

Bericht

Vergleichende Datenverfügbarkeit von LiDAR-Messkampagnen

Analyse und Bewertung im Rahmen der
IEA Wind Task 32 Forschungskoooperation



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zusammenfassung	3
2.	Einleitung: Das LiDAR-Messprinzip und Datenverfügbarkeit.....	4
3.	Methodik.....	6
3.1	Auswahl der LiDAR-Messstandorte	6
3.2	Meteorologische Daten	7
4.	Ergebnisse	9
4.1	Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen bei Flachland- & Bergstandorten	9
4.2	Einflussfaktor Schneedecke.....	11
4.3	Einflussfaktor Niederschlag	12
4.4	Einflussfaktor Luftfeuchtigkeit	13
4.5	Einflussfaktor Globalstrahlung	15
4.6	Einflussfaktor Lufttemperatur	16
4.7	Niederschlag und LiDAR-Wischerfrequenz	18
5.	Zusammenfassung und Diskussion	20
6.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	22

1. Einleitung und Zusammenfassung

Wind-LiDAR (kurz für „Light Detection And Ranging“) ist eine Technologie, mit der Messungen der Windgeschwindigkeit mittels Laserstrahlen über größere Entfernungen hinweg vorgenommen werden können. Auf diese Weise können mit einem in Bodennähe aufgestellten Gerät Windgeschwindigkeiten bis in eine Höhe von mehreren hundert Meter über dem Boden vorgenommen werden. Aus diesem Grund sind Wind-LiDAR-Geräte eine sehr attraktive Technologie für Fragestellungen aus der Windenergie. Für manche Anwendungen in der Windenergie ist es somit auch möglich, aufwendig und teuer zu errichtende Windmessmasten durch bodenbasierte Wind-LiDAR-Messungen zu ersetzen.

Das Messprinzip einer LiDAR-Windmessung beruht auf der Streuung des Laserlichts an Aerosolen in der Luft. Bei zu wenig Aerosolen sind LiDAR-Messungen nur eingeschränkt oder gar nicht möglich. Die praktische Erfahrung mit Windmessungen an Bergstandorten hat gezeigt, dass LiDAR-Messungen an Alpinen Standorten in größerer Seehöhe in besonderem Maße von diesem Problem betroffen sind, insbesondere im Winterhalbjahr.

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist daher eine vergleichende Analyse, in der die Mess-Verfügbarkeiten von LiDAR-Messungen von Bergstandorten als auch von Standorten in flachen Regionen gegenübergestellt werden. Das Ergebnis dieser Analyse bestätigt den Eindruck aus der Praxis: Während an den üblichen Messstandorten im Flachland die Messverfügbarkeit über das Jahr hinweg in der Größenordnung von etwa 90% bleibt, und damit in einem gut vertretbaren Rahmen, zeigen die LiDAR-Messungen von Bergstandorten deutlich geringere Verfügbarkeiten, die im Winter im Durchschnitt auf unter 50% fallen.

Obwohl eine genaue Zuordnung dieser geringen Verfügbarkeiten anhand von Messdaten und von meteorologischen Informationen nicht möglich war, besteht kein Zweifel daran, dass diese geringe Verfügbarkeit von einer zu geringen Konzentration von Aerosolen verursacht wird. In dieser Hinsicht nehmen demnach Wind-LiDAR-Messungen an Berg-Standorten in größerer Seehöhe eine besondere Stellung ein, die gegebenenfalls in der Konzeption von LiDAR-Messkampagnen berücksichtigt werden sollte.

Eine Diskussion der Ergebnisse im Rahmen der IEA Wind TCP Task 32 Forschungskooperation hat die Sonderstellung von LiDAR-Messungen im Alpinen Raum in Hinsicht auf Aerosolkonzentrationen und Verfügbarkeit bestätigt. LiDAR-Messungen in kalten Klimazonen (bspw. Kanada, Skandinavien) sind zwar ebenfalls zeitweise von durch eine geringe Verfügbarkeit beeinträchtigt, aber bei weitem nicht in dem Umfang wie in der gegenständlichen Auswertung beobachtet.

2. Einleitung: Das LiDAR-Messprinzip und Datenverfügbarkeit

Windmessung mittels Wind-LiDAR beruht auf der Ausstrahlung eines Laserstrahls in das zu vermessende Luftvolumen. Ein kleiner Teil des Laserlichts wird an Aerosolen in der Luft zurückgestreut und daraufhin von dem LiDAR-Gerät detektiert. Da sich die Aerosole mit der Luft mitbewegen, erfährt das zurückgestreute Licht eine leichte Dopplerverschiebung, aus der auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Wenn zusätzlich die Laufzeit des Lasersignals gemessen wird, ist eine Unterscheidung unterschiedlicher Messentfernungen möglich. Dieses Messprinzip ist in Abb. 1 veranschaulicht.

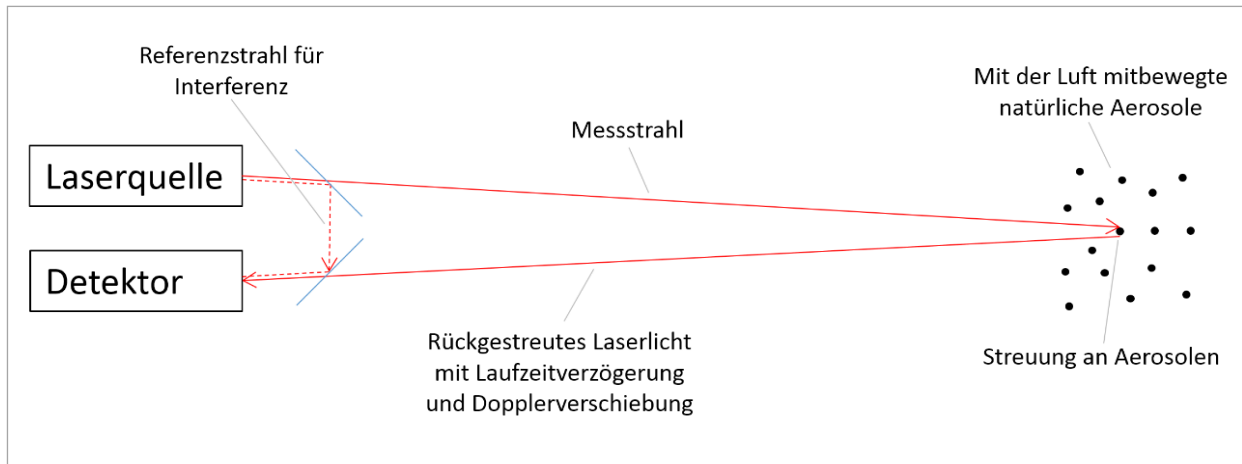


Abb. 1: Messprinzip einer LiDAR-Messung.

Eine Messung dieser minimalen Dopplerverschiebung in der Größe von etwa 10^{-8} , auf Basis des extrem schwachen Anteils an zurückgestreutem Laserlicht, ist eine große messtechnische Herausforderung. Bei ungünstigen Voraussetzungen, z.B. zu wenig oder zu viel Aerosolen, kann daher eine LiDAR-Messung oft nur eingeschränkt (d.h. geringe Reichweite) oder gar nicht durchgeführt werden. Zusätzlich können LiDAR-Messungen natürlich auch von technischen Einschränkungen betroffen sein, welche die zu Verfügung stehenden Daten limitieren. Dazu gehören bspw. Verschmutzungen der Optik, Schneeanlagerungen, Geräteausfälle, Ausfälle der Stromversorgung oder Ausfälle der Datenübertragung.

Mit der Messung der Dopplerverschiebung, kann bei einer LiDAR-Messung zunächst immer nur die Windgeschwindigkeitskomponente entlang der Achse des Laserstrahls bestimmt werden. Um den Windgeschwindigkeitsvektor in seinen drei Dimensionen zu messen, sind daher mehrere LiDAR-Messungen in unterschiedlichen Richtungen erforderlich, aus denen dann der Windgeschwindigkeitsvektor rekonstruiert wird. Bei komplexen Strömungsbedingungen, wie sie bspw. durch die Orographie bedingt im Alpinen Raum auftreten, kann diese Rekonstruktion des Windes eine zusätzliche Herausforderung und ein weiterer Beitrag zur Messunsicherheit sein.

Bei bodengebundenen „vertical profiling“ LiDAR-Geräten, wird die Messung in verschiedene Raumrichtungen durch ein Kippen des Laserstrahls, der an der Oberseite des Geräts durch ein Fenster austritt, aus der Vertikale in verschiedene Richtungen bewerkstelligt. Die Messungen in den unterschiedlichen Richtungen erfolgen in einer festgelegten Abfolge in einem Intervall von etwa einer Sekunde. Je nach einem Durchlauf dieses Abtastmusters können dann durch Kombination der einzelnen Messwerte die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung rekonstruiert werden. Auf diese Weise kann ein in Bodennähe aufgestelltes LiDAR-Gerät die Windgeschwindigkeit in eine Höhe von bis zu einigen hundert Meter bestimmen.

Je nach Vorhandensein von Aerosolen, bzw. nach den meteorologischen Bedingungen, ist eine Detektion des zurückgestreuten Lichts nur bei einem Teil der Laserimpulse möglich. Die Anzahl der Messwerte pro 10-Minuten Mittelungsintervall ist somit nicht konstant. Der prozentuale Anteil der in einer bestimmten Messhöhe detektierten zu den ausgesendeten Laserimpulsen wird als „Verfügbarkeit“ einer LiDAR-Windmessung bezeichnet und wird vom LiDAR-Gerät für alle Messhöhen parallel zur Windgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die Verfügbarkeit ist somit ein Merkmal für die Zuverlässigkeit einer in einem gewissen Zeitraum erfolgte Windgeschwindigkeitsmessung. Üblicherweise werden Messwerte mit Verfügbarkeiten unter 70% nicht für die weitere Datenauswertung herangezogen, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch die lückenhafte Messung zu verhindern.

