

Windenergiepotenzial in Tirol

Studie im Auftrag von
Amt der Tiroler Landesregierung
28. April 2023

Impressum

Windenergiepotenzial in Tirol

April 2023

Auftragnehmer:

e3 consult GmbH
Andreas-Hofer-Straße 28a
6020 Innsbruck
office[at]e3-consult.at
www.e3-consult.at

Autor:

Dr. Jürgen Neubarth (e3 consult GmbH)

Zitiervorschlag:

Neubarth, J. (2023): Windenergiepotenzial in Tirol, Studie im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung; Innsbruck.

Gender-Hinweis:

Die vorliegende Veröffentlichung wurde in einer gendergerechten Sprache verfasst. Wenn an wenigen Stellen zur besseren Lesbarkeit die männliche Form verwendet wird, sind ebenfalls alle Personen unabhängig von ihrem Geschlecht gemeint.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	II
TABELLENVERZEICHNIS.....	III
KURZFASSUNG	1
1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG	2
2 STAND DER WINDENERGIENUTZUNG IN ÖSTERREICH	3
3 METHODISCHER ANSATZ UND RANDBEDINGUNGEN.....	5
3.1 GRUNDLEGENDE VORGEHENSWEISE.....	5
3.2 WINDNUTZUNGS- UND WINDPOTENZIALFLÄCHEN	6
3.2.1 Mittlere Windgeschwindigkeiten Österreichischer Windatlas	8
3.2.2 Mittlere Windgeschwindigkeiten BIOCLIM	8
3.3 STANDORTSPEZIFISCHE ERTRAGSFAKTOREN	10
3.3.1 Grundlagen	10
3.3.2 Repräsentativer Windkraftanlagentyp	11
Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe	12
Brutto-Volllaststunden für repräsentativen Windkraftanlagentyp	13
Netto-Volllaststunden für repräsentativen Windkraftanlagentyp	17
3.3.3 Mittlerer Flächenbedarf je Windkraftanlage	17
4 TECHNISCHE WINDENERGIEPOTENZIALE IN TIROL	19
4.1 WINDENERGIEPOTENZIALE AUF BASIS WINDDATEN ÖSTERREICHISCHER WINDATLAS	19
4.1.1 Theoretisches technisches Potenzial	19
4.1.2 Realisierbares technisches Potenzial	20
4.1.3 Technisch-wirtschaftliches Potenzial.....	22
4.2 WINDENERGIEPOTENZIALE AUF BASIS WINDDATEN BIOCLIM	25
4.2.1 Theoretisches technisches Potenzial	25
4.2.2 Realisierbares technisches Potenzial	26
4.2.3 Technisch-wirtschaftliches Potenzial.....	26
4.3 GEGENÜBERSTELLUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	30
5 ZUSATZANALYSE: WINDENERGIEPOTENZIALE IN TIROLER SCHIGEBIETEN	35
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	37
7 REFERENZEN	38

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der installierten Windkraftleistung in Österreich 2000-2022	3
Abb. 2:	Regionale Verteilung der Windkraft in Österreich Ende 2022	4
Abb. 3:	Vorgehensweise zur Ermittlung des Windenergiepotenzials in Tirol	5
Abb. 4:	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 100 Meter über Grund Windatlas Österreich.....	8
Abb. 5:	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 100 Meter über Grund BIOCLIM	10
Abb. 6:	Beispiele für Transport und Aufstellung von Windkraftanlagen im Hochgebirge	12
Abb. 7:	Ein- und Ausgabemaske Energieertragsrechner Suisse Éole	14
Abb. 8:	Windpotenzialflächen zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials auf Basis Windatlas Österreich mit (oben) sowie ohne (unten) Darstellung der Ausschlussflächen	23
Abb. 9:	Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial Tirol auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe (Datenbasis Windatlas Österreich).....	26
Abb. 10:	Windpotenzialflächen zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials auf Basis Winddaten BIOCLIM mit (oben) sowie ohne (unten) Darstellung der Ausschlussflächen.....	27
Abb. 11:	Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial Tirol auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe (Datenbasis BIOCLIM)	30
Abb. 12:	Realisierbares technisches und technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol	31
Abb. 13:	Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol für unterschiedliche Winddatensätze auf Bezirksebene	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben bei der Festlegung von Gebieten für eine Windenergienutzung in Tirol.....	7
Tabelle 2: Windnutzungsflächen in km ² auf Grundlage Winddaten Windatlas Österreich.....	9
Tabelle 3: Windnutzungsflächen in km ² auf Grundlage Winddaten BIOCLIM	11
Tabelle 4: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 100 m über Grund sowie 130 m Nabenhöhe in m/s.....	13
Tabelle 5: Brutto-Volllaststunden für exemplarische Windkraftanlagen mit 130 m Nabenhöhe für unterschiedliche Windgeschwindigkeitsklassen in 400 m Seehöhe	15
Tabelle 6: Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten Windatlas Österreich.....	16
Tabelle 7: Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten BIOCLIM	16
Tabelle 8: Netto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten Windatlas Österreich	18
Tabelle 9: Netto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten BIOCLIM.....	18
Tabelle 10: Theoretische technische Windkraftleistung in MW auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bei einem Flächenbedarf von 5,2 ha/MW (Datenbasis Windatlas Österreich) ..	19
Tabelle 11: Theoretisches technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich).....	20
Tabelle 12: Technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich)	21
Tabelle 13: Rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion der repräsentativen Windkraftanlage.....	24
Tabelle 14: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich).....	25
Tabelle 15: Theoretische technische Windkraftleistung in MW auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bei einem Flächenbedarf von 5,2 ha/MW (Datenbasis BIOCLIM)	28
Tabelle 16: Theoretisches technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)	28
Tabelle 17: Technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)	29
Tabelle 18: Rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion der repräsentativen Windkraftanlage.....	29
Tabelle 19: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)	30
Tabelle 20: Gegenüberstellung der Windenergiepotenziale in Tirol für unterschiedliche Winddatensätze	31
Tabelle 21: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial mit exemplarischer Variation wesentlicher Eingangsparameter.....	32
Tabelle 22: Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten für unterschiedliche Winddatensätze.....	36

Kurzfassung

Nicht zuletzt aufgrund der bisherigen Einschätzungen, dass Tirol über ein vergleichsweise geringes Windenergiepotenzial verfügt, hat die Windkraft bisher nur eine geringe Rolle in den energiepolitischen Diskussionen auf Tiroler Landesebene gespielt. Allerdings haben sich die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen der Windkraftnutzung in den vergangenen Jahren sehr dynamisch weiterentwickelt, die eine Neubewertung der Windenergiepotenziale in Tirol notwendig macht. Vor diesem Hintergrund hat die e3 consult gemeinsam mit dem Amt der Tiroler Landesregierung eine aktualisierte Bewertung der Windenergiepotenziale in Tirol durchgeführt, deren Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden können:

Windkraftanlagen im Multi-MW-Bereich können heute auch in alpinen Regionen Tirols errichtet werden

Die Entwicklung immer leistungsstärkerer Windkraftanlagen mit Nabenhöhen von bis zu 175 m ermöglicht mittlerweile eine wirtschaftliche Nutzung der Windenergie auch in Schwachwindgebieten. In Tirol werden aufgrund der z. T. hochalpinen Standorte solche Größen jedoch nur in Einzelfällen erreicht werden können – ein Leistungsbereich von 3-4 MW sowie Nabenhöhen von 130-150 m sind für Tirol aus heutiger Sicht typische mittlere Anlagengrößen.

Verfügbare Winddatensätze der mittleren Windgeschwindigkeiten zeigen hohe Unsicherheiten

Da der Windatlas Österreich die Windenergiepotenziale in Tirol tendenziell unterschätzt, werden die Windenergiepotenziale sowohl aus den Winddaten des Windatlas Österreich als auch des Forschungsprojekts BIOCLIM hergeleitet. Aufgrund der unterschiedlichen Modellansätze zeigen die Winddatensätze vor allem auf kleinräumiger Ebene zum Teil hohe Unterschiede und führen damit zu einer vergleichsweise großen Bandbreite der Ergebnisse.

Windenergiepotenzial in Tirol hat eine energiewirtschaftlich relevante Größenordnung

Trotz der Berücksichtigung von Ausschlussflächen entsprechend europarechtlicher Vorgaben sowie einer restriktiven Festlegung von Mindestabständen zu bspw. Siedlungsgebieten nach fachlichen Vorgaben kann für Tirol auf Grundlage eines vereinfachenden Modellansatzes ein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial von 0,8 bis 1,2 TWh/a abgeleitet werden. Zur Umsetzung dieses Potenzials wären etwa 410-480 MW an Windkraftleistung zu installieren, was bei einer beispielhaften Anlagengröße von 3 MW etwa 140-160 Windkraftanlagen entsprechen würde. Da die Windkraft ihren Erzeugungsschwerpunkt im Winterhalbjahr hat, kann der Windkraftausbau aus Sicht der Versorgungssicherheit Vorteile gegenüber einem Ausbau der Photovoltaik und Laufwasserkraft mit einem Erzeugungsschwerpunkt im Sommer haben.

In Schigebieten liegen etwa 15% der Tiroler Windenergiepotenziale

Vor dem Hintergrund der gestiegenen Strompreise wird die mögliche energiewirtschaftliche Nutzung der Windkraft innerhalb von Tiroler Schigebieten verstärkt diskutiert. Das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial in Tiroler Schigebieten liegt dabei in einer Bandbreite von 150 bis 180 GWh/a. Dieses Potenzial entspricht einer Windkraftleistung von rd. 60 bis 70 MW bzw. 20 bis 23 Windkraftanlagen bei einer Anlagengröße von 3 MW.

Qualität der Winddaten für einen detaillierten Windkataster noch nicht ausreichend

Die GIS-basierte Analyse liefert zwar eine hohe räumliche Auflösung der Windenergiepotenziale für Tirol, hat jedoch auch gezeigt, dass die modellierten Windenergiepotenziale in hohem Maße von der Qualität der Winddaten abhängig sind. Über die vorliegende Neubewertung der Gesamttiroler Windenergiepotenziale hinaus, sollte auf Basis der verfügbaren Winddatensätze daher keine weitergehende Festlegung von konkreten Windvorrangflächen erfolgen. Auch können aus den pauschalen Bewertungsergebnissen keine abschließenden Aussagen zur technischen Umsetzbarkeit von Windkraftanlagen auf konkreten Einzelstandorten getroffen werden.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Mit der im Jahr 2018 von der Österreichischen Bundesregierung beschlossenen *Klima- und Energiestrategie #mission2030* [1] wurde die Richtung der österreichischen Energie- und Klimapolitik bis 2030 und darüber hinaus bis 2050 vorgegeben. Die *#mission2030* stellt auch die Basis für den *nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP) Österreichs* [2] dar, mit dem die Umsetzung der von der EU für die gesamte Union bzw. die einzelnen Mitgliedsländer vorgegebenen Zielvorgaben näher konkretisiert werden. Entsprechend dem NEKP muss Österreich bis 2030 die Treibhausgasemissionen in den nicht vom Emissionshandel erfassten Sektoren um 36% gegenüber 2005 reduzieren sowie den Anteil erneuerbarer Energie am Brutto-Endenergieverbrauch auf 45-50% erhöhen und die Primärenergieintensität (d. h. Verhältnis von Primärenergieverbrauch und Bruttoinlandsprodukt) um 25-30% gegenüber 2015 verbessern. Auch sieht der NEKP eine (national bilanzielle) Deckung des Stromverbrauchs bis 2030 zu 100% aus erneuerbaren Energien vor. Entsprechend dem österreichischen Regierungsprogramm 2020-2024 [3] soll dieses Ziel durch einen Zubau von rd. 27 TWh Jahreserzeugung aus erneuerbaren Energien erreicht werden, wobei das Regierungsprogramm als Ausbauziele bis 2030 für Windkraft 10 TWh, für Photovoltaik 11 TWh, für Wasserkraft 5 TWh und für Biomasse 1 TWh nennt. Hierzu müssten zwischen 2020 und 2030 etwa 1.200 MW an Wasserkraft (ohne Pumpspeicher), 5.000 MW an Windkraft- und 11.000 MW an PV-Leistung errichtet werden.

Auf Tiroler Ebene hat die Tiroler Landesregierung mit *Tirol 2050 energieautonom* [4] und ihrem Bekenntnis zur Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern bis zum Jahr 2050 die Grundlagen für die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung in Tirol geschaffen. Mit den im Jahr 2018 veröffentlichten *Ressourcen- und Technologieeinsatz- Szenarien Tirol 2050* [5] und den 2021 an die geänderten energiepolitischen Vorgaben auf Bundesebene (Klimaneutralität bis 2040) angepassten *Energie-Zielszenario Tirol 2050 und 2040 mit Zwischenziel 2030* [6] wurde die von *Tirol 2050 energieautonom* vorgegebene Entwicklung des Tiroler Energiesystems weitergehend konkretisiert. Auf Grundlage der Ergebnisse der 2014 erstmalig durchgeführten Bewertung des Windenergiepotenzials in Tirol [7] ist für die Windkraft eine Jahreserzeugung von 250 GWh/a als realisierbares Ausbaupotenzial bis 2050 im *Energie-Zielszenario* berücksichtigt. Im Vergleich dazu wird im *Energie-Zielszenario* ein Ausbau der Wasserkraft auf eine Jahreserzeugung von rd. 9.400 GWh/a und der Photovoltaik von rd. 3.900 GWh/a bis 2050 unterstellt.

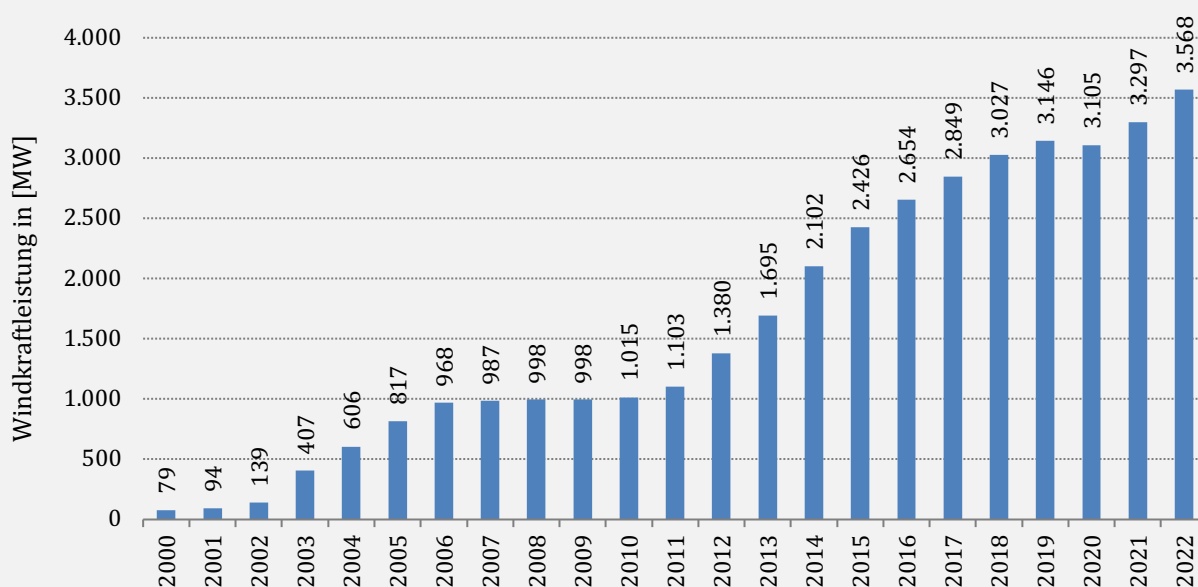
Allerdings haben sich die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zur Bewertung des Windenergiepotenzials in Tirol in den vergangenen Jahren weiterentwickelt, so dass eine Aktualisierung der Bewertung der Tiroler Windenergiepotenziale aus dem Jahr 2014 zielführend ist. Entsprechend hat der Tiroler Landtag mit Entscheidung vom 7. Juli 2022 [8] beschlossen, dass eine Aktualisierung der damaligen Arbeiten zur Nutzung der Windenergiepotenziale in Tirol durchgeführt werden soll, um geeignete Standorte für Windkraftanlagen prüfen und einen Windkataster analog zum Solarkataster 2.0 erstellen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurde die e3 consult vom Amt der Tiroler Landesregierung mit einer Aktualisierung der Bewertung der technischen und technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenziale in Tirol beauftragt. Hierzu wird nach einer Darstellung der Entwicklung der Windenergienutzung in Österreich in Kapitel 2 die grundlegende Methodik zur Ermittlung der Tiroler Windenergiepotenziale in Kapitel 3 beschrieben. In Kapitel 4 werden auf Basis der Ergebnisse einer GIS-basierten Analyse die Windenergiepotenziale nach Vorgabe der Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben bei der Festlegung von Gebieten für eine Windenergienutzung in Tirol bestimmt. Zusätzlich werden in Kapitel 5 die Windenergiepotenziale innerhalb Tiroler Schigebiete gesondert betrachtet, bevor im abschließenden Kapitel 6 ein zusammenfassendes Fazit gezogen wird.

2 Stand der Windenergienutzung in Österreich

Weltweit waren Ende 2021 rd. 837.600 MW an Windkraftleistung installiert, wobei hiervon 93% auf Wind onshore und 7% auf Wind offshore entfallen [9]. Mit über 338.000 MW installierter Leistung dominiert China den Weltmarkt vor Europa, wo Ende 2021 etwa 236.000 MW an Windkraftleistung am Netz waren (208.000 MW onshore und 28.000 MW offshore). Mit knapp 3.600 MW hatte Österreich Ende 2022 zwar nur einen Anteil von 1,4 % an der gesamteuropäischen Windkraftleistung, nach einer schleppenden Entwicklung der Installationszahlen in den vergangenen Jahren ist durch das im Juli 2021 in Kraft getretene Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) wieder eine etwas stärkere Dynamik in den österreichischen Windmarkt gekommen (Abb. 1). Um jedoch die Ausbau-Ziele der Bundesregierung von 10 TWh/a bis 2030 erreichen zu können, müsste der jährliche Zubau bei einem Plus von 500 MW/a und damit etwa um den Faktor 2 über der aktuellen Ausbaugeschwindigkeit liegen.

