Manuel **Borovsky**

Beurteilung der geländeklimatisch bedingten Temperaturverhältnisse unter besonderer Berücksichtigung der Kaltluftgefährdung im WegenerNet-Gebiet (Raum Feldbach)

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

am

Institut für Geographie und Raumforschung

der

Karl-Franzens-Universität Graz

Betreuer

Ao. Univ.-Prof. Dr. Reinhold LAZAR

Graz, August 2017

A1 Vorwort und Danksagung

Als ich im Jahr 2001 das Studium der Geographie und Raumforschung an der Karl-Franzens-Universität Graz begann, so geschah dies vorwiegend aus Interesse an der Materie. Finanzielle Überlegungen oder berufliche Sicherheit spielten keine Rolle, was man im Nachhinein als naiv oder idealistisch bezeichnen könnte. Nach Abschluss meiner Diplomarbeit im Jahr 2009 stand ich dann praktisch mit leeren Händen da und hätte mich wohl auf alternative Tätigkeitsfelder verlegen müssen, wäre da nicht schon Univ.-Prof. Reinhold Lazar auf mich aufmerksam geworden.

Dieser war jedoch nicht der erste, der meine Fähigkeiten im Bereich Geographie erkannte und förderte. Bereits in jungen Jahren war es mein Vater **Volker Borovsky**, der mir seine eigene Begeisterung für Flora und Fauna zu vermitteln versuchte. Dies war zunächst von wenig Erfolg gekrönt, und ich kann auch heute noch keine Eiche von einer Buche unterscheiden - aber die Landschaften und das Wetter haben mich zunehmend fasziniert. Darüber hinaus hat mein Vater als Korrekturleser dieser Arbeit sein Durchhaltevermögen bewiesen und über die Maßen gute Arbeit geleistet.

Auch meine Mutter **Sieglinde Bürger** hat einen wichtigen Anteil daran, dass diese Arbeit nun vollendet werden konnte. Sie war und ist für mich immer eine wichtige Stütze und eine Quelle positiver Energie. Ihre Stärke und die Bereitschaft, trotz aller Schwierigkeiten alles für uns Kinder (sowie auch ihre Arbeit) zu geben, macht sie zu einem großen Vorbild. Sie hätte mit Sicherheit einen noch größeren Teil beigetragen, wenn sie mich nicht selbst dazu erzogen hätte, selbständig und autark zu arbeiten.

Mein fachlicher Dank gilt in erster Linie meinem Mentor, Freund und Doktorvater **Reinhold Lazar**, der eine entscheidende Rolle bei meiner beruflichen Entwicklung spielte. Nach dem Besuch seiner Vorlesungen, von denen mir ewig die einzigartigen und sehr persönlichen Tafelbilder in Erinnerung bleiben werden, sowie der Teilnahme an Exkursionen, wurde der Kontakt auf privater und beruflicher Ebene intensiviert. Er erkannte mein Potenzial und förderte es stetig, indem er mir zunächst kleinere Aufträge und später eine Anstellung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie verschaffte.

Er war es auch, der mir vom Projekt „WegenerNet“ des *Wegener Centers für Klima und Globalen Wandel* im Raum Feldbach erzählte. Sofort war mein Interesse an diesem einzigartigen Messnetzwerk geweckt, und das Thema dieser Dissertation schnell gefunden. Durch zahlreiche Gespräche mit ihm wurden nicht nur fachliche Verbesserungen erarbeitet

und Lösungen für diverse Probleme gefunden, sondern auch immer wieder neue und spannende Fragestellungen aufgeworfen.

Mein Zweitbetreuer **Wolfgang Sulzer** füllte diese Funktion nicht von Anfang an aus, sondern kam erst später ins Team. Dennoch lieferte er einen äußerst wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit und ich bin froh, einen so sympathischen und kompetenten Menschen als Unterstützung gehabt zu haben.

In dieser Aufzählung darf **Herwig Wakonigg** nicht fehlen, der auf dem Gebiet der physischen Geographie zu den absoluten Koryphäen zählt. Er hatte mit meiner Dissertation direkt zwar nichts zu tun, aber seine herausragende analytische und kritische Denkweise hat mich in vielerlei Hinsicht beeinflusst und zu einem besseren Wissenschaftler gemacht.

Darüber hinaus gibt es noch viele Menschen, die mir zur Seite standen:

Meine Ansprechpartner beim Wegener Center waren **Thomas Kabas** und **Jürgen Fuchsberger**, die immer ein offenes Ohr für mich hatten. Bei der ZAMG war **Axl Podesser**, den ich sowohl fachlich als auch privat sehr schätze, ein wichtiger Kontakt.

Marianne Schwaiger, **Maria Müller**, **Sabine Schwarzl, Yvonne Rieger** und **Bettina Gamerith** vom Sekretariat des Instituts für Geographie waren stets hilfsbereit und über alle Maßen freundlich.

Simone Giesen und **Martin Kreinz** von der Fachbibliothek Geographie waren oft eine große Hilfe.

Markus Duschek hat für meine Dissertation zwar nur einen kleinen Beitrag geleistet, darf an dieser Stelle aber nicht unerwähnt bleiben. Der Workaholic aus Waidhofen an der Ybbs arbeitete ebenfalls für Reinhold Lazar, und wir verstanden uns sofort sowohl auf beruflicher, als auch privater Ebene. Im Jahr 2017 gründeten wir dann unser gemeinsames Ingenieurbüro für Geographie, die *Borovsky & Duschek GmbH*.

Der wichtigste Mensch der vergangenen fünf Jahre ist meine Freundin **Gloria Gugganig**, die mein Leben auf unerwartete Weise um so vieles bereichert hat und die ich über alles liebe. Ihre Unterstützung, Motivation und gelegentlich auch mal ein Tritt in den Hintern haben dazu beigetragen, dass diese Arbeit in der nun vorliegenden Version existiert.

A2 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Datenanalyse und -auswertung des Stationsnetzwerks WegenerNet, welches im Auftrag des Wegener Centers für Klima und Globalen Wandel im Raum Feldbach in der Südost-Steiermark (Österreich) mit 01.01.2007 in Betrieb ging. Durch die Besonderheit des vergleichsweise dichten und langfristig aufzeichnenden Messnetzes WegenerNet, welches 151 Stationen in einem Gebiet von 20x15 km Fläche umfasst, konnten neue bzw. detailliertere Erkenntnisse vor allem bezüglich geländeklimatischer Parameter wie Hanglage und Exposition erwartet werden.

Das Forschungsgebiet der Geländeklimatologie ist in der Literatur durch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten und Studien behandelt worden, wobei BENDIX (2004) sowie KUTTLER (2009) als aktuelle Standardliteratur hervorzuheben sind. In der Steiermark hat das Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz seit Jahrzehnten eine Vorreiterrolle in dieser Disziplin inne, wie beispielweise die Arbeiten und Forschungen von WAKONIGG (1978), LIEB (1991) und LAZAR (1997 sowie 2013) beweisen.

In dieser Dissertation hat der Parameter Lufttemperatur die aussagekräftigsten Ergebnisse geliefert. Dieser wird an allen Stationen im Untersuchungsgebiet erhoben (im Vergleich dazu werden die Windparameter nur an 12 Stationen gemessen), und die Werte reagieren auch bereits auf geringe geländeklimatische Unterschiede (während die Reliefenergie der Riedel zu gering für eine mögliche Einflussnahme auf die Niederschlagsverhältnisse ist).

Durch die Analysen konnte gezeigt werden, dass die Hanglagen der Riedel bis zu den Kuppen in der Nacht thermisch gegenüber den Tallagen deutlich bevorzugt sind, was vor allem am Kaltluftabfluss und der Kaltluftansammlung in den Tälern liegt. Im Winter ist dieser Effekt durch Inversionen und Bodennebel noch verstärkt. Im Sommer sind die Hanglagen gegenüber den aufgeheizten Tallagen tagsüber gemäßigt temperiert. Die Exposition konnte hinsichtlich der Temperaturverhältnisse als wichtigster geländeklimatischer Parameter bestimmt werden, welche bei sonst gleichartigen Bedingungen vor allem im Winter tagsüber große Unterschiede von durchschnittlich bis zu 1 Kelvin bewirken kann.

Ein wichtiges Ergebnis ist auch die Klimatopkarte des Untersuchungsgebietes, welche vorrangig auf den Messergebnissen und Analysen dieser Arbeit beruhend erstellt wurde. Vor allem bei den Hanglagen können deutliche Unterschiede zu bereits existierenden Darstellungen wie dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) festgestellt werden, die in erster Linie an der stärkeren Einbeziehung der Exposition bei der Zonierung festzumachen sind.

Abschließend wird das Thema Klimawandel behandelt, indem Trends und Tendenzen für die Verhältnisse dieser Region in naher Zukunft (auch unter Einbeziehung der Ergebnisse dieser Arbeit) analysiert und interpretiert werden.

A3 Abstract

Title: *"Evaluation of Topographic Determined Temperature Conditions in the WegenerNet Region (Feldbach/Styria) with Particular Regard to Cold-Air Hazard"*

This dissertation deals with data evaluation and analysis of WegenerNet, a network consisting of 151 stations in the area of Feldbach in South-East Styria (Austria). It entered service on January the first, 2007 as a part of the Wegener Center for Climate and Global Change. This is an interdisciplinary, internationally oriented institute belonging to the University of Graz. The WegenerNet station network is unique as it consists of a large number of long-term recording stations over an area of only 20x15 km. As a result, new (or at least more detailed) findings were to be expected; especially findings of a topographic and climatic nature.

Topoclimatology is an established field with BENDIX (2004) and KUTTLER (2009) being two of the more recent standard points of reference in the literature. For decades now, The Department of Geography and Regional Science of the University of Graz has been playing a leading role in this area, as shown by the examples of WAKONIGG (1978), LIEB (1991) and LAZAR (1997; 2013).

Here, the most significant results are emergent from the analysis of air temperature. This is measured at all 151 stations, in contrast to wind which is only measured at 12. Air temperature reacts to even minor topographic differences, whereas the relief energy is far too low to influence precipitation.

The analysis has shown that sloping terrain up to the crests is thermally favoured over valley locations. This is due to cold air drains and cold air accumulation in the valleys. In winter, this effect is more pronounced due to temperature inversions and ground fog. In summer, the valleys receive more heat than the sloping terrain. Thermally, slope exposure could be determined as the most significant parameter as it can lead to differences of at least 1 Kelvin under similar conditions.

The climatope map is another important result, as it is mainly based on the results and analysis of this dissertation. Significant differences to existing graphical representations, such as the Digital Atlas of Styria (Land Steiermark 2013), were easily determined, especially with regard to sloping terrain. This was mainly due to the involvement of the results of this dissertation as with regard to slope exposure.

Finally, the topic of climate change is being dealt with by analysing trends and tendencies in this region for the near future, incorporating the results of this study.

Inhaltsverzeichnis

A1 Vorwort und Danksagung i

A2 Zusammenfassung iii

A3 Abstract v

A4 Abbildungsverzeichnis xi

A5 Tabellenverzeichnis xvii

1. Einleitung 1

2. Theoretische Grundlagen, wissenschaftliche Relevanz und Forschungsaspekte 3

2.1 Geländeklimatologie 3

2.2 Kaltluft 10

2.3 Wissenschaftliche Relevanz dieser Arbeit 26

2.4 Forschungsaspekte 28

3. Klimatische und naturräumliche Grundlagen des Untersuchungsgebietes im Südoststeirischen Riedelland 29

3.1 Naturräumliche Gliederung 29

3.2 Geomorphologische Beschreibung 33

3.3 Bodenverhältnisse 35

3.4 Klimatische Verhältnisse 37

4. Das Messnetz WegenerNet 67

4.1 Messnetzstruktur 67

4.2 Stationstypen 70

4.3 Eingesetzte Messgeräte 72

4.4 Datenqualität 73

5. Forschungsfragen und methodische Grundlagen 77

5.1 Forschungsfragen und -methoden 77

5.2 Auswahl der relevanten WegenerNet-Stationen 78

5.3 Auswahl der Tage mit autochthoner Witterung 85

5.4 Relevante externe Datenquellen 101

5.5 Statistische Methoden 102

6. Lufttemperatur 105

6.1 Mittelwerte, Minima und Maxima 105

6.2 Aperiodische Tages- und Jahresschwankung 114

6.3 Durchschnittliche Tages- und Jahresgänge ausgewählter Stationen 115

6.4 Kennwerte zur Vegetationsperiode an ausgewählten Stationen 118
6.5 Temperaturabhängige Kenntage 119
6.6 Hitzewellen 123
6.7 Autochthone Witterung 125
6.8 Geländeklimatische Parameter 141
6.9 Geländeklimatische Parameter nach Nivellierung der Seehöhe 162
6.10 Inversionen 175
6.11 Ausbreitungsklassen 178
6.12 Vertikaler Temperaturgradient 181
7. Niederschlag 185
7.1 Monats- und Jahresniederschläge 185
7.2 Tages- und Jahresgänge 188
7.3 Niederschlagsintensität 190
7.4 Niederschläge und Trockenperioden in der Vegetationsperiode 193
7.5 Auswertung der Niederschläge nach geländeklimatischen Parametern 196
8. Wind 201
8.1 Allgemeine Charakteristik 201
8.2 Tages- und Jahresgang 206
8.3 Starkwinde 210
8.4 Verhältnisse bei autochthoner Witterung 211
9. Strahlungsbilanz und Luftdruck 215
9.1 Strahlungsbilanz 215
9.2 Luftdruck 217
10. Vergleich der Ergebnisse mit zusätzlichen Stationen im bzw. nahe des Untersuchungsgebietes 221
10.1 Feldbach und Bad Gleichenberg (ZAMG) 221
10.2 Stradner Kogel und Kapfensteiner Kogel 223
10.3 Klöch 233
11. Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit dem Digitalen Atlas der Steiermark 237
11.1 Lufttemperatur 237
11.2 Windgeschwindigkeit 248
12. Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets 251
12.1 Grundlagen 251
12.2 Methodik 253

12.3 Klimatopkarte und Zonenbeschreibung 256
12.4 Beispiel Bad Gleichenberg 263
12.5 Vergleich mit der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark 264
12.6 Analyse der Ergebnisse und Zusammenfassung 271
13. Erstellung einer Karte des potenziellen Weinbaugebiets 273
13.1 Grundlagen und Methodik 273
13.2 Die Karte potentieller Weinbauflächen 276
14. Faktor Klimawandel 281
14.1 Prognosen für die Periode von 2021 - 2050 281
14.2 Vergleich des Untersuchungszeitraums 2007 – 2011 mit der Klimanormalperiode 1971 – 2000 287
14.3 Auswirkungen und Strategien für Land- und Forstwirtschaft 291
15. Diskussion und Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse dieser Arbeit 295
15.1 Diskussion relevanter Untersuchungsergebnisse 295
15.2 Beantwortung der gestellten Forschungsfragen 301
15.3 Verbesserungsvorschläge für Zoneneinteilungen in Klimatopkarten 305
15.4 Evaluierung der Anwendungsmöglichkeit der Ergebnisse 307
16. Schlussfolgerungen 309
17. Literatur 313

A4 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Skaleneinteilung der Klimageographie und Meteorologie 5
Abb. 2: Skalenvarianz von Kaltluftseen 6
Abb. 3: Typische Windsituation in einem Mittelgebirgstal (Rheintal bei Bonn) 7
Abb. 4: Überlagerung thermischer Windsysteme in einem N-S orientierten Tal 8
Abb. 5: Tageszeitliche Temperaturdynamik in Tälern 13
Abb. 6: Kaltluftabfluss und –umlenkung 14
Abb. 7: Sommer- und Wintermittel der extraterrestrischen Hangbestrahlung 16
Abb. 8: Schematische Darstellung eines Kaltluftsees in einem Tal 18
Abb. 9: Idealisiertes System der Berg-Talwinde bzw. Hangwinde 21
Abb. 10: Ausschnitt aus der ÖK250 30
Abb. 11: Naturräumliche Gliederung der Steiermark 31
Abb. 12: Topographische Karte des WegenerNet-Gebietes 33
Abb. 13: Geomorphologische Karte für das Gebiet des WegenerNet 34
Abb. 14: Geländeneigung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet 35
Abb. 15: Bodentypen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet 36
Abb. 16: Die Klimalandschaften im Untersuchungsgebiet des WegenerNet 39
Abb. 17: Durchschnittliche relative Sonnenscheindauer 42
Abb. 18: Durchschnittliche Lufttemperatur in [°C] im Untersuchungsgebiet im Jänner 44
Abb. 19: Durchschnittliche Lufttemperatur in [°C] im Untersuchungsgebiet im Juli 45
Abb. 20: Durchschnittliche Jahresschwankung der Lufttemperatur 46
Abb. 21: Durchschnittliche aperiodische Tagesschwankung der Lufttemperatur 47
Abb. 22: Bioklimakarten der Südost-Steiermark 49
Abb. 23: Durchschnittliche (windkorrigierte) Niederschlagssumme im Jahr 53
Abb. 24: Durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke 54
Abb. 25: Die Verteilung der Windrichtung im Jahresmittel 56
Abb. 26: Die Verteilung der Windrichtung bei Tagen mit autochthoner Witterung 58
Abb. 27: Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit 60
Abb. 28: Kaltlufthöhen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet nach 1 Stunde 62
Abb. 29: Kaltlufthöhen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet nach 8 Stunden 63
Abb. 30: Windrichtungsverteilung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet 64
Abb. 31: Windgeschwindigkeitsverteilung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet 65
Abb. 32: Stationsraster des WegenerNet 68
Abb. 33: Stationsraster des WegenerNet mit den Standorten der errichteten Stationen 69
Abb. 34: Verteilung der WegenerNet-Stationen nach Seehöhe und Lageklasse 70
Abb. 35: Die 151 WegenerNet-Klimastationen sowie die zwei ZAMG-Messstellen 72
Abb. 36: Verortung der Stationen mittels Koordinateneingabe 80
Abb. 37: Stationsnetz WegenerNet mit den verwendeten Stationen 85
Abb. 38: Kurve der Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes 91
Abb. 39: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes 92
Abb. 40: Darstellung des Geopotentials der 500 hPa Druckfläche von Europa am 22.09.10 . 93
Abb. 41: Kurve der Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Gebietes 94
Abb. 42: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes 95

Abb. 43: Darstellung des Geopotentials der 500 hPa Druckfläche von Europa am 12.10.08 . 96
Abb. 44: Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanz und Albedo 98
Abb. 45: Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanz 98
Abb. 46: Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Gebietes..... 100
Abb. 47: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes 101
Abb. 48: Die mittleren täglichen Minima und Maxima im Jahresdurchschnitt 112
Abb. 49: Die durchschnittliche aperiodische Tagesschwankung und Jahresschwankung..... 115
Abb. 50: Die mittleren Jahresgänge der Stationen 007, 097, 109 und 122 116
Abb. 51: Die mittleren Tagesgänge (UTC) der Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 .. 117
Abb. 52: Die durchschnittliche Anzahl der Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentage 122
Abb. 53: Die mittleren Tagesgänge bei autochthoner Witterung an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122..... 127
Abb. 54: Die mittleren Tagesgänge bei autochthoner Witterung im Jänner an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 128
Abb. 55: Die mittleren Tagesgänge bei autochthoner Witterung im Juli an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122..... 129
Abb. 56: Die mittleren Tagesgänge an den Stationen 082, 109 und 122 im Vergleich von Tagen mit autochthoner Witterung mit dem Gesamtjahr..... 130
Abb. 57: Die mittleren täglichen Minima und Maxima sowie die mittleren täglichen Temperaturen bei autochthoner Witterung..... 132
Abb. 58: Die mittlere aperiodische Tagesschwankung des gesamten Jahres sowie bei autochthoner Witterung der Lufttemperatur..... 133
Abb. 59: Durchschnittliche Jahresnormalwerte sowie mittlere Jänner- und Juliwerte der Temperatur bei autochthoner Witterung..... 136
Abb. 60: Die mittleren Tagesgänge bei autochthoner Witterung und Schneebedeckung.... 138
Abb. 61: Die Stationen 054 und 055 des Stationsnetzes WegenerNet 139
Abb. 62: Die Stationen 122 und 135 des Stationsnetzes WegenerNet 140
Abb. 63: Durchschnittliche Tagesgänge der Stationen 054, 055, 122 und 135 im Jänner bei autochthoner Witterung 141
Abb. 64: Durchschnittliche Tagesgänge der Temperatur im Mittel der ausgewählten Stationen des WegenerNet-Gebietes mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition 143
Abb. 65: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Jänner der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition..... 144
Abb. 66: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Juli der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition..... 145
Abb. 67: Jahresnormalwerte der ausgewählten Stationen in Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition 146
Abb. 68: Mittlere tägliche Maxima in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition 147
Abb. 69: Mittlere tägliche Minima in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition 148
Abb. 70: Mittlere tägliche Maxima in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition 149
Abb. 71: Mittlere Tagesgänge der Temperatur des Jahres der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang sowie Kammlage)..... 150

Abb. 72: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Jänner der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang sowie Kammlage)..... 151
Abb. 73: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Juli der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage)..... 152
Abb. 74: Jahresnormalwerte der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage)..... 153
Abb. 75: Mittlere tägliche Maxima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Sommer 154
Abb. 76: Mittlere tägliche Minima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Winter..... 155
Abb. 77: Mittlere tägliche Maxima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglagen (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Winter..... 156
Abb. 78: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Jahresdurchschnitt..... 157
Abb. 79: Mittlere Tagesgänge im Durchschnitt des Jänners..... 158
Abb. 80: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Juli 159
Abb. 81: Die mittleren täglichen Minima und Maxima sowie die mittleren täglichen Temperaturen in den Sommer- und Wintermonaten der Lufttemperatur..... 160
Abb. 82: Mittlere Tagesgänge der Temperatur im Jahresdurchschnitt der ausgewählten Stationen nach Tallage (Talausgang, Talmitte und Talschluss)..... 161
Abb. 83: Jahresmitteltemperaturen in unterschiedlichen Höhenbereichen im Vergleich mit den Werten derselben Stationen nach der Nivellierung der Temperaturen auf die Seehöhe der niedrigsten Station..... 164
Abb. 84: Jahresmitteltemperaturen der ausgewählten Stationen nach Expositionen gegliedert nach Nivellierung der Seehöhe..... 166
Abb. 85: Jahresmitteltemperaturen der ausgewählten Stationen nach Hanglagen gegliedert nach Nivellierung der Seehöhe..... 167
Abb. 86: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Sommermonaten..... 168
Abb. 87: Mittlere tägliche Minima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten..... 169
Abb. 88: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten..... 170
Abb. 89: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Sommermonaten 171
Abb. 90: Mittlere tägliche Minima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten..... 172
Abb. 91: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten..... 173
Abb. 92: Mittlerer Tagesgang der Inversionswahrscheinlichkeit in [%] als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 176
Abb. 93: Mittlerer Tagesgang der Inversionswahrscheinlichkeit im Jänner und Juli als Ergebnis des Temperaturvergleichs der Stationen 122 und 145..... 177

Abb. 94: Mittlerer Tagesgang der Ausbreitungsklassen an der WegenerNet-Station 077 ... 180
Abb. 95: Durchschnittliche Jahresnormalwerte sowie mittlere Jänner- und Juliwerte der Temperatur ... 184
Abb. 96: Die durchschnittlichen Tagesgänge des Niederschlags ausgewählter Stationen ... 189
Abb. 97: Durchschnittliche Jahresgänge ausgewählter Stationen ... 190
Abb. 98: Anzahl von Tagen mit Niederschlagswerten ≥1 mm bzw. ≥10 mm ... 191
Abb. 99: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte ... 197
Abb. 100: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte der untersuchten Stationen nach Hanglage gemittelt ... 198
Abb. 101: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte aller untersuchten Stationen nach Exposition gemittelt ... 199
Abb. 102: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte der untersuchten Stationen nach Tallage gemittelt ... 200
Abb. 103: Jahresmittel der Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten und Kalmenhäufigkeit für die 12 WegenerNet-Stationen mit Windparametern ... 203
Abb. 104: Die Windrichtungsverteilung im WegenerNet-Messnetz bei autochthoner Witterung mit Unterteilung in Tages- und Nachtzeitraum ... 212
Abb. 105: Die Windrichtungen der Station 077 im Jänner bei autochthoner Witterung während der Nachtstunden ... 213
Abb. 106: Die Lage der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes ... 214
Abb. 107: Die durchschnittliche Strahlungsbilanz an der Station 077 ... 216
Abb. 108: Die durchschnittlichen Tagesgänge der Strahlungsbilanz für Jänner und Juli der Station 077 ... 217
Abb. 109: Der durchschnittliche Luftdruck der Station 077 ... 218
Abb. 110: Die durchschnittlichen Tagesgänge des Luftdrucks für Jänner und Juli der Station 077 ... 219
Abb. 111: Die mittlere Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit der WegenerNet-Station 135 sowie der ZAMG-Station Bad Gleichenberg ... 223
Abb. 112: Die Jahresgänge der WegenerNet-Stationen 122 und 145 sowie der Station Stradner Kogel ... 225
Abb. 113: Die Tagesgänge der WegenerNet-Stationen 122 und 145 sowie der Station Stradner Kogel ... 226
Abb. 114: Die mittlere Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit der Station Stradner Kogel ... 230
Abb. 115: Die mittlere Temperatur an den Stationen Kapfensteiner Kogel sowie 139 ... 231
Abb. 116: Die mittleren Tagesgänge der Temperatur an den Stationen Kapfensteiner Kogel und 139 ... 232
Abb. 117: Die mittleren Tagesgänge der Temperatur an den Stationen 094, 097, und 133 des WegenerNet-Gebiets sowie Klöch ... 235
Abb. 118: Ausschnitt des Raums Feldbach aus der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark ... 238
Abb. 119: Legende zur Klimatopkarte aus dem Digitalen Atlas der Steiermark ... 238
Abb. 120: Windgeschwindigkeiten im Gebiet des WegenerNet-Stationsnetzes ... 248
Abb. 121: Mittlere tägliche Minima sämtlicher 151 Stationen des WegenerNet-Gebietes als Mittel des Monats April 2007 ... 253

Abb. 122: Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets in der Südost-Steiermark 261
Abb. 123: Unterschiedliche Darstellungen einer Klimatopkarte des Raums Bad Gleichenberg. Links aus LAZAR, mittig aus dem Digitalen Atlas der Steiermark, rechts aus dieser Arbeit 263
Abb. 124: Vergleich der Darstellung der Talregionen im Raum Feldbach in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark (links) und der Darstellung in dieser Arbeit 266
Abb. 125: Vergleich der Darstellung der Übergangsregionen und Sondergebiete in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark und der Darstellung in dieser Arbeit 267
Abb. 126: Vergleich der Darstellung der Hügelregionen im Raum Bad Gleichenberg in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark und der Darstellung in dieser Arbeit 269
Abb. 127: Mittlere Temperaturverhältnisse im WegenerNet-Gebiet als Abweichung vom Jahresmittelwert 270
Abb. 128: Karte der potenziellen Weinbaugebiete in der Region WegenerNet 277
Abb. 129: Das „Naturweingut Hutter“ bei Reiting 279
Abb. 130: Erwartete saisonale Temperaturänderung als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050 282
Abb. 131: Erwartete saisonale Änderung der Kühlgradtage als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050 283
Abb. 132: Erwartete saisonale Niederschlagsänderung als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050 284
Abb. 133: Niederschlagsentwicklung in Südost-Österreich seit 1800 sowie Prognosen für den Zeitraum bis 2100 285
Abb. 134: Erwartete saisonale Änderung der Tage mit starkem Niederschlag als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050 286
Abb. 135: Häufigkeit von Trockenperioden in den Regionen Nord und Süd, beobachtet und als Ergebnis der CHRM-Szenarien für die Periode von 2070-2100 287
Abb. 136: Jahresnormalwerte der Temperatur im Vergleich der WegenerNet-Station 145 und der ZAMG-Stationen Bad Gleichenberg sowie Feldbach 288
Abb. 137: Mittelwerte der Temperatur sowie mittlere tägliche Minima und Maxima im Vergleich der WegenerNet-Station 145 und der ZAMG-Station Bad Gleichenberg 289
Abb. 138: Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentage im Vergleich der WegenerNet-Station 145 und der ZAMG-Station Bad Gleichenberg 290
Abb. 139: Entwicklung der klimatischen Anbaueignung verschiedener Weinsorten 293
Abb. 140: Vorschläge für dem Untersuchungsgebiet in der Südost-Steiermark klimatisch ähnliche Regionen 308

A5 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Die wichtigsten Arbeitsgebiete und Fragestellungen der Geländeklimatologie 9
Tab. 2: Zeitlich aufeinanderfolgende Phasen der Kaltluftströmung mit Beschreibung..... 14
Tab. 3: Frostgefährdungsstufen 17
Tab. 4: Frostgefährdungsstufen nach der Reliefform. 17
Tab. 5: Faktoren der Kaltluftbildung 19
Tab. 6: Jahres- und Tagesgang der Relativen Feuchte an der Station Leibnitz..... 50
Tab. 7: Stationen des WegenerNet - Messnetzes mit den gemessenen Parametern 71
Tab. 8: Die Prüfschichten des Qualitätskontrollsystems (QCS) des Wegener Centers..... 74
Tab. 9: Erklärung der Qualitätsprüfungsmarken (QC-Marke)..... 75
Tab. 10: Die Seehöhenbereiche der einzelnen Hanglagen 81
Tab. 11: Die ausgewählten Stationen des WegenerNet-Messnetzes..... 83
Tab. 12: Statistik der Hanglage und Exposition der verwendeten Stationen. 84
Tab. 13: Mittlere tägliche Minima, Maxima und Mittelwerte der Lufttemperatur sowie die Seehöhe für die bearbeiteten Stationen des WegenerNet-Gebiets..... 109
Tab. 14: Mittlere absolute Minima (Winter) und Maxima (Sommer) sowie absolute Minima und Maxima sowie Seehöhen der ausgewählten Stationen des WegenerNet-Gebiets 113
Tab. 15: Durchschnittlicher Beginn, Dauer und Ende der Vegetationsperiode..... 118
Tab. 16: Lufttemperaturabhängige Kenntage sowie die Seehöhe ausgewählter Stationen des WegenerNet-Gebiets 121
Tab. 17: Beginn und Ende der Vegetationsperiode an der Station 007 122
Tab. 18: Grenzwerte für Schwüle als Kombination von Temperatur und rel. Luftfeuchte ... 124
Tab. 19: Parameter zu Hitzewellen an der Referenzstation 077 124
Tab. 20: Absolute Zahlen der Fünf-Minuten-Werte betreffend Inversionen an Tagen mit autochthoner Witterung als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 134
Tab. 21: Die mittleren Temperaturen des Jahres, im Jänner sowie Juli der Tage mit autochthoner Witterung 135
Tab. 22: Temperaturunterschiede bei den Expositionen Nord bzw. Süd 174
Tab. 23: Temperaturunterschiede bei den Hanglagen Kamm bzw. Tal..... 174
Tab. 24: Absolute Zahlen der Fünf-Minuten-Werte hinsichtlich Inversionen als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 178
Tab. 25: Ausbreitungsklassen nach TURNER in der ÖNORM M 9440 179
Tab. 26: Ausbreitungsklassen in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und der Strahlungsbilanz 179
Tab. 27: Die durchschnittlichen Jahresnormalwerte sowie Jänner- und Julimittelwerte 183
Tab. 28: Durchschnittlicher Niederschlag sowie die Seehöhe in Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittelwerten 187
Tab. 29: Durchschnittliche Starkregenereignisse pro Jahr an ausgewählten Stationen 192
Tab. 30: Starkregenereignisse der Stationen 041, 044, 054, 122 und 145 192
Tab. 31: Die durchschnittlichen Niederschlagssummen für die Vegetationsperiode (Monate V-IX) und das Gesamtjahr..... 193

Tab. 32: Durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode sowie die Häufigkeit von Trockenperioden mit einer Dauer von mindestens 7 Tagen 195
Tab. 33: Die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode sowie die Häufigkeit von Trockenperioden mit einer Dauer von mind. 7 Tagen 195
Tab. 34: Die durchschnittliche Häufigkeit von Starkregenereignissen in der Vegetationsperiode 196
Tab. 35: Mittlere Windgeschwindigkeiten sämtlicher Stationen 202
Tab. 36: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 011 208
Tab. 37: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 044 209
Tab. 38: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 074 210
Tab. 39: Absolute Häufigkeiten des Auftretens von Wind der Stärken 6, 7 und 8 laut Beaufortskala 211
Tab. 40: Durchschnittliche Tagesmitteltemperaturen der Monate, Jahreszeiten und der Jahre der Stationen 046, 135 und 145 sowie der ZAMG-Stationen Feldbach sowie Bad Gleichenberg 222
Tab. 41: Durchschnittlicher mittlerer Niederschlag der Monate, Jahreszeiten und der Jahre der WegenerNet-Stationen 046, 135 und 145 sowie der ZAMG-Stationen Feldbach sowie Bad Gleichenberg 222
Tab. 42: Die durchschnittlichen Temperaturen der Monate, Jahreszeiten und des Jahres der WegenerNet-Stationen 122 und 145 und der Station Stradner Kogel 224
Tab. 43: Häufigkeiten der Inversionen als Vergleich der WegenerNet-Station 145 mit den Werten der Station Stradner Kogel 227
Tab. 44: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station Stradner Kogel 228
Tab. 45: Durchschnittliche Unterschiede der Windgeschwindigkeit im Tages- und Jahresgang der Stationen Stradner Kogel und der WegenerNet-Station 144 229
Tab. 46: Häufigkeiten der Inversionen als Vergleich der WegenerNet-Station 139 mit den Werten der Station Kapfensteiner Kogel 233
Tab. 47: Durchschnittliche mittlere tägliche Minima, Maxima und der Jahresnormalwert der Lufttemperatur sowie die Seehöheder Stationen 094, 097 und 133 sowie der Messstation Klöch 234
Tab. 48: Auswertung der Stationen 097, 122 und 123 239
Tab. 49: Auswertung der Stationen 071 und 131 240
Tab. 50: Auswertung der Stationen 017, 029, 036, 074, 078 und 094 241
Tab. 51: Auswertung der Stationen 033 und 037 243
Tab. 52: Auswertung der Stationen 011, 020, 044, 046, 069, 076, 101, 109, 127 und 132 245
Tab. 53: Auswertung der Stationen 007, 015, 038, 056 und 082 246
Tab. 54: Auswertung der Station 055 247

1. Einleitung

Am 01.01.2007 ging das WegenerNet, ein Messnetz aus 151 Stationen in der Südost-Steiermark rund um Feldbach, in Betrieb. Über eine Fläche von etwa 15x20 km wurde ein Raster mit 150 Feldern gelegt, worauf in jedem dieser Felder möglichst mittig eine Messstation geplant und errichtet wurde. Die Besonderheit dieses Stationsnetzes liegt in der langfristigen Aufzeichnung wichtiger Klimaparameter wie Lufttemperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit von vielen Stationen auf vergleichsweise kleinem Raum. Dadurch lassen sich neue bzw. genauere wissenschaftliche Erkenntnisse vor allem hinsichtlich der richtigen Einschätzung geländeklimatologischer Parameter wie Hanglage, Exposition und Kaltluftprozessen erwarten.

Diese Arbeit gibt nun in erster Linie einen detaillierten klimatischen Überblick über das Untersuchungsgebiet mit dem Fokus auf der Geländeklimatologie und den Kaltluftprozessen. Darüber hinaus werden die gesammelten Daten und Analysen dazu verwendet, eine Klimatopkarte zu erstellen, bestehende Tendenzen hinsichtlich des Klimawandels zu bewerten und weiterführende Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse zu diskutieren.

Die einleitenden Kapitel beschreiben wichtige Grundlagen, das Untersuchungsgebiet, die Methodik und das Messnetz WegenerNet selbst. Das Untersuchungsgebiet wird klimatisch und naturräumlich beschrieben und wichtige Forschungsfragen und -methoden angeführt.

Danach folgt der Hauptteil dieser Arbeit mit den Ergebnissen der Auswertungen der Messstationen, wobei vor allem auf die Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und Wind eingegangen wird. Darüber hinaus werden die Messdaten in komplexeren Analysen verwendet, wobei geländeklimatische Parameter und die Verhältnisse bei autochthoner Witterung im Vordergrund stehen.

Nach der Einbeziehung von zusätzlichen Stationsdaten aus dem Untersuchungsgebiet bzw. dessen Nähe, durch welche die Daten evaluiert und ergänzt werden, stellt die Erstellung der Klimatopkarte den zweiten wichtigen Kernpunkt der Arbeit dar. Auf der Grundlage der Messwerte, persönlicher Erhebungen, bereits existierender Darstellungen und fachlichen Expertisen wird eine Karte generiert, die vor allem hinsichtlich Detailgenauigkeit und Einbeziehung geländeklimatischer Parameter einen qualitativen Mehrwert liefern soll. Außerdem wird auch die Eignung der klimatischen Bedingungen für die Landwirtschaft, im Speziellen für den vor allem thermisch anspruchsvollen Weinbau, mit der Erstellung einer Karte potentieller Weinbaugebiete im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Stationsnetzes behandelt.

Der Klimawandel wird nur am Rande behandelt, da der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren für diesbezügliche Aussagen zu kurz ist. In den abschließenden Kapiteln werden die Antworten auf die zu Beginn gestellten Forschungsfragen der Arbeit zusammengefasst und die wichtigsten Ergebnisse diskutiert.

2. Theoretische Grundlagen, wissenschaftliche Relevanz und Forschungsaspekte

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen dieser Arbeit hinsichtlich der Geländeklimatologie und Kaltluft, die wissenschaftliche Relevanz dieser Themen sowie relevante Forschungsaspekte beschrieben.

2.1 Geländeklimatologie

Das Fachgebiet der „Geländeklimatologie“ ist traditionell ein wichtiger Zweig der physischen Geographie (vgl. YOSHINO 1975). Dieser Begriff wird in der Literatur allerdings unterschiedlich definiert (siehe Kap. 2.1.1).

Einfacher ist die Situation im Falle des Begriffs „Klima“, für den eine allgemein anerkannte Definition folgendermaßen lautet: *„Unter Klima verstehen wir den mittleren Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Erdort, bezogen auf eine bestimmte Zeitepoche, mit Rücksicht auf die mittleren und extremen Veränderungen, denen die zeitlich und örtlich definierten atmosphärischen Zustände unterworfen sind“* (CONRAD 1936, zitiert nach FLEMMING 1991, S. 37). „Klimatologie“ ist ein Teil der Meteorologie und soll ein *„möglichst lebendiges Bild des Zusammenwirkens aller atmosphärischen Erscheinungen über einer Erdstelle“* liefern (HANN 1883).

2.1.1 Definition

Der Begriff „Geländeklimatologie“ wurde erstmals von KNOCH 1949 als Teildisziplin der Klimatologie eingeführt (zitiert nach BENDIX 2004, S. 23). In dieser Arbeit zählt KNOCH als mögliche Anwendungsbereiche unter anderem die Land- und Forstwirtschaft auf, die in Kap. 13 dieser Arbeit mit dem Weinbau beispielhaft behandelt wird.

Es gibt zahlreiche Synonyme für den Begriff des Geländeklimas wie beispielsweise Lokalklima, Mesoklima und Topoklima (YOSHINO 1975, zitiert nach BENDIX 2004, S. 23). In dieser Arbeit werden in weiterer Folge nur die Begriffe Geländeklima bzw. Geländeklimatologie verwendet. Ebenso zahlreich wie die Synonyme sind auch die Definitionen für den Begriff des Geländeklimas; als Beispiel möge die Formulierung von BOER 1959 dienen, der es als „Lokalklima“ bezeichnet (zitiert nach HIRTENFELLNER 1998, S.8):

„Während im großklimatischen Bereich die räumliche und zeitliche Verteilung der meteorologischen Elemente vorwiegend durch die geographische Breite, die Lage zum Festland und Meer und die Seehöhe bestimmt wird, hängt im lokalklimatischen Bereich die räumliche und zeitliche Verteilung der meteorologischen Elemente im Wesentlichen von lokal wirksamen Faktoren wie Geländeform, Exposition und Beschaffenheit der Erdoberfläche ab (Verteilung Wald- und Wiesenflächen). Entscheidend ist ferner die Lage innerhalb eines makroklimatischen Bereiches, so etwa die Entfernung zu Gebirgen. Das Lokalklima stellt somit den mittleren Zustand und den durchschnittlichen Verlauf der Gesamtheit aller Klimaelemente im lokalklimatischen Bereich dar.“

2.1.2 Grundprinzipien und Arbeitsgebiete der Geländeklimatologie

BENDIX (2004, S. 24-29) teilt die Geländeklimatologie in vier Grundprinzipien ein, die nachfolgend beschrieben werden.

a) Die Skalenfrage

Die Abb. 1 zeigt die unterschiedlichen Skalensysteme der Meteorologie und der Klimageographie. Die Skalendefinition erfolgt auf Seiten der Klimageographie ausschließlich auf der Basis externer, also das Klima beeinflussender Faktoren. Die meteorologische Skalendefinition basiert hingegen auf den spezifischen Skalenlängen atmosphärischer Prozesse, die nicht von Klimafaktoren abhängig sind.

Die Geländeklimatologie reicht im Skalensystem vom Mikro- bis in den Mesobereich, was auf der horizontalen Skala eine Ausdehnung von einigen Metern bis etwa 10 km bedeutet. Auf meteorologischer Seite finden wir in diesem Bereich Thermik, Konvektion und Gewitter. Die Problematik einer solchen Einteilung erkennt man am Beispiel des Land-Seewindes, der stark vom Klimafaktor Bodenbedeckung abhängig ist und somit eher zum Gelände- als zum Globalklima zu rechnen wäre. Mit einer Skalenlänge von 20-200 km liegt dieses meteorologische Phänomen allerdings außerhalb des Geländeklimas dieser Skala.

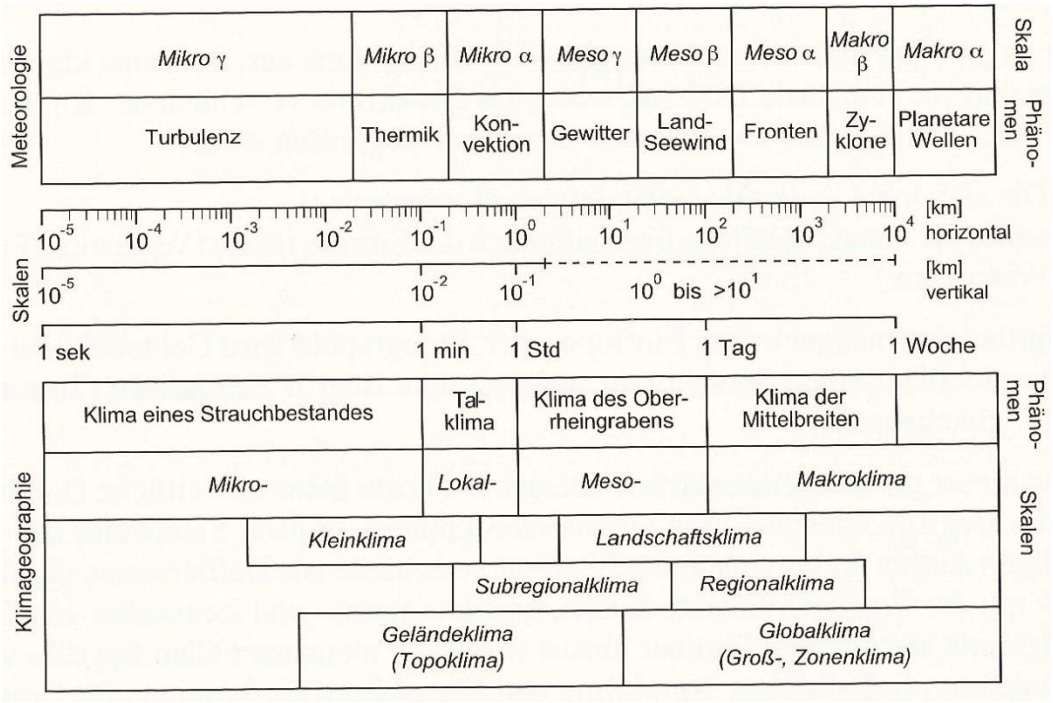


Abb. 1: Skaleneinteilung der Klimageographie und Meteorologie. *(Quelle: BENDIX 2004)*

b) Skalenvarianz klimatologischer Phänomene

Aus dem oben genannten Problem heraus entsteht der logische Schluss, dass man die unterschiedlichen Skalen der von kleinräumig wechselnden Klimafaktoren beeinflussten Klimaphänomene berücksichtigen sollte. Als Beispiel dient herfür die Bildung von Kaltluftseen, die als Folge von Kaltluftprozessen ein wichtiger Teil dieser Arbeit sind. Die Abb. 2 zeigt, wie unterschiedlich groß die gebildeten Kaltluftseen ausfallen können. Eine Erstreckung von >10 km, also über der eigentlichen Grenze der Geländeklimatologie, ist in den großen Becken des Alpenvorlandes (z.B. Poebene oder Klagenfurter Becken) keine Seltenheit. Im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Messnetzes gibt es in manchen Seitentälern deutlich kleinräumigere Gebiete, wo unter autochthonen Bedingungen Kaltluftseen entstehen können (siehe Kap. 12).

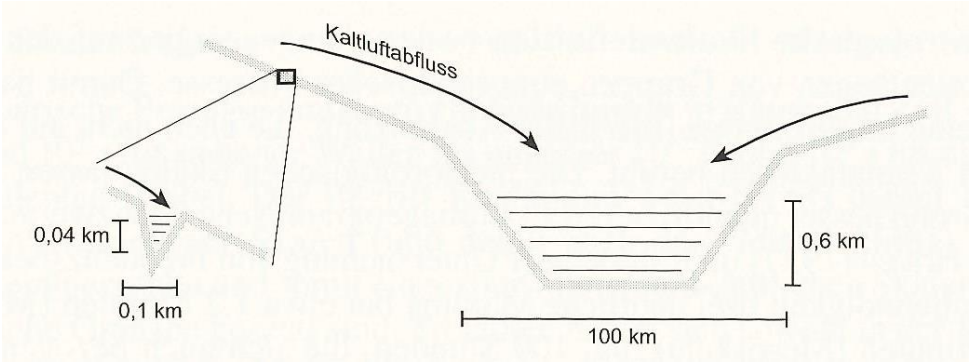


Abb. 2: Skalenvarianz von Kaltluftseen. *(Quelle: BENDIX 2004)*

c) Geländeklima, synoptische Situation und Klimafaktoren

Die Ausbildung eines Geländeklimas als „Schönwetterklima“ zu bezeichnen ist zwar nicht grundsätzlich falsch, aber doch etwas zu oberflächlich betrachtet. Zutreffend ist die Beobachtung allerdings dahingehend, dass geländeklimatologische Phänomene meist mit kleinräumigen Gradienten im Temperatur- und Druckfeld einhergehen, was beste Voraussetzungen für Schönwetter bedeutet. Auch ein schwach ausgebildetes synoptisches Windfeld ist sowohl ein Kennzeichen für Hochdruckwetterlagen, als auch für die mögliche Ausbildung geländeklimatologischer Vorgänge.

Die Abb. 3 zeigt, warum bei näherer Betrachtung der Begriff „Schönwetterklima“ nur teilweise zutreffend ist. Es kann sich bei einer synoptischen Westströmung (rechte Bildhälfte) durch die Leitwirkung des Reliefs die gleiche Windrichtung im Tal ergeben, wie beim nächtlichen Talabwind (linke Bildhälfte). Die große Häufigkeit an Südost- und Nordwest-Winden an Station (a) deutet somit auf eine große Anzahl von Schönwettertagen hin; die tatsächliche Zahl der Schönwettertage liegt aber meist deutlich darunter. Vielmehr wird der synoptische Wind auch an anderen Tagen stark durch das Relief des Talsystems beeinflusst und täuscht somit eine gradientschwache Lage vor.

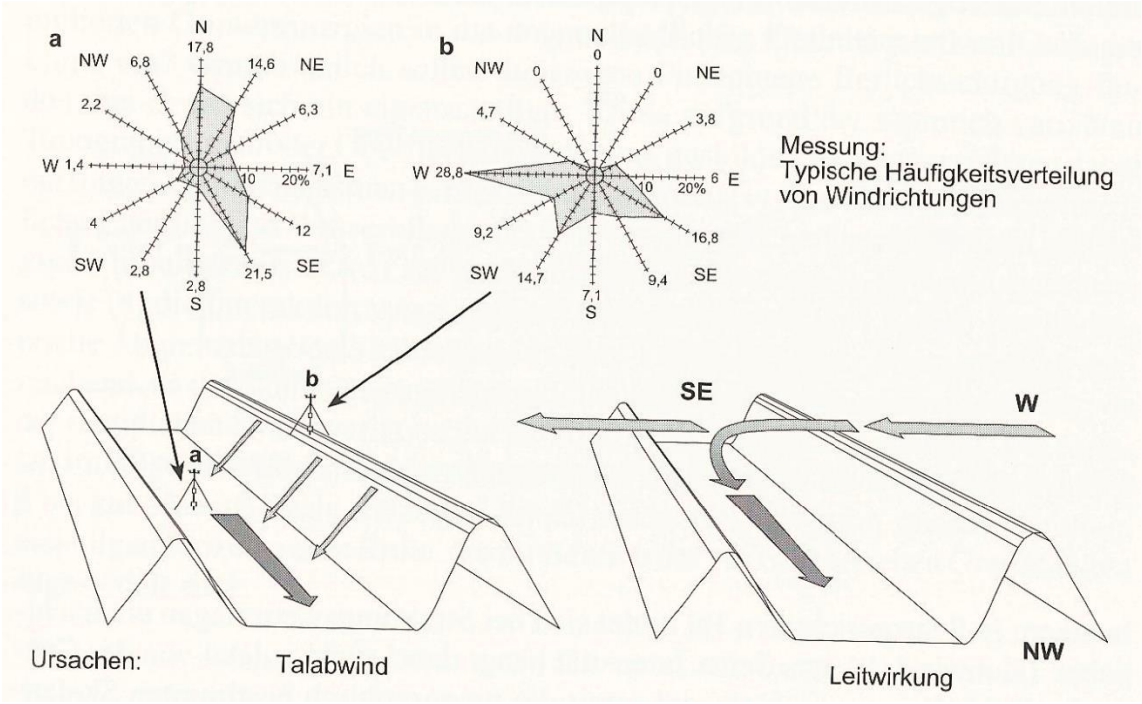


Abb. 3: Typische Windsituation in einem Mittelgebirgstal (Rheintal bei Bonn). *(Quelle: BENDIX 2004)*

d) Interaktion geländeklimatologischer Phänomene unterschiedlicher Skalen

Auch bei ungestörten Wettersituationen kann es zu Überlagerung von geländeklimatologischen Effekten verschiedener Skalenlängen kommen, wie in Abb. 4 ersichtlich wird. Hier bildet sich in einem Nord-Süd-gerichteten Tal bei Strahlungswetterlage ein nächtlicher Talabwind (Süd) aus. Befindet sich nun im Talgrund eine größere Stadt, so ist in diesem Bereich durch den Überwärmungseffekt mit einem anderen lokalen Windsystem zu rechnen, dem schwächer ausgeprägten Flurwind (wie auch beispielsweise in Graz zutreffend, siehe LAZAR et al. 1995). An Punkt P1 der Abbildung treffen die beiden Windsysteme aufeinander, und je nach Stärke des Flurwindes wird der Talabwind in diesem Beispiel um 14° bzw. 37° abgelenkt.

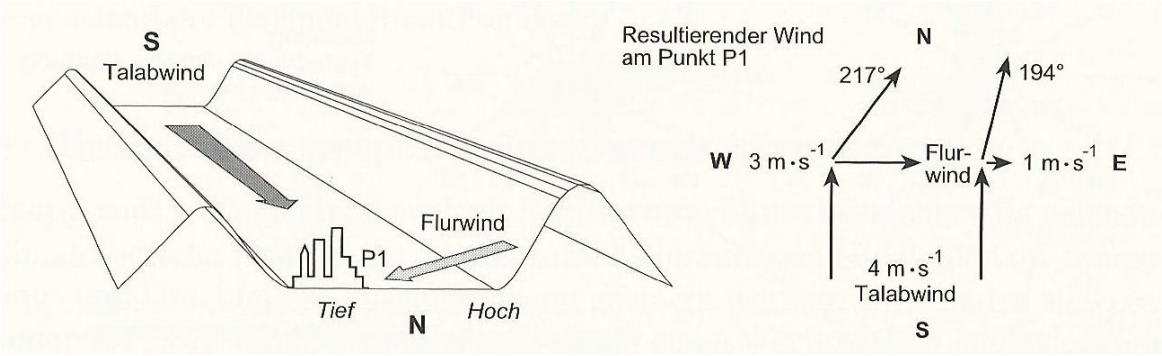


Abb. 4: Überlagerung thermischer Windsysteme in einem Nord-Süd orientierten Tal. *(Quelle: BENDIX 2004)*

BENDIX nennt neben den beschriebenen Grundprinzipien vier Mechanismen, die beim Geländeklima berücksichtigt werden müssen:

1) Räumlich unterschiedliche Energie- und Wasserbilanz.
2) Von der Oberflächenbeschaffenheit abhängige Turbulenzmuster.
3) Schwerkraftbedingte Prozesse (z.B. Kaltluftabfluss).
4) Interaktion von synoptischer Strömung mit dem Relief.

In dieser Arbeit sind vor allem die schwerkraftbedingten Prozesse relevant, wobei auch die übrigen Punkte behandelt werden. So findet die Energiebilanz mithilfe der Strahlungsbilanz Eingang in die Analyse, während die Wasserbilanz kein Gegenstand dieser Untersuchung ist. Die von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen Turbulenzmuster werden durch Einbeziehung von Vegetation und Gebäuden in der Umgebung der einzelnen Stationen des WegenerNet sowie bei der Erstellung der Klimatopkarte in Kap. 12 berücksichtigt. Die Interaktion synoptischer Strömungen mit dem Relief, also jener die geländeklimatischen Prozesse überlagernde Einfluss der Großwetterlagen, wird durch die spezielle Untersuchung autochthoner Witterungen in Kap. 6.7 besondere Bedeutung beigemessen.

WANNER (1986, S. 6) zeigt in Anlehnung an frühere Arbeiten zu diesem Thema eine Zusammenstellung der Arbeitsgebiete, die grundsätzlich auf eine Abschätzung der Klimaeignung für bestimmte Arten der Landnutzung abzielt (Tab. 1).

Tab. 1: Die wichtigsten Arbeitsgebiete und Fragestellungen innerhalb der Geländeklimatologie.

ART DER LANDNUTZUNG	ARBEITSGEBIET/MASSNAHME
Generelle Zielsetzung:	Abschätzung der Klimaeignung für bestimmte Arten der Landnutzung
Landwirtschaft	- Suche nach den bestgeeigneten Arealen für den Anbau von Spezialkulturen (Ausweichen gegenüber Gefahren wie Frost, Dürre, Nässe usw.) - Festlegung entscheidender, produktbezogener Schwellenwerte - Erhöhung der Produktionsraten
Forstwirtschaft	- Abschätzung von Einflüssen des Klimas auf das Baumwachstum - Suche von Zusammenhängen zwischen trockener und nasser Deposition, Interzeption und Waldschäden
Wohnen, Arbeiten	- Erhöhung des Wohnkomfortes durch experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Baukörperklimatologie - Steigerung der Behaglichkeit durch optimale Ausnützung des Umgebungsklimas (Strahlung, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit usw.) - Einschränkung des Energieverbrauchs und Bereitstellung von Grundlagen zur optimalen Nutzung passiver Energien (z. B. Wintergärten)
Gewerbe, Industrie und Stadtplanung	- Erarbeitung von Empfehlungen für die Reduktion negativer Effekte, hervorgerufen durch größere Baukuben: Hitzestreß, Windböen, Luftverschmutzung - Simulation diverser Szenarien zur Stadt- und Quartierentwicklung im Hinblick auf thermische, mechanische und lufthygienische Effekte
Öffentliche Bauten und Anlagen (Ausbildung, Gesundheit)	- Gewährleistung eines guten Raum- und Umgebungsklimas (wenig Starkwind, Bewölkung, Nebel) - Herabsetzung des generellen Energiebedarfs
Verkehrsanlagen	- Herabsetzung der lufthygienischen Schadstoffgefährdung - Ausweichen bezüglich gefährlicher Wettereinflüsse (Frost, Starkniederschläge, Nebel, Windböen, Schneeverwehungen)
Versorgungs- und Entsorgungsanlagen	- Reduktion unangenehmer oder schädigender Immissionen - Herabsetzung des Energiebedarfs infolge günstiger Standortwahl
Energienutzung	- Suche nach günstigen Standorten für geplante Energieproduktionsanlagen mit Ausstoß unangenehmer oder schädigender Immissionen - Erarbeitung klimatologischer Grundlagen zur Abschätzung der Rendite von Wasserkraftwerken, Wind- und Sonnenenergieanlagen
Sommer- und Wintertourismus	- Abschätzung von Eignung und Rendite verschiedener Areale für bestimmte Formen des Tourismus (anhand der Klimaelemente Sonnenscheindauer, Wind, Schneehöhe usw.)

Quelle: WANNER 1986, S. 6

In dieser Arbeit wird grundlegende Forschung betrieben, ohne im Speziellen auf bestimmte Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse einzugehen; eine Ausnahme stellt die Karte potentieller Weinanbaugebiete in Kap. 13.2 dar, welche speziell auf eine vor allem thermisch sehr anspruchsvolle Landwirtschaft eingeht. Die thermische Begünstigung der Hanglagen wird beispielsweise bereits in Kap. 3.4 auf der Grundlage vorhandener wissenschaftlicher Arbeiten beschrieben, wird aber erst durch die detaillierten Ergebnisse in Kap. 6 für diese Region genau quantifiziert.

2.2 Kaltluft

Im klimatischen Sinne bedeutet der Begriff „Kaltluft“ grundsätzlich, dass aufgrund geländeklimatologischer Vorgänge an gewissen Stellen bzw. zu gewissen Zeiten Regionen mit kälterer Luft als in der näheren Umgebung entstehen. Nachfolgend werden die Entstehung und andere Parameter der Kaltluft näher betrachtet.

2.2.1 Meteorologische Grundlagen

Bodennahe Kaltluft entsteht laut Definition durch die Energieumsätze an der Erdoberfläche (SCHWAB 2000, S. 7). Um diese Energieumsätze verständlich zu machen, lohnt ein Blick auf die Formel des Wärmehaushalts der Erdoberfläche (vgl. KUTTLER 2009, S. 69):

$$C^* - Q_H - Q_E - Q_B = 0 \ [W/m^2]$$

wobei

C*……Strahlungsbilanz,

Q_H …..turbulente fühlbare Wärmeflussdichte,

Q_E ……turbulente latente Wärmeflussdichte,

Q_B ……Bodenwärmeflussdichte.

Diese Wärmebilanz beinhaltet bereits die Strahlungsbilanz Q*, die aus der Summe der Strahlungseinflüsse zusammengesetzt wird. Diese ist von entscheidender Wichtigkeit für die Kaltluftproduktion und wird von der Referenzstation 077 des WegenerNet im Fünf-Minuten-Takt aufgezeichnet. Die Strahlungsbilanz wird in folgender Form angegeben (KUTTLER 2009, S. 68):

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow - L\uparrow - L\uparrow_{refl.} + L\downarrow \ [W/m^2]$$

wobei

Q*……..Strahlungsbilanz,

K↓…….direkte (I) und diffuse (D) Globalstrahlungsflussdichte,

K↑…….kurzwellige Reflexion,

L↑……..langwellige Ausstrahlung,

$L\uparrow_{refl.}$...langwellige Reflexion,

L↓……..langwellige atmosphärische Gegenstrahlung.

In der Nacht reduziert sich die Formel auf:

$$Q^* = L\downarrow - L\uparrow \; [W/m^2],$$

da der Einfluss der Sonnenstrahlung wegfällt. Besonders in wolkenlosen Nächten ist die Strahlungsbilanz negativ, also die Ausstrahlung der Erdoberfläche größer als die Atmosphärische Gegenstrahlung.

Nun gibt es in der Thermodynamik das Gesetz, dass unterschiedliche Temperaturen zweier benachbarter Körper einen Wärmeaustausch zur Folge haben, der nach einem Ausgleich der Temperaturen strebt (SCHWAB 2000, S. 3). Die durch die starke Ausstrahlung fehlende Energiemenge des Erdbodens muss nun ausgeglichen werden, wofür in erster Linie die bodennahen Luftschichten in Frage kommen; als Ergebnis der negativen Strahlungsbilanz nimmt die Bodentemperatur so stark ab, dass die Temperatur der angrenzenden Luftschichten unterschritten wird. In Folge dessen findet ein molekularer Wärmestrom von der Luft zum Boden statt („fühlbarer Wärmestrom“), die bodennahe Luft kühlt sich an der Oberfläche ab (SCHWAB 2000, S. 7).

Als Faustregel kann bezüglich der Intensität festgehalten werden, dass die Kaltluftbildung umso stärker ausfällt, je stärker negativ die Strahlungsbilanz ist (großes Volumen oder starke Abkühlung). Voraussetzung hierfür ist, dass die anderen Komponenten des Wärmehaushalts nicht andersartig für einen Ausgleich sorgen (SCHWAB 2000, S. 8).

Wie in der Formel des Wärmehaushalts der Erdoberfläche ersichtlich, gibt es neben der Ausstrahlung des Bodens noch andere Faktoren, die das Entstehen der Kaltluft begünstigen oder behindern. Dazu zählt die molekulare Wärmeleitung in der bodennahen millimeterdicken Grenzschicht, der Verlust durch vertikalen Austausch der Luftmassen, den Energieverlust durch pflanzliche Verdunstung bzw. Taubildung sowie die Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Ist letztere gering, kann aus den unteren Bodenschichten nur wenig Wärme nachströmen, und der Boden kühlt schneller aus (WIESNER 1986, S. 54 f.). Diese Vorgänge können wichtige Einflussfaktoren darstellen, sind aber aufgrund ihrer Komplexität schwer messbar und können im Sinne meiner Aufgabenstellung auch vernachlässigt werden.

In weiterer Folge des oben genannten Wärmeflusses von der Luft zum kälteren Boden werden auch höher gelegene Luftschichten betroffen, da sie den Energieverlust der unteren Luftschichten ausgleichen müssen. Diese Abkühlung wird also „von unten“ an die nächst höheren Luftschichten weitergegeben, wodurch eine allmählich wachsende Kaltlufthaut entsteht (VOGT 1994, zitiert in SCHWAB 2000, S. 7).

Problematisch für die wissenschaftliche Auswertung ist die Tatsache, dass die Luft in direkter Nähe zum Boden (etwa 10 cm über Grund) im Normalfall am kältesten ist (GEIGER, ARON und TODHUNTER 1995, S. 346). Die Messstationen des WegenerNet für die Lufttemperatur befinden sich aber standardmäßig in einer Höhe von 2 m über Grund, wodurch die Ergebnisse in jedem Fall nur abgeschwächt dargestellt werden können. Bei schwach ausgeprägten Kaltluftabflüssen erreichen die Mächtigkeiten der Pakete nur wenige Meter und könnten somit zumindest zeitweise gar nicht von den Stationen aufgezeichnet werden.

Eine „von unten“ wachsende Kaltlufthaut bedeutet auch, dass in der Nacht eine bodennahe Inversion entsteht. Die Abb. 5 (BENDIX 2004, S. 104) zeigt die typische tageszeitliche Temperaturdynamik in Tälern, wobei für die Analyse der Kaltluftprozesse nur die rechte Seite mit den Verhältnissen in der Nacht von Interesse ist. Die Entstehung sowie der typische Verlauf eines Kaltluftabflusses sind in den Schritten t5-t7 grafisch dargestellt. Durch die nächtliche Ausstrahlung bilden sich an den Hängen und Kuppen Kaltluftpolster, die ab einer gewissen Mächtigkeit wie Wasser entlang des Gefälles abfließen (t5); ein Kaltluftsee bildet sich aus. Aus Gründen der Massenkontinuität setzt eine Ausgleichszirkulation ein, die in der Höhe gegen die Talflanken gerichtet ist und dort die Ausbildung einer warmen Hangzone begünstigt (t6). Es kommt zur Ausbildung einer Talinversion, die durch den zusätzlichen Einfluss des Kaltluftabflusses größere Mächtigkeiten als reine Strahlungsinversionen annehmen können. Vor dem Sonnenaufgang ist häufig das gesamte Tal durch die Inversion ausgefüllt.

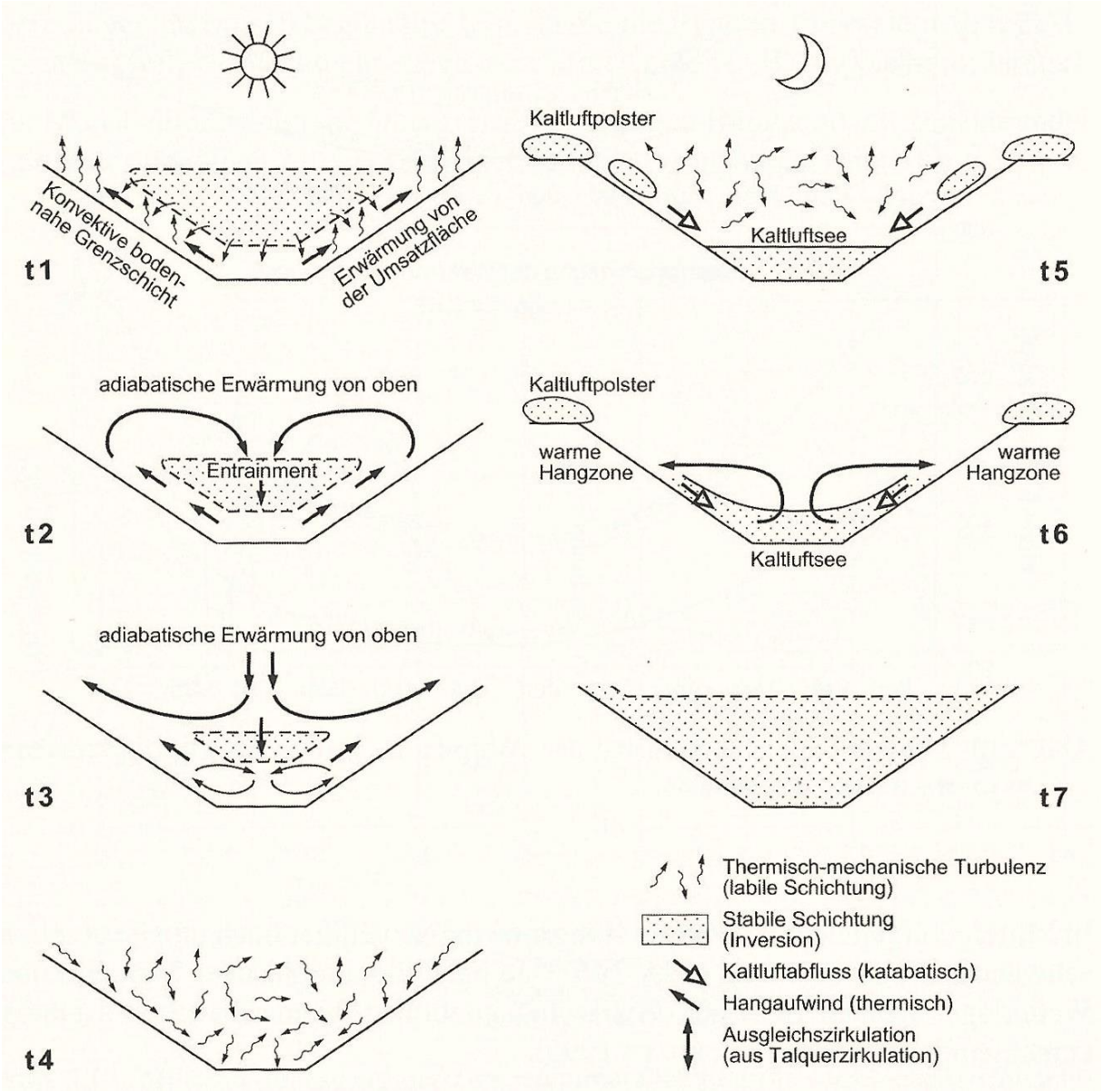


Abb. 5: Tageszeitliche Temperaturdynamik in Tälern. *(Quelle: BENDIX 2004)*

Die Kaltluftrichtlinie 3787, Blatt 5 des VDI (Verein Deutscher Ingenieure, 2003) ergänzt zu oben genanntem Schema die Parameter Schichtdicke und Geschwindigkeit (siehe folgende Tab. 2). Der Kaltluftabfluss geht demnach bei vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten, aber noch einer geringen Schichtdicke vonstatten. Nach Akkumulation und Kaltluftstau in Ebenen und Senken ist die Schichtdicke deutlich größer (bis >100 m), die Windgeschwindigkeit kommt aber beinahe zum Erliegen.

Tab. 2: Zeitlich aufeinanderfolgende Phasen der Kaltluftströmung mit Beschreibung einzelner Parameter.

Phase	**Beschreibung**	**Dominante Kräfte**	**Wind-geschwindigkeit**	**Richtung**	**Schichtdicke**
Kaltluft-abfluss	Abfließen von Hängen	Schwerkraft, Reibung	Hoch (1-3 m/s)	hangabwärts	Gering (bis 10 m)
Kaltluft-akkumulation	Sammeln und Abfluss im Haupttal	Druck, Reibung, Schwerkraft	Mittel (0,5-1 m/s)	talabwärts	Mittel (10-50 m)
Kaltluftstau	Stagnation in Ebenen, Rückstau in Haupttälern	Druck, Reibung	Gering (<0,5 m/s)	keine definierte Richtung, Wirbel	Groß (50 bis >100 m)

Quelle: Verein Deutscher Ingenieure 2003, eigene Bearbeitung

Ein wichtiger Faktor hinsichtlich der Richtung des Kaltluftabflusses im Gelände sind die Geländeform sowie etwaige Hindernisse wie Waldränder oder Hecken (siehe Abb. 6). Dadurch können Kaltluftabflüsse umgelenkt bzw. gebündelt werden.

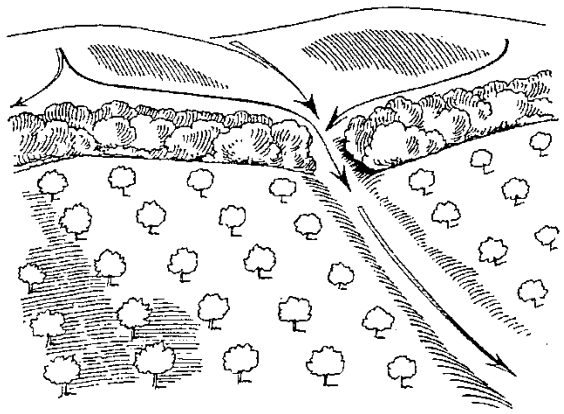


Abb. 6: Kaltluftabfluss und –umlenkung in geneigtem, unterschiedlich bewachsenem Gelände. *(Quelle: HILKENBÄUMER et al. 1957)*

Entscheidend für die Entstehung und Ausbreitung von Kaltluft ist auch die Gestaltung der Erdoberfläche bzw. die Bodennutzung. Sowohl bebaute Flächen als auch Wasserflächen können als Kaltluftproduzenten vernachlässigt werden, da in beiden Fällen tagsüber große Mengen an Wärme gespeichert und dann in der Nacht an die Luft abgegeben werden. Außerdem sind für den Kaltluftabfluss entsprechende Hangneigungen erforderlich, die im Falle der Wasserflächen gar nicht und im Falle der Bebauung nur selten gegeben sind. Als

Bereiche intensiver Kaltluftbildung gelten hingegen Acker- und Wiesenflächen. Hier wird ein Großteil der tagsüber zugeführten Energie in latente Wärme umgewandelt und steht somit in der Nacht nicht mehr zur Verfügung. Eine Quantifizierung der Kaltluftbildung ist kaum möglich, da zu den schwer einzuschätzenden individuellen bodenphysikalischen Verhältnissen auch noch der Faktor Vegetation hinzukommt (SCHWAB 2000, S. 9). Lange umstritten war die Rolle des Waldes als Kaltluftproduktionsgebiet, aber mehrere ältere sowie sämtliche neueren Studien (z.B. PARLOW 1983, GOSSMANN 1984, FOKEN 2006) zeigen deutlich, dass in Waldgebieten sehr wohl Kaltluft gebildet werden kann, die Vorgänge aber komplexer und daher schwerer einschätzbar sind als auf Freiflächen.

Eine wichtige Rolle spielt auch die Exposition des Gebietes. Süd-exponierte Flächen nehmen tagsüber größere Mengen an Wärme und Energie auf, wodurch sie in der Nacht dann viel langsamer auskühlen. Die Entstehung von Kaltluft setzt nur verzögert ein. Nord-exponierte Flächen nehmen im Winter deutlich bzw. im Sommer geringfügig weniger Energie auf als anders exponierte Flächen, und kühlen dementsprechend auch schneller aus (KUTTLER 2009, S. 188). Die Abb. 7 (HÄCKEL 2012, S. 329) zeigt die Unterschiede der Nord- und Süd-exponierten Flächen in 50° nördlicher Breite, dürften aber auch für das Gebiet rund um Feldbach sehr ähnlich sein. Die Hangneigung ist hierbei radial aufgetragen, wobei 0° im Kreismittelpunkt und 90° am Rand des Kreises zu finden sind. Die Bestrahlungsstärke ist für Ost- und West-exponierte Hänge spiegelbildlich und wird daher nur einmal dargestellt. Auf der linken Hälfte wird der Sommer (in diesem Fall von 5.5. bis 8.8.), auf der rechten Seite der Winter (7.11. bis 4.2.) gezeigt.

Im Sommer sind die Unterschiede zwischen Nord- und Süd-exponierten Hängen - wie bereits erwähnt - nicht sehr groß, am meisten Energie nehmen Süd-exponierte Flächen mit einer Hangneigung von etwa 2-23° auf; hier werden knapp 500 W/m² erreicht. Auch Ost- und West-exponierte Flächen erreichen hohe Werte. Im Winter sind die Unterschiede durch die deutlich flachere Sonneneinstrahlung viel gravierender – so gibt es auf Nordhängen bereits ab einer Neigung von gut 20° überhaupt keine direkte Einstrahlung mehr. Am höchsten sind die Werte auf stark geneigten Süd-exponierten Hängen, das Maximum wird im Winter an Flächen von etwa 55-90° Hangneigung mit 400 W/m² erreicht. Ost- und West-exponierte Flächen erreichen unabhängig von der Hangneigung Werte von rund 100 W/m². Die höchsten Jahressummen erreichen Südhänge mit etwa 45° Neigungswinkel (HÄCKEL 2012, S. 330).

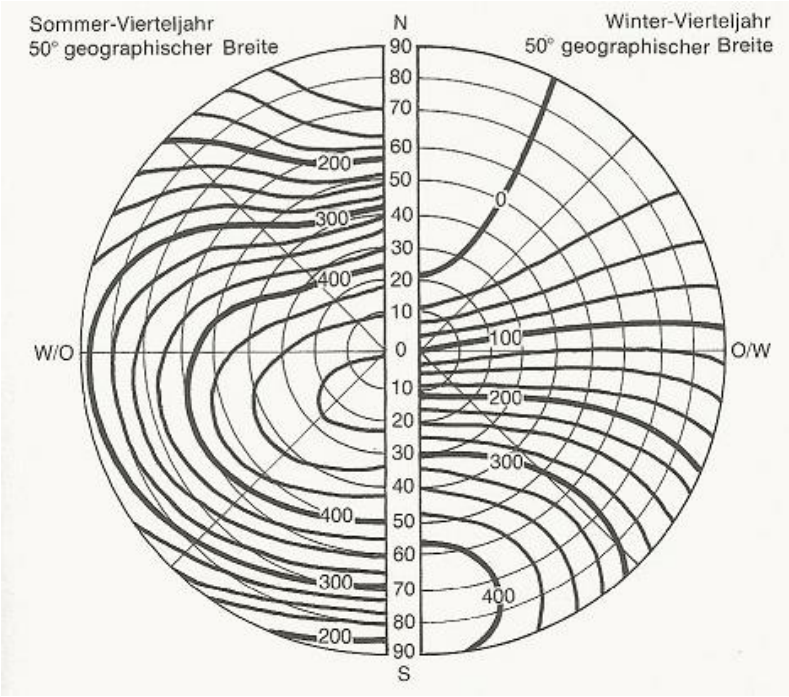


Abb. 7: Sommer- und Wintermittel der extraterrestrischen Hangbestrahlung in [W/m²] auf verschieden geneigten und orientierten Hängen (Sommervierteljahr: 05.05. bis 08.08., Wintervierteljahr 07.11. bis 04.02.). *(Quelle: HÄCKEL 2012)*

Es besteht aber dennoch ein Unterschied zwischen Ost- und West-exponierten Flächen, zumindest was die Wahrscheinlichkeit und den Zeitpunkt der Kaltluftproduktion betrifft. Die Morgensonne sorgt auf Ost-exponierten eher für Austrocknung denn Erwärmung, und die Energie wird im Gegensatz zu West-exponierten Flächen großteils bereits vormittags aufgebaut. Als Folge daraus sind Ost-exponierte Hänge besser zur Kaltluftproduktion geeignet als West-exponierte, da diese am Nachmittag nur wenig Energie aufnehmen und somit schneller auskühlen (SCHWAB 2000, S. 9).

Die Häufigkeit von Kaltluftsituationen ist je nach Region sehr unterschiedlich, wobei man im mitteleuropäischen Raum mit einer Häufigkeit von 5-20 % aller Tage rechnen kann (SCHÄDLER 1996, S. 10). Wenn man eine Häufigkeit nach Jahreszeiten einschätzen will, kann man aufgrund der häufig windschwachen Hochdruckwetterlagen im Frühherbst davon ausgehen, dass der Herbst die höchste Anzahl an Tagen mit Kaltluftsituationen aufweist. Diese Annahme wird durch die Auswertung der Tage mit autochthoner Witterung (und somit perfekten Voraussetzungen für die Kaltluftentstehung, siehe Kap. 6.7) nicht bestätigt – nur etwa 25 % fallen auf den Herbst, während der Frühling mit knapp 35 % Anteil an den autochthonen Witterungen dominiert. Natürlich muss auch hier wieder der Hinweis erfolgen, dass der

Untersuchungszeitraum von fünf Jahren zu kurz ist, um hieraus eine stichhaltige Aussage ableiten zu können.

Eine Möglichkeit der Quantifizierung der Kaltluftgefährdung findet FOKEN (2006, S. 239) mittels einer Einteilung in Frostgefährdungsstufen (Tab. 3). Er beziffert die unter Normalbedingungen möglichen extremsten negativen Auswirkungen mit 5-8 K unter dem Niveau der Normallage.

Tab. 3: Frostgefährdungsstufen (Voraussetzungen: Bewölkung <2/8, Windgeschwindigkeit <3 m/s) mit Temperaturunterschieden in Kelvin.

Gefährdungsstufe	Bezeichnung	Vergleich zur Normallage
1	Begünstigt	+1 bis +5 K
2	Normallage	-1 bis +1 K
3	schwach bis mäßig frostgefährdet	-2 bis –4 K
4	stark bis sehr stark frostgefährdet	-5 bis –8 K

Quelle: FOKEN 2006, S. 239

Auch hinsichtlich der unterschiedlichen Reliefformen hat FOKEN (2006, S. 239) eine Einteilung getroffen und daraus resultierende Gefährdungsstufen erstellt (Tab. 4). Die größte Gefährdung gibt es demnach bei geschlossenen Hohlformen und Talböden mit geringem bzw. mäßigem Gefälle auf einem Moorboden. An stark geneigten Hängen oder auf Bergen mit einer Hangneigung von >10° gibt es kaum Frostgefährdung durch Kaltluft, da der Kaltluftabfluss dort stark ausgeprägt ist.

Tab. 4: Frostgefährdungsstufen nach der Reliefform. Bei Moorboden: jeweils 1 Stufe höher.

Reliefform	Kaltluftzufuhr, -produktion	Kaltluftabfluss	Gefährdungsstufe*
geschlossene Hohlform (Kessel)	vorhanden	-	3
Talboden, geringes Gefälle	vorhanden	schwach	3
Talboden, mäßiges Gefälle	vorhanden	mäßig	3
Platten, $\Delta h > 10m$	-	-	2
Hänge schwach geneigt (1-3°)	-	mäßig	2
Hänge stark geneigt (>15°)	-	sehr gut	1
Berge h > 50 m, Neigung > 10°	-	sehr gut	1

* Moorboden +1

Quelle: FOKEN 2006, S. 239

Die folgende Abb. 8 zeigt eine schematische Darstellung eines Kaltluftsees mit angrenzenden Hängen, wo die Kaltluftgefährdung deutlich geringer ist.

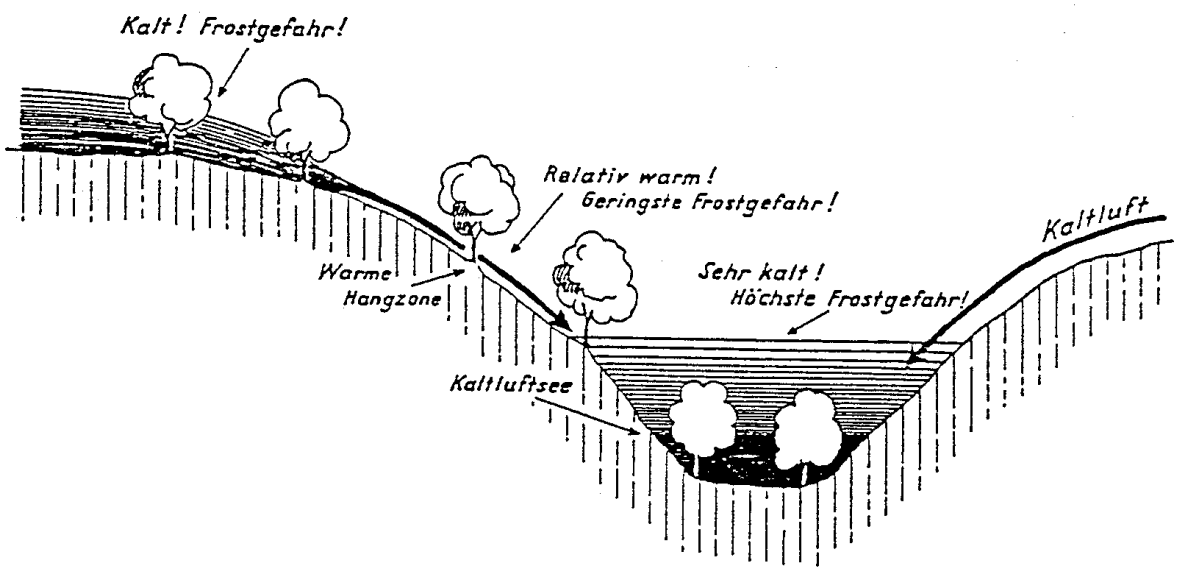


Abb. 8: Schematische Darstellung eines Kaltluftsees in einem Tal mit angrenzenden Hangbereichen. *(Quelle: HILKENBÄUMER et al. 1957)*

In HÄCKEL (2012, S. 339) werden allgemeine Faktoren zusammengestellt, die sich positiv oder negativ auf die Kaltluftbildung auswirken (Tab. 5). Die Faktoren wurden großteils bereits erläutert, aber hier kommt die Schneebedeckung als für die Kaltluft förderliche Einflussgröße hinzu.

Tab. 5: Faktoren der Kaltluftbildung

Energiehaushalts-komponente	**Einflussgröße**	**Für die Bildung von Kaltluft:**	
		förderlich	**hinderlich**
Strahlungsbilanz	Atmosphärische Gegenstrahlung	Geringe oder dünne Bewölkung	Starke oder dichte Bewölkung
		Trockene Luft	Feuchte Luft
		Saubere Luft	Verschmutzte Luft
		Ebenes Gelände	Stark strukturiertes Gelände
Bodenwärmestrom	Bodenart	Stark humushaltiger Boden	Mineralischer Boden
	Bodenwassergehalt	Trockener Boden	Feuchter Boden
	Lockerungszustand	Lockerer, bearbeiteter Boden	Verfestigter Boden
	Bodenbedeckung	Gras, Nutzpflanzen-bestände, Laub, Schnee, unbewachsener Boden	Gewässer, Siedlungen, Asphalt, Wald
	Wind	Gering bis keiner	Mäßig bis stark

Quelle: HÄCKEL 2012, eigene Bearbeitung

2.2.2 Kaltluftabfluss als Folge thermisch induzierter Windsysteme

Neben der Kanalisierung des Windes durch die Topographie spielt hinsichtlich des Windfeldes einer Region die Ausbildung der tagesperiodischen Lokalwindzirkulation, bedingt durch Temperatur- bzw. Druckgegensätze, die Hauptrolle. Diese Zirkulation ist also für die Entstehung und Intensität des Kaltluftabflusses von entscheidender Bedeutung; die verschiedenen Formen thermisch induzierter Windsysteme werden nachfolgend beschrieben.

a) Berg- und Talwindzirkulation

DEFANT erkannte das System der Berg- und Talwinde bereits im Jahre 1949 und beschrieb es in acht Phasen, die in Abb. 9 dargestellt werden (zitiert nach BENDIX 2004, S. 166-167). Dieses System erklärt die Ausbildung von Hangwindsystemen (b), die für den Kaltluftabfluss entscheidend sind.

Phase A: Die Situation knapp nach dem Sonnenaufgang. Der Talauswind (Kaltluftabfluss aus dem Gebirge) ist noch voll ausgebildet, an den Hängen beginnt die Luft aufgrund der

Erwärmung durch die Sonne hangaufwärts zu fließen. Auf Höhe des Kamms fließt die Luft in Richtung Talmitte und wird dort durch den Talauswind abgelenkt.

Phase B: Durch die Erwärmung des Tals wurde das Druckgefälle zwischen dem Tal und Vorland ausgeglichen und der Talauswind ist zum Erliegen gekommen. In dieser kurzen Phase existiert nur das Hangwindsystem.

Phase C: Das Tal erwärmt sich aufgrund des geringeren Luftkörpers und der größeren strahlungsrelevanten Oberfläche, wodurch ein Druckgefälle zum Vorland und in weiterer Folge ein Taleinwind entsteht. Die Intensität des Hangwindsystems nimmt durch die gleichmäßige Erwärmung des Tals immer mehr ab.

Phase D: Das Hangwindsystem ist zum Erliegen gekommen, dafür erreicht nun der Taleinwind die höchsten Geschwindigkeiten.

Phase E: Die erste von drei wichtigen Phasen hinsichtlich des Kaltluftabflusses. Bereits knapp vor Sonnenuntergang wird die Strahlungsbilanz negativ, ein System des Hangabwindes bzw. Kaltluftabflusses beginnt sich zu formen. Das System des Taleinwindes hält aber noch eine Zeit lang vor, bis der Druckgradient wieder ausgeglichen ist.

Phase F: Nun bildet sich das gleiche System wie in Phase B aus, allerdings mit entgegen gerichteten Luftbewegungen. Eine kurze Zeit lang existiert nur der Kaltluftabfluss.

Phase G: Die Luft im Tal kühlt sich, auch verstärkt durch das Hangabwindsystem mit Kaltluftabflüssen, immer weiter ab; es entsteht wieder ein Druckgefälle im Vergleich zum Vorland, wodurch ein Talauswind entsteht. Der Kaltluftabfluss beginnt nachzulassen.

Phase H: Bis zum Sonnenaufgang dominiert der Talauswind, die Hangwinde erliegen oder werden überprägt.

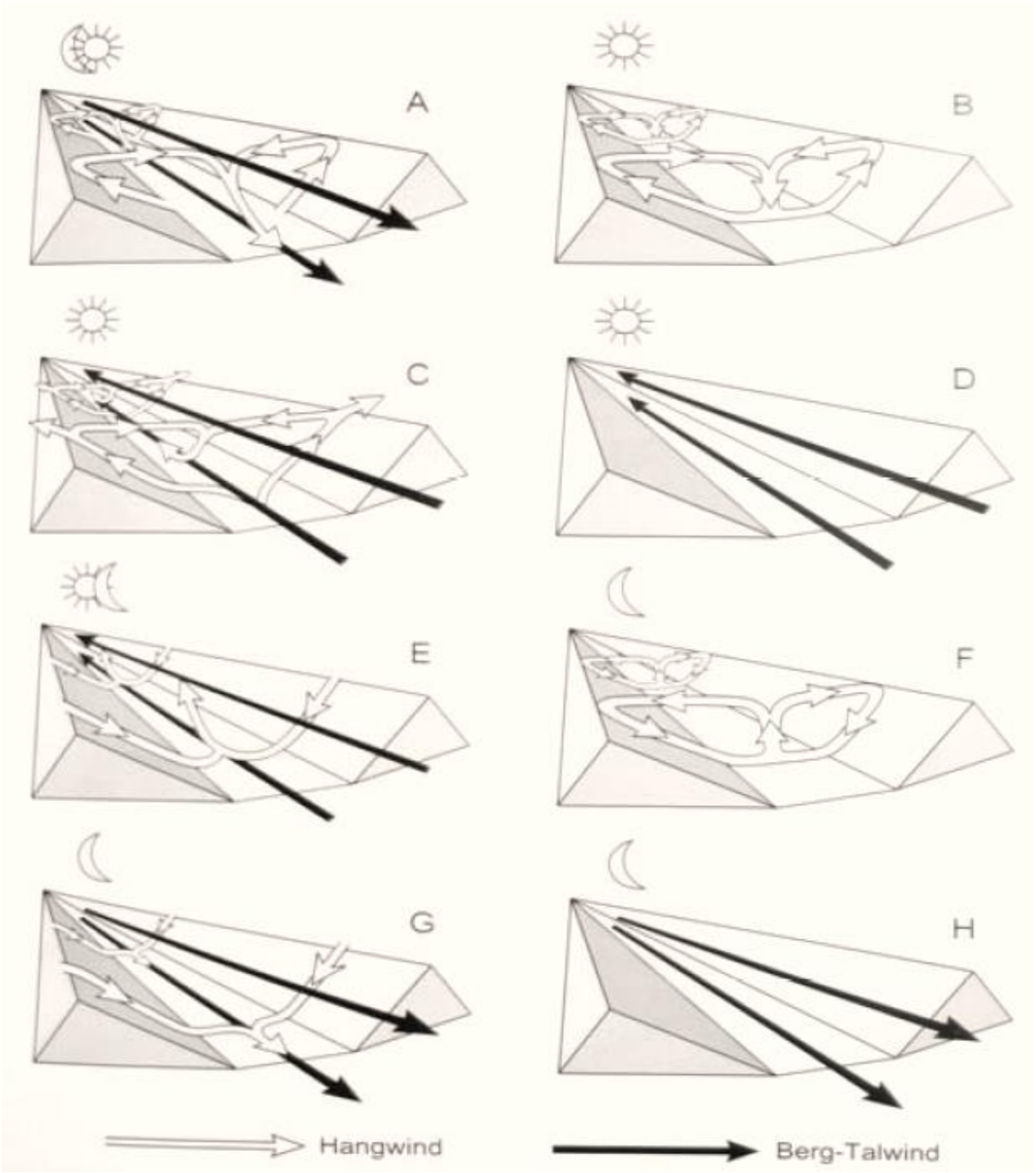


Abb. 9: Idealisiertes System der Talaus- und Taleinwinde sowie Hangwinde bei symmetrischer Hangerwärmung und -abkühlung. *(Quelle: BENDIX 2004 nach DEFANT 1949)*

b) Hangwindsysteme und Kaltluftabfluss

Für diese Arbeit ist nur der nächtliche, abwärts gerichtete Teil des Hangwindsystems von Bedeutung, weshalb der anabatische Hangaufwind nicht behandelt wird.

Der Kaltluftabfluss bzw. katabatische Hangabwind ist als eine kleinräumige Luftbewegung zu verstehen, der in Bodennähe mit geringer Geschwindigkeit abwärts fließt. Quellgebiete des

Kaltluftabflusses sind offene Kuppenflächen, Hangwälder und sonstige freie Flächen (FOKEN 2006, S. 238). Die Fließrichtung ist aufgrund der höheren Dichte der in Bodennähe befindlichen Schicht in Richtung der Falllinie (der Schwerkraft folgend). Während des Abfließens wird durch Austausch mit der Bodenschicht weiterhin Wärme aus der Luft abgegeben, was einer adiabatischen Erwärmung entgegenwirkt (BENDIX 2004, S. 163). Das Abfließen erfolgt dabei in direkter Bodennähe stoßweise, was mit dem Einfluss des Untergrunds erklärt werden kann; mit ansteigender Mächtigkeit des Kaltluftkörpers verlängern sich die Phasen des stoßweisen Abfließens, erreichen aber kaum mehr als 1 m/s (GEIGER et al. 1995, S. 354). In einigen Metern Höhe ist die Abflussgeschwindigkeit am höchsten, da der Einfluss der Bodenrauheit wegfällt; in noch größeren Höhen wird der Kaltluftabfluss dann von anders gerichteten Talwinden überlagert (WHITEMAN 2000, S. 187). Sollte der Abfluss durch enge Täler erfolgen, so können beachtliche Windgeschwindigkeiten entstehen. Ein Beispiel dafür wäre der „Höllentäler Wind“ im Schwarzwald in Deutschland (FOKEN 2006, S. 236).

Das Ausmaß der Kaltluftproduktion hängt wie erwähnt mit der Beschaffenheit der Oberfläche und der damit einhergehend effektiven Ausstrahlung zusammen. Die Mächtigkeit des Kaltluftabflusses wiederum hängt neben der Oberflächenbeschaffenheit auch mit der Hangneigung und –länge ab, mit denen sie positiv korreliert. Höhere Mächtigkeiten bedeuten in weiterer Folge auch höhere Abflussgeschwindigkeiten. Die Kaltluft sammelt sich in konkaven Geländeformen (Becken, Täler, Mulden) und bildet Kaltluftseen, die zusätzlich zur Abkühlung beitragen. In diesen Gebieten gibt es dann keine nennenswerten Luftbewegungen mehr, und die Temperaturen können teilweise deutlich von jenen in angrenzenden Gebieten abweichen (SCHWAB 2000, S. 12).

Die Lokalisierung markanter Kaltluftabflüsse ist vor allem in der Land- und Forstwirtschaft, aber auch aus siedlungsgeographischer Sicht von großer Bedeutung. Meist wird das Gelände einer Klassifizierung unterzogen, der sogenannten Bonitierung. Diese lässt sich schematisieren, wie in den Tab. 3 und 4 in Kap. 2.2.1 ersichtlich ist. Die höchste Frostgefährdung liegt bei geschlossenen Hohlformen sowie Talböden ohne oder mit geringer Neigung vor, wenn zusätzlich ein Moorboden vorhanden ist; hier wird die Kaltluft nicht oder nur langsam wegtransportiert und sammelt sich. Eine Neigung der Hänge von >15° reicht aus, dass die Frostgefährdung nicht mehr groß ist.

Besonders stark ist die Kaltluftgefährdung darüber hinaus bei nächtlichem wolkenlosen Himmel und einem zusätzlichen synoptischen Kaltlufteinbruch wie den „Eisheiligen“ (FOKEN 2006, S. 238).

c) Talwindsysteme

Diese Windsysteme werden, wie zuvor in Abb. 9 (Phase A) gezeigt, von den Hangwindsystemen eingeleitet und durch die Temperatur- und Druckunterschiede zum Vorland aufrechterhalten (DEFANT 1949, S. 423-427). Tagsüber erwärmt sich die vertikale Luftsäule über dem Flachland aufgrund des größeren Volumens langsamer als im Gebirge, wodurch dort ein Unterdruck entsteht; die Folge ist ein talaufwärts gerichteter Wind. In der Nacht kehren sich diese Verhältnisse entsprechend um (WHITEMAN 2000, S. 188).

d) Regionalwinde

Regionalwinde fungieren als Ausgleichsströmungen zwischen unterschiedlich geprägten und räumlich distanzierten Landschaftseinheiten (WHITEMAN 2000, S. 171). Im Falle des Untersuchungsgebietes stellt der Randgebirgswind (bzw. der gegensätzlich gerichtete Antirandgebirgswind) die Form des Regionalwindes zwischen dem Randgebirge und dem Südoststeirischen Riedelland dar (OBERTH 2010). Der nächtliche Randgebirgswind, der aus Nord- bis West-Richtung ins Riedelland bläst, steht dabei mit Geschwindigkeiten von 1-2 m/s deutlich hinter dem tagsüber mit Süd- und Südost-Richtung strömenden Antigebirgsrandwind zurück, auch was die vertikale Mächtigkeit betrifft (LAZAR 1984, S. 157; WAKONIGG 1978, S. 328). Ein stark ausgeprägter Regionalwind stört das Entstehen von Kaltluft, da er die lokalen Windsysteme zumindest teilweise überprägt.

2.2.3 Messung von Kaltluftabflüssen

Hinsichtlich der Analyse von Kaltluftprozessen gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten: den theoretischen Ansatz, wo man den Vorgang mathematisch ausrechnen lässt; den praktischen Ansatz, wo Experimente zum Ergebnis führen; die jüngste und vielversprechendste Möglichkeit ist aber jene der numerischen Simulation. Bei letzterer werden mathematische Modelle durch Experimente verbessert und verifiziert.

Das Problem dabei ist oftmals, dass die Messungen nur punkthaft vorliegen; aus diesem Grund beschränkt man sich in der Regel darauf, charakteristische Merkmale in den Simulationen zu überprüfen (SCHWAB 2000, S. 16 f.). Die Messstationen des WegenerNet sind für diese Belange zu grobmaschig, da im Optimalfall mehrere Stationen auf einem einzelnen Hang nötig wären. Die große Anzahl an Stationen in unterschiedlichen Hanglagen dürfte aber eine deutlich bessere Überprüfbarkeit des mathematischen Modells zulassen. Wenn optimale Bedingungen vorliegen (windstille, gradientschwache und trockene Hochdruckwetterlage), dann gilt dies in der Regel für das gesamte Untersuchungsgebiet, das sich ja nur auf einer Fläche von 20x15 km erstreckt. Man kann also annehmen, dass die über das Gebiet verteilten Hangabflüsse unter

gleichen sonstigen Voraussetzungen wie Oberflächenbedeckung, Hangneigung u. a., auch gleichartig verlaufen.

Ein bekanntes Strömungsmodell ist KLAM_21, das auch OBERTH (2010, S. 112-131) in seiner Arbeit verwendet. Dieses Strömungsmodell des Deutschen Wetterdienstes simuliert den Kaltluftabfluss und die Ansammlung in einem beliebigen, rechteckigen Untersuchungsgebiet. Die Größen der Untersuchungsgebiete können dabei zwischen 50 und 1000 km² liegen. Über die Fläche des Untersuchungsgebietes wird ein numerisches Gitter gelegt, wobei die Gitterpunktabstände im Normalfall 20-50 m betragen. Jedem Gitterpunkt wird dabei eine Flächennutzung aus neun Klassen zugewiesen, die gleichzeitig eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und Rauheit bedeuten; auch die Geländehöhe wird jedem Punkt zugewiesen (SIEVERS 2005, S. 83).

Das Abfließen der Luft wird in einfacheren numerischen Modellen durch eine Umverteilung realisiert. Dabei gelten folgende Grundregeln (SCHWAB 2000, S. 22):

- Die entstandene Kaltluft muss von den höher gelegenen den tiefer gelegenen Gebieten zufließen;
- Einsenkungen im Gelände dienen ebenso wie Hindernisse in der Fließrichtung als Führungslinien;
- Als Folge der Hangabwinde müssen sich talauswärts führende Bergwinde einstellen;
- In konkaven Geländeformen muss es zur Ansammlung kalter Luft, in isolierten Hohlformen (z.B. Mulden) muss es zur Ausbildung von Kaltluftseen kommen;
- Die stauende Wirkung von hangparallelen oder talquerenden Hindernissen muss wiedergegeben werden (Waldränder, Siedlungsränder).

Zur besseren Einschätzung der Kaltluftabflüsse greift man auch auf die Möglichkeit zurück, einzelne Punkte nach gewissen Reliefparametern zu bewerten. Diese werden aus digitalen Geländemodellen und Landnutzungskarten flächenhaft abgeleitet, die dann in die Kaltluftabflussmodelle einfließen. Beispiele für solche Kriterien lauten (vgl. SCHWAB 2000, S. 20):

- Neigung, Exposition und Krümmung eines Punktes;
- Länge eines Fließpfades;
- Lage und Größe von Kaltlufteinzugsgebieten;
- Charakteristische Eigenschaften der Einzugsgebiete (z.B. mittlere Neigung und Anteile verschiedener Nutzungsklassen);
- Kaltluftstaubereiche;
- Beschattungsmuster und topographisch mögliche Sonnenscheindauer.

Mithilfe dieser Informationen, deren Beschaffung von unterschiedlicher Schwierigkeit ist, können mit den Simulationen dann nachvollziehbare und aussagekräftige Modelle erstellt werden.

2.2.4 Eigenschaften der Kaltluft

Die folgenden Beschreibungen stammen aus der Kaltluftrichtlinie des VDI (Verein Deutscher Ingenieure 2003). Aus den Eigenschaften fließender und stagnierender Kaltluft kann im räumlichen Bezug auf mögliche Auswirkungen geschlossen werden.

Kaltlufteigenschaften sind:

1. Im Entstehungsraum bei stagnierender Kaltluft:
    a. stetige Auskühlung der Luft von der Oberfläche her
    b. Zunahme von Frosthäufigkeit und –intensität
    c. Zunahme der Nebelhäufigkeit
    d. Entstehung einer stark stabilen Schichtung
    e. verminderter vertikaler Luftaustausch
2. Im Entstehungsraum bei abfließender Kaltluft:
    a. Luftaustausch: Abfließende Kaltluft wird vor allem in den oberen Hanglagen durch wärmere Luft ersetzt, wodurch es dort höhere Temperaturen als bei stagnierender Kaltluft gibt
    b. verminderte Frostgefährdung und Nebelhäufigkeit in höheren Hanglagen
3. Im Wirkungsraum der Kaltluft:
    a. Luftaustausch: Abtransport der vorhandenen, möglicherweise thermisch oder lufthygienisch belasteten Luft und Verringerung der Spurenstoffkonzentration (u. U. wird der durch fließende Kaltluft verbesserte Horizontalaustausch durch einen verminderten Vertikalaustausch kompensiert).
    b. Temperaturabnahme

Diese Eigenschaften können positive oder negative Auswirkungen auf die zu betrachtenden Flächen ausüben. Fließende Kaltluft wirkt sich z. B. positiv aus, wenn sie in einem städtischen Bereich zur Reduktion der Wärme- oder der Schadstoffbelastung beiträgt. Wenn eine thermische Schutzfunktion innerhalb der Bebauung zur Reduktion des Heizenergieeinsatzes erreicht werden soll, ist der Kaltluftfluss hingegen als negativ zu bewerten.

Nach der eher qualitativen Zuordnung muss eine quantitative Einordnung der Auswirkungen erfolgen. Dazu sind mittels Messungen bzw. Modellrechnungen die Intensität und Häufigkeit der Kaltluftabflüsse und die daraus resultierenden Veränderungen bei Wärme- und

lufthygienischer Belastung sowie für die Frostgefährdung respektive den Heizenergiebedarf abzuschätzen. Die Intensität kann z. B. über Volumenstrom, Kaltluftmächtigkeit und Inversionsintensität ausgedrückt werden.

2.3 Wissenschaftliche Relevanz dieser Arbeit

Aus den vorangegangenen Kapiteln geht hervor, dass Geländeklimatologie und Kaltluftprozesse in der Literatur bereits seit mehr als 100 Jahren wichtige Themen sind. Dabei wurden die Vorgänge und Eigenschaften vor allem theoretisch analysiert und durch physikalische Prozesse umfassend erklärt. Darüber hinaus gab es auch immer wieder Fallstudien, bei denen mit zahlreichen Stationen auf engem Raum Daten gemessen und ausgewertet wurden (siehe z.B. PARLOW 1983, SCHÄDLER & LOHMAYER 1996, HIRTENFELLNER 1998 oder DIETRICH & BÖHNER 2008). Diese Theorien und Studien sind Grundlage für wichtige Entscheidungen in diversen Anwendungsbereichen wie der Land- und Forstwirtschaft, Wohnen, Politik (Flächenwidmungspläne) sowie Stadt- und Raumentwicklung.

Die wissenschaftliche Relevanz dieser Arbeit kann demnach nicht in der Neuentwicklung grundlegender Theorien liegen, sondern in der Verbesserung bestehender Lehrmeinungen sowie der genauen Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter. Die meisten der Theorien sind rein physikalisch begründet und erklären sämtliche geländeklimatischen Vorgänge, liefern aber quantitativ keine bzw. nur sehr vage Aussagen, die auch nur teilweise auf tatsächlichen Feldstudien beruhen. Genau an dieser Stelle kann das Messnetz WegenerNet mit den vergleichsweise engmaschig installierten 151 langfristig aufzeichnenden Stationen wichtige Informationen liefern.

In dem durch Muldentäler und sanfte Riedel geprägten Gebiet rund um Feldbach, das nur durch die ehemaligen Vulkankegel der Gleichenberger Kogel mit steileren Hängen und Kerbtälern unterbrochen wird, herrschen auch durch die geringe Reliefenergie von max. 300 m großflächig sehr ähnliche klimatische Bedingungen. Diese gelten vor allem für die Klimaelemente Luftdruck, Windgeschwindigkeit und –richtung, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Sonnenstrahlung und teilweise auch für die Lufttemperatur. Diese Voraussetzung ermöglicht es, verstärkt die Geländeklimatologie mit den Kaltluftprozessen in den Fokus zu stellen und vor allem bei autochthoner Witterung genau beobachten zu können. Durch die große Anzahl an Messstationen gibt es für beinahe jede Geländeform, Hanglage, Exposition, Talform und Seehöhe eine stabile Datenbasis, die auch atypische oder ungewöhnliche Stationsdaten (beispielsweise durch technische Probleme) kompensieren könnte. Diese Probleme können auch durch die Langfristigkeit der

Aufzeichnungen und die umfangreiche Datenqualitätskontrolle des Wegener Centers (siehe Kap. 4.4) deutlich vermindert werden.

Eine Verbesserung und detaillierte Quantifizierung der geländeklimatischen Prozesse ist nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht von Interesse, sondern kann auch bei politischen, persönlichen und wirtschaftlichen Entscheidungen wichtig sein. Als Beispiele seien an dieser Stelle die Widmung von Hanglagen als Bauland oder landwirtschaftlichen Flächen genannt, die aufgrund genauerer Datengrundlagen einfacher durchzuführen und zu rechtfertigen sind. Gerade in der Landwirtschaft und dem in dieser Arbeit in Kap. 13 angeführten Beispiel des Weinbaus sind genaue Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen eines Gebiets von entscheidender Wichtigkeit. Diesbezüglich können bereits tageszeitliche Unterschiede bzw. höhere mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur von wenigen Zehntel Kelvin, eine um wenige Prozent geringere Spätfrostgefährdung oder Nebelhäufigkeit die Machbarkeit eines geplanten Vorhabens deutlich begünstigen.

Auch der Klimawandel wird Änderungen bringen, die vor allem bei der Land- und Forstwirtschaft Anpassungsstrategien notwendig machen werden. Während bei der Landwirtschaft auch kurzfristig Änderungen vorgenommen werden können, indem beispielsweise eine neue Anbausorte ausgewählt wird, sind die Folgen für die Forstwirtschaft deutlich schwerer einzuschätzen und Änderungen nur langfristig durchführbar. Die möglichst genaue Kenntnis der Prognosen für eine Region ist dabei bei weitem nicht so wichtig, wie jene der bereits vorherrschenden makroklimatischen Bedingungen. Der Grund dafür liegt in der Unsicherheit der Prognosen, die auch zu falschen Entscheidungen führen könnte; je genauer jedoch die heute vorherrschenden Bedingungen bekannt sind, desto besser kann man sich in jedem Fall auf zukünftige Entwicklungen vorbereiten.

Durch den Fortschritt bei der Simulation und Modellierung von klimatischen Prozessen in den letzten Jahrzehnten, wie beispielsweise durch das in Kap. 2.2.3 erwähnte Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes, können die klimatischen Bedingungen einer Region schnell und nachvollziehbar dargestellt werden. Gerade bei solchen Simulationen sind die Eingangsparameter von entscheidender Wichtigkeit, welche die Voraussetzung für qualitativ hochwertige und wirklichkeitsnahe Darstellungen sind. Je genauer und detaillierter diese Eingangsparameter beschrieben werden können, desto besser und aussagekräftiger wird auch das Ergebnis ausfallen. Grafische Darstellungen in der Form von Klimatopkarten wie jene des Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) werden als leicht verständliches und aussagekräftiges Mittel herangezogen, um auf einfache Weise einen Konsens herstellen zu können. Daher ist auch die eigene Erstellung einer Klimatopkarte des Untersuchungsgebietes ein sehr wichtiges Kernthema dieser Arbeit.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die Forschung in diesem Gebiet von außerordentlicher wissenschaftlicher Relevanz ist. Ein derart umfangreiches, aufwändiges und kostenintensives Projekt wie jenes des WegenerNet Messnetzes wird auch in Zukunft die Ausnahme bleiben, wodurch die qualitativ hochwertige Auswertung und Interpretation der Daten absolut notwendige Schritte sind.