Zusätzlich zu den erwähnten bodengebundenen „vertical profiling“ LiDAR-Geräten gibt es auch andere Einsatzmöglichkeiten von Wind-LiDAR in der Windenergie, bspw. auf den Gondeln von Windkraftanlagen montierte LiDAR-Geräte oder sogenannte „scanning LiDARs“, die mit einem oder mehreren Strahlen beliebig im Raum verteilte Messpunkte anpeilen. Der vorliegende Bericht behandelt ausschließlich Daten von bodenbasierten „vertical profiling“ LiDAR-Geräten. Die Herausforderungen bezüglich Datenverfügbarkeit betreffen aber alle Arten von Wind-LiDAR-Geräten im gleichen Maße, insofern sind die Ergebnisse dieses Berichts allgemein für Wind-LiDAR-Messungen relevant.

3. Methodik

3.1 Auswahl der LiDAR-Messstandorte

Die Datenverfügbarkeitsanalyse basiert auf zehn ausgewählten LiDAR-Messungen, die in den letzten Jahren von der Energiewerkstatt an verschiedenen Standorten durchgeführt wurden. Für den Vergleich von Standorten im flachen und offenen Gelände mit Standorten im Alpen Raum wurden jeweils fünf Messungen von Standorte dieser beiden Kategorien ausgewählt. Dabei wurde zusätzlich darauf geachtet, dass die Messzeiträume für beide Kategorien möglichst den ganzen Jahresverlauf gleichmäßig abdecken. Auf diese Weise soll die Untersuchung von systematischen Verfügbarkeitsunterschieden zwischen Messungen im Winter (Dezember bis Februar) und Messungen in den restlichen Monaten möglich sein. Vereinfachend und in Abgrenzung zu den Wintermonaten werden in diesem Bericht daher die Monate von März bis November als "Sommermonate" bezeichnet. Tab. 1 fasste die Messzeiträume der ausgewählten LiDAR-Standorte und einige wichtige Standortmerkmale zusammen.

		Messperiode	Seehöhe	Vegetation / Topologie
Flachland Standorte	Standort 1	Sommer, Winter	200 m	Ackerlandschaft (unbewaldet), Tiefebene
	Standort 2	Herbst – Frühjahr	300 m	Ackerlandschaft (unbewaldet), Tiefebene
	Standort 3	Frühjahr – Sommer	200 m	Ackerlandschaft (unbewaldet), Tiefebene
	Standort 4	Herbst – Winter	200 m	Ackerlandschaft (schwache Bewaldung), Tiefebene
	Standort 5	Herbst – Winter	300 m	Ackerlandschaft (schwache Bewaldung), Tiefebene
Alpine Standorte	Standort 6	Winter – Frühjahr	1700 m	An der Baumgrenze, tiefster Punkt eines Bergrückens
	Standort 7	Sommer – Winter	1500 m	Bewaldung (nicht durchgehend), sanfte Hügel
	Standort 8	Herbst – Winter	1500 m	Starke Bewaldung, leichter Hügelrücken
	Standort 9	Frühjahr – Herbst	1800 m	Oberhalb der Baumgrenze, Gipfelplateau
	Standort 10	Sommer	1500 m	Bewaldung (nicht durchgehend), moderater Hügelrücken

Tab. 1: Ausgewählte LiDAR-Messungen an österreichischen Flachland- und Bergstandorten.

Bei einer bodenbasierten Wind-LiDAR-Messung werden im Regelfall die Windgeschwindigkeiten in einer Reihe von unterschiedlichen Messhöhen erfasst. Diese Messhöhen werden jeweils beim Aufbau der Messung parametrisiert und weisen daher im Allgemeinen bei verschiedenen Messungen unterschiedliche Werte auf. Für die Vereinheitlichung des Vergleichs in der gegenständlichen Untersuchung wurden aus den vorliegenden Messdaten vier unterschiedliche Messhöhen ausgewählt die, mit geringen vertikalen Abweichungen, in alle Messungen vertreten sind:

Die niedrigsten Messungen fanden in einem Höhenbereich zwischen 40 m bis 60 m statt, der hier als „Höhe 1“ zusammengefasst wird. „Höhe 2“ beschreibt Messungen zwischen 75 m und 85 m und bildet den bei Windmessungen zumeist wichtigsten Höhenbereich ab. „Höhe 3“ und „Höhe 4“ decken die Bereiche von 135 m bis 145 m und von 180 m bis 200 m ab. Da LiDAR-Geräte auf eine Messhöhe von etwa 80 m optimiert sind, weisen LiDAR-Messungen in dieser Höhe (entspricht hier dem Höhenbereich „Höhe 2“) die beste Verfügbarkeit auf. In größeren Höhen (Höhe 3 & Höhe 4) nimmt die Verfügbarkeit aufgrund der geometrischen und atmosphärischen Schwächung des zurückgestreuten Lichts deutlich ab.

3.2 Meteorologische Daten

Als Basis für den Vergleich der in den Windmessungen auftretenden Verfügbarkeiten mit den gleichzeitig bestehenden meteorologischen Bedingungen wurden meteorologischen Daten ausgewählter ZAMG-Wetterstationen der GeoSphere Austria herangezogen (GeoSphere Austria Data Hub; zamg.ac.at). Übereinstimmend mit den LiDAR-Daten wurde hier ebenfalls auf Zeitreihendaten im 10-Minuten-Intervall zurückgegriffen, sodass die Datensätze in den jeweiligen Messzeiträumen zusammengeführt werden konnten. Bei der Auswahl der Wetterstationen war ausschlaggebend, dass sich diese einerseits in räumlicher Nähe zum LiDAR-Standort befanden und andererseits die Standortcharakteristiken (insbesondere in Bezug auf die Seehöhe) denen der Windmessung ähneln. Mit Hilfe dieser Daten sollte anschließend untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen den meteorologischen Bedingungen und den beobachteten Verfügbarkeiten in den LiDAR-Windmessungen erkennen lässt.

Betrachtet wurden folgende, von den ZAMG-Wetterstationen zur Verfügung gestellten, Messgrößen:

- Schneedeckenhöhe
- Niederschlagsintensität
- Luftfeuchtigkeit
- Globalstrahlung

Im Allgemeinen lassen sich zwei Arten von Wetterbedingungen identifizieren, welche zu besonders geringen Verfügbarkeiten führen. Wenn sich zu wenig Aerosole in der Luft befinden, wird zu wenig von dem ausgestrahlten Laserstrahl zurückgestreut. Eine Messung ist dann aufgrund des zu schwachen Signals (signal to noise ratio) nicht möglich. Solche Bedingungen werden als „clean air“-Verhältnisse bezeichnet. Bei Nebel oder Niederschlag tritt eine gegenteilige Situation ein. In diesem Fall wird der ausgesandte Strahl so stark gestreut und absorbiert, dass eine Ausbreitung des Laserstrahls bis in die angestrebten Messhöhen nicht möglich ist. In beiden Fällen hat das zur Folge, dass kein oder zu wenig Messsignal vom LiDAR-Gerät empfangen wird. Rein aus messtechnischer Sicht lassen sich daher diese beiden möglichen Ursachen für eine geringe Verfügbarkeit nur sehr schlecht unterscheiden. Die zusätzlichen, von den ZAMG Stationen aufgezeichneten, meteorologischen Daten können daher bei dieser Unterscheidung hilfreich sein.

Die langjährige Erfahrung mit Windmessungen in Österreich hat gezeigt, dass die Verfügbarkeit von LiDAR-Messungen im Winter, insbesondere in Berggebieten, besonders gering ist. Potentiell kann eine

Schneedecke die Bildung von Aerosolen drastisch reduzieren. Durch eine Schneedecke wird die Aufwirbelung von Aerosolen von offenen Böden (z.B. Ackerflächen) stark reduziert oder verhindert, womit eine der Hauptquellen von Aerosolen entfällt. In Österreich treten großflächigere Schneedecken typischerweise im Zeitraum von Dezember bis Februar auf, in höheren Lagen auch länger. An zwei der Bergstandorte war das auch der Fall. Für die Zeiträume mit Schneebedeckung wurde für beiden Standorte die wöchentlich durchschnittliche LiDAR-Verfügbarkeit berechnet und in Hinblick auf das Vorhandensein einer Schneebedeckung analysiert. So konnte ein erster Eindruck gewonnen werden, ob eine signifikante Beziehung zwischen diesen beiden Faktoren besteht. Als Kriterium für das Vorhandensein von Schneebedeckung wurde eine wöchentliche, durchschnittliche Schneehöhe von mehr als 2 cm verwendet.

Gleichermaßen wurde auch der Einfluss von Luftfeuchtigkeit und Niederschlag auf die Verfügbarkeit analysiert. Bei der Luftfeuchtigkeit wurden die Tagesmittelwerte verwendet, beim Niederschlag erfolgte die Gegenüberstellung mit der Verfügbarkeit im Sechsstundenmittelwert. Außerdem wurde überprüft, ob eine Korrelation zwischen der Niederschlagsintensität und der Anzahl der Messzeitpunkte mit über 70% Verfügbarkeit erkennbar ist. Letzteres erfolgte zusammengefasst nach Berg- und Flachlandstandorten.