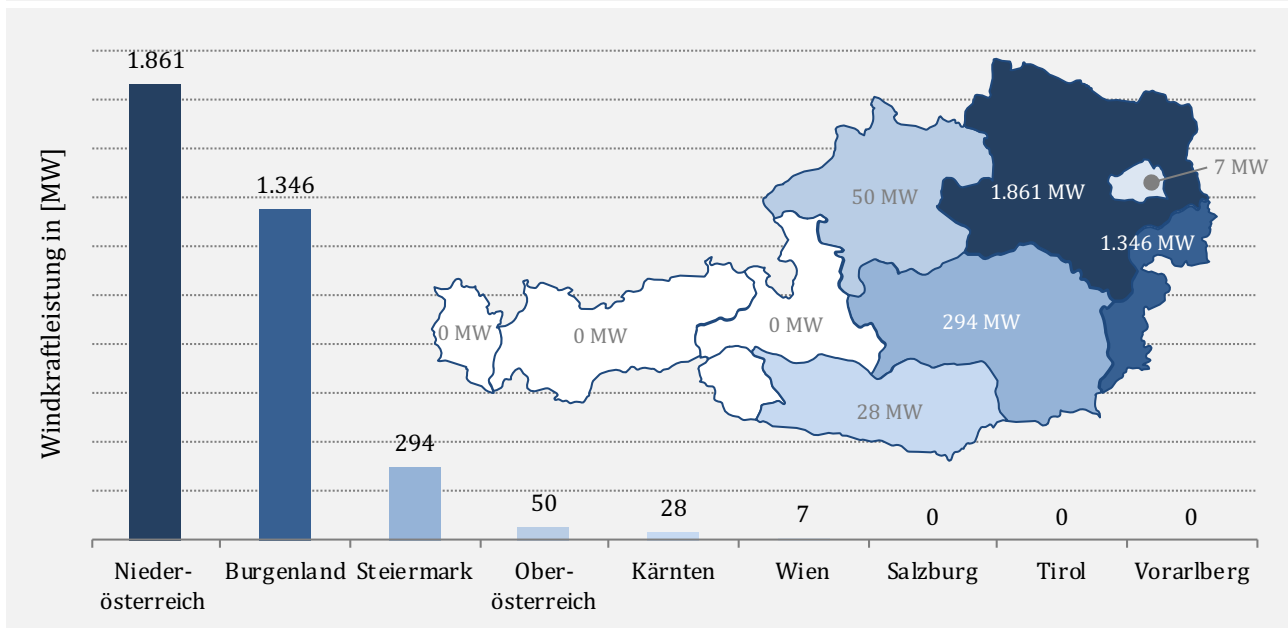
Abb. 1: Entwicklung der installierten Windkraftleistung in Österreich 2000-2022



Quelle: IG Windkraft [10]

Das potenzielle Jahreserzeugungsvermögen der bis Ende 2022 in Österreich installierten Windkraftanlagen liegt auf Basis eines Normalwindjahres bei etwa 8,3 TWh/a – dies entspricht rd. 11% des gesamten österreichischen Inlandsstromverbrauchs [10], [11]. Auf Grund der vom meteorologischen Windenergiedargebot abhängigen tatsächlichen Windstromerzeugung kann diese um +/-15% von einem Normalwindjahr abweichen. Bspw. lag die Windstromerzeugung in 2022 mit 7,2 TWh [12] knapp 13% unter der Erzeugung eines rechnerischen Normalwindjahrs.

Bisher konzentriert sich großtechnische Windenergienutzung in Österreich fast ausschließlich auf Niederösterreich (1.861 MW), das Burgenland (1.346 MW) und die Steiermark (294 MW) – in den drei Bundesländern waren 2022 rd. 98 % der gesamtösterreichischen Windkraftleistung installiert. Die restlichen 2% verteilen sich auf Oberösterreich (50 MW), Kärnten (28 MW) und Wien (7 MW). Neben Tirol wurden bisher auch in den beiden anderen westlichen Bundesländern Salzburg und Vorarlberg keine großen Windkraftanlagen installiert (Abb. 2).

Abb. 2: Regionale Verteilung der Windkraft in Österreich Ende 2022

Quelle: IG Windkraft [10]

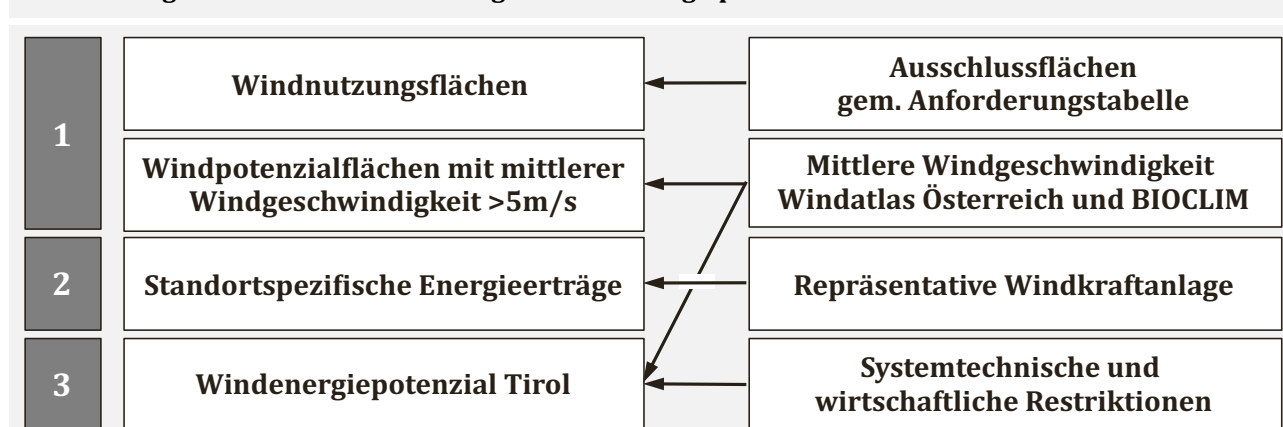
Diese regionale Verteilung der Windstromerzeugung in Österreich spiegelt vor allem die im Osten und Süd-Osten Österreichs vorhandenen sehr guten Windbedingungen wider. Sie zeigt jedoch auch die einer Erschließung von Windkraftstandorten z. T. entgegenstehenden naturräumlichen Gegebenheiten (Topografie, Naturgefahren) und Schutzinteressen (Tourismus, Naturschutz) in den alpinen Regionen Westösterreichs auf, die bisher einer großtechnischen Nutzung der Windkraft entgegenstanden.

3 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

3.1 Grundlegende Vorgehensweise

In den vergangenen Jahren hat sich eine nennenswerte Anzahl an Studien mit dem in Österreich vorhandenen und energiewirtschaftlich nutzbaren Windenergiepotenzial beschäftigt, wobei sich diese z. T. deutlich in ihrer Detailtiefe und regionalen Ausrichtung unterscheiden. Dadurch zeigen diese Studien nicht zuletzt auf Grund der unterschiedlichen Veröffentlichungsjahre sowie der abweichenden Schwerpunktsetzungen auch eine relativ große Streubreite für das Windenergiepotenzial in Tirol. Während bspw. in einer Meta-Studie der IG Windkraft aus dem Jahr 2007 für Tirol ein Windenergiepotenzial zwischen 150 und 380 GWh/a ausgewiesen wird [13], zeigt ein vom Österreichischen Institut für Raumplanung (ÖIR) koordiniertes Projekt für Tirol ein technisches Windenergiepotenzial von 900-1.200 GWh/a [14]. Die relativ großen Unterschiede zwischen den einzelnen Studien liegen zum einen an den unterschiedlichen Randbedingungen zur Quantifizierung der Potenziale und zum anderen an der technologischen Entwicklung der Windkraft im Laufe der Jahre. Entsprechend können die Ergebnisse dieser vergleichweisen alten Studien nur mehr sehr eingeschränkt zur Einschätzung des Windenergiepotenzials in Tirol herangezogen werden. Das Amt der Tiroler Landesregierung hat sich daher entschlossen, eine eigene GIS-basierte Analyse der Windenergiepotenziale in Tirol durchzuführen, um damit insbesondere eine Berücksichtigung der in der sog. Anforderungstabelle zusammengeführten europarechtlichen und fachlichen Vorgaben bei der Ermittlung der Tiroler Windenergiepotenziale zu ermöglichen. Abb. 3 zeigt hierzu die grundlegende Vorgehensweise zur Ermittlung des Windenergiepotenzials in Tirol.

Abb. 3: Vorgehensweise zur Ermittlung des Windenergiepotenzials in Tirol



Quelle: e3 consult

- Im ersten Schritt (Abschnitt 3.2) werden die für eine Windkraftnutzung in Tirol prinzipiell zur Verfügung stehenden Windnutzungsflächen auf Grundlage der Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben bei der Festlegung der für eine Windenergienutzung in Tirol geeigneten Gebiete ermittelt. Als Windpotenzialflächen werden jedoch nur jene Windnutzungsflächen berücksichtigt, die eine jahresmittlere Windgeschwindigkeit von über 5,0 m/s in 100 m Höhe über Grund aufweisen, da bei geringeren mittleren Windgeschwindigkeiten in der Regel eine technisch-wirtschaftlich sinnvolle Windenergienutzung ausgeschlossen werden kann.

- Im zweiten Schritt (Abschnitt 3.3) werden anhand einer für alpine Regionen repräsentativen Windkraftanlage die standortspezifischen Energieerträge für unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten und Höhenlagen hergeleitet.
- Im abschließenden dritten Schritt (Kapitel 4) wird unter Berücksichtigung eines mittleren Flächenbedarfs je Windkraftanlage sowie systemtechnischer und wirtschaftlicher Restriktionen aus den je Rasterelement vorliegenden jahresmittleren Windgeschwindigkeit das Windenergiepotenzial in Tirol ermittelt.

3.2 Windnutzungs- und Windpotenzialflächen

Auf Basis der im Tiroler Rauminformationssystem tiris im 10x10 m-Raster verfügbaren Geoinformationen wurden jene Gebiete und Bereiche ausgeschlossen, in denen gemäß der Anforderungstabelle (Tabelle 1) keine Nutzung der Windkraft erfolgen soll. Die Anforderungstabelle berücksichtigt dabei jene Parameter, die nach europarechtlichen und fachlichen Vorgaben nicht als Gebiete für eine Windenergienutzung in Tirol vorgesehen sind und damit im Rahmen der vorliegenden Studie von einer Betrachtung als Windnutzungsfläche **ausgenommen** werden und differenziert zwischen den Themenbereichen A) Mensch/Nutzungen/Infrastruktur, B) Landschaft/Erholung sowie C) Naturraum/Ökologie, wobei sämtliche in der Anforderungstabelle vorgegebenen Mindestabstände als Luftlinie zwischen Schutzgut und Fußpunkt der Windkraftanlage zu verstehen sind.

Im Ergebnis können von der gesamten Tiroler Landesfläche (rd. 12.650 km²) etwa 29% oder 3.607 km² als Windnutzungsflächen klassifiziert werden. Diese Windnutzungsflächen haben jedoch nicht notwendigerweise ein zur energiewirtschaftlichen Nutzung ausreichendes Windpotenzial (d. h. wirtschaftliche Restriktionen) bzw. wird die Errichtung von Windkraftanlagen auf Grund geländespezifischer Eigenschaften (Hangneigung) nicht auf jeder Windnutzungsfläche möglich sein (systemtechnische Restriktionen). Zur Ableitung der in Tirol verfügbaren Windpotenzialflächen werden daher jene Windnutzungsflächen ausgeschieden, die aus technischer oder energiewirtschaftlicher Sicht keine bzw. nur eine sehr eingeschränkt sinnvolle Nutzung der Windenergie ermöglichen. In Anlehnung an vergleichbare Studien (u. a. [15], [16]) werden daher nur jene Windnutzungsflächen als Windpotenzialflächen für die weiteren Betrachtungen berücksichtigt, die eine jahresmittlere Windgeschwindigkeit von über 5,0 m/s in 100 m Höhe über Grund aufweisen.

Für die mittleren Windgeschwindigkeiten wird im Rahmen dieser Studie auf zwei unterschiedliche Datenquellen zurückgegriffen. Neben dem Windatlas Österreich [17] werden die Windenergiepotenziale in Tirol auch mit den Daten aus dem Forschungsprojekt BIOCLIM [18] hergeleitet.¹ Der Winddatensatz BIOCLIM wird insbesondere auch deshalb für die Bewertung der Windenergiepotenziale in Tirol herangezogen, da die im Windatlas Österreich ausgewiesenen Windgeschwindigkeiten durch modellimmanente Unsicherheiten einen mittleren Fehler von +/-0,8 m/s aufweisen. Auf Grund der geringeren Dichte an Windmessstationen im Alpenraum, die in die Modellrechnungen des Windatlas eingeflossen sind, kann diese Unsicherheit für Tirol z. T. sogar noch deutlich höher liegen. Auch muss berücksichtigt werden, dass sich seit Erstellung des Windatlas Österreich im Jahre 2011 die computergestützten Möglichkeiten zur Windmodellierung weiterentwickelt haben.

¹ Grundsätzlich steht mit dem Global Wind Atlas [19] ein weiterer Datensatz für mittlere Windgeschwindigkeiten in Tirol zur Verfügung. Allerdings überschätzt der Global Wind Atlas auf Grund seines Modellierungsansatzes sowie der vergleichsweise großen Auflösung von 250 x 250 m die Windenergiepotenziale in Tirol deutlich, so dass im Rahmen der vorliegenden Potenzialstudie der Global Wind Atlas nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 1: Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben bei der Festlegung von Gebieten für eine Windenergienutzung in Tirol

Thema / Kriterien		Konflikt	Pufferzone ²
A	Mensch / Nutzungen / Infrastruktur		
A1	Bauland, überwiegend für Wohnnutzung	Ja	1.200 m
A2	Bauland überwiegend für gemischte Nutzung	Ja	1.200 m
A3	Bauland, überwiegend für gewerblich – industrielle Nutzung	Ja	1.200 m
A4	Sonderflächen überwiegend für intensive bauliche Nutzung	Ja	1.200 m
A1 – A4	Bauliche Entwicklungsbereiche in den Örtlichen Raumordnungskonzepten, welche diese Nutzungen ermöglichen	Ja	1.200 m
A5	Sonderflächen überwiegend für intensive bauliche Nutzung, der Landwirtschaft zugeordnet exkl. Einzelgehöfte in Hanglagen	Ja	1.200 m
A6	Autobahnen und Flughäfen	Ja	150 m
A7	Eisenbahnlinien und andere Straßen	Ja	100 m
A8	Hochspannungstrassen >= 110KV	Ja	150 m
A9	Richtfunkstrecken des Landes Tirol sowie die Richtfunkstrecken des Österreichischen Bundesheeres zuzüglich eines Sicherheitskorridors von je 25 m links und rechts	Ja	50 m
A10	Interessens- und Sperrflächen des Österreichischen Bundesheeres ³ inkl. zuzüglich eines Mindestabstandes	Ja	500 m
B	Landschaft / Erholung		
B1	Nationalparks	Ja	Keine
B2	Landschaftsschutzgebiete	Ja	Keine
B3	Geschützte Landschaftsteile	Ja	Keine
B4	Ruhegebiete	Ja	Keine
B5	Naturparke	Ja	Keine
B6	Gletscherflächen	Ja	Keine
C	Naturraum / Ökologie		
C1	Naturschutzgebiete nach dem Tiroler Naturschutzgesetz	Ja	Keine
C2	Natura 2000-SPA-Schutzgebiete nach der Vogelschutzrichtlinie, Referenzvogel für Tirol – Steinadler mit 5 km Aktionsradius um das Revierzentrum	Ja	5.000 m

Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis europarechtlicher und fachlicher Vorgaben

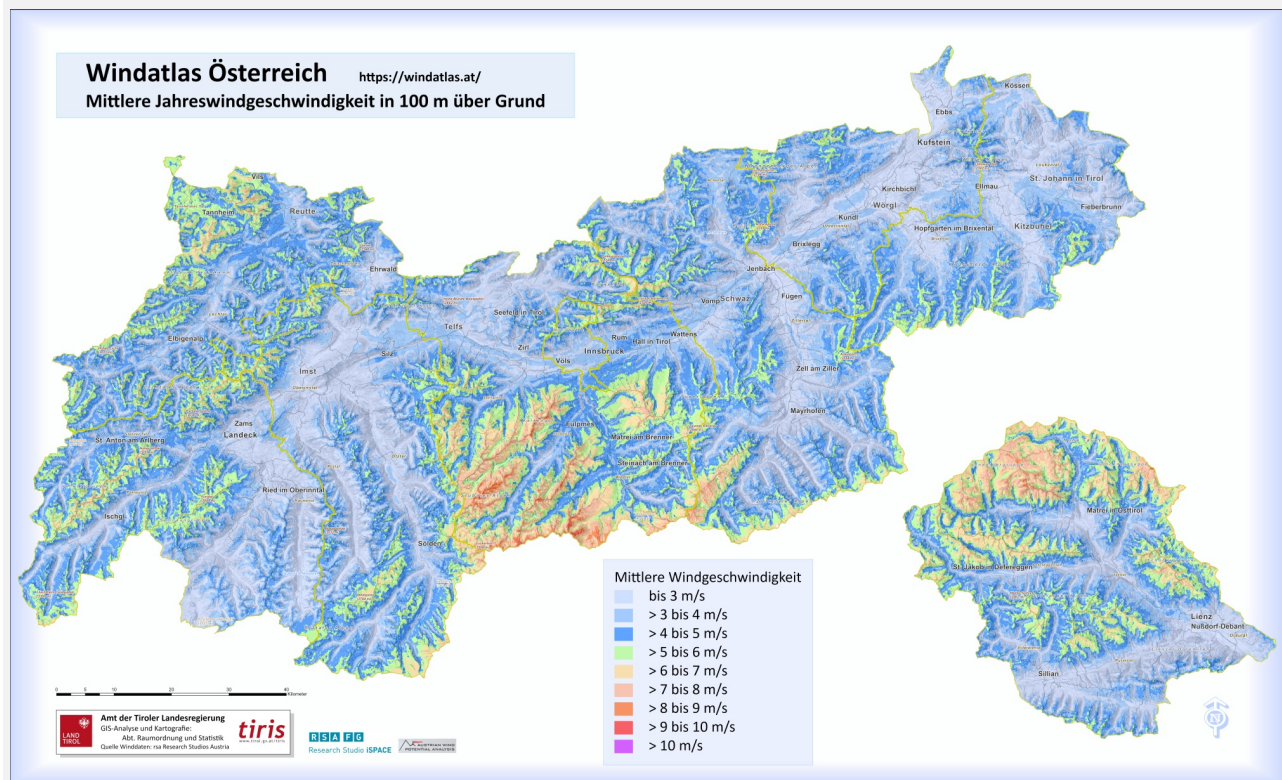
² Sämtliche Mindestabstände sind als Luftlinie zwischen Schutzgut und Fußpunkt der Windkraftanlage definiert.

³ Truppenübungsplätze Wattener Lizum und Hochfilzen

3.2.1 Mittlere Windgeschwindigkeiten Österreichischer Windatlas

Mit dem von der Energiewerkstatt und RSA iSpace 2011 abgeschlossenen Projekt *Windatlas und Windpotenzialstudie Österreich* [17], [20] wurde erstmals für Österreich eine speziell auf die spezifischen Anforderungen der Windkraftnutzung abgestimmte regional differenzierende Potenzialanalyse durchgeführt. Im Ergebnis liefert die Studie die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 50 und 100 Meter Höhe über Grund im Raster 100 x 100 m (Abb. 4).

Abb. 4: Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 100 Meter über Grund Windatlas Österreich



Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis Windkarte Österreich [20]

Durch die Verschneidung der mittleren Windgeschwindigkeiten und der von Windnutzung gemäß Kriterienkatalog ausgenommen Flächen, können die in Tabelle 2 dargestellten Windnutzungsflächen in Tirol als Matrix der mittleren Windgeschwindigkeit gemäß Windatlas Österreich sowie Höhenlage abgeleitet werden. Von den in Tirol insgesamt zur Verfügung stehenden 3.607 km² Windnutzungsflächen haben 838 km² eine jahresmittlere Windgeschwindigkeit von über 5,0 m/s in 100 m Höhe über Grund und können damit als Windpotenzialflächen für die weiteren Betrachtungen berücksichtigt werden. Dies entspricht 6,6% der gesamten Landesfläche.

3.2.2 Mittlere Windgeschwindigkeiten BIOCLIM

In dem vom Amt der Tiroler Landesregierung in Auftrag gegeben Forschungsprojekt BIOCLIM werden unterschiedliche klimatologische Daten für die Weiterentwicklung der Waldtypenkarte bereitgestellt [18]. U. a. steht die jahresmittlere Windgeschwindigkeiten in einem Raster von 10x10 m zur Verfügung. Allerdings liegen die Windgeschwindigkeiten in BIOCLIM nicht in einer Höhe von 100 m, sondern von 10 m über Grund vor, d. h die Windgeschwindigkeit muss auf eine Höhe von 100 m über Grund umgerechnet werden.

