Windenergie Kanton Zürich

Planerische Grundlagen zur Richtplananpassung – Grundlagenbericht

Kunde
Baudirektion Kanton Zürich
AWEL, Abteilung Energie
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich

—

Datum
21. Dezember 2022

Basler & Hofmann

Impressum

Datum
21. Dezember 2022

Bericht-Nr.
07167.123

Verfasst von
ALMI

Basler & Hofmann AG
Ingenieure, Planer und Berater

Forchstrasse 395
Postfach
CH-8032 Zürich
T +41 44 387 11 22

Verteiler

AWEL und ARE Kanton Zürich
Beteiligte Organisationen

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einleitung**	**1**
1.1	Vorgeschichte	1
1.2	Windpotenzialgebiete von der Windpotenzialstudie bis zum kantonalen Richtplan	2
1.3	Ziel des Winddialogs	4
2.	**Windressourcen**	**4**
2.1	Windressourcenmodellierung	4
2.2	Vergleich Wind in der Schweiz und im Kanton Zürich	9
2.3	Reicht der Wind im Kanton Zürich für eine energetische Nutzung?	13
3.	**Räumliche Negativplanung**	**14**
3.1	Auf welchen Grundlagen basiert die Negativplanung?	14
3.2	Welche Kriterien werden berücksichtigt?	15
4.	**Energieertragsabschätzung**	**19**
4.1	Methodik	19
4.2	Wie viel Strom aus Wind könnte im Kanton Zürich erzeugt werden?	23
5.	**Standortsteckbriefe**	**29**
6.	**Bewertung von Umweltthemen**	**75**
7.	**Literaturverzeichnis**	**76**
Anhang		**77**

1. Einleitung

1.1 Vorgeschichte

Windpotenzialstudie 2013

Die Abteilung Energie hat im Jahr 2013 eine Studie in Auftrag gegeben, um das Windpotenzial und seine räumliche Verteilung im Kanton Zürich zu untersuchen. Dazu hatte die New Energy Scout GmbH die Windgeschwindigkeiten auf 100 Meter über Grund modelliert und daraus das theoretische Windenergiepotenzial ermittelt. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde damals ein einfacheres und mit grösserer Unsicherheit behaftetes Windmodell mit 2D Simulation anstatt einer 3D Simulation zugrunde gelegt.

Veränderte Rahmenbedingungen

Seither haben sich die Technologien und die gesetzlichen Rahmenbedingungen geändert:

- Am 21. Mai 2017 nimmt das Schweizer Stimmvolk das erste Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 mit 58.2% Ja-Stimmen an.
- Das 2017 überarbeitete nationale Energiegesetz (EnG) sowie die entsprechende Energieverordnung (EnV) legen für Windenergieanlagen (WEA) ein nationales Interesse fest, wenn die Anlagen innerhalb des gleichen, im kantonalen Richtplan festgelegten Windenergiegebiets liegen und deren jährliche Produktion mind. 20 GWh beträgt.
- Durch die Revision des Waldgesetzes vom 1. Januar 2017 werden die Behörden aufgefordert, bei einer Bewilligung von Energieerzeugungs- und Energietransportanlagen im Wald eine umfassende Interessenabwägung durchzuführen. Dabei soll das nationale Interesse an der Realisierung dieser Vorhaben als gleichrangig betrachtet werden mit anderen nationalen Interessen, ohne dabei den Schutzstatus des Waldes grundsätzlich in Frage zu stellen.
- Das überarbeitete Konzept Windenergie Schweiz (Stand 25.09.2020) legt fest, wie die Bundesinteressen bei der Planung von WEA zu berücksichtigen sind und zeigt mögliche Räume mit Potenzial zur Nutzung von Windenergie auf. Planungs- und Projektträger verfügen damit über eine Entscheid- und Planungshilfe.
- Ein Rechtsgutachten des Bundesamts für Energie vom April 2019 kommt zum Schluss, dass Kantone und Gemeinden im Lichte des revidierten Energiegesetzes (Energiestrategie 2050) in der Pflicht stehen, Windenergieprojekte im Rahmen der Raumplanung und Baugesetzgebung zu unterstützen und zu fördern.
- Als Reaktion auf die veränderten Rahmenbedingungen hat das Bundesamt für Energie im Sommer 2022 eine Neuberechnung des Windenergiepotenzials in der Schweiz erarbeiten lassen (Bundesamt für Energie BFE, 2022). In diesem Bericht legt der Bund fest, welchen Beitrag die Kantone an den Ausbau der Windenergieproduktion im Rahmen der Energiestrategie 2050 leisten sollen. Für den Kanton Zürich liegt dieser Orientierungsrahmen bei 883 GWh/Jahr.

Auch strebt der Kanton Zürich eine Überarbeitung des Kapitels Energie des kantonalen Richtplans an. Aus den vorweg erwähnten Gründen, möchte der Kanton eine neue Grundlage für WEA schaffen. Die Ergebnisse fliessen in die kantonale und/oder regionale Richtplanung ein.

Basler & Hofmann hat die Grundlagen für die Windpotenzialstudie Kanton Zürich im Auftrag der Abteilung Energie überarbeitet:

_ Durchführung einer räumlichen Windressourcenberechnung auf 100 m über Boden (mit 3D Simulation), welche die Gebiete im Kanton Zürich darlegt, in denen WEA wirtschaftlich sinnvoll betrieben werden können (vgl. Kapitel 2.1)
_ Durchführung einer räumlichen Negativplanung (vgl. Kapitel 3.). Diese zeigt auf, wo WEA aufgrund rechtlicher Vorgaben nicht gebaut werden können und wo eine richtplankonforme Interessensabwägung vorzunehmen ist.
_ Vorauswahl der Windpotenzialgebiete anhand der Windgeschwindigkeit, Geländekomplexität sowie einer ersten groben Interessenabwägung mit nationalen Interessen.
_ Abschätzung des Windenergiepotenzials für den Kanton Zürich (vgl. Kapitel 4.)

1.2 Windpotenzialgebiete von der Windpotenzialstudie bis zum kantonalen Richtplan

Ein Windpotenzialgebiet ist ein potenzieller Standort für einen Windpark mit einer Mindestwindgeschwindigkeit und folgender Definition gemäss Konzept Windenergie Schweiz: *Ensemble von örtlich, funktional beziehungsweise konzeptionell zusammenhängenden Windturbinen* (Bundesamt für Raumentwicklung ARE (1), 2020).

Die im Folgenden beschriebenen Windpotenzialgebiete repräsentieren die nach dem jeweiligen Beurteilungsschritt gemäss Abb. 1 verbleibenden Gebiete.

Windpotenzialgebiete nach Windgeschwindigkeit

Aus all den Gebieten, welche bei der Windpotenzialstudie keinem Ausschlusskriterium entgegenstehen, wurden diejenigen ausgewählt, welche die Anforderungen bzgl. wirtschaftlicher Untergrenze der Windgeschwindigkeit erfüllen:
_ Ein Windpotenzialgebiet in einfachem Gelände sollte auf 100 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von mind. 4.5 m/s aufweisen und um eine potentielle Überschätzung auszugleichen zusätzlich Teilbereiche von mind. 4.75 m/s beinhalten.
_ Ein Windpotenzialgebiet in komplexem Gelände sollte auf 100 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von mind. 5 m/s aufweisen.

Nach diesem Schritt konnten insgesamt 63 Windpotenzialgebiete identifiziert werden.

Windpotenzialgebiete nach Machbarkeit

Aus den 63 "Windpotenzialgebieten nach Windgeschwindigkeit" wurden diejenigen Windpotenzialgebiete eliminiert, bei welchen die technische Machbarkeit aufgrund der Topografie (zu steile Hanglage, zu wenig Platz für die WEA-Montage etc.) nur mit unverhältnismässigem Aufwand gegeben wäre.

Des Weiteren sind die Windpotenzialgebiete einer ersten groben Interessenabwägung mit nationalen Interessen unterzogen worden. Windpotenzialgebiete, welche das nationale Interesse bzgl. Windenergie von >20 GWh nicht erreichen und gleichzeitig anderen nationalen Schutzinteressen gegenüberstehen, wurden ebenfalls verworfen.

Wo sinnvoll wurden die verbleibenden Windpotenzialgebiete arrondiert und zu homogenen Gebieten zusammengefasst. Nach diesem Schritt resultieren 46 Windpotenzialgebiete.

Windpotenzialgebiete Richtplan

Die 46 "Windpotenzialgebiete nach Machbarkeit" werden im Nachgang zu dieser Studie mit Projektentwicklern, Suisse Eole, den Natur- und Landschaftsschutzverbänden sowie den Regionen und Gemeinden an Gesprächen und Workshops diskutiert. Ziel ist es, die Wichtigkeit der Windenergie im Kanton Zürich im Zusammenhang mit der Stromversorgungssicherheit und den Klimazielen zu erläutern und einen möglichst breiten Konsens über Eignungsgebiete in der Richtplanung zu erhalten. Daraus werden für jedes " Windpotenzialgebiet nach Machbarkeit" die verschiedenen Schutzinteressen mit dem Interesse der Windenergienutzung detailliert abgewogen. Fällt die Interessenabwägung zugunsten der Windenergienutzung aus, wird es zur Aufnahme in den kantonalen Richtplan vorgeschlagen.

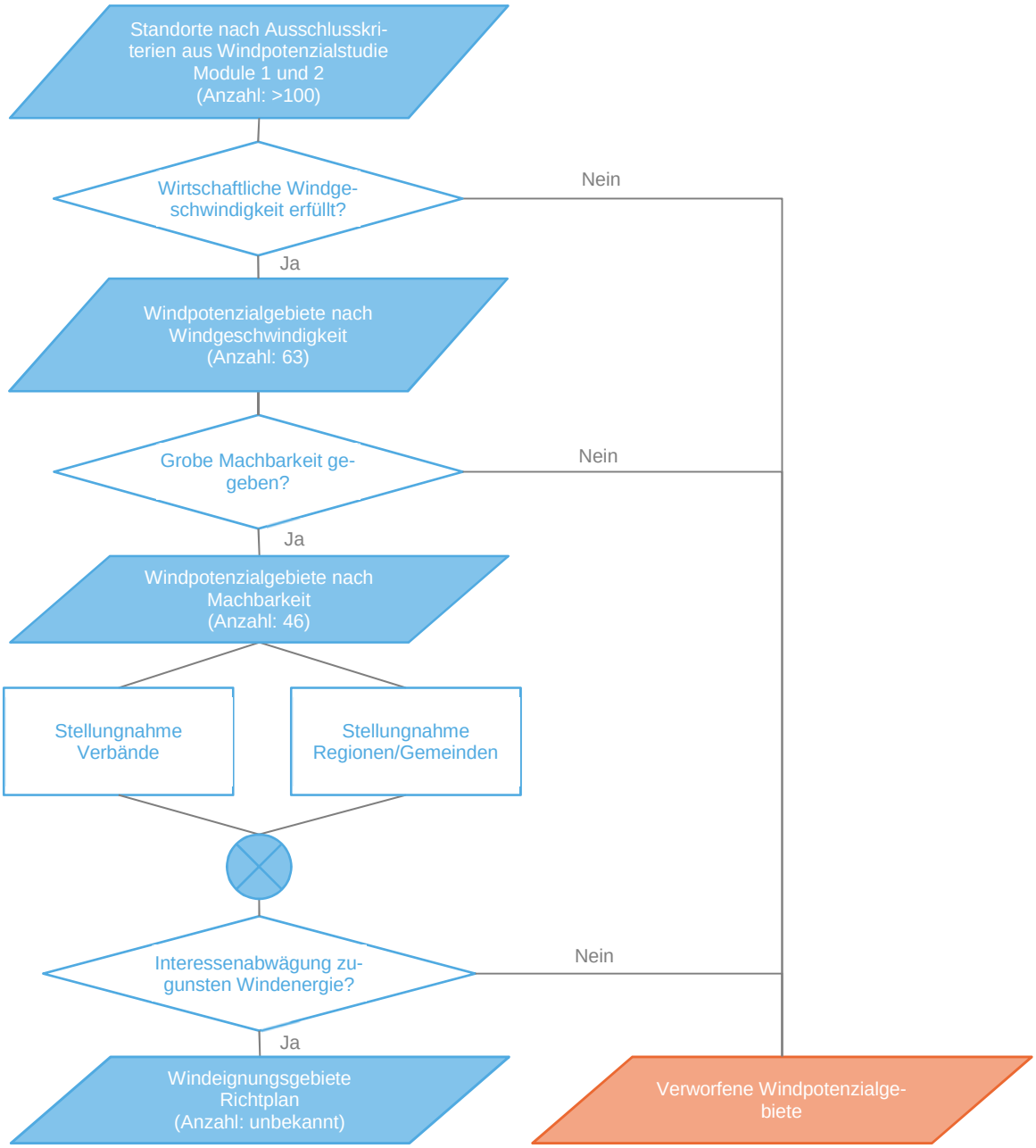


Abb. 1 Windpotenzialgebiete von der Windpotenzialstudie zum Richtplan

1.3 Ziel des Winddialogs

Die bisherigen Arbeiten werden in diesem Bericht zusammengefasst, um die im Winddialog involvierten Stakeholder (Projektentwickler, Suisse Eole, Natur- und Landschaftsschutzverbände, Regionen, Gemeinden) auf den aktuellen Stand der Planungsarbeiten zur Richtplananpassung Windenergie Kanton Zürich zu bringen.

Kapitel 2. gibt einen Überblick der aktuellen Situation bzgl. Windenergie in der Schweiz und im Kanton Zürich bevor in Kapitel 3. die kürzlich durchgeführte räumliche Negativplanung vorgestellt wird, bei welcher die potentiellen Windenergiestandorte identifiziert wurden. Wie die darauffolgende Energiepotenzialabschätzung durchgeführt wurde, wird in Kapitel 4. erläutert. Die 46 "Windpotenzialgebiete nach Machbarkeit" werden in Kapitel 5. einzeln in kurzen Steckbriefen beschrieben, in welchen die wichtigsten Schutz- und Nutzungsinteressen dokumentiert werden. Die Art und Weise wie diese Interessen bewertet werden sollen, wird in Kapitel 6. erläutert.

Anhand dieser Grundlagen sollen die erwähnten Stakeholder ihre Stellungnahmen abgeben können, welche in die darauffolgende Interessenabwägung einfliessen.

2. Windressourcen

2.1 Windressourcenmodellierung

Methodik

Die Windressourcen im Kanton Zürich werden mit einem 3-dimensionalen CFD Modell (Computational Fluid Dynamics, CFD) berechnet. CFD-Modelle berechnen die 3-dimensionale Windströmung im Gelände und sind insbesondere auch für Berechnungen des Windes in der komplexen Topographie des Voralpen- und Alpenraumes geeignet. CFD-Modelle benötigen als Input ein geografisches Geländemodell und eine Beschreibung der Bodenbeschaffenheit, die als Rauigkeit angegeben wird. Die Modelle berechnen zunächst relative Windgeschwindigkeiten, die sich aufgrund der Topographie und Geländestrukturen einstellen. Diese relativen Windgeschwindigkeiten werden mittels Messwerten zu den gesuchten absoluten Windgeschwindigkeiten kalibriert.

Aus den Berechnungen wird eine Windkarte erstellt, welche die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 100 m über Grund zeigt. Die Karte hat eine horizontale Rasterung von 50 m und überdeckt den gesamten Kanton. Insgesamt gibt die Windressourcenkarte einen guten Überblick über das Windgeschehen im Kanton. Für die detaillierte Planung einer Windenergieanlage ist sie nicht ausreichend und muss mit Windmessungen am Standort ergänzt werden.

Datenbasis

Die folgenden Eingangsdaten werden für das CFD Modell benötigt:

_ Digitales Terrain-Modell des Kantons Zürich und angrenzender Gebiete
_ Digitale Karte der Oberflächenrauigkeit
_ Windmessungen an verschiedenen Orten

Das Digitale Terrain-Modell (DTM) basiert in den Kantonen ZH, AG, LU, ZG, SZ, TG, SG, GL auf dem DHM25 von swisstopo[1]. Für das benachbarte Ausland wurde das Terrain-Modell mit SRTM[2] satellitenbasierten Höhendaten ergänzt. Die Daten lagen als Vektordaten vor, was bedeutet, dass das DTM Höhenlinien enthält.

Die Bodenrauigkeiten wurden aus der Landnutzung abgeleitet. Im Kanton Zürich wird die Landnutzung mit Datensätzen des Amts für Raumentwicklung dargestellt, in den anderen Kantonen mit dem Vector25 Datensatz[3] der Landestopografie. Für das benachbarte Ausland wurden die Daten mit dem CORINE[4] Datensatz ergänzt. Aus der Landnutzung wurden die benötigten Bodenrauigkeiten als sog. Rauigkeitslängen abgeleitet. Dabei wurde jeder Landnutzungsklasse eine bestimmte Rauigkeitslänge zugeordnet. Diese Daten lagen als Vektordaten vor, was bedeutet, dass z.B. Waldgebiete mit ihrem Umriss dargestellt werden.

Es lagen Winddaten an neun Standorten vor. Diese wurden während unterschiedlichen Zeiträumen und über unterschiedlicher Dauer sowie auf unterschiedlichen Höhen erfasst. Um dies auszugleichen, werden langjährige Korrelationen mit hochaufgelösten Re-analyse Daten aus ERA-5 Re-analysen[5] ausgeführt. ERA-5 Daten enthalten Stundenwerte der Windgeschwindigkeit aus dem Zeitraum 01.01.1991 – 31.12.2020. Dieser Zeitraum entspricht der Normalperiode, die die World Meteorological Organisation, WMO, als Referenzeitraum zur Bildung von klimatologischen Mittel verlangt. Die Windressourcenkarte erfüllt diesen Standard der WMO.

Mit den Stationsdaten werden die ERA-5 Daten auf die Standorte der Messdaten kalibriert. Zur Korrelation werden Stundenwerte aus den Windmessungen gebildet, die mit Winddaten aus 16 Orten der ERA-5 Daten verglichen wurden. Insgesamt standen 4 Datensätze innerhalb des Rechengebietes zur Verfügung (02_Schaffhausen, 04_Thundorf, 06_Fischingen und 07_Uetliberg), welche geeignet sind, die Windgeschwindigkeiten des CFD-Modells zu kalibrieren. Für diese Stationen liegen die Korrelationskoeffizienten mit ERA-5 Daten auf Basis von Stundenwerten deutlich über 70%. Damit ist gezeigt, dass die ERA-5 Daten sehr gut geeignet sind, die Windverhältnisse an den Standorten wiederzugeben.

Langjährige Windstatistiken wurden mit dem branchenüblichen MCP Verfahren (Measure-Correlate-Predict), also mit linearen Korrelationen aus den Standortdaten und den ERA-5 Daten erstellt. Mit den langjährigen Windstatistiken werden später die berechneten (relativen) Windgeschwindigkeiten des CFD Modells kalibriert.

[1] DHM25: Bundesamt für Landestopografie swisstopo: https://www.swisstopo.admin.ch/de/home/products/height/dhm25.html#technische_details (letzter Aufruf: 21.05.2021)
[2] SRTM Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT
[3] VECTOR25: Bundesamt für Landestopografie swisstopo
[4] CORINE Landcover. Siehe https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover
[5] ERA-5: Hersbach et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. https://doi.org/10.1002/qj.3803

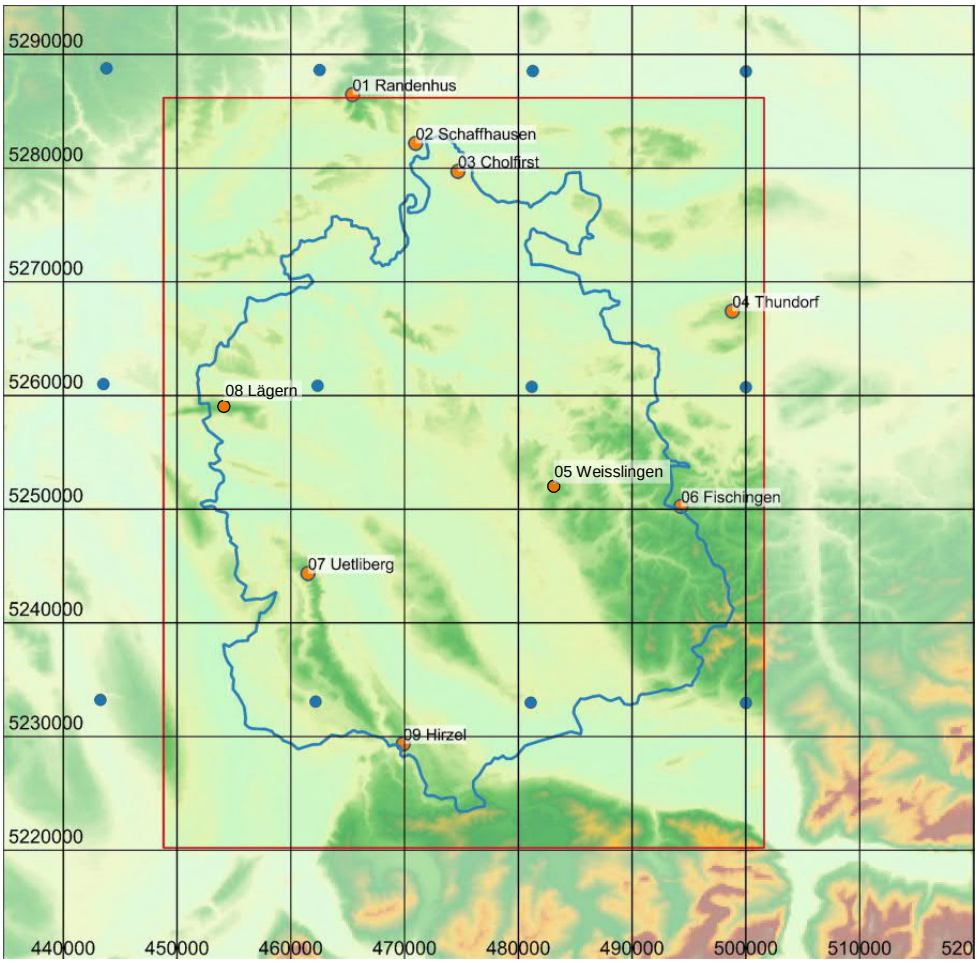


Abb. 2 Übersicht Windmessstationen
Die Karte zeigt die Topografie, die im CFD Modell genutzt wird. Das Rechengebiet mit 50m Raster liegt in dem roten Rechteck, das die Kantonsgrenze (blaue Linie) enthält. Die Stationen der Winddaten sind mit orangen Punkten und die Orte der ERA-5 Daten mit blauen Punkten gekennzeichnet.

CFD-Modell

Zur Berechnung der Windressourcenkarte wird das Model PALM[6] genutzt. PALM wurde an der Universität Hannover entwickelt. Das Modell kann als LES Modell (Large-Eddy-Simulation, LES) oder als RANS Modell (Reynolds-Averaged-Navier Stokes, RANS) genutzt werden. PALM wird zum Beispiel zur Berechnung eines Stadtklimas mit Rastern von wenigen Metern angewendet, bei dem die Umströmung in den Strassen und einzelnen Häuser sichtbar wird; oder zur Berechnung extrem hochaufgelöster Wettervorhersagen mit einer Skala von einigen hundert Metern.

RANS Modelle werden dort eingesetzt, wo die Temperatur keine Rolle spielt. Dies setzt eine neutrale Schichtung der Atmosphäre voraus, in der die Windströmung sich zeitlich nicht ändert. LES Modelle werden dort eingesetzt, wo die Temperatur die Windströmung antreiben kann. Solche Strömungen ändern sich zeitlich (z. B. im Tagesverlauf) und sind wesentlich komplexer. Zur Berechnung der Windressourcen wird aus Kapazitätsgründen das Modell PALM als RANS eingesetzt.

[6] PALM: Raasch, S. and M. Schröter (2001): PALM - a large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. Meteorol. Z. 10, 363–372

Das Modell PALM erfüllt die Anforderungen der deutschen TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) und kann zur Berechnung von Windströmungen bei Ausbreitungsrechnungen von Luftschadstoffen eingesetzt werden. Der Deutsche Wetterdienst DWD erstellt höchstaufgelöste Wettervorhersagen, in denen PALM zur Berechnung der turbulenten Strömung innerhalb der Gitterzellen des Wettervorhersagemodell COSMO genutzt wird.

PALM ist äquivalent zu kommerziellen RANS Modellen, die in der Windindustrie genutzt werden. Darüber hinaus bietet PALM Vorteile, die die Berechnung der Windressourcen in grossen Gebieten ermöglicht. Im Gegensatz zu den kommerziellen Modellen, die in der Windindustrie für das micro-siting genutzt werden, berücksichtigt das Modell PALM den Einfluss der Erdrotation auf das Windfeld. Aus diesem Grund kann mit PALM die Berechnung des Windfeldes über dem gesamten Gebiet des Kantons Zürich erfolgen, ohne dass eine Unterteilung notwendig wäre.

Die Berechnung mit einem RANS Modell erfolgt so, dass zunächst die Windströmung relativ zu einem Referenzwind erfolgt. Als Referenzwind wird ein geostropher Höhenwind mit einer festen Windgeschwindigkeit gewählt. Das Modell berechnet, wie sich der Höhenwind über dem Gelände ändert. Welche Geschwindigkeit der Höhenwind hat, spielt keine Rolle, weil eine sogenannte Reynolds-Ähnlichkeit besteht. Diese besagt, dass die berechneten Werte des Windes nicht der tatsächlichen Windgeschwindigkeit entsprechen, sondern relativ zur Windgeschwindigkeit des Höhenwindes verstanden werden können. Wird die Windgeschwindigkeit des Höhenwindes um einen beliebigen Faktor vergrössert, dann ändern sich die berechneten Werte mit demselben Faktor.

Für die Windrichtung gilt dieses Ähnlichkeitsgesetz nicht. Deshalb müssen die Berechnungen für Höhenwinde aus verschiedenen Windrichtungen wiederholt werden. Für die Windressourcenkarte wurden die (relativen) Windfelder aus insgesamt 24 Berechnungen ermittelt, wobei jede Berechnung mit einer anderen Windrichtung des Höhenwindes erfolgt. Die Auswahl der Windrichtungen wurde so gestaltet, dass die Häufigkeiten der an den Stationsdaten gemessenen Winde (genauer der Windstatistik), welche in den verschiedenen Windrichtungssektor auftreten, ungefähr gleich gross sind. Dies wird dadurch erreicht, dass die Windrichtungssektoren nicht gleich, sondern unterschiedlich breit gewählt werden. Damit werden in den Hauptwindrichtungen die Berechnungen für schmalere Windsektoren mit einer Breite von z. B. 10° ausgeführt, ohne dass dies in den Nebenwindrichtungen notwendig wäre. Da eine Berechnung mehrere Tage Rechenzeit auf einem sehr leistungsstarken Server benötigt, kann mit diesem Verfahren der Aufwand erheblich gesenkt werden, ohne dass die Genauigkeit der Ergebnisse darunter leiden würde.

Nachdem die Windfelder mit den relativen Windgeschwindigkeiten mit dem PALM Modell berechnet wurden, werden sie auf die Windstatistiken kalibriert. Dies bedeutet, dass die berechneten Windfelder mit Faktoren aus der Windstatistik multipliziert werden, so dass die mittlere Windgeschwindigkeit an allen meteorologischen Stationen

und für jeden Windrichtungssektor möglichst genau mit den Windstatistiken übereinstimmen. Die Windressourcenkarte wird aus den so gewichteten Windfeldern der Modellrechnungen zusammengesetzt.

Unsicherheiten

Unsicherheiten in der Windressourcenkarte summieren sich aus mehreren Ursachen:

_ Windmessungen (Sensoren, Datenaufbereitung etc.) mindestens ±0.1 m/s (eher deutlich mehr).

_ Langjährige Windstatistiken: Die Korrelation der ERA-5 Daten mit den Winddaten zeigt einen Korrelationskoeffizienten von ca. 75%. Dieser Wert ist erstaunlich gut und besagt, dass circa 75% der Messdaten mit den ERA-5 Daten erklärt werden können. Es bedeutet aber auch, dass 25% der Messwerte nicht von den ERA-5 Daten abgebildet werden. Die Erfahrung zeigt, dass die Unsicherheit in den langjährigen Windstatistiken ca. ±0.3 m/s bis ±1 m/s beträgt.

_ Berechnungsmodell: Das Modell PALM bildet die Realität nur teilweise ab. Das Modell berechnet die Windgeschwindigkeit in der sog. atmosphärischen Grenzschicht, das ist die Schicht, die am Boden beginnt und bis in eine Höhe von ca. 1'000 m reicht. Tagsüber, wenn die Sonne den Boden aufheizt, steigt die Wärme auf und durchmischt die Grenzschicht. Im theoretischen Ideal entsteht eine gleichmässig durchmischte Schicht, in der das vertikale Windprofil einem logarithmischen Gesetz folgt.

_ Bodenrauigkeiten: Das Windprofil wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst und die Aufgabe des CFD Modells ist es, die unterschiedlichen Faktoren möglichst genau zu erfassen. Ein erster Faktor ist die Bodenbeschaffenheit. Je nach Beschaffenheit des Bodens wird die bodennahe Windgeschwindigkeit mehr oder weniger stark abgebremst: über Wiesen z. B. weniger stark als über einer Stadt. Die unterschiedliche "Bremswirkung" wird als Rauigkeit im CFD Modell berücksichtigt. Aus einem Bodenkataster wird die Bodenbeschaffenheit abgeleitet und daraus eine Rauigkeitslänge geschätzt. Unsicherheiten in der Rauigkeitslänge wirken sich unmittelbar auf die Berechnungen aus und bilden eine wesentliche Quelle für die Unsicherheit in den Windkarten.

_ Höhenwind / Windprofil: Neben der Bodenbeschaffenheit (bzw. Rauigkeitslänge) wird das vertikale Windprofil durch den Höhenwind bestimmt. Als Höhenwind nutzt das CFD Modell eine Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die in grosser Höhe vorgegeben wird. Das Modell rechnet die Änderung des Windes relativ zum Höhenwind. Die Theorie besagt, dass die Änderung des bodennahen Windes bei unterschiedlichen Höhenwinden gleichbleibt, sofern das CFD Modell gewisse Voraussetzungen erfüllt. Eine der Voraussetzungen ist, dass die Erdrotation nicht berücksichtigt wird. Dem steht gegenüber, dass die Erdrotation die Windrichtung in mittleren Höhen, ab ca. 100m sich stetig ändert. Insbesondere also auch in den Höhen, die für moderne Wind-energieanlagen relevant sind. Deshalb wurde im CFD Modell die Erdrotation in den Berechnungen berücksichtigt. Damit sind die eben genannten Voraussetzungen nicht mehr gültig. Es wurde deshalb geprüft, welche Unsicherheiten in den Änderungen des bodennahen Windes bei verschiedenen Höhenwinden zu erwarten sind. Dazu wurden Testrechnungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten des Höhenwindes ausgeführt und daraus die Unsicherheiten bestimmt. Die Unsicherheiten sind regional verschieden und können 10% (und mehr) betragen. Die

besten Ergebnisse wurden erreicht, wenn der Höhenwind nahe bei der zu erwartenden mittleren Windgeschwindigkeit liegt. Für alle Berechnungen wurde deshalb ein (horizontal konstanter) Höhenwind von 5 m/s genutzt.

_ Luftschichtung: In der Windkarte werden die zeitliche Änderung der Windgeschwindigkeit nicht berücksichtigt. Insbesondere wird der Tagesgang oder jahreszeitliche Schwankungen im Winddargebot nicht erfasst. Dies wird im CFD Modell dadurch erreicht, dass die Einstrahlung der Sonne und die damit einhergehende Erwärmung des Bodens sich nicht ändern. In anderen Worten, die Temperatur in der modellierten Atmosphäre spielt keine Rolle; der Wind wird nur für den Idealfall einer neutral geschichteten Grenzschicht berechnet. Weil sich die Temperatur nicht ändert, sollte sich nach einer gewissen Zeit ein stationäres Windfeld einstellen. Das bedeutet, dass sich die Windgeschwindigkeit im Laufe der Zeit nicht mehr ändert. Dem stehen jedoch andere physikalische Phänomene entgegen. In manchen Modellrechnungen entstanden hinter exponierten Gipfeln sog. Karmanstrassen. Karmanstrassen sind geordnete Filamente in der Struktur der Windfelder, die sich gegenseitig umschlingen. Sie entstehen in turbulenten Strömungen bei der Umströmung von Hindernissen. Dass solche Strukturen bei der Berechnung entstehen, ist ein guter Hinweis auf die hohe Qualität des CFD Modells. Für die Windkarte bedeuten sie aber eine weitere Unsicherheit: Karmanstrassen bewegen sich, sind also zeitlich nicht konstant. In der Natur zerfallen Karmanstrassen spätestens wenn die neutrale Schichtung der bodennahen Grenzschicht nach Sonnenuntergang zusammenbricht und sich eine stabile Temperaturschichtung einstellt. Weil in den Modellrechnungen die Temperatur unberücksichtigt bleibt, wird die Karmanstrasse "unendlich" lange bestehen und kann sich über das ganze Land ziehen. Diese Unsicherheit wird mit der unterstellten Annahme einer neutralen Schichtung in Kauf genommen.

_ Topografie: Mit dem CFD Modell sind weitere Unsicherheiten verbunden, z. B. werden nicht alle topografischen Einflüsse erfasst. Das Modell rechnet zwar die Windgeschwindigkeiten auf einem horizontalen Raster von 50 m. Die Erfahrung zeigt aber, dass nur solche Phänomene richtig erfasst werden, die eine Ausdehnung des 4 bis 8-fachen der Rasterweite besitzen. Die Windkarte zeigt deshalb nur eine Genauigkeit, die einem Raster von ca. 200 m bis 400 m in der Natur entspricht.

Es ergibt sich eine räumlich unterschiedlich ausgeprägte Unsicherheit. Weil sich die Standorte der verwendeten Windstatistiken allesamt auf Hügeln befinden, werden die Windgeschwindigkeiten im hügeligen Gelände mit geringerer Unsicherheit abgebildet. Im flacheren Gelände ohne Windmessdaten ist diese höher. Auch nimmt die Unsicherheit mit zunehmender Entfernung zu einer Windstatistik tendenziell zu. Aus diesen Gründen kann keine generelle Angabe zur Unsicherheit angegeben werden.