2.4 Forschungsaspekte

Aufbauend auf den Informationen und Grundlagen dieses Kapitels, der wissenschaftlichen Relevanz und des Forschungsstandes sowie der zur Verfügung stehenden Daten des WegenerNet-Gebietes (siehe Kap. 4), werden in dieser Arbeit folgende Forschungsaspekte behandelt:

- Auswertung der Daten ausgewählter Stationen des WegenerNet-Stationsnetzes vor allem hinsichtlich Temperatur- und Windparameter
- Untersuchung geländeklimatischer Parameter (vor allem Hanglage, Exposition, Seehöhe und Relief) und deren Einfluss auf die Klimaelemente
- Beurteilung der klimatischen Situation nach Tages- und Jahreszeiten sowie bei bestimmten Witterungsverhältnissen (autochthone Witterung, Schneedecke)
- Erstellung von Ausbreitungsklassen und vertikalen Temperaturprofilen (unter Einbeziehung der Daten des Stradner Kogels)
- Erstellung einer Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets
- Erstellung einer Karte potentieller Weinbauflächen im Untersuchungsgebiet als Beispiel für vor allem thermisch anspruchsvolle Landwirtschaft
- Validierung bestehender Klimatop- und Klimakarten wie des Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013)
- Analyse von Prognosen hinsichtlich des Klimawandels
- Analyse der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf ähnlich geartete Landschaftsformen

Die Bearbeitung dieser Forschungsaspekte bildet den Kern dieser Arbeit und soll wichtige neue bzw. detailliertere Erkenntnisse für die Wissenschaft, Politik, Land- und Forstwirtschaft u. a. liefern.

3. Klimatische und naturräumliche Grundlagen des Untersuchungsgebietes im Südoststeirischen Riedelland

Als Untersuchungsgebiet wurde jenes Gebiet von etwa 20x15 km Ausdehnung mit dem Stationsnetz WegenerNet gewählt. Dieses befindet sich im Südosten der Steiermark (Österreich) im Raum Feldbach. Nachfolgend wird das Gebiet naturräumlich und klimatisch beschrieben.

3.1 Naturräumliche Gliederung

Das Untersuchungsgebiet gehört nach der gängigen Einteilung Österreichs in Großlandschaften zum südöstlichen Alpenvorland. Die Abb. 10 zeigt einen Ausschnitt aus der ÖK250, der das Untersuchungsgebiet gut abdeckt. Die genauen Positionen der Messstellen, die nicht regelmäßig im Gebiet verteilt sind, werden in Kap. 4.1 dargestellt. Der Ausschnitt zeigt den Hauptort Feldbach (282 m Seehöhe) im Norden mit dem breiten und dominanten Raabtal. Die Riegersburg liegt bereits außerhalb des Untersuchungsgebietes im Norden, im Westen ist die Grenze bei Fehring. Der wichtigste Ort im Süden ist Bad Gleichenberg, der südlich der höchsten Erhebung im Gebiet liegt (Gleichenberger Kogel mit 598 m). Im Südosten ist die Grenze zum Burgenland erkennbar.

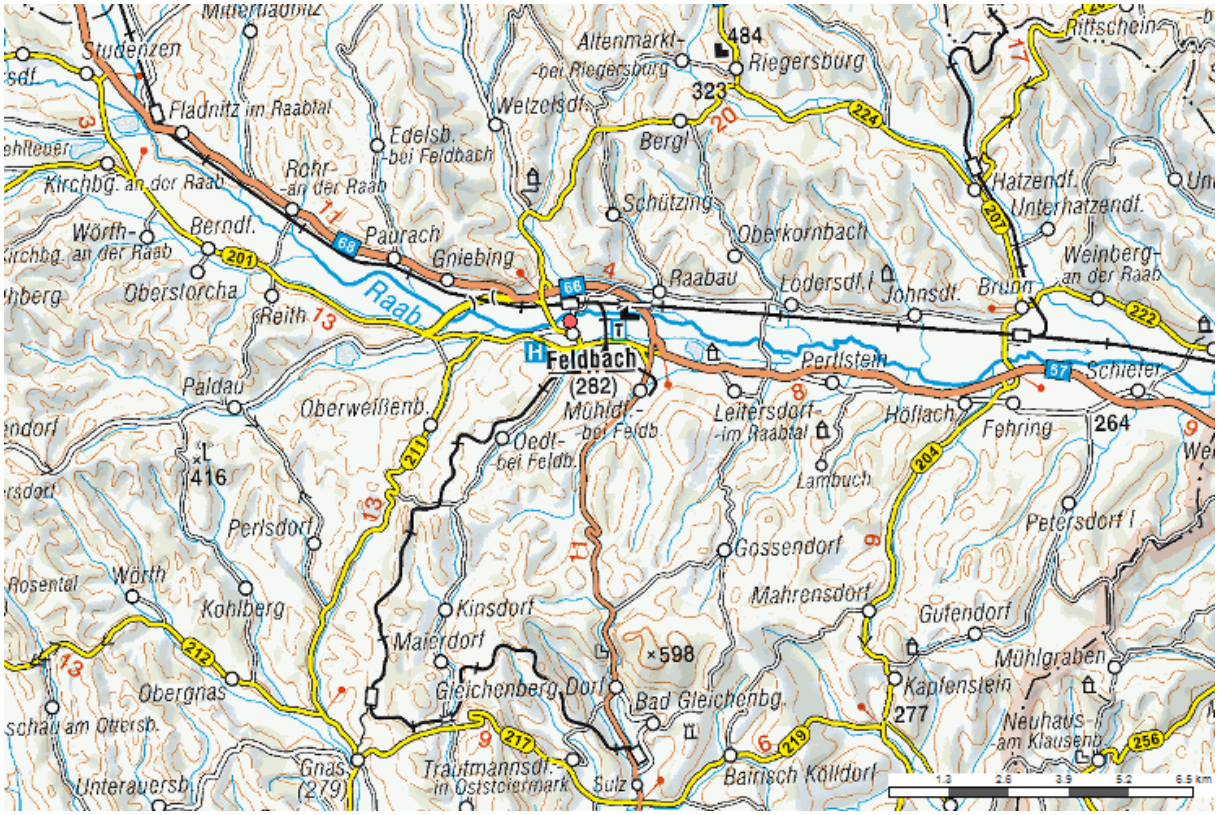


Abb. 10: Ausschnitt aus der ÖK250 mit der ungefähren Ausdehnung des WegenerNet-Gebietes. *(Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen 2016)*

Hinsichtlich einer genaueren naturräumlichen Einteilung gehört dieser Raum zum Oststeirischen Hügel- bzw. Riedelland (LIEB 1991, siehe Abb. 11). Eine detailliertere topographische Karte des Untersuchungsgebietes ist in Kap. 4.1, Abb. 33 dargestellt.

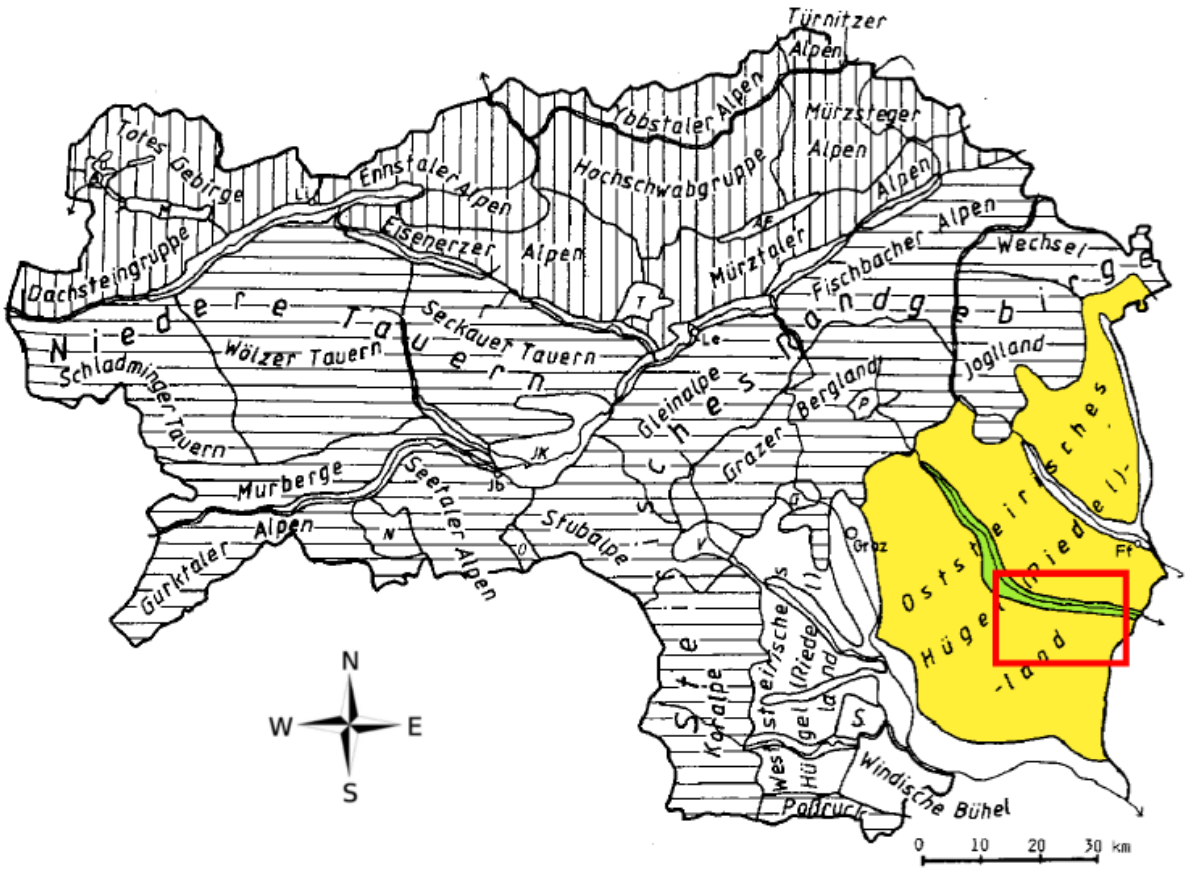


Abb. 11: Naturräumliche Gliederung der Steiermark mittels Landschaftseinheiten. Oststeirisches Riedelland gelb, Talboden des Raabtals grün gekennzeichnet; ungefähre Ausdehnung des WegenerNet-Gebiets rot umrandet. *(Quelle: KABAS 2011, S. 8 (adaptiert aus LIEB 1991); eigene Bearbeitung)*

Das WegenerNet-Gebiet setzt sich demnach aus zwei Gebietseinheiten zusammen, die nachfolgend beschrieben werden: das Oststeirische Hügel- bzw. Riedelland, das fortan nur noch als Südoststeirisches Riedelland bezeichnet wird, sowie die Talböden des Vorlandes.

a) Das Südoststeirische Riedelland

Bei Betrachtung der Darstellung von LIEB in Abb. 11 fällt auf, dass das Riedelland der größte, nicht weiter unterteilte Bereich der Steiermark ist. Diese offenbare Homogenität des Gebietes ist durch die weitläufige Landschaftsgestaltung bedingt, die nur wenig Unterschiede offenbart; auffällige Erscheinungen wie die Reste des jungtertiären Vulkanismus im Süden des Gebietes sind nach LIEB nicht großflächig genug, um als eigene Zone Beachtung zu finden. Das ebenfalls etwas anders geartete Grabenland im Westen, zwischen der Mur und der Raab, fällt nicht in das Untersuchungsgebiet des WegenerNet und wird daher auch nicht weiter beschrieben.

Das Riedelland wird durch Täler in mehrere Teile getrennt, was am Charakter des Gebietes aber nur wenig ändert. Beiderseitig der Täler grenzen sanftwellige Hügel mit einer Seehöhe von etwa 400-500 m an und erheben sich nur 100-200 m über dem Talboden. Im Süden des Riedellandes gibt es Reste des bereits erwähnten jungtertiären Vulkanismus, deren Gipfel in größere Höhen reichen (Gleichenberger Kogel 598 m).

b) Die Talböden des Vorlandes

Nur das Raabtal, welches das bei weitem breiteste Tal im Untersuchungsgebiet ist, gehört zu dieser Kategorie. Es ist durch ein Sohlental von geringer Neigung in einer Seehöhe von 250-300 m im Untersuchungsgebiet gekennzeichnet (abfallend von Nordwest in Richtung Ost) und erreicht hier eine Talbreite von 800-2500 m. Diese beachtliche Breite wird auch durch das Einmünden von Seitentälern erreicht. Die Raab erreicht das Untersuchungsgebiet aus einer Nordwest-Südost-Richtung und schwenkt dann in eine West-Ost-Richtung ein. Sämtliche anderen Seitentäler sind von zu geringer Breite, um als eigene Landschaftseinheit im Riedelland anerkannt zu werden.

Die Abb. 12 zeigt eine topographische Karte des Gebiets mit farblichen Höhenabstufungen im Abstand von 50 m. Der tiefste Punkt der Region liegt demnach ganz im Osten mit einer Seehöhe von knapp unter 250 m. Nördlich des Raabtales werden im Untersuchungsgebiet 450 m nicht überschritten, die auf einem Felsen gelegene Riegersburg im Norden mit einer Seehöhe von 482 m liegt außerhalb des WegenerNet-Gebietes. Die Gleichenberger Kogel mit einer maximalen Höhe von 598 m sind als rötliche Fläche etwas südlich der Kartenmitte gut erkennbar. Der Stradner Kogel ganz im Süden mit 609 m liegt bereits außerhalb des Untersuchungsgebietes. Der restliche Bereich im Süden und Südwesten des Raabtales bewegt sich in Höhenbereichen von 250-450 m, wobei die Höhen gegen Osten hin abnehmen.

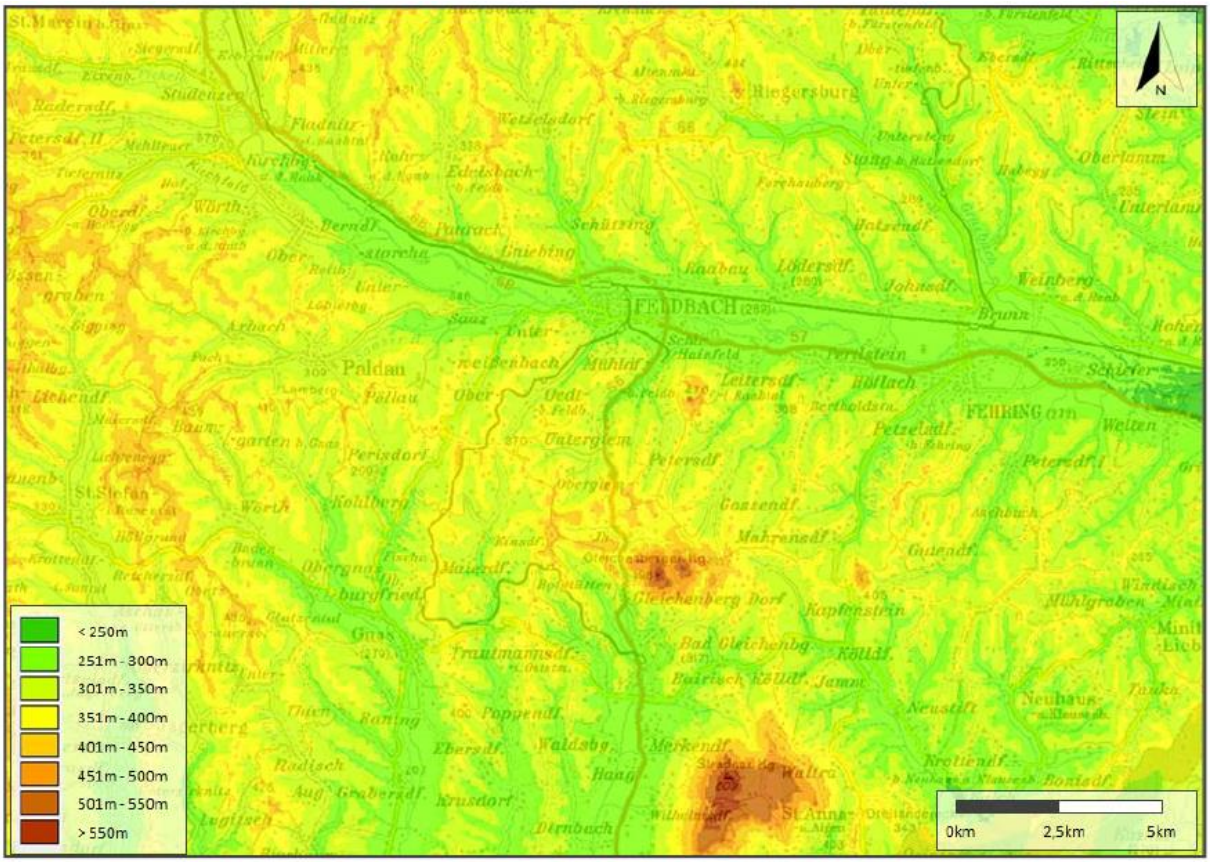


Abb. 12: Topographische Karte des WegenerNet-Gebietes mit transparenter Höhenstufendarstellung auf der Grundlage der Österreichischen Karte (ÖK). *(Quelle: OBERTH 2010, S.32)*

3.2 Geomorphologische Beschreibung

Die Geomorphologische Karte von PLIENEGGER (2011, S. 124) in Abb. 13 unterstreicht die Aussage der naturräumlichen Analyse. Die Raab, die mitten durch Feldbach fließt, der mit knapp 4700 Einwohnern einzigen Stadt im Untersuchungsgebiet, dominiert mit dem umgebenden Talboden den Charakter des Gebietes. Nördlich gibt es nur sehr wenige Hänge auf Vulkangestein, es überwiegen die Riedel und Riedelrücken sowie ein markantes Seitental der Raab im Osten der Region. Im Süden des Flusses gibt es größere Reste des jungtertiären Vulkanismus (beispielsweise die Gleichenberger Kogel), und gegen Südosten weichen die Riedelrücken sanfteren Riedeln. Ansonsten dominieren im Süden der Raab kleinere Täler, Riedel und Riedelrücken. Das breite Tal südlich der Gleichenberger Kogel liegt bereits außerhalb des Untersuchungsgebietes.

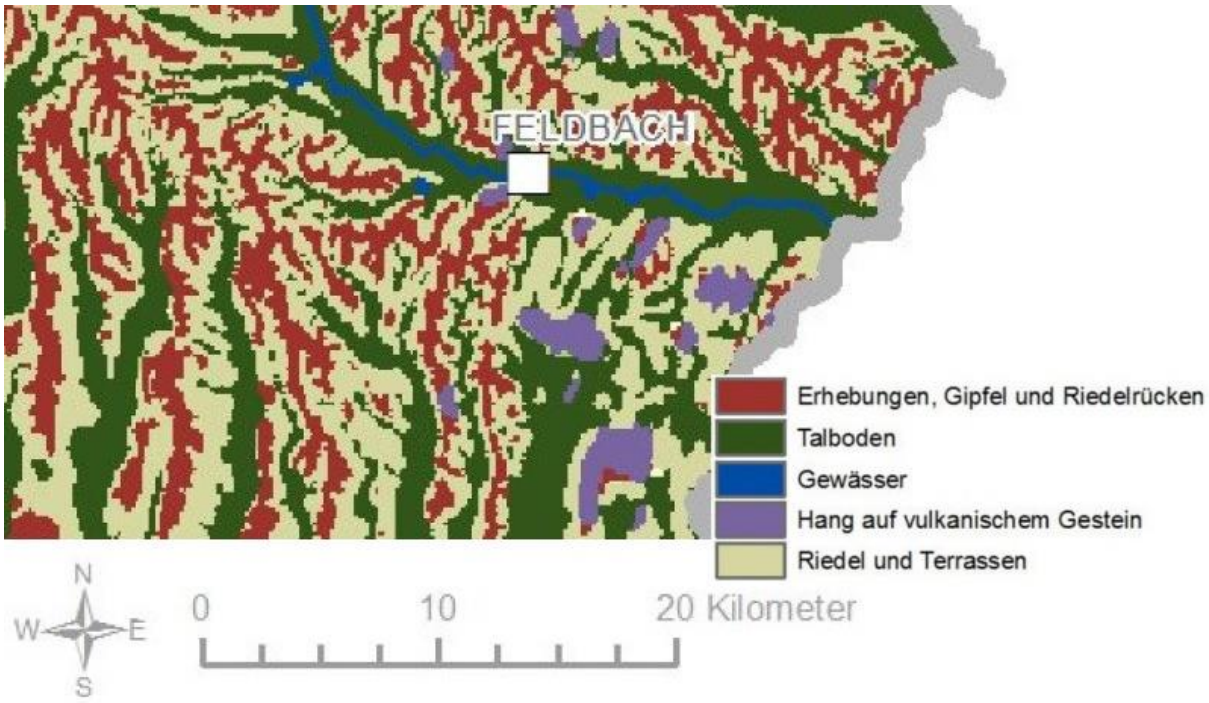


Abb. 13: Geomorphologische Karte für das Gebiet des WegenerNet. *(Quelle: PLIENEGGER 2011, S. 124; eigene Bearbeitung)*

Bei den Talformen dominieren in diesem Gebiet Sohlentäler, und die Hänge sind fast ausschließlich flach ansteigend. Dies geht aus Abb. 14 hervor, welche die Geländeneigung farblich darstellt. Als Darstellungsvariante wurden Prozentangaben gewählt, da die Einteilung in Grad im Digitalen Atlas der Steiermark ein beinahe ausschließlich grünes Bild ergeben hätte (also unter 20° Steigung). Die Umrechnung von Prozent in Grad erfolgt, indem man den Arkustangens der Prozentzahl / 100 ermittelt; für 100 % wären das 45°, 30 % entsprächen 16,7°. Diese 30 % werden oft als Grenze herangezogen, ab welcher beispielsweise im Weinbau von „steilen“ Rebflächen gesprochen wird (vgl. Landwirtschaftliches Wochenblatt 2014).

Betrachtet man die Hangneigungen im WegenerNet-Gebiet in Abb. 14, so dominieren eindeutig die Grüntöne, die einer Neigung von unter 30 % entsprechen. Gelbe und orange Farbtöne sind häufig auf etwas höheren Riedeln zu finden, während rote und violette Farbtöne nur selten vorkommen. Auf den Gleichenberger Kogel sowie bei einem Steinbruch im Südosten von Feldbach gibt es auch großflächige rot eingefärbte Gebiete. Auch den Kapfensteiner Kogel, der ebenfalls dem Vulkanismus entstammt, erkennt man gut an der ringförmigen Kraterstruktur im Norden von Kapfenstein. Südlich von Pertlstein etwa in der Mitte der Karte gibt es mit dem Schwengbach einen für diese Gegend ungewöhnlich tief eingeschnittenen Bach mit stärkeren Hangneigungen.

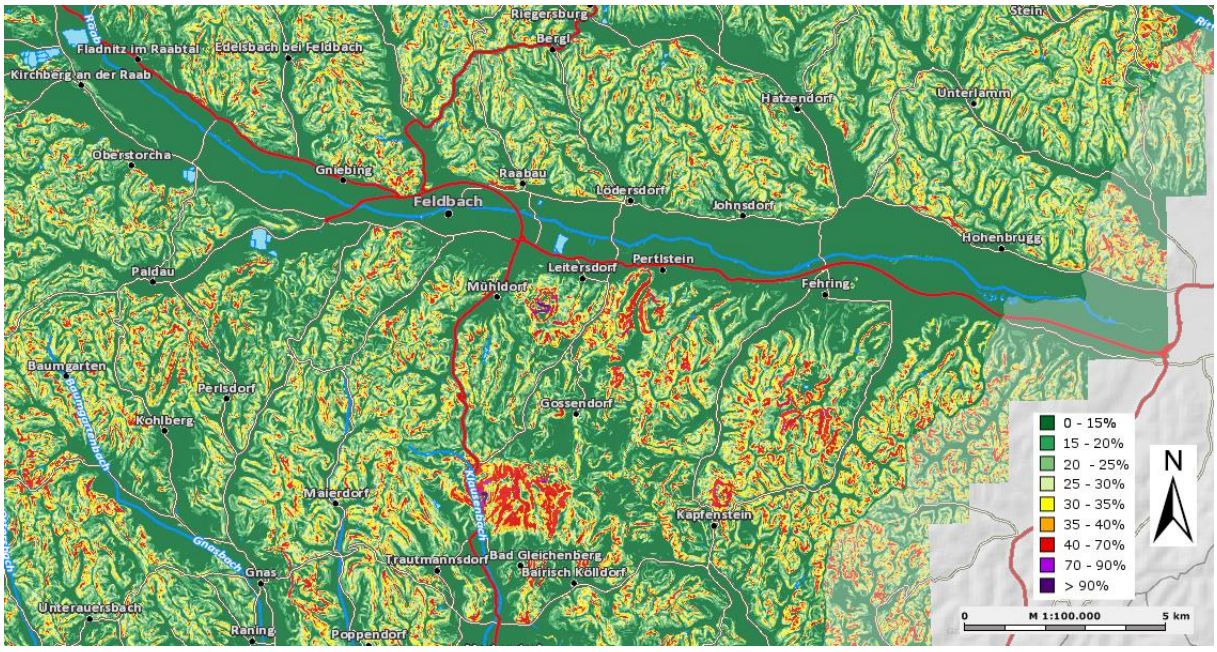


Abb. 14: Geländeneigung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet in [%]. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Für die geländeklimatischen Analysen kann also hinsichtlich der Hangneigungen, Tal- und Hügelformen festgehalten werden, dass die Bedingungen im gesamten Untersuchungsgebiet sehr ähnlich sind. Dies ist dahingehend ein Vorteil, da durch die Gleichartigkeit der Geländeformen auch Hänge oder Tallagen ohne Messstation ähnliche Bedingungen aufweisen sollten.

3.3 Bodenverhältnisse

Die Bodenverhältnisse stellen kein Kernthema dieser Arbeit dar, sind aber dennoch ein wichtiger Faktor beispielsweise für die Karte der potentiellen Weinbaugebiete und die allgemeine Vegetation in der Region. Diese wird zwar in der Klimatopkarte nicht direkt berücksichtigt, spielt aber dennoch eine Rolle hinsichtlich der Kaltluftprozesse (Stauwirkung, Kaltluftentstehung).

Die Abb. 15 zeigt die Bodentypen der Region mit dazu gehörenden Erläuterungen, die aus den abrufbaren Zusatzangaben des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) und des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) (2011) stammen.

Das breite Raabtal ist zu einem großen Teil in blauen Farbtönen dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen schwach vergleyten, kalkfreien Auboden, der in kalkfreien Gley übergeht. Der Gley tritt vorwiegend auf flachen Schwemmfächern auf, der auf leicht geneigten, angrenzenden Flächen in Pseudogley übergeht. Im Bereich des Riedellandes herrschen Braunerde, Bodenformkomplexe (kleinflächig schnell wechselnde Böden) und sogenannte untypische Böden (Erscheinungsbild wurde entweder aufgrund besonderer lokaler Gegebenheiten oder beispielsweise durch menschlichen Einfluss verändert) vor. Stellenweise treten auch Reliktböden auf, die unter vorzeitlichen Klimabedingungen entstanden sind, sowie gering entwickelte Rohböden.

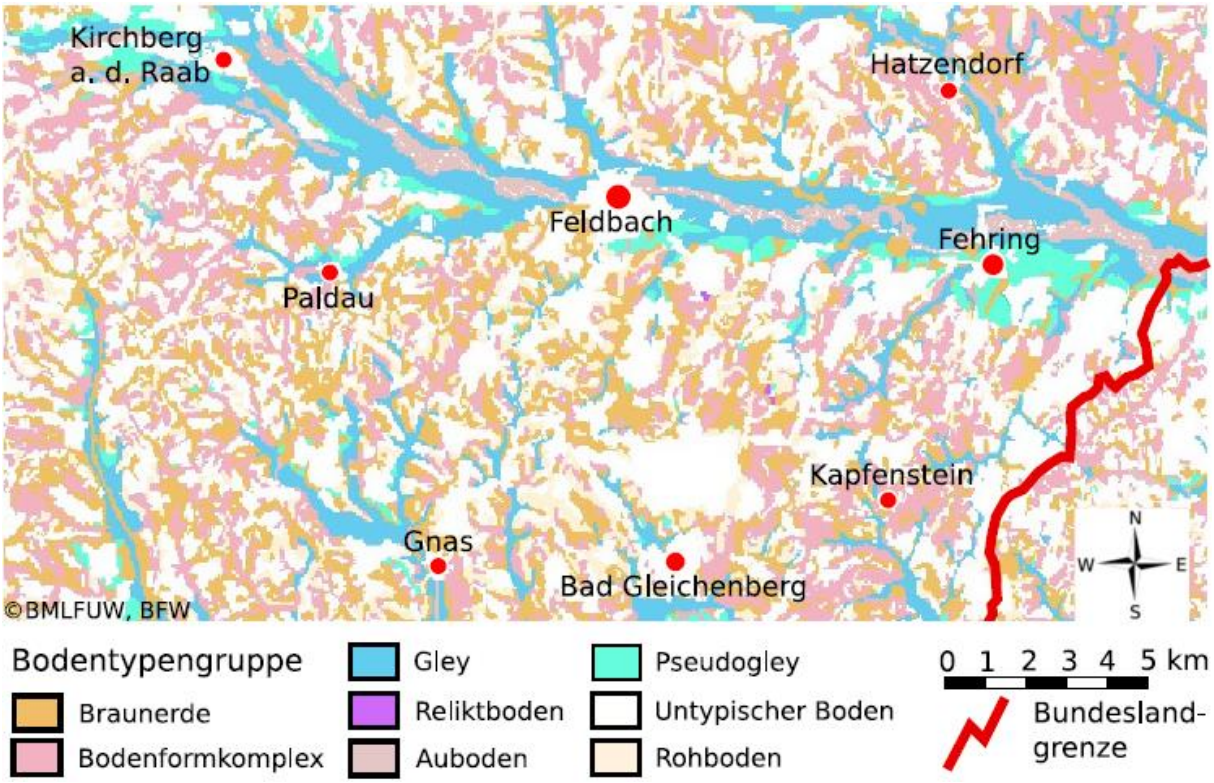


Abb. 15: Bodentypen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet. *(Quelle: KABAS 2011, S. 10 (nach Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) und Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) 2011); eigene Bearbeitung)*

3.4 Klimatische Verhältnisse

Die folgenden klimatischen Analysen und Beschreibungen stammen großteils aus WAKONIGG (1978), dem Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER, und PILGER 2010) sowie dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013). Zunächst erfolgt eine Charakteristik der ganzen Steiermark, bevor detailliert auf das Untersuchungsgebiet in der Südost-Steiermark eingegangen wird.

3.4.1 Klima der Steiermark

Das Klima in der Steiermark hängt im Wesentlichen von der Seehöhe und der Lage im Gelände bzw. Exposition ab. Die geographische Breite kann aufgrund der diesbezüglich geringen Breitenunterschiede zwischen dem Norden und dem Süden der Steiermark vernachlässigt werden.

Im Allgemeinen nimmt die Temperatur mit der Höhe ab, während die Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Windstärke und Niederschläge zunehmen (WAKONIGG 1978, S. 18). Die tiefsten Jahresmitteltemperaturen sind in der Steiermark im Bereich des Dachsteins in knapp 3000 m Seehöhe zu finden, die höchsten in den tiefgelegenen Regionen der Südost-Steiermark. Hinsichtlich der Lage im Gelände ist es notwendig, zwischen einem Becken-, Hang-, Gipfel-, Pass- und Plateauklima zu unterscheiden, wo auf gleicher Seehöhe bedeutende Unterschiede auftreten können. Im Bereich des Untersuchungsgebiets im Südosten der Steiermark gibt es aufgrund der geringen Höhenunterschiede in dieser Hinsicht nur Hang- und Beckenklimate zu unterscheiden. Das Klima in einem Becken unterscheidet sich im Normalfall gegenüber jenem an einem Hang durch geringere Windgeschwindigkeiten, häufigeren Nebel und tiefere Nacht- und Wintertemperaturen (WAKONIGG 1978, S. 18). Die Exposition betreffend sind Süd-exponierte Hänge aufgrund der größeren Sonneneinstrahlung bevorzugt, was in wärmeren Temperaturen gegenüber Nord-exponierten Hängen resultiert. Diese kleinräumigen Unterschiede sind vor allem im Weinbaugebiet des südöstlichen Alpenvorlandes zu bemerken, wo der Weinbau vor allem auf Süd-exponierten Hängen betrieben wird, während an Nord-exponierten Hängen und in Becken Wiesen, Wald oder Ackerbau dominieren.

Die größten klimatischen Unterschiede entstehen bei autochthoner Witterung, welche in Kap. 6.7 genau beschrieben wird und ein Kernpunkt dieser Arbeit ist. Bei allochthoner Witterung hingegen werden kleinräumige Unterschiede weitestgehend ausgeglichen und überprägt. In dieser Hinsicht spielt auch das Großrelief, also in diesem Fall vor allem die nahen Alpengebirgszüge, eine wichtige Rolle indem es allochthone Witterungen ablenken oder modifizieren kann.

Als wesentliche Großräume, die das Klima der Steiermark beeinflussen, sind zunächst die Alpen zu nennen, die vor allem hinsichtlich des Niederschlags (Stauwirkung) entscheidend sind. Des Weiteren sind jene Gebiete, in denen Hoch- oder Tiefdruckgebiete entstehen und deren typische Wanderungen auch die Steiermark betreffen, von Bedeutung. Hochdruckgebiete bilden sich häufig über Skandinavien und dem osteuropäischen Raum sowie über West- und Nordeuropa aus; Tiefdruckgebiete entstehen in Südeuropa über den Meeren, wobei sich Zyklonen aus dem Mittelmeerraum für die Steiermark besonders intensiv auswirken können.

3.4.2 Klimalandschaften im Untersuchungsgebiet

WAKONIGG (1978, S. 375 ff.) nahm bereits vor 35 Jahren eine klimatische Einteilung der Steiermark vor, die heute noch allgemein gültig ist. Die Abgrenzungen der einzelnen Zonen sind wie in klimatischen Darstellungen üblich keine scharfen Linien, sondern sind in Form von allmählichen Übergängen zu verstehen (WAKONIGG 1978, S. 376). Diese Darstellung ist detaillierter als die aktuelle Darstellung im Digitalen Atlas der Steiermark, wodurch sie als Grundlage für die Analyse dieses klimatisch gesehen sehr kleinen Raums besser geeignet erscheint.

Die gesamte Steiermark wird in 22 verschiedenen Klimazonen beschrieben, wobei im Gebiet des WegenerNet-Messnetzes nur drei davon vorkommen. Die folgende Abb. 16 zeigt diesen Ausschnitt, wobei die „Talböden des Vorlandes“ in Pink, das „Übergangsklima der Terrassenstufe“ in Rosa sowie das „Klima des Riedellandes“ in Orange dargestellt werden. Das Raabtal ist als charakteristisches Element sofort erkennbar. An diese Zone schließt nördlich eher schmal, südlich etwas großflächiger das Übergangsklima der Terrassenstufe an; im Raum Bad Gleichenberg nimmt diese Zone einen breiteren Bereich ein. In höheren Lagen folgt schließlich die Zone des Riedelland-Klimas.

Abb. 16: Die Klimalandschaften im Untersuchungsgebiet des WegenerNet im Südosten der Steiermark. *(Quelle: WAKONIGG 1978; eigene Bearbeitung)*

Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Zonen, wobei vor allem hinsichtlich der Temperaturwerte beachtet werden muss, dass die Angaben aus WAKONIGG (1978) gut 35 Jahre alt sind und inzwischen aufgrund des Klimawandels allgemein etwas höher anzusetzen sind.

1) Die Talböden des Vorlandes

Dieser Bereich umfasst allgemein alle Talböden des Vorlandes unterhalb etwa 400 m Seehöhe, was im Untersuchungsgebiet vorwiegend auf das Raabtal mit Seitentälern anwendbar ist. Das Klima kann als sommerwarmes und winterkaltes Klima bezeichnet werden.

Die Temperaturen im Jänner liegen zwischen -3 und -4 °C, die im Juli zwischen 18 und 19 °C, das Jahresmittel bleibt unter 9 °C. Die mittleren absoluten Minima liegen zwischen -19 und -21 °C, die mittleren absoluten Maxima zwischen 31 und 32 °C. Die Nebel- und Inversionswahrscheinlichkeiten sind vergleichsweise hoch und die mittleren Windgeschwindigkeiten erreichen im Jahresmittel nur 1,0 - 1,4 m/s.

2) Das Übergangsklima der „Terrassenstufe“

Dieser Bereich liegt zwischen dem Talbodenklima und dem Riedelklima, wobei als Abgrenzung eine relative Höhe von 20 bis 100 m über den benachbarten Talböden festgelegt werden kann.

In dieser Zone werden weder die Ungunst der Talböden, noch die Gunst der Riedellagen voll erreicht. Das Klima kann als sommerwarm und mäßig winterkalt beschrieben werden.

Die Temperaturen im Jänner liegen zwischen -2 und -3 °C, die im Juli zwischen 18 und 19 °C, das Jahresmittel liegt um 9 °C. Die mittleren absoluten Minima liegen zwischen -16 und -19 °C, die mittleren absoluten Maxima zwischen 31 und über 32 °C. Die Nebelwahrscheinlichkeiten sind unterschiedlich, da die Gebiete teilweise schon über die Talnebel hinausragen, und die mittleren Windgeschwindigkeiten erreichen im Jahresmittel 1,1-2,1 m/s.

3) Das Klima des Riedellandes

Das Riedellandklima ist ein sommerwarmes, sehr wintermildes und thermisch stark ausgeglichenes Klima. Voraussetzungen sind eine relative Höhe von mindestens 100 m über den angrenzenden Talböden sowie eine nicht allzu hohe absolute Höhe im Sinne noch genügend großer Sommerwärme. Bei voller Ausbildung des Riedellandklimas liegen die Temperaturen im Jänner über -2 °C, im Juli über 19 °C, das Jahresmittel liegt über 9 °C. Die mittleren absoluten Minima liegen zwischen -13 und -14 °C, die mittleren absoluten Maxima zwischen 30 und über 31 °C. Die Nebelhäufigkeit nimmt nach oben hin zu, da diese Gebiete oft in die Nebelverdichtungszone hineinragen, während sich der Nebel im Tal zusehends lichtet. Die mittleren Windgeschwindigkeiten erreichen im Jahresmittel 1,5 - 3,0 m/s.

Diese Temperaturwerte werden in den Kap. 6 bzw. 12 im Rahmen der Erstellung der Klimatopkarte auf den neuesten Stand gebracht. Grundsätzlich kann man seit 1978 von rund 1 Kelvin Zunahme bei sämtlichen Werten ausgehen.

3.4.3 Relevante Klimaelemente

In diesem Kapitel werden die Kennzahlen ausgewählter Klimaparameter im Untersuchungsgebiet vorwiegend auf Basis des Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) beschrieben.

3.4.3.1 Globalstrahlung und relative Sonnenscheindauer

Hinsichtlich der Globalstrahlung, also der Summe aus Sonnen- und Himmelsstrahlung (die in Kap. 9.1 beschrieben wird), stellen sich die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet sehr einheitlich dar. Im gesamten Gebiet, ausgenommen sehr kleinräumiger Flächen mit etwas geringeren Werten, liegt die Globalstrahlung zwischen 1000 und 1200 kWh/m² pro Jahr (Land Steiermark 2013). Dies ist ein für die Steiermark sehr hoher Wert, nur in sehr wenigen

Gebieten wie beispielsweise im Bereich der Koralm oder des Zirbitzkogels werden noch höhere Werte erreicht.

Etwas anders ist die Situation bei der relativen Sonnenscheindauer, bei der die Einflüsse von geographischer Breite und Horizontüberhöhung hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den Werten anderer Orte nicht berücksichtigt werden. Diese ist laut Definition *„der Prozentsatz der tatsächlich beobachteten Sonnenscheindauer an der durch die vorher bestimmten Tagbogenlängen gegebenen effektiv möglichen Dauer“* (WAKONIGG 1978, S. 40). Im Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) wird die relative Sonnenscheindauer in fünf Zeiteinheiten von zwei oder drei Monaten unterteilt, wobei vier dieser Abbildungen für das Untersuchungsgebiet aufgrund fehlender Unterschiede keine Aussagen liefern. Nur im Zeitraum von November bis Dezember (siehe Abb. 17) gibt es nennenswerte Unterschiede. Vor allem aufgrund des Bodennebels weist das Raabtal mit seinen Seitentälern mit 25-30 % die niedrigsten Werte der ganzen Steiermark auf, während auf höher gelegenen Gebieten 30-35 % erreicht werden. Diese Werte sind im Vergleich zur Obersteiermark, wo in höheren Lagen durchgehend 40-45 % erreicht werden, immer noch niedrig; der Hauptgrund hierfür ist die häufige Bildung von Hochnebel über dem Vorland im Südosten (WAKONIGG 1978, S. 40). Im September und Oktober werden im gesamten Untersuchungsgebiet 45-48 % erreicht, von Jänner bis März 35-40 %, von April bis Juni 45-50 % und im Juli sowie August 54-60 % relative Sonnenscheindauer.

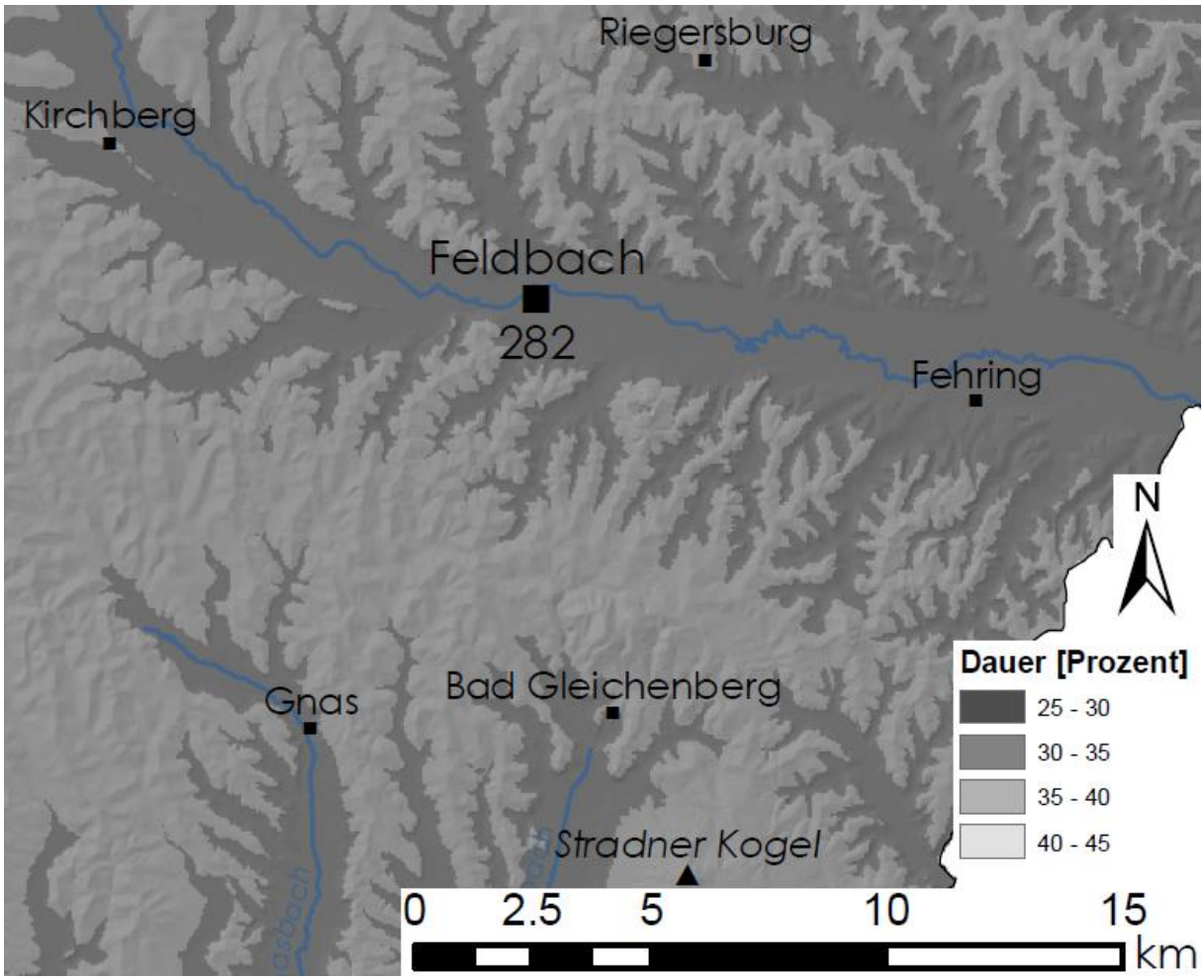


Abb. 17: Durchschnittliche relative Sonnenscheindauer im November und Dezember, Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

3.4.3.2 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist das zentrale Klimaelement dieser Arbeit und wird aus diesem Grund auch besonders ausführlich behandelt. Die folgenden Abbildungen stammen aus dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013), weiterführende Analysen aus WAKONIGG (1978).

Die **durchschnittliche Jahrestemperatur** ist ein sehr verallgemeinerter Hinweis auf die thermischen Verhältnisse an einem Ort, liefert ansonsten aber nur wenig Informationen. Eine grafische Darstellung dieses Faktors ist für das Untersuchungsgebiet wenig zielführend, da die gesamte Region im Bereich von 8-10 °C liegt (Land Steiermark 2013). Dieser Umstand resultiert vor allem aus den geringen Höhenunterschieden (die Seehöhe ist hier der entscheidende Faktor für die Temperaturunterschiede) und sehr ähnlichen Geländeformen in der Region, aber auch der vernachlässigbaren Ausdehnung des Gebietes hinsichtlich der geographischen Breite sowie den ähnlichen Bodenverhältnissen. Die wärmsten Gebiete

finden sich an Süd-exponierten Hängen wenigstens 200 m über dem Talboden, wo ein Jahresdurchschnitt von knapp unter 10 °C realistisch erscheint. Diese Einschätzung aus WAKONIGG (1978) wird in Kap. 6 behandelt und aufgrund der Entwicklungen der letzten Jahrzehnte dementsprechend nach oben korrigiert.

Der Jänner ist zwar nicht der Monat mit der geringsten Einstrahlung (sondern der Dezember), aufgrund der Verzögerung des Temperaturgangs aber regelmäßig der kälteste im Jahr. Mit der **mittleren Jännertemperatur** (Abb. 18) bekommt man also einen Eindruck über die Verhältnisse im Hochwinter, der im Untersuchungsgebiet im Vergleich zur restlichen Steiermark durchaus mild ausfällt. Neben der Seehöhe spielen vor allem die Geländeformen sowie Nebelereignisse und Inversionen eine wichtige Rolle, alle anderen Faktoren sind hinsichtlich der Temperaturgestaltung im Jänner zu vernachlässigen. Die Täler der Obersteiermark sind nicht nur aufgrund der größeren Seehöhe kälter als jene im Südosten, sondern spiegeln auch ihre Lage als inneralpine Täler und Becken mit häufiger Kaltluftansammlung wider. Die wärmsten Temperaturen mit -1 bis -2 °C findet man im Untersuchungsgebiet in einiger Höhe über den etwas kälteren Talböden, wobei auch kleine Taleinschnitte für kältere Bedingungen ausreichen.

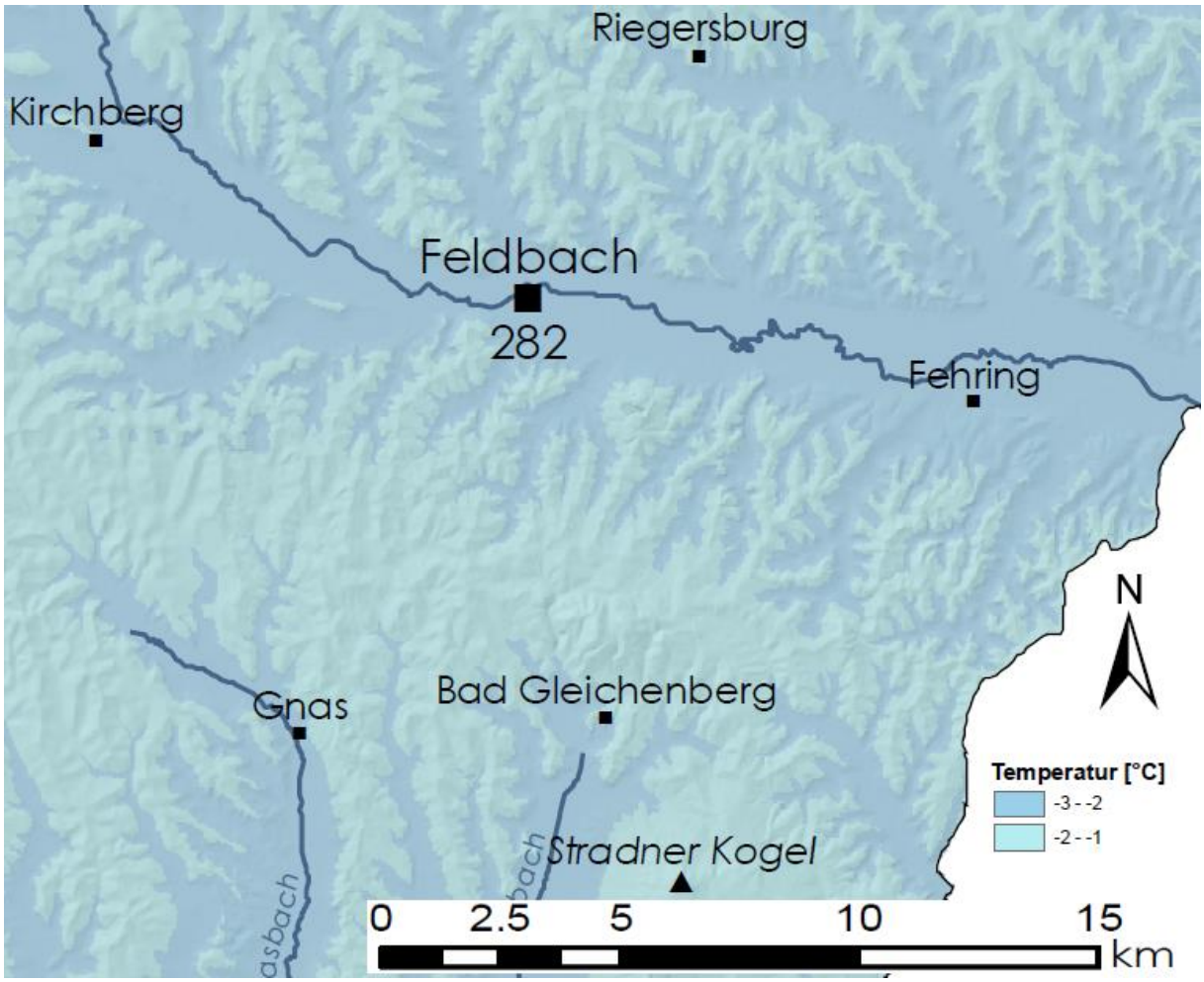


Abb. 18: Durchschnittliche Lufttemperatur in [°C] im Untersuchungsgebiet im Jänner, Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Der **Juli** ist im Normalfall der wärmste Monat des Jahres und somit das extreme Gegenteil zum Jänner. Die Strahlungsbilanzen sind hoch positiv, wodurch nur selten Inversionen und Nebel auftreten und die Täler nur mehr während weniger Nachtstunden kälter sind als die darüber liegenden Hänge. Dies kommt auch in der Abb. 19 mit der mittleren Julitemperatur gut zur Geltung – beinahe im gesamten Untersuchungsgebiet bewegen sich die Temperaturen zwischen 18 und 19 °C, nur in höheren Gebieten wie nördlich von Bad Gleichenberg oder dem nicht mehr im Untersuchungsgebiet befindlichen Stradner Kogel treten Temperaturen von 16-18 °C auf, stellenweise sogar etwas darunter. Die (niedrige) Seehöhe wird also zum alles bestimmenden Faktor, weswegen auch in der gesamten Obersteiermark keine Station nur annähernd an die wärmsten Regionen im Südosten des Bundeslandes herankommt.

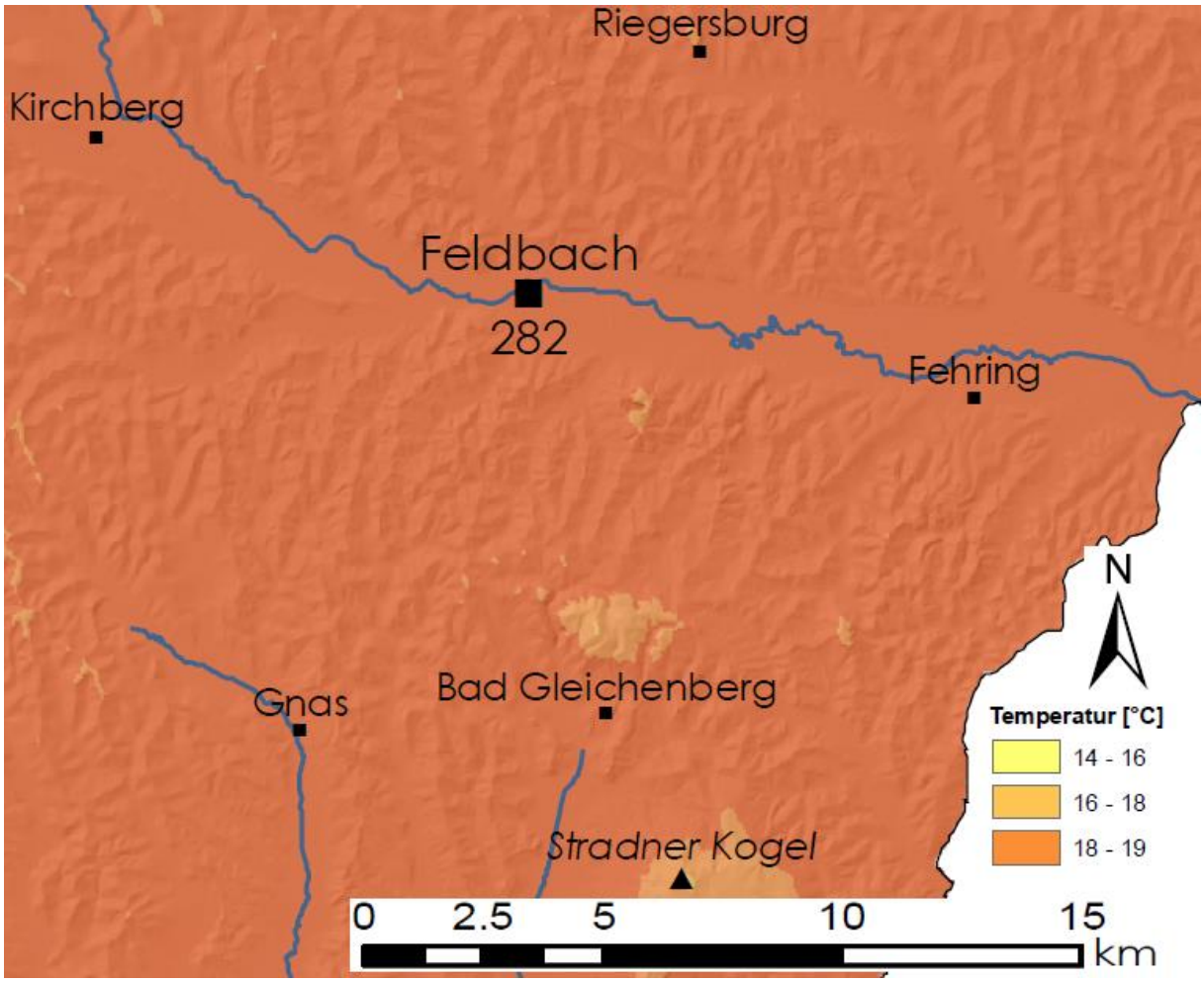


Abb. 19: Durchschnittliche Lufttemperatur in [°C] im Untersuchungsgebiet im Juli, Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013, eigene Bearbeitung)*

Die durchschnittliche **Jahresschwankung** der Temperatur ist laut Definition der Unterschied zwischen den Normalwerten des kältesten und wärmsten Monats, in der Steiermark also zwischen Jänner und Juli. Neben der Seehöhe ist das Gelände ein wichtiger Faktor, das aufgrund der verstärkt im Winter auftretenden Kaltluftansammlung in den Becken und Tälern vor allem im Jänner von großer Wichtigkeit ist. Die restlichen Einflussfaktoren spielen keine große Rolle. Dementsprechend beträgt die Jahresschwankung der Temperatur in den Tälern des Untersuchungsgebietes die für die Steiermark sehr hohen Werte zwischen 22 und 23 K, auf den Hängen und Riedelrücken werden 21-22 K erreicht (Abb. 20). Dies ist durch die oben erwähnte Kaltluftansammlung in den Tälern im Jänner zu erklären (Abb. 18), wo tiefere Temperaturen als auf den Hängen und Riedelrücken erreicht werden; im Juli sind die Werte im Untersuchungsgebiet annähernd isotherm (siehe Abb. 19).

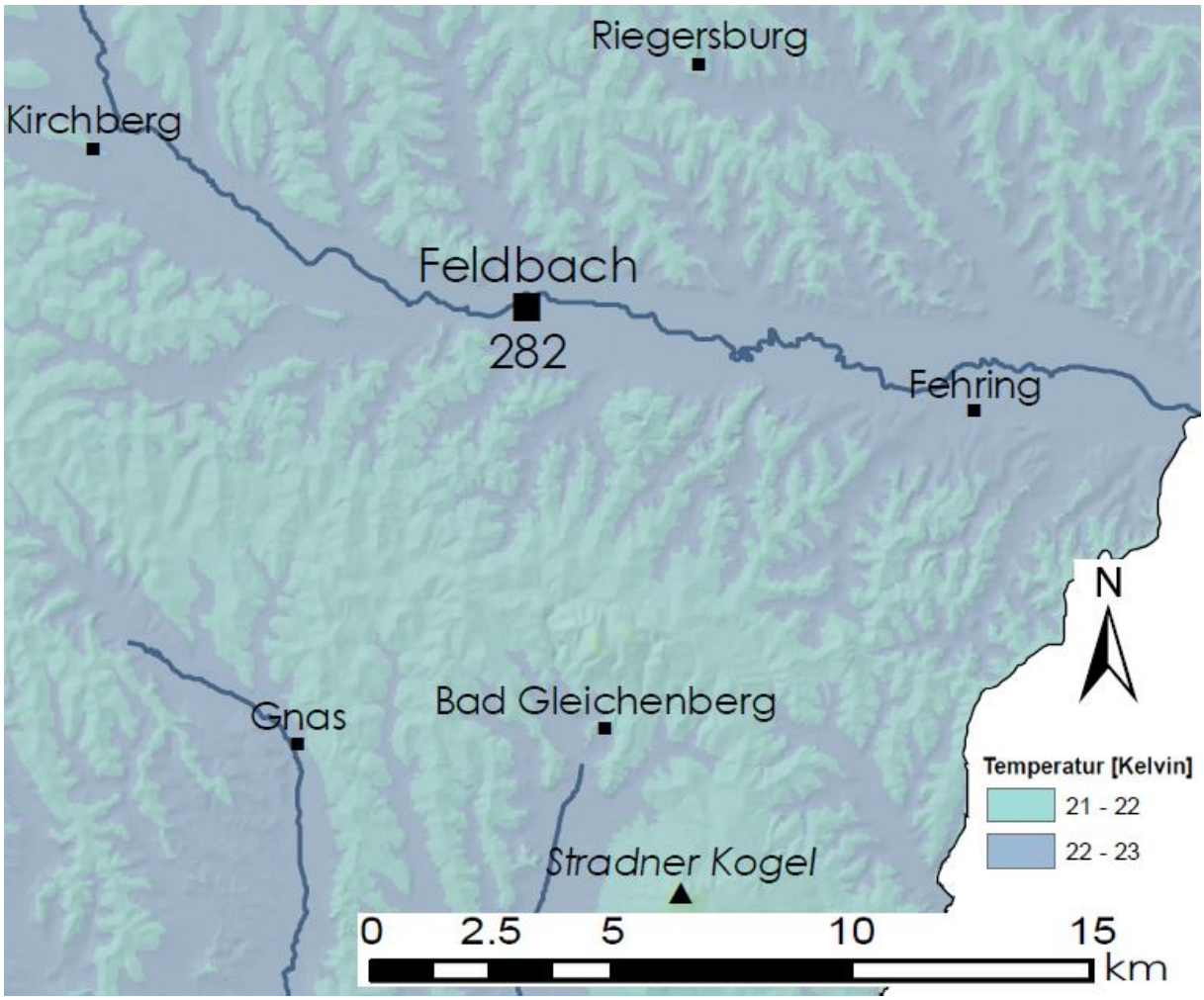


Abb. 20: Durchschnittliche Jahresschwankung der Lufttemperatur in [K], Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Die durchschnittliche **aperiodische Tagesschwankung** ist laut Definition die Differenz zwischen dem mittleren täglichen Minimum und dem mittleren täglichen Maximum, also den tatsächlich erreichten Extremwerten ohne Rücksichtnahme auf den Eintrittszeitpunkt derselben. Die Einflussfaktoren, die für das Zustandekommen der Tagesschwankung verantwortlich zeichnen, sind neben Seehöhe (Abnahme nach oben) und Gelände (Höchstwerte in Beckenlagen mit nächtlicher Kaltluftbildung) noch die Witterung und die Jahreszeit (wegen der Häufigkeit von Nebelbildung).

Im Untersuchungsgebiet werden in den Tallagen durchgehend Werte zwischen 10 und 12 K erreicht, auf den höher liegenden Hängen und Riedelrücken nur 8-10 K. Die höheren Werte bei den Tallagen entstehen vor allem durch die verstärkte Kaltluftansammlung und Nebelbildung in Bodennähe im Winter (Abb. 21).

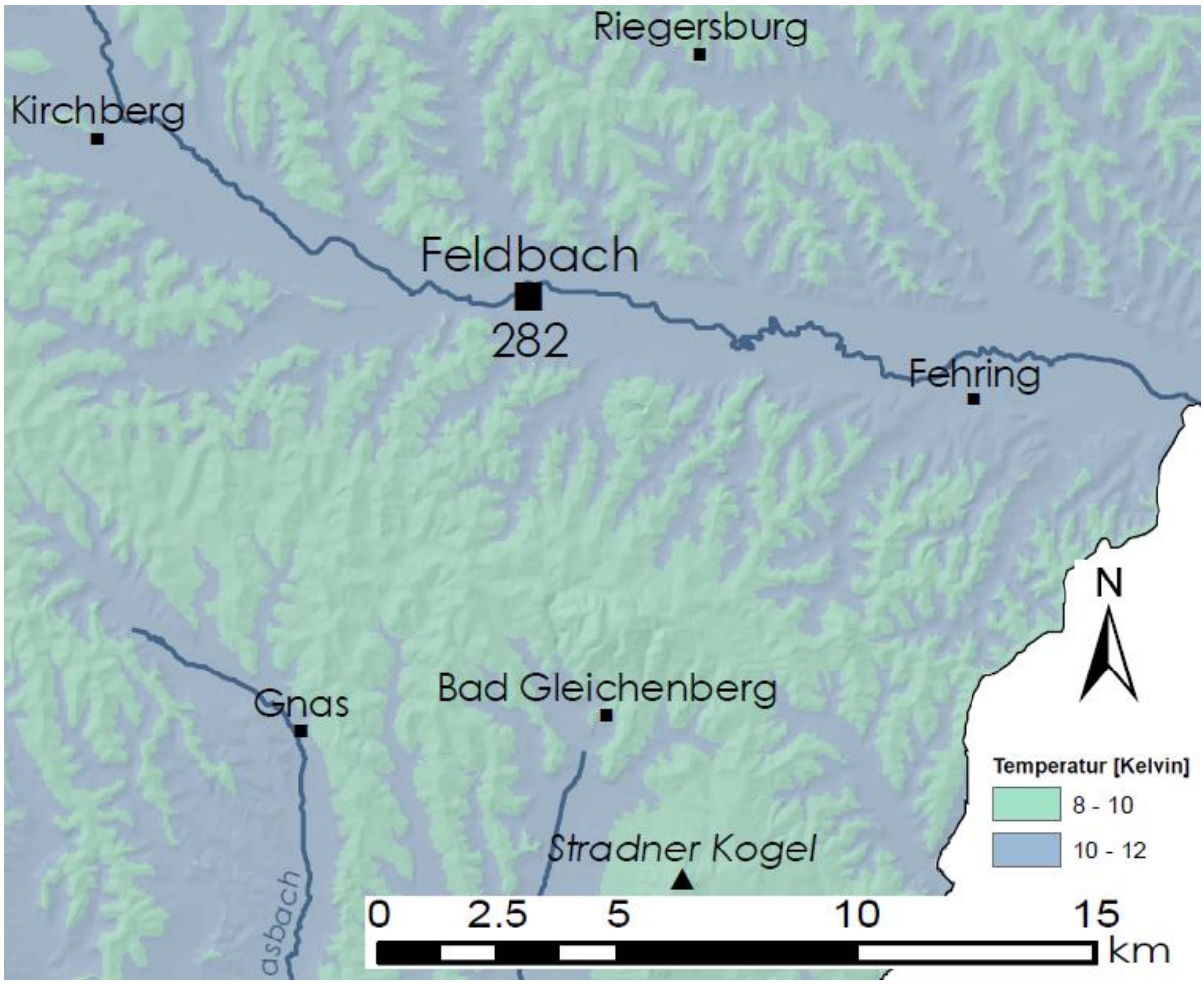


Abb. 21: Durchschnittliche aperiodische Tagesschwankung der Lufttemperatur in [K], Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Hinsichtlich der **Frosttage**, also Tage, an denen die Temperatur zumindest einmal Werte unter 0 °C annimmt (unabhängig vom Zeitpunkt des Eintretens), weisen die Tallagen im Untersuchungsgebiet mit 115-135 Tagen deutlich höhere Werte als auf den höher gelegenen Hanglagen und Riedelrücken auf, wo 100-115 Tage dieser Kategorie entsprechen, stellenweise sogar unter 100 Tage. Diese (hauptsächlich inversionsbedingte) Abnahme der Frosttage nach oben kommt in der Steiermark fast ausschließlich im Süden vor. Im Gegensatz dazu gibt es im Untersuchungsgebiet bei den **Eistagen**, also Tagen wo die Temperatur niemals positive Werte erreicht, kaum Unterschiede zwischen den Tal- und Hanglagen. Überall gibt es 15-25 Eistage im Jahresdurchschnitt. Dies resultiert aus der ungleich höheren tageszeitlichen Erwärmung in Tal- und Beckenlagen gegenüber höher gelegenen Gebieten, was somit jene Tage ausgleicht, an denen ganztägig Bodennebel und Inversionen bestehen bleiben.

Hinsichtlich der **Sommertage**, also Tage, an denen die Temperatur 25 °C erreicht oder überschreitet, ist die Seehöhe der entscheidende Faktor. Im Untersuchungsgebiet wird

demnach die höchste Anzahl mit 60-70 Tagen pro Jahr im unteren Bereich des Raabtales (niedrigste Seehöhen um 280 m) erreicht. Auf den angrenzenden Riedeln gibt es meist 50-60 Sommertage, nördlich von Bad Gleichenberg am Kapfensteiner Kogel gibt es sogar Stellen mit unter 40 Sommertagen. Bezüglich der **Tropentage**, also Tage, an denen die Temperatur 30 °C erreicht oder überschreitet, gilt ähnliches wie für die Sommertage. Wieder ist die Seehöhe der entscheidende Faktor, und im Untersuchungsgebiet wird die höchste Anzahl mit 8-10 Tagen pro Jahr in den Tallagen erreicht. Auf den Riedeln fallen meist 6-8 Tage pro Jahr in diese Kategorie, am Kapfensteiner Kogel sogar stellenweise unter vier Tage (sämtliche Angaben aus Land Steiermark 2013).

Hitzestress und Inversionen

Auch bioklimatische Faktoren wie Hitzestress (im Sommer) und Inversionen (im Winter) sind vorrangig von der Lufttemperatur abhängig. Unter Bioklima versteht man die „Summe aller auf lebende Organismen wirkenden Faktoren des Klimas“, wobei in diesem Fall die Wirkung auf den Menschen betrachtet wird (vgl. HUMBOLDT 1845, S. 331).

WINKLER (2002) hat die Zonen des Bioklimas in Österreich analysiert, welche für das Untersuchungsgebiet (links Winter und rechts Sommer) in der folgenden Abb. 22 dargestellt werden. Das Untersuchungsgebiet liegt also im Winter großteils in einem Bereich hoher Inversionsgefährdung, nur die höheren Riedellagen sind davon nicht betroffen. Dadurch tritt in dieser Jahreszeit vermehrter Kältestress in den Tälern auf und die Neigung zu für das Wohlbefinden belastender Nebeldecken nimmt zu. Im Sommer sind nur die höheren Riedellagen von Wärmestress nicht belastet. Die Riedellagen weisen also in beiden Jahreszeiten ein grundsätzlich angenehmeres Bioklima auf.

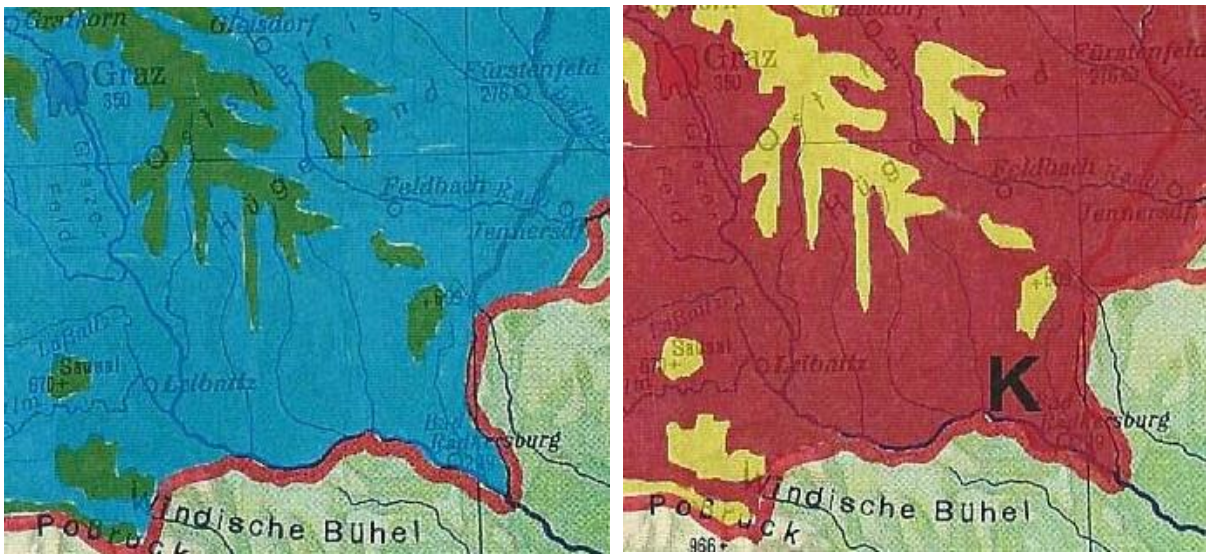


Abb. 22: Bioklimakarten der Südost-Steiermark im Winter (links) und Sommer (rechts). Blaue Flächen bedeuten „außeralpine Flachländer mit hoher Inversionsneigung“ und grüne Flächen „Riedelländer mit geringer Inversionsgefährdung. Rote Flächen bedeuten „Zonen mit zunehmendem Wärmestress“ und gelbe Flächen „randalpine Täler mit geringem Wärmestress tagsüber und Abkühlung in der Nacht“. *(Quelle: WINKLER 2002)*

3.4.3.3 Relative Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und Nebel

Die **relative Luftfeuchtigkeit** gibt für eine gegebene Temperatur den Prozentsatz des Wasserdampfes an, der hinsichtlich des maximal möglichen Wasserdampfes in der Luft vorhanden ist. Bei wärmeren Temperaturen kann aus physikalischen Gründen mehr Wasserdampf aufgenommen werden. In tieferen Lagen sind durch die strahlungsbedingte Erwärmung des Bodens sowohl im Tages-, als auch Jahresverlauf größere Schwankungen als in der Höhe zu beobachten.

Die Tab. 6 zeigt am Beispiel Leibnitz, das in einer Seehöhe von 270 m liegt und etwa 20 km vom Untersuchungsgebiet entfernt liegt, den tages- und jahreszeitlichen Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit. Die niedrigsten Werte werden im Frühling festgestellt, vor allem der April sticht auch mit vergleichsweise niedrigen Werten in der Nacht hervor; das Minimum wird am Nachmittag mit knapp unter 50 % erreicht. Das Maximum liegt mit über 95 % in den frühen Morgenstunden im September bzw. Oktober. Im Winter bleiben die Werte aufgrund der geringeren Wirkung der Sonneneinstrahlung auch tagsüber generell über 70 %. Da Leibnitz mit 270 m etwas niedriger liegt als die meisten Stationen im Untersuchungsgebiet, ist dort von ausgeglicheneren Werten auszugehen, die sich in einer um wenige Prozent reduzierten Tages- und Jahresschwankung niederschlägt. Bei der höchsten Station des WegenerNet-Gebietes am Gleichenberger Kogel ist beispielsweise kaum mit Werten unter 55 % zu rechnen.

Tab. 6: Jahres- und Tagesgang der Relativen Feuchte an der Station Leibnitz (270 m) für die Periode 1991-2000.

Uhr [MEZ]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
1	93,2	88,6	85,0	83,2	87,5	91,0	89,7	92,3	93,8	93,1	91,1	94,0	85,2	91,0	92,7	91,9	90,2
2	93,3	89,0	87,0	85,4	89,0	92,2	91,2	93,3	94,3	93,9	91,4	93,8	87,1	92,2	93,2	92,0	91,1
3	93,4	89,3	88,1	86,9	90,4	93,2	92,3	94,2	94,8	94,4	91,8	94,2	88,5	93,2	93,7	92,3	91,9
4	93,4	90,0	89,6	88,5	91,7	93,8	93,0	94,6	94,9	94,7	92,2	94,5	89,9	93,8	93,9	92,6	92,6
5	93,6	90,3	90,2	89,8	92,7	93,9	93,6	94,9	95,2	94,7	92,6	94,5	90,9	94,2	94,2	92,8	93,0
6	93,5	91,0	91,0	89,9	90,7	90,3	91,6	94,4	95,7	95,2	92,7	94,3	90,5	92,1	94,5	93,0	92,5
7	93,5	91,3	90,2	84,9	83,6	83,8	85,0	89,1	94,3	95,3	92,6	94,3	86,2	85,9	94,1	93,0	89,8
8	93,5	90,5	85,3	77,3	76,0	76,3	77,8	81,6	89,1	93,3	92,2	94,5	79,6	78,5	91,5	92,8	85,6
9	93,0	85,6	78,4	68,9	68,3	69,4	70,4	74,1	81,3	88,7	90,1	94,2	71,9	71,3	86,7	90,9	80,2
10	91,1	76,8	70,1	62,6	62,4	64,6	64,4	67,0	73,3	82,8	86,5	92,8	65,0	65,3	80,9	86,9	74,5
11	88,0	68,4	63,5	57,5	58,0	60,5	59,9	61,6	67,1	76,6	82,0	90,2	59,7	60,7	75,2	82,2	69,4
12	84,5	60,6	58,8	53,9	55,3	57,7	57,4	58,7	62,2	70,0	77,8	86,3	56,0	57,9	70,0	77,2	65,3
13	81,4	54,7	55,8	51,9	52,9	55,9	55,6	56,5	59,3	65,6	74,6	83,3	53,5	56,0	66,5	73,1	62,3
14	78,8	51,8	53,5	50,1	52,1	55,1	54,9	55,0	58,1	63,8	72,8	81,5	51,9	55,0	64,9	70,7	60,6
15	78,5	50,9	52,7	49,2	52,7	56,2	55,1	55,7	58,2	63,9	72,6	81,7	51,5	55,7	64,9	70,4	60,6
16	79,8	52,2	53,1	49,7	53,9	57,3	55,9	57,0	60,0	66,1	74,7	84,1	52,3	56,7	66,9	72,0	62,0
17	83,2	56,7	54,9	51,6	55,2	59,4	57,8	59,2	64,2	72,2	78,9	87,4	53,9	58,8	71,7	75,8	65,1
18	86,8	64,4	59,1	54,0	57,2	62,6	61,0	63,5	71,5	80,6	82,8	89,7	56,8	62,4	78,3	80,3	69,4
19	88,6	71,2	64,7	58,6	61,6	66,3	65,5	71,0	80,1	85,5	85,6	91,0	61,6	67,6	83,8	83,6	74,2
20	89,9	76,2	69,9	64,5	68,2	73,1	72,8	79,0	85,2	88,1	87,1	91,9	67,6	75,0	86,8	86,0	78,8
21	91,0	80,0	74,3	69,4	74,6	79,2	79,5	83,6	88,5	89,8	88,8	92,7	72,8	80,8	89,0	87,9	82,6
22	91,5	82,7	77,8	74,2	79,7	83,7	83,4	86,9	90,6	90,8	89,8	93,2	77,2	84,7	90,4	89,1	85,4
23	92,3	85,2	80,8	77,7	82,9	87,0	86,1	89,0	92,1	91,8	90,6	93,4	80,5	87,4	91,5	90,3	87,4
24	92,6	87,3	83,1	80,7	85,6	89,6	88,6	91,0	93,1	92,5	91,1	93,5	83,1	89,7	92,3	91,1	89,1

Quelle: Land Steiermark 2013

Hinsichtlich der **Bewölkung** gibt es im Untersuchungsgebiet leider keine Messstation, bei der die Wolkenklassifikation in hoher zeitlicher Auflösung und unter Berücksichtigung von drei Wolkenstockwerken vorgenommen wird. Daher können nur die Angaben der Klimabeobachter herangezogen werden, die drei Mal am Tag den Bedeckungsgrad des Himmels in Zehnteln schätzen. Die auf diese Weise entstehenden Mittelwerte geben aber oft kein realistisches Bild der Verhältnisse vor Ort wieder; dieses statistische Problem entsteht dadurch, dass die häufigsten Bedeckungsgrade 10/10 (bedeckt) gefolgt von 0/10 (wolkenlos) sind. Der Mittelwert wäre in diesem Beispiel ein Wert von 5/10, also ein mäßig bewölkter Himmel, der so nie zu beobachten war. Für die Station Bad Gleichenberg, die sich am südlichen Rand des Untersuchungsgebiets befindet, wird das Maximum der Bewölkung im Winter mit 63 % und das Minimum im Sommer mit 50 % angegeben (Land Steiermark 2013). Die verstärkt auftretende Konvektionsbewölkung im März und April sorgt mit knapp 59 % für ein sekundäres Maximum im Frühling. Bad Gleichenberg liegt etwas außerhalb der Gebiete mit häufigem Bodennebel, wodurch beispielsweise für das Raabtal höhere Werte in den Wintermonaten angenommen werden können.

Dies kommt auch bei der Analyse der Tage mit **Nebel** gut zum Vorschein. Vor allem der Bodennebel, der sich bevorzugt bei autochthoner Witterung in der Nacht bildet, ist für diese Arbeit von entscheidender Wichtigkeit. Der Nebel bleibt in der Steiermark nur sehr selten den ganzen Tag über bestehen und tritt vorwiegend in den Tälern des Vorlandes im Südosten sowie im Raum Graz auf. In Bad Gleichenberg gibt es im Jahresschnitt 53 Tage mit Nebel, wobei 23 davon auf den Herbst und 18 auf den Winter fallen. Im Frühling und Sommer gibt es nur an jeweils etwa sechs Tagen Nebel. Für die Stationen im Raabtal ist mit einer höheren Anzahl an Nebeltagen zu rechnen. Im Vergleich dazu gibt es an der Station Graz Flughafen an fast 150 Tagen im Jahr Nebel, auch die nicht weit vom Untersuchungsgebiet entfernte Station Bad Radkersburg weist mit knapp 82 Tagen einen deutlich höheren Wert auf (Land Steiermark 2013).

3.4.3.4 Niederschlag und Schneebedeckung

Laut dem Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 197) lauten die Kriterien für das Zustandekommen der Höhe des Jahresniederschlags (in absteigender Wichtigkeit) wie folgt:

1) Zunahme der Niederschläge mit zunehmender Seehöhe, wobei für das Alpenvorland der Steiermark ein Gradient von 68 mm pro 100 m zutrifft.
2) Abnahme von außen nach innen im Sinne des zentral-periphären Formenwandels.
3) Im Süden der Steiermark Zunahme nach Süden aufgrund des Einflusses der Mittelmeerzyklonen.
4) Lokale Reliefeinflüsse wie die Stauwirkung.

Der Jahresgang des Niederschlags ist von vier Faktoren abhängig (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 195):

- Dem Precipitable Water, also der in der Atmosphäre verfügbaren und für den Niederschlag verfügbaren Wasserdampfmenge;
- Der Häufigkeit der die Steiermark beeinflussenden Zyklonen;
- Der jahreszeitlich unterschiedlichen Wirkung der Stau-Wetterlagen;
- Der Häufigkeit von Konvektionsniederschlägen.

Das Precipitable Water ist von der Temperatur abhängig und hat ihr Maximum im Sommer, was bereits die Niederschlagsverteilung in der Steiermark mit einem Sommermaximum erklärt. Im Raum des Untersuchungsgebietes gibt es einen herbstlichen Überhang der

Niederschläge, was mit der Häufung der Mittelmeerzyklonen in dieser Zeit zusammenhängt; im Frühjahr überwiegen hingegen die Nordstaulagen. Für die Stationen im Talbereich des Untersuchungsgebietes ergibt dies gemessene Jahressummen von 780 mm (Fehring im Osten) bis 830 mm (Bad Gleichenberg im Süden).

Mit gut 300 mm fällt dabei mehr als ein Drittel des Gesamtniederschlags im Sommer mit dem Maximum entweder im Juni oder Juli, der Herbst hat mit gut 200 mm etwas mehr Niederschlag als der Frühling; im Winter fällt mit rund 100 mm deutlich am wenigsten Niederschlag, wobei das Minimum mit knapp 30 mm auf den Jänner fällt. In höheren Gebieten steigt die Niederschlagssumme auf über 900 mm im Jahr. Diese Werte sind nicht windkorrigiert.

Die Abb. 23 zeigt die Jahressummen des Niederschlags im Untersuchungsgebiet, wobei die Stationswerte in dieser Darstellung windkorrigiert sind; dies bedeutet vor allem für höher gelegene Stationen eine deutliche Korrektur der Messwerte nach oben. Die Talböden erreichen somit 800-900 mm, die höher gelegenen Riedel bis zu 1000 mm Niederschlag im Jahr; am Kapfensteiner Kogel nördlich von Bad Gleichenberg werden sogar Werte zwischen 1000 und 1100 mm angegeben.

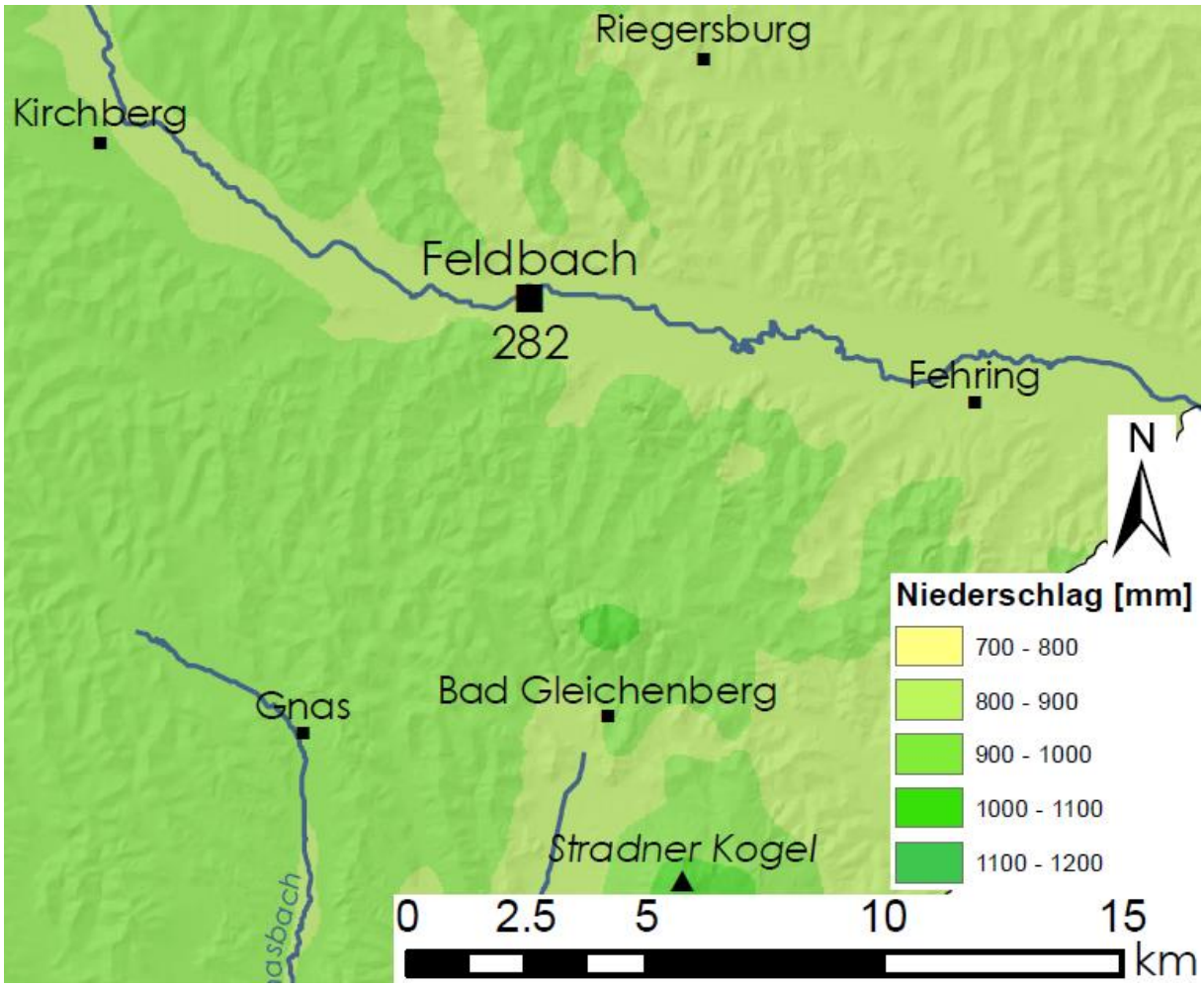


Abb. 23: Durchschnittliche (windkorrigierte) Niederschlagssumme im Jahr in [mm], Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Niederschlagssummen in der Kernzeit der Vegetationsperiode (von Mai bis September) betragen im Untersuchungsgebiet durchgehend zwischen 500 und 600 mm. Diese Niederschläge sind vor allem für die Vegetation und in weiterer Folge für die Landwirtschaft von großer Bedeutung.

Für diese Arbeit ist auch die Anzahl der Tage mit **Schneedecke** wichtig, die in Abb. 24 dargestellt wird. Die Werte liegen durchwegs zwischen 25 und 50 Tagen im Jahr, südlich von Bad Gleichenberg am südlichen Rand des Untersuchungsgebietes sinken die Werte sogar unter 25 Tage. Leider können aufgrund der Einteilung der Tage mit Schneedecke in 25-Tages-Schritten in diesem Gebiet kaum lokale Unterschiede ausgemacht werden. Allgemein kann festgehalten werden, dass auf den Riedeln ein milderes Klima vorherrscht (am Stradner Kogel südlich des Untersuchungsgebietes werden durchschnittlich knapp 36 Tage mit Schneedecke erreicht), Talstationen mit häufigem Bodennebel erreichen höhere Werte (Fehring im Osten des Untersuchungsgebietes knapp 52 Tage).

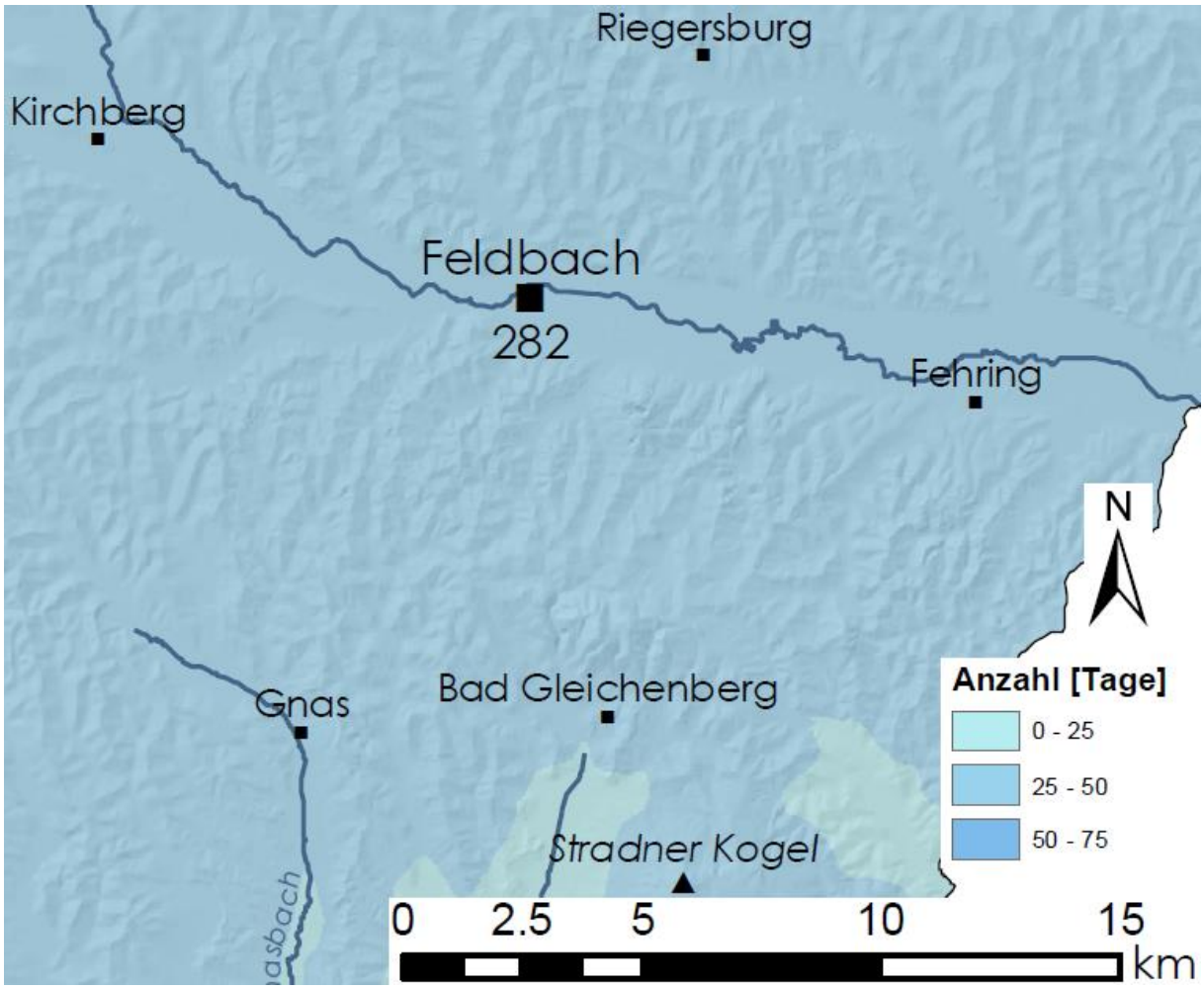


Abb. 24: Durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke in [d], Periode 1971 – 2000. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

3.4.3.5 Windverhältnisse

Die Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Messnetzes wurden in der Arbeit von OBERTH (2010) bereits ausführlich behandelt. In seiner Arbeit werden die Windverhältnisse des Jahres 2008 analysiert, welche aufgrund der zu erwartenden geringen Variabilität der Windparameter auch für den Untersuchungszeitraum von 2007-2011 als Grundlage herangezogen werden können.

Im Südoststeirischen Riedelland herrschen tagsüber meist Strömungen aus Süd bis Südost vor, in der Nacht sorgt der Gebirgsrandwind für geringer mächtige und weniger ausgeprägte Strömungen aus Nord bis West. Damit das zutrifft, müssen autochthone Bedingungen vorherrschen, da sonst Advektionswetterlagen das Geschehen überprägen.

Die Abb. 25 zeigt die durchschnittliche Windrichtungsverteilung des Jahres 2008 (OBERTH 2010). Die Stationen in Tallage, die in der Grafik mit einem grünen Mittelpunkt markiert und nur im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets zu finden sind, zeigen eine stark

reliefabhängige Windrichtungsverteilung. Vor allem in der Nacht ist der Talabwind die dominierende Situation. Tagsüber ist ebenfalls das Relief der wichtigste Faktor, aber meist nicht so ausgeprägt wie in der Nacht; der Talaufwind dominiert zwar weitestgehend, was aber beispielsweise im Falle der Station 044 nicht zutrifft. Die Windparameter werden an dieser Station in einer Höhe von 55 m über Grund aufgenommen, wodurch das Relief gegenüber den anderen, in 10 m über Grund installierten Stationen an Bedeutung verliert; dies ist auch an der äußerst niedrigen Kalmenhäufigkeit (etwas mehr als 8 %) sowohl in der Nacht als auch am Tag zu sehen, da die Windgeschwindigkeit im Normalfall mit der Höhe zunimmt. Mit knapp 6 % weist nur die Station 074 niedrigere Werte auf, die durch die Kammlage weitestgehend frei angeströmt werden kann.

Die fünf Stationen in Hanglage, mit einem gelben Mittelpunkt markiert, zeigen von der Windrichtungsverteilung her ein etwas anderes Bild. Auch hier dominiert das Relief die Richtung mit Talabwind in der Nacht und tagsüber schwächer ausgeprägtem Talaufwind, aber die Unterschiede sind viel geringer und die Verteilung ist viel einheitlicher als bei den Stationen in Tallage. Wichtig sind hier die Kalmenhäufigkeiten, wo sich deutliche Unterschiede zwischen der Nacht und dem Tag zeigen. Station 139 weist beispielsweise in der Nacht eine Kalmenhäufigkeit von knapp 60 % auf, was den höchsten Wert darstellt; tagsüber sind es hier nur etwa 28 %. Tagesperiodische Hangwinde scheinen keinen großen Einfluss zu haben, wobei die Stationen in 10 m Höhe über Grund befestigt sind; in Bodennähe würde sich wohl ein anderes Bild abzeichnen.

Die beiden Stationen in Kammlage zeigen ein sehr unterschiedliches Bild. Die Station 037 zeigt tagsüber eine dominante Anströmung aus Süd, in der Nacht ist das Verhältnis von Süd / Südwest zu Nord / Nordost ein sehr ausgeglichenes. Station 074 liegt von der Seehöhe her am höchsten, womit die relativ reliefunabhängige Verteilung erklärt werden könnte. Hier ist ein direktes Anströmen möglich, was auch die Kalmenhäufigkeit auf unter 6 % drückt. An Station 037 haben die Kalmen eine ähnlich große Häufigkeit wie bei den Stationen in Hanglage, was für eine Station in Kammlage eher ungewöhnlich ist.

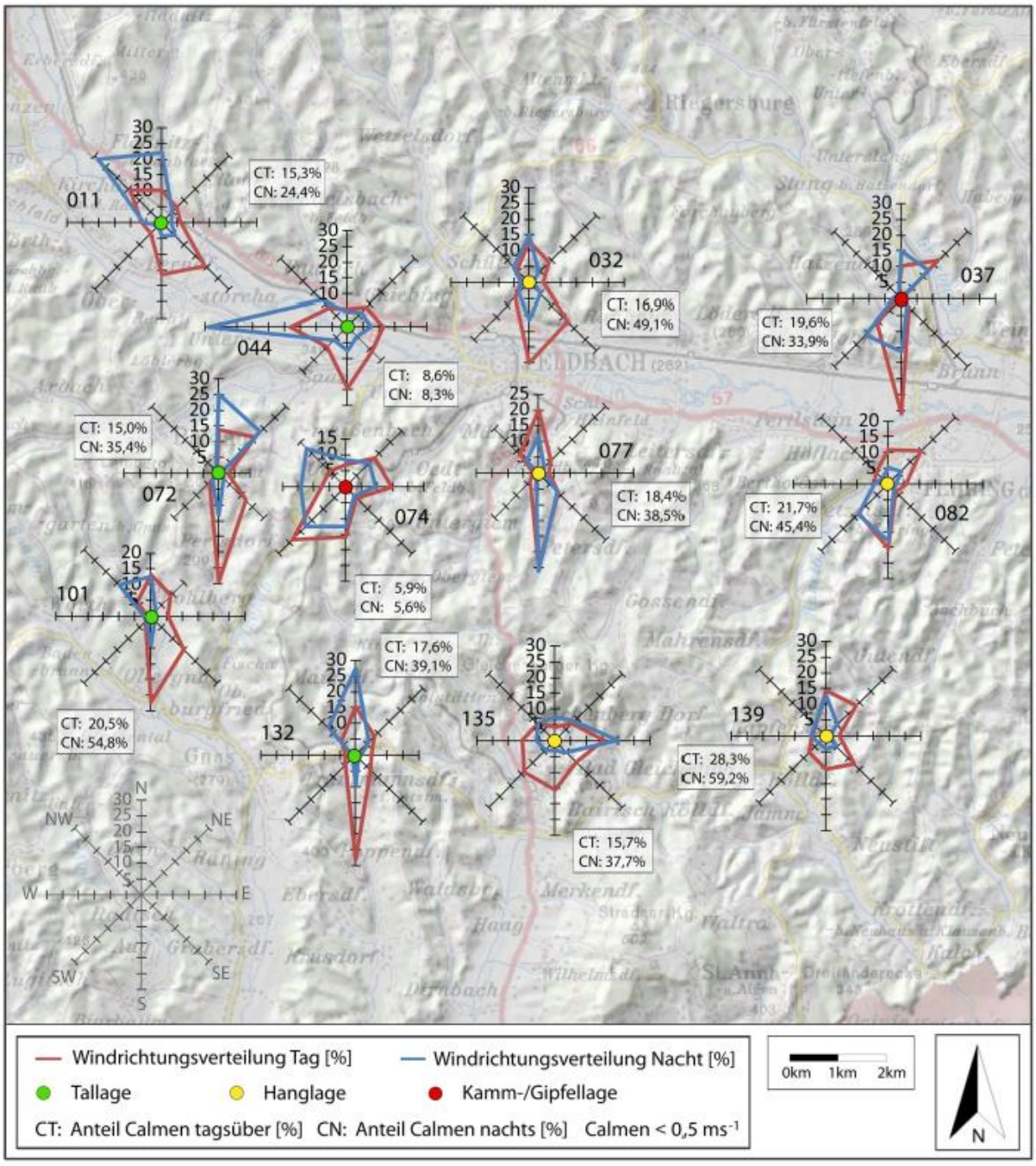


Abb. 25: Die Verteilung der Windrichtung im Jahresmittel in [%], unterteilt in Tag (06-18 Uhr) und Nacht (18-06 Uhr) inkl. Kalmenanteil (Windgeschwindigkeit <0,5 m/s) und Hanglage (farblich markiert). *(Quelle: OBERTH 2010, S. 48; Datengrundlage: Wegener Center 2013)*

Die Abb. 26 zeigt als Vergleich eine Auswertung der Windparameter an Tagen mit autochthoner Witterung. Dafür hat OBERTH (2010) insgesamt 34 Tage im Zeitraum von 01.01. - 31.12.2008 ausgewählt, jeweils 17 im Sommer- und Winterhalbjahr.

Bei den Stationen in Tallage kann eine Verstärkung der tageszeitlich alternierenden Windrichtungen festgestellt werden, wodurch die anderen Windrichtungen prozentuell

abnehmen. Des Weiteren kann eine Zunahme der talachsenparallelen Windrichtungen beobachtet werden, wodurch die Hauptwindrichtungen sowohl tagsüber, als auch in der Nacht mehr als 30 % erreichen. Die Station 044 im Raabtal erreicht den höchsten Wert mit knapp 75 %, wobei hier wieder der Faktor der großen Höhe über Grund (55 m) beachtet werden muss. Station 101 weist in der Nacht einen sehr hohen Kalmenanteil von fast 80 % auf.

Auch bei den Stationen in Hanglage kann eine deutliche Steigerung des Kalmenanteils in der Nacht festgestellt werden, wobei überall ein Anteil von über 50 % erreicht wird. Station 139 weist sogar einen Kalmenanteil von knapp 90 % auf. Im Vergleich mit der Abb. 25 wird klar, dass die Windrichtungen aus südlichen Sektoren merklich zugenommen haben.

Bei den beiden Stationen in Kammlage zeigt sich ein ähnliches Bild: die Hauptwindrichtungen treten verstärkt in Erscheinung, was die tageszeitlichen Unterschiede im Vergleich zur Abb. 25 verschärft.

Es kann also festgehalten werden, dass die autochthonen Witterungen grundsätzlich ein verstärktes Auftreten der (meist dem Talverlauf folgenden) Winde aus den Hauptwindrichtungen zur Folge haben. Tagsüber weisen sämtliche Stationen ein Windrichtungsmaximum aus Südost- bis Südwest-Richtung, was die Dominanz des Antigebirgsrandwindes beweist. Des Weiteren steigt die Kalmenhäufigkeit bei allen Stationen an, was auch der Charakteristik von autochthonen Witterungen entspricht (siehe Kap. 6.7).

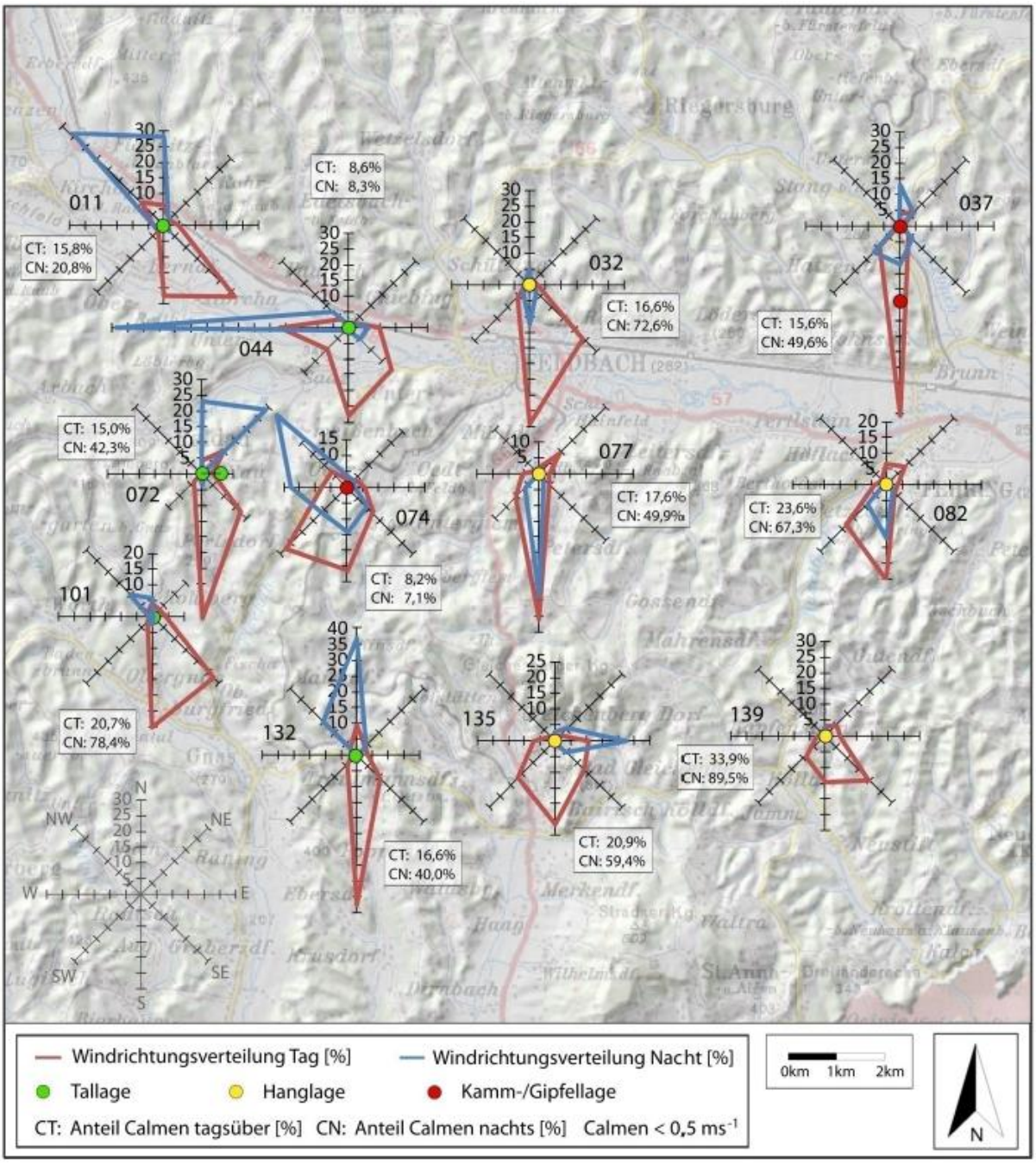


Abb. 26: Die Verteilung der Windrichtung bei Tagen mit autochthoner Witterung an 34 Tagen des Jahres 2008 in [%], unterteilt in Tag (06-18 Uhr) und Nacht (18-06 Uhr) inkl. Kalmenanteil (Windgeschwindigkeit <0,5 m/s) und Hanglage (farblich markiert). *(Quelle: OBERTH 2010, S. 52; Datengrundlage: Wegener Center 2013)*

In Abb. 27 sind die Windgeschwindigkeiten im Jahresmittel dargestellt, sowohl für alle Tage als auch nur für die 34 ausgewählten Tage mit autochthoner Witterung. Wichtig für das Verständnis bei dieser Darstellungsvariante ist, dass nur die Geschwindigkeiten und nicht mehr die prozentuellen Wahrscheinlichkeiten dargestellt sind. Eine sehr hohe

durchschnittliche Geschwindigkeit muss für eine realistische Betrachtung der tatsächlichen Verhältnisse somit in Relation mit der prozentuellen Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Windrichtung gesehen werden.

Die Stationen in Tallage, wiederum mit einem grünen Mittelpunkt gekennzeichnet, zeigen sowohl tagsüber, als auch in der Nacht höhere Geschwindigkeiten im Jahresdurchschnitt als bei autochthoner Witterung. Dies ist aufgrund der beiden vorhergehenden Abb. 25 und Abb. 26 nicht anders zu erwarten gewesen. Die höchsten Geschwindigkeiten werden in den Hauptwindrichtungen erzielt, wobei die Höhenstation 044 eine Ausnahme darstellt. Hier werden mit knapp über 3 m/s in Nord- und Süd-Richtung im Jahresdurchschnitt nicht nur die höchsten Geschwindigkeiten erreicht, sondern auch die Windrichtungsverteilung ist sehr einheitlich. Dies beschreibt laut WAKONIGG (1978, S. 323) auch den Idealfall, dass die Verteilung der Windgeschwindigkeiten annähernd die Form eines Sechseckes annimmt. Abweichungen deuten auf den Einfluss des Reliefs bzw. Beeinflussung hoher Gebäude oder ähnlicher Hindernisse hin. Bei den autochthonen Witterungen werden nur von Winden aus Ost- bis Süd-Richtung Geschwindigkeiten von über 2 m/s erreicht.

Bei den Stationen in Hanglage zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei jenen in Tallage. Die Geschwindigkeiten an Tagen mit autochthoner Witterung liegen hinter jenen des Gesamtjahres zurück und erreichen maximal 2 m/s. Die Verteilung ist aber gleichmäßiger als bei den Stationen in Tallage, es bildet sich an mehreren Stationen ein beinahe regelmäßiges Sechseck aus.

Bei den beiden Stationen in Hanglage gilt ebenfalls, dass bei autochthoner Witterung die Windgeschwindigkeiten durchschnittlich niedriger sind als im Jahresdurchschnitt. Wie bei den anderen Abbildungen auch zeigt sich die Station 037 sehr untypisch für eine Kammlagen-Station, da sie ähnlich wie bei den Stationen in Tallage deutliche reliefbedingte Geschwindigkeitsmaxima in den Hauptwindrichtungen zeigt, wobei die Winde aus südlicher Richtung deutlich stärker ausgeprägt sind. Station 074 zeigt ein regelmäßig ausgeprägtes Sechseck mit der Idealverteilung, und zwar sowohl tagsüber, als auch in der Nacht (im Jahresdurchschnitt sowie bei Tagen mit autochthoner Witterung).