Tabelle 2: Windnutzungsflächen in km² auf Grundlage Winddaten Windatlas Österreich

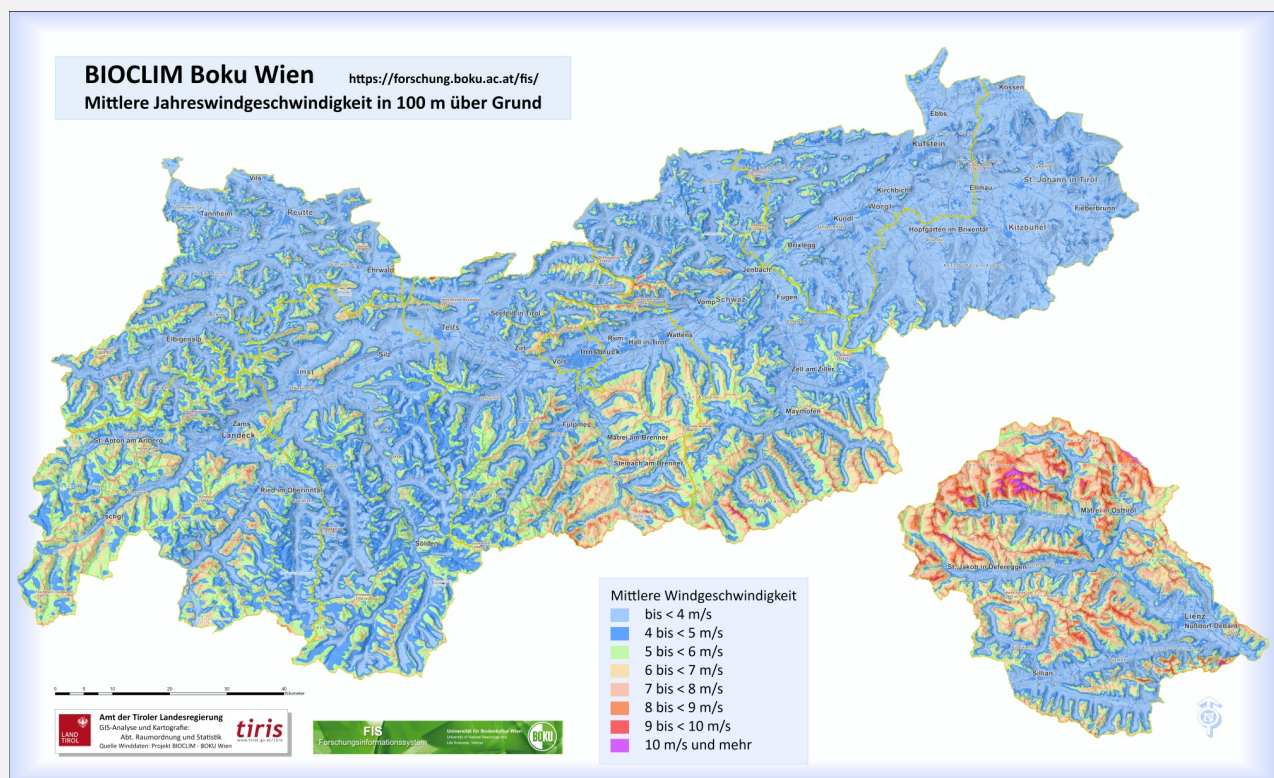
Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)								Gesamt (km ²)
von	bis	0,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0	
400	1.000	59,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,2
1.000	1.500	588,6	26,4	10,4	1,6	0,2	0,0	0,0	0,0	627,2
1.500	1.600	192,4	16,0	6,4	1,8	0,6	0,0	0,0	0,0	217,1
1.600	1.700	190,5	19,3	8,8	1,4	0,5	0,0	0,0	0,0	220,5
1.700	1.800	204,3	20,1	10,7	2,4	0,3	0,1	0,0	0,0	237,9
1.800	1.900	223,0	23,7	13,3	3,1	0,4	0,1	0,0	0,0	263,6
1.900	2.000	228,3	29,6	15,6	5,3	0,8	0,1	0,0	0,0	279,7
2.000	2.100	224,2	33,8	18,6	7,2	1,6	0,3	0,0	0,0	285,7
2.100	2.200	208,4	38,7	21,9	8,9	3,5	0,4	0,1	0,0	281,9
2.200	2.300	180,8	44,1	24,2	10,8	4,2	0,9	0,2	0,0	265,1
2.300	2.400	149,1	46,1	25,1	11,5	4,0	0,9	0,2	0,0	236,9
2.400	2.500	116,1	43,8	27,8	13,0	4,3	1,1	0,2	0,1	206,4
2.500	2.600	84,9	37,1	29,0	14,7	4,4	1,7	0,4	0,1	172,3
2.600	2.700	55,2	25,7	23,7	12,3	4,4	1,6	0,5	0,2	123,7
2.700	2.800	33,7	11,5	13,5	7,9	3,6	1,0	0,3	0,1	71,7
2.800	2.900	18,6	5,1	5,2	3,6	1,9	0,7	0,1	0,1	35,3
2.900	3.000	8,3	1,9	2,1	1,4	0,7	0,2	0,0	0,0	14,7
3.000	3.100	2,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,1	0,0	0,0	5,5
3.100	3.200	0,8	0,2	0,2	0,2	0,5	0,1	0,0	0,0	2,0
3.200	3.300	0,4	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,7
3.300	3.400	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
3.400	3.500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt (km ²)		2.769,5	423,9	257,1	108,0	36,7	9,4	2,0	0,7	3.607,2

Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis Windatlas Österreich [17]

Für eine solche Umrechnung wird häufig ein logarithmisches Windprofil entsprechend der nachfolgend dargestellten Formel herangezogen, um den mit zunehmender Höhe über Grund abnehmenden Einfluss der Bodenbeschaffenheit berücksichtigen zu können (vgl. bspw. Windprofil-Rechner auf der Website für Windenergie-Daten der Schweiz [21]).

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

Dabei ist v_1 die aus BIOCLIM für die Höhe h_1 (10 m über Grund) verfügbare mittlere Windgeschwindigkeit. v_2 ist die mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe h_2 , also in 100 m über Grund. z_0 ist die von der Oberflächenbeschaffenheit des Geländes abhängige sog. Rauigkeitslänge. In Anlehnung an die in der Literatur für unterschiedliche Geländetypen und Geländeoberflächen genannten Rauigkeitslänge (u. a. [21], [22]), wird z_0 standardmäßig mit 0,005 m vorgegeben (Literaturangabe für kahle Felsen und wenig bewachsene Flächen und damit typisch für bspw. alpine Berglandschaften). Davon abweichend wird für Waldgebiet eine Rauigkeitslänge von 0,4 m, für landwirtschaftlich genutzt Flächen von 0,04 m und für Siedlungs- und Verkehrsflächen von 1,0 m unterstellt (Abb. 5).

Abb. 5: Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 100 Meter über Grund BIOCLIM

Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis BIOCLIM [18]

Durch die Verschneidung der mittleren Windgeschwindigkeiten und der von einer Windnutzung gemäß Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben ausgenommenen Flächen kann die in Tabelle 3 dargestellte Matrix der Windnutzungsflächen in Tirol für unterschiedliche Klassen der mittleren Windgeschwindigkeit auf Basis BIOCLIM sowie unterschiedliche Klassen für die Höhenlage abgeleitet werden. Von den in Tirol insgesamt zur Verfügung stehenden 3.616 km² Windnutzungsflächen⁴ haben 1.563 km² eine jahresmittlere Windgeschwindigkeit von über 5,0 m/s in 100 m Höhe über Grund und können damit als Windpotenzialflächen für die weiteren Betrachtungen berücksichtigt werden. Dies entspricht 12,4% der gesamten Landesfläche.

3.3 Standortspezifische Ertragsfaktoren

3.3.1 Grundlagen

Die dem Wind beim Durchströmen des Rotors einer Windkraftanlage entnommene Leistung wird neben der Rotorkreisfläche und damit der Größe der Windkraftanlage von der Windgeschwindigkeit sowie der Luftdichte bestimmt. Der grundsätzliche Zusammenhang zur Ermittlung der dem Wind entzogenen Leistung wird durch die nachfolgende Formel beschrieben.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * v_{wi}^3 * c_p$$

⁴ Die Abweichungen der Windnutzungsflächen gemäß BIOCLIM (3.190 km²) im Vergleich zu Windnutzungsflächen gemäß Windatlas Österreich (3.607 km²) entstehen durch Rundungsdifferenzen sowie insbesondere unterschiedliche Raster-Zuschneitte.

Tabelle 3: Windnutzungsflächen in km² auf Grundlage Winddaten BIOCLIM

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)												Ge- samt (km ²)
von	bis	0,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0	
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0		
400	1.000	59,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,6
1.000	1.500	588,5	24,7	8,7	4,7	1,4	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	628,8
1.500	1.600	185,0	15,1	7,6	6,2	2,0	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	217,4
1.600	1.700	175,2	21,1	9,7	7,9	3,8	2,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	220,7
1.700	1.800	174,4	24,0	15,1	13,6	6,5	2,8	1,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	238,1
1.800	1.900	177,2	31,6	16,6	18,4	11,9	4,8	1,9	0,8	0,4	0,1	0,0	0,0	263,7
1.900	2.000	165,2	39,8	23,8	18,7	15,1	9,4	4,4	2,0	0,8	0,4	0,2	0,0	279,8
2.000	2.100	140,7	55,1	35,4	22,2	13,7	9,2	5,3	2,7	1,2	0,3	0,1	0,0	285,9
2.100	2.200	96,0	68,8	52,7	26,9	20,5	9,0	4,7	1,9	0,9	0,3	0,1	0,0	282,1
2.200	2.300	69,6	57,6	55,7	32,8	26,4	12,5	6,5	3,4	0,8	0,1	0,0	0,0	265,5
2.300	2.400	61,0	46,1	47,0	28,8	26,1	12,7	8,0	5,1	2,2	0,5	0,1	0,0	237,6
2.400	2.500	56,9	36,5	38,9	25,3	21,1	13,4	6,8	3,9	3,1	1,0	0,3	0,0	207,0
2.500	2.600	42,9	36,9	28,2	19,5	19,8	10,8	7,8	3,6	1,9	1,0	0,4	0,0	172,8
2.600	2.700	31,2	25,8	24,0	12,2	11,2	10,1	5,1	2,5	1,2	0,6	0,3	0,0	124,2
2.700	2.800	18,8	13,6	14,7	9,8	6,9	3,5	3,6	1,2	0,4	0,1	0,0	0,0	72,6
2.800	2.900	7,7	8,2	5,8	5,2	5,3	2,0	0,8	0,9	0,3	0,1	0,0	0,0	36,1
2.900	3.000	1,9	3,3	3,5	1,8	2,4	1,7	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	15,2
3.000	3.100	0,6	0,8	1,2	0,9	1,0	0,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8
3.100	3.200	0,1	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
3.200	3.300	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
3.300	3.400	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
3.400	3.500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt (km ²)		2.052,5	509,6	389,1	255,2	195,3	106,8	58,5	28,8	13,4	4,7	1,8	0,0	3.615,7

Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis BIOCLIM [18]

Dabei ist ρ die Dichte der Luft, S die vom Rotor überstrichene Fläche, v_{wi} die Windgeschwindigkeit vor dem Rotor und c_p der sog. Betzsche Leistungsbeiwert. Der potenzielle Stromertrag, der auf einer Windpotenzialfläche erzielt werden kann, ist damit zum einen abhängig von der Seehöhe (Luftsdichte nimmt mit steigender Höhe ab) sowie vom Windkraftanlagentyp (Rotordurchmesser und Leistungsbeiwert). Zum anderen wird der über ein Gesamtjahr erzielbare Stromertrag auf Grund der kubischen Beziehung zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit von der Häufigkeitsverteilung und nicht unmittelbar vom Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit bestimmt.

Da im Gegensatz zur jahresmittleren Windgeschwindigkeit die Häufigkeitsverteilung des Winddargebots für Tirol nicht flächig verfügbar ist, erfolgt die Herleitung des Windenergiepotenzials nach einem vereinfachenden, für die Anforderungen an eine projektunabhängige Potenzialanalyse jedoch hinreichend genauen Ansatz. Hierzu wird ein für den alpinen Raum repräsentativer Windkraftanlagentyp definiert, für den anschließend die Brutto- und Netto-Volllaststunden für die im Rahmen dieser Studie berücksichtigten Klassen der mittleren Windgeschwindigkeit und Höhenlage bestimmt werden.

3.3.2 Repräsentativer Windkraftanlagentyp

Das an einem bestimmten Standort gegebene Winddargebot lässt sich i. Allg. mit zunehmender Nabenhöhe und zunehmendem Rotordurchmesser der Windkraftanlagen besser ausnutzen. Entsprechend ist die durchschnittliche Anlagengröße der in Österreich neu installierten Windkraftanlagen in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen. Während im Jahr 2010 neu errichteten Anlagen noch im Mittel 2,2 MW hatten, betrug die mittlere Anlagengröße der 2022 in Österreich errichteten Windkraftanlagen 3,6 MW, wobei gerade im ostösterreichischen Flach- und Hügelland auch bereits Windkraftanlagen mit deutlich über 5 MW installiert wurden [10]. Allerdings

sind diese Anlagengrößen für den alpinen und hochalpinen Bereich nur bedingt geeignet, da insbesondere auf Grund von Einschränkungen beim Transport der Rotorblätter und Turmsegmente häufig eine „natürliche“ Größenbegrenzung nach oben besteht (vgl. Abb. 6).

Abb. 6: Beispiele für Transport und Aufstellung von Windkraftanlagen im Hochgebirge



Fotos: Fa. Scheuerle (links oben), Gemeinde Obergoms (rechts oben), Nicola Demaldi (rechts und links unten)

In Tirol werden aufgrund der z. T. hochalpinen potenziellen Standorte daher nur in Einzelfällen Anlagengrößen erreicht werden können, wie sie in Ostösterreich bereits heute Standard sind. Vielmehr werden in Tirol eher Windkraftanlagen in einem Leistungsbereich von 3-4 MW mit Nabenhöhen von 130-150 m umgesetzt werden. Für die weitergehenden Analysen im Rahmen dieser Studie wird daher vereinfachend unterstellt, dass unter den gegebenen Standortbedingungen in Tirol Windkraftanlagen im Leistungsbereich von 3,0 MW mit einem Rotordurchmesser von etwa 120 m und einer Nabenhöhe von 130 m technisch geeignet und umsetzbar sind. In Anlehnung an die Vorgehensweise im *Gutachten zu den Betriebs- und Investitionsförderungen im Rahmen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG)* [23] sowie den *Bayerischen Windatlas* [15] wird dabei ein repräsentativer Windkraftanlagentyp definiert, der aus den Leistungsdaten von drei exemplarischen Windkraftanlagen abgeleitet wird. Für diese repräsentative Windkraftanlage werden anschließend die Energieerträge bzw. Volllaststunden für die mittleren Windgeschwindigkeits- und Höhenklassen ermittelt.

Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

Da die mittlere Windgeschwindigkeit sich im Windatlas Österreich auf 100 m über Grund bezieht bzw. die mittleren Windgeschwindigkeiten aus BIOCLIM auf 100 m über Grund hochgerechnet wurden, müssen in einem ersten Schritt die Windgeschwindigkeitsklassen auf die unterstellte Nabenhöhe von 130 m bezogen werden. Hierzu wird

wiederum auf ein logarithmisches Windprofil zurückgegriffen, das u. a. im Windprofil-Rechner auf der Website für Windenergie-Daten der Schweiz verfügbar ist [21]. Für die jeweiligen Windgeschwindigkeitsklassen wird dabei der Mittelwert aus oberer und unterer Grenze für die Berechnungen herangezogen (also bspw. 6,75 m/s für die Klasse 6,5-7,0 m/s) und mit der für Tirol unterstellten Rauigkeitslänge z_0 von 0,005 m (Literaturangabe für kahle Felsen und wenig bewachsene Flächen und damit typisch für alpine Berglandschaften) die mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe ermittelt. Für eine mittlere Windgeschwindigkeit von bspw. 6,75 m/s in 100 m über Grund leitet sich daraus in 130 m Nabenhöhe eine mittlere Windgeschwindigkeit von 6,93 m/s ab. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Umrechnung der mittleren Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe für alle Windgeschwindigkeitsklassen dargestellt. Für die Klasse >8,0 m/s (Windatlas Österreich) bzw. >10,0 m/s (BIOCLIM) wurde vereinfachend ein Wert von 8,5 bzw. 10,5 m/s unterstellt – auf Grund der sehr geringen Windnutzungsflächen mit mittleren Windgeschwindigkeiten über 8,0 m/s bzw. 10,0 m/s ist die daraus resultierende Ungenauigkeit vergleichsweise gering.

Tabelle 4: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 100 m über Grund sowie 130 m Nabenhöhe in m/s

Windklasse (100 m)	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0- 6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5	8,5-9,0	9,0-9,5	9,5-10,0	>8,0	>10,0
Rechenwert (100 m)	5,25	5,75	6,25	6,75	7,25	7,75	8,25	8,75	9,25	9,75	8,50	10,50
Nabenhöhe (130m)	5,39	5,90	6,42	6,93	7,44	7,96	8,47	8,98	9,50	10,01	8,73	10,78

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]

Brutto-Volllaststunden für repräsentativen Windkraftanlagentyp

Mit der mittleren Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe werden im nächsten Schritt für drei für Tirol dem Stand der Technik entsprechende „typische“ Windkraftanlage die jährlichen Brutto-Volllaststunden (d. h. Volllaststunden ohne Verluste) ermittelt. Als exemplarische Windkraftanlagen mit jeweils 3,0 MW Nennleistung werden hierfür die Enercon E-115, Nordex N117 und Vestas V126 gewählt. Für diese Windkraftanlagen können im Energieertragsrechner von Suisse Éole [21] aus der jeweiligen Leistungskennlinien sowie der mittleren Windgeschwindigkeit und Luftdichte in Nabenhöhe der jährliche Brutto-Energieertrag bzw. die rechnerischen jährlichen Volllaststunden ermittelt werden. Da die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten für die Rasterflächen der jeweiligen Winddatensätze nicht bekannt sind, werden diese näherungsweise durch Vorgabe einer sog. Weibull-Verteilung bestimmt. Die Weibull-Verteilung stellt vereinfacht ausgedrückt einen mathematischen Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und der relativen Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklasse her. Für die hier durchgeführten Analysen wird auf die Weibull-Schätzung innerhalb des Energieertragsrechners von Suisse Éole zurückgegriffen [21].

Innerhalb des Energieertragsrechners wird die für eine vorzugebende mittlere Windgeschwindigkeit abgeschätzte Weibull-Verteilung mit der Leistungskurve einer bestimmten Windenergieanlage (in unserem Fall Enercon E-115, Nordex N117 und Vestas V126) verknüpft und daraus u. a. der jahresmittlere Energieertrag sowie die Volllaststunden errechnet. In Abb. 7 ist dies bspw. für eine Enercon E-115 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6,42 m/s (d. h. Windnutzungsfläche mit einer Windgeschwindigkeitsklasse 6,0-6,5 m/s in 100 m über Grund) sowie einer Standort- bzw. Fußpunkthöhe von 400 m und damit einer Luftdichte in Nabenhöhe von 1,180 kg/m³ dargestellt. Mit diesen Standorteigenschaften kann für eine Enercon E-115 ein Brutto-Energieertrag von rd. 8.8 GWh/a bzw. 2.938 Volllaststunden ermittelt werden.

