7
2.2	Was ist ein Windatlas?	8
2.3	Beschreibung des Auftrages zur Bewertung der Studie von Ennova	9
2.4	Vorgehen von Meteotest für die Bewertung der Studie von Ennova	9
2.4.1	Datenlieferung von Ennova	9
2.4.2	Vorgehen der Bewertung	9
3	Analyse	11
3.1	Bewertung Messdaten	11
3.1.1	Einleitung	11
3.1.2	Verworfenen Messdaten	11
3.1.3	Verwendete Messdaten	12
3.1.4	Beurteilung des Vorgehens von Ennova bezüglich Messdaten	14
3.2	Bewertung Strömungsmodellierung	15
3.2.1	Was ist das Modell WAsP?	15
3.2.2	Vorgehen Ennova	16
3.2.3	Bewertung des Vorgehens von Ennova	16
3.2.4	Einschätzung der von Ennova angegebenen Unsicherheiten	18
3.3	Verifizierung der Resultate mit den Windressourcen von Ennova und Vergleich mit den Werten des Windatlas Schweiz Ausgabe 2016 und Ausgabe 2019	19
3.3.1	Verifizierung der Resultate von Ennova	19
3.3.2	Vergleich Resultate von Ennova mit den Windatlanten 2016 und 2019	21
4	Schlussfolgerung	25

1 Zusammenfassung

Am 16. Januar 2024 wurde durch einen Beschluss des Staatsrates ein Steuerungsausschuss eingesetzt. Dessen Aufgabe ist es, die Windenergieplanung neu zu prüfen, sie gegebenenfalls zu aktualisieren und zu untersuchen, ob neben den bereits berücksichtigten Kriterien noch andere zur Bestimmung der am besten geeigneten Standorte für die Windenergienutzung herangezogen werden können. Diese Arbeiten dienen vorrangig der Umsetzung von Art. 10 Abs. 1 EnG.

Im Rahmen der Überprüfung der sieben Schritte der Windenergieplanung, die in der Studie "Etude pour la planification des sites éoliens" (Mai 2017) beschrieben sind, wird insbesondere die methodische Vorgehensweise sowie die Vollständigkeit, Relevanz und aktuelle Gültigkeit der verwendeten Daten und Kriterien hinterfragt. Ziel ist es, die Planung zu validieren und/oder einen möglichen Aktualisierungsbedarf festzustellen.

In diesem Zusammenhang wurde entschieden, Meteotest, ein neutrales und unabhängiges Studienbüro mit der Überprüfung der Vergleichsstudie zu Windgeschwindigkeiten und Ertragspotenzial von Ennova ("Etude comparative des vites-ses de vent et du productible" (November 2016,) zu beauftragen. Die Ergebnisse dieser Studie dienten in der zweiten Phase der Planungsstudie als Auswahlkriterium für die Windenergiestandorte

Die vorliegende Bewertung von Meteotest behandelt zwei zentrale Fragestellungen:

1. Bewertung der Studie von Ennova aus dem Jahr 2016 unter Berücksichtigung des damaligen Wissensstandes.
2. Einschätzung, ob die damalige Vorgehensweise heutigen Standards entspricht und ob Anpassungen empfohlen werden.

Meteotest hat für die Überprüfung die Resultate in elektronischer Form bei Ennova angefordert. Ennova hat die Daten gefunden und geliefert. Ennova hat Meteotest alle Perimeter und Teilperimeter der Gebiete mit den Windressourcen im GIS-Format zu Verfügung gestellt. Zusätzlich hat Ennova ein Excel geliefert, welches ihre Berechnungen dokumentiert. Meteotest konnte damit die Bearbeitungsschritte von Ennova nachvollziehen. Meteotest hat aber selber keine Windmodellierungen oder Datenanalysen der Messungen gemacht. Das war im Auftrag nicht vorgesehen.

Ein Windatlas ist eine Windkarte, welche eine grossflächige, möglichst homogene Übersicht der Windbedingungen über eine Region oder ein ganzes Land bietet. Ein Windatlas wird auf Basis eines Strömungsmodells und langjährig abgeglichenen Windmessungen erstellt.

Ennova hat die damals verfügbaren Windmessungen bei Projektentwicklern eingeholt und aufbereitet. Das Verwerfen einzelner Datensätze und das Verwenden (Datenbereinigung, langjähriger Abgleich der Daten) der Messdaten von Ennova

ist aus damaliger wie heutiger Sicht nachvollziehbar. Man musste sich damals mit den wenigen Messungen, welche zu Verfügung standen, behelfen um einen möglichst verlässlichen Windatlas zu erstellen. Meteotest sind aus dem Bereich Windenergie keine weiteren Messungen zum Zeitpunkt der Analyse von Ennova bekannt.

Das damals gängige Strömungsmodell für ein Erstellen eines Windatlas war das lineare Modell WAsP der Software windPRO¹. Dieses Modell hat Ennova für die Berechnung der Windressourcen verwendet. Das Gelände des Kantons Fribourg ist gemischt mit relativ flachen Regionen, Hügeln und Bergen (Voralpen). Um die Verlässlichkeit des Modelloutputs möglichst hoch zu halten, würde aus Sicht Meteotest in solchen gemischten Geländetypen ein Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell verwendet werden. So wird die Windströmung in allen Regionen möglichst korrekt abgebildet. Die Verwendung eines CFD-Modells ist aber nicht zwingend, da auf der Stufe eines Windatlases noch keine sehr genauen Daten zu Verfügung stehen müssen.

Das Vorgehen und die Analyse von Ennova kann reproduziert und nachvollzogen werden. Die Resultate von Ennova liegen in einem sehr ähnlichen Rahmen wie diejenigen der Nachberechnungen von Meteotest und es resultieren dieselben sechs Gebiete mit den besten Windressourcen. Das Vorgehen von Ennova ist schlüssig und ist gut auf die damals verfügbaren Messungen abgestimmt. Die Wahl des Strömungsmodells (WAsP) entspricht dem damaligen Standard für Windatlanten. Für die komplexeren Perimeter in den Voralpen ist es hingegen nicht ideal, da es die vorherrschenden Strömungen nicht physikalisch korrekt erfassen kann. Ein Vergleich mit dem Windatlas 2019, welcher mit einem CFD-Modell erstellt wurde, zeigt aber, dass die Unterschiede der mittleren Windgeschwindigkeit im Mittel bei 0.5 m/s liegen und die maximalen Abweichungen bei 0.9 m/s. Diese Abweichungen liegen deutlich im Unsicherheitsbereich des Windatlas 2019. In der Publikation des BFE zum Windatlas steht bezüglich Unsicherheit²: «Die Grössenordnung der Unsicherheiten liegen im Jurabogen bei bis zu +/- 0.5 m/s, im Mittelland bei bis zu +/- 0.8 m/s, in den Voralpen bei bis zu +/- 1.0 m/s und in den Alpen bei bis zu +/- 1.5 m/s. Für die Karten ab 100 m Höhe über Grund stehen markant weniger Messungen für die Modellierung zu Verfügung. Dies resultiert in einer höheren Unsicherheit der Ergebnisse.». Die Unterschiede der Werte von Ennova und des Windatlas 2019 sind in Ordnung, insbesondere, da es sich beim Windatlas 2019 nicht um eine Referenz handelt, sondern eben auch "nur" um einen Windatlas mit relativ hoher Unsicherheit. Da das BFE den Windatlas 2019 als Standard für die Beurteilung des Windpotenzials für die Erstellung eines Richtplanes nennt, wurde dieser Vergleich dennoch gemacht.

¹ <https://www.emd-international.com/software/windpro/modules/model>

² https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EE_Windatlas/

2 Einleitung

2.1 Hintergrund des Auftrages

Der Kanton Freiburg hat seine Windenergieplanung im Jahr 2017 abgeschlossen. Diese bildete die Grundlage für die Aufnahme des Themas Windenergie in den revidierten Sachplan Energie (Juli 2017) und in den revidierten Kantonalen Richtplan, der 2018 verabschiedet und im August 2020 vom Bundesrat genehmigt wurde.