2.2 Vergleich Wind in der Schweiz und im Kanton Zürich

Ein Blick nach Süddeutschland mit ähnlicher Landschaft und ähnlichen Windbedingungen zeigt, dass eine wirtschaftliche Windenergienutzung auch im Kanton Zürich möglich sein müsste, drehen sich in Süddeutschland doch schon seit Längerem WEA, wie sie auch in Zürich stehen könnten. Ein Blick auf den Windatlas Schweiz bestätigt den Eindruck, dass es einige Gebiete gibt, welche über gute Windverhältnisse verfügen (vgl. Abb. 3).

Es können folgende Aussagen zum Windatlas Schweiz gemacht werden:

_ Im Kanton Zürich gibt es grossflächige Gebiete mit Windgeschwindigkeiten von 4.5-5.5 m/s oder sogar mehr auf 100 m Höhe über Boden, was eine wirtschaftliche Nutzung der Windenergie grundsätzlich möglich macht (siehe Kapitel 2.3).
_ Die Unsicherheiten der Modellierung sind mit +/- 0.7 m/s relativ hoch.
_ Punktuelle Windmessungen im Kanton Zürich zeigen, dass die Windgeschwindigkeiten des Windatlas Schweiz tendenziell überschätzt werden.
_ Die räumliche Berechnungsauflösung von 100 m ist relativ grob, aber für eine erste schweizweite Einschätzung der Windverhältnisse angebracht. Für kleinere Gebiete wie z.B. einen Kanton, sollte sie jedoch 50 m oder noch weniger betragen.

Dies sind alles Gründe dafür, weshalb die Windverhältnisse für den Kanton Zürich mit einem angepassten CFD-Modell und aktualisierten Eingangsdaten neuberechnet wurden. Das Resultat dieser Neuberechnung ist in Abb. 4 ersichtlich. Diese für den Kanton Zürich angepasste Windmodellierung zeigt, dass die Windgeschwindigkeiten stark topografisch geprägt sind. Gut sichtbar wird dies z. B. in den Seitentälern entlang der Töss. Dort kommt der Wind im Jahresmittel kaum über 3 m/s hinaus. Winde über 5 m/s sind hingegen (fast) nur auf exponierten Lagen zu finden. Dabei kann sich die Windgeschwindigkeit innerhalb von wenigen 100 m sehr schnell ändern. Entlang des Albis bildet sich z. B. ein enger Raum mit hohen Windgeschwindigkeiten von 5.5 m/s (und mehr), der von schwachwindigen Lagen an den Berghängen flankiert wird.

Diese neue Windressourcenkarte eignet sich für die Ausscheidung von Windeignungsgebieten in der Richtplanung sowie für die grobe Planung von Windparks. Detaillierte Ertragsprognosen für WEA sollten in allen Gebieten des Kantons Zürich jedoch ausschliesslich mit Windmessungen möglichst in Nabenhöhe der Anlagen erfolgen, die am Standort der Anlage ausgeführt werden.

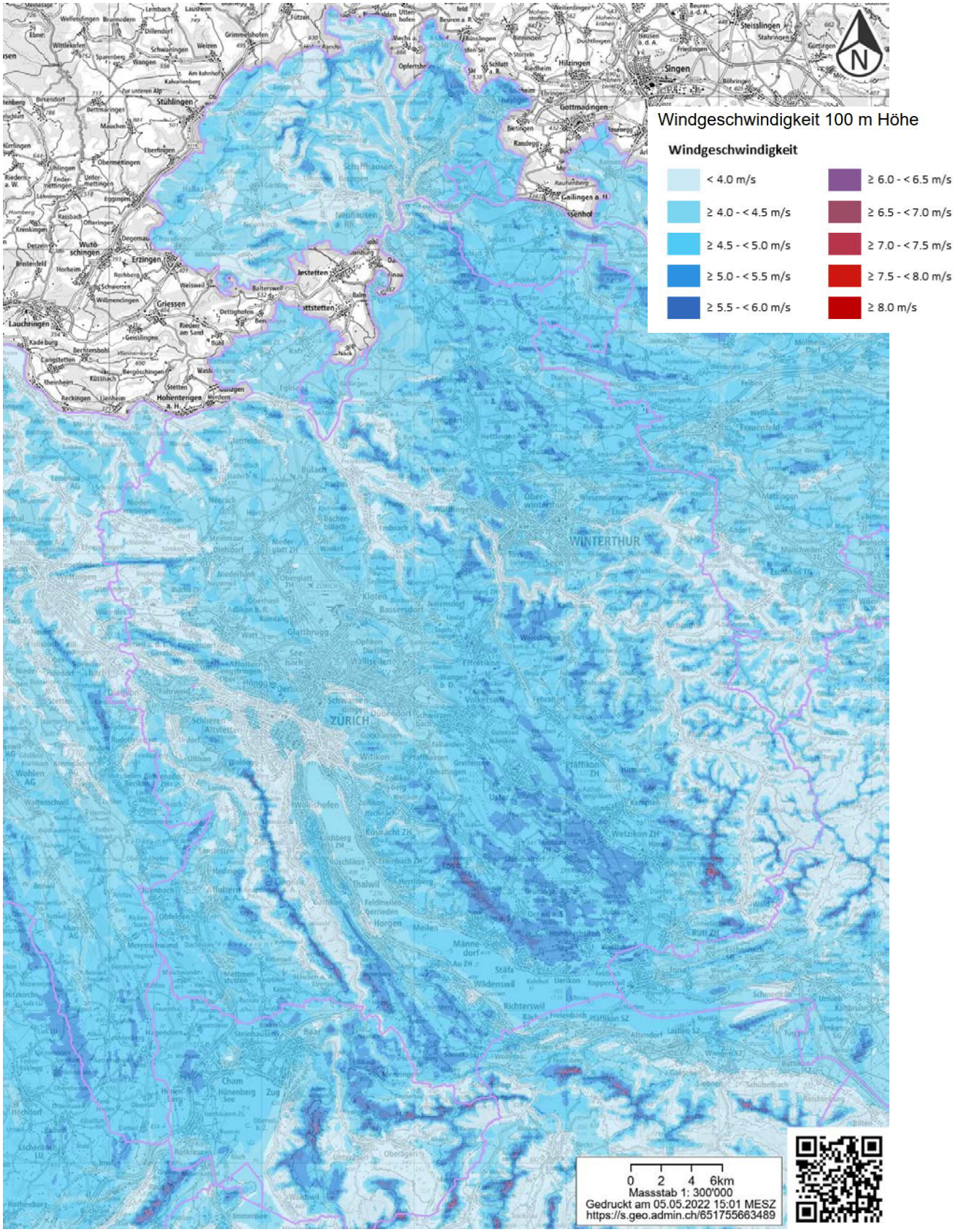


Abb. 3 Windgeschwindigkeiten auf 100 m über Boden gemäss Windatlas Schweiz
Quelle: https://map.geo.admin.ch/

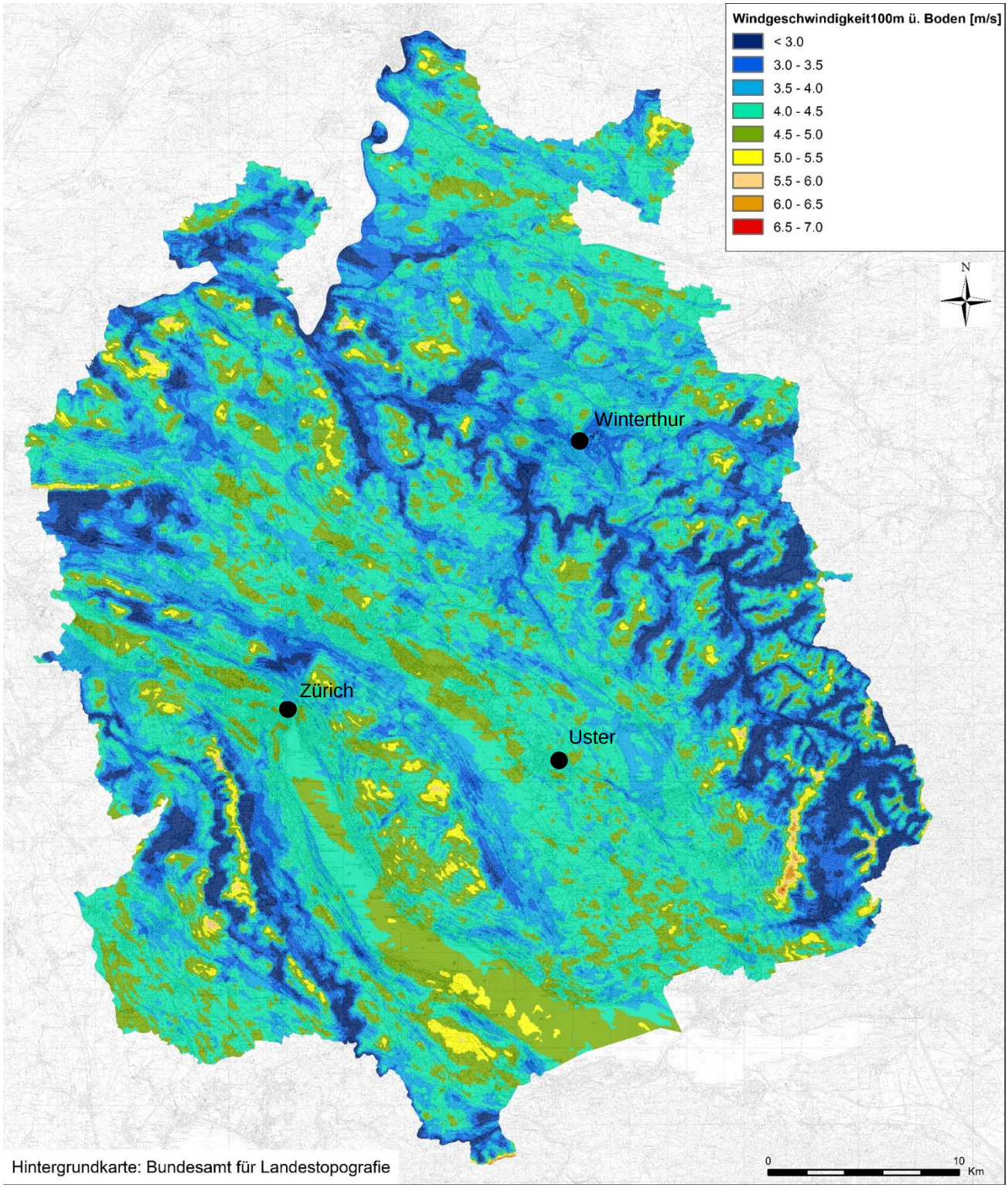


Abb. 4 Windgeschwindigkeiten auf 100 m über Boden gemäss Windpotenzialstudie Kanton Zürich
Karte in höherer Auflösung siehe Anhang

Schweizweit finden sich die besten Windenergiestandorte, welche bereits realisiert wurden, entweder auf exponierten Hügeln wie z.B. den Jurahöhen oder in Tallagen mit ausgeprägtem Berg-/Talwindregime wie z.B. im Rhonetal oder Churer Rheintal. Der am

ehesten mit Standorten im Kanton Zürich vergleichbare Windpark steht jedoch unmittelbar an Landesgrenze auf deutscher Seite, in Verenafohren (7 km nördlich von Schaffhausen). Der Standort ist sehr gut mit einem hügeligen Mittellandstandort vergleichbar und besteht aus 3 Windenergieanlagen à 3.3 MW und produziert jährlich ca. 20 GWh Windstrom, also genau die Strommenge, welche in der Schweiz als Grenzwert gilt, ab welcher ein Windpark von nationalem Interesse ist. Solche Windparks von nationalem Interesse sind anderen nationalen Interessen wie z.B. der Walderhaltung gleichgestellt, was heisst, dass zwischen solchen Interessen eine Interessenabwägung durchgeführt werden kann.

2.3 Reicht der Wind im Kanton Zürich für eine energetische Nutzung?

Ob sich ein Standort für die Windenergienutzung eignet, hängt nebst raumplanerischen oder Akzeptanzgründen in hohem Mass auch von wirtschaftlichen Überlegungen ab. Die Wirtschaftlichkeit wiederum ergibt sich aus dem Zusammenspiel von technischen und finanziellen Faktoren.

Die Gesamtkosten einer WEA setzen sich zusammen aus den Investitionskosten (ca. 2/3) und den abgezinsten Betriebskosten (ca. 1/3), wobei bei den Investitionskosten die Anlage selber mit 65% der Kosten den weitaus grössten Anteil ausmachen, gefolgt von den Kosten für die Erschliessung (ca. 15-20%). Mit anderen Worten: die Erschliessungskosten, welche stark standortabhängig sind, sind mitentscheidend, ob ein Windenergieprojekt wirtschaftlich ist oder nicht.

Auf der Ertragsseite ist die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der Anlagen entscheidend sowie der für den produzierten Strom bezahlte Preis. Im Allgemeinen gilt mit wenigen Ausnahmen die Formel: je grösser die Nabenhöhe desto grösser ist die Windgeschwindigkeit. Wichtig ist ebenfalls, wie effizient der Wind genutzt werden kann. Nebst dem Wirkungsgrad der Anlage selber spielen Grössen wie die Art der Windströmung, Verfügbarkeit der Anlagen oder Abschaltungen zugunsten des Naturschutzes mit.

Über diese Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit von WEA u.a. beeinflussen, lassen sich gewisse Regeln ableiten, welche für die Windenergienutzung im Kanton Zürich und für die Beurteilung von Standorten untereinander wichtig sind.

Einfluss der Geländekomplexität[7] auf die Kosten:

- Die Windgeschwindigkeitszunahme mit zunehmender Höhe über Boden ist in komplexem Gelände weniger stark als in einfachem Gelände. D.h. in komplexem Gelände können kleinere Nabenhöhen von 100-130 m sinnvoller sein als grosse (130-150 m), da die Kosten für höhere WEA auch grösser sind.
- Die Effizienz von WEA ist in komplexem Gelände wegen turbulenten Windströmungen geringer als in einfachem Gelände mit laminaren Strömungen.
- Die Erschliessung (Strasse, Stromnetz) eines Standorts sowie die Montage der Anlagen sind in komplexem Gelände meistens aufwändiger und teurer.
- In einfachem Gelände werden WEA mit grossen Nabenhöhen (130-150 m) und grossen Rotordurchmessern (140-160 m) angestrebt.

[7] Komplexes Gelände: Ausgeprägte Hügel- und Berglandschaft mit vorwiegend turbulenten Windströmungen
Einfaches Gelände: Ebenen und leichte Hügel mit vorwiegend laminaren Windströmungen

_ In komplexem Gelände sind WEA mit kleineren Nabenhöhen (100-130 m) und kleineren Rotordurchmessern (100-130 m) meist sinnvoller.

Einfluss der Windparkgrösse auf die Kosten:
_ Windparks mit mehreren WEA sind tendenziell wirtschaftlicher als Einzelanlagen, weil fixe Kosten für Planung oder Erschliessung verteilt werden können.

Aus all diesen Überlegungen sowie aus Erfahrungswerten aus anderen Schweizer Windenergieprojekten kommen wir zum Fazit, dass eine wirtschaftliche Windenergienutzung mit folgenden Windgeschwindigkeiten grundsätzlich möglich ist:
_ Ein Windeignungsgebiet in einfachem Gelände sollte auf 100 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von mind. 4.5 m/s aufweisen und um eine potentielle Überschätzung auszugleichen zusätzlich Teilbereiche von mind. 4.75 m/s beinhalten
_ Ein Windeignungsgebiet in komplexem Gelände sollte auf 100 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von mind. 5 m/s aufweisen.

Im Kanton Zürich gibt es 63 Gebiete, welche sowohl diese Kriterien als auch die raumplanerischen Ausschlusskriterien gemäss Kapitel 3. erfüllen.

3. Räumliche Negativplanung

Die Windenergie kann sowohl in der Schweiz als auch im Kanton Zürich nur dann ausgebaut werden, wenn sie sauber und objektiv mit allen anderen Raumnutzungsinteressen abgestimmt und abgewogen wird. Der Natur- und Landschaftsschutz, welcher in der Schweiz einen hohen Stellenwert geniesst und v.a. die dichte Besiedlung mitsamt der dazugehörigen Infrastruktur haben im Kanton Zürich die grössten Raumansprüche, welche mit einer Windenergienutzung koordiniert werden müssen. Dazu wurde im Rahmen der Windpotenzialstudie eine räumliche Negativplanung durchgeführt, welche in diesem Kapitel erläutert wird.

3.1 Auf welchen Grundlagen basiert die Negativplanung?

Alle Kriterien, welche in der räumlichen Negativplanung entweder als Ausschluss- oder Vorbehaltskriterium definiert wurden, sind entweder von nationalem oder kantonalem Interesse. Weitere Kriterien, welche auf Grundlagen wie regionalen und kommunalen Richtplänen oder Nutzungsplänen basieren, wurden nicht berücksichtigt, sofern sie nicht bereits auf nationaler oder kantonaler Ebene geregelt sind. Solche Kriterien werden im Falle der regionalen Richtplanung mittels dieses Winddialogs oder projektspezifisch im Rahmen der Nutzungsplanänderung berücksichtigt.

Konzept Windenergie Schweiz

Das überarbeitete Konzept Windenergie Schweiz (Stand 25.09.2020) legt fest, wie die Bundesinteressen bei der Planung von WEA zu berücksichtigen sind und zeigt mögliche Räume mit Potenzial zur Nutzung von Windenergie auf. Planungs- und Projektträger verfügen damit über eine Entscheid- und Planungshilfe. Das Konzept dient somit den Windenergieplanungen auf kantonaler Ebene als Basis, um die massgeblichen Bundesinteressen rechtzeitig und adäquat berücksichtigen zu können.

Das Konzept ist gemäss Art. 22 der Raumplanungsverordnung (RPV) behördenverbindlich und daher von Bundesstellen, Kantonen, regionalen Planungsträgern und Gemeinden bei der Erarbeitung, Anwendung und Überprüfung ihrer Sach-, Richt- und Nutzungspläne zu berücksichtigten (Bundesamt für Raumentwicklung ARE (1), 2020). Die Aussagen des Konzepts Windenergie beziehen sich hauptsächlich auf die Stufe der Richtplanung.

Kantonale Richtplanung

Der festgesetzte kantonale Richtplan vom 28. Oktober 2019 (Baudirektion Kanton Zürich, 2019) ist das strategische Führungsinstrument des Kantons für die Koordination und Steuerung der langfristigen räumlichen Entwicklung. Er stellt die Abstimmung mit den Sachplänen des Bundes und den Richtplänen der Nachbarkantone sicher. Die Kompetenz der Kantone zur Ausscheidung von Gebieten und Standorten im Richtplan, die für die Windenergienutzung geeignet sind, bleibt auch mit dem Konzept Windenergie des Bundes erhalten.

3.2 Welche Kriterien werden berücksichtigt?

Bei der Negativplanung wird mittels eines GIS-Programmes (Geografisches Informationssystem) die Gesamtfläche des Kantons Zürich durch Ausschlussflächen eingegrenzt. Ausschlussflächen sind diejenigen Flächen, in denen per Definition keine Windenergienutzung stattfinden soll. Bei einzelnen Ausschlussflächen können zusätzlich bestimmte Pufferzonen definiert werden. Die Kriterien und die verwendeten Pufferdistanzen wurden zusammen mit dem AWEL und ARE festgelegt.

Gebiete, in denen eine Windenergienutzung grundsätzlich möglich, aber erschwert und nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist, werden als Vorbehaltsgebiete bezeichnet. Hier ist in jedem Fall eine Interessensabwägung durchzuführen. Eine Interessenabwägung durchzuführen ist ebenfalls bei den Kriterien, welche erst auf Stufe Nutzungsplanänderung behandelt werden. Die Einteilung wurde ebenfalls zusammen mit dem AWEL und ARE durchgeführt.

Ein Themenbereich kann sowohl Ausschluss- als auch Vorbehaltsgebiete enthalten, wenn z.B. die Kernzone eines Schutzgebietes für die Windenergienutzung ausgeschlossen ist (Ausschlussgebiet), in dessen Umgebungszone aber durchaus WEA errichtet werden können, wenn die Auflagen in diesem Gebiet erfüllt werden (Vorbehaltsgebiet).

Die Interessenabwägung soll möglichst breit abgestützt sein, das heisst, es ist wichtig, die Einschätzung der verschiedenen Interessensverbände und Regionen/Gemeinden zu den einzelnen Kriterien in den Windpotenzialgebieten abzuholen und in die Abwägung einfliessen zu lassen.

Bundesinteresse	**Ausschlussgebiet** (kein Anlagebau möglich)	**Vorbehaltsgebiet** (Interessensabwägung Richtplanung)	**Projektebene** Interessenabwägung Projektstufe
Lärmschutz	0 m (Industrie/Gewerbe) 300m (ES 3, Gebäude) 500m (ES 2) 700m (ES 1)	Lärmempfindliche Gebäude in Industrie/Gewerbe (z.B. bei Büronutzung)	
UNESCO Welterbe	Perimeter	Struktureller und visueller Wirkungsbereich	x
ISOS-Objekte	Kerngebiet	Struktureller und visueller Wirkungsbereich	x
Historische Verkehrswege von nationaler Bedeutung (IVS-Objekte)	x		
Denkmalschutzinventar von überkommunaler Bedeutung		x	x
Kantonales Ortsbildinventar von überkommunaler Bedeutung	Kerngebiete	Umgebungszonen	
Archäologische Fundstellen (Verdachtsflächen)		x	x
Moorlandschaften von besonderer Schönheit und nationaler Bedeutung; Hoch- und Übergangs- bzw. Flachmoore von nationaler Bedeutung; Kern- und Umgebungs- resp. Übergangszone Nationalpärke und Naturerlebnispärke; Auengebiete; Amphibienlaichgebiete; Trockenwiesen– und weiden von nat. Bedeutung	x		
Wasser- und Zugvogelreservate von internat. und nat. Bedeutung WZVV	x	850 m Puffer	x
Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN)		x	x
Landschaftsschutzgebiet gemäss kantonalem Richtplan		x	x
Smaragdgebiete		x	x
Landschaftscharakter			x
Fruchtfolgeflächen		x	x
Wald	Waldreservate	x	x
Prioritäre Potenzialflächen für Feuchtgebiete (PPF)	Prioritäre Flächen	alle übrigen Flächen	
Kantonale Schutzverordnungen (SVO-Objekte und Zonen inkl. altrechtliche Schutzverordnungen)	Zonen I, II und IVA	alle übrigen Zonen	x
Inventar der Landschaftsschutzobjekte	Kleinräumige Gebiete	Grossflächige Naturlandschaften	Grossflächige Kulturlandschaften
Stehende Gewässer und Flüsse	Rhein, Limmat, Töss, Thur: 30 m Puffer übrige: 15 m Puffer	Rhein, Limmat, Töss, Thur: Gewässerraum bis 100 m	x
Gewässerbaulinien	x		
Gewässerabstandlinien	x		
Grundwasserschutzzonen und -areale	S1, S2, GWS-Areal	S3	x
Wildtierkorridore, Ausbreitungsachsen und Wildtierpassagen	Wildtierpassagen von Nationalstrassen: 300 m Puffer	Wildtierkorridore von überregionaler Bedeutung; Wildtierpassagen 300-500 m Pufferbereich	x

Bundesinteresse	**Ausschlussgebiet** (kein Anlagebau möglich)	**Vorbehaltsgebiet** (Interessensabwägung Richtplanung)	**Projektebene** Interessenabwägung Projektstufe
Schutz von Wildtieren vor gefährlichen Infrastrukturanlagen			x
Auerhuhn	Kerngebiet		
Zug- und Brutvögel, Fledermäuse			x
Rotmilan		Aktuell bekannte Winterschlafplätze: 5 km Puffer	x
Lebensräume mit geschützten oder prioritären Arten bzw. Arten der «Roten Liste»			x
Flugplatzperimeter und Gebiete mit Hindernisbegrenzung der zivilen Flugplätze gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt SIL	x		
Kommunikations-, Navigations- und Überwachungsanlagen für die Zivilluftfahrt		Puffer 1-15 km je nach Objekt	x
Übriger Luftraum (Zivilluftfahrt)			x
Militärflugplätze: Flugplatzperimeter und Gebiete mit Hindernisbegrenzung	x	20 km Puffer	x
Perimeter der Waffen- und Schiessplätze gemäss Sachplan Militär	x		
Übriger Luftraum (Militärluftfahrt)			x
Meteoradar, Windprofiler	5 km Puffer	5-20 km Pufferbereich	x
Richtfunkstrecken			x
Bahnlinien	160 m Puffer		
Autobahnen	160 m Puffer		
Stromleitungen gemäss Sachplan Übertragungsleitungen SÜL	160 m Puffer		
Verhinderung übermässiger Belästigung durch periodischen Schattenwurf oder Lichteffekte bei nahegelegenen Wohn- und Arbeitsräumen			x

Tab. 1 Berücksichtigung der Bundes- und Kantonsinteressen

Die in der vorangehenden Tabelle aufgezeigten Ausschlusskriterien sind in folgender Karte als graue Flächen kartiert (siehe Abb. 5).

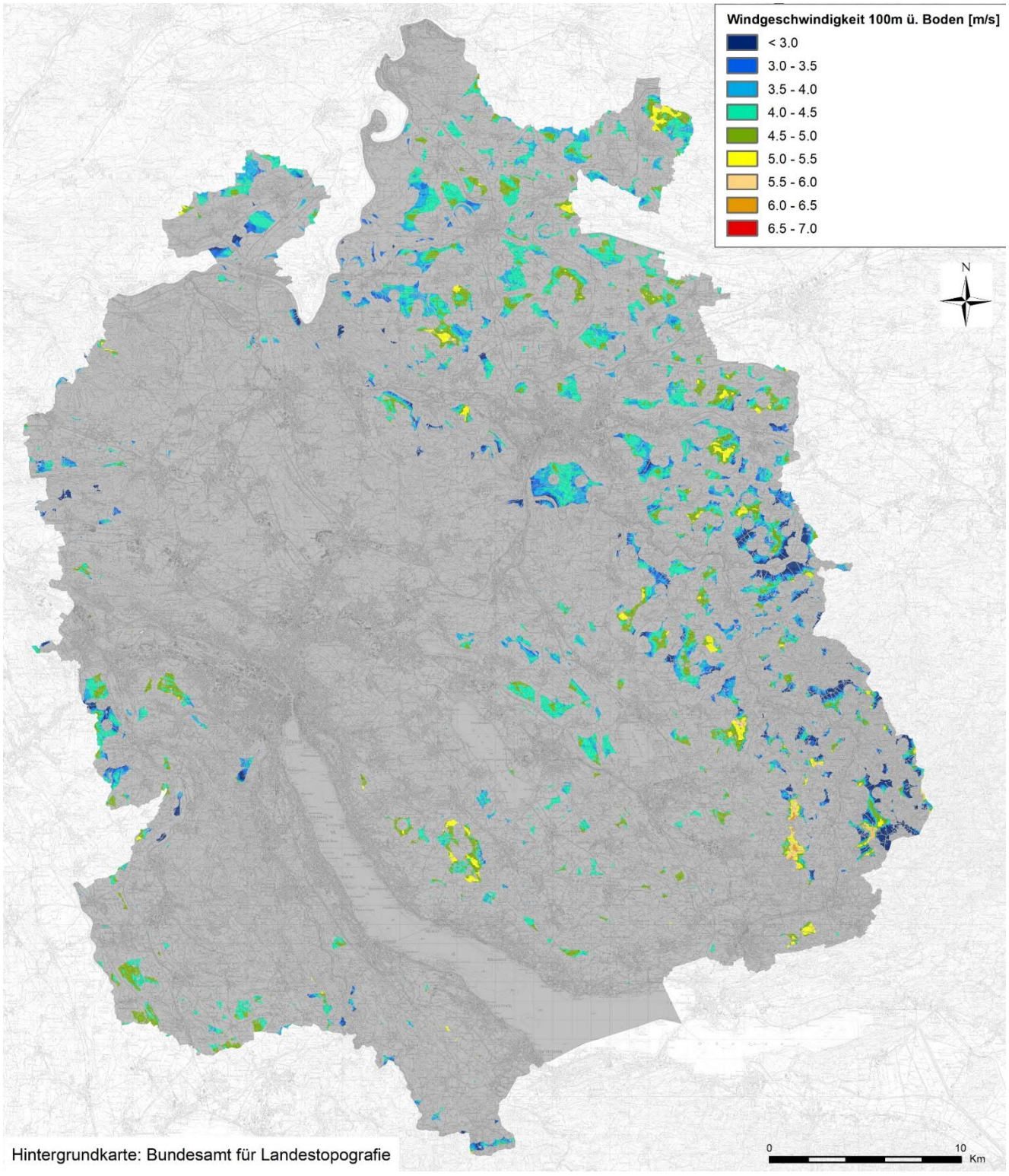


Abb. 5 Ausschlussgebiete für Grosswindanlagen (graue Flächen).
Karte in höherer Auflösung siehe Anhang

4. Energieertragsabschätzung

4.1 Methodik

Windenergieanlagen (WEA)

Für die Standortbeurteilungen werden nur WEA mit horizontaler Rotorachse berücksichtigt. Diese entsprechen, im Gegensatz zu WEA mit vertikaler Rotorachse oder weiteren Windenergiesystemen (z.B. Flugwindenergieanlage), dem Stand der Technik und sind jahrzehntelang erprobt.

Eine Grosswindanlage, wie sie im Kanton Zürich errichtet werden könnte, besteht aus den Komponenten Fundament, Turm sowie Gondel mit drei Rotorblättern. Die Dimensionen sind u.a. abhängig von der Topografie, den Windverhältnissen und der Bodenbedeckung. Für Kleinwindanlagen hat diese Studie keine Relevanz.

In einfachem Gelände sind WEA für mittlere bis schwache Windverhältnisse die ideale Wahl. Diese Anlagen haben vorzugsweise einen grossen Rotordurchmesser von 140-160 m und grosse Nabenhöhen, welche 130-150 m über Boden oder sogar noch höher reichen können.

In komplexem Gelände sind, aufgrund meist schwierigerer Zufahrtsverhältnisse, beschränkteren Platzverhältnissen für die Montage sowie erhöhter Turbulenzverhältnissen, Anlagen mit ca. 100-130 m Rotordurchmesser und ca. 100-140 m Nabenhöhe repräsentativ.

Für die Energieertragsabschätzung müssen spezifische WEA-Typen definiert werden. In der Schweiz sind bisher nur WEA der beiden Hersteller Vestas und Enercon errichtet worden, weshalb für diese Abschätzung auch WEA-Typen von einem dieser beiden Hersteller gewählt werden (vgl. Tab. 2). Es wird darauf hingewiesen, dass die gewählten Anlagentypen rein exemplarischer Natur sind und es keine expliziten Präferenzen für den jeweiligen Typ gibt. Ein Anlagentyp eines anderen Herstellers, welcher die Bedingungen erfüllt, ist ebenfalls denkbar. Die Wahl der Nabenhöhe ist anlagetypenspezifisch und hängt neben den Parametern Wind, Sichtbarkeit, Schattenwurf, Lärm von weiteren Faktoren ab wie z.B. Aktivität von Vögeln und Fledermäusen, Vereinbarkeit mit Flugsicherungsanlagen oder Akzeptanz in der Bevölkerung (Aufzählung nicht abschliessend).

Kenngrösse	**Geländekomplexität**	
	Einfach	**Komplex**
WEA Typ (exemplarisch)	Enercon E-160	Enercon E-103
Leistung	5.5 MW	2.35 MW
Rotordurchmesser	160 m	103 m
Nabenhöhe	140 m	108 m
Gesamthöhe (Turm + Rotorblatt)	220 m	159.5 m

Tab. 2 Exemplarische Kenngrössen geeigneter WEA im Kanton Zürich

Windparklayout

Ausgehend vom gewählten WEA-Typ wird ein sogenanntes Windparklayout, d.h. eine Anordnung der WEA zu einem Windpark, erstellt. Dieser Schritt ist notwendig, um die anschliessende Energieertragsabschätzung durchführen zu können aber auch um konkrete Nutzungskonflikte mit anderen Interessen zu eruieren.

Die Windparklayouts stellen eine realistische Anzahl WEA dar, wenn die in der folgenden Auflistung zugrunde gelegten Bedingungen angewendet werden:

_ Die WEA dürfen nicht in Ausschlussgebieten gemäss Negativplanung (vgl. Kapitel 3.) platziert werden.
_ Die WEA werden in einfachem Gelände nur an Standorten mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 4.5 m/s auf 100 m über Boden platziert und in komplexem Gelände nur an Standorten von >5.0 m/s. Geringfügige Abweichungen können durch die Standortoptimierung resp. Verschiebung der Anlagenpositionen entstehen.
_ Die Windparklayouts basieren auf der Windressourcenkarte gemäss Kapitel 2.
_ Mögliche Standorte auf freiem Feld werden solchen im Wald vorgezogen.
_ Die Abstände zwischen den WEA sind abhängig von der Verwirbelung der Luftströmungen, welche die Rotoren auf der windabgewandten Seite erzeugen. Als Planungsgrundlage wird in hügeligen Gebieten mit hohem Waldanteil von einem Minimalabstand von 5-mal dem Rotordurchmesser in angenommener Hauptwindrichtung und 3.5-mal Rotordurchmesser in Nebenwindrichtung ausgegangen, was der gängigen Planungspraxis in bewaldetem und hügeligem Gelände entspricht. Angenommene Hauptwindrichtung ist im gesamten Kanton Zürich West-Südwest, was auch durch langjährig gemessene Winddaten bestätigt wird (vgl. Abb. 6).