Als Indikator für das Vorhandensein einer Bewölkung oder von Nebel wurde zusätzlich die gemessene solare Globalstrahlung betrachtet und in Hinsicht auf eine mögliche Korrelation mit der Datenverfügbarkeit ausgewertet. Eine geringe Datenverfügbarkeit einer LiDAR-Messung bei gleichzeitig hohen Werten für die Globalstrahlung (d.h. bei Schönwetterbedingungen) wäre somit ein Hinweis auf „clean air“ Bedingungen. Im Gegensatz dazu kann eine niedrige Globalstrahlung ein Hinweis auf Bewölkung, bzw. eine feuchte Witterung, sein. Es wurde daher überprüft, ob geringe LiDAR-Verfügbarkeiten insbesondere bei ausgeprägt hoher bzw. niedriger Globalstrahlung in Erscheinung treten. Um einen Effekt der jahreszeitlich unterschiedlichen Tageszeitlängen auszuschließen, wurden in der Auswertung jeweils nur die Messwerte zwischen 9:00 vormittags und 15:00 nachmittags herangezogen und für diesen Zeitraum die Mittelwerte von Verfügbarkeit und Globalstrahlung berechnet.

Als letzter Einflussfaktor wurde ein möglicher Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und LiDAR-Verfügbarkeit untersucht. Die Lufttemperatur wurde im Zuge der LiDAR-Messungen jeweils direkt am Messstandort mit aufgezeichnet und in den Datensatz aufgenommen.

Der mögliche Einfluss der beschriebenen meteorologischen Größen auf die Verfügbarkeit in Messhöhe *Höhe 2* wurde jeweils mittels einer Spearman Rangkorrelation überprüft.

Die Messung eines LiDAR-Geräts, d.h. das Ausstrahlen und Detektieren des Laserlichts, erfolgt durch ein, auf der Gehäuseoberseite eingelassenes Fenster. Damit dieses Fenster während der Messung durchgehend frei von Verunreinigungen, Niederschlag, Regentropfen und Schnee bleibt, verfügen LiDAR-Geräte über einen automatisch geregelten Scheibenwischer und eine Düse für Scheibenwaschflüssigkeit, ähnlich wie bei einer Auto-Windschutzscheibe. Initial wird eine Scheibenreinigung jeweils von einem zu geringen Messsignal ausgelöst. Der Effekt dieser Reinigung auf die Messung wird dann von einem Algorithmus ausgewertet und die Wischfrequenz entsprechend geregelt. Wenn sich durch die Scheibenreinigung keine Verbesserung ergibt (z.B. weil die Schwächung des Signal durch clean air Bedingungen verursacht wird, wird die Scheibenreinigung wieder eingestellt.

Die Wischfrequenz innerhalb der 10-Minuten-Messintervalle wird während des Betriebs einer LiDAR-Messung laufend mit aufgezeichnet und ist somit ein Indikator für die Niederschlagsintensität am Standort. Der Zusammenhang zwischen Wischerfrequenz, Niederschlag und Datenverfügbarkeit der LiDAR-Messung wurde daher ebenfalls mit untersucht.

4. Ergebnisse

4.1 Verfügbarkeit der LiDAR-Messungen bei Flachland- & Bergstandorten

Eine Zusammenfassung der LiDAR-Datenverfügbarkeiten für die betrachteten Flachland- und Bergstandorte in den Sommer- und Wintermonaten findet sich in Tab. 2. Die Alpinstandorte zeigen auf allen Messhöhen deutlich niedrigere Verfügbarkeitswerte als jene im Flachland. Die Unterschiede betragen je nach Messhöhe bis zu 30%. Beispielsweise wird an den Flachlandstandorten auf *Höhe 3* eine über das Jahr gemittelte Verfügbarkeit von 85% erreicht während Bergstandorte nur 55% aufweisen. Diese Auswertung bestätigt somit die anfängliche, auf anekdotischen Hinweisen beruhende Vermutung, dass LiDAR-Messungen an Bergstandorten deutlich geringere Verfügbarkeitswerte aufweisen.

Die Aufteilung in Winter- und Sommermessungen verdeutlicht dieses Bild. So verringert sich die Verfügbarkeit bei Standorten im Flachland über die Wintermonate nur um wenige Prozent. Hingegen weichen die Datenverfügbarkeiten an den Alpinstandorten im Winter stark von den Messungen in den Sommermonaten ab. Zwar weisen Bergstandorte auch im Sommer um 15% bis 20% niedrigere Verfügbarkeiten als Messungen im Flachland auf, in den Wintermonaten verstärkt sich dieser Unterschied jedoch nochmals drastisch. Hier sind die Verfügbarkeiten um bis zu 60% niedriger als an Flachlandstandorten und überschreiten in keiner Messhöhe eine Verfügbarkeit von 50%. Die im Jahresdurchschnitt schlechteren Verfügbarkeiten an Bergstandorten können somit zu einem großen Anteil auf die Unterschiede in den Wintermonaten zurückgeführt werden. Die anekdotischen Erfahrungen werden somit auch in dieser Hinsicht durch die Auswertung der betrachteten Datensätze gut gestützt.

	<i>Höhe 1</i>	<i>Höhe 2</i>	<i>Höhe 3</i>	<i>Höhe 4</i>
Flachland	94%	96%	85%	54%
Bergstandorte	65%	73%	55%	39%
Flachland - Sommer	96%	97%	86%	52%
Flachland - Winter	92%	94%	82%	56%
Berg - Sommer	80%	83%	66%	49%
Berg - Winter	32%	48%	30%	17%

Tab. 2: Mittlere LiDAR-Verfügbarkeit an Flachland- und Bergstandorten.

Abb. 2 zeigt die gemittelten Verfügbarkeiten im jahreszeitlichen Verlauf. Die reduzierten Verfügbarkeiten in den Wintermonaten, insbesondere Dezember und Jänner, sind gut erkennbar. Das gilt gleichermaßen für die beiden dargestellten Messhöhen (*Höhe 2* und *Höhe 3*). Gemäß dem Messprinzip nimmt die Datenverfügbarkeit einer bodenbasierten LiDAR-Messung mit größerer Höhe ab. Daher sind die Verfügbarkeiten in *Höhe 3* allgemein etwas geringer als jene in *Höhe 2*. Auffällig sind außerdem die geringen jahreszeitlichen Schwankungen bei Flachlandstandorten. In *Höhe 2* fällt die Verfügbarkeit

ganzjährig nicht unter 90%. In *Höhe 3* liegen zwar geringe Unterschiede vor, die winterliche Verfügbarkeit ist jedoch nicht generell geringer als im Sommer. Für den Monat April liegen bei keinem Flachlandstandort Daten vor.

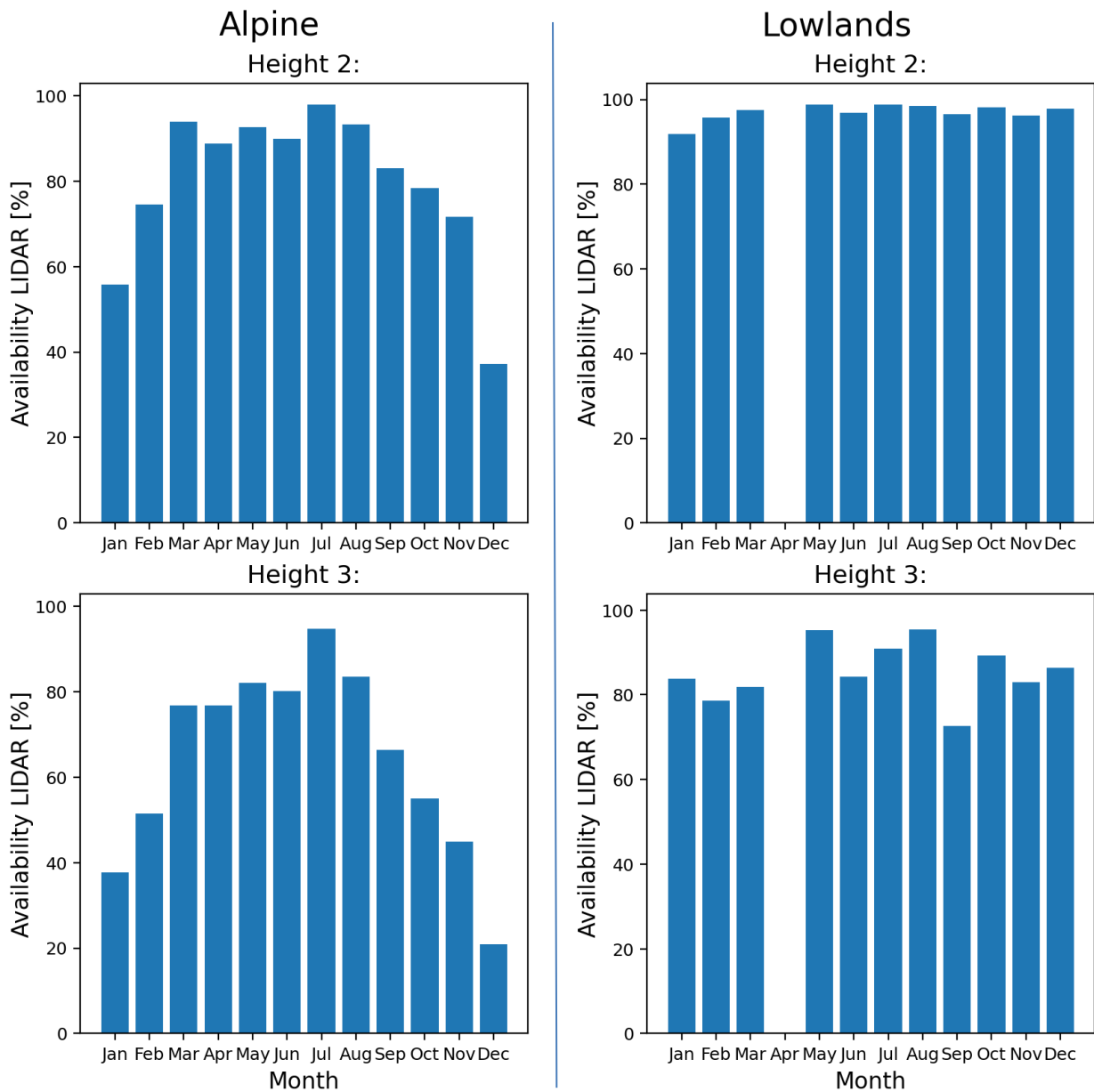


Abb. 2: Verfügbarkeit von LiDAR-Messungen im jahreszeitlichen Verlauf für Bergstandorte (links) und Flachlandstandorte (rechts) in den Messhöhen *Höhe 2* (oben) und *Höhe 3* (unten).