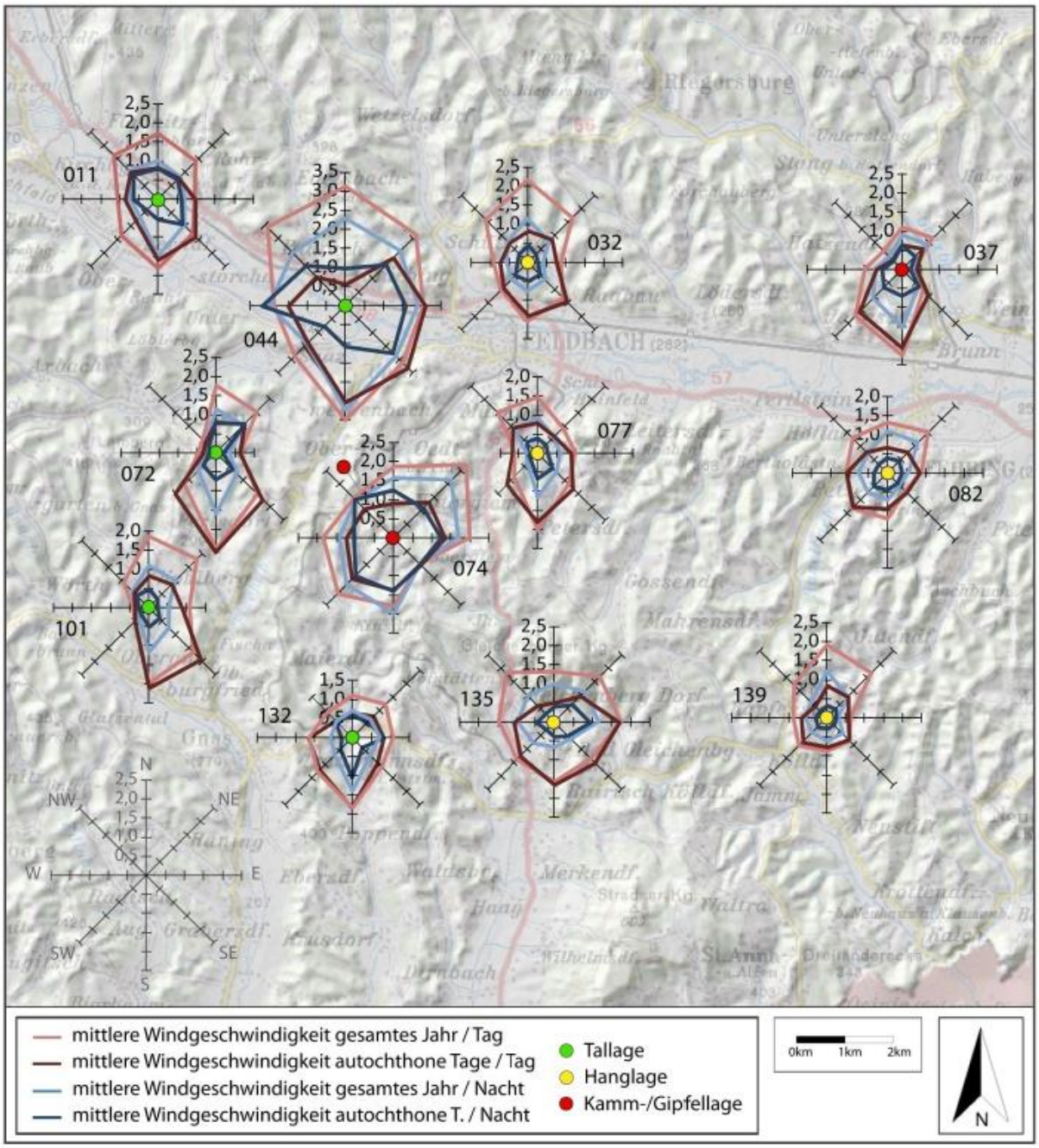


Abb. 27: Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit für alle Tage bzw. Tage mit autochthoner Witterung in [m/s] unterteilt in Tag (06-18 Uhr) und Nacht (18-06 Uhr) inkl. Kalmenanteil (Windgeschwindigkeit <0,5 m/s) und Hanglage (farblich markiert). *(Quelle: OBERTH 2010, S. 56; Datengrundlage: Wegener Center 2013)*

Auch diese Auswertung bestätigt die Charakteristik, dass bei autochthonen Witterungen ein niedrigeres Niveau der Windgeschwindigkeiten als im Jahresdurchschnitt zu erwarten ist.

OBERTH (2010, S. 57-77) zeigt in seiner Arbeit weiterhin, dass die Windrichtungsverteilung im Sommer- bzw. Winterhalbjahr an sämtlichen 12 Stationen annähernd gleich ist. Aus diesem Grund wird auf eine genauere Analyse der einzelnen Stationen an dieser Stelle verzichtet. Auch der Unterschied zwischen Tal-, Hang- und Kammlage ist nicht scharf abgrenzbar, weswegen eine andere Einteilung in drei Klassen vorgeschlagen wird, die den charakteristischen Ausprägungen des Windfeldes eher entspricht:

Klasse I: Berg-Talwindsystem mit tageszeitlich alternierenden Hauptwindrichtungen parallel zur Talachse (Stationen 011, 032, 037, 072, 101, 132, 135, 139).

Klasse II: Berg-Talwindsystem unter dem dominanten Einfluss des Antirandgebirgswindes mit Hauptwindrichtungen aus Süden sowohl während der Bergwind- als auch während der Talwindphase (Stationen 077, 082).

Klasse III: Stationen in größerer Höhe über Grund mit relativ freier Anströmbarkeit bei geringer bis fehlender Leitwirkung des Reliefs (Stationen 044, 074)

OBERTH folgert weiter, dass aufgrund der Windrichtungsverteilung in Hanglage sowie wegen der geringen Reliefenergie den Hangwindzirkulationen nur eine untergeordnete Rolle zukäme. Weiters müsse angenommen werden, dass auch die nächtliche Kaltluftbildung nur wenig Einfluss auf die Temperaturen in den Tälern dieses Gebietes habe. Diese Aussage wird dahingehend relativiert, dass für eine wissenschaftlich stichhaltige Folgerung allerdings Messungen in verschiedenen Höhen über Grund stattfinden müssten (vgl. auch KING 1973).

3.4.4 Simulation der Kaltlufthöhe, Windrichtung und Windgeschwindigkeit

OBERTH (2010, S. 112-131) hat in seiner Arbeit eine Simulation der Kaltlufthöhe, Windrichtung und Windgeschwindigkeit mittels des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 erstellt (technischer Hintergrund nachzulesen bei SIEVERS 2005). Als Untersuchungszeitraum wurde eine viertägige Phase im Mai 2008 (11.05., 12 Uhr bis 14.05., 12 Uhr MEZ) herangezogen, zu der im Untersuchungsgebiet optimale autochthone Bedingungen mit einem stabilem Hoch und ungestörter nächtlicher Ausstrahlung vorherrschten.

Die Abb. 28 und Abb. 29 zeigen die Verhältnisse der Modellsimulation 1 (Modellgebiet 50x50 m, einheitliche Landnutzungsklasse 7, kein Regionalwind), die beispielhaft für die tatsächlichen Verhältnisse herangezogen werden. Nach einer Stunde beträgt die Mächtigkeit der Kaltluft im Haupttal gut 30 m, in den Seitentälern sogar über 40 m; auf den Riedeln beträgt die Mächtigkeit erwartungsgemäß nur wenige Meter. Nach acht Stunden beträgt die Mächtigkeit im Haupttal über 100 m, in den Seitentälern etwas weniger. Nur auf den Kuppen

der Riedel beträgt die Mächtigkeit weiterhin wenige Meter, aber auch bei kleinen Seitentälern finden sich Kaltluftschichten bis über 50 m.

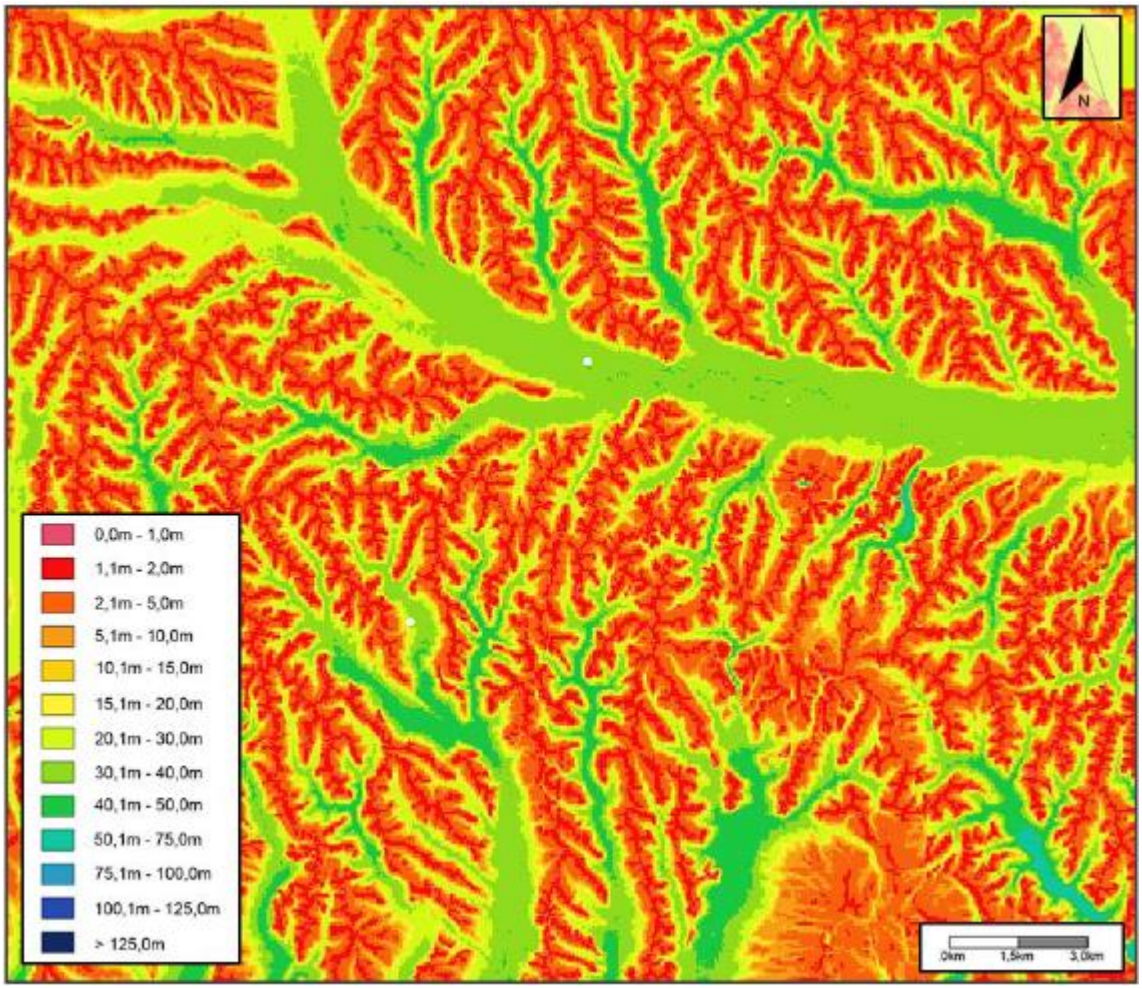


Abb. 28: Kaltlufthöhen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet nach einer Stunde Simulationszeit für Simulation 1 in [m]. *(Quelle: OBERTH 2005, S. 118)*

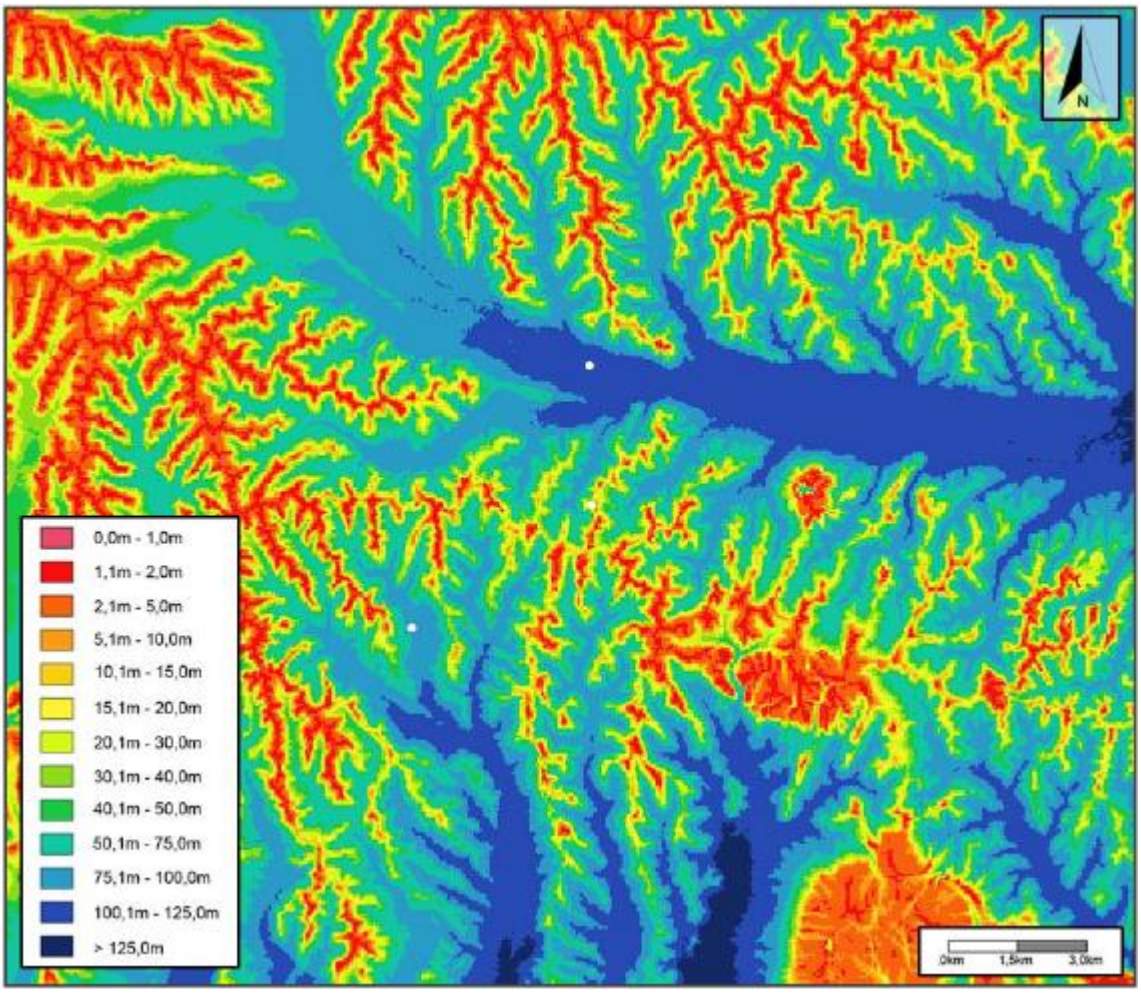


Abb. 29: Kaltlufthöhen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet nach acht Stunden Simulationszeit für Simulation 1 in [m]. *(Quelle: OBERTH 2005, S. 118)*

Das Modell KLAM_21 kann nicht nur für die Darstellung von Kaltluftschichten, sondern auch für jene der Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung eines Gebietes herangezogen werden. Die nachfolgende Darstellung zeigt die Windrichtungsverteilung in einer Höhe von 10 m ü. Gr. nach zwei Stunden Simulationszeit der Simulation 1. Die hang- bzw. talabwärts gerichteten Strömungen sind gut erkennbar, wobei sich die Geschwindigkeiten meist nur im Bereich von 1 m/s bewegen.

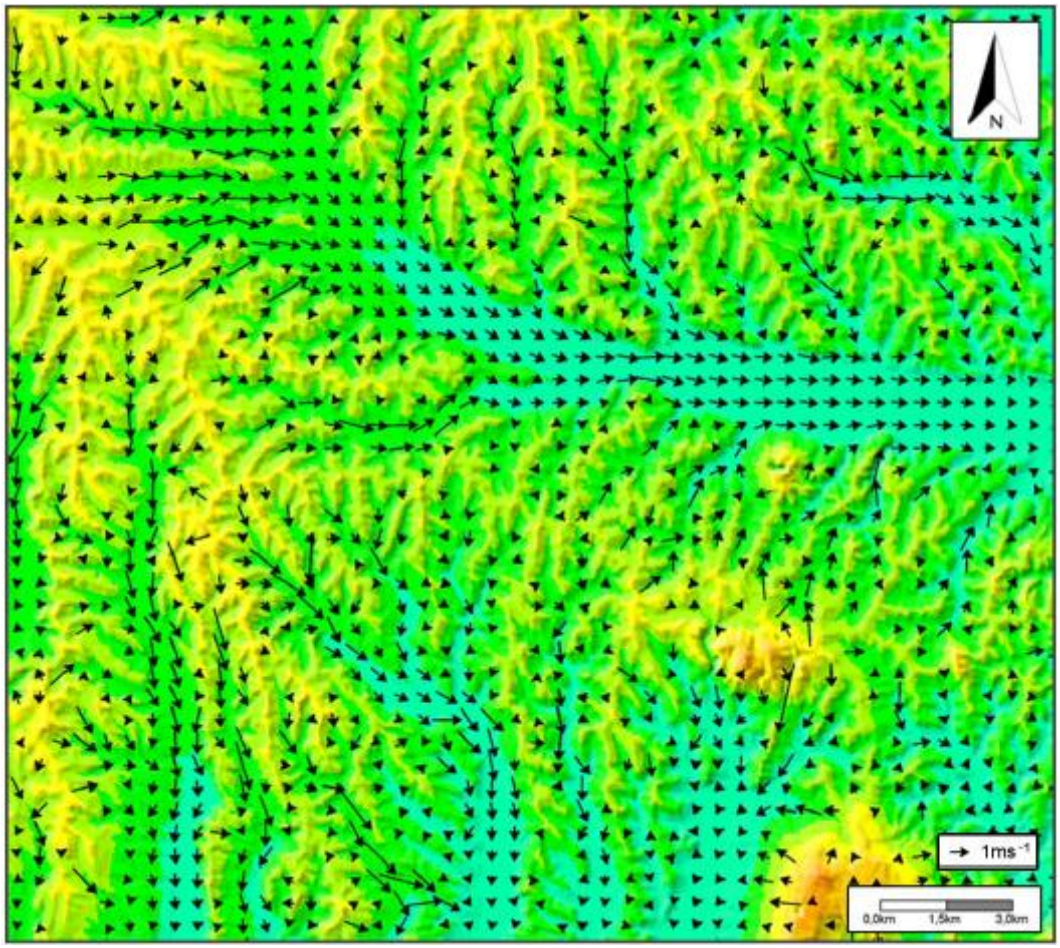


Abb. 30: Windrichtungsverteilung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet in einer Höhe von 10 m ü. Gr. nach zwei Stunden Simulationszeit für Simulation 1. *(Quelle: OBERTH 2005, S. 125)*

Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten wird in Abb. 31 beispielhaft für die Simulation 1 nach einer Stunde Laufzeit dargestellt. Aufgrund der geringen Schichthöhen sind die Verläufe der Täler gut erkennbar, die höchsten Geschwindigkeiten werden mit knapp 6 m/s an den Talmündungen bzw. nördlich von Bad Gleichenberg erreicht, wo sich ein Düseneffekt ausbildet. Das Geschwindigkeitsniveau im Haupttal der Raab ist nach einer Stunde deutlich niedriger als in den zulaufenden Seitentälern, hier bleiben die Geschwindigkeiten meist unter 1 m/s.

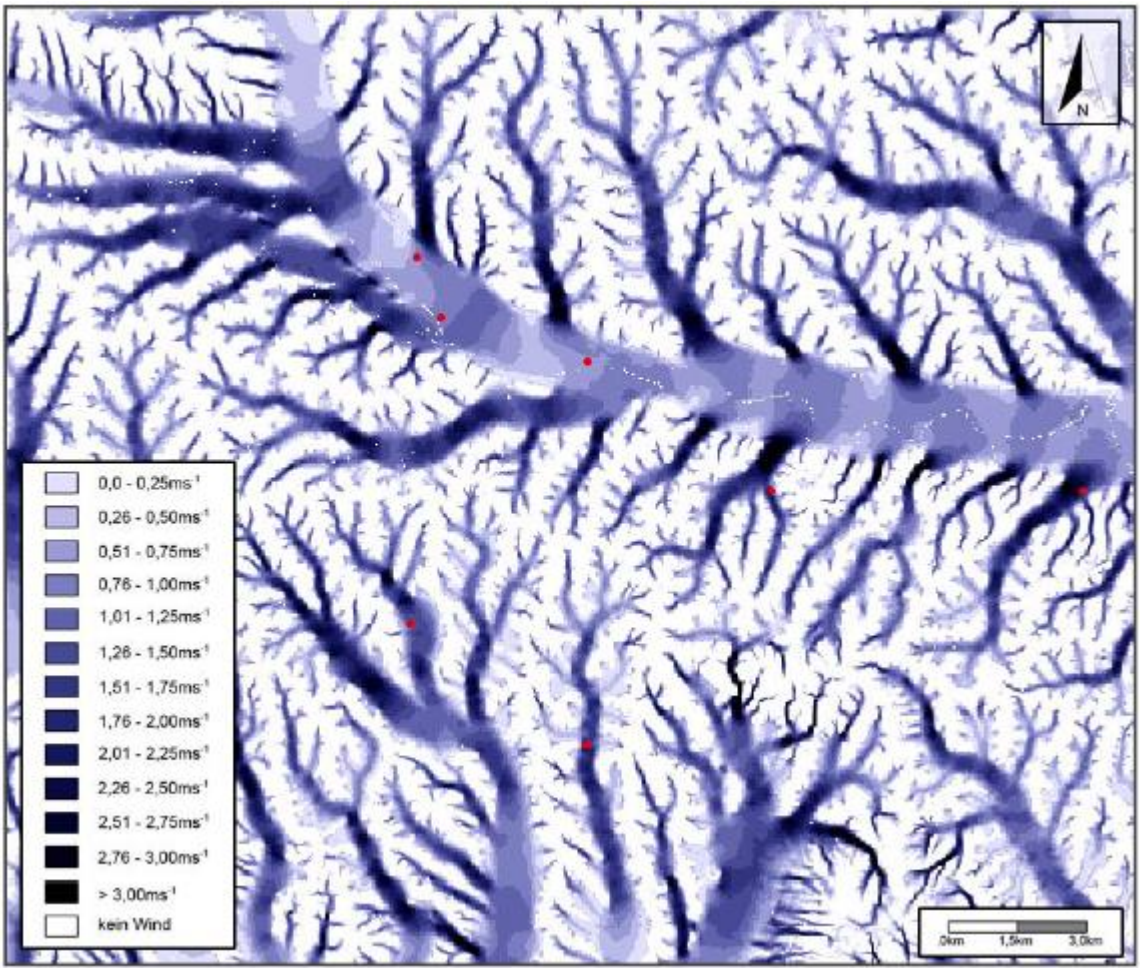


Abb. 31: Windgeschwindigkeitsverteilung im Untersuchungsgebiet des WegenerNet in einer Höhe von 10 m nach einer Stunde Simulationszeit für Simulation 1. Die roten Punkte stellen die für die Validierung der Ergebnisse herangezogenen Stationen dar. *(Quelle: OBERTH 2005, S. 128)*

4. Das Messnetz WegenerNet

Das WegenerNet, ein Messnetz mit insgesamt 151 Messstationen, nahm mit 01.01.2007 seinen Betrieb auf. Hinsichtlich der möglichen Gebietsauswahl gab es einen langen Prozess mit einer umfassenden regionalspezifischen Analyse, in der Kriterien wie klimatische und orographische Verhältnisse, agrarwirtschaftliche Nutzflächen sowie Siedlungsräume berücksichtigt wurden (KIRCHENGAST et al. 2008, S. 7-8).

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Struktur des Messnetzes, die eingesetzten Messgeräte, die verschiedenen Stationstypen sowie die Datenqualität.

4.1 Messnetzstruktur

Das Messnetz ergab sich letztendlich nach Bewertung oben genannter Kriterien, um auch Regionen mit stark regionalklimatischen Ausprägungen wie das Gnaser Becken berücksichtigen zu können (KIRCHENGAST et. al. 2008, S. 7-8). Insgesamt verteilen sich 151 Stationen in einem 150-Zellen-Raster (Fläche einer quadratischen Gitterzelle etwa 2 km²) rund um die Stadt Feldbach im Südosten der Steiermark, wobei sich mehr Stationen südlich als nördlich der Stadt befinden (siehe Abb. 32). Durch die vier Eckpunkte Kirchberg an der Raab im Nordwesten, Hatzendorf im Nordosten, Gnas im Südwesten und Kapfenstein im Südosten entsteht die annähernd rechteckige Form mit einer Ausdehnung von ca. 20x15 km.

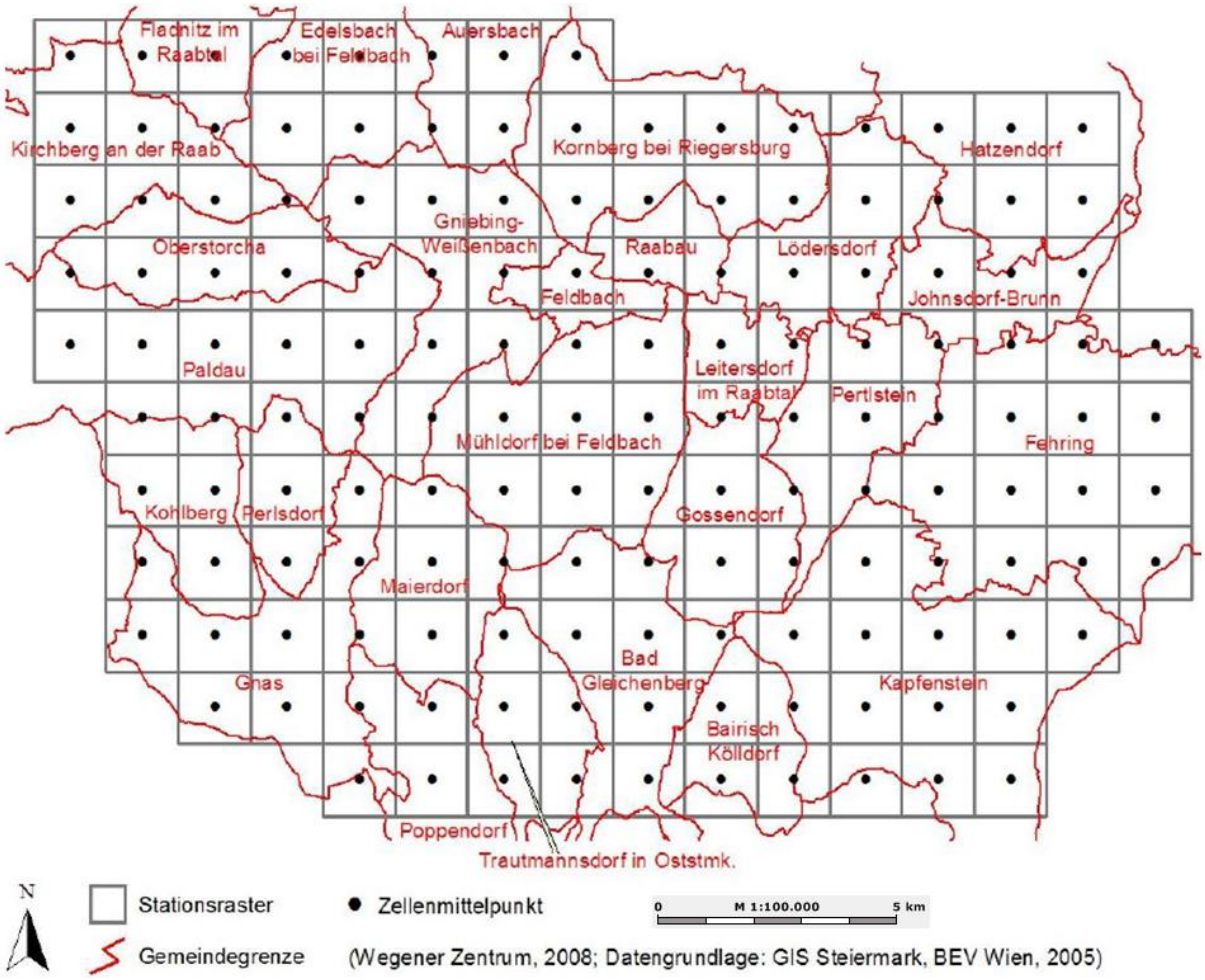


Abb. 32: Stationsraster des WegenerNet mit Verteilung der 27 Gemeinden im Untersuchungsgebiet. *(Quelle: KIRCHENGAST et al. 2008, S. 8; eigene Bearbeitung)*

Die Zellenmittelpunkte sind die theoretischen Idealstandorte, konnten aber vor allem aufgrund großflächiger landwirtschaftlicher Nutzflächen und Waldarealen nicht überall realisiert werden. Die Abb. 33 zeigt die realen Standorte im Vergleich zu den Zellenmittelpunkten auf der Basis einer Österreich-Karte (ÖK).

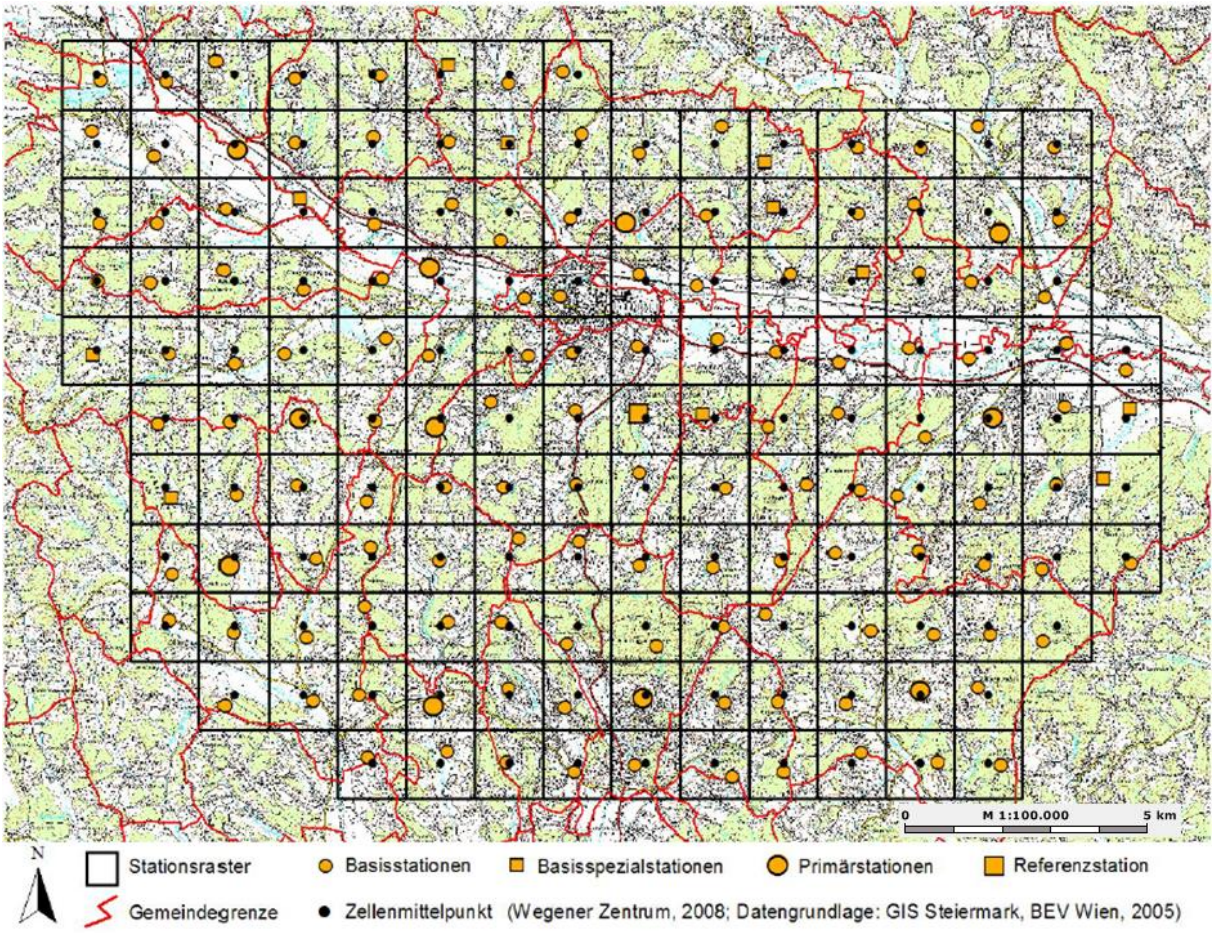


Abb. 33: Stationsraster des WegenerNet mit den Standorten der errichteten Stationen (in gelb), den Gitterzellenmittelpunkten und den Gemeindegrenzen auf Basis einer Österreich-Karte (ÖK). *(Quelle: KIRCHENGAST et al. 2008, S. 21; eigene Bearbeitung)*

Die Station 044 westlich von Feldbach ist als Höhenstation ausgeschrieben, da sie am Dach eines Silos angebracht ist und die Parameter in einer Höhe von 53 m über Grund misst. An selber Stelle ist auch die Station 151 angebracht, die standardmäßig in einer Höhe von 2 m über Grund misst.

Die 151 Stationen befinden sich in Seehöhen von 257-520 m, also innerhalb einer vertikalen Spannweite von 263 m. Die Abb. 34 zeigt die Verteilung der Stationen hinsichtlich ihrer Seehöhe und Lageklasse, zwei für diese Arbeit sehr wichtige Faktoren. Die Seehöhe nimmt stochastisch mit ansteigender (Hang-) Lageklasse zu. Eine Sonderstellung nimmt die Station am Gleichenberger Kogel (in 520 m Seehöhe) ein, die der Zone der Oberhangstufe zugeordnet wird und trotzdem deutlich höher als sämtliche Stationen in Kammlage gelegen ist. Am meisten Stationen findet man in Talboden- bzw. Kammlage, während nur wenige Stationen in Hangfuß- bzw. Unterhangstufe positioniert sind.

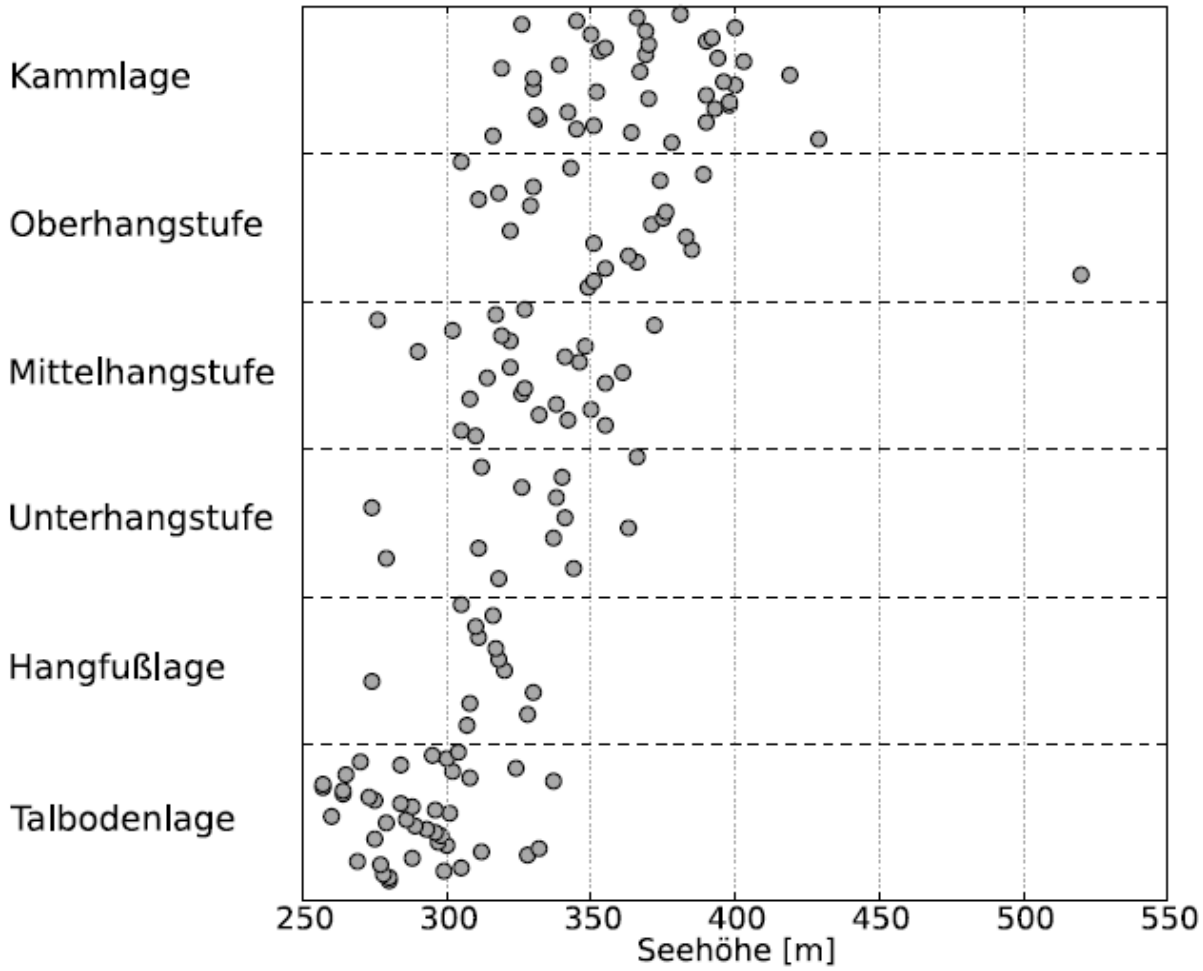


Abb. 34: Verteilung der WegenerNet-Stationen nach Seehöhe und Lageklasse. *(Quelle: KABAS 2011, S. 26)*

4.2 Stationstypen

Die 151 Stationen des WegenerNet-Gebietes lassen sich in vier Gruppen unterteilen, die sich durch die gemessenen Parameter unterscheiden (siehe Tab. 7). Den Hauptanteil mit 127 Stationen machen die Basisstationen aus, an denen die Parameter Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte sowie der Niederschlag standardmäßig in einer Höhe von 2 m über Grund gemessen werden. Zu den Grundstationen zählen darüber hinaus noch die 12 Basisspezialstationen, an denen zusätzlich zu den Parametern der Basisstationen die Bodentemperatur sowie der pF-Wert des Bodens (Maß für die Saugspannung des Wassers) gemessen werden. Die schon erwähnte Station 151 stellt eine Besonderheit dar, da an ihr kein Niederschlag gemessen wird; das resultiert daher, dass die am selben Ort in 53 m über Grund befindliche Station 044 diese Funktion übernimmt. Die kleinere Gruppe der Hauptstationen besteht zunächst aus 11 Primärstationen, die zusätzlich zu den Parametern der Basisstationen

noch den festen Niederschlag sowie Windparameter (in 10 m über Grund) messen. Die Windparameter sind Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Windböen sowie die Richtung der Windböen. Darüber hinaus stellt die Station 077 als Referenzstation eine Besonderheit dar, da an dieser zusätzlich zu den Parametern der Primärstationen noch der Luftdruck sowie die Strahlungsbilanz gemessen werden.

Tab. 7: Stationen des WegenerNet - Messnetzes mit den gemessenen Parametern.

Stationstyp	**Messparameter**	**Stationsnummer(n)**	**Anzahl**
Basisstation (B)	Lufttemperatur Rel. Luftfeuchte Niederschlag	Alle bis auf die Stationsnummern von BS, P und R	127
Basisspezialstation (BS)*	+ Bodentemperatur + pF-Wert - Niederschlag	006, 015, 019, 027, 034, 050, 054, 078, 084, 085, 099 151	12
Primärstation (P)*	+ fester Niederschlag + Windparameter	011, 032, 037, 044, 072, 074, 082, 101, 132, 135, 139	11
Referenzstation (R)*	+ fester Niederschlag + Windparameter + Luftdruck + Strahlungsbilanz	077	1
			Gesamt: 151
*Messparameter: zusätzlich zu (B)			

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Abb. 35 zeigt die Lage der Stationen in der Karte, wobei hier auch die beiden Stationen der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, in Feldbach und Bad Gleichenberg) sowie die LINET-Station (Lightning Detection Network, im Osten von Feldbach) verortet sind. Die LINET-Station dient ausschließlich zur Betreibung eines Blitzortungssystems.

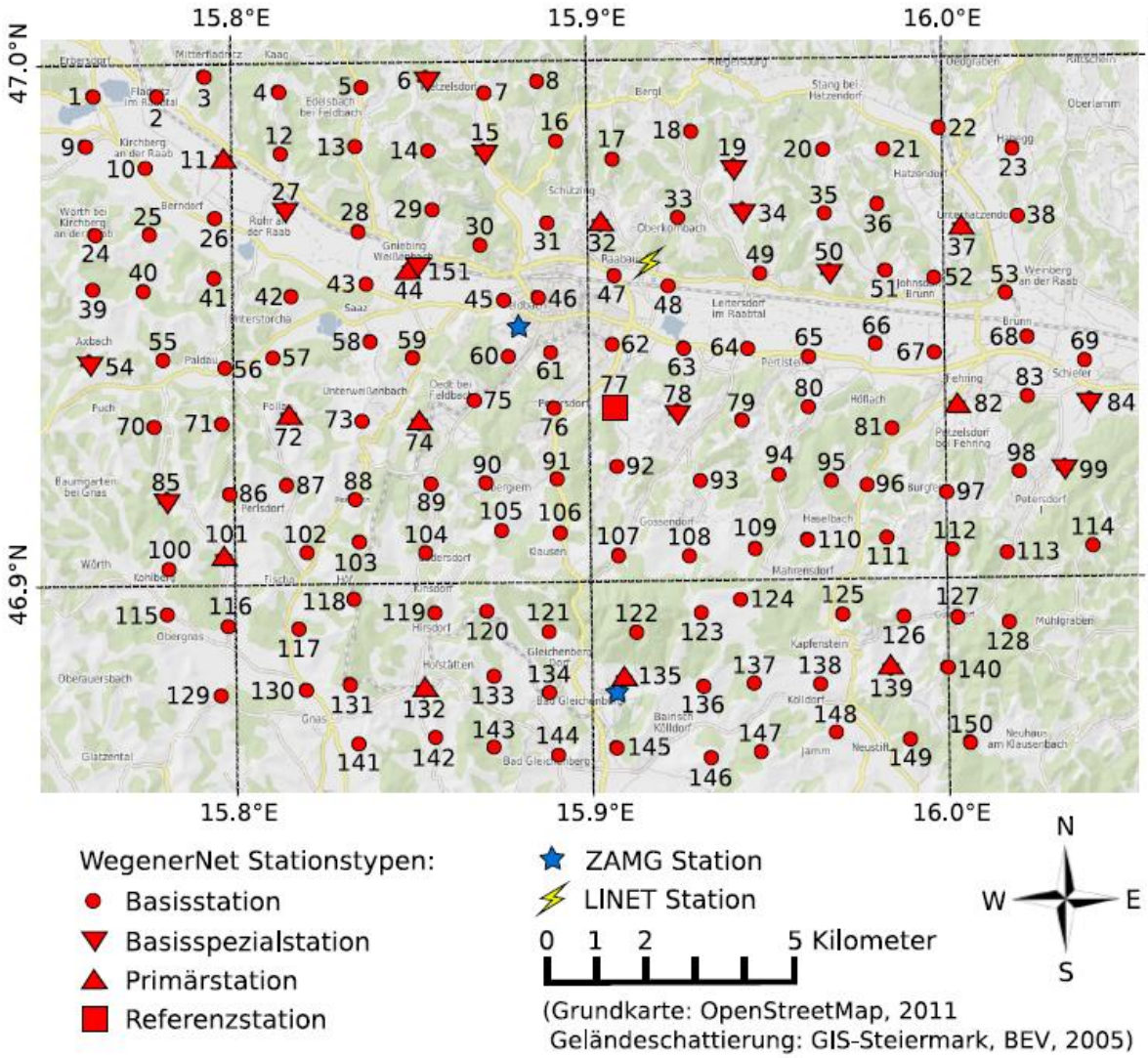


Abb. 35: Die 151 WegenerNet-Klimastationen sowie die zwei ZAMG-Messstellen (Bad Gleichenberg, Feldbach) und die LINET-Station (Raabau). *(Quelle: KABAS 2011, S. 60)*

4.3 Eingesetzte Messgeräte

Nachfolgend werden die vom Wegener Center für Klima und Globalen Wandel verwendeten Messgeräte aus technischer Sicht beschrieben, wobei sämtliche Angaben aus KABAS (2011) stammen.

Die Messwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden mit einem Kombisensor vom Typ SHT75 der Firma Sensirion AG erhoben und sollen eine gute Signalqualität und eine hohe Messgenauigkeit gewährleisten.

Die Niederschlagsmessung ist komplexer, da sie von drei verschiedenen Niederschlagsgebern durchgeführt wird, die alle nach dem Prinzip der Kippwaage funktionieren. Als Basismodell

dient die unbeheizte Version des Modells 7041 der Firma „Theodor Friedrichs & Co. - Meteorologische Geräte und Systeme GmbH“ und kann nur für die Messung des flüssigen Niederschlags herangezogen werden. Das zweite Modell mit der Nummer 52202 stammt von der „R. M. Young Company“ und ist mit einer thermostatischen Heizung ausgestattet. Dieses Modell kann ebenso wie der dritte Typ MR3H der Firma „Meteoservis“, wo von der Firma „Kroneis GmbH“ eine Umluftheizung installiert wurde, auch für die Messung festen Niederschlags verwendet werden. Die beiden letztgenannten Niederschlagsgeber wurden an den Primärstationen installiert, während an der Referenzstation nur das Gerät von Meteoservis installiert wurde. Vor allem durch die unterschiedlichen Auffangflächen (zwischen 200 und 500 cm^2) entstehen durch den Einfluss des Windes unterschiedlich hohe Messfehler, auf die in Kap. 7 eingegangen wird. Ausführliche Informationen dazu können in der zu diesem Thema verfassten Masterarbeit von SZEREBENYI (2014) nachgelesen werden.

Zur Windmessung werden Ultraschallanemomenter des Modells WindSonic der Firma „Gill Instruments Ltd.“ eingesetzt. Für die Strahlungsbilanz wird ein Netto-Radiometer vom Typ NR Lite der Firma „Kipp & Zonen“ verwendet, während der Luftdruck durch einen Barogeber des Typs 315 K der Firma „Kroneis GmbH“ gemessen wird.

4.4 Datenqualität

Die Daten der WegenerNet-Stationen, die seit dem 01.01.2007 im Fünf-Minuten-Takt aufgezeichnet, elektronisch übermittelt und auf das Datenportal WegenerNet (Wegener Center 2013) gestellt werden, sind keine Rohdaten, sondern haben bereits mehrere Schritte einer Qualitätsprüfung hinter sich. Es folgt eine Übersicht darüber aus dem Leitfaden des WegenerNet (Wegener Center 2010, S. 9).

Die gemessenen Werte durchlaufen ein automatisiertes Qualitätskontrollsystem (QCS), welches die Daten auf Korrektheit und Plausibilität überprüft. Die Tab. 8 führt die einzelnen Prüfschichten des Kontrollsystems an. Durch diese Schritte wird nicht nur die technische Funktionalität der Messung garantiert, sondern auch eine darüberhinausgehende Plausibilitätsprüfung durchgeführt.

Tab. 8: Die Prüfschichten des Qualitätskontrollsystems (QCS) des Wegener Centers zur Datenkontrolle mit Erklärungen.

Prüfschicht	Erklärung der QCS-Prüfschichten
0	**Prüfung auf Messbetrieb:** Vorprüfung ob Sensor in Betrieb und QCS Prüfschichten 1-7 zu durchlaufen sind
1	**Prüfung der Datenverfügbarkeit:** Kontrolle ob Messwert vorhanden ist
2	**Prüfung der Sensorfunktion:** Kontrolle ob Messwert außerhalb des erlaubten Wertebereichs der Sensorspezifikationen liegt
3	**Prüfung der klimatologischen Plausibilität:** Kontrolle ob Messwert außerhalb klimatologischer Grenzen (aus langjährigen ZAMG Messreihen ermittelt) liegt
4	**Prüfung der zeitlichen Variabilität:** Kontrolle ob Messwert eine zu hohe oder zu geringe zeitliche Variabilität auf weist (also einerseits unnatürlich hohe „Sprünge“ oder andererseits über unnatürlich langen Zeitraum gleiche Werte)
5	**Prüfung der Intra-Stations-Konsistenz:** Kontrolle ob Messwert mit anderen physikalisch abhängigen Parametern der gleichen Station sinnvoll überein stimmt (z.B. Zusammenhang Niederschlag-Luftfeuchte)
6	**Prüfung der Inter-Stations-Konsistenz:** Kontrolle on Messwert in Gegenüberstellung zu benachbarten Stationen zu starke Abweichung auf weist
7	**Prüfung gegen externe Referenz:** Kontrolle ob Messwert von Messwerten externer Referenzen (ZAMG Stationen Feldbach, Bad Gleichenberg) zu stark abweicht (für den Luftdruck geprüft, den im Netz nur die Referenzstation misst)

Quelle: Wegener Center 2010

Nur die nach obigen Schritten als fehlerlos bescheinigten Werte schaffen es zum nächsten Schritt, dem Datenprodukt-Generierungssystem (DPG). Im Zuge dessen werden mittels verschiedener Interpolationsverfahren etwaige Lücken durch Messausfälle oder fehlende Daten aufgefüllt. Je nach Länge der Datenlücken werden kürzere Perioden linear interpoliert, längere Lücken auch aus benachbarten Stationen interpoliert (Tab. 9). Im Falle der Basisdaten (Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte) kann mit dieser QC-Marke (Qualitätsprüfungsmarke) auf die Ableitung des Datenpunktes geschlossen werden, alle übrigen Datentypen können dadurch qualitativ interpretiert werden.

Tab. 9: Erklärung der Qualitätsprüfungsmarken (QC-Marke) des Datenprodukt-Generierungssystems (DPG).

QC-Marke	Legende und Erklärung der DPG-Qualitätsmarken für Basisdaten	alle weiteren Datentypen
0	Messwert hat alle vorhergehenden Qualitätsprüfungen ohne Fehler bestanden	Daten sehr guter Qualität
1	Datenpunkt wurde zeitlich interpoliert	Daten guter Qualität
2	Datenpunkt wurde mittels ausgewählte Nachbarstationen räumlich interpoliert	Daten mittlerer Qualität
3	Datenpunkt wurde aus den nahesten Gitterpunkten räumlich interpoliert	Daten geringer Qualität
4	Fehlwert	Daten schlechter Qualität bzw. Fehlwert

Quelle: Wegener Center 2010

Als Beispiel für die herausragende Qualität der Daten sei die Station 007 ausgewählt, die für den gesamten Untersuchungszeitraum von 2007-2011 durch den Fünf-Minuten-Rhythmus insgesamt 525.889 Werte pro Parameter aufweist. Die folgende Statistik steht stellvertretend für alle ausgewählten Stationen (siehe Kap. 5.2), die vergleichbare Werte erzielen. Von allen Datenpunkten sind 99,55 % mit der QC-Marke 0 gekennzeichnet und somit als fehlerfrei markiert; 0,05 % sind mit der Marke 1 markiert, was eine zeitliche Interpolation kennzeichnet; 0,36 % sind mit Marke 2 gekennzeichnet, was eine Interpolation mittels ausgewählter Nachbarstationen bedeutet. Die Marke 3 haben insgesamt 0,04 % der Werte und wurden somit aus den nahesten Gitterpunkten interpoliert. Die Marke 4 zeigt einen Fehlwert an, der an dieser Station gar nicht vorkommt.

Am schlechtesten sind die Werte bei Station 074, wo 6,49 % der Daten als fehlerhaft markiert sind. Dies resultiert vor allem aus einem mehr als dreimonatigen Datenausfall von 14.11.2007 bis 28.02.2008.

5. Forschungsfragen und methodische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die relevanten Forschungsfragen sowie die Methoden beschrieben, mit denen erstgenannte beantwortet werden sollen. Danach folgen methodische Grundlagen zu den Daten des WegenerNet-Messnetzes, der Auswahl geeigneter Stationen, der Daten der ZAMG und sonstiger Daten sowie der Auswahl von Tagen mit autochthoner Witterung.

5.1 Forschungsfragen und -methoden

Die Forschungsfragen bauen auf den Forschungsaspekten in Kap. 2.4 auf und lauten wie folgt:

a) Entsprechen die geländeklimatischen Auswertungen den Erwartungen auf Basis der Erkenntnisse aus wissenschaftlicher Literatur?
b) Wie können die geländeklimatischen Parameter Hanglage, Seehöhe und Exposition quantitativ beurteilt werden? Unter welchen Voraussetzungen (Witterung, Tages- und Jahreszeit) sind die Unterschiede besonders deutlich?
c) Wie gestaltet sich die vertikale Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet?
d) Inwiefern stimmt die erstellte Klimatopkarte mit bestehenden Produkten überein bzw. wo gibt es Unterschiede? Worin besteht der Mehrwert der erstellten Karte?
e) Wie realistisch ist der Anbau vor allem thermisch anspruchsvoller Nutzpflanzen wie z.B. Wein und wie groß bzw. verbreitet sind diese Gebiete im Untersuchungsraum?
f) Welche Änderungen sind aufgrund des Klimawandels in der Region zu erwarten, und inwiefern stimmen die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Trends überein? Welche Anpassungen werden in Zukunft voraussichtlich notwendig werden?
g) Für welche Regionen außerhalb des Untersuchungsgebietes sind die Untersuchungsergebnisse anwendbar?

Diese Fragen werden mit den nachfolgend genannten Methoden beantwortet:

a) Erhebung des aktuellen Wissensstandes durch Literatur- und Internetrecherche sowie Fachgesprächen
b) Detaillierte Auswertungen der in Kap. 5.2 ausgewählten Stationen hinsichtlich sämtlicher in den Forschungsfragen erwähnten Parametern mit Fokus auf den Temperaturdaten
c) Analyse der Daten hinsichtlich unterschiedlicher Tages- und Jahreszeiten, speziellen Witterungen und der vertikalen Strukturen
d) Erstellung einer Klimatopkarte auf Basis der Ergebnisse sowie unter Zuhilfenahme vergleichbarer Produkte (Digitaler Atlas der Steiermark), zusätzlicher Informationsquellen sowie eigener Kenntnisse und Erhebungen vor Ort
e) Erhebung der notwendigen Grundlagen für Weinbau und Erstellung einer Karte potentieller Weinanbauflächen unter Einbeziehung der Ergebnisse der Untersuchungen
f) Vergleich der gemessenen Daten mit den langjährigen Temperaturverhältnissen und prognostizierten Entwicklungen hinsichtlich der Einschätzung des Einflusses des Klimawandels; Berücksichtigung relevanter Parameter (Extremwerte, Jahreszeiten, geländeklimatologische Faktoren)
g) Untersuchung der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Regionen (hinsichtlich Seehöhe, Hangneigung, Temperaturverhältnisse, Wind, Niederschlag, Sonneneinstrahlung, ...)

5.2 Auswahl der relevanten WegenerNet-Stationen

Für die geländeklimatische Analyse des Gebietes gab es zunächst die Überlegung, sämtliche 151 Stationen auszuwerten. In Ausnahmefällen wurden auch alle Stationen berücksichtigt, für den Hauptteil dieser Arbeit wurde jedoch eine Auswahl von insgesamt 46 Stationen getroffen (siehe Tab. 11). Dieser Schritt wurde aus mehreren Gründen durchgeführt:

- Deutlich ausgeglichenere Verteilung der Stationen auf die unterschiedlichen Ausprägungen der verschiedenen Parameter (Seehöhe, Hanglage, Exposition usw.)
- Kein zu erwartender Qualitätsverlust der Ergebnisse
- Vermeidung einer durch das Relief bedingten einseitigen Gewichtung der Stationen
- Deutlich geringerer Arbeitsaufwand

Durch diese Auswahl der Stationen werden also vor allem Stationen ausgeschieden, die maximal redundante Informationen liefern würden. Für eine wissenschaftlich aussagekräftige

Auswahl, die keinerlei Einschränkungen qualitativer Aussagen mit sich bringt, müssen zahlreiche Kriterien beachtet werden, die nachfolgend beschrieben werden.

Die Auswahl der geeigneten Stationen erfolgte in der Reihenfolge der folgenden Kriterien:

1. **Wind**: Alle Stationen mit Windparametern und der Strahlungsbilanz

Die Windparameter sind vor allem hinsichtlich des Kaltluftabflusses von großer Bedeutung und daher unerlässlich. Im WegenerNet-Gebiet gibt es nur 12 Stationen mit Windmessung, die alle berücksichtigt werden. Die Strahlungsbilanz wird an der Referenzstation 077 gemessen.

2. **Exposition**: Abdeckung aller Expositionen, Fokus auf Nord und Süd

Im zweiten Schritt werden sämtliche Expositionen der Hänge ausreichend abgedeckt. Bei diesem sehr wichtigen Kriterium wird der Fokus auf die Nord- und Süd-exponierten Hänge gelegt, da jene im Vergleich die größten Unterschiede und damit besten Aussagen liefern können. Im Endeffekt ergibt sich durch die Berücksichtigung der anderen Kriterien eine ausgeglichene Auswahl aller Expositionen (siehe Tab. 11). Bei diesem Kriterium werden auch unterschiedliche Seehöhen sowie Tallagen soweit möglich berücksichtigt; das bedeutet, dass bei sämtlichen unterschiedlichen Expositionen möglichst unterschiedliche Seehöhen und Tallagen mit in die Analyse einfließen sollen.

3. **Hanglage**: Abdeckung aller Hanglagen

Für die unterschiedlichen Hanglagen gilt ähnliches wie bei der Exposition: Es sollen alle vorkommenden Hanglagen abgedeckt werden. Der Fokus liegt auf Hangfuß, Mittelhang und Oberhang, die hinsichtlich des Kaltluftabflusses wichtiger sind als Tallage, Unterhang und Kammlage. Das konnte trotz der unterschiedlichen Verteilung der Stationen (Kap. 4.1) gut umgesetzt werden (Tab. 11). Auch hier wird versucht, die Stationen sämtlicher Hanglagen auch in unterschiedlichen Seehöhen und Tallagen zu berücksichtigen. Die Hanglage (wie auch die Exposition) wurde entweder aus der Stationsbeschreibung des WegenerNet Datenportals (Wegener Center 2013) übernommen oder mittels Verortung per Koordinaten im Digitalen Atlas der Steiermark zugeordnet (siehe Abb. 36); nur in Einzelfällen war eine Erhebung vor Ort notwendig.

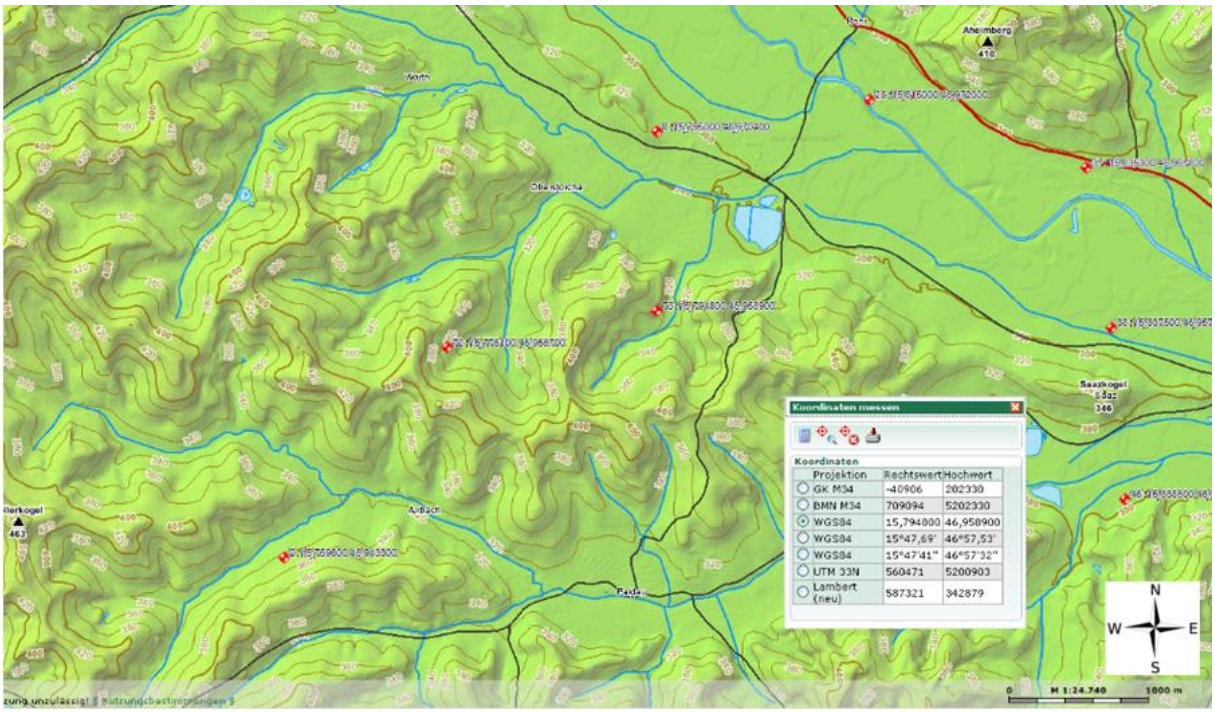


Abb. 36: Verortung der Stationen mittels Koordinateneingabe im Digitalen Atlas der Steiermark zur Bestimmung der Hanglage und Exposition. *(Quellen: Wegener Center 2013, Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

4. **Temperatur**: Stationen mit Extremwerten

Hinsichtlich der Temperatur wurden zunächst mehrere Stichproben aller Stationen genommen, um die Stationen hinsichtlich der wärmsten und kältesten Extremwerte herausfiltern zu können. Dabei werden auch die unterschiedlichen Seehöhen mitberücksichtigt, wobei diese aufgrund der nur geringen Höhenunterschiede im Untersuchungsgebiet keine große Rolle spielen.

5. **Seehöhe**: Abdeckung aller Seehöhenbereiche

Die höchsten sowie niedrigsten Stationen werden zur besseren Abdeckung des gesamten Spektrums des Untersuchungsgebietes ausgewählt, wobei wie schon bei Punkt 4 erwähnt, die Seehöhen nur vergleichsweise geringfügig variieren. Die höchsten Stationen waren darüber hinaus aufgrund der vorhergehenden Schritte bereits großteils in der Auswahl vorhanden. Zur Verdeutlichung der geringen vertikalen Unterschiede dient die folgende Tab. 10.

Tab. 10: Die Seehöhenbereiche der einzelnen Hanglagen.

Hanglage	Seehöhenbereich
Talboden	257-337 m
Hangfuß	274-330 m
Unterhang	274-366 m
Mittelhang	276-372 m
Oberhang	305-520 m
Kammlage	316-429 m

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die einzelnen Hangzonen weisen also von der Seehöhe her sehr geringe Unterschiede auf. Es fällt auf, dass der Bereich der Stationen am Talboden in höhere Gebiete reicht als jener der Stationen in Hangfußlage, und die Stationen der Oberhänge in höhere Zonen reichen als jene in Kammlagen. Dies kann durch die Lage der Stationen gut erklärt werden, wobei das Beispiel der höchsten Station am Gleichenberger Kogel in Oberhanglage bereits angesprochen wurde (siehe Kap. 4.1).

6. **Tallage**: Abdeckung der verschiedenen Tallagen (Talschluss, Talmitte, Talausgang)

Trotz Berücksichtigung der Tallagen bei Exposition und Hanglage gab es noch Lücken bei der Verteilung, die mit diesem Schritt geschlossen wurden. Das Raabtal wurde seiner Bedeutung entsprechend besonders berücksichtigt.

7. **Temperatur**: Elimination redundanter Stationen

Die Analyse vieler sehr gleichartiger Stationen ist für diese geländeklimatische Untersuchung nicht sinnführend, da die Ergebnisse dann auch als sehr gleichartig zu erwarten sind; wichtiger ist es, das gesamte Spektrum abzudecken. Dabei müssen aber die „normalen“ Stationen ebenfalls entsprechend berücksichtigt werden, da sonst den Stationen mit Extremwerten eine zu wichtige Rolle zukommt, die das Gesamtergebnis teilweise verfälschen könnte. Diese „Ausdünnung“ der Stationen wurde mit genauester Betrachtung diverser Mittel- und Extremwerte im Tages- und Jahresverlauf sowie der geländeklimatischen Bedingungen durchgeführt.

8. **Lage in der Region**: Auffüllen von Lücken im Untersuchungsgebiet

Dieser Schritt sollte sicherstellen, dass das Gesamte Untersuchungsgebiet flächenmäßig einigermaßen gut und ohne größere Lücken abgedeckt wird. Durch die bereits sehr gute Abdeckung des Gebietes kamen bei diesem Schritt aber nur wenige Stationen zusätzlich hinzu.

9. **ZAMG-Stationen**: Berücksichtigung der ZAMG-Stationen

Durch beide ZAMG-Stationen im Untersuchungsgebiet (Feldbach bzw. Bad Gleichenberg) gibt es eine gute Vergleichsmöglichkeit der Werte, um mögliche Abweichungen und Unklarheiten sofort erkennen zu können. Dafür wurden jene WegenerNet-Stationen definiert, die den ZAMG-Stationen räumlich am nächsten sind, und der Auswahl hinzugefügt (sofern sie nicht schon durch ein anderes Kriterium berücksichtigt waren).

Insgesamt ergibt die Auswahl eine Anzahl von **46 Stationen** im Untersuchungsgebiet, von denen 12 neben der Temperatur auch die Winddaten und eine die Luftdruck- sowie Strahlungsbilanzwerte aufzeichnen. Es fließt somit rund ein Drittel der insgesamt 151 Stationen des WegenerNet-Stationsnetzes in die Auswertung ein.

Die Tab. 11 zeigt die ausgewählten Stationen im Überblick. Zusätzlich zu den allgemeinen Stationsdaten werden die Hanglage, Bebauung und Exposition angeführt. Stationen in Kamm- bzw. Tallage weisen keine Hangneigung und daher auch keine Exposition auf.

Tab. 11: Die ausgewählten Stationen des WegenerNet-Messnetzes mit Angabe von Stationsart, Seehöhe, Hanglage, Bebauungsgrad und Exposition.

Stations-nr.	Stationsart	See-höhe	Hanglage	Bebauung des Gebiets	Exposition
007	Basisstation	308 m	Hangfuß	tw. bebaut	Nordwest
011	Primärstation	300 m	Talboden	tw. bebaut	-
015	Basisspezialstation	297 m	Talboden	unbebaut	-
017	Basisstation	385 m	Oberhang	unbebaut	West
020	Basisstation	330 m	Hangfuß	unbebaut	Südost
021	Basisstation	337 m	Unterhang	unbebaut	Nordost
026	Basisstation	314 m	Mittelhang	tw. bebaut	Nordost
029	Basisstation	383 m	Oberhang	tw. bebaut	Süd
032	Primärstation	322 m	Oberhang	unbebaut	Nordost
033	Basisstation	361 m	Mittelhang	tw. bebaut	Nord
036	Basisstation	341 m	Mittelhang	unbebaut	Südwest
037	Primärstation	330 m	Kammlage	tw. bebaut	-
038	Basisstation	274 m	Hangfuß	unbebaut	Nordwest
041	Basisstation	341 m	Unterhang	unbebaut	Südost
044	Primärstation	288 m	Talboden	bebaut	-
046	Basisstation	280 m	Talboden	bebaut	-
054	Basisspezialstation	348 m	Mittelhang	unbebaut	Nordwest
055	Basisstation	320 m	Hangfuß	unbebaut	Südwest
056	Basisstation	318 m	Hangfuß	bebaut	Süd
069	Basisstation	257 m	Talboden	unbebaut	-
071	Basisstation	375 m	Oberhang	tw. bebaut	Nordost
072	Primärstation	337 m	Talboden	tw. bebaut	-
074	Primärstation	394 m	Kammlage	unbebaut	-
076	Basisstation	319 m	Mittelhang	tw. bebaut	Süd
077	Referenzstation	302 m	Mittelhang	unbebaut	West
078	Basisspezialstation	372 m	Mittelhang	tw. bebaut	Ost
082	Primärstation	276 m	Mittelhang	bebaut	Südwest
094	Basisstation	370 m	Kammlage	tw. bebaut	-
097	Basisstation	392 m	Kammlage	tw. bebaut	-
101	Primärstation	304 m	Talboden	tw. bebaut	-
109	Basisstation	316 m	Hangfuß	unbebaut	Ost
111	Basisstation	343 m	Oberhang	unbebaut	Süd
113	Basisstation	312 m	Unterhang	unbebaut	Nordost
117	Basisstation	305 m	Oberhang	unbebaut	Südwest
122	Basisstation	520 m	Oberhang	unbebaut	Ost
123	Basisstation	429 m	Kammlage	tw. bebaut	-
127	Basisstation	310 m	Mittelhang	unbebaut	Nord
129	Basisstation	332 m	Mittelhang	unbebaut	Nord

131	Basisstation	350 m	Mittelhang	unbebaut	Süd
132	Primärstation	295 m	Talboden	unbebaut	-
133	Basisstation	338 m	Mittelhang	unbebaut	Südwest
135	Primärstation	305 m	Mittelhang	tw. bebaut	West
136	Basisstation	328 m	Hangfuß	tw. bebaut	Nordwest
139	Primärstation	307 m	Hangfuß	unbebaut	Nord
143	Basisstation	344 m	Unterhang	unbebaut	Südwest
145	Basisstation	279 m	Unterhang	bebaut	West

Quellen: Wegener Center 2013, Land Steiermark 2013 und Erhebung vor Ort; eigene Bearbeitung

Die Seehöhen der ausgewählten Stationen reichen von 257 m (Station 69) bis 520 m (Station 122). Bezüglich der Bebauung stehen 25 Stationen in unbebautem Gebiet, 16 in teilweise bebautem und fünf in bebautem Gebiet. Die Verteilung der Hanglagen und Expositionen ist in Tab. 12 zusammengefasst. Sämtliche Hanglagen sind gut abgedeckt, wobei der Mittelhang deutlich überrepräsentiert ist; dies ist eine Folge der Verteilung der Stationen des WegenerNet-Stationsnetzes. Die verschiedenen Expositionsrichtungen sind so gut wie möglich abgedeckt, wobei die Tal- und Kammlagen ohne Exposition mit 13 Stationen am öftesten vorkommen.

Tab. 12: Statistik der Hanglage und Exposition der verwendeten Stationen.

Hanglage	**Anzahl Stationen**		**Exposition**	**Anzahl Stationen**
Talboden	8		Nord	4
Hangfuß	8		Nordost	5
Unterhang	5		Ost	3
Mittelhang	13		Südost	2
Oberhang	7		Süd	5
Kammlage	5		Südwest	6
			West	4
			Nordwest	4
			Keine	13

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die folgende Abb. 37 zeigt die Lage der verwendeten Stationen (grün markiert) im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Stationsnetzes.

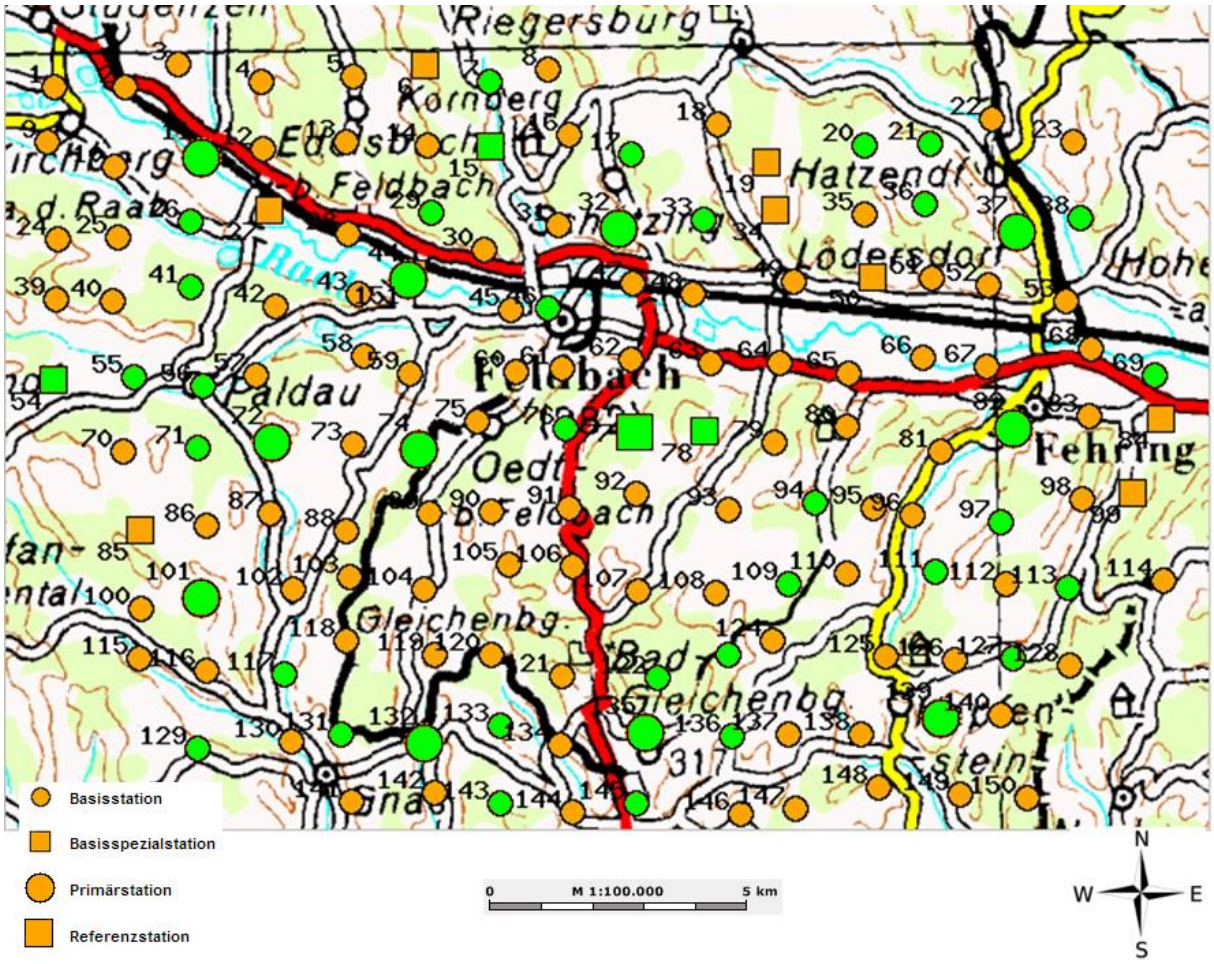


Abb. 37: Stationsnetz WegenerNet mit den verwendeten Stationen (grün markiert). *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

5.3 Auswahl der Tage mit autochthoner Witterung

Ein wichtiger Schritt dieser Arbeit ist die Auswahl geeigneter Tage mit autochthoner Witterung. Diese Selektion ist aufgrund diverser Umstände, die nachfolgend angeführt werden, schwierig und sehr zeitintensiv. Der gesamte Untersuchungszeitraum umfasst fünf Jahre oder 1826 Tage, die einzeln betrachtet und zugeordnet werden. Dieser Vorgang ist essentiell für die Aussagekraft und Qualität dieser Arbeit.

5.3.1 Kriterien für die Klassifizierung

Für den Auswahlprozess wurde ein Verfahren gewählt, das nicht nur die klassischen Kriterien für autochthone Witterungen berücksichtigt, sondern auch die Verhältnisse für die Ausbildung von Kaltluftprozessen zusätzlich miteinbezieht.

Nachfolgend werden die Kriterien aufgezählt, die für die Klassifizierung als autochthone Witterung entscheidend sind. Es ist dabei wichtig zu erwähnen, dass Tage mit autochthoner Witterung und gleichzeitiger Schneebedeckung gesondert in Kap. 6.7.5 behandelt werden, da eine Schneebedeckung die Ausstrahlung des Bodens verhindert und somit ein wichtiges Kriterium hinsichtlich der Definition autochthoner Tage nicht zutrifft.

Eine autochthone Witterung ist nach Definition des Deutschen Wetterdienstes eine "*eigenbürtige, durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist.*" (Deutscher Wetterdienst 2013). Für die Zuteilung von Tagen zu einer autochthonen Witterung gibt es unterschiedliche Herangehensweisen, eine Möglichkeit stellen folgende fünf Faktoren dar (KAISER 1958, S. 162):

1) Der Tagesgang der Strahlungsbilanz zeichnet sich durch eine ungestörte, stark tagesperiodische Schwankung aus, also maximale Ausstrahlung in der Nacht und Einstrahlung am Tag.
2) Der Tagesgang der Temperatur beschreibt einen ungestörten Verlauf mit hoher tageszeitlicher Amplitude.
3) Die relative Luftfeuchtigkeit ist gering (vgl. DIETRICH und BÖHNER 2008, S. 37).
4) Die Windgeschwindigkeiten sind niedrig.
5) Die großräumige Strömung ist gradientschwach und im Allgemeinen durch eine Hochdruckwetterlage geprägt.

Diese Kriterien wurden kritisch zu hinterfragt und auf ihre Sinnhaftigkeit hinsichtlich des zu erwartenden Aufwandes für die Auswertungen zu prüfen. Der Tagesgang der Strahlungsbilanz ist bedeutend, da laut Kap. 2.2 Kaltluft dann entsteht, wenn der Boden in der Nacht stark ausstrahlt und der bodennahen Luft Energie entzieht. Diese Ausstrahlung ist anhand der Strahlungsbilanz gut ablesbar, weswegen dieser Faktor das erste Kriterium darstellt.

Der Tagesgang der Temperatur wird als zweites Kriterium herangezogen, der sich im Allgemeinen mit jenem des Strahlungsganges (zeitversetzt) deckt. Er ist vor allem zu jenen Zeitpunkten entscheidend, wo es bei der Strahlungsbilanz Datenausfälle gibt oder die Messstation noch nicht arbeitete (Beginn der Datenaufzeichnung der Strahlungsbilanz: 20.10.2007).

Als drittes Kriterium werden die großräumigen Strömungsbedingungen herangezogen, wobei dieses Kriterium einige Schwierigkeiten in sich birgt. Zwar führt die ZAMG in Wien eine Wetterlagenklassifikation auf täglicher Basis durch, aber es gibt auch bei passender

Wetterlage viele Faktoren, die eine Ausbildung autochthoner Verhältnisse verhindern können. WAKONIGG (1970, S. 15-22) nennt als mögliche Probleme unter anderem das Auftreten von Hochnebel im Winter, das Auftreten von Konvektionsniederschlägen im Sommer sowie den möglichen Einfluss mehrerer Wetterlagen auf das Untersuchungsgebiet, wobei immer nur eine pro Tag angegeben werden darf. Diese Überlegungen wurden im Zuge der Auswertung eindrucksvoll bestätigt, da eine Hochdruckwetterlage nur zu etwa 60 % gleichbedeutend mit einem passenden Strahlungsgang war. Bei tagelang andauernden Schönwetterphasen war dieser Prozentsatz zwar etwas höher, jedoch war dieses Kriterium insgesamt weniger hilfreich als erwartet. Die großräumigen Strömungsbedingungen lieferten nur in Ausnahmefällen zusätzliche Informationen, ansonsten reichten meist die gewonnenen Informationen aus dem Tagesgang der Strahlung.

Zusätzlich wird der Luftdruck anhand von Bodenwetterkarten (Wetterzentale 2011) überprüft, genauer gesagt wie sich die Verhältnisse im 500 hPa-Bereich über dem Untersuchungsgebiet an den fraglichen Tagen darstellten. Auch dieses Kriterium hatte wurde nur in Ausnahmefällen als Entscheidungshilfe herangezogen.

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde vernachlässigt, da etwaige Niederschläge bereits anhand der Temperatur- bzw. Strahlungskurven auffallen würden. Eine niedrige Luftfeuchtigkeit bringt als zusätzliches Kriterium zu den Tagesgängen der Temperatur sowie der Strahlungsbilanz keinen Mehrwert.

Als letztes Kriterium wird der Wind herangezogen, um etwaige synoptische Einflüsse ausschließen zu können. Diese zeigen sich durch den Vergleich mit im selben Zeitraum üblichen Windgeschwindigkeiten, welche anhand der Station 074 überprüft worden sind.

Die Bewölkung wurde ebenfalls nicht miteinbezogen, da dieses Kriterium wiederum mit der Strahlungsbilanz direkt zusammenhängt und keine neuen Erkenntnisse bringen würde.

Aufgrund der oben genannten Überlegungen erfolgte die Selektion der Tage mit autochthoner Witterung zusammenfassend aufgrund folgender Kriterien:

1) Der Tagesgang der Strahlungsbilanz beschreibt eine ungestörte, stark tagesperiodische Schwankung. Dies wird mittels der Daten der Referenzstation 077 ermittelt. Die Station nahm den Betrieb mit 19.10.2007 auf, davor wurden nur die anderen Kriterien für die Bewertung herangezogen (im Falle eindeutiger Tendenzen). Vor allem etwaige nächtliche Störungen der Ausstrahlung sind nach den Erläuterungen in Kap. 2.2 ein Ausschlusskriterium.

2) Der Tagesgang der Temperatur beschreibt einen ungestörten tageszeitlichen Verlauf mit einer der Strahlung folgenden Amplitude. Auch dies wird mittels der Daten der Referenzstation 077 ermittelt.
3) Die Großwetterlage wird anhand der Wetterlagenklassifikation und –beschreibung der ZAMG analysiert (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2012a) und mittels der Bodenwetterkarten der Wetterzentrale (2011) überprüft. Dabei werden auch die dazu gehörenden textlichen Erläuterungen und im Zweifelsfall auch die Niederschlagswerte für jeden einzelnen Tag miteinbezogen, da die Wetterlagenklassifikation laut WAKONIGG (1970) nur unsichere Tendenzen liefern kann. Generell ist aber eine ausgewiesene Hochdruckwetterlage gegenüber den anderen Wetterlagen zu bevorzugen.
4) Die Windgeschwindigkeiten werden anhand der Werte der Station 074 überprüft und sind bei deutlich überhöhten Geschwindigkeiten auch ein Ausschlusskriterium. Dieser Fall trat jedoch nur selten ein, da bei Zutreffen der anderen Kriterien niedrige Windgeschwindigkeiten der Regelfall sind.

5.3.2 Methodik der Klassifizierung

Die Klassifizierung eines Tages mit autochthoner Witterung erfolgte nicht für einen Tag von 00-24 Uhr, sondern von 08 Uhr morgens bis 08 Uhr des Folgetages. Dieser Zeitraum wurde aus folgenden Überlegungen heraus gewählt:

- Durch die Wahl dieses Zeitraums können die Kaltluftprozesse bestmöglich und umfassend analysiert werden. Dadurch fallen Tage heraus, an denen die Kaltluftprozesse nach Mitternacht erliegen (und somit keine autochthone Witterung vorherrscht), und es werden Tage berücksichtigt, die bei einer Betrachtung von 00-24 Uhr vielleicht nicht erfasst worden wären.
- Die Morgenstunden des ersten Tages (von 00-08 Uhr) sind sowohl für die Klassifizierung als autochthone Witterung, als auch für die Voraussetzungen zur Kaltluftproduktion in der darauf folgenden Nacht nicht relevant.
- Der späteste Sonnenaufgang des Jahres findet in diesem Gebiet etwa um 07:45 Uhr statt (vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2011), womit bei einer Zeitspanne bis 08 Uhr des Folgetages in jedem Fall der Zeitraum bis zum (theoretischen) Sonnenaufgang abgedeckt ist; zu diesem Zeitpunkt wird im Normalfall die Strahlungsbilanz wieder positiv und die Temperatur beginnt zu steigen.
- Der früheste Sonnenaufgang ist im Untersuchungsgebiet kurz nach 05 Uhr MEZ, womit auch eine Zeitspanne von 05 Uhr des ersten bis 08 Uhr des Folgetages denkbar gewesen wäre. Aber aufgrund der besseren Möglichkeiten zur Auswertung (genau 24

Stunden eines Tages gelangen zur Auswertung) wurde diese Überlegung, die keinen deutlichen Mehrwert bringen würde, vernachlässigt.

- Eine zeitgenaue Einteilung jedes einzelnen Tages je nach Zeitpunkt des Sonnenaufgangs wurde überlegt, aber dann aufgrund der Schwierigkeiten mit der Auswertung sowie einem erheblichen Aufwand ohne Mehrwert wieder verworfen.

Im Sinne einer möglichst aussagekräftigen Analyse und wissenschaftlichen Auswertung scheint dieser Schritt der Einteilung von 08 bis 08 Uhr des Folgetages anstatt von 00-24 Uhr unumgänglich.

In der Literatur findet man unterschiedliche Angaben über die Häufigkeiten von Tagen mit autochthoner Witterung im Jahresdurchschnitt, wobei im mitteleuropäischen Raum meist Zahlen im Bereich von 20-25 % (73-81 Tage pro Jahr) genannt werden (vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010, S. 19 und GROSS 2011, S. 6). Insgesamt wurden nach obigen Kriterien im Untersuchungszeitraum von 2007 bis 2011 364 Tage (inkl. 11 Tage mit Schneebedeckung) mit autochthoner Witterung gezählt, was einem Anteil von 19,93 % aller Tage entspricht. Im Jahresdurchschnitt ergibt das 72,8 Tage, wobei das Jahr 2007 mit 62 die wenigsten und das Jahr 2011 mit 89 Tagen die eindeutig meisten aufweist. Allgemein wird aufgrund des Klimawandels mit einer Zunahme der Tage mit autochthoner Witterung gerechnet (vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010, S. 19).

Für einen Vergleich wird OBERTH (2010) herangezogen, der im Zuge der Windauswertung im Gebiet des WegenerNet - Messnetzes ebenfalls eine Selektion von Tagen mit autochthoner Witterung durchgeführt hat. OBERTH hat für das Jahr 2008, das gleichzeitig den gesamten Untersuchungszeitraum seiner Arbeit darstellt, 34 Tage mit autochthoner Witterung gezählt; in dieser Arbeit sind es im Jahr 2008 64 Tage. Für diesen doch auffälligen Unterschied können mehrere Gründe gefunden werden:

- OBERTH hat sich genau 17 Tage für das Sommer- sowie das Winterhalbjahr gesucht, um die Jahreszeiten direkt vergleichen zu können; dies führte wohl dazu, dass in einer der beiden Jahreszeiten Tage mit autochthoner Witterung weggelassen wurden. In dieser Arbeit wurden im Jahr 2008 in den Wintermonaten 27 Tage und in den Sommermonaten 37 Tage mit autochthoner Witterung gezählt.
- OBERTH ließ mit der Bewölkung und einer stärkeren Miteinbeziehung des Windes zwei Faktoren mehr einfließen. Dies dürfte zu einer noch strengeren Auswahl geführt haben.

- Es ist davon auszugehen, dass OBERTH die Wetterlagenklassifikation der ZAMG strenger berücksichtigt hat. Bei der Auswertung in dieser Arbeit sind einige Tage dabei, die nicht explizit als Hochdruckwetterlage ausgewiesen sind; diese wurden dennoch als autochthon klassifiziert, wenn die anderen Kriterien zutrafen.
- OBERTH hat die Tage immer von 00-24 Uhr analysiert, während in dieser Arbeit der Zeitraum von 08 bis 08 Uhr des Folgetages gewählt wurde. Dadurch sind mit Sicherheit zusätzliche Unterschiede bei der Erfassung der Tage mit autochthoner Witterung entstanden.

5.3.3 Fallbeispiele

Die Selektion der Tage, an denen höchstwahrscheinlich eine autochthone Witterung vorherrschte, ist zu einem gewissen Grad subjektiv. Je nach Auswahl bzw. Strenge bei der Bewertung der verschiedenen Kriterien wird jeder Autor ein anderes Ergebnis erzielen. Zur besseren Erklärung der Handhabung der Kriterien in dieser Arbeit werden nachfolgend zwei Fallbeispiele zur Auswahl autochthoner Tage sowie ein weiteres für einen Tag mit Schneebedeckung bei autochthoner Witterung ausgewählt.

a) <u>Fallbeispiel 1: Perfekte Voraussetzungen für eine autochthone Witterung</u>

Als Beispiel für einen Tag mit optimalen Bedingungen wird der 21.09.2010 gewählt. Die Abb. 38 zeigt die Verlaufskurve der Lufttemperatur dieses Tages von 08 bis 08 Uhr des nächsten Tages. Die Temperatur ist bereits ab etwa 06:40 Uhr ansteigend, was mit dem Zeitpunkt des Sonnenaufgangs in diesem Gebiet zusammenfällt (für Graz: 06:43 Uhr, vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2011). Danach verzeichnet die Kurve einen gleichmäßigen Anstieg bis zum Maximum um 14 Uhr, um danach eine Zeitlang stabil zu bleiben und ab 16 Uhr zuerst steiler und dann sanfter bis zum Sonnenaufgang des nächsten Tages um etwa 06:40 abzufallen. Der Verlauf folgt im Wesentlichen jenem der Strahlungsbilanz (siehe Abb. 39), was physikalisch auf die Wärmeleitung der Erdoberfläche an die Luft zurückzuführen ist.

Der etwas unruhige Verlauf der Kurve ist vor allem auf die Messung im Fünf-Minuten-Takt zurückzuführen, welche schon die kleinsten Änderungen wie kurzfristig auftretende Bewölkung oder Änderungen der Windparameter sofort registriert. Die Turbulenzen gerade in der Erwärmungsphase sind auf die Durchmischung verschiedener Luftschichten beim gleichzeitig auftretenden tagesperiodischen Windmaximum zurückzuführen. Bei autochthoner Witterung wird der Zeitpunkt der niedrigsten Temperatur im Allgemeinen

knapp vor Sonnenaufgang erreicht, was in diesem Fall auch zutrifft (vgl. BLÜTHGEN und WEISCHET 1980, S. 125).

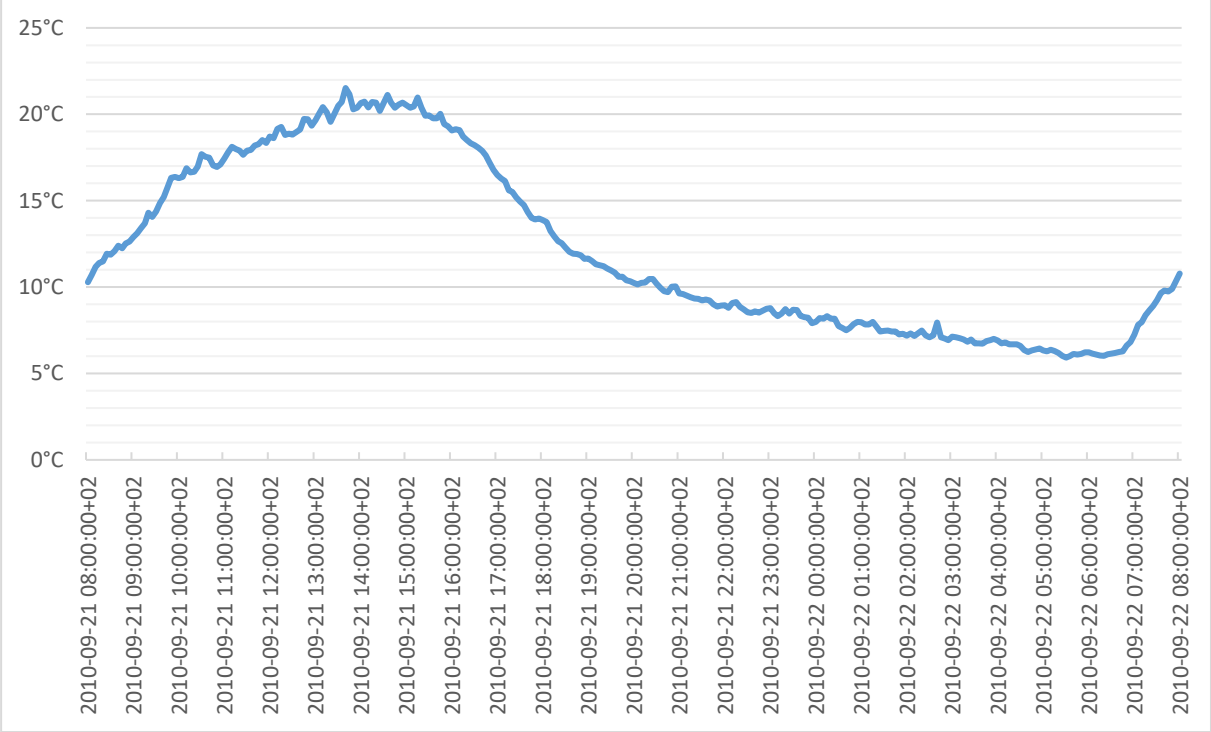


Abb. 38: Kurve der Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes von 21.09.2010, 08 Uhr bis 22.09.2010, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Kurve der Strahlungsbilanz in Abb. 39 nimmt einen ähnlich stabilen Verlauf wie jene der Lufttemperatur, wobei die Fluktuationen wieder hauptsächlich vom kurzzeitigen Aufnahmeintervall von fünf Minuten herrühren. Die Kurve beginnt kurz vor 08 Uhr steil ins Positive zu steigen, also etwa 1,5 h nach Sonnenaufgang, und erreicht ihr Maximum gegen 13 Uhr mit mehr als 400 W/m², was auf ungestörte Sonneneinstrahlung bei fehlender Bewölkung schließen lässt. Um 18 Uhr, also bereits eine Stunde vor dem Sonnenuntergang um 18:59 (vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2011), fallen die Werte ins Negative und bleiben bis nach dem Sonnenaufgang um 06:40 konstant negativ bei etwa -50 W/m². Dies ist ein deutliches Zeichen für fehlende Bewölkung und optimale Ausstrahlungsbedingungen.

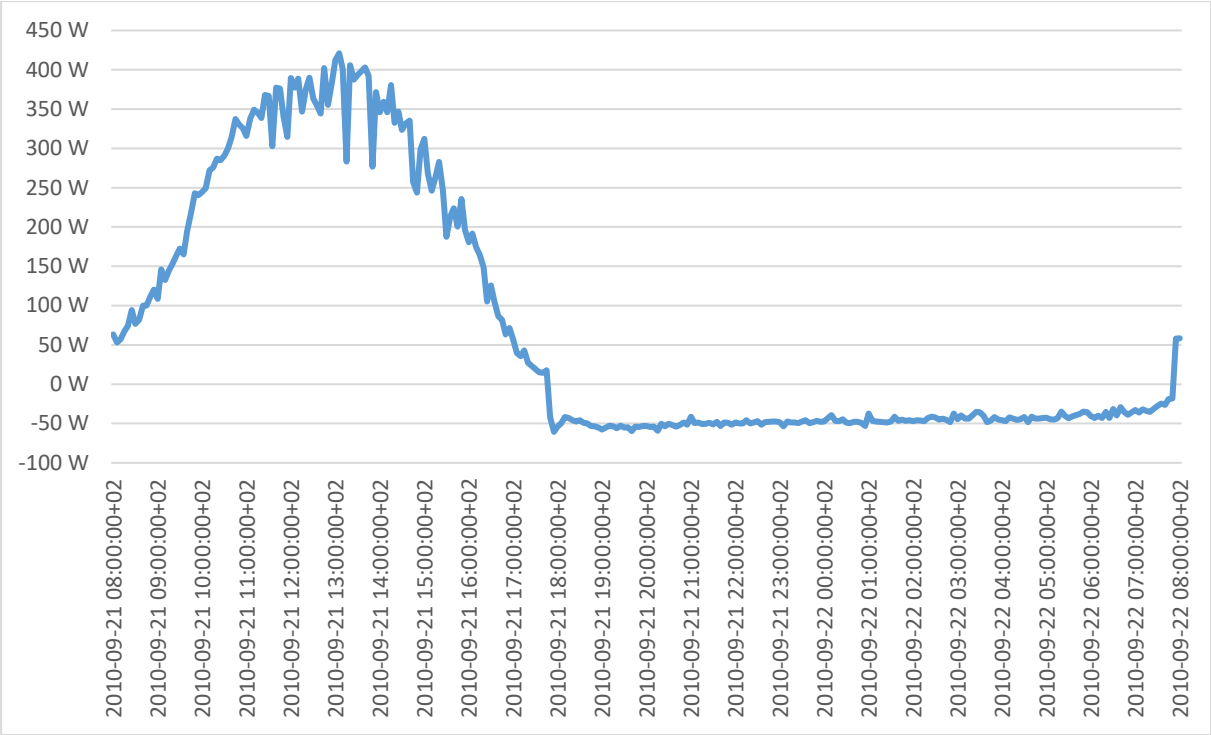


Abb. 39: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes von 21.09.2010, 08 Uhr bis 22.09.2010, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [W/m²]. *Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung*

Die Karte des Geopotentials der 500 hpa Druckfläche in Kombination mit der Bodendruckkarte und der relativen Topographie (siehe Abb. 40) zeigt für diesen Zeitraum ein stabiles Hoch über Mitteleuropa und einen Luftdruck von 1020 hPa. Dies wird auch in der Wetterlagenklassifikation der ZAMG (2012a) beschrieben: *„Hoch über West- und Mitteleuropa; über Mitteleuropa baut sich ein stabiles Hochdruckgebiet auf. Meist scheint in ganz Österreich von der Früh weg die Sonne, auf den Bergen gibt es ausgezeichnete Fernsicht.“* Die Einfärbung des Gebietes mit den Werten des Geopotentials hat in dieser Betrachtung keine Bedeutung.

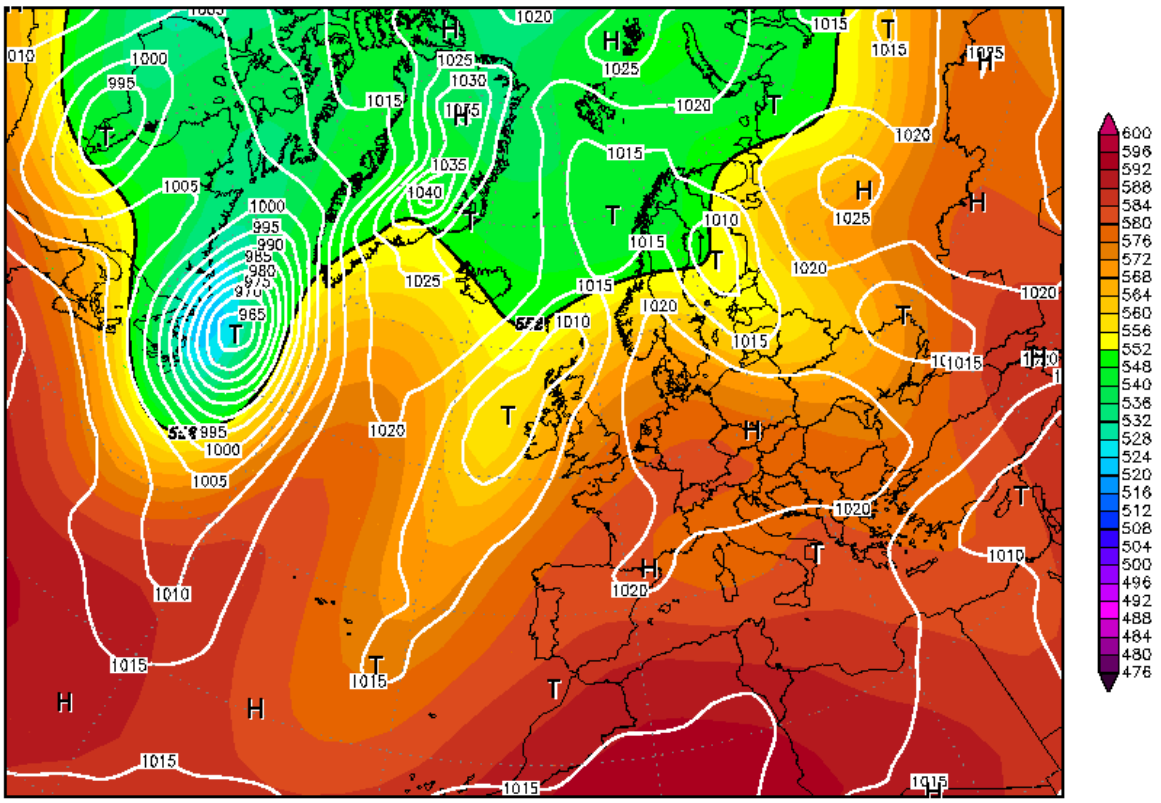


Abb. 40: Darstellung des Geopotentials der 500 hPa Druckfläche in Verbindung mit der relativen Topographie und der Bodendruckkarte (in hPa) von Europa am 22.09.2010 um 00 Uhr (UTC). *(Quelle: Wetterzentrale 2011; eigene Bearbeitung)*

Somit sind für diesen Tag alle ausgewählten Kriterien optimal erfüllt und es kann von einer autochthonen Witterung ausgegangen werden.

b) <u>Fallbeispiel 2: Grenzwertige Bedingungen mit zu starker Fluktuation des Strahlungsganges</u>

Als Beispiel für einen Tag, der es aufgrund eines nicht passenden Kriteriums nicht in die Auswahl geschafft hat, wird der 11.10.2008 herangezogen.

Die Kurve der Lufttemperatur (Abb. 41) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie jene des vorhergehenden Beispiels in Abb. 38, wobei der flache Anstieg der Temperatur von 10 Uhr bis zum Maximum um 15 Uhr mit etwa 20 °C auffällt. Dies kann mit der Kurve der Strahlungsbilanz in Abb. 42 erklärt werden, die aufgrund verstärkter Bewölkung einen Einbruch erfährt. Die Temperatur folgt diesem Verlauf zeitlich versetzt und bei weitem nicht so deutlich; ohne die auftretende Bewölkung wäre die Temperaturkurve jedenfalls mit Sicherheit noch steiler angestiegen. Dieser flache Verlauf stellt für sich noch kein Problem dar. Problematisch ist hingegen der Anstieg der Temperatur ab 03:30 Uhr, der ein durchziehendes Wolkenfeld

vermuten lässt. Dies sind keine optimalen Bedingungen für Kaltluftbildung und –abfluss. Ab 05:30 Uhr sinkt die Temperatur dann wieder bis zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs. Es kann somit schon in dieser Grafik erkannt werden, dass in dieser Nacht keine optimalen Bedingungen herrschen.

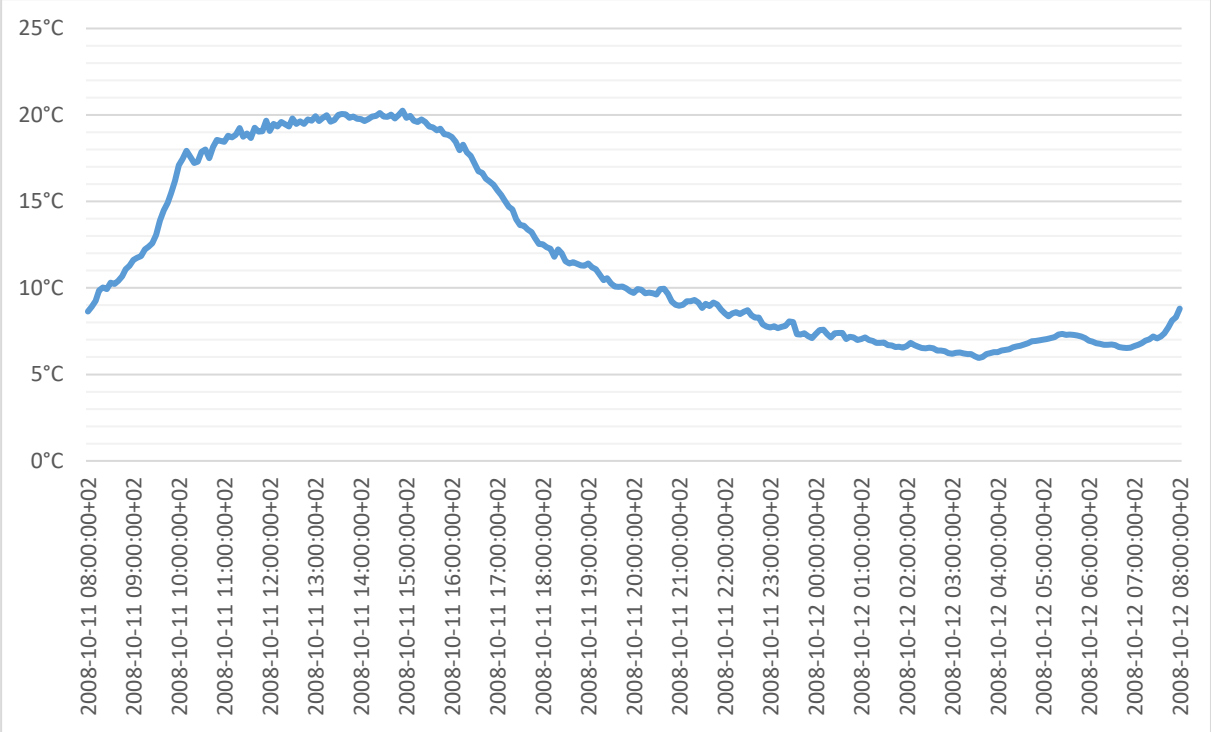


Abb. 41: Kurve der Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Gebietes von 11.10.2008, 08 Uhr bis 12.10.2008, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Hinsichtlich der Kurve der Strahlungsbilanz in Abb. 42 zeigt sich am Vormittag des 11.10. ein etwas anderes Bild als bei der Temperaturkurve – der Einbruch von 09:30 bis 10:30 Uhr lässt auf ein durchziehendes Wolkenfeld schließen; Niederschlag wird in diesem Zeitraum keiner verzeichnet. Das Maximum mit mehr als 300 W/m² wird um 12 Uhr erreicht, um dann abzusinken und bereits vor 17 Uhr negativ zu werden. Bis etwa 02:30 Uhr des folgenden Tages ist der Verlauf der Kurve optimal, bis zuerst ein kurzer und schließlich ein längerer Anstieg verzeichnet werden. Wie in der Abbildung der Lufttemperatur ebenfalls zu erkennen ist, stört in diesem Zeitraum wohl ein durchziehendes Wolkenfeld die Ausstrahlung.

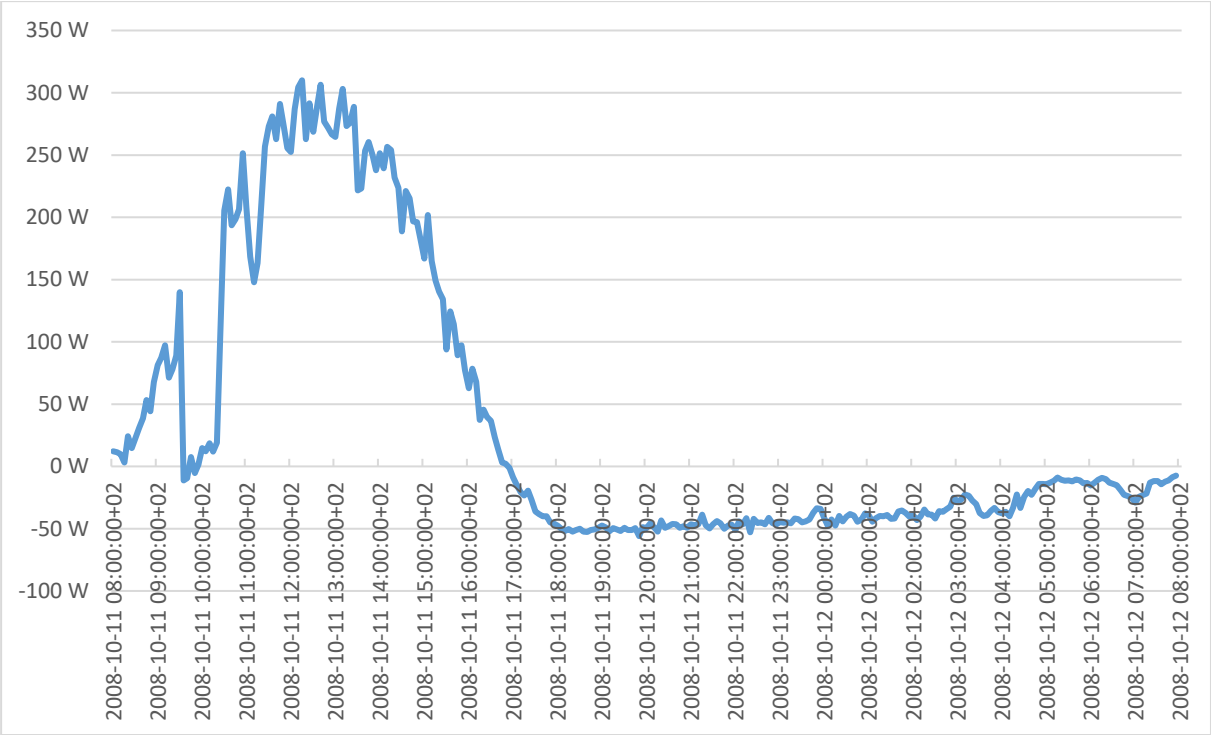


Abb. 42: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes von 11.10.2008, 08 Uhr bis 12.10.2008, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [W/m²]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die ZAMG hat für den Zeitraum von 6.10. bis 15.10. dieses Jahres die Wetterlagenklassifikation „Hoch über West- und Mitteleuropa“ vergeben, und auch die textlichen Erläuterungen lassen auf gute Bedingungen schließen: *„Der am 9. noch schwache Hochdruckeinfluss sorgt immerhin verbreitet für Aufheiterung letzte Schauer treten im Südosten auf. Danach setzt sich das Hoch mit Zentrum über Mitteleuropa voll durch. Jahreszeittypisch beginnt der Tag aber oft mit Nebel oder Hochnebel von unterschiedlicher Andauer. Je nach der Anzahl der Sonnenstunden werden Temperaturmaxima von 10 bis 23 °C erreicht. Am 13. d. M. wird das Hoch schwächer“* (vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2012a).

Dies kommt auch in der Abb. 43 gut heraus, in der das Geopotential der 500 hpa Druckfläche mit der Bodendruckkarte und der relativen Topographie kombiniert wird. An diesem Tag liegt ein ausgedehntes Hoch über Mitteleuropa und verspricht mit einem Luftdruck von 1030 hPa optimale Verhältnisse.