Abb. 7: Ein- und Ausgabemaske Energieertragsrechner Suisse Éole

[Home](#)
[Windkarte](#)
[Messdaten](#)
[Tools](#)
[Windkraftanlagen](#)
[Branchenverzeichnis](#)
[Kontakt](#)

[Allgemeine Infos](#)
[D](#)
[F](#)
[E](#)

Die Website für Windenergie-Daten der Schweiz
www.wind-data.ch » Tools » Energieertrag

[Einleitung](#)
[Windprofil](#)
[Weibullverteilung](#)
[Luftdichte](#)
[Energieertrag](#)

Ertragsrechner

Eingabe Wind-Verteilung

Entweder berechnen Sie die Weibull-Verteilung für Ihren Standort mit dem [Weibull-Rechner](#) oder der Ertragsrechner schätzt die Weibull-Verteilung für Sie ab, wenn Sie die mittlere Windgeschwindigkeit eingeben.

☐ Weibull-Parameter A: m/s k:
☒ mittlere Windgeschwindigkeit v: m/s

Eingabe Luftdichte

Die Luftdichte Ihres Standorts können Sie mit dem [Luftdichte-Rechner](#) bestimmen.

Luftdichte: kg/m³

Eingabe Anlage/Leistungskurve

Wählen Sie eine Anlage aus der Liste oder wählen Sie "eigene Leistungskurve" und geben Sie Ihre eigene Leistungskurve ein.

1 m/s	0 kW	11 m/s	2900 kW	21 m/s	3000 kW
2 m/s	3 kW	12 m/s	3000 kW	22 m/s	3000 kW
3 m/s	48 kW	13 m/s	3000 kW	23 m/s	3000 kW
4 m/s	155 kW	14 m/s	3000 kW	24 m/s	3000 kW
5 m/s	339 kW	15 m/s	3000 kW	25 m/s	3000 kW
6 m/s	627 kW	16 m/s	3000 kW	26 m/s	0 kW
7 m/s	1035 kW	17 m/s	3000 kW	27 m/s	0 kW
8 m/s	1549 kW	18 m/s	3000 kW	28 m/s	0 kW
9 m/s	2090 kW	19 m/s	3000 kW	29 m/s	0 kW
10 m/s	2580 kW	20 m/s	3000 kW	30 m/s	0 kW

Resultat

Hersteller	Enercon
Typ	E-115
Installierte Leistung	3'000 kW
Rotordurchmesser	115.7 m
Energieertrag	8'818'816 kWh/Jahr
Kapazitätsfaktor ¹	33.5%
Volllaststunden ²	2'938 h/Jahr
Betriebsstunden ³	8'392 h/Jahr

Enercon E-115 (3000 kW)

v = 6.4 m/s, A = 7.2 m/s, k = 2.0, Dichte = 1.18 kg/m³

☒ Windgeschwindigkeits-Verteilung
☒ Ertrags-Verteilung
☒ Leistungskurve

gemeinsam für windenergie

Allgemeine
Windenergie-
Informationen

im Auftrag des
Bundesamtes für
Energie

Realisierung

Quelle: Suisse Éole [21]

Tabelle 5 zeigt die Brutto-Volllaststunden der drei exemplarischen Windkraftanlagen für alle im Rahmen dieser Studie berücksichtigten Windgeschwindigkeitsklassen sowie die Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage, die für jede Windgeschwindigkeitsklasse aus dem Mittelwert der Brutto-Volllaststunden der drei exemplarischen Windkraftanlagen abgeleitet werden.

Tabelle 5: Brutto-Volllaststunden für exemplarische Windkraftanlagen mit 130 m Nabenhöhe für unterschiedliche Windgeschwindigkeitsklassen in 400 m Seehöhe

Windgeschw.-klasse	(m/s)	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0- 6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5	8,5-9,0	9,0-9,5	9,5-10,0	>8,0	>10,0
Mittlere Windgeschwindigkeit*	(m/s)	5,39	5,90	6,42	6,93	7,44	7,96	8,47	8,98	9,50	10,01	8,73	10,78
Enercon E-115	(h/a)	2.060	2.499	2.938	3.348	3.733	4.096	4.421	5.715	4.980	5.208	4.575	5.490
Nordex N117	(h/a)	2.040	2.486	2.929	3.344	3.733	4.099	4.426	4.721	4.987	5.216	4.580	5.499
Vestas V126	(h/a)	2.272	2.739	3.196	3.618	4.006	4.365	4.679	4.955	5.197	5.395	4.825	5.624
Mittelwert	(h/a)	2.124	2.575	3.021	3.437	3.824	4.187	4.509	5.130	5.055	5.273	4.660	5.538

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]; *in 130 m Nabenhöhe

Die Ergebnisse können dabei sehr gut mit den im *Gutachten zu den Betriebs- und Investitionsförderungen im Rahmen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG)* [23]⁵ aus 13 repräsentativen Windkraftanlagen abgeleiteten Ertragskenngrößen validiert werden. Für den durch die EAG-Marktprämienverordnung [24] festgelegten Normstandort – ein für Österreich repräsentativer Standort mittleren Windertrags mit einer Standorthöhe von 400 Meter – weist das o. a. Gutachten auf Seite 154 bspw. für 6,5 m/s mittlere Windgeschwindigkeit 3.069 Brutto-Volllaststunden aus. Im Vergleich dazu liegen die Brutto-Volllaststunden für den im Rahmen der vorliegenden Analysen definierten repräsentativen Windkraftanlagentyp bei einer mittleren Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von 6,42 m/s bei 3.021 h/a.

Bei der Interpretation der Ergebnisse von Tabelle 5 ist zu berücksichtigen, dass sich diese auf eine Standort- bzw. Fußpunkthöhe von 400 m Seehöhe und Nabenhöhe von 130 m über Grund beziehen. Auf Grund der von der Seehöhe abhängigen Luftdichte sinkt jedoch der Energieertrag von Windkraftanlagen bei gleicher Windgeschwindigkeit mit zunehmender Seehöhe. Entsprechend müssen für die im Rahmen dieser Studie festgelegten Höhenklassen die jeweils spezifischen Volllaststunden bzw. Energieerträge in Abhängigkeit von der Luftdichte ermittelt werden. Dabei wird die Luftdichte der jeweiligen Höhenklasse aus dem Mittelwert der oberen und unteren Grenze unter zusätzlicher Berücksichtigung der Nabenhöhe ermittelt. Bspw. wird dadurch die Luftdichte für die Höhenklasse 400-1.000 m für eine Seehöhe von 830 m⁶ mit 1,144 kg/m³ bestimmt. Für die Höhenklasse 2.200-2.300 m liegt demgegenüber die zu berücksichtigende Luftdichte bei 0,973 kg/m³ (2.380 m rechnerische Seehöhe⁷). Damit ergeben sich die in den beiden nachfolgenden Tabellen zusammengefassten Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für die Matrix aus Windgeschwindigkeits- und Höhenklassen. Auf Grund der höheren Anzahl an Windgeschwindigkeitsklassen bei der Bewertung der Windnutzungsflächen auf Grundlage der BIOCLIM-Winddaten werden zur besseren Übersichtlichkeit die Ergebnisse getrennt für die Windgeschwindigkeitsklassen gemäß Windatlas Österreich (Tabelle 6) und BIOCLIM (Tabelle 7) dargestellt.

⁵ Das Gutachten ist Grundlage für Ausgestaltung der EAG-Marktprämienverordnung [24]

⁶ $400 + (1.000 - 400) / 2 + 130 = 830 \text{ m}$

⁷ $2.200 + (2.300 - 2.200) / 2 + 130 = 2.380 \text{ m}$

Tabelle 6: Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten Windatlas Österreich

Höhe über Meeres-spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)						
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	
400	1.000	2.059	2.496	2.929	3.332	3.707	4.059	4.518
1.000	1.500	1.944	2.356	2.765	3.145	3.500	3.832	4.265
1.500	1.600	1.903	2.306	2.706	3.078	3.425	3.750	4.174
1.600	1.700	1.865	2.260	2.652	3.017	3.357	3.676	4.091
1.700	1.800	1.845	2.236	2.624	2.985	3.322	3.637	4.048
1.800	1.900	1.827	2.215	2.599	2.956	3.289	3.601	4.008
1.900	2.000	1.807	2.191	2.570	2.924	3.254	3.562	3.965
2.000	2.100	1.789	2.169	2.545	2.895	3.221	3.527	3.925
2.100	2.200	1.771	2.147	2.519	2.866	3.189	3.491	3.886
2.200	2.300	1.751	2.123	2.491	2.834	3.153	3.452	3.843
2.300	2.400	1.733	2.101	2.465	2.805	3.121	3.417	3.803
2.400	2.500	1.715	2.079	2.440	2.776	3.088	3.381	3.764
2.500	2.600	1.697	2.058	2.414	2.746	3.056	3.346	3.724
2.600	2.700	1.681	2.038	2.391	2.720	3.027	3.314	3.689
2.700	2.800	1.663	2.016	2.366	2.691	2.994	3.278	3.649
2.800	2.900	1.645	1.994	2.340	2.662	2.962	3.243	3.610
2.900	3.000	1.629	1.975	2.317	2.636	2.933	3.211	3.574
3.000	3.100	1.613	1.955	2.294	2.610	2.904	3.179	3.538
3.100	3.200	1.595	1.933	2.268	2.580	2.871	3.144	3.499
3.200	3.300	1.579	1.914	2.245	2.554	2.842	3.112	3.463
3.300	3.400	1.562	1.894	2.222	2.528	2.813	3.080	3.428
3.400	3.500	1.546	1.874	2.199	2.502	2.784	3.048	3.392

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]

Tabelle 7: Brutto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten BIOCLIM

Höhe über Meeres-spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	0,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
400	1.000	2.059	2.496	2.929	3.332	3.707	4.059	4.371	4.974	4.900	5.112	5.369	2.059
1.000	1.500	1.944	2.356	2.765	3.145	3.500	3.832	4.127	4.696	4.626	4.826	5.068	1.944
1.500	1.600	1.903	2.306	2.706	3.078	3.425	3.750	4.039	4.596	4.528	4.723	4.960	1.903
1.600	1.700	1.865	2.260	2.652	3.017	3.357	3.676	3.958	4.504	4.438	4.630	4.862	1.865
1.700	1.800	1.845	2.236	2.624	2.985	3.322	3.637	3.916	4.456	4.391	4.580	4.810	1.845
1.800	1.900	1.827	2.215	2.599	2.956	3.289	3.601	3.878	4.413	4.348	4.536	4.763	1.827
1.900	2.000	1.807	2.191	2.570	2.924	3.254	3.562	3.836	4.365	4.301	4.487	4.712	1.807
2.000	2.100	1.789	2.169	2.545	2.895	3.221	3.527	3.798	4.322	4.258	4.442	4.665	1.789
2.100	2.200	1.771	2.147	2.519	2.866	3.189	3.491	3.760	4.278	4.215	4.397	4.618	1.771
2.200	2.300	1.751	2.123	2.491	2.834	3.153	3.452	3.718	4.230	4.168	4.348	4.566	1.751
2.300	2.400	1.733	2.101	2.465	2.805	3.121	3.417	3.680	4.187	4.125	4.303	4.519	1.733
2.400	2.500	1.715	2.079	2.440	2.776	3.088	3.381	3.641	4.143	4.082	4.259	4.472	1.715
2.500	2.600	1.697	2.058	2.414	2.746	3.056	3.346	3.603	4.100	4.039	4.214	4.425	1.697
2.600	2.700	1.681	2.038	2.391	2.720	3.027	3.314	3.569	4.061	4.001	4.174	4.383	1.681
2.700	2.800	1.663	2.016	2.366	2.691	2.994	3.278	3.531	4.017	3.958	4.129	4.336	1.663
2.800	2.900	1.645	1.994	2.340	2.662	2.962	3.243	3.492	3.974	3.915	4.084	4.289	1.645
2.900	3.000	1.629	1.975	2.317	2.636	2.933	3.211	3.458	3.935	3.877	4.044	4.247	1.629
3.000	3.100	1.613	1.955	2.294	2.610	2.904	3.179	3.424	3.896	3.838	4.004	4.205	1.613
3.100	3.200	1.595	1.933	2.268	2.580	2.871	3.144	3.385	3.852	3.795	3.959	4.158	1.595
3.200	3.300	1.579	1.914	2.245	2.554	2.842	3.112	3.351	3.813	3.757	3.919	4.116	1.579
3.300	3.400	1.562	1.894	2.222	2.528	2.813	3.080	3.317	3.774	3.718	3.879	4.073	1.562
3.400	3.500	1.546	1.874	2.199	2.502	2.784	3.048	3.282	3.735	3.680	3.839	4.031	1.546

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]

Netto-Volllaststunden für repräsentativen Windkraftanlagentyp

Die Brutto-Volllaststunden stellen Volllaststunden bei 100 % Verfügbarkeit der Windkraftanlagen sowie ohne Eigenverbrauch und Verluste dar. Zur weiteren Ermittlung des im Energiesystem Tirol auch tatsächlich zur Verfügung stehenden Windenergiepotenzials müssen von den aus den Brutto-Volllaststunden ableitbaren theoretischen Brutto-Energieerträgen diese technisch unvermeidbaren Verluste abgezogen werden. Diese Verluste umfassen insbesondere Erzeugungsausfälle durch Nicht-Verfügbarkeiten sowie geplante und nicht geplante Anlagenausfälle, Abschattungsverluste im Windpark, elektrischer Eigenbedarf der Windkraftanlagen und elektrische Verluste bei der Energieableitung und Umspannung. Als Verlustabschlag wird im Rahmen dieser Studie der pauschalisierte Verlustabschlag in Höhe von 18% aus dem *Gutachten zu den Betriebs- und Investitionsförderungen im Rahmen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG)* [23] übernommen. Damit ergeben sich die in den Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellten Netto-Volllaststunden für die Höhenklassen bzw. Windgeschwindigkeitsklassen gemäß Winddaten Windatlas Österreich und BIOCLIM, die in die weiteren Berechnungen der Windenergiepotenziale in Tirol eingehen.

3.3.3 Mittlerer Flächenbedarf je Windkraftanlage

Neben den verfügbaren Windpotenzialflächen sowie den flächenspezifischen Netto-Volllaststunden ist für die Berechnung der Windenergiepotenziale in Tirol der mittlere Flächenbedarf je Windkraftanlage bzw. je MW installierter Windkraftleistung zu berücksichtigen⁸. Zur Minimierung der Ertragseinbußen durch die gegenseitige Abschattung der Windkraftanlagen in einem Windpark werden als Mindestabstände zwischen den Anlagen in der Literatur häufig Werte von 5 bis 9 x Rotordurchmesser in Hauptwindrichtung und 3 bis 5 x Rotordurchmesser quer zur Hauptwindrichtung genannt [27]. Bei sehr ausgeprägten Hauptwindrichtungen oder auf Hanglagen und Bergkuppen kann der Abstand zwischen den einzelnen Windkraftanlagen aber auch geringer sein. Da in großen Teilen Tirols eine tendenziell westliche Hauptwindrichtung vorherrscht (W, NW, SW) [28], kann für Tirol insgesamt von einem tendenziell geringeren notwendigen mittleren Abstand zwischen den Windkraftanlagen ausgegangen werden. Auch kann der notwendige Flächenbedarf auf Gebirgsrücken geringer sein, da die energiewirtschaftlich interessanten Windpotenzialflächen häufig nur im Bereich von Kammlagen liegen, d. h. eine Aufstellung von Windkraftanlagen würde sich ohnedies an den vergleichsweisen schmalen Kammlagen orientieren. Unabhängig davon wird für die Herleitung des Windenergiepotenzials in Tirol der von der IG Windkraft für den Anlagenbestand im Jahr 2021 abgeschätzte mittlere Flächenbedarf der Windkraft in Österreich von pauschal rd. 5,2 ha/MW unterstellt [29]⁹.

⁸ Der eigentliche Flächenbedarf einer Windkraftanlage für Fundament, Zuwegung und Kranstellfläche ist vergleichsweise gering und liegt etwa im Bereich von 0,3-0,5 ha je Windkraftanlage (vgl. u. a. [25], [26]).

⁹ Flächenbedarf für 3.300 MW Windkraftleistung von 171 km²

Tabelle 8: Netto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten Windatlas Österreich

Höhe über Meeres-spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)						
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	
400	1.000	1.689	2.047	2.402	2.732	3.040	3.328	3.705
1.000	1.500	1.594	1.932	2.267	2.579	2.870	3.142	3.497
1.500	1.600	1.560	1.891	2.219	2.524	2.809	3.075	3.423
1.600	1.700	1.529	1.854	2.175	2.474	2.753	3.014	3.355
1.700	1.800	1.513	1.834	2.152	2.448	2.724	2.982	3.319
1.800	1.900	1.498	1.816	2.131	2.424	2.697	2.953	3.287
1.900	2.000	1.482	1.796	2.108	2.398	2.668	2.921	3.251
2.000	2.100	1.467	1.778	2.087	2.374	2.641	2.892	3.219
2.100	2.200	1.452	1.761	2.066	2.350	2.615	2.863	3.186
2.200	2.300	1.436	1.741	2.043	2.324	2.586	2.831	3.151
2.300	2.400	1.421	1.723	2.022	2.300	2.559	2.802	3.118
2.400	2.500	1.407	1.705	2.001	2.276	2.532	2.773	3.086
2.500	2.600	1.392	1.687	1.980	2.252	2.506	2.744	3.054
2.600	2.700	1.379	1.671	1.961	2.231	2.482	2.717	3.025
2.700	2.800	1.364	1.653	1.940	2.207	2.455	2.688	2.992
2.800	2.900	1.349	1.635	1.919	2.183	2.429	2.659	2.960
2.900	3.000	1.336	1.619	1.900	2.161	2.405	2.633	2.931
3.000	3.100	1.322	1.603	1.881	2.140	2.381	2.607	2.902
3.100	3.200	1.308	1.585	1.860	2.116	2.354	2.578	2.869
3.200	3.300	1.294	1.569	1.841	2.094	2.331	2.552	2.840
3.300	3.400	1.281	1.553	1.822	2.073	2.307	2.525	2.811
3.400	3.500	1.268	1.537	1.803	2.051	2.283	2.499	2.782

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]

Tabelle 9: Netto-Volllaststunden der repräsentativen Windkraftanlage für Potenzialermittlung mit Winddaten BIOCLIM

Höhe über Meeres-spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	0,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
400	1.000	1.689	2.047	2.402	2.732	3.040	3.328	3.584	4.079	4.018	4.192	4.402	1.689
1.000	1.500	1.594	1.932	2.267	2.579	2.870	3.142	3.384	3.850	3.794	3.957	4.156	1.594
1.500	1.600	1.560	1.891	2.219	2.524	2.809	3.075	3.312	3.768	3.713	3.873	4.068	1.560
1.600	1.700	1.529	1.854	2.175	2.474	2.753	3.014	3.246	3.693	3.639	3.796	3.987	1.529
1.700	1.800	1.513	1.834	2.152	2.448	2.724	2.982	3.211	3.654	3.600	3.756	3.944	1.513
1.800	1.900	1.498	1.816	2.131	2.424	2.697	2.953	3.180	3.619	3.565	3.719	3.906	1.498
1.900	2.000	1.482	1.796	2.108	2.398	2.668	2.921	3.146	3.579	3.527	3.679	3.864	1.482
2.000	2.100	1.467	1.778	2.087	2.374	2.641	2.892	3.114	3.544	3.491	3.642	3.825	1.467
2.100	2.200	1.452	1.761	2.066	2.350	2.615	2.863	3.083	3.508	3.456	3.606	3.787	1.452
2.200	2.300	1.436	1.741	2.043	2.324	2.586	2.831	3.049	3.469	3.418	3.565	3.744	1.436
2.300	2.400	1.421	1.723	2.022	2.300	2.559	2.802	3.017	3.433	3.383	3.529	3.706	1.421
2.400	2.500	1.407	1.705	2.001	2.276	2.532	2.773	2.986	3.398	3.347	3.492	3.667	1.407
2.500	2.600	1.392	1.687	1.980	2.252	2.506	2.744	2.955	3.362	3.312	3.455	3.629	1.392
2.600	2.700	1.379	1.671	1.961	2.231	2.482	2.717	2.926	3.330	3.281	3.422	3.594	1.379
2.700	2.800	1.364	1.653	1.940	2.207	2.455	2.688	2.895	3.294	3.246	3.386	3.556	1.364
2.800	2.900	1.349	1.635	1.919	2.183	2.429	2.659	2.864	3.259	3.210	3.349	3.517	1.349
2.900	3.000	1.336	1.619	1.900	2.161	2.405	2.633	2.835	3.226	3.179	3.316	3.483	1.336
3.000	3.100	1.322	1.603	1.881	2.140	2.381	2.607	2.807	3.194	3.147	3.283	3.448	1.322
3.100	3.200	1.308	1.585	1.860	2.116	2.354	2.578	2.776	3.159	3.112	3.247	3.410	1.308
3.200	3.300	1.294	1.569	1.841	2.094	2.331	2.552	2.748	3.127	3.081	3.214	3.375	1.294
3.300	3.400	1.281	1.553	1.822	2.073	2.307	2.525	2.720	3.095	3.049	3.181	3.340	1.281
3.400	3.500	1.268	1.537	1.803	2.051	2.283	2.499	2.691	3.062	3.017	3.148	3.306	1.268

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21]

4 Technische Windenergiepotenziale in Tirol

4.1 Windenergiepotenziale auf Basis Winddaten Österreichischer Windatlas

Bei der Berechnung der Windenergiepotenziale in Tirol wird im Folgenden zwischen dem theoretisch technischen Potenzial, dem realisierbar technischen Potenzial und dem technisch-wirtschaftlichen Potenzial unterschieden.