Der Kantonale Richtplan legt fest, dass bis zum Jahr 2030 jährlich 160 GWh Windenergie produziert werden sollen. Dabei soll die Entwicklung von Windparks in Gebieten gefördert werden, die gesellschaftliche, technische, wirtschaftliche und umweltrelevante Aspekte berücksichtigen, und zwar in Übereinstimmung mit Artikel 10 des Bundesgesetzes über die Energie (EnG; SR 730.0) sowie den Grundsätzen und Zielen des eidgenössischen Konzepts Windenergie des Amts für Raumplanung (ARE).

Zur Erreichung dieser Ziele sieht der Kantonale Richtplan vor, Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 30 Metern in Windparks von mindestens sechs Anlagen zu konzentrieren. Diese sollen an einem der sieben durch die kantonale Planung festgelegten Standorte errichtet werden:

- Schwyberg
- Collines de la Sonnaz
- Massif du Gibloux
- Monts de Vuisternens
- Côte du Glâne
- Autour de l'Esserta
- Surpierre-Cheiry

Am 16. Januar 2024 wurde durch einen Beschluss des Staatsrates ein Steuerungsausschuss (COPIL éolien) eingesetzt. Dessen Aufgabe ist es, die Windenergieplanung neu zu prüfen, sie gegebenenfalls zu aktualisieren und zu untersuchen, ob neben den bereits berücksichtigten Kriterien noch andere zur Bestimmung der am besten geeigneten Standorte für die Windenergienutzung herangezogen werden können. Diese Arbeiten dienen vorrangig der Umsetzung von Art. 10 Abs. 1 EnG.

Der COPIL éolien wird dabei vom Ingenieurbüro CSD begleitet. Die Arbeitsmethodik umfasst eine erneute Überprüfung der sieben Schritte der

Windenergieplanung, die in der Studie "Etude pour la planification des sites éoliens" (Mai 2017, im Folgenden auch "Bericht 2") dokumentiert sind.

Im Rahmen dieser Überprüfung wird insbesondere die methodische Vorgehensweise sowie die Vollständigkeit, Relevanz und aktuelle Gültigkeit der verwendeten Daten und Kriterien hinterfragt. Ziel ist es, die Planung zu validieren und/oder einen möglichen Aktualisierungsbedarf festzustellen.

In diesem Zusammenhang wurde entschieden, Meteotest, ein neutrales und unabhängiges Büro mit der Überprüfung der Studie "Etude comparative des vitesses de vent et du productible" (November 2016, im Folgenden auch "Bericht 1" oder "Vergleichsstudie zu Windgeschwindigkeiten und Ertragspotenzial" oder "Studie von Ennova") zu beauftragen, welche 2016 durch das Unternehmen Ennova SA erstellt wurden. Die Ergebnisse dieser Studie dienten in der zweiten Phase der Planungsstudie als Auswahlkriterium für die Windenergiestandorte (vgl. den nächsten Abschnitt 2.1.1).

2.1.1 Ziel der Studie von Ennova zur Bewertung des Windenergiepotenzials

Die Studie von Ennova "Etude comparative des vitesses de vent et du productible" (November 2016, im Folgenden auch "Bericht 1") diente dazu, die in Etappe 1 (Negativplanung) identifizierten möglichen Standorte ("Sites de Faisabilité éoliens" oder "SFE") auf Grund ihres Windenergiepotenzials bewerten zu können. Diese Bewertung des Windpotenzials war eines der zwölf Kriterien, die in die Gesamtnote jedes Standortes miteinflussen.

Ziel war somit eine relative Bewertung des Windpotenzials verschiedener Standorte auf dem Kantonsgebiet im Rahmen eines Raumplanungsverfahrens (welches sind die Standorte mit mehr respektive weniger Wind?), und nicht eine absolute, möglichst genaue Kalkulation, wie dies im Rahmen eines konkreten Ausführungsprojekts respektive einer Wirtschaftlichkeitsprüfung verlangt wird.

2.1.2 Hintergrund der Studie von Ennova

Wie kam es zur Studie von Ennova und warum wählte Ennova ihre Vorgehensweise? Das Amt für Energie AfE des Kantons Fribourg erklärt das wie folgt:

Das Bundesgesetz über die Energie (Art. 10 EnG) schreibt den Kantonen unter anderem vor, eine Windenergieplanung zu erstellen. Die dabei zu berücksichtigenden Kriterien sind im «Konzept Windenergie» des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) präzisiert. Hinsichtlich des Kriteriums «Windgeschwindigkeit» verweist das «Konzept Windenergie» in Kapitel 3.3 Planung der Windenergienutzung durch die Kantone, auf den Windatlas Schweiz. Im Jahr 2016 stellte die Arbeitsgruppe fest, dass zahlreiche Messungen vor Ort geringere Werte ergaben als im Windatlas angegeben. Die Arbeitsgruppe beschloss daher, das Unternehmen Ennova zu beauftragen, eine Modellierung der Windressourcen auf dem

Kantonsgebiet durchzuführen, mittels Einbezug der damals zur Verfügung stehenden Windmessungen.

Die kantonale Planung wurde anschliessend vom Bundesrat genehmigt, nachdem die zuständigen Bundesämter ihren Inhalt, insbesondere die begleitenden Studien, geprüft hatten.

Das 2020 revidierte «Konzept Windenergie» des Bundesamtes für Raumentwicklung verweist auf den im Februar 2019 aktualisierten Windatlas.

2.2 Was ist ein Windatlas?

Ein Windatlas ist eine Windkarte, welche eine grossflächige, möglichst homogene Übersicht der Windbedingungen über eine Region oder ein ganzes Land bietet. Der Hauptzweck eines Windatlas ist die grobe Einschätzung des Windenergiepotenzials, um geeignete Regionen für Windpotenzialabklärungen zu identifizieren. Ein Windatlas wird auf Basis eines Strömungsmodells und langjährig abgeglichenen Windmessungen erstellt.

Das damals gängige Strömungsmodell für ein Erstellen eines Windatlas war das lineare Modell WAsP (windPRO³). Meteotest hat für die Erstellung des Windatlas Schweiz 2016 das Computational Fluid Dynamics Modell WindSim⁴, verwendet. Das Modell war damals noch nicht auf die Anwendung von Windatlanten ausgerichtet. Meteotest hat darum die Modellierungen in enger Zusammenarbeit mit WindSim durchgeführt. Als Ausgangslage für die Strömungsmodellierung werden Höhen- und Rauigkeitsmodelle benutzt. Messungen werden verwendet um die Windströmungen zu skalieren und realitätsnahe Windressourcen zu berechnen. Je mehr Messungen zu Verfügung stehen (bestenfalls maximal vier Kilometer Abstand zwischen Messungen im komplexen Gelände) und je besser diese Messungen (mit kalibrierten und beheizten Sensoren, mindestens einjährige Messung) die Windbedingungen wiedergeben, desto belastbarer ist der Windatlas.

Es gibt keine nationalen oder internationalen Normen, wie ein Windatlas erstellt werden soll, da die enthaltenen Informationen nicht die Belastbarkeit eines bankfähigen Gutachtens für die Windenergieertragsberechnung aufweisen kann und muss.

Heutzutage würden Windatlanten anders erstellt werden. Es würde ein Downscaling von Wettermodellen (Mesoskalenmodellen) durchgeführt, welche grossskalige Wetter-Informationen immer höher auflösen bis schliesslich mit einem mikroskaligen Modell die lokalen Bedingungen abgebildet werden.

³ <https://www.emd-international.com/software/windpro/modules/model>

⁴ <https://windsim.com/>

2.3 Beschreibung des Auftrages zur Bewertung der Studie von Ennova

Die vorliegende Bewertung behandelt zwei zentrale Fragestellungen:

1. Bewertung der Studie von Ennova aus dem Jahr 2016 unter Berücksichtigung des damaligen Wissensstandes.
2. Einschätzung, ob die damalige Vorgehensweise heutigen Standards entspricht und ob Anpassungen empfohlen werden.