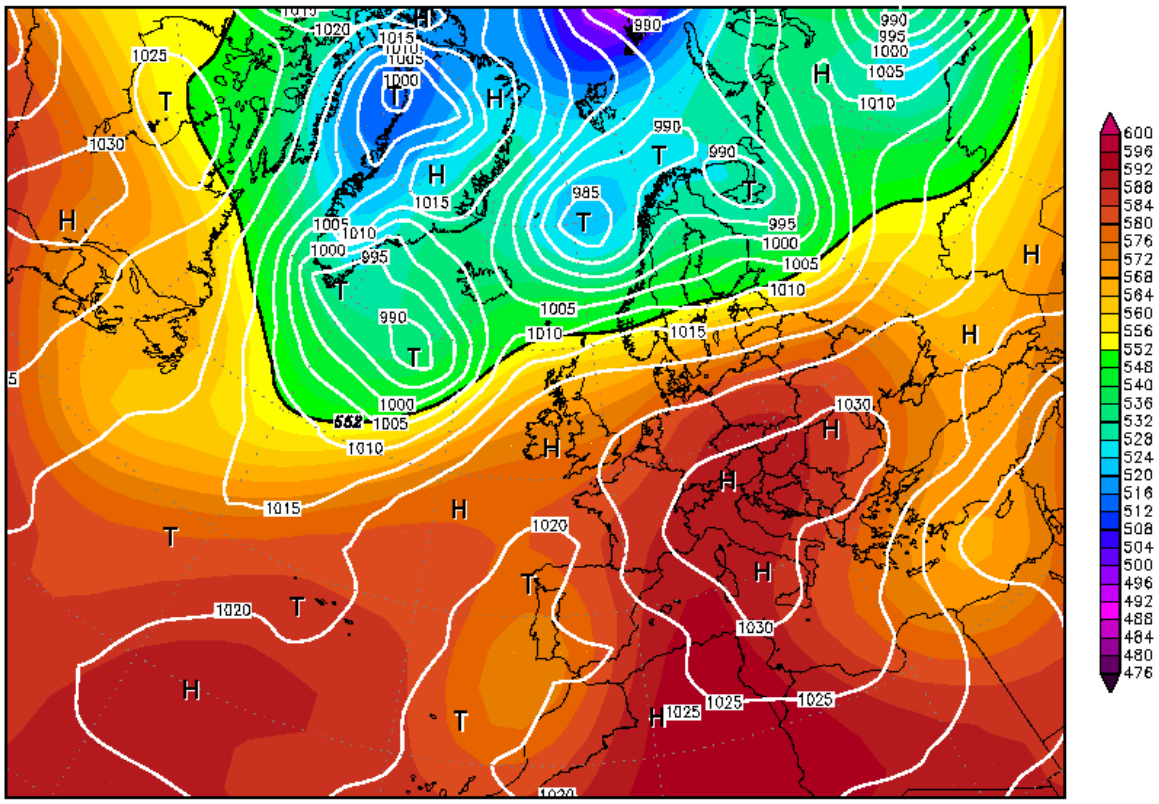


Abb. 43: Darstellung des Geopotentials der 500 hPa Druckfläche in Verbindung mit der relativen Topographie und der Bodendruckkarte (in hPa) von Europa am 12.10.2008 um 00 Uhr (UTC). *(Quelle: Wetterzentrale 2011; eigene Bearbeitung)*

Man kann mit Sicherheit darüber diskutieren, ob dieser Tag in die Auswahl gehört hätte oder nicht – in dieser Arbeit war die Störung um etwa 03 Uhr in der Nacht des 12.10. ausreichend, um ihn nicht auszuwählen. Autochthone Verhältnisse sind an diesem Tag zwar großteils gegeben, aber vor allem hinsichtlich der Bewertung des Kaltluftabflusses sind in der Nacht ungestörte Bedingungen notwendig. Da nur die Werte der Station 077 ausgewertet werden, ist nicht abzusehen, wie die Verhältnisse im übrigen Untersuchungsgebiet ausgesehen haben. Die Störungen könnten Stellenweise noch gravierender sein, was die Kaltluftprozesse erheblich behindern würden. Im Zweifelsfall wurden solche Tage nicht berücksichtigt, um nur mit optimal passenden Tagen eine bestmögliche Aussagekraft garantieren zu können.

c) Fallbeispiel 3: Schneebedeckung und autochthone Witterung

Interessant ist auch die Rolle der Schneebedeckung, die laut HÄCKEL (2012, S. 339) ein verstärkender Faktor für die Kaltluftbildung ist. Der Schnee verhindert zwar die Ausstrahlung des Bodens, jedoch können Schmelz- und Gefriervorgänge im Tagesverlauf starken Einfluss auf die bodennahe Luft haben. Diesem Thema wurde das Kap. 6.7.5 gewidmet, wo nur auf die

Tage mit Schneebedeckung bei autochthoner Witterung eingegangen wird. Die Messstationen der ZAMG halten die Art und Höhe der Schneebedeckung im Gegensatz zu den Stationen des WegenerNet fest; dadurch gibt es neben der Strahlungsbilanz der WegenerNet-Messstation 077, aus der man eine Schneebedeckung bereits erahnen kann, eine weitere Grundlage zur Auswahl von geeigneten Tage mit Schneebedeckung. Natürlich kann diese im Untersuchungsgebiet durchaus unterschiedlich sein bzw. bei geringer Schneedeckenhöhe stellenweise auch ganz fehlen, worauf hinsichtlich einer Bewertung und Analyse durch strengere Auswahlkriterien Rücksicht genommen werden muss.

Die allgemeinen Kriterien für die Selektion der Tage mit autochthoner Witterung (siehe oben) treffen nur teilweise zu; die Temperaturkurve ist wie die Kurve der Strahlungsbilanz schwer einschätzbar: je nach der Intensität der Einstrahlung tagsüber können Schmelzvorgänge für respektable Werte bei der Strahlungsbilanz sorgen, während bei fehlenden Schmelzvorgängen die Werte kaum 30 W/m² erreichen. In Abb. 44 ist dieser Fall für eine Station in der Antarktis bei wolkenlosem Wetter aufgezeigt (KRAUS 2008, S. 178), die als grundlegende Theorie auch für das Untersuchungsgebiet herangezogen werden kann. Die Strahlungsbilanz (Q_0) ist in der Nacht negativ und erreicht tagsüber nur sehr niedrige Werte. Die hohen Werte der kurzwelligen Ausstrahlung (K↑) kommen aufgrund der sehr hohen Albedo von über 80 % des äußerst reinen Schnees zustande. Im Vergleich dazu ist die Albedo in Abb. 45 (KRAUS 2008, S. 179) auf dem Vernagtferner in Tirol nur etwa 26 %. In dieser Abbildung geht man von einer schmelzenden Eisoberfläche aus und man erkennt als Ergebnis sofort die sehr hohen Werte der Globalstrahlung (G) und in weiterer Folge auch der Strahlungsbilanz (Q_0). In der Nacht erreicht die Ausstrahlung Spitzenwerte von bis zu -100 W/m², was das Ergebnis der höheren langwelligen Ausstrahlung (L↑) gegenüber der langwelligen Einstrahlung (L↓) ist.

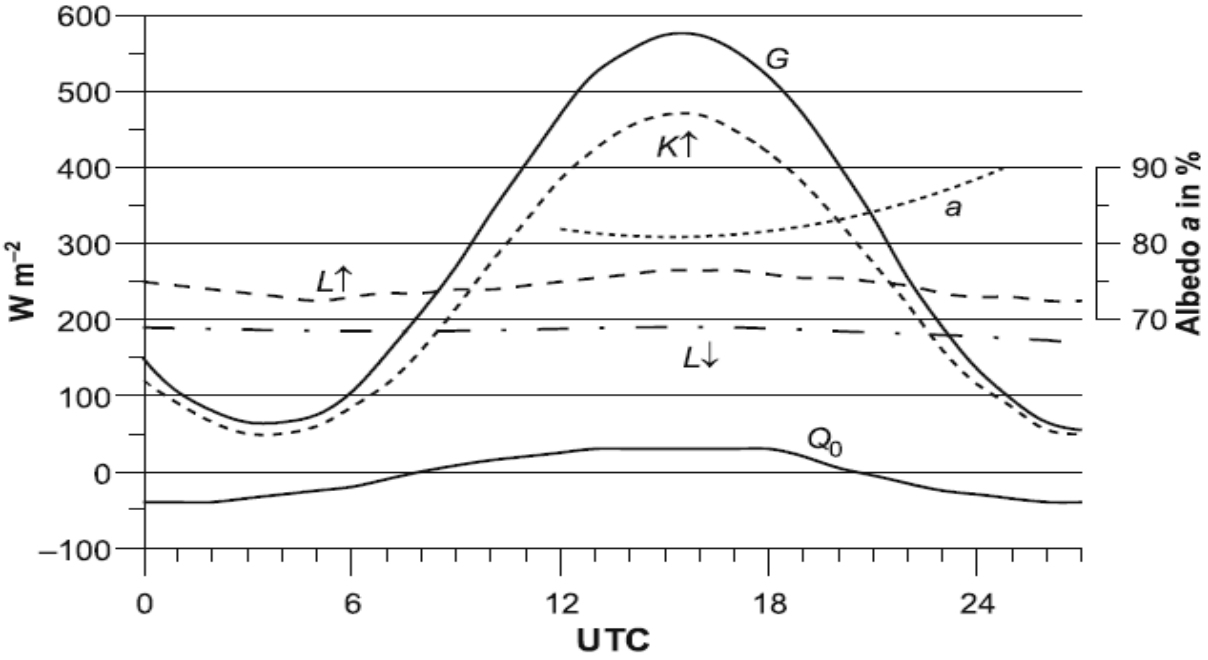


Abb. 44: Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanz und Albedo einer nichtschmelzenden Schneeoberfläche eines Wintertages 1984 in der Antarktis. *(Quelle: KRAUS 2008)*

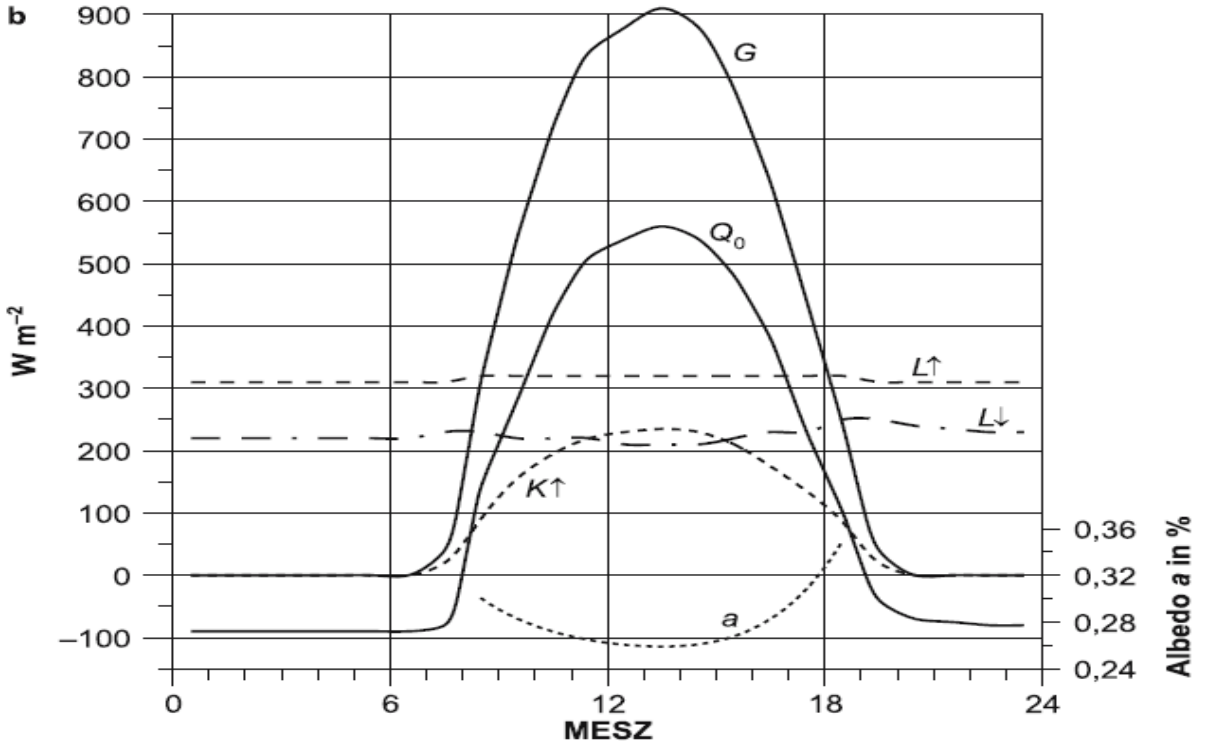


Abb. 45: Tagesgang der Komponenten der Strahlungsbilanz und Albedo an einer schmelzenden Eisoberfläche an einem Sommertag 2000 bei wolkenlosem Wetter auf dem Vernagtferner in Tirol. *(Quelle: KRAUS 2008)*

Die Strahlungsbilanz kann bei Schneebedeckung und autochthoner Witterung je nach Intensität der Sonnenstrahlung und der Schmelzvorgänge sehr unterschiedlich aussehen. Neben der nicht eindeutigen Strahlungsbilanz und der Temperaturkurve werden als weitere Kriterien für die Selektion die Wetterlagenklassifikation der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2012a) sowie die Bodendruckkarten (Wetterzentrale 2011) herangezogen, sowie das Vorhandensein einer Schneedecke und die Dichte der Bewölkung aus den Jahrbüchern der ZAMG für die relativ nahe gelegene Station Graz Flughafen ausgewertet (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016). Die Kaltluft ist in diesem Fall nicht von der Ausstrahlung und dem Wärmehaushalt des Bodens gesteuert, sondern von der Abkühlung der Schneedecke, die der bodennahen Luft Energie entzieht.

Die Tage mit Schneebedeckung bei autochthoner Witterung haben also einen deutlich erkennbaren Tagesgang der Strahlungsbilanz, was bei Hochnebelbedeckung komplett wegfallen würde. Auch bei kältesten Temperaturen (Eistage mit ganztägigen Temperaturen von <0 °C) sind ein Ausstrahlungseffekt und somit Schmelzvorgänge an der Schneeoberfläche festzustellen.

Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet WegenerNet nur elf Tage im gesamten Untersuchungszeitraum von 01.01.2007 bis 31.12.2011 gezählt, für welche die ausgewählten Kriterien zutreffen (drei davon sind Eistage mit ganztägigen Temperaturen <0 °C). Der Hauptgrund für diese niedrige Zahl ist die geringe Anzahl von Tagen mit einer Schneedecke. An diesen elf Tagen passen die Kriterien gut, aber perfekte Übereinstimmungen wie bei Tagen ohne Schneebedeckung sind selten. Als Beispiel für einen Tag mit autochthoner Witterung und gleichzeitiger Schneebedeckung sowie geringer Bewölkung wird der 01.02.2010 herangezogen (Abb. 46).

An der Kurve der Temperatur ist erkennbar, dass der Verlauf etwas unruhiger und unregelmäßiger ist als bei dem Fallbeispiel 1 ist. Dies liegt auch an der vergleichsweise geringen Schwankungsbreite der Werte. Scheinbar stören auch Wolkenfelder den optimalen Verlauf, aber vor allem die nächtlichen Bedingungen passen gut: bis 07 Uhr sinkt die Temperatur auf den Tiefststand von -10 °C. Die höchsten Temperaturen werden gegen 12:30 Uhr mit +4 °C erreicht.

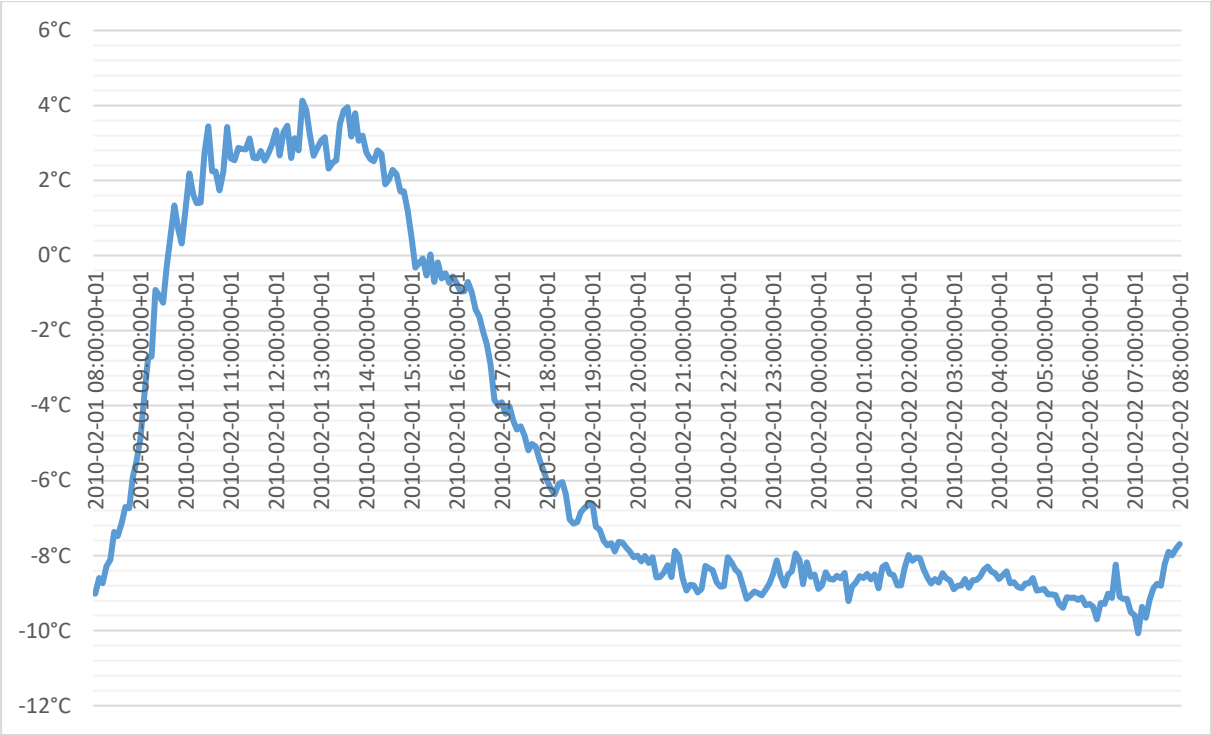


Abb. 46: Lufttemperatur der Station 077 des WegenerNet-Gebietes von 01.02.2010, 08 Uhr bis 02.02.2010, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Der Verlauf des Strahlungsganges am 01.02.2010 ist sehr unregelmäßig (Abb. 47); hier wird der Einfluss der Bewölkung offensichtlich. Ab etwa 10 Uhr wird die Bilanz positiv, was aufgrund der Schneebedeckung auf Schmelzvorgänge schließen lässt. Die Temperatur hat zu diesem Zeitpunkt bereits +2 °C erreicht. Danach gibt es noch Spitzen um 12:30 und 13:30 Uhr, dazwischen wird die Bilanz aber sogar negativ. Schon vor 15 Uhr sinkt die Bilanz auf den Tiefststand von -90 W/m² und sie bleibt auch die gesamte Nacht über im negativen Bereich.

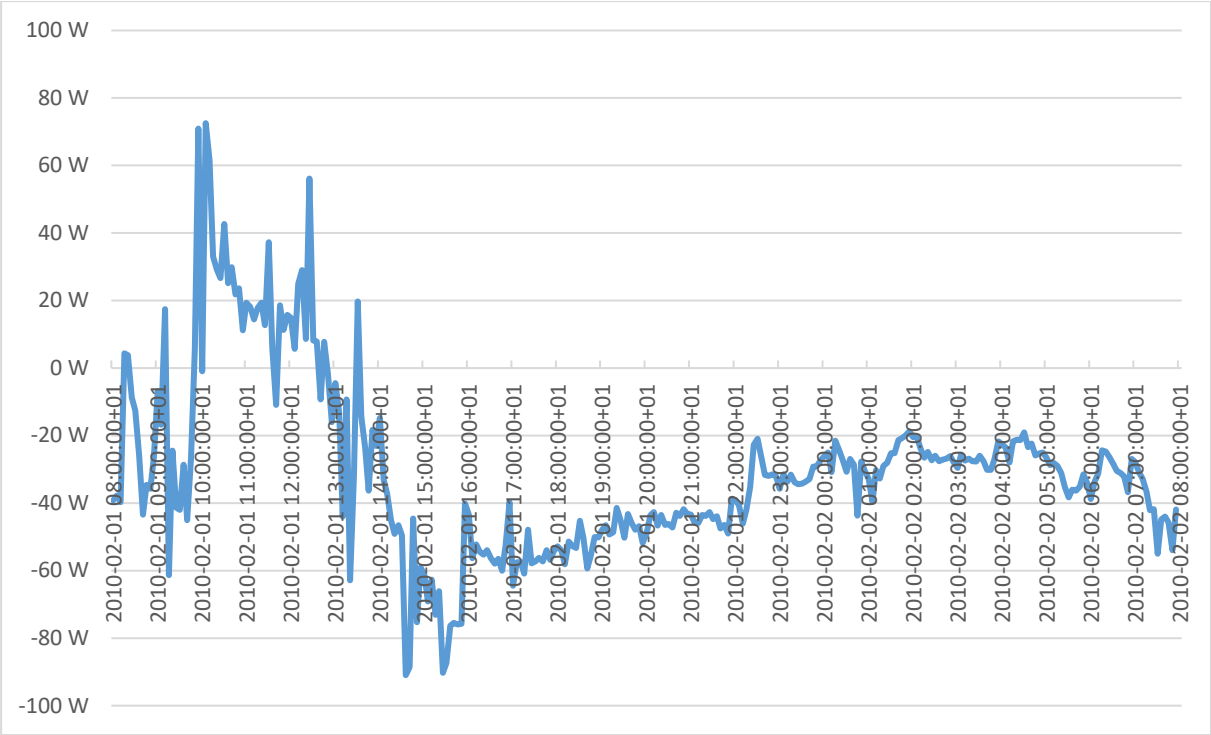


Abb. 47: Strahlungsbilanz der Station 077 des WegenerNet-Gebietes von 01.02.2010, 08 Uhr bis 02.02.2010, 08 Uhr (MEZ) im Fünf-Minuten-Takt in [W/m²]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die an dieser Stelle nicht angeführte Karte des Geopotentials des 500 hPa Druckniveaus zeigt ein Hoch im Westen Österreichs an (Wetterzentrale 2011); die ZAMG spricht von einem Hoch über Mitteleuropa mit viel Sonne in den südlichen Landesteilen (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2012a). Das Jahrbuch der ZAMG weist an der Station Graz Flughafen eine Schneehöhe von 14 cm aus, die Bewölkung wird mit einem Wert von 2,3 / 10 angegeben (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016).

Es spricht also alles dafür, dass an diesem Tag eine autochthone Witterung bei gleichzeitiger Schneebedeckung im gesamten Untersuchungsgebiet vorliegt.

5.4 Relevante externe Datenquellen

Die Daten der beiden ZAMG-Klimastationen im Untersuchungsgebiet (Bad Gleichenberg und Feldbach) dienen als wichtige Vergleichswerte. Die relevanten Parameter für die Auswertung umfassen die Lufttemperatur, Windverhältnisse sowie den Niederschlag.

Die Daten der außerhalb des Untersuchungsgebietes liegenden Stradner Kogel und Kapfensteiner Kogel wurden von Markus DUSCHEK (2012 bzw. 2014) zur Verfügung gestellt. Die Station am Stradner Kogel wurde bereits im Jahr 2010 unter eigener Mithilfe errichtet und kann somit auch zeitlich direkte Vergleichswerte zu jenen des WegenerNet-Gebietes liefern, während die Station am Kapfensteiner Kogel erst im Jahr 2013 errichtet wurde und somit nur bedingt als Vergleichsstation dienen kann.

Die Werte der Station Klöch wurden dem Landes-Umwelt-Informationssystem (LUIS) des Landes Steiermark entnommen (Landesumweltinformation Steiermark 2013) und als Stundenmittelwerte analysiert.

5.5 Statistische Methoden

Sämtliche Diagramme (mit Ausnahme der Windrosen) wurden mit den Standardfunktionen in Microsoft Excel erstellt. Vor allem bei der Farbgebung wurde auf eine gut nachvollziehbare und schnell erkennbare Darstellung geachtet. Die Windrosen wurden mit dem Programm WRPLOT von „Lakes Environmental“ erstellt, einem Freeware-Programm mit großem Funktionsumfang.

Fast alle statistischen Methoden dieser Arbeit bedürfen keiner genaueren Analyse bzw. Beschreibung, da sie meist selbsterklärend und in der Wissenschaft standardmäßig angewendet werden. Als weiterführende Lektüre sei an dieser Stelle SCHÖNWIESE (2013a) empfohlen.

Eine Ausnahme bietet die Trend-Funktion, die nachfolgend beschrieben wird.

Die Trend-Funktion in Excel

Ein wichtiger Teil der Auswertungen und Diagramme ist die Darstellung eines linearen Trends, der von Excel automatisch berechnet wird. An manchen Stellen scheint die Gerade Ausreißer nicht oder zu wenig zu berücksichtigen, was aber nicht der Fall ist – zur besseren Erklärung folgt die Beschreibung der Funktionsweise der Trenderstellung durch Excel, die der offiziellen Seite entnommen worden ist (Microsoft 2013).

Mit der TREND-Funktion wird in Excel auf Grundlage der Methode der kleinsten Quadrate eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die verwendete Formel lautet dabei:

$$y=mx + b$$

wobei m die Steigung und b den Y-Schnittpunkt darstellt. Als Ergebnis wird auch das Bestimmtheitsmaß R^2 angezeigt, das die Variation von Y angibt und zwischen 0 und 1 liegt; dabei bedeutet 1 „perfekter linearer Zusammenhang“ und 0 „kein linearer Zusammenhang“. Das Bestimmtheitsmaß sagt aber nichts über die statistische Signifikanz des ermittelten Zusammenhangs aus, da dafür die Stichprobengröße bekannt sein und ein Stichprobentest ausgeführt werden müsste (INWT Statistics 2014).

6. Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist das zentrale Klimaelement dieser Arbeit und wird daher ausführlich behandelt. Sämtliche zeitliche Angaben der folgenden Diagramme und Beschreibungen (beispielsweise beim Tagesgang) sind im UTC-Format gehalten (Coordinated Universal Time). Um die gebräuchlichere MEZ (Mitteleuropäische Zeit) zu erhalten, wird demnach während der Sommerzeit zwei und während der Winterzeit eine Stunde hinzugezählt. Der Grund für die Auswahl des UTC-Formats liegt in der einfachen internationalen Vergleichbarkeit der Daten.

6.1 Mittelwerte, Minima und Maxima

Die mittleren täglichen Temperaturen im Zeitraum eines Monats, der Jahreszeiten sowie des Jahres geben einen guten Überblick über die thermische Situation an einem Ort. Diese sind gemeinsam mit den mittleren täglichen Minima sowie Maxima der jeweiligen Zeitspanne für alle ausgewerteten Stationen für den Zeitraum von 2007-2011 in der nachfolgenden Tab. 13 dargestellt. Die einzelnen Werte entstehen dabei aus der Mittelung der Fünf-Minuten-Werte jeder einzelnen Station. Das Kürzel mTmin bezeichnet die mittleren täglichen Minima, mTmax die mittleren täglichen Maxima und mT das mittlere tägliche Mittel der Lufttemperatur für die jeweilige Zeitspanne. Die farbliche Kennzeichnung ist ein Hinweis auf besonders warme oder kalte Bedingungen: hellrot bedeutet einen im Vergleich zu den anderen Stationen sehr hohen Wert, das absolute Maximum ist in dunkelrot gehalten; hellblau bedeutet einen kühlen Wert, und das absolute Minimum ist in dunkelblau gehalten. Bei zwei gleichen Werten, die durch die Rundung der Zahlen entstehen, wird nur das tatsächliche Maximum bzw. Minimum farblich besonders hervorgehoben.

<u>Die mittleren täglichen Minima (mTmin)</u>

Die niedrigsten Werte: Vor allem im Frühling und Winter sind die Messwerte an der Station 007, die im Norden des Gebietes an einem Hangfuß gelegen ist, am niedrigsten. Diese Station in einem teilweise bebauten Gebiet des Ortes Wetzelsdorf liegt am Rande des Talbodens in direkter Umgebung eines Sportplatzes. Die Station liegt am Treffpunkt zweier Seitentäler aus den Richtungen Nordnordwest und Nordost, aus denen bedingt durch die großflächigen landwirtschaftlichen Flächen ungehindert Kaltluft abfließen kann. Die im Süden angrenzenden Gebäude sorgen darüber hinaus für eine gewisse Stauwirkung, wodurch die

Kaltluft nicht ungehindert abfließen kann. Im Frühling wird an keiner anderen Station ein Wert unter -3,5 °C, im Winter keiner unter -4 °C beim mittleren täglichen Minimum erreicht.

Im Juni wird an der Station 015 in 297 m Seehöhe mit einem Schnitt von 11,97 °C das niedrigste mittlere tägliche Minimum erreicht. Diese Station liegt 700 m talabwärts im selben Tal wie die Station 007 in unbebautem Gebiet. Die Temperaturen liegen im Sommer und Herbst durchwegs unter jenen der Station 007.

Der absolut niedrigste Wert wird von Juli bis Oktober an der Station 109 in 316 m Seehöhe erreicht. Diese Station liegt etwas südöstlich der Mitte des Untersuchungsgebietes nahe dem Ort Gossendorf an einem Hangfuß in unbebautem Gebiet. Trotz der Südost-Exposition gibt es hier sehr kalte nächtliche Kaltluftabflüsse, die vor allem bei den mittleren täglichen Minima keine hohen Werte zustande kommen lassen. Diese sind im Sommer mit 12,3 °C und im Herbst mit 4,2 °C die niedrigsten Werte aller Stationen.

Die höchsten Werte: Hier stechen zwei Stationen hervor, an denen im Jahresverlauf alle höchsten mittleren täglichen Minima aufgezeichnet wurden: die Stationen 097 und 122. Beide liegen mit 397 bzw. 520 m sehr hoch, wobei sich erstere in Kammlage und letztere am Oberhang befinden. Die Station 097 liegt ganz im Osten des Untersuchungsgebietes bei Fehring und an dieser wird in jedem Monat außer im Jänner, April und Oktober der mildeste Wert erreicht. Auch das mittlere tägliche Minimum des Jahresdurchschnitts ist mit 6,9 °C der Höchstwert. An der Station 122, die höchste Station des Untersuchungsgebietes am Osthang des Gleichenberger Kogels, wird mit 6,7 °C im Jahresschnitt der mittleren täglichen Minima ein nur knapp darunter liegender Wert erreicht. In beiden Fällen zeichnet die vergleichsweise hohe Seehöhe (die allgemein für ein ausgeglicheneres Klima sorgt) für die milden Temperaturen verantwortlich.

Die mittleren täglichen Maxima (mTmax)

Die niedrigsten Werte: Hier gibt es mehrere Stationen, an denen über die Monate verteilt die niedrigsten mittleren täglichen Maxima erreicht werden. Zunächst wäre die Station 054 zu erwähnen, die in einer Seehöhe von 348 m am Mittelhang in Nordwest-Exposition ganz im Westen des Untersuchungsgebietes errichtet wurde; hier werden im Jänner und Dezember mit 3,2 bzw. 2,7 °C die niedrigsten Werte erreicht. Vor allem im Frühjahr sind die Bedingungen an der Station 122 sehr kühl, die bereits beim vorangegangenen Punkt erwähnt und beschrieben wurde; an der vergleichsweise hoch gelegenen Station gibt es geringere Schwankungen und das niedrigste Jahresmittel mit knapp unter 15 °C. Vor allem im Spätsommer und Herbst ist die Station 078 zu erwähnen, die in Mittelhanglage in 383 m Seehöhe und Nord-Exposition im Südosten von Feldbach errichtet wurde. An dieser wird im

Herbst mit 13,9 °C der niedrigste Wert erreicht, und auch das Jahresmittel liegt nur knapp über jenem Wert an der Station 122.

Die höchsten Werte: Bei den höchsten Mittelwerten gibt es wiederum mehrere Stationen, wo die höchsten täglichen Maxima erreicht werden. Im Jänner und auch im Mittel der Wintermonate sticht die Station 111 hervor. Diese liegt am Oberhang in einer Seehöhe von 343 m und Süd-Exposition in unbebautem Gebiet im südöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, unweit der Station 097 mit den sehr milden mittleren täglichen Minima. Im Frühling und Herbst werden an der Station 046 die höchsten Werte gemessen, welche mit 16,6 °C auch das höchste Jahresmittel erreicht. Diese Station stellt eine Besonderheit dar, da sie in nur 280 m Seehöhe am Talboden mitten im bebauten Gebiet der Stadt Feldbach liegt. Hier wirkt sich offenbar ein leichter Wärmeinseleffekt aus, der vor allem in Zeiten ohne häufige Boden- oder Hochnebelfelder zu erhöhten Temperaturen führt. Im Sommer ist es die Station 082, an der in sämtlichen Sommermonaten und mit 27,0 °C im Durchschnitt der höchste Wert erreicht wird. Diese Station liegt in 282 m Seehöhe auf einem Mittelhang in Südwest-Exposition nahe der Stadt Fehring im Osten des Untersuchungsgebietes. Der Bebauungsgrad ist in diesem Bereich sehr hoch und sorgt offenbar ähnlich wie bei Station 046 für einen Erwärmungseffekt im Sommer. Auch die Station 094, die im Südosten von Feldbach in Kammlage in einer Höhe von 370 m Seehöhe an einem sehr steilen Hang liegt, ist in diesem Zusammenhang erwähnenswert. An ihr werden im April und September die höchsten Werte und mit 16,6 °C im Jahresschnitt der zweithöchste Wert nach Station 046 erreicht.

Die mittleren täglichen Mittelwerte (mT)

Hinsichtlich der mittleren täglichen Mittelwerte macht eine Analyse bzw. farbliche Kennzeichnung nur wenig Sinn, da die Werte sehr eng beisammen liegen; der Jahresnormalwert bewegt sich beispielsweise innerhalb einer Spannweite von etwas mehr als 1 K (9,7 °C bis 10,9 °C). Auffallend ist jedoch die hohe Anzahl der Stationen mit einem Jahresnormalwert von mehr als 10 °C, was laut Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER, und PILGER 2010, S. 67) maximal im südlicher liegenden Gebiet um Klöch für möglich gehalten wird. Der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren ist aber zu kurz, um dahingehend eine wissenschaftliche Aussage ableiten zu können.

Der Maximalwert 10,9 °C wird an der Station 133 erreicht. Diese Station liegt auf einem Mittelhang in einer Seehöhe von 338 m und Südwest-Exposition im unbebauten Gebiet im Süden des Untersuchungsgebietes. An dieser Station werden in fast allen Monaten die Höchstwerte der Mitteltemperatur erreicht, was zunächst verwunderlich erscheint – denn weder bei den mTmin - noch den mTmax – Werten tritt diese Station sonderlich in

Erscheinung. Offenbar sorgen die äußeren Verhältnisse hier für milde Bedingungen im Winter und warme im Sommer ohne Extrema in die eine oder andere Richtung, was im Jahresschnitt dann zu diesem Rekordwert führt. Bei vielen anderen Stationen werden höhere Sommerwerte erreicht, allerdings liegen die Werte in den Wintermonaten dann deutlich hinter dieser Station zurück. Dies lässt auf eine ausreichende Höhe über dem Talboden schließen, um von den Kaltluft- und Bodennebelsituationen im Normalfall nicht mehr betroffen zu sein. Mit 10,8 °C wird der zweithöchste Wert an der Station 097 erreicht, die bereits im Abschnitt über die mittleren täglichen Maxima beschrieben wurde und an der auch hohe tägliche Minima erreicht werden. Der niedrigste Jahresdurchschnitt wird an der Station 015 mit 9,6 °C erreicht, die bereits im Abschnitt über die mittleren täglichen Minima mit durchwegs sehr niedrigen Werten beschrieben wurde.

Tab. 13: Mittlere tägliche Minima, Maxima und Mittelwerte der Lufttemperatur in [°C] sowie die Seehöhe in [m] für die bearbeiteten Stationen des WegenerNet-Gebiets für den Zeitraum von 2007-2011 in Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittelwerten. Warme Werte sind rot, die wärmsten dunkelrot dargestellt; kühle sind blau, die kühlsten Werte dunkelblau gefärbt.

Nr.	Sh[m]	Para-meter	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
007	308	mTmin	-4,5	-3,9	-1,1	2,9	8,2	12,0	13,0	13,0	9,1	3,4	0,6	-4,2	3,3	12,6	4,4	-4,2	**4,0**
		mTmax	4,1	7,4	11,9	19,0	22,3	25,3	27,3	26,6	21,6	15,1	9,2	3,4	17,7	26,4	15,3	5,0	**16,1**
		mT	-0,9	0,9	5,2	11,0	15,1	18,5	20,0	19,3	14,6	8,7	4,3	-0,7	10,4	19,3	9,2	-0,2	**9,7**
011	300	mTmin	-4,0	-3,2	-0,1	4,3	9,4	12,8	13,5	13,4	9,4	3,9	1,2	-3,7	4,5	13,2	4,8	-3,6	**4,7**
		mTmax	3,8	7,3	11,8	18,9	22,1	24,9	26,8	26,2	21,5	15,1	9,1	3,3	17,6	26,0	15,2	4,8	**15,9**
		mT	-0,7	1,2	5,6	11,6	15,6	18,7	20,1	19,4	14,8	8,9	4,5	-0,6	10,9	19,4	9,4	0,0	**9,9**
015	297	mTmin	-4,3	-3,6	-0,8	3,1	8,3	12,0	12,6	12,7	8,8	3,4	0,9	-4,0	3,6	12,4	4,3	-4,0	**4,1**
		mTmax	3,9	7,3	11,7	18,7	22,0	25,1	27,2	26,4	21,5	15,1	9,0	3,2	17,5	26,2	15,2	4,8	**15,9**
		mT	-0,9	1,0	5,2	11,0	15,1	18,4	19,8	19,1	14,4	8,6	4,3	-0,8	10,4	19,1	9,1	-0,2	**9,6**
017	385	mTmin	-2,4	-1,3	1,9	6,9	10,5	13,8	14,9	14,6	10,9	5,5	2,2	-2,1	6,4	14,4	6,2	-1,9	**6,3**
		mTmax	4,1	7,2	11,7	18,8	22,2	25,1	27,2	26,4	21,4	14,9	8,8	3,6	17,6	26,3	15,1	5,0	**16,0**
		mT	0,5	2,4	6,4	12,5	15,9	19,0	20,7	19,9	15,5	9,8	5,1	0,5	11,6	19,9	10,1	1,2	**10,7**
020	330	mTmin	-3,8	-3,0	-0,2	4,3	8,5	12,1	13,0	13,0	9,1	3,8	1,0	-3,4	4,2	12,7	4,6	-3,4	**4,5**
		mTmax	4,1	7,2	11,7	18,5	21,8	24,8	26,8	26,1	21,2	14,9	9,0	3,6	17,3	25,9	15,0	5,0	**15,8**
		mT	-0,3	1,5	5,6	11,5	15,1	18,4	19,8	19,1	14,6	8,9	4,5	-0,2	10,7	19,1	9,3	0,3	**9,9**
021	337	mTmin	-3,2	-2,3	0,6	5,3	9,4	13,0	13,9	13,8	9,9	4,4	1,5	-2,8	5,1	13,6	5,2	-2,8	**5,3**
		mTmax	3,9	7,0	11,5	18,4	21,7	24,7	26,6	25,8	21,2	15,1	8,8	3,5	17,2	25,7	15,1	4,8	**15,7**
		mT	0,0	1,9	6,0	11,9	15,6	18,8	20,3	19,5	14,9	9,2	4,8	0,1	11,2	19,6	9,6	0,7	**10,3**
026	314	mTmin	-3,7	-2,8	0,3	4,9	9,7	13,1	13,9	13,7	9,8	4,3	1,4	-3,3	5,0	13,6	5,1	-3,3	**5,1**
		mTmax	3,6	7,0	11,7	18,8	21,9	24,8	26,9	26,3	21,6	14,9	8,8	3,0	17,5	26,0	15,1	4,5	**15,8**
		mT	-0,5	1,5	5,8	11,9	15,6	18,8	20,3	19,6	15,0	9,1	4,6	-0,4	11,1	19,6	9,6	0,2	**10,1**
029	383	mTmin	-3,3	-2,3	0,9	5,4	9,7	13,2	14,2	13,9	10,1	4,5	1,5	-2,9	5,3	13,8	5,4	-2,8	**5,4**
		mTmax	3,7	6,8	11,3	18,1	21,4	24,3	26,1	25,4	20,7	14,4	8,5	3,3	17,0	25,3	14,5	4,6	**15,3**
		mT	0,0	1,9	6,0	11,9	15,4	18,6	20,2	19,5	15,0	9,2	4,7	0,1	11,1	19,4	9,6	0,7	**10,2**
032	322	mTmin	-3,5	-2,6	0,3	4,6	9,1	12,8	13,7	13,5	9,7	4,1	1,3	-3,1	4,7	13,4	5,0	-3,1	**5,0**
		mTmax	3,8	6,9	11,5	18,5	22,0	24,9	26,9	26,0	21,1	14,6	8,6	3,3	17,3	25,9	14,8	4,7	**15,7**
		mT	-0,2	1,7	5,8	11,7	15,5	18,8	20,2	19,4	14,8	9,0	4,7	-0,1	11,0	19,5	9,5	0,5	**10,1**
033	361	mTmin	-2,9	-1,9	1,2	5,8	9,9	13,4	14,4	14,1	10,2	4,7	1,7	-2,6	5,6	14,0	5,6	-2,5	**5,7**
		mTmax	3,7	6,9	11,5	18,4	21,7	24,7	26,8	26,0	20,9	14,5	8,4	3,2	17,2	25,8	14,6	4,6	**15,6**
		mT	0,2	2,1	6,1	12,2	15,7	18,9	20,6	19,8	15,1	9,3	4,8	0,2	11,3	19,7	9,7	0,8	**10,4**
036	341	mTmin	-2,9	-1,9	1,1	5,7	9,7	13,4	14,3	14,1	10,2	4,7	1,8	-2,5	5,5	13,9	5,6	-2,5	**5,6**
		mTmax	4,2	7,2	11,6	18,4	21,8	24,7	26,5	25,9	21,0	14,8	8,8	3,7	17,3	25,7	14,9	5,0	**15,7**
		mT	0,3	2,2	6,2	12,1	15,6	18,8	20,4	19,6	15,1	9,4	5,0	0,4	11,3	19,6	9,8	1,0	**10,4**
037	330	mTmin	-3,3	-2,3	0,8	5,5	9,7	13,3	14,2	14,0	10,0	4,4	1,5	-2,8	5,3	13,8	5,3	-2,8	**5,4**
		mTmax	3,8	7,0	11,4	18,3	21,6	24,5	26,7	25,8	20,8	14,5	8,6	3,4	17,1	25,7	14,6	4,7	**15,5**
		mT	-0,1	1,9	6,0	11,9	15,4	18,7	20,3	19,5	14,9	9,2	4,7	0,1	11,1	19,5	9,6	0,6	**10,2**
038	274	mTmin	-3,6	-2,9	0,0	4,2	9,1	12,7	13,4	13,4	9,4	3,8	1,4	-3,1	4,4	13,1	4,9	-3,2	**4,8**
		mTmax	4,0	7,1	11,8	18,7	22,0	25,1	27,0	26,4	21,4	15,0	9,0	3,6	17,5	26,2	15,1	4,9	**15,9**
		mT	-0,4	1,5	5,7	11,4	15,5	18,7	20,1	19,3	14,6	8,8	4,6	-0,1	10,9	19,4	9,3	0,3	**10,0**
041	341	mTmin	-3,4	-2,5	0,6	5,1	9,6	13,1	14,0	13,9	10,2	4,8	1,8	-2,7	5,1	13,7	5,6	-2,9	**5,4**
		mTmax	3,8	7,2	11,7	18,5	21,8	24,8	26,7	25,9	21,4	15,1	9,3	3,6	17,3	25,8	15,3	4,9	**15,8**
		mT	-0,4	1,7	5,9	11,8	15,5	18,7	20,2	19,5	15,1	9,4	5,0	0,1	11,1	19,4	9,8	0,5	**10,2**
044	288	mTmin	-3,4	-2,5	0,7	5,1	9,7	13,1	14,1	13,8	9,9	4,4	1,4	-3,0	5,1	13,7	5,2	-3,0	**5,3**
		mTmax	4,1	7,3	11,4	18,3	21,6	24,7	26,7	26,2	21,3	14,9	8,9	3,6	17,1	25,9	15,0	5,0	**15,8**
		mT	-0,3	1,7	5,8	11,7	15,5	18,7	20,2	19,4	14,9	9,1	4,6	-0,1	11,0	19,4	9,5	0,4	**10,1**
046	280	mTmin	-3,5	-2,8	0,3	4,9	9,6	13,3	14,3	14,1	10,1	4,4	1,5	-3,2	4,9	13,9	5,3	-3,2	**5,2**
		mTmax	4,6	8,1	12,7	19,6	22,8	25,8	27,7	26,9	22,2	15,6	9,7	4,0	18,4	26,8	15,8	5,6	**16,6**
		mT	-0,3	1,7	6,0	12,0	15,9	19,2	20,7	20,0	15,3	9,3	4,8	-0,2	11,3	20,0	9,8	0,4	**10,4**
054	348	mTmin	-3,7	-2,9	0,0	4,4	9,0	12,7	13,5	13,4	9,5	4,0	1,1	-3,4	4,5	13,2	4,9	-3,4	**4,8**
		mTmax	3,2	6,7	11,6	18,7	21,9	24,8	26,7	25,9	20,8	14,2	8,0	2,7	17,4	25,8	14,3	4,2	**15,4**
		mT	-0,6	1,2	5,4	11,3	15,0	18,3	19,8	18,9	14,2	8,5	4,2	-0,5	10,6	19,0	9,0	0,0	**9,6**
055	320	mTmin	-4,1	-3,3	-0,1	4,2	9,1	12,6	13,3	13,2	9,3	3,7	1,0	-3,6	4,4	13,0	4,6	-3,7	**4,6**
		mTmax	4,0	7,4	11,8	18,7	22,2	25,0	27,0	26,3	21,4	15,1	9,1	3,4	17,6	26,1	15,2	4,9	**15,9**
		mT	-0,8	1,2	5,5	11,4	15,3	18,5	19,8	19,1	14,5	8,7	4,4	-0,5	10,7	19,1	9,2	0,0	**9,8**
056	318	mTmin	-3,9	-3,1	0,0	4,4	9,3	13,0	13,8	13,6	9,6	4,0	1,2	-3,5	4,6	13,5	4,9	-3,5	**4,9**
		mTmax	4,5	8,0	12,4	19,2	22,5	25,4	27,4	26,5	21,9	15,4	9,5	3,8	18,0	26,4	15,6	5,4	**16,4**

		mT	-0,5	1,5	5,8	11,7	15,6	18,9	20,4	19,6	15,0	9,1	4,6	-0,3	11,0	19,6	9,6	0,2	**10,1**
069	257	mTmin	-3,6	-2,9	0,0	4,4	9,6	12,8	13,1	13,0	9,2	3,4	1,5	-3,0	4,7	13,0	4,7	-3,2	**4,8**
		mTmax	4,1	7,3	11,9	18,9	22,2	25,1	26,9	26,4	21,7	15,4	9,1	3,7	17,7	26,1	15,4	5,0	**16,1**
		mT	-0,4	1,5	5,8	11,7	15,8	18,9	20,0	19,4	14,8	8,9	4,8	0,0	11,1	19,5	9,5	0,4	**10,1**
071	375	mTmin	-3,0	-2,0	1,0	5,6	9,8	13,4	14,4	14,1	10,3	4,8	1,8	-2,7	5,5	13,9	5,6	-2,6	**5,6**
		mTmax	3,4	6,8	11,3	18,3	21,5	24,5	26,4	25,6	20,7	14,3	8,3	2,9	17,0	25,5	14,4	4,4	**15,3**
		mT	0,0	2,0	6,0	12,0	15,4	18,6	20,2	19,5	14,9	9,2	4,7	0,1	11,1	19,4	9,6	0,7	**10,2**
072	337	mTmin	-3,2	-2,2	0,8	5,6	10,0	13,3	13,8	13,8	9,9	4,6	1,7	-2,8	5,5	13,6	5,4	-2,7	**5,4**
		mTmax	4,0	7,3	11,7	18,8	21,9	24,8	27,3	27,0	22,3	15,3	8,8	3,4	17,4	26,4	15,5	4,9	**16,0**
		mT	-0,1	2,0	6,1	12,2	15,7	18,8	20,3	19,8	15,2	9,4	4,9	0,1	11,3	19,6	9,9	0,7	**10,4**
074	394	mTmin	-3,0	-1,9	1,2	5,9	9,9	13,3	14,4	14,1	10,3	4,8	1,7	-2,7	5,7	13,9	5,6	-2,5	**5,7**
		mTmax	3,7	6,7	11,2	18,2	21,6	24,5	26,9	26,1	21,3	14,8	8,4	3,1	17,0	25,8	14,8	4,5	**15,5**
		mT	0,0	2,0	5,9	11,9	15,4	18,6	20,4	19,6	15,0	9,3	4,7	0,2	11,1	19,5	9,7	0,7	**10,3**
076	319	mTmin	-3,2	-2,4	0,6	5,0	9,5	13,2	14,1	13,9	10,0	4,5	1,6	-2,8	5,1	13,8	5,4	-2,8	**5,3**
		mTmax	4,7	7,9	12,3	19,2	22,2	25,0	27,0	26,3	21,7	15,4	9,4	4,3	17,9	26,1	15,5	5,6	**16,3**
		mT	0,2	2,1	6,2	12,1	15,7	19,0	20,5	19,8	15,2	9,4	5,1	0,4	11,3	19,8	9,9	0,9	**10,5**
077	302	mTmin	-3,5	-2,8	0,2	4,5	9,1	12,7	13,4	13,3	9,5	3,9	1,3	-3,1	4,6	13,2	4,9	-3,1	**4,9**
		mTmax	4,3	7,4	11,8	18,7	21,9	24,8	26,8	26,2	21,4	15,0	9,0	3,8	17,5	25,9	15,1	5,2	**15,9**
		mT	-0,2	1,7	5,8	11,6	15,4	18,7	20,1	19,3	14,7	8,9	4,7	0,0	11,0	19,4	9,4	0,5	**10,1**
078	372	mTmin	-2,6	-1,5	1,7	6,5	10,4	13,9	14,8	14,4	10,6	5,0	1,7	-2,5	6,2	14,4	5,8	-2,2	**6,0**
		mTmax	3,6	6,7	10,9	17,8	21,1	24,1	25,9	25,1	20,1	13,7	7,9	2,9	16,6	25,0	13,9	4,4	**15,0**
		mT	0,4	2,4	6,3	12,3	15,8	19,0	20,5	19,7	15,1	9,3	4,8	0,3	11,5	19,8	9,7	1,0	**10,5**
082	276	mTmin	-3,6	-2,8	0,0	4,3	9,2	13,0	13,9	13,7	9,7	4,0	1,3	-3,1	4,5	13,5	5,0	-3,1	**5,0**
		mTmax	4,4	7,7	12,3	19,4	22,9	25,9	27,9	27,2	22,0	15,5	9,3	3,8	18,2	27,0	15,6	5,3	**16,5**
		mT	-0,3	1,6	5,8	11,6	15,8	19,2	20,6	19,8	15,0	9,0	4,7	0,0	11,1	19,9	9,6	0,5	**10,2**
094	370	mTmin	-2,4	-1,4	1,8	6,6	10,3	13,7	14,8	14,6	10,8	5,4	2,2	-2,1	6,2	14,4	6,1	-2,0	**6,2**
		mTmax	4,6	7,9	12,3	19,6	22,9	25,7	27,6	27,1	22,3	15,6	9,3	4,0	18,3	26,8	15,7	5,5	**16,6**
		mT	0,6	2,5	6,4	12,4	15,9	19,0	20,7	20,0	15,5	9,7	5,2	0,7	11,6	19,9	10,1	1,3	**10,7**
097	392	mTmin	-2,1	-0,8	2,4	7,7	11,1	14,4	15,8	15,4	11,7	6,3	2,5	-1,8	7,0	15,2	6,8	-1,6	**6,9**
		mTmax	3,7	6,4	10,8	17,8	21,2	24,3	26,2	25,6	20,4	14,1	8,3	3,4	16,6	25,4	14,3	4,5	**15,2**
		mT	0,6	2,5	6,3	12,5	15,9	19,0	20,9	20,2	15,6	9,9	5,2	0,7	11,6	20,0	10,3	1,3	**10,8**
101	304	mTmin	-3,9	-3,2	-0,1	4,3	9,3	12,9	13,6	13,5	9,4	3,9	1,3	-3,3	4,5	13,4	4,9	-3,4	**4,8**
		mTmax	4,0	7,6	12,1	19,2	22,5	25,3	27,2	26,4	21,6	15,1	9,1	3,4	17,9	26,3	15,3	5,0	**16,1**
		mT	-0,6	1,3	5,6	11,6	15,5	18,7	20,1	19,4	14,7	8,8	4,5	-0,3	10,9	19,4	9,3	0,1	**9,9**
109	316	mTmin	-4,1	-3,4	-0,6	3,5	8,5	12,0	12,4	12,4	8,6	3,0	1,0	-3,3	3,8	12,3	4,2	-3,6	**4,2**
		mTmax	4,4	7,2	11,5	18,4	21,6	24,6	26,6	25,8	21,0	14,8	9,0	3,8	17,2	25,7	14,9	5,1	**15,7**
		mT	-0,4	1,3	5,4	11,0	15,1	18,3	19,6	18,8	14,2	8,4	4,6	0,0	10,5	18,9	9,0	0,3	**9,7**
111	343	mTmin	-2,5	-1,5	1,6	6,2	10,1	13,6	14,6	14,4	10,6	5,2	2,1	-2,1	6,0	14,2	6,0	-2,0	**6,0**
		mTmax	4,8	7,9	12,3	19,2	22,4	25,1	27,2	26,6	21,6	15,4	9,4	4,2	18,0	26,3	15,5	5,6	**16,3**
		mT	0,7	2,6	6,5	12,4	15,9	19,0	20,7	20,0	15,4	9,7	5,3	0,8	11,6	19,9	10,1	1,3	**10,7**
113	312	mTmin	-3,3	-2,6	0,2	4,4	8,9	12,6	13,5	13,4	9,5	4,0	1,4	-2,8	4,5	13,2	5,0	-2,9	**4,9**
		mTmax	3,9	6,9	11,4	18,2	21,5	24,6	26,5	25,7	20,9	14,7	8,7	3,6	17,1	25,6	14,7	4,8	**15,5**
		mT	-0,1	1,6	5,7	11,3	15,2	18,5	19,9	19,2	14,6	8,9	4,7	0,1	10,7	19,2	9,4	0,5	**10,0**
117	305	mTmin	-3,4	-2,6	0,3	4,8	9,6	13,1	13,8	13,8	9,8	4,3	1,6	-2,9	4,9	13,6	5,3	-3,0	**5,2**
		mTmax	4,1	7,7	12,2	19,3	22,5	25,4	27,4	26,7	22,0	15,5	9,1	3,6	18,0	26,5	15,5	5,1	**16,3**
		mT	-0,3	1,7	5,9	11,8	15,6	18,8	20,1	19,5	14,9	9,2	4,8	0,0	11,1	19,5	9,6	0,5	**10,2**
122	520	mTmin	-2,1	-0,9	2,1	7,8	10,7	13,7	15,5	15,3	11,6	6,5	2,4	-2,1	6,9	14,8	6,8	-1,7	**6,7**
		mTmax	3,6	6,0	10,6	17,8	20,8	23,7	26,1	25,2	20,2	14,0	8,4	3,1	16,4	25,0	14,2	4,2	**14,9**
		mT	0,5	2,2	5,8	12,2	15,3	18,4	20,4	19,8	15,2	9,7	5,0	0,3	11,1	19,5	10,0	1,0	**10,4**
123	429	mTmin	-2,3	-1,3	1,9	6,9	10,5	13,9	15,1	14,7	11,1	5,7	2,3	-2,2	6,4	14,6	6,3	-1,9	**6,4**
		mTmax	3,8	6,4	10,7	17,7	21,2	24,2	26,1	25,2	20,3	14,1	8,3	3,3	16,5	25,1	14,2	4,5	**15,1**
		mT	0,5	2,3	6,1	12,2	15,7	18,9	20,6	19,8	15,3	9,6	5,1	0,5	11,3	19,8	10,0	1,1	**10,6**
127	310	mTmin	-3,3	-2,5	0,3	4,6	9,0	12,8	13,6	13,5	9,6	4,1	1,4	-2,9	4,6	13,3	5,0	-2,9	**5,0**
		mTmax	3,8	6,8	11,5	18,5	21,8	24,9	26,8	26,0	20,9	14,4	8,4	3,3	17,2	25,9	14,6	4,7	**15,6**
		mT	0,0	1,7	5,8	11,5	15,4	18,7	20,1	19,4	14,7	8,9	4,7	0,1	10,9	19,4	9,4	0,6	**10,1**
129	332	mTmin	-3,2	-2,2	0,8	5,7	9,8	13,3	14,2	14,0	10,2	4,7	1,7	-2,7	5,4	13,8	5,5	-2,7	**5,5**
		mTmax	3,3	6,2	10,8	17,9	21,4	24,4	26,2	25,4	20,3	13,8	8,0	3,0	16,7	25,3	14,0	4,2	**15,1**
		mT	-0,2	1,8	5,9	11,9	15,5	18,7	20,2	19,4	14,8	9,1	4,7	0,1	11,1	19,4	9,6	0,6	**10,2**
131	350	mTmin	-2,8	-1,8	1,3	6,0	10,0	13,4	14,4	14,3	10,5	5,0	2,0	-2,4	5,8	14,1	5,9	-2,3	**5,8**
		mTmax	4,0	7,4	11,9	19,0	22,2	25,2	27,3	26,7	21,8	15,3	9,0	3,6	17,7	26,4	15,4	5,0	**16,1**
		mT	0,2	2,3	6,2	12,2	15,7	18,9	20,5	19,8	15,3	9,6	5,1	0,4	11,4	19,7	10,0	1,0	**10,5**
132	295	mTmin	-3,8	-3,2	-0,3	4,3	9,4	12,9	13,7	13,6	9,5	3,8	1,3	-3,3	4,4	13,4	4,9	-3,4	**4,8**
		mTmax	4,0	7,4	11,9	18,9	22,1	25,1	27,0	26,4	21,5	15,2	9,2	3,6	17,6	26,2	15,3	5,0	**16,0**
		mT	-0,6	1,3	5,5	11,5	15,7	18,8	20,2	19,5	14,8	8,9	4,6	-0,2	10,9	19,5	9,4	0,2	**10,0**
133	338	mTmin	-2,4	-1,2	1,9	6,9	10,5	13,9	15,0	14,8	11,0	5,6	2,4	-2,0	6,4	14,6	6,3	-1,9	**6,4**
		mTmax	4,3	7,6	11,8	18,7	22,1	25,0	26,9	26,2	21,4	15,1	9,1	4,0	17,5	26,0	15,2	5,3	**16,0**
		mT	0,6	2,7	6,6	12,6	16,0	19,1	20,8	20,2	15,6	10,0	5,4	0,8	11,7	20,0	10,4	1,4	**10,9**

135	305	mTmin	-2,8	-1,7	1,2	6,0	10,0	13,6	14,4	14,4	10,4	5,0	2,0	-2,4	5,7	14,1	5,8	-2,3	**5,8**
		mTmax	4,4	7,6	11,8	18,8	22,2	25,2	27,3	26,6	21,5	15,2	9,3	4,1	17,6	26,4	15,3	5,4	**16,2**
		mT	0,4	2,5	6,5	12,5	16,0	19,3	20,9	20,2	15,4	9,7	5,3	0,7	11,6	20,1	10,1	1,2	**10,8**
136	328	mTmin	-3,0	-1,9	1,1	5,9	9,8	13,3	14,2	14,1	10,3	4,9	1,8	-2,6	5,6	13,9	5,7	-2,5	**5,7**
		mTmax	3,5	6,6	11,4	18,6	21,9	24,9	26,9	26,2	21,0	14,4	8,2	3,1	17,3	26,0	14,5	4,4	**15,6**
		mT	0,1	2,1	6,1	12,2	15,7	18,9	20,5	19,8	15,1	9,4	4,9	0,3	11,3	19,7	9,8	0,8	**10,4**
139	307	mTmin	-3,7	-2,8	0,2	4,4	9,0	12,7	13,4	13,3	9,4	3,8	1,2	-3,0	4,5	13,1	4,8	-3,1	**4,8**
		mTmax	3,8	7,1	11,4	18,6	22,0	24,9	26,9	26,2	21,2	14,8	8,5	3,3	17,3	26,0	14,8	4,7	**15,7**
		mT	-0,2	1,7	5,8	11,6	15,5	18,7	20,2	19,5	14,8	8,9	4,6	0,1	11,0	19,4	9,4	0,5	**10,1**
143	344	mTmin	-2,5	-1,3	1,7	6,7	10,2	13,6	14,6	14,5	10,8	5,4	2,2	-2,2	6,2	14,2	6,1	-2,0	**6,1**
		mTmax	4,6	7,9	12,3	19,2	22,2	25,0	26,9	26,3	21,7	15,5	9,5	4,1	17,9	26,1	15,5	5,5	**16,3**
		mT	0,5	2,6	6,5	12,6	15,9	18,9	20,6	19,9	15,4	9,8	5,3	0,7	11,7	19,8	10,2	1,3	**10,7**
145	279	mTmin	-3,3	-2,5	0,4	5,1	9,6	13,3	14,2	14,1	10,1	4,5	1,5	-2,8	5,0	13,9	5,4	-2,8	**5,4**
		mTmax	4,4	7,7	12,0	19,0	22,4	25,3	27,4	26,8	21,7	15,4	9,3	4,0	17,8	26,5	15,5	5,4	**16,3**
		mT	0,1	2,1	6,1	12,1	15,8	19,1	20,6	19,9	15,2	9,5	5,0	0,3	11,3	19,9	9,9	0,8	**10,5**

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Seehöhe als dominanter Faktor

Wenn man die Seehöhe als entscheidenden Faktor heranzieht, wie auch im Klimaatlas Steiermark beschrieben wird (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 66), dann zeichnen sich zumindest bei zwei der drei Kategorien (mTmin und mTmax) deutliche Trends ab (Abb. 48).

Die mittleren täglichen Minima der Temperatur nehmen im Jahresdurchschnitt stochastisch mit zunehmender Seehöhe zu. Dies ist anhand der Trendgeraden gut zu erkennen, wobei die höchstgelegenen Stationen in 429 m bzw. 520 m Seehöhe auf dem Niveau der Stationen knapp unterhalb von 400 m bleiben. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,47, was auf einen geringen bis mittleren Zusammenhang schließen lässt (MARTENS 1999).

Bei den mittleren täglichen Maxima der Temperatur zeichnet sich ein etwas schwächer ausgeprägter, umgekehrter Trend ab: die Maxima sinken mit zunehmender Höhe. Die höchsten Werte liegen bei knapp unter 17 °C bei Stationen unter 300 m Seehöhe. Die niedrigsten Werte mit knapp unter 15 °C findet man sowohl im Bereich um 350 m, als auch bei der höchsten Station in 520 m Seehöhe. Das Bestimmtheitsmaß liegt hier bei 0,35, womit sich ein geringerer linearer Zusammenhang ergibt als bei den Minima.

Bei dem Jahresnormalwert der Temperatur (in grau gehalten) gibt es nur einen sehr schwachen Trend – das Bestimmtheitsmaß liegt hier bei 0,2 und bedeutet einen sehr geringen bis geringen Zusammenhang der beiden Datenreihen (MARTENS 1999). Sämtliche Werte bewegen sich beinahe seehöhenunabhängig innerhalb von etwa 1,5 K zwischen 9,5 °C und 11 °C.

Die Abb. 48 zeigt die allgemein hohe Temperaturgunst in diesem Gebiet mit Jahresnormalwerten von vorwiegend über 10 °C im Zeitraum von 2007-2011. Vor allem die Stationen in höheren Lagen sind hervorzuheben, da die Lufttemperatur im Regelfall

stochastisch mit zunehmender Seehöhe abnimmt. Im Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 68) werden Jahresnormalwerte von über 10 °C im Zeitraum von 1981-2010 in dieser Region nicht klassifiziert. Die ZAMG-Station in Bad Gleichenberg hat beispielsweise in diesem Zeitraum einen Jahresnormalwert von 9,1 °C.

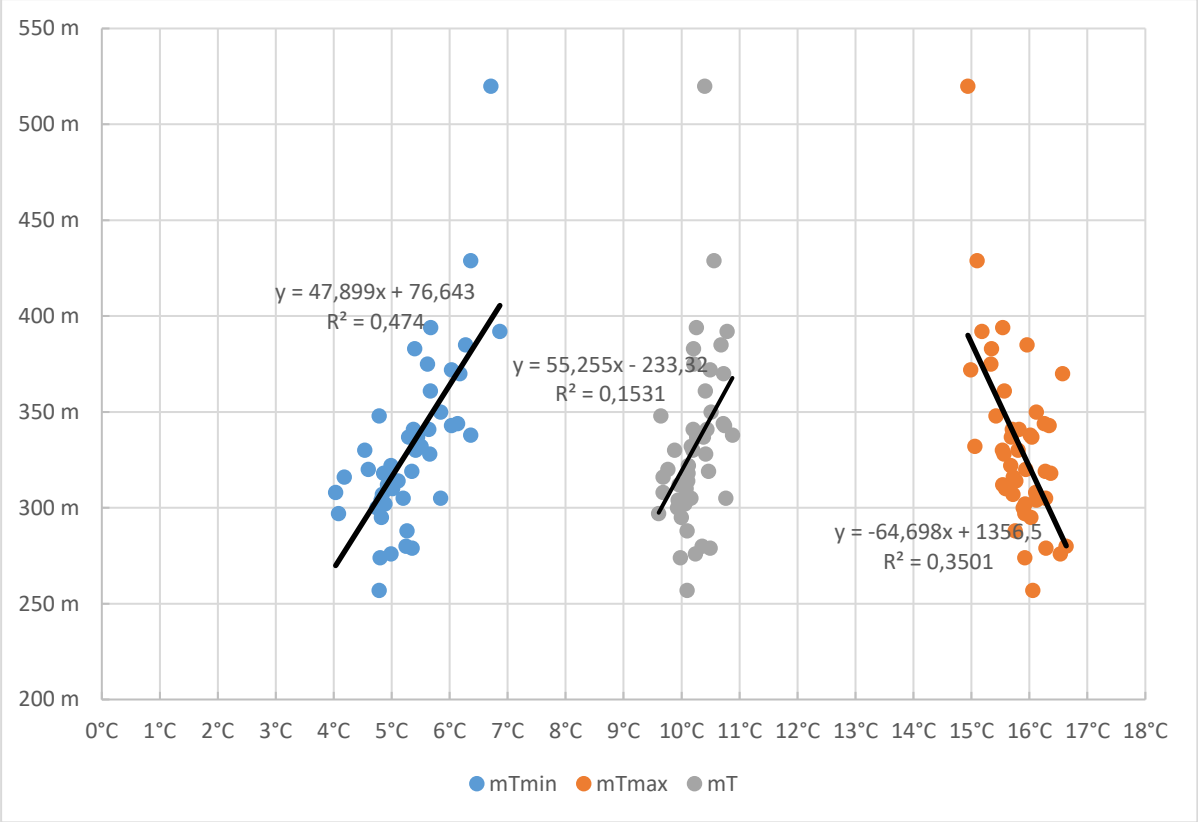


Abb. 48: Die mittleren täglichen Minima (mTmin in blau) und Maxima (mTmax in orange) im Jahresdurchschnitt sowie der Jahresnormalwert (mT in grau) der Lufttemperatur in [°C] für die Periode 2007-2011 der ausgewerteten Stationen nach Seehöhe in [m]. Die schwarzen Linien sind die linearen Trends, R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die folgende Tab. 14 fasst zum Abschluss dieses Kapitels die mittleren absoluten Maxima (mAmax), mittleren absoluten Minima (mAmin) sowie die absoluten Maxima und Minima sämtlicher untersuchter Stationen zusammen. Die Extremwerte werden dabei ausschließlich an niedrig gelegenen Stationen erreicht, wo im Winter die Kaltluftprozesse und im Sommer die tagsüber starke Erwärmung ausschlaggebend sind. Die Ergebnisse stimmen also mit jenen der vorangegangenen Analysen überein, die kältesten Stationen (007 sowie 015) erreichen

Tiefstwerte von unter -22 °C als absolutes Minimum im Untersuchungszeitraum von 2007-2011. Das absolute Maximum wird an der Station 082 mit knapp über 38 °C erreicht.

Tab. 14: Mittlere absolute Minima (mAmin) und Maxima (mAmax) sowie absolute Minima (Amin)und Maxima (Amax) in [°C] sowie Seehöhen in [m] der ausgewählten Stationen des WegenerNet-Gebiets für den Zeitraum von 2007-2011.

Nr.	Sh [m]	mAmin	Amin	mAmax	Amax
007	308	-16,0	-23,0	34,8	36,9
011	300	-14,6	-20,2	34,1	35,9
015	297	-15,6	-22,2	34,1	36,3
017	385	-11,0	-14,8	34,6	36,8
020	330	-14,3	-18,7	34,4	36,3
021	337	-12,9	-17,8	33,7	36,4
026	314	-13,6	-18,4	33,9	35,2
029	383	-12,4	-16,8	33,4	35,7
032	322	-13,1	-18,1	34,1	36,7
033	361	-12,3	-16,8	34,3	37,5
036	341	-12,3	-16,7	33,7	36,1
037	330	-12,7	-17,6	34,0	36,6
038	274	-14,3	-20,8	34,5	36,6
041	341	-12,9	-17,6	33,9	36,1
044	288	-13,0	-17,6	34,2	36,2
046	280	-13,4	-18,7	35,0	37,0
054	348	-13,5	-17,4	33,7	35,9
055	320	-14,9	-20,2	34,1	36,2
056	318	-14,0	-18,8	34,6	36,4
069	257	-15,0	-24,2	34,1	36,1
071	375	-11,8	-16,0	33,9	36,6
072	337	-12,8	-18,2	34,2	36,0
074	394	-11,6	-16,3	34,2	37,2
076	319	-13,0	-17,8	34,1	36,6
077	302	-13,7	-19,1	33,8	36,4
078	372	-11,8	-17,7	33,5	35,9
082	276	-13,8	-19,8	35,7	38,1
094	370	-11,5	-15,8	34,8	37,1
097	392	-10,4	-14,2	34,2	36,9
101	304	-14,7	-20,9	34,2	35,8
109	316	-15,9	-22,8	33,6	36,2
111	343	-11,8	-15,8	34,6	37,1
113	312	-13,2	-17,7	33,6	36,3
117	305	-13,3	-18,9	34,7	36,2
122	520	-10,4	-12,4	33,7	36,6
123	429	-11,0	-14,0	33,2	35,7

127	310	-13,4	-18,2	33,9	36,0
129	332	-12,6	-17,8	33,6	35,6
131	350	-11,8	-16,0	34,8	36,3
132	295	-14,7	-21,2	34,4	35,6
133	338	-11,4	-16,8	34,0	36,2
135	305	-12,2	-17,4	34,8	37,0
136	328	-12,3	-17,9	34,3	36,6
139	307	-14,1	-20,2	34,3	36,9
143	344	-11,3	-16,0	34,2	35,9
145	279	-13,1	-18,6	34,9	37,5

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

6.2 Aperiodische Tages- und Jahresschwankung

Wie in Kap. 3.4.3.2 beschrieben, hängt die durchschnittliche aperiodische Tagesschwankung in erster Linie mit der Seehöhe zusammen, was in Abb. 49 (blau) gut erkennbar ist. Die Abnahme der Tagesschwankung mit der Höhe ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,65 deutlich signifikant. Das Minimum wird an der höchsten Station des Untersuchungsgebietes in 520 m Seehöhe mit 8 K, das Maximum wird in einer Seehöhe um 300 m mit knapp über 12 K erreicht.

Im Falle der Jahresschwankung in Abb. 49 (orange) lässt sich nur ein schwacher Trend erkennen, wobei auch hier laut Beschreibung in Kap. 3.4.3.2 die Seehöhe der entscheidende Faktor ist. Die Höhenunterschiede zwischen den einzelnen Stationen sind wohl zu gering für deutlichere Unterschiede. Das Minimum mit knapp unter 20 K wird nicht nur bei der höchsten Station in 520 m Seehöhe, sondern auch bei Stationen in knapp über 300 m Seehöhe erreicht; das Maximum mit gut 21 K wird knapp unter 300 m Seehöhe erreicht.

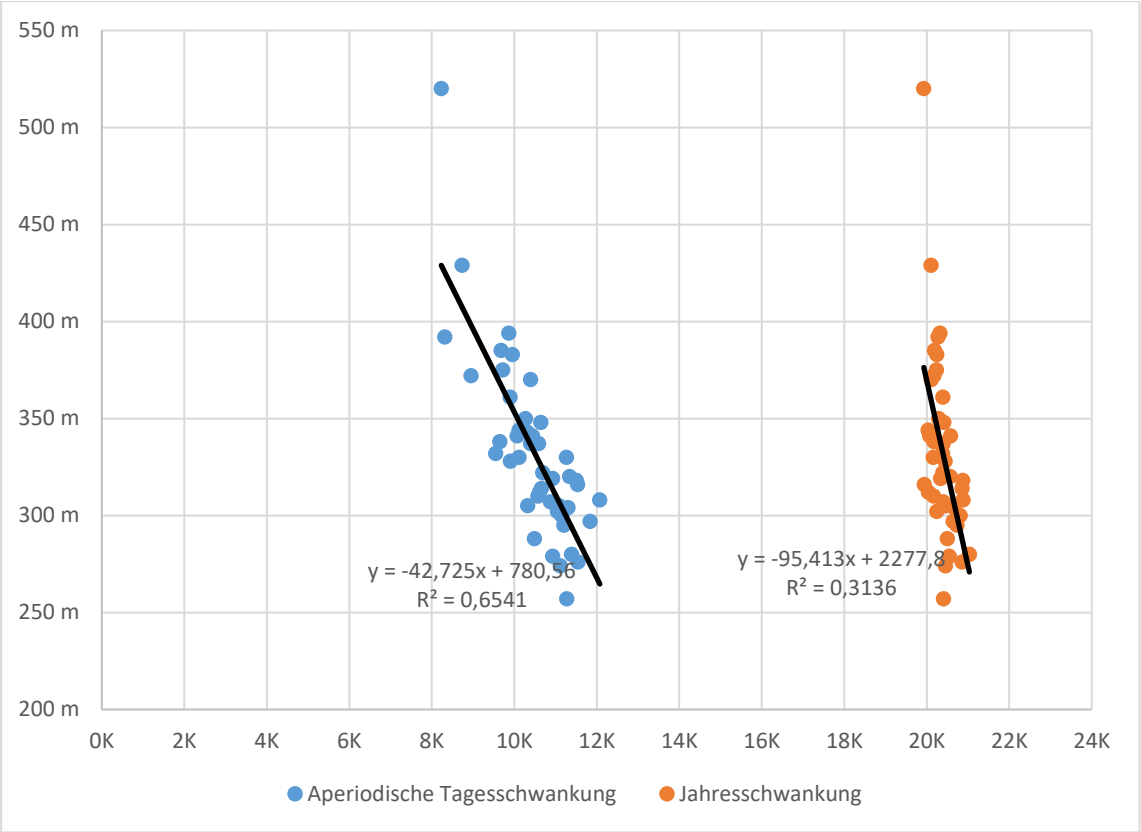


Abb. 49: Die durchschnittliche aperiodische Tagesschwankung (blau) und die Jahresschwankung (orange) der untersuchten Stationen für die Periode von 2007-2011 in Kelvin [K] nach Seehöhe in [m]. R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.3 Durchschnittliche Tages- und Jahresgänge ausgewählter Stationen

Für die Darstellung der Tages- und Jahresgänge wurden sechs bzw. vier Stationen mit vergleichsweise sehr hohen bzw. niedrigen Werten ausgewählt, um möglichst große Unterschiede der sonst sehr gleichartig verlaufenden Kurven erreichen zu können.

Die Abb. 50 zeigt die Jahresgänge der Stationen 007, 097, 109 und 122, welche die kältesten bzw. wärmsten Jahresnormalwerte der ausgewählten Stationen aufweisen bzw. die Station 122 als Sonderfall. Station 007 liegt auf 308 m Seehöhe an einem Hangfuß. Das Jahresmittel des Zeitraums 2007-2011 liegt bei 9,7 °C, und die Werte sind in jedem Monat vergleichsweise tief. Das Minimum im Jänner liegt bei -1 °C, das Maximum im Juli bei 20 °C.

An Station 109, die ebenfalls an einem Hangfuß in 316 m Seehöhe liegt, sind die Bedingungen in den Sommermonaten sogar noch etwas kühler, hier werden nur maximal 19,5 °C erreicht; der Jahresnormalwert liegt auch hier bei 9,7 °C.

Die Bedingungen an der Station 097 (in Kammlage in 392 m) zählen hingegen mit einem Jahresnormalwert von 10,8 °C zu den wärmsten in der Region, im Juli wird ein Durchschnittswert von 21 °C erreicht; das Minimum liegt im Jänner bei 0,5 °C. Auch der Jahresnormalwert an der Station 122 (am Oberhang in 520 m) zählt mit 10,4 °C zu den höheren Werten; durch die größere Seehöhe sinken die Mittelwerte aber im Mai bzw. Juni sogar auf das Niveau der Stationen 007 und 109 ab.

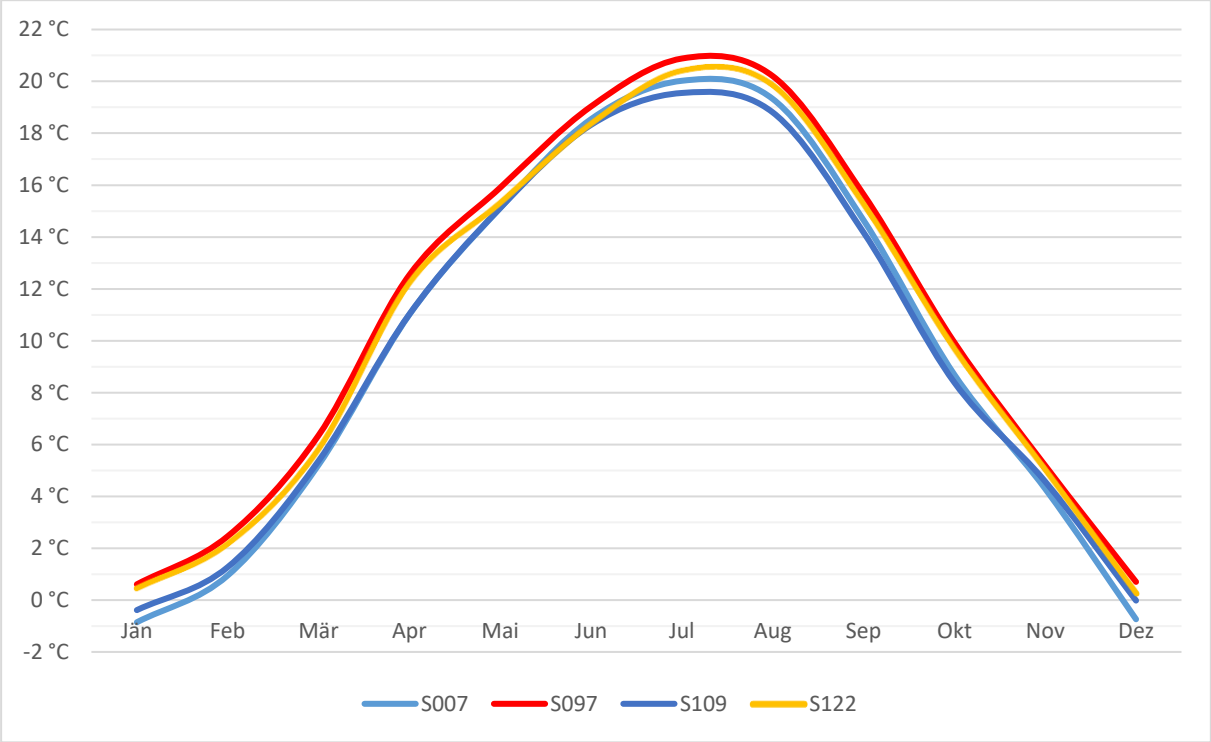


Abb. 50: Die mittleren Jahresgänge der Stationen 007, 097, 109 und 122 für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 51 zeigt die Tagesgänge von sechs ausgewählten Stationen. An der Station 007, die bei der vorigen Abb. 50 bereits als sehr kalt beschrieben wurde, sinkt die Temperatur vor allem in den Morgen- und Abendstunden stark ab, das Minimum liegt hier gegen 04 Uhr (UTC) in der Früh mit 5,5 °C. Danach steigt die Temperatur stark an und erreicht um die Mittagszeit 13 °C, um in den Abendstunden wieder steil abzusinken. Sehr ähnlich ist der Verlauf bei Station 109, an der die Temperatur nur in den Morgenstunden etwas milder, dafür in den Mittagsstunden etwas kühler ist.

Die Stationen 046 (am Talboden in 280 m) und 082 (am Mittelhang in 276 m) sind einander wieder sehr ähnlich. Das Minimum um 04 Uhr beträgt etwas über 6 °C, das Maximum liegt um 13 Uhr bei 15,5 °C.

Deutlich anders verhalten sich die Stationen 097 (392 m) und 122 (520 m). Hier wirkt sich die höhere Lage der Stationen aus, die einen sehr ausgeglichenen Tagesgang aufweisen. In den Morgenstunden erreicht die Temperatur ein Minimum von etwas über 8 °C, in den Mittagsstunden werden aber nur 13,5-14 °C erreicht. Die Bedingungen an der Höhenstation 122 sind am Nachmittag und in den Abendstunden bis zu 2 K kälter als an der Station 097, was von der Lage der Station mitbeeinflusst wird: diese befindet sich in Südost-Exposition am Hang und weist in Richtung Westen bzw. Südwesten eine Horizontüberhöhung von 40° auf, welche durch Bäume in einer Entfernung von 20 m hervorgerufen wird. Dadurch befindet sich die Station je nach Jahreszeit vergleichsweise früh im Schatten.

Durch den ausgeglichenen Tagesgang an den beiden letztgenannten Stationen werden im Jahresdurchschnitt hohe Werte erreicht, was durch mäßig warme Sommertemperaturen und sehr milde Wintertemperaturen zustande kommt.

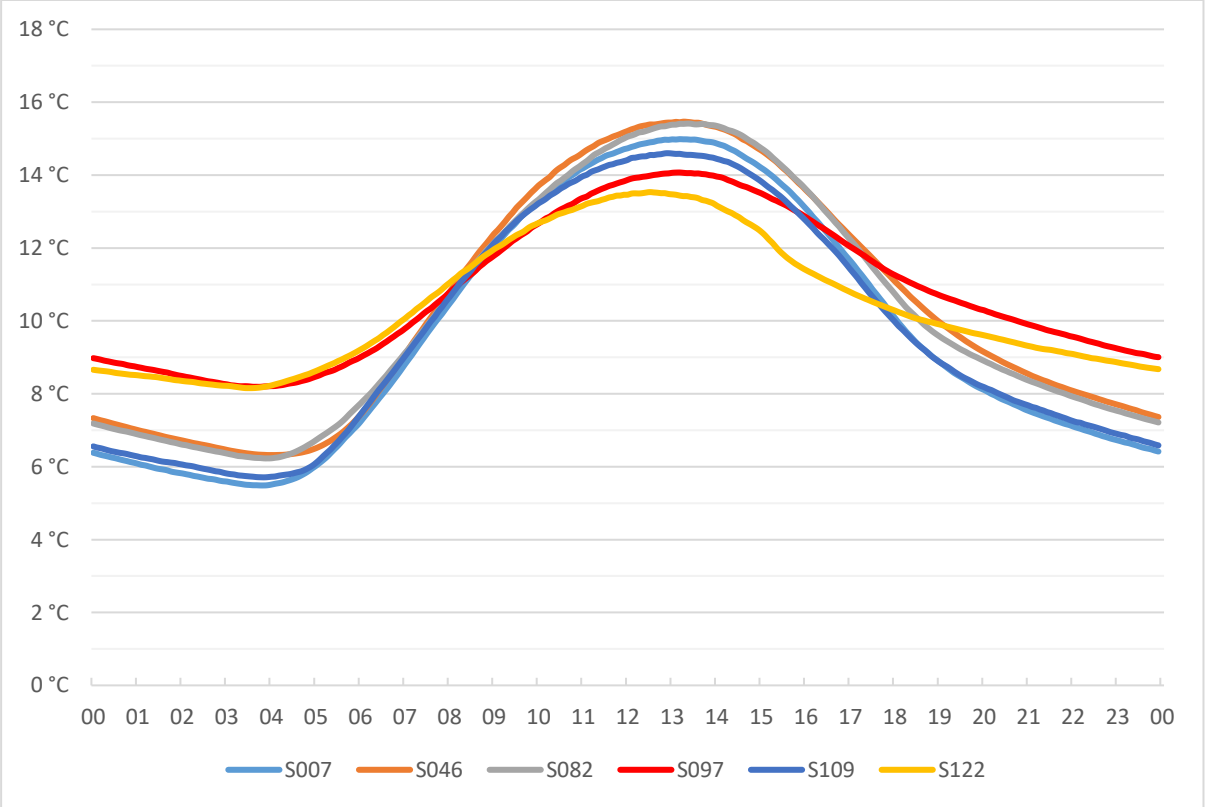


Abb. 51: Die mittleren Tagesgänge (UTC) der Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.4 Kennwerte zur Vegetationsperiode an ausgewählten Stationen

Als Vegetationsperiode wird allgemein jene Zeit des Jahres mit Tagesnormalwerten von ≥5 °C bezeichnet (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S.78). Als Tagesnormalwert wird die mittlere Temperatur eines Tages bezeichnet. Der durchschnittliche Beginn und das Ende der Vegetationszeit erfolgt durch die Mittelbildung der jeweiligen Beginn- und Enddaten der Einzeljahre, welche über ein spezielles Verfahren ermittelt werden. Üblicherweise folgt nach den ersten Tagen eines Jahres mit einem Tagesnormalwert von ≥5 °C eine Phase mit kälteren Tagen, woraufhin dann bis zum Herbst keine Unterbrechung mehr stattfindet; diese Phase wird als „Kernperiode“ bezeichnet, die Phasen davor und danach als „Teilperioden“. Der Beginn der Vegetationsperiode im Einzeljahr ist jener Tag einer geschlossenen Teilperiode, die länger ist als die Summe aller noch vor der Kernperiode vorkommenden Tage mit einem Tagesnormalwert von <5 °C.

Die Tab. 15 zeigt Beginn, Dauer und Ende der Vegetationsperiode ausgewählter Stationen im Durchschnitt der Jahre 2007-2011. Die Ergebnisse unterscheiden sich dabei nur im Detail. Allen gemeinsam ist eine für die Steiermark vergleichsweise lange Dauer der Vegetationszeit, die aber im Durchschnitt der Jahre 1981-2010 der ZAMG-Station Bad Gleichenberg liegt (239 Tage). Der Beginn der Vegetationsperiode ist dabei etwas nach hinten auf Mitte März verschoben (ZAMG-Station Bad Gleichenberg: 11. März), sie hört aber auch erst um den 10. November auf (ZAMG-Station Bad Gleichenberg: 05. November) (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 79).

Die Dauer der Vegetationsperiode liegt im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 bei allen untersuchten Stationen zwischen 234 und 243 Tagen, wobei tendenziell vor allem an den niedrig gelegenen Talstationen die längste Dauer feststellbar ist.

Tab. 15: Durchschnittlicher Beginn, Dauer in [d] und Ende der Vegetationsperiode mit der Seehöhe in [m] für die Periode von 2007-2011 an ausgewählten Stationen des WegenerNet-Messnetzes.

Station	Seehöhe [m]	Beginn	Dauer [d]	Ende
S007	308	18. März	236	09. Nov.
S041	341	17. März	238	10. Nov.
S044	288	12. März	243	10. Nov.
S054	348	17. März	234	06. Nov.
S122	520	16. März	239	10. Nov.
S133	338	11. März	239	05. Nov.
S145	279	14. März	243	12. Nov.

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Für eine langfristige wissenschaftliche Auswertung sind schwankende Zeiträume nicht brauchbar, weswegen man sich aufgrund der Datenlage auf eine Periode einigt, die fortan als Vegetationsperiode gilt. Dabei muss natürlich gewährleistet sein, dass über den gesamten Zeitraum mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit (beruhend auf den langjährigen Statistiken) äußere Bedingungen herrschen, die das Wachstum der Vegetation fördern. Für die Steiermark wird in diesem Sinne im Normalfall der Zeitraum von Mai bis September (V. – IX.) herangezogen (vgl. PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 200).

In diesen Monaten liegen die Tagesnormalwerte sämtlicher Stationen des WegenerNet-Messnetzes im Durchschnitt deutlich über den geforderten 5 °C. Die Daten der Station 007, die in den vorangegangenen Kapiteln bereits als eine Station mit vergleichsweise sehr kühlen Bedingungen klassifiziert worden ist, wurden stellvertretend für alle Stationen auf Tagesnormalwerte unter diesem Grenzwert hin untersucht. Im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 konnte in den Monaten Mai bis September kein einziger Tag mit einem Tagesnormalwert von <5 °C festgestellt werden. Nur bei extremen Kaltlufteinbrüchen sinkt der Wert unter 8 °C; ein Beispiel dafür wäre der 30. Mai 2009, an dem nur 6,9 °C im Schnitt gemessen wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Zeitraum der Vegetationsperiode von Mai bis September auch für das Untersuchungsgebiet passend gewählt ist. Durch die vergleichsweise milden Temperaturen könnte sogar mit einer zumindest um einige Wochen verlängerten Vegetationsperiode gerechnet werden.

6.5 Temperaturabhängige Kenntage

Bei den folgenden Auswertungen muss berücksichtigt werden, dass sie auf dem kurzen Beobachtungszeitraum von nur fünf Jahren beruhen und daher für Vergleiche mit längeren Perioden nicht herangezogen werden sollten.

Nachfolgend werden zwei der Stationen mit kalten Verhältnissen (007, 109) drei mit warmen Bedingungen (046, 082 und 097) sowie der Station 122 gegenübergestellt. Als lufttemperaturabhängige Kenntage werden Frost-, Eis- Sommer und Tropentage herangezogen. Ein Frosttag ist laut Definition ein Tag, an dem die Temperatur irgendwann unter 0 °C fällt; bei einem Eistag bleibt die Temperatur ganztägig unter dem Gefrierpunkt. An einem Sommertag wird im Tagesverlauf irgendwann die 25 °C-Grenze überschritten, bei einem Tropentag die 30 °C-Grenze (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 94 ff.).

Hinsichtlich der Frosttage wird das Maximum von knapp 107 Tagen im Jahr an der Station 007 erreicht, die bereits in den vorangehenden Kapiteln durch kühle Verhältnisse charakterisiert

worden ist. Dies entspricht etwa der Zahl der Frosttage an der ZAMG-Station Bad Gleichenberg, die laut Klimaatlas Steiermark in der Periode von 1981 bis 2010 durchschnittlich 108 Frosttage aufweist (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 97). Der niedrigste Wert mit 46 Frosttagen wird an der Station 122 am Gleichenberger Kogel erreicht. An dieser Station wird zugleich der Höchstwert an Eistagen mit knapp 29 erreicht. Bei so kalten Bedingungen reicht die tageszeitliche Erwärmung bedingt durch die Seehöhe von 520 m also deutlich häufiger als bei anderen Stationen nicht aus, die Temperatur über den Gefrierpunkt ansteigen zu lassen. Das Verhältnis von Frost- zu Eistagen ist mit 1:1,6 so niedrig wie bei keiner anderen Station. Der niedrigste Wert an Eistagen wird an der Station 046 mit knapp 17 Tagen im Jahresdurchschnitt erreicht. An der ZAMG-Station Bad Gleichenberg werden in der Periode von 1981 bis 2010 durchschnittlich 23 Eistage pro Jahr ausgewiesen.

Hinsichtlich der Sommertage wird an der Station 046 mit rund 65 Tagen der Höchstwert erreicht, knapp gefolgt von Station 082 (siehe Tab. 16). Das Minimum von 53 Sommertagen wird an der Höhenstation 122 erreicht. Dieser Wert liegt knapp unter jenem von Bad Gleichenberg für die Klimanormalperiode 1981-2010 im Digitalen Atlas der Steiermark, wo 57 Tage als Sommertage ausgewiesen werden. Bei den Sommertagen entsprechen die Jahre von 2007-2011 also recht gut dem langjährigen Durchschnitt. Bei den Tropentagen liegt das Maximum an der Station 082 bei 26, das Minimum an Station 122 mit etwas mehr als zehn Tropentagen. Der Digitale Atlas der Steiermark weist an der ZAMG-Station Bad Gleichenberg im Zeitraum von 1981-2010 acht Tropentage im Jahr aus. Dies ist in erster Linie ein Hinweis auf sehr warme Sommer im Zeitraum von 2007-2011, stimmt aber auch mit den Prognosen des Klimawandels gut überein; wie eingangs erwähnt, wird diesbezüglich aber keine Aussage getätigt.

Zunächst scheint auch der Umstand überraschend, dass im August durchwegs mehr Sommertage erreicht werden als Juli. Dies wird allerdings durch die deutlich höhere Anzahl an Tropentagen im Juli relativiert, womit insgesamt die Bedingungen im Juli wie üblich am wärmsten sind. Der Maximalwert an Eistagen innerhalb eines Monats wird an Station 122 mit elf Tagen, der Maximalwert an Tropentagen im Juli an Station 082 mit ebenfalls elf Tagen erreicht.

Tab. 16: Lufttemperaturabhängige Kenntage in [d] sowie die Seehöhe in [m] ausgewählter Stationen des WegenerNet-Gebiets für den Zeitraum von 2007-2011 in Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittelwerten. Vergleichsweise hohe Werte sind farblich gekennzeichnet, wobei für Frost- und Eistage Blau, für Sommer- und Tropentage Rot gewählt wurde, mit den Maximalwerten dunkler gekennzeichnet.

Nr.	Sh[m]	Para-meter	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
007	308	Frost	18,8	23,0	19,0	4,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	7,8	14,2	19,4	23,4	0,0	22,2	61,2	**106,8**
		Eis	8,0	2,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	7,0	0,2	0,0	0,8	17,2	**18,2**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	1,0	8,6	13,2	12,4	17,0	5,6	1,6	0,0	0,0	9,6	42,6	7,2	0,0	**59,4**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	3,8	9,4	4,8	1,0	0,0	0,0	0,0	1,2	18,0	1,0	0,0	**20,2**
046	280	Frost	19,0	21,2	13,6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	12,4	18,0	14,6	0,0	17,0	58,2	**89,8**
		Eis	7,2	1,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	6,6	0,2	0,0	0,8	15,6	**16,6**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	1,0	10,4	14,0	13,2	17,4	7,4	1,6	0,0	0,0	11,4	44,6	9,0	0,0	**65,0**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	5,4	10,4	5,4	1,0	0,0	0,0	0,0	1,2	21,2	1,0	0,0	**23,4**
082	276	Frost	19,2	20,4	15,2	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	12,4	17,2	16,6	0,0	18,6	56,8	**92,0**
		Eis	6,8	2,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	7,2	0,4	0,0	0,8	16,2	**17,4**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	1,6	8,6	14,0	12,2	17,0	8,0	1,8	0,0	0,0	10,2	43,2	9,8	0,0	**63,2**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	5,2	11,0	6,6	1,0	0,0	0,0	0,0	2,2	22,8	1,0	0,0	**26,0**
097	392	Frost	10,4	11,6	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	8,2	9,2	7,0	0,0	9,4	31,2	**47,6**
		Eis	10,4	4,2	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	9,4	1,4	0,0	2,2	24,0	**27,6**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	0,4	6,4	12,0	14,4	16,8	4,8	1,0	0,0	0,0	6,8	43,2	5,8	0,0	**55,8**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	2,2	6,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	11,0	0,0	0,0	**11,4**
109	316	Frost	18,2	21,2	18,2	2,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	13,0	17,4	20,8	0,0	21,6	56,8	**99,2**
		Eis	7,6	2,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	7,0	0,6	0,0	0,8	17,2	**18,6**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	0,6	7,4	13,6	14,4	17,2	5,8	1,4	0,0	0,0	8,0	45,2	7,2	0,0	**60,4**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	2,0	7,2	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	11,8	0,0	0,0	**12,4**
122	520	Frost	8,4	11,2	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	8,6	9,6	7,8	0,0	9,2	29,2	**46,2**
		Eis	11,0	5,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	9,2	1,2	0,0	2,2	25,4	**28,8**
		Sommer	0,0	0,0	0,0	0,4	6,8	11,4	13,6	14,6	5,0	0,8	0,0	0,0	7,2	39,6	5,8	0,0	**52,6**
		Tropen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,2	6,2	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	10,2	0,0	0,0	**10,4**

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die folgende Abb. 52 zeigt die in Tab. 16 ermittelten Jahressummen für Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentage in einer grafischen Darstellung. An den beiden Stationen 007 und 109 werden die meisten Frosttage ausgewiesen, bei den Eistagen werden sie aber von den beiden höher liegenden Stationen 097 und 122 übertroffen. Bei den Sommertagen werden an den Stationen 046 und 082 die höchsten Werte erreicht, was auch für die Tropentage gilt. Die Station 097 ist auch hier ein Sonderfall, da sowohl Sommer- als auch Tropentage aufgrund der Kammlage nur selten vorkommen.

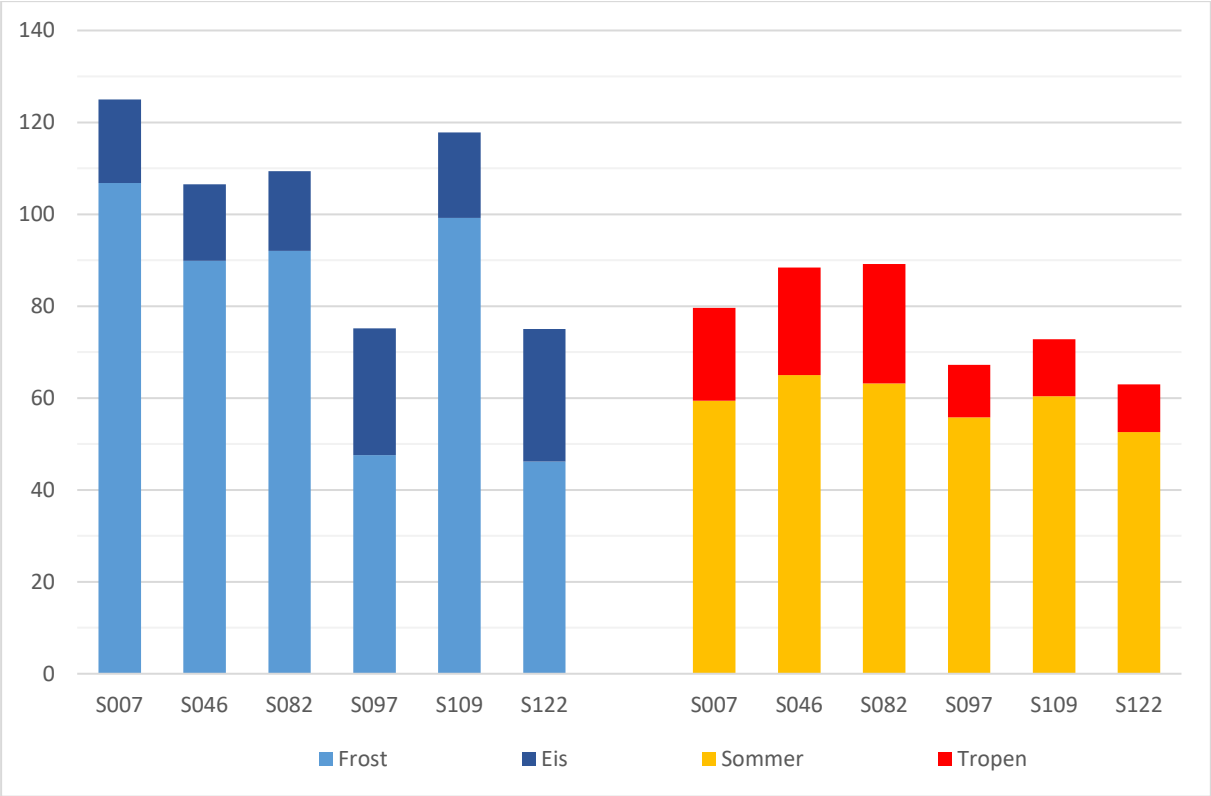


Abb. 52: Die durchschnittliche Anzahl der Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentage der ausgewählten Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 in Tagen für den Zeitraum von 2007-2011 in [d]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Bei den Frost- und Eistagen spielt neben der Anzahl auch der Zeitpunkt des Auftretens eine große Rolle, da vor allem in der Vegetationsperiode große Schäden in der Landwirtschaft entstehen können. Eine dahingehende Untersuchung wurde beispielhaft an der Station 007 durchgeführt, an der im Jahresdurchschnitt mit 107 Frosttagen der höchste Wert erreicht wird (siehe oben). Die Vegetationsperiode dauert im Bereich dieser Station durchschnittlich vom 18.03. bis 09.11. (siehe Kap.6.4), allerdings wurde für die folgende Auswertung die tatsächlich ermittelte Vegetationsperiode jedes Einzeljahres herangezogen.

Tab. 17: Beginn und Ende der Vegetationsperiode an der Station 007 im Untersuchungszeitraum von 2007-2011.

Jahr	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**
Beginn Vegetationsperiode	04.Mär	28.Mär	27.Mär	19.Mär	12.Mär
Ende Vegetationsperiode	30.Okt	15.Nov	30.Okt	22.Nov	10.Nov

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

In der Vegetationsperiode werden an der Station 007 insgesamt 90 Frosttage ausgewiesen, was einem Schnitt von 18 Frosttagen während der Vegetationsperiode pro Jahr entspricht. Eistage kamen gar nicht vor. Der Großteil der Frosttage ereignete sich am Beginn oder knapp vor dem Ende der Vegetationsperiode und dürfte somit kaum negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft gehabt haben. In vier der fünf Jahre gab es allerdings auch vereinzelt Frosttage nach längeren Phasen von wachstumsbegünstigenden Bedingungen. Ein Beispiel aus dem Jahr 2011: bis zum 31.03. gab es (mit wenigen Ausnahmen) durchwegs Frosttage, danach gab es bis zum 12.04.2011 vergleichsweise hohe Durchschnittstemperaturen mit höchsten Minima von bis zu 10 °C. Am 13.04. erfolgte ein Kaltlufteinbruch, der die Temperaturen wieder unter den Gefrierpunkt sinken ließ. Diese Phase mit Frosttagen könnte das Wachstum der Pflanzen durchaus beeinträchtigt haben.

6.6 Hitzewellen

Hitzewellen stehen in engem Zusammenhang mit den Sommer- und Tropentagen des vorangegangenen Kapitels und kennzeichnen Phasen stärkerer Belastung für das Wohlbefinden des Menschen. Unter einer Hitzewelle versteht man die Erwärmung der Luft bzw. die Ausbreitung heißer Luftmassen in einem gewissen Gebiet über einen Zeitraum mehrerer Tage oder Wochen, wobei unterschiedliche Definitionen gebräuchlich sind. In Österreich wird die Definition von HARLFINGER et al. (2002) verwendet, die beispielsweise auch im Digitalen Atlas der Steiermark angewendet wird (vgl. FEENSTRA 2011, S. 7).

HARLFINGER berücksichtigt mehrere Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und die Jahreszeit und fasst diese unter einem Bioklima-Index zusammen. Der Hitzeschutzplan der Steiermark (FEENSTRA 2011, S. 7) definiert auf Grundlage dessen eine Hitzewelle derart, dass an drei aufeinanderfolgenden Tagen eine starke Wärmebelastung vorherrschen muss, wofür wiederum eine Temperatur von über 27 °C und eine Luftfeuchtigkeit ab 60 % gegeben sein müssen. Bei höheren Temperaturen reicht auch eine niedrigere Luftfeuchtigkeit aus.

Um die Situation im WegenerNet-Gebiet mit den vorhandenen Daten abschätzen zu können, ist eine Vereinfachung der Faktoren von HARLFINGER nötig. Die Definition von Schwüle ist jener der starken Wärmebelastung ähnlich und hängt nur von den Parametern Lufttemperatur und relative Feuchte ab (siehe Tab. 18).

Tab. 18: Grenzwerte für Schwüle als Kombination von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit.

Lufttemperatur	Relative Luftfeuchtigkeit
27 °C	≥ 53 %
30 °C	≥ 45 %
33 °C	≥ 38 %
37 °C	≥ 31 %

Quelle: Deutscher Wetterdienst 2014, eigene Bearbeitung

Im folgenden Beispiel werden die Bedingungen für Schwüle mit jenen für eine starke Wärmebelastung („Hitzetag“) gleichgesetzt. Wenn man diese Kriterien für die Referenzstation 077 anwendet und voraussetzt, dass für eine Hitzewelle laut obiger Definition zumindest drei aufeinanderfolgende Tage durch schwüle Verhältnisse gekennzeichnet sein müssen, dann kommt man auf einen Wert von 29 Hitzewellen im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 oder durchschnittlich knapp sechs Hitzeperioden pro Jahr (siehe Tab. 19). Der überwiegende Teil davon fällt erwartungsgemäß in den Sommer. Insgesamt konnten von den 1826 Tagen im Untersuchungszeitraum genau 201 als schwüle Tage definiert werden, was einem Prozentsatz von 11 % entspricht (für das Sommerhalbjahr dementsprechend 22 %, also etwa jeder fünfte Tag). Das Auftreten eines „schwülen Tags“ bedeutet, dass zumindest einmal am Tag laut obiger Definition schwüle Bedingungen vorherrschen. Der früheste Hitzetag eines Jahres fand am 18.05.2009 statt, der späteste am 18.09.2011. Die früheste Hitzewelle mit drei oder mehr Tagen begann am 23.05.2007, die späteste endete mit 14.09.2011. Die längsten Hitzewellen dauerten zehn Tage, jeweils von 26.07. - 04.08.2008 sowie vom 17. - 26.08.2011.

Tab. 19: Parameter bzgl. Hitze an der Referenzstation 077 im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 in [d].

Station	Hitzetage / Jahr	Hitzewellen / Jahr	Frühester Hitzetag	Spätester Hitzetag	Längste Hitzewelle
077	40,2	5,8	18.05.2009	18.09.2011	10 Tage

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Im Digitalen Atlas der Steiermark wird ein anderer Zugang gewählt: auf Basis der Äquivalenttemperatur (theoretische Lufttemperatur, wenn der gesamte Wasserdampf kondensiert und als Energie zur Erhöhung der Temperatur verwendet wird) werden sechs thermische Empfindungsstufen definiert, wobei die drei wärmsten als Belastung angesehen

werden. Die durchschnittliche Wärmebelastung um 14:00 Uhr MEZ weist für das gesamte Untersuchungsgebiet eine Äquivalenttemperatur von 45-50 °C aus, was als „behaglich“ eingestuft wird (Land Steiermark 2013). An 23,3 Tagen pro Jahr wird für die Station Bad Radkersburg südlich des Untersuchungsgebiets eine Wärmebelastung beschrieben, was in ähnlicher Form auch für den Großteil des Untersuchungsgebietes angenommen werden kann.

Eine starke Belastung für den menschlichen Organismus stellen sogenannte Tropennächte dar, bei denen laut Definition die Temperatur in der Nacht nie unter 20 °C fällt (Deutscher Wetterdienst 2012). In Mitteleuropa treten solche Situationen eher selten auf, so weist die ZAMG für die meisten Stationen durchschnittlich unter einen Tag pro Jahr aus. Der Wärmeinseleffekt kann diese Erscheinung aber stark begünstigen, wodurch in der Innenstadt von Wien im Zeitraum von 2001-2010 sogar durchschnittlich 15 Tropennächte im Jahr auftraten (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016).

Im Untersuchungsgebiet wurde diese Auswertung beispielhaft an der Referenzstation 077 sowie an der Station 097, welche im Sommer den höchsten Wert des mittleren täglichen Minimums aufweist, durchgeführt. Während an der Station 077 die Temperaturen in der Nacht regelmäßig deutlich unter die 20 °C-Grenze absinken und somit keine Tropennächte verzeichnet werden, sind an der Station 097 insgesamt 17 Tropennächte im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 verzeichnet; dies entspricht durchschnittlich 3,4 Tropennächten pro Jahr. Dieser Wert ist für eine außerstädtische Station in Österreich sehr hoch, wobei die Gründe für diese Häufung an der Lage der Station liegen: Tagsüber sorgt die Sonneneinstrahlung an der in 392 m vergleichsweise niedrig gelegenen Station in Kammlage für starke Erwärmung, die gerade bei autochthonen Bedingungen in der Nacht von keinen Kaltluftprozessen beeinträchtigt wird.

6.7 Autochthone Witterung

Die autochthone Witterung, die bereits in Kap. 5.3 definiert und beschrieben wurden, ist ein zentrales Thema dieser Arbeit. Während autochthoner Bedingungen kommen geländeklimatisch begründete Unterschiede besonders stark zur Geltung, da beinahe ausschließlich lokale Einflüsse für die Temperaturentwicklung zu berücksichtigen sind.