4.1.1 Theoretisches technisches Potenzial

Unter Berücksichtigung der in der Anforderungstabelle enthaltenen europarechtlichen und fachlichen Vorgaben zur Nutzung der Windenergie in Tirol können auf Basis der mittleren Windgeschwindigkeiten des Windatlas Österreich von den in Tirol insgesamt zur Verfügung stehenden 3.607 km² Windnutzungsflächen von 838 km² als Windpotenzialflächen eingestuft werden (vgl. Kapitel 3.2). Bei einem mittleren spezifischen Flächenbedarf von 5,2 ha je MW-Windkraftleistung können damit – zumindest theoretisch – 16.110 MW an Windkraftleistung auf diesem Windpotenzialflächen errichtet werden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Theoretische technische Windkraftleistung in MW auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bei einem Flächenbedarf von 5,2 ha/MW (Datenbasis Windatlas Österreich)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)							Gesamt (MW)
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0	
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0		
400	1.000	2	0	0	0	0	0	0	2
1.000	1.500	508	200	31	4	0	0	0	743
1.500	1.600	308	122	35	11	0	0	0	476
1.600	1.700	370	169	28	9	1	0	0	578
1.700	1.800	386	205	46	6	3	0	0	646
1.800	1.900	456	256	59	8	1	0	0	782
1.900	2.000	569	300	101	16	2	0	0	989
2.000	2.100	650	357	139	30	5	1	1	1.183
2.100	2.200	744	422	172	66	7	2	0	1.413
2.200	2.300	848	466	208	80	17	3	1	1.622
2.300	2.400	887	483	220	77	18	3	0	1.688
2.400	2.500	841	534	251	83	21	4	1	1.736
2.500	2.600	714	558	282	84	33	7	2	1.680
2.600	2.700	494	456	237	85	31	9	4	1.317
2.700	2.800	221	260	152	70	19	5	2	731
2.800	2.900	98	100	70	37	13	3	2	322
2.900	3.000	37	40	27	13	4	0	0	122
3.000	3.100	12	11	14	13	2	0	0	52
3.100	3.200	3	4	4	9	3	0	0	22
3.200	3.300	1	1	0	4	1	0	0	7
3.300	3.400	0	0	0	0	0	0	0	1
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt (MW)		8.151	4.944	2.076	705	180	39	14	16.110

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und Windatlas Österreich [17]

Für die Berechnung des Windenergiepotenzials in Tirol kann nun im abschließenden Schritt die Windkraftleistung aus Tabelle 10 mit den Netto-Volllaststunden aus Tabelle 8 verknüpft und so das theoretische technische Windenergiepotenzial für jede Höhen- und Windgeschwindigkeitsklasse in GWh/a bestimmt werden (Tabelle 11).

Tabelle 11: Theoretisches technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)							Summe (GWh/a)
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0	
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0		
400	1.000	3	0	0	0	0	0	0	3
1.000	1.500	810	386	70	10	0	0	0	1.276
1.500	1.600	480	231	77	28	1	0	0	817
1.600	1.700	566	314	61	23	2	0	0	966
1.700	1.800	585	376	98	14	7	1	0	1.081
1.800	1.900	684	465	126	21	4	0	0	1.299
1.900	2.000	843	539	214	38	5	1	1	1.642
2.000	2.100	954	635	289	71	13	2	3	1.968
2.100	2.200	1.080	742	355	156	19	5	1	2.359
2.200	2.300	1.218	811	424	186	44	9	2	2.693
2.300	2.400	1.261	832	445	176	46	9	0	2.769
2.400	2.500	1.184	911	502	189	52	12	4	2.853
2.500	2.600	994	942	559	189	82	19	6	2.790
2.600	2.700	682	762	465	190	78	25	12	2.213
2.700	2.800	302	430	295	154	48	15	6	1.250
2.800	2.900	132	164	135	81	31	7	6	555
2.900	3.000	50	65	52	28	9	1	1	205
3.000	3.100	15	18	26	29	5	0	0	93
3.100	3.200	4	6	8	19	6	0	0	43
3.200	3.300	2	1	1	7	1	0	0	13
3.300	3.400	0	0	0	1	0	0	0	1
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe (GWh/a)		11.848	8.629	4.201	1.609	453	107	42	26.890

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und Windatlas Österreich [17]

In Summe liegt das theoretische technische Windenergiepotenzial in Tirol bei rd. 26,9 TWh/a. Dieses Potenzial berücksichtigt dabei alle Windnutzungsflächen mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit über 5,0 m/s (in Summe 838 km²), ohne jedoch eine weitergehende Bewertung möglicher technischer oder wirtschaftlicher Restriktionen durchzuführen. Es stellt daher eine theoretische Obergrenze des technischen Windenergiepotenzials in Tirol dar.

4.1.2 Realisierbares technisches Potenzial

Die technische Umsetzung des im vorangegangenen Abschnitt ermittelten theoretischen Potenzials wird auf Grund der schwierigen Erschließbarkeit von Windpotenzialflächen im hochalpinen Gelände nur eingeschränkt möglich sein. Technische Restriktionen für die Errichtung von Windkraftanlagen ergeben sich insbesondere aus der Hangneigung sowie der notwendigen wege- und netztechnischen Erschließung der Standorte. Grundsätzlich erfolgt die Bewertung der technischen Eignung eines Standorts immer einzelfallbezogen auf Basis umfassender Vorort-Analysen von bspw. Kurvenradien und Breite der Straßen und Wege sowie Durchfahrtshöhen von Brücken und Tunnels. Im Rahmen der vorliegenden Potenzialstudie können solche standortspezifischen Restriktionen jedoch nicht berücksichtigt werden. Vielmehr werden über einen vereinfachten Ansatz jene Windpotenzialflächen für die Ermittlung des realisierbaren technischen Potenzials ausgeschieden, auf denen die Errichtung von Windkraftanlagen aus technischer Sicht sehr unwahrscheinlich ist

Zur Ermittlung des technisch erschließbaren Windenergiepotenzials werden daher in einem ersten Schritt jene Windpotenzialflächen ausgeschieden, die für die Errichtung von Windkraftanlagen in der Regel zu steil sind. Vergleichbare Potenzialstudien gehen dabei von maximal möglichen Hangneigungen für die Errichtung von Windkraftanlagen zwischen 10 und 20° (18 bis 36%) aus (u. a. [14], [30]). Es werden daher für die weiteren Betrachtungen nur Windpotenzialflächen bis zu einer maximalen Hangneigung von 30% (16,7°) berücksichtigt¹⁰. Dadurch reduzieren sich für die weiteren Betrachtungen die Windpotenzialflächen von 838 km² auf 120 km². Auf diesen verbleibenden Windpotenzialflächen können in Summe 2.313 MW an Windkraftleistung mit einem technischen Windenergiepotenzial von rd. 3,9 TWh/a installiert werden (Tabelle 12).

Tabelle 12: Technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)							Summe (GWh/a)
von	bis	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	7,0 7,5	7,5 8,0	> 8,0	
400	1.000	3	0	0	0	0	0	0	3
1.000	1.500	151	124	19	4	0	0	0	298
1.500	1.600	71	54	31	10	0	0	0	166
1.600	1.700	74	54	12	4	1	0	0	145
1.700	1.800	61	49	30	4	1	0	0	145
1.800	1.900	78	67	15	3	0	0	0	164
1.900	2.000	121	76	36	1	1	0	0	236
2.000	2.100	125	106	35	6	1	0	0	274
2.100	2.200	152	120	54	17	2	2	0	347
2.200	2.300	183	132	76	31	5	0	0	428
2.300	2.400	182	118	63	27	4	1	0	395
2.400	2.500	192	138	76	25	3	1	0	434
2.500	2.600	140	143	82	23	13	3	1	404
2.600	2.700	77	99	58	29	17	3	1	283
2.700	2.800	22	33	24	21	5	2	0	107
2.800	2.900	9	10	12	8	6	2	0	47
2.900	3.000	2	2	3	2	1	0	0	10
3.000	3.100	0	0	1	3	1	0	0	6
3.100	3.200	0	0	0	2	1	0	0	3
3.200	3.300	0	0	0	0	0	0	0	0
3.300	3.400	0	0	0	0	0	0	0	0
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe (GWh/a)		1.643	1.326	627	221	63	14	3	3.895

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und Windatlas Österreich [17]

Ein Teil dieses verbleibenden Potenzials liegt allerdings in einer Seehöhe, wo zum einen keine für die Erschließung der Standorte notwendigen Wege bestehen bzw. nicht mit einem vertretbaren Aufwand errichtet werden können. Zum anderen steigen die technischen Herausforderungen bei der Errichtung und im Betrieb von Windkraftanlagen mit zunehmender Höhenlage deutlich an (u. a. Gründung im Felsen, Erreichbarkeit im Winter, Energieableitung). Neben der Hangneigung wird daher als zusätzliche technische Restriktion eine maximale Seehöhe von 2.300 m zur Bestimmung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials in Tirol berücksichtigt. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass diese Restriktion kein Ausschlusskriterium darstellt, sondern eine zur Herleitung des Windenergiepotenzials in Tirol festgelegte vereinfachende Randbedingung darstellt. Im jewei-

¹⁰ Die Informationen zur Hangneigung liegen im GIS-Modell des Amtes der Tiroler Landesregierung im 10 x 10 m Raster vor, so dass innerhalb der 100 x 100 m Windgeschwindigkeitsraster nur jene Teilflächen „ausgeschieden“ werden, deren Hangneigung über 30 % liegen.

ligen Einzelfall kann eine Errichtung von Windkraftanlagen auch über einer Seehöhe von 2.300 m technisch möglich sein. Umgekehrt kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass eine Erschließung von Standorten auch unter 2.300 m aus technischer Sicht zu aufwendig und damit nicht möglich ist.

Von den 838 km² Windpotenzialflächen mit einer Hangneigung unter 30% verbleiben damit rd. 4,9% oder 68 km² an Windpotenzialflächen bis zu einer Seehöhe von 2.300 m mit einem realisierbaren technischen Windenergiepotenzial von rd. 1.299 MW bzw. 2,2 TWh/a. Abb. 8 zeigt hierzu jene Windpotenzialflächen, die zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials berücksichtigt werden sowohl mit (oben) als auch ohne (unten) Darstellung der Ausschlussflächen.

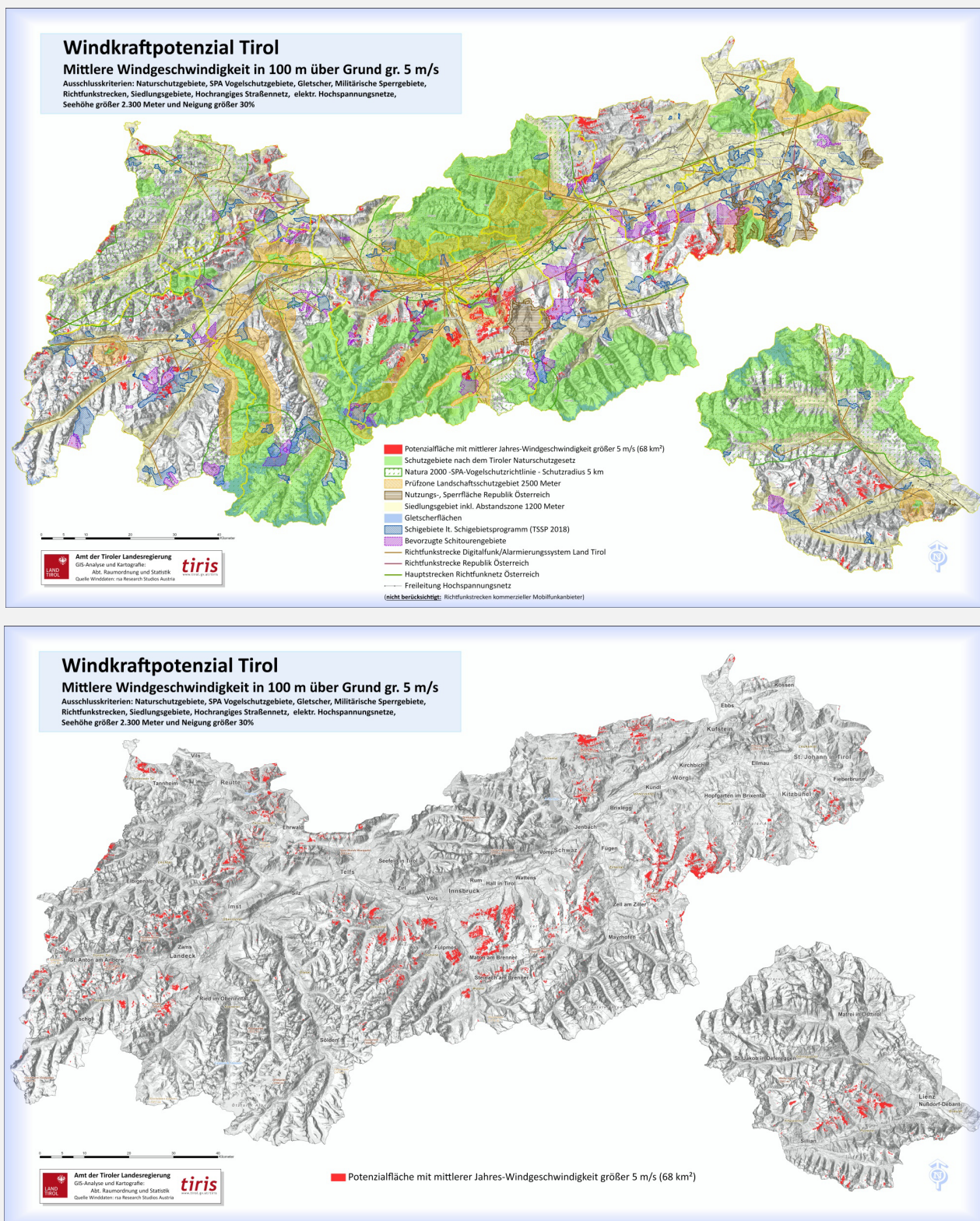
4.1.3 Technisch-wirtschaftliches Potenzial

Rund 75% der in Tabelle 12 dargestellten realisierbaren technischen Windenergiepotenziale bis 2.300 m Seehöhe zeigen jahresmittlere Windgeschwindigkeiten in 100 m über Grund zwischen 5,0 und 6,0 m/s – ein Bereich, in dem Windkraftanlagen häufig nur noch Netto-Volllaststunden von zum Teil deutlich unter 2.000 h/a erreichen können. Aus wirtschaftlicher Sicht erscheint die Umsetzbarkeit dieses technischen Windenergiepotenzials daher sehr unrealistisch, so dass potenzielle Standorte mit vergleichsweise niedrigen Jahresenergieerträgen für die abschließende Quantifizierung eines technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials ausgeschlossen werden.

Die Grenze hierfür sollte jedoch nicht zu eng gezogen werden, da sich die wirtschaftlichen Randbedingungen (insbesondere Investitionskosten und Förderungen) und damit die Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale in den kommenden Jahren ändern können. Umgekehrt ist aber auch die Berücksichtigung von Standorten mit geringen Energieerträgen nicht zielführend, da ansonsten eine zu hohe öffentliche und politische Erwartungshaltung an die Windenergiepotenziale in Tirol suggeriert werden könnte. Vor diesem Hintergrund wird zur Herleitung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials der nachfolgende Ansatz gewählt, der sich an den aktuellen Förderbedingungen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes – EAG [31] orientiert:

- Die EAG-Marktprämienverordnung (EAG-MPV) [24] definiert unter §2 Abs 1 Ziffer 17 als Normstandort für eine Windkraftanlage einen für Österreich repräsentativen Standort mittleren Windertrags mit einer Standorthöhe von 400 Meter, charakterisiert durch einen Normertrag (rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion RJ einer Normanlage) von 694 kWh/m².
- Dieser Normertrag leitet sich aus dem *Gutachten zu den Betriebs- und Investitionsförderungen im Rahmen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG)* [23] ab, mit dem die wesentlichen Randbedingungen zur Festlegung der Marktprämien und damit der Förderung der Windstromerzeugung in Österreich ausgearbeitet wurden. Windkraftanlagen können damit grundsätzlich mit den an einem Normstandort vorherrschenden Windbedingungen wirtschaftlich betrieben werden.
- Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Windkraftanlagen, die im Rahmen einer Ausschreibung gemäß § 40 EAG einen Zuschlag erhalten, ein Korrekturfaktor auf den Zuschlagswert gemäß § 43 EAG anzuwenden ist, der die standortbedingten unterschiedlichen Stromerträge der Windkraftanlage widerspiegelt. Für Windkraftanlagen mit einer Standorthöhe bis 1.400 Meter liegt dieser Korrekturfaktor zwischen -14,00 und +20,00%. Zusätzlich erhöht sich für Windkraftanlagen mit einer Standorthöhe ab 1.400 Meter der Korrekturfaktor additiv um bis zu +7,66%. Die maximalen Korrekturfaktoren von 20,00% bzw. 27,66% kommen dabei jeweils bei einer rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion von 557 kWh/m² zur Anwendung, d. h. der Gesetzgeber geht davon aus, dass für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Windkraftanlage zumindest eine rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion von 557 kWh/m² erreicht werden muss.