2.4 Vorgehen von Meteotest für die Bewertung der Studie von Ennova

2.4.1 Datenlieferung von Ennova

Meteotest hat die Resultate in elektronischer Form bei Ennova angefordert. Ennova hat die Daten gefunden und geliefert, obwohl seit der Bearbeitung zehn Jahre vergangen sind und der Mitarbeiter, der den Auftrag ausführte, nicht mehr bei Ennova arbeitet. Ennova hat Meteotest alle Perimeter und Teilperimeter der Gebiete aus Abbildung 1 mit den Windressourcen in einem GIS-Format zu Verfügung gestellt. Zusätzlich hat Ennova ein Excel geliefert, welches ihre Berechnungen dokumentiert. Meteotest konnte damit die Bearbeitungsschritte von Ennova nachvollziehen. Meteotest hat aber selber keine Windmodellierungen oder Datenanalysen der Messungen gemacht. Das war im Auftrag nicht vorgesehen.

2.4.2 Vorgehen der Bewertung

In einem ersten Schritt werden die in der Ennova-Studie verwendeten Messdaten beschrieben und analysiert. Welche Daten wurden verwendet respektive verworfen? Entsprachen die verwendeten Daten den Best Practices im Jahr 2016? Ist das damalige Vorgehen aus damaliger Perspektive (2016) nachvollziehbar? Gilt dies immer noch aus heutiger Perspektive (2025): Gibt es neue Vorgehensweisen, Normen oder Daten, auf Grund derer die damalige Vorgehensweise als überholt betrachtet werden muss, d.h. Daten die damals verwendet/verworfen wurden, würden heute anders behandelt?

In einem zweiten Schritt wird die in der Ennova-Studie verwendete Modellierungsmethodik beschrieben und bewertet. Entsprach die WAsP-Methode den damals (2016) in der Branche geltenden Best Practices? Wie sieht dies aus heutiger Perspektive (2025) aus?

In einem dritten Schritt werden die Synthese-Resultate von Ennova nachberechnet und mit den entsprechenden Werten des Windatlas 2016 und 2019 verglichen und die eventuellen Differenzen interpretiert. Diese Vergleichsanalyse beschränkt sich auf diejenigen 21 Standorte, welche im Rahmen des

Planungsverfahren einer detaillierten Analyse unterzogen wurden. Potentielle Standorte, die damals auf Grund von Guillotine-Kriterien (Gesamtnote < 1,5 oder Standortpotential < 6 WA) eliminiert wurden, sind somit nicht Teil der Meteotest-Analyse. Diese 21 Standorte sind in Abbildung 1 aufgeführt.

N° SFE	Note finale (sur 3)	Nom site	Commune-site	Couverture au sol	Nombre d'éolienne estimé
15	2.22	Massif du Gibloux	Sâles, Riaz, Le Châtelard, Vuisternens-devant-Romont, Grangettes, Sorens, Villorsonnens, Pont-en-Ogoz, Vuisternens-en-Ogoz, Le Glèbe	Agricole/Forêt	27
1	2.09	Salvenach	Salvenach, Jeuss, Lurtigen, Ulmiz, Staaswald Galm, Murten	Agricole/Forêt	13
56	2.09	Côte Ouest de Romont	Romont, La Folliaz, Billens-Hennens	Agricole/Forêt	9
25	2.09	Monts de Vuisternens	Vuisternens-devant-Romont, Le Flon, Siviriez	Agricole/Forêt	8
36	2.08	Misery-Courtion	Misery-Courtion, Belfaux	Agricole/Forêt	9
21	2.07	Côte Sud de Romont	Siviriez, Ursy	Agricole/Forêt	10
9	2.00	Le Schwyberg	Plaffin, Plasselb	Pâturage	9
8	1.95	La Berra	La Roche, Cerniat	Pâturage	8
41	1.91	Surpierre	Surpierre, Prévondavaux	Agricole/Forêt	8
35	1.90	Passafou	Misery-Courtion, La Sonnaz, Courtepin, Belfaux, Barberêche	Agricole/Forêt	11
20	1.88	Autour de l'Esserta	La Verrerie, Vaulruz, Sâles, Vuisternens-devant-Romont	Agricole/Forêt	12
52	1.86	Boussevent	Hauterives, Farvagny	Agricole/Forêt	6
50	1.84	Les Chaudeires	Ponthaux, Noréaz, Montagny	Agricole/Forêt	6
5	1.80	Bösingen	Bösingen, Wünnewil-Flamatt	Agricole	9
18	1.72	Remaufens	Remaufens	Agricole	8
49	1.71	Piamont	Ponthaux, Noréaz, Autafond, Belfaux, Grolley	Agricole/Forêt	9
54	1.70	Villorsonnens	Villorsonnens, Le Glèbe	Agricole/Forêt	6
58	1.70	Plateau d'Autigny	Autigny, Cottens	Agricole	7
47	1.66	La Brillaz	La Brillaz, Cottens, Avry-sur-Matran, Prez-vers-Noréaz, Neyruz	Agricole/Forêt	8
43	1.62	Düdingen	Düdingen	Agricole	6
19	1.57	Semsaes	Semsaes, La Verrerie	Agricole	6

Figure 21 : Etape 4 - Listes des SFE pondérés et filtrés

Abbildung 1: Tabelle der "21 sites de faisabilité pondérés et filtrés" auf Seite 79 des Berichts 2.

3 Analyse

3.1 Bewertung Messdaten

3.1.1 Einleitung

Messdaten für die Skalierung einer Windmodellierung sollen die Windbedingungen einer Region repräsentieren. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, sollen die Messungen mit hochwertigen Messgeräten während mindestens eines ganzen Jahresverlaufs durchgeführt werden. So kann die Saisonalität des Windes erfasst werden. Die Messdaten werden langjährig abgeglichen um ein langjähriges Mittel zu generieren. Je mehr solch hochwertiger Messungen zu Verfügung stehen, desto belastbarer ist der resultierende Windatlas. Diese Anforderungen an Messungen sind damals wie heute unverändert.

Aus der Erfahrung der Windatlanten Schweiz 2016 und 2019 kann gesagt werden, dass ein Windatlas genauer wird, wenn ebenfalls Messung verwendet werden, welche nicht vollständig den Anforderungen genügen. So kann vermieden werden, dass Messungen im Strömungsmodell über zu weite Distanzen transferiert werden müssen.

3.1.2 Verworfenne Messdaten

Auf Seite 6 des Berichts 1, Abbildung 2, wird aufgeführt, welche Messdaten verworfen wurden. Als Grund für das Nichtverwenden wird eine tiefe Datenverfügbarkeit und fehlende Messung der Windrichtung genannt. Beim Kriterium tiefe Datenverfügbarkeit ist nicht angegeben, wieviel Prozent der Daten verfügbar sind und wie lange die Messperiode war. Für die Verwendung von Windmessungen in einem Strömungsmodell sind Messungen der Windrichtung notwendig.

Plusieurs jeux de données n'ont pas été utilisés dans cette étude car la mesure a été faite dans des conditions approximatives qui ne tenaient parfois pas compte du critère de la direction du vent. Ces mesures ne peuvent par ailleurs pas être utilisées dans l'extrapolation long-terme (voir Chapitre 3).

Tableau 1: Liste des points de mesures exclus de la phase de calcul

Localisation Mesure	Type	Projet	Raison
Gros Plané	Sodar	Les Paccots, Gros Plané	Disponibilité faible
Bioley	Pylone	Glâne du Nord	Pas de mesure de direction
Düdingen	Pylone	Bösingen	Pas de mesure de direction
Le Jordil	Pylone	Veveyse	Pas de mesure de direction
Mont Vuarat	Pylone	Mont Vuarat, Attalens	Pas de mesure de direction
Salvenach	Pylone	Lac Murten, Galmiz	Pas de mesure de direction
Vauderens	Pylone	Glâne Sud	Pas de mesure de direction

Abbildung 2: Auszug aus Seite 6 im Bericht 1.