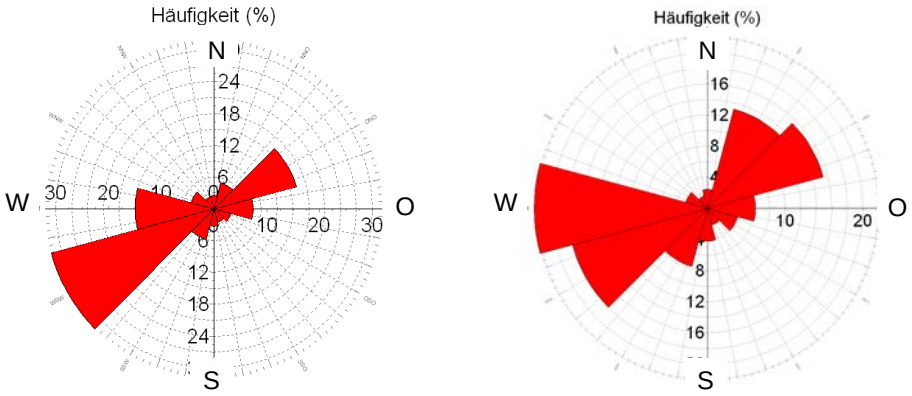


Abb. 6 Windhäufigkeitsverteilung an den Messstationen von Meteoschweiz: Üetliberg (links); Schaffhausen (rechts). Hauptwindrichtungen jeweils Südwest/West, wenn auch in Schaffhausen nicht ganz so deutlich wie auf dem Uetliberg.
Messdatenreihen >20 Jahre

Bei der Weiterentwicklung zu einem konkreten Windenergieprojekt müssen diverse weitere Kriterien erfüllt werden (z. B. Lärmschutz, Artenschutz, Einverständnis der lokalen Bevölkerung), was in der Regel zu einer Verschiebung oder gar Streichung der einen oder anderen Turbine führen wird.

Es ist deshalb unwahrscheinlich, dass sämtliche Turbinen der hier erstellten Windparklayouts zur Errichtung kommen. Sie sind deshalb nicht als direkte Vorlage für eine

Nutzungsplanänderung anzusehen, sondern stellen eine Grundlage für weitere projektspezifische Optimierungsarbeiten dar. Aus diesem Grund werden die Windparklayouts auch nicht kartographisch dargestellt.

Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der WEA

Um aus der Windgeschwindigkeit auf 100 m über Boden, so wie auf der Windressourcenkarte dargestellt, die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der WEA zu berechnen, muss eine Hochrechnung mittels eines typischen Windprofils generiert werden.

Das Windprofil hängt stark von der Topografie, der Bodenrauigkeit und der Luftschichtung ab. Am Boden ist der Wind wegen Hindernissen und der Bodenrauigkeit stark gebremst. Hoch über dem Boden in den ungestörten Luftschichten des geostrophischen Windes (um 5 km hoch) ist der Wind nicht mehr von der Oberflächenbeschaffenheit der Erde beeinflusst. Zwischen diesen beiden Schichten ändert sich die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Grund[8].

Windprofil in einfachem Gelände

In flachem oder einfachem Gelände und bei neutraler atmosphärischer Schichtung ist das logarithmische Windprofil eine gute Näherung für die vertikale Windscherung:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

Die Referenzgeschwindigkeit v_1 ist bei der Referenzhöhe h_1 gemessen. v_2 ist die Windgeschwindigkeit in der Höhe h_2. z_0 ist die Rauigkeitslänge gemäss folgender Tabelle.

Geländeoberfläche	Rauigkeitsklasse	Rauigkeitslänge z_0
Wasserflächen: Meer und Seen	0	0.0002 m
Offenes Gelände mit glatter Oberfläche, z.B. Beton, Landebahnen auf Flughäfen, gemähtes Gras etc.	0.5	0.0024 m
Offenes landwirtschaftliches Gelände ohne Zäune und Hecken, evtl. mit weitläufig verstreuten Gebäuden und sehr sanfte Hügel	1	0.03 m
Landwirtschaftliches Gelände mit einigen Häusern und 8 m hohen Hecken im Abstand von mehr als 1 km	1.5	0.055 m
Landwirtschaftliches Gelände mit einigen Häusern und 8 Meter hohen Hecken im Abstand von ca. 500 m	2	0.1 m
Landwirtschaftliches Gelände mit vielen Häusern, Büschen, Pflanzen, oder 8m hohe Hecken im Abstand von ca. 250m	2.5	0.2 m
Dörfer, Kleinstädte, landwirtschaftliches Gelände mit vielen oder hohen Hecken, Wäldern und sehr raues und unebenes Terrain (für Berechnung in einfachem Gelände verwendet)	3	0.4 m
Grössere Städte mit hohen Gebäuden	3.5	0.6 m
Grossstädte mit hohen Gebäuden und Wolkenkratzern	4	1.6 m

Tab. 3 Rauigkeitsklassen und –längen unterschiedlicher Geländeoberflächen
Quelle: https://wind-data.ch/tools/profile.php

[8] Quelle: https://wind-data.ch/tools/profile.php

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht verschiedene typische Windprofile in ebenem Gelände in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit. Es gilt: Je höher die Bodenrauigkeit, desto kleiner die Windgeschwindigkeit in Bodennähe und desto flacher ist das Windprofil.

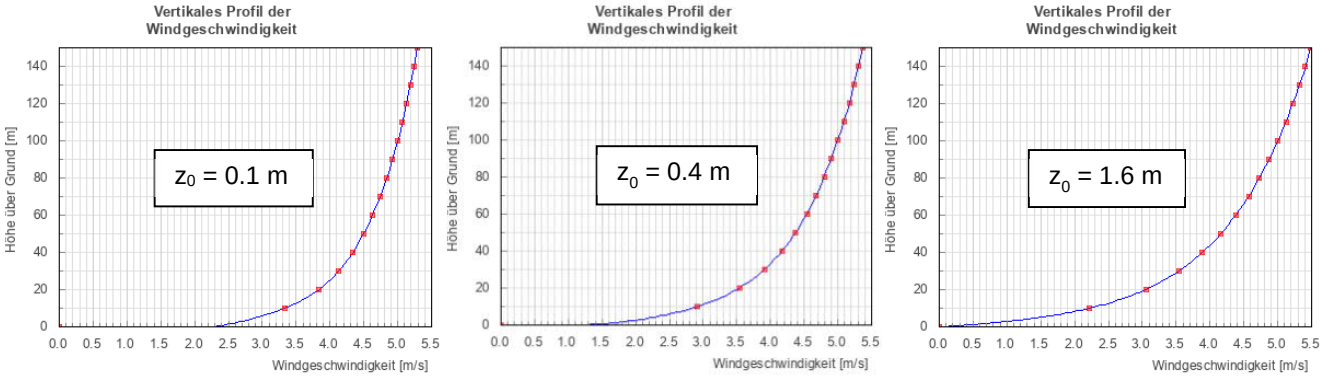


Abb. 7 Typische Windprofile in einfachem Gelände in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit
Berechnet mit Windprofil-Rechner auf https://wind-data.ch/tools/profile.php

Den Windeignungsgebieten in einfachem Gelände im Kanton Zürich wird eine Rauigkeitslänge von 0.4 m (Rauigkeitsklasse 3) zugrunde gelegt, da sie sich meist in Waldgebieten oder in deren unmittelbarer Nähe befinden. Die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird mit dem Windprofil-Rechner (https://wind-data.ch/tools/profile.php) berechnet.

Windprofil in komplexem Gelände

Auf Hügeln in komplexem Gelände verliert die Bodenrauigkeit an Bedeutung. Entscheidender für das Windprofil ist die Topografie. Wenn der Wind einen Hügel überstreift, werden die Luftmassen in Bodennähe zusammengedrückt und beschleunigt. Man spricht vom sog. Speed-Up-Effekt. Im Extremfall kann sich ein Windprofil umkehren, d.h. in Bodennähe herrschen höhere Windgeschwindigkeiten als in grösseren Höhen. Die Stärke des Speed-Up-Effekts sowie seine wirksame Höhe über Grund sind sehr individuell und u.a. abhängig von der Höhe des Hügels, seiner Hangneigung, der Windstärke, der Anströmrichtung sowie der umliegenden Topografie.

Weil für komplexes Gelände Windenergieanlagen mit einer Nabenhöhe von 108 m angenommen wurden und die Differenz zur berechneten Windressourcenhöhe von 100 m minimal ist, fallen die genannten Einflussfaktoren nicht stark ins Gewicht, weil sie grösstenteils bereits bei der Windressourcenmodellierung berücksichtigt wurden. Für die Hochrechnung der Windgeschwindigkeit von 100 m auf 108 m wurde deshalb vereinfachend ebenfalls ein logarithmisches Windprofil angenommen.

Berechnung Energieertrag für das Windparklayout

Für jeden einzelnen WEA-Standort ist die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe hergeleitet worden (vgl. Windressourcenkarte und Windprofil). Aus den Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe der einzelnen WEA ist eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit pro Windeignungsgebiet berechnet worden.

Die Energieertragsberechnung für die erstellten Windparklayouts ist mit dem Ertragsrechner auf www.wind-data.ch durchgeführt worden, was eine schnelle und qualitativ gute Ersteinschätzung des Energiepotenzials ermöglicht. Die Eingangsparameter für die Berechnung sind:

_ Mittlere Windgeschwindigkeit pro Windeignungsgebiet
_ Luftdichte: berechnet aus der durchschnittlichen Höhe der Rotornabe in m ü. M. anhand der Näherungsformel für die Schweiz[9]
_ Leistungskurven der Windenergieanlagen (Enercon, 2020), (Enercon, 2015)

Der so pro Windeignungsgebiet berechnete durchschnittliche Energieertrag ist mit der Anzahl WEA, einem Wake-Faktor (für die Abschattungsverluste der WEA untereinander, vgl. Abb. 8) und einem Verlustfaktor (pauschal 15% Verluste für Umweltauflagen, Leitungsverluste, Anlagenverfügbarkeit etc., was einem konservativen Ansatz entspricht) multipliziert worden, was den Gesamtertrag pro Windeignungsgebiet ergibt.

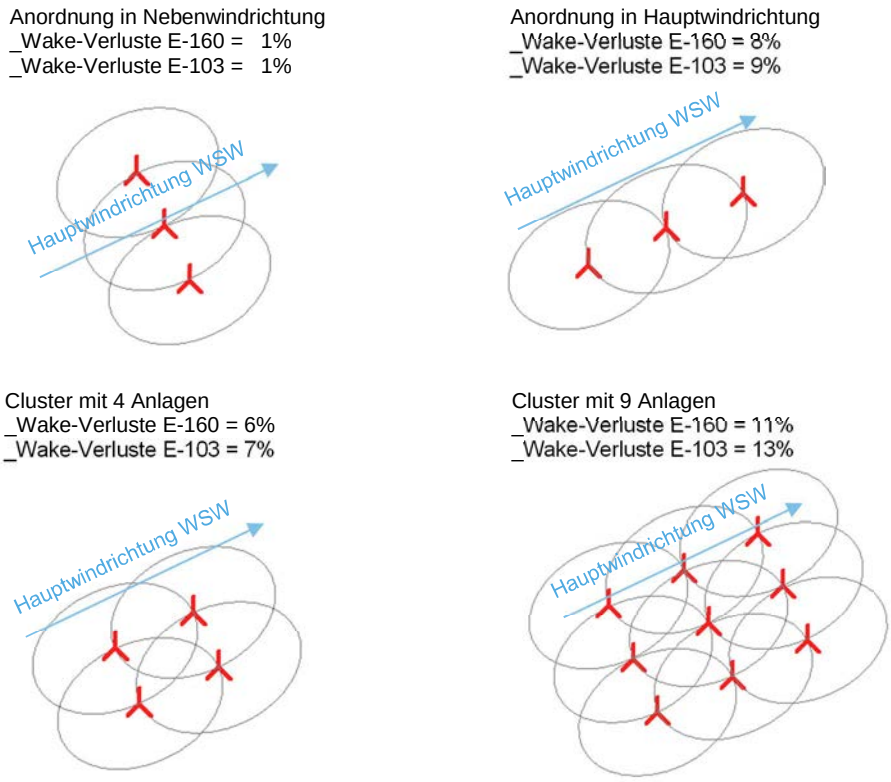


Abb. 8 Wake-Verluste in Abhängigkeit des Windparklayouts (idealisierte Darstellung)

4.2 Wie viel Strom aus Wind könnte im Kanton Zürich erzeugt werden?

Die Schweiz bildet bei der Windenergienutzung das Schlusslicht in Europa. 2020 wurden gerade mal 0.2 % des schweizerischen Strombedarfs mit Windenergie gedeckt (vgl. Abb. 9). In absoluten Zahlen produzieren die 41 Grosswindenergieanlagen[10] in der

[9] https://wind-data.ch/tools/luftdichte.php
[10] Definition Grosswindenergieanlage: Gesamthöhe (Turm und Rotor) >30 m und Leistung >150 kW

Schweiz zusammen jährlich ca. 145 GWh Strom, was in etwa dem Strombedarf von 40'000 Schweizer Durchschnittshaushalten (ca. 3.5 MWh/a) entspricht. Im Kanton Zürich steht bis jetzt noch keine Grosswindenergieanlage.

Selbst kleine Staaten wie Estland, Lettland oder Österreich weisen deutlich mehr installierte WEA auf, was auch für die an die Schweiz grenzenden Regionen in Deutschland, Frankreich und Italien gilt.

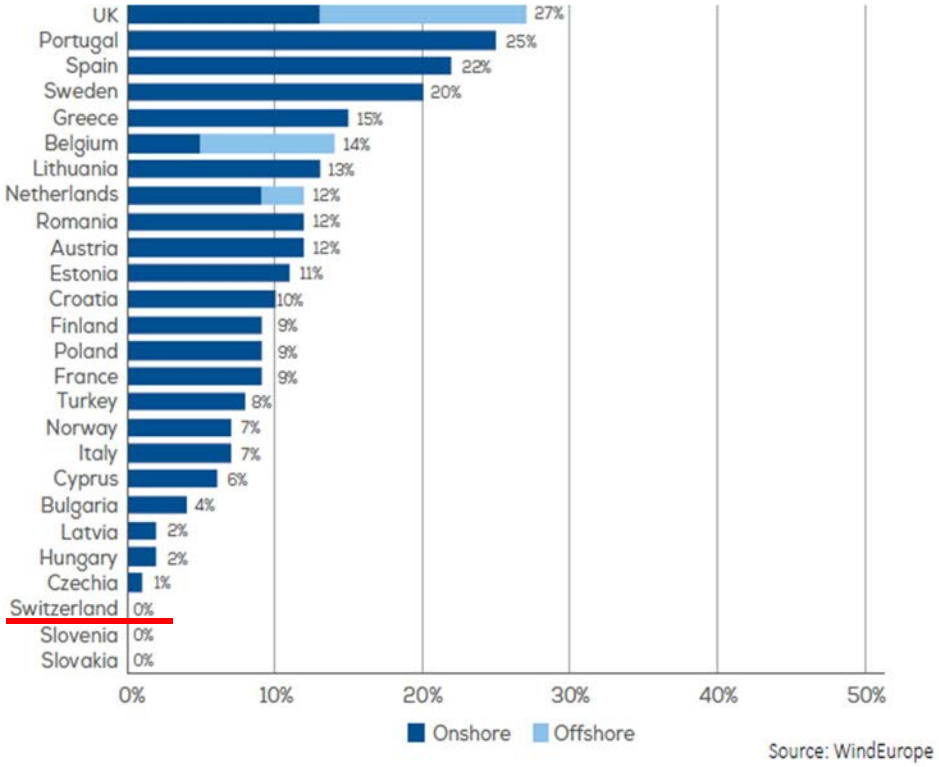


Abb. 9 Deckung des Strombedarfs mit Windenergie
Quelle: WindEurope 2020

Dabei gäbe es gute Gründe, vermehrt auf die Windenergie zu setzen. WEA in der Schweiz können wirtschaftlich betrieben werden und sie produzieren zwei Drittel ihres Stroms im Winterhalbjahr sowie häufig in der Nacht, also genau dann, wenn mehr Heizenergie resp. Strom für die Beleuchtung gebraucht wird. Die Windenergie ist damit eine ideale Ergänzung zu den Wasserkraftwerken und Solaranlagen, die im Sommer am meisten Strom produzieren (vgl. Abb. 10).

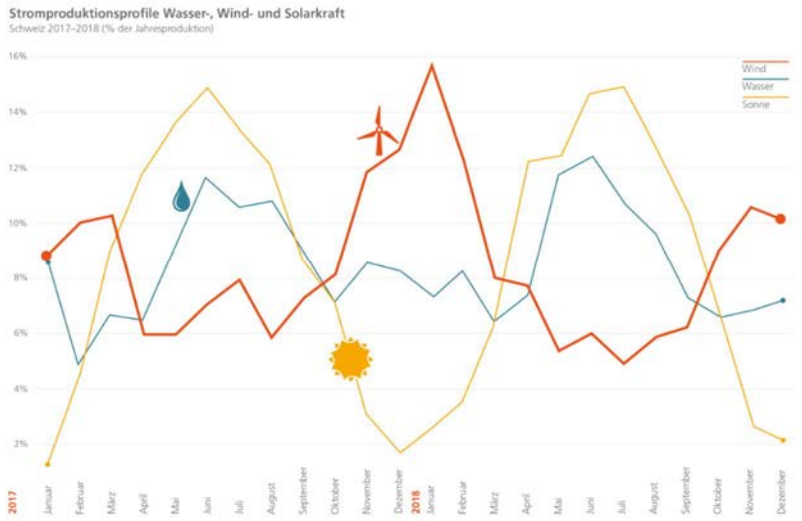


Abb. 10 Stromproduktionsprofile Wasser-, Wind- und Solarenergie
Quelle: https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/windenergie.html

Unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, einer Mindest-Windgeschwindigkeit auf 100 m über Boden (4.5 m/s in einfachem resp. 5 m/s in komplexem Gelände) und ersten groben Machbarkeitsabklärungen konnten die 46 in Abb. 11 kartierten und in Tab. 4 aufgeführten Windpotenzialgebiete identifiziert werden. Vorbehaltskriterien wurden dabei noch keine berücksichtigt.

In den 46 Windpotenzialgebieten könnte ein theoretisches Potenzial von jährlich rund 1'200 GWh Strom erzeugt werden, falls sämtliche zugrunde gelegten ~176 WEA errichtet würden. Damit könnten rund 250'000 typische Schweizer Haushalte oder 550'000 Personen (unter der Annahme von 2.2 Personen/Haushalt) mit Strom versorgt werden. Da erfahrungsgemäss die Gebiete nicht mit der gesamtmöglichen Anzahl WKA bestückt werden können, ist von einem tieferen Jahresertrag auszugehen, welcher bei geschätzten 800 GWh liegen würde. Zum Vergleich: Der Orientierungsrahmen für den Kanton Zürich beträgt gemäss natio-naler Windpotenzialabschätzung 883 GWh/a (Bundesamt für Energie BFE, 2022).

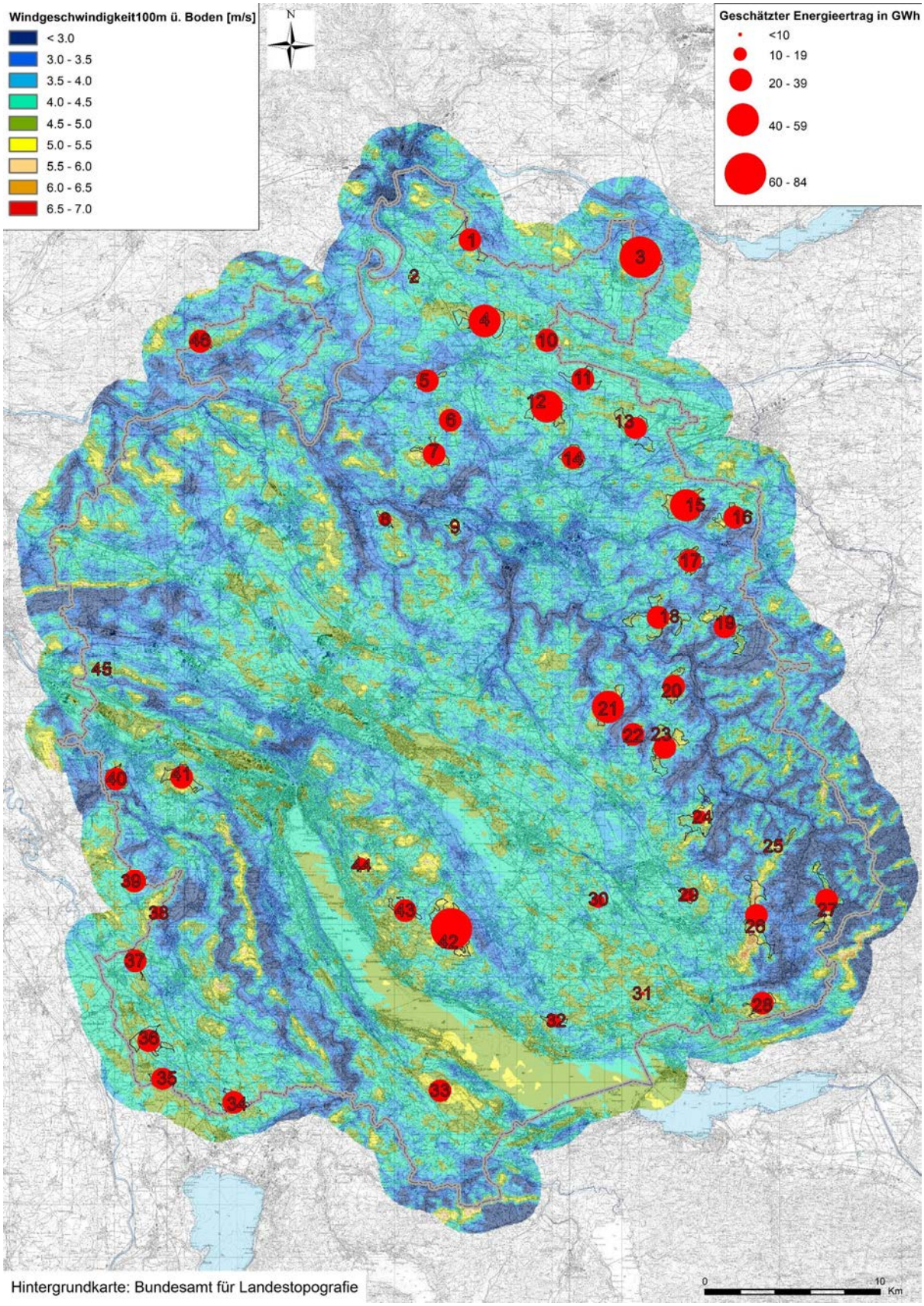


Abb. 11 Übersicht der 46 "Windpotenzialgebiete nach Machbarkeit" mit abgeschätztem jährlichem Energieertrag
Karte in höherer Auflösung siehe Anhang

Nr.	Name	Anzahl WEA	Energieertrag [GWh/a]
1	Cholfirst	3	26
2	Im Berg (Marthalen)	1	8
3	Stammerberg	8	64
4	Kleinandelfingen	6	46
5	Schwerzenberg	3	22
6	Bergbuck	3	24
7	Wolschberg	4	33
8	Blauen	2	16
9	Berenberg	1	9
10	Ossingen (Oberholz)	3	26
11	Thalheim	3	25
12	Berg (Dägerlen)	5	41
13	Rickenbach (Oberholz)	4	32
14	Eschberg	3	21
15	Zünikon	6	48
16	Hagenbuch (Schneitberg)	3	24
17	Elgg (Guegenhard)	3	28
18	Nussberg	10	30
19	Schauenberg	7	22.5
20	Luegeten	3	22
21	Furtbühl	5	40
22	Schlossberg	3	22
23	Hermatswil	4	30
24	Stoffel	6	18
25	Baschlisgipfel	3	9
26	Bachtel	7	29
27	Hüttchopf-Brandegg	7	21
28	Batzberg	3	26
29	Schönwis	2	16
30	Altenberg	2	16
31	Hombergchropf	1	8.5
32	Obsirain	2	16
33	Wädenswiler Berg	3	30
34	Uerzlikon	4	29
35	Rotenberg	4	29

Nr.	Name	Anzahl WEA	Energieertrag [GWh/a]
36	Maschwanden (Haltenrain)	4	30
37	Ottenbach (Isenberg)	3	24
38	Himelsbüel	2	16
39	Chüewald	3	22.5
40	Honeret	3	22.5
41	Buechhoger	4	32
42	Pfannenstiel	10	84
43	Küsnachter Berg	3	25
44	Zollikerberg	2	17
45	Hüttikerberg	2	6
46	Gnüll	3	24
Total		**176**	**1'210**

Tab. 4 Theoretisches Potenzial der Windkraft

5. Standortsteckbriefe

Nr. 1 Cholfirst

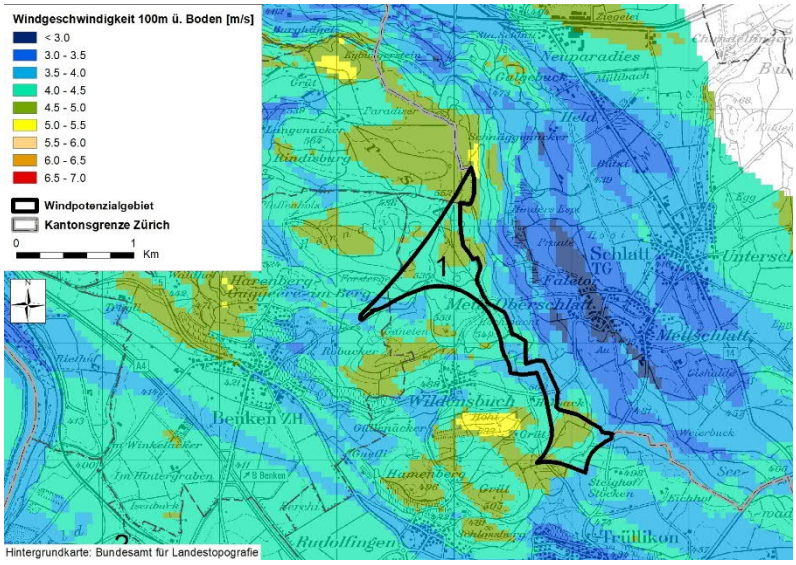


Abb. 12 Windressourcen

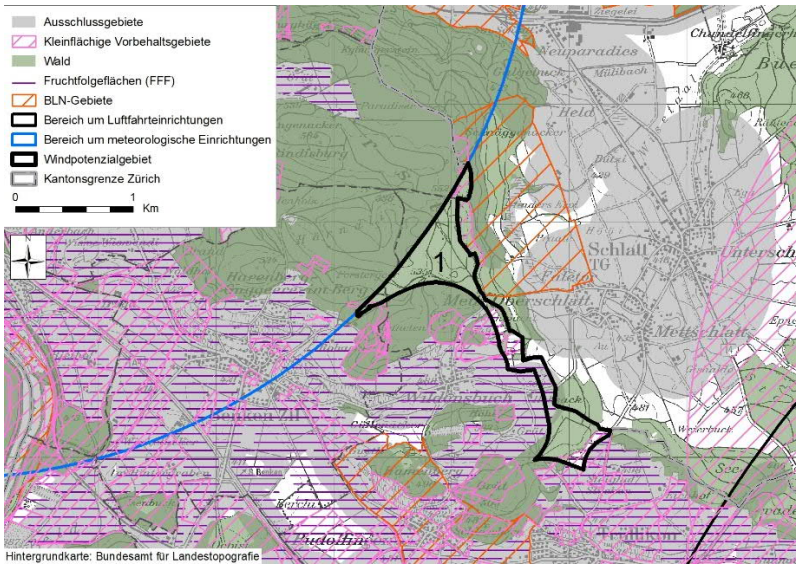


Abb. 13 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Trüllikon, Benken, Laufen-Uhwiesen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (5-7 km), Wald, BLN angrenzend, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone, Offenland: FFF
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	26 GWh

Tab. 5 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 2 Im Berg (Marthalen)

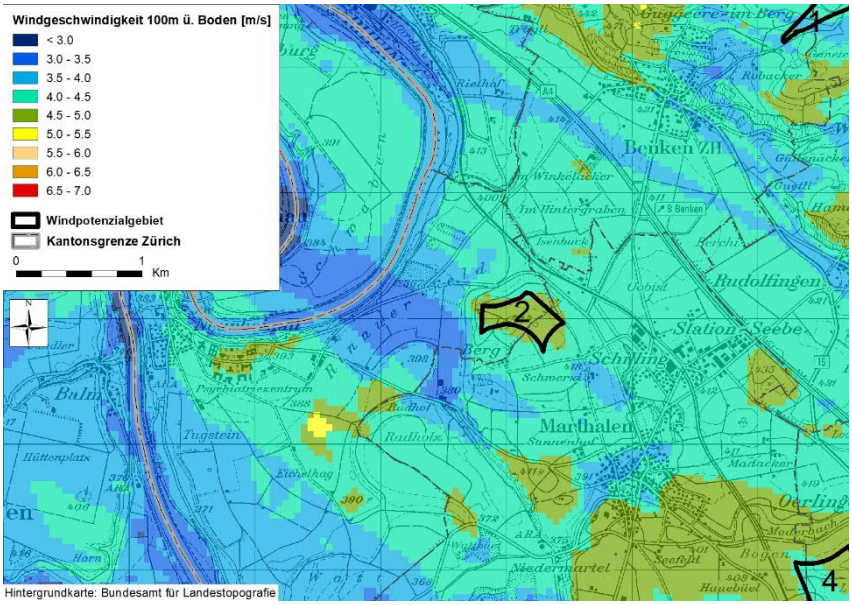


Abb. 14 Windressourcen

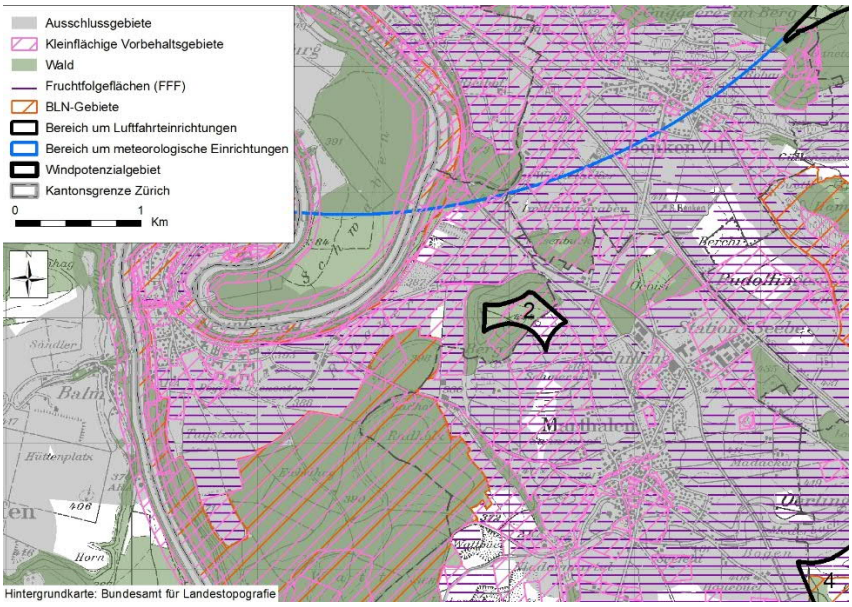


Abb. 15 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Marthalen, Rheinau
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (6 km), Wald, teilweise Archäologische Zone, Wildtierkorridor, Offenland: FFF
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	1
Geschätzter Energieertrag (netto)	8 GWh

Tab. 6 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 3 Stammerberg

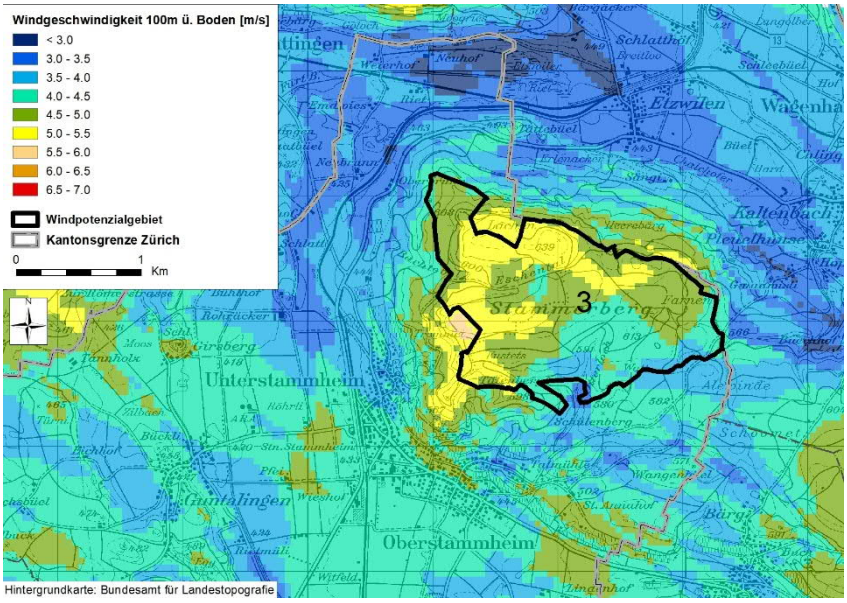


Abb. 16 Windressourcen

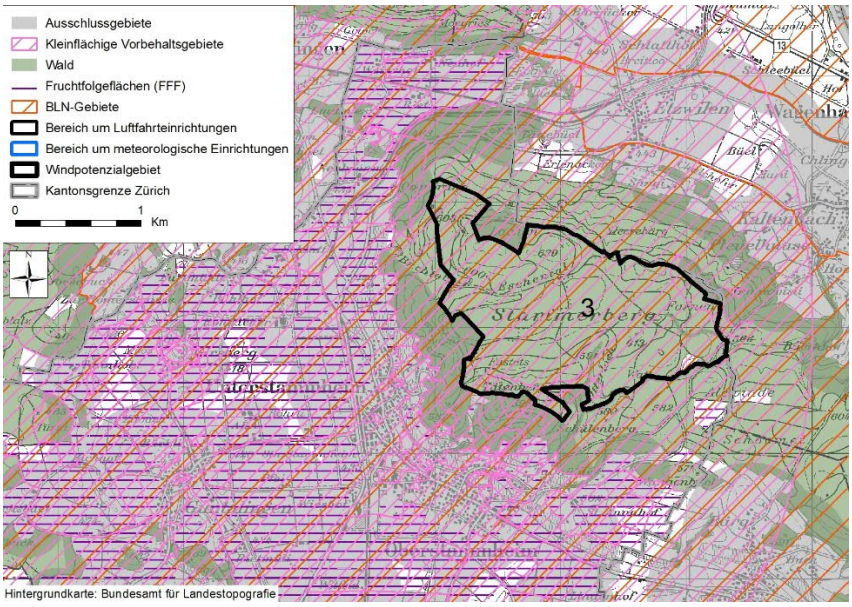


Abb. 17 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Stammheim
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (14-16 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (5-7 km), Wald, BLN, Rotmilan-Massenschlafplatz (2-4 km), Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	8
Geschätzter Energieertrag (netto)	64 GWh