Abb. 8: Windpotenzialflächen zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials auf Basis Windatlas Österreich mit (oben) sowie ohne (unten) Darstellung der Ausschlussflächen



- Die Herleitung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials in Tirol erfolgt ausgehend von dieser rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion von 557 kWh/m², wobei im Sinne einer „weicheren“ Herleitung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials auch jene Windenergiepotenzialflächen berücksichtigt werden, auf denen die rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion zumindest bei 500 kWh/m² bzw. 90% von 557 kWh/m² liegt. Dadurch werden zum einen die modellimmanenten Unsicherheiten in den mittleren Windgeschwindigkeiten berücksichtigt. Zum anderen kann auch auf Windpotenzialflächen mit einer rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion unter 557 kWh/m² ein aus Projektbetreibersicht wirtschaftlicher Betrieb nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.
- Die Berechnung der rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion erfolgt für den in Abschnitt 3.3.2 definierten repräsentativen Windkraftanlagentyp¹¹ mit einer Rotorkreisfläche von rd. 11.216 m² sowie den ebenfalls in Abschnitt 3.3.2 ermittelten Netto-Volllaststunden für die unterschiedlichen Höhenlagen und mittleren Windgeschwindigkeiten. Damit ergibt sich beispielsweise für die Höhenlage 400-1.000 m und der mittleren Windgeschwindigkeit in 100 m über Grund von 6,0-6,5 m/s bei Netto-Volllaststunden von 2.402 h/a und einer Netto-Jahresstromerzeugung von 7.206 MWh eine rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion von 642 kWh/m². Tabelle 13 zeigt die vollständigen Ergebnisse der Berechnung der rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion für die Matrix aus Höhenlagen und mittleren Windgeschwindigkeiten. Grün eingefärbt sind Windpotenzialflächen mit einer rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion größer 500 kWh/m².

Tabelle 13: Rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion der repräsentativen Windkraftanlage

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)						
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	
400	1.000	452	547	642	731	813	890	991
1.000	1.500	426	517	606	690	768	840	935
1.500	1.600	417	506	594	675	751	823	916
1.600	1.700	409	496	582	662	736	806	897
1.700	1.800	405	491	576	655	729	798	888
1.800	1.900	401	486	570	648	721	790	879
1.900	2.000	396	480	564	641	714	781	870
2.000	2.100	392	476	558	635	707	774	861
2.100	2.200	388	471	553	629	699	766	852
2.200	2.300	384	466	546	622	692	757	843

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21] und EAG [31]

Zur abschließenden Herleitung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials werden nur jene Windpotenzialflächen aus Tabelle 12 berücksichtigt, die gemäß Tabelle 13 eine rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion von über 500 kWh/m² aufweisen. In Summe ergibt sich damit ein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol von rd. 0,6 TWh/a (Tabelle 14). Dies entspricht knapp 2,2% des theoretischen technischen Windenergiepotenzials von rd. 26,9 TWh/a bzw. 26% des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials von 2,2 TWh/a. Zur Umsetzung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials wären auf einer Fläche von 14,5 km² Windkraftanlagen mit einer installierten Nennleistung von 278 MW erforderlich – dies entspricht bspw. 93 Anlagen der 3 MW-Klasse.

¹¹ Nennleistung 3 MW und Rotordurchmesser von 119,5 m abgeleitet aus Mittelwert der Rotordurchmesser Enercon E-115 (115,7 m), Nordex N117 (116,8 m) und Vestas V126 (126,0 m)

Tabelle 14: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe in GWh/a (Datenbasis Windatlas Österreich)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)							Summe (GWh/a)
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	> 8,0	
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0		
400	1.000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1.000	1.500	0,0	124,2	19,3	3,5	0,0	0,0	0,0	147
1.500	1.600	0,0	53,8	31,1	9,7	0,2	0,0	0,0	95
1.600	1.700	0,0	0,0	12,3	3,9	1,0	0,0	0,0	17
1.700	1.800	0,0	0,0	29,9	3,7	1,0	0,3	0,0	35
1.800	1.900	0,0	0,0	15,2	3,2	0,3	0,0	0,0	19
1.900	2.000	0,0	0,0	35,8	1,3	0,9	0,4	0,3	39
2.000	2.100	0,0	0,0	34,8	6,5	0,8	0,0	0,0	42
2.100	2.200	0,0	0,0	53,8	17,4	1,8	2,1	0,3	75
2.200	2.300	0,0	0,0	75,9	31,1	4,9	0,1	0,0	112
Summe (GWh/a)		0	178	308	80	11	3	1	581

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und Windatlas Österreich [17]

Im Detail zeigt sich, dass in den Tallagen Tirols kein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial vorhanden ist. Dies liegt zum einen daran, dass auf Grund der in der Anforderungstabelle zur Berücksichtigung europarechtlicher und fachlicher Vorgaben vorgegebenen Abstandsregelungen nur wenig Windnutzungsflächen in Tallagen verfügbar sind. Zum anderen sind die Windverhältnisse in Tallagen in der Regel nicht für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Windkraftanlage ausreichend. Die technisch geeigneten und wirtschaftlich attraktiven Windpotenzialflächen konzentrieren sich daher auf Höhenbereiche zwischen 1.000 und 1.600 m sowie 2.000 und 2.300 m. In Höhenbereichen zwischen 1.000 und 1.600 m kann zwar grundsätzlich auch an Standorten mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit zwischen 5,5 und 6,0 m/s ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein. Bei gleichen Windgeschwindigkeiten nimmt die Attraktivität der Standorte jedoch mit zunehmender Höhe ab, so dass auf den ersten Blick attraktive Standorte keine ausreichenden Energieerträge erzielen und damit letztendlich auch nicht wirtschaftlich zu betreiben sind. Dadurch werden Windpotenzialflächen mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von unter 6,0 m/s ab einer Seehöhe von 1.600 m auch nicht für das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial berücksichtigt. Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse aus Tabelle 14 zeigt dies anschaulich in Abb. 9.

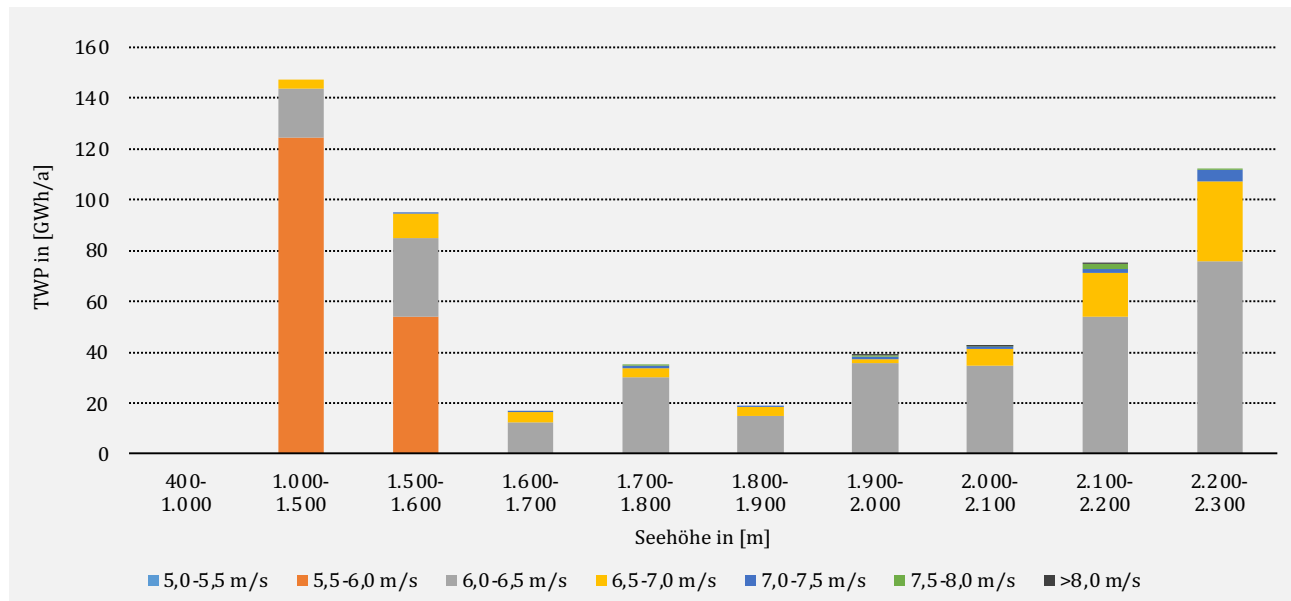
4.2 Windenergiepotenziale auf Basis Winddaten BIOCLIM

Die Berechnung des Windenergiepotenzials auf Basis der BIOCLIM-Winddaten [18] erfolgt nach dem in Abschnitt 4.1 „Windenergiepotenziale auf Basis Winddaten Österreichischer Windatlas“ beschriebenen und angewendeten Bewertungsansatz. Nachfolgend ist das theoretische technische Potenzial, das realisierbare technische Potenzial und das technisch-wirtschaftliche Potenzial zusammenfassend dargestellt.

4.2.1 Theoretisches technisches Potenzial

Entsprechend der gemäß Anforderungstabelle berücksichtigten Ausschlussflächen können auf Basis der mittleren Windgeschwindigkeiten aus dem Forschungsprojekt BIOCLIM von den in Tirol insgesamt zur Verfügung stehenden 3.616 km² Windnutzungsflächen 1.563 km² als Windpotenzialflächen eingestuft werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Bei einem mittleren spezifischen Flächenbedarf von 5,2 ha je MW-Windkraftleistung können – zumindest theoretisch –

Abb. 9: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial Tirol auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe (Datenbasis Windatlas Österreich)



Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und Windatlas Österreich [17]

30.061 MW an Windkraftleistung auf diesen Windpotenzialflächen errichtet werden (Tabelle 15). Wird die so ermittelte Windkraftleistung mit den Netto-Volllaststunden aus Tabelle 9 verknüpft, leitet sich ein theoretisches technisches Windenergiepotenzial von in Summe 57,5 TWh/a ab (Tabelle 16).

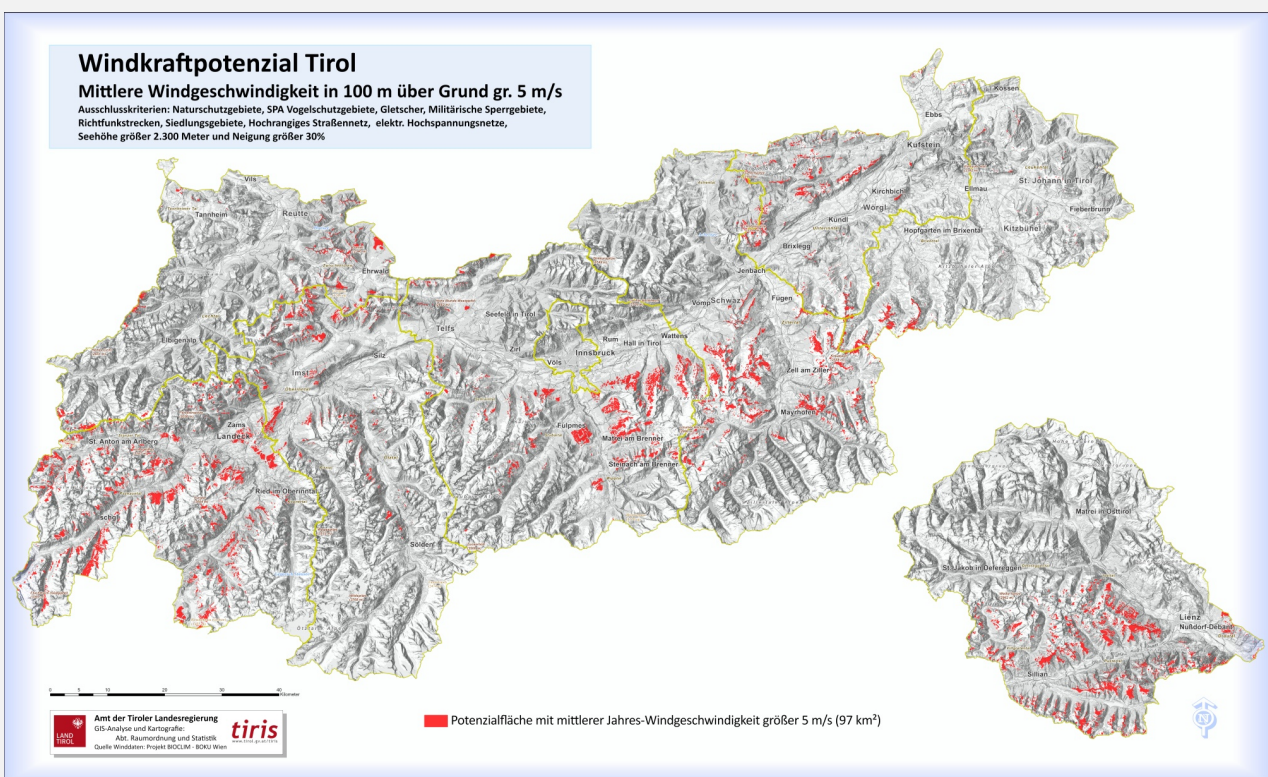
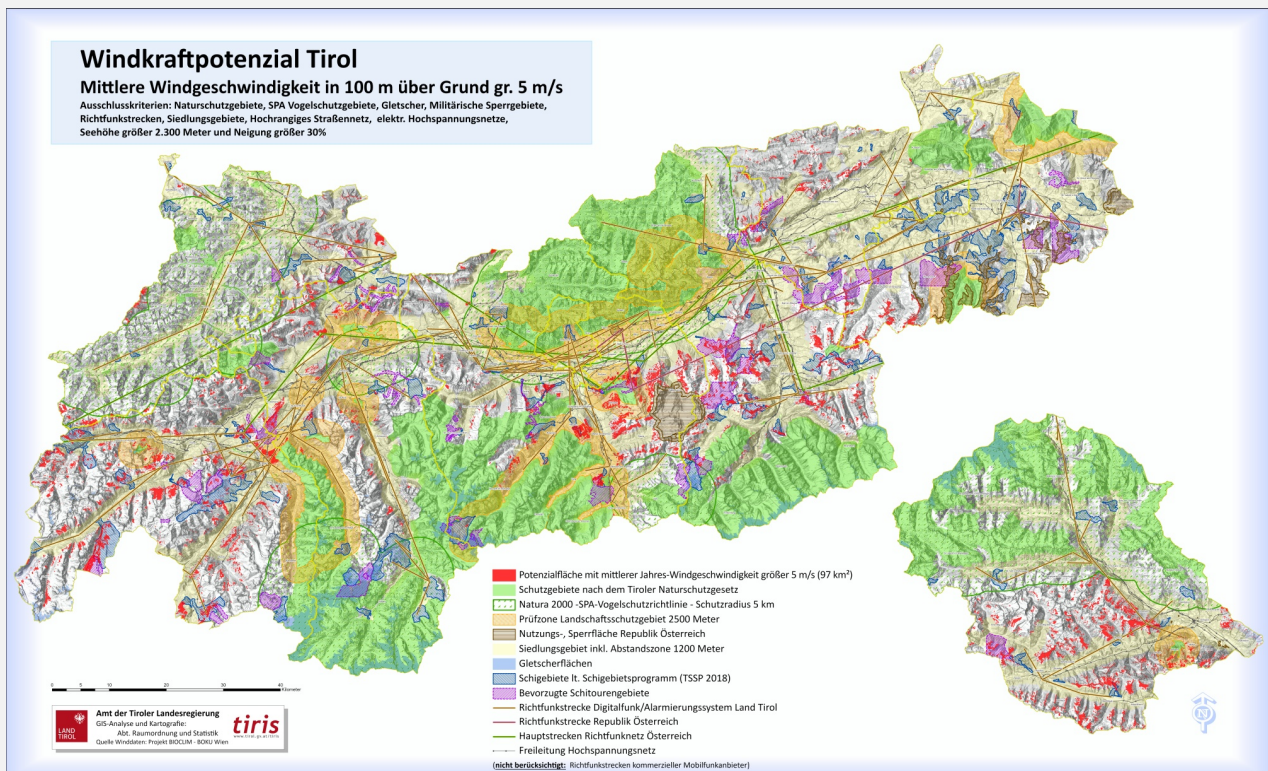
4.2.2 Realisierbares technisches Potenzial

Zur Ermittlung des technisch erschließbaren Windenergiepotenzials werden nur Windpotenzialflächen bis zu einer maximalen Hangneigung von 30% (16,7°) berücksichtigt, wodurch sich die verfügbaren Windpotenzialflächen von ursprünglich 1.563 km² auf 162 km² reduzieren. Auf diesen verbleibenden Windpotenzialflächen können in Summe 3.114 MW an Windkraftleistung mit einem technischen Windenergiepotenzial von rd. 5,9 TWh/a installiert werden (Tabelle 17). Bei einer weitergehenden Beschränkung der Windpotenzialflächen auf eine maximale Seehöhe von 2.300 m (in Summe 97 km²) leitet sich ein realisierbares technisches Windenergiepotenzial von rd. 1.865 MW bzw. 3,6 TWh/a ab. Abb. 10 zeigt hierzu jene Windpotenzialflächen, die zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials berücksichtigt werden.

4.2.3 Technisch-wirtschaftliches Potenzial

Für die Herleitung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials werden nur jene Windpotenzialflächen berücksichtigt, die eine rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion von über 500 kWh/m² zeigen (grün eingefärbt in Tabelle 18). In Summe ergibt sich damit ein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol von rd. 1,8 TWh/a (Tabelle 19 und Abb. 11). Dies entspricht knapp 3,8% des theoretischen technischen Windenergiepotenzials von rd. 57,5 TWh/a bzw. 61% des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials von 3,6 TWh/a. Zur Umsetzung des technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzials wären auf einer Fläche von 39 km² Windkraftanlagen mit einer installierten Nennleistung von 752 MW oder bspw. 250 Anlagen der 3 MW-Klasse erforderlich.