Die Auswertung nach Tages-, Monats- oder Jahresmitteln bei autochthonen Bedingungen ist nicht sinnvoll, da die Verteilung der Tage mit autochthonen Bedingungen sehr unterschiedlich ausfällt. In den Wintermonaten gab es im Untersuchungszeitraum nur wenige Tage mit autochthonen Bedingungen, womit beispielsweise bei einem Jahresmittel viel zu hohe Werte

herauskommen würden. Jahresdurchschnittswerte werden dennoch gebildet, um Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen aufzuzeigen.

6.7.1 Tagesgänge ausgewählter Stationen

Wie in Kap. 5.3 dargestellt, umfasst die Auswahl der Tage mit autochthoner Witterungen insgesamt 364 Tage im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 bzw. knapp 73 Tage pro Jahr, was einem Anteil von rund 20 % aller Tage ausmacht. Die Abb. 53 zeigt die durchschnittlichen Tagesgänge der Lufttemperatur bei autochthoner Witterung, wobei der grundsätzliche Charakter der Stationen gleich geblieben ist wie im Jahresdurchschnitt. Dazu passt auch die Abb. 56 im folgenden Kapitel, wo auf die Unterschiede zwischen den Werten an Tagen mit autochthoner Witterung gegenüber allen Tagen eines Jahres hingewiesen wird.

Die Tagesgänge sind in Abb. 53 von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages dargestellt, was eine Folge der verwendeten Auswertungsmethode autochthoner Witterungen ist (siehe Kap. 5.3).

Die Unterschiede zwischen den Werten der niedrig und hoch gelegenen Stationen sind in den Nachtstunden sehr groß und erreichen gegen 04 Uhr bis zu 6 K. Die tiefsten Werte treten bei den Stationen 007 und 109 auf, die sich in Tallage bzw. am Hangfuß befinden. Die Werte der am höchsten gelegenen Stationen 097 und 122 sind auch am höchsten. Im Tagesverlauf herrscht bereits zwischen 08:00 und 09:00 Uhr (UTC) beinahe Isothermie vor, bis tagsüber dann die Werte der niedriger gelegenen Stationen um bis zu 2 K wärmer sind als jene der höher gelegenen. Das Maximum mit knapp 21 °C wird dabei an den Stationen 046 und 082 erreicht, die mit einer Seehöhe von rund 280 m beide sehr niedrig gelegen sind. Zwischen 17 und 18 Uhr herrscht wiederum annähernde Isothermie, danach bleiben die Verhältnisse an den höher gelegenen Stationen deutlich begünstigt.

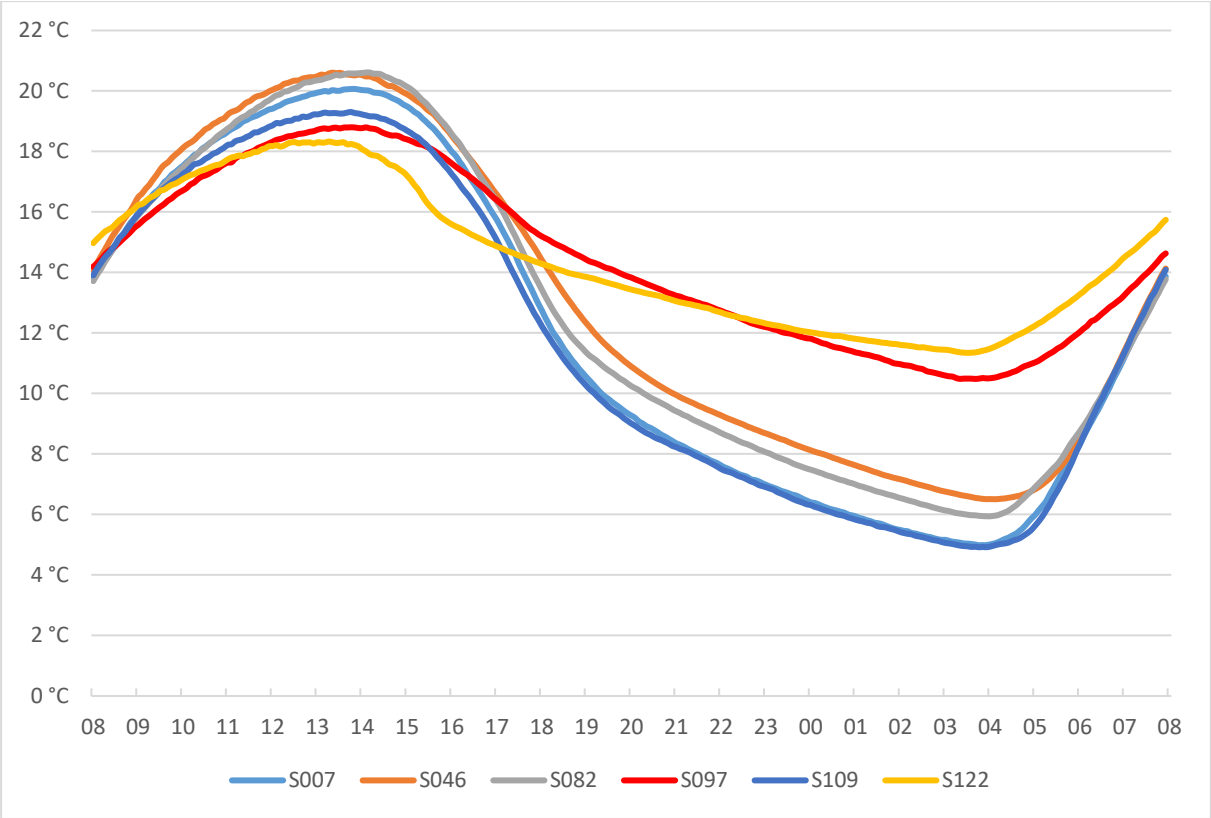


Abb. 53: Die mittleren Tagesgänge von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages bei autochthoner Witterung an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Charakteristik im Jänner (Abb. 54) ist ähnlich jener des Gesamtjahres, wobei im Untersuchungsgebiet aufgrund der kurzen Sonnenscheindauer die Isothermie am Morgen verzögert bzw. am Abend früher eintritt. Die Temperaturverhältnisse an den einzelnen Stationen sind sehr gut mit jenen von allen Tagen mit autochthonen Bedingungen vergleichbar – in der Nacht werden an den tiefer gelegenen Stationen eindeutig die kältesten Temperaturen verzeichnet, das Minimum liegt in den frühen Morgenstunden bei -8 °C an Station 007; die Höhenstation 122 sinkt hingegen kaum unter -2 °C, wodurch ein Unterschied von max. 6 K entsteht. Tagsüber wird an der Station 122 nur knapp 3 °C erreicht, an der Station 046 hingegen knapp 6 °C, wodurch ein Unterschied von 3 K feststellbar ist. Diese Werte sind gut vergleichbar mit der Auswertung aller Tage mit autochthonen Bedingungen, wobei tagsüber (trotz der geringeren Amplitude von 13 K gegenüber 15 K des Gesamtjahres) ein etwas größerer Unterschied zwischen höher und tief gelegenen Stationen entsteht.

Sehr interessant ist der deutliche Unterschied zwischen den beiden Werten um 08 Uhr (UTC) des ersten und zweiten Tages. Während in der Abb. 53 dieser Unterschied maximal 1 K ausmacht, liegt er im Jänner an den tiefer gelegenen Stationen bei 3 K. Das bedeutet, dass der Unterschied im Jänner zwischen einem „Schönwettertag“ mit autochthonen Bedingungen und

einem „normalen“ Tag sehr groß ist, viel größer als im Jahresdurchschnitt. Nach einem Tag mit autochthonen Bedingungen sinkt die Temperatur im Jänner also durchschnittlich bis auf -8 °C, währenddessen es im Durchschnitt aller Tage des Jänners deutlich mildere -5 °C sind. Dies ist ein deutliches Zeichen für die Auswirkungen von Kaltluftprozessen.

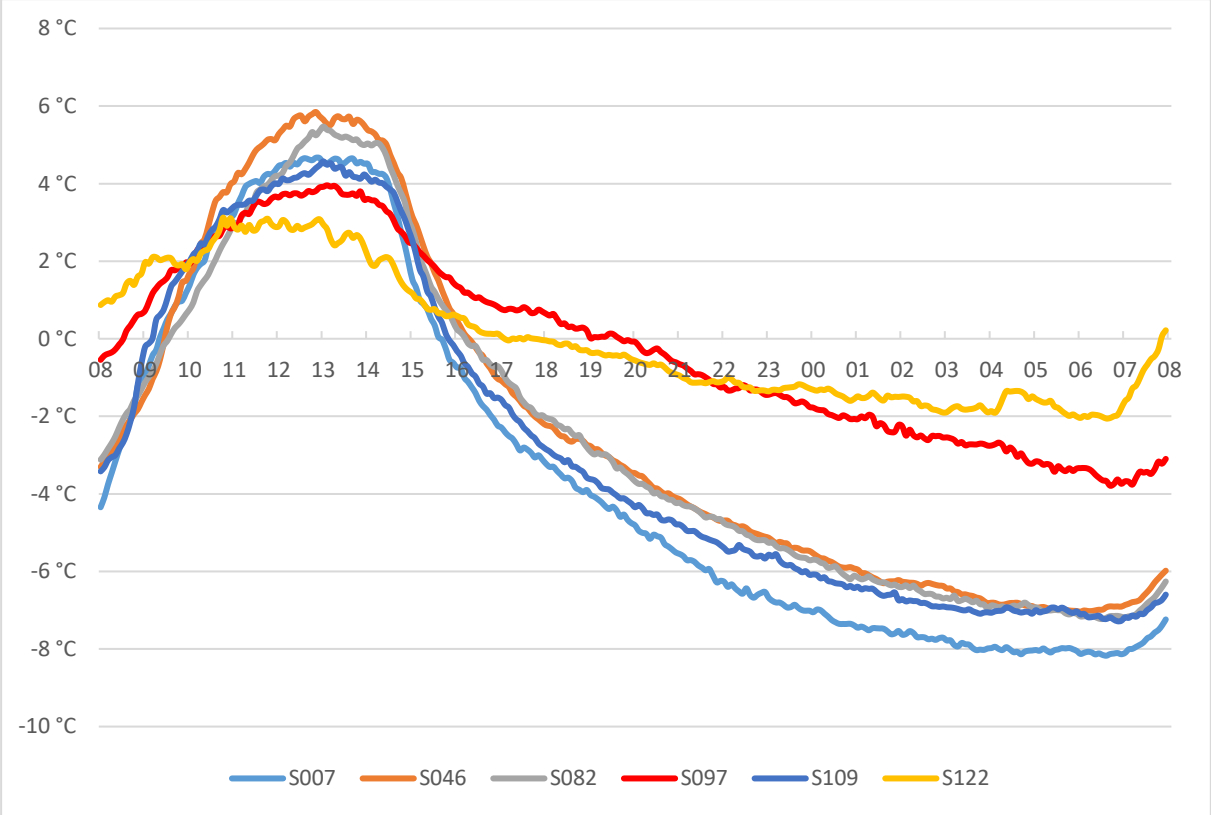


Abb. 54: Die mittleren Tagesgänge von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages bei autochthoner Witterung im Jänner an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Auch die Verhältnisse im Juli (Abb. 55) sind von der Charakteristik her dem Gesamtjahr sehr ähnlich, wobei die veränderte Sonnenscheindauer für eine frühere Isothermie der Stationen am Morgen und eine spätere am Abend sorgt. Das Minimum liegt gegen 04 Uhr (UTC) bei 13 °C bei den Talstationen, währenddessen der Wert der Station 122 bis auf 20 °C absinkt, was eine Spannweite von 7 K ergibt. Tagsüber ist es an der Station 082 mit maximal 30 °C gegen 15 Uhr am wärmsten, die Kurve der Station 122 sinkt aufgrund der in Kap. 6.1 beschriebenen Lage der Station schon früher ab und erreicht nur knapp 28 °C; die Spannweite beträgt hier also etwa 2 K. Der Unterschied der beiden Werte um 08 Uhr beträgt maximal 1 K, wobei die Verhältnisse an Tagen mit autochthoner Witterung sogar wärmer sind als im Durchschnitt des

gesamten Jahres. Dies liegt wohl am stärkeren Anstieg der Temperatur am Morgen, der durch die frühere Sonneneinstrahlung bedingt ist.

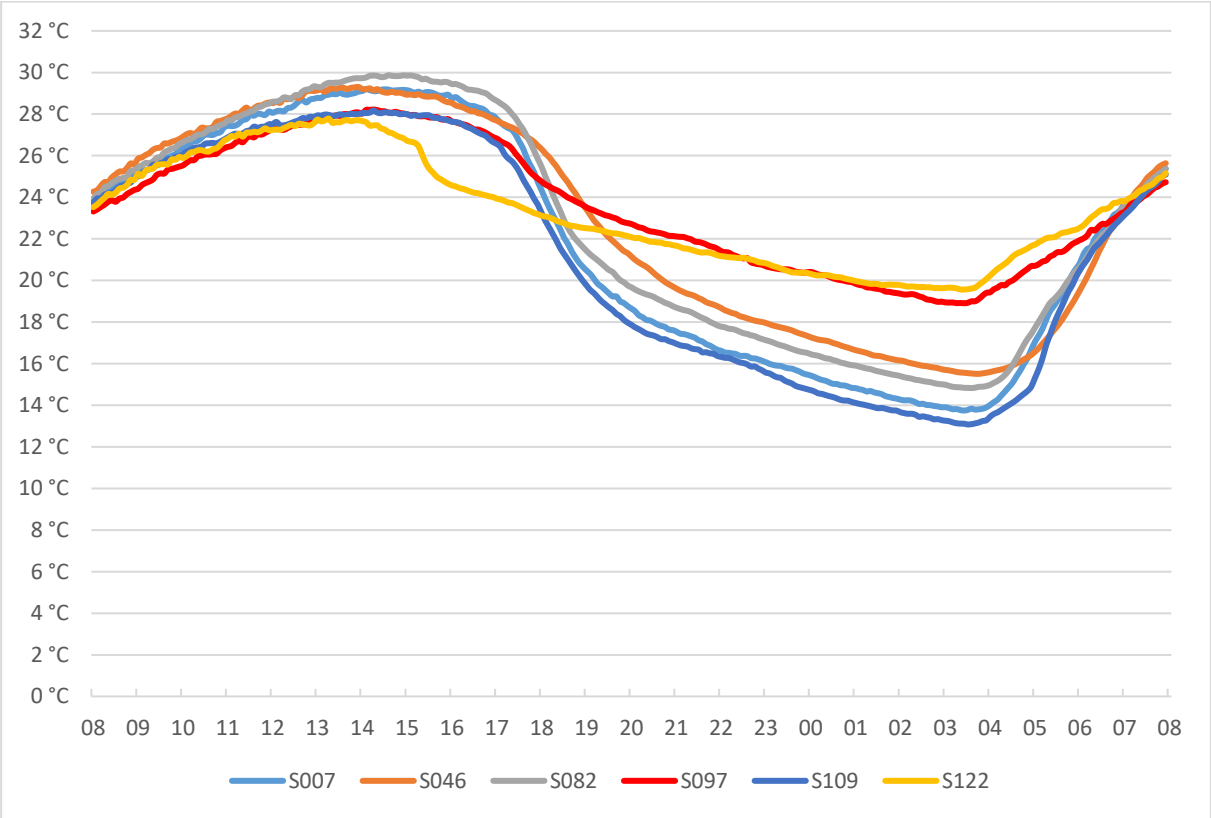


Abb. 55: Die mittleren Tagesgänge von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages bei autochthoner Witterung im Juli an den Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.7.2 Vergleich mit dem Gesamtjahr

Die Abb. 56 zeigt die Tagesgänge der Stationen 082, 109 und 122 im Vergleich von Tagen autochthoner Witterung mit dem Gesamtjahr, wobei aufgrund der Auswertungsmethodik wiederum um 08:00 Uhr am Morgen begonnen wird (Erklärung siehe Kap. 6.7.1).

Nun gilt für autochthone Tage die (in Kap. 5.3.1 genauer beschriebene) vereinfachte Definition, dass durch Schönwetter bedingt tagsüber eine starke Einstrahlung, in der Nacht eine ungestörte Ausstrahlung stattfindet. Daraus resultieren höhere Temperaturen zumindest tagsüber, teilweise aber auch in der Nacht, was am Beispiel der Station 122 offensichtlich wird: in der Nacht beträgt die Begünstigung 3 K, tagsüber etwa 5 K. Bei dieser am Oberhang

gelegenen Station gibt es in der Nacht kaum negative Einflüsse durch Kaltluftprozesse, tagsüber positive Effekte der „warmen Hangzone“ (siehe Kap. 2.2.2).

Die Situation gestaltet sich bei den Stationen 082 und 109 etwas anders, wo in beiden Fällen die Temperaturen bei autochthoner Witterung in den Morgenstunden unter jene des Gesamtjahres fallen. An Station 082 beträgt der Unterschied maximal 0,3 K, bei Station 109 maximal 0,8 K. Dies ist ein deutliches Zeichen für die starke Abkühlung durch die ungehinderte Ausstrahlung des Bodens sowie nächtliche Kaltluftprozesse, welche die tagsüber deutlich höheren Temperaturen (um 5 K Unterschied zur wärmsten Tageszeit) in der Nacht sogar unter jene des Gesamtjahres sinken lassen.

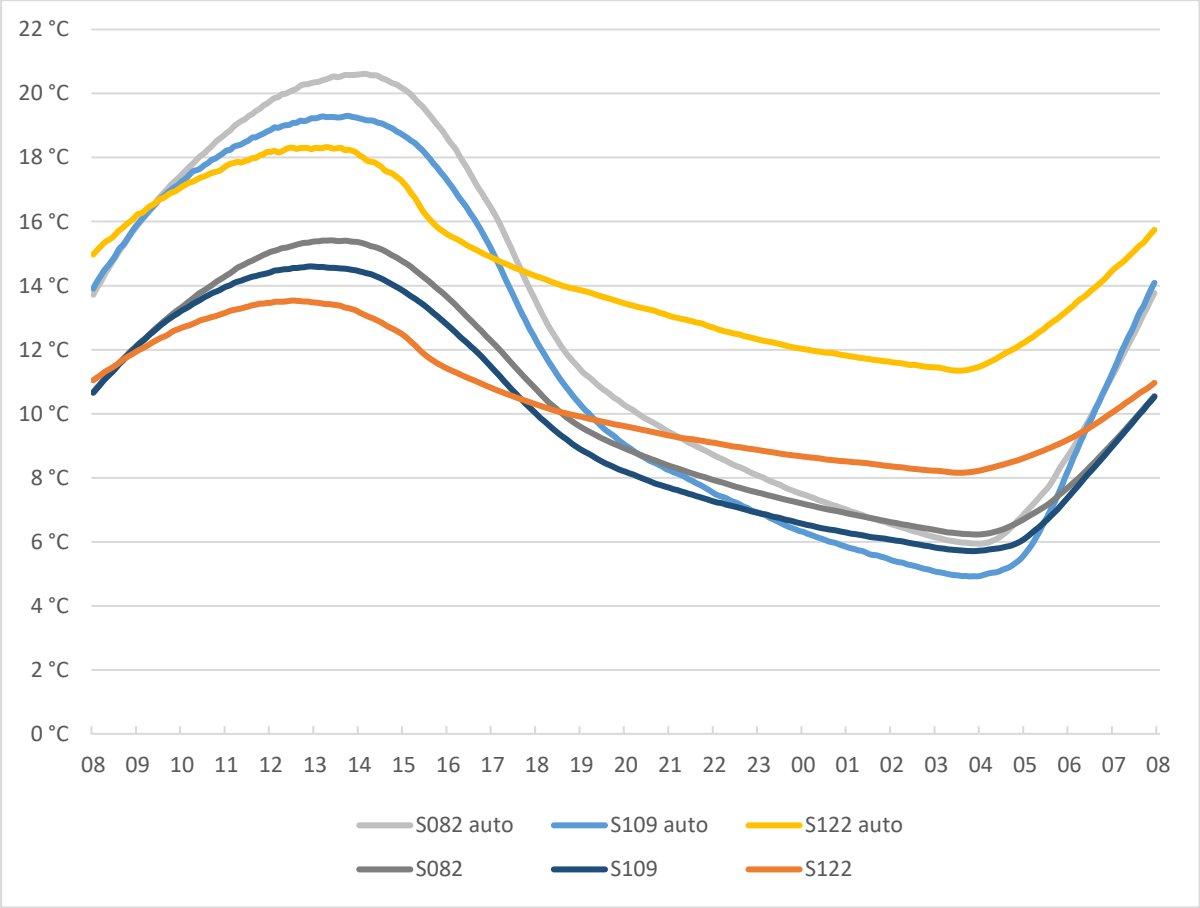


Abb. 56: Die mittleren Tagesgänge von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages an den Stationen 082, 109 und 122 im Vergleich von Tagen mit autochthoner Witterung mit dem Gesamtjahr für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die folgende Abb. 57 zeigt die mittleren täglichen Durchschnittstemperaturen sowie Minima und Maxima an Tagen mit autochthoner Witterung in den Sommer- und Wintermonaten. Diese Analyse wurde auch schon in Kap. 6.1, Abb. 48 für sämtliche Tage der Periode von 2007-

2011 gemacht. Diese durchschnittlichen Temperaturwerte dürfen ausschließlich für Vergleiche untereinander dienen, da sie nur aus den (unregelmäßig vorkommenden) Tagen mit autochthoner Witterung resultieren.

Im Winter fällt bei den Minima auf, dass die Temperaturen durchschnittlich etwas unter jenen des Gesamtjahres liegen – offenbar sinken die Temperaturen in der Nacht durch die ungehinderte Ausstrahlung und mögliche Kaltluftprozesse schneller ab als bei allochthonen Wetterlagen (dies geht auch aus Abb. 54 hervor). Im Falle der mittleren Temperatur gibt es eine stärkere Streuung, aber gleichzeitig eine aussagekräftigere Signifikanz der Temperaturabnahme mit der Seehöhe. Die Maxima liegen teilweise deutlich (bis zu 3 K) über jenen der Auswertung des gesamten Jahres. Im Sommer sind die Minima bei autochthoner Witterung etwa gleich zu jenen des gesamten Jahres, wobei wiederum eine etwas stärkere Streuung und eine stärkere Signifikanz der Temperaturabnahme mit der Höhe festgestellt werden kann. Die Durchschnittstemperaturen sind um etwa 1 K wärmer, die Maxima um 2 K; in beiden Fällen ist der Trend nicht stark signifikant.

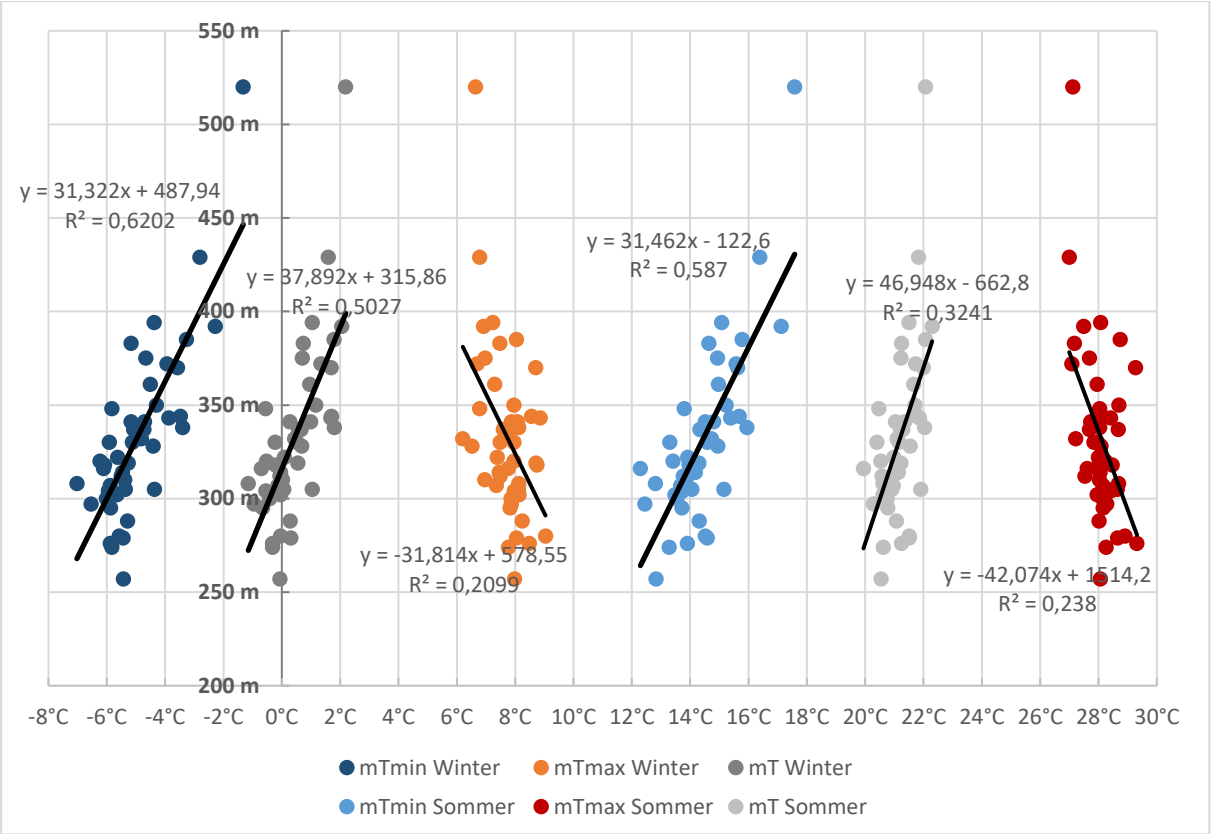


Abb. 57: Die mittleren täglichen Minima (mTmin in blau) und Maxima (mTmax in orange) sowie die mittleren täglichen Temperaturen bei autochthoner Witterung in den Sommer- (Juni, Juli, August) und Wintermonaten (Dezember, Jänner, Februar) in [°C] für die Periode 2007-2011 der ausgewerteten Stationen nach Seehöhe in [m]. Schwarzen Linien sind lineare Trends, R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 58 zeigt die mittlere aperiodische Tagesschwankung als Vergleich des gesamten Jahres mit den Tagen mit autochthoner Witterung, wobei mehrere Dinge zu beachten sind:

- Durch die ungleichmäßige Verteilung der Tage mit autochthoner Witterung zugunsten der warmen Jahreszeit sind die Durchschnittswerte etwas zu hoch.
- Die Bildung der mittleren aperiodischen Tagesschwankung erfolgte beim gesamten Jahr durch Mittelbildung aus den Monatsmitteln, im Falle der Tage mit autochthoner Witterung durch Mittelbildung der einzelnen Tagesmittel. Diese Maßnahme wurde getroffen, da kein durch genügend große Daten abgesichertes Mittel sämtlicher Monate gebildet werden konnte.
- Die Tagesmittel wurden auf Grundlage der Daten zu autochthoner Witterung von 08 bis 08 Uhr des Folgetages gebildet, also nicht wie im Falle des Gesamtjahres von 00-24

Uhr. Dadurch entstehen also keine „Tagesmittel“ per se, aber ein durchaus zutreffendes Mittel für Tage mit autochthoner Witterung.

Das Ergebnis zeigt, dass die aperiodische Tagesschwankung bei Tagen mit autochthoner Witterung durchwegs deutlich höher ausfällt als im Gesamtjahr. Dies liegt an der stärkeren Erwärmung tagsüber, da bei „Schönwetter“ im Regelfall höhere Temperaturen erreicht werden. Dieser Unterschied reicht von bis zu 4,5 K in den niedrigeren Gebieten bis zu knapp 1 K im Falle der höchstgelegenen Station 122, wobei die Trends in beiden Fällen auf eine starke Signifikanz hinweisen und das Bestimmtheitsmaß in beiden Fällen Werte um 0,65 erreicht.

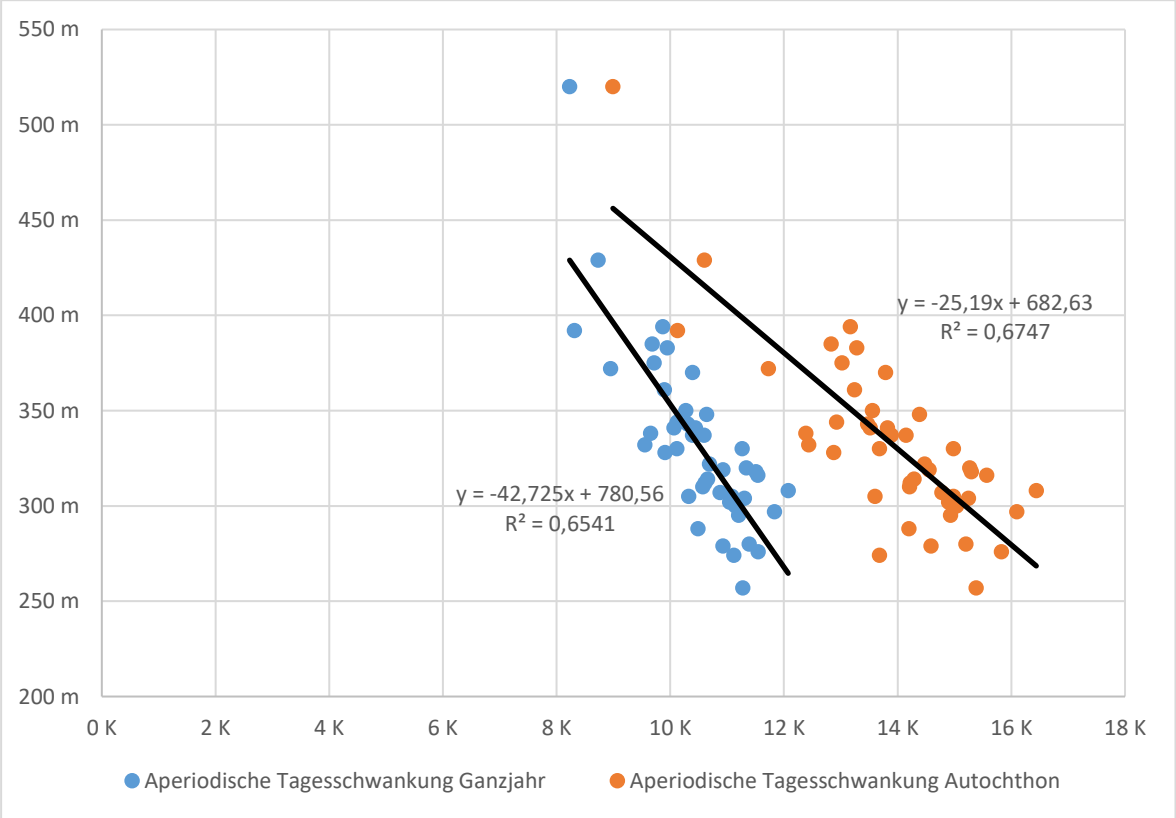


Abb. 58: Die mittlere aperiodische Tagesschwankung des gesamten Jahres sowie bei autochthoner Witterung der Lufttemperatur in [°C] für die Periode 2007-2011 an den ausgewerteten Stationen nach Seehöhe in [m]. Schwarze Linien sind lineare Trends, R^2 das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.7.3 Inversionen

In Kap. 6.10 wird die Inversionshäufigkeit des gesamten Jahres behandelt, in Tab. 20 sind nun die Daten für Tage mit autochthoner Witterung aufgelistet. Im Vergleich mit der Auswertung des ganzen Jahres fällt auf, dass die Wahrscheinlichkeit für Inversionen mit 59,3 % viel höher als im gesamten Jahresdurchschnitt ist, wo diese nur rund 36 % beträgt. Dies ist gut nachvollziehbar, da bei autochthonen Bedingungen die nächtlichen Kaltluftprozesse besonders gut ausgeprägt sind und die Ausbildung von Inversionen dadurch begünstigt. Nur in den warmen Mittags- und Nachmittagsstunden erwärmt sich das Tal stärker als die erhöhten Lagen, wodurch die Temperatur in den tiefen Lagen höher ist als oben.

Tab. 20: Absolute Zahlen der Fünf-Minuten-Werte betreffend Inversionen an Tagen mit autochthoner Witterung als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C].

Auftreten von Inversionen:		**60270**
	in %:	**59,3**
Davon:	mind. +3K:	31617 Mal
	mind. +5K:	14905 Mal
	mind. +7K:	4363 Mal
	mind.+10K:	444 Mal

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

6.7.4 Vertikaler Temperaturgradient

Der vertikale Temperaturgradient wird im Normalfall über den Jahresnormalwert ermittelt, was in diesem Fall aufgrund der Selektion einzelner Tage nicht möglich ist. Dennoch wurde eine Auswertung gemacht, da die Absolutwerte zwar keine Aussagekraft haben, ein relativer Vergleich der Stationen untereinander im Sinne des vertikalen Temperaturgradienten aber durchaus Sinn macht; dieser wird in Tab. 21 zusammengefasst. Hinweise zu den Charakteristika der einzelnen Stationen können in Kap. 6.12 beim vertikalen Temperaturgradienten des gesamten Jahres nachgelesen werden.

Vergleicht man die Höhenstufen 250-299 m mit 350-399 m, die einem Abstand von 100 Höhenmetern entsprechen, so kommt man auf einen vertikalen Temperaturgradienten von +1,1 K/hm. Die Spannweite der Werte ist mit knapp 2 K deutlich höher als im Gesamtjahr (~0,5 K, siehe Kap. 6.12). Es herrscht also wie im Gesamtjahr eine Zunahme der Temperatur nach oben, wobei sie im Vergleich zu den +0,4 K des Gesamtjahres deutlich stärker ausfällt.

Dies ist aufgrund der bereits mehrfach erwähnten Eigenschaften von autochthoner Witterung sowie den sehr häufig auftretenden Inversionen (siehe oben) gut nachvollziehbar.

In den kalten Monaten ist diese Temperaturgunst der Hügellagen am deutlichsten ausgeprägt, hier erreicht der vertikale Temperaturgradient bei den Zonen 250-299 m und 350-399 m sogar +1,5 K; im Juli beträgt dieser Wert +0,9 K.

Es kann also festgehalten werden, dass der vertikale Temperaturgradient vor allem an Tagen mit autochthoner Witterung sehr hoch ausgeprägt ist und die Temperaturgunst der höher gelegenen Gebiete dieser Region dann noch stärker bemerkbar wird; der größte Unterschied tritt dabei im Winter auf.

Tab. 21: Die mittleren Temperaturen des Jahres, im Jänner sowie Juli der Tage mit autochthoner Witterung der untersuchten Stationen in [°C] mittels Einteilung in 50 m - Höhenschritten.

Seehöhe	Anzahl Stationen	Jahr	Jänner	Juli
250-299	8	**9,8**	-2,5	22,1
300-349	27	**10,1**	-2,0	22,3
350-399	9	**10,9**	-1,0	23,0
400-449	1	**11,2**	-0,7	23,1
450-499	0	**-**	-	-
500-549	1	**11,7**	0,0	23,3

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Abb. 59 zeigt die durchschnittlichen Jahres-, Jänner- und Julimittelwerte aller Tage mit autochthoner Witterung im Untersuchungszeitraum. Diese sind über das Mittel der Tage mit autochthoner Witterung gebildet und nur für den Vergleich untereinander geeignet.

Im Vergleich zu den Mittelwerten des gesamten Jahres in Kap. 6.1 erkennt man auf den ersten Blick den höheren Wert des Bestimmungsmaßes aller drei Trendgeraden, was auf eine stärkere Signifikanz der Zunahme der Temperatur nach oben hindeutet (und mit dem vertikalen Temperaturgradienten auch bestätigt wird). Die Spannweite der Werte ist deutlich höher als im gesamten Jahr; so beträgt der Unterschied zwischen kältester und wärmster Station im Jänner bei autochthoner Witterung knapp 4 K, im Jänner allgemein hingegen nur 2 K. Die Werte im Jänner sind darüber hinaus bei autochthoner Witterung durchgehend kälter als im Mittel aller Jännertage (-4 - 0 °C bzw. -1 - +1 °C); im Juli sind die Verhältnisse umgekehrt (21 - 24 °C bzw. 19,5 - 21 °C). Im Mittel des Jahres gleichen die Werte bei autochthoner Witterung stark jenen aller Tage des Jahres, wobei die Spannweite bei autochthoner

Witterung etwas größer ist (9 - 12 °C bzw. 9,5 - 11 °C). Die Station 122 auf 520 m Seehöhe ist in beiden Fällen unter den wärmsten Stationen.

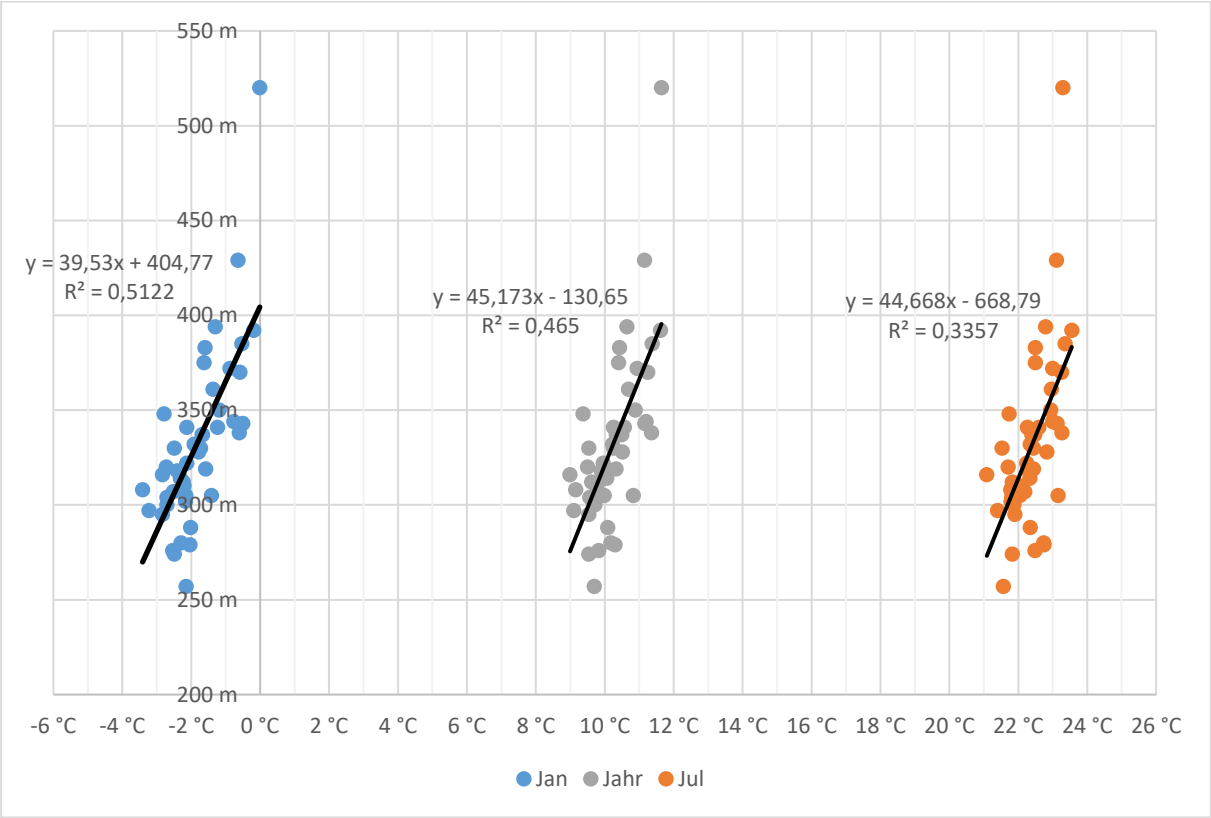


Abb. 59: Durchschnittliche Jahresnormalwerte (grau) sowie mittlere Jänner- (blau) und Juliwerte (orange) der Temperatur bei autochthoner Witterung in [°C] mit Trends in Abhängigkeit der Seehöhe in [m]. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß der Trendgeraden, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.7.5 Schneebedeckung

Die Abb. 60 zeigt die Tagesgänge der Lufttemperatur bei autochthoner Witterung und gleichzeitiger Schneebedeckung (insgesamt wurden elf solcher Tage gezählt) im Untersuchungszeitraum von 2007-2011.

Im Untersuchungszeitraum konnte kein einziger Tag mit perfekten Bedingungen gefunden werden, was auf die Seltenheit dieser speziellen Wetterlage hinweist; oft sind Nebelereignisse störend. Wenn diese speziellen Bedingungen vorherrschen, ist mit extrem niedrigen Temperaturen zu rechnen.

An den am Talboden gelegenen Stationen 007 und 046 werden in der Nacht die niedrigsten Temperaturen erreicht, welche mit -6 °C um bis zu 4 K kälter als an den wärmsten (und am höchsten gelegenen) Stationen 097 und 122 sind. Die Kurven stimmen im Wesentlichen gut mit jenen der autochthonen Witterung ohne Schneebedeckung in Kap. 6.7.1 überein.

Erst nach 10 Uhr, also rund eine Stunde später als bei autochthoner Witterung ohne Schneebedeckung, werden die Werte der niedrig gelegenen Stationen höher als jene der höher gelegenen Stationen. Das liegt daran, da die Tage mit autochthoner Witterung und Schneebedeckung zur Zeit der niedrigsten Sonneneinstrahlung vorkommen und die Temperaturen daher auch später ansteigen. Das Maximum wird um 13 Uhr (UTC) mit 5 °C bei Station 046 erreicht, was um etwa 2 K höher ist als die Temperatur der Station 122. Bereits zwischen 15 und 16 Uhr (UTC) gleichen sich die Temperaturen wieder annähernd aus.

Die Unterschiede zu den Tagen ohne Schneebedeckung halten sich also in Grenzen, nur die Stationen 046 und 109 fallen etwas aus dem Rahmen. Bei Schneebedeckung spielt die Hanglage offenbar eine größere Rolle als bei fehlender Schneebedeckung, da die beiden Talstationen in der Nacht deutlich am kältesten sind; bei fehlender Schneebedeckung sind die Werte der am Hangfuß gelegenen Station 109 in der Nacht niedriger als jene der Station 046. Auch Kaltluftprozesse dürften hier eine Rolle spielen, da die direkt in Feldbach und somit mitten im Raabtal gelegene Station 046 eher für Kaltluftabflüsse anfällig ist als die in einem Seitental am Hangfuß gelegene Station 109.

Einen Vergleichswert liefert der durchschnittliche Tagesgang von Tagen mit autochthoner Witterung (ohne Schneebedeckung) im Jänner im Untersuchungszeitraum von 2007-2011, der in der Abb. 60 als hellblaue, strichlierte Linie dargestellt ist. Auffallend ist der extreme Unterschied zwischen 08 Uhr des ersten und 08 Uhr des zweiten Tages, der bereits in Kap. 6.7.1 erläutert worden ist. Am Morgen und tagsüber gibt es kaum Unterschiede zwischen Tagen mit Schneebedeckung und schneefreier Oberfläche, die Kurven verlaufen annähernd synchron. Ab etwa 16 Uhr ändert sich das: An Tagen mit Schneebedeckung sinkt die Temperatur steiler ab und bleibt dann auf einem konstanten Niveau. Ohne Schneebedeckung sinkt die Temperatur stetig bis in die Morgenstunden ab, wodurch gegen 07 Uhr morgens eine Diskrepanz von 2 K entsteht.

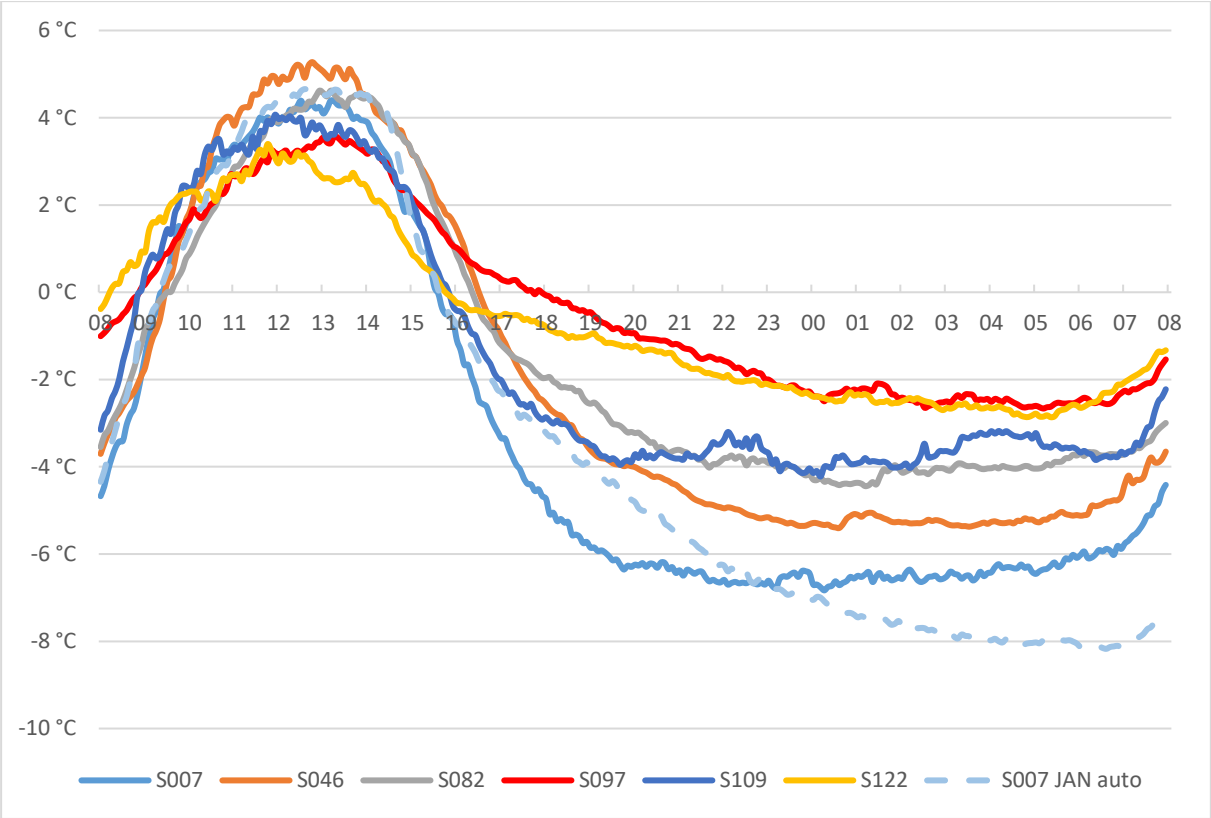


Abb. 60: Die mittleren Tagesgänge von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages bei autochthoner Witterung und Schneebedeckung (elf Tage) der Stationen 007, 046, 082, 097, 109 und 122 sowie der durchschnittliche Tagesgang im Jänner für Tage mit autochthoner Witterung für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.7.6 Fallbeispiele für Kaltluftprozesse

In diesem Kapitel werden zwei verschiedene Prozesse untersucht: Die quantitative Auswirkung von Kaltluftabflüssen hinsichtlich der Temperaturverhältnisse sowie der Unterschied bei benachbarten Stationen mit bzw. ohne Beeinflussung von Kaltluftprozessen. In beiden Fällen ist es entscheidend für ein realistisches Ergebnis, geeignete Stationen im Untersuchungsgebiet zu finden.

Für die Analyse der Auswirkung von Kaltluftabflüssen werden die beiden Stationen 054 und 055 im Westen des Untersuchungsgebietes ausgewählt, deren geographische Lage in Abb. 61 abgebildet ist. Die Station 054 befindet sich am Mittelhang in unbebautem Gebiet und einer Seehöhe von 348 m. Die Station 055 befindet sich am Hangfuß in unbebautem Gebiet in einer Seehöhe von 320 m und einer Entfernung von etwa 1,5 km Luftlinie talabwärts.

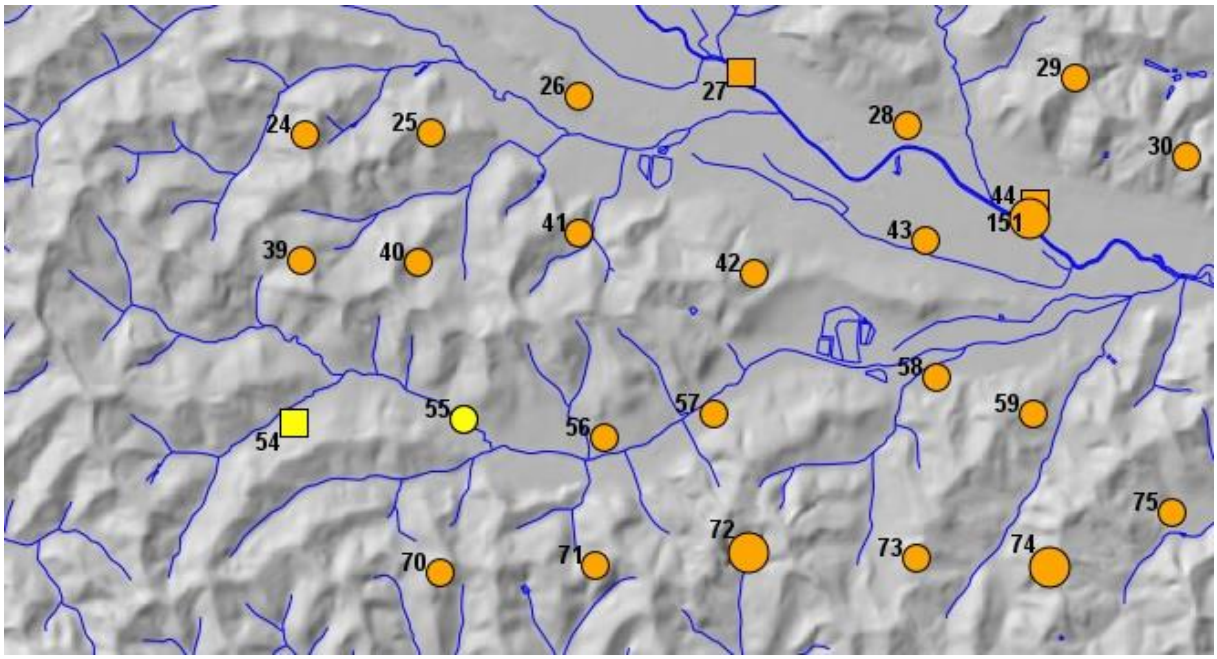


Abb. 61: Die Stationen 054 und 055 (gelb markiert) des Stationsnetzes WegenerNet am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes. *(Quelle: Wegener Center (2013), Kartengrundlage: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Hinsichtlich des Unterschieds von Stationen mit bzw. ohne Beeinflussung von Kaltluftprozessen werden die beiden Stationen 122 und 135 ausgewählt, die sich im Süden des Untersuchungsgebietes befinden. Die Lage der beiden Stationen ist in Abb. 62 dargestellt. Die Station 122 befindet sich auf 520 m Seehöhe am Oberhang des Gleichenberger Kogels in unbebautem Gebiet. Die Station 135 befindet sich am Mittelhang in teils bebautem Gebiet nahe Bad Gleichenberg in einer Seehöhe von 305 m. Der Unterschied ist also deutlich größer als im ersten Fall, jedoch beträgt die Entfernung auch nur 1,2 km Luftlinie.

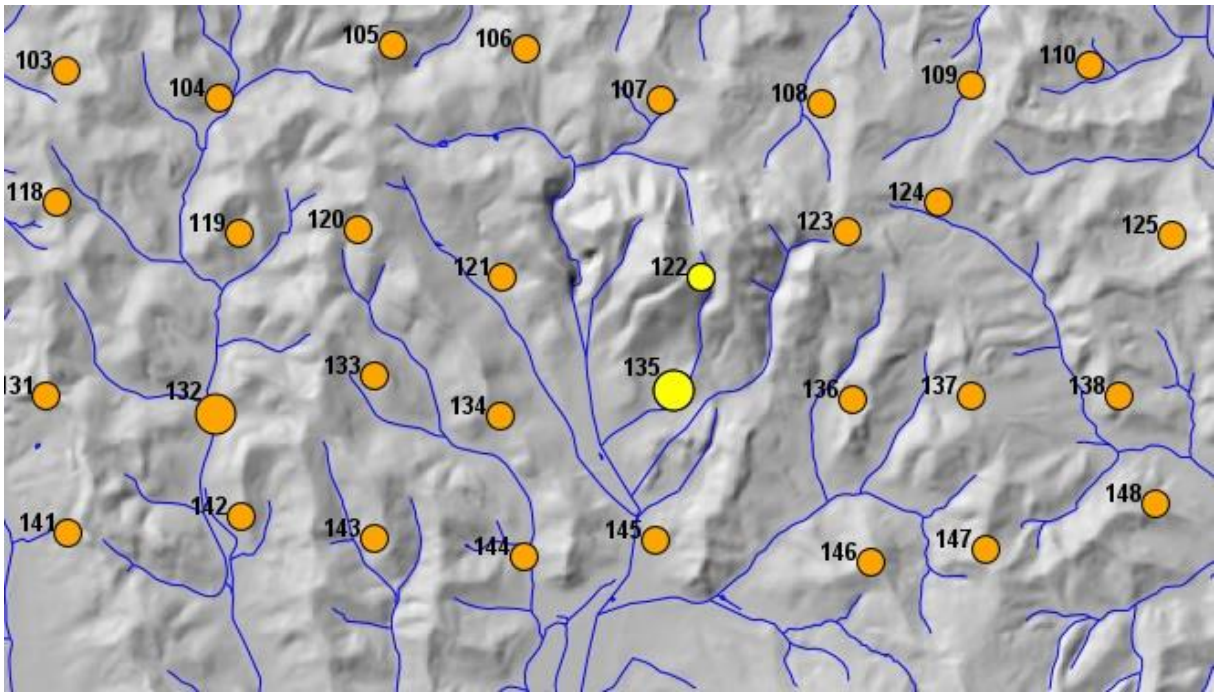


Abb. 62: Die Stationen 122 und 135 (gelb markiert) des Stationsnetzes WegenerNet am südlichen Rand des Untersuchungsgebietes. Die Größe der Punkte weist auf unterschiedliche Stationsarten und hat in diesem Zusammenhang keine Bedeutung. *(Quelle: Wegener Center 2013, Kartengrundlage: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 63 zeigt die durchschnittlichen Tagesgänge der beiden genannten Stationspaare bei autochthoner Witterung im Jänner als Mittel der Jahre 2007-2011 in einer gemeinsamen Darstellung.

Die Werte der beiden Stationen 054 und 055 liegen um 08 Uhr (UTC) bei etwa -3,5 °C, wonach sie an der Station 054 deutlich stärker ansteigen und in den Mittagsstunden mit knapp 5 °C um gut 1 K höher sind, als an der tiefer gelegenen Station 055. Schon vor 15:00 Uhr herrscht wieder Isothermie; danach verlaufen die Kurven sehr gleichförmig, wobei die Werte an der niedriger gelegenen Station 055 durchwegs um knapp 0,5 K kälter sind. In der Früh liegen die Werte dann nur bei -6 °C und damit um mehr als 2 K niedriger als im Durchschnitt eines „normalen“ Jännertages. Bei beiden Stationen sind die Kaltluftprozesse gut erkennbar: die Temperaturen sinken um den Zeitpunkt des Sonnenunterganges rasch ab und erreichen knapp vor Sonnenaufgang ihren Tiefstwert. Die Station 055 liegt in einem Gebiet mit Kaltluftstau in einer der kältesten Regionen des Untersuchungsgebietes (siehe auch Kap. 12), wodurch die durchwegs etwas niedrigeren Temperaturen zustande kommen.

Der zweite Fall ist durch das Stationspaar 122 und 135 dargestellt, von denen nur letztere Station durch Kaltluftprozesse beeinträchtigt wird. Die Station 122 befindet sich nach den Analysen und Auswertungen in Kap. 6.1 in keinem von Kaltluftprozessen beeinflussten Gebiet.

Die Temperaturkurve verläuft ausgeglichen und fällt nach dem Maximum am Nachmittag nicht steil ab. Die Kurve der Station 135 zeigt hingegen einen ähnlichen Verlauf wie jene der Stationen 054 und 055, wobei die Temperaturen durchwegs um rund 1,5 K höher sind. Bei diesen beiden Stationen ist natürlich auch der beträchtliche Höhenunterschied von 215 m zu berücksichtigen, der prinzipiell für einen ausgeglicheneren Tagesgang an der Station 122 sorgt. Dennoch ist der beinahe stabile Verlauf der Temperaturkurve in der Nacht auffällig.

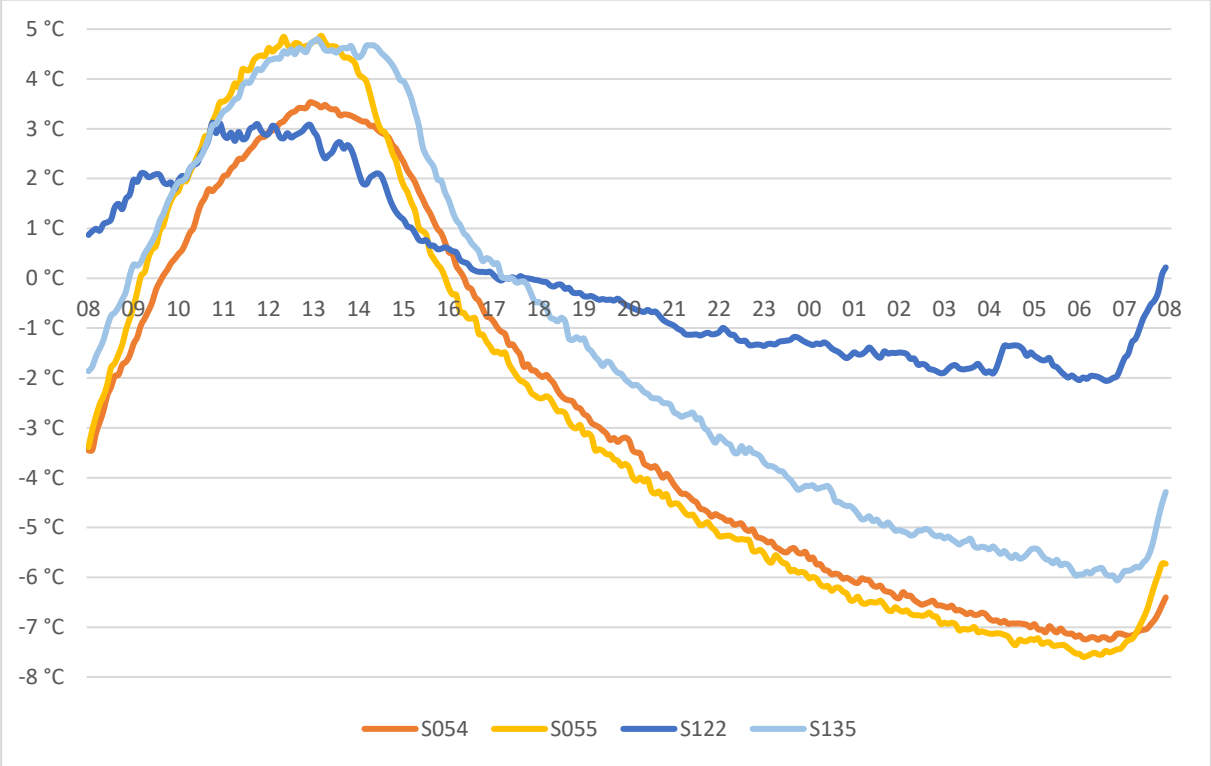


Abb. 63: Durchschnittliche Tagesgänge der Stationen 054 (348 m), 055 (320 m), 122 (520 m) und 135 (305 m) im Jänner bei autochthoner Witterung von 08 bis 08 Uhr (UTC) des Folgetages im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.8 Geländeklimatische Parameter

Nachfolgend werden die vier wichtigsten geländeklimatischen Parameter Exposition, Hanglage, Seehöhe und Tallage untersucht. Diese haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Lufttemperatur, wobei nie nur ein Parameter allein entscheidend ist, sondern immer eine unterschiedlich gewichtete Kombination aller. In diesem Kapitel wird versucht, den jeweiligen Parameter durch eine einfache Kategorisierung aller Stationen herauszufiltern, wobei teilweise die Seehöhe mitberücksichtigt wird. Im Kap. 6.9 folgt dann der Versuch, die Einflüsse

der jeweiligen Parameter durch Eliminierung des dominanten Faktors Seehöhe (durch Nivellierung) bestmöglich zu quantifizieren.

6.8.1 Exposition

Hinsichtlich der Exposition war es zunächst notwendig, die Himmelsrichtungen auf die vier Hauptrichtungen zu reduzieren; dadurch sind klarere Aussagen und eine deutlichere Darstellung im Diagramm möglich. Die Abb. 64 zeigt die durchschnittlichen Tagesgänge der untersuchten Stationen nach den vier Himmelsrichtungen gruppiert, wobei die Kurven aus dem Mittel von 4 (Nord), 6 (Ost), 6 (Süd) bzw. 6 (West) Stationen bestehen. Dabei wurden zusätzliche Stationen miteinbezogen, die zuvor nicht ausgewählt wurden (008, 034, 051, 104, 116, 120 und 125). Dadurch wurden zwei Probleme beseitigt:

- Bei der ursprünglichen Auswahl wären nur zwei Stationen mit Ost-Exposition in die Analyse miteinbezogen. Durch die Verwendung zusätzlicher Stationen gibt es nun zumindest vier bzw. sechs Stationen pro Expositionsrichtung.
- Die Seehöhe konnte als beeinflussender Faktor praktisch eliminiert werden, da die mittleren Seehöhen der ausgewählten Stationen bei jeder Expositionsrichtung nun recht einheitlich sind: 328 m bei Nord, 331 m bei Ost, 334 m bei Süd und 330 m bei West.

Grundsätzlich war zu erwarten, dass vor allem die Stationen in Süd-Exposition durch die hohe Sonneneinstrahlung die höchsten Werte aufweisen. Dies trifft im Durchschnitt des ganzen Jahres nur zeitweise bzw. gar nicht zu. Um 07 Uhr morgens sind die Werte sämtlicher Stationen sehr ausgeglichen, wonach die Werte jener in Süd-Exposition bis 14 Uhr am höchsten sind. Der Unterschied beträgt aber maximal 0,2 K. Am Nachmittag und auch während der Nacht sind die Werte der West-exponierten Stationen am höchsten. Dies kann damit begründet werden, dass die Sonneneinstrahlung am Nachmittag in Südwest- bzw. später West-Exposition am stärksten ist. Offenbar führt die erhöhte Energiezufuhr am Nachmittag bzw. Abend dazu, dass die Werte in weiterer Folge auch in der Nacht höher bleiben.

Das Maximum liegt um 13 Uhr bei 14,8 °C und ist damit um 0,4 K höher als jenes der Stationen in Nord-Exposition. Es war davon auszugehen, dass an diesen Stationen die niedrigsten Werte gemessen werden würden – dies trifft nur zur Mittagszeit zu, wo die Sonneneinstrahlung bei Nord-exponierten Lagen am wenigsten Energie liefert. Die kältesten Werte während der Abend- und Nachtstunden werden eindeutig bei Ost-exponierten Lagen erreicht. Das

Minimum liegt um 6 Uhr bei 6,1 °C und damit um 0,9 K unter dem Minimum der West-exponierten Lagen. An Süd- und Nord-exponierten Lagen werden Minima um 6,6 °C erreicht.

Vor allem die Werte der Nord- bzw. West-exponierten Lagen sind vergleichsweise zu hoch, was anhand der Exposition nicht erklärt werden kann. Da auch die durchschnittliche Seehöhe in den vier Kategorien fast identisch ist und keine Rolle spielt, sind wohl Faktoren wie Kaltluftprozesse und lokalklimatische, geländebedingte Faktoren dafür ausschlaggebend. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Unterschiede im Jahresdurchschnitt zwischen Nord- und Süd-Exposition in der Nacht bzw. morgens 1 K und tagsüber 0,5 K betragen.

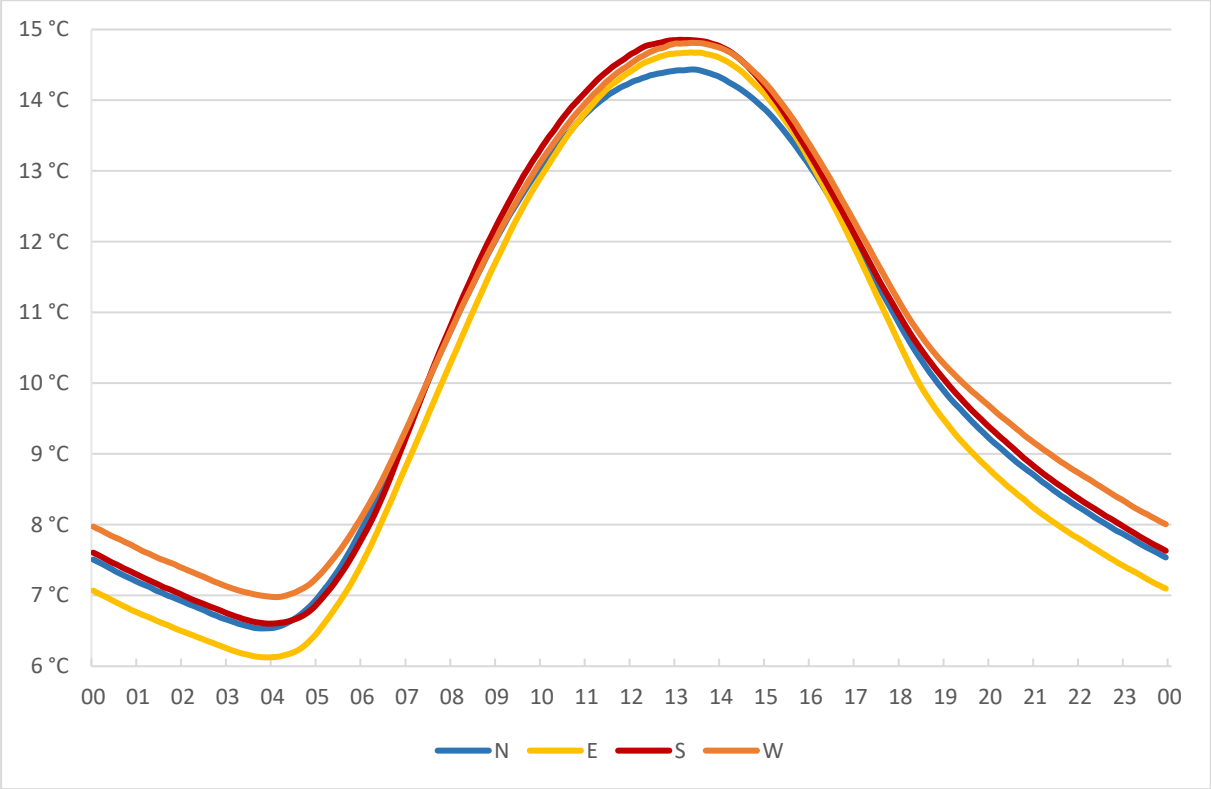


Abb. 64: Durchschnittliche Tagesgänge (in UTC) der Temperatur in [°C] im Mittel der ausgewählten Stationen des WegenerNet-Gebietes mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition für den Zeitraum von 2007-2011. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 65 zeigt die Tagesgänge im Jänner, die aufgrund der geringen Sonneneinstrahlung und damit Erwärmung tagsüber sehr ausgeglichen verlaufen. Es gibt nur wenige aussagekräftige Unterschiede der einzelnen Lagen, wobei die Werte der West-exponierten Lagen während der Nachtstunden mit einem Minimum von -1,5 °C wiederum um 0,5 K höher sind als jene der anderen Lagen. Zur Zeit der stärksten Sonneneinstrahlung sind die Werte der Nord-exponierten Lagen mit einem Maximum von knapp 3 °C um 0,6 K niedriger als jene der

Süd- und West-exponierten Lagen. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen Nord- und Süd-exponierten Lagen sowohl in der Nacht bzw. morgens, als auch tagsüber rund 0,5 K betragen. Vor allem vormittags herrscht stundenlang Isothermie.

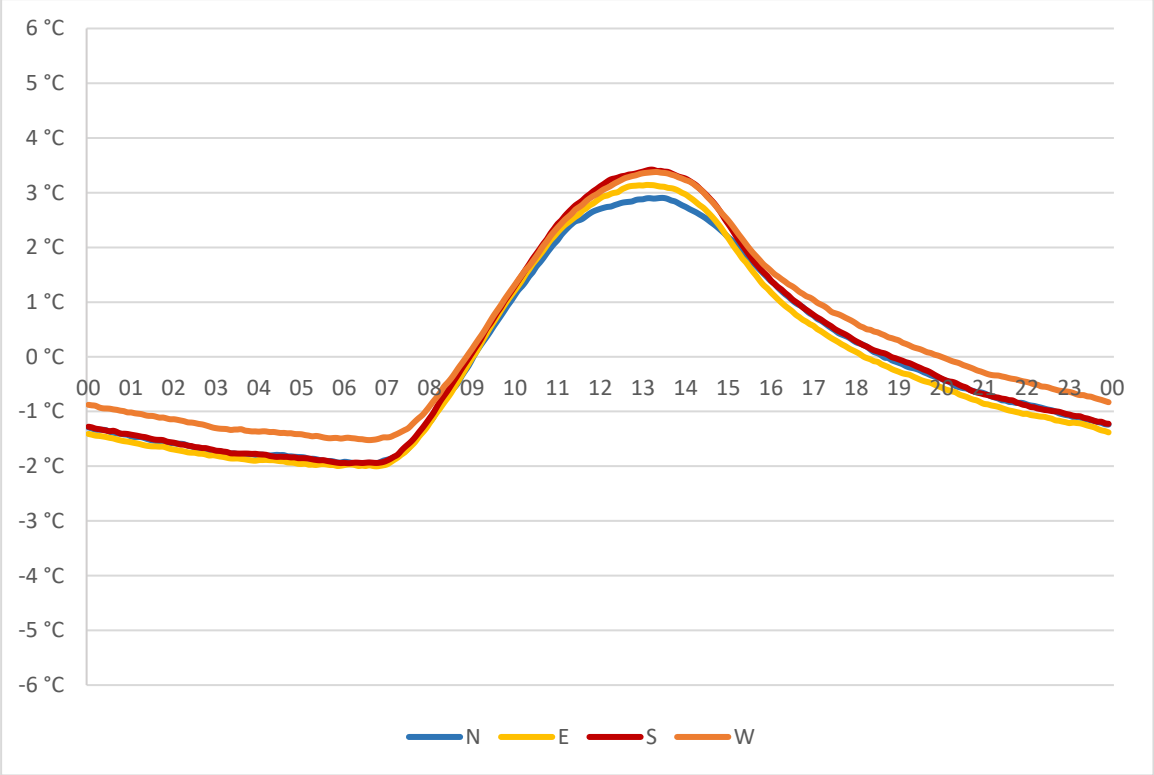


Abb. 65: Mittlere Tagesgänge (UTC) der Temperatur im Jänner der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Im Juli sind die Tagesgänge ausgeprägter, was sich aber kaum auf die Unterschiede der einzelnen Lagen auswirkt. Schon knapp vor 04 Uhr früh tritt das Minimum mit knapp unter 15 °C bei den Nord- und Ost-exponierten Lagen ein, wobei der Unterschied zur West-exponierten Lage rund 0,7 K beträgt. Ab 05 Uhr sind die Werte dann sehr einheitlich und bleiben das auch im weiteren Tagesverlauf. Das Maximum wird um 13 Uhr an den Süd- und West-exponierten Lagen mit 25,4 °C erreicht, was rund 0,3 K über dem Maximum der Nord-exponierten Lagen liegt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen Nord- und Süd-exponierten Lagen im Juli tagsüber mit 0,3 K sehr gering und in der Nacht mit maximal 0,8 K auch eher gering sind. Durch den steilen Einfallswinkel der Sonne werden offenbar auch

die Nordlagen dementsprechend begünstigt, dass die Verhältnisse kaum kühler sind als bei Südlagen.

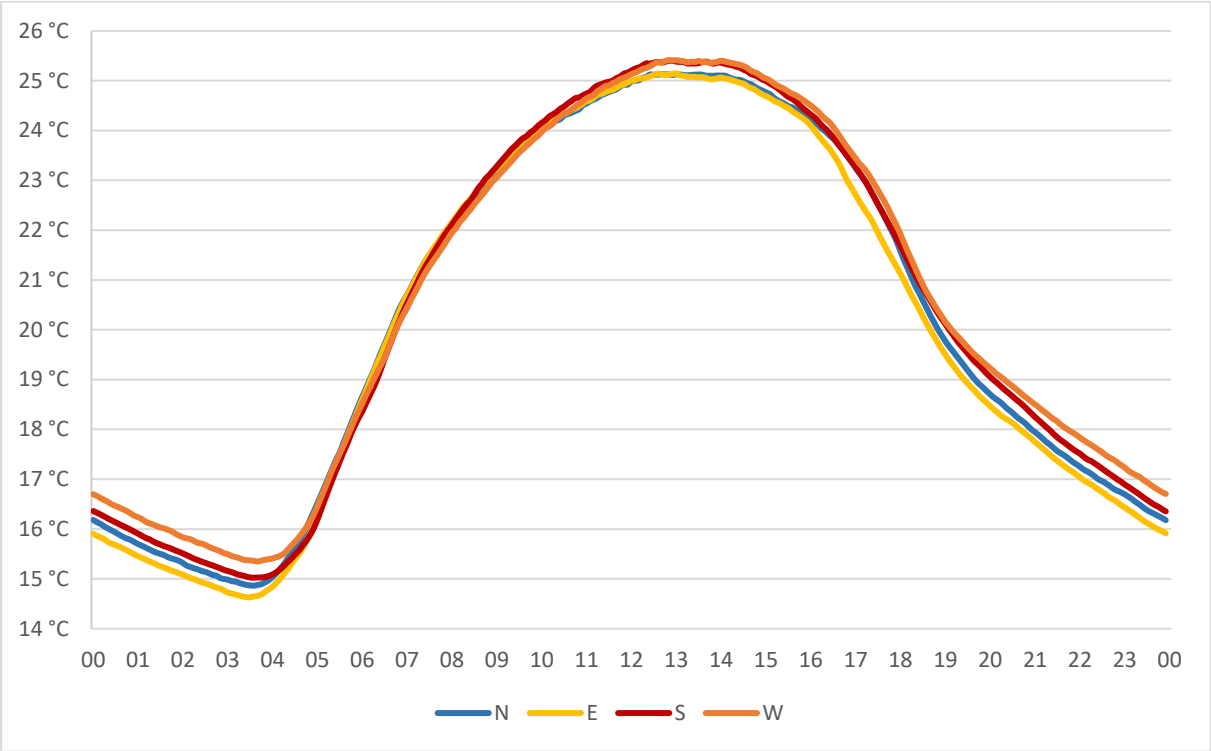


Abb. 66: Mittlere Tagesgänge (UTC) der Temperatur im Juli der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Neben dem Tagesgang ist auch der Jahresnormalwert von Interesse, der ebenfalls nach dem Parameter Exposition ausgewertet wurde. Das Ergebnis (Abb. 67) zeigt einen starken Zusammenhang mit der jeweiligen Exposition, wobei bei einzelnen Stationen wie bereits erwähnt andere Faktoren wie Seehöhe, Hanglage und Relief starke Auswirkungen haben können.

Die Jahresnormalwerte zeigen ein Bild, das aufgrund der Jahresgänge bereits abzusehen war und nur durch die Exposition nicht erklärbar ist. Unter den vier wärmsten Stationen befinden sich drei in West-Exposition und nur eine in Süd-Exposition, während zwei der südlich exponierten Stationen sogar niedrigere Werte als in vergleichbarer Seehöhe befindliche Stationen in Nord-Exposition haben. Eine grundsätzliche Tendenz lässt sich allerdings dennoch erkennen: bis auf ein paar Ausreißer sind die Werte der Stationen in Süd- bzw. West-Exposition am höchsten, während jene in Ost-Lage eine breite Streuung zeigen. Die Stationen in Nord-Exposition erreichen durchwegs kühlere Werte.

Eine Mittelung der Jahresnormalwerte ergibt, dass die Stationen in Nord- bzw. Ost-Exposition um rund 0,3 K kühlere Werte aufweisen als jene in Süd- bzw. West-Exposition.

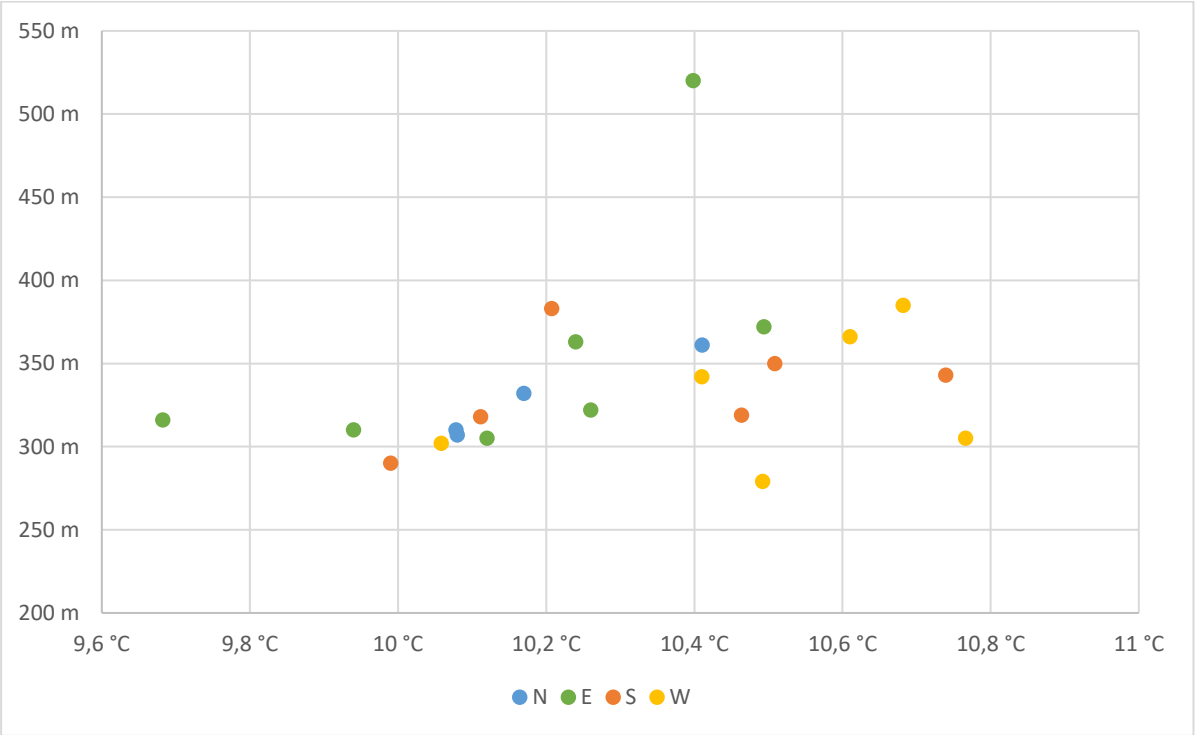


Abb. 67: Jahresnormalwerte der ausgewählten Stationen in Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Ebenfalls relevant sind mittlere tägliche Maxima (Sommer und Winter) sowie mittlere tägliche Minima (Winter), die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. Bei diesen sind größere Unterschiede und aussagekräftigere Ergebnisse als bei den Jahresnormalwerten zu erwarten. Die mittleren täglichen Minima im Sommer wurden nicht analysiert.

Bei den sommerlichen Maxima (Abb. 68) ist das Bild eindeutig: Die Stationen in Süd- bzw. West-Exposition weisen grundsätzlich die höchsten Werte auf. Es gibt aber auch Abweichungen, die durch die Seehöhe (Station 122) oder lokale, geländeklimatische Faktoren erklärbar sind. Als Mittelwert kommt im Vergleich der Ost- bzw. Nord- mit den Süd- bzw. West-exponierten Lagen, an denen jeweils beinahe identische Mittelwerte gemessen werden, ein Unterschied von 0,5 K heraus.

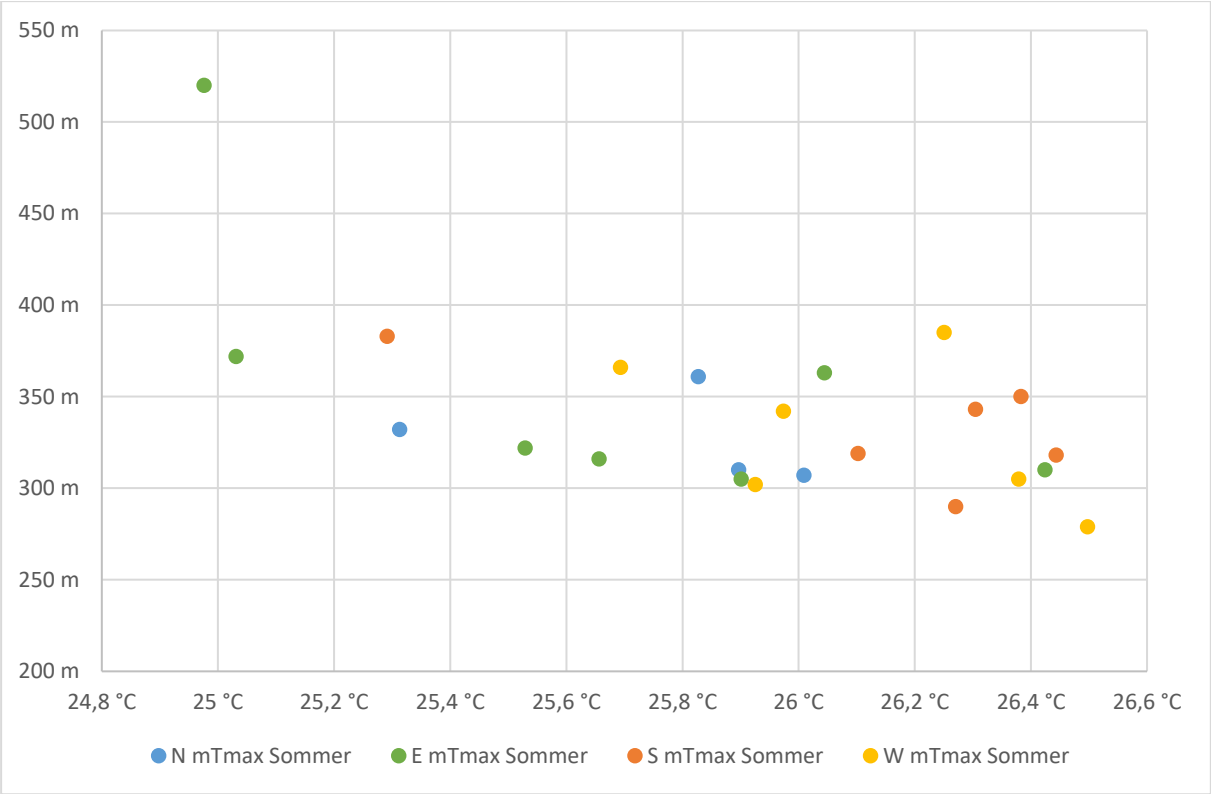


Abb. 68: Mittlere tägliche Maxima in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die nachfolgende Darstellung zeigt die mittleren täglichen Minima der Wintermonate Dezember, Jänner und Februar. Die Verteilung ist eher zufällig und es lassen sich keine aussagekräftigen Schlüsse ziehen. Eine Ausnahme stellt der Wert der Station 122 dar, der durch die größere Seehöhe bedingt (und die damit ausgeglicheneren bzw. begünstigten Bedingungen am Oberhang) das Maximum von -1,7 °C erreicht. Ansonsten gibt es bei jeder Exposition Werte in sämtlichen Bereichen des Spektrums. Der Grund dafür ist die bereits erwähnte schwache Sonneneinstrahlung im Winter. Die Stationen in West-Exposition sind laut der Auswertung begünstigt und erreichen durchschnittliche Minima, die rund 0,4 K über den anderen Lagen liegen. Dies ist aber rein mit der Exposition nicht erklärbar, weswegen als Ergebnis kein nennenswerter (expositionsbedingter) Unterschied bei den mittleren täglichen Minima zwischen den einzelnen Lagen festgestellt werden kann.

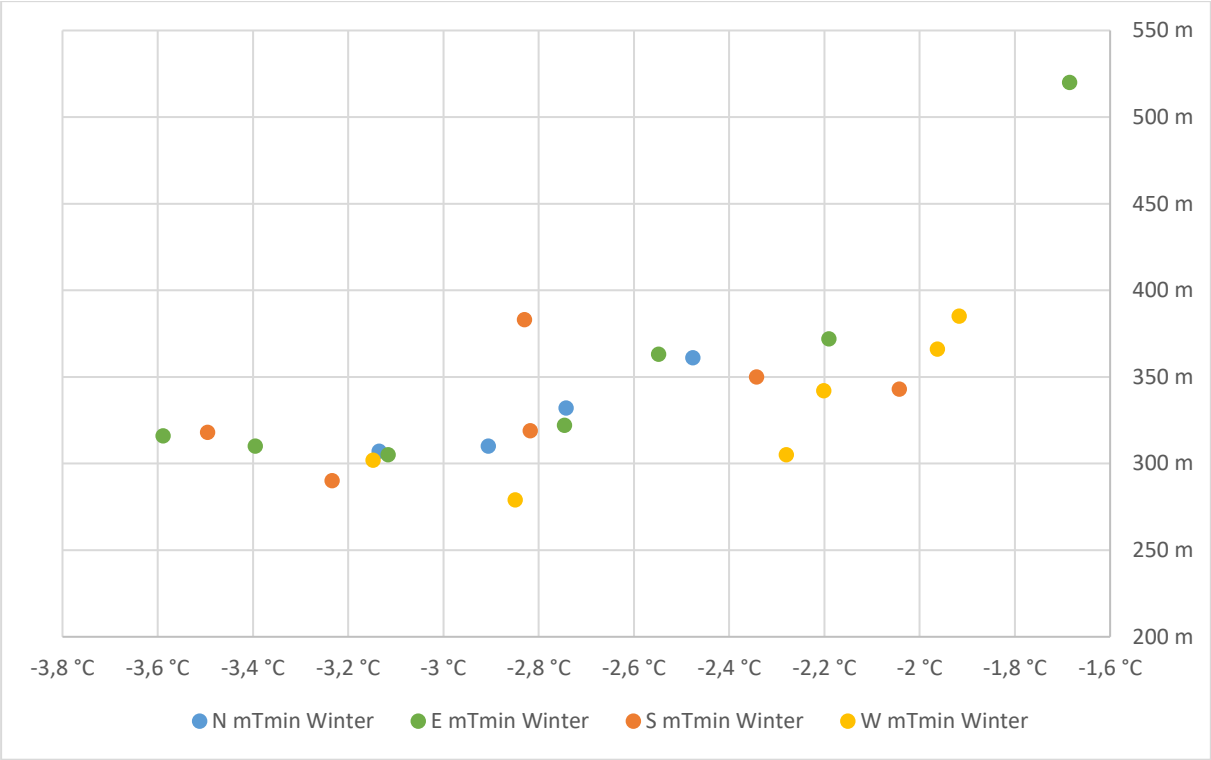


Abb. 69: Mittlere tägliche Minima in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Mehr Aussagekraft hat im Winter die Auswertung der mittleren täglichen Maxima, die in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Aufgrund der flach einfallenden Sonnenstrahlung ist ein deutlicher Unterschied zwischen Nord- und Süd-Exposition feststellbar, der nur von wenigen Ausreißern beeinträchtigt wird. Der Unterschied beträgt rund 0,7 K, wobei im Normalfall durchaus mit 1 K gerechnet werden darf. Denn im Gegensatz zu den vorangehenden Darstellungen, wo die West-exponierten Lagen durch geländeklimatische Faktoren begünstigt die höchsten Werte aufweisen, erreichen nun die Süd-exponierten Lagen erstmals die höchsten mittleren Maxima.

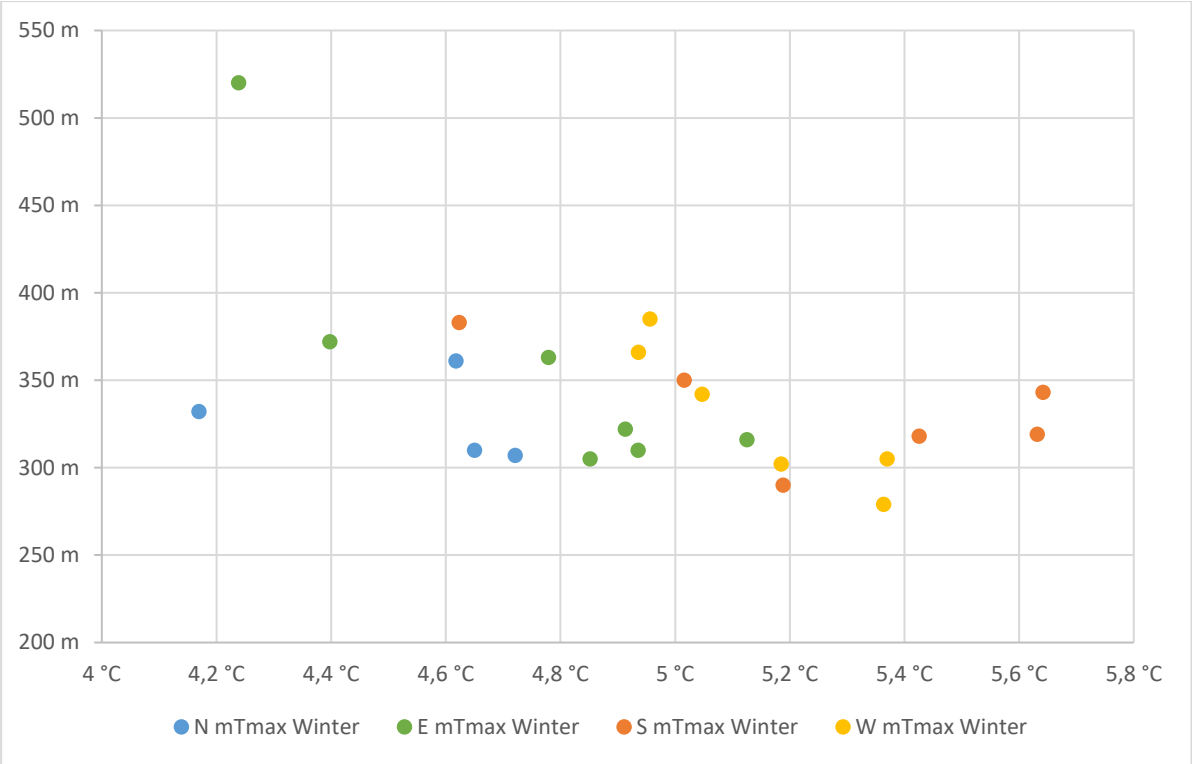


Abb. 70: Mittlere tägliche Maxima in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) der ausgewählten Stationen mit Nord-, Ost-, Süd- und West-Exposition im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.8.2 Hanglage

Als nächster Parameter wird der Einfluss der Hanglage auf die Lufttemperatur analysiert, und hier ergibt sich ein klareres Bild als bei der Exposition. Abb. 71 zeigt den durchschnittlichen Tagesverlauf der 6 unterschiedlichen Hanglagen, die natürlich auch mit der unterschiedlichen Seehöhe zusammenhängen. Die durchschnittlichen Werte nach Hanglage sind: Talboden 295 m, Hangfuß 313 m, Unterhang 323 m, Mittelhang 328 m, Oberhang 376 m, Kammlage 383 m.

Die Abstände sind also teilweise sehr gering, wobei die Kurven des Tagesgangs deutliche Unterschiede aufweisen. Der entscheidende Faktor dabei ist die Höhe der Lage über dem Talboden und damit geringere Beeinflussung durch winterliche Nebel- und Kaltluftsituationen, wie auch in Kap. 2.2 bereits beschrieben wurde.

Das Minimum wird einheitlich gegen 04 Uhr (UTC) in der Früh erreicht, wobei am Talboden und Hangfuß durchschnittlich 6 °C und in Kammlage rund 7,5 °C gemessen werden; der Unterschied beträgt also 1,5 K. Gegen 08 Uhr morgens herrscht praktisch eine Isothermie über sämtliche Hangbereiche, wonach sich durch die unterschiedlich starke tageszeitliche Erwärmung die nächtlichen Verhältnisse umkehren: Nun weisen die Kamm- sowie

Oberhanglage mit knapp 14,5 °C die niedrigsten, die Tal- und Unterhanglage mit knapp 15 °C die höchsten Werte auf; der Unterschied beträgt also nur 0,5 K. Gegen 17 Uhr herrscht wieder Isothermie über sämtliche Hangbereiche, wonach sich bei niedriger am Hang gelegenen Stationen kältere Temperaturen ausbilden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: je höher die Hanglage (und gleichzeitig die relative Höhe), desto ausgeglichener ist die Temperatur. Die Unterschiede zeigen dabei morgens und nachts deutlich höhere Werte als zu Mittag und am frühen Nachmittag.

Vor allem der große Abstand zwischen Talboden bzw. Hangfuß im Vergleich mit Unter- bzw. Mittelhang ist auffallend und hängt wohl mit den teilweise sehr niedrig ausgeprägten Kaltluft- und Bodennebelsituationen zusammen, die oft nur eine Höhe von 20-100 m erreichen (siehe auch Kap. 2.2).

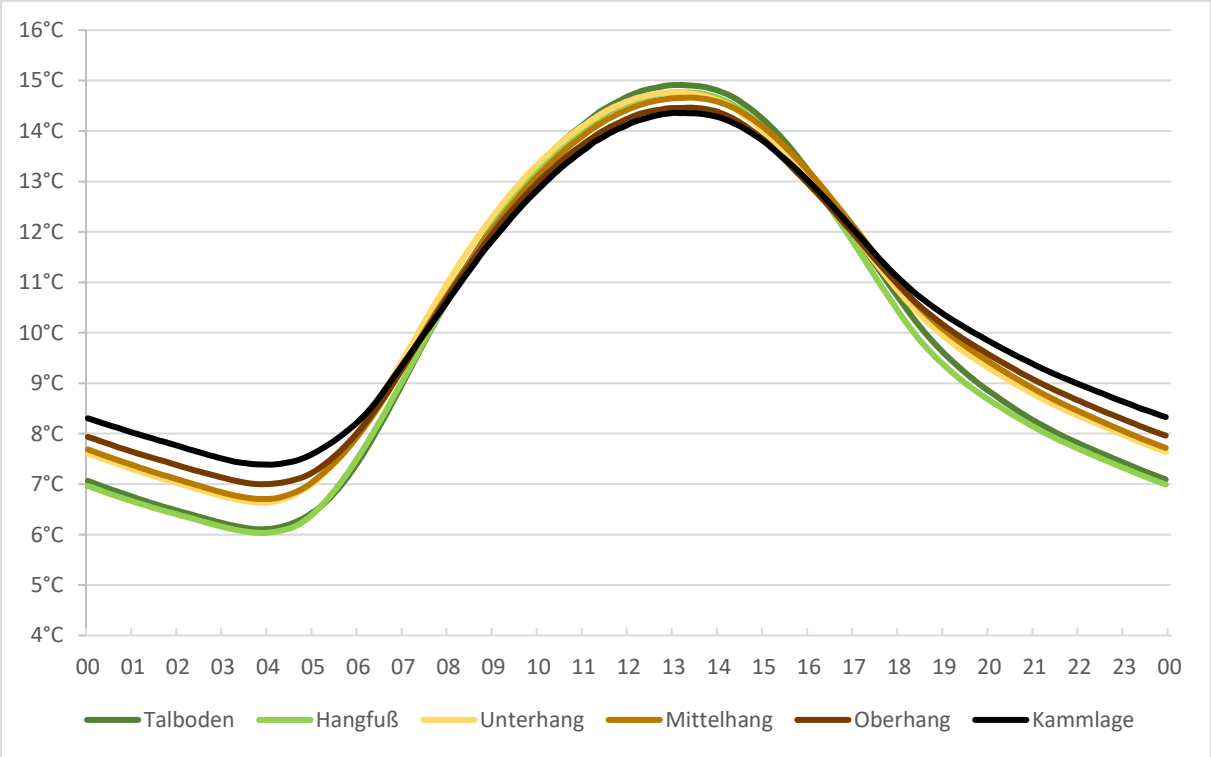


Abb. 71: Mittlere Tagesgänge (Zeiten in UTC) der Temperatur des Jahres der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang sowie Kammlage) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 72 zeigt den mittleren Tagesgang im Jänner, wobei wie in der vorangehenden Darstellung zur besseren Vergleichbarkeit die y-Achse 12 K umfasst. Der Tagesgang im Jänner ist deutlich ausgeglichener als im Jahresdurchschnitt. Das Minimum um 07 Uhr erreichen die

Stationen am Talboden und Hangfuß mit -2,5 °C und sind damit um etwa 1 K kälter als jene in Kammlage. Gegen 11 Uhr herrscht beinahe Isothermie, danach sind bis zur wärmsten Tageszeit um 13 Uhr die unteren Hanglagen etwas milder. Der Unterschied beträgt nur ein paar Zehntel Grad, und schon gegen 15 Uhr sind die Werte wieder sehr einheitlich; danach sind die höheren Hanglagen wieder wärmer als die niedrigeren.

Diese Darstellung zeigt die Auswirkung der Kaltluftprozesse (in der Nacht) sowie jene des Bodennebels, die insgesamt die höheren Hanglagen im Winter deutlich bevorzugen. Die durchschnittlichen Temperaturen liegen demnach in Kammlage etwa 0,5 K über jenen in Tallage. Auch Unter- und Mittelhanglagen sind bereits bevorzugt, da die vorher genannten Prozesse oft nur eine geringe Mächtigkeit haben.

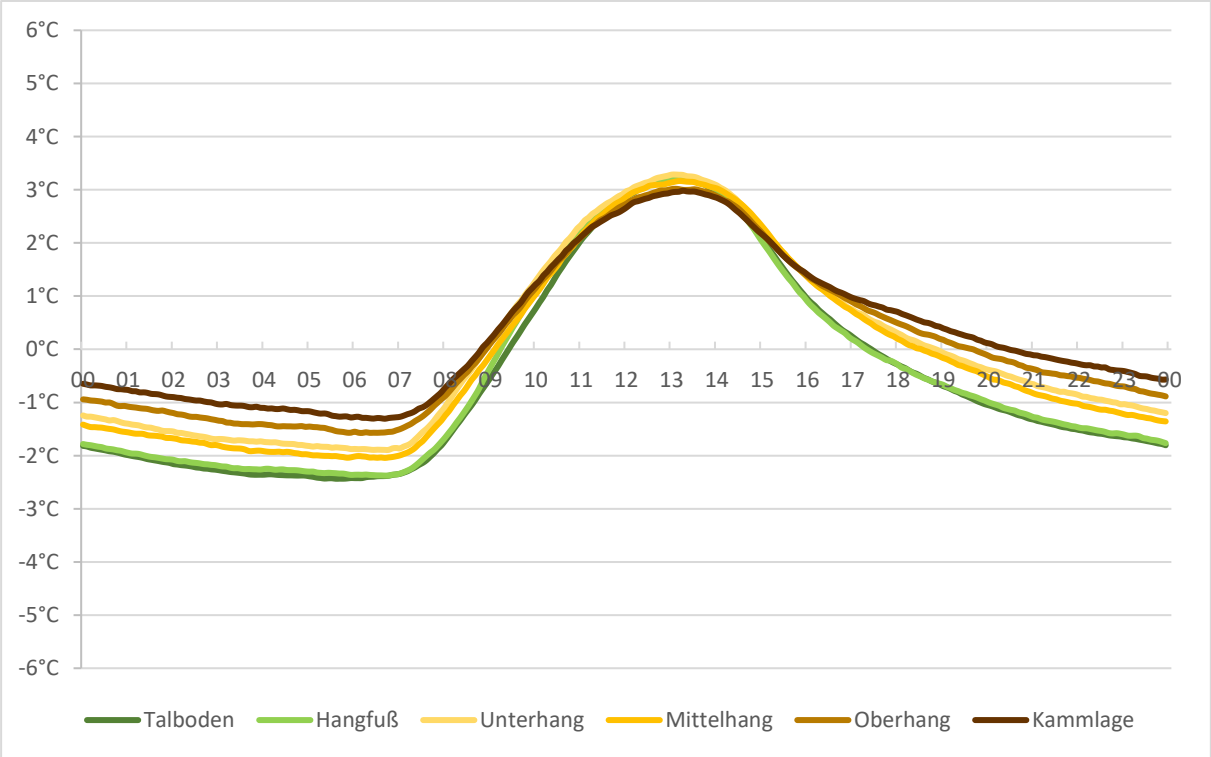


Abb. 72: Mittlere Tagesgänge (in UTC) der Temperatur im Jänner der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang sowie Kammlage) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 73 zeigt die Verhältnisse im Juli, die der Darstellung der Jahresverhältnisse sehr ähnlich sind. Die y-Achse umfasst wiederum 12 K als Spannweite. Das Minimum wird mit knapp 14,5 °C schon vor 04 Uhr (UTC) bei Tal- und Hangfußlagen erreicht, die Temperaturen in Kammlage sinken auf 16 °C ab. Dies ergibt einen Unterschied von 1,5 K. Schon nach 06 Uhr tritt praktisch eine Isothermie sämtlicher Stationen ein, bis dann die niedrigeren Hanglagen

wärmer werden. Das Maximum von 25,5 °C wird zwischen 13 und 14 Uhr erreicht, das Maximum der Kammlagen beträgt 25 °C; dies ergibt einen Unterschied von 0,5 K. Gegen 17 Uhr herrscht wiederum Isothermie, bis die niedrigen Hanglagen wieder kälter als die höheren werden.

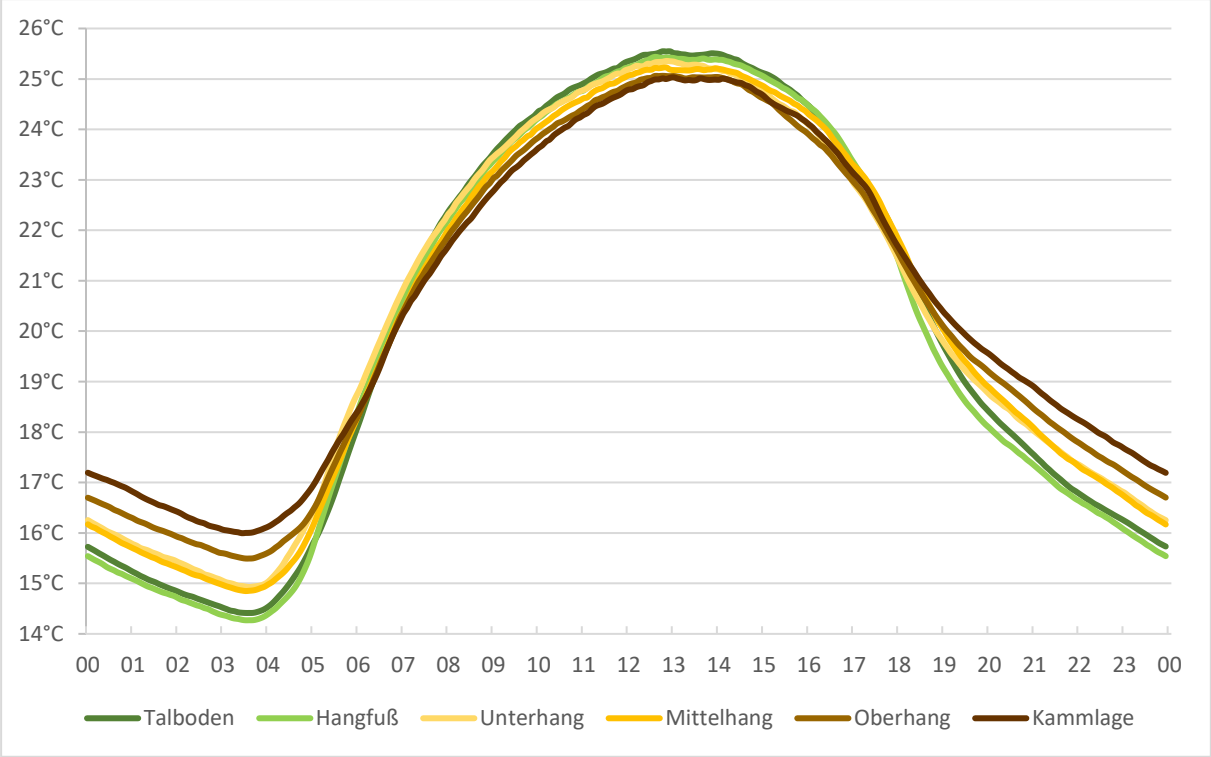


Abb. 73: Mittlere Tagesgänge (in UTC) der Temperatur im Juli der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. (Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die Mittelwerte nach unterschiedlichen Zeiträumen in Abhängigkeit von der Seehöhe. Dadurch können die tatsächlichen Auswirkungen der Hanglagen noch besser interpretiert werden, da grundsätzlich Stationen auf gleicher Seehöhe ähnliche Werte aufweisen sollten. Unterschiede deuten also auf Auswirkungen der Hanglagen hin, können aber natürlich auch auf reliefbedingte Faktoren oder die Exposition zurückzuführen sein

Die wärmsten Bedingungen im Jahresdurchschnitt herrschen fast durchwegs am Mittel- oder Oberhang bzw. in Kammlage vor, was nach den vorangehenden Auswertungen zu erwarten war. Auch am Unterhang gibt es geländebedingt hohe Mittelwerte, die nur durch die Hanglage oder Seehöhe nicht erklärbar wären. Talboden und Hangfuß sind fast durchwegs am kühlsten.

Der durchschnittliche Unterschied zwischen Tal- bzw. Hangfußlage und der Kammlage beträgt rund 0,5 K.

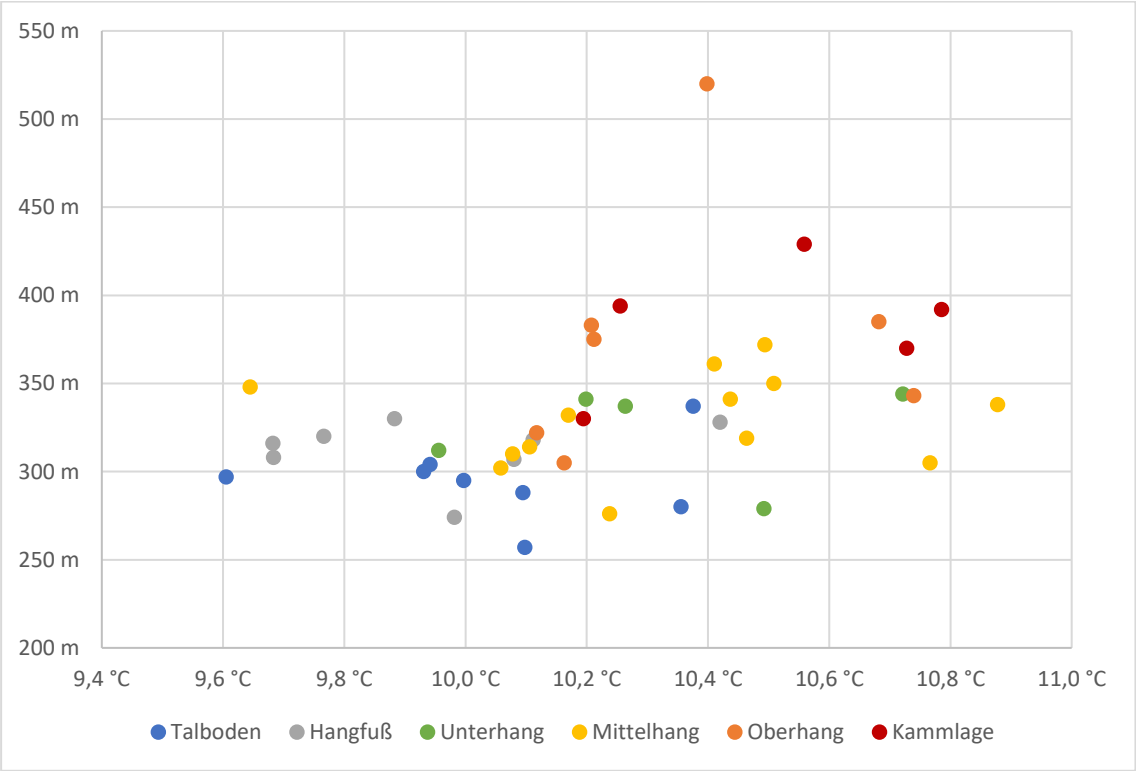


Abb. 74: Jahresnormalwerte der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Nachfolgend werden die mittleren täglichen Maxima des Sommers (Juni, Juli und August) im Zeitraum von 2007-2011 analysiert. Die niedrigsten Mitteltemperaturen werden in Kammlage sowie an Ober- und Mittelhang erreicht, während beispielsweise in Tallage durchwegs höhere Maxima erreicht werden. Es gibt auch in diesem Fall Ausnahmen, da beispielsweise eine Station am Mittelhang auf einer Seehöhe von nur 280 m liegt und dort dadurch extrem hohe Maxima mit durchschnittlich über 27 °C erreicht werden. Der durchschnittliche Unterschied zwischen Tal- und Kammstation beträgt rund 0,5 K.