Tab. 7 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 4 Kleinandelfingen

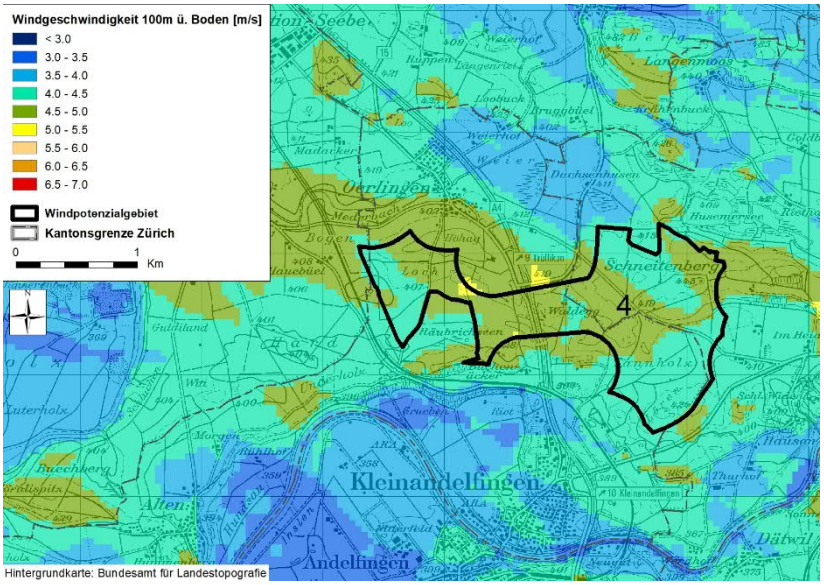


Abb. 18 Windressourcen

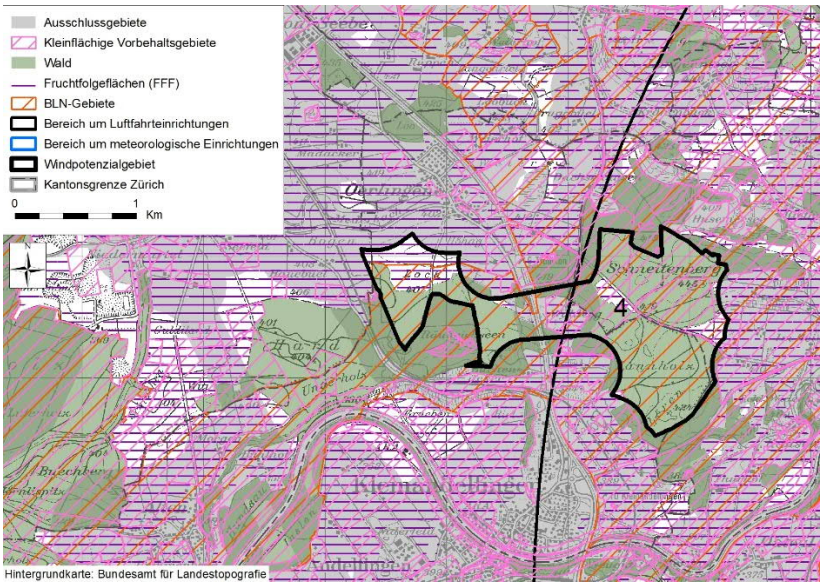


Abb. 19 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Kleinandelfingen, Ossingen, Marthalen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (9-11 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (9-12 km), Wald, BLN, Wildtierkorridor, Offenland: FFF, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	6
Geschätzter Energieertrag (netto)	46 GWh

Tab. 8 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 5 Schwerzenberg

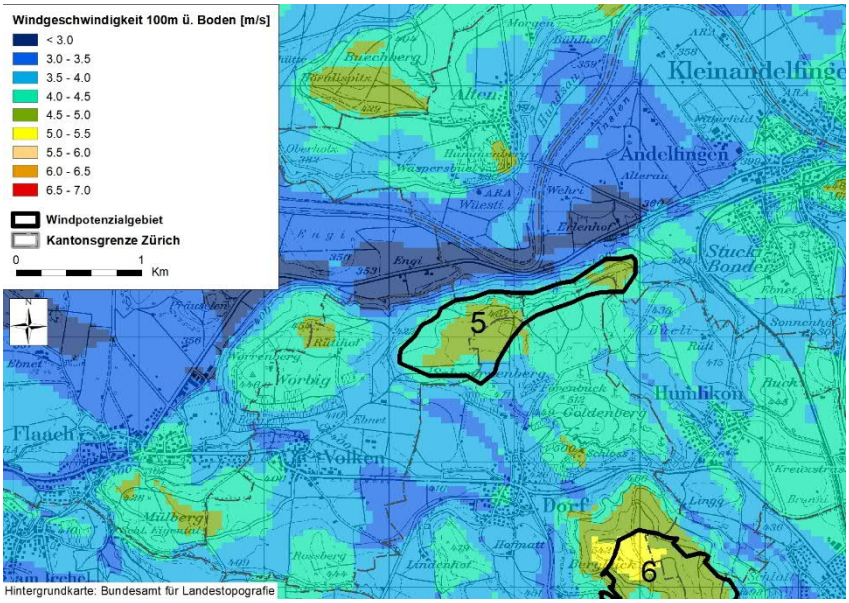


Abb. 20 Windressourcen

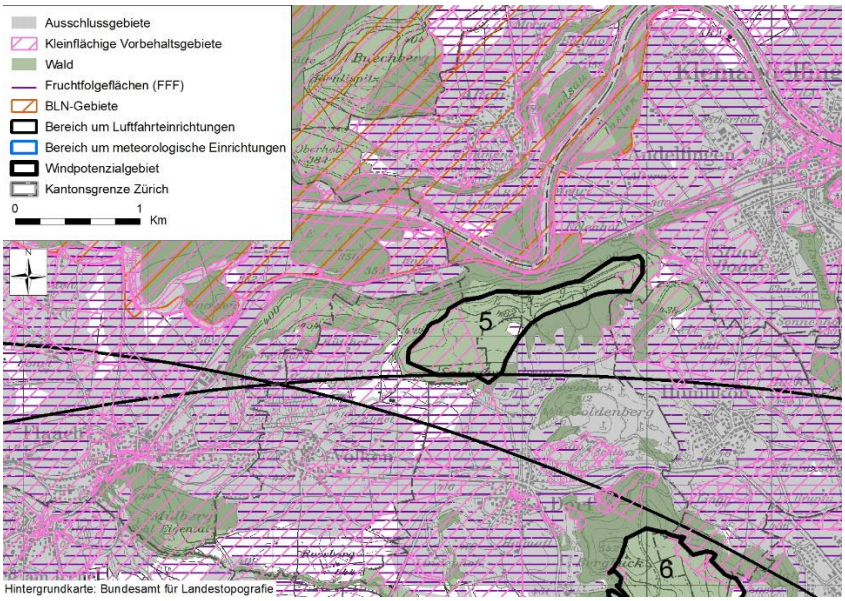


Abb. 21 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Dorf, Volken, Andelfingen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (12 km), Flugplatz Dübendorf (20 km), Wald, Rotmilan-Massenschlafplatz (5 km), Wildtierkorridor angrenzend, Offenland: FFF
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	22 GWh

Tab. 9 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 6 Bergbuck

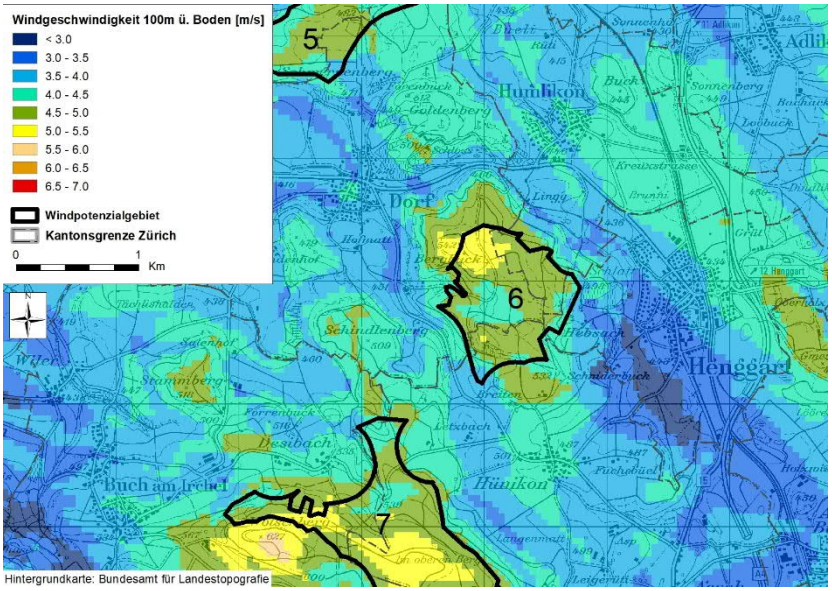


Abb. 22 Windressourcen

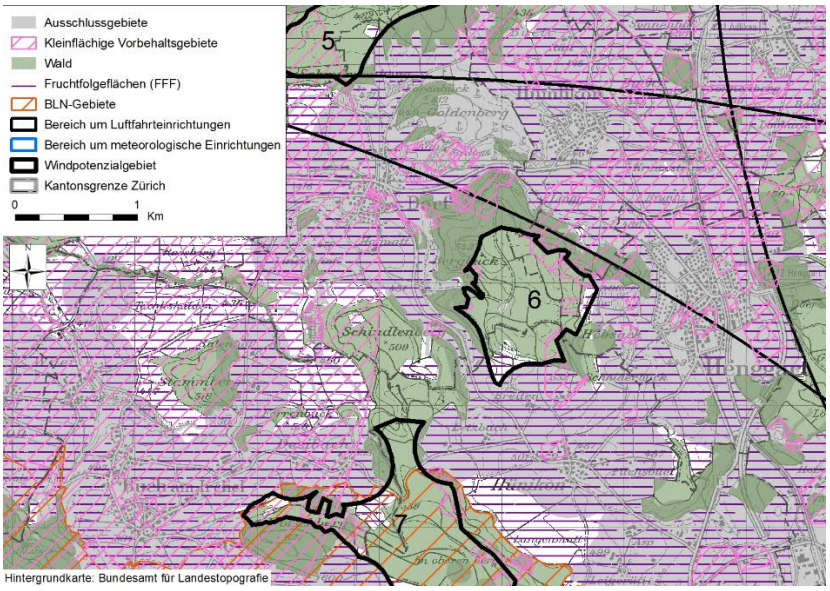


Abb. 23 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Dorf, Humlikon, Neftenbach
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (14-15 km), Primärradar Holberg (14-15 km), Flugplatz Dübendorf (18 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, Offenland: FFF, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	24 GWh

Tab. 10 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 7 Wolschberg

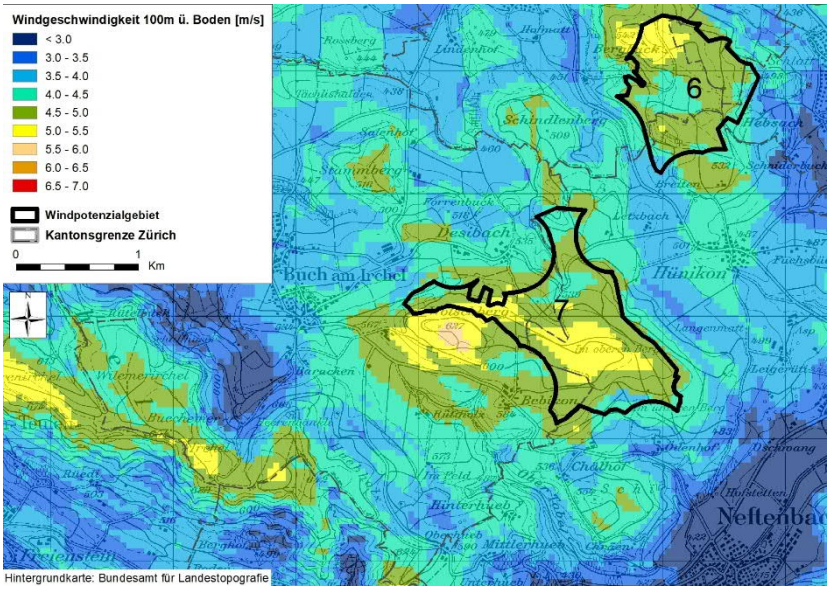


Abb. 24 Windressourcen

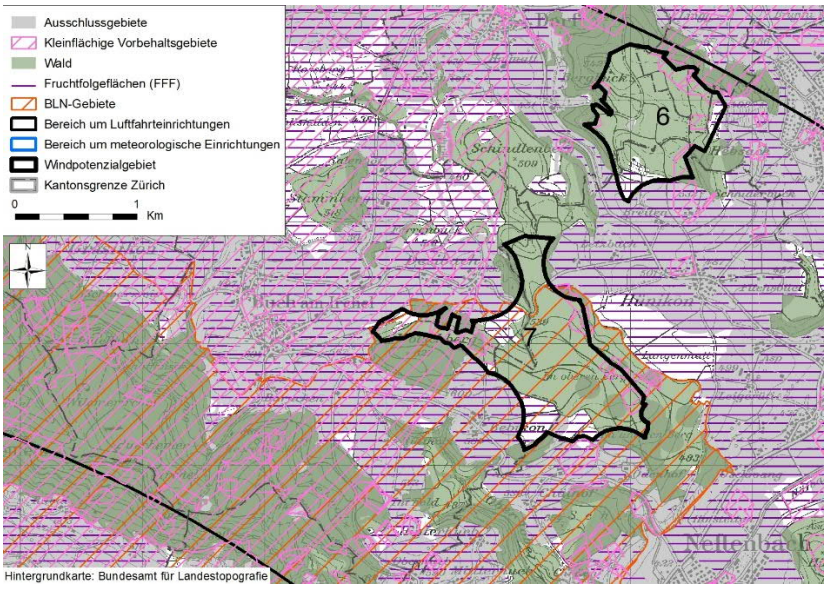


Abb. 25 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Neftenbach, Buch am Irchel
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (15-17 km), Primärradar Holberg (12-13 km), Flugplatz Dübendorf (15 km), Wald, BLN, Rotmilan-Massenschlafplatz (5 km), Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	33 GWh

Tab. 11 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 8 Blauen

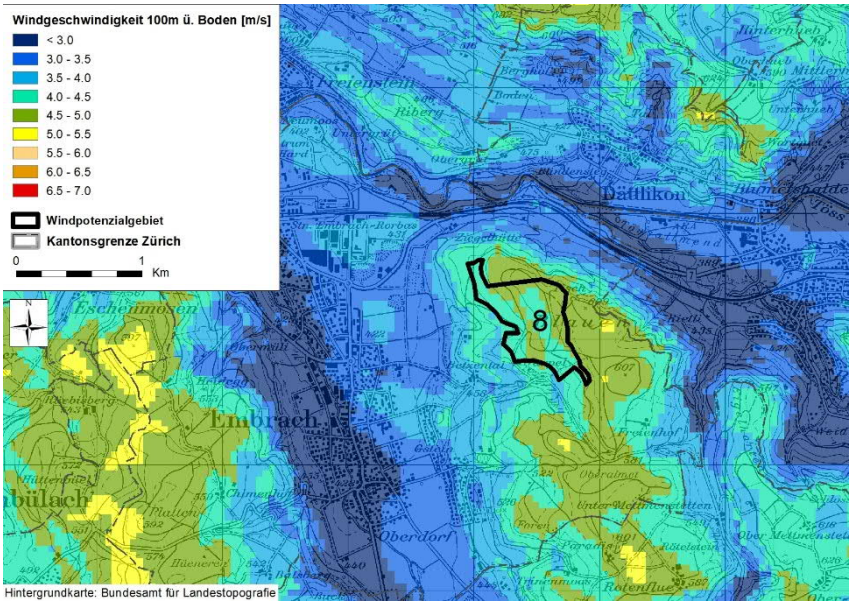


Abb. 26 Windressourcen

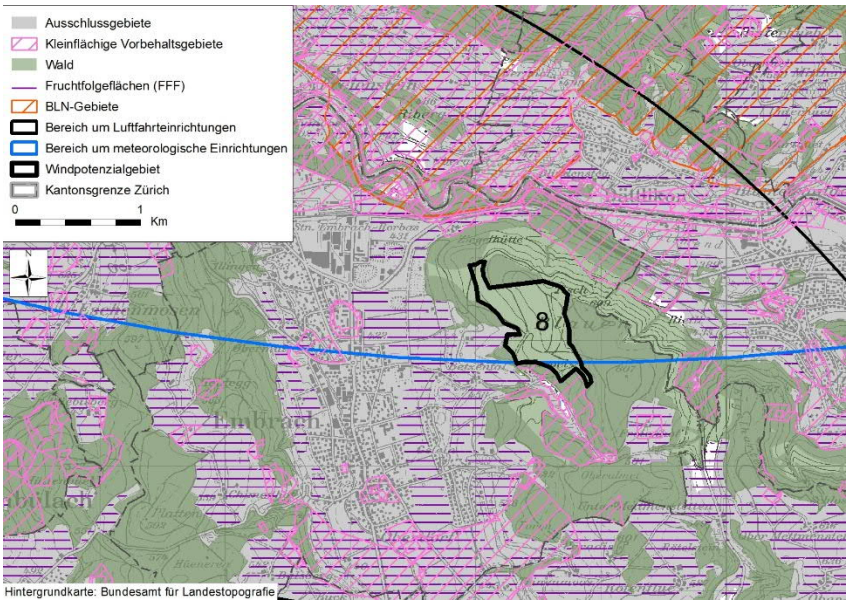


Abb. 27 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Embrach
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (20 km), Primärradar Holberg (7-8 km), Drehfunkfeuer Kloten (7-8 km), Flugplatz Dübendorf (12-13 km), Wald
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	16 GWh

Tab. 12 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 9 Berenberg

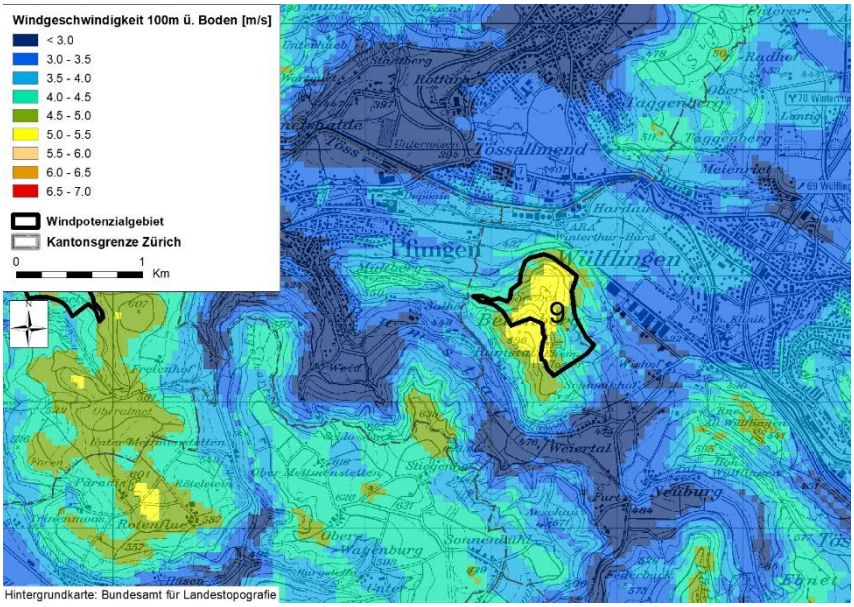


Abb. 28 Windressourcen

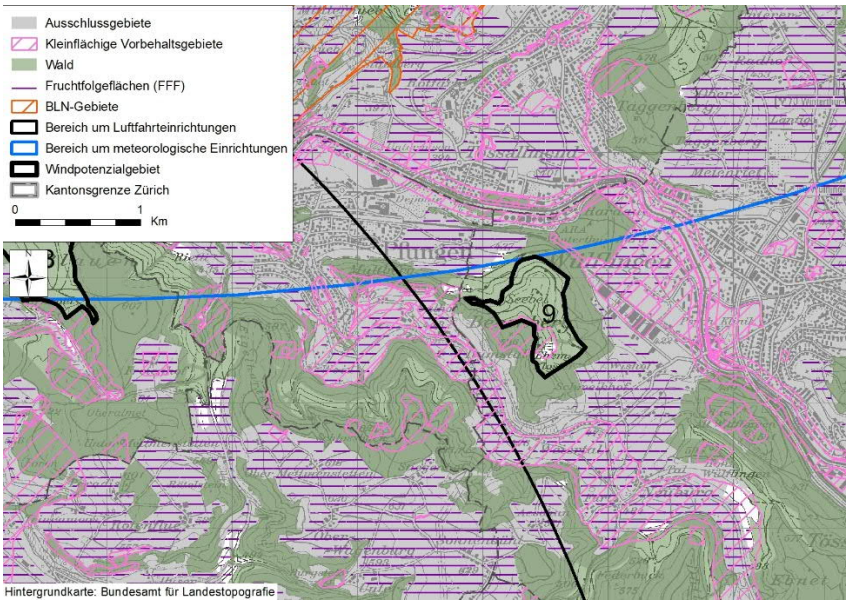


Abb. 29 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Winterthur
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (9-10 km), Drehfunkfeuer Kloten (10-11 km), Flugplatz Dübendorf (11-12 km), Wald, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	1
Geschätzter Energieertrag (netto)	9 GWh

Tab. 13 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 10 Ossingen (Oberholz)

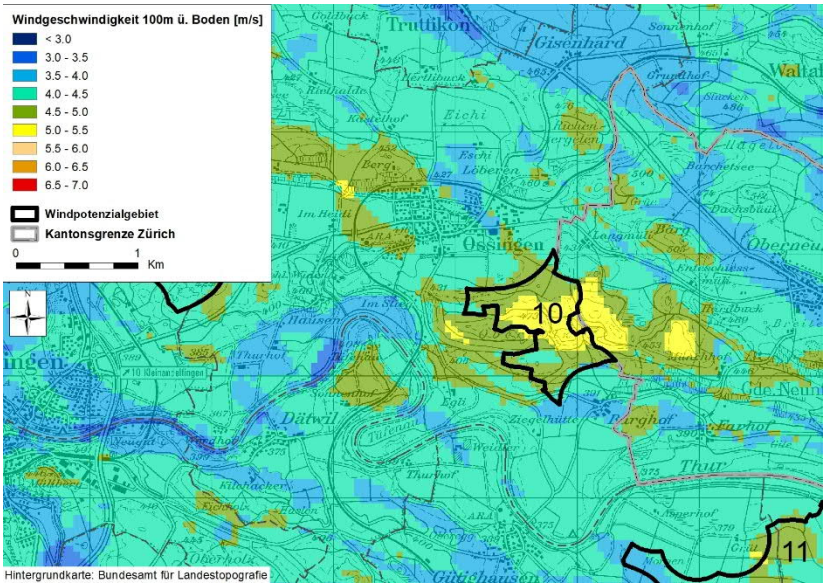


Abb. 30 Windressourcen

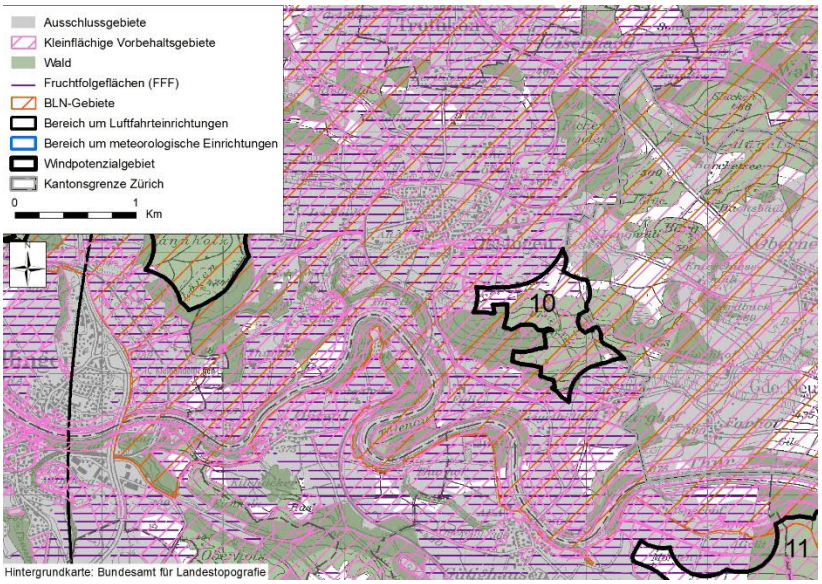


Abb. 31 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Ossingen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (13-14 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (6-7 km), Wald, BLN, Rotmilan-Massenschlafplatz (4-5 km), Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend, kant. Landschaftsschutzobjekt
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	26 GWh

Tab. 14 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 11 Thalheim

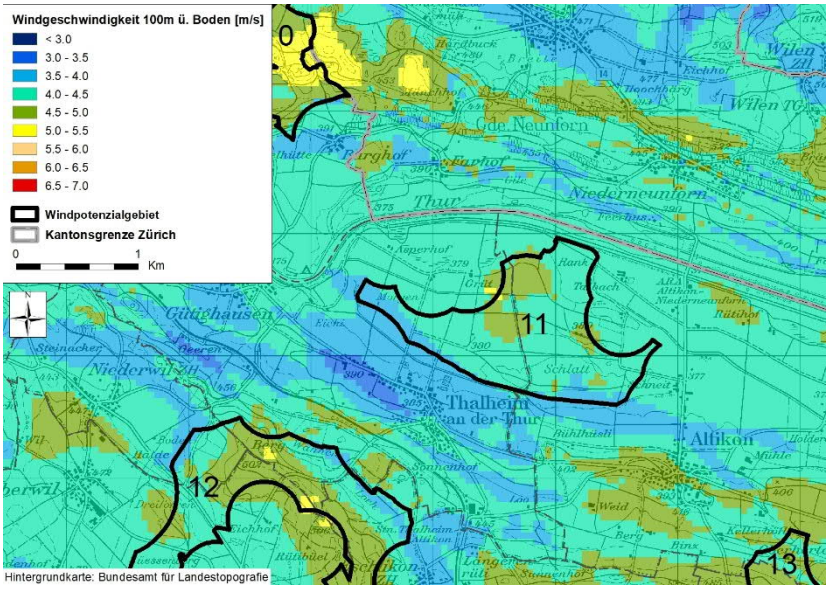


Abb. 32 Windressourcen

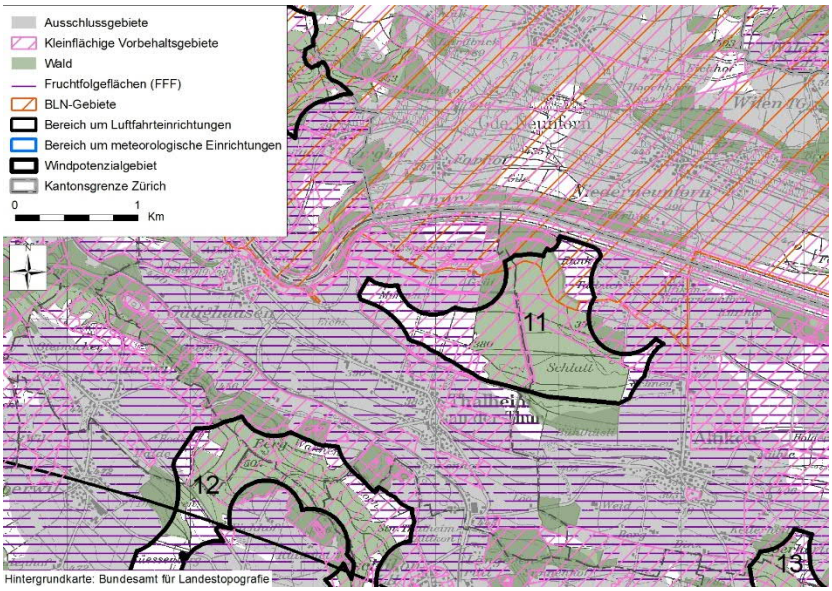


Abb. 33 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Thalheim an der Thur, Altikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (15-17 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (3-5 km), Wald, BLN (Nordteil), Offenland: FFF, Wildtierkorridor (Nordteil), teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	25 GWh

Tab. 15 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 12 Berg (Dägerlen)

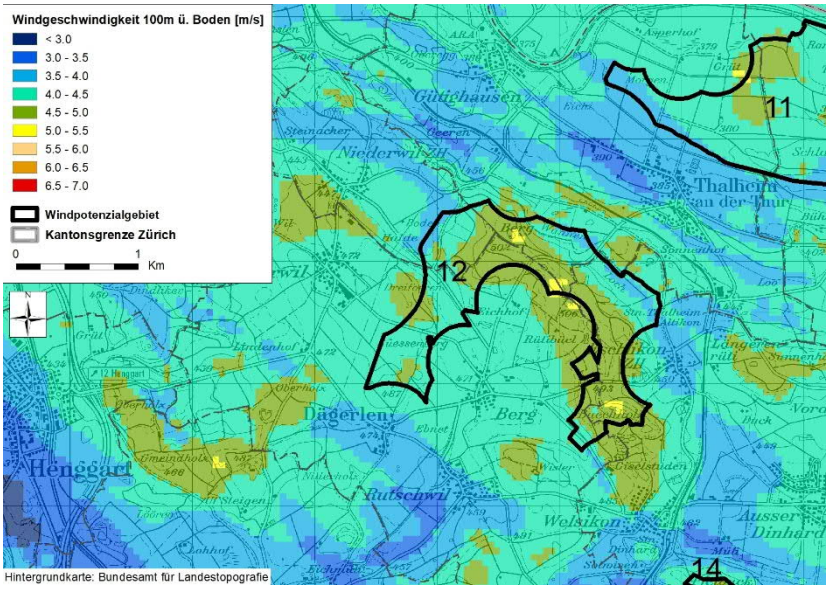


Abb. 34 Windressourcen

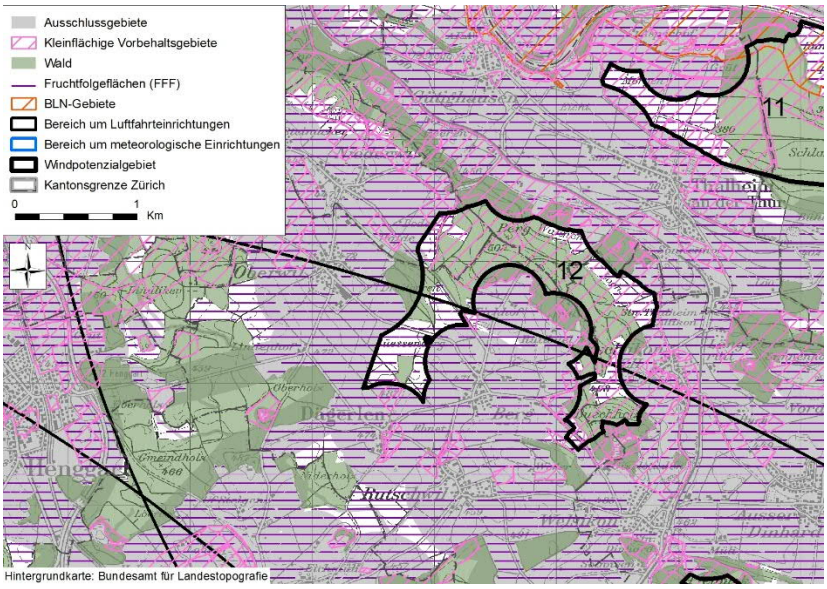


Abb. 35 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Dägerlen, Adlikon, Thalheim an der Thur, Dinhard
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (15-17 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (6-8 km), Flugplatz Dübendorf (19-21 km), Wald, Offenland: FFF, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	5
Geschätzter Energieertrag (netto)	41 GWh

Tab. 16 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 13 Rickenbach (Oberholz)