3.1.3 Verwendete Messdaten

In der Tabelle 2 auf Seite 7 des Berichts 1 (Abbildung 3) sind die für die Modellierung verwendeten Messungen aufgeführt. Es weisen nicht alle Messungen Zeitreihen von mindestens einem ganzen Jahresverlauf auf. Die Erfahrung zeigt, dass eine Zeitreihe von mindestens sechs Monaten Messung vorliegen muss, damit ein verlässlicher langjähriger Abgleich durchgeführt werden kann, da erst dann eine Korrelation der Zeitreihe mit einer langjährigen Zeitreihe verlässlich durchgeführt werden kann.

Die Daten wurden auf Fehlwerte und Vereisung bereinigt. Es ist nicht klar, ob die Angaben der Verfügbarkeit in Tabelle 2 des Berichts 1 (vgl. Abbildung 3) für vor oder nach der Bereinigung gelten.

Tableau 2: Liste des points de mesures utilisés pour la modélisation

X	Y	Type de Mesure	Localisation Mesure	Date début	Date fin	Durée (Jour)	Disponibilité (%)	Hauteur (m)	Source
565736	168400	Mat	Châtelard	17.05.2013	05.04.2016	1054	97.8	90	Ennova SA
565670	167768	Lidar	Châtelard	16.12.2015	05.04.2016	111	80.7	202	Ennova SA
532553	165016	Mat	Dallens (VD)	05.04.2011	06.10.2014	1280	99.3	70	Ennova SA
578607	200155	Pylône	Galmiz	08.02.2012	16.10.2012	251	100	79	Groupe E Greenwatt
558269	163262	Sodar	Le Flon	30.04.2015	01.11.2015	185	81.1	150	Groupe E Greenwatt
559407	163922	Sodar	Les Ecasseys	29.11.2013	14.04.2014	136	74.4	150	Groupe E Greenwatt
558032	155864	Sodar	Remaufens	23.04.2015	29.09.2015	159	69.6	150	Groupe E Greenwatt
586985	172917	Sodar	Schwyberg	24.05.2012	27.11.2012	187	55.2	150	Groupe E Greenwatt
569548	170418	Mat	Gibloux	09.10.2015	11.02.2016	125	85.4	107	Groupe E Greenwatt
568114	169679	Sodar	Gibloux	23.11.2015	11.02.2016	80	52.7	200	Groupe E Greenwatt
566147	152962	Mat	Belle Chaux	20.05.2010	29.08.2011	466	82.8	50	Groupe E Greenwatt
580912	169091	Mat	La Berra / Cerniat	08.08.2011	02.09.2012	391	83.1	30	BKW
580333	170497	Mat	La Berra / Cousimbert	10.08.2011	02.09.2012	389	31.1	50	BKW

Abbildung 3: Auszug aus Seite 7 im Bericht 1.

Die Methode des langjährigen Abgleichs wurde mit dem Modul MCP von Wind-PRO und langjährigen Merra-Reanalysedaten durchgeführt. Die Daten von Gibloux (Mast und SoDAR) und LiDAR Châtelard wurden mit den langjährig abgeglichenen Daten des Mastes Châtelard und der MCP-Methode verlängert. Diese Methode ist zulässig.

Die Messungen Mast und SoDAR Gibloux (Groupe E Greenwatt) und die LiDAR-Messung Châtelard werden mit den Daten des Mastes Châtelard und der MCP-Methode verlängert. Dies ist zulässig.

Die SoDAR-Messung Les Ecasseys ist zu kurz. Da der Standort aber in der Nähe von Le Flon steht, können die langjährig abgeglichenen Daten als Input für die Modellierung benutzt werden. Dies ist für die Verbesserung der Qualität der Windressourcenmodellierung sinnvoll.

Hochwertige Messgeräte sind First Class Anemometer und Windfahnen und im einfachen Gelände SoDAR- und LiDAR-Messungen. Im komplexen Gelände sind standalone SoDAR oder LiDAR-Messungen fehlerhaft, da das Messprinzip eines

Remote Sensing Gerätes bei einer komplexen Strömung nicht einwandfrei funktioniert. Es ist aber zulässig mit einer SoDAR- oder LiDAR-Messung Mastmessungen z.B. auf Nabenhöhe zu extrapolieren. Dafür braucht es aber eine Mastmessung in unmittelbarer Nähe zum Remote Sensing Gerät. Bei den Mastmessungen ist nicht präzisiert welche Anemometer- und Windfahnentypen verwendet wurden. Deshalb kann keine weitere Beurteilung zur Qualität der Messungen abgegeben werden.

Wenn die Kriterien aus der internationalen Norm Measnet⁵ für die Erstellung eines bankfähigen Windgutachtens (Mastmessung, mindestens 2/3 Nabenhöhe und mindestens zwölf aufeinanderfolgende Monate Messung mit einer Datenverfügbarkeit von mindestens 90%) angewendet würde, hält die "Mastmessung Ennova Châtelard" diesen Anforderungen stand. Diese Norm wird aber bei der Erstellung von Windatlanten nicht verlangt. Dennoch kann man daraus schliessen, dass die Windressourcen um die Mastmessung Ennova Châtelard besonders verlässlich sind.

Um mit der Windmodellierung die Windressourcen im Perimeter möglichst korrekt abzubilden, braucht es (unabhängig vom verwendeten Modell) repräsentative Windmessungen. Diese sind aber nicht in allen Perimetern (Abbildung 4) vorhanden. Beispielsweise in Bösing, Düdingen, Piamont, Passafou, Misery-Courtion, Les Chaudeires, La Brillaz, Surpierre, Plateau d'Autigny, Boussevent, Côte Sud de Romont und Côte Ouest de Romont fehlen Messungen. Hier werden in der Modellierung die Windressourcen aus weiter weg gelegenen Messungen transferiert. Deren Windressourcen sind also nicht durch nahegelegene Messungen gestützt und entsprechend mit einer höheren Unsicherheit behaftet.

⁵ https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2022/09/Measnet_Evaluation-of-Site-Especific-Wind-Conditions_v3-1.pdf