4.2 Einflussfaktor Schneedecke

Abb. 3 und Abb. 4 stellen die LiDAR-Datenverfügbarkeit (farbige Linien) und das Vorhandensein einer Schneedecke (grau hinterlegte Bereiche) anhand zweier Bergstandorte dar. Ein direkter Zusammenhang zwischen Verfügbarkeit und Schneelage ist jeweils nicht erkennbar. So liegt die Verfügbarkeit in Abb. 3 von Dezember bis Mitte Jänner zu großen Teilen unter 50%, von Februar bis März größtenteils darüber. In beiden Zeiträumen war eine Schneedecke vorhanden, was nahelegt, dass diese keine große Auswirkung auf die Verfügbarkeit in den LiDAR-Messungen hat. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, gibt es gute Argumente, die eine Korrelation zwischen Schneelage und Aerosolkonzentrationen nahelegen, dennoch haben in den betrachteten Messkampagnen offensichtlich andere Einflussfaktoren überwogen.

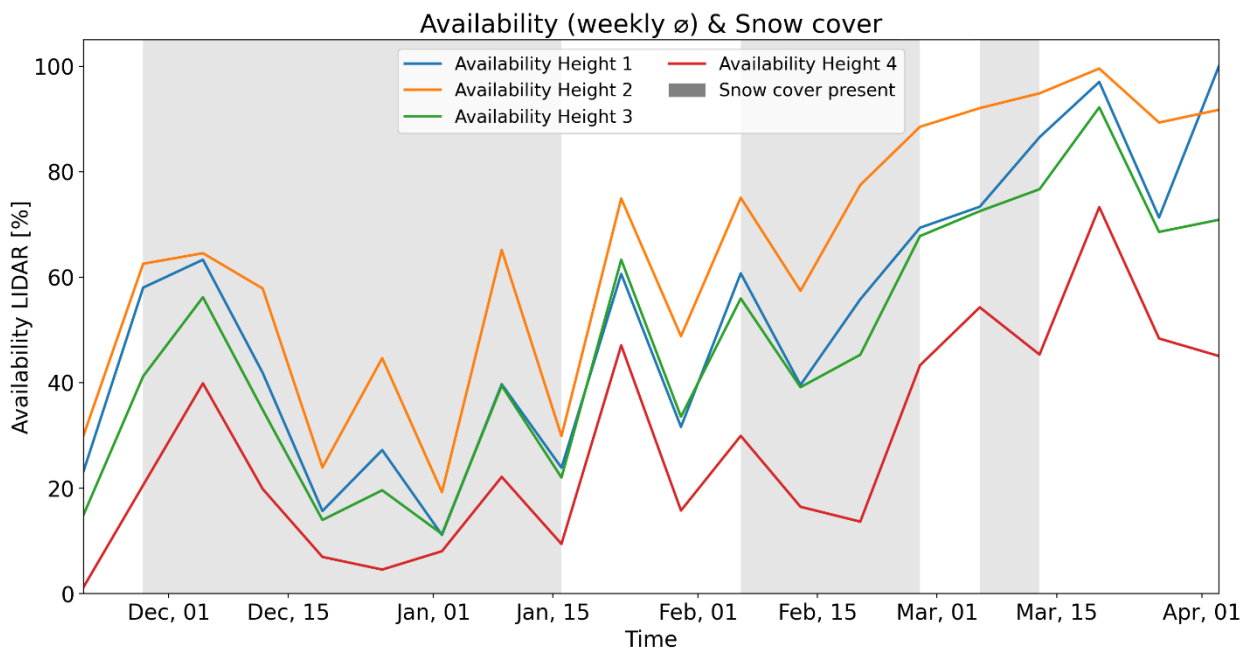


Abb. 3: Beispiel für den Verlauf der wöchentlich durchschnittliche LiDAR-Datenverfügbarkeit und des Vorhandenseins einer Schneedecke an einem Alpinen Standort.

Der typische jahreszeitliche Verlauf der Verfügbarkeit ist in Abb. 3 ebenfalls gut erkennbar. Nach einer durchwegs geringen Verfügbarkeit über die Wintermonate hinweg, steigt in dieser Messung die Datenverfügbarkeit im Frühjahr wieder stetig an, und zwar unabhängig von dem Vorhandensein einer Schneedecke. Ausschlaggebend ist an diesem Standort also nicht das Vorhandensein einer Schneedecke, sondern es sind offensichtlich andere Faktoren für die geringe Verfügbarkeit im Winter verantwortlich. Dabei sollte auch erwähnt werden, dass eine belastbare Aussage sich auf eine größere Anzahl von Standorten mit einer größeren Bandbreite an Schneehöhen stützen müsste. Bei den beiden hier dargestellten Standorten überschreitet die Schneehöhen im Wochenmittel nur selten 3 cm. Für eine abschließende Bewertung ist das möglicherweise nicht ausreichend, da bei solchen Verhältnissen durchaus auch größere schneefreie Flächen wahrscheinlich scheinen.

An Bergstandorten, in denen im Untersuchungszeitraum keine Schneedecke vorhanden war, zeigten sich in den Wintermonaten ebenfalls geringere Verfügbarkeiten als im Sommer. Das bestätigt den Eindruck, dass die geringe Datenverfügbarkeit der LiDAR-Messungen an Bergstandorten nicht primär durch die Schneebedeckung verursacht wird.

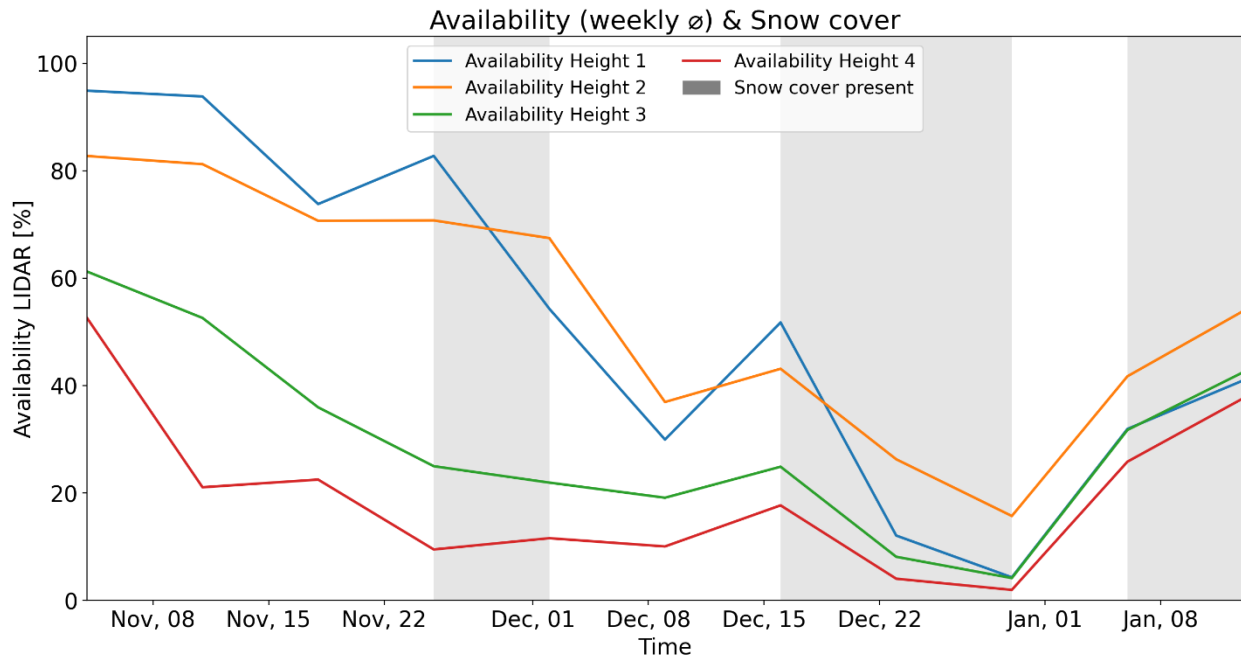


Abb. 4: Beispiel für den Verlauf der wöchentlich durchschnittliche LiDAR-Datenverfügbarkeit und des Vorhandenseins einer Schneedecke an einem Alpinen Standort.

4.3 Einflussfaktor Niederschlag

Abb. 5 stellt die Verfügbarkeit in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität in der LiDAR-Messhöhe *Höhe 2* dar. Regentropfen sind eine Ursache für atmosphärische Absorption und somit eine potentielle Ursache für eine geringe Verfügbarkeit in einer LiDAR-Messung. In den betrachteten Datensätzen konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen Niederschlag und Verfügbarkeit gefunden werden.