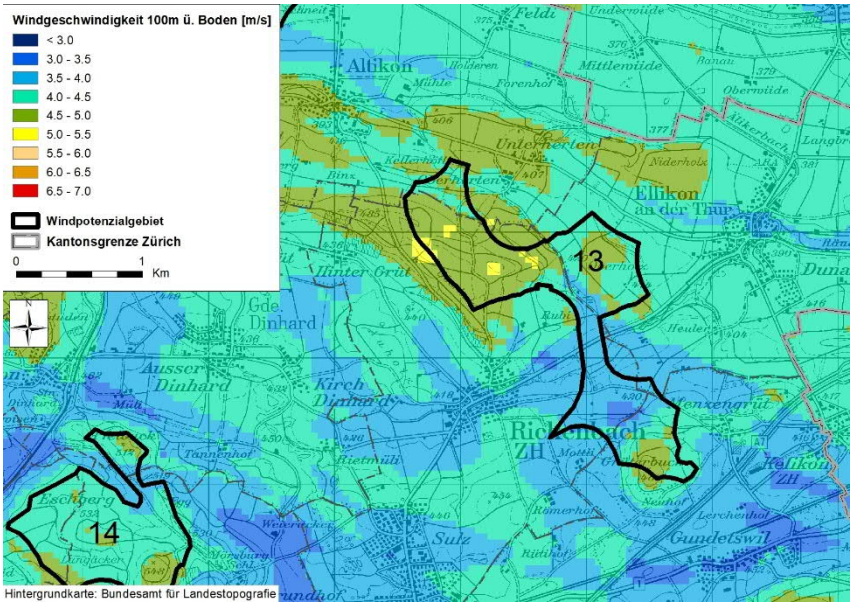


Abb. 36 Windressourcen

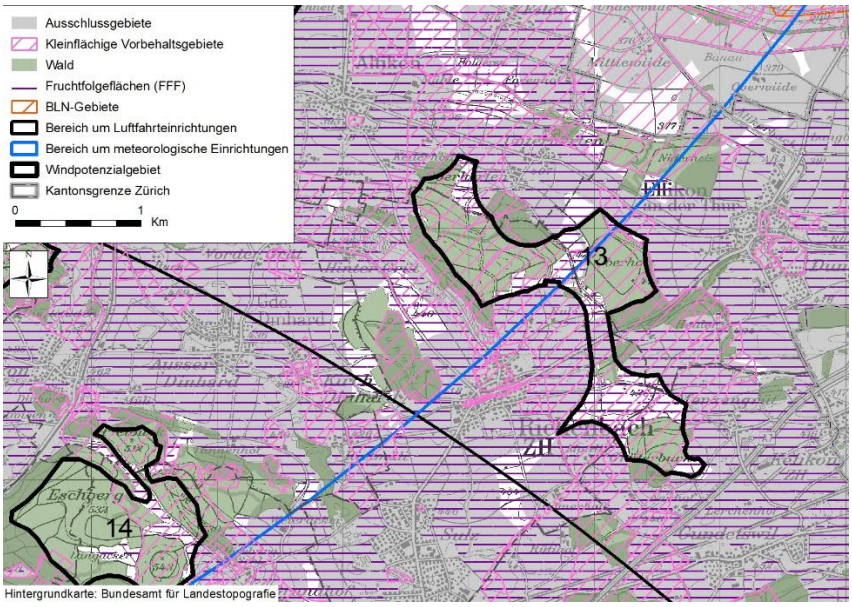


Abb. 37 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Rickenbach, Ellikon an der Thur, Altikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (19-20 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (3-4 km), Wald, Offenland: FFF, Wildtierkorridor, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	32 GWh

Tab. 17 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 14 Eschberg

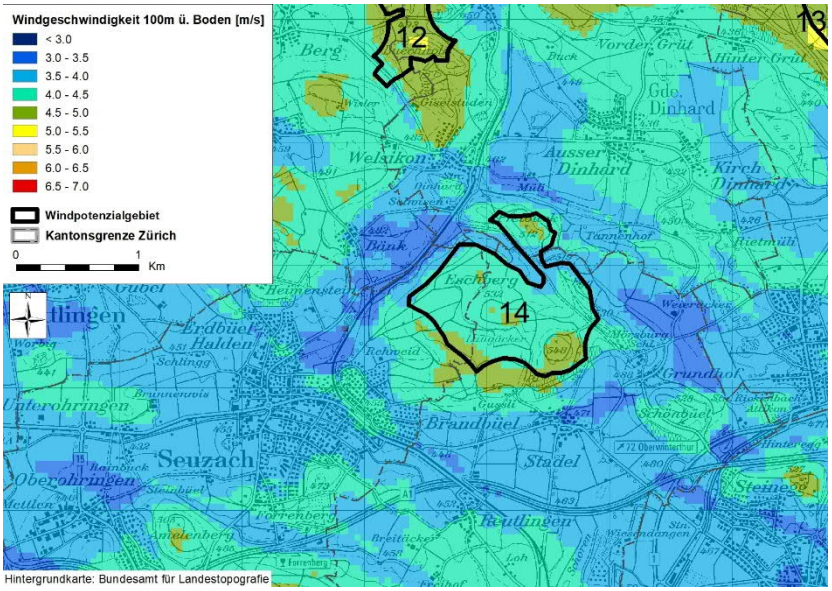


Abb. 38 Windressourcen

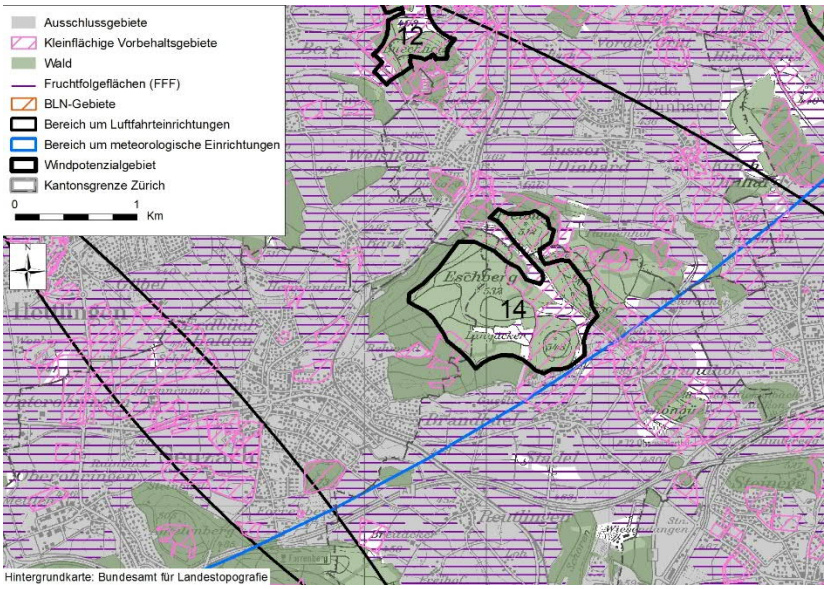


Abb. 39 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Winterthur, Seuzach, Dinhard
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (19-20 km), Drehfunkfeuer Trüttlikon (6-8 km), Flugplatz Dübendorf (17-19 km), Wald, Offenland: FFF, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	21 GWh

Tab. 18 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 15 Zünikon

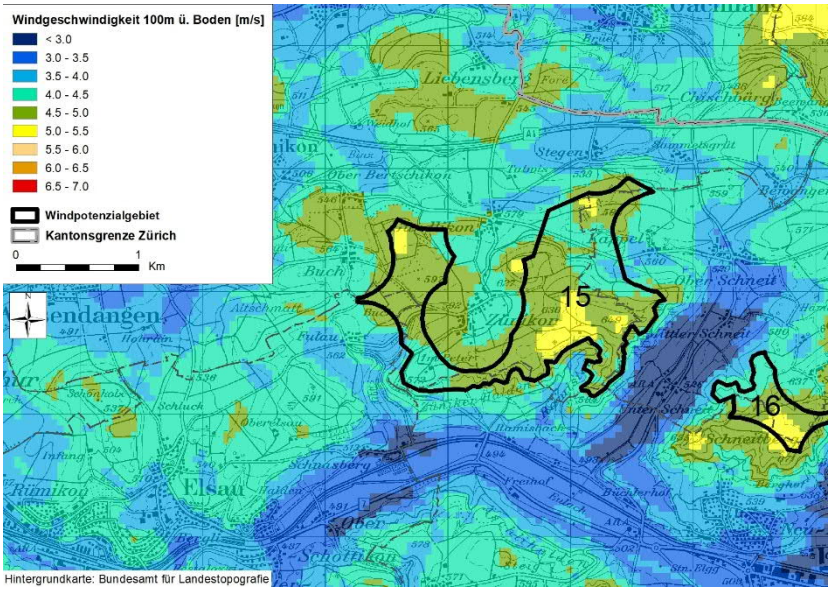


Abb. 40 Windressourcen

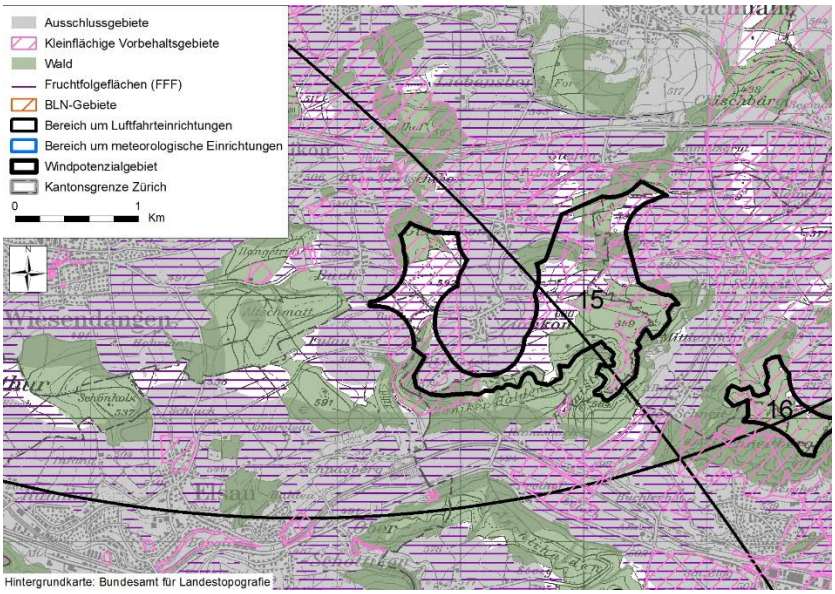


Abb. 41 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Wiesendangen, Elsau, Elgg, Hagenbuch
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Drehfunkfeuer Trüttlikon (8-9 km), Flugplatz Dübendorf (19-21 km), Wald, Offenland: FFF, Wildtierkorridor, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	6
Geschätzter Energieertrag (netto)	48 GWh

Tab. 19 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 16 Hagenbuch (Schneitberg)

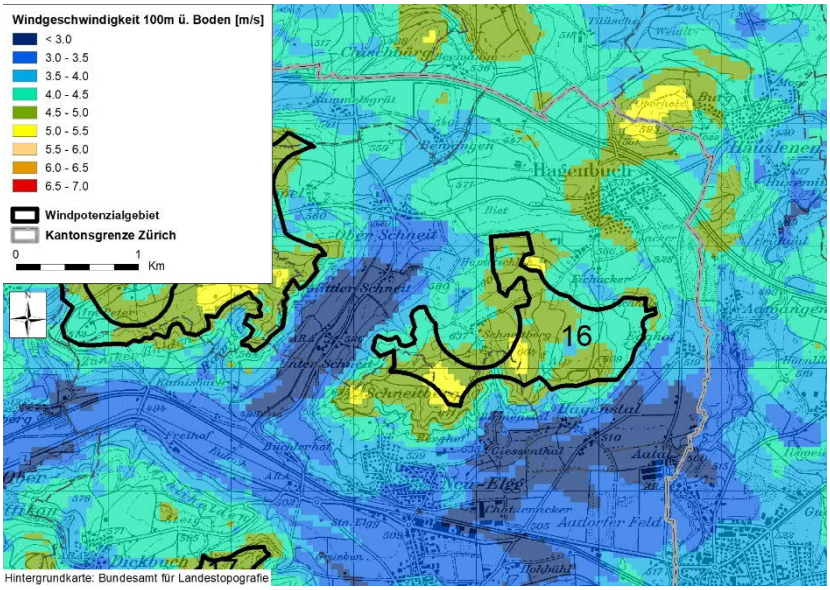


Abb. 42 Windressourcen

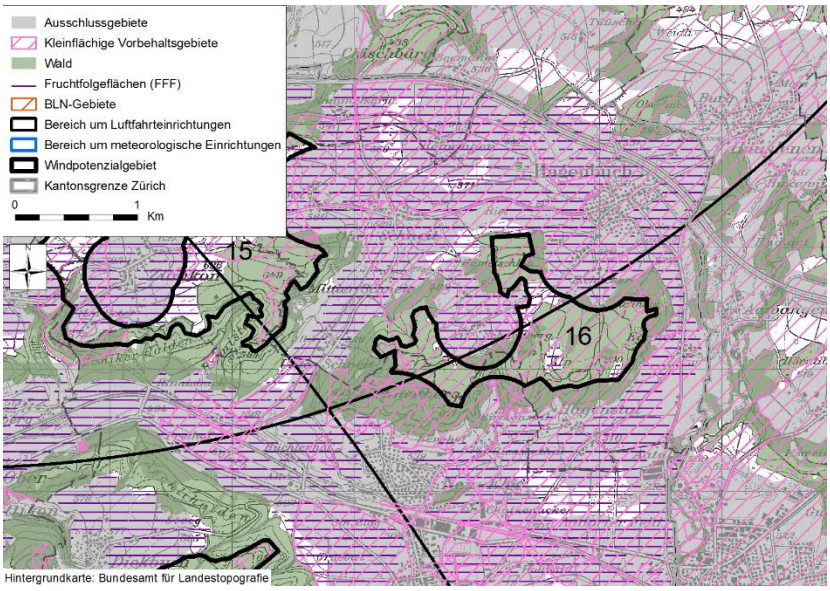


Abb. 43 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Hagenbuch, Elgg
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Drehfunkfeuer Trüttlikon (9-10 km), Wald, Rotmilan-Massenschlafplatz (3-5 km), Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	24 GWh

Tab. 20 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 17 Elgg (Guegenhard)

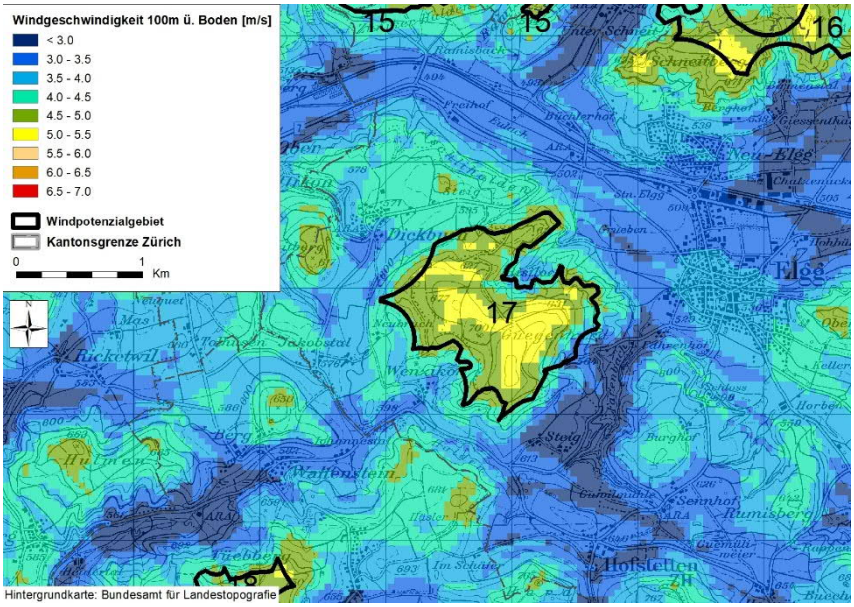


Abb. 44 Windressourcen

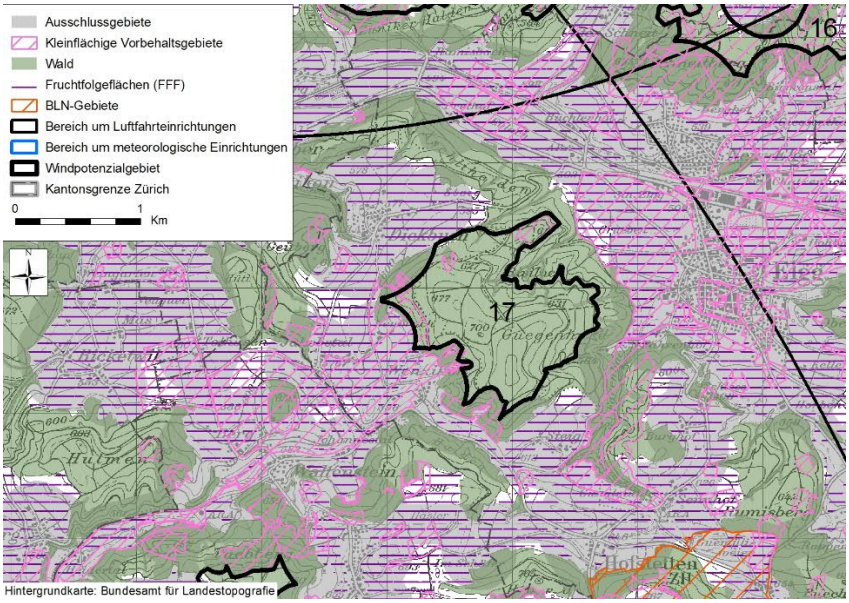


Abb. 45 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Elgg
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (17-19 km), Wald, kant. Landschaftsschutzobjekt angrenzend, teilweise Archäologische Zone, kleine Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	28 GWh

Tab. 21 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 18 Nussberg

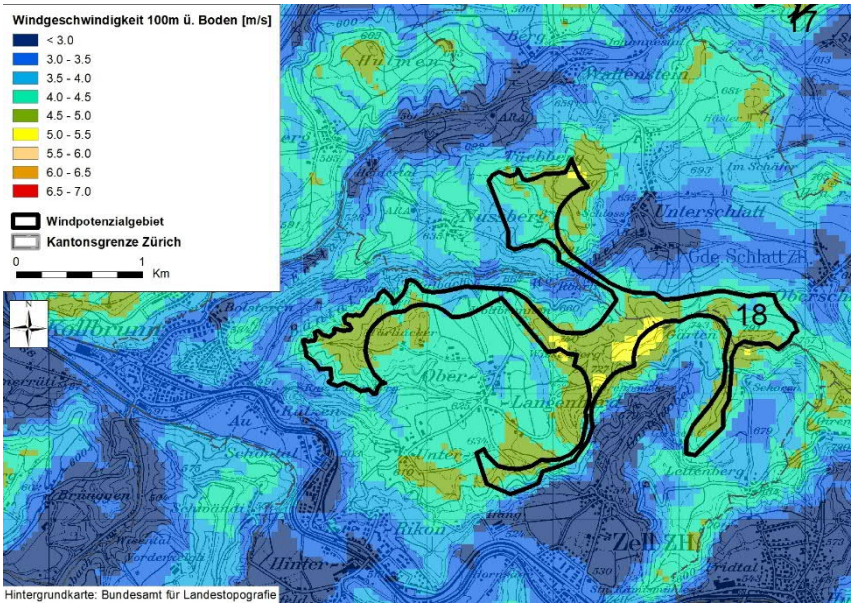


Abb. 46 Windressourcen

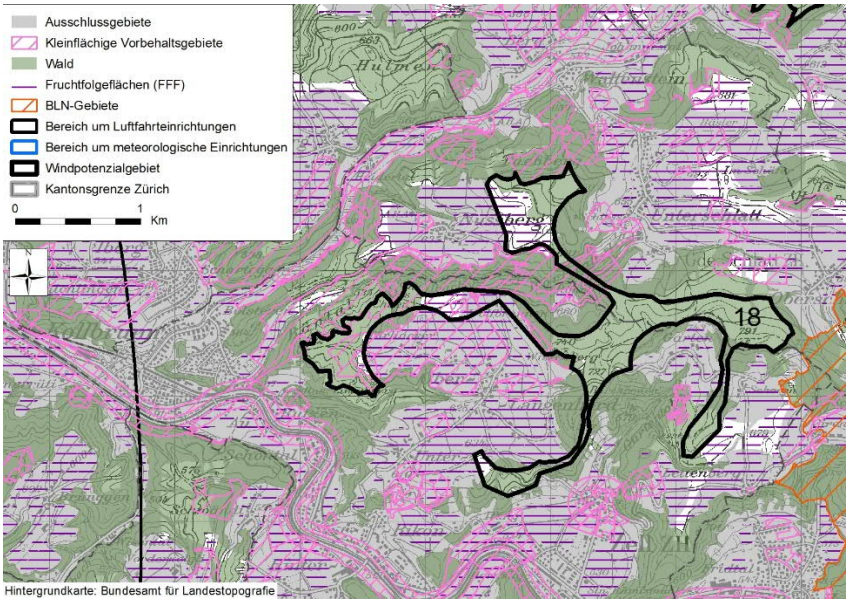


Abb. 47 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Schlatt (ZH), Zell (ZH)
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (13-16 km), Wald, Offenland: FFF, kant. Landschaftsschutzobjekt angrenzend, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	10
Geschätzter Energieertrag (netto)	30 GWh

Tab. 22 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 19 Schauenberg

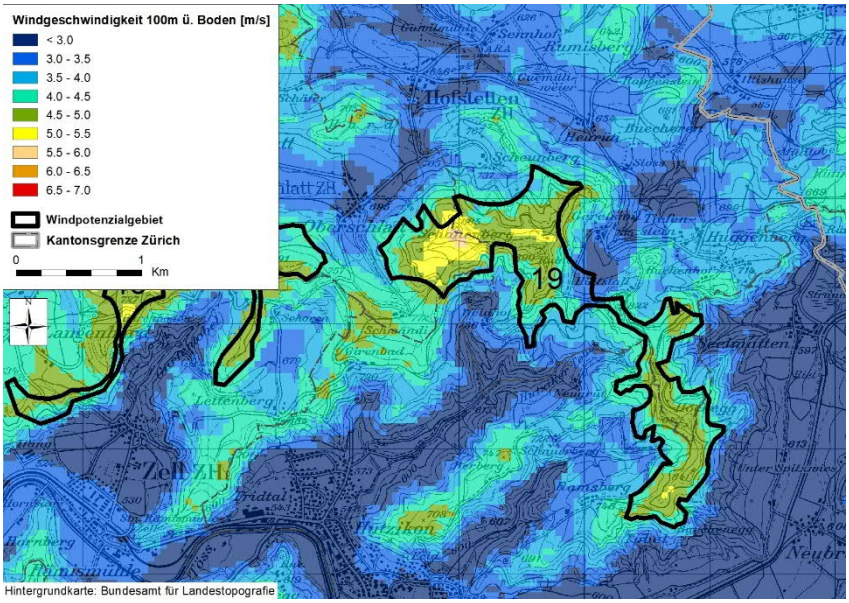


Abb. 48 Windressourcen

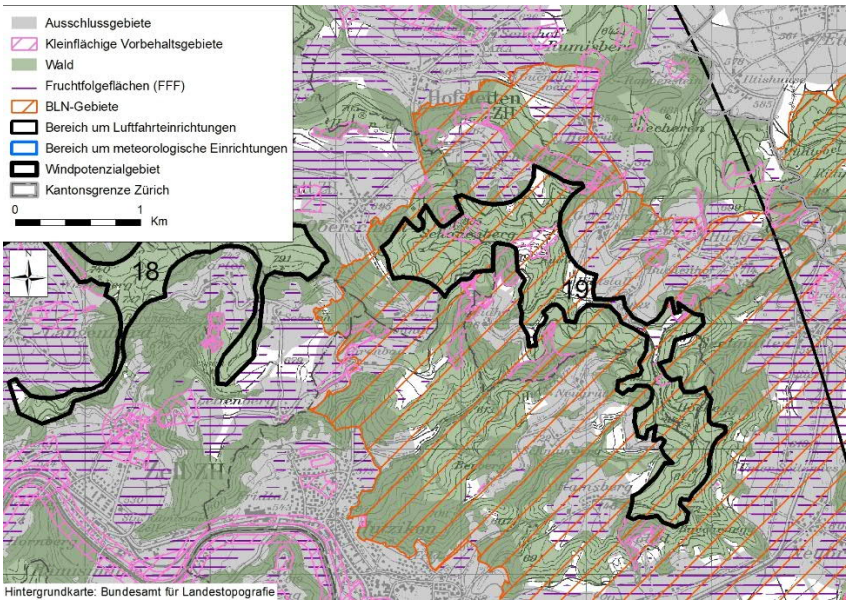


Abb. 49 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Schlatt (ZH), Elgg, Turbenthal
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (16-19 km), Wald, BLN, teilweise Archäologische Zone, kleine Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	7
Geschätzter Energieertrag (netto)	22.5 GWh

Tab. 23 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 20 Luegeten

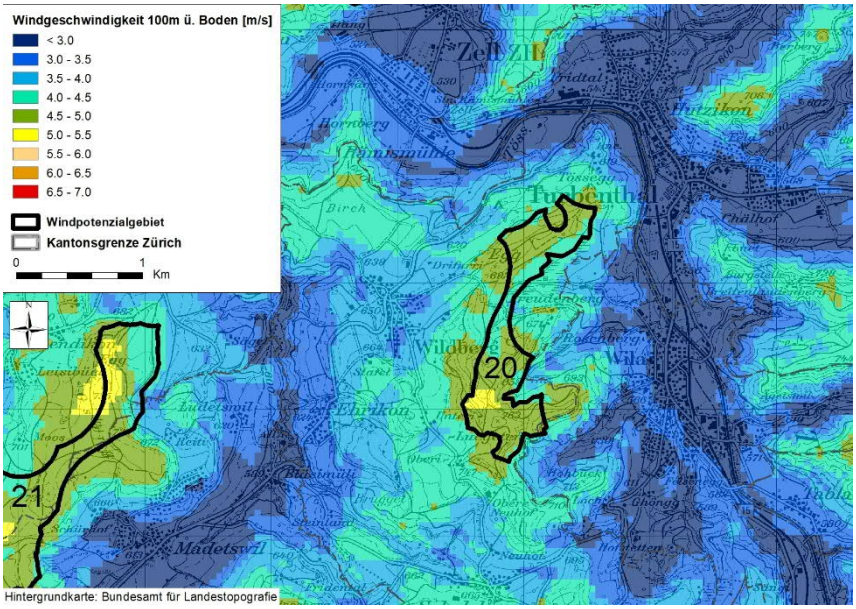


Abb. 50 Windressourcen

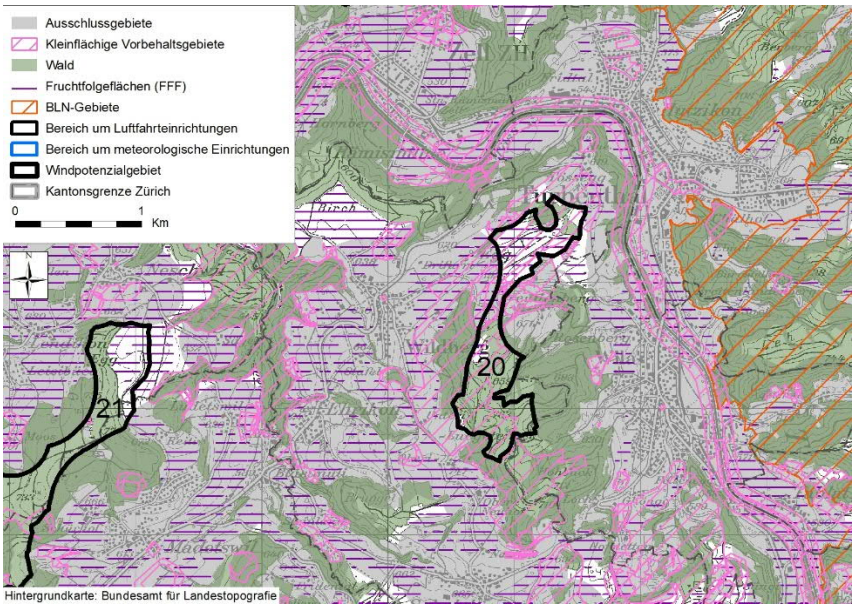


Abb. 51 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Wildberg
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (13-15 km), Wald, Offenland: FFF, kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	22 GWh

Tab. 24 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 21 Furtbühl

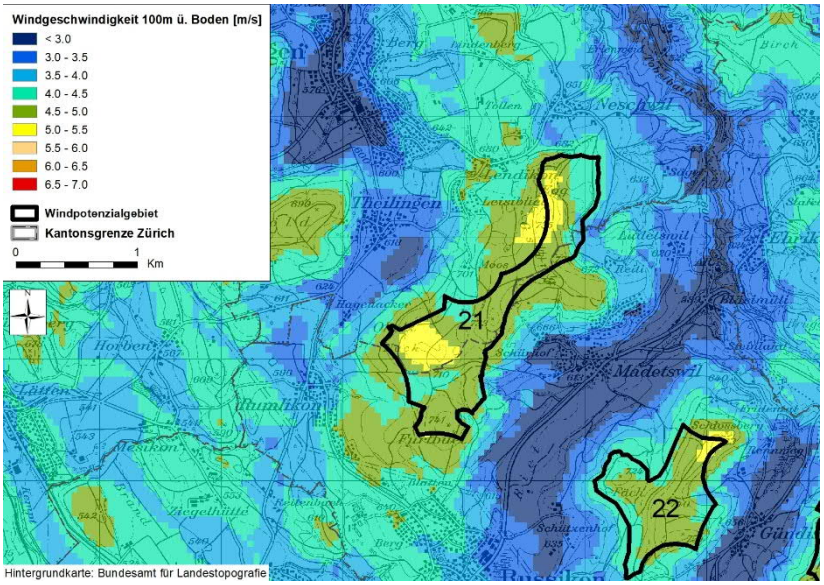


Abb. 52 Windressourcen

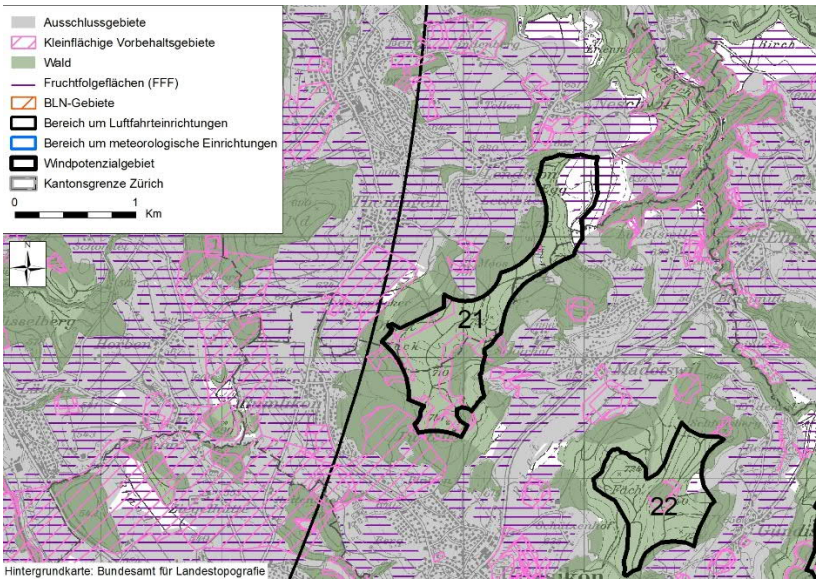


Abb. 53 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Weisslingen, Russikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Wald, teilweise Grundwasserschutzzone, kleine Archäologische Zone, kleinräumiges SVO-Objekt, Primärradar Holberg (15-16 km), Flugplatz Dübendorf (9-11 km), Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	5
Geschätzter Energieertrag (netto)	40 GWh

Tab. 25 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 22 Schlossberg

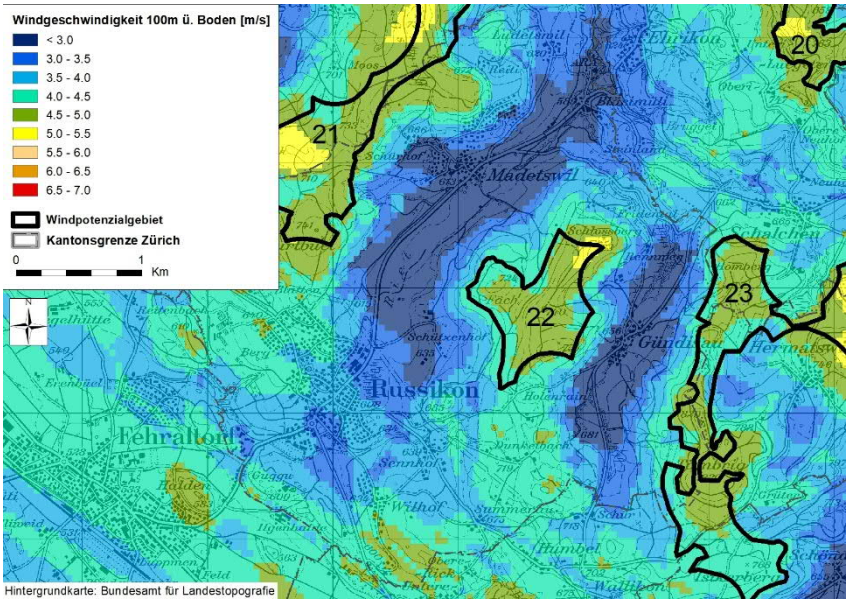


Abb. 54 Windressourcen

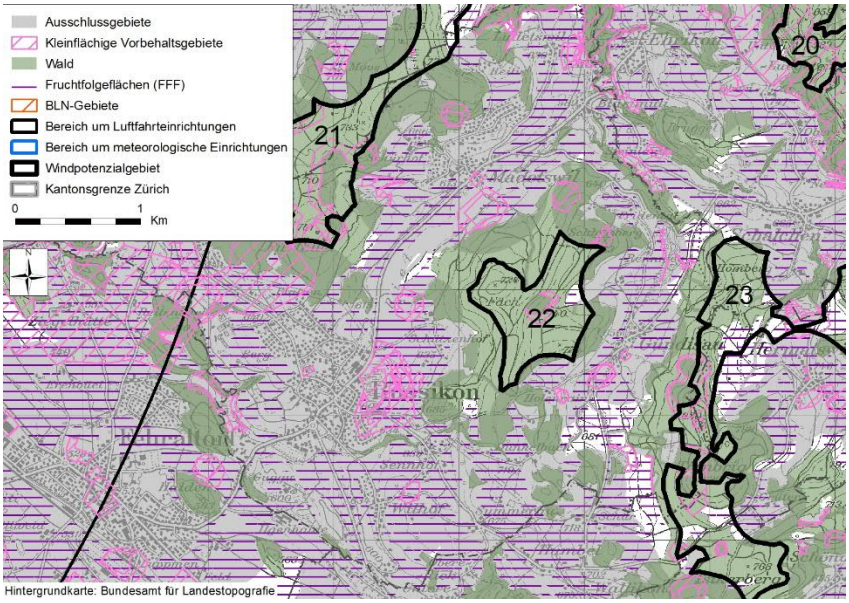


Abb. 55 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Russikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (11-12 km), Wald, Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	22 GWh