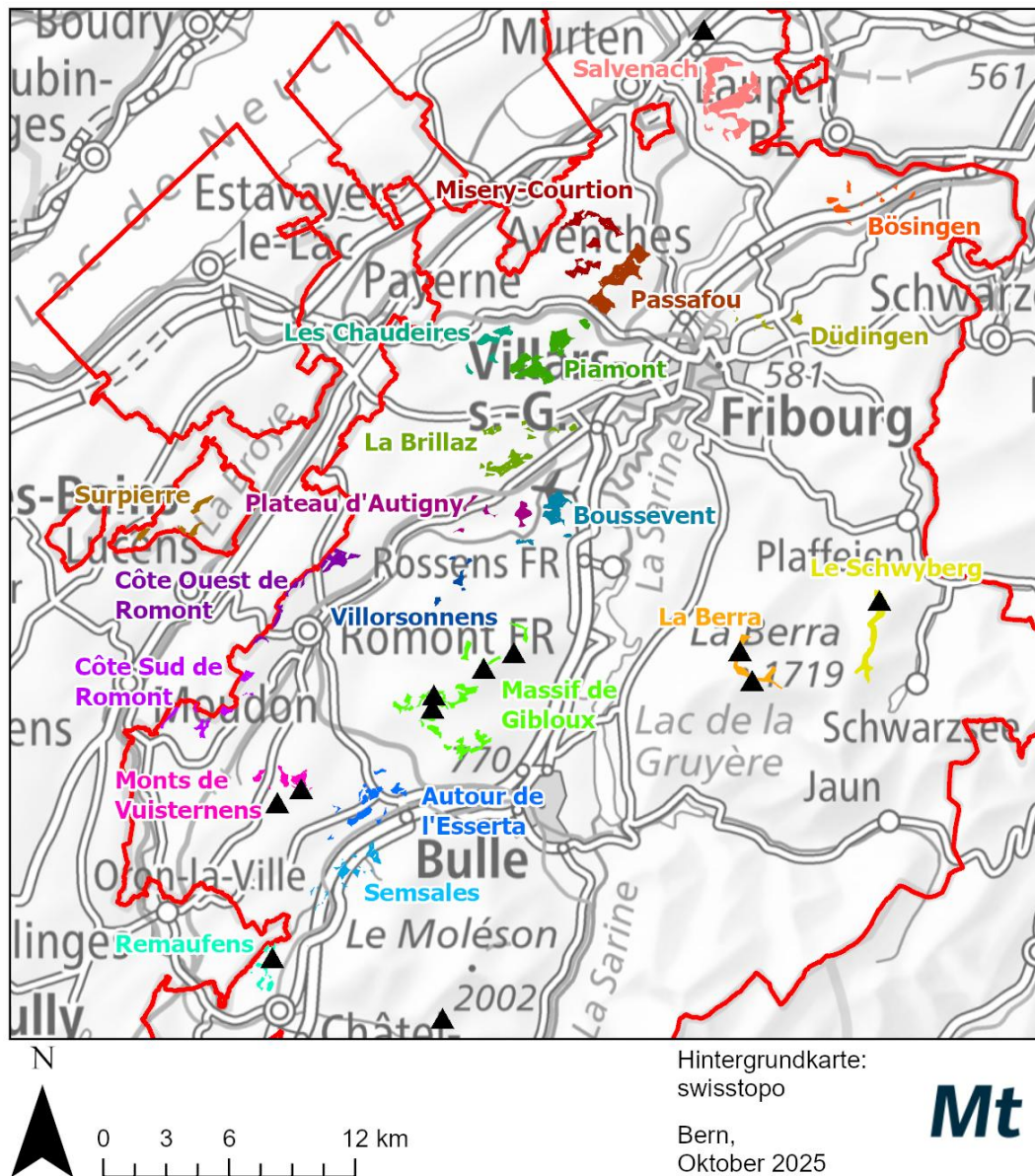


Abbildung 4: Messungen (schwarze Dreiecke) und Untersuchungsperimeter (in Farbe).

3.1.4 Beurteilung des Vorgehens von Ennova bezüglich Messdaten

Das Verwerfen der Daten aus Abbildung 2 und das Verwenden der Daten aus Abbildung 3 ist aus damaliger wie heutiger Sicht nachvollziehbar. Man musste sich damals mit den wenigen Messungen, welche zu Verfügung standen, behelfen um einen möglichst verlässlichen Windatlas zu erstellen. Meteotest sind aus dem Bereich Windenergie keine weiteren Messungen zum Zeitpunkt der Analyse von Ennova bekannt. Um die Windressourcen noch besser abstützen zu können, hätte Ennova ebenfalls Messungen des SwissMetNet der MeteoSchweiz verwenden können. Diese Messungen wurden zum Beispiel im Windatlas 2019 verwendet, nicht aber im Windatlas 2016 (siehe Erklärung in 3.1.1). Dies hätte eine

homogenere Verteilung der Messpunkte im Kantonsgebiet erwirkt. Andererseits erfolgen SwissMetNet-Messungen in der Regel nur auf 10 m über Grund und nicht unbedingt an repräsentativen Standorten für die Nutzung der Windenergie. Ihr Nutzen für die Verbesserung eines Windatlas ist deshalb eingeschränkt.

Um das Windpotenzial an den Richtplan-Standorten zu verifizieren, ist der Kanton Fribourg zurzeit dabei an den sieben Standorten des Richtplanes LiDAR- und 100 m-Mastmessungen durchzuführen und zu planen. An vier Standorten (Glâne, Surpierre, Gibloux und Schwyberg) sind die Messungen bereits in Betrieb. An den drei weiteren (La Sonnaz, Esserta und Vuisternens) sind die Messungen für nächstes Jahr in Planung. Diese Messungen werden gemäss den Normen (beispielsweise Measnet⁶) durchgeführt und sind von hoher Qualität. Eine Verwendung dieser Daten für die kantonale Windplanung bringt einen grossen Mehrwert. Diese Messungen dienen einerseits einer präzisen Beurteilung der Windressourcen an den entsprechenden Standorten und sie könnten auch in einen neuen Windatlas einfließen.

3.2 Bewertung Strömungsmodellierung

3.2.1 Was ist das Modell WAsP?

Die Modellierung wurde mit der Software windPRO⁷ durchgeführt, die das lineare Strömungsmodell WAsP⁸ enthält. WAsP wird weltweit verwendet und stellt einen langjährigen Industriestandard dar, der sowohl in Raumplanungsverfahren als auch in der Projektplanung zur Verwendung kommt. Seit 2013 existiert die Computational Fluid Dynamics (CFD) Variante WAsP-CFD, welche ebenfalls in windPRO verwendet werden kann. WAsP eignet sich für offene, wenig variierte Landschaften. Lineare Windmodelle haben ihre Grenzen in Bezug auf komplexes Gelände, da sie nicht-lineare Effekte ausschliessen. WAsP-CFD berücksichtigt diese nicht-linearen Effekte und ist daher besser für komplexes Gelände geeignet.

Anwendungszweck von WAsP:

- Analyse der gemessenen Winddaten (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Turbulenz)
- Erstellung eines Windatlasses für eine Region
- Einschätzung des Windpotenzials an einem gegebenen Standort

⁶ https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2022/09/Measnet_Evaluation-of-Site-Specific-Wind-Conditions_v3-1.pdf

⁷ <https://www.emd-international.com/software/windpro>

⁸ <https://wasp.dtu.dk/software/wasp>

- Vorhersage der Energieproduktion einer Windkraftanlage oder eines Windparks

Funktionsweise (vereinfacht):

- Man sammelt Winddaten an einer Referenzstation.
- WAsP übernimmt diese Daten, um Folgendes zu berücksichtigen: die Topografie (Hügel, Täler), die Geländerauigkeit (Wald, Meer, Felder) und die Hindernisse (Gebäude, Bäume).
- Das Modell überträgt die Windklimatologie der Station auf einen neuen Standort (wo es keine Messungen gibt).
- Man erhält Windkarten und Schätzungen des Windregimes.

Beispielsweise für die Erstellung des Global Wind Atlas⁹ wurde als Mikroskalenmodell WAsP verwendet. Der erste Global Wind Atlas wurde 2015 publiziert.

3.2.2 Vorgehen Ennova

Ennova hat die Software windPRO (Version 3.1) mit dem Modell WAsP 11 verwendet. Als Input-Daten von WAsP hat Ennova bezüglich Topografie das Geländemodell des Kantons Fribourg (10 m horizontale Auflösung) und Rauigkeit CO-RINE Land Cover (100 m Auflösung) verwendet. Sie haben die Windressourcen anhand der dreizehn Messungen aus Abbildung 3 skaliert. Die Modellierung weist eine Auflösung von 25m auf.

3.2.3 Bewertung des Vorgehens von Ennova

Die damalige Vorgehensweise von Ennova ist nachvollziehbar und entspricht den damaligen Best Practices. Das Gelände des Kantons Fribourg ist gemischt mit relativ flachen Regionen, Hügeln und Bergen (Voralpen). Um die Verlässlichkeit des Modelloutputs möglichst hoch zu halten, würde aus Sicht Meteotest in solchen gemischten Geländetypen ein Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell verwendet werden. So wird die Windströmung in allen Regionen möglichst korrekt abgebildet. Die Verwendung eines CFD-Modells ist aber nicht zwingend, da auf der Stufe eines Windatlasses noch keine sehr genauen Daten zu Verfügung stehen müssen.

Es gibt keine neuen Erkenntnisse und Best Practices, auf Grund derer die damalige Vorgehensweise aus heutiger Perspektive als überholt beurteilt werden müsste.

In Tabelle 1 ist ein Vergleich des WAsP-Modells mit einem CFD-Modell gezeigt.

⁹ <https://globalwindatlas.info/en/about/method>

Tabelle 1: Vergleich lineares WAsP-Modell mit CFD-Modell.