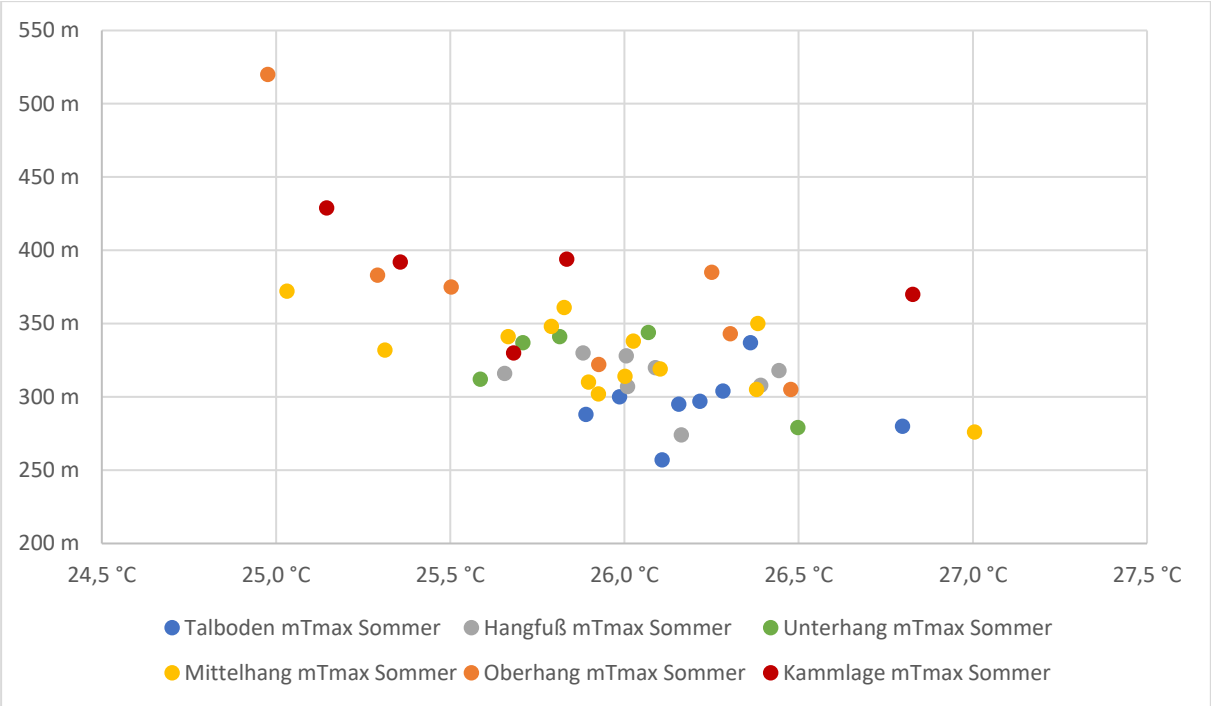


Abb. 75: Mittlere tägliche Maxima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Sommer (Juni, Juli und August) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen täglichen Minima derselben Stationen im Winter des Zeitraums 2007-2011. Bei den Minima zeigt sich ebenfalls ein sehr deutliches Bild, das wiederum die Stationen in Kamm- bzw. Ober- und Mittelhanglage begünstigt zeigt. Der Talboden und Hangfuß weisen die tiefsten durchschnittlichen Minima auf. Der Unterschied zwischen Tal- bzw. Hangfußlage sowie Kammlage ist bei dieser Auswertung mit 1-1,5 K sehr deutlich. Diese sind mit Begünstigung der Hänge bzgl. der Kaltluftprozesse bzw. dem Talnebel gut erklärbar. Auch die Reichweite der Minima von -4,2 bis -1,6 °C ist auffallend hoch und zeigt, dass die Temperaturgunst am Hang im Winter am deutlichsten in Erscheinung tritt.

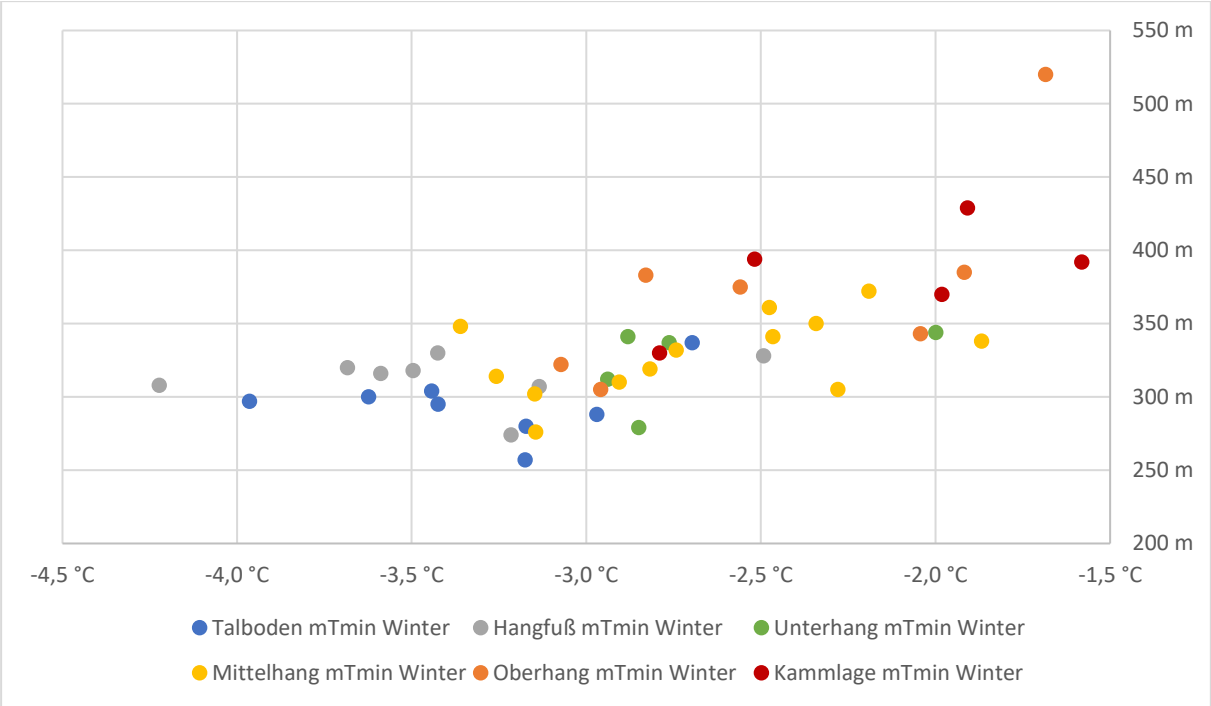


Abb. 76: Mittlere tägliche Minima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Winter (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die nächste Abbildung zeigt die mittleren täglichen Maxima während der Wintermonate im Zeitraum von 2007-2011. Im Gegensatz zu den mittleren täglichen Minima im Winter gibt es bei den Maxima kaum klare Erkenntnisse. Vor allem ab dem Mittelhang aufwärts sind die Werte über das ganze Spektrum verteilt, während sich Talboden bzw. Hangfuß bis auf wenige Ausnahmen im mittleren Temperaturbereich bewegen. Daraus können dennoch wichtige Erkenntnisse gewonnen werden: vermutlich lösen sich störende Talnebelsituationen im Tagesverlauf meist schnell auf, sodass sich die mittleren täglichen Maxima der Talbereiche ähnlich jener der höheren Hanglagen verhalten. Sämtliche Mittelwerte bewegen sich um 5 °C, es ist bei den mittleren täglichen Maxima kaum ein Unterschied zwischen den einzelnen Hanglagen auszumachen. Dies war nach der Darstellung des Tagesgangs im Jänner absehbar (Abb. 72).

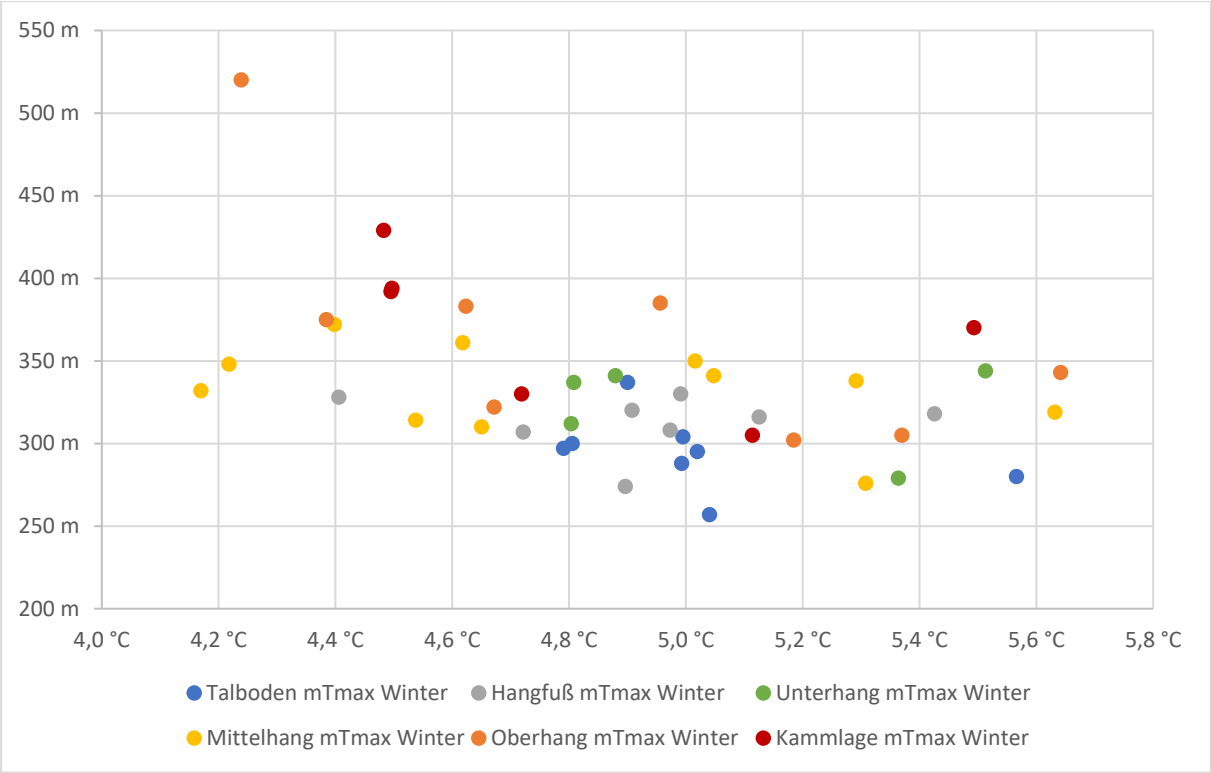


Abb. 77: Mittlere tägliche Maxima der Temperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglagen (Talboden, Hangfuß, Unter-, Mittel- und Oberhang und Kammlage) im Winter (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.8.3 Seehöhe

Hinsichtlich der Seehöhe gibt es das bereits mehrfach erwähnte Problem, dass sich aufgrund des Reliefs sämtliche Stationen innerhalb eines sehr engen Höhenbereichs befinden. Für die Auswertung wurden die Stationen nun in Höhenbereiche von 50 m eingeteilt: 250-299 m (8 Stationen), 300-349 m (27), 350-399 m (9), 400-449 m (1), 450-499 m (0) sowie 500-549 m (1). Die Stufen 400-449 m und 500-549 m werden mit einer dünneren Linie dargestellt, da diese Werte nur von jeweils einer einzigen Station stammen und somit wissenschaftlich nur wenig Aussagekraft besitzen; die Zone von 450-499 m wird gar nicht dargestellt, da sich in diesem Bereich keine Messstation befindet.

Die Abb. 78 zeigt die gemittelten Tagesgänge der Temperatur dieser Höhenstufen, und es werden ähnliche Ergebnisse wie bei der Hanglage erzielt; allerdings ist die Verteilung noch deutlich einheitlicher. Das Minimum wird in der tiefsten Zone (250-299 m) mit 6 °C gegen 04 Uhr morgens (UTC) erreicht, das Maximum liegt in der höchsten Zone (500-549 m) mit gut 8 °C. Gegen 09 Uhr morgens herrscht Isothermie über sämtliche Höhenbereiche, danach erreichen die tieferen Lagen höhere Werte. Das niedrigste Maximum liegt gegen 13 Uhr bei

13,5 °C (500-549 m), das höchste weist die Zone von 250-299 m mit 15 °C auf. Ab 17 Uhr ist es in der Zone von 350-400 m am wärmsten, wonach es ab 21:00 Uhr wiederum in den am höchsten gelegenen Bereichen am mildesten ist.

Hinsichtlich der Schwankungsbreite innerhalb einer Höhenschicht kann man festhalten, dass diese in den niedrigeren Zonen höher ist, als in den darüber liegenden. Die Stationen in der niedrigsten Zone weisen also untereinander größere Unterschiede auf, als dies darüber der Fall ist. Der Grund dafür liegt vor allem in der unterschiedlichen Ausprägung von Kaltluftprozessen, die vor allem im Tal verstärkt auftreten können. Der Unterschied der Durchschnittstemperaturen beträgt innerhalb der Zone von 250-299 m Seehöhe knapp 1 K, innnerhalb der Zone von 350-399 (mit vergleichbar vielen Stationen) nur knapp 0,5 K.

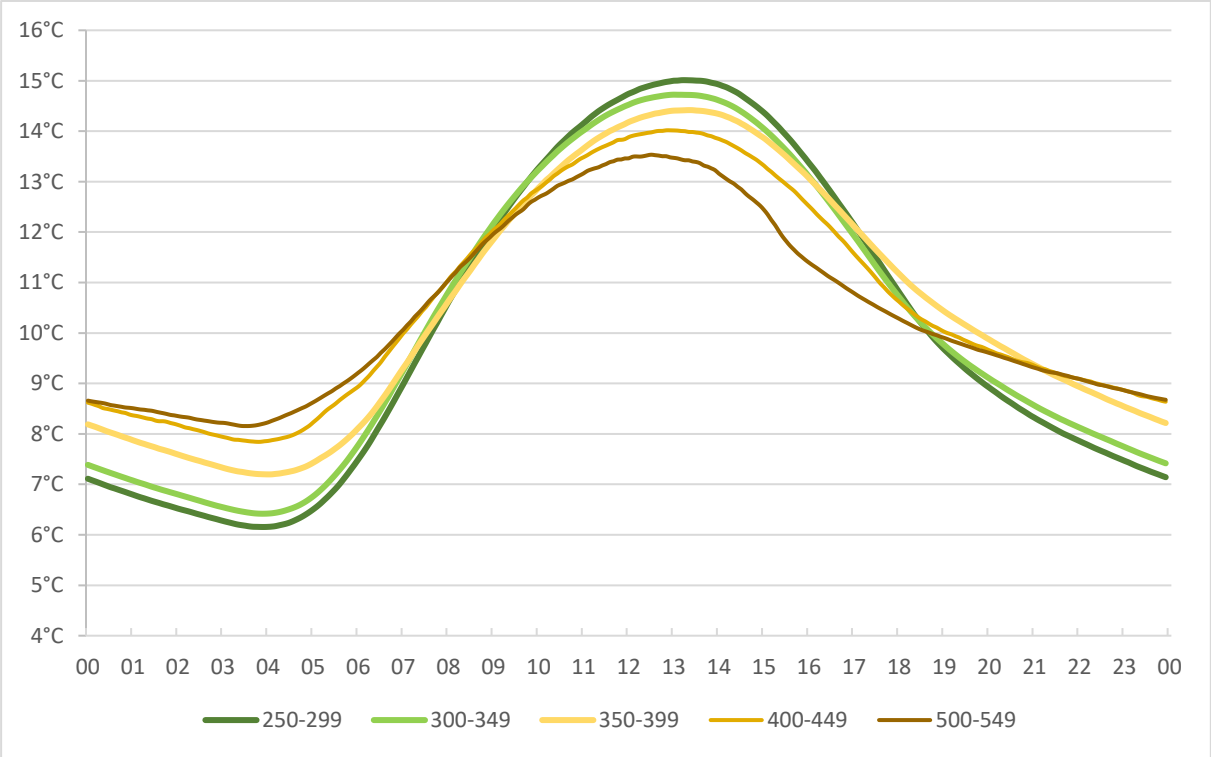


Abb. 78: Mittlere Tagesgänge (in UTC) der Temperatur im Jahresdurchschnitt der ausgewählten Stationen in unterschiedlichen Höhenbereichen im Zeitraum der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 79 zeigt den Kurvenverlauf im Jänner, wobei für eine bessere Vergleichbarkeit die y-Achse wieder in dieselben Bereiche wie bei den anderen Darstellungen gegliedert wurde. Das Minimum von -2,3 °C wird knapp vor 07 Uhr von den tiefsten Zonen erreicht, die höchste Zone erreicht zu dieser Zeit -0,6 °C. Zwischen 10 und 11 Uhr drehen sich die Verhältnisse um, das Maximum von 3,2 °C wird von den tiefsten Zonen nach 13 Uhr erreicht; jenes der höchsten

Zone liegt zu Mittag bei 2,3 °C. Knapp nach 15 Uhr werden die beiden tiefsten Zonen wieder kühler als die darüber liegenden. Allgemein lässt sich wiederum ein sehr ausgeglichener Tagesgang mit einer Amplitude von nur 5,5 K in den Talbereichen und 2,5 K bei den Kammlagen feststellen.

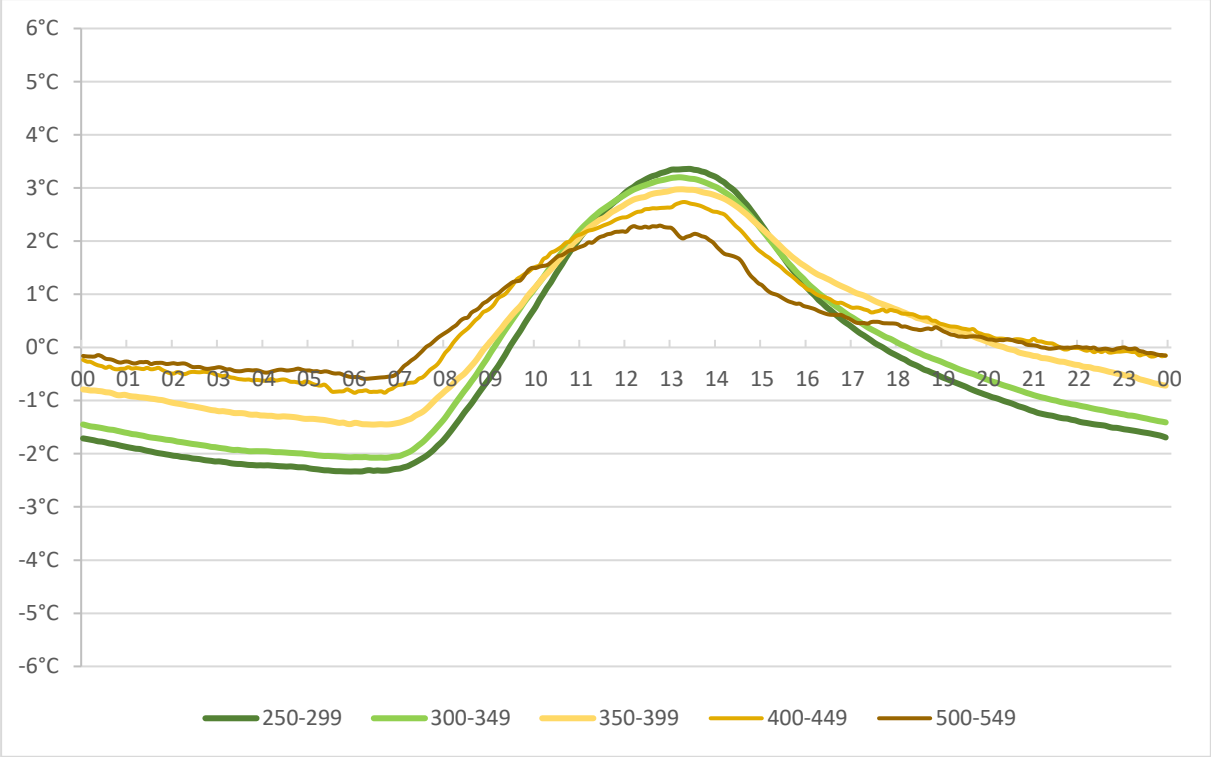


Abb. 79: Mittlere Tagesgänge (in UTC) im Durchschnitt des Jänners der ausgewählten Stationen nach unterschiedlichen Höhenbereichen im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Im Juli (Abb. 80) sind die Verhältnisse sehr ähnlich wie in den vorhergehenden Zeiträumen. Das niedrigste Minimum von 14,5 °C wird knapp vor 04 Uhr (UTC) in den tiefsten Zonen erreicht, die Werte der höchsten Zonen liegen zu diesem Zeitpunkt bei 17 °C. Gegen 07 Uhr herrscht Isothermie, wonach die tieferen wieder wärmer als die höheren Zonen werden. Das Maximum von 25,6 °C wird in der tiefsten Zone nach 13 Uhr erreicht; das niedrigste Maximum liegt zu dieser Zeit bei 24,4 °C und wird in der höchsten Zone erreicht. Die Verhältnisse kehren sich dann wieder nach 18 Uhr um.

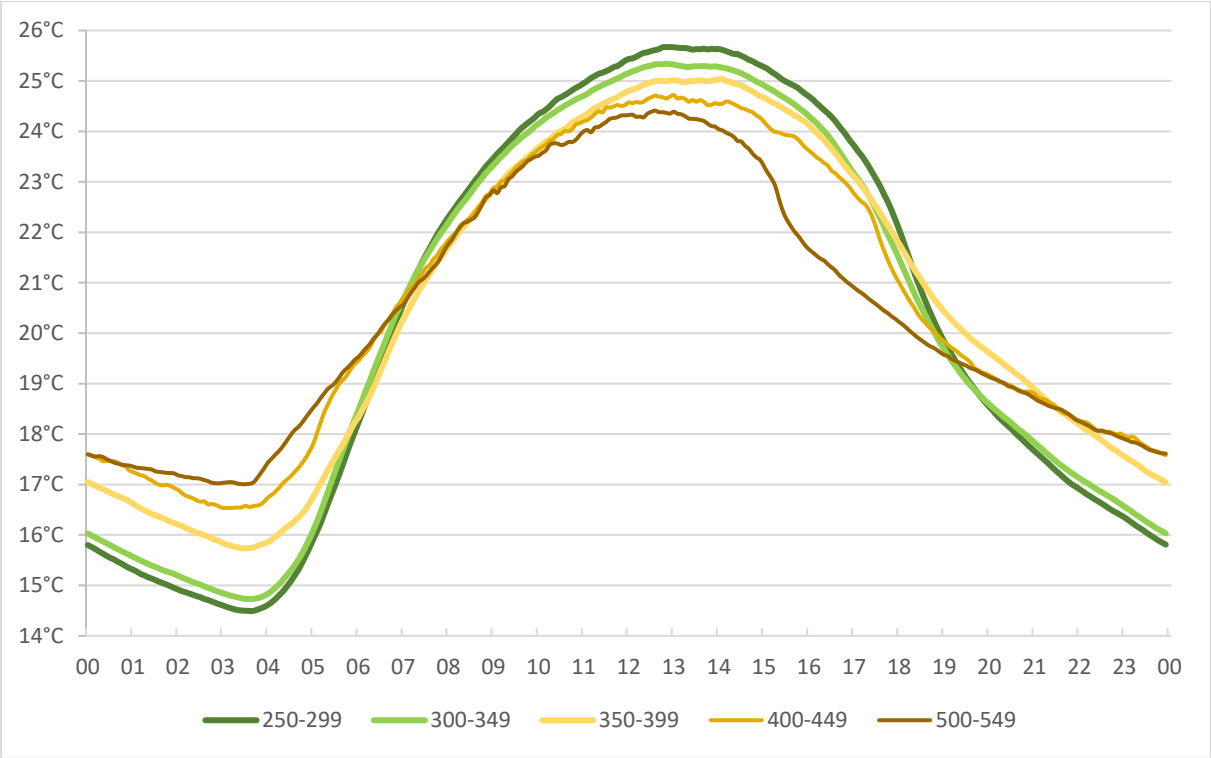


Abb. 80: Mittlere Tagesgänge (in UTC) der Temperatur im Juli der ausgewählten Stationen nach unterschiedlichen Höhenbereichen im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die folgende Abb. 81 zeigt die Auswertung der durchschnittlichen mittleren täglichen Minima und Maxima in den Winter- und Sommermonaten. Die Abnahme der durchschnittlichen täglichen Minima der Temperatur mit der Seehöhe ist in beiden Jahreszeiten offensichtlich und weist Bestimmtheitsgrade über 0,4 auf. Die durchschnittlichen täglichen Maxima sowie mittleren Temperaturen weisen in dieser Hinsicht deutlich geringere Bestimmtheitsmaße auf, wobei bei den Maxima dennoch eine leicht signifikante Abnahme mit zunehmender Höhe zu erkennen ist. Ein theoretischer Vergleich der Stationen um 280 m mit jenen um 380 m Seehöhe ergibt einen Temperaturgradienten von +1 K/hm im Falle der mTmin im Winter sowie -1 K/hm bei den mTmax im Sommer. Ab 400 m Seehöhe scheinen die Werte dann zu stagnieren, wobei dies durch die sehr geringe Anzahl an Stationen in diesem Höhenbereich nur schwer zu belegen ist.

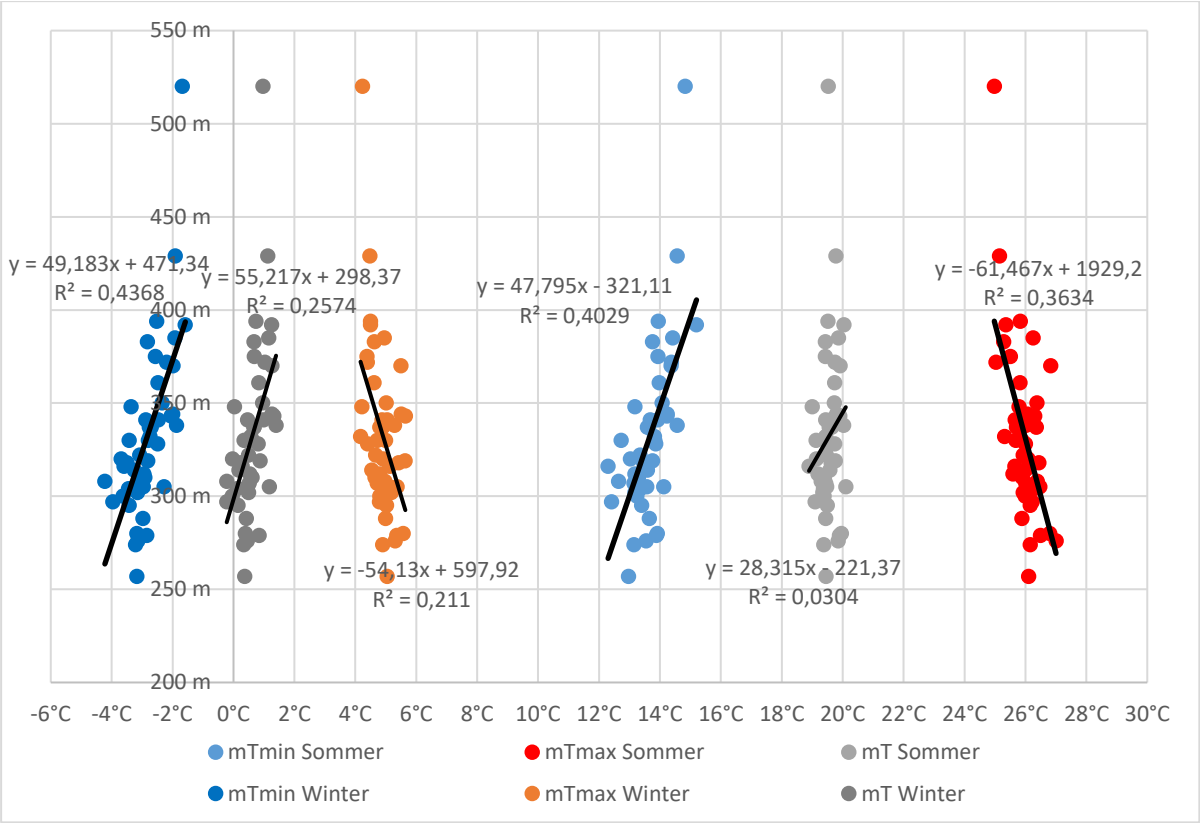


Abb. 81: Die mittleren täglichen Minima (mTmin in blau) und Maxima (mTmax in orange) sowie die mittleren täglichen Temperaturen in den Sommer- (Juni, Juli, August) und Wintermonaten (Dezember, Jänner, Februar) der Lufttemperatur in [°C] für die Periode 2007-2011 der ausgewerteten Stationen nach Seehöhe in [m]. R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.8.4 Tallage

Mit Tallage ist in diesem Fall gemeint, an welcher Stelle des Tales sich eine Station befindet. Man unterscheidet Talschluss, Talmitte und Talausgang, wobei die Verteilung der Stationen nicht gleichmäßig ist: so gibt es drei Stationen am Talschluss, 17 in der Talmitte und sieben am Talausgang. Die übrigen Stationen sind entweder nicht zuzuordnen oder befinden sich in Oberhang- oder Kammlage, welche nicht berücksichtigt werden. Auch die Seehöhe spielt eine Rolle: Die Stationen des Talausgangs liegen im Mittel auf 276 m, jene der Talmitte auf 317 m und die des Talschlusses auf 342 m Seehöhe.

Dieser Umstand macht umfassende Analysen nach dem Parameter Tallage auch sinnlos, da die Seehöhe bzw. andere Faktoren wie Entfernung zu größeren Tälern deutlich wichtiger sind, als jener der Tallage. Es wird daher nur eine Auswertung durchgeführt, die sich erwartungsgemäß sehr ähnlich jenen der Seehöhe in Kap. 6.8.3 gestaltet.

Aufgrund der unterschiedlichen Höhen war davon auszugehen, dass sich dieser Faktor auch stark auf die Kurven des Tagesmittels auswirkt (Abb. 82). Die Verhältnisse am Talausgang sind in der Nacht um etwa 0,5 K kälter als jene des Talschlusses, tagsüber drehen sie sich um. Anders ist die Situation bei den Stationen in Talmitte, die aus der Reihe fallen. Diese sind in der Nacht sogar noch etwas kälter als jene des Talausgangs, und erreichen tagsüber auch nur geringfügig höhere Werte als jene des Talschlusses. Dieser Umstand dürfte ein Hinweis auf die geländeklimatischen Charakteristika der einzelnen Stationen bzw. auf die geringe Stationsdichte beim Talschluss sein, und nicht direkt mit der Lage im Tal zusammenhängen. Der Faktor Tallage kann also hinsichtlich des deutlich stärker ausgeprägten Faktors Seehöhe vernachlässigt werden.

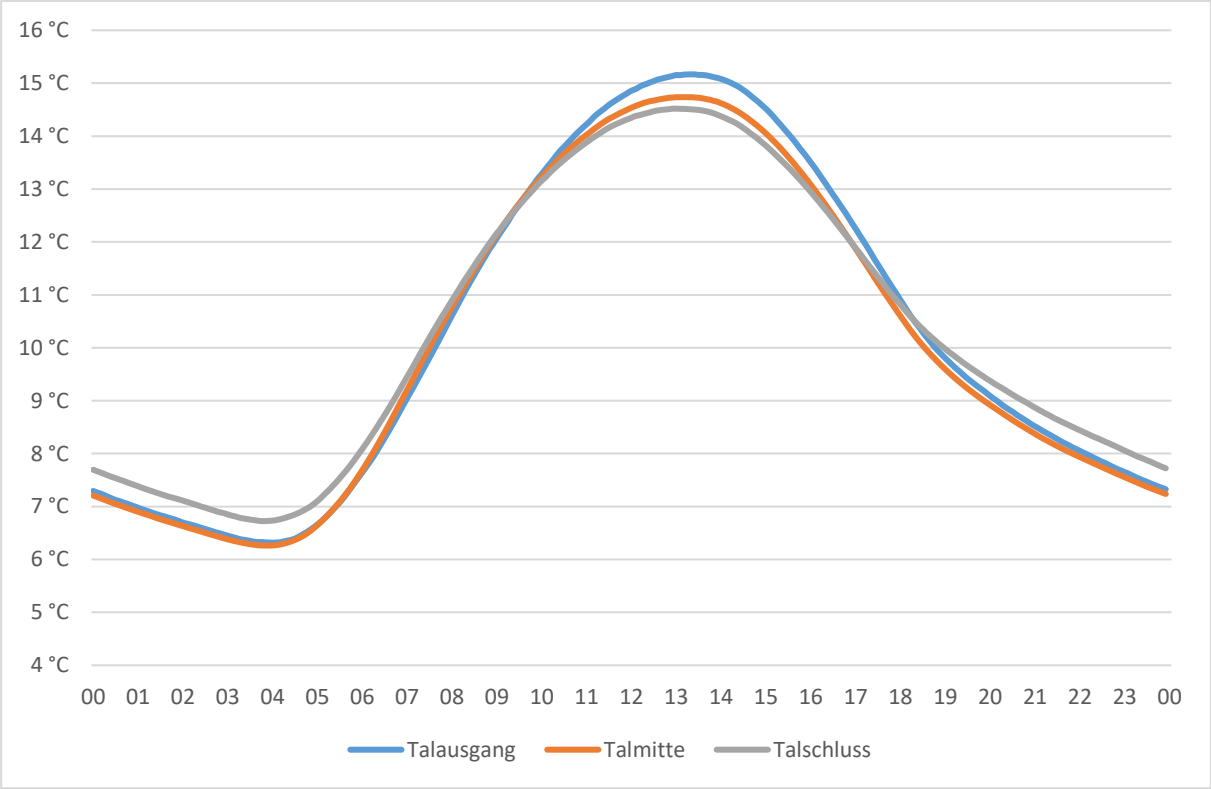


Abb. 82: Mittlere Tagesgänge (in UTC) der Temperatur im Jahresdurchschnitt der ausgewählten Stationen nach Tallage (Talausgang, Talmitte und Talschluss) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

6.9 Geländeklimatische Parameter nach Nivellierung der Seehöhe

Dieses Kapitel beschreibt den Versuch, den tatsächlichen Einfluss der geländeklimatischen Parameter Seehöhe, Exposition und Hanglage zu quantifizieren. Um das zu erreichen, muss vor allem die Seehöhe als wichtigster der die Temperatur beeinflussenden Faktoren bestmöglich eliminiert werden.

6.9.1 Methodik

Laut Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 66 ff.) sind für die Lufttemperatur folgende Faktoren in absteigender Bedeutung maßgeblich:

1) Die Seehöhe
2) Gelände
3) Alpeninneres - Alpenrand
4) Geographische Breite
5) Luftmasse
6) Stau und Föhn
7) Weitere Faktoren wie Exposition und Eigenschaften des Untergrundes

Die Seehöhe ist also der wichtigste Faktor, den es zu beseitigen gilt wenn man die anderen Faktoren analysieren möchte. Das Gelände umfasst die Reliefgestaltung, wobei vor allem die Bildung von Kaltluftabflüssen und –seen von großer Bedeutung sind; hier fällt vor allem der Faktor Hanglage meiner Auswertung hinein. Die Punkte 3-6 werden vernachlässigt, da sie aufgrund der Gestaltung und geringen räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes keine nennenswerten Unterschiede bringen. Die Exposition (Punkt 7) ist jedenfalls interessant, spielt aber gegenüber den anderen geländeklimatischen Parametern in ihrer Wichtigkeit laut dieser Auflistung nur eine sehr untergeordnete Rolle. Das Kap. 6.8.1 hat jedoch bereits gezeigt, dass die Auswirkungen unterschiedlicher Expositionen durchaus beachtenswert sein können.

Um eine Quantifizierung der Faktoren Gelände und Exposition möglich zu machen, ist es unerlässlich, den Einfluss der Seehöhe durch Nivellierung bestmöglich auszublenden.

Das Ziel dieser Analysen und Auswertemethoden ist es, die tatsächlichen Auswirkungen der Parameter Seehöhe, Hanglage und Exposition bestmöglich zu erarbeiten. Durch die Nivellierung der Seehöhe können die Stationen miteinander verglichen werden, ohne den Einfluss des stärksten, die Lufttemperatur beeinflussenden Parameters. Natürlich bleiben

noch viele andere Faktoren übrig, die Einfluss auf die jeweilige Temperatur vor Ort haben; dennoch sollte durch diese Analysemethode ein aussagekräftiges Ergebnis zu den fraglichen Parametern möglich sein. Die Tallage wird nicht behandelt. Wie in Kap. 6.8.4 bereits erwähnt, wird der Parameter Tallage fast gänzlich von anderen Faktoren wie Seehöhe und Hanglage überdeckt und hat somit kaum Aussagekraft.

Nachfolgend werden der Jahresnormalwert sowie mittlere tägliche Maxima und Minima durch die Nivellierung der Seehöhe herausgearbeitet. Die Vorgehensweise ist bei beiden Faktoren unterschiedlich und wird nachfolgend beschrieben.

a) Jahresnormalwert

Beim Jahresnormalwert wird der im Digitalen Atlas der Steiermark für diese Region festgesetzte Temperaturgradient mit einer Änderung von -0,32 K/hm nach oben verwendet (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 67). Damit werden alle Jahresnormalwerte der Stationen auf das Höhenniveau der niedrigsten Station im Untersuchungsraum (257 m Seehöhe) gebracht.

Die Auswertungen in Kap. 6.1 weisen auf andere vertikale Temperaturgradienten im Untersuchungsraum hin, worauf auch in Kap 6.12 ausführlich eingegangen wird. Die sehr allgemeine Modellannahme des Digitalen Atlas der Steiermark hat in diesem Gebiet eine Schwachstelle, da die Besonderheit der steigenden Temperatur mit der Seehöhe nicht berücksichtigt wird. Die diesbezüglichen Auswertungen und Analysen haben somit eher statistischen Wert.

b) Mittlere tägliche Maxima und Minima

Im Fall der mittleren täglichen Maxima und Minima musste eine andere Lösung als beim Jahresnormalwert gefunden werden, da der Temperaturgradient aus dem Digitalen Atlas nur für Jahresnormalwerte bestimmt ist. Die beste Möglichkeit besteht darin, das bestehende Datenmaterial aus dem Untersuchungsgebiet heranzuziehen und daraus einen geeigneten Gradienten zu generieren. Dafür werden fünf Stationen in einer Seehöhe um 280 m und fünf um 380 m herangezogen, da in diesen Höhenbereichen die Stationsdichte am höchsten ist. Aus diesen Mittelwerten wird als Ergebnis ein Temperaturgradient von 1 K/hm festgelegt (siehe Kap. 6.1). Zufällig stimmt dieser Gradient für beide Auswertungen, also für die mittleren täglichen Maxima im Sommer (Abnahme nach oben) sowie Minima im Winter (Zunahme nach oben). Für die Stationen unterhalb von 280 m werden die Werte ebenfalls mittels dieses Gradienten bearbeitet, da die Messwerte plausibel erscheinen. Die Werte der Stationen über 380 m scheinen hingegen nach oben bis zur höchsten Station auf 520 m zu stagnieren, wodurch für diese auch ein stagnierender Gradient von 0 K/hm festgelegt wird. Bei diesen Stationen wird also einfach das Maximum von 1 K hinzugerechnet bzw. abgezogen.

Durch diese beiden Methoden kommen unterschiedliche Ergebnisse heraus, die auch getrennt voneinander zu behandeln sind.

6.9.2 Jahresmitteltemperaturen

Die folgende Abb. 83 zeigt die Jahresmitteltemperaturen der untersuchten Stationen im direkten Vergleich mit denselben nach Nivellierung der Seehöhe auf das Niveau der niedrigsten Station (257 m Seehöhe). Dabei wird mit -0,32 K/hm jener Temperaturgradient herangezogen, der im Digitalen Atlas der Steiermark für diese Region festgelegt ist (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 67). Diese Abnahme mit zunehmender Seehöhe stimmt nicht mit den Auswertungen aus den Kap. 6.1 und 6.12, weshalb die folgenden Diagramme und Analysen eher statistischen Wert haben.

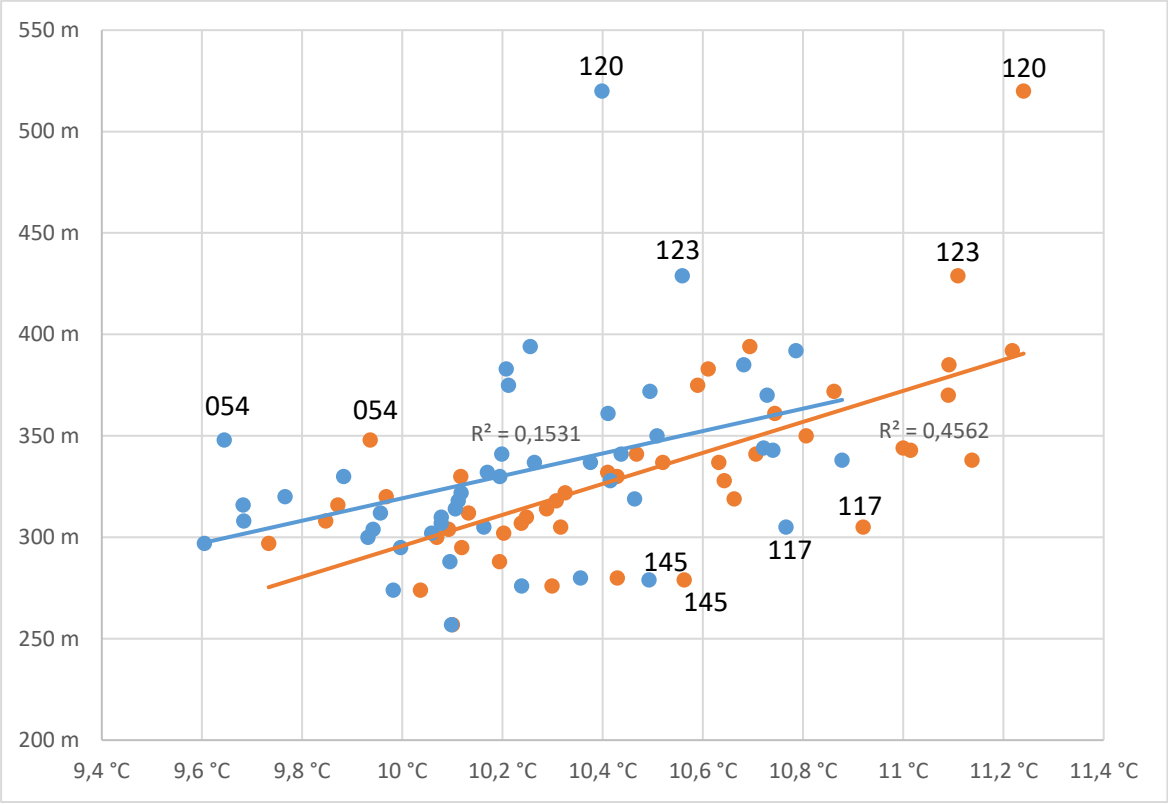


Abb. 83: Jahresmitteltemperaturen der ausgewählten Stationen in unterschiedlichen Höhenbereichen (blau) im Vergleich mit den Werten derselben Stationen nach der Nivellierung der Temperaturen auf die Seehöhe der niedrigsten Station in 257 m (orange, Temperaturgradient -0,32 K/hm) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Darstellung zeigt teils deutliche Unterschiede und auch eine starke Veränderung des Trends, der mit einem Bestimmungsmaß von 0,46 nach der Nivellierung stärkere Zusammenhänge zeigt. Der Jahresnormalwert der Station 122 in 520 m Seehöhe liegt beispielsweise mit 10,4 °C im Mittelfeld, nach der Nivellierung der Seehöhe mit über 11,3 °C an der Spitze. Durch die Nivellierung wird die Temperaturgunst der höher gelegenen Stationen noch klarer hervorgehoben.

Bei den Auffälligkeiten der Werte nach der Nivellierung wäre zunächst die Station 123 zu nennen, die einen vergleichsweise niedrigen Jahresnormalwert aufweist. Durch die Methodik der stagnierenden Temperaturen ab einer Seehöhe von 380 m könnte dieser Wert zu wenig berücksichtigt worden sein; dieser Umstand ist durch die sehr geringe Anzahl an Stationen in diesem Höhenbereich nicht belegbar. Auch die Station 054, die auf einer Seehöhe von 348 m nach der Nivellierung nur einen Jahresnormalwert von 9,9 °C erreicht, erscheint zu kalt. In diesem Fall liegt der Grund an der Lage der Station nur wenige Höhenmeter über dem Tal, in dem sich ein Bereich stagnierender Kaltluft befindet (in der Nähe von Paldau, siehe auch Kap. 12).

Die Werte der Stationen 117 und 145 sind nach der Nivellierung hingegen vergleichsweise zu warm. Die Station 117 liegt in 305 m Seehöhe am Oberhang eines Seitentales und bleibt deshalb von Kaltluftprozessen weitgehend verschont; der seehöhenkorrigierte Jahresnormalwert beträgt 10,9 °C. Die Station 145 befindet sich nahe des Ortskerns von Bad Gleichenberg und könnte einen leichten Wärmeinseleffekt erfahren. Auf einer Seehöhe von 279 m wird ein seehöhenkorrigierter Jahresnormalwert von 10,6 °C erreicht.

Es folgt eine Darstellung der Stationen nach dem Parameter Exposition, wobei die Werte wie zuvor nach der in Kap. 6.9.1 beschriebenen Methode bearbeitet worden sind. Dieselbe Abbildung ohne Nivellierung der Seehöhe kann in Kap. 6.8.1, Abb. 67 nachvollzogen werden.

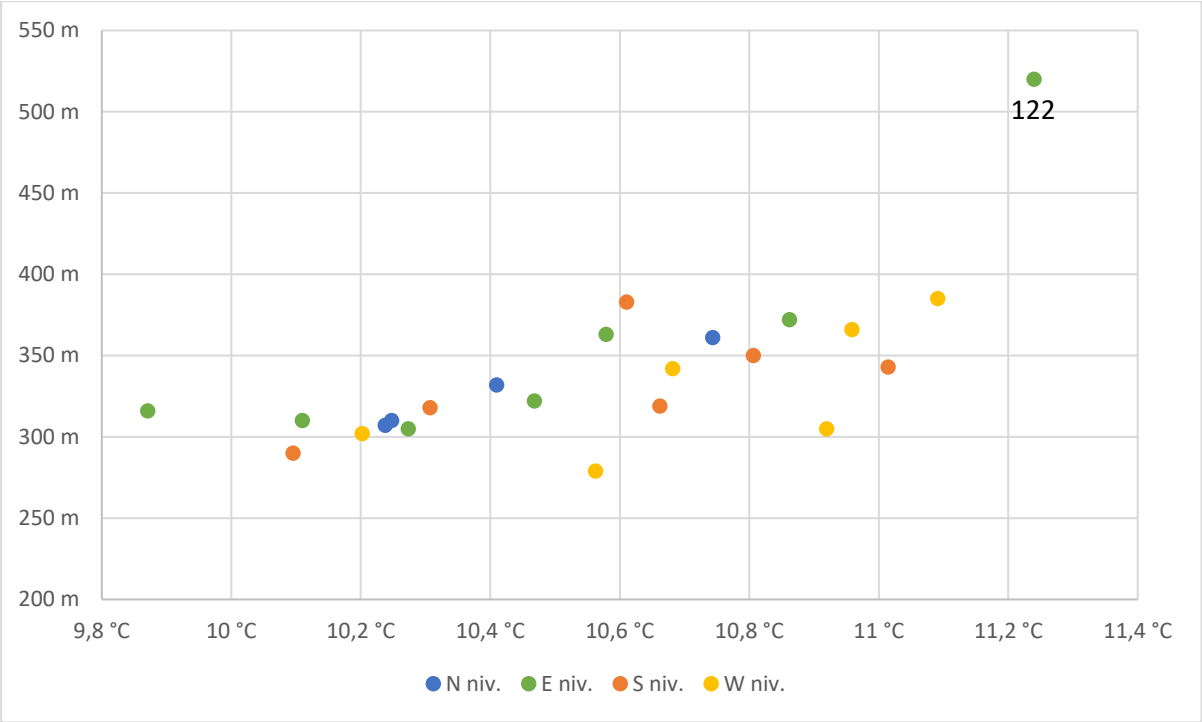


Abb. 84: Jahresmitteltemperaturen der ausgewählten Stationen nach Expositionen gegliedert nach Nivellierung der Seehöhe (Temperaturgradient -0,32 K/hm) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Nivellierung der Seehöhe hat vor allem im Fall der Station 122 nicht den erwarteten Effekt, da sie als einzige Station in dieser Seehöhe stark von dieser Art der Datenmanipulation profitiert. Ohne geeignete Vergleichswerte in gleicher Höhenlage kann der Höchstwert von 11,2 °C nicht schlüssig analysiert werden und wird in der weiteren Betrachtung daher nicht mehr behandelt.

Auch die Charakteristik der übrigen Stationen der verschiedenen Expositionen bleibt im Vergleich mit der Abbildung ohne Nivellierung der Seehöhe erhalten. Da bei der Methodik der Erstellung der Abb. 67 bereits darauf geachtet wurde, die Seehöhen bei allen Lagen möglichst gleich zu wählen, können keine neuen Informationen gewonnen werden. Im Schnitt liegen die mittleren Temperaturen an Stationen mit West-Exposition bei 10,7 °C, jene mit Nord-, Süd- und Ost-Expositionen bei 10,5 °C. Dennoch kann aus dieser Auswertung ein wichtiges Ergebnis gewonnen werden: die Auswirkungen der Exposition sind in den meisten Fällen nicht so stark, um etwaige geländeklimatische Faktoren (zumindest beim Jahresnormalwert) ausgleichen zu können.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Werte der einzelnen Stationen nach Hanglage gegliedert. Die Einteilung in Hanglagen ist sehr ungenau: ein „Unterhang“, der weit

talaufwärts fernab der von Kaltluftprozessen benachteiligten Tälern liegt, wird deutlich günstigere Werte aufweisen als ein „Unterhang“, der tatsächlich direkt nahe des Hangfußes des Raabtals liegt. Dadurch gibt es auch deutlichere Abweichungen von der Norm, die meist relief- bzw. lagebedingt einfach erklärt werden können.

Die Darstellung der Stationen nach Hanglage ohne die Nivellierung der Seehöhe kann in Kap. 6.8.2 nachvollzogen werden; auf eine gemeinsame Darstellung wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

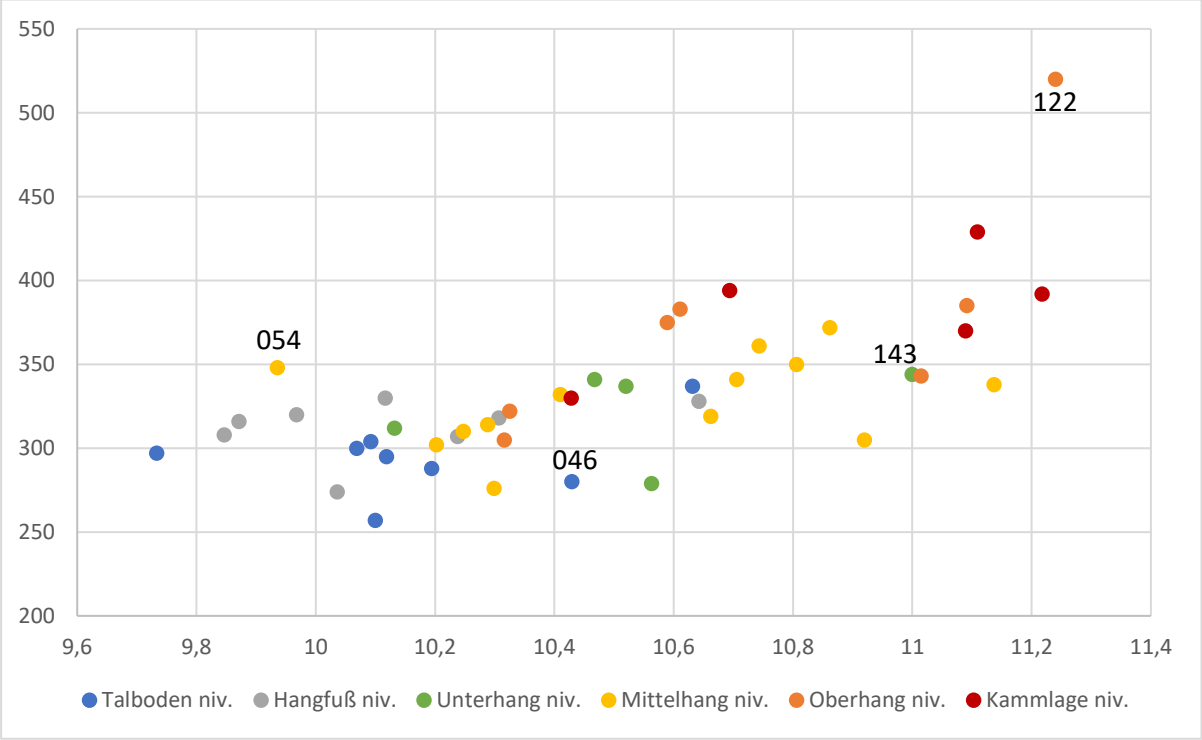


Abb. 85: Jahresmitteltemperaturen der ausgewählten Stationen nach Hanglagen gegliedert nach Nivellierung der Seehöhe (Temperaturgradient -0,32 K/hm) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Darstellung zeigt die Gunst der höher am Hang gelegenen Stationen gegenüber jenen im Tal oder am Hangfuß. Bis auf ein paar Ausnahmen sind die wärmsten Stationen durchwegs am Kamm, dem Ober- oder Mittelhang gelegen; die kältesten im Tal oder am Hangfuß. Der Unterhang ist als Übergangsregion meist im Mittelfeld gelegen.

Relativ zu kalt ist die bereits zuvor beschriebene Station 054, die im Tal bei Paldau im Bereich der stagnierenden Kaltluft liegt. Relativ zu warm sind beispielsweise die ebenfalls bereits beschriebenen Stationen 046 und 122, aber auch die Station 143. Letztere liegt trotz der

Klassifizierung „Unterhang“ in deutlicher Höhe über dem Talboden und kann dadurch einen Jahresnormalwert von knapp 11 °C (seehöhenbereinigt) aufweisen.

6.9.3 Mittlere tägliche Maxima und Minima

Die Jahresnormalwerte geben nur bedingt Aufschluss über die klimatischen Unterschiede der einzelnen Regionen. Deswegen werden nun nachfolgend wie im Kap. 6.1 die mittleren täglichen Maxima der Sommermonate (Juni, Juli und August) sowie die mittleren täglichen Minima und Maxima der Wintermonate (Dezember, Jänner und Februar) analysiert und einer Nivellierung der Seehöhe hinsichtlich der Auswertung nach Exposition und Hanglage unterzogen. Die Methodik ist in Kap. 6.9.1 beschrieben. Die mittleren täglichen Minima im Sommer wurden wie bei den Auswertungen in Kap. 6.8.1 wiederum vernachlässigt.

Die nachfolgende Abb. 86 zeigt die mittleren täglichen Maxima an den untersuchten Stationen nach dem Parameter Exposition in den Sommermonaten (und Nivellierung der Seehöhe).

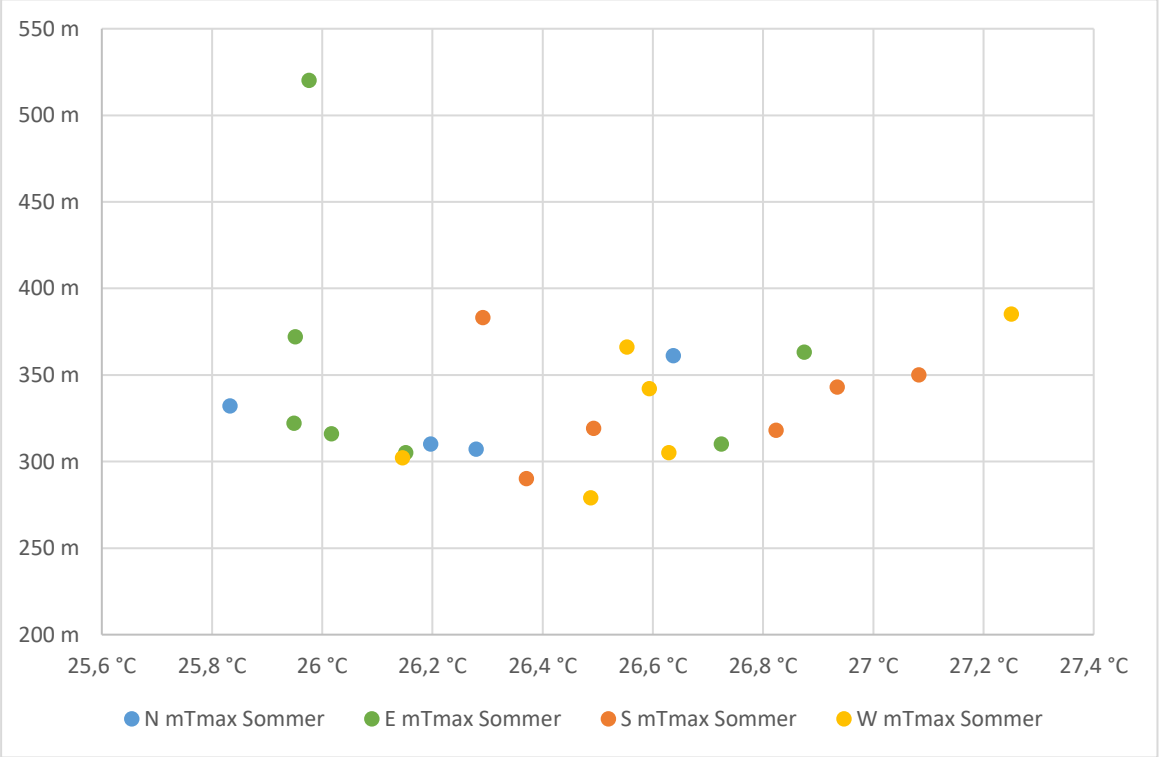


Abb. 86: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Durch die Nivellierung der Seehöhe sind die Unterschiede bei den Temperaturen nach Expositionen in dieser Darstellung gut erkennbar. Die deutlich höchsten Temperaturen

werden an Süd- bzw. West-exponierten Stationen erreicht, wobei das Maximum bei 27,3 °C liegt. Die Ost-exponierten Stationen weisen durchschnittlich niedrigere Durchschnittswerte als Nord-exponierte auf. Der Unterschied zwischen West- bzw. Süd- sowie Ost- bzw. Nord-exponierten Stationen beträgt durchschnittlich rund 0,4 K.

Die Abb. 87 zeigt die mittleren täglichen Minima der Wintermonate an den ausgewählten Stationen nach dem Parameter Exposition (und Nivellierung der Seehöhe).

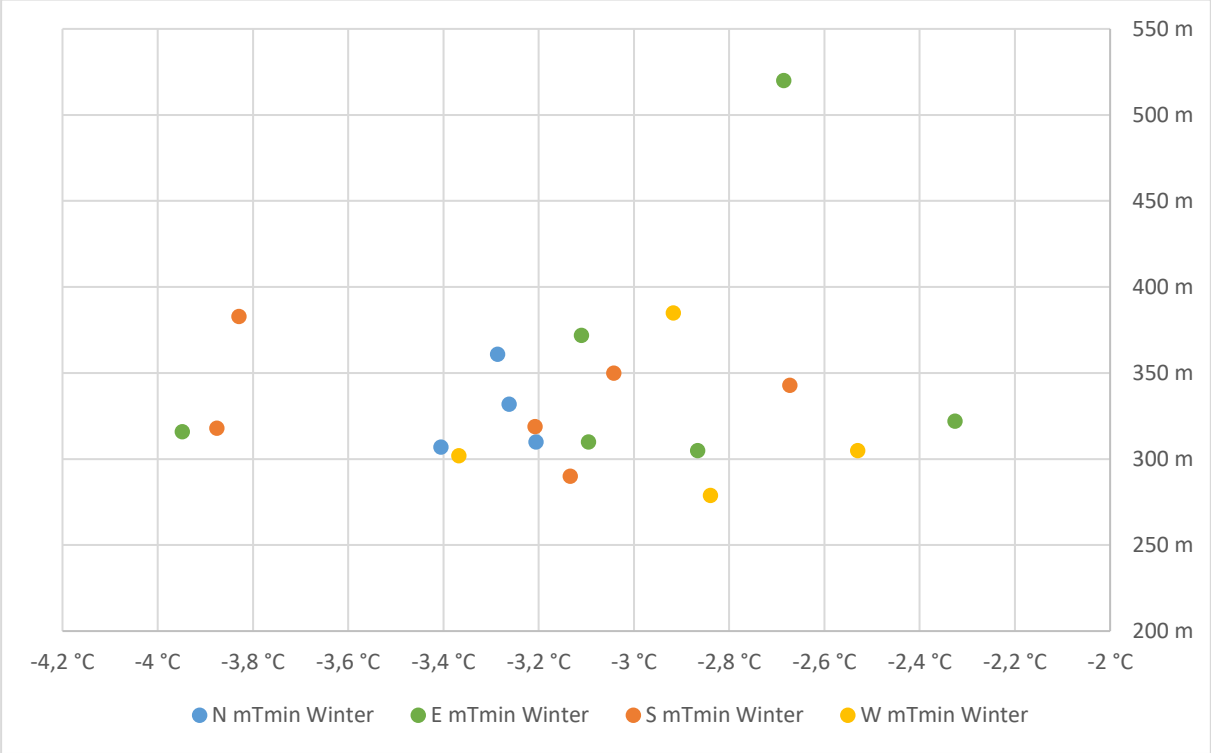


Abb. 87: Mittlere tägliche Minima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Bei den Minima gibt es erwartungsgemäß kaum einen Unterschied zwischen den einzelnen Expositionen, was bereits in Kap. 6.1 festgestellt und erläutert wurde. Zum Zeitpunkt des Erreichens der Minima gibt es keine Sonneneinstrahlung und die Nachwirkungen der Temperaturunterschiede des Vortages sind offenbar nur für sehr geringe Unterschiede ausreichend. Auffallend ist die geringe Bandbreite Nord-exponierter Stationen, die sich alle im Bereich von -3,2 bis -3,4 °C bewegen. Bei den Süd-exponierten Stationen bewegen sich die Werte hingegen zwischen -2,6 und -3,9 °C. Durch die meist breite Verteilung der Werte macht

eine Unterscheidung nach Expositionen kaum Sinn und wird an dieser Stelle auch nicht ausgeführt.

Bei den Maxima der Wintertemperaturen sind nun deutlich größere Unterschiede der einzelnen Lagen nach der Nivellierung der Seehöhe zu erkennen, als dies bei den grundlegenden Auswertungen in Kap. 6.1 der Fall war (Abb. 88).

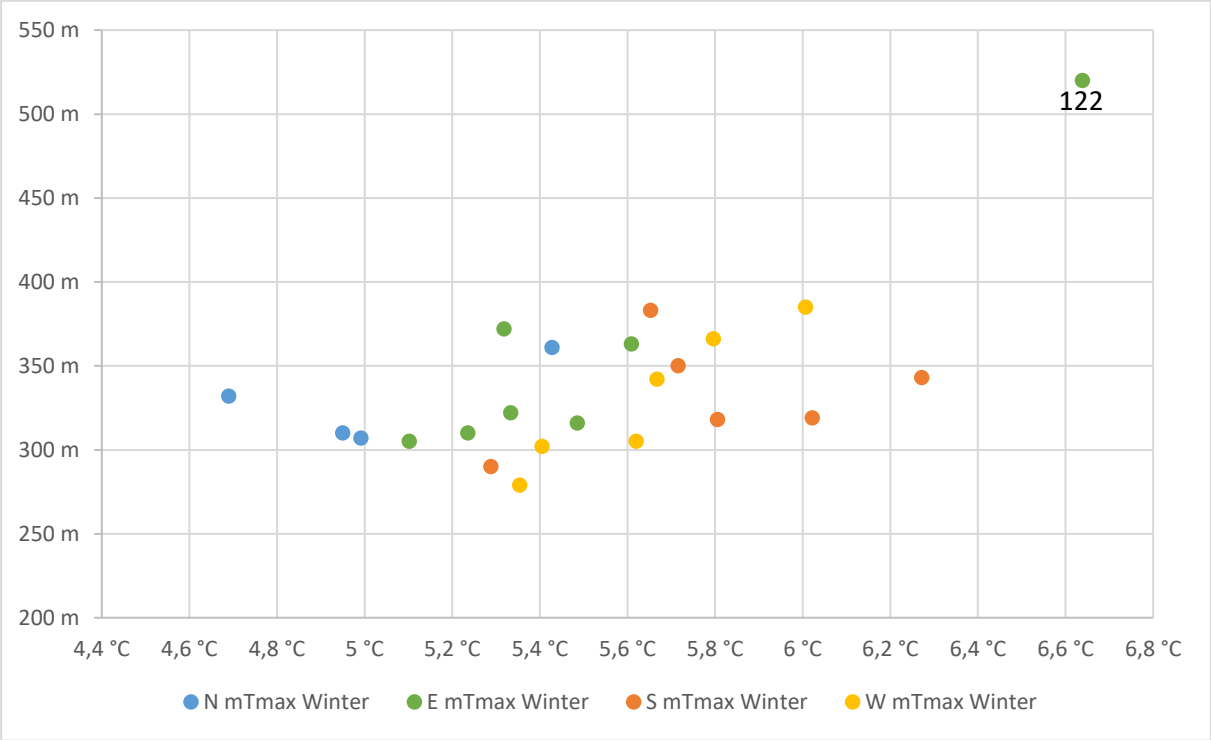


Abb. 88: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Exposition gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Aufgrund der fehlenden Vergleichswerte wird die Station 122 bei der nachfolgenden Analyse wieder weggelassen. Ansonsten sind die Werte der einzelnen Expositionen so verteilt, wie man es von vornherein erwarten durfte. Die Werte der südlich exponierten Stationen liegen bei durchschnittlich rund 5,8 °C und somit um knapp 0,8 K höher als jene der nördlich exponierten. Die Werte an den westlich exponierten Stationen liegen bei 5,6 °C, jene an östlich exponierten Stationen bei 5,3 °C (wenn man die Station 122 nicht berücksichtigt).

Wie bei den Jahresmitteltemperaturen im vorangegangenen Kapitel liefern also die Verhältnisse der mittleren täglichen Maxima vor allem im Winter, aber auch im Sommer den eindeutigen Beweis für die Auswirkungen der Exposition auf die Temperaturverhältnisse.

Als nächstes werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Hanglagen nach der Nivellierung der Seehöhe untersucht. Die folgende Abb. 89 zeigt die durchschnittlichen mittleren täglichen Maxima der Sommermonate.

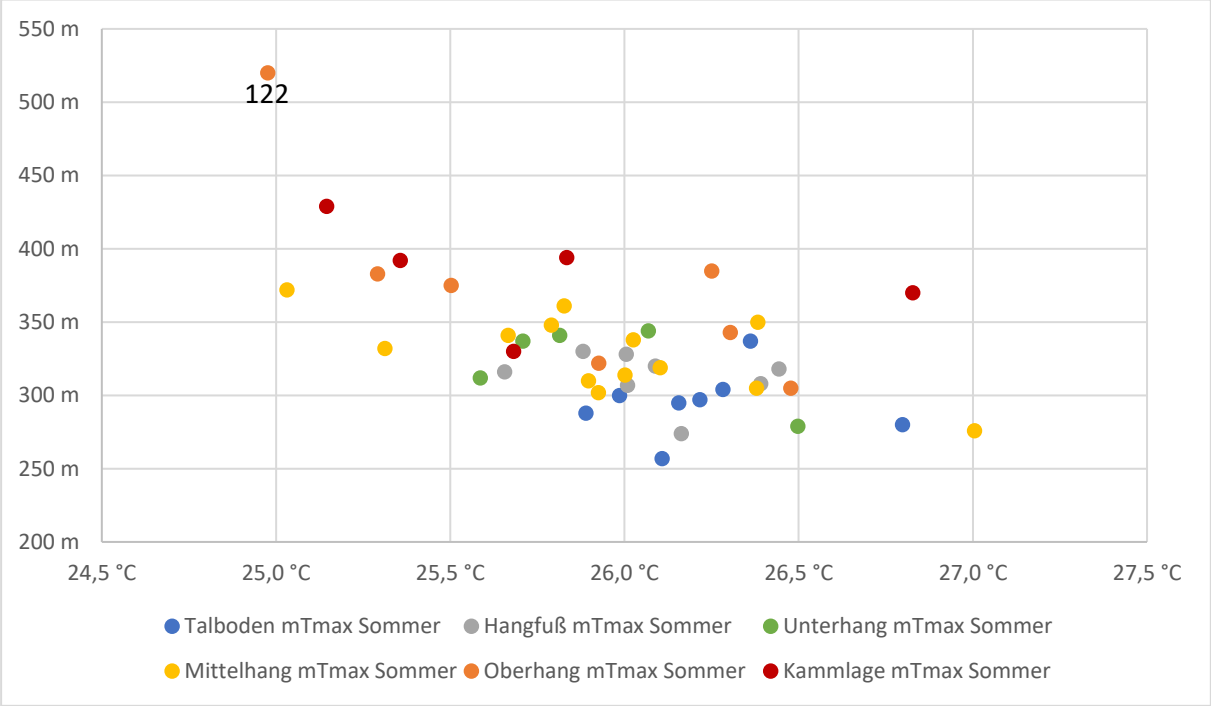


Abb. 89: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Nivellierung der Seehöhe in dieser Auswertung der täglichen Maxima im Sommer bewirkt, dass die Werte der unterschiedlichen Hanglagen sehr ausgeglichen über das Spektrum verteilt sind. Die niedriger gelegenen Stationen weisen durchschnittlich höhere Maxima auf. Bei den höher gelegenen Stationen fallen die großen Unterschiede untereinander auf. Das Maximum liegt bei 27,0 °C und wird an einer Station am Mittelhang erreicht; das Minimum von knapp unter 25 °C wird an der Station 122 am Oberhang erreicht und stellt als Einzelwert in dieser Seehöhe ein schwer zu interpretierendes Ergebnis dar.

Die Abb. 90 zeigt die durchschnittlichen mittleren täglichen Minima nach Hanglage in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) der untersuchten Stationen (nach Nivellierung der Seehöhe).

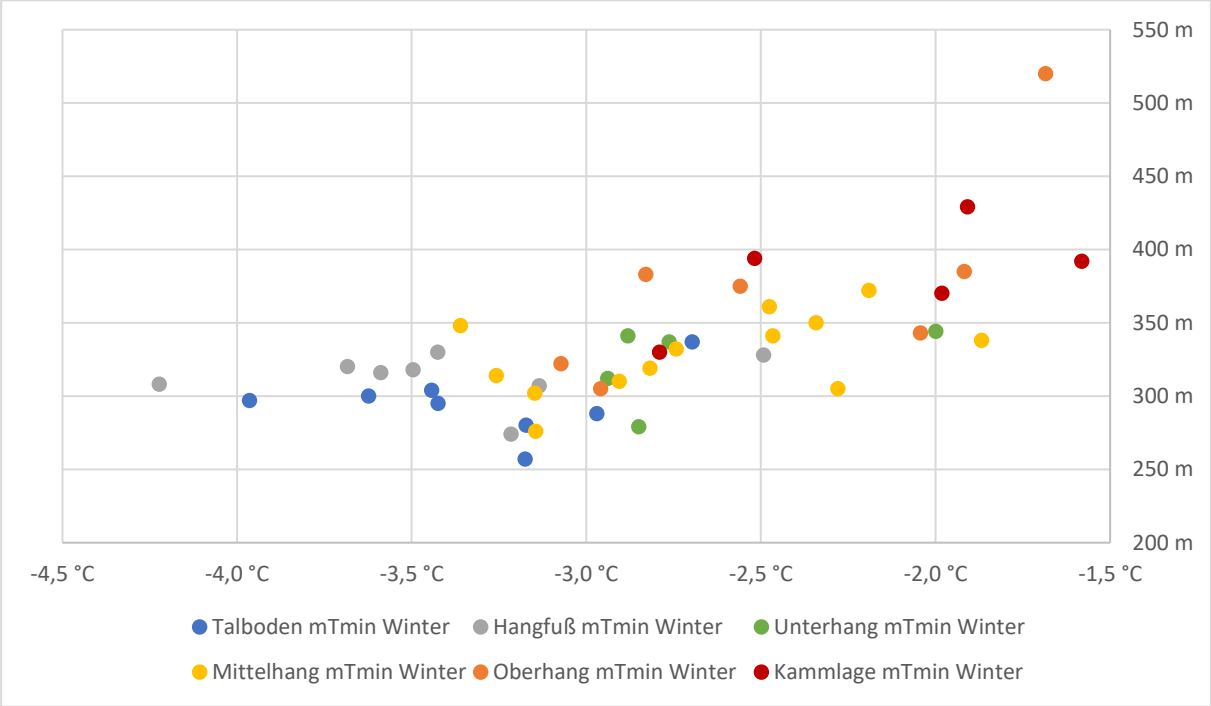


Abb. 90: Mittlere tägliche Minima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Bei den Minima im Winter ist ein schwacher Trend erkennbar: an den höher gelegenen Stationen werden durchschnittlich mildere Werte als bei den tiefer gelegenen erreicht. Die kältesten Werte sind fast ausschließlich bei Tal- und Hangfußstationen zu finden, die wärmsten bei Mittel- und Oberhangstationen sowie solchen in Kammlage. Der Unterschied beträgt dabei rund 0,6 K. Diese Auswertung zeigt, dass die Unterschiede auch bei Nivellierung der Seehöhe bei den morgendlichen Minima deutlich besser erkennbar bleiben als tagsüber bei den Maxima.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Analyse der durchschnittlichen mittleren täglichen Maxima nach Hanglagen im Winter nach der Nivellierung der Seehöhe, die in Abb. 91 dargestellt ist.

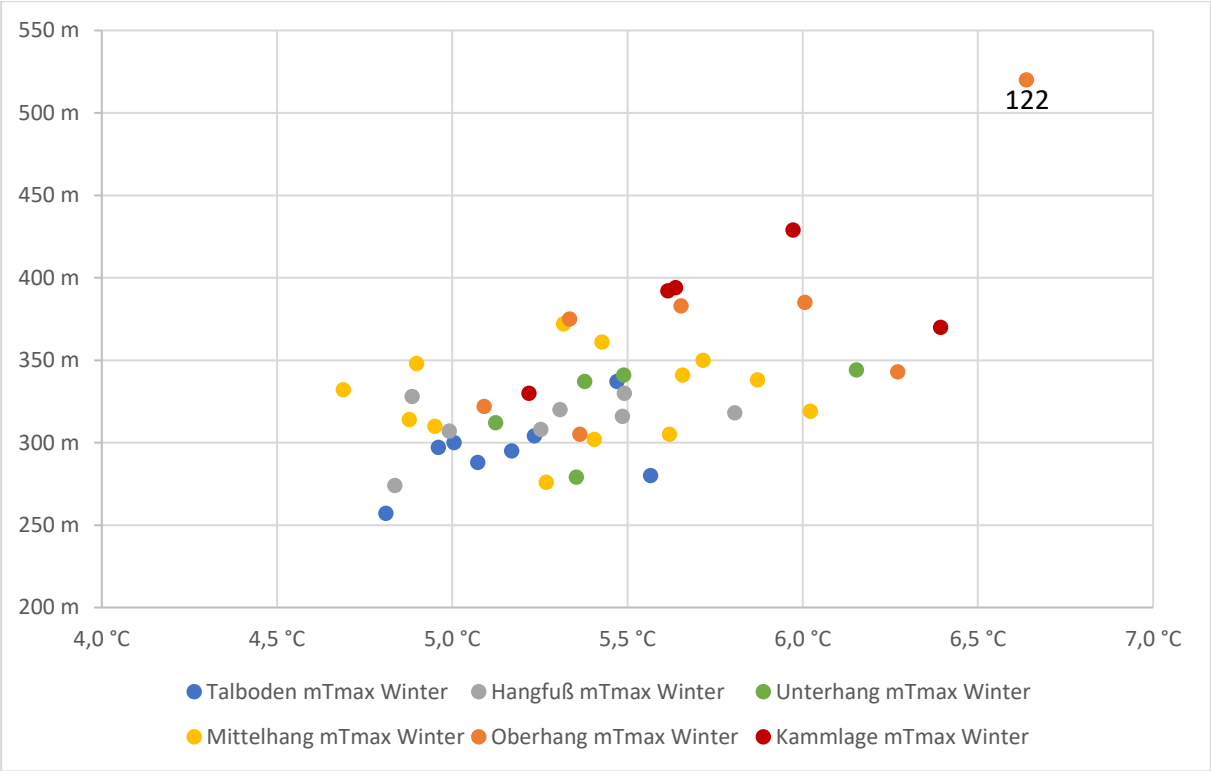


Abb. 91: Mittlere tägliche Maxima der Lufttemperatur der ausgewählten Stationen nach Hanglage gegliedert und Nivellierung der Seehöhe in den Wintermonaten (Dezember, Jänner und Februar) im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Wie bei der Exposition profitieren die Werte der Station 122 auf 520 m Seehöhe so deutlich von der Nivellierung der Seehöhe, dass die Hanglage nur eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus spielen (nicht berücksichtigte) geländeklimatische Faktoren bzw. auch die Höhe über dem Tal eine wichtige Rolle und verhindert eine klare Aussage bei der Gliederung nach Hanglage. Man kann allerdings erkennen, dass die Werte der Kamm- und Oberhanglagen mit durchschnittlich knapp 5,8 °C die höchsten sind. Die Werte der Mittelhanglagen sind über das gesamte Spektrum verteilt. Die Werte der Stationen in Hangfuß- bzw. Tallage befinden sich wie jene der Stationen in Unterhanglage meist im kühleren Bereich des Spektrums.

6.9.4 Zusammenfassung der Ergebnisse dieses Kapitels

Nachfolgend werden die Diagramme und Analysen der beiden vorangehenden Kapitel 6.9.2 und 6.9.3 zusammengefasst und die Ergebnisse quantitativ festgehalten.

Hinsichtlich der Exposition (Tab. 22) zeigt sich, dass dieser Parameter vor allem Auswirkungen auf die jeweiligen Maxima hat. Dies war zu erwarten, da sich Unterschiede bei den Expositionen fast ausschließlich bei Sonneneinstrahlung und darauf folgender Erwärmung

tagsüber entwickeln. Bei den Maxima im Sommer beträgt der Unterschied 0,4 K, im Winter sogar 0,8 K; zu diesem Zeitpunkt wirkt sich die Lage in Süd-Exposition im Vergleich zu jener in Nord-Exposition also am stärksten aus. Dies ist vor allem durch die flache Sonneneinstrahlung zu dieser Jahreszeit bedingt.

Beim Jahresmittelwert ist nur eine geringe Differenz feststellbar, während es beim Minimum im Winter gar keinen Unterschied gibt.

Tab. 22: Temperaturunterschiede bei den Expositionen Nord bzw. Süd bei unterschiedlichen Parametern im Zeitraum von 2007-2011 in [K].

Parameter	Unterschied Nord - Süd	Abbildung
Jahresmittelwert	0,1 K	Abb. 84
Mittleres tägliches Maximum Sommer	0,4 K	Abb. 86
Mittleres tägliches Minimum Winter	0,0 K	Abb. 87
Mittleres tägliches Maximum Winter	0,8 K	Abb. 88

Quelle: Wegener Center 2013, eigene Bearbeitung

Hinsichtlich der Hanglage (Tab. 23) beträgt der Unterschied beim Jahresmittelwert +0,7 K. Dies bedeutet, dass die Stationen in Kammlage durchschnittlich um 0,7 K höhere Mittelwerte erreichen, als jene in Tallage. Umgekehrt ist die Situation bei den täglichen Maxima im Sommer: hier werden in Tallage um 0,5 K höhere Maxima erreicht. Dies resultiert aus der durch die geringere Seehöhe bedingt stärkere tageszeitliche Erwärmung bei weitgehend fehlenden Bodennebelereignissen im Sommer.

Im Winter sind die Inversionen und Bodennebelereignisse entscheidend, die in Kammlage für begünstigte Temperaturen sorgen; der Unterschied beträgt sowohl bei Maxima, als auch bei den Minima 0,6 K.

Tab. 23: Temperaturunterschiede zwischen Kamm- und Tallage bei unterschiedlichen Parametern im Zeitraum von 2007-2011 in [K].

Parameter	Unterschied Tal – Kamm	Abbildung
Jahresmittelwert	+0,7 K	Abb. 85
Mittleres tägliches Maximum Sommer	-0,5 K	Abb. 89
Mittleres tägliches Minimum Winter	+0,6 K	Abb. 90
Mittleres tägliches Maximum Winter	+0,6 K	Abb. 91

Quelle: Wegener Center 2013, eigene Bearbeitung

6.10 Inversionen

In diesem Kapitel folgt eine Analyse der Inversionswahrscheinlichkeit und –häufigkeit im Gebiet des WegenerNet-Messnetzes.

Hinsichtlich der Inversionshäufigkeit in Tälern wurden bereits in Kap. 2.2.1 die wichtigsten Quellen zitiert und analysiert. Für diese Auswertung werden eine hoch gelegene Hangstation und eine Talstation in direkter Nähe im Untersuchungsgebiet des Wegener Centers verwendet, und zwar die Stationen 122 und 145. Erstere wurde schon häufig erwähnt und ist als höchste Station (520 m) die optimale Station am oberen Hangbereich; die Station 145 liegt etwa 1000 m südlich davon auf einem Unterhang auf einer Seehöhe von 279 m.

Aufgrund fehlender direkter Vergleichsdaten wird in der Folge angenommen, dass die Werte der Station 122 vertikal über der Station 145 gemessen wurden. Durch diese Vorgehensweise entsteht eine Unschärfe der Auswertung, wodurch die Ergebnisse nur als Richtwerte anzusehen sind. Anhand der Fünf-Minuten-Werte der Temperatur werden dann jene Zeitpunkte ausgemacht, an denen die Temperatur der Höhenstation zumindest gleich hoch oder höher ist als jene der tief gelegenen Station (und somit eine Inversion vorherrscht).

Die Abb. 92 zeigt den Verlauf der Wahrscheinlichkeitskurve für Inversionen in diesem Gebiet im Jahresverlauf als Durchschnitt des Untersuchungszeitraums 2007-2011. Die höchste Wahrscheinlichkeit für eine Temperaturumkehr besteht im Jahresdurchschnitt zwischen 04 und 05 Uhr (UTC) mit 60 %. Danach (vor allem durch die einsetzende Sonneneinstrahlung) sinken die Werte kontinuierlich bis auf das Minimum zwischen 14 und 15 Uhr, wo nur mehr eine Wahrscheinlichkeit von 3 % für eine Inversion besteht. Danach steigt die Wahrscheinlichkeit wieder kontinuierlich an und erreicht gegen 21 Uhr bereits wieder 50 %.

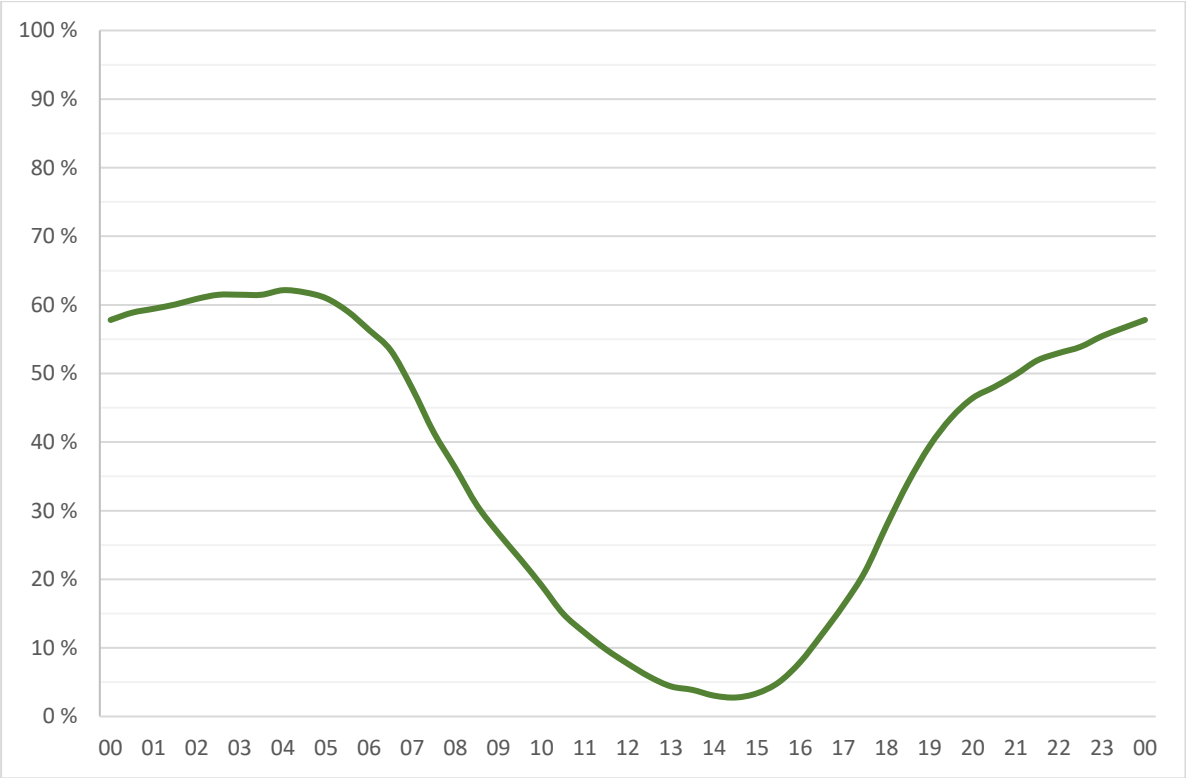


Abb. 92: Mittlerer Tagesgang (in UTC) der Inversionswahrscheinlichkeit in [%] als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Sehr interessant ist der Vergleich der Inversionswahrscheinlichkeiten der Stationen 122 und 145 im Jänner bzw. Juli als Durchschnitt der Jahre 2007-2011 (Abb. 93). Das Maximum liegt im Winter in den frühen Morgenstunden bei 55 %. Die Werte fallen dann bis 13 Uhr auf 10 % ab, um bereits ab 15 Uhr wieder anzusteigen und gegen 21 Uhr die 50 % - Marke zu überschreiten. Im Juli zeigt sich ein etwas anderes Bild: hier wird das Maximum bereits um 05 Uhr mit 80 % Wahrscheinlichkeit erreicht, was deutlich über dem Jahresdurchschnitt liegt – hier kann man von häufiger Auswirkung von Kaltluftprozessen ausgehen. Die Kurve fällt dann steil ab und erreicht nach 15 Uhr das Minimum von 0 % - zu diesem Zeitpunkt im Juli gab es also in den Jahren 2007-2011 kein einziges Mal eine Inversion. Mit dem Untergang der Sonne gegen 18 Uhr (UTC) steigt die Kurve sofort wieder steil an und erreicht bereits vor 20 Uhr wieder die 50 %-Marke – auch hier muss man von den Auswirkungen von Kaltluftprozessen ausgehen.

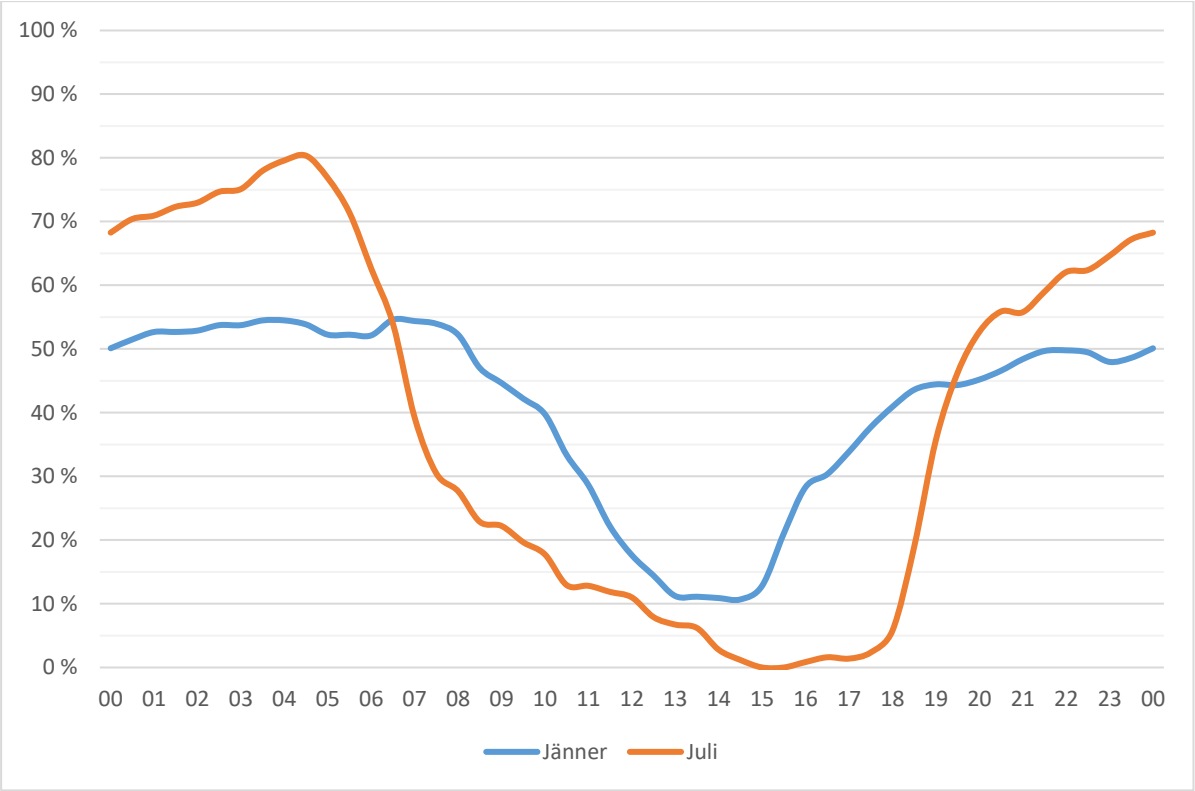


Abb. 93: Mittlerer Tagesgang (in UTC) der Inversionswahrscheinlichkeit in [%] im Jänner und Juli als Ergebnis des Temperaturvergleichs der Stationen 122 und 145 im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Tab. 24 zeigt nun die absoluten Zahlen zu Inversionswetterlagen im Vergleich der Stationen 122 und 145 im Durchschnitt der Jahre 2007-2011. Es ergibt sich ein Wert von 36,5 % an Inversionen. Davon gab es an 70.872 Zeitpunkten zumindest einen Unterschied von 3 K, an 28.188 von zumindest 5 K, an 7.875 von zumindest 7 K und an 833 Zeitpunkten von zumindest 10 K. Das Maximum lag im Untersuchungszeitraum bei 15,7 K Unterschied und die Marke von 15 K wurde immerhin vier Mal übertroffen.

Tab. 24: Absolute Zahlen der Fünf-Minuten-Werte hinsichtlich Inversionen als Ergebnis des Vergleichs der Stationen 122 und 145 im Durchschnitt der Jahre 2007-2011 in [°C].

Auftreten von Inversionen:		**191.728 Mal**
in %:		**36,46%**
Davon:	mind. +3K:	70.872 Mal
	mind. +5K:	28.188 Mal
	mind. +7K:	7.875 Mal
	mind.+10K:	833 Mal

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

6.11 Ausbreitungsklassen

Die Ausbreitungsklassen der Luft wurden anhand der Referenzstation 077 beispielhaft für das Untersuchungsgebiet ausgewertet. Ausbreitungsklassen dienen in erster Linie zur Veranschaulichung der Ausbreitung luftverunreinigender Stoffe, können aber auch Aufschluss über die allgemeine Durchlüftungssituation sowie die Häufigkeit von Inversionen geben. Der Fokus dieser Arbeit liegt bei den zwei letztgenannten Punkten, da die Schadstoffausbreitung kein Thema dieser Arbeit ist und an anderer Stelle nachvollzogen werden kann (vgl. z.B. SCHAUER 2009).

Für die Auswertung wurde jene Methode gewählt, bei der die Ausbreitungsklassen mittels Windgeschwindigkeit und Strahlungsbilanz berechnet werden, und die auch in der ÖNORM M 9440 (Austrian Standards 1996, S.12) beschrieben wird. Die Strahlungsbilanz wird nur an der Referenzstation 077 aufgezeichnet, wodurch auch nur diese zur Berechnung herangezogen werden kann. Diese Methode der Ermittlung der Ausbreitungsklassen ist in diesem Fall gegenüber den gängigsten Alternativen (mittels Strahlungsindex bzw. Temperaturgradienten) zu bevorzugen, da die benötigten Daten schon vorhanden sind; auch qualitativ ist diese Methode an einem freien Standort wie jenem von Station 077 (Mittelhang, unbebautes Gebiet, 302 m Seehöhe) den anderen beiden vorzuziehen (vgl. SCHAUER 2009, S. 18 ff. sowie S. 37 ff.). In direkter Umgebung der Station gibt es nur Grünland und Wiesen, die ungehindert anströmenden Wind und eine genaue Aufzeichnung der Strahlungsbilanz ohne störende Hindernisse ermöglichen sollten.

Tab. 25: Ausbreitungsklassen nach TURNER in der ÖNORM M 9440

Ausbreitungsklasse	Atmosphärische Schichtung
2	Labil
3	Leicht labil
4	Neutral
5	Leicht stabil
6	Stabil
7	Stark stabil

Quelle: Austrian Standards 1996, S. 13

Die stark labile Klasse 1 wird in Österreich nicht verwendet, da diese im nordamerikanischen Raum auftretende extreme Wettersituation nicht auf den europäischen Raum anwendbar ist. Die Tab. 26 zeigt die Einteilung der Ausbreitungsklassen in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Strahlungsbilanz aus der ÖNORM M 9440 (Austrian Standards 1996, S. 12).

Tab. 26: Ausbreitungsklassen in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit in [m/s] und der Strahlungsbilanz in [W/m²].

Strahlungsbilanz W/m² / Windgeschwindigkeit u_{10} in m/s	unter −29	−28 bis −7	−6 bis 54	55 bis 109	110 bis 244	245 bis 415	ab 416
	Ausbreitungsklassen						
bis 0,7	7	6	4	3	2	2	2
0,8 bis 1,9	7	6	4	3	2	2	2
2,0 bis 2,9	6	5	4	4	3	2	2
3,0 bis 3,9	5	4	4	4	3	2	2
4,0 bis 4,9	5	4	4	4	3	3	2
5,0 bis 6,9	5	4	4	4	4	3	3
ab 7,0	4	4	4	4	4	4	4

Quelle: Austrian Standards 1996, S. 12

Für die Auswertung sollen laut ÖNORM 9440 Halbstundenmittelwerte herangezogen werden, was in Summe über 87.000 Werte für den Untersuchungszeitraum von 2007-2011 ergibt.

Die Abb. 94 zeigt die Auswertung des Gesamtjahres, wobei auf eine Teilung in Winter- und Sommerhalbjahr verzichtet wurde. Der hauptsächliche Unterschied zwischen Sommer- und

Winterhalbjahr ist die stärkere und im Tagesverlauf länger anhaltende Dominanz der labilen Ausbreitungsklasse 2, sonst bleibt der Grundcharakter unverändert (vgl. SCHAUER 2009, S. 42).

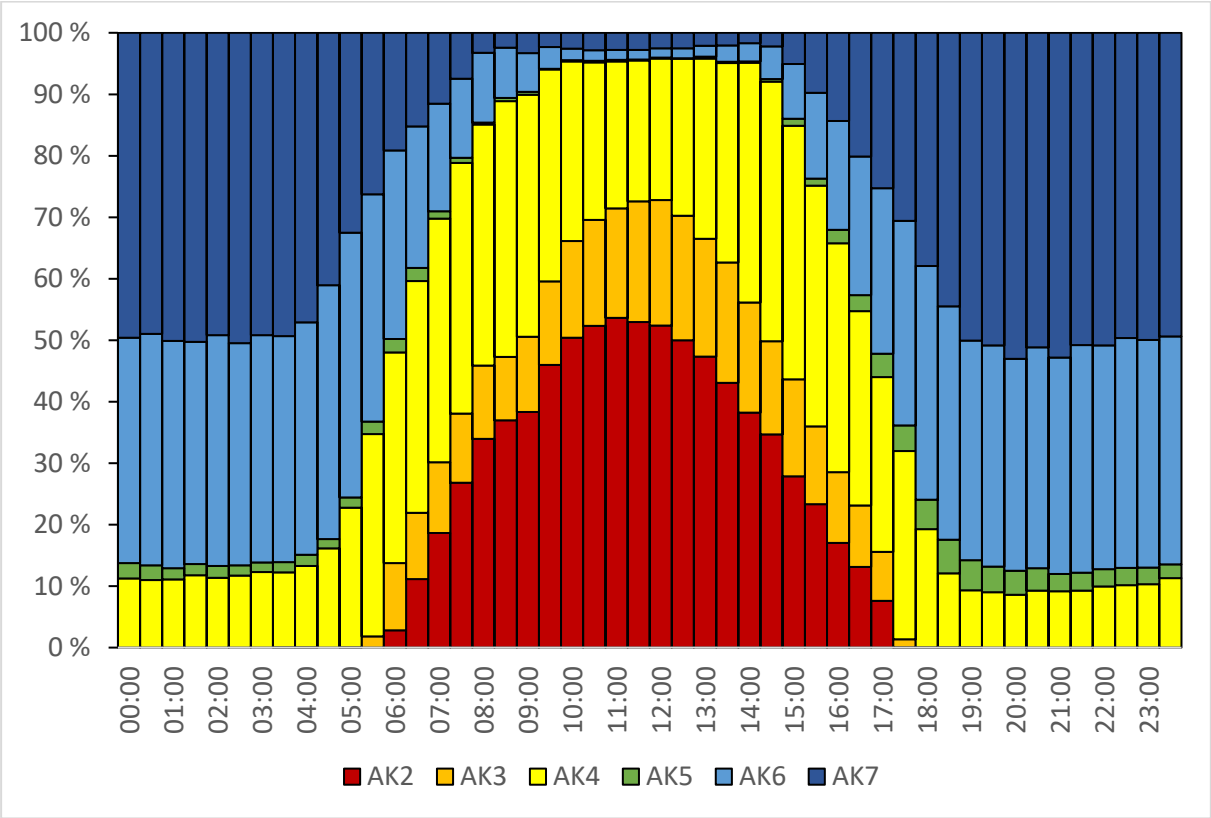


Abb. 94: Mittlerer Tagesgang der Ausbreitungsklassen an der WegenerNet-Station 077 im Jahresdurchschnitt der Periode 2007-2011 unter Verwendung der Strahlungsbilanz-Methode (Erläuterung im Text). *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Analyse des Diagramms:

AK2: Die labile Ausbreitungsklasse 2 tritt in den Nachtstunden nicht auf, dominiert das Bild aber zur Mittagszeit mit bis zu knapp über 50 % Wahrscheinlichkeit.

AK3: Die leicht labile Klasse 3 ist von der Charakteristik her ähnlich der AK2, allerdings schwächer ausgeprägt. Auch sie tritt nicht in der Nacht auf und erreicht um die Mittagszeit mit knapp 20 % die höchsten Werte.

AK4: Die neutrale Klasse 4 ist recht gleichmäßig über den ganzen Tag und die Nacht verteilt, wobei das Maximum vormittags und nachmittags (zur Zeit des stärksten Windes) mit etwa 40 % Wahrscheinlichkeit auftritt.

AK5: Diese leicht stabile Klasse tritt am seltensten auf und kommt vor allem während der Abendstunden und in der Nacht vor; das Maximum liegt nur bei etwa 5 % in den Abendstunden.

AK6: Die stabile Klasse 6 tritt vor allem während der Nacht auf, kommt aber auch tagsüber vor. Ihr Maximum liegt während der Nachtstunden bei etwa 40 %.

AK7: Die stark stabile Klasse 7 ist von der Charakteristik her sehr ähnlich der Klasse 6 und hat ihr Maximum ebenfalls in der Nacht mit bis zu 50 % Wahrscheinlichkeit. Genauso wie die stabile Klasse 6 verschwindet sie tagsüber nicht vollständig, sondern tritt da mit einer Wahrscheinlichkeit von wenigen Prozenten auf. Gemeinsam mit der Klasse 6 erreicht die stark stabile Ausbreitungsklasse also eine nächtliche Wahrscheinlichkeit von 90 % und sorgt damit für beste Voraussetzungen für häufige Inversionswetterlagen.

Dieses Ergebnis spiegelt den allgemein windschwachen Charakter des Untersuchungsgebiets wider, welcher in Kap. 8 genau behandelt wird. Durch die geringen Windgeschwindigkeiten tritt die leicht stabile Klasse 5, die höhere Windgeschwindigkeiten voraussetzt, kaum auf; die stark stabilen Klassen 6 und 7 wiederum treten nur bei geringen Windgeschwindigkeiten auf und sind in der Nacht vorherrschend. Die Folge ist eine hohe Wahrscheinlichkeit für Inversionen in den Nachtstunden, was auch in Kap. 6.10, Abb. 92 gut belegt wird.

6.12 Vertikaler Temperaturgradient

Die Erhebung des vertikalen Temperaturgradienten ist ein wichtiger Schritt, um nicht nur die allgemeine Situation der Temperaturverteilung einschätzen, sondern auch die Stationen untereinander besser vergleichen zu können. Dieser gibt an, um wie viel Kelvin [K] pro 100 m die Temperatur mit der Höhe abnimmt. Für die gesamte Steiermark wird standardmäßig eine Änderung von -0,5 K/hm angenommen (Reliefenergie 2800 m, Unterschiede beim Jahresnormalwert 14 K). Dieser Wert ist stark verallgemeinert und nur bedingt gültig für die sehr unterschiedlichen Regionen der Steiermark. Der Klimaatlas Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 67 f.) teilt das Bundesland daher in drei Regionen mit jeweils drei Höhenschichten ein, die jeweils unterschiedliche vertikale Temperaturgradienten aufweisen (insgesamt also neun Zonen).

Für diese Arbeit ist nur die Region „Gesamtsüden“ und dabei nur die „untere Schicht“ interessant, die bis in eine Höhe von 500 m ausgewiesen ist und damit bis auf die höchsten Erhebungen am Gleichenberger Kogel (598 m) das gesamte Untersuchungsgebiet betrifft. Für

diese Zone wird im Jahresdurchschnitt ein Temperaturgradient in der freien Atmosphäre (unter Einbeziehung von Stationswerten) von -0,32 K/hm angegeben; im Jänner beträgt dieser Wert +0,28 K/hm, im Juli -0,23 K/hm. Im Jahresdurchschnitt gibt es laut dieser Darstellung also eine Abnahme nach oben, wobei aber im Winter die Temperatur durch häufige Inversionswetterlagen in dieser Zone sogar nach oben zunimmt.

Die Verteilung der Stationen und das allgemein niedrige Höhenniveau im Untersuchungsgebiet machen eine Auswertung hinsichtlich des vertikalen Temperaturgradienten schwierig. Insgesamt beträgt der Höhenunterschied 263 m (siehe Kap. 5.2), wobei gerade in größeren Höhen die Stationsdichte extrem gering ist. Daher macht eine Betrachtung der Werte in 50 m – Schritten mehr Sinn, wie sie in Tab. 27 dargestellt wird. Anhand der Anzahl der Stationen sieht man auch hier, dass nur die Höhenschritte von 250-299 m, 300-349 m und 350-399 m wissenschaftlich verwertbar sind; im Bereich von 400-449 m gibt es nur eine, von 450-499 m gar keine und von 500-549 m ebenfalls nur eine Station. Die Bewertung dieser drei höheren Schichten hätte daher kaum Aussagekraft.

Die 3 unteren Schichten zeigen allerdings ein interessantes Bild, das auch dem Wert von -0,32 K/hm aus dem Digitalen Atlas widerspricht. So beträgt die Änderung der Temperatur im Jahresdurchschnitt von 275 (Mittelwert von 250-299 m) auf 325 m +0,08 K und von 325 bis 375 m sogar +0,30 K - die Temperatur nimmt also nach oben hin zu. Der weitere Verlauf nach oben legt nahe, dass dieser Vorgang zumindest bis in eine Höhe von 475 m anhält, und auch bis 525 m Seehöhe zumindest keine niedrigeren Werte als in 275 m zu erwarten sind.

Wenn man nun die Werte von 275 und 375 m vergleicht und daraus die Änderung im 100 m - Schritt erstellt, so ergibt das eine Steigerung von **+0,38 K/hm**. Dies spiegelt auch die Temperaturgunst der Hang- gegenüber den Tallagen des Gebiets gut wider, was auch im Klimaatlas Steiermark behandelt wird (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 66). Die mittlere Änderung von 275 bis 375 m im Durchschnitt des Jänners beträgt sogar **+0,66 K/hm** (Digitaler Atlas: +0,28 K/hm), was auf die Häufigkeiten von Inversionen und Bodennebel in den Tallagen zurückzuführen ist; im Durchschnitt des Julis beträgt dieser Wert „nur“ rund **+0,27 K/hm** (Digitaler Atlas: -0,23 K/hm!). Der Wert des Julis widerspricht also jenem im Digitalen Atlas der Steiermark, wo im Gegensatz eine deutliche Abnahme der Temperatur nach oben festgestellt wurde.

Tab. 27: Die durchschnittlichen Jahresnormalwerte sowie Jänner- und Julimittelwerte der untersuchten Stationen in [°C] mittels Einteilung in 50 m-Höhenschritten.

Seehöhe [m]	Anzahl Stationen	Jahr	Jan Temp	Jul Temp
250-299	8	**10,11**	-0,32	20,19
300-349	27	**10,18**	0,03	20,34
350-399	9	**10,48**	0,34	20,46
400-449	1	**10,56**	0,52	20,62
450-499	0	-	-	-
500-549	1	**10,40**	0,47	20,40

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Abb. 95 zeigt die Jahres-, Jänner- und Julimittel der untersuchten Stationen in Abhängigkeit von der Seehöhe. Die Jännermittelwerte (in Blau gehalten) zeigen einen mäßig signifikanten Trend der Temperaturzunahme nach oben mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,32. In diesem Monat ist die Temperaturzunahme nach oben am offensichtlichsten, wie auch schon bei Tab. 27 beschrieben wurde. Leider gibt es über einer Seehöhe von 400 m nur zwei Stationen, die zwar auch hohe Werte anzeigen, aber als Einzelwerte kaum Aussagekraft haben.

Das Minimum wird mit knapp -1 °C in 300 m Seehöhe erreicht, das Maximum mit 0,7 °C in knapp 350 m. Beim durchschnittlichen Jahresnormalwert ist das Bild nicht so eindeutig, das Bestimmtheitsmaß des Trends ist mit 0,15 sehr niedrig; dennoch ist ein leichter Anstieg der Temperatur mit steigender Seehöhe zu erkennen. Das Minimum liegt wie im Jänner bei 300 m Seehöhe um 9,6 °C, das Maximum in einer Höhe um 350 m mit 10,9 °C. Beim durchschnittlichen Julimittel zeichnet sich ein ähnliches Bild wie im Jahresdurchschnitt ab, wobei das Bestimmtheitsmaß des Trends mit 0,09 äußerst niedrig ist und somit kaum Signifikanz aufweist. Das Minimum wird mit 19,5 °C in einer Seehöhe von etwa 320 m erreicht, das Maximum von 20,9 °C sowohl in 300 m, als auch knapp 400 m Seehöhe.

Das Diagramm veranschaulicht sehr gut, dass vor allem in einer Seehöhe von 350-400 m eine auffallende Temperaturgunst herrscht. Diese manifestiert sich vor allem im Winter, wo der Bodennebel der entscheidende Faktor ist. Sämtliche Stationen im Bereich von 350-400 m weisen in allen 3 Auswertungen vergleichsweise hohe Werte auf, auch das Maximum liegt fast immer in diesem Bereich. Ein Blick auf die Stationsbeschreibung in Kap. 4 zeigt auch, dass sich sämtliche Stationen dieses Höhenbereichs entweder in Mittel- oder Oberhang- bzw. in Kammlage befinden.