Tab. 26 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 23 Hermatswil

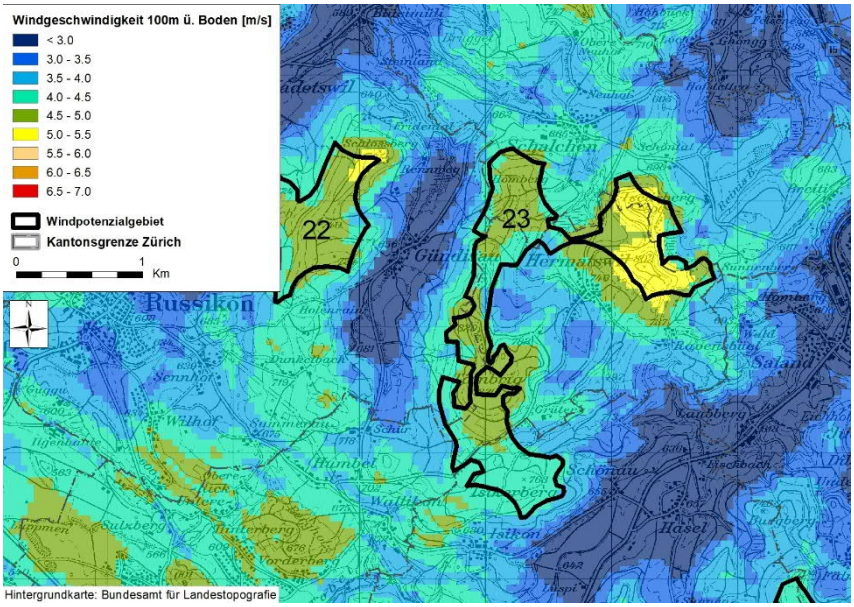


Abb. 56 Windressourcen

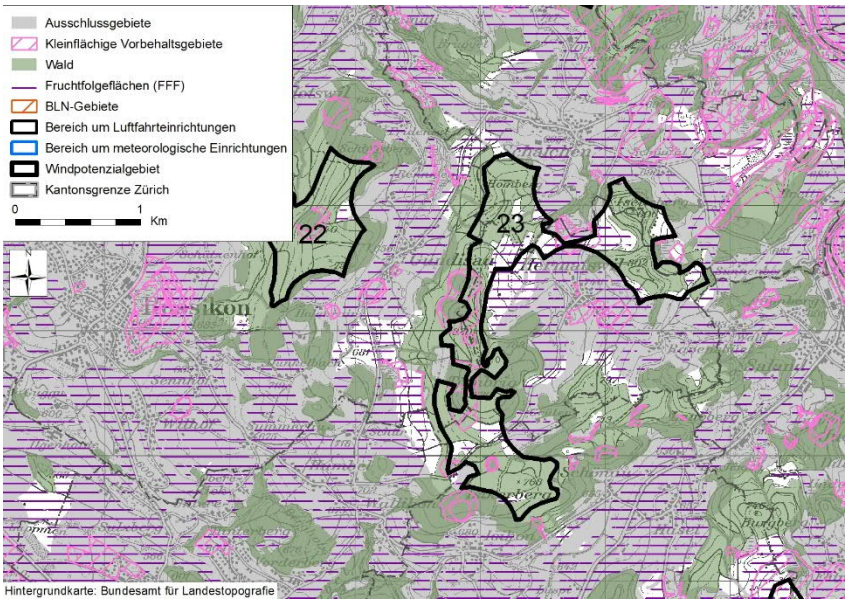


Abb. 57 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Pfäffikon, Russikon, Wildberg, Hittnau
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (12-14 km), Wald, Offenland: FFF, Wildtierkorridor angrenzend, kleine Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	30 GWh

Tab. 27 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 24 Stoffel

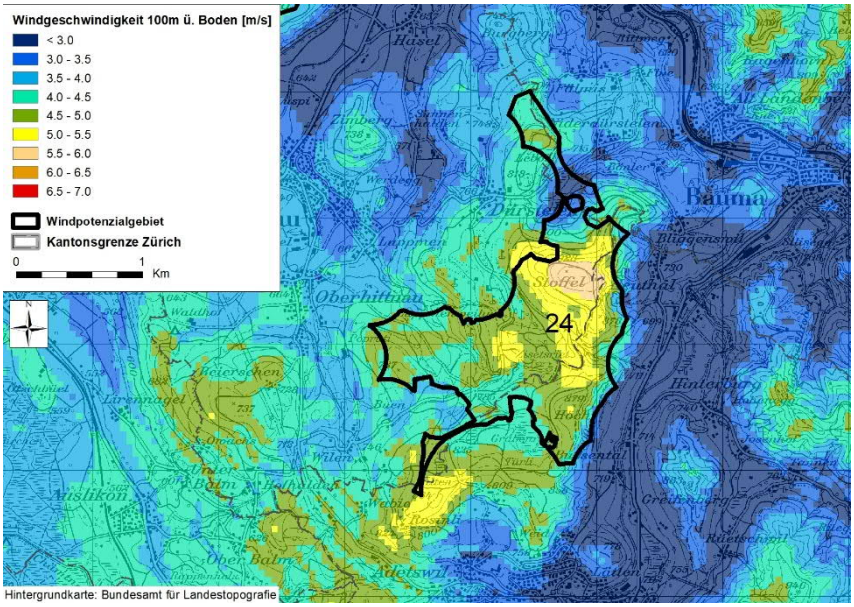


Abb. 58 Windressourcen

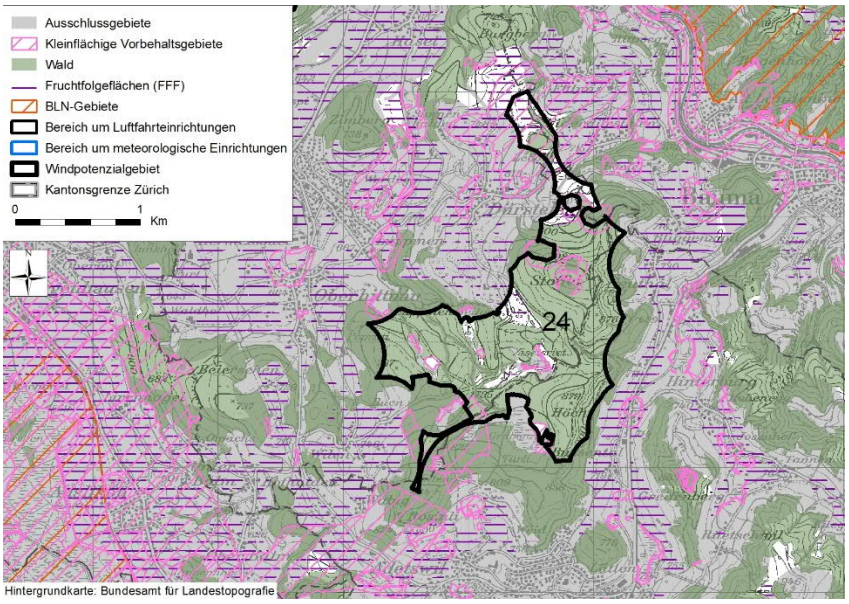


Abb. 59 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Hittnau, Bäretswil, Bauma
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (15-17 km), Wald, FFF, Wildtierkorridor angrenzend, kant. Landschaftsschutzobjekt (Nordteil), teilweise SVO-Objekt, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	6
Geschätzter Energieertrag (netto)	18 GWh

Tab. 28 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 25 Baschlisgipfel

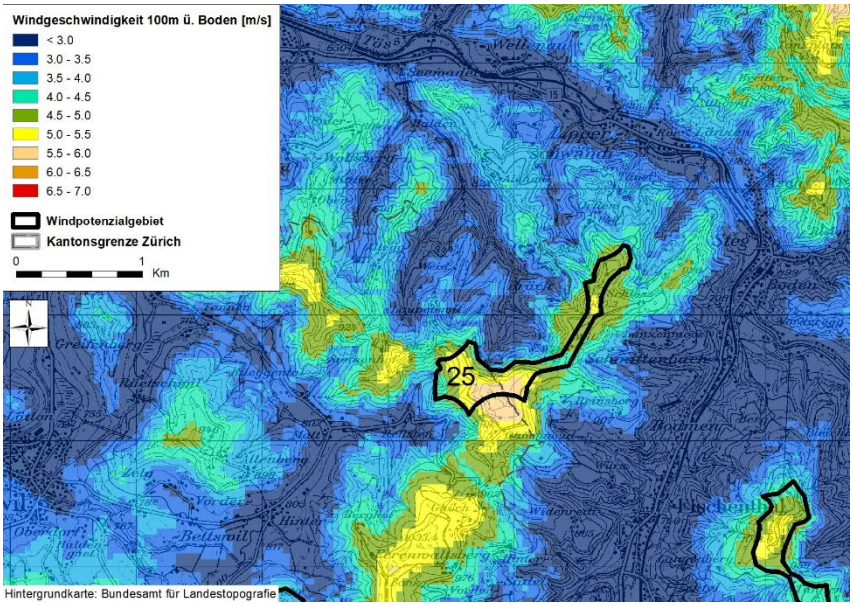


Abb. 60 Windressourcen

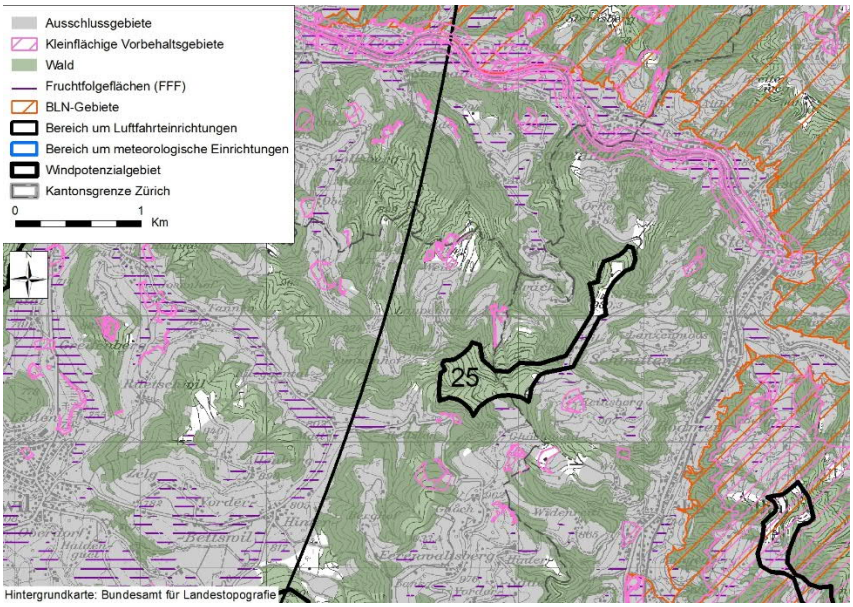


Abb. 61 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Bäretswil, Fischenthal
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Wald
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	9 GWh

Tab. 29 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 26 Bachtel

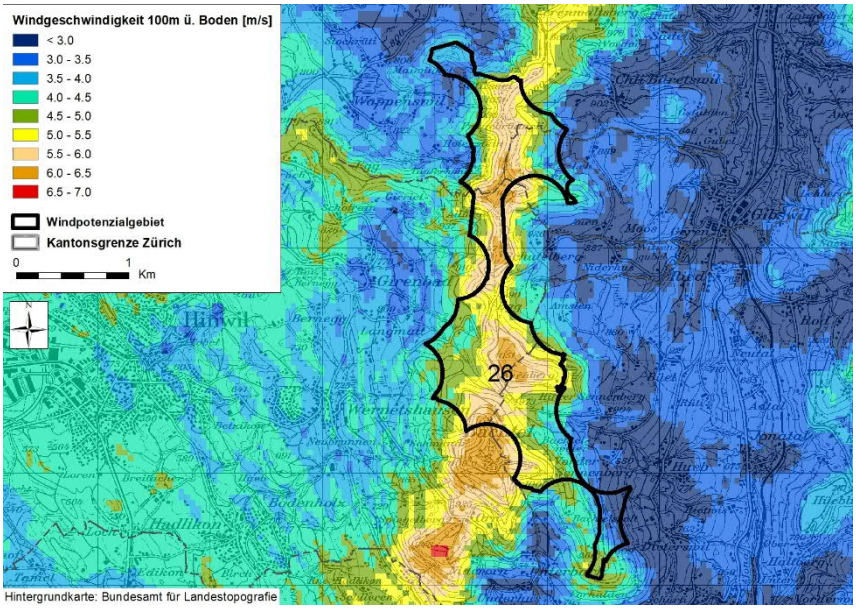


Abb. 62 Windressourcen

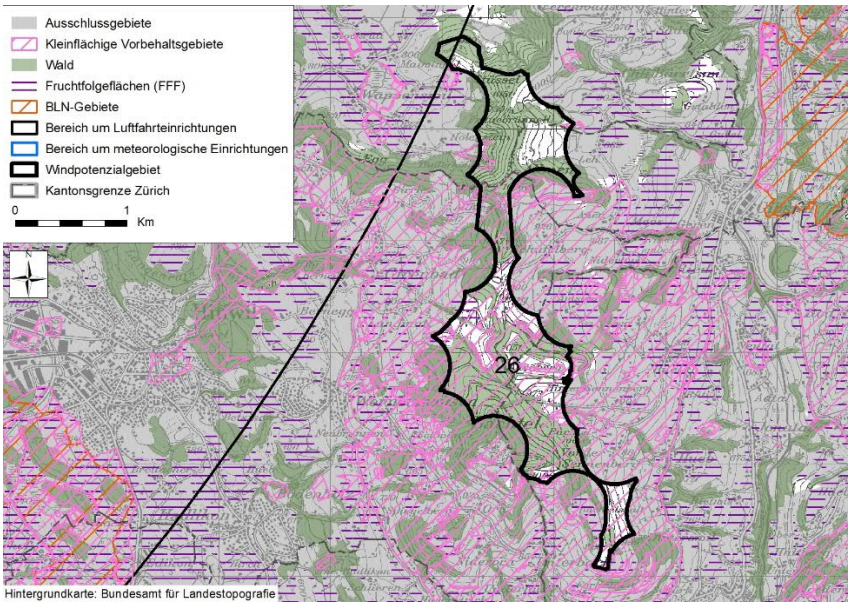


Abb. 63 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Bäretswil, Fischenthal, Hinwil, Wald (ZH)
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Wald, teilweise FFF, mehrheitlich kant. Landschaftsschutzobjekt, mehrheitlich SVO-Objekt, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	7
Geschätzter Energieertrag (netto)	29 GWh

Tab. 30 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 27 Hüttchopf-Brandegg

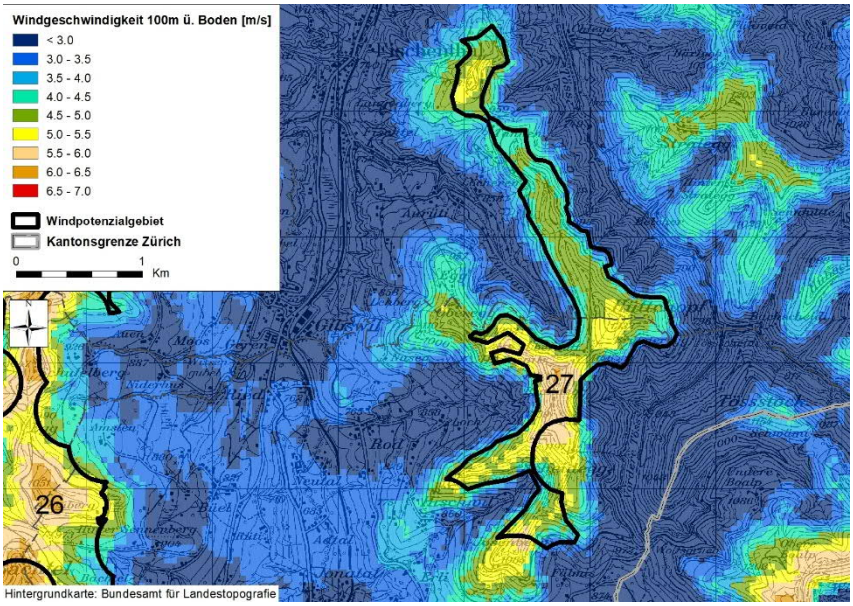


Abb. 64 Windressourcen

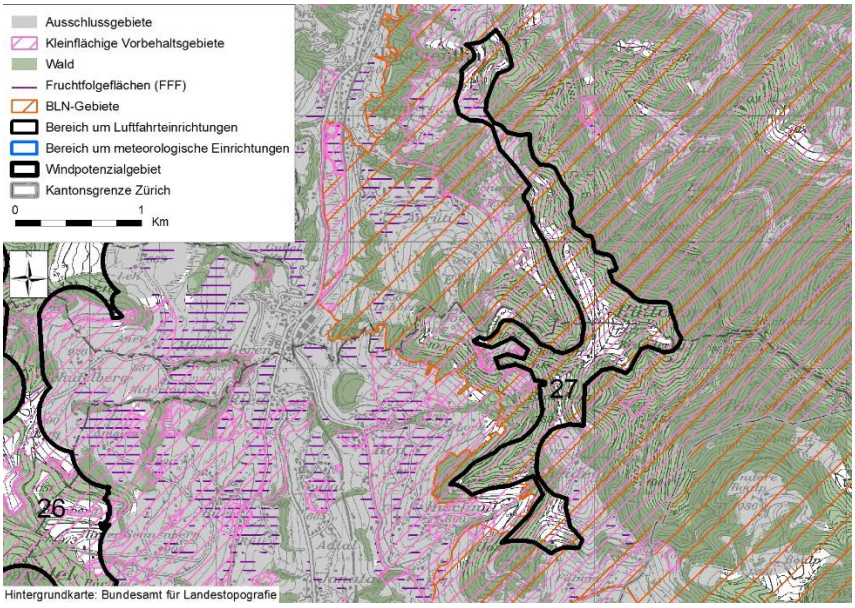


Abb. 65 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Wald (ZH), Fischenthal
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Wald, BLN, kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	7
Geschätzter Energieertrag (netto)	21 GWh

Tab. 31 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 28 Batzberg

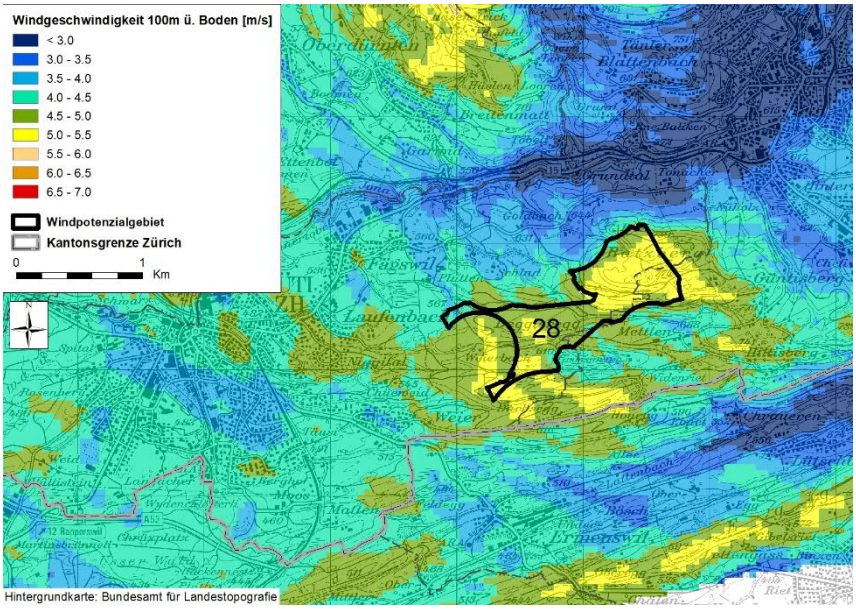


Abb. 66 Windressourcen

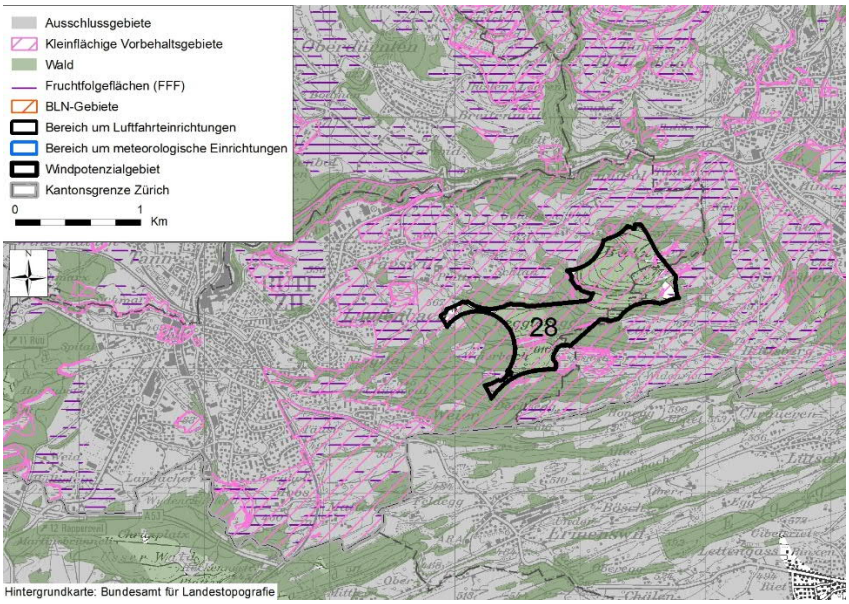


Abb. 67 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Rüti (ZH), Wald (ZH)
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Wald, kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt, kleine Archäologische Zone, kleine Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	26 GWh

Tab. 32 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 29 Schönwis

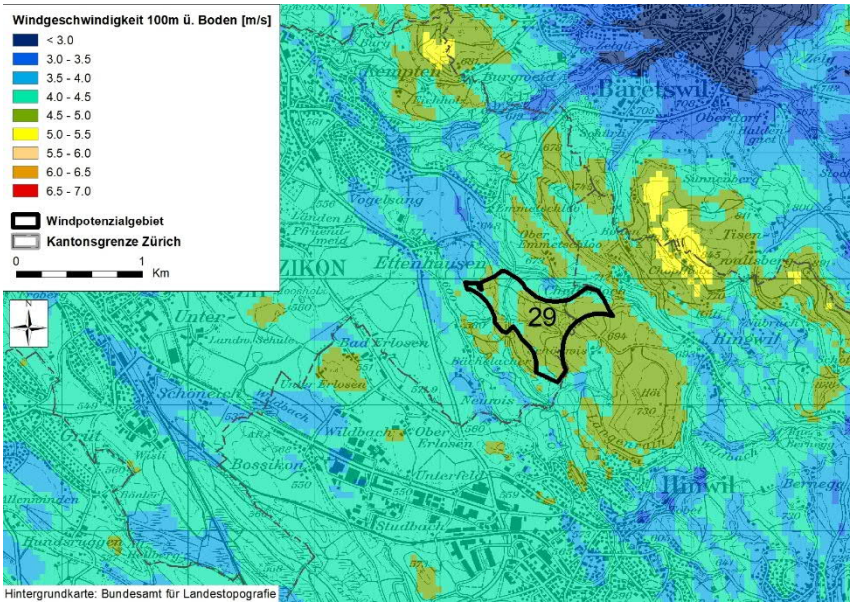


Abb. 68 Windressourcen

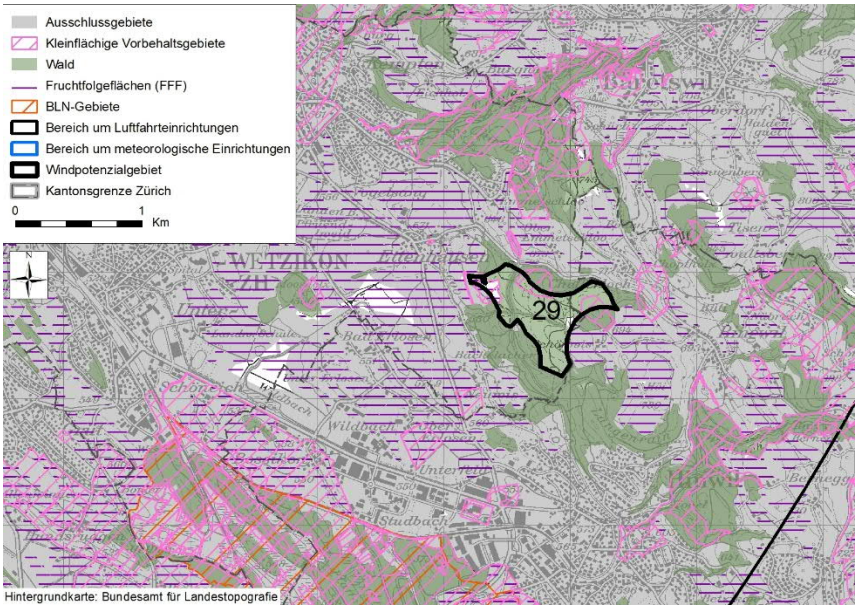


Abb. 69 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Hinwil, Wetzikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (17 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	16 GWh

Tab. 33 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 30 Altenberg

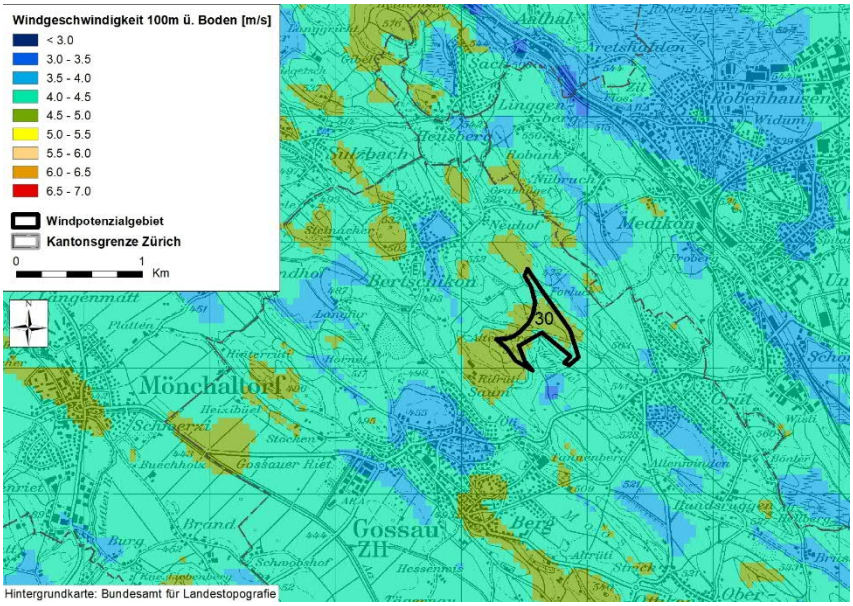


Abb. 70 Windressourcen

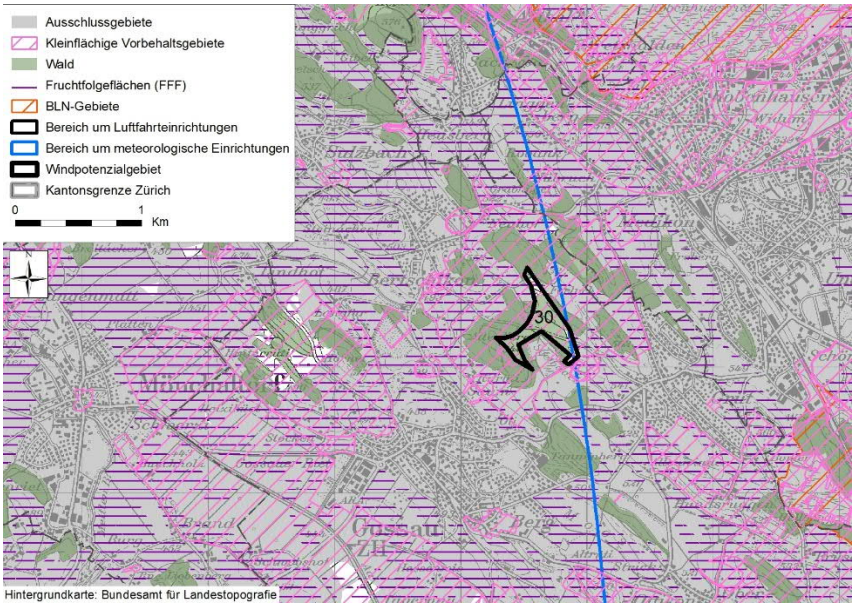


Abb. 71 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Gossau (ZH)
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (20 km), Flugplatz Dübendorf (12-13 km), Wald, Offenland: FFF, kant. Landschaftsschutzobjekt, kleine Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	16 GWh

Tab. 34 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 31 Hombergchropf

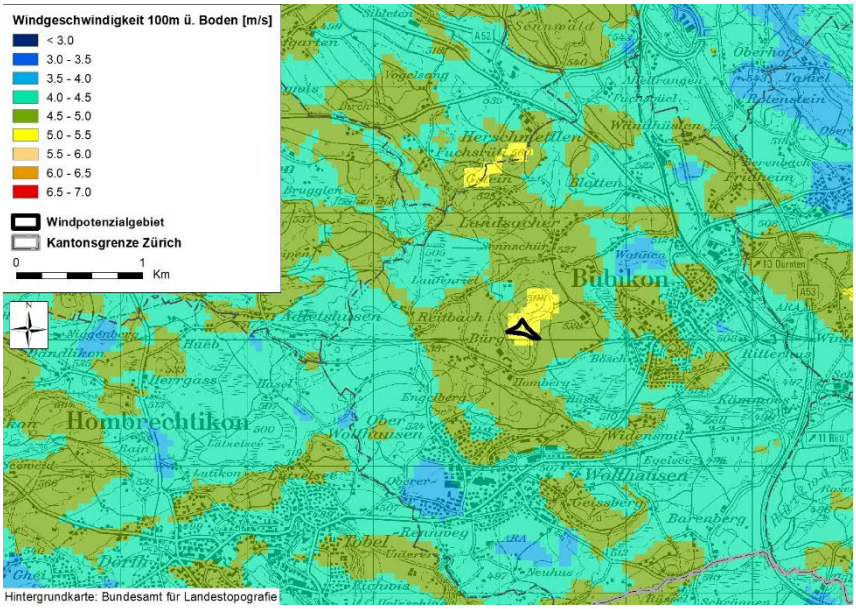


Abb. 72 Windressourcen

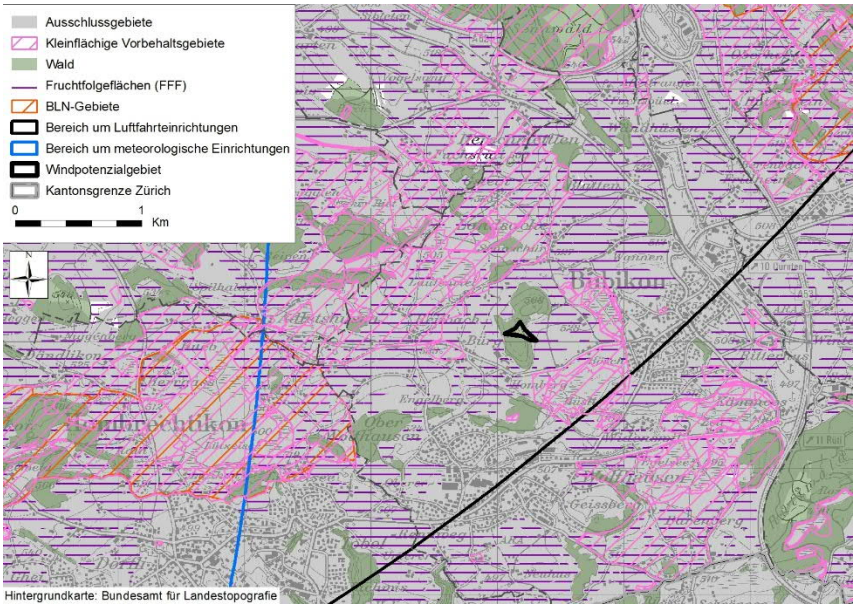


Abb. 73 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Bubikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Dübendorf (19 km), Wald, Offenland: FFF, Wildtierkorridor
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	1
Geschätzter Energieertrag (netto)	8.5 GWh

Tab. 35 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 32 Obsirain

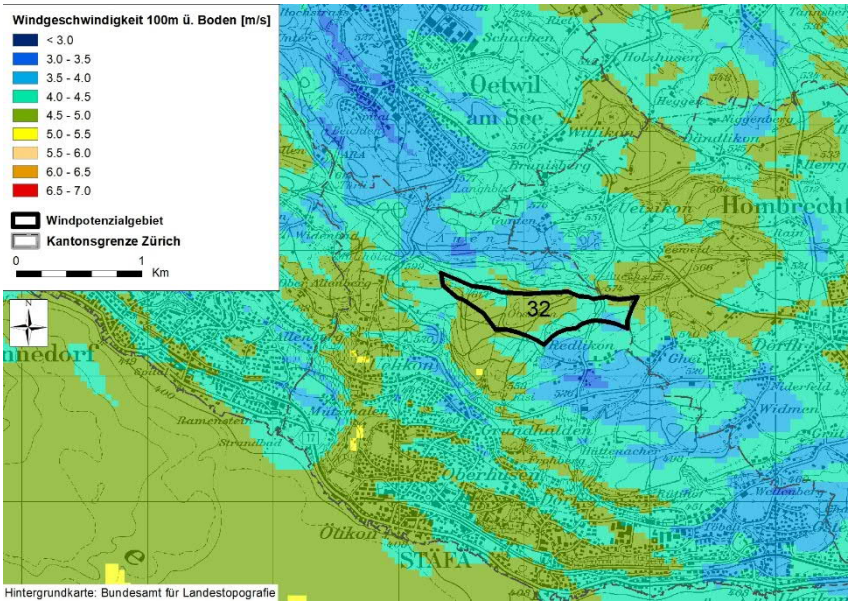


Abb. 74 Windressourcen

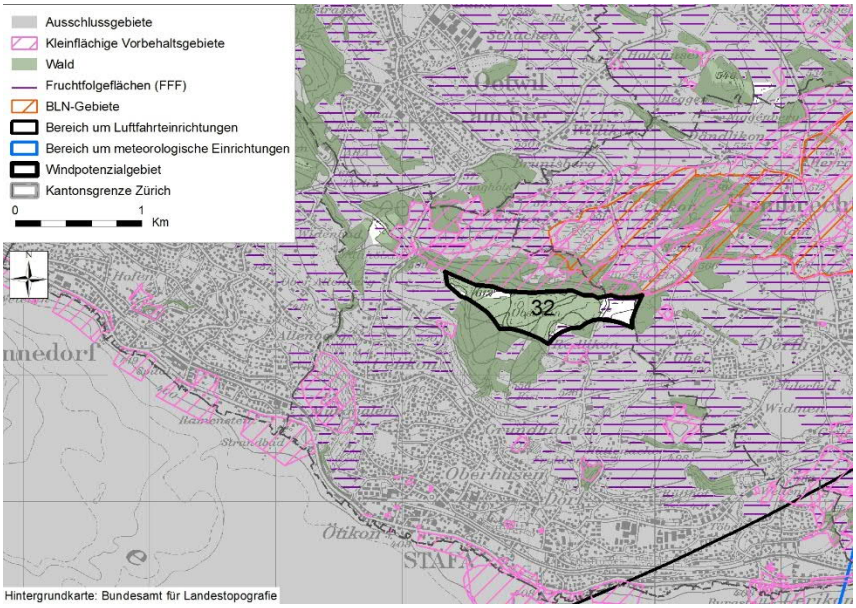


Abb. 75 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Stäfa
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (16-18 km), Flugplatz Dübendorf (17-18 km), Wald, Offenland teilweise FFF, BLN angrenzend, kant. Landschaftsschutzobjekt angrenzend
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	16 GWh