	WAsP	CFD
Modelltyp	Linear, empirisch	Numerisch, basierend auf Reynolds Averaged Navier-Stokes Gleichungen
Eingangsdaten	Winddaten, Topografie, Geländerauhigkeit	Winddaten, Topografie, Geländerauhigkeit, 3D-Gitter, Randbedingungen
Genauigkeit	Mittel (geeignet für einfaches Gelände)	Hoch (geeignet für alle Gelände)
Rechenzeit	Sehr schnell	Aufwändig
Typische Anwendung	Windressourcen im einfachen Gelände, Windatlas	Windressourcen im komplexen Gelände

Die Berechnung der Windressourcen mit einem CFD-Modell sind komplexer, da die Strömungsberechnungen auf die Topografie eingehen. Daher resultieren aus CFD-Modellierungen genauere Berechnungen als aus WAsP-Modellierungen wenn es substantielle Topografieunterschiede im Modellgebiet gibt. Bei flacher Topografie sind die Resultate eines CFD-Modells vergleichbar mit denjenigen des WAsP-Modells.

In der Abbildung 5 sind Beispiele der Measnet-Norm von einfachem und komplexen Gelände gezeigt. Das Gelände im Kanton Fribourg liegt oft zwischen diesen beiden Ausprägungen mit Ausnahmen von Schwyberg und La Berra, welche eindeutig komplexem Gelände zugesprochen werden müssen.

Um eine quantitative Aussage zu machen um wieviel ein CFD-Modell genauere Resultate liefert, verglichen mit dem WAsP-Modell, müssten die Windressourcen mit hochwertigen Messungen, welche nicht im WAsP-Modell von Ennova und nicht im Windatlas des BFE verwendet wurden, validiert werden. Solche Messungen werden zurzeit in Glâne, Surpierre, Gubloux und Schwyberg erhoben und könnten nach Abschluss der Messungen für eine Validierung herangezogen werden.

Qualitativ betrachtet können die Windbedingungen in den Voralpen von WAsP modellbedingt nicht korrekt abgebildet werden. Hier ist ein substantieller Unterschied in der Genauigkeit der Resultate eines CFD- verglichen mit einem WAsP-Modell zu erwarten. Wenn die Abdeckung mit Messungen in diesen Regionen aber sehr dicht ist, kann die mangelhafte Berechnung der Strömungen aufgefangen werden. In La Berra lagen zwei Messungen und auf dem Schwyberg eine Messung vor. Das reduziert die modellbedingten Unsicherheiten.



Figure 2: Example of a *simple terrain* site as defined by this guideline. Such a site has only minor relief which leads to a negligible influence of orographic effects on wind conditions. The latter are therefore mainly influenced by roughness conditions.



Figure 3: Example of a *complex terrain* site as defined by this guideline. Such a site is characterised by orographic features with terrain slopes, which have a significant influence on wind conditions.

Abbildung 5: Beispiele von einfachem Gelände (oben) und komplexem Gelände (unten) der internationalen Norm Measnet¹⁰.

3.2.4 Einschätzung der von Ennova angegebenen Unsicherheiten

Ennova hat die Unsicherheiten nur für die sechs Standorte mit den besten Windressourcen und nur bezüglich Energieertrag im Bericht 1 angegeben. Bezüglich Windgeschwindigkeiten ist die Unsicherheit tiefer.

Die berechneten Unsicherheiten bezüglich Energieertrag liegen bei 18.76% (Mittellandstandorte) und 21.84% (Voralpenstandorte). Berücksichtigt werden die Datenverfügbarkeit, Länge der Zeitreihen, Messhöhe über Grund und Vorhandensein oder Fehlen einer Messung. Im komplexen Gelände darf gemäss Normen nicht weiter als 2 km horizontal extrapoliert werden. Für eine Abschätzung des

¹⁰ https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2022/09/Measnet_Evaluation-of-Site-Specific-Wind-Conditions_v3-1.pdf (Seite 12/13)

Windpotenzials kann dies aber oft nicht eingehalten werden, da schlicht zu wenig Messungen zu Verfügung stehen.

Die Unsicherheit des linearen Strömungsmodells WAsP fehlt in der Unsicherheitsberechnung. Diese wird natürlich noch substantieller, wenn über weite Distanzen transferiert werden muss. Da Meteotest die Daten nicht vorliegen, kann keine eigene Berechnung der Unsicherheiten gemacht werden. Aus den zu Verfügung stehenden Informationen würde Meteotest die Unsicherheiten folgendermassen einschätzen:

- La Berra Cousimbert: 21.84% ist plausibel (zu tiefe Messhöhe und teilweise viel zu tiefe Datenverfügbarkeit, aber mindestens 12 Monate Messung an zwei Masten)
- Le Schwyberg: 21.84% ist plausibel (nur SoDAR und kein Mast, mindestens sechs Monate Messung auf verlangter Nabenhöhe)
- Monts de Vuisternens: 18.76% ist zu tief, da nur SoDAR und kein Mast, zu tiefe Datenverfügbarkeit und zu kurze Messung
- Massif du Gibloux: 18.76% ist knapp bemessen (zu kurze Zeitreihen)
- Côtes de Romont: 18.76% ist deutlich zu tief, da keine Messung in dieser Region in die Modellierung einfluss
- Collines de La Sonnaz: 18.76% ist deutlich zu tief, da keine Messung in dieser Region in die Modellierung einfluss

3.3 Verifizierung der Resultate mit den Windressourcen von Ennova und Vergleich mit den Werten des Windatlas Schweiz Ausgabe 2016 und Ausgabe 2019

3.3.1 Verifizierung der Resultate von Ennova

Um die Synthese der Resultate (mittlere Windgeschwindigkeit pro Untersuchungsgebiet) von Ennova rechnerisch verifizieren zu können, hat Meteotest die Windressourcen, die Perimeter und das Excel mit den Berechnungen bei Ennova eingeholt.

In Tabelle 2 sind die Berechnungen der mittleren Windgeschwindigkeiten der 21 Untersuchungsgebiete aus Abbildung 1 von Ennova und die Berechnungen von Meteotest auf Basis der Windressourcen von Ennova einander gegenübergestellt. Zudem sind die Abweichungen der beiden Berechnungen dargestellt.

Die Windressourcen konnten reproduziert werden. Es wurde eine minimale Abweichung von 0.00 m/s und eine maximale von 0.07 m/s registriert. Als Mittelwert der Abweichung wurden 0.02 m/s berechnet.

Tabelle 2: Vergleich der Berechnung von Ennova aus Bericht 1 mit der Nachberechnung durch Meteotest für die Ressourcenfiles von Ennova.

Untersuchungsgebiet	Berechnung von Ennova (Bericht 1)	Nachberechnung von Meteotest mit Ressourcenfiles Ennova	Abweichungen
	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]
Salvenach	3.9	3.9	0.01
Bösingen	4.1	4.2	0.02
La Berra	6.5	6.6	0.06
Le Schwyberg	6.3	6.3	-0.03
Le Massif de Gibloux	5.5	5.5	0.02
Remaufens	4.5	4.5	-0.01
Semsaes	4.9	4.9	0.04
Autour de l'Esserta	4.9	4.8	-0.06
Côte Sud de Romont	5.1	5.1	0.02
Monts de Vuisternens	5.3	5.3	0.00
Misery-Courtion	4.7	4.6	-0.07
Passafou	4.7	4.7	0.01
Surpierre	4.9	4.9	0.00
Düdingen	4.5	4.5	-0.02
La Brillaz	4.9	4.9	0.00
Piamont	4.9	5.0	0.02
Les Chaudeires	4.9	4.9	0.01
Boussevent	4.8	4.8	-0.05
Villorsonnens	5.0	5.0	0.02
Côte Ouest de Romont	4.9	5.0	0.03
Plateau d'Autigny	4.9	4.9	-0.01

Die Abweichungen der Windgeschwindigkeit der Nachberechnung von Meteotest verglichen mit den Resultaten von Ennova sind also marginal. Ennova hat zuerst die Mittelwerte der Teilgebiete berechnet und anschliessend aus diesen Mittelwerten den Mittelwert für den gesamten Perimeter unabhängig der Grösse der Teilgebiete berechnet. Zusätzlich wurde bei der Mittelwertberechnung, wenn mehrere Teilperimeter pro Perimeter vorhanden waren, diese teilweise nicht gleichwertig gewichtet. Dies geschah wahrscheinlich, wenn Teilgebiete später zu einem Perimeter hinzugefügt wurden. Zusätzlich können kleine Unterschiede auftreten, je nachdem welche Rasterzellen bei der Bildung des Mittelwerts genau berücksichtigt werden.