Abb. 10: Windpotenzialflächen zur Ableitung des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials auf Basis Winddaten BIOCLIM mit (oben) sowie ohne (unten) Darstellung der Ausschlussflächen



Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung auf Basis BIOCLIM [18]

Tabelle 15: Theoretische technische Windkraftleistung in MW auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bei einem Flächenbedarf von 5,2 ha/MW (Datenbasis BIOCLIM)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0	Gesamt (MW)
400	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.000	1.500	475	168	90	26	10	4	2	1	0	0	0	776
1.500	1.600	291	146	119	39	20	7	0	1	0	0	0	622
1.600	1.700	406	186	152	73	44	12	1	1	0	0	0	874
1.700	1.800	461	290	262	124	54	24	7	1	1	0	0	1.225
1.800	1.900	607	319	355	228	93	37	15	7	2	0	0	1.664
1.900	2.000	766	458	360	291	180	85	38	15	8	4	0	2.204
2.000	2.100	1.059	680	426	263	177	102	51	22	6	3	0	2.791
2.100	2.200	1.324	1.014	518	394	173	91	37	17	6	2	0	3.577
2.200	2.300	1.109	1.070	630	508	241	126	65	16	3	1	0	3.768
2.300	2.400	887	903	554	502	244	153	99	42	10	2	0	3.396
2.400	2.500	701	747	486	405	257	131	74	60	19	6	0	2.888
2.500	2.600	710	543	375	380	207	151	68	36	20	9	0	2.498
2.600	2.700	496	461	235	216	195	98	47	24	11	5	0	1.788
2.700	2.800	261	282	188	133	68	69	24	7	2	1	0	1.035
2.800	2.900	158	111	100	102	38	16	17	5	1	0	0	548
2.900	3.000	63	68	35	46	33	7	3	1	1	0	0	256
3.000	3.100	16	23	17	18	14	7	2	0	0	0	0	99
3.100	3.200	9	6	6	5	4	4	2	0	0	0	0	37
3.200	3.300	2	6	1	2	1	1	1	0	0	0	0	15
3.300	3.400	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt (MW)		9.800	7.483	4.908	3.756	2.054	1.125	554	257	91	34	0	30.061

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und BIOCLIM [18]

Tabelle 16: Theoretisches technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0	Gesamt (GWh/a)
400	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.000	1.500	758	324	203	68	29	12	6	3	1	1	0	1.405
1.500	1.600	453	277	263	99	55	22	1	2	1	0	0	1.173
1.600	1.700	620	345	330	181	122	35	3	2	2	0	0	1.640
1.700	1.800	698	532	565	305	147	72	21	4	3	0	0	2.346
1.800	1.900	909	580	755	554	250	108	48	25	9	2	0	3.240
1.900	2.000	1.135	823	758	698	480	247	118	54	28	16	0	4.357
2.000	2.100	1.554	1.209	889	624	469	296	160	79	22	10	0	5.313
2.100	2.200	1.923	1.786	1.069	926	452	261	115	60	22	9	0	6.624
2.200	2.300	1.592	1.863	1.287	1.180	622	357	200	54	9	2	0	7.166
2.300	2.400	1.260	1.556	1.121	1.154	625	430	298	145	33	7	0	6.628
2.400	2.500	986	1.274	972	922	652	364	222	205	63	22	0	5.682
2.500	2.600	988	916	742	856	520	413	202	121	67	29	0	4.853
2.600	2.700	684	770	461	482	484	266	138	79	36	18	0	3.418
2.700	2.800	356	466	364	293	167	186	68	24	7	3	0	1.936
2.800	2.900	213	182	192	223	92	42	47	17	4	0	0	1.012
2.900	3.000	84	110	66	100	78	18	8	4	2	0	0	470
3.000	3.100	21	37	33	39	34	19	6	0	0	0	0	189
3.100	3.200	12	10	11	10	10	11	5	0	0	0	0	70
3.200	3.300	3	10	1	4	3	3	3	0	0	0	0	27
3.300	3.400	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	4
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt (GWh/a)		14.249	13.069	10.085	8.717	5.291	3.161	1.672	881	308	121	0	57.553

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und BIOCLIM [18]

Tabelle 17: Technisches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0	Gesamt (GWh/a)
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0		
400	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.000	1.500	87	42	24	4	5	2	2	0	0	0	0	167
1.500	1.600	85	54	50	15	11	8	0	0	0	0	0	224
1.600	1.700	69	40	39	26	30	8	0	0	0	0	0	214
1.700	1.800	53	44	50	35	31	13	2	0	0	0	0	228
1.800	1.900	52	38	52	54	22	7	4	1	0	0	0	232
1.900	2.000	81	65	47	60	37	23	15	7	2	1	0	339
2.000	2.100	168	108	65	63	47	24	11	9	2	1	0	496
2.100	2.200	257	204	101	97	51	46	14	5	1	0	0	778
2.200	2.300	204	208	151	151	65	42	43	10	1	1	0	877
2.300	2.400	156	169	110	134	54	39	36	18	6	2	0	725
2.400	2.500	120	136	95	100	70	41	13	15	5	2	0	597
2.500	2.600	150	80	67	90	59	48	13	9	4	2	0	522
2.600	2.700	79	70	26	39	46	24	15	4	1	1	0	304
2.700	2.800	39	30	16	14	11	15	3	1	1	0	0	130
2.800	2.900	17	11	8	9	6	2	2	0	0	0	0	56
2.900	3.000	5	3	2	3	4	0	0	0	0	0	0	17
3.000	3.100	1	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	9
3.100	3.200	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3.200	3.300	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3.300	3.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.400	3.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt (GWh/a)		1.624	1.307	906	896	552	346	175	80	24	10	0	5.919

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und BIOCLIM [18]

Tabelle 18: Rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion der repräsentativen Windkraftanlage

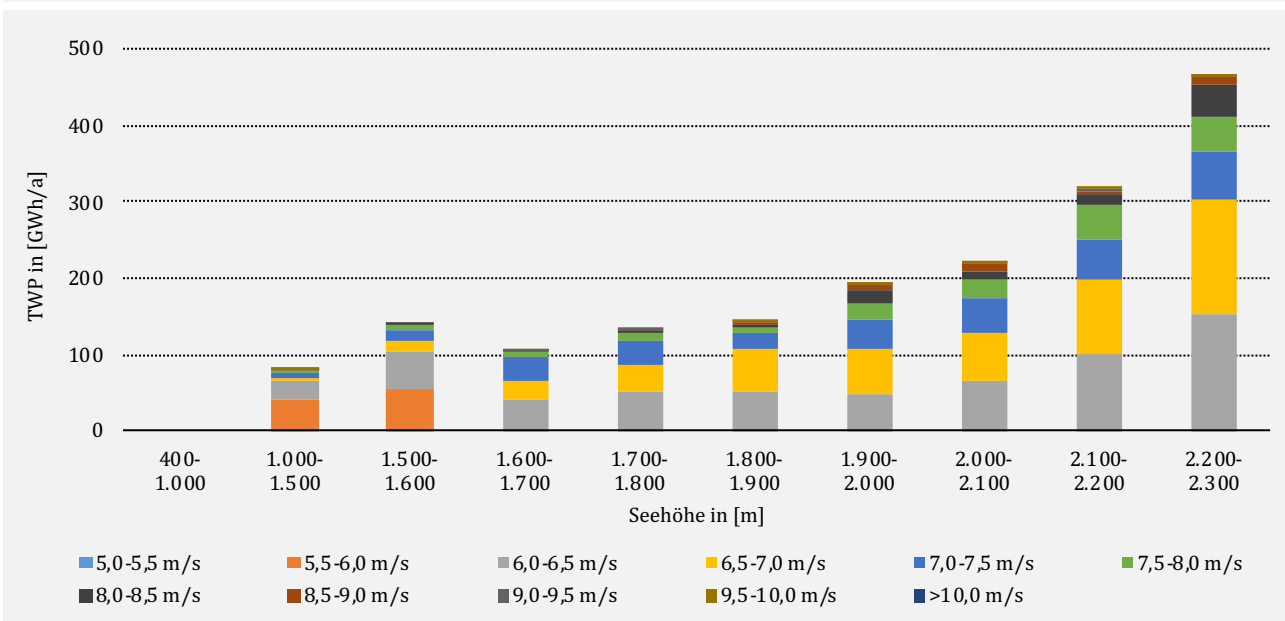
Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)										
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
400	1.000	452	547	642	731	813	890	959	1.091	1.075	1.121	1.178
1.000	1.500	426	517	606	690	768	840	905	1.030	1.015	1.059	1.112
1.500	1.600	417	506	594	675	751	823	886	1.008	993	1.036	1.088
1.600	1.700	409	496	582	662	736	806	868	988	973	1.015	1.066
1.700	1.800	405	491	576	655	729	798	859	977	963	1.005	1.055
1.800	1.900	401	486	570	648	721	790	851	968	954	995	1.045
1.900	2.000	396	480	564	641	714	781	841	957	943	984	1.033
2.000	2.100	392	476	558	635	707	774	833	948	934	974	1.023
2.100	2.200	388	471	553	629	699	766	825	938	925	964	1.013
2.200	2.300	384	466	546	622	692	757	815	928	914	954	1.002

Quelle: e3 consult auf Basis Windprofil-Rechner Suisse Éole [21] und EAG [31]

Tabelle 19: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe in GWh/a (Datenbasis BIOCLIM)

Höhe über Meeres- spiegel in m		Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in m/s (100 m über Grund)											
von	bis	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	>10,0	Gesamt (GWh/a)
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0		
400	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.000	1.500	0	42	24	4	5	2	2	0	0	0	0	80
1.500	1.600	0	54	50	15	11	8	0	0	0	0	0	139
1.600	1.700	0	0	39	26	30	8	0	0	0	0	0	104
1.700	1.800	0	0	50	35	31	13	2	0	0	0	0	131
1.800	1.900	0	0	52	54	22	7	4	1	0	0	0	141
1.900	2.000	0	0	47	60	37	23	15	7	2	1	0	192
2.000	2.100	0	0	65	63	47	24	11	9	2	1	0	220
2.100	2.200	0	0	101	97	51	46	14	5	1	0	0	316
2.200	2.300	0	0	151	151	65	42	43	10	1	1	0	465
Gesamt (GWh/a)		0	96	578	505	299	175	92	33	7	3	0	1.789

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und BIOCLIM [18]

Abb. 11: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial Tirol auf Windpotenzialflächen gemäß Anforderungstabelle bis 30% Hangneigung und 2.300 m Seehöhe (Datenbasis BIOCLIM)

Quelle: e3 consult auf Datengrundlage Amt der Tiroler Landesregierung und BIOCLIM [18]

4.3 Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse

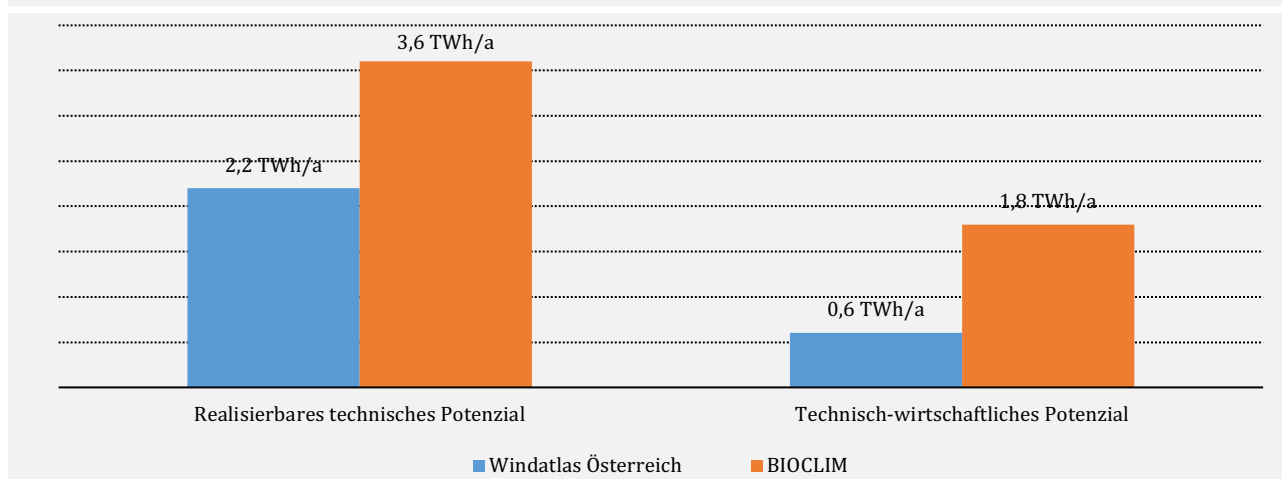
Entsprechend der Unterschiede in der absoluten Höhe und geografischen Verteilung der jahresmittleren Windgeschwindigkeiten der im Rahmen dieser Studie zur Quantifizierung der Windenergiepotenziale in Tirol herangezogenen Winddatensätze Windatlas Österreich [17] und BIOCLIM [18] zeigen auch die daraus abgeleiteten Windenergiepotenziale in Tirol eine gewisse Bandbreite. In Tabelle 20 sind hierzu die auf Basis der beiden Winddatensätze ermittelten Windenergiepotenziale in Tirol zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Windenergiepotenziale in Tirol für unterschiedliche Winddatensätze

	Windatlas Österreich	BIOCLIM
Windnutzungsflächen	3.607 km ²	
Windpotenzialflächen (>5,0 m/s)	838 km ²	1.563 km ²
Theoretisches technisches Potenzial	26,9 TWh/a	57,5 TWh/a
Realisierbares technisches Potenzial	2,2 TWh/a	3,6 TWh/a
	68 km ²	97 km ²
Technisch-wirtschaftliches Potenzial	0,6 TWh/a	1,8 TWh/a
	14 km ²	39 km ²

Quelle: e3 consult

Während das aus dem Windatlas Österreich bestimmte realisierbare technische Windenergiepotenzial in Tirol bei rd. 2,2 TWh/a liegt, kann aus den BIOCLIM-Winddaten ein realisierbares technisches Windenergiepotenzial von 3,6 TWh/a abgeleitet werden. (vgl. auch Abb. 12). Aufgrund des im Windatlas Österreich insgesamt niedrigeren Windgeschwindigkeitsniveaus ist auf Basis der Winddaten aus dem Windatlas Österreich jedoch nur ein vergleichsweise geringer Anteil des realisierbaren technischen Windenergiepotenzials aus technisch-wirtschaftlicher Sicht für eine Errichtung von Windkraftanlagen geeignet. Dadurch liegt das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial in Tirol auf Basis der Winddaten des Windatlas Österreich mit rd. 0,6 TWh/a um 3/4 unter dem realisierbaren technischen Windenergiepotenzial. Demgegenüber reduziert sich das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial auf Grundlage der Winddaten BIOCLIM nur um etwa 50% auf rd. 1,8 TWh/a (vgl. Abb. 12).

Abb. 12: Realisierbares technisches und technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol

Quelle: e3 consult

Worin können diese Unterschiede nun begründet liegen? Zum einen führen die den Winddatensätzen zu Grunde liegenden Modellierungsansätze zu modellimmanenten Unterschieden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass BIOCLIM im Vergleich zum Windatlas Österreich deutlich aktueller ist und damit den aktuellen wissenschaftlichen Stand in Bezug auf bspw. meteorologische und räumliche Modelle widerspiegelt. Auch standen zur Validierung

der von BIOCLIM modellierten Windgeschwindigkeiten mehr reale Windmessdaten als zur Validierung der Modellergebnisse des Windatlas Österreich zur Verfügung.

Zum anderen bestehen zwischen den Winddatensätzen erhebliche Unterschiede in der Auflösung der mittleren Windgeschwindigkeiten. Während der Windatlas Österreich eine Rastergröße von 100x100 m hat, liegen in BIOCLIM die Daten in einer Auflösung von 10x10 m vor. Dadurch können in BIOCLIM im Vergleich zum Windatlas Österreich auch sehr kleinräumige Windpotenzialflächen erfasst werden, die sich zur Aufstellung einzelner Windkraftanlagen eignen können.

Neben der eingeschränkten Genauigkeit der Winddatensätze lassen sich weitere Unsicherheiten insbesondere aus den im Rahmen dieser Studie unterstellten vereinfachten Randbedingungen zum repräsentativen Windkraftanlagentyp und zur Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten sowie zu den pauschal festgelegten technischen Restriktionen mit einer maximalen Hangneigung von 30 % und einer maximalen Seehöhe von 2.300 m ableiten.

Diese modellimmanenten Unsicherheiten zeigen sich auch bei einer Variation von Eingangsparametern, die das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial maßgeblich bestimmen – in Tabelle 21 sind die Ergebnisse für eine exemplarische Variation der maximalen Hangneigung, maximalen Seehöhe, rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion RJ sowie mittleren Windgeschwindigkeit dargestellt.

Tabelle 21: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial mit exemplarischer Variation wesentlicher Eingangsparameter

	Windatlas Österreich	BIOCLIM
Basisannahmen	0,6 TWh/a	1,8 TWh/a
Maximale Hangneigung 25% statt 30%	0,4 TWh/a	1,1 TWh/a
Maximale Hangneigung 35% statt 30%	0,8 TWh/a	2,6 TWh/a
Maximale Seehöhe 2.100 m statt 2.300 m	0,4 TWh/a	1,0 TWh/a
Maximale Seehöhe 2.500 m statt 2.300 m	0,8 TWh/a	2,5 TWh/a
RJ* 557 kWh/m² statt 500 kWh/m²	0,3 TWh/a	1,4 TWh/a
Mittlere Windgeschwindigkeit +0,5 m/s	1,6 TWh/a	3,0 TWh/a
Mittlere Windgeschwindigkeit -0,5 m/s	0,1 TWh/a	0,8 TWh/a

Quelle: e3 consult; *rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion

- **Variation maximale Hangneigung und maximale Seehöhe:** Gegenüber der Basisannahme von 30 % bzw. 2.300 m zeigt eine Variation der maximalen Hangneigung bzw. maximalen Seehöhe für den Windatlas Österreich eine ähnliche Sensitivität wie für BIOCLIM, d. h. es gibt in Bezug auf eine Variation von Hangneigung und Seehöhe keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Winddatensätzen.
- **Variation rotorkreisflächenspezifische Jahresstromproduktion:** Demgegenüber ist die Sensitivität der Ergebnisse bei einer Variation der rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion für die Winddaten des Windatlas Österreich deutlich höher, als für die Winddaten aus BIOCLIM. Dies liegt vor allem daran, dass die technisch-wirtschaftlich geeigneten Windpotenzialflächen auf Grundlage des Windatlas Österreich tendenziell auf den insgesamt wirtschaftlich weniger attraktiven Flächen mit mittleren Windgeschwindigkeiten zwischen 5,5 und 6,5 m/s liegen. Diese Flächen haben in der Regel eine rotorkreisflächenspezifische Jahresstrompro-

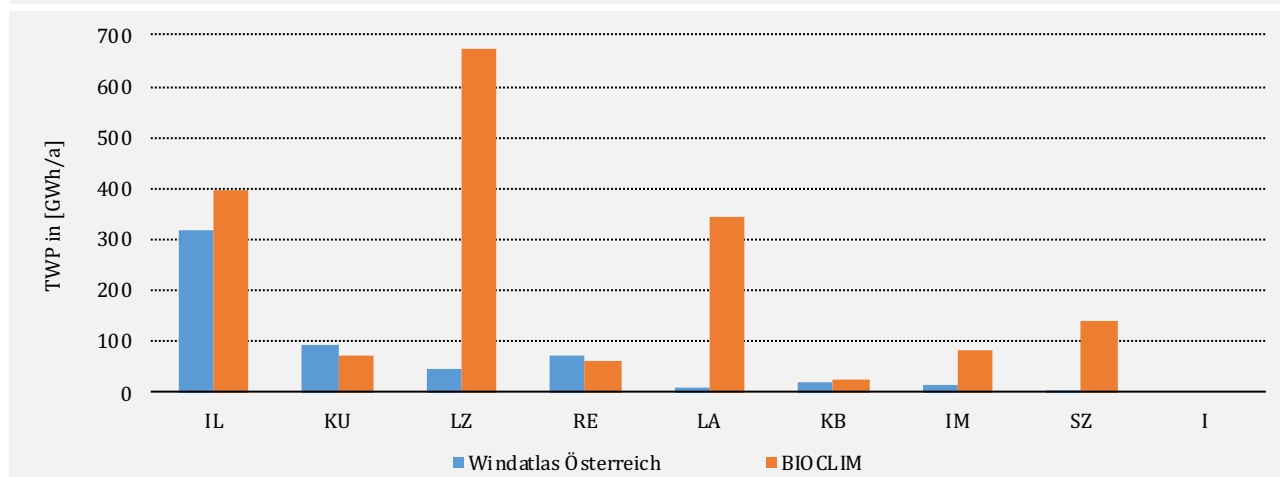
duktion von unter 557 kWh/m² und fallen bei einer Verschiebung der wirtschaftlichen Grenze der rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion daher aus dem technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzial heraus.

- **Variation mittlere Windgeschwindigkeit:** Auch in Bezug auf eine Variation der mittleren Windgeschwindigkeit zeigen die Ergebnisse auf Basis des Windatlas Österreich im Vergleich zu BIOCLIM eine deutlich höhere Sensitivität. Würde beispielsweise die mittlere Windgeschwindigkeit aller 100 x 100 m Windnutzungsflächen um jeweils 0,5 m/s über den im Windatlas ausgewiesenen Werten liegen, wäre das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial in Tirol mit 1,6 GWh/a fast dreimal so hoch, wie auf Grundlage der Basisannahmen. Im Vergleich dazu, würde das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial auf Basis BIOCLIM bei einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeiten auf allen Potenzialflächen um 0,5 m/s um weniger als 50% steigen.