Tab. 36 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 33 Wädenswiler Berg

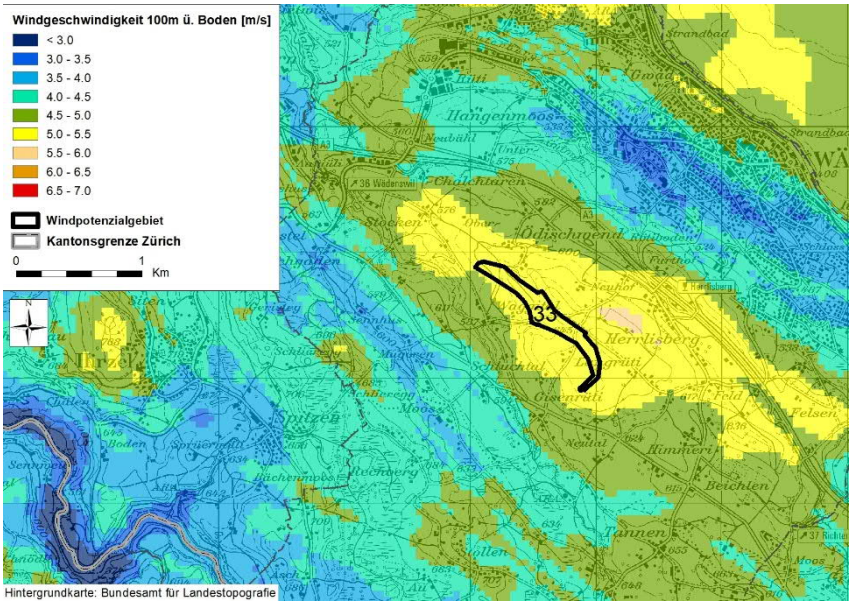


Abb. 76 Windressourcen

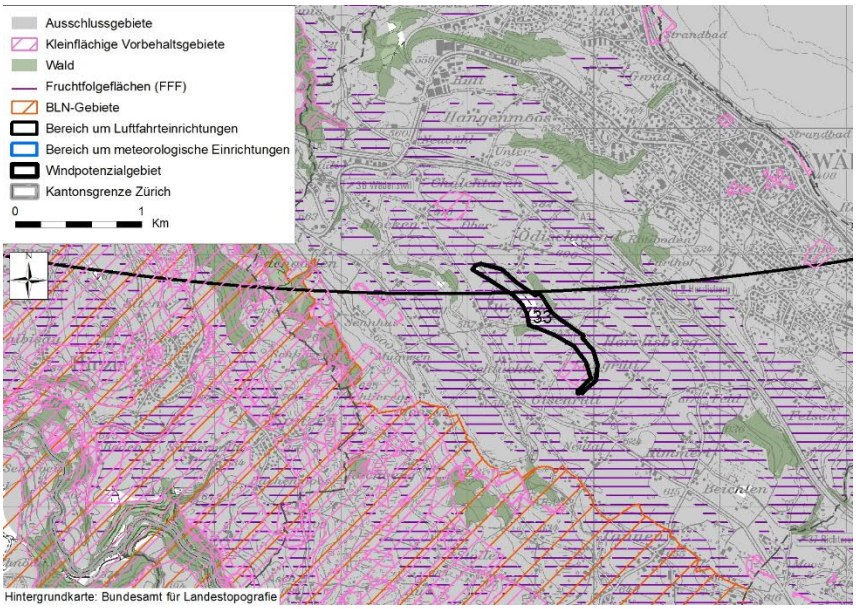


Abb. 77 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Wädenswil
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (12-13 km), Flugplatz Dübendorf (20-21 km), FFF
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	30 GWh

Tab. 37 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 34 Uerzlikon

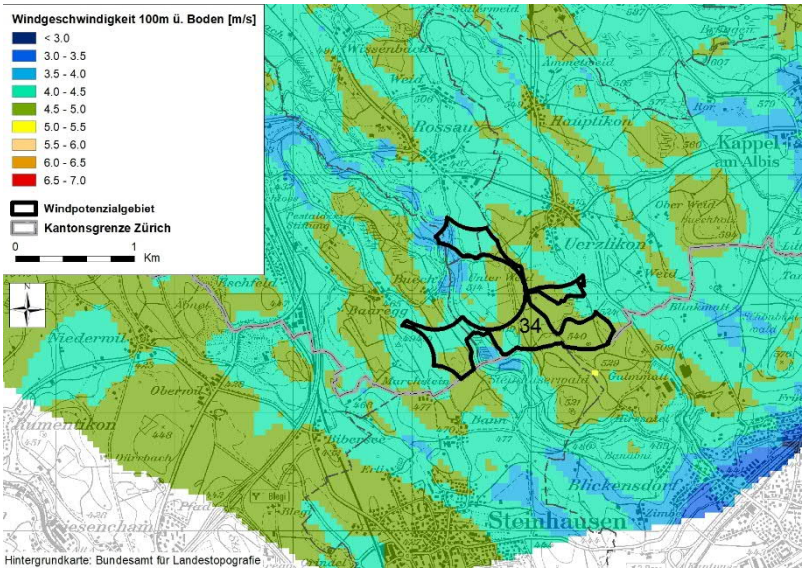


Abb. 78 Windressourcen

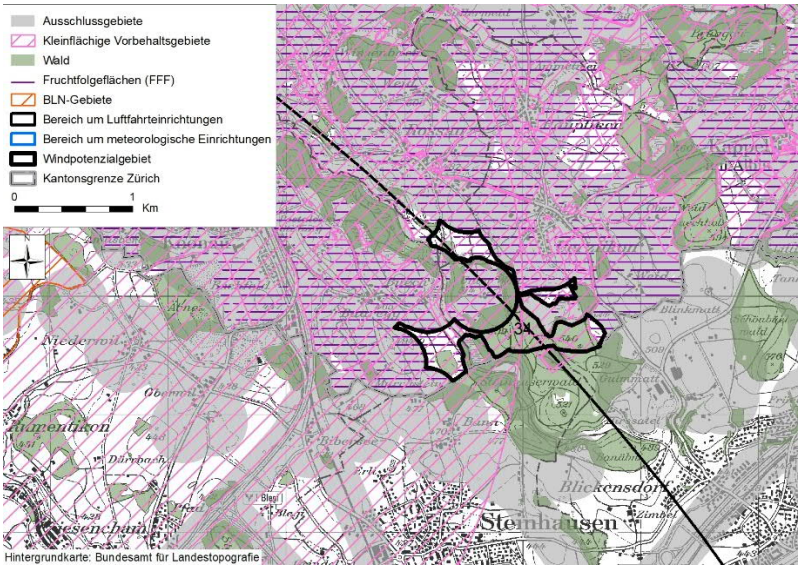


Abb. 79 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Kappel am Albis, Mettmenstetten, Knonau
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (7-8 km), Flugplatz Emmen (20 km), Flugfeld Hausen a. A. (2-3 km), Wald, Offenland FFF, Rotmilan-Massenschlafplatz (4-6 km), kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt, teilweise Archäologische Zone, kleine Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	29 GWh

Tab. 38 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 35 Rotenberg

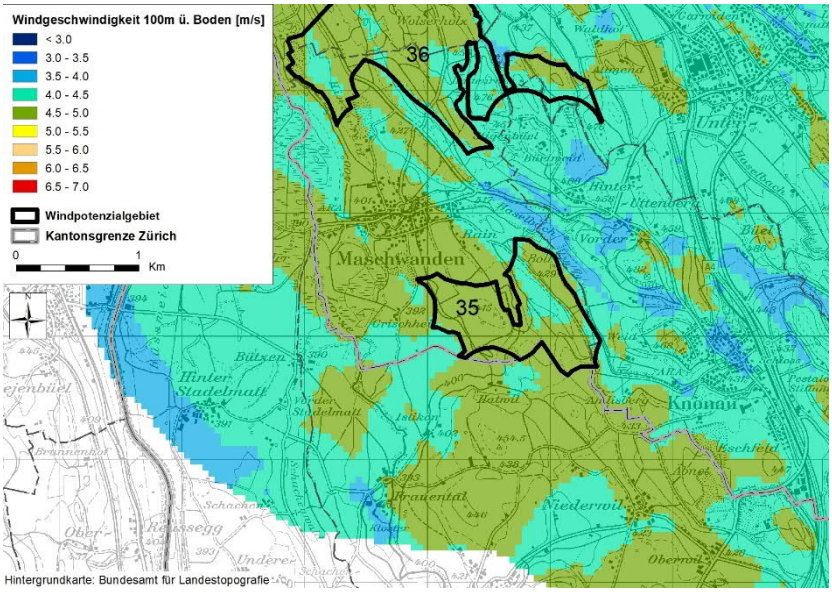


Abb. 80 Windressourcen

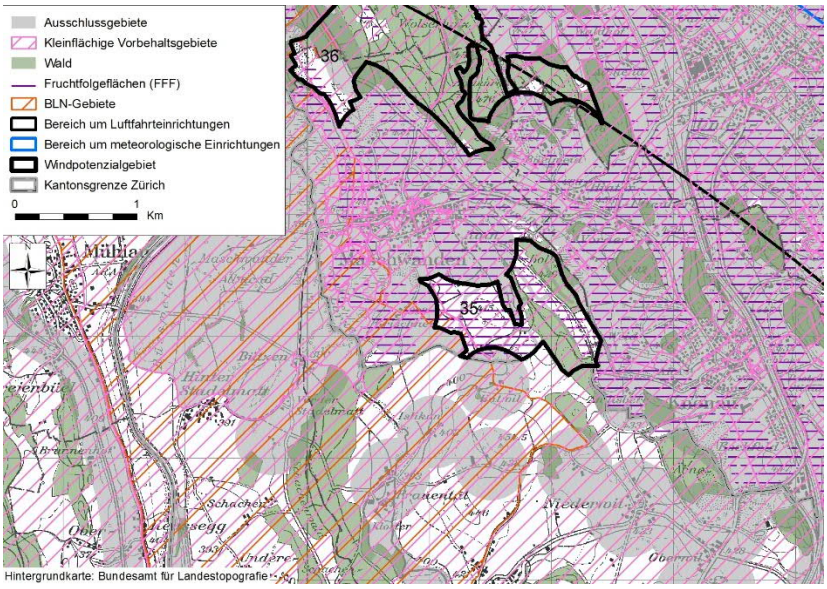


Abb. 81 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Maschwanden
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (8-9 km), Wald, Offenland: FFF, Rotmilan-Massenschlafplatz (1-2 km), Smaragdgebiet angrenzend, Wildtierkorridor angrenzend, kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	29 GWh

Tab. 39 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 36 Maschwanden (Haltenrain)

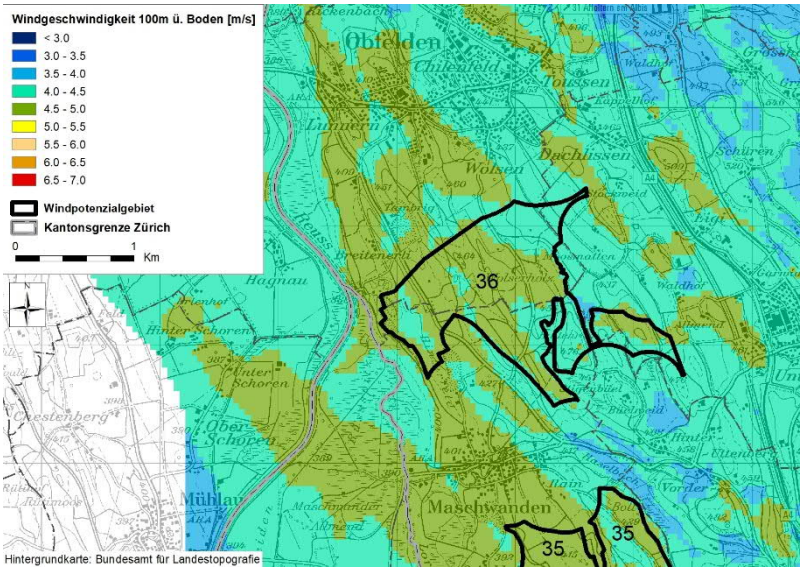


Abb. 82 Windressourcen

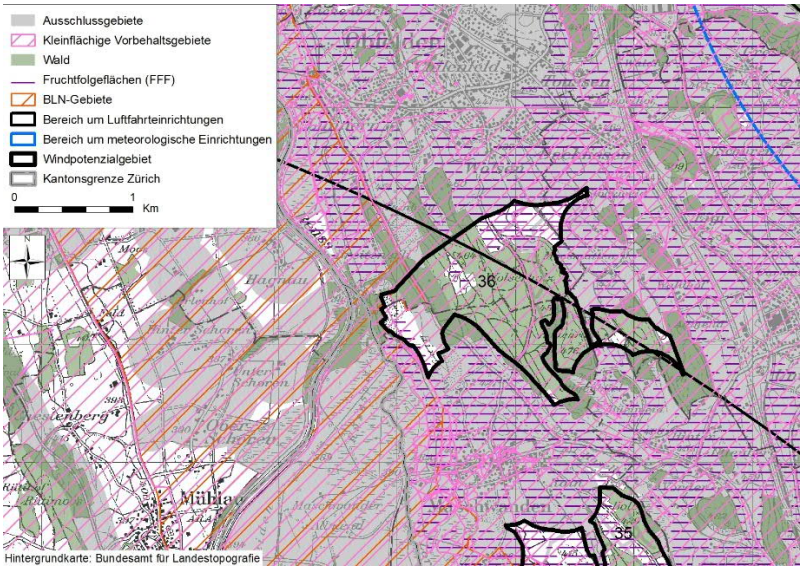


Abb. 83 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Maschwanden, Obfelden, Mettmenstetten, Knonau
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Flugplatz Emmen (20 km), Meteoradar Albis (7-8 km), Wald, BLN angrenzend, Offenland teilweise FFF, Rotmilan-Massenschlafplatz (2.5-4 km), Smaragdgebiet angrenzend, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	30 GWh

Tab. 40 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 37 Ottenbach (Isenberg)

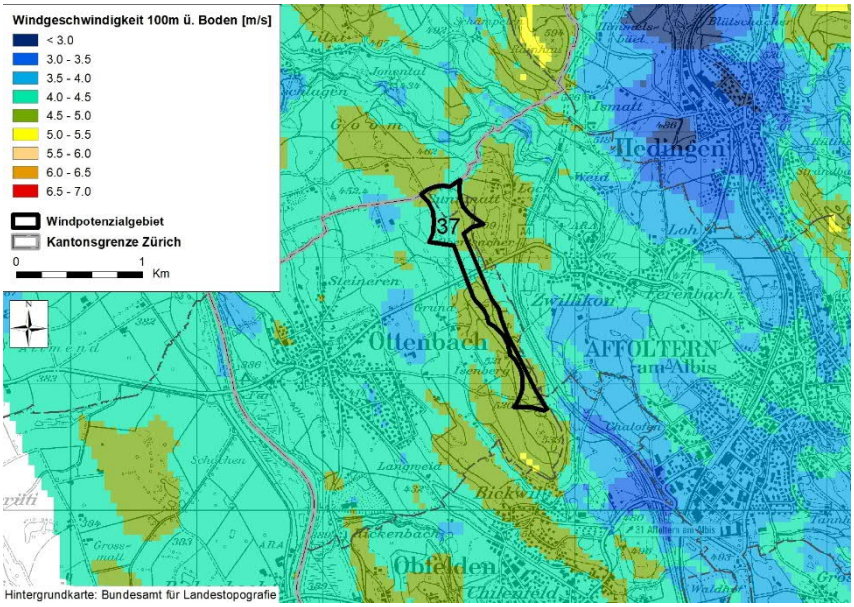


Abb. 84 Windressourcen

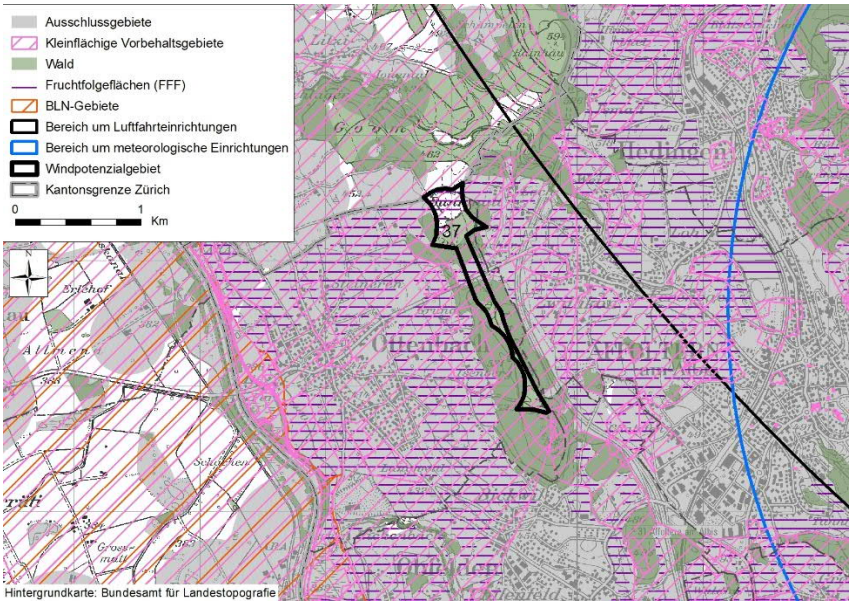


Abb. 85 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Ottenbach
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (7 km), Wald, Offenland: FFF, Rotmilan-Massenschlafplatz (4 km)
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	24 GWh

Tab. 41 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 38 Himelsbüel

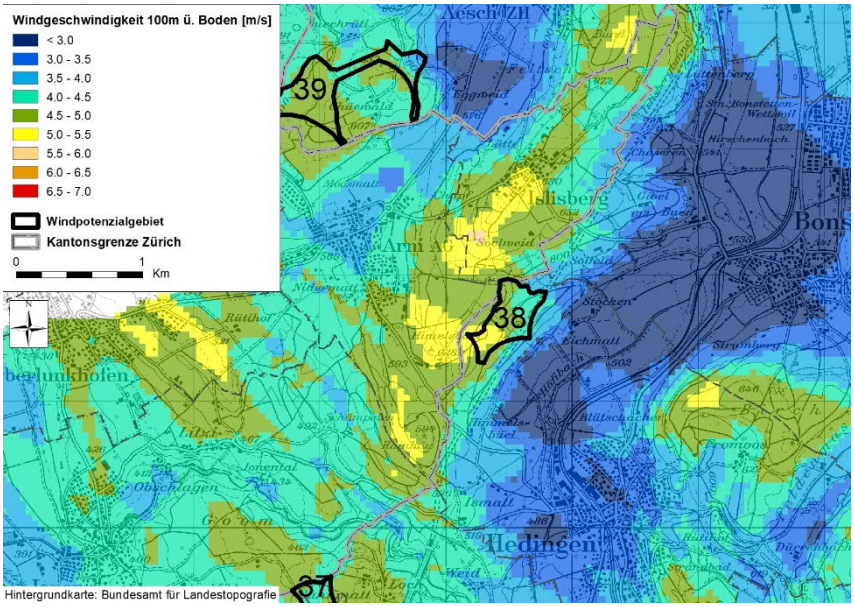


Abb. 86 Windressourcen

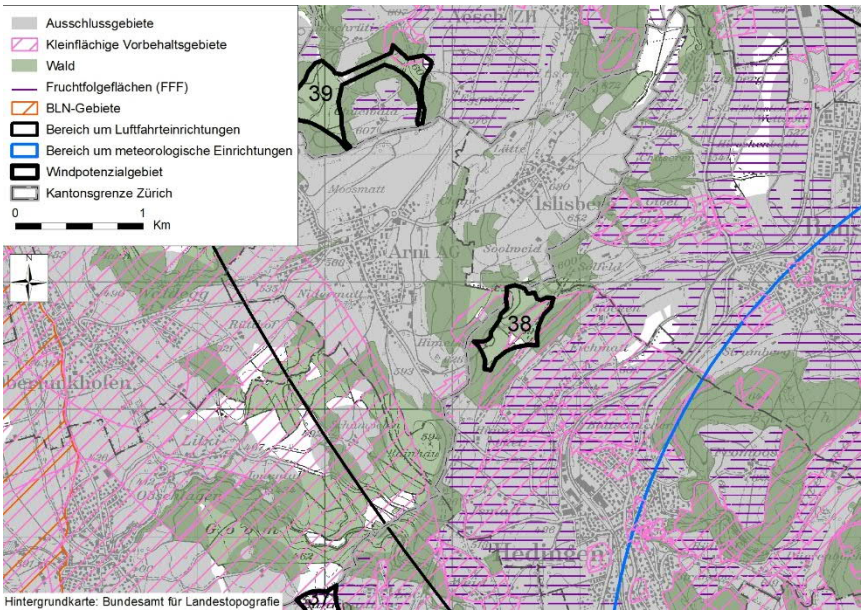


Abb. 87 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Hedingen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (6 km), Flugplatz Dübendorf (19 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, kleine Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	16 GWh

Tab. 42 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 39 Chüewald

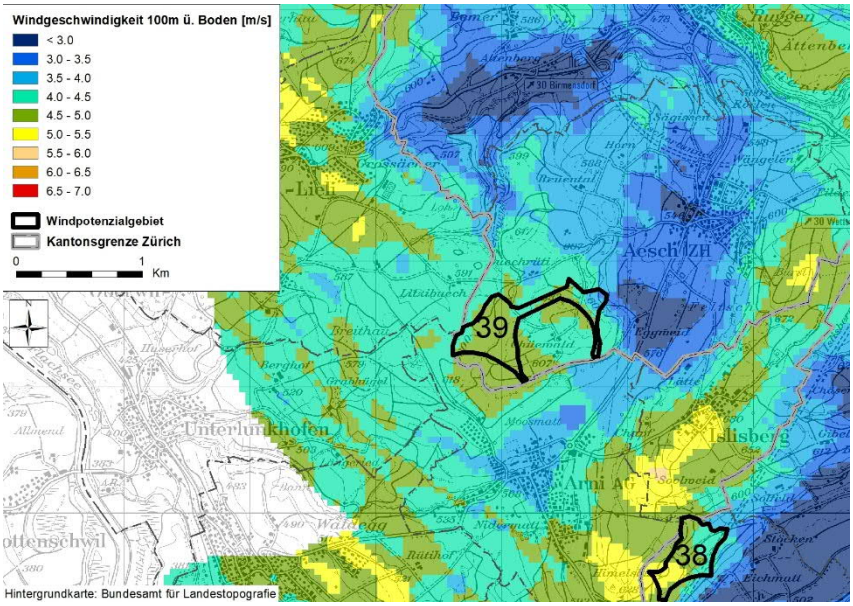


Abb. 88 Windressourcen

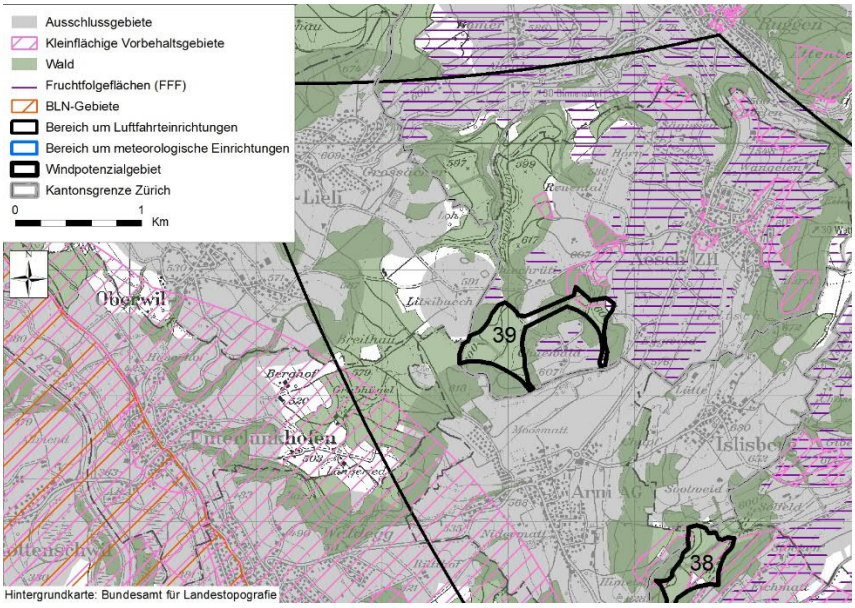


Abb. 89 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Aesch (ZH)
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (8-9 km), Flugplatz Dübendorf (19 km), Wald
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	22.5 GWh

Tab. 43 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 40 Honeret

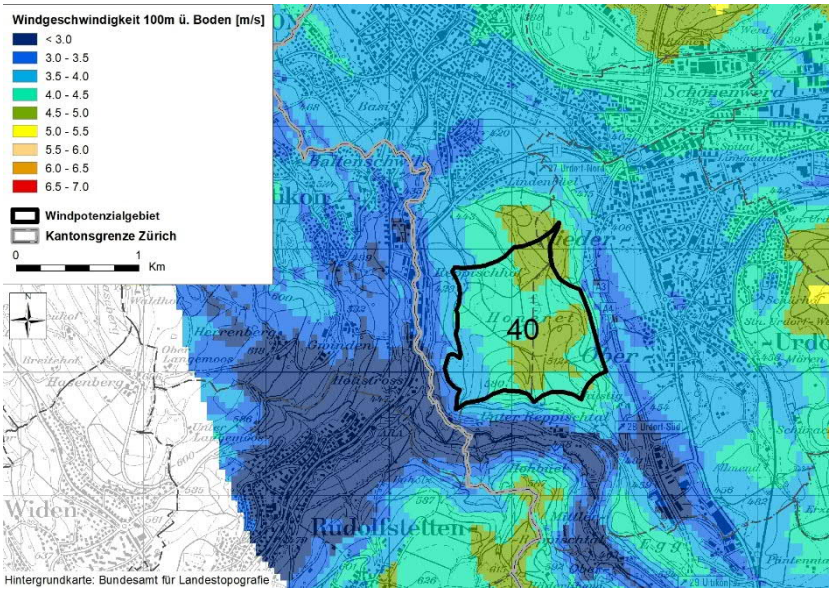


Abb. 90 Windressourcen

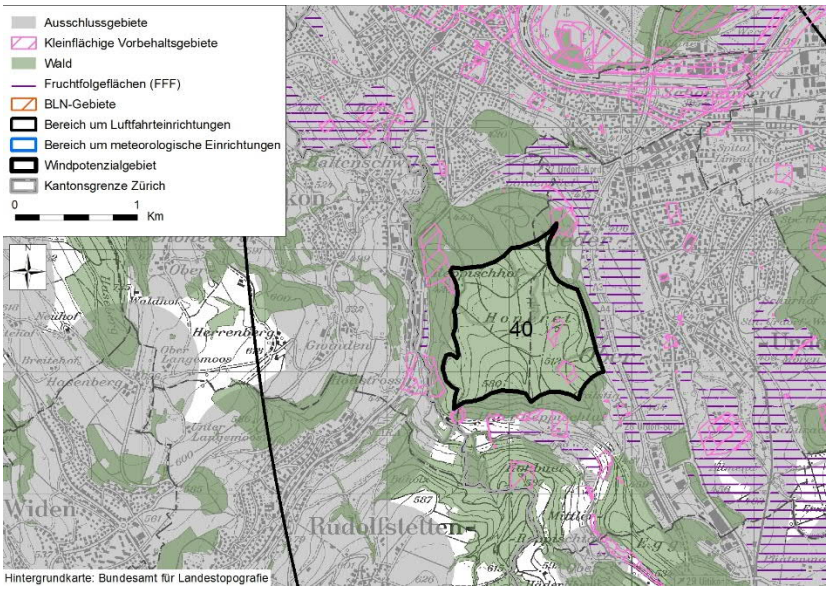


Abb. 91 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Dietikon, Urdorf
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (14-15 km), Sekundärradar Lägern (10-12 km), Meteoradar Albis (13-14 km), Flugplatz Dübendorf (17-19 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	22.5 GWh

Tab. 44 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 41 Buechhoger

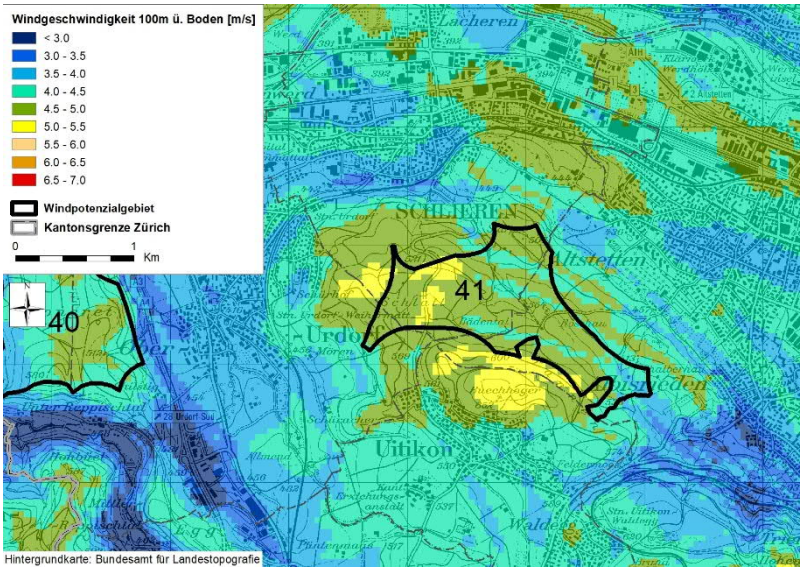


Abb. 92 Windressourcen

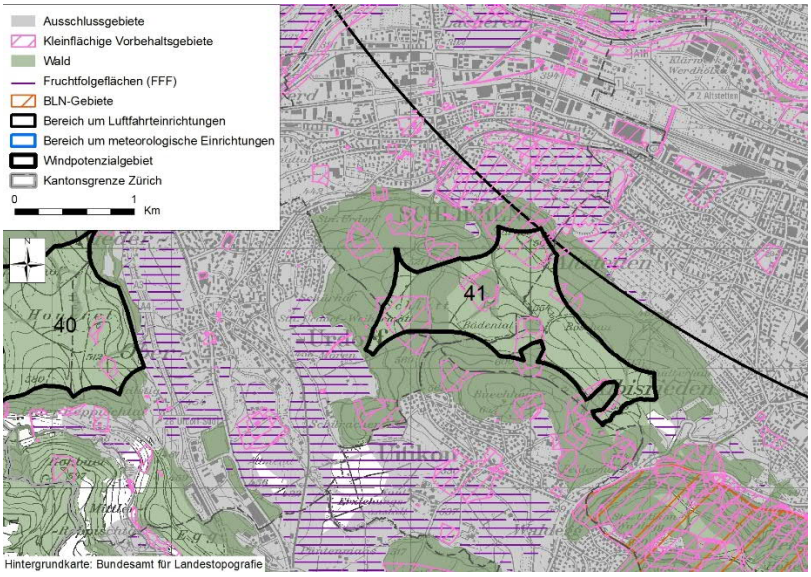


Abb. 93 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Zürich, Schlieren, Urdorf
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (11 km), Sekundärradar Lägern (11-13 km), Drehfunkfeuer Kloten (10-11 km), Meteoradar Albis (11-12 km), Flugplatz Dübendorf (12-14 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, teilweise Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	4
Geschätzter Energieertrag (netto)	32 GWh