Für die Nachberechnung hat Meteotest die Mittelwerte der Teilgebiete mit der Anzahl Zellen der einzelnen Teilgebiete gewichtet. Da die Abweichungen von Ennova und Meteotest so klein sind, hat der Fehler von Ennova in der Mittelwertberechnung keine Konsequenzen.

Ennova berechnet folgende sechs Standorte mit den höchsten Windgeschwindigkeiten: La Berra (6.5 m/s), Le Schwyberg (6.3 m/s), Le Massif de Gibloux (5.5 m/s), Monts de Vuisternens (5.3 m/s), Côte Sud de Romont (5.1 m/s) und Villorsonnens (5.0 m/s).

Bei Meteotest resultieren die gleichen sechs Standorte: La Berra (6.6 m/s), Le Schwyberg (6.3 m/s), Le Massif de Gibloux (5.5 m/s), Monts de Vuisternens (5.3 m/s), Côte Sud de Romont (5.1 m/s) und Villorsonnens (5.0 m/s).

3.3.2 Vergleich Resultate von Ennova mit den Windatlanten 2016 und 2019

Windatlas Schweiz

Die Windatlanten Schweiz 2016 und 2019 wurden von Meteotest im Auftrag des Bundesamtes für Energie erstellt. Sie wurden mit dem CFD-Modell WindSim¹¹ modelliert. In der Publikation von 2016 wurden für die Skalierung nur Messungen von Windenergieprojekten und andere höhere Mastmessungen verwendet. Es lagen dafür 97 Klimatologien vor. Die horizontale Extrapolation der Klimatologien musste deshalb teilweise über sehr weite Distanzen erfolgen, was eine grosse Unsicherheit der Resultate zur Folge hat. Deshalb wurde entschieden, dass bei dem Update des Windatlas 2019 zwar die ursprünglichen CFD-Windfelder beibehalten werden, aber mit viel mehr Klimatologien skaliert werden soll. Bei der Publikation von 2019 wurden zusätzlich sämtliche SwissMetNet¹² Stationen der MeteoSchweiz und IMIS-Stationen¹³ des Schnee- und Lawinenforschungsinstitutes verwendet - also Messungen, welche oft auf 5 m oder 10 m erhoben werden. Für den Windatlas 2019 wurden 396 Klimatologien verwendet. Diese höhere Dichte der Windmessungen erlaubt eine präzisere Skalierung der Windressourcen.

Vergleich der Windressourcen von Ennova und den Windatlanten

In Tabelle 3 sind neben der Nachberechnung von Meteotest mit den Windressourcen von Ennova Mittelwertberechnungen der beiden Windatlanten von 2016 und 2019 des Bundesamtes für Energie gezeigt.

Für die beiden Untersuchungsgebiete Le Schwyberg und La Berra wurden von Ennova die Windressourcen auf 100 m ü. Grund ausgewertet; für die restlichen Untersuchungsgebiete auf 130 m. ü. Grund. Für die beiden Windatlanten wurden

¹¹ <https://windsim.com/>

¹² <https://www.meteoswiss.admin.ch/services-and-publications/applications/measurement-values-and-measuring-networks.html#param=messwerte-windgeschwindigkeit-kmh-10min&table=false>

¹³ <https://whiterisk.ch/de/conditions/measurements/new-snow>

die Windgeschwindigkeiten auf 100 m (nur für die Voralpengebiete Le Schwyberg und La Berra) und 125 m über Grund verwendet.

Tabelle 3: Mittlere Windgeschwindigkeit der 21 Untersuchungsgebiete der Windressourcen von Ennova und den Windatlanten 2016 und 2019.

Untersuchungsgebiet	Nachberechnung mit Ressourcenfiles von Ennova	Windatlas 2016	Windatlas 2019
	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]	Windgeschwindigkeit Mittelwert [m/s]
Salvenach	3.9	5.8	5.2
Bösingen	4.2	5.6	5.1
La Berra	6.6	6.1	5.7
Le Schwyberg	6.3	5.8	5.5
Le Massif de Gibloux	5.5	5.9	5.4
Remaufens	4.5	6.1	5.4
Semsaes	4.9	5.5	4.7
Autour de l'Esserta	4.8	5.9	5.2
Côte Sud de Romont	5.1	6.5	5.7
Monts de Vuisternens	5.3	6.4	5.7
Misery-Courtion	4.6	5.8	5.1
Passafou	4.7	5.9	5.2
Surpierre	4.9	6.0	5.3
Düdingen	4.5	5.7	5.1
La Brillaz	4.9	5.9	5.2
Piamont	5.0	6.0	5.3
Les Chaudeires	4.9	5.9	5.2
Boussevent	4.8	5.6	5.0
Villorsonnens	5.0	6.0	5.3
Côte Ouest de Romont	5.0	6.3	5.5
Plateau d'Autigny	4.9	5.8	5.2

In Tabelle 4 sind die Abweichungen der Windatlanten von den Windressourcen von Ennova gezeigt. Der Vergleich der Windgeschwindigkeiten zwischen der WASP-Berechnung von Ennova und den CFD-Modellierungen der Windatlanten zeigt, dass der Windatlas 2016 teilweise deutlich (> 1 m/s) höhere Windgeschwindigkeiten für Untersuchungsgebiete zeigen, ausser für die Untersuchungsgebiete Le Massif de Gibloux, Le Schwyberg, La Berra und Semsales. Für Le Massif de Gibloux und Le Schwyberg hat Ennova höhere Windressourcen

berechnet als im Windatlas 2016. Im Mittelwert sind die Abweichungen 1.1 m/s für den Windatlas 2016.

Die Windgeschwindigkeiten des Windatlas 2019 korrespondieren besser mit den Resultaten von Ennova. Ausser Bösing, La Berra, Remaufens und Le Schwyberg zeigen alle anderen Perimeter kleinere Abweichungen als 0.7 m/s.

Die grösste Abweichung zwischen den Nachberechnungen mit den Daten von Ennova und dem Windatlas 2016 zeigt sich am Standort Salvenach mit 1.9 m/s (respektive 1.3 m/s mit dem Windatlas 2019). Solche Differenzen sind auf die Verwendung anderer Modelltypen (WASP versus CFD) und einer unterschiedlichen Datenbasis zurückzuführen. Da die Verwendung der privaten Messdaten für die Skalierung der Windatlanten 2016 und 2019 einem NDA unterliegen, können keine Aussagen gemacht werden, welche Daten in der Region Salvenach benutzt wurden. Von den öffentlichen Messungen wurden als nächstgelegene Station zu Salvenach die Daten der SwissMetNet-Station Mühleberg/Stockeren für die Skalierung der Windatlanten 2016 und 2019 verwendet.

Tabelle 4: Abweichungen der Resultate von Ennova von den Windatlanten

Abweichungen Ennova - Windatlas	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]	Mittelwert [m/s]
Windatlas 2016	0.4	1.9	1.1
Windatlas 2019	0.1	1.3	0.5

Die Unterschiede der drei Ressourcenkarten rühren daher, dass unterschiedliche Strömungsmodelle und/oder unterschiedliche Messungen für die Skalierung der Windressourcen verwendet wurden. Man kann keine besonderen Erkenntnisse aus den Vergleichen ziehen, dafür ist die Datengrundlage zu schwach. Man sieht zum Beispiel geringe Abweichungen an den bergigen Standorten Le Schwyberg und La Berra mit dem Windatlas 2016, aber grosse mit dem Windatlas 2019. Zudem sind die Windgeschwindigkeiten beider Windatlanten in den beiden bergigen Gebieten höher als in den anderen Gebieten.