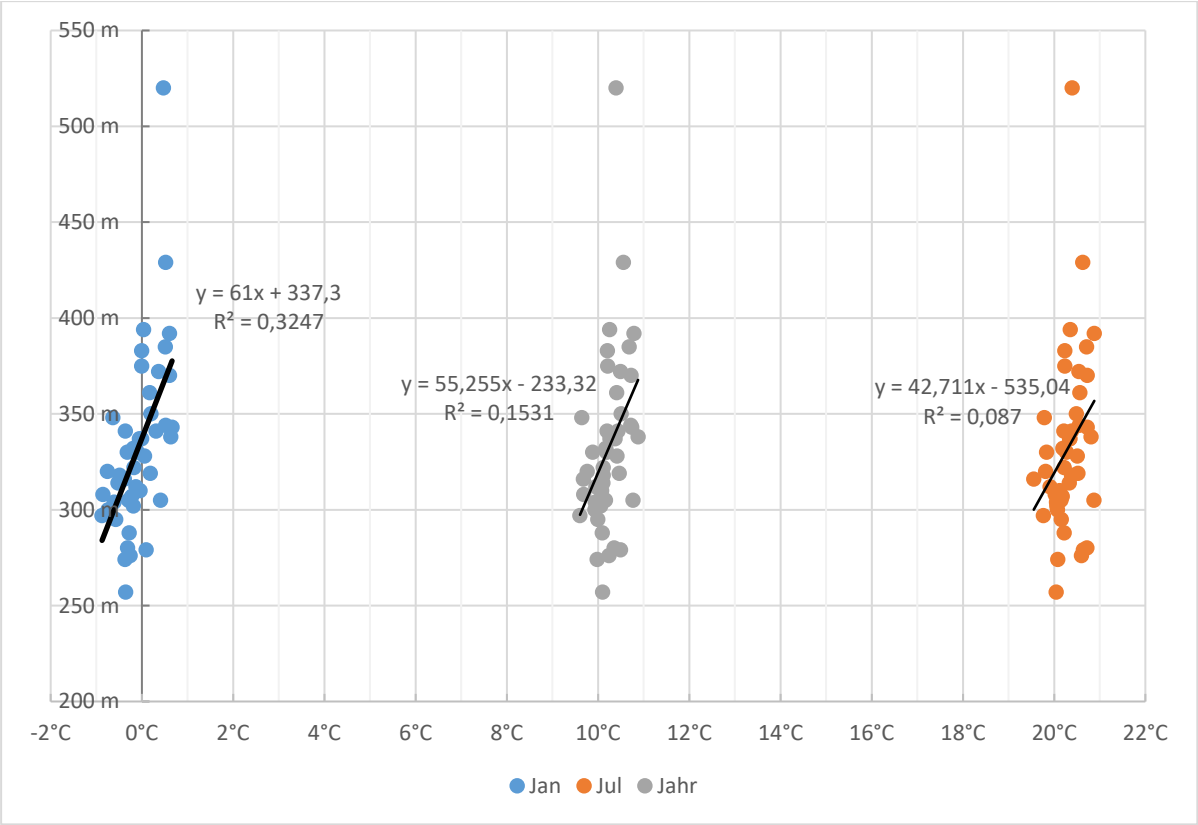


Abb. 95: Durchschnittliche Jahresnormalwerte (grau) sowie mittlere Jänner- (blau) und Juliwerte (orange) der Temperatur in [°C] mit Trends in Abhängigkeit von der Seehöhe in [m]. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß der Trendgeraden, y die Formel zum Berechnen des Trends nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass vor allem die Mittel- und Oberhanglagen sowie Kammlagen eine deutliche Temperaturgunst aufweisen. Dabei spielt vor allem die Höhe über dem Tal eine entscheidende Rolle im Winter. Daher ist der vertikale Temperaturgradient im Jänner mit +0,66 K/hm deutlich höher, als im Juli mit +0,27 K/hm bzw. im Jahresdurchschnitt mit +0,37 K/hm. In allen drei Fällen wird die Durchschnittstemperatur im Höhenbereich von 250-400 m nach oben hin höher.

Vor allem im Juli widerspricht diese Auswertung damit ganz klar den Angaben im Klimaatlas der Steiermark, wo eine Abnahme nach oben von -0,23 K/hm beschrieben wird (Prettenthaler, Podesser und Pilger 2010, S. 66). Die thermisch günstigen Bedingungen der Hanglagen im Riedelland sorgen also auch im Sommer für eine thermische Begünstigung. Von 400-500 m Seehöhe scheinen gleichbleibende Bedingungen zu herrschen, was mit zusätzlichen Stationen in diesem Höhenbereich und darüber verifiziert werden müsste.

7. Niederschlag

Hinsichtlich des Niederschlags werden nachfolgend die Jahresniederschläge und Tages- und Jahresgänge analysiert. In den weiteren Kapiteln werden detaillierterer Fragestellungen behandelt und auch eine Auswertung nach geländeklimatischen Parametern durchgeführt.

7.1 Monats- und Jahresniederschläge

Die durchschnittlichen Summen der Monats- und Jahresniederschläge geben einen Überblick über die allgemeinen Verhältnisse des Wasserhaushaltes einer Region. Der Niederschlag hängt dabei, wie in Kap. 3.4.3.4 beschrieben, in erster Linie von der Seehöhe ab; weitere Einflussfaktoren sind der zentral-periphere Formenwandel sowie regionale geländeklimatische Unterschiede (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 197). Durch die geringe Ausdehnung des Gebiets und die Lage fernab der Alpen spielt der zentral-periphere Formenwandel kaum eine Rolle; die Auswirkungen der unterschiedlichen Seehöhe sind trotz der geringen Reliefenergie stellenweise feststellbar.

Das Minimum im Jahresverlauf ist einheitlich in den Wintermonaten Jänner und Februar zu verzeichnen, wobei das absolute Minimum knapp 14 mm im Februar an der Station 015 beträgt. Die höchsten Werte werden in den Sommermonaten Juni bis August erreicht: das absolute Maximum wird mit 135 mm an Station 026 im August erreicht. Den niedrigsten Wert im Jahresdurchschnitt erreicht die Station 044 mit knapp unter 600 mm, der höchste Wert mit knapp 800 mm wird an Station 041 erreicht.

Diese Werte sind im Vergleich mit den Messstationen der ZAMG deutlich zu niedrig; diese weisen sowohl für Bad Gleichenberg, als auch Feldbach für den gleichen Zeitraum (2007-2011) einen Durchschnittswert von 870 mm auf (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016). Auch im langjährigen Durchschnitt von 1981 bis 2010 liegt der Wert immer noch bei 828 mm (vgl. Land Steiermark 2013).

Die Gründe hierfür müssen in den Unterschieden bei den verwendeten Sensoren der ZAMG und des Wegener Centers sowie einem systemischen Messfehler gesucht werden (vgl. Kap. 4.3). SZEREBENYI (2014) schreibt in seiner Masterarbeit den im WegenerNet am öftesten verwendeten Friedrichs-Sensoren einen um durchschnittlich 20 % zu niedrigen Wert zu, was einerseits an der schlechteren Qualität der Messgeräte gegenüber jenen von Kroneis liegt, andererseits auch durch die fehlenden Daten für Schnee (aufgrund fehlender bzw. ausgefallener Beheizung, vgl. SZEREBENYI 2014, S. 69) zustande kommt.

Eine Erhöhung sämtlicher Werte um 20 % wurde überlegt, dann aber nicht vollzogen. Dieser Wert von 20 % ist ein Durchschnittswert, der von Station zu Station bzw. von Jahr zu Jahr stark schwanken kann (vgl. SZEREBENYI 2004, S. 69).

Die Niederschlagsdaten des folgenden Kapitels sind also die unveränderten Originaldaten, deren Werte schätzungsweise um durchschnittlich 20 % zu niedrig sind.

Tab. 28: Durchschnittlicher Niederschlag sowie die Seehöhe für die bearbeiteten Stationen des WegenerNet-Gebiets für den Zeitraum von 2007-2011 in Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittelwerten in [mm]. Hohe Niederschlagswerte sind blau, niedrige rot markiert; absolute Maximal- und Minimalwerte sind dunkler gekennzeichnet.

Nr.	Sh[m]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
007	308	16	15	45	33	76	119	99	124	89	48	33	36	154	341	169	67	**731**
011	300	20	18	42	33	75	90	76	112	77	41	27	33	150	278	145	70	**643**
015	297	16	14	42	32	75	122	100	125	82	48	32	35	149	347	163	65	**724**
017	385	17	17	45	29	75	106	90	114	76	47	29	35	148	309	152	70	**679**
020	330	16	15	45	35	71	101	98	121	88	53	34	42	150	320	175	74	**719**
021	337	16	16	44	36	70	100	95	121	88	57	35	42	149	316	179	73	**718**
026	314	16	15	45	35	92	115	96	136	90	52	34	34	173	346	176	65	**759**
029	383	16	16	46	34	78	128	101	132	95	57	36	38	158	360	187	70	**775**
032	322	24	22	46	29	74	94	83	108	75	43	30	47	149	285	148	94	**675**
033	361	18	17	44	32	77	109	98	124	91	56	35	40	153	330	182	74	**739**
036	341	16	16	43	28	69	96	97	124	90	57	37	42	140	317	183	75	**714**
037	330	24	18	42	36	61	76	90	121	80	48	34	40	138	287	162	82	**669**
038	274	19	16	43	36	70	98	98	123	90	52	35	39	149	319	177	74	**718**
041	341	16	15	45	34	98	126	99	131	98	55	38	40	177	356	190	71	**794**
044	288	17	18	38	25	62	92	81	99	72	39	30	26	125	272	141	61	**598**
046	280	17	15	40	29	72	111	85	107	81	50	33	36	141	302	164	68	**674**
054	348	18	18	48	33	93	117	97	131	95	57	36	41	175	345	188	77	**785**
055	320	16	16	45	31	93	117	99	126	94	53	35	36	169	341	182	68	**760**
056	318	17	16	47	33	91	123	97	129	97	55	36	39	171	348	189	71	**779**
069	257	16	14	38	38	62	96	91	118	83	52	33	34	137	305	167	64	**674**
071	375	17	16	40	27	77	100	92	112	83	49	30	35	144	304	162	69	**678**
072	337	28	22	48	32	70	106	91	120	88	51	38	40	149	317	177	89	**732**
074	394	29	26	49	31	73	87	87	116	86	50	41	46	153	290	177	100	**719**
076	319	19	17	46	34	83	116	105	125	92	57	38	40	162	345	186	75	**769**
077	302	25	21	47	34	79	111	106	123	92	57	42	41	160	340	190	87	**776**
078	372	16	16	40	33	74	104	92	115	85	54	34	39	147	311	173	72	**702**
082	276	26	22	42	36	56	91	86	107	78	48	34	39	135	284	159	87	**664**
094	370	15	18	41	34	67	92	94	116	81	53	34	37	142	302	167	70	**681**
097	392	14	15	34	33	63	94	90	117	77	47	34	34	130	301	158	63	**652**
101	304	25	21	45	28	86	103	102	109	87	51	34	37	160	315	171	83	**728**
109	316	15	16	40	33	63	91	91	117	80	50	33	36	137	299	162	66	**664**
111	343	16	19	42	38	68	98	100	128	86	56	37	44	148	326	180	79	**732**
113	312	15	19	42	34	69	97	100	118	77	44	33	35	145	315	154	68	**682**
117	305	18	17	47	33	93	120	103	115	91	56	37	42	172	337	184	76	**770**
122	520	16	19	38	33	68	101	98	115	88	40	31	37	140	315	159	72	**686**
123	429	15	18	43	37	70	102	99	119	87	56	36	39	150	320	179	72	**721**
127	310	16	18	40	34	66	99	92	121	86	48	33	40	140	312	167	73	**692**
129	332	18	17	39	30	85	109	96	107	91	54	35	36	154	312	181	70	**717**
131	350	18	19	46	34	89	125	101	112	88	57	36	42	169	338	182	79	**768**
132	295	29	24	44	33	76	94	95	115	87	48	33	42	153	304	168	94	**719**
133	338	20	18	48	37	87	108	107	115	92	54	37	43	172	329	183	80	**764**
135	305	27	25	44	35	67	97	92	108	87	50	35	40	146	297	171	91	**704**
136	328	18	18	43	33	66	91	95	112	83	52	35	40	141	298	170	76	**686**
139	307	23	34	49	33	62	98	90	124	89	52	42	45	143	311	183	101	**738**
143	344	19	17	44	35	79	101	99	105	90	52	34	41	158	306	176	77	**716**
145	279	17	16	36	26	59	85	88	102	78	46	29	40	120	274	152	72	**618**

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

7.2 Tages- und Jahresgänge

Nachfolgend wird der durchschnittliche Tagesgang des Niederschlags ausgewählter Stationen dargestellt, wobei es sich dabei um rein statistische Wahrscheinlichkeiten des Niederschlags handelt und keine realen Verläufe darstellt. Sämtliche Kurven steigen bis 05:30 Uhr an und verzeichnen um 07:30 ein erstes Minimum. Danach nehmen die Kurven einen regelmäßigen, leicht ansteigenden Verlauf, bis am Nachmittag erstmals deutliche Unterschiede zu erkennen sind. Nach einem Zwischenmaximum um 13:30 Uhr, wo die Werte teilweise über 0,12 mm/h steigen, wird gegen 17:30 Uhr das Hauptmaximum erreicht; in dieser Stunde fällt durchschnittlich bis zu 0,15 mm/h Niederschlag. Allerdings betrifft das nur die beiden Stationen 041 und 054, die auch insgesamt die höchsten Jahresniederschlagswerte erreichen; die Niederschlagswerte der anderen steigen nur geringfügig bzw. fallen im Falle der Stationen 122 und 145 bereits davor wieder ab. Diese zeitliche Diskrepanz ist ein Hinweis auf die meist vorherrschenden südlichen Strömungen, die zunächst die am weitesten südlich gelegenen Stationen 122 und 145 erreichen. Nach einem weiteren Minimum gegen 19 Uhr steigen die Werte wieder leicht an.

Auffallend ist auch die Tatsache, dass sich die beiden Stationen mit hohen Jahresniederschlägen auf Mittelhang-Niveau befinden, währenddessen die beiden Stationen mit den geringsten Jahresniederschlägen sich am Talboden bzw. im Unterhangbereich befinden. Eine gewisse Stauwirkung könnte also auch an diesen vergleichsweise niedrigen Riedeln auftreten, die dann etwas höhere Niederschläge am Hang zur Folge haben. Die Station 044 stellt generell einen Sonderfall dar, da diese Station am Dach eines Futtersilos in einer Höhe von 50 m über Grund befindet.

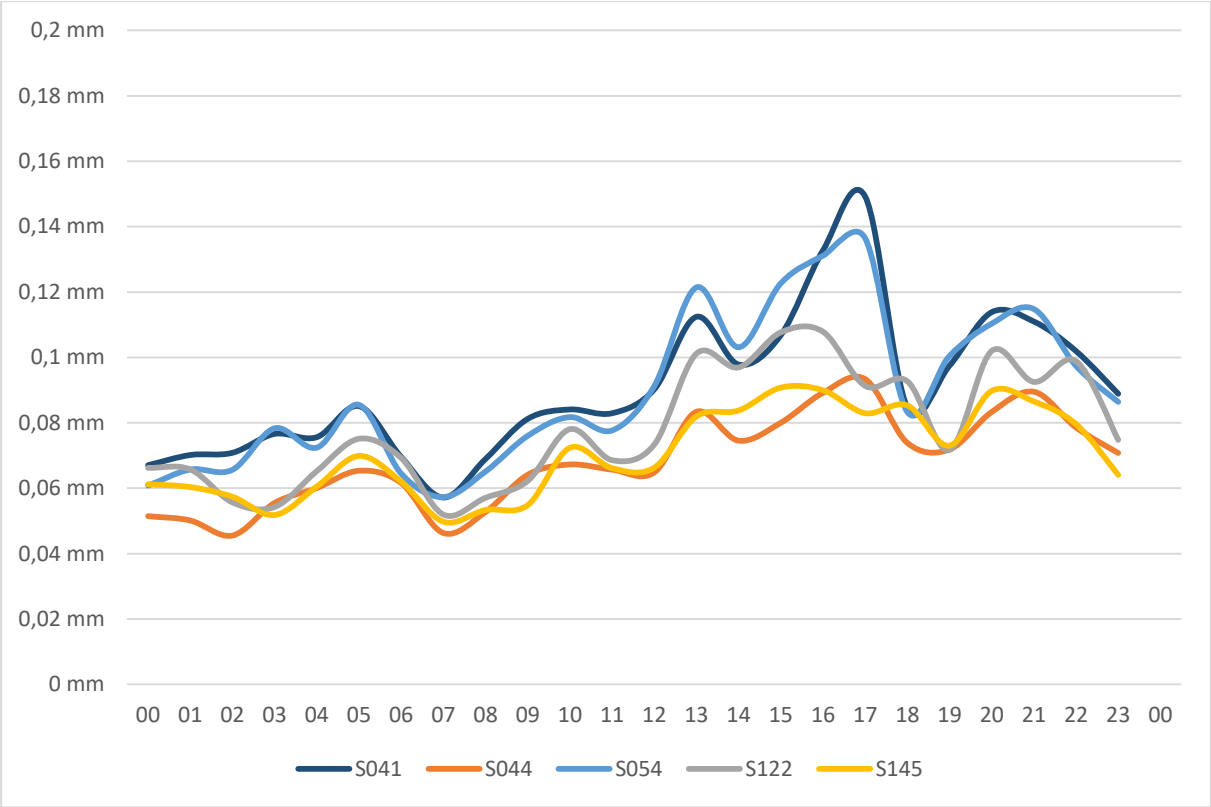


Abb. 96: Die durchschnittlichen Tagesgänge des Niederschlags ausgewählter Stationen für die Periode von 2007-2011 in [mm]. Jene Stationen mit dem höchsten Jahresniederschlag sind in Blautönen, jene mit dem geringsten in Orangetönen gehalten; die Höhenstation 122 ist als Sonderfall (siehe Erläuterung im Text) in grau dargestellt. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 97 zeigt die Jahresgänge ausgewählter Stationen des WegenerNet-Gebietes im Mittel der Jahre 2007-2011. Aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. Gegenüber des durchschnittlichen Jahresgangs von 1981-2010 des Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) fällt der unverhältnismäßig hohe Niederschlagswert im August auf, was wohl ein Resultat der kurzen Beobachtungsdauer ist. Daneben ist die Übereinstimmung mit niedrigen Werten in den Wintermonaten und dem Hauptanteil des Niederschlags in den Sommermonaten sehr gut. Vergleicht man die Stationen untereinander, so sind auf sehr engem Raum oft deutliche Unterschiede zu erkennen. Sowohl im Vergleich der Stationen 122 und 145 bzw. 041 und 044 gibt es vor allem hinsichtlich der Gesamtmenge klar erkennbare Unterschiede; die jeweils etwas höher gelegenen Stationen weisen in jedem Monat höhere Werte auf, wobei dies vor allem in den Sommermonaten deutlich ist. Auffällig ist auch die Tatsache, dass die Niederschläge vor allem im Juni in Richtung Osten deutlich abnehmen. Grundsätzlich weisen niedriger gelegene Stationen auch niedrigere Niederschlagswerte auf, was der Beschreibung in Kap. 3.4.3.4 gut entspricht.

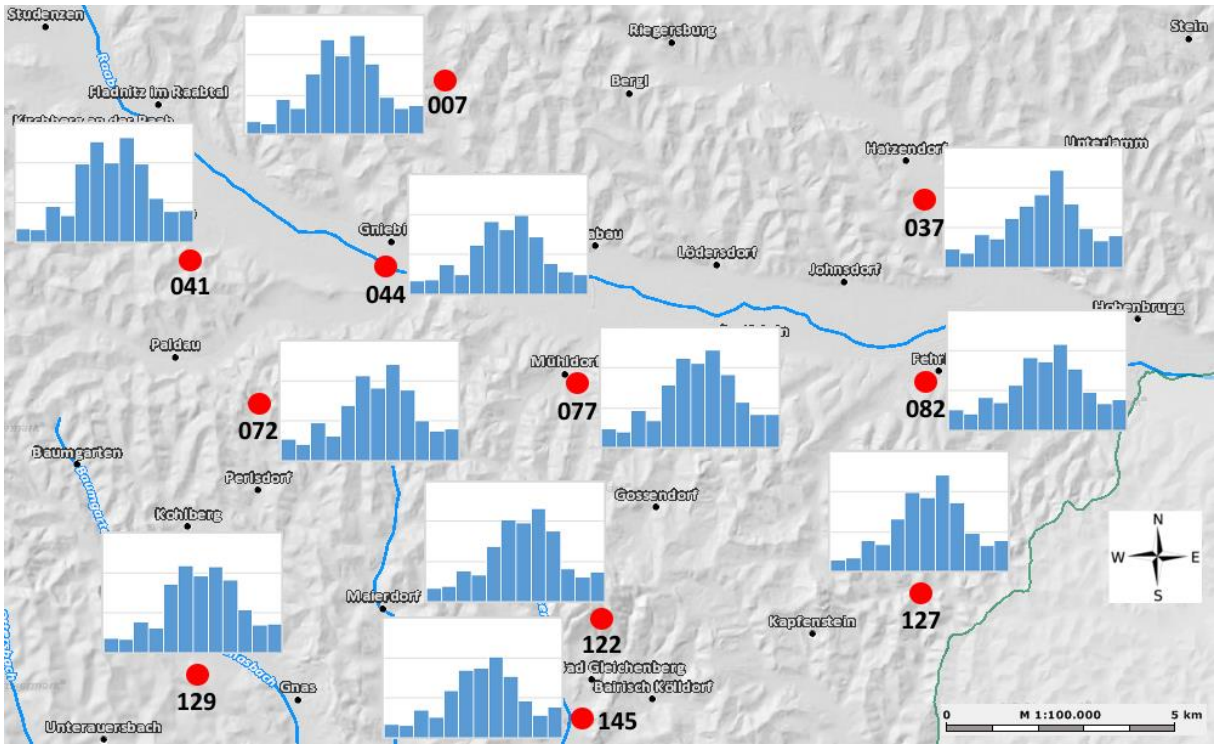


Abb. 97: Durchschnittliche Jahresgänge ausgewählter Stationen des WegenerNet-Gebietes in [mm] für den Zeitraum von 2007-2011. Die beiden horizontalen Linien bedeuten 50 bzw. 100 mm Niederschlag. *(Quelle: Wegener Center 2013, Kartengrundlage: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

7.3 Niederschlagsintensität

Auch bei den Tagen mit zumindest 1 bzw. 10 mm Niederschlag macht sich der Unterschied zu den Daten des Digitalen Atlas der Steiermark bemerkbar (Land Steiermark 2013). An der Station Bad Gleichenberg werden demnach 99 Tage mit zumindest 1 mm Niederschlag im Jahresdurchschnitt der Periode 1981-2010 erreicht, wobei es an etwa 27 Tagen davon zumindest 10 mm Niederschlag gab. Die Werte der ausgewählten Stationen im WegenerNet-Messnetz liegen da durchwegs darunter, was hauptsächlich auf die um 20 % zu niedrige Niederschlagssumme zurückzuführen ist (siehe Kap. 7.1). Der höchste Wert an Niederschlagstagen von zumindest 1 mm wird an den Stationen 041 und 072 mit knapp 92 Tagen erreicht, wobei an jeweils etwa 26 Tagen davon Mengen im Ausmaß von ≥10 mm fielen. Der niedrigste Wert mit knapp 74 Tagen wird an der Station 044 erreicht, wobei an 18 Tagen davon zumindest 10 mm Niederschlag fielen. Die Niederschlagsverteilung ist über das gesamte Untersuchungsgebiet relativ ausgeglichen, was aufgrund der vorangehenden

Analysen in Kap. 7.2 auch so zu erwarten war; die Talstationen erreichen wiederum die niedrigsten Werte.

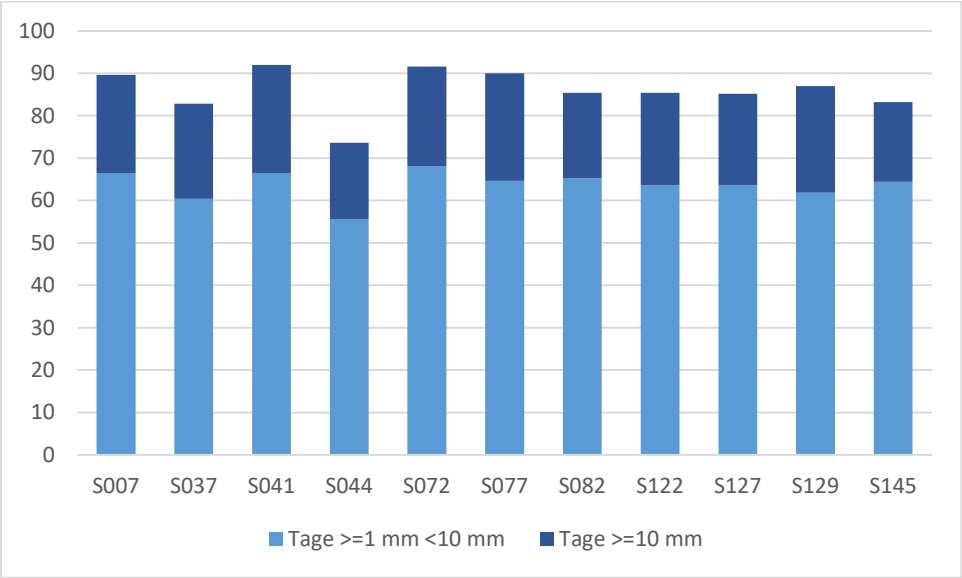


Abb. 98: Anzahl von Tagen mit Niederschlagswerten ≥1 mm bzw. ≥10 mm im Jahresdurchschnitt für ausgewählte Stationen des WegenerNet-Gebietes für den Zeitraum von 2007-2011 in [d]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die nächste Tabelle zeigt die Häufigkeiten von Starkregenereignissen. Laut Definition spricht man davon, wenn entweder innerhalb von fünf Minuten eine Menge von 5 mm bzw. innerhalb einer Stunde eine Menge von 17 mm Niederschlag fällt (Umweltzentrale 2013). Aufgrund der Auswertung der Niederschlagsdaten im Stundentakt kann nur auf letztere Variante eingegangen werden, wodurch die Ereignisse insgesamt wohl zu selten gewertet werden; sehr kurzzeitige Starkregenereignisse werden durch diese Auswertungsmethode nicht erfasst. Problematisch ist auch der bereits mehrfach erwähnte Messfehler der Messstationen: daher ist davon auszugehen, dass die Häufigkeiten noch zusätzlich vermindert dargestellt werden.

Die Tab. 29 zeigt die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit für Starkregenereignisse pro Jahr für ausgewählte Stationen. Die höchsten Werte mit 1,2 bzw. 1,4 Mal werden erwartungsgemäß von jenen Stationen mit dem höchsten Jahresniederschlag erreicht. Dies bedeutet, dass im Untersuchungsgebiet maximal 1,4 Mal (bzw. während maximal 1,4 h) im Jahr ein Starkregenereignis stattfindet. Der Minimalwert liegt bei Station 044 mit 0,4 Mal pro Jahr. Aufgrund des systemischen Messfehlers der Regensensoren sowie der Beschränkung auf eine der zwei laut Definition gültigen Möglichkeiten für Starkregenereignisse liegen die tatsächlichen Werte real sehr wahrscheinlich höher.

Tab. 29: Durchschnittliche Starkregenereignisse pro Jahr an ausgewählten Stationen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Messnetzes für den Zeitraum von 2007-2011 inkl. der Seehöhe in [m].

Station	Seehöhe [m]	Starkregenereignisse / Jahr
041	341 m	1,2
044	288 m	0,4
054	348 m	1,4
122	520 m	0,6
145	279 m	0,8

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

In der Tab. 30 sind die zehn höchsten Niederschlagssummen einer Einzelstunde im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 für die oben ausgewählten Stationen (041, 044, 054, 122 und 145) angeführt. Auffallend ist dabei, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen beträchtlich sind; die Station 044 ist in dieser Liste gar nicht zu finden. Auf der anderen Seite ist es aufgrund der relativen Kleinräumigkeit des Gebietes wenig verwunderlich, dass gewisse Niederschlagsereignisse (wie der 01.09.2011 nachmittags oder der 18.07.2009 vormittags) mehrfach auftreten. Der Maximalwert wird am 03.08.2011 an der Station 054 mit einem Niederschlag von 37,3 mm in einer Stunde erreicht.

Tab. 30: Starkregenereignisse der Stationen 041, 044, 054, 122 und 145 im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 in [mm/h].

Rang	Station	Datum	Uhrzeit	Niederschlag (mm/h)
1.	054	03.08.2011	21:30	**37,3**
2.	122	01.09.2011	16:30	**33,4**
3.	041	24.06.2008	17:30	**32,7**
4.	054	18.07.2009	10:30	**32,3**
5.	041	18.07.2009	10:30	**28,8**
6.	145	01.09.2011	16:30	**27,3**
7.	054	01.09.2011	16:30	**26,9**
8.	145	24.06.2008	18:30	**26,7**
9.	054	24.06.2008	17:30	**23,6**
10.	041	05.08.2010	20:30	**23,3**

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

7.4 Niederschläge und Trockenperioden in der Vegetationsperiode

Bei den Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode sind Werte um 500 mm wünschenswert, was sowohl für die Vegetation, als auch die Agrarwirtschaft und die Wasserversorgung eine ausreichend hohe Menge darstellt (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 200). Vorausschickend muss auch an dieser Stelle der Hinweis erfolgen, dass die Niederschlagswerte der WegenerNet-Stationen einen um etwa 20 % zu niedrigen Wert aufweisen dürften (siehe Kap. 7.1).

Bei den ausgewählten Stationen liegen die Werte in der Vegetationsperiode meist um 500 mm, jedoch weisen beispielsweise die Stationen 044 und 145 gerade 400 mm im Jahresdurchschnitt auf (Tab. 31). Diese niedrigen Werte beschränken sich, wie aus der Beschreibung der Niederschlagsstruktur in Kap. 7.1 gut zu erkennen ist, auf die Talböden. Das Maximum wird an Station 041 in 341 m Seehöhe mit 552 mm erreicht; diese Station befindet sich unweit der Station 044, an welcher das Minimum der Niederschläge gemessen wird. Auf sehr kleinräumigen Gebiet können also durchaus bemerkenswerte Unterschiede auftreten, die allerdings auch auf den kurzen Aufnahmezeitraum zurückzuführen sind. Der prozentuelle Anteil des Niederschlags in der Vegetationsperiode am Gesamtniederschlag liegt durchwegs zwischen 65 und 70 %.

Tab. 31: Die durchschnittlichen Niederschlagssummen ausgewählter Stationen des WegenerNet-Gebietes in [mm] für die Vegetationsperiode (Monate V-IX) und das Gesamtjahr für den Zeitraum von 2007-2011.

Stat.	Sh [m]	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Niederschlag in Vegetationsperiode [mm]	Jahresniederschlag [mm]
007	308	76,2	118,7	98,5	123,9	88,7	**506,1**	730,9
037	330	61,0	76,4	90,3	120,6	79,7	**428,0**	669,0
041	341	98,2	126,2	99,1	131,0	97,7	**552,2**	794,3
044	288	61,6	91,9	80,7	99,3	72,4	**405,9**	598,2
072	337	69,7	105,6	90,5	120,3	88,4	**474,5**	731,7
077	302	78,7	111,2	105,8	122,5	91,9	**510,1**	776,0
082	276	56,4	91,1	85,8	107,2	77,5	**418,0**	664,1
122	520	68,3	101,2	98,4	115,4	87,8	**471,1**	686,3
127	310	65,7	99,2	92,2	120,9	86,1	**464,0**	691,9
129	332	85,1	108,7	95,9	106,9	90,9	**487,5**	716,6
145	279	58,8	84,9	87,5	101,5	77,6	**410,3**	618,2

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Als Trockenperioden gelten laut dem Digitalen Atlas der Steiermark (PRETTENTHALER, PODESSER & PILGER 2010, S. 208) alle Tage, an denen nicht wenigstens 0,1 mm Niederschlag gefallen ist. Rein statistisch steigt also die durchschnittliche Dauer der Trockenperioden an, je weniger Niederschlagstage es gibt. Da im Sommerhalbjahr in der Steiermark durchschnittlich hohe Niederschlagsmengen zustande kommen, ist davon auszugehen, dass die Trockenperioden verglichen mit dem Jahresdurchschnitt niedriger ausfallen (PRETTENTHALER, PODESSER & PILGER 2010, S. 215). Der Klimaatlas Steiermark weist beispielsweise für das Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Messnetzes eine durchschnittliche Dauer der Trockenperioden im Jahresdurchschnitt von etwa vier Tagen, für die Vegetationsperiode von etwas mehr als drei Tagen aus.

Bei der Auswertung der Daten des WegenerNet wurden sämtliche Tage mit genau 0,1 mm Niederschlag auch noch als niederschlagsfreie Tage gewertet. Es gibt nämlich auffallend viele Tage mit genau diesem Wert, was ein weiteres Problem der Messsensoren sein könnte. Ohne diese Maßnahme würde die durchschnittliche Dauer der Trockenperioden in der Vegetationszeit bei 1,5 Tagen liegen, was ein unerklärbar geringer Wert wäre. Als Stationen für diesen Vergleich werden dieselben wie in Kap. 7.2 herangezogen, an denen die höchsten und niedrigsten Jahressummen erreicht werden: 041, 044, 054, 122 und 145.

Die Tab. 32 zeigt die Auswertung der durchschnittlichen Dauer sowie der jährlichen Häufigkeit von Trockenperioden in der Vegetationsperiode, die sieben Tage oder länger andauern. In den fünf Vergleichsjahren liegt die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode bei 2 - 3,2 Tagen, was etwas unter dem Schnitt der Daten aus dem Digitalen Atlas der Steiermark liegt. Die Andauer an Station 041, die sowohl beim Sommer- als auch beim Jahresniederschlag (~800 mm) den höchsten Wert der ausgewerteten Stationen erreicht, ist mit 2,0 Tagen am kürzesten. Die eindeutig längste Dauer wird mit 3,2 Tagen an der Station 044 erreicht, an der mit knapp 600 mm auch der geringste Jahresniederschlag aller ausgewerteten Stationen gemessen wird.

Hinsichtlich der Häufigkeit von Trockenperioden mit einer Dauer von ≥7 Tagen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, wobei die Unterschiede überraschend groß sind. So gibt es an Station 041 nur 0,8 Mal pro Vegetationsperiode eine derart lange Trockenzeit, während eine solche an der Station 044 sogar drei Mal pro Vegetationsperiode vorkommt.

Tab. 32: Durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode in [d] sowie die Häufigkeit von Trockenperioden mit einer Dauer von mindestens sieben Tagen pro Vegetationsperiode von ausgewählten Stationen des WegenerNet-Messnetzes für den Zeitraum von 2007-2011.

Station	Dauer Trockenperiode in [d]	Häufigkeit von Trockenperioden in der Vegetationsperiode
041	2,0	**0,8**
044	3,2	**3,0**
054	2,6	**2,0**
122	2,8	**2,0**
145	2,8	**2,2**

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Definition der Trockenperiode aus dem Digitalen Atlas der Steiermark, dass während einer Trockenperiode maximal 0,1 mm/d Niederschlag fallen darf, ist sehr restriktiv ausgelegt (vgl. Climate Service Center 2012). Auch ein etwas höherer Niederschlagswert hätte noch kaum einen positiven Effekt auf die Vegetation oder die Landwirtschaft. Eine international gebräuchliche Definition des ECA&D Project (European Climate Assessment & Dataset Project 2010) beschreibt eine Trockenperiode als *„beliebig viele aufeinanderfolgende Tage, in denen maximal ein Niederschlag von 1 mm/d fällt“*; diese Definition wird auch von der ZAMG verwendet (siehe Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2010).

Die Tab. 33 zeigt nun einen beispielhaften Vergleich der beiden Klassifizierungsarten, wobei man vor allem bei der Häufigkeit der Trockenperioden mit einer Länge von ≥7 Tagen eine deutliche Steigerung feststellen kann. Im Hinblick auf das Wachstum der Pflanzen ist die zweite Variante aussagekräftiger und realistischer.

Tab. 33: Die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode in [d] sowie die Häufigkeit von Trockenperioden mit einer Dauer von mind. 7 Tagen pro Vegetationsperiode im Vergleich der Klassifizierungen des Niederschlags von ≥0,1 mm/d und ≥1 mm/d der Station 041 für den Zeitraum von 2007-2011.

Station	Dauer Trockenperiode in [d]	Häufigkeit von Trockenperioden in der Vegetationsperiode
041 (≥0,1 mm/d)	2,0	0,8
041 (≥1 mm/d)	3,0	3,0

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Ein wichtiges Ereignis sind Starkregenereignisse während der Vegetationsperiode, bei denen laut Definition (siehe Kap. 7.3) innerhalb einer Stunde eine Menge von 17 mm Niederschlag erreicht werden müssen. In der Vegetationsperiode sind solche Ereignisse negativ zu bewerten, da unter gewissen Voraussetzungen ein massiver Oberflächenabfluss stattfinden kann. Das Ausmaß dieses Vorgangs hängt dabei von folgenden Faktoren ab: Infiltrationsverhalten der Böden, Anfangswassergehalt und Verschlämmungsneigung. Durch die Schaffung eines wasserstabilen, gut regenaufnehmenden Bodengefüges können die Folgen von Starkregenereignissen für die Landwirtschaft in Grenzen gehalten werden (KLAGHOFER 1985, S. 95).

Anhand der Tab. 34 kann man erkennen, dass die Häufigkeiten genau jenen des Gesamtjahres entsprechen; sämtliche Starkregenereignisse im Zeitraum von 2007 bis 2011 finden im Normalfall also in der Vegetationsperiode statt. Aufgrund dessen wird an dieser Stelle auf eine Analyse verzichtet und auf die Erläuterung in Kap. 7.3 verwiesen.

Tab. 34: Die durchschnittliche Häufigkeit von Starkregenereignissen (≥17 mm/h) in der Vegetationsperiode ausgewählter Stationen für den Zeitraum von 2007-2011.

Station	Starkregenereignisse / Vegetationsperiode
041	1,2
044	0,4
054	1,4
122	0,6
145	0,8

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

7.5 Auswertung der Niederschläge nach geländeklimatischen Parametern

Anders als bei der Temperatur sind ausführliche und detaillierte Analysen zum Niederschlag hinsichtlich der geländeklimatischen Parameter wenig zielführend. Vor allem aufgrund der geringen Höhenunterschiede und der Ähnlichkeit der Oberflächenformen im gesamten Untersuchungsgebiet ist mit keinen extremen Unterschieden zu rechnen. Auch der kurze Untersuchungszeitraum trägt zur Unsicherheit der Ergebnisse bei. Daher beschränkt sich die nachfolgende Analyse auf eine differenzierte Betrachtung nach den Parametern Seehöhe, Hanglage, Exposition und Tallage.

7.5.1 Seehöhe

Bei den Faktoren, die für die Höhe des Jahresniederschlags entscheidend sind (siehe Kap. 3.4.3.4), sind im Gebiet des WegenerNet-Messnetzes vor allem die Seehöhe und lokale Reliefeinflüsse zu beachten. Der zentral-periphäre Formenwandel sowie Mittelmeerzyklonen werden wie bei der Temperatur aufgrund des relativ kleinräumigen und flachhügeligen Untersuchungsgebiets vernachlässigt.

Die Abb. 99 zeigt den Niederschlag im Zusammenhang mit der Seehöhe, und das Bestimmtheitsmaß von 0,009 zeigt, dass praktisch keine Signifikanz zu erkennen ist. Die niedrigsten Werte werden auf einer Seehöhe von 280 m erreicht, die höchsten auf 340 m. Die Streuung ist dabei sehr groß, und auch an der höchsten Station in 520 m Seehöhe wird mit etwa 680 mm nur ein durchschnittlicher Wert erreicht.

Das bedeutet, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen stark auf regionale, geländeklimatische Faktoren zurückzuführen sind. Diese kommen bei einer näheren Betrachtung der Hanglagen (siehe Abb. 100) zum Vorschein.

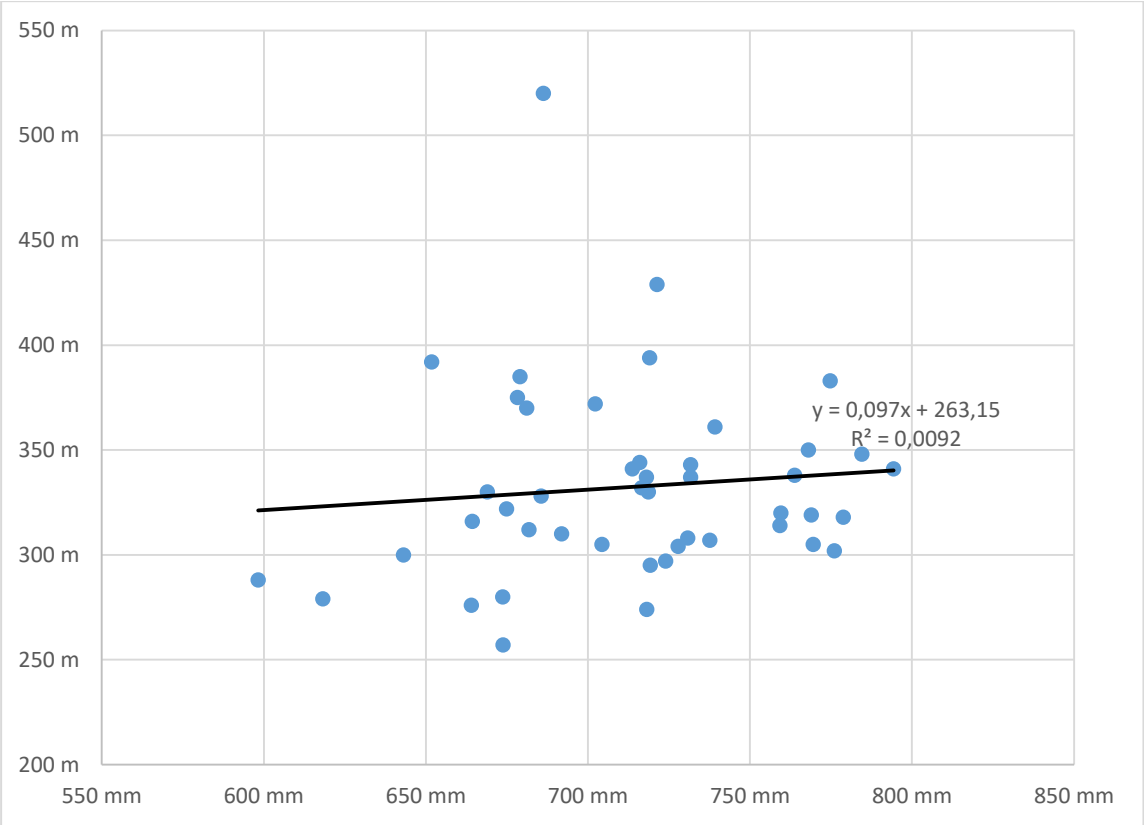


Abb. 99: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte aller untersuchten Stationen für die Periode von 2007-2011 in [mm] nach Seehöhe in [m]. R^2 beschreibt das Bestimmtheitsmaß, y die Formel zum Berechnen der Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

7.5.2 Hanglage

Die Abb. 100 zeigt die Stationen nach Hanglage gegliedert, die höchsten Werte werden dabei mit 730 mm in Mittelhanglage erreicht, die niedrigsten in Tal- und Kammlage. Schwer einzuschätzen sind die niedrigen Werte der Stationen in Unterhanglage, wobei hier wahrscheinlich andere geländeklimatische Parameter ausschlaggebend sind. Die Stationen in Kammlage, die ja theoretisch aufgrund der höheren und frei anströmbaren Lage höhere Werte aufweisen müssten, erreichen allerdings nur 700 mm Jahresniederschlag.

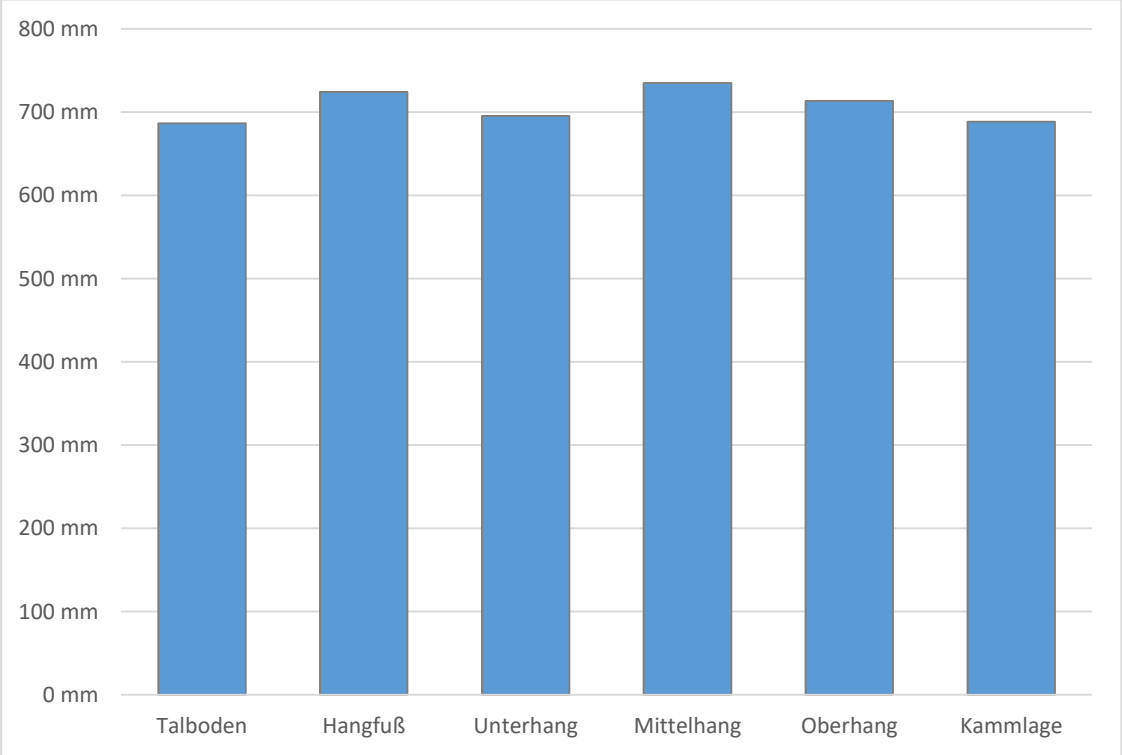


Abb. 100: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte der untersuchten Stationen nach Hanglage gemittelt für die Periode von 2007-2011 in [mm]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

7.5.3 Exposition

Die Analyse der Exposition zeigt einen klaren und eindeutigen Trend: an Stationen mit Süd-Exposition fällt mit durchschnittlich knapp 770 mm am meisten Niederschlag (Abb. 101). Dies stimmt sehr gut mit der Analyse aus dem Klimaatlas Steiermark überein (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 197), wo in diesem Gebiet von einer stärkeren Auswirkung der aus dem Süden kommenden Mittelmeerzyklonen die Rede ist. Offenbar gibt es dadurch trotz der geringen Seehöhenunterschiede und der Kleinräumigkeit des Untersuchungsgebietes deutliche Unterschiede bei den Niederschlagsmengen. Auch an Nord- und Nordwest-Lagen

werden Werte um 720 mm erreicht, wohingegen in Ost- und Nordost-Lagen die Niederschlagssummen knapp unter 700 mm bleiben.

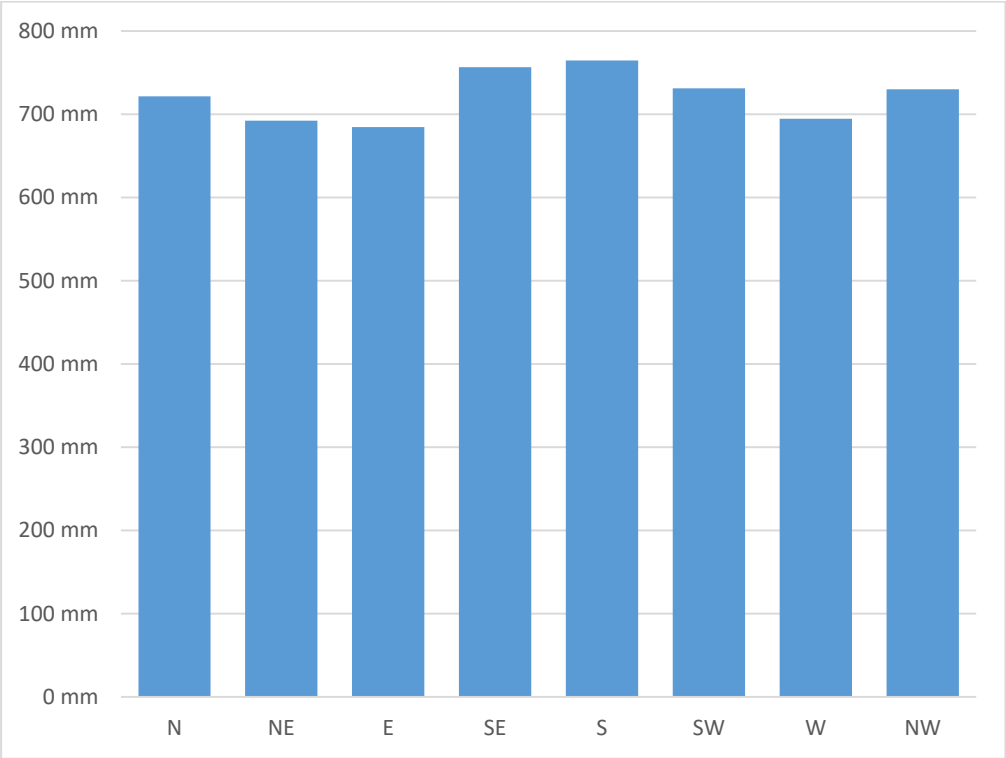


Abb. 101: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte aller untersuchten Stationen nach Exposition gemittelt für die Periode von 2007-2011 in [mm]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

7.5.4 Tallage

Bei der Tallage ist die Analyse schwierig, da davon auszugehen ist, dass ähnlich wie bei der Temperatur (siehe Kap. 6.8.4) andere Faktoren entscheidender sind. Die niedrigen Werte der Stationen am Talausgang sind einerseits darauf zurückzuführen, dass es nur drei Stationen dieser Kategorie gibt, und andererseits befinden sich diese in einer geringeren Seehöhe als die Vergleichskategorien und daher sollten die Niederschlagswerte auch aufgrund der bisherigen Analysen in Kap. 7.5.1 etwas niedriger sein. Bei Talmitte und Talschluss werden Werte von über 700 mm Jahresniederschlag erreicht (siehe Abb. 102).

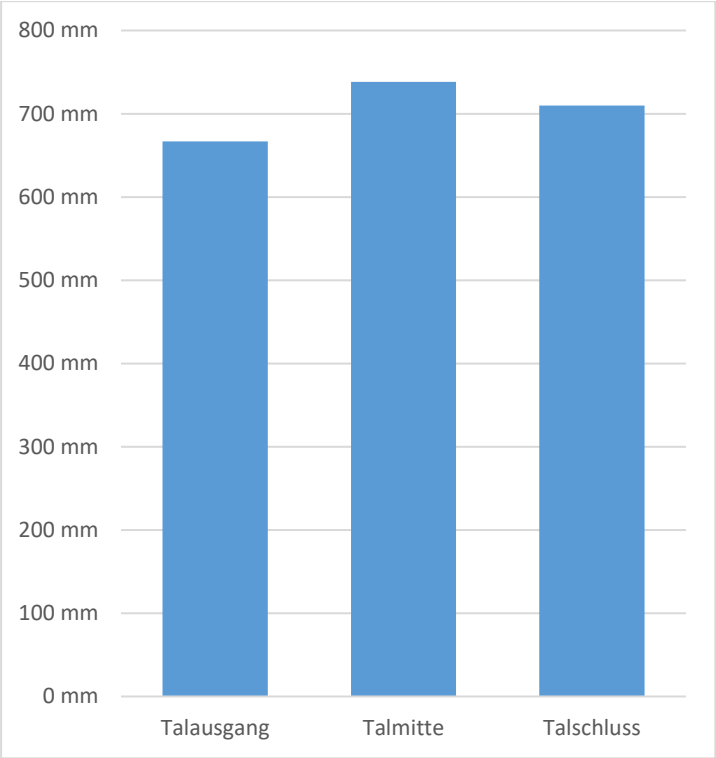


Abb. 102: Die durchschnittlichen Jahresniederschlagswerte der untersuchten Stationen nach Tallage gemittelt für die Periode von 2007-2011 in [mm]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

8. Wind

Gerade hinsichtlich der Kaltluftprozesse spielt der Wind eine wichtige Rolle, dennoch wird dieses Klimaelement in dieser Arbeit nicht so ausführlich wie die Temperatur behandelt. Die Gründe dafür liegen einerseits in der Charakteristik der Windparameter, die nur an wenigen Stationen erhoben und daher kaum lokalklimatisch behandelt werden können. Andererseits gibt es von OBERTH (2010) bereits eine ausführliche Arbeit über die Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet des WegenerNet-Messnetzes.

Analysen der Stationen nach Exposition oder Seehöhe (wie im Falle der Temperatur) sind nicht sinnvoll, da der Wind stark von geländeklimatischen Faktoren wie der Hanglage bzw. dem Talverlauf abhängig ist und Exposition und Seehöhe nur eine geringe Rolle spielen. Eine Analyse der Windparameter durch Kaltluftprozesse bei autochthoner Witterung wurde letztlich ebenfalls nicht durchgeführt. Da sich die Stationen in meist 10 m ü. Gr. befinden, können relevante Strömungen mit geringer Mächtigkeit gar nicht erfasst werden (siehe Kap. 2.2).

8.1 Allgemeine Charakteristik

Das Windfeld ist allgemein von vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeiten geprägt, wie es in Kap. 3.4.3.5 bereits als typisch für die Region beschrieben worden und in Tab. 35 ersichtlich ist. Die höchsten Geschwindigkeiten sind an der Station 074 in Kammlage sowie der Station 044 (in 55 m über Grund) zu verzeichnen, und im Jahresdurchschnitt wird maximal eine Geschwindigkeit von 2,2 m/s erreicht. Die zweite Station in Kammlage (Station 037) bildet einen Sonderfall, da sie von der Seehöhe her sehr niedrig liegt und der Kamm aufgrund der umrahmenden, etwas höher ragenden Riedel nicht frei anströmbar ist; hier liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit des Windes wie bei vielen anderen Stationen auch nur im Bereich um 1,2 m/s. Die niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeiten werden mit knapp unter 1,0 m/s an den Stationen 082 und 139 erreicht. Diese Werte decken sich auch gut mit den Auswertungen von OBERTH (2010, S. 55).

Tab. 35: Mittlere Windgeschwindigkeiten sämtlicher Stationen des WegenerNet-Messnetzes mit Erfassung der Windparameter für den Zeitraum von 2007-2011 in [m/s].

Stationsnr.	Seehöhe [m]	Lage	Messhöhe ü. Gr. [m]	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]
011	300	Tal	10	1,20
032	322	Oberhang	10	1,11
037	330	Kamm	10	1,22
044	288	Tal	55	2,14
072	337	Tal	18	1,37
074	394	Kamm	10	1,73
077	302	Mittelhang	10	1,11
082	276	Mittelhang	10	0,98
101	304	Tal	14	1,12
132	295	Tal	10	1,02
135	305	Mittelhang	10	1,27
139	307	Hangfuß	10	0,98

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Der Faktor Kalmenhäufigkeit (also Windgeschwindigkeiten von <0,5 m/s) hängt mit der mittleren Windgeschwindigkeit zusammen; an den Stationen 044 und 074, welche die höchsten Werte erreichen, liegt die Kalmenhäufigkeit unter 10 %. Der höchste Wert wird mit über 44 % an Station 139 erreicht, wo die mittlere Windgeschwindigkeit knapp unter 1,0 m/s liegt. Die übrigen Stationen bewegen sich meist im Bereich von 20 bis 30 %. Diese Werte liegen etwas höher als jene von Vergleichsstationen wie Laßnitzhöhe (ZAMG) für die Periode 1996 - 2000, welche im Nordwesten des Untersuchungsgebietes und mit 524 m Seehöhe höher liegt als sämtliche Stationen des WegenerNet-Gebietes; dort liegt die Kalmenhäufigkeit bei 10,2 %. An der Station Bad Radkersburg (ZAMG) südöstlich des Untersuchungsgebietes mit der Seehöhe von 208 m liegt die Kalmenhäufigkeit in derselben Periode bei knapp 23 % (PRETTENTHALER, PODESSER & PILGER 2010, S. 297). OBERTH (2010, S. 48 ff.) hat die Windrichtungen nach Tageszeit getrennt ausgewertet, wobei man zusätzlich erkennen kann, dass die Kalmenhäufigkeit bei fast jeder Station in der Nacht bedeutend höher, teilweise sogar mehr als doppelt so hoch wie tagsüber ist.

Die folgende Abb. 103 zeigt die durchschnittlichen Verhältnisse der Windrichtung und Windgeschwindigkeit der Stationen des WegenerNet für den Zeitraum von 2007-2011. Auch OBERTH (2010) hat eine ähnliche Auswertung für den Zeitraum des Jahres 2008 erstellt, auf die bereits im Kap. 3.4.3.5 Bezug genommen wurde (Abb. 25 und Abb. 26). Nachfolgend werden die Stationen auch einzeln analysiert.

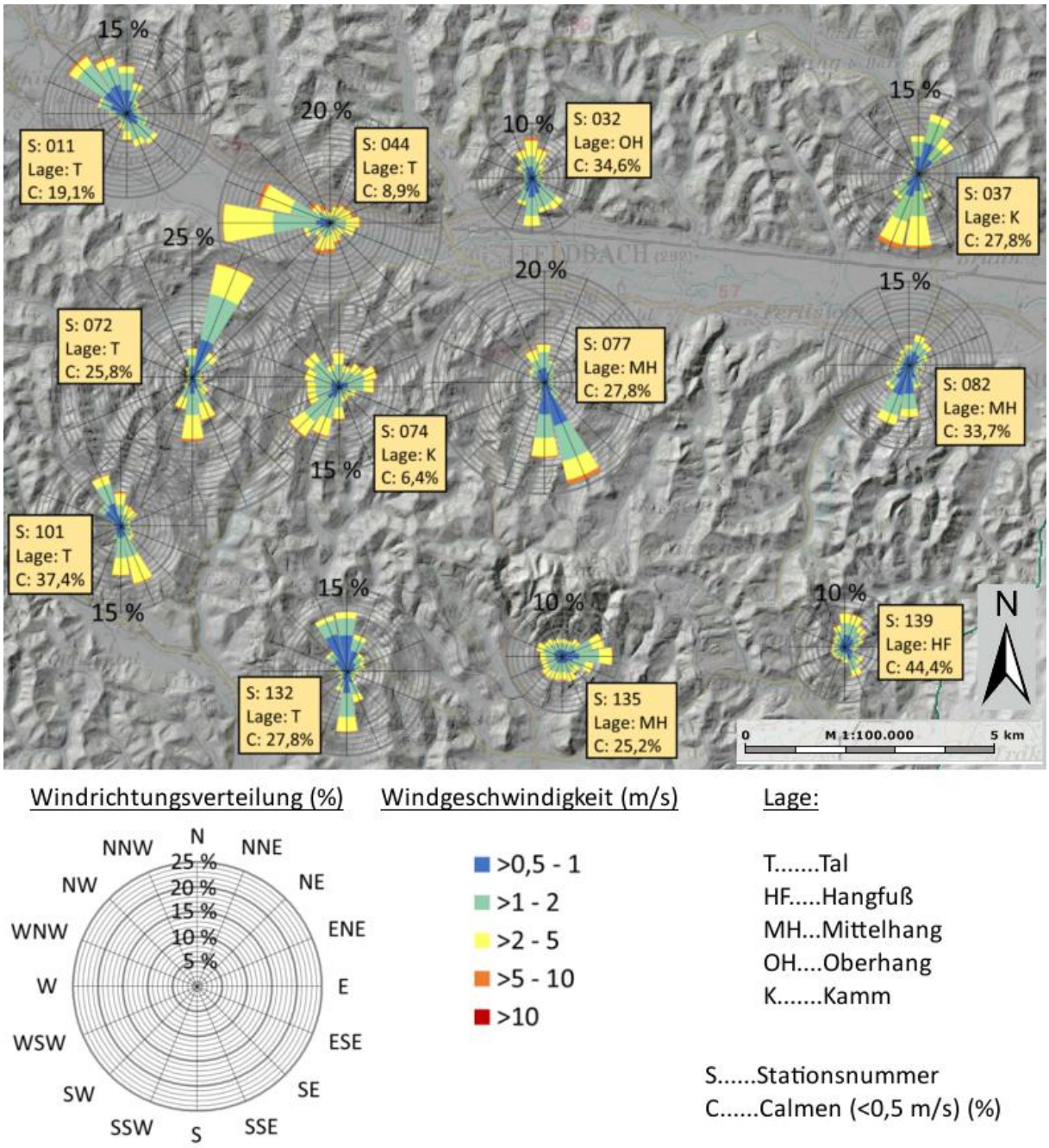


Abb. 103: Jahresmittel der Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten in [m/s] und Kalmenhäufigkeit in [%] für die 12 WegenerNet-Stationen mit Windparametern im Zeitraum von 2007-2011. *(Quelle: Wegener Center 2013, Kartengrundlage Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Bei den folgenden Beschreibungen der einzelnen Stationen wird hinsichtlich der Tag- und Nachtverteilung, die in obiger Abbildung nicht dargestellt ist, auf die Abb. 25 in Kap. 3.4.3.5 von OBERTH (2010) Bezug genommen.

Tallage:

An der Station 011 im Nordwesten im Raabtal herrschen eine Nordwest- bzw. Nord-Komponente sowie eine etwas schwächere Südost- bzw. Süd-Komponente vor, was der Richtung des Talverlaufs entspricht; letztere resultiert fast ausschließlich aus den Windeinflüssen tagsüber, während sich die Nordwest- bzw. Nord-Komponente aus einem stärker ausgeprägten Nacht- und einem schwach ausgeprägten Tag-Anteil zusammensetzt. An dieser Station (wie bei allen in Tallage) stimmen die Resultate mit jenen von OBERTH (2010) überein – der Anteil der Nordwest- bzw. Nord-Komponente beträgt in beiden Fällen rund 35 %, der Süd / Südost-Komponente knapp 20 %.

An der Station 044 ist eine stark ausgeprägte West- bzw. Westsüdwest-Komponente festzustellen, die etwa 32 % ausmacht; die Werte der anderen Windrichtungen erreichen jeweils maximal 5 %. An dieser Station ist die Verteilung der Windrichtungen tagsüber relativ ausgeglichen, währenddessen in der Nacht fast ausschließlich Winde aus West vorherrschen. Die Verteilung stimmt gut mit jener aus OBERTH überein, wobei die Süd-Komponente in dieser Darstellung weniger markant ausgeprägt ist.

An der Station 072 kommt der Wind zu 21 % aus Nordnordost; dies ist der höchste Wert einer einzelnen Himmelsrichtung aller 12 Stationen. Die zweite Hauptkomponente aus südlicher Richtung, die vor allem tagsüber auftritt, ist deutlich schwächer ausgeprägt. Diese beiden Hauptwindrichtungen beschreiben den Talverlauf dieses Seitentals der Raab.

An der Station 101 sind eine stark ausgeprägte, vor allem tagsüber auftretende Komponente aus Süd- bzw. Südsüdost-Richtung und eine etwas schwächer ausgeprägte aus Nordnordwest feststellbar. Dies stimmt auch mit der Ausrichtung des Tals überein.

An der Station 132 werden als Hauptwindrichtungen Nord bzw. Nordnordwest sowie Süd definiert, wobei letztere fast ausschließlich tagsüber auftritt. Auch diese Verteilung spiegelt die Ausrichtung des Tals wider. Im Unterschied zu OBERTH ist in dieser Auswertung die Nord- bzw. Nordnordwest-Komponente deutlich stärker ausgeprägt als jene aus dem Süden.

Hanglage:

Die Station 032 liegt zwar am Oberhang, allerdings auch nur in geringer Höhe über dem Seitental; die Charakteristik des Windes entspricht daher eher einer Tallage. Die Hauptwindrichtungen Nord bzw. Süd entsprechen den Richtungen des Seitentales, wobei Winde aus Ost oder West kaum auftreten. Wie bei OBERTH (2010) ist die südliche Komponente stärker ausgeprägt, was hauptsächlich an der Windrichtungsverteilung tagsüber liegt.

Die Primärstation 077 am Mittelhang liegt ebenfalls nur wenige Meter über dem Talboden des Seitentales und weist wieder eine sehr charakteristische Windrichtungsverteilung in Talrichtung auf. Die Verteilung mit einer stark ausgeprägten Nord- bzw. Nordnordwest-Komponente sowie einer schwächeren Süd-Komponente stimmt gut mit OBERTH überein.

Auch die Station 082 steht nur wenige Meter über dem Talboden des Seiten- bzw. Raabtales, wobei die Hauptwindrichtungen in diesem Fall nicht direkt mit dem Verlauf des Tals in Verbindung gebracht werden können. Der Wind kommt im Durchschnitt hauptsächlich aus Süd bzw. Südsüdwest, während das Seitental einen Verlauf von Südwest nach Nordost nimmt. Die Station steht allerdings auch im Einflussgebiet eines kleineren Seitentals, das aus Süd bis Südsüdost einmündet. Die zweite Hauptwindrichtung aus Nordnordost bzw. Nordost ist mit 11 % an dieser Station nur schwach ausgeprägt, weil diese Strömungen in der Nacht nur selten vorkommen.

Die Station 135 befindet sich ebenfalls nur wenige Meter über dem Talboden. Es gibt mit Ost bzw. Ostnordost nur eine Hauptwindrichtung, sonst ist die Windverteilung sehr ausgeglichen. Die Station liegt am Rande eines sehr flach ansteigenden Plateaus, wodurch eine ungehinderte Anströmung aus allen Richtungen möglich ist. Bei OBERTH erkennt man diese sehr regelmäßige Verteilung aufgrund der Unterteilung in Nacht- und Tagverhältnisse kaum, die Ergebnisse stimmen dennoch gut überein.

Kammlage:

Die Station 037 wird zwar als Station in Kammlage beschrieben, allerdings ist das Windfeld für eine solche Lage eher ungewöhnlich. Dies liegt daran, dass die Station mit 337 m Seehöhe einerseits vergleichsweise niedrig, andererseits auf einer flachen Senke des Riedelkamms mit höheren Erhebungen in näherer Umgebung liegt. Die Hauptwindrichtungen sind Nordnordost und Süd bzw. Südsüdwest, welche vom nahen Talverlauf bestimmt sein könnten. Die Süd / Südsüdwest – Komponente ist mit 28 % dominant, was auch gut mit den Ergebnissen von OBERTH (2010) übereinstimmt.

Die einzige Station in Kammlage mit charakteristischen Werten ist 074, die sowohl aufgrund der geringen Kalmenhäufigkeit von 6 %, als auch des vergleichsweise regelmäßig verteilten Windfeldes als nahezu frei anströmbare Kammstation definiert werden kann. Es gibt eine leichte Dominanz der Winde aus Südwest, während Winde aus Südost kaum eine Rolle spielen. Diese Ergebnisse passen gut mit der Auswertung von OBERTH überein.

8.2 Tages- und Jahresgang

Bei den Tages- und Jahresgängen wird wieder die Arbeit von OBERTH (2010, S. 96 f.) als gute Vergleichsmöglichkeit herangezogen, wobei der Zeitraum (2007-2011) und die Darstellungsvariante anders gewählt werden. Die Tab. 36 - 38 zeigen die Tages- und Jahresgänge der Windgeschwindigkeit für die Stationen 011, 044 und 074 in einer schematischen Form inklusive der Jahreszeiten- und Jahresmittelwerte. Die Station 011 steht für die Windverhältnisse in Tallage, die Station 044 in einer Höhe von 55 m über Grund für die Verhältnisse einer frei anströmbaren Station in Tallage ohne den störenden Einfluss der Bodenschicht. Die Station 074 liegt in Kammlage in einer Seehöhe von 394 m und stellt somit einen Vergleichswert in größerer Seehöhe dar (Erläuterungen zu den einzelnen Stationen siehe Kap. 8.1).

Prinzipiell hängt die jahreszeitliche Ausprägung der Windgeschwindigkeit von zwei Faktoren ab: Der thermischen Durchmischung der Atmosphäre einerseits sowie der Intensität horizontaler Druckgradienten andererseits. Ersteres sorgt in Tallagen aufgrund häufiger Inversionen für ein Winterminimum sowie ein Sommermaximum der Windgeschwindigkeit; das zuletzt genannte sorgt hingegen für ein Wintermaximum und ein Sommerminimum. Aus der Kombination dieser beiden Faktoren entsteht ein Maximum der Windgeschwindigkeit im Frühling mit einem Sekundärmaximum im Herbst sowie einem Winterminimum (WAKONIGG 1978, S. 324-325 sowie BLÜTHGEN & WEISCHET 1980, S. 377-378). Mit zunehmender Seehöhe nimmt der störende Einfluss der Bodenschicht ab, was zu einem Wintermaximum der Windgeschwindigkeit führt – die Tab. 36 - 38 zeigen allerdings, dass die Stationen des Untersuchungsgebietes wohl nicht hoch genug liegen, um dieser Kategorie zu entsprechen.

Da die Tab. 36 - 38 sehr viele Gemeinsamkeiten haben, werden vorerst diese herausgearbeitet, um dann auf die Unterschiede einzugehen. An allen drei Stationen wird in den Morgen- und Abendstunden ein Minimum der Geschwindigkeiten im tageszeitlichen Verlauf verzeichnet, was auf das Vorhandensein von Hangwinden hindeutet. Bis 07 Uhr (UTC) bleiben die Geschwindigkeiten unter 1,5 bzw. 2,5 m/s, erst danach steigen sie stark an und erreichen gegen 14:00 Uhr ihr Maximum, das je nach Monat knapp 3 – 4,2 m/s betragen kann. Danach sinken die Geschwindigkeiten wieder ab. Hinsichtlich des jahreszeitlichen Verlaufs gibt es ein eindeutiges Maximum im März, gefolgt vom April – hier sind die Geschwindigkeiten bis doppelt so hoch wie zur selben Tageszeit in den Wintermonaten Jänner und Dezember. Aus diesem Grund gibt es auch im Frühling die höchste mittlere Windgeschwindigkeit, womit eine gute Übereinstimmung mit der oben genannten Analyse des jahreszeitlichen Verlaufs für Tallagen erzielt wird.

An den Werten der Station 044 kann man erkennen, dass sich in einer Höhe von 55 m über Grund die störende Bodenschicht nicht mehr so stark auswirkt wie im Fall zuvor. Die Werte sind durchwegs höher, allerdings lässt sich auch hier kein Wintermaximum ausmachen.

Die Geschwindigkeitswerte der Station 074 in Kammlage sind etwas höher als an Station 011 im Tal, aber niedriger als bei Station 044 in 55 m ü. Gr. Auch an dieser Station gibt es kein Wintermaximum, wobei die Unterschiede zwischen Frühling und Winter geringer sind als bei den beiden anderen Stationen.

Im Vergleich zur Auswertung von OBERTH (2010) kann man im Falle der Station 011 von einer sehr guten Übereinstimmung sprechen, da sämtliche Charakteristika in beiden Darstellungen sehr ähnlich sind. Im Falle der Station 044 könnte man bei OBERTH ein zumindest sekundäres Maximum in den Sommermonaten herauslesen, was in dieser Auswertung nicht erkennbar ist. Die Werte der Station 074 wurden von OBERTH nicht ausgewertet.

Tab. 36: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 011 (10 m ü. G.) für den Zeitraum von 2007-2011 in [m/s].

Zeit	Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
00	0,8	0,9	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	0,9
01	0,8	0,9	1,1	1,1	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9
02	0,9	0,9	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9
03	0,9	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9
04	0,8	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9
05	0,8	1,0	1,0	1,1	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9
06	0,9	0,9	1,0	1,2	1,0	0,9	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	0,8	0,8	0,9	0,9
07	0,9	0,9	1,1	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,2	0,9	0,8	0,9	1,0
08	1,0	1,0	1,5	1,6	1,4	1,4	1,2	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	1,5	1,2	0,9	1,0	1,1
09	1,0	1,1	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,1	1,3	1,2	1,0	1,0	1,8	1,4	1,1	1,1	1,3
10	1,1	1,4	2,3	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,5	1,4	1,2	1,0	2,1	1,5	1,4	1,2	1,5
11	1,2	1,7	2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,6	1,5	1,4	1,1	2,3	1,6	1,5	1,3	1,7
12	1,3	1,9	2,7	2,3	2,1	1,8	1,7	1,5	1,7	1,5	1,5	1,3	2,4	1,7	1,6	1,5	1,8
13	1,3	2,0	2,8	2,5	2,2	1,9	1,8	1,5	1,6	1,4	1,5	1,3	2,5	1,7	1,5	1,5	1,8
14	1,2	2,0	2,9	2,5	2,2	1,9	1,8	1,5	1,6	1,4	1,4	1,2	2,5	1,7	1,4	1,5	1,8
15	1,1	1,8	2,8	2,4	2,2	1,8	1,7	1,4	1,4	1,1	1,1	1,2	2,5	1,6	1,2	1,4	1,7
16	1,1	1,4	2,4	2,3	1,9	1,6	1,5	1,2	1,1	1,0	1,1	1,1	2,2	1,5	1,1	1,2	1,5
17	1,0	1,3	1,8	1,7	1,5	1,5	1,2	1,1	1,2	1,0	1,0	0,9	1,7	1,3	1,1	1,1	1,3
18	1,0	1,2	1,6	1,3	1,3	1,3	1,0	1,1	1,0	0,9	1,0	0,9	1,4	1,1	1,0	1,1	1,1
19	1,0	1,1	1,4	1,2	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,3	1,1	0,9	1,0	1,1
20	1,0	1,0	1,4	1,1	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,3	1,0	0,9	1,0	1,0
21	0,9	1,0	1,3	1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	1,2	0,9	0,9	1,0	1,0
22	0,9	0,9	1,2	1,1	1,1	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	0,9	0,9	0,9	1,0
23	0,9	0,9	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	0,9

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Tab. 37: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 044 (55 m ü. G.) für den Zeitraum von 2007-2011 in [m/s].

Zeit	Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
00	1,6	1,9	2,2	2,5	2,1	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,9	2,3	1,9	1,9	1,8	2,0
01	1,6	1,8	2,2	2,4	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,9	1,8	1,8	2,2	1,9	1,8	1,7	1,9
02	1,7	1,8	2,2	2,4	1,9	1,9	2,0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,2	1,9	1,8	1,8	1,9
03	1,6	1,8	2,2	2,4	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,8	1,8	1,9	2,2	1,9	1,8	1,8	1,9
04	1,6	1,9	2,1	2,3	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	1,6	1,9	2,1	1,7	1,7	1,8	1,8
05	1,5	1,9	2,0	1,9	1,4	1,3	1,3	1,3	1,6	1,8	1,7	1,9	1,8	1,3	1,7	1,8	1,6
06	1,6	1,9	1,7	1,7	1,3	1,4	1,3	1,0	1,3	1,7	1,7	1,9	1,6	1,2	1,6	1,8	1,5
07	1,6	1,6	1,8	1,7	1,6	1,8	1,6	1,1	1,2	1,4	1,5	1,9	1,7	1,5	1,4	1,7	1,6
08	1,6	1,4	2,3	2,2	1,9	2,3	2,1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,8	2,1	2,0	1,5	1,6	1,8
09	1,6	1,5	2,9	2,7	2,5	2,6	2,5	2,0	2,0	1,8	1,6	1,7	2,7	2,3	1,8	1,6	2,1
10	1,5	1,9	3,3	3,2	2,8	2,8	2,8	2,1	2,3	2,2	1,8	1,6	3,1	2,6	2,1	1,7	2,4
11	1,7	2,4	3,7	3,3	3,1	2,9	3,0	2,4	2,5	2,3	2,2	1,8	3,4	2,7	2,3	1,9	2,6
12	1,8	2,5	3,9	3,4	3,4	3,2	3,2	2,6	2,6	2,4	2,4	2,0	3,6	3,0	2,5	2,1	2,8
13	1,8	2,6	4,0	3,6	3,6	3,4	3,4	2,8	2,7	2,4	2,5	2,1	3,7	3,2	2,6	2,2	2,9
14	2,0	2,7	4,2	3,8	3,7	3,5	3,5	2,7	2,8	2,5	2,3	2,0	3,9	3,2	2,5	2,2	3,0
15	1,8	2,6	4,2	3,6	3,8	3,4	3,4	2,7	2,7	2,3	2,0	1,9	3,9	3,2	2,3	2,1	2,9
16	1,7	2,3	3,8	3,8	3,5	3,2	3,1	2,6	2,4	1,8	1,7	1,8	3,7	3,0	2,0	1,9	2,6
17	1,7	2,0	2,9	3,1	2,9	3,0	2,7	2,2	1,9	1,7	1,7	1,7	3,0	2,6	1,8	1,8	2,3
18	1,7	2,0	2,6	2,3	2,4	2,5	2,3	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	2,4	2,2	1,8	1,8	2,1
19	1,8	2,0	2,4	2,2	2,1	2,2	2,0	1,7	1,9	1,9	1,8	1,8	2,2	2,0	1,9	1,9	2,0
20	1,8	1,9	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	2,1	2,0	1,8	1,8	2,2	2,0	2,0	1,8	2,0
21	1,7	1,8	2,3	2,3	2,0	2,1	1,9	2,0	2,2	1,9	1,8	1,9	2,2	2,0	2,0	1,8	2,0
22	1,6	1,8	2,2	2,5	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,9	2,3	2,1	2,0	1,7	2,0
23	1,7	1,8	2,2	2,6	2,2	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,9	2,3	2,0	1,9	1,8	2,0

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Tab. 38: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station 074 (10 m ü. G.) für den Zeitraum von 2007-2011 in [m/s].

Zeit	Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
00	1,5	1,6	1,9	1,7	1,6	1,6	1,5	1,3	1,4	1,4	1,4	1,7	1,8	1,5	1,4	1,6	1,6
01	1,5	1,5	2,0	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,4	1,4	1,5	1,7	1,8	1,4	1,5	1,6	1,5
02	1,6	1,6	1,9	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,8	1,7	1,4	1,4	1,6	1,5
03	1,5	1,6	2,0	1,6	1,4	1,5	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,8	1,7	1,4	1,4	1,6	1,5
04	1,4	1,5	2,0	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2	1,4	1,4	1,5	1,9	1,7	1,3	1,4	1,6	1,5
05	1,5	1,5	2,0	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,8	1,6	1,2	1,4	1,6	1,5
06	1,6	1,5	2,0	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,4	1,5	1,9	1,6	1,3	1,3	1,7	1,5
07	1,4	1,5	2,1	1,7	1,5	1,7	1,5	1,2	1,3	1,3	1,5	1,9	1,8	1,5	1,4	1,6	1,6
08	1,6	1,6	2,5	2,0	1,7	1,8	1,7	1,4	1,4	1,4	1,5	2,0	2,1	1,6	1,5	1,7	1,7
09	1,6	1,8	2,9	2,3	1,8	1,9	1,8	1,5	1,6	1,7	1,6	1,9	2,3	1,7	1,6	1,8	1,9
10	1,7	2,1	2,9	2,4	2,0	2,0	1,9	1,5	1,8	1,8	1,7	1,9	2,4	1,8	1,8	1,9	2,0
11	1,9	2,3	3,1	2,4	2,1	2,0	1,9	1,6	1,8	1,8	1,8	2,0	2,5	1,8	1,8	2,1	2,1
12	2,0	2,4	3,2	2,5	2,2	2,1	2,0	1,6	1,8	1,9	1,8	1,9	2,6	1,9	1,8	2,1	2,1
13	1,8	2,5	3,2	2,5	2,3	2,3	2,0	1,7	1,8	1,8	1,7	2,0	2,7	2,0	1,8	2,1	2,1
14	1,9	2,7	3,2	2,7	2,4	2,2	2,1	1,7	1,9	1,8	1,6	1,9	2,8	2,0	1,7	2,2	2,2
15	1,7	2,6	3,0	2,6	2,4	2,2	2,0	1,7	1,7	1,6	1,5	1,8	2,7	2,0	1,6	2,0	2,1
16	1,6	2,4	2,7	2,5	2,3	2,0	1,9	1,6	1,6	1,6	1,4	1,7	2,5	1,8	1,6	1,9	1,9
17	1,6	2,2	2,4	2,2	2,0	1,9	1,6	1,5	1,6	1,6	1,4	1,7	2,2	1,7	1,5	1,8	1,8
18	1,6	2,0	2,3	2,0	1,9	1,9	1,6	1,5	1,6	1,5	1,4	1,7	2,0	1,7	1,5	1,8	1,7
19	1,6	1,9	2,3	1,8	1,8	1,8	1,7	1,5	1,6	1,5	1,4	1,6	2,0	1,7	1,5	1,7	1,7
20	1,6	1,7	2,2	1,8	1,6	1,7	1,6	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	1,9	1,6	1,5	1,7	1,7
21	1,5	1,7	2,1	1,7	1,6	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,8	1,8	1,6	1,4	1,7	1,6
22	1,4	1,7	2,1	1,8	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,7	1,8	1,5	1,4	1,6	1,6
23	1,4	1,5	2,0	1,8	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,8	1,8	1,5	1,4	1,6	1,6

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

8.3 Starkwinde

Als Starkwind wird in diesem Kontext eine Windgeschwindigkeit von mindestens 6 Beaufort (Bft) verstanden, das entspricht mindestens 10,8 m/s. Die Tab. 39 listet die absoluten Häufigkeiten aller Stationen mit Windparametern auf, an denen Stärken von 6-8 Bft erreicht wurden; dabei werden die Fünf-Minuten-Werte herangezogen. Noch höhere Windgeschwindigkeiten wurden zu keinem Zeitpunkt an einer der Stationen erreicht.

Bei der Auswertung offenbaren sich deutliche Unterschiede der Werte an den einzelnen Stationen. An der Station 044 wurden mit Abstand die größten Häufigkeiten in jeder Kategorie erreicht. So gab es im Zeitraum von 2007-2011 an 482 Zeitpunkten der Fünf-Minuten-Werte

eine Windstärke von 6 Bft, 49 Mal 7 Bft und fünf mal 8 Bft. An dieser Station, die in 55 m ü. Gr. errichtet worden ist, wurden auch bereits die höchsten durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten gemessen (siehe Kap. 8.1). An den anderen Stationen sind die Häufigkeiten starker Winde deutlich niedriger: an der Station 037 wird im Untersuchungszeitraum beispielsweise 43 Mal eine Windstärke von 6 Bft gemessen. An der Station 132, die sich am Talboden befindet, gibt es sogar zu keinem Zeitpunkt eine Windgeschwindigkeit von 10,8 m/s oder mehr.

Tab. 39: Absolute Häufigkeiten des Auftretens von Wind der Stärken 6 (10,8 - <13,9 m/s), 7 (13,9 - <17,2 m/s) und 8 (17,2 - <20,8 m/s) laut Beaufortskala an den 12 Stationen des WegenerNet-Messnetzes mit Windparametern für den Zeitraum von 2007-2011 (Fünf-Minuten-Werte).

Windstärke	**011**	**032**	**037**	**044**	**072**	**074**	**077**	**082**	**101**	**132**	**135**	**139**
Starker Wind (Bft 6)	24	6	43	482	7	26	1	3	2	0	31	6
Steifer Wind (Bft 7)	3	0	3	49	5	0	0	1	1	0	0	0
Stürmischer Wind (Bft 8)	0	0	1	5	3	2	0	0	0	0	0	0

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

8.4 Verhältnisse bei autochthoner Witterung

Für die Verhältnisse bei autochthoner Witterung sind auch die Windparameter von Bedeutung, da sich bei dieser Wetterlage die lokalen Winde (Hang-, Talwinde) bestmöglich entwickeln können.

Die folgende Abb. 104 aus OBERTH (2010, S. 52 bzw. 56) zeigt die durchschnittlichen Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten der 12 Stationen mit Windparameter bei autochthoner Witterung. Sie unterscheidet sich von der Darstellung des gesamten Jahres nur im Detail (siehe auch Abb. 103, Kap. 8.1). Die Abb. 104 zeigt die Verteilung der Windrichtungen, wobei in fast allen Fällen der Unterschied zwischen nächtlichen Talauswinden und den Taleinwinden tagsüber gut erkennbar ist. Eine Ausnahme bildet unter anderem die Station 077, wo in der Nacht häufig Kalmen und praktisch kein Taleinwind tagsüber bemerkbar ist. Auffallend ist auch der große Unterschied beim Kalmenanteil (von 7,1 % bei Station 074 bis zu 89,5 % bei Station 139 in der Nacht), wobei die Kalmenanteile in der Nacht fast überall markant höher sind als tagsüber.

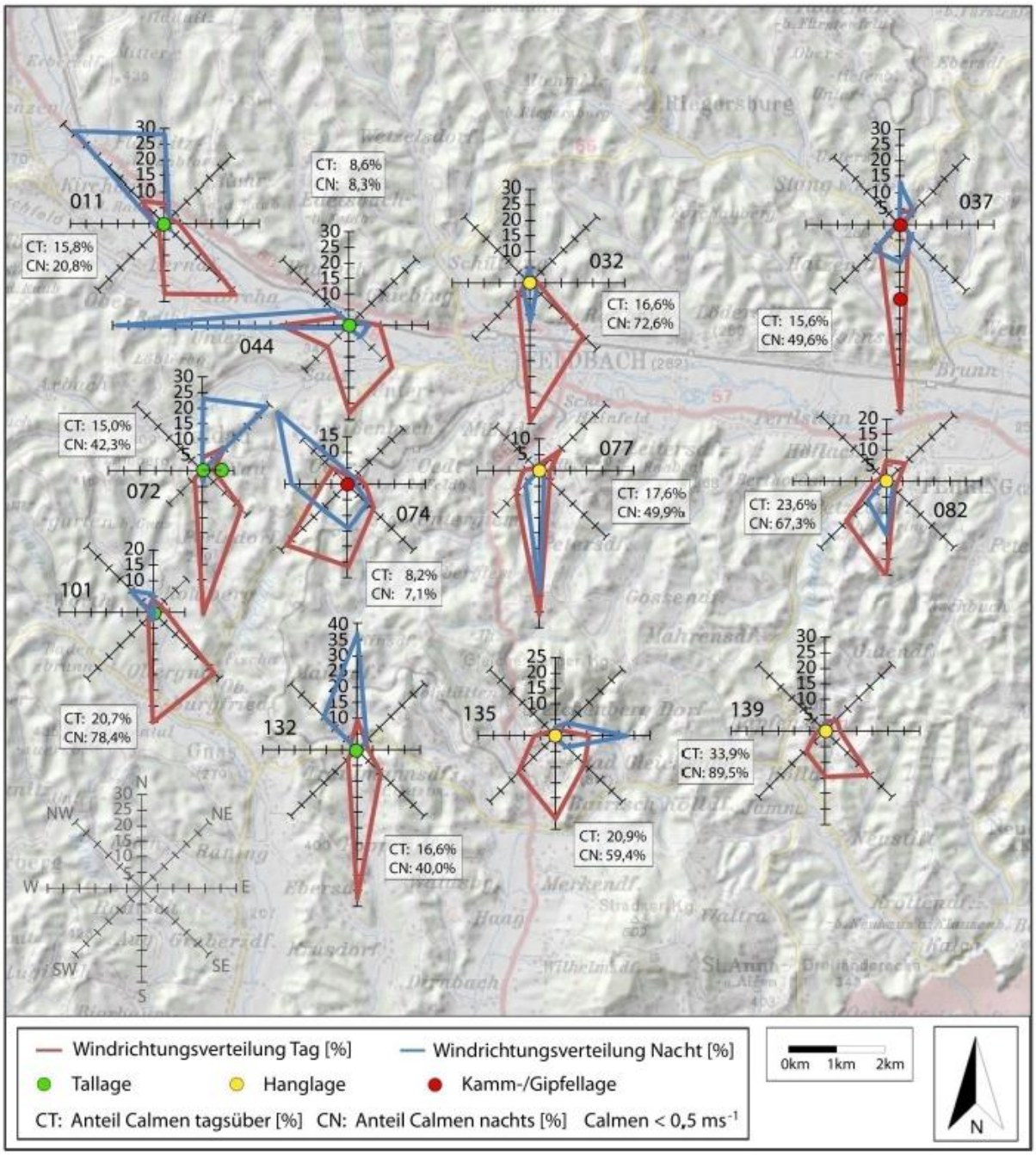


Abb. 104: Die Windrichtungsverteilung im WegenerNet-Messnetz bei autochthoner Witterung mit Unterteilung in Tages- (06 – 18 Uhr MEZ) und Nachtzeitraum (18 – 06 Uhr MEZ) für das Jahr 2008. *(Quelle: OBERTH 2010, S. 52)*

Ein interessanter Faktor sind die Hangwinde, die aber wie bereits erwähnt mit den vorhandenen Stationen kaum einzuschätzen sind. Sieben der Stationen mit Windparametern befinden sich darüber hinaus in Tal- oder Kammlage und spielen daher diesbezüglich keine Rolle. Von den fünf verbleibenden Stationen wurde beispielhaft die Station 077 herangezogen und die Werte während der Nachtstunden (20 - 04 Uhr) im Jänner bei autochthoner Witterung

analysiert. Die Daten stammen dabei von insgesamt 12 Tagen im Jänner, an denen im Zeitraum von 2007-2011 autochthone Bedingungen herrschten (Abb. 105).

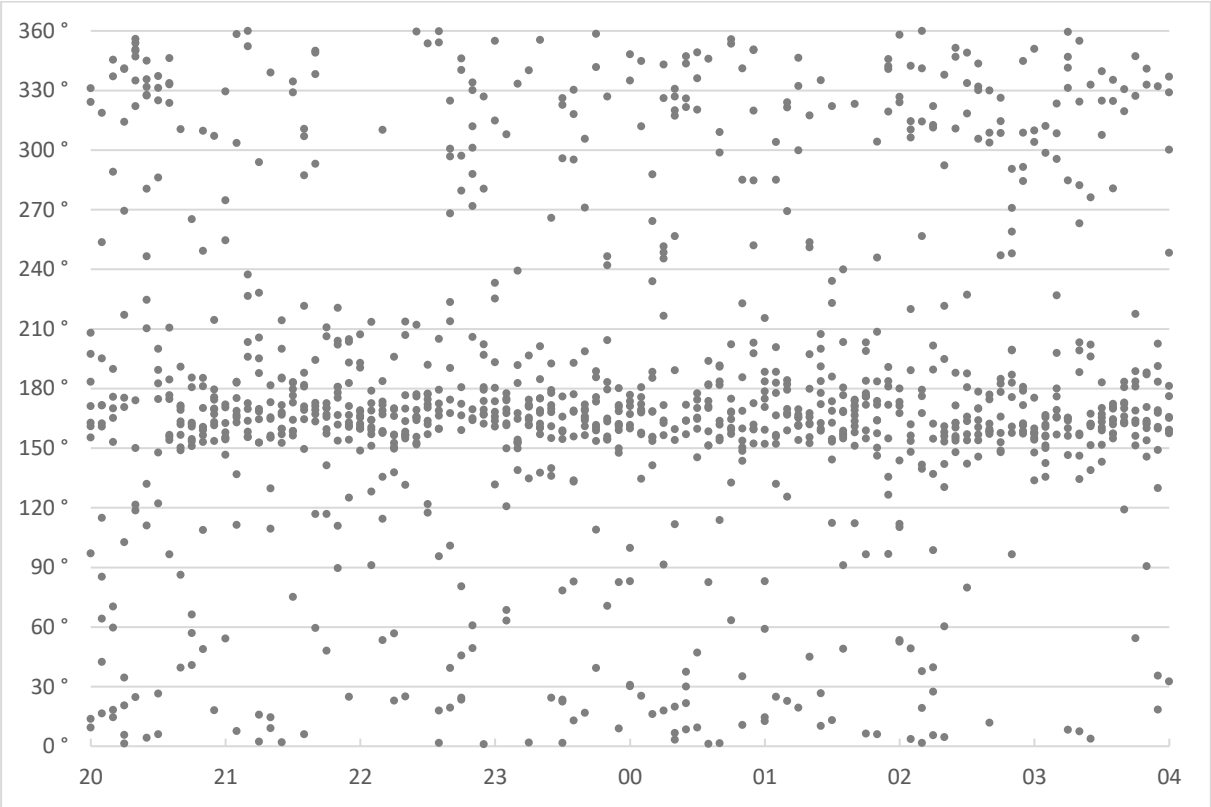


Abb. 105: Die Windrichtungen der Station 077 im Jänner bei autochthoner Witterung während der Nachtstunden (20 - 04 Uhr MEZ) für die Periode von 2007-2011 in [°]. (*Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Man erkennt die Dominanz der Windrichtung aus dem Segment zwischen 150° und 180°, also aus Süd- bis Südost-Richtung. Der Prozentsatz der Winde aus dieser Richtung liegt bei 46,2 %. Unter Einbeziehung der Lage dieser Station, die in der folgenden Abb. 106 dargestellt wird, erkennt man den Grund für diese Hauptwindrichtung: Die Station 077 liegt in einem Südsüdost-Nordnordwest gerichteten Tal im Süden der Stadt Feldbach, und Winde aus Süd bzw. Südost sind somit die typischen nächtlichen Talauswinde.

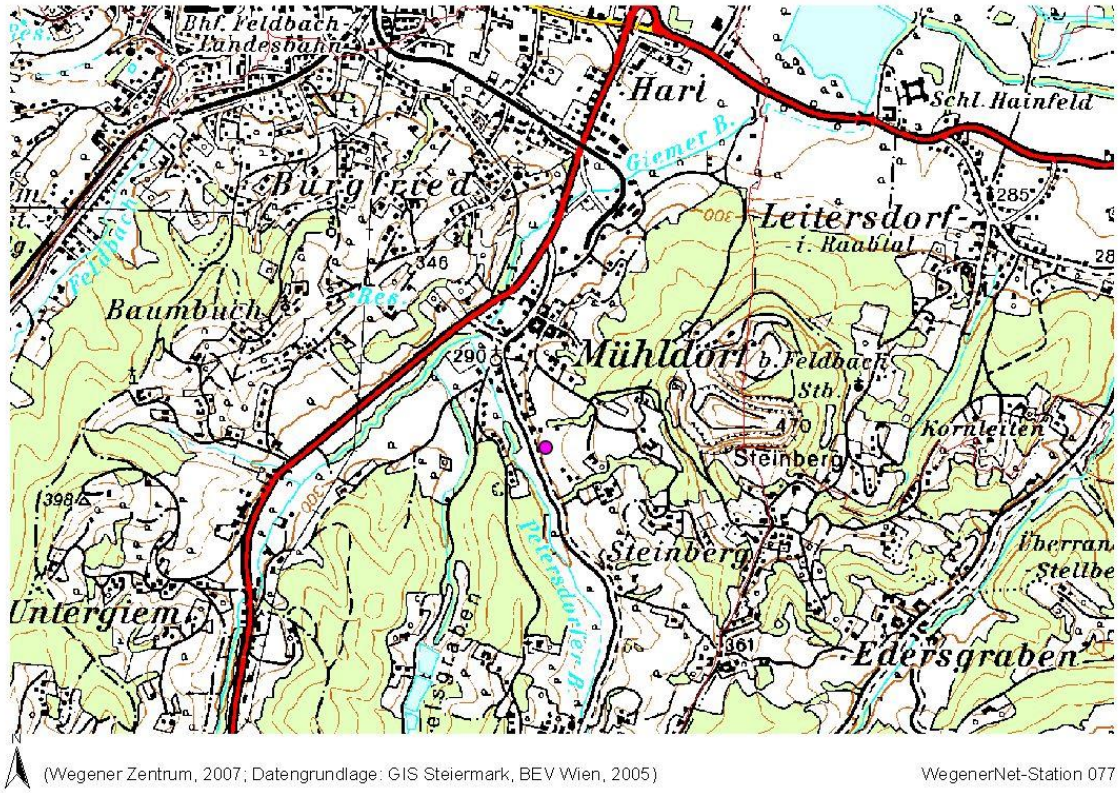


Abb. 106: Die Lage der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes (violetter Punkt in der Mitte der Karte). *(Quelle: Wegener Center 2013, Kartengrundlage: Land Steiermark 2013)*

9. Strahlungsbilanz und Luftdruck

Die Klimaelemente in diesem Kapitel sind keine Kernthemen dieser Arbeit und werden aus Gründen der weitgehend fehlenden Relevanz für diese Arbeit und geringer Datenverfügbarkeit nur kurz behandelt.

9.1 Strahlungsbilanz

Die Strahlungsbilanz wird nur an der Station 077 gemessen und liefert einen Überblick über die Strahlungsverhältnisse in der Region. Die Abb. 107 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Strahlungsbilanz, der weitestgehend den theoretischen Erläuterungen aus Kap. 3.4.3.1 entspricht. In den Monaten von November bis Jänner ist die Bilanz knapp negativ, ab dem Februar werden bereits positive Werte erreicht. Die höchsten Werte liegen bei 100-120 W/m² von Mai bis August, den Monaten mit der stärksten Sonneneinstrahlung. Der Mai hat einen vergleichsweise hohen Wert, was auf ausgedehnte Schönwetterperioden im Untersuchungszeitraum hindeutet. Der Abfall von August zu September ist sehr markant, auch von September zu Oktober ist ein großer Unterschied festzustellen; in dieser Zeit werden die Sonneneinstrahlung immer schwächer und die Bodennebelsituationen immer häufiger.

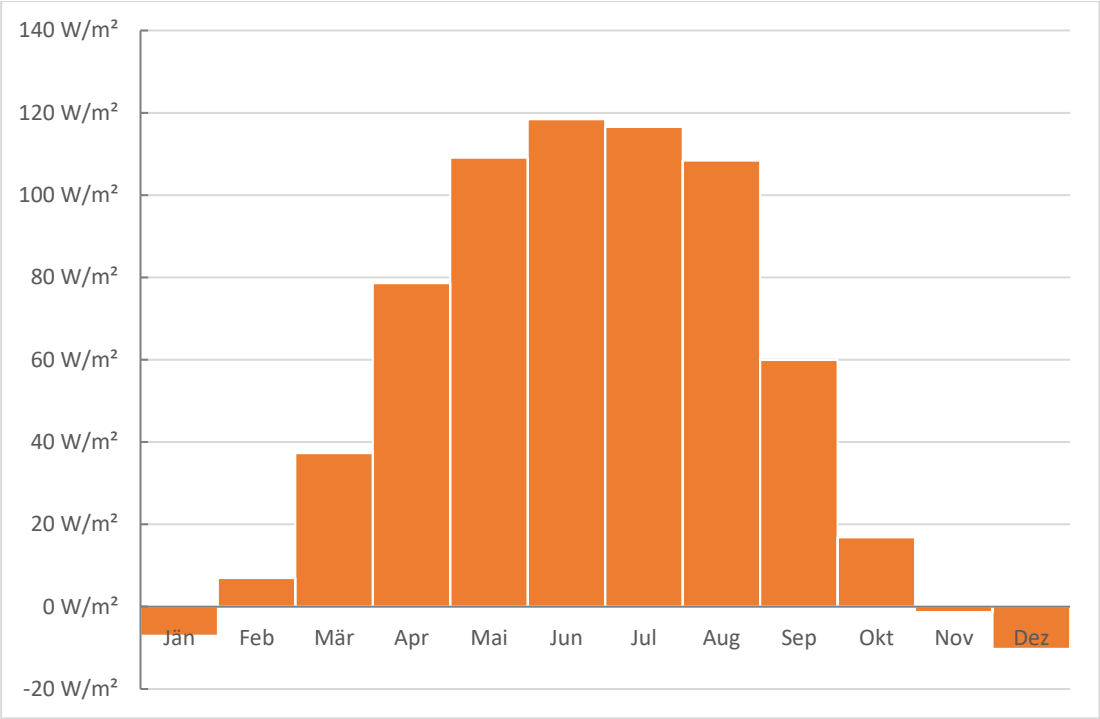


Abb. 107: Die durchschnittliche Strahlungsbilanz an der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes im Jahresverlauf für die Periode von 2007-2011 in [W/m²]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die mittleren Tagesgänge der Strahlungsbilanz im Jänner und Juli sind in Abb. 108 dargestellt. Im Juli werden in der Nacht sogar etwas niedrigere Werte als im Jänner erreicht, was auf eine verstärkte Ausstrahlung bzw. Energiezufuhr der Luft durch den Boden schließen lässt; die Werte liegen zwischen 20 und 04 Uhr (UTC) durchgehend bei rund -40 W/m². Im Jänner liegen diese zwischen 16 und 08 Uhr bei etwa -20 W/m². Tagsüber ist im Juli durch die starke Sonneneinstrahlung eine ausgeprägte Zunahme der Strahlungsbilanz bis zu einem Maximum von 450 W/m² um 12 Uhr feststellbar. Der Einbruch am Nachmittag ist auf die häufige Konvektionsbewölkung im Sommer zurückzuführen (siehe Kap. 3.4.3.3). Im Jänner werden hingegen zu Mittag nur rund 50 W/m² erreicht. Diese Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, die in Kap. 3.4.3.1 erläutert wurden. kurzfristige Schwankungen liegen in der sehr hoch aufgelösten Auswertung der Fünf-Minuten-Werte zugrunde.

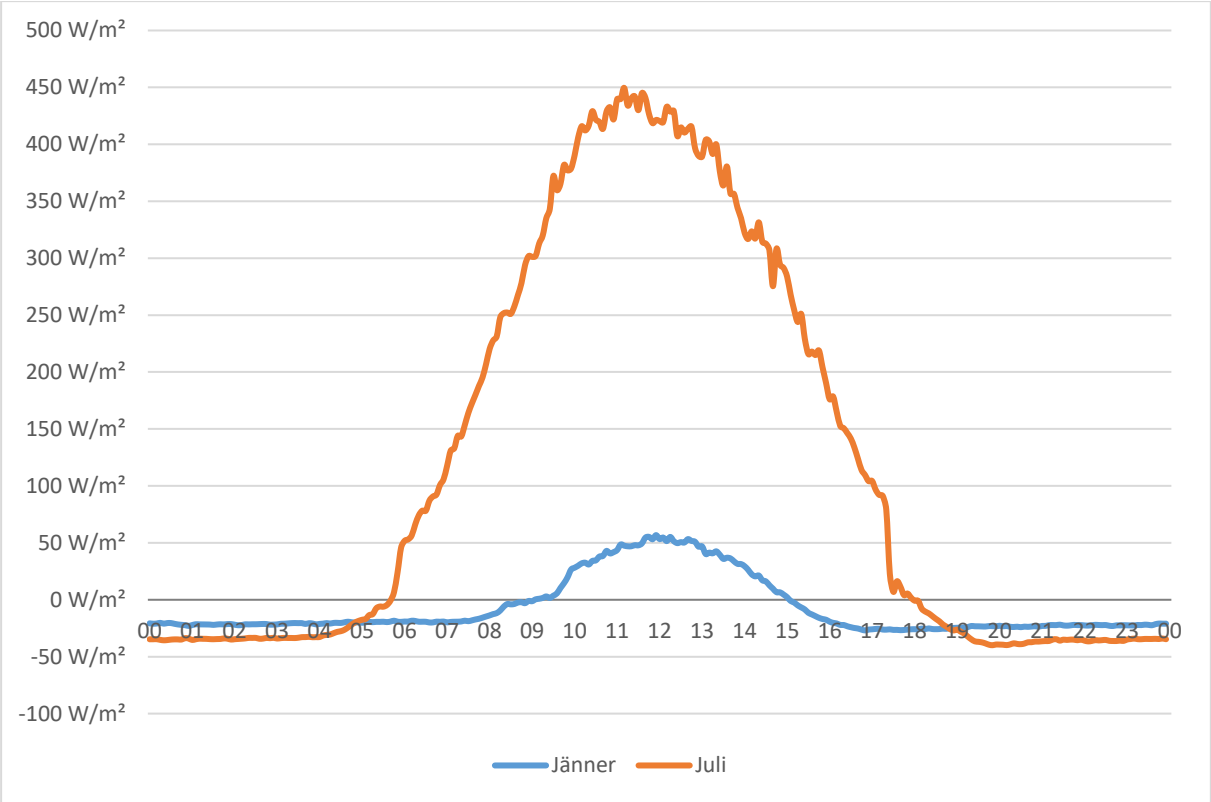


Abb. 108: Die durchschnittlichen Tagesgänge der Strahlungsbilanz für Jänner und Juli der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes als Mittel der Periode von 2007-2011 in [W/m²]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

9.2 Luftdruck

Der Jahresgang des Luftdrucks der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes ist in Abb. 109 dargestellt. Erwartungsgemäß gibt es nur geringe Schwankungen und die Werte sämtlicher Monate liegen innerhalb weniger Hektopascal (hPa). Das Maximum wird dabei mit knapp 981 hPa im Herbst erreicht, wo häufig stabile Schönwetterlagen vorherrschen. Das Minimum mit knapp 977 hPa wird im Frühling erreicht, wo die Wetterlage oft labil ist.

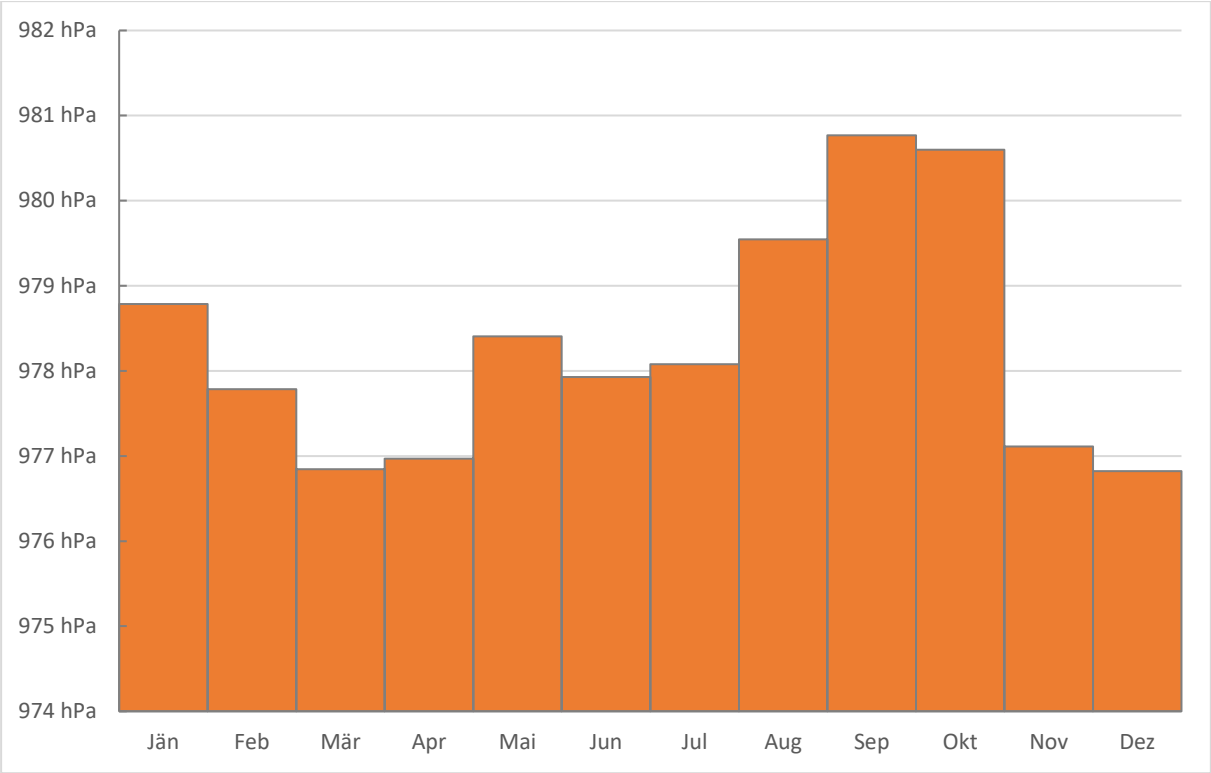


Abb. 109: Der durchschnittliche Luftdruck der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes im Jahresverlauf für die Periode von 2007-2011 in [hPa]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Der Tagesgang des Luftdrucks folgt im Wesentlichen jenem der Temperatur und weist im Normalfall zwei Maxima und zwei Minima auf (MALBERG 1997, S. 16). Die Gründe dafür liegen in der täglichen Erwärmung und Abkühlung der Luft. Die Abb. 110 zeigt den Tagesgang mit den beiden Maxima um 09 bzw. 21 Uhr, die sowohl im Jänner, als auch Juli auftreten. Im Juli werden fast durchgehend etwas niedrigere Werte als im Jänner gemessen, was besonders am Nachmittag und in der Nacht offensichtlich wird; der Unterschied beträgt rund 1 hPa.

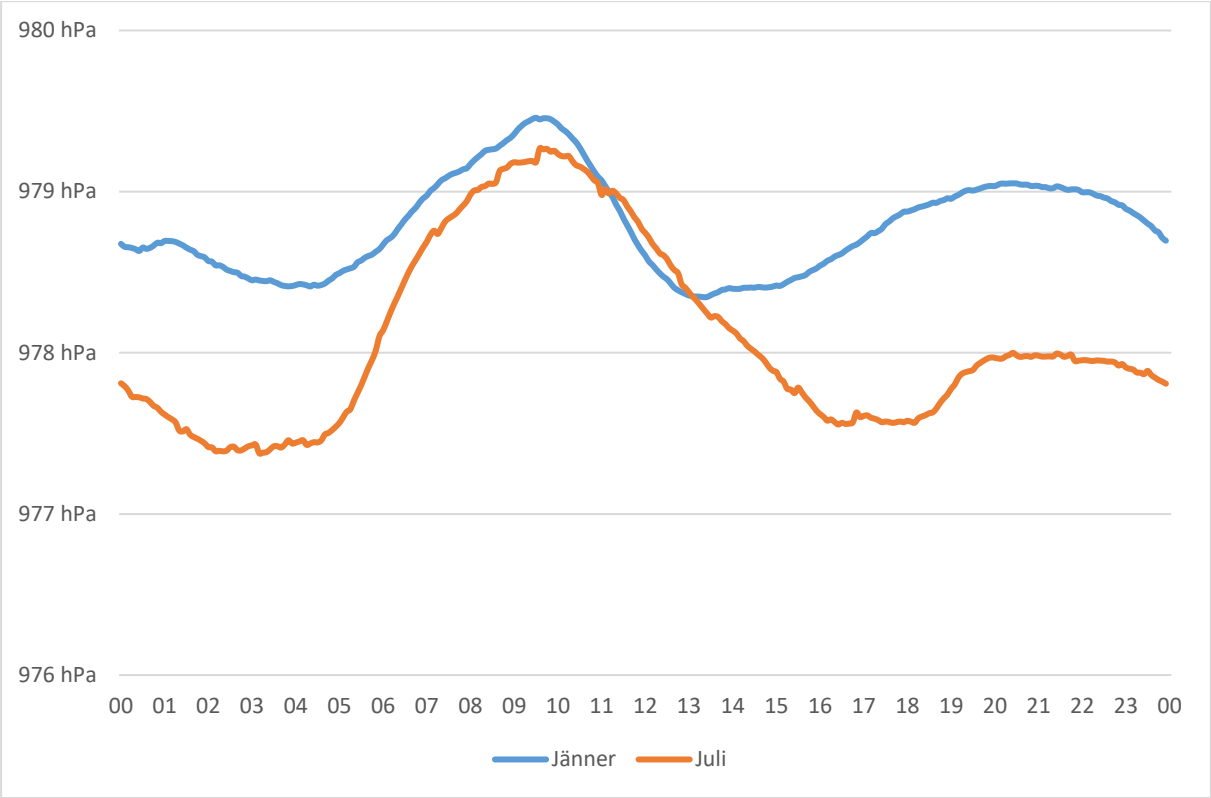


Abb. 110: Die durchschnittlichen Tagesgänge des Luftdrucks für Jänner und Juli der Station 077 des WegenerNet-Messnetzes als Mittel der Periode von 2007-2011 in [hPa]. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

10. Vergleich der Ergebnisse mit zusätzlichen Stationen im bzw. nahe des Untersuchungsgebietes

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse dieser Arbeit zunächst mit den Daten der ZAMG-Stationen in Feldbach und Bad Gleichenberg verglichen, die im Untersuchungsgebiet liegen und vor allem zur Datenvalidierung herangezogen werden. Danach werden zwei Stationen am Stradner sowie Kapfensteiner Kogel ausgewertet, um vor allem Vergleichswerte für die Station 122 (auf 520 m) in ähnlicher Seehöhe zu bekommen. Zusätzlich werden die Daten der Station Klöch analysiert, die in einer der durchschnittlich wärmsten Regionen der Steiermark bzw. Österreichs eingerichtet wurde.