In einer Winddatenauswertung werden Messwerte mit einer Verfügbarkeit unter einem gewissen Schwellenwert, z.B. 70%, aufgrund der höheren inhärenten Unsicherheit nicht mitberücksichtigt. Für die Bestimmung des Effekts von Niederschlag auf eine LiDAR-Messung wurde daher der Anteil der Messwerte mit einer Verfügbarkeit von über 70% für unterschiedliche Niederschlagsintensitäten bestimmt. Als binning-Intervall für die Niederschlagsintensität wurden 0,1 mm/h gewählt. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abb. 5 dargestellt. Während es an den Flachlandstandorten eine geringe negative Korrelation mit der Regenintensität gibt, so scheint es bei den Bergstandorten eine geringe positive Korrelation zwischen Niederschlagsintensität und Verfügbarkeit zu geben (d.h. eine bessere Datenqualität bei mehr Niederschlag). Eine Ursache für diese sich widersprechenden Ergebnisse könnte eine zu geringe Datenbasis sein: Nur 533 der insgesamt über 160 000 Messzeitpunkte weisen eine Niederschlagsmenge über 0,6 mm/h auf.

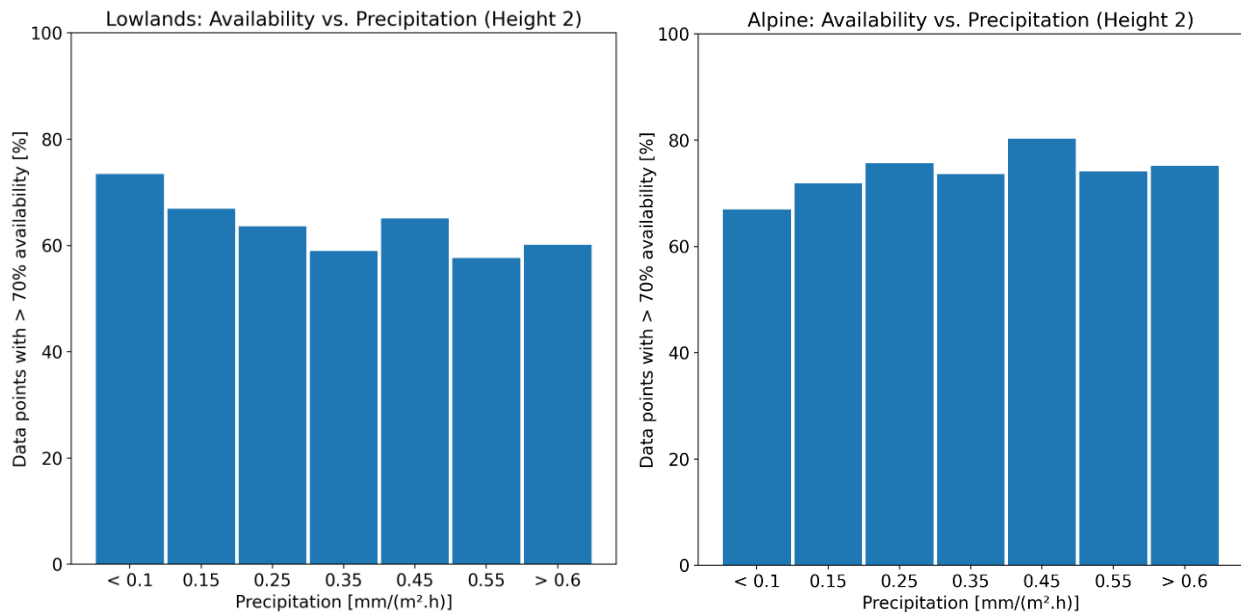


Abb. 5: LIDAR-Verfügbarkeit in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität in Flachlandstandorten (links) und Bergstandorten (rechts).

Ungeachtet dieser statistischen Betrachtung, kann man in einer detaillierten Betrachtung der Messzeitreihen und der parallelen Niederschlagsintensitäten in manchen Einzelereignissen einen klaren Zusammenhang zwischen Niederschlag und Verfügbarkeit erkennen. Zeitpunkte deutlich schlechterer Verfügbarkeit fallen hier auffällig gut mit den Zeitpunkten hoher Regenintensität zusammen. Demnach scheinen Niederschlagsereignisse bei ausreichender Intensität zwar zu verringerten LiDAR-Verfügbarkeiten beizutragen, können aber, wie aus Abb. 5 erkennbar, als primäre Ursache für geringe Datenverfügbarkeit ausgeschlossen werden. Auch in den statistischen Auswertungen zeigt sich kein Zusammenhang ($\rho = 0.05$, $p \approx 0.0$). Insbesondere ist Niederschlag auch nicht die Ursache für die beobachteten, systematisch geringeren Verfügbarkeiten in den Wintermonaten und an Bergstandorten.

4.4 Einflussfaktor Luftfeuchtigkeit

Abb. 6 und Abb. 7 geben einen Überblick über den zeitlichen Verlauf von LiDAR-Datenverfügbarkeit und gemessenen Luftfeuchtigkeitswerte. In Abb. 6 ist beispielhaft ein Flachlandstandorte dargestellt, in Abb. 7 ein Bergstandort. Die Luftfeuchtigkeit dient hier in erster Linie als Indikator für Nebel. Regen ist zwar ebenfalls mit hoher Luftfeuchtigkeit verbunden. Hier ist es jedoch sinnvoller, direkt auf die Niederschlagsmessungen zurückzugreifen, wie oben in Abschnitt 4.3 diskutiert. Im Fall von Nebel ist durch die starke atmosphärische Streuung die Funktion eines LiDAR-Geräts auf jeden Fall stark eingeschränkt. Wäre die geringe Verfügbarkeit in erster Linie auf Nebel und Niederschlag zurückzuführen, dann sollten Zeiträume mit geringer Verfügbarkeit mit nahezu 100% mit einer hohen Luftfeuchtigkeit korrelieren. In beiden Abbildungen ist eine solche Korrelation allenfalls vereinzelt erkennbar, was sich gut durch vereinzelt auftretende Nebel oder Niederschlagsereignisse erklären lässt. Umgekehrt gibt es aber in den allermeisten Zeiträumen mit schlechter Verfügbarkeit keine Hinweise (in der Form hoher Luftfeuchtigkeit) auf Nebel oder Niederschlag. Dieser Sachverhalt stellt sich in den übrigen, nicht dargestellten Messungen ähnlich dar. Eine Berechnung des Spearman Rangkorrelationskoeffizienten, bestätigt, dass es in den betrachteten

Datensätzen keinen systematischen statistischen Zusammenhang zwischen Verfügbarkeit und Luftfeuchte gibt ($\rho = 0.03$, $p \approx 0.0$).

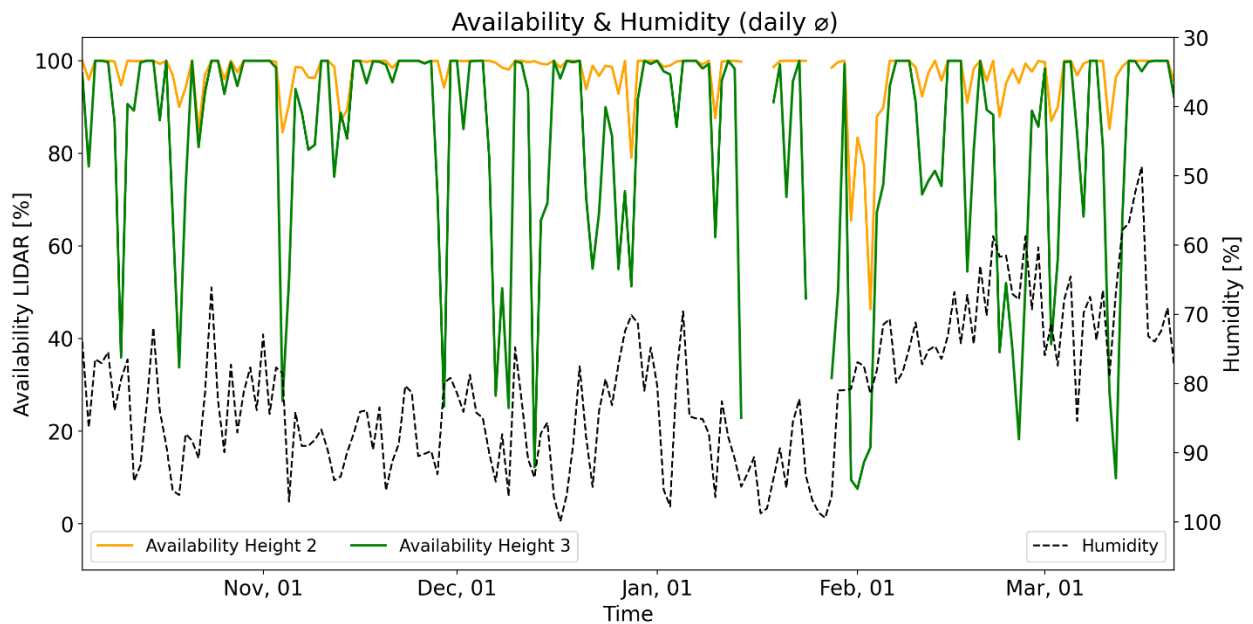


Abb. 6: Beispiel für den Verlauf von LiDAR-Verfügbarkeit und Luftfeuchtigkeit an einem Flachlandstandort.