Um wirklich eine Aussage zur Qualität der Ergebnisse machen zu können, braucht es qualitativ hochwertige Messungen mit welchen die Ergebnisse validiert werden könnten. Diese liegen im Moment aber noch nicht vor. Gemäss der verfügbaren Datenbasis in den 21 Perimetern sind die Windatlas-Werte im Mittel höher als diejenigen von Ennova. Somit ist die Ennova-Methodik konservativer als wenn die Windatlas Daten verwendet worden wären.

Ein direkter Vergleich der Werte des Windatlas mit den Werten der Berechnung von Ennova ist nur bedingt sinnvoll, da beide Datensätze keine Referenz darstellen und damit nicht fundiert beurteilt werden kann, welche Karte genauer ist. Wie

im Bericht 1 erwähnt, hat der Windatlas eine Auflösung von 100 m und die Windkarte von Ennova eine von 25 m. Trotz der höheren Auflösung der Karten von Ennova, heisst das nicht, dass diese Windkarte genauer ist. Meteotest geht davon aus, dass der Windatlas 2019 wahrscheinlich genauer ist als die Karten von Ennova, da mehr Messungen für die Skalierung einbezogen wurden und ein geeigneteres Modell auch für eine Simulation im komplexen Gelände verwendet wurde.

Wahl der sechs Gebiete mit den besten Windressourcen

Gemäss den Berechnungen von Meteotest auf Basis der Windressourcen von Ennova resultieren folgende sechs Standorte mit den besten Windressourcen: La Berra (6.6 m/s), Le Schwyberg (6.3 m/s), Le Massif de Gibloux (5.5 m/s), Monts de Vuisternens (5.3 m/s), Côte Sud de Romont (5.1 m/s) und Villorsonnens (5.0 m/s).

Im Bericht 1 werden ebenfalls diese Standorte genannt als Perimeter mit den höchsten Windressourcen. Ennova hat allerdings die Perimeter Côte Sud de Romont und Côte Ouest de Romont in Côtes de Romont zusammengefasst. Und anstelle von Villorsonnens (5.0 m/s) wird Monts de Vuisternens (5.3 m/s) im Bericht 1 gewählt. Beide Standorte haben mittlere Windgeschwindigkeiten von mindestens 5 m/s.

Gemäss den Berechnungen auf Basis des Windatlas 2016 sind folgende Standorte unter den besten sechs: Côte Sud de Romont (6.5 m/s), Mont de Vuisternens (6.4 m/s), Côte Ouest de Romont (6.3 m/s), La Berra (6.1 m/s), Remaufens, Surpierre/Piamont/Villorsonnens (diese drei Standorte haben alle eine mittlere Windgeschwindigkeit von 6.0 m/s). Alle diese Standorte haben im Windatlas 2016 Windgeschwindigkeiten von mindestens 6 m/s.

Im Windatlas 2019 sind die sechs Gebiete mit den höchsten Windgeschwindigkeiten folgende: La Berra (5.7 m/s), Côte Sud de Romont (5.7 m/s), Monts de Vuisternens (5.7 m/s), Côte Ouest de Romont (5.5 m/s), Le Schwyberg (5.5 m/s) und Le Massif de Gibloux/Remaufens (beide Standorte haben mittlere Windgeschwindigkeiten von 5.4 m/s).

In allen drei Windkarten kursieren unter den besten Standorten die Perimeter: Côte Sud und Côte Ouest de Romont, La Berra und Mont de Vuisternens. Le Schwyberg und Massif de Gibloux sind im Windatlas 2016 nicht unter den besten sechs Standorten, haben aber mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5.8 m/s (Le Schwyberg) und 5.9 m/s (Massif de Gibloux) sehr gute Windbedingungen. In den beiden anderen Windkarten erscheinen die Standorte unter den besten sechs Standorten.

Die im vorgehenden Absatz genannten Perimeter sind also von allen drei Windkarten als beste Standorte für die Windenergienutzung ausgezeichnet. Die damalige Auswahl von Ennova kann darum aufgrund der zusätzlichen Datenbasis (Windatlanten 2016 und 2019) gestützt werden.

4 Schlussfolgerung

Das Vorgehen und die Analyse von Ennova im Bericht 1 kann reproduziert und nachvollzogen werden. Die Resultate liegen trotz Mittelungsfehler in einem sehr ähnlichen Rahmen wie diejenigen der Nachberechnungen von Meteotest und es resultieren dieselben sechs Gebiete mit den besten Windressourcen. Das Vorgehen von Ennova ist schlüssig und ist gut auf die damals verfügbaren Messungen abgestimmt. Die Wahl des Strömungsmodells (WAsP) entspricht dem damaligen Standard für Windatlanten. Für die komplexeren Perimeter in den Voralpen ist es hingegen nicht ideal, da es die vorherrschenden Strömungen nicht physikalisch korrekt erfassen kann. Ein Vergleich mit dem Windatlas 2019, welcher mit einem CFD-Modell erstellt wurde, zeigt aber, dass die Unterschiede der mittleren Windgeschwindigkeit im Mittel bei 0.5 m/s liegen und die maximalen Abweichungen bei 0.9 m/s. Diese Abweichungen liegen deutlich im Unsicherheitsbereich des Windatlas 2019. In der Publikation des BFE zum Windatlas steht bezüglich Unsicherheit¹⁴: «Die Grössenordnung der Unsicherheiten liegen im Jurabogen bei bis zu +/- 0.5 m/s, im Mittelland bei bis zu +/- 0.8 m/s, in den Voralpen bei bis zu +/- 1.0 m/s und in den Alpen bei bis zu +/- 1.5 m/s. Für die Karten ab 100 m Höhe über Grund stehen markant weniger Messungen für die Modellierung zu Verfügung. Dies resultiert in einer höheren Unsicherheit der Ergebnisse.». Die Unterschiede der Werte von Ennova und des Windatlas 2019 sind in Ordnung, insbesondere, da es sich beim Windatlas 2019 nicht um eine Referenz handelt, sondern eben auch "nur" um einen Windatlas mit relativ hoher Unsicherheit. Da das BFE den Windatlas 2019 als Standard für die Beurteilung des Windpotenzials für die Erstellung eines Richtplanes nennt, wurde dieser Vergleich gemacht.

Die Unterschiede der Windressourcen von Ennova verglichen mit den beiden Windatlanten stammen einerseits von unterschiedlichen Modelleigenschaften, aber auch von den verwendeten Messungen für die Skalierung.

Die Arbeit von Ennova entspricht einem korrekten Vorgehen und Ausführung von Windatlanten zur damaligen Zeit. Es wurden keine gravierenden Mängel oder Fehler entdeckt, welche weitreichende Konsequenzen hätten und die Wahl der Perimeter mit den besten Windressourcen infrage gestellt oder geändert hätten. Es wurden die richtigen Schlüsse gezogen.

Heutzutage würde die Erstellung eines Windatlas vermutlich anders umgesetzt. Es würde wahrscheinlich ein statistisches oder physikalisches Downscaling von Wettermodelldaten verwendet, welches in mehreren Auflösungsschritten die Windbedingungen immer höher auflöst. Entweder würde das statistische Downscaling bis zur letzten Auflösungsstufe durchgeführt oder ein Wettermodell an ein Mikroskalenmodell gekoppelt. Diese Downscalingmethoden erlauben es, nicht nur statische Windfelder, sondern Zeitreihen zu berechnen. Damit wäre es möglich nicht nur mittlere Windgeschwindigkeiten pro Standort zu exportieren,

¹⁴ https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EE_Windatlas/

sondern Zeitreihen der Windgeschwindigkeit. So würde die Berechnung des daraus resultierenden Windenergieertrags viel genauer.