Tab. 45 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 42 Pfannenstiel

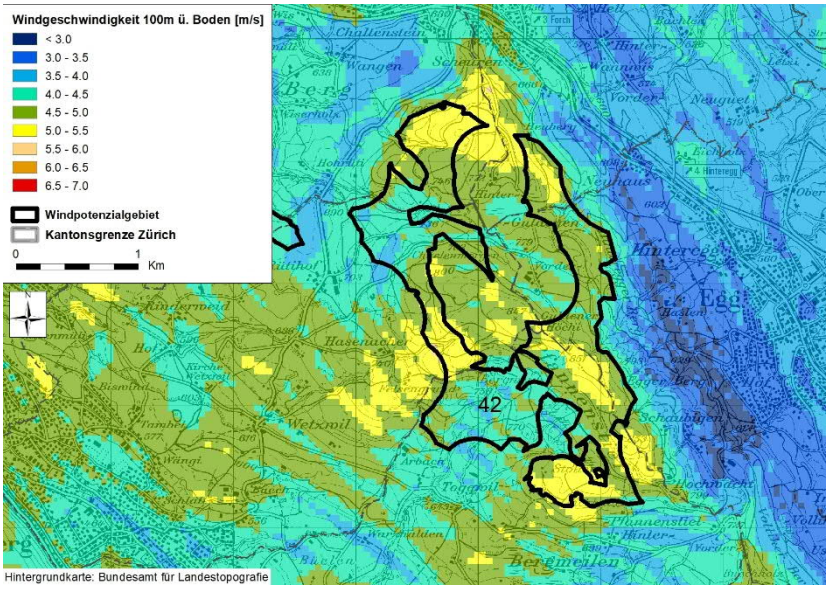


Abb. 94 Windressourcen

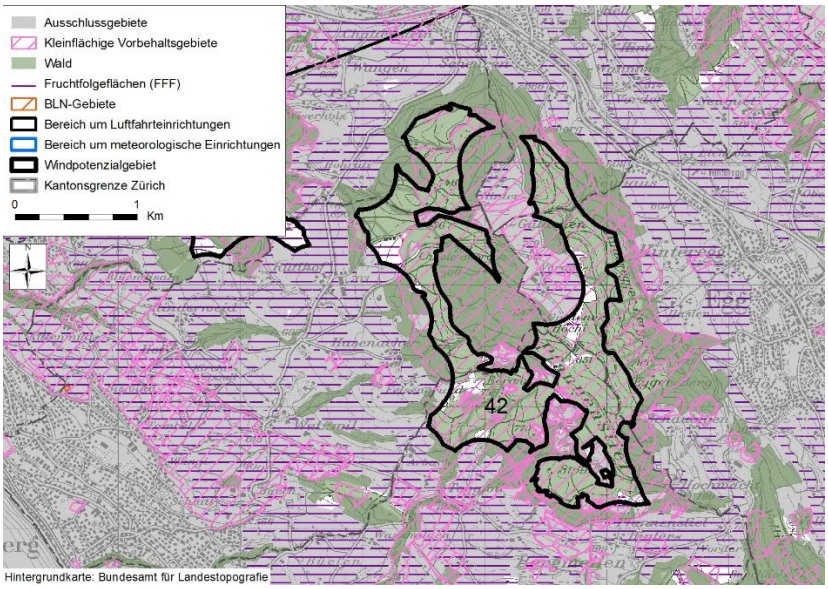


Abb. 95 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Meilen, Egg, Herrliberg, Küsnacht (ZH), Maur
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Meteoradar Albis (10-12 km), Flugplatz Dübendorf (9-12 km), Wald, Offenland teilweise FFF, teilweise kant. Landschaftsschutzobjekt, teilweise SVO-Objekt, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	10
Geschätzter Energieertrag (netto)	84 GWh

Tab. 46 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 43 Küsnachter Berg

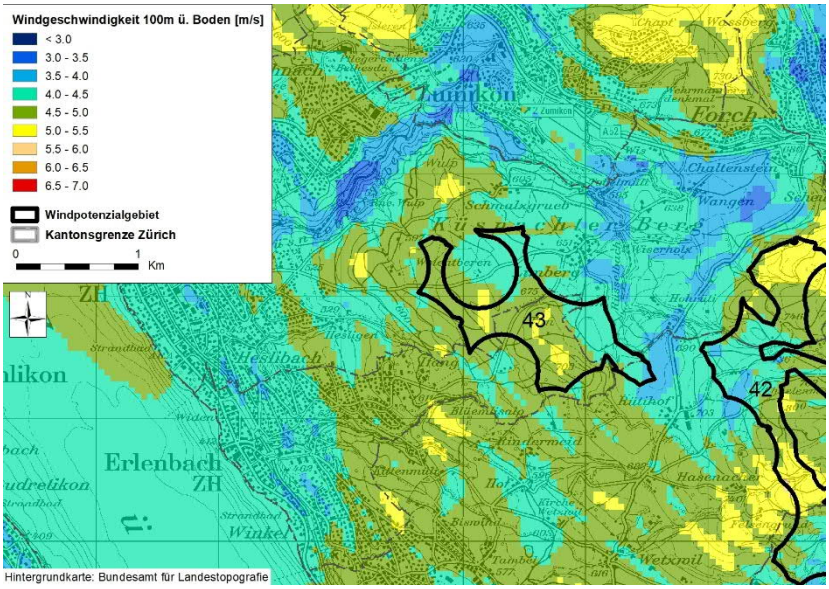


Abb. 96 Windressourcen

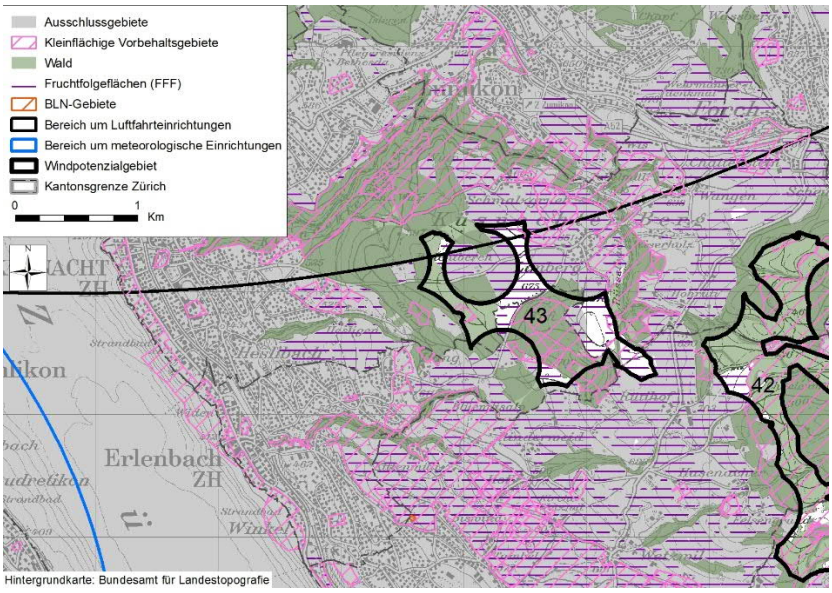


Abb. 97 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Küsnacht (ZH), Erlenbach (ZH), Herrliberg
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (15-16 km), Meteoradar Albis (8-9 km), Flugplatz Dübendorf (9-10 km), Wald, Offenland teilweise FFF, kant. Landschaftsschutzobjekt angrenzend, kleine Archäologische Zone, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	25 GWh

Tab. 47 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 44 Zollikerberg

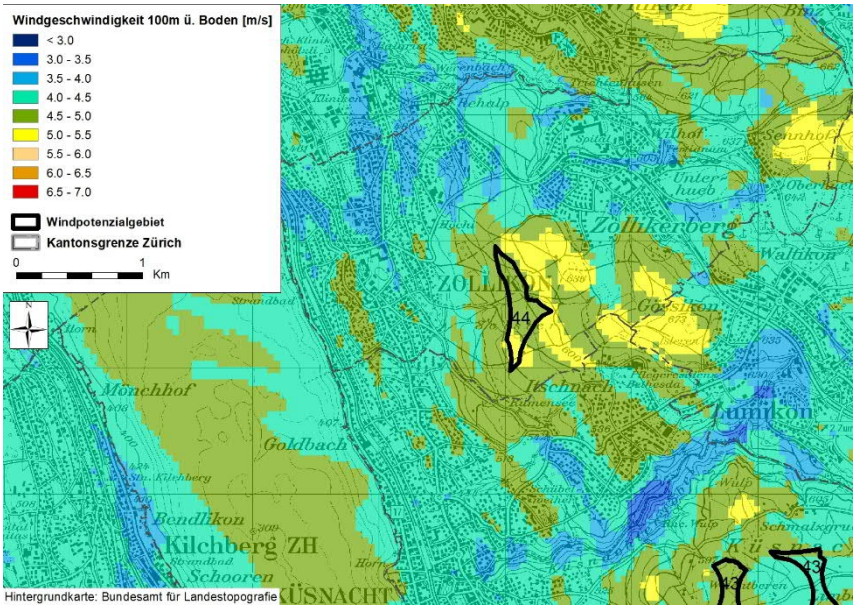


Abb. 98 Windressourcen

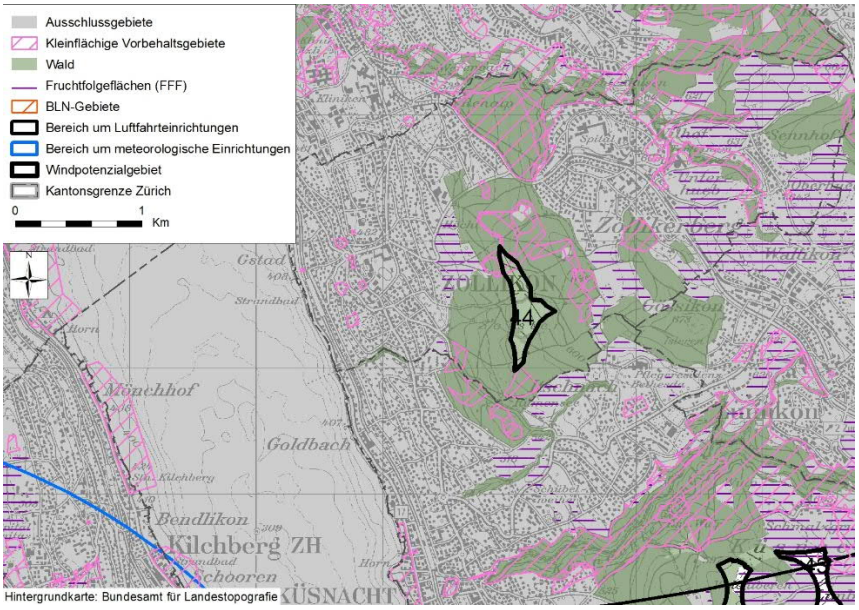


Abb. 99 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Zollikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (12-13 km), Meteoradar Albis (8 km), Wald, teilweise Grundwasserschutzzone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	17 GWh

Tab. 48 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 45 Hüttikerberg

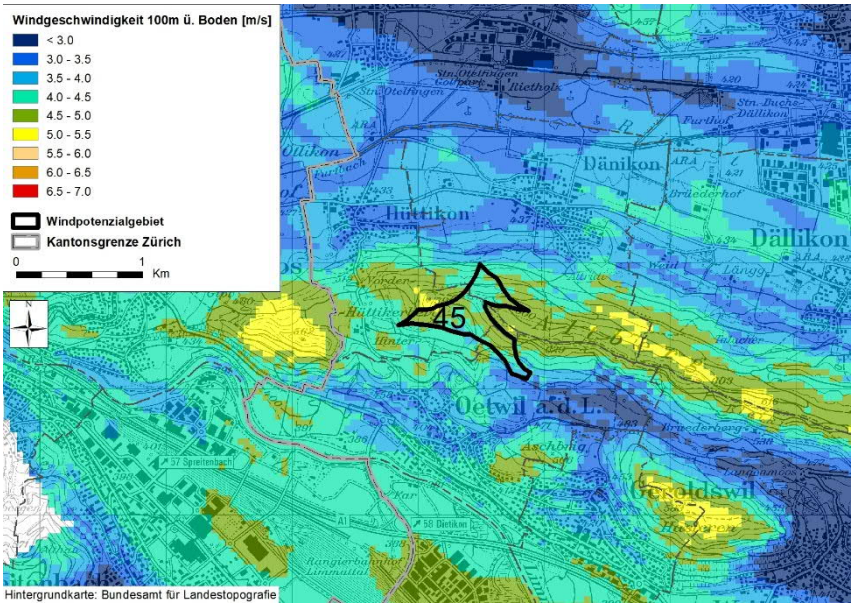


Abb. 100 Windressourcen

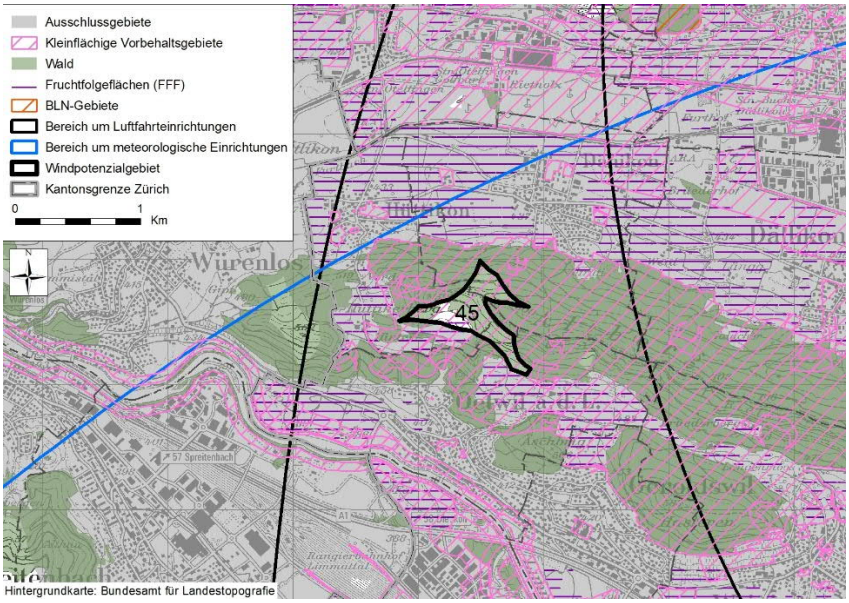


Abb. 101 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Hüttikon, Oetwil an der Limmat, Dänikon
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Primärradar Holberg (13-14 km), Sekundärradar Lägern (5 km), Meteoradar Albis (19 km), Flugplatz Dübendorf (18-19 km), Wald, kant. Landschaftsschutzobjekt
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	2
Geschätzter Energieertrag (netto)	6 GWh

Tab. 49 Wichtigste Standorteigenschaften

Nr. 46 Gnüll

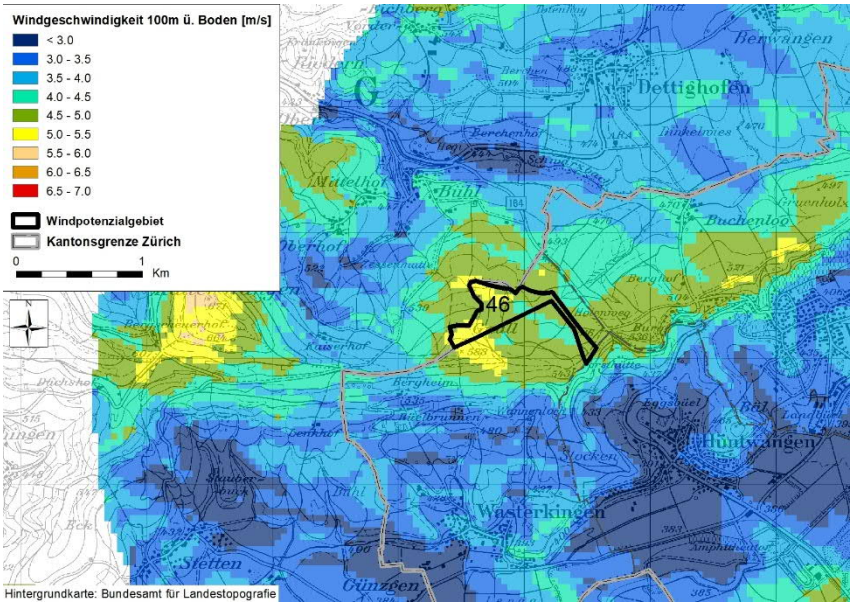


Abb. 102 Windressourcen

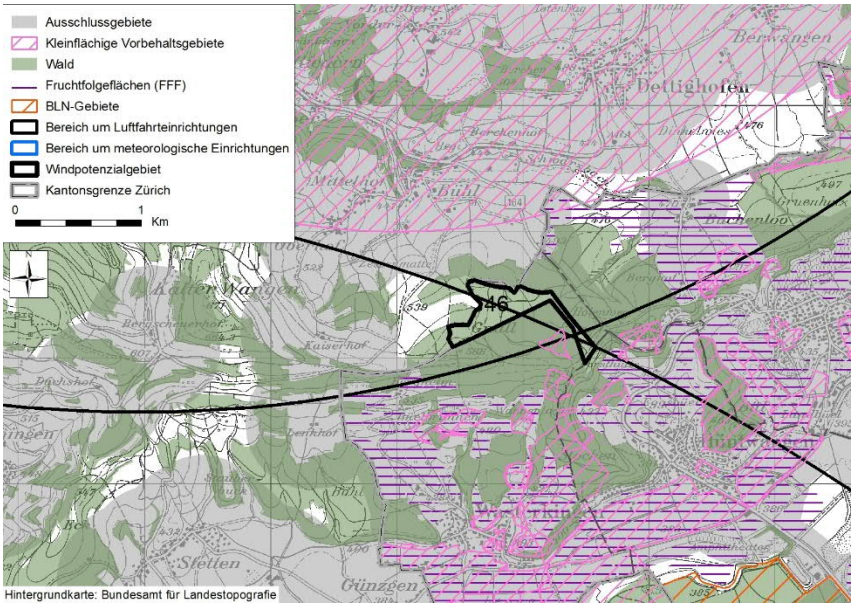


Abb. 103 Ausschluss- und Vorbehaltsgebiete

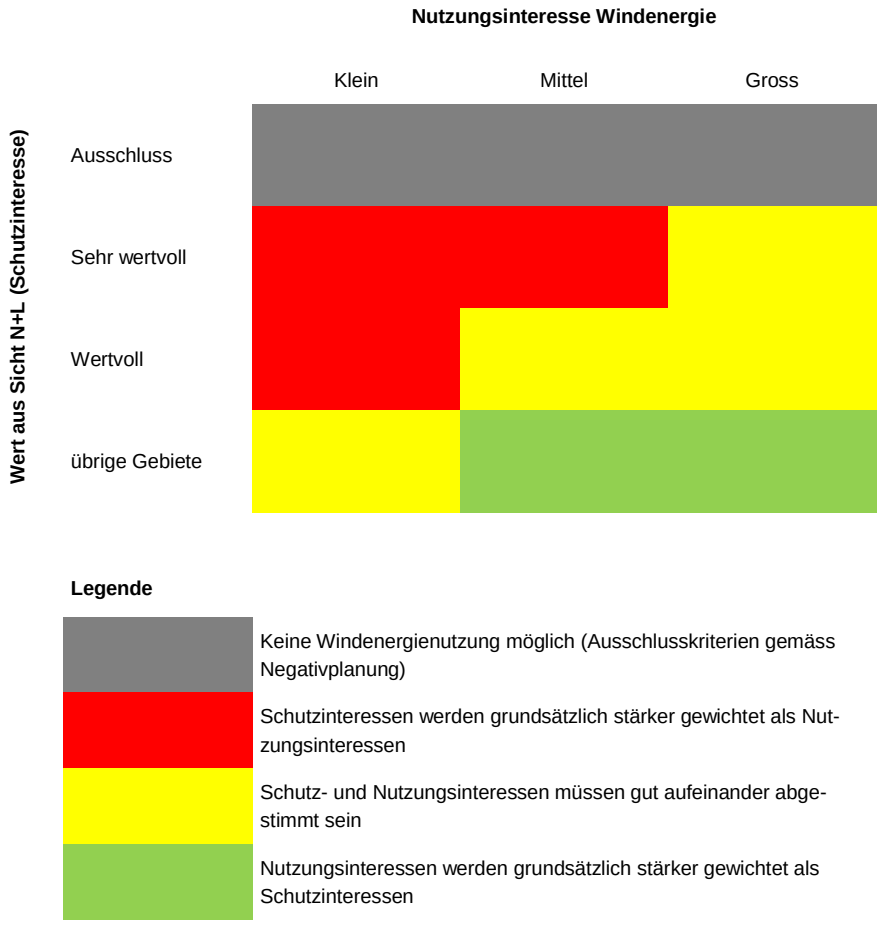
Eigenschaft	Wert
Standortgemeinden	Wasterkingen
Vorbehaltskriterien gemäss Windpotenzialstudie	Windprofiler Schaffhausen (14-15 km), Drehfunkfeuer Trasadingen (10 km), Sekundärradar Lägern (15 km), Wald, Wildtierkorridor angrenzend, kleine Archäologische Zone
Mögliche Anzahl Windenergieanlagen	3
Geschätzter Energieertrag (netto)	24 GWh

Tab. 50 Wichtigste Standorteigenschaften

6. Bewertung von Umweltthemen

Um die Natur- und Landschaftsschutzinteressen mit dem Interesse der Windenergienutzung abzuwägen, sollen die Windeignungsgebiete anhand einer Schutz-/Nutzungsmatrix bewertet werden. Dazu sehen wir das folgende Bewertungsraster vor, welches aktuell als Vorschlag zu verstehen ist und den Natur- und Landschaftsschutzverbänden mit diesem Bericht zur Konsultation vorgelegt wird. Es steckt die Idee dahinter, dass Windenergiegebiete mit kleinem Nutzungspotenzial grössere Hürden bzgl. Natur- und Landschaftsschutz zu überwinden haben als solche mit grossem Nutzungspotenzial. Auf diese Weise wird eine effiziente Windenergienutzung angestrebt, sprich sie soll dort erfolgen, wo die Eingriffe in die Umwelt am geringsten sind und gleichzeitig die Nutzung technisch-wirtschaftlich gut möglich wäre.

Wie die einzelnen Klassen definiert werden resp. welche Kriterien zugrunde liegen sollen, wird im Rahmen des Winddialogs erarbeitet.



Tab. 51 Konzept Schutz-/Nutzungsmatrix

7. Literaturverzeichnis

Baudirektion Kanton Zürich. (2019). *Kanton Zürich Richtplan. Beschluss des Kantonsrates (Festsetzung).* Zürich.

Bundesamt für Energie BFE. (2022). *Windpotenzial Schweiz 2022 - Schlussbericht.* Bern.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (1). (2020). *Konzept Windenergie. Basis zur Berücksichtigung der Bundesinteressen bei der Planung von Windenergieanlagen.* Bern.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2). (2020). *Erläuterungsbericht Konzept Windenergie.* Bern.

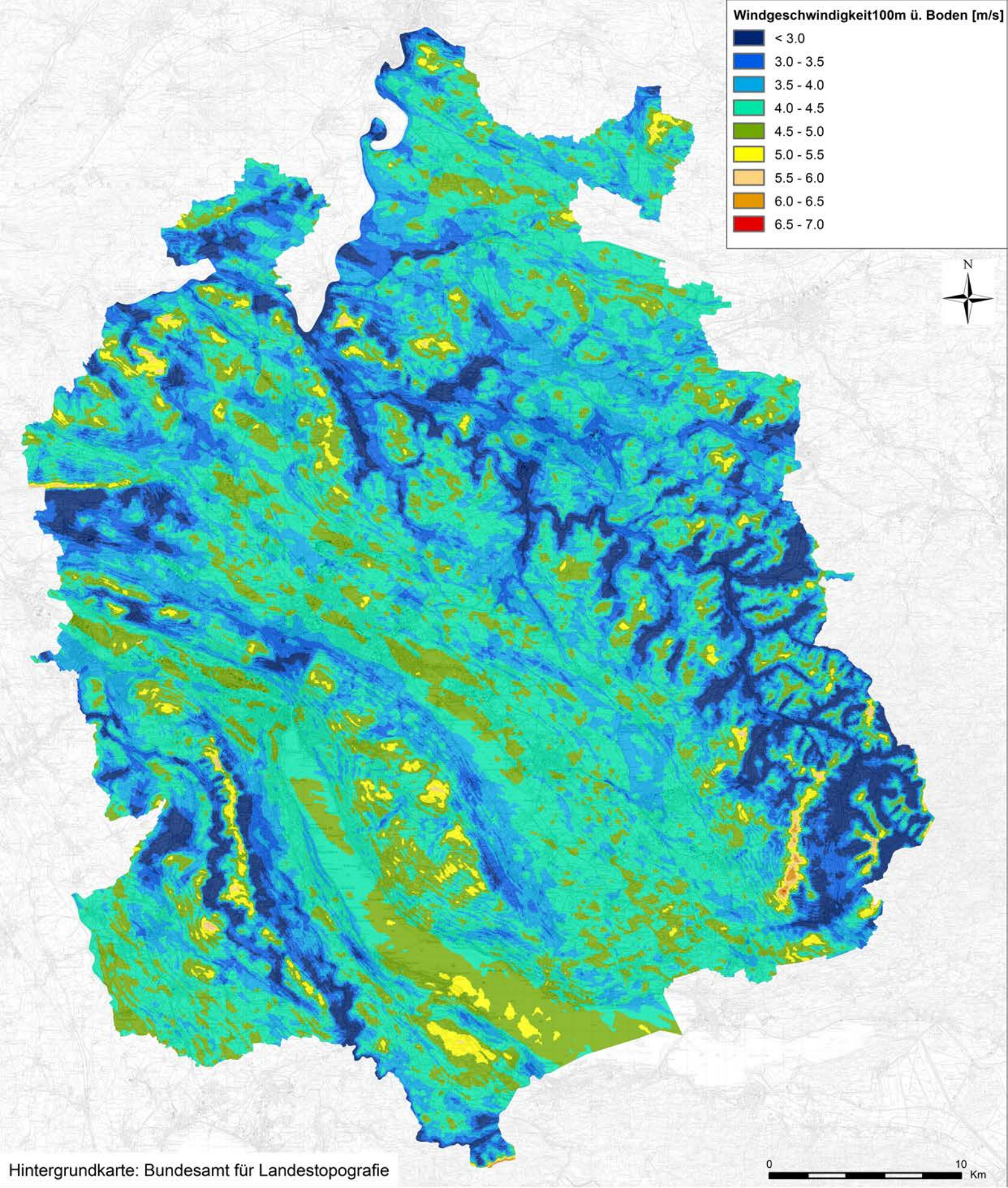
EBP Schweiz AG. (2020). *Investitions- und Planungsbeiträge für Windenergieanlagen.* Zollikon.

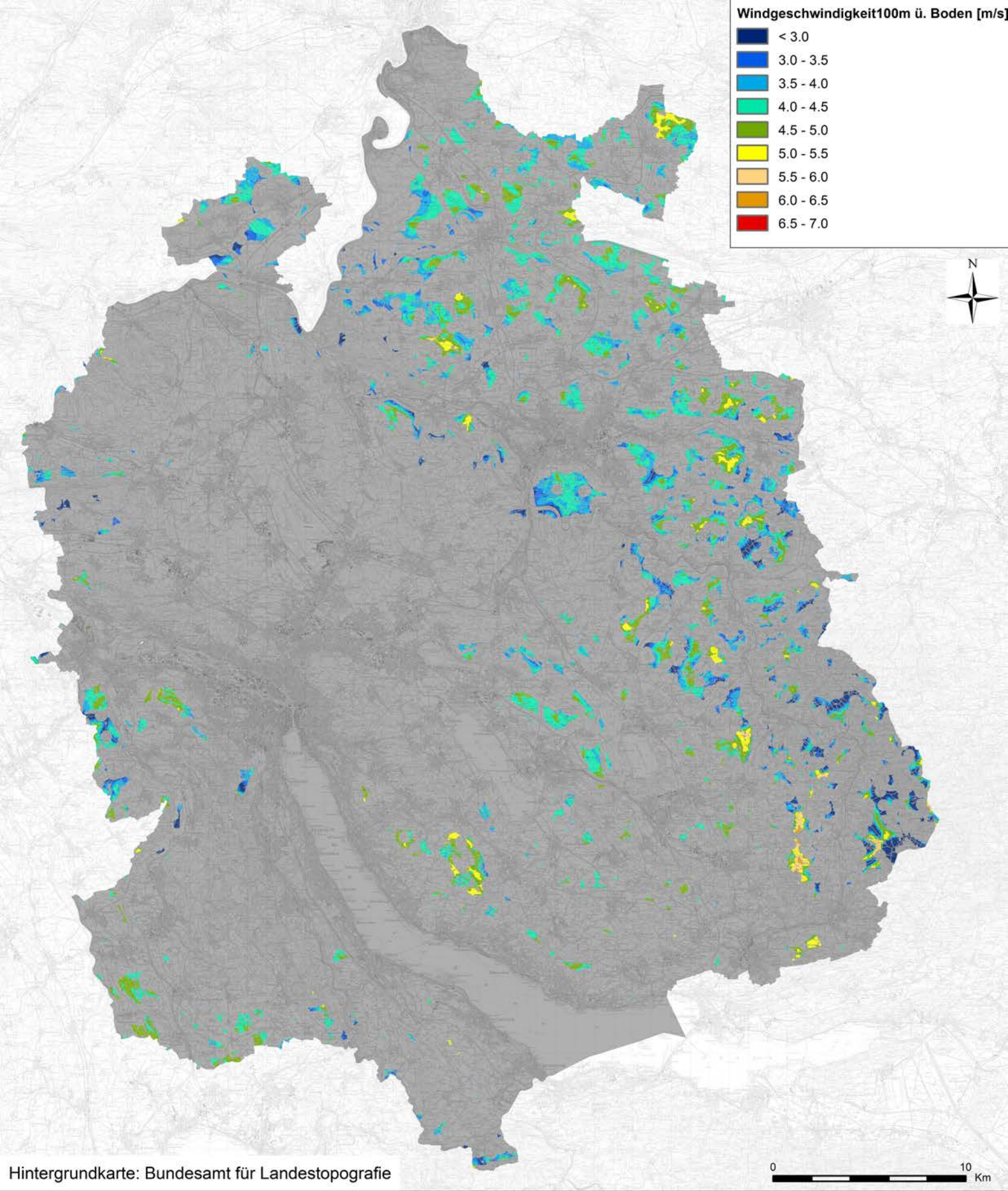
Enercon. (2015). *Datenblatt - ENERCON Windenergieanlage E-103 EP2 Betriebsmodi 0s, Is und IIs.* Aurich.

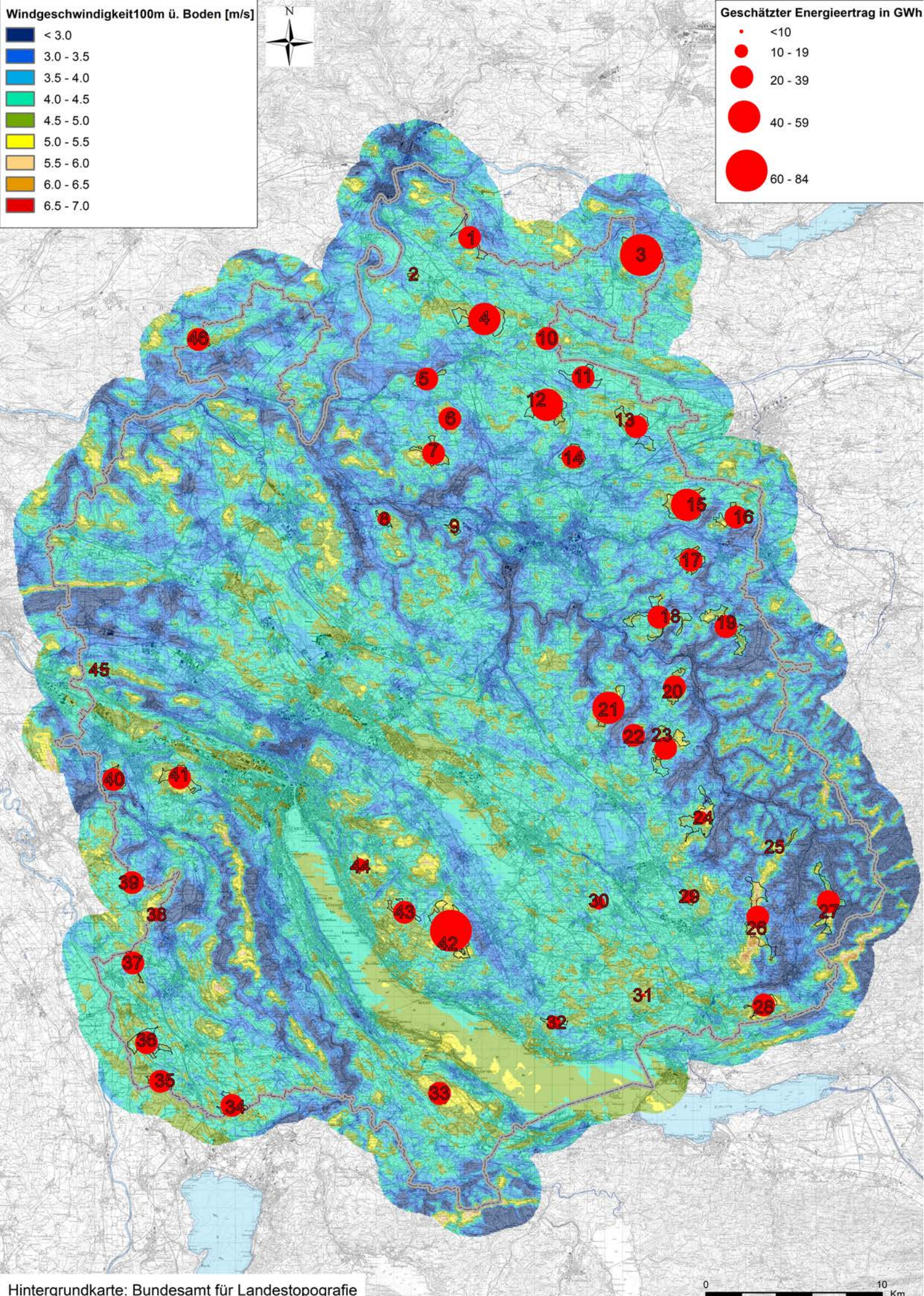
Enercon. (2020). *Technical data sheet - Air Density Dependent Power Curves ENERCON E-160 EP5 E2 / 5500 kW wind energy converter.* Aurich.

New Energy Scout GmbH. (2014). *Windpotentialstudie Kanton Zürich.* Winterthur.

Anhang


Windgeschwindigkeit100m ü. Boden [m/s]
< 3.0
3.0 - 3.5
3.5 - 4.0
4.0 - 4.5
4.5 - 5.0
5.0 - 5.5
5.5 - 6.0
6.0 - 6.5
6.5 - 7.0
N
0
10
Km
Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie


Windgeschwindigkeit100m ü. Boden [m/s]
< 3.0
3.0 - 3.5
3.5 - 4.0
4.0 - 4.5
4.5 - 5.0
5.0 - 5.5
5.5 - 6.0
6.0 - 6.5
6.5 - 7.0
N
Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie
0
10
Km


Windgeschwindigkeit100m ü. Boden [m/s]
< 3.0
3.0 - 3.5
3.5 - 4.0
4.0 - 4.5
4.5 - 5.0
5.0 - 5.5
5.5 - 6.0
6.0 - 6.5
6.5 - 7.0
N
Geschätzter Energieertrag in GWh
<10
10 - 19
20 - 39
40 - 59
60 - 84
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie
0
10
Km