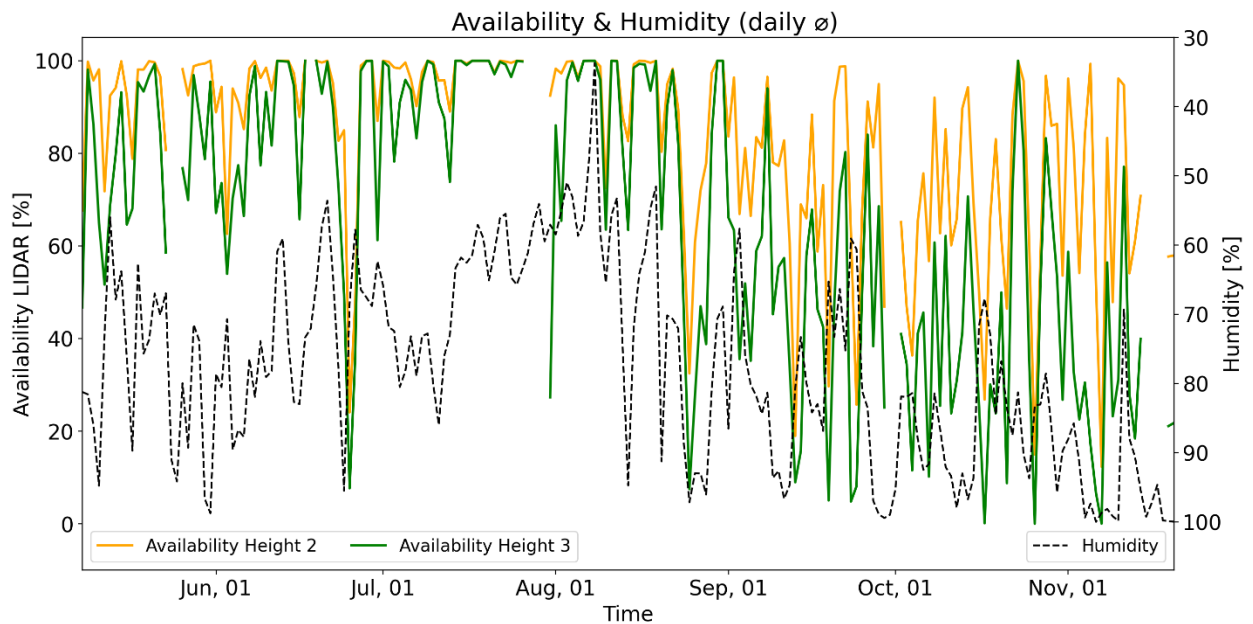


Abb. 7: Beispiel für den Verlauf von LiDAR-Verfügbarkeit und Luftfeuchtigkeit an einem Bergstandort.

4.5 Einflussfaktor Globalstrahlung

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wurde zusätzlich auch die solare Globalstrahlung als möglicher Indikator für das Vorhandensein einer Bewölkung oder von Nebel in der Auswertung miteinbezogen. Beispiele für die zeitliche Korrelation von Globalstrahlung und Verfügbarkeit sind in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Wie in den vorhergehenden Abschnitten ergibt sich auch hier kein eindeutiges Bild. In Abb. 8 variieren beispielsweise bei konstant niedriger Globalstrahlung in den Wintermonaten (also mutmaßlich bewölktem Himmel) die Verfügbarkeiten stark. Während die gemittelten Verfügbarkeiten teilweise auf Werte zwischen 0% und 20% absinken, zeigen sich bei der Strahlungsintensität keine Auffälligkeiten. In den letzten drei Wochen des dargestellten Zeitraums bleibt die Verfügbarkeit durchgehend sehr gut, während die Globalstrahlung unverändert auf niedrigem Niveau bleibt.

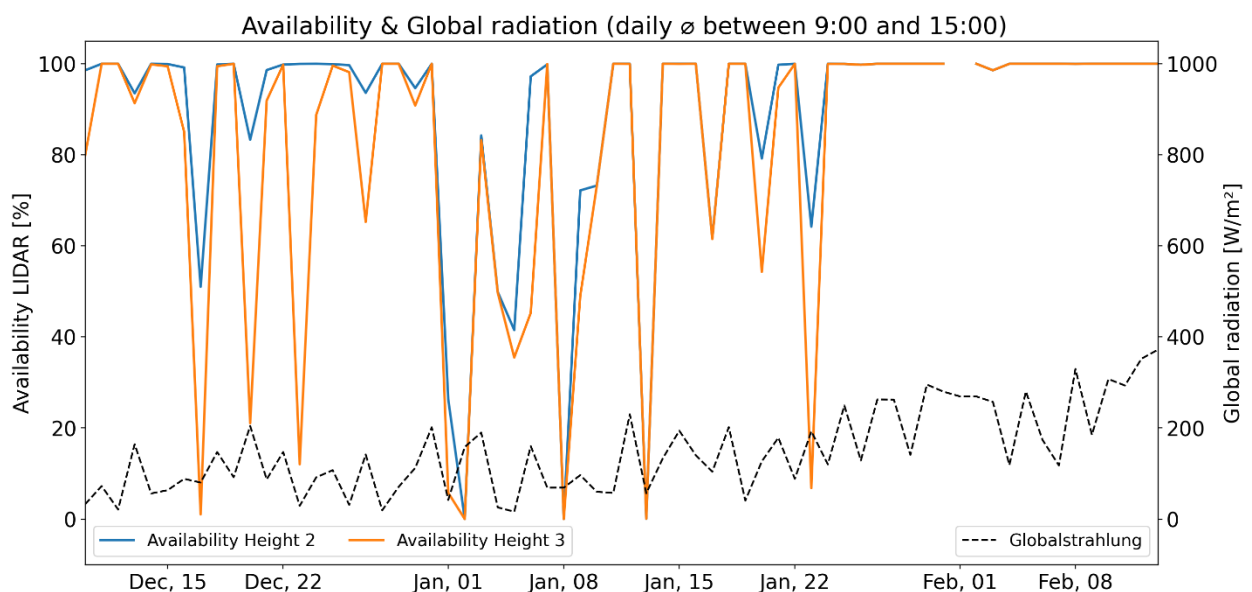


Abb. 8: Gegenüberstellung von LIDAR-Verfügbarkeit und Globalstrahlung im Zeitverlauf für einen Flachlandstandort.

Ein deutlich anderes Muster kann man in Abb. 9 erkennen, in der Messzeitraum im Sommer darstellt ist. Hier stehen stark wechselnde Strahlungsbedingungen in den Sommermonaten einer überwiegend konstant hohen Verfügbarkeit gegenüber. Die an zwei Tagen insbesondere auf Messhöhe *Höhe 3* niedrigeren Verfügbarkeitswerte sind vermutlich auf Schlechtwetterereignisse mit Niederschlag zurückzuführen. In einzelnen Ereignissen bestätigt sich somit die postulierte Korrelation aus geringer Globalstrahlung – also schlechtem Wetter mit Nebel und Niederschlag – mit einer geringen Verfügbarkeit. Diese Korrelation bleibt jedoch auf vereinzelte Ereignisse beschränkt und auf einen längeren Betrachtungszeitraum gesehen ist die Globalstrahlung kein tauglicher Indikator für die LiDAR-Verfügbarkeit. Eine formale statistische Prüfung bestätigt diese Schlussfolgerung ($\rho = 0.01$, $p \approx 0.0$).

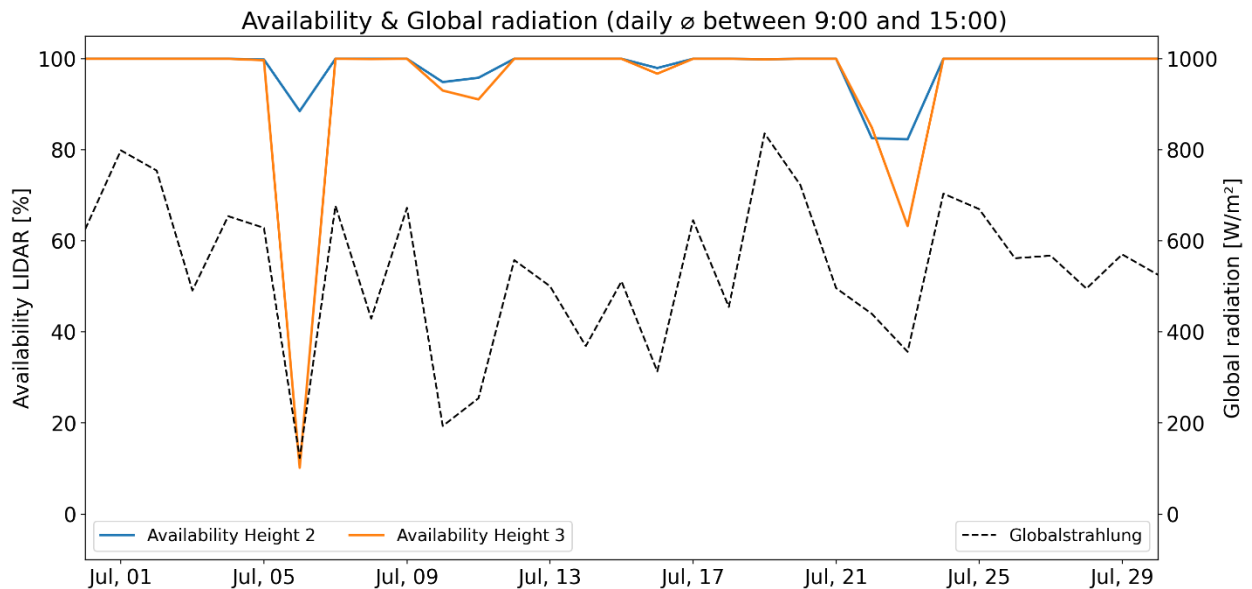


Abb. 9: Gegenüberstellung von LiDAR-Verfügbarkeit und Globalstrahlung im Zeitverlauf für einen Bergstandort.