Bei einer Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeiten um 0,5 m/s würde das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial auf Basis der Winddaten aus dem Windatlas Österreich mit 0,1 TWh/a praktisch vernachlässigbar werden. Hingegen würde für die Winddatensätze BIOCLIM eine Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeiten um 0,5 m/s mit 0,8 TWh/a noch immer ein technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in einer energiewirtschaftlich relevanten Größenordnung ergeben.

Die Unterschiede in den Windenergiepotenzialen auf Grundlage der beiden Winddatensätze zeigen sich dabei nicht nur auf Gesamttyroler Ebene, sondern insbesondere auch auf Bezirksebene. Während die Ergebnisse auf Basis der Winddaten des Windatlas Österreich nur für die Bezirke Innsbruck-Land, Kufstein, Reutte und eingeschränkt Lienz ein nennenswertes technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial ausweisen, zeigen die Ergebnisse auf Basis der Winddaten BIOCLIM mit Ausnahme des Bezirks Innsbruck in allen Bezirken ein zum Teil signifikantes technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial (Abb. 13).

Abb. 13: Technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tirol für unterschiedliche Winddatensätze auf Bezirksebene



Quelle: e3 consult

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die aus den Winddatensätzen Windatlas Österreich und BIOCLIM hergeleiteten Windenergiepotenziale in unterschiedlichen Ausprägungen modellspezifische Einschränkungen zeigen. Während mit dem Windatlas Österreich die Windenergiepotenziale in Tirol tendenziell unterschätzt werden, führen die Berechnungen mit den Winddaten BIOCLIM eher zu einer Überschätzung der Tiroler Windenergiepotenziale.

Fazit: Unter Berücksichtigung dieser modellimmanenten Unsicherheiten und der vergleichsweisen hohen Sensitivität der Ergebnisse bei einer Variation der Eingangsdaten und Randbedingungen **kann als technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial eine Bandbreite von 0,8 bis 1,2 TWh/a abgeleitet werden.** Zur Umsetzung dieses Potenzials wären bei einem unterstellten Flächenbedarf von 5,2 ha/MW **rd. 410 bis 480 MW an Windkraftleistung** zu installieren, was bei einer beispielhaften Anlagengröße von 3 MW etwa 140 bis 160 Windkraftanlagen entsprechen würde.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass frühere Abschätzungen des Windenergiepotenzials in Tirol zum Teil deutlich geringere Potenziale ausweisen. Dies liegt zum einen daran, dass sich in den vergangenen Jahren der Trend zu immer höheren und leistungstärkeren Windkraftanlagen fortgesetzt hat und damit heute mit deutlich größeren Anlagen und höheren Nabenhöhen signifikant höhere Energieerträge auf Windpotenzialflächen erzielt werden können, als dies bspw. vor 10 Jahren noch möglich war. Zum anderen sind heute neben dem Windatlas Österreich weitere Winddatensätze verfügbar, die bei einer Bewertung der Windenergiepotenziale berücksichtigt werden können. In Abhängigkeit von der Weiterentwicklung der Windkrafttechnologie sowie der Qualität der für Tirol verfügbaren Winddatensätze können die Ergebnisse einer möglichen zukünftigen Neubewertung der Windenergiepotenziale daher von den hier ausgewiesenen Potenzialen auch abweichen.

5 Zusatzanalyse: Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten

Im Zusammenhang mit einer möglichen energiewirtschaftlichen Nutzung der Windenergiepotenziale in Tirol wird vor dem Hintergrund der Energiepreiskrise verstärkt eine Diskussion über die Nutzung der Windkraft vor allem auch innerhalb von Schigebieten geführt (vgl. u. a. [32], [33]). Im Folgenden werden daher die Windenergiepotenziale auf den nach Tiroler Seilbahn- und Schigebietsprogramm - TSSP 2018 [34] als Schigebiete ausgewiesenen Windnutzungsflächen getrennt von den Gesamttiroler Windenergiepotenzialen dargestellt. Die Herleitung der Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten erfolgt dabei nach der in Kapitel 3 „Methodischer Ansatz und Randbedingungen“ und Kapitel 4 „Technische Windenergiepotenziale in Tirol“ beschriebenen Vorgehensweise. Abweichend davon werden für das realisierbare technische Windenergiepotenzial jedoch auch Windpotenzialflächen zwischen einer Seehöhe von 2.300 und 2.800 m berücksichtigt, da in Schigebieten die für eine Errichtung von Windkraftanlagen notwendige wege- und netztechnische Infrastruktur in der Regel auch in Höhen über 2.300 m bereits vorhanden ist. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass insbesondere auf Grund des Risikos von Eiswurf ein ausreichender Abstand der Windkraftanlagen zu Skipisten und Verbindungswegen gewährleistet ist. Als Richtwert kann hier ein Abstand entsprechend der Summe aus Nabenhöhe und halber Rotordurchmesser unterstellt werden. Diese sich daraus ergebenden standortspezifischen Einschränkungen werden bei der nachfolgenden Abschätzung des Windenergiepotenzials in Tiroler Schigebieten allerdings nicht berücksichtigt.

Insgesamt sind in Tirol 515 km² Landesfläche als Schigebiete im Sinne des TSSP 2018 ausgewiesen. Davon können 166 km² oder rd. 32% als Windnutzungsflächen klassifiziert werden. Entsprechen der Vorgehensweise zur Herleitung der Gesamttiroler Windenergiepotenziale werden auch die Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten mit den Winddaten aus dem Windatlas Österreich und BIOCLIM bestimmt. Die Ergebnisse sind nachfolgend sowie in Tabelle 22 zusammengefasst.

- **Windatlas Österreich:** Als Windpotenzialflächen mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit in 100 m über Grund größer 5,0 m/s sind 49,1 km² mit einem theoretischen technischen Windenergiepotenzial von 1.592 GWh/a verfügbar. Werden davon Flächen mit einer Hangneigung von über 30% sowie über einer Höhe von 2.800m abgezogen, verbleibt eine Fläche von 12,8 km² mit einem realisierbaren technischen Potenzial von 413 GWh/a. Das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial mit einer rotorkreisflächenspezifischen Jahresstromproduktion größer 500 kWh/m² (2,9 km² Windpotenzialflächen) liegt demgegenüber bei 121 GWh/a. Während zur Umsetzung des realisierbaren technischen Potenzials 245 MW an Windkraftleistung erforderlich wären, müssten zur Hebung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials 47 MW installiert werden.

Von den Windenergiepotenzialen in Schigebieten liegen 196 GWh/a des realisierbaren technischen Potenzials sowie 68 GWh/a des technisch-wirtschaftlichen Potenzials in einer Seehöhe zwischen 2.300 und 2.800 m und sind somit additiv zu den in Abschnitt 4.1 dargestellten Gesamttiroler Windenergiepotenziale zu betrachten, die Windpotenzialflächen nur bis zu einer Seehöhe von 2.300 m berücksichtigen.

- **BIOCLIM:** Auf einer Windpotenzialfläche von in Summe 88 km² beträgt das theoretische technische Windenergiepotenzial 2.777 GWh/a. Das realisierbare technische Potenzial liegt auf einer Windpotenzialfläche von 15,4 km² demgegenüber bei 539 GWh/a (101 GWh/a über 2.300 m Seehöhe) und das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial auf einer Windpotenzialfläche von 4,9 km² bei 222 GWh/a (29 GWh/a über 2.300 m Seehöhe). Zur Umsetzung des realisierbaren technischen Potenzials wären 236 MW an Windkraftleistung und zur Umsetzung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials 94 MW an Windkraftleistung notwendig.

Tabelle 22: Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten für unterschiedliche Winddatensätze

	Datenbasis jahresmittlere Windgeschwindigkeiten	
	Windatlas Österreich	BIOCLIM
Schigebiete nach TSSP 2018 gesamt	515 km ²	
Windnutzungsflächen in Schigebieten	166 km ²	
Windpotenzialflächen in Schigebieten	49,1 km ²	88,0 km ²
Theoretisches technisches Potenzial	1.592 GWh/a	2.777 GWh/a
Realisierbares technisches Potenzial	413 GWh/a	539 GWh/a
	12,8 km ²	15,4 km ²
Technisch-wirtschaftliches Potenzial	121 GWh/a	222 GWh/a
	2,9 km ²	4,9 km ²

Quelle: e3 consult

Die Windenergiepotenziale in Schigebieten zeigen aufgrund der modellimmanenten Unsicherheiten der Winddatensätze eine ähnliche Bandbreite wie die Gesamttiroler Windenergiepotenziale. Dabei kann auch in Bezug auf die Windenergiepotenziale in Tiroler Schigebieten davon ausgegangen werden, dass diese auf Basis der Winddaten des Windatlas Österreich tendenziell unterschätzt bzw. auf Basis der Winddaten BIOCLIM tendenziell überschätzt werden. Im Unterschied zu den Gesamttiroler Windenergiepotenzialen ist jedoch zu erwarten, dass innerhalb von Schigebieten auch auf den ersten Blick wirtschaftlich weniger attraktive Standorte genutzt werden können. Dies liegt zum einen daran, dass durch die bereits vorhandene verkehrs- und netztechnische Infrastruktur die Investitionskosten im Vergleich zu einer Erschließung von Windpotenzialflächen außerhalb von Schigebieten niedriger sein können. Zum anderen wird in den meisten Fällen ein Großteil der erzeugten Strommengen direkt von den Seilbahnunternehmen selbst verbraucht und damit können die im Vergleich zu den Erzeugungskosten von Windstrom meist höheren Strombezugskosten aus dem öffentlichen Netz vermieden werden.

Fazit: Als technisch-wirtschaftliches Windenergiepotenzial in Tiroler Schigebieten kann daher eine Bandbreite von 150 bis 180 GWh/a¹² abgeleitet werden. Dieses Potenzial entspricht bei einem unterstellten Flächenbedarf von 5,2 ha/MW etwa 60 bis 70 MW an Windkraftleistung bzw. bei einer beispielhaften Anlagengröße von 3 MW 20 bis 23 Windkraftanlagen.

Von dem für Tiroler Schigebieten ausgewiesenen technisch-wirtschaftlichen Windenergiepotenzial von 150-180 GWh/a liegen knapp 50 GWh/a in einer Seehöhe zwischen 2.300 und 2.800 m und sind damit nicht in den Gesamttiroler Windenergiepotenzialen (Kapitel 4) enthalten.

¹² Im Vergleich dazu liegt der Stromverbrauch aller Tiroler Schigebiete bei etwa 350 GWh/a [35].

6 Schlussfolgerungen

Mit einer Bandbreite von 0,8 bis 1,2 TWh/a liegt das technisch-wirtschaftliche Windenergiepotenzial in Tirol bei etwa 15 bis 22 % der Stromabgabe an Endkunden, die 2021 rd. 5,5 TWh verbraucht haben [36]. Nicht zuletzt auf Grund der Weiterentwicklung der Windkrafttechnologie in den vergangenen Jahren hin zu immer leistungsstärkeren und höheren Windkraftanlagen kann die Windkraft damit auch im alpinen Tiroler Raum einen deutlich größeren Beitrag zu dem übergeordneten energiepolitischen Ziel *Tirol 2050 energieautonom* [4] leisten, als bisher im *Energie-Zielszenario Tirol 2050 und 2040 mit Zwischenziel 2030* [6] (200 bis 300 GWh/a) unterstellt wurde. Dies ist insbesondere auch aus energiewirtschaftlicher Sicht von Relevanz, da die Windkraft im Gegensatz zur Photovoltaik und Laufwasserkraft ihren Erzeugungsschwerpunkt im Winterhalbjahr hat und damit aus Portfoliosicht bzw. aus Sicht der Versorgungssicherheit der Ausbau der Windkraft Vorteile gegenüber einem Ausbau der Photovoltaik und Laufwasserkraft haben kann. Insofern sollte die mögliche zukünftige Rolle der Windkraft im Tiroler Stromerzeugungssystem neu bewertet und bei der Weiterentwicklung des Energie-Zielszenarios entsprechend berücksichtigt werden.

Die GIS-basierte Bewertung anhand der Winddatensätze von Windatlas Österreich und BIOCLIM liefert zwar eine hohe räumliche Auflösung der Windenergiepotenziale für Tirol, hat jedoch auch gezeigt, dass die modellierten Windenergiepotenziale im hohen Maße von der Qualität der Winddaten abhängig sind. Gerade für Tirol können die Winddatensätze aufgrund der nur eingeschränkt verfügbaren realen Messdaten zur Validierung der Modellergebnisse vergleichsweise hohe Unsicherheiten zeigen, die sich letztendlich auch in einer großen Bandbreite der Windenergiepotenziale für die einzelnen Winddatensätze widerspiegeln. Unabhängig davon kann mit den verfügbaren Winddatensätzen jedoch eine aktuelle Abschätzung der Gesamttiroler Windenergiepotenziale bereitgestellt werden, die bspw. im Rahmen einer weitergehenden energiepolitischen Planung zur Nutzung der Windkraft in Tirol berücksichtigt werden kann. Darüber hinaus, sollte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse jedoch keine weitergehende Festlegung von konkreten Windvorrangflächen (bspw. in Form eines Windkatasters) erfolgen, da die zur Verfügung stehenden Winddatensätze auf lokaler Ebene nicht durchgehend die hierfür erforderliche Qualität haben.

7 Referenzen

- [1] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, „Österreichische Klima- und Energiestrategie #mission2030“, 2018.
- [2] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, „Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich Periode 2021 - 2030“. 2019.
- [3] Die neue Volkspartei/Die Grünen, Hrsg., „Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024“. 2020.
- [4] Tiroler Landesregierung, „Regierungsbeschluss vom 03.06.2014 zur Energieautonomie bis 2050 (Tirol 2050 energieautonom)“, 2014.
- [5] Wasser Tirol, Universität Innsbruck, und MCI, „Ressourcen- und Technologieeinsatz-Szenarien Tirol 2050 (im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung)“, 2018.
- [6] Universität Innsbruck, MCI, und Wasser Tirol, „Advisory Board Workshop Zielszenario 2050/2040 und Energiespeicher Tirol 2050“, 25. Juni 2020.
- [7] J. Neubarth, „Bewertung des Windenergiepotenzials in Tirol, Studie im Auftrag des Energiebeauftragten des Landes Tirol“, 2014.
- [8] Tiroler Landtag, *Entschließung des Tiroler Landtags*. 2022. Zugriffen: 23. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.tirol.gv.at/LteWeb/public/ggs/ggsDetails.xhtml?id=18700#>
- [9] Global Wind Energy Council, „Global Wind Report 2022“, 2022.
- [10] IG Windkraft, „Windkraftausbau 2022 und Vorschau auf 2023“, 2023. Zugriffen: 8. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://windfakten.at/mmedia/download/2023.01.17/1673942588253231.pdf>
- [11] E-Control, „Elektrizitätsstatistik“. <https://www.e-control.at/statistik/e-statistik> (zugegriffen 9. Februar 2023).
- [12] APG - Austrian Power Grid, „Marktinformation Erzeugung“. <https://www.apg.at/de/markt/Markttransparenz/erzeugung> (zugegriffen 9. Februar 2023).
- [13] S. Hantsch und S. Moidl, „Das realisierbare Windkraftpotenzial in Österreich bis 2020, Kurzstudie der IG Windkraft“, 2007. Zugriffen: 10. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1006726
- [14] G. et al Stanzer, „REGIO Energy - Regionale Szenarien erneuerbarer Energiepotenziale in den Jahren 2012/2020; Studie im Rahmen des Forschungs- und Technologieprogramms ‚Energie der Zukunft‘“, 2010.
- [15] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Bayerischer Windatlas - Potenziale der Windenergie in Bayern“, 2021.
- [16] Energiewerkstatt, „Windenergiepotential Vorarlberg - Einschätzung der Windverhältnisse und des theoretischen Windenergiepotentials im Land Vorarlberg“, 2023.
- [17] A. Krenn et al, „Windatlas und Windpotentialstudie Österreich; Studie im Rahmen der Programmschiene Neue Energie 2020“, 2011.
- [18] F. et al Lehner, „Klimatologische Daten für die Klimawandelanpassung der Tiroler Wälder durch Kombination mit dynamischen Klimaszenarien (BIOCLIM)“, 2023.
- [19] Technical University of Denmark, „Global Wind Atlas 3.0 - a free, web-based application developed, owned

- and operated by the Technical University of Denmark (DTU).“, 2023. <https://globalwindatlas.info> (zugegriffen 24. Februar 2023).
- [20] R.-S. iSPACE Energiewerkstatt, „Windkarte Österreich - Windverteilung in verschiedenen Höhen über Grund“, 2011. <http://www.windatlas.at/ergebnisse.html> (zugegriffen 21. Februar 2023).
- [21] Suisse Eole, „Windenergie-Daten der Schweiz - Hilfsmittel für eine erste Einschätzung von Winddaten“. <https://wind-data.ch/tools/index.php> (zugegriffen 13. Februar 2023).
- [22] Eco Energy, „Windverhältnisse in Deutschland“. <https://shef-eco-energy.com/ee-grundlagen/windenergieanlagen/windverhaeltnisse/> (zugegriffen 21. Februar 2023).
- [23] „Gutachten zu den Betriebs- und Investitionsförderungen im Rahmen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG)“, Wien, 2022.
- [24] *Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie zur Gewährung von Marktprämien nach dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz für die Jahre 2022 und 2023 (EAG-Marktprämienverordnung – EAG-MPV)*.
- [25] ABO Wind, „Info-Center Flächenbesitzer*innen“. <https://www.abo-wind.com/de/info-center/flaechenbesitzer-innen.html> (zugegriffen 17. Februar 2023).
- [26] Fachagentur Windenergie an Land, „Entwicklung der Windenergie im Wald (7. Auflage)“, 2022.
- [27] E. Hau, *Windkraftanlagen - Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit*. Berlin: Springer, 2016.
- [28] Gruppe Forst, „Katastrophenplan – Wald – Tirol; Studie im Rahmen des Interreg Projektes Monitor II“, Innsbruck, 2011.
- [29] IG Windkraft, „Windpotential und Windparkflächen“, 2022.
- [30] I. Lütkehus et al, „Potenziale der Windenergie an Land - Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land“, 2013.
- [31] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, *Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG)*. 2022.
- [32] ORF Online, „NEOS wollen Windkraft in Skigebieten“, 16. Juni 2022. <https://tirol.orf.at/stories/3160969/> (zugegriffen 22. Februar 2023).
- [33] TT Online, „Seilbahnchef Hörl will Windräder in der Zillertal Arena errichten“, 20. September 2022. <https://www.tt.com/artikel/30832340/seilbahnchef-hoerl-will-windraeder-in-der-zillertal-arena-errichten> (zugegriffen 22. Februar 2023).
- [34] *Tiroler Seilbahn- und Schigebietsprogramm 2018 - TSSP 2018*.
- [35] R. Wagner, „Tiroler Skigebiete und ihr Joker für den Strompreis“, *Dolomitenstadt*, 19. August 2022. Zugegriffen: 24. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dolomitenstadt.at/2022/08/19/tiroler-skigebiete-und-ihr-joker-fuer-den-strompreis/>
- [36] Wasser Tirol - Ressourcenmanagement-GmbH, „Tiroler Energiemonitoring 2021 - Statusbericht zur Umsetzung der Tiroler Energiestrategie“, 2022.