4.6 Einflussfaktor Lufttemperatur

Von allen betrachteten möglichen Einflussgrößen, zeigten sich für die Lufttemperatur an Bergstandorten in den statistischen Tests die größte Korrelation mit der Verfügbarkeit der LiDAR-Messung (*Höhe 2*: $\rho = 0.35$; *Höhe 3*: $\rho = 0.42$). Im Flachland ist die Korrelation in Messhöhe *Höhe 2* hingegen ähnlich niedrig wie für die anderen besprochenen Einflussfaktoren ($\rho = 0.03$, $\rho \approx 0.0$). Dennoch ist die Temperatur hier vermutlich nur ein indirektes Maß für die jahreszeitlich unterschiedliche atmosphärische Stabilität. Diese Korrelation wäre dann nur eine andere Betrachtungsweise des bereits in Abschnitt 4.1 festgestellten jahreszeitlichen Unterschieds in der Verfügbarkeit, umgelegt auf die sich verändernden Durchschnittstemperaturen im Jahresverlauf. Andernfalls müssten auch bei kurzfristigen größeren Temperaturschwankungen deutliche Abnahmen in der Verfügbarkeit erkennbar sein und nicht nur im langfristigen Jahreszeitverlauf. Verdeutlicht wird dies beim Vergleich von Abb. 10 und Abb. 11. Einerseits zeigt sich zwar eine gemeinsame Abnahme von Verfügbarkeit und Temperatur über die Wintermonate (Abb. 10), andererseits, dass niedrige Temperaturen alleine noch keine geringe Verfügbarkeiten verursachen, da auch bei Temperaturen unterhalb von 0°C teilweise gute Verfügbarkeiten von über 70% erzielt werden können (Abb. 11).

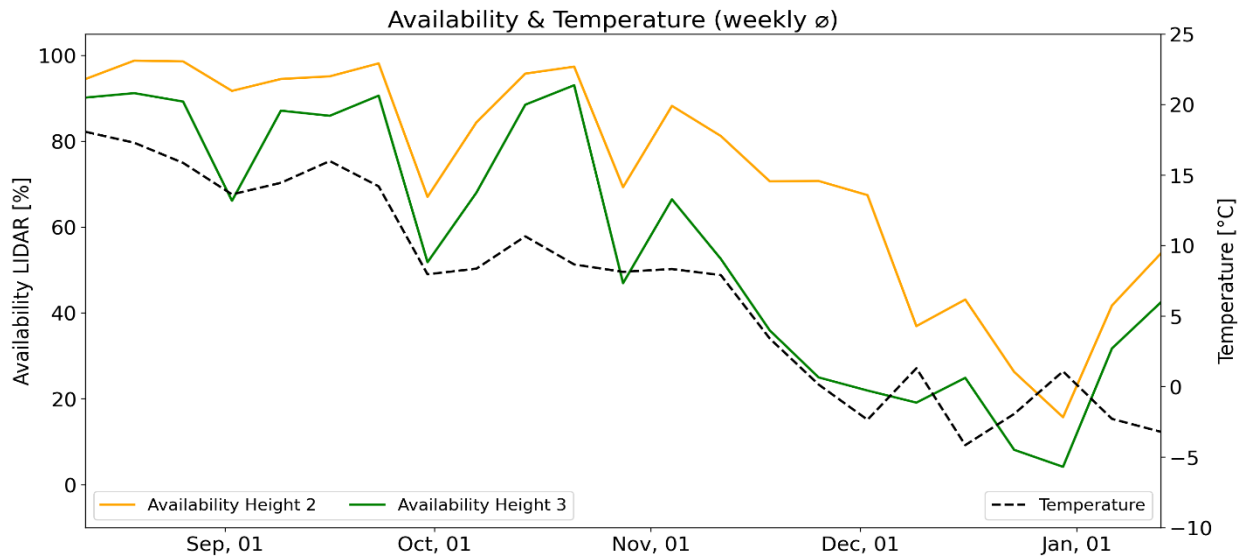


Abb. 10: Beispiel für den Verlauf von Verfügbarkeit und Temperatur an einem Bergstandort.

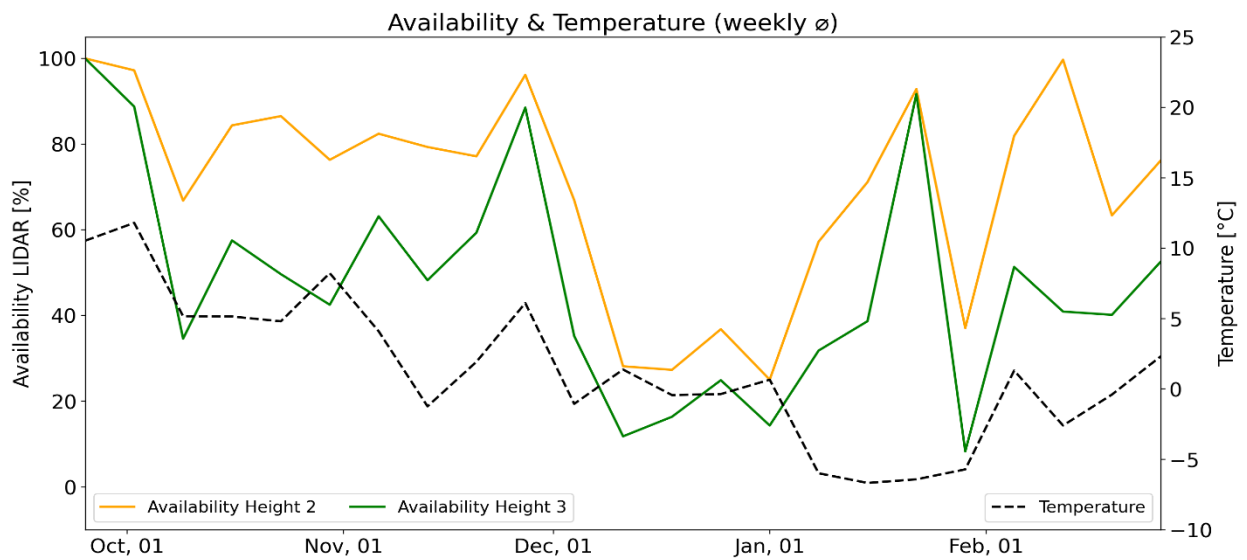


Abb. 11: Beispiel für den Verlauf von Verfügbarkeit und Temperatur an einem Bergstandort.

4.7 Niederschlag und LiDAR-Wischerfrequenz

Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, sind LiDAR-Geräte mit Scheibenwischern ausgerüstet, um das Gehäusefenster für das Aussenden und Detektieren des Laserstrahls auch bei Regen und Schnee durchgehend frei und sauber zu halten. Bei Niederschlag wird dieser Scheibenwischer durch einen Algorithmus aktiviert. Die aufgezeichnete Wischerfrequenz ist somit ein möglicher Indikator für Niederschlagsereignisse.

Als Signal für die Aktivierung des Scheibenwischers wird eine geringe Verfügbarkeit der LiDAR-Messung genutzt. Der Scheibenwischer wird, also zumindest kurzfristig, auch dann aktiviert, wenn andere Ursachen als Niederschlag (z.B. „clean air“) eine geringe Verfügbarkeit verursachen.

Für die Untersuchung der Tauglichkeit der Wischerfrequenz als Indikator für Niederschlagsereignisse, wurden daher, zusätzlich zur Betrachtung des Niederschlages im obigen Abschnitt 4.3, in Abb. 12 der Zusammenhang von Niederschlag und Wischerfrequenz anhand zweier Beispiele dargestellt. Diese Abbildungen lassen keinen systematischen Zusammenhang erkennen. So kommt es zwar bei Niederschlagsereignissen des Öfteren zu Wischvorgängen, solche ereignen sich jedoch auch sehr oft ohne jeden Niederschlag. Insgesamt ist also Niederschlag nur eine von mehreren Ursachen von Wischeraktivität. Die Wischerfrequenz ist demnach kein geeigneter Indikator für das Auftreten von Niederschlag.

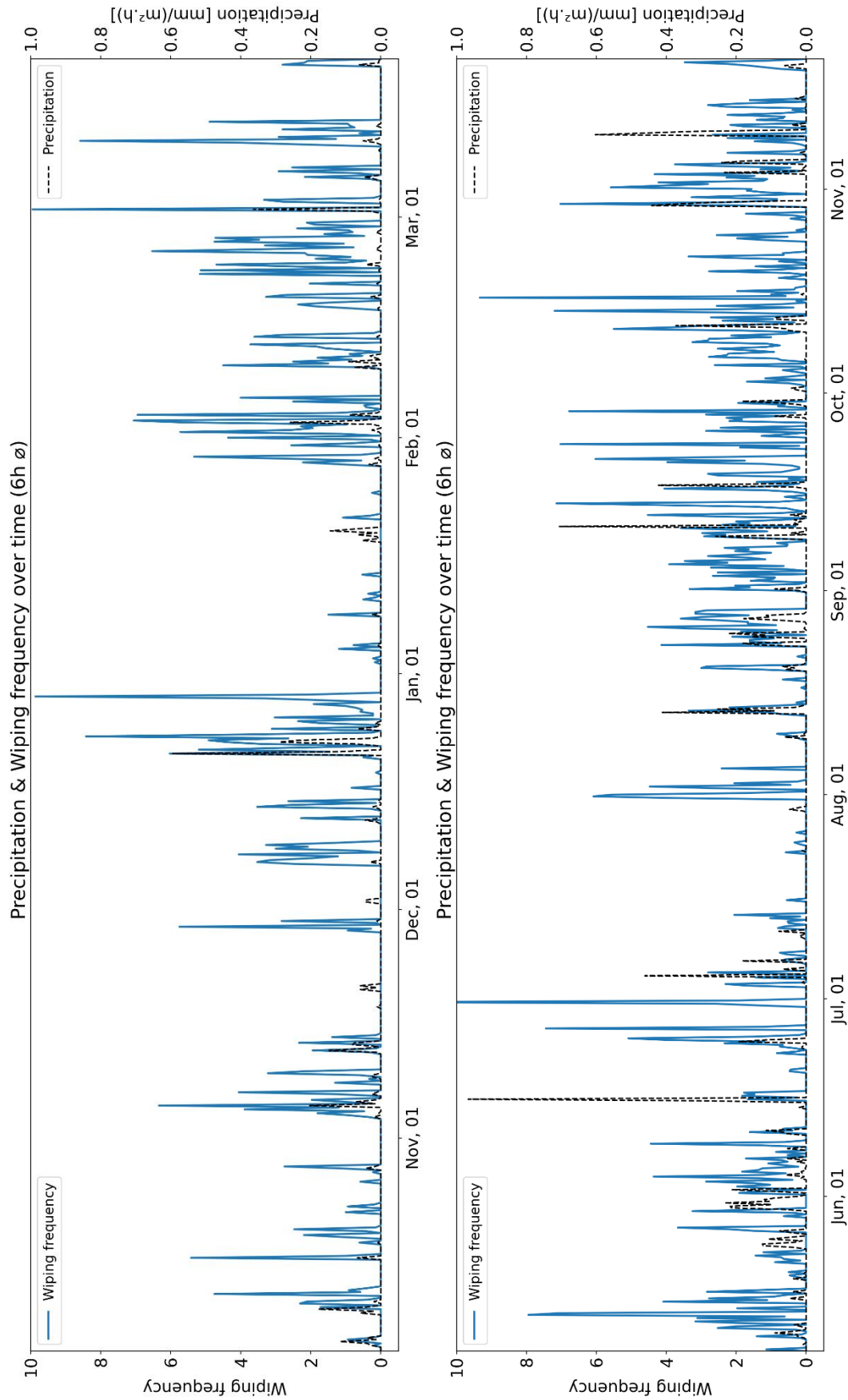


Abb. 12: Zwei Beispiele für den zeitlichen Verlauf von Niederschlagsintensität und LiDAR-Wischfrequenz an Bergstandorten.

5. Zusammenfassung und Diskussion

Zielsetzung in der gegenständlichen Auswertung waren eine qualitative Bewertung und ein besseres Verständnis der erfahrungsgemäß niedrigen LiDAR-Verfügbarkeiten an Bergstandorten, insbesondere in den Wintermonaten. Die Datenauswertung der LiDAR-Messungen an Standorten im Alpenen Raum brachte tatsächlich eine starke jahreszeitabhängige Variabilität der LiDAR-Datenverfügbarkeit zu Tage. An Standorten im flachen Gelände konnte nur eine sehr geringe jahreszeitliche Abhängigkeit festgestellt werden.

In dem Versuch die beobachteten geringen LiDAR-Verfügbarkeiten den mutmaßlichen Ursachen, namentlich Nebel/Niederschlag und zu wenig Aerosole ("clean air"), zuzuordnen, wurden eine Reihe von meteorologischen und technischen Größen untersucht. In den betrachteten Größen (Niederschlag, Vorhandensein einer Schneedecke, Luftfeuchtigkeit, solare Strahlungsintensität und Lufttemperatur) konnten jedoch in dieser Hinsicht keine klaren Zusammenhänge gefunden werden.

Ungeachtet dieser ungeklärten Details kann man in einer Gesamtbetrachtung folgende Feststellungen treffen:

- Regen, allgemein Niederschlag, und Nebel tragen unbestritten zu einer geringen Verfügbarkeit bei. In einzelnen Ereignissen ist das auch klar in den Datensätzen nachvollziehbar.
- Niederschläge treten sowohl an Flachland- als auch an Bergstandorten über das ganze Jahr verteilt auf. Die größten Niederschlagsmengen fallen in Österreich in den Sommermonaten an. Abgesehen von spezifischen geographischen Gegebenheiten (bspw. Staulagen), sind keine großen systematischen Unterschiede in der Niederschlagshäufigkeit zwischen Berg- und Flachlandstandorte zu erwarten. Nebellagen sind hingegen vor allem in den kälteren Jahreszeiten zu erwarten. Inversions-Wetterlagen, als eine häufige Ursache für Bodennebel, können dabei nur Standorte im Flachland betreffen.
- Sowohl Niederschlag als auch Nebel können daher nicht die Ursache für die eklatanten Unterschiede in der Verfügbarkeit zwischen Berg- und Flachlandstandorten sein (siehe Tab. 2).
- An Bergstandorten in den Wintermonaten liegt die Verfügbarkeit im Durchschnitt in keiner Höhe über 50% (siehe Tab. 2). Nebel oder Niederschlag kommen als Ursache für eine Nicht-Verfügbarkeit über so lange Zeiträume nicht in Frage.
- Gemäß dem Ausschlussprinzip kann somit nur ein Mangel an Aerosolen die Ursache für die systematisch geringe LiDAR-Verfügbarkeiten an Berg-Standorten sein.

Diese Erklärung für die geringen LiDAR-Verfügbarkeiten ist aus meteorologischer Sicht sehr plausibel: Die allermeisten Aerosolquellen (Landwirtschaft, Bodenerosion, Verkehr, Industrie, Hausbrand, Seesalz) befinden sich in Bodennähe. Mischungsprozesse durch vertikalen Luftaustausch transportieren dann Aerosole in größere Höhen. Das Höhenprofil der Aerosolkonzentration ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen den vertikalen Mischungsprozessen und dem Absinken der Aerosole.

In den beobachteten LiDAR-Verfügbarkeiten spiegelt sich dieses Höhenprofil der Aerosolkonzentration durch eine systematisch geringere Verfügbarkeiten an Bergstandorten wieder. Eine in größerer Höhe gegen einen Berg anströmende Luftmasse bringt von Haus aus weniger Aerosole mit als eine bodennahe Grenzschichtströmung. Gerade in einer Grenzschicht, also dem Höhengradienten der Windgeschwindigkeit in Bodennähe, wird durch die Luftscherung Turbulenz erzeugt, die eine effiziente vertikale Durchmischung bewirkt.

Die jahreszeitlichen Unterschiede in der LiDAR-Verfügbarkeit an Bergstandorten ergeben sich zwanglos aus der stabileren atmosphärischen Schichtung im Winter. Im Sommer sorgt die Sonneneinstrahlung für eine starke Erwärmung des Bodens und damit der bodennahen Schichten. Die bei überadiabatischen Temperaturgradienten einsetzende Konvektion („Thermik“) sorgt dann für eine effiziente vertikale Mischung bis in große Höhen. Im Winter hingegen entfällt dieser Mechanismus. Die Strahlungsbilanz ist überwiegend negativ, d.h. der Boden verliert mehr Energie durch Abstrahlung als von der Sonne eingestrahlt wird. Das bedingt einen geringen (oder bei Inversionslagen sogar negativen) Temperaturgradienten und eine stabile atmosphärische Schichtung.

Das an Flachlandstandorten die Verfügbarkeit auch im Winter auf einem hohen Niveau bleibt, lässt sich dadurch erklären, dass in der bodennahen Grenzschicht, wie oben beschrieben, die Windscherung laufend Turbulenz induziert, die, unabhängig von thermischer Instabilität, eine gute vertikale Durchmischung gewährleistet.

6. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1:	Messprinzip einer LiDAR-Messung.....	4
Abb. 2:	Verfügbarkeit von LiDAR-Messungen im jahreszeitlichen Verlauf für Bergstandorte (links) und Flachlandstandorte (rechts) in den Messhöhen <i>Höhe 2</i> (oben) und <i>Höhe 3</i> (unten).	10
Abb. 3:	Beispiel für den Verlauf der wöchentlich durchschnittliche LiDAR-Datenverfügbarkeit und des Vorhandenseins einer Schneedecke an einem Alpinen Standort.	11
Abb. 4:	Beispiel für den Verlauf der wöchentlich durchschnittliche LiDAR-Datenverfügbarkeit und des Vorhandenseins einer Schneedecke an einem Alpinen Standort.	12
Abb. 5:	LIDAR-Verfügbarkeit in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität in Flachlandstandorten (links) und Bergstandorten (rechts).	13
Abb. 6:	Beispiel für den Verlauf von LiDAR-Verfügbarkeit und Luftfeuchtigkeit an einem Flachlandstandort. ...	14
Abb. 7:	Beispiel für den Verlauf von LiDAR-Verfügbarkeit und Luftfeuchtigkeit an einem Bergstandort.	14
Abb. 8:	Gegenüberstellung von LIDAR-Verfügbarkeit und Globalstrahlung im Zeitverlauf für einen Flachlandstandort.	15
Abb. 9:	Gegenüberstellung von LiDAR-Verfügbarkeit und Globalstrahlung im Zeitverlauf für einen Bergstandort.	16
Abb. 10:	Beispiel für den Verlauf von Verfügbarkeit und Temperatur an einem Bergstandort.	17
Abb. 11:	Beispiel für den Verlauf von Verfügbarkeit und Temperatur an einem Bergstandort.	17
Abb. 12:	Zwei Beispiele für den zeitlichen Verlauf von Niederschlagsintensität und LiDAR-Wischfrequenz an Bergstandorten.	19
Tab. 1:	Ausgewählte LiDAR-Messungen an österreichischen Flachland- und Bergstandorten.	6
Tab. 2:	Mittlere LiDAR-Verfügbarkeit an Flachland- und Bergstandorten.	9