10.1 Feldbach und Bad Gleichenberg (ZAMG)

Der Vergleich mit den ZAMG-Stationen in diesem Gebiet stellt nicht nur zusätzliches Datenmaterial dar, sondern liefert auch einen guten Vergleich der Messsensoren. Wie in Kap. 4.3 beschrieben, sind vor allem die eingesetzten Niederschlagsgeber des WegenerNet qualitativ etwas schlechter als jene der ZAMG; darüber hinaus gibt es einen Messfehler von etwa 20 %, der in Kap. 7 beschrieben wurde. Gerade in dieser Hinsicht ist ein zusätzlicher Vergleich mit den ZAMG-Daten sehr hilfreich.

Die Station Feldbach befindet sich im Ort auf einer Seehöhe von 320 m; die WegenerNet-Station 046 (280 m) liegt etwa 500 m Luftlinie entfernt in Richtung Nordnordost. Die ZAMG-Station Bad Gleichenberg liegt im Ort Bad Gleichenberg auf einer Seehöhe von 269 m; die beiden WegenerNet-Stationen 135 (305 m) und 145 (279 m) befinden sich jeweils etwa 500 m Luftlinie entfernt in Richtung Nordnordost bzw. Südsüdost (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2012b).

Die Tab. 40 zeigt die durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen im Jahresverlauf als Vergleich der ZAMG-Stationen mit den genannten WegenerNet-Stationen. Die Werte der Stationen in Feldbach unterscheiden sich erwartungsgemäß nur gering, wobei die Werte der ZAMG-Station regelmäßig um 0,1-0,5 K niedriger sind als jene der WegenerNet-Station 046. Im Fall des Vergleichs der Stationen 135 und 145 mit der ZAMG-Station Bad Gleichenberg passen die Werte in allen Monaten und Jahreszeiten sehr gut zusammen, wobei die ZAMG-Station regelmäßig um wenige Zehntel Kelvin niedrigere Werte aufweist.

Tab. 40: Durchschnittliche Tagesmitteltemperaturen der Monate, Jahreszeiten und der Jahre im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 der WegenerNet-Stationen 046, 135 und 145 sowie der ZAMG-Stationen Feldbach (Z FB) sowie Bad Gleichenberg (Z BG) in [°C].

Nr.	Sh[m]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
046	280	-0,3	1,7	6,0	12,0	15,9	19,2	20,7	20,0	15,3	9,3	4,8	-0,2	11,3	20,0	9,8	0,4	**10,4**
Z FB	320	-0,2	1,8	6,0	11,9	15,5	18,8	20,3	19,6	15,0	9,2	4,7	0,0	11,1	19,6	9,6	0,5	**10,2**
135	305	0,4	2,5	6,5	12,5	16,0	19,3	20,9	20,2	15,4	9,7	5,3	0,7	11,7	20,1	10,1	1,2	**10,8**
145	279	0,1	2,1	6,1	12,1	15,8	19,1	20,6	19,9	15,2	9,5	5,0	0,4	11,3	19,9	9,9	0,8	**10,5**
Z BG	269	-0,1	1,8	5,8	11,8	15,6	19,0	20,5	19,8	15,0	9,3	4,9	0,0	11,1	19,8	9,7	0,6	**10,3**

Quellen: Wegener Center 2013, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016; eigene Bearbeitung

Die Tab. 41 zeigt den Vergleich des Niederschlags derselben Stationen. Die Unterschiede sind in beiden Fällen klar erkennbar: die Werte der WegenerNet-Stationen liegen in jedem Monat klar unter den Vergleichswerten der ZAMG-Stationen. Dies liegt wie erwähnt an den unterschiedlichen Messsensoren und vor allem am Messfehler der WegenerNet-Stationen. Der größte Unterschied tritt dabei im Winter auf, wo neben dem Messfehler noch die Schwierigkeit der Erfassung des festen Niederschlags hinzukommt.

Tab. 41: Durchschnittlicher mittlerer Niederschlag der Monate, Jahreszeiten und der Jahre im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 der WegenerNet-Stationen 046, 135 und 145 sowie der ZAMG-Stationen Feldbach (Z FB) sowie Bad Gleichenberg (Z BG) in [°C].

Nr.	Sh[m]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
046	280	17	15	40	29	72	111	85	107	81	50	33	36	141	302	164	68	**674**
Z FB	320	35	24	51	35	85	137	105	138	101	50	43	54	170	379	194	113	**856**
135	305	27	25	44	35	67	97	92	108	87	50	35	40	146	297	171	91	**704**
145	279	17	16	36	26	59	85	88	102	78	46	29	40	120	274	152	72	**618**
Z BG	269	48	27	59	40	73	119	151	109	89	48	47	47	172	379	184	122	**857**

Quellen: Wegener Center 2013, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016; eigene Bearbeitung

Die Abb. 111 zeigt als nächsten Vergleich die Windrosen der WegenerNet-Station 135 mit der benachbarten ZAMG-Station Bad Gleichenberg. Im Falle der ZAMG-Station Feldbach konnte kein Vergleich gemacht werden, da die WegenerNet-Station 046 keine Winddaten aufzeichnet. Die prinzipielle Charakteristik der Windfelder ist ähnlich, da keine Windrichtung dominant auftritt und die Verteilung recht gleichmäßig ist. Allerdings erkennt man deutliche Unterschiede bei den Hauptwindrichtungen, die eindeutig von den lokalen Strömungsverhältnissen entlang der (Seiten-) Täler abhängig sind. Die WegenerNet-Station 135 liegt im Einflussbereich eines Seitentales aus Ost, während die ZAMG-Station Bad Gleichenberg in einem Nord-Süd-gerichteten Tal liegt; die Hauptwindrichtungen sind Nordnordwest sowie Süd bzw. Südsüdwest.

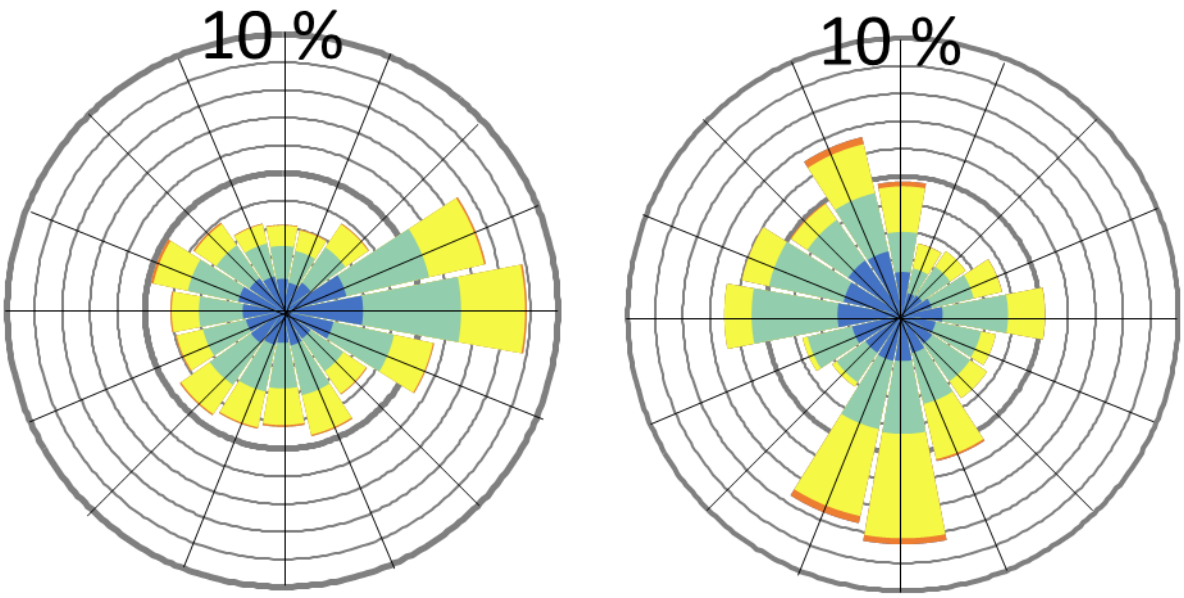


Abb. 111: Die mittlere Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit der WegenerNet-Station 135 (links) sowie der ZAMG-Station Bad Gleichenberg (rechts) für den Untersuchungszeitraum von 2007-2011 in [%] bzw. [m/s]. Die Windgeschwindigkeiten sind farblich dargestellt: Dunkelblau 0-1 m/s, Türkis 1-2 m/s, Gelb 2-5 m/s, Orange 5-10 m/s. *(Quellen: Wegener Center 2013, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016; eigene Bearbeitung)*

10.2 Stradner Kogel und Kapfensteiner Kogel

Die Station am Stradner Kogel wurde im Jahr 2010 am Sendemast Straden errichtet. Die Seehöhe beträgt 610 m, wobei die Station 23 m über Grund installiert wurde. Der Stradner Kogel befindet sich etwa 4 km in Richtung Südsüdost von der WegenerNet-Station 145

entfernt und liegt somit außerhalb des Untersuchungsgebietes; sie wird aufgrund der relativen Nähe für Vergleiche der Temperatur- und Inversionsverhältnisse herangezogen. Aus dem vorhandenen Datenmaterial von 16.09.2010 bis 11.11.2011 wurde der Zeitraum von 01.10.2010 bis 30.09.2011 ausgewählt, um genau ein Jahr analysieren zu können.

Die durchschnittlichen Lufttemperaturen im Jahresverlauf an dieser Station sind in Tab. 42 zusammengefasst. Die Werte des Stradner Kogels passen dabei sehr gut mit den beiden WegenerNet-Stationen überein, nur im Jänner ergibt sich eine große Diskrepanz von fast 2 K. Diese ist allerdings nicht mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, sondern viel mehr mit vermehrten Datenausfällen bei der Station Stradner Kogel zu erklären; daraus erklärt sich dieser zu hohe Wert. Die Werte passen also trotz der teils großen Höhenunterschiede gut überein, was in Kap. 6.1 bereits behandelt wurde – die Unterschiede sind im Jahresverlauf bei den mittleren Temperaturen nicht erkennbar.

Tab. 42: Die durchschnittlichen Temperaturen der Monate, Jahreszeiten und des Jahres der WegenerNet-Stationen 122 (520 m) und 145 (279 m) und der Station Stradner Kogel (633 m) jeweils im Zeitraum von 10/2010 – 09/2011 in [°C].

Nr.	Sh[m]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
122	520	0,4	0,1	6,1	12,9	15,5	18,6	18,9	21,1	18,6	8,1	7,0	-1,3	11,5	19,5	11,2	-0,3	**10,5**
145	279	-0,1	-0,2	5,8	12,5	15,3	19,2	19,4	20,8	18,0	8,1	7,0	-1,1	11,2	19,8	11,0	-0,5	**10,4**
Strad.	510	2,1	0,2	5,8	12,6	15,3	18,5	18,7	20,9	18,5	8,1	7,5	-0,1	11,3	19,4	11,4	0,7	**10,7**

Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2012; eigene Bearbeitung

Die Abb. 112 zeigt die Jahresgänge der oben genannten Stationen im Zeitraum von 10/2010 - 09/2011. Der hohe Wert des Jänners an der Station Stradner Kogel fällt sofort auf, dies ist auf Datenlücken zurückzuführen; ansonsten verlaufen die Kurven dieser Station und Station 122 beinahe identisch. Nur die Werte im November und Dezember sind am Stradner Kogel um rund 1 K höher als bei Station 122. An der Station 145 sind die Werte im Hochsommer (Juni und Juli) um maximal 1 K höher als an den beiden anderen Stationen. Diese Darstellung liefert einen wichtigen Hinweis darauf, dass die Station 122 durchaus normale Werte für eine Lage in dieser Seehöhe liefert und keinen Extremfall darstellt.

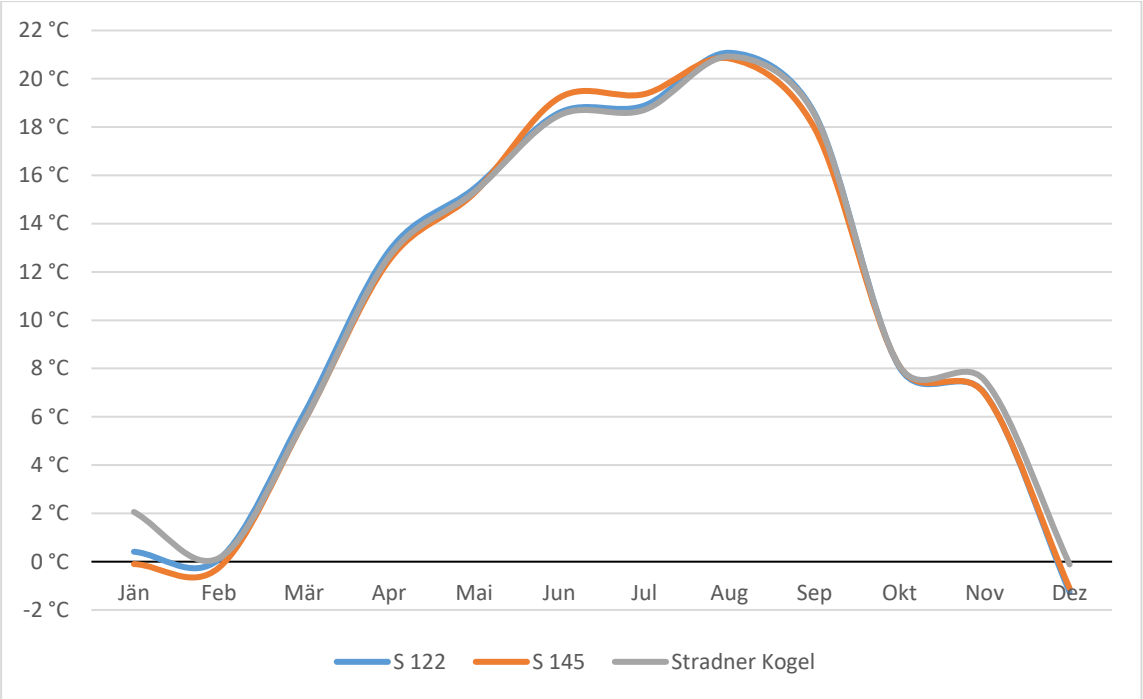


Abb. 112: Die Jahresgänge der WegenerNet-Stationen 122 und 145 sowie der Station Stradner Kogel (633 m) im Zeitraum 10/2010 – 09/2011 in [°C]. *(Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2012; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 113 zeigt nun die Tagesgänge der ausgewählten Stationen im Zeitraum von 10/2010 - 09/2011. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Station 122 und der Station Stradner Kogel, wobei sich letztere durch einen viel ausgeglicheneren Tagesgang auszeichnet. Die Unterschiede betragen dabei in der Nacht bis in die frühen Morgenstunden bis zu 2 K, um die Mittagszeit sind die Verhältnisse hingegen fast ausgeglichen. Diese doch eher überraschende Differenz liegt hauptsächlich an den lokalen Gegebenheiten an der Station Stradner Kogel, die ja nicht in 2 m über Grund, sondern in einer Höhe von 23 m inmitten eines Waldes angebracht ist.

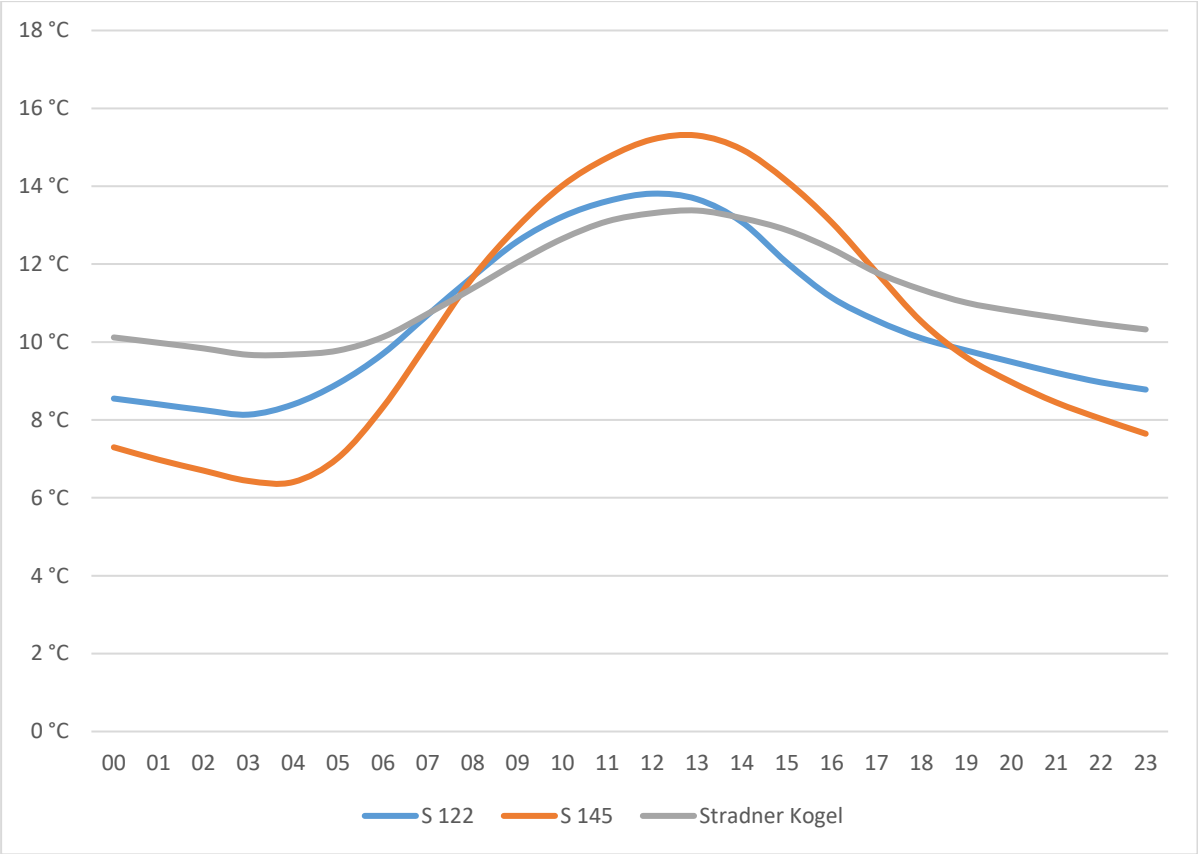


Abb. 113: Die Tagesgänge der WegenerNet-Stationen 122 (520 m) und 145 (279 m) sowie der Station Stradner Kogel (633 m) im Zeitraum 10/2010 – 09/2011 in [°C]. *(Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2012; eigene Bearbeitung)*

Die Tab. 43 beschreibt die Inversionshäufigkeiten, die wie in Kap. 6.10 durch einen einfachen Vergleich der Temperaturen an den beiden Stationen berechnet wurden. Durch den sehr ausgeglichenen Tagesgang am Stradner Kogel gibt es regelmäßig nächtliche Inversionen, die auch ein beträchtliches Ausmaß annehmen können (etwa die Hälfte der Inversionen erreicht einen Temperaturunterschied von mind. 3 K). Der Prozentsatz ist mit knapp 42 % auch ausnehmend hoch; höhere Werte wurden an keiner der Auswertungen erreicht, abgesehen von jenen bei autochthoner Witterung (vgl. Kap. 6.7.3).

Tab. 43: Häufigkeiten der Inversionen als Vergleich der WegenerNet-Station 145 mit den Werten der Station Stradner Kogel (633 m) im Zeitraum von 10/2010 – 09/2011.

Auftreten von Inversionen		**3.472**
in %		**41,81**
Davon:	mind. +3K:	1.804 Mal
	mind. +5K:	872 Mal
	mind. +7K:	315 Mal
	mind.+10K:	41 Mal

Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2012; eigene Bearbeitung

Die folgende Tab. 44 zeigt verschiedene Parameter der Windgeschwindigkeit aus dem Zeitraum von 10/2010 - 09/2011 der Station Stradner Kogel mit derselben Farbgebung wie bei den Stationen des WegenerNet (siehe Kap. 8.2).

Tab. 44: Mittlerer Tages-, Jahreszeiten- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit der Station Stradner Kogel (633 m Seehöhe) für den Zeitraum von 10/2010 - 09/2011 in [m/s].

Zeit	Jän	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
00	3,6	2,5	3,4	3,1	2,9	2,5	3,0	3,1	2,9	3,5	4,3	4,2	3,1	2,8	3,6	3,5	**3,2**
01	3,6	2,5	3,6	3,0	2,7	2,5	3,1	2,9	2,8	3,6	4,1	4,4	3,1	2,8	3,5	3,5	**3,2**
02	3,6	2,6	3,5	2,8	2,7	2,5	3,2	2,9	2,7	3,7	4,2	4,7	3,0	2,9	3,5	3,6	**3,3**
03	3,8	2,7	3,1	2,7	2,5	2,3	3,1	3,1	2,8	3,6	4,1	4,5	2,8	2,8	3,5	3,6	**3,2**
04	3,8	2,8	3,0	2,8	2,4	2,3	3,0	3,1	2,7	3,5	4,2	4,3	2,8	2,8	3,5	3,7	**3,2**
05	3,8	3,1	3,3	2,7	2,3	2,3	3,1	3,0	2,5	3,4	4,0	4,5	2,8	2,8	3,3	3,8	**3,2**
06	3,4	3,0	3,1	2,8	2,4	2,3	2,9	3,1	2,5	3,4	4,3	4,8	2,8	2,7	3,4	3,7	**3,2**
07	3,3	2,9	3,1	2,6	2,1	2,3	2,4	2,7	2,4	3,1	4,1	4,8	2,6	2,5	3,2	3,7	**3,0**
08	3,3	2,9	3,0	2,3	1,9	2,2	2,2	2,1	2,1	2,9	3,9	4,5	2,4	2,2	3,0	3,5	**2,8**
09	3,2	2,6	2,8	2,3	1,8	1,9	2,0	1,7	1,7	2,7	3,6	4,5	2,3	1,9	2,7	3,4	**2,6**
10	3,3	2,3	2,6	2,2	1,9	1,8	1,9	1,8	1,5	2,4	3,5	4,2	2,2	1,8	2,4	3,3	**2,4**
11	3,1	2,1	2,6	2,0	2,1	1,9	2,1	2,1	1,6	2,2	2,9	3,9	2,2	2,0	2,2	3,0	**2,4**
12	3,0	1,8	2,6	2,1	2,1	1,9	2,0	2,2	1,6	2,1	2,6	3,6	2,3	2,1	2,1	2,8	**2,3**
13	2,9	1,9	2,6	2,1	2,2	2,1	2,3	2,2	2,0	2,1	2,7	3,6	2,3	2,2	2,2	2,8	**2,4**
14	2,7	1,9	2,8	2,2	2,4	2,4	2,3	2,4	2,0	2,1	2,8	3,6	2,5	2,4	2,3	2,7	**2,5**
15	3,0	2,0	2,8	2,1	2,3	2,7	2,5	2,5	2,1	2,1	3,3	4,0	2,4	2,6	2,5	3,0	**2,6**
16	3,3	2,5	3,1	2,2	2,4	3,0	2,6	2,7	1,9	2,5	4,0	4,1	2,6	2,8	2,8	3,3	**2,9**
17	3,6	2,6	3,4	2,4	2,7	2,8	2,6	2,6	1,9	2,8	4,1	4,4	2,8	2,7	2,9	3,5	**3,0**
18	3,3	2,6	3,3	2,4	2,6	3,1	2,4	2,5	2,1	3,1	4,2	4,2	2,8	2,7	3,1	3,4	**3,0**
19	3,5	2,7	3,6	2,5	2,6	3,3	2,5	2,7	2,3	3,4	4,2	4,4	2,9	2,8	3,3	3,5	**3,2**
20	3,1	2,7	3,6	2,6	2,8	3,5	2,8	3,1	2,6	3,5	4,5	4,3	3,0	3,1	3,5	3,4	**3,3**
21	3,2	2,9	3,5	2,8	3,1	3,7	3,1	2,9	3,0	3,6	4,5	4,2	3,2	3,2	3,7	3,4	**3,4**
22	3,2	2,9	3,3	2,8	3,2	3,2	3,1	3,1	2,9	3,6	4,4	4,3	3,1	3,1	3,7	3,4	**3,3**
23	3,4	2,8	3,5	3,0	3,2	2,8	3,1	3,3	2,8	3,7	4,4	4,0	3,2	3,0	3,6	3,4	**3,3**

Quelle: DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung

Im Vergleich mit den Auswertungen der 3 Stationen des WegenerNet-Gebiets (siehe Kap 8.2) fällt die deutlich stärkere Gelb- und Rot-Färbung der Werte auf, die gleichbedeutend mit höheren durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten sind. Blaue bzw. grüne Farbtöne, die im WegenerNet-Gebiet am häufigsten vorkommen und Geschwindigkeiten bis 2,0 m/s bedeuten, kommen hier nur selten vor. Vor allem in den Wintermonaten Jänner und Dezember treten tagsüber meist vergleichsweise hohe Windgeschwindigkeiten auf. Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten fallen in die Zeit zwischen 09 und 18 Uhr und liegen dabei immer über 1,5 m/s. Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten vorwiegend nachts bzw. in den frühen Morgenstunden auf und erreichen maximal 4,8 m/s. Das ist ein deutlicher Unterschied zu den Stationen des WegenerNet-Gebietes, wo die höchsten Geschwindigkeiten tagsüber im März auftreten (siehe Kap. 8.2). Diese Unterschiede sind mit der deutlich höheren Lage dieser

Station und reliefbedingten Faktoren zu erklären. Das absolute Maximum wurde in diesem Zeitraum in den frühen Morgenstunden am 07.12.2010 mit 14,5 m/s erreicht. Der Jahresmittelwert ist mit 2,94 m/s deutlich höher als die Vergleichswerte sämtlicher Stationen des WegenerNet-Gebiets.

Die folgende Tab. 45 zeigt die durchschnittlichen Unterschiede der Windgeschwindigkeiten der Stationen Stradner Kogel und der WegenerNet-Station 144 im Zeitraum von 10/2010 – 09/2011.

Tab. 45: Durchschnittliche Unterschiede der Windgeschwindigkeit im Tages- und Jahresgang der Stationen Stradner Kogel (633 m) und der WegenerNet-Station 144 (269 m) für den Zeitraum von 10/2010 – 09/2011 in [m/s].

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
00	1,8	0,9	1,1	0,3	0,8	0,9	1,3	1,3	1,1	1,8	2,4	2,0
01	1,8	1,0	1,4	0,3	0,4	0,7	1,6	1,2	1,1	2,1	2,1	2,2
02	1,9	1,1	1,3	0,0	0,3	0,8	1,2	1,4	1,1	2,2	2,1	2,5
03	2,0	1,1	0,9	-0,1	0,2	0,6	1,3	1,7	1,2	2,2	2,2	2,4
04	2,2	1,1	0,9	0,0	0,6	0,8	1,4	1,8	1,2	2,1	2,5	2,1
05	2,2	1,3	1,4	0,3	1,1	1,0	1,7	1,8	1,1	1,9	2,4	2,4
06	1,7	1,1	1,6	0,8	1,1	0,8	1,4	2,2	1,5	2,0	2,6	2,7
07	1,7	1,3	1,6	0,5	0,7	0,6	0,9	1,7	1,4	1,7	2,6	2,6
08	1,6	1,5	1,1	-0,3	-0,1	-0,1	0,2	0,5	0,9	1,6	2,7	2,3
09	1,5	1,1	0,4	-0,8	-0,9	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	1,2	2,2	2,6
10	1,8	0,9	-0,2	-1,1	-1,0	-1,1	-0,9	-0,3	-0,3	0,5	1,8	2,2
11	1,5	0,3	-0,5	-1,4	-1,1	-0,8	-0,8	-0,2	-0,4	0,4	0,9	1,7
12	1,5	-0,1	-0,5	-1,6	-1,4	-1,0	-1,1	-0,6	-0,2	0,2	0,2	1,4
13	1,1	0,0	-0,6	-1,7	-0,9	-1,1	-1,0	-0,7	-0,1	0,1	0,1	1,2
14	0,7	-0,1	-0,8	-1,6	-0,9	-1,3	-1,1	-0,4	-0,3	-0,1	0,6	1,0
15	1,2	0,1	-1,0	-1,3	-1,0	-0,8	-0,7	-0,5	-0,5	0,0	1,4	1,8
16	1,7	0,6	-0,3	-1,3	-0,9	-0,2	-0,6	0,0	-0,7	0,6	2,1	2,0
17	2,0	0,9	0,8	-0,6	-0,1	0,0	-0,3	0,2	0,0	1,1	1,9	2,0
18	1,5	0,8	0,9	0,4	0,4	0,5	-0,2	0,6	0,6	1,3	2,2	2,2
19	1,7	0,8	1,3	0,6	0,7	1,1	0,6	1,2	0,6	1,7	2,1	2,4
20	1,1	0,9	1,5	0,5	0,6	1,4	1,1	1,5	0,7	1,7	2,3	2,3
21	1,3	1,1	1,1	0,4	0,9	1,7	1,6	0,7	1,1	1,7	2,3	2,2
22	1,3	1,2	0,8	0,0	1,1	1,3	1,2	1,0	1,1	1,8	2,5	2,2
23	1,4	1,4	1,1	0,1	1,0	1,1	1,5	1,4	1,0	1,9	2,5	1,9

Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung

Dieser Vergleich zeigt, dass die Verteilung der Windgeschwindigkeiten der beiden Stationen 144 des WegenerNet-Messnetzes sowie jener am Stradner Kogel teilweise deutliche Unterschiede aufweisen. Vor allem in den Wintermonaten sind die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten am Stradner Kogel um bis zu 3 m/s höher, dafür im Frühling zur Mittagszeit um bis zu 2 m/s geringer.

Die folgende Abb. 114 zeigt die Windrose der Station am Stradner Kogel.

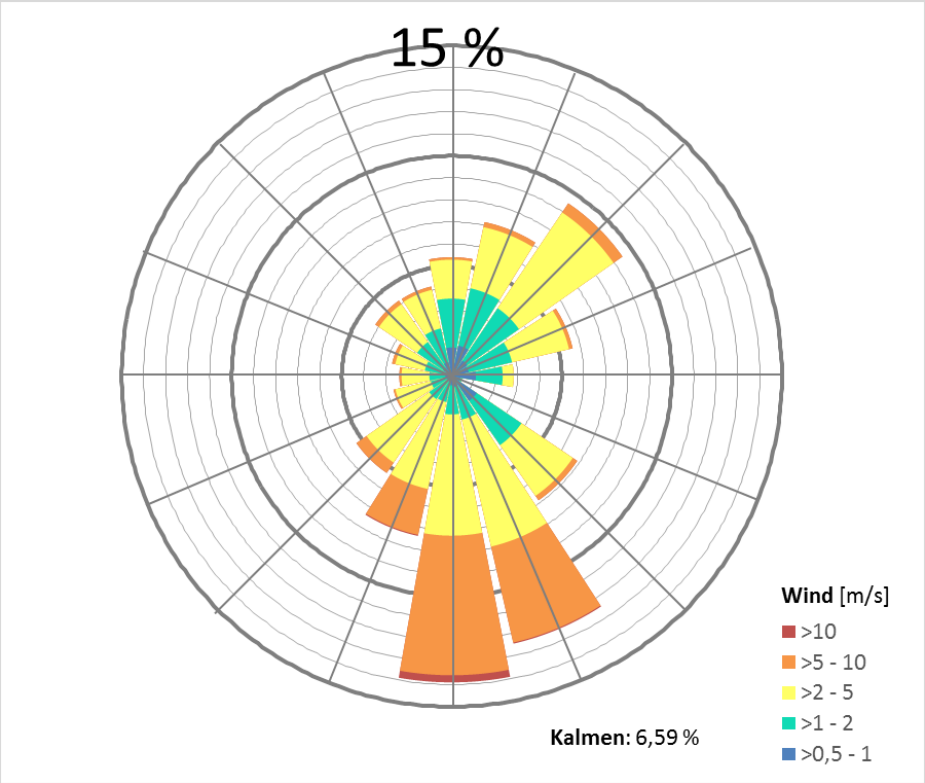


Abb. 114: Die mittlere Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit der Station Stradner Kogel (633 m) im Zeitraum von 10/2010 – 09/2011 in [%] bzw. [m/s]. *(Quelle: DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung)*

Diese Verteilung zeigt eine Dominanz von Winden aus Süd, die nicht nur am häufigsten vorkommen, sondern auch die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit aufweisen; rund 40 % der Winde aus südlicher Richtung haben eine Stärke von 5 – 10 m/s. Der Wind aus Nordost bleibt meist unter 5 m/s. Kalmen treten nur zu 6,6 % der Zeit und damit deutlich seltener als bei sämtlichen Stationen des WegenerNet-Gebiets auf. Diese Verteilung und Charakteristik mit dominanter Süd- und weniger dominanter Nord-Strömung stimmt gut mit den Ausführungen in den Kap. 2.2.2 sowie 3.4.3.5 überein, in welchen die Hauptwindrichtungen in der Region (in ausreichender Höhe über Grund) beschrieben werden.

Im Falle des Kapfensteiner Kogels stehen Daten im Zeitraum von März bis einschließlich November 2013 zur Verfügung (DUSCHEK 2014). Diese Station wurde am oberen Rand eines Weinbaugebietes in einer Seehöhe von 440 m aufgebaut und liegt etwa 700 m Luftlinie von Station 139 in Richtung Nordnordwest entfernt, welche sich auf 307 m Seehöhe befindet.

Der Jahresgang der beiden Stationen in Abb. 115 zeigt einen sehr gleichmäßigen Temperaturverlauf mit wenigen Unterschieden. Die Werte der Station 139 sind im Frühling um bis zu 2 K höher, im Hochsommer ist es dann genau umgekehrt – an der Station am Kapfensteiner Kogel werden da um bis zu 2 K höhere Temperaturen erreicht. Aufgrund des Untersuchungszeitraumes von nur neun Monaten ist die Kurve im Gesamtverlauf vergleichsweise unregelmäßig und lässt auf einen kalten Mai sowie September schließen. Die mittlere Temperatur dieser Monate liegt in beiden Fällen knapp über 13 °C.

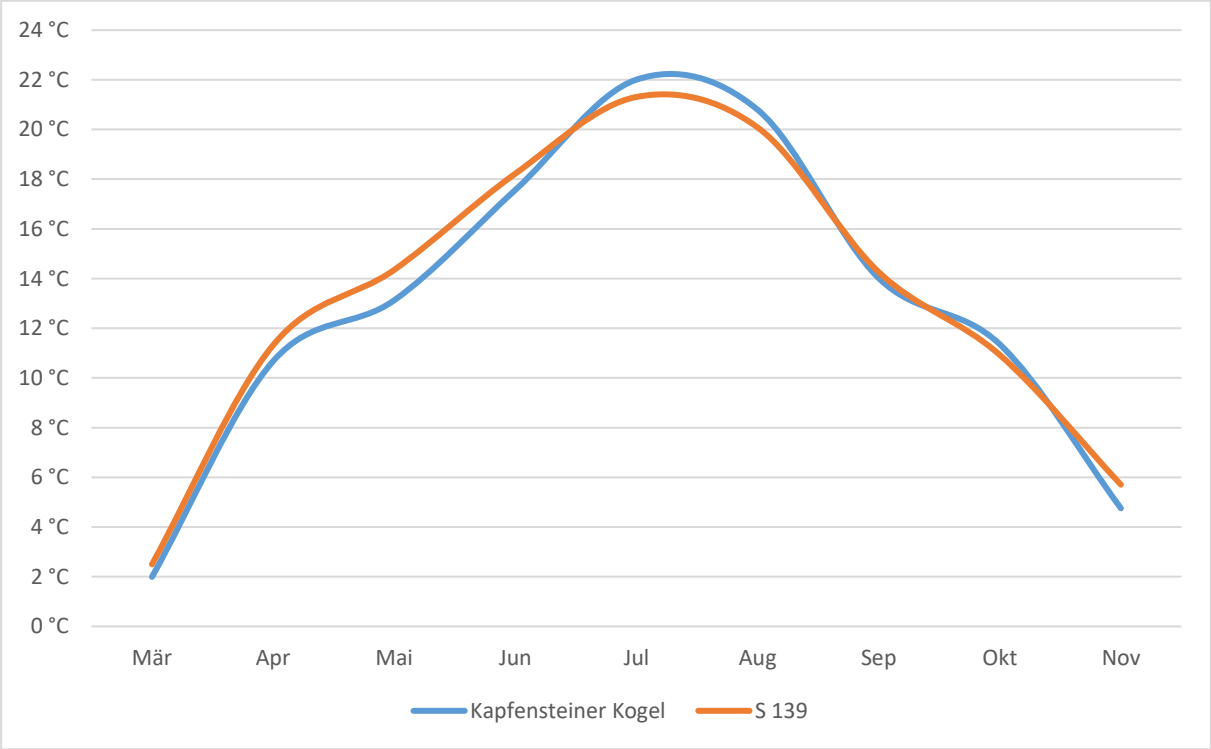


Abb. 115: Die mittlere Temperatur an den Stationen Kapfensteiner Kogel sowie 139 im WegenerNet-Gebiet des Zeitraumes 01.03. – 30.11.2013 in [°C]. *(Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung)*

Die Abb. 116 zeigt die mittleren Tagesgänge der beiden oben genannten Stationen im Zeitraum von März bis einschließlich November 2013. Beide Stationen weisen typische Verläufe auf, deren Unterschiede vorwiegend an der unterschiedlichen Seehöhe liegen. Die Werte der höher gelegenen Station am Kapfensteiner Kogel beschreiben einen

ausgeglicheneren Verlauf mit höheren nächtlichen und tieferen Temperaturen tagsüber. Die Unterschiede betragen dabei maximal 1 K. Diese Verläufe deuten auch schon auf eine hohe Inversionshäufigkeit während der Nachtstunden hin, was in der Tab. 46 behandelt wird.

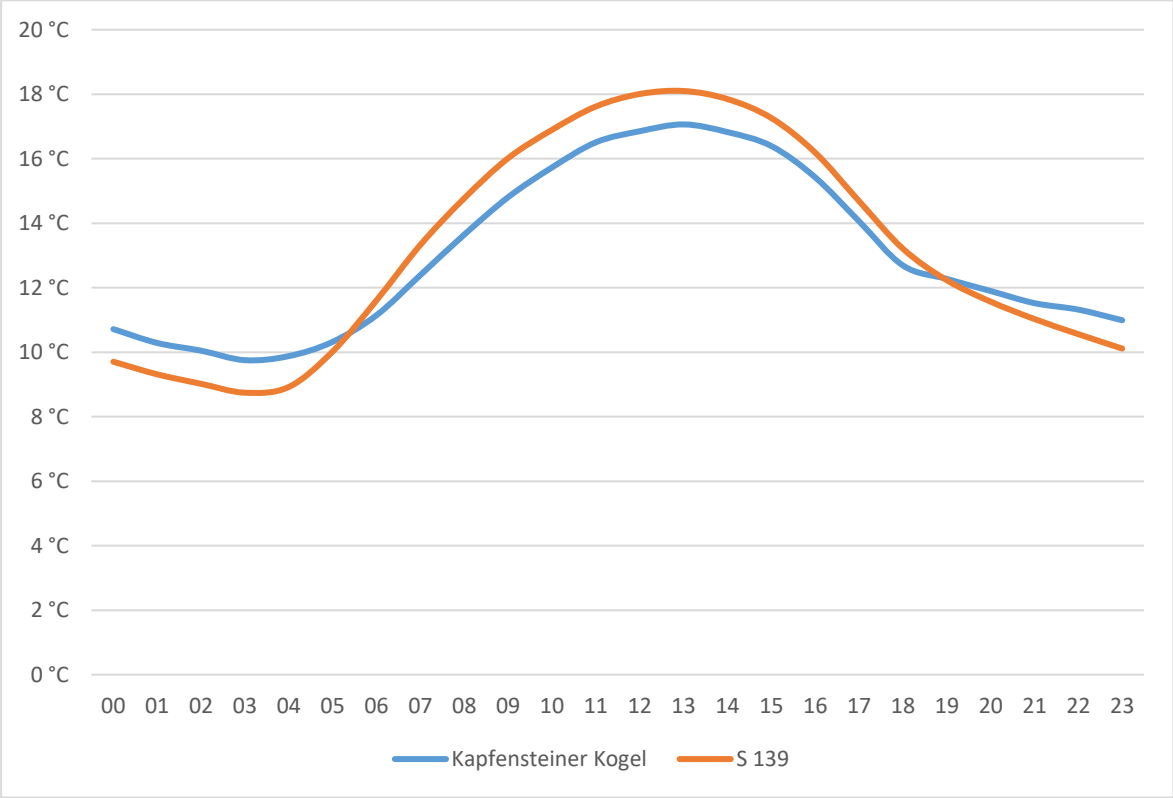


Abb. 116: Die mittleren Tagesgänge der Temperatur an den Stationen Kapfensteiner Kogel und 139 des WegenerNet-Gebiets im Zeitraum 01.03. – 30.11.2013 in [°C]. *(Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung)*

Die Tab. 46 beschreibt nun das Auftreten von Inversionen im Vergleich der Stationen Kapfensteiner Kogel mit der WegenerNet-Station 139 im Zeitraum von März bis einschließlich November 2013. Von insgesamt 6.506 Stundenmitteln wiesen 2.230 eine höhere Temperatur an der höher gelegenen Station Kapfensteiner Kogel auf; diese Inversionshäufigkeit beschränkt sich nach Abb. 116 und den Ergebnissen aus Kap. 6.7.3 vorwiegend auf die Nachtstunden. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kap. 6.7.3 ist die Inversionshäufigkeit um 2 % niedriger, und vor allem bei den höheren Temperaturunterschieden wie beispielsweise mindestens 7 K ist ein deutlicher Unterschied festzustellen. Dies liegt wohl an der deutlich geringeren vertikalen Differenz dieser beiden Stationen, die um 100 m weniger beträgt als bei der Auswertung im Kap. 6.7.3.

Tab. 46: Häufigkeiten der Inversionen als Vergleich der WegenerNet-Station 139 mit den Werten der Station Kapfensteiner Kogel im Zeitraum von 01.03. – 30.11.2013.

Auftreten von Inversionen		**2.230**
	in %	**34,28**
Davon:	mind. +3K:	639 Mal
	mind. +5K:	146 Mal
	mind. +7K:	17 Mal
	mind.+10K:	0 Mal

Quellen: Wegener Center 2013, DUSCHEK 2014; eigene Bearbeitung

10.3 Klöch

In diesem Kapitel werden die Werte diverser Parameter der Lufttemperatur ausgewählter Stationen des Untersuchungsgebiets mit jenen der Station Klöch (ca. 14 km südlich von Bad Gleichenberg im äußersten Südosten der Steiermark) verglichen. Der Fokus liegt dabei auf den wärmsten Stationen des WegenerNet-Gebietes, da die Region um Klöch als die wärmste der Steiermark gilt (vgl. PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 67) und auch österreichweit in der Reihenfolge der wärmsten Regionen nur knapp hinter Neusiedl/See sowie dem Marchfeld liegt (trotz deutlich höherer Lage, siehe Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2002).

Die Tab. 47 zeigt die mittleren Minima, Maxima und Mitteltemperaturen für unterschiedliche Zeiträume als Vergleich der wärmsten Stationen des Untersuchungsgebietes und der Vergleichsstation Klöch (K) auf 415 m Seehöhe. Die Daten der Station Klöch stammen dabei von Stundenmittelwerten, während die Daten der WegenerNet-Stationen von Fünf-Minuten-Werten abstammen. Man sieht aufgrund der Farbgebung sehr deutlich, dass an der Station Klöch sowohl bei den Jänner- als auch den Jahresmittelwerten in sämtlichen Zeiträumen die Maximalwerte erreicht werden. Teilweise sind die Unterschiede nur sehr gering, wie beispielsweise beim Jahresnormalwert der Station 133 und Klöch (10,9 °C bzw. 11,1 °C). Die vergleichsweise eher kühlen Verhältnisse im Juli sind aufgrund der Seehöhe von 415 m auf den ersten Blick nicht sehr verwunderlich, allerdings sind die Werte von Klöch in fast ausnahmslos allen Monaten auch kühler als sämtliche Werte der 46 ausgewählten Stationen des WegenerNet-Gebietes, also auch der vergleichsweise kühlsten und höher gelegenen. Der hohe Jahresnormalwert in Klöch wird also vor allem aufgrund der milden Wintertemperaturen erreicht.

Tab. 47: Durchschnittliche mittlere tägliche Minima, Maxima und der Jahresnormalwert der Lufttemperatur in [°C] sowie die Seehöhe in [m] der Stationen 094, 097 und 133 des WegenerNet-Gebiets sowie der Messstation Klöch (K) für den Zeitraum von 2007-2011 in Monats-, Jahreszeiten- und Jahresmittelwerten. Die vergleichsweise wärmsten Werte sind in Dunkelrot, die kühlsten in Dunkelblau gehalten.

Nr.	Sh[m]	Para-meter	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Fr	So	He	Wi	Jahr
094	370	mTmin	-2,4	-1,4	1,8	6,6	10,3	13,7	14,8	14,6	10,8	5,4	2,2	-2,1	6,2	14,4	6,1	-2,0	**6,2**
		mTmax	4,6	7,9	12,3	19,6	22,9	25,7	27,6	27,2	22,3	15,6	9,3	4,0	18,3	26,8	15,7	5,5	**16,6**
		mT	0,6	2,5	6,4	12,4	15,9	19,0	20,7	20,0	15,5	9,7	5,2	0,7	11,6	19,9	10,2	1,3	**10,7**
097	392	mTmin	-2,1	-0,8	2,4	7,7	11,1	14,4	15,8	15,4	11,7	6,3	2,5	-1,8	7,0	15,2	6,8	-1,6	**6,9**
		mTmax	3,7	6,4	10,8	17,8	21,2	24,3	26,3	25,6	20,4	14,1	8,3	3,4	16,6	25,4	14,3	4,5	**15,2**
		mT	0,6	2,5	6,4	12,5	15,9	19,0	20,9	20,2	15,6	9,9	5,2	0,7	11,6	20,0	10,3	1,3	**10,8**
133	338	mTmin	-2,4	-1,2	1,9	6,9	10,5	13,9	15,0	14,8	11,0	5,6	2,4	-2,0	6,4	14,6	6,3	-1,9	**6,4**
		mTmax	4,4	7,6	11,8	18,7	22,2	25,0	26,9	26,2	21,4	15,1	9,1	4,0	17,5	26,0	15,2	5,3	**16,0**
		mT	0,6	2,7	6,6	12,6	16,0	19,1	20,8	20,2	15,6	10,0	5,4	0,8	11,7	20,0	10,4	1,4	**10,9**
K	415	mTmin	-1,1	0,3	3,4	8,8	12,4	15,4	16,8	16,3	12,7	7,2	3,4	-1,0	8,2	16,2	7,8	-0,6	**7,9**
		mTmax	3,3	6,1	10,2	17,1	21,1	24,0	25,8	25,2	19,9	13,7	7,8	2,8	16,1	25,0	13,8	4,1	**14,7**
		mT	0,9	2,9	6,5	12,7	16,4	19,4	21,2	20,5	15,9	10,1	5,4	0,8	11,9	20,4	10,5	1,5	**11,1**

Quellen: Wegener Center 2013, Landesumweltinformation Steiermark 2013; eigene Bearbeitung

Für die Darstellung der durchschnittlichen Tagesgänge in Abb. 117 wurden dieselben Vergleichsstationen wie oben herangezogen; die Daten stammen dabei im Falle der WegenerNet-Stationen wieder von den Fünf-Minuten-Daten, im Falle von Klöch von Stundenmittelwerten. Der Tagesgang von Klöch ist dabei vor allem jenem der Station 097 sehr ähnlich, wobei an der Station Klöch vor allem in der Nacht deutlich mildere Temperaturen gemessen werden. Der Unterschied beträgt im Vergleich zu den Stationen 094 und 133 etwa 2 K, zur wärmsten Zeit nach Mittag sind die Werte der Station Klöch um rund 1 K niedriger als jene der beiden letztgenannten Stationen.

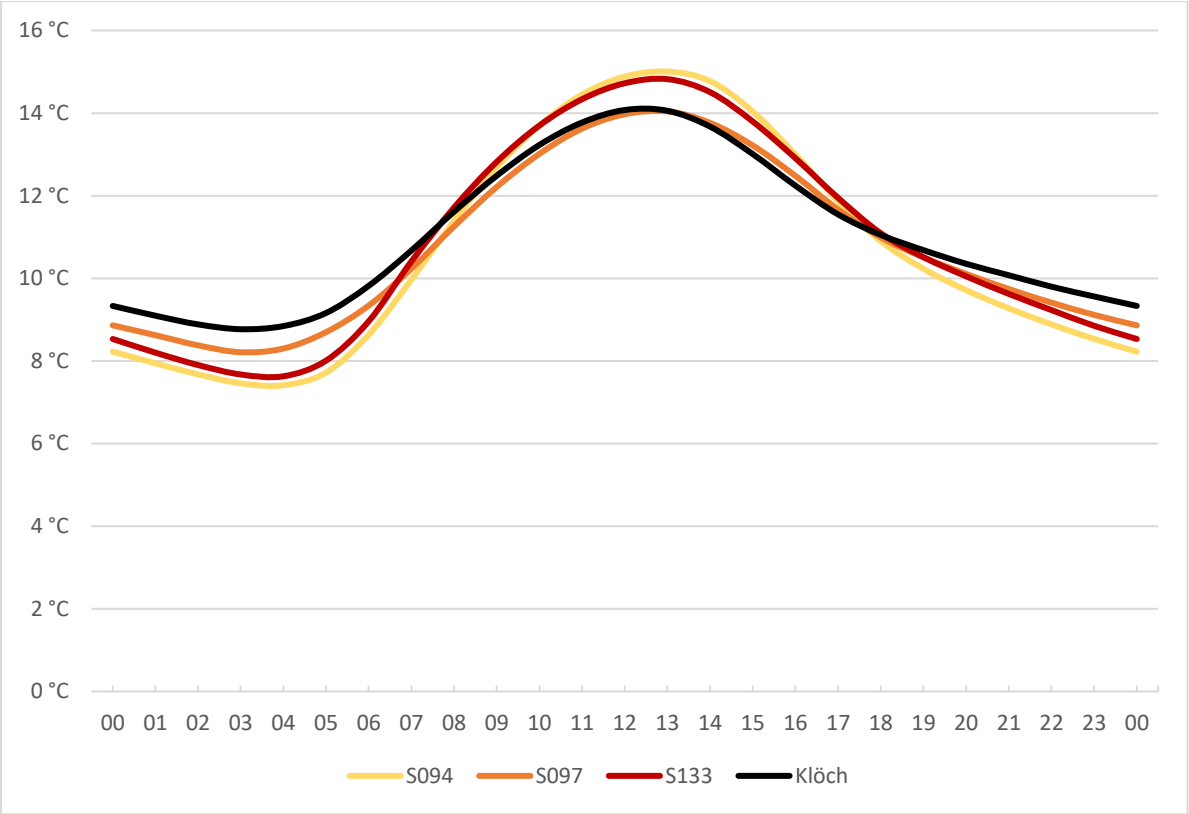


Abb. 117: Die mittleren Tagesgänge (UTC) der Temperatur an den Stationen 094, 097, und 133 des WegenerNet-Gebiets sowie Klöch für die Periode von 2007-2011 in [°C]. *(Quellen: Wegener Center 2013, Landesumweltinformation Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

11. Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit dem Digitalen Atlas der Steiermark

In diesem Kapitel werden zunächst die erhobenen Daten der Lufttemperatur im WegenerNet-Gebiet mit den Angaben im Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) verglichen. Dafür wurden die einzelnen Stationen mit Hilfe der Geo-Koordinaten, die jeder Station im WegenerNet zugeordnet sind (Wegener Center 2013), verortet und einer Zone der Klimatopkarte zugeordnet (Abb. 118). Diese Zonen sind im Digitalen Atlas zumeist mit Temperaturwerten (Zeitraum 1971-2000) beschrieben, die nachfolgend mit den Daten der WegenerNet-Stationen verglichen werden.

In Kap. 11.2 werden dann die Daten der Windparameter mit den Angaben im Digitalen Atlas verglichen.

11.1 Lufttemperatur

Nachfolgend ist der Ausschnitt der Klimatopkarte des Untersuchungsgebietes aus dem Digitalen Atlas der Steiermark(Land Steiermark 2013) dargestellt.

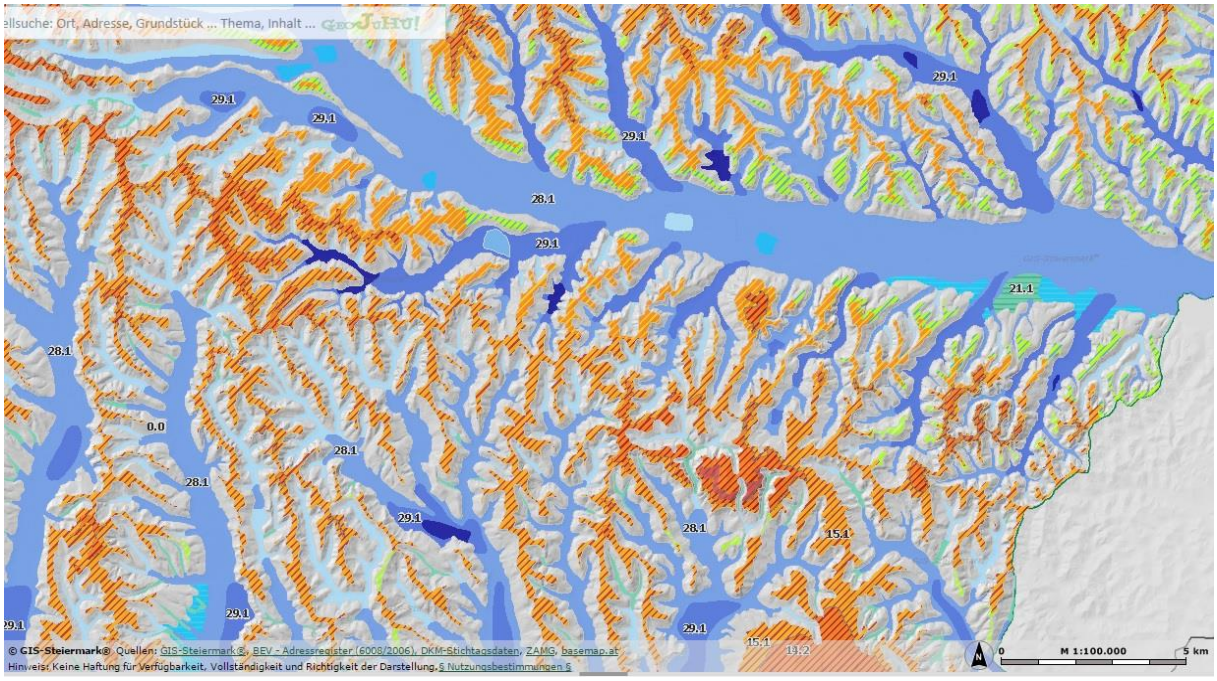


Abb. 118: Ausschnitt des Raums Feldbach aus der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark (Legende siehe folgende Abb. 119). *(Quelle: Land Steiermark 2013)*

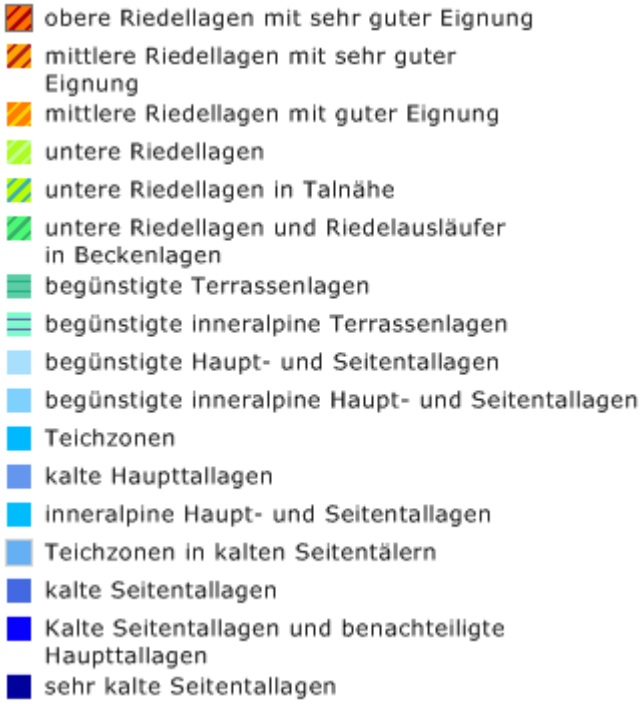


Abb. 119: Legende zur Klimatopkarte aus dem Digitalen Atlas der Steiermark (Auszug). *(Quelle: Land Steiermark 2013, eigene Bearbeitung)*

Für die aufgelisteten Zonen gibt es Detailbeschreibungen, welche die grundlegende klimatische Charakteristik definieren. Für diesen Vergleich wurden Stationen, die in die „Übergangszone“ (0.0) der Klimatopkarte fallen, nicht berücksichtigt, da jene im Digitalen Atlas nicht näher definiert ist. Sämtliche Beschreibungen am Beginn jeder Zone stammen dabei aus den Erläuterungen der Klimatope im Digitalen Atlas der Steiermark (Zeitraum 1971-2000; Quelle: Land Steiermark 2013).

1) Zone 14.2: Obere Riedellagen mit sehr guter Eignung

„Diese Riedellagen ab ca. 400m Seehöhe stellen aufgrund ihrer thermischen Begünstigung Gunstlagen für Wein- bzw. Obstbau dar (Jännermittel: -1,2 bis -1,5 °C, Julimittel: 18,6 bis 19,1 °C, Jahresmittel: 9,3 bis 9,6 °C, mittl. abs. Min.: -12 bis -14 °C, mittl. abs. Max.: um 30 °C, Sommertage 35 - 40 d/a). Eine sehr geringe Frost- und Inversionsgefährdung (85 - 95 Tage mit Frost/Jahr (erster Frost: 31.10. bis 4.11.; letzter Frost: 10. bis 15.4.) und ca. 40 – 60 % Inversionshäufigkeit) sind kennzeichnend. Die Vegetationsperiode dauert ca. 240 - 245 Tage/Jahr an.“

In diese Kategorie fallen die Station 122 sowie die Stationen 097 und 123, wobei die beiden letztgenannten nahe der Grenze zu anderen Zonen liegen (16.1 Mittlere Riedellagen mit guter Eignung bzw. 0.0 Übergangszone, die nicht näher beschrieben wird). Die folgende Tab. 48 beschreibt die Verhältnisse oben genannter Parameter an diesen Standorten (soweit verfügbar).

Tab. 48: Auswertung der Stationen 097, 122 und 123 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax) in [°C].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	Sommer-tage	Frost-Tage	Erster Frost	Letzter Frost	Vegetations-periode
097	392	0,6	20,9	10,8	-10,4	34,2	55,8	47,6			
122	520	0,5	20,4	10,4	-10,4	33,7	52,6	46,2	31.Okt	20.Mär	239
123	429	0,5	20,6	10,6	-11,0	33,2					

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Jänner-, Juli und Jahresmittel sind deutlich höher als die Werte des Digitalen Atlas: Im Jänner und Juli um knapp 2 K, im Jahresmittel um etwa 1 K. Bei den mittleren absoluten Minima und

Maxima wird der Unterschied noch deutlicher: alle drei Stationen weisen mittlere absolute Minima von etwa -10,5 °C bis -11 °C und Maxima von 33-34 °C auf. Diese Werte sind um 3-4 K höher als in der Beschreibung des Digitalen Atlas der Steiermark, die allerdings als Datengrundlage den Zeitraum von 1971-2000 verwenden.

Die Anzahl der Sommertage ist um 15 Tage und somit deutlich höher als im Digitalen Atlas angegeben. Dies ist eine Folge der deutlich höheren Tagesmitteltemperaturen und mittleren absoluten Maxima. Die Zahl der Frosttage wird von den gemessenen Werten an den drei Stationen sehr deutlich unterboten. Nur an etwa 47 Tagen (statt 85-90) pro Jahr gab es im Untersuchungszeitraum Frost, was auf sehr milde Winter hindeutet.

2) Zone 15.1: Mittlere Riedellagen mit sehr guter Eignung

„Diese Riedelzone im Höhenbereich von ca. 360 bis 400m liegt außerhalb des Einflussbereiches des Raabtalwindsystems. Die thermischen Verhältnisse weisen eine Eignung speziell für Obstanbau aus (Jännermittel: -1,5 bis -1,8 °C, Julimittel: 18,5 bis 18,8 °C, Jahresmittel: 9,0 - 9,4 °C, mittl. abs. Min.: -13 bis – 14 °C, mittl. abs. Max.: 30 bis 31°C, abs. Min.: -20 bis -23 °C, abs. Max.: 36 bis über 37 °C, aperiodische Tagesschwankung <8 K).“

Zu dieser Kategorie zählen die Stationen 071 und 131, wobei letztere an der Grenze zur Zone 0.0 (Übergangszone) liegt. Die folgende Tab. 49 beschreibt die Verhältnisse oben genannter Parameter an diesen Standorten.

Tab. 49: Auswertung der Stationen 071 und 131 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	Aper. Tages-schwankung
071	375	0,0	20,2	10,2	-11,8	33,9	-16,0	36,6	9,7
131	350	0,2	20,5	10,5	-11,8	34,8	-16,0	36,3	10,3

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

An diesen beiden Stationen zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei jenen der Zone 14.2. Wieder sind die mittleren Temperaturen im Jänner und Juli um rund 2 K, die Jahresmitteltemperatur um 1 K höher als im Digitalen Atlas. Auch die mittleren absoluten Minima und Maxima

verhalten sich ähnlich wie bei der vorangegangenen Zone: die Minima sind um 2 K, die Maxima um knapp 4 K höher. Die absoluten Minima reichen mit -16 °C bei weitem nicht an die -20 °C bis -23 °C aus dem Digitalen Atlas heran, hingegen stimmen die absoluten Maxima mit knapp 37 °C sehr gut überein.

Die aperiodische Tagesschwankung ist mit etwa 10 K deutlich höher als jene mit 8 K im Digitalen Atlas der Steiermark.

3) Zone 16.1: Mittlere Riedellagen mit guter Eignung

„Diese Riedelzone entspricht von der Höhenlage her der Zone 15.1, wird jedoch durch das Raabtalwindsystem beeinflusst. Dadurch ergibt sich eine leichte Zunahme der Inversions- und Nebelhäufigkeit."

Zu dieser Kategorie zählen die Stationen 017, 029, 036, 074, 078 und 094, wobei die Stationen 036, 078 und 094 an der Grenze zur Zone 0.0 (Übergangszone) liegen. Die folgende Tab. 50 beschreibt die relevanten Parameter dieser Stationen.

Tab. 50: Auswertung der Stationen 017, 029, 036, 074, 078 und 094 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	Aper. Tages-schwankung
017	385	0,5	20,7	10,7	-11,0	34,6	-14,8	36,8	9,7
029	383	0,0	20,2	10,2	-12,4	33,4	-16,8	35,7	10,0
036	341	0,3	20,4	10,4	-12,3	33,7	-16,7	36,1	10,0
074	394	0,0	20,4	10,3	-11,6	34,2	-16,3	37,2	9,9
078	372	0,4	20,5	10,5	-11,8	33,5	-17,7	35,9	9,0
094	370	0,6	20,7	10,7	-11,5	34,8	-15,8	37,1	10,4

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Sämtliche Werte sind jenen der Zone 15.1 sehr ähnlich, weshalb nicht noch einmal im Detail darauf eingegangen wird. Sie sind also im Vergleich zu den Werten aus dem Digitalen Atlas deutlich zu hoch, sogar noch etwas höher als in der Zone 15.1. Das Absolute Minimum wird mit -17,7 °C an Station 078 erreicht, damit ist dieser Wert deutlich milder ist als die Angabe von -20 °C bis -23 °C aus dem Digitalen Atlas der Steiermark.

4) Zone 17.1: Untere Riedellagen

„Die niedrigen Riedellagen und Riedelsporne in 320 bis 360m Seehöhe weisen neben expositionsbedingten Differenzierungen speziell in den unteren Bereichen Beeinflussungen durch die Kaltluftabflüsse aus den Seitentälern auf. Daher besteht zumeist nur eine geringe Begünstigung gegenüber der Talsohle. Bei einer erhöhten Inversionshäufigkeit (70 – 80 % aller Tage zum Morgentermin) ergeben die Temperaturverhältnisse kaum noch Eignung für Obstbau (am ehesten noch in den höheren Bereichen ab 340 m), (Jännermittel: -2,5 bis -3,2 °C, Julimittel: 18,1 bis 18,5 °C, Jahresmittel: 8,2 bis 8,6 °C, abs. Min. -22 bis -26 °C). Die Vegetationsperiode erreicht 230 bis 235 Tage/Jahr. Die Frosthäufigkeit erreicht 115 - 130 Tage/Jahr (erster Frost: 10. - 20.10., letzter Frost 25.4. bis 3.5.). Die Durchlüftung ist abhängig vom Einfluss der Seitentalabwinde und erreicht ein durchschnittliches Jahresmittel der Windgeschwindigkeit von ca. 1,0 - 1,5 m/s.“

In dieser Zone liegt keine der ausgewerteten Stationen. Analog zu den anderen Zonen kann aber mit deutlich höheren Mittelwerten der Temperatur gerechnet werden.

5) Zone 18.1: Untere Riedellagen in Talnähe

„Infolge des starken Einflusses nächtlicher Talauswinde besteht erhöhte Frostgefährdung, speziell im Raabtal und Feistritztal, wobei die Temperaturgunst mit der Höhe kaum zunimmt und annähernd jener in begünstigten Haupttallagen entspricht (115 - 120 Tage mit Frost, bei einem durchschnittlich letzten Frost um den 23.4.). Die Durchlüftung ist vergleichsweise erhöht (geringe Kalmenhäufigkeit in der Nacht). Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit liegt generell über 2 m/s. Die Zone 18.1 zählt damit zu den bestdurchlüfteten Abschnitten in dieser Klimaregion.“

Zu dieser Kategorie zählen die Stationen 033 und 037. Die folgende Tab. 51 beschreibt aufgrund fehlender Kennzahlen die allgemeinen klimatischen Verhältnisse an diesen Standorten.

Tab. 51: Auswertung der Stationen 033 und 037 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Metern (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C], mittlere Windgeschwindigkeit (mWindG) in [m/s].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	mWindG
033	361	0,2	20,6	10,4	-12,3	34,3	-16,8	37,5	
037	330	-0,1	20,3	10,2	-12,7	34,0	-17,6	36,6	1,2

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Temperaturwerte sind ähnlich jenen der Zonen 14.2 sowie 15.1, was aufgrund der Talnähe etwas überraschend erscheint; grundsätzlich war von stärker ausgeprägten Extrema auszugehen. Auch die Windgeschwindigkeit ist an Station 037 mit 1,2 m/s deutlich unter dem im Digitalen Atlas angegebenen Jahresmittel von >2 m/s.

6) Zone 21.1: Begünstigte Terrassenlagen

„…verbesserte Durchlüftungsbedingungen infolge der erhöhten Terrassenlage (ca. 30-50 m oberhalb der Talsohle) mit einem Jahresmittel der Windgeschwindigkeit von ca. 2m/s. Dadurch ist auch eine verringerte Frostgefährdung gegeben (etwa 110 - 115 Tage mit Frost). Das Jännermittel liegt bei durchschnittlich -2,5 °C. Die Nebelhäufigkeit erweist sich gegenüber der Talsohle ebenfalls reduziert (ca. 40 Tage mit Nebel).“

Auch für diese Zone, die im Digitalen Atlas noch um eine Zone der „mäßig begünstigten Terrassenlage“ erweitert wird, gibt es keine Stationsdaten zur Analyse.

7) Zone 27.1: Begünstigte Haupt- und Seitentallagen

„Das Klima dieser Zone lässt sich als mäßig inversions- und frostgefährdet einstufen (Inversionsgefährdung ca. 70 % der Nachtstunden). Das Jahresmittel der Temperatur schwankt zwischen 8,4 und 8,9 °C, die Vegetationsperiode zwischen 232 und 236 Tagen/Jahr. Die Durchlüftung bleibt an das Talwindsystem gebunden, wobei 1 m/s als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit kaum überschritten wird. Die Anzahl der Sommertage liegt bei ca. 50 Tagen/Jahr. Dieser Zone wird auch der Stadtkern von Feldbach zugerechnet, da speziell in klaren Strahlungsnächten die Ausbildung einer Wärmeinsel mit 1,0 - 1,5 K (nur bei Schneedecke auch höher) erfolgt.“

Auch in dieser Zone liegt keine der ausgewerteten Stationen.

8) Zone 27.3: Teichzonen im Raabtal

„Diese Zone gleicht hinsichtlich der Inversions- und Temperaturverhältnisse der Zone 28.1, wobei eine thermische Ausgeglichenheit auf die Wirkung der freien Wasseroberflächen zurückzuführen ist (Dämpfung der Extremwerte). Die Talnebelbereitschaft ist allerdings leicht erhöht (ca. 60 – 80 Tage/Jahr mit Nebel mit einem Maximum im Oktober/November).“

Diese Zone steht beispielhaft für mehrere Teichzonen in dem Gebiet, die alle ähnlich der umgebenden Zone sind und aufgrund der Wasseroberfläche etwas veränderte Bedingungen aufweisen. Es liegt keine der Stationen in diesen Bereichen.

9) Zone 28.1: Kalte Haupttallagen

„Die Zone umfasst Tallagen mit relativ hoher Frost- und Inversionsgefährdung (130 - 138 Frostage/Jahr, 70 – 85 % Inversionshäufigkeit), wobei die zugehörigen Eigenschaften weitgehend mit der Basisstation Graz Thalerhof übereinstimmen: Jahresmittel: 8,1 bis 8,4 °C, Jännermittel: -3,5 bis -3,7 °C, Julimittel: 18,3 bis 18,5 °C, mittl. abs. Min.: -17 bis -19 °C, abs. Min.: -26 bis -28 °C, erster Frost: 8.10. bis 15.10., letzter Frost: 25.4. bis 3.5., Schneedecke: 45 - 55 d/a, Vegetationsperiode: 226 - 230 d/a, Schwületage: >30 d/a. Hinsichtlich der Durchlüftung zeigt sich eine deutliche Begünstigung gegenüber der Zone 29.1. (Jahresmittel der Windgeschwindigkeit 1,5 - 2,0 m/s), wobei die Windgeschwindigkeiten in den Seitentälern deutlich geringer sind (<1,5 m/s).“

Zu dieser Kategorie zählen die Stationen 011, 020, 044, 046, 069, 076, 101, 109, 127 und 132, wobei die Station 076 an der Grenze zur Übergangszone (0.0) liegt. Die folgende Tab. 52 beschreibt die Verhältnisse oben genannter Parameter an diesen Standorten (soweit vorhanden).

Tab. 52: Auswertung der Stationen 011, 020, 044, 046, 069, 076, 101, 109, 127 und 132 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C], mittlere Windgeschwindigkeit (mWindG) in [m/s].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	Frosttage	mWindG
011	300	-0,7	20,1	9,9	-14,6	34,1	-20,2	35,9		1,2
020	330	-0,3	19,8	9,9	-14,3	34,4	-18,7	36,3		
044	288	-0,3	20,2	10,1	-13,0	34,2	-17,6	36,2		2,1
046	280	-0,3	20,7	10,4	-13,4	35,0	-18,7	37,0	89,8	
069	257	-0,4	20,1	10,1	-15,0	34,1	-24,2	36,1		
076	319	0,2	20,5	10,5	-13,0	34,1	-17,8	36,6		
101	304	-0,6	20,1	9,9	-14,7	34,2	-20,9	35,8		1,1
109	316	-0,4	19,6	9,7	-15,9	33,6	-22,8	36,2	99,2	
127	310	0,0	20,1	10,1	-13,4	33,9	-18,2	36,0		
132	295	-0,6	20,2	10,0	-14,7	34,4	-21,2	35,6		1,0

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die Verhältnisse an diesen Stationen sind zwar kühler als an den bisher analysierten WegenerNet-Stationen, aber immer noch deutlich zu mild im Vergleich zu den Angaben aus dem Digitalen Atlas der Steiermark. Dort wird eine mittlere Jännertemperatur von -3,5 °C, im Juli 18,5 °C und als Jahresnormalwert 8,2 °C angegeben. Die Vergleichswerte der WegenerNet-Stationen sind also im Jänner um 3 K, im Juli 1,5 K und im Jahresdurchschnitt um etwa 1,7 K höher.

Die Unterschiede bei den mittleren absoluten Maxima und Minima sind noch deutlicher: statt -18 °C werden im Schnitt -13 °C bis -16 °C, und statt -27 °C teilweise extrem mildere -18 °C bis -25 °C erreicht.

Die Windgeschwindigkeiten an den vier Stationen mit Windmessung liegen großteils deutlich unter 1,5 m/s, nur die Werte an der Station 044 (auf 55 m über Grund gemessen) stimmen mit knapp über 2 m/s gut mit der Vorgabe des Digitalen Atlas überein.

10) Zone 29.1: Kalte Seitentallagen

„Dies betrifft stark inversions- und frostgefährdete Talabschnitte (140 - 150 Tage/Jahr mit Frost und 80 – 90 % Inversionshäufigkeit) mit geringer Durchlüftung und erhöhter Talnebelbereitschaft. Diese Klimazone stellt im Raum Feldbach/Fürstenfeld zusammen mit der

Zone 30.1 die Bereiche mit der größten Jahres- und Tagesschwankung (bis über 11 K) und der geringsten Vegetationsperiode (um 225 Tage/Jahr) dar; Jännermittel -3,5 bis -4,0 °C, Julimittel: 17,8 bis 18,3 °C, Jahresmittel: 7,8 bis 8,2 °C, mittl. abs. Min.: -19 bis – 21 °C, abs. Min.: um -30 °C, Frosttage: 135 - 145 d/a, erster Frost: 4. - 10.10., letzter Frost: 30.4. bis 8.5. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten liegt bei 0,5 bis 1,0 m/s."

Zu dieser Kategorie zählen die Stationen 007, 015, 038, 056 und 082, wobei die Station 082 an der Grenze sowohl zur mäßig begünstigten Terrassenlage (21.1), als auch zur kalten Haupttallage (28.1) liegt. Die folgende Tab. 53 beschreibt die Verhältnisse oben genannter Parameter an diesen Standorten (soweit vorhanden).

Tab. 53: Auswertung der Stationen 007, 015, 038, 056 und 082 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	Frosttage	Aper. Tages-schwankung
007	308	-0,9	20,0	9,7	-16,0	34,8	-23,0	36,9	106,8	12,1
015	297	-0,9	19,8	9,6	-15,6	34,1	-22,2	36,3		11,8
038	274	-0,4	20,1	10,0	-14,3	34,5	-20,8	36,6		11,1
056	318	-0,5	20,4	10,1	-14,0	34,6	-18,8	36,4		11,5
082	276	-0,3	20,6	10,2	-13,8	35,7	-19,8	38,1	92	11,6

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

Die höhere Gefährdung für Nebel und Inversionen und der schwache wind sorgen an diesen Stationen durchwegs für kühle Jännermittel. Diese sind mit etwa -0,5 °C um etwa 3 K wärmer als im Digitalen Atlas beschrieben, im Juli beträgt der Unterschied +2 K und im Jahresmittel ebenfalls fast +2 K.

Beim mittleren absoluten Minimum werden um rund 6 K mildere Temperaturen erreicht, hinsichtlich des absoluten Minimums beträgt der Unterschied sogar zwischen 7 und 11 K.

Die aperiodische Tagesschwankung passt gut überein, stellenweise können sogar über 12 K durchschnittliche Tagesschwankung auftreten. Die Tage mit Frost sind an den zwei Vergleichsstationen mit 92 bzw. 107 Tagen wieder deutlich niedriger, als im Digitalen Atlas angegeben (etwa 140 Tage).

11) Zone 30.1: Sehr kalte Seitentallagen

„Zumeist durch Kaltluftstau an Hindernissen bedingte, sehr kalte Abschnitte in Seitentälern mit sehr hoher Kaltluft- und Inversionsgefährdung. Die klimatische Situation entspricht etwa jener der Zone 29.1, es gelten jedoch eher die ungünstigeren Werte, sodass hinsichtlich der ackerwirtschaftlichen Nutzung bereits ein erhöhtes Risiko für Maisanbau gegeben ist (die Anzahl der Frosttage liegt bei ca. 151 Tagen/Jahr; der erste Frost um den 3.10.; der letzte Frost um den 7.5.; Jahresmittel der Temperatur ca. 7,8 - 8,2 °C; Jännermittel analog Zone 29.1 bei ca. -4 °C).“

Zu dieser Kategorie zählt die Station 055, welche sich an der Grenze zur Übergangszone (0.0) befindet. Die folgende Tab. 54 beschreibt die relevanten Parameter dieser Station.

Tab. 54: Auswertung der Station 055 des WegenerNet-Messnetzes im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 mit folgenden Parametern: Seehöhe in Meter (Sh[m]), mittlere tägliche Temperatur im Jänner (mTJan) und Juli (mTJul), mittlere tägliche Jahrestemperatur (mTm), mittleres absolutes Minimum (mAMin) und Maximum (mAMax), absolutes Minimum und Maximum in [°C].

Nr.	Sh[m]	mTJan	mTJul	mTm	mAMin	mAMax	AMin	AMax	Aper. Tages-schwankung
055	320	-0,8	19,8	9,8	-14,9	34,1	-20,2	36,2	11,3

Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung

In diese sehr kalte Zone fällt nur die WegenerNet-Station 055, deren Werte sich aber kaum von jenen der Zone 29.1 unterscheiden. Die mittleren und absoluten Minima sind milder als im Digitalen Atlas der Steiermark beschrieben.

Zusammenfassung:

Grundsätzlich kann man bei jeder einzelnen Zone feststellen, dass die gemessenen Temperaturwerte deutlich höher sind, als jene in der Beschreibung aus dem Digitalen Atlas der Steiermark. In weiterer Folge entstehen auch Unterschiede bei den besonderen Tagen. Die Unterschiede sind mit den unterschiedlichen Aufnahmezeiträumen der Daten zu erklären: während beim Digitalen Atlas der Zeitraum von 1971-2000 herangezogen wurde, war es im Falle des WegenerNet-Gebiets jene aus 2007-2011. Allein durch den kürzeren Zeitraum waren

Unterschiede zu erwarten, vor allem ist jedoch der Einfluss des Klimawandels zu bemerken. Dadurch sind bei der Temperatur beinahe alle Werte deutlich milder.

Allgemein muss festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Zonen oft nicht so deutlich ausfallen, wie es im Digitalen Atlas beschrieben wird. Beispiele dafür wären die absoluten Minima, die bei den einzelnen Zonen deutlich ähnlicher ausfallen, als im Digitalen Atlas der Steiermark beschrieben.

11.2 Windgeschwindigkeit

Die folgende Abb. 120 zeigt die Windgeschwindigkeiten, wie sie im Digitalen Atlas der Steiermark dargestellt werden. Die höchsten Geschwindigkeiten mit einem Mittel von 2,5-3,9 m/s kommen demnach im mittleren Bereich des Raabtals vor, die Seitentäler und vor allem die Riedel weisen geringere Geschwindigkeiten auf.

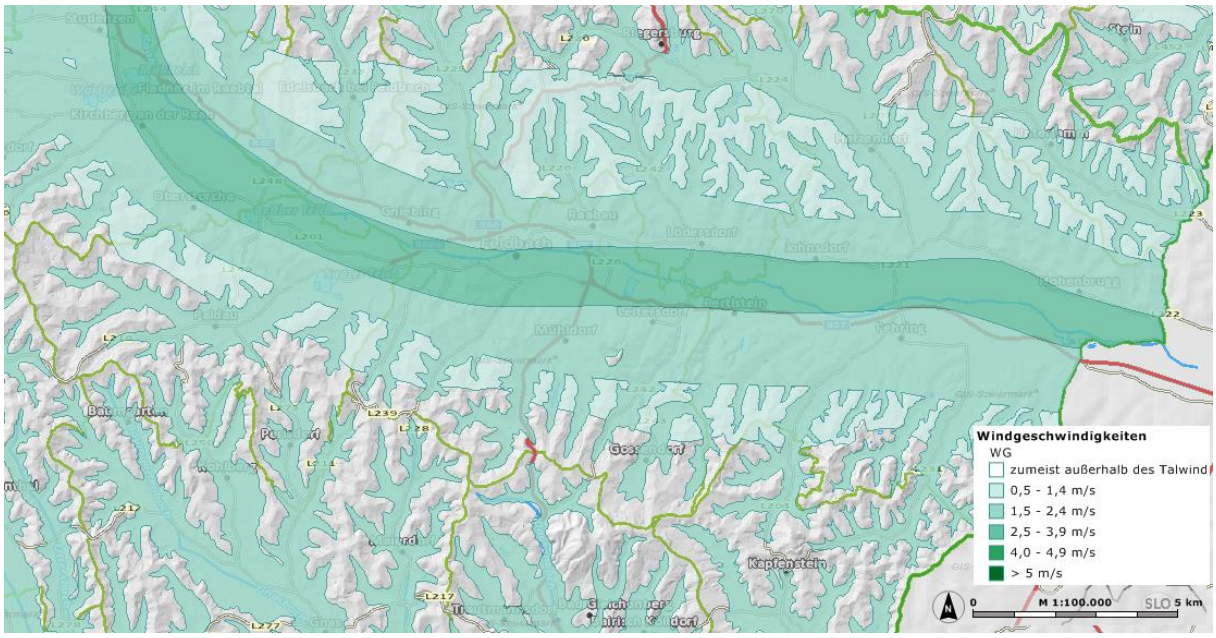


Abb. 120: Windgeschwindigkeiten im Gebiet des WegenerNet-Stationsnetzes in [m/s]. *(Quelle: Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

In den Korridor mit Geschwindigkeiten von 2,5 bis 3,9 m/s fallen die beiden Stationen 011 sowie 044. Die Station 011 weist im Mittel der Jahre 2007-2011 eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 1,2 m/s auf, die Station 044 2,1 m/s; letztere befindet sich am Dach eines Futtersilos, etwa 55 m über Grund. Diese zwei Beispiele zeigen, dass die

Durchschnittsgeschwindigkeiten von >2,5 m/s in Bodennähe im Untersuchungszeitraum von 2007-11 bei weitem nicht erreicht werden.

Die Windgeschwindigkeiten und vor allem die Wirkung des Raabtales auf diese könnten im Digitalen Atlas demnach zu hoch angesetzt worden sein. Es gibt keine Angaben darüber, in welcher Höhe über Grund diese Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind.

12. Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets

In diesem Kapitel wird die Erstellung der Klimatopkarte des WegenerNet-Gebiets, die in Kap. 12.3 dargestellt ist, beschrieben und die Darstellung nachfolgend analysiert.

Eine Klimatopkarte stellt die Klimatope einer Region grafisch dar, welche als „kleinste klimatische Einheit bei der Differenzierung der Klimate“ definiert wird. Klimatope zeichnen sich demnach durch weitgehend homogene Zustände und gleichartige Prozesse in der betrachteten topischen Dimension aus. Sie ergeben sich als Synthese der einzelnen messbaren, das Klima am Standort prägenden Klimaparameter. (STEINHARDT et al. 2011, S. 156). Das Ziel der Erstellung dieser Karte ist ähnlich wie bei Klimaeignungskarten, die oft speziell für besondere Bedürfnisse erstellt werden (z.B. Landwirtschaft), um eine gute Planungsgrundlage für verschiedenste Bedürfnisse zu liefern. Darüber hinaus soll die Karte die komplexen Zusammenhänge der kleinräumigen Unterschiede im Relief erklären und eine Grundlage für die Erstellung ähnlich gearteter Karten in vergleichbaren Räumen liefern. Durch die in der Folge beschriebene, nur teilweise automatisierte Kartenerstellung und Ergänzung der Messwerte durch andere Quellen, persönliche Einschätzungen und Beobachtungen vor Ort wird ein Ergebnis geliefert, das sich durch die Kombination dieser Methoden durch besondere Detailgenauigkeit auszeichnet.

Nach der Beschreibung der Grundlagen und Methodik folgt die genaue Beschreibung der einzelnen Zonen; danach wird der Raum Bad Gleichenberg als Sonderbeispiel stellvertretend für die Darstellung schwieriger klimatischer Verhältnisse analysiert und schließlich ein Abschnitt mit Interpretationen und Schlussfolgerungen angeführt.

12.1 Grundlagen

Die wichtigsten Grundlagen zur Erstellung der Klimatopkarte sind die Ergebnisse und Analysen aus den vorangehenden Kap. 6 - 11. Darüber hinaus wurden noch zusätzliche Analysen durchgeführt und bisher nicht berücksichtigte Darstellungen miteinbezogen, die nachfolgend beschrieben werden. Die aktuelle Vegetation wird nicht gesondert berücksichtigt, da sie kein Teil dieser Arbeit und auch ständigen Veränderungen unterworfen ist. Sie hat allerdings an manchen Stellen zwangsläufig Einfluss auf die Messwerte und somit die Klimatopkarte, beispielsweise durch Beschattung oder als Staufaktor bei Kaltluftprozessen.

Der wichtigste Parameter für die Erstellung der Klimatopkarte ist das Klimaelement Lufttemperatur. Vor allem eine Auswertung der mittleren täglichen Minima (mTmin) ist

essentiell, welche den wichtigsten Parameter für die Erfassung des Einflusses von Kaltluftprozessen auf ein Gebiet darstellen (pers. Mitt. Lazar 2015). Vor allem im Winter, aber auch in den übrigen Jahreszeiten können so Gebiete ausgemacht werden, wo sich nächtliche Kaltlufteinflüsse sehr stark oder gar nicht auswirken. Diese Auswertung wurde für sämtliche Stationen des Untersuchungsgebietes durchgeführt, um das Gebiet bestmöglich abdecken zu können.

Die folgende Abb. 121 zeigt die mTmin sämtlicher Stationen des WegenerNet-Gebietes nach Hanglage geordnet. Als Zeitraum wurde der April 2007 gewählt, da in diesem Monat fast ausschließlich autochthone Witterung vorherrschte, bei welcher sich die Kaltlufteinflüsse am stärksten ausbilden (siehe Kap. 6.7). Es kann grundsätzlich ein klarer Trend festgestellt werden, wonach die Tal- und Hangfußstationen die niedrigsten, die Kammlagen die höchsten Werte erreichen. Die durchschnittlichen mTmin der verschiedenen Hanglagen lauten: Tallage 3,7 °C (durchschnittlich 295 m Seehöhe), Hangfuß 3,9 °C (313 m), Untere Hanglage 5,1 °C (323 m), Mittlere Hanglage 5,0 °C (328 m), Obere Hanglage 5,7 °C (376 m) und Kammlage 6,3 °C (383 m). An diesen Werten kann man erkennen, dass die Seehöhe allein kaum Aussagekraft hat (wie im Vergleich der Unteren Hanglage mit dem Hangfuß: bei nur durchschnittlich 10 m Höhenunterschied wird ein Unterschied von über 1 K erreicht. Näheres dazu wird im Kap. 6.8 beschrieben).

Die tiefsten Werte werden an den Stationen 007, 015 und 109 erreicht und liegen knapp über 2 °C. Von diesen liegt nur die Station 015 am Talboden, die beiden anderen am Hangfuß. Die höchsten mTmin am Talboden erreichen knapp 5,5 °C, am Hangfuß 6 °C. Unterhang und Mittelhang ähneln sich stark, sämtliche Werte liegen zwischen 3 und 7 °C. Alle mTmin des Oberhangs liegen über 4 K, als absoluter Spitzenwert ragt dabei die höchste Station des Untersuchungsgebietes (122) mit fast 9 °C heraus. Die Stationen in Kammlage erreichen zwischen 4,5 und 8,5 °C.

Die Unterschiede bei den mTmin sind also durchaus beachtlich, die Spannweite beträgt knapp 7 K. Die bei autochthoner Witterung begünstigte Kaltluftbildung beeinflusst vor allem die Stationen in Tallage und am Hangfuß, während die Stationen in oberer Hanglage und Kammlage davon kaum betroffen sind.

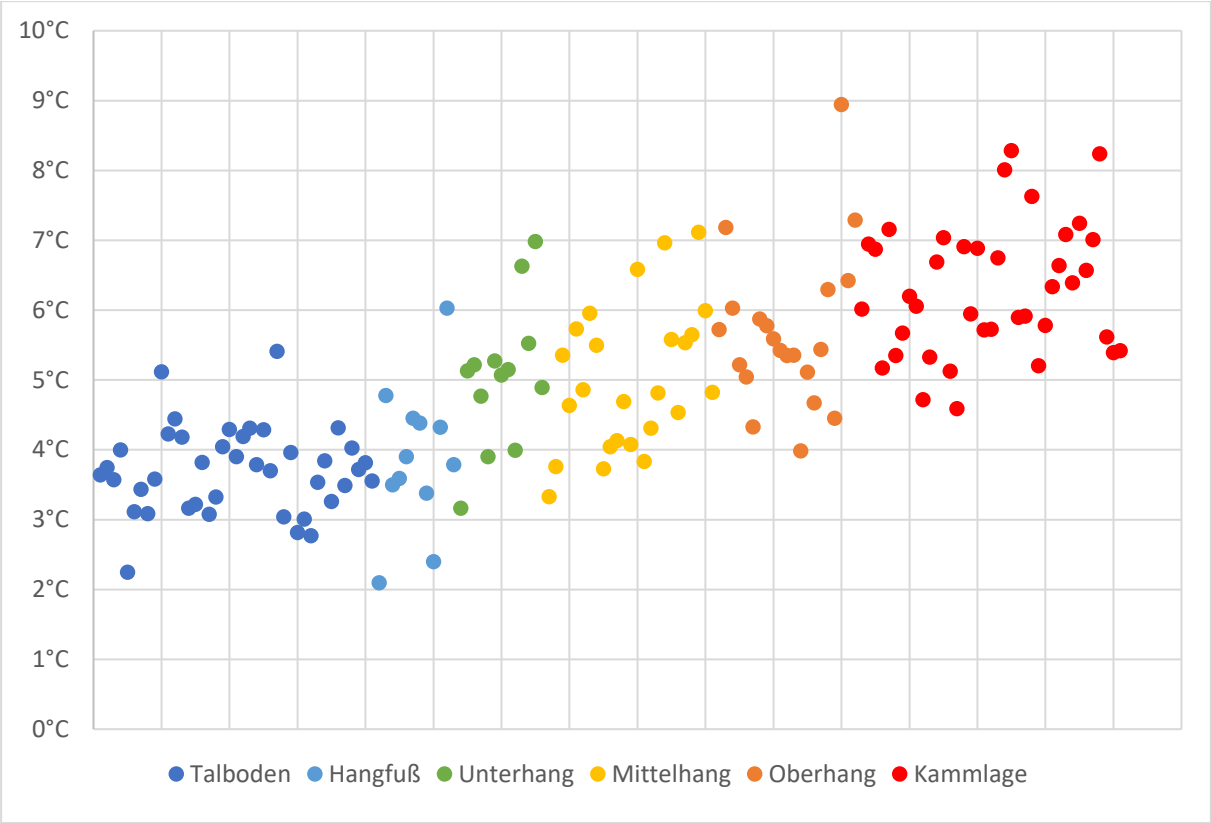


Abb. 121: Mittlere tägliche Minima (mTmin) sämtlicher 151 Stationen des WegenerNet-Gebietes als Mittel des Monats April 2007 in [°C]. Die unterschiedlichen Hanglagen sind farblich hervorgehoben. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

12.2 Methodik

Bei der Erstellung der Klimatopkarte wurde (wie eingangs erwähnt) jener Variante der Vorzug gegeben, bei der es mehr Möglichkeiten der Einflussnahme gibt. Im Gegensatz zum automatisierten Vorgang, wo im GIS durch die Eingabe diverser Parameter eine Karte generiert wird, wurde diese zunächst im linuxbasierten Grafikprogramm GIMP (in der Ausführung GIMPshop) manuell gezeichnet und gestaltet. Erst danach erfolgte die Digitalisierung und Georeferenzierung mittels des Programms ArcGIS Desktop, um vor allem eine direkte Vergleichsmöglichkeit mit bestehenden Karten zu schaffen.

Durch diese Vorgehensweise konnte sichergestellt werden, dass auch Faktoren wie Ergebnisse der Messstationen, Beobachtung im Gelände, Sondenaufstiege und persönliche Fachkenntnis in die Karte übertragen werden konnten. Darüber hinaus existiert mit der Klimatopkarte im Digitalen Atlas der Steiermark bereits eine wissenschaftlich fundierte Darstellungsvariante, die nur durch höheren Detailgrad und Einbeziehung weiterer Daten- und Wissensquellen verbessert werden kann.

Die Karte ist in zwei große Arbeitsbereiche geteilt, deren Erstellung auf unterschiedlichen Grundlagen und Vorgehensweisen basiert:

a) Talbereiche

Der erste Teil umfasst sämtliche Talbereiche, bei deren Darstellung die Vorgaben aus dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) miteinbezogen wurden. Gerade hinsichtlich der Einteilung in kalte bzw. begünstigte Bereiche konnte nur stellenweise auf Stationsdaten zurückgegriffen werden, da dafür deutlich mehr Stationen in jedem Tal notwendig gewesen wären. Die Darstellungsweise im Digitalen Atlas der Steiermark ist allerdings inkonsistent und weist gleichartige Seitentäler einmal als begünstigt, dann wieder als kalt aus. Ohne besondere Stausituationen sind diese gleich zu behandeln, was in der Karte auch umgesetzt wurde. Diese Vorgehensweise wird aufgrund der Überwärmung an den Hängen kleiner Täler empfohlen (pers. Mitt. Lazar 2016).

Sehr kalte Talabschnitte, die durch massive Kaltluftprozesse und Stausituationen beeinträchtigt werden, wurden nach einer geländeklimatischen Analyse des Kartenmaterials durch kurzfristige Messungen zu geeigneten Zeitpunkten vor Ort verifiziert.

Auch der Einfluss des Windes kann durch die spärlich im Gebiet verteilten Stationen nur geschätzt werden, wodurch in den meisten Fällen die Zoneneinteilung des Digitalen Atlas herangezogen und dann aufgrund der Datenlage und Erhebungen vor Ort adaptiert wurde. Die Zoneneinteilung wurde vereinfacht und vor allem hinsichtlich der kalten Seitentäler besser an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst. Diese (auch sehr kleinflächigen Seitentäler) werden im Digitalen Atlas oft auch als „Kalte Haupttallage“ klassifiziert, was als Darstellungsfehler gewertet wird. In der Karte dieser Arbeit wird mit der Bezeichnung „Haupttal“ nur das Raabtal verstanden, da sich diese Einteilung vor allem über die höheren Windgeschwindigkeiten definiert; diese sind nur im Raabtal durch die Stationsdaten belegbar (siehe Kap. 8.1). Die anderen Täler des Gebiets sind von den Einzugsgebieten zu klein ausgeprägt und werden zur Kategorie „Seitentäler“ gezählt.

b) Hangbereiche

Der zweite Teil umfasst die Hangbereiche, die sich nun deutlich von der Darstellung im Digitalen Atlas der Steiermark unterscheiden. Die „Übergangszone“, die dort nicht weiter beschrieben wird, wurde durch die „Untere Hangzone“ ersetzt. In diesen Bereichen gibt es eine Mischung aus Begünstigung aufgrund der Hanglage und Benachteiligung aufgrund der Kaltluftprozesse; auf eine Unterscheidung hinsichtlich der Exposition wurde verzichtet, da der Einfluss der Sonne hier noch zu gering ist. Diese Zone ist im Bereich des Raabtals relativ breit ausgeprägt und wird im Bereich von Talschlüssen sehr schmal, da dort Kaltluftprozesse nur eine geringe Rolle spielen.

Gerade für die möglichst realistische Gestaltung dieser Zone war eine genaue Kenntnis der Gegebenheiten vor Ort notwendig, die durch separate Bewertungen jedes Tals in die Karte einfließen konnte. Mithilfe der Stationsdaten sowie einer Isohypsenkarte wurden weiters eine Unterteilung der mittleren und oberen Hangabschnitte nach Exposition gemacht, die auf den Ergebnissen der Analysen in Kap. 6.8.1 beruht. Eine solche Darstellung erscheint deutlich realistischer, als die nur auf Seehöhe bzw. Höhe über dem Tal basierende Darstellung aus dem Digitalen Atlas der Steiermark.

Die Definition als mittlere bzw. obere Hangzone erfolgte in erster Linie durch eine Kombination aus folgenden Faktoren (in absteigender Wichtigkeit):

- Relative Höhe über dem Talboden
- Grundsätzlicher Charakter des darunterliegenden Tals
- Möglicher Einfluss des Raabtales
- Absolute Seehöhe

Die relative Höhe über dem Talboden ist ein essentieller Hinweis darauf, wie sehr Kaltluftprozesse eine Region beeinflussen. Grundsätzlich gilt: Je höher über dem Tal, desto weniger spielen Kaltluftprozesse eine Rolle. Dies gilt selbstverständlich nur für das Untersuchungsgebiet bzw. ähnlich strukturierte Regionen, da die absoluten Seehöhen nur niedrige Werte annehmen.

Der grundsätzliche Charakter des angrenzenden Tals definiert wiederum, wie weit nach unten die begünstigten oberen Hangzonen reichen. Bei einem Talschluss an einer Stelle mit begünstigten Verhältnissen wird diese Zone weit nach unten reichen, bei sehr kalten und breiten Talabschnitten möglicherweise gar nicht vorkommen.

Der Einfluss des Raabtals darf nicht vernachlässigt werden, was auch in der Darstellung des Digitalen Atlas der Steiermark gut ersichtlich ist: das Raabtal hat aufgrund seiner Breite und den vorherrschenden Winden und Kaltluftprozessen einen großen und weit reichenden Einfluss auf angrenzende Hanggebiete. Dort ist die untere Hangzone sehr breit ausgeprägt und die mittleren Hangzonen reichen meist bis zum Riedelkamm.

Die absolute Seehöhe darf trotz der geringen Unterschiede nicht vernachlässigt werden, da an vergleichsweise hoch liegende Täler angrenzende Hänge meist günstigere Bedingungen aufweisen als tiefer liegende Regionen. Dies belegen auch die Ergebnisse in Kap. 6.8.3. Als Darstellungsvariante dieser Hangeinteilung wurden unterschiedliche Farben einer (wie auch immer gearteten) Signatur vorgezogen, da letztere die Karte wohl stark überladen hätte.

Die Darstellung der Hangzonen in dieser Arbeit ist trotz teilweise fehlender Stationen durch die Verwendung der guten Datenlage sämtlicher Hanglagen und die Anwendung des

Analogieschlusses wegen der ähnlichen morphologischen Gegebenheiten abgesichert. Dies stellt die eigentliche wissenschaftliche Neuerung dar, die auch das Datenmaterial und die umfangreichen Analysen im Rahmen dieser Arbeit einbeziehen.

Hinsichtlich der Talzonen wurde zumeist auf bereits vorhandenes Wissen (vor allem aus dem Digitalen Atlas der Steiermark) aufgebaut und die Darstellung verfeinert bzw. stellenweise verbessert.

12.3 Klimatopkarte und Zonenbeschreibung

Im Folgenden werden die einzelnen Zonen der Klimatopkarte beschrieben, die daran anschließend in einer vergrößerten Version dargestellt wird (Abb. 122). Die Einteilung ergibt sich aus den unterschiedlichen Geländeformen, Seehöhen und Hanglagen; ergänzend wurden Angaben aus dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) hinzugefügt, sofern diese vorhanden und anwendbar sind. Vor allem bei den Riedelzonen wurde beispielsweise durch die Einbindung der Exposition eine andere Darstellungsvariante als im Digitalen Atlas der Steiermark gewählt.

Die Durchschnittswerte von Temperatur und Wind der folgenden Zonenbeschreibungen basieren auf den Ergebnissen der Auswertungen in den Kap. 6 und 8. Diese Werte sind dabei nicht als genaue Mittelwerte der untersuchten Stationen in den einzelnen Zonen angegeben, sondern als Richtwerte basierend auf den jeweiligen Messwerten sowie geländespezifischer Überlegungen. Dieser Schritt war aufgrund der sehr unterschiedlich verteilten Stationen notwendig.

Die Temperaturen sind (wie in Kap. 6.1 ausgeführt) deutlich höher als im langjährigen Durchschnitt, der als Basis für die Erstellung des Digitalen Atlas dient. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Zonen der Darstellung im Digitalen Atlas der Steiermark ist in Kap. 11 angeführt; in der folgenden Beschreibung werden nur (sofern vorhanden) jene Vergleichswerte der Temperatur *kursiv* am Ende jeder Zone angeführt.

Die Zonen im Einzelnen:

1) <u>Sehr kalte Seitentallage</u>

Diese sehr kleinräumig auftretenden Gebiete sind meist durch einen Kaltluftstau an Hindernissen gekennzeichnet; dadurch ist mit einer erhöhten Kaltluft- und Inversionsgefährdung sowie häufigem Auftreten von Spät- und Frühfrost zu rechnen. Die Aufstauung der Kaltluft resultiert aus einer Verengung mit nachfolgender Erhöhung (bzw.

Hindernissen wie Baumgruppen oder Häusergruppen) in Fließrichtung. Dieser Typus kommt im Untersuchungsgebiet nur in Seitentallage vor, da das Haupttal der Raab von ihrer Charakteristik her (sanft abfallendes, breites Tal) keine Stausituationen ermöglicht. Die Windgeschwindigkeiten sind in diesem Bereich sehr gering. Das Jahresmittel der Temperatur liegt bei 9 °C, das Jännermittel bei -2 °C. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 7,8-8,2 °C, Jännermittel -4 °C.*

2) Kalte Seitentallage

Diese Zone beschreibt die meisten Seitentalabschnitte des Gebiets mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für Inversionen und Frost sowie geringer Durchlüftung und erhöhter Nebelbereitschaft. Das Jahresmittel der Temperatur liegt um 9,5 °C, das Jännermittel liegt bei -1 °C und das Julimittel bei 20 °C. Die Jahres- und Tagesschwankungen sind die höchsten in dieser Region (11-12 K). Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,5 und 1 m/s. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 7,8-8,2 °C, Jännermittel -3,5 bis -4 °C.*

3) Kalte Haupttallage

Diese Zone ist jener der kalten Seitentallage sehr ähnlich, wird jedoch vom Raabtalwind beeinflusst. Die Windgeschwindigkeit und damit die Durchlüftung ist dementsprechend etwas höher (1–1,5 m/s), Frost- und Inversionsgefahr etwas niedriger. Das Jahresmittel der Temperatur beträgt 10 °C, das Jännermittel -0,5 °C und das Julimittel 20 °C. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 8,1-8,4 °C, Jännermittel -3,5 bis -3,7 °C.*

4) Begünstigte Haupt- und Seitentallage

In dieser Zone gibt es eine mäßige Gefährdung von Inversionen und Frost und etwas höhere Jahresmitteltemperaturen als in den kalten Tallagen (10-10,5 °C). Die Windgeschwindigkeiten bleiben ähnlich wie in den anderen Talzonen meist unter 1 m/s. Diese Gebiete befinden sich meist im Bereich von Talschlüssen sowie begünstigten Talabschnitten. Diese Zone kommt im Haupttal nur im Stadtbereich von Feldbach vor, wo der Wärmeinseleffekt für gemäßigte Bedingungen sorgt. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 8,4-8,9 °C.*

5) Begünstigte Terrassenlage

Aufgrund der Höhe von 30-50 m über der Talsohle verändert sich das Klima in dieser kleinräumigen Zone bereits beträchtlich. Die Frost- und Nebelgefährdung ist deutlich verringert, das Jahresmittel gleicht jenem begünstigter Riedellagen (10,5 °C) und die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten erreichen durch den Einfluss des Raabtalwindes etwa 2 m/s. *Digitaler Atlas: Jännermittel -2,5 °C.*

6) Teichzone

Diese sehr kleinräumige Zone umfasst sämtliche Teiche im Gebiet, welche aufgrund der Wasseroberfläche für leicht veränderte Bedingungen sorgen (Abschwächung der Temperaturextreme, Erhöhung der Talnebelbereitschaft). Zusätzlich werden an Teichen bzw. Seen sämtliche Kaltluftprozesse zum Erliegen gebracht, da die Temperatur des Wassers im Vergleich mit der umgebenden Lufttemperatur in der Nacht meist deutlich wärmer ist. Temperatur- oder Windwerte können durch die sehr unterschiedlichen Lagen nicht angegeben werden. Die Auswirkungen der Teiche auf das Klima sind aufgrund der geringen Größe nur minimal.

7) Untere Riedellage

Die unterste Zone der Riedel ist eine Übergangszone von den kaltluft- und inversionsgefährdeten Tälern zu den begünstigten Riedeln. Die Temperaturgunst der unteren Riedelgebiete wirkt sich bereits leicht aus, aber auch die Frost- und Inversionsgefährdung ist noch vergleichsweise hoch. Die Temperaturmittel sind etwas höher als im Tal: Jahresmittel 10-10,5 °C, Jännermittel 0 °C und Julimittel 20,5 °C. Die Windgeschwindigkeiten liegen um 1 – 1,5 m/s. Der Unterschied der Temperaturgunst zwischen Nord- und Süd-Hängen ist nicht sehr ausgeprägt, weshalb eine weitere Untergliederung hinsichtlich der Eignung wie bei den folgenden zwei Zonen nicht durchgeführt wird. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 8,2-8,6 °C, Jännermittel -2,5 bis -3,2 °C.*

8) Mäßig begünstigte mittlere Riedellage

Diese Zone entspricht bezüglich der Höhenlage den Zonen 9 und 10, hier werden die Nord-, Nordwest- und Nordost-exponierten Hänge zusammengefasst. Sämtliche Temperaturwerte liegen hier geringfügig unter jenen der Zone 10, und vor allem die Erwärmung tagsüber ist wegen meist fehlender direkter Sonneneinstrahlung weniger ausgeprägt (siehe Kap. 6.8.1). *Digitaler Atlas: Jahresmittel 9-9,4 °C, Jännermittel -1,5 bis -1,8 °C.*

9) Begünstigte mittlere Riedellage

Diese Zone umfasst die Ost- und West-exponierten Hänge mittlerer Riedellage, die dementsprechend weniger von der Sonneneinstrahlung profitieren als Süd-exponierte Lagen. Sämtliche Temperaturwerte liegen zwischen jenen der nördlich und südlich geprägten Zonen 8 und 10.

10) Sehr begünstigte mittlere Riedellage

Diese Zone betrifft die Süd-, Südost- und Südwest-exponierten Hänge in mittlerer Hanglage mit deutlichem Abstand zum Talboden. Das Jahresmittel beträgt hier etwa 10,5 °C, das Jännermittel rund 0 °C und das Julimittel 20,5 °C. Der Unterschied zur Unteren Riedellage

besteht vor allem im geringeren Gefährdungspotenzial von Kaltluftprozessen, Frost und Inversionen. Im Vergleich zur folgenden Zone 11 besteht durch die günstige Exposition ein Unterschied im Jahresmittel von +1 K (siehe Kap. 6.8.2). *Digitaler Atlas: Jahresmittel 9-9,4 °C, Jännermittel -1,5 bis -1,8 °C.*

11) Mäßig begünstigte obere Riedellage

Diese Zone umfasst die Nord-, Nordwest- und Nordost-exponierten oberen Hang- und Kammlagen, die thermisch gegenüber der Zone 13 um etwa 1 K im Jahresmittel benachteiligt sind. Die Frost- und Inversionshäufigkeit ist in diesem Höhenbereich allgemein gering. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 9,3-9,6 °C, Jännermittel -1,2 bis -1,5 °C.*

12) Begünstigte obere Riedellage

Diese Zone umfasst wie die Zone 9 die Hang- und Kammlagen in Ost- und West-Exposition. Sämtliche Temperaturwerte bewegen sich zwischen jenen der Zonen 11 und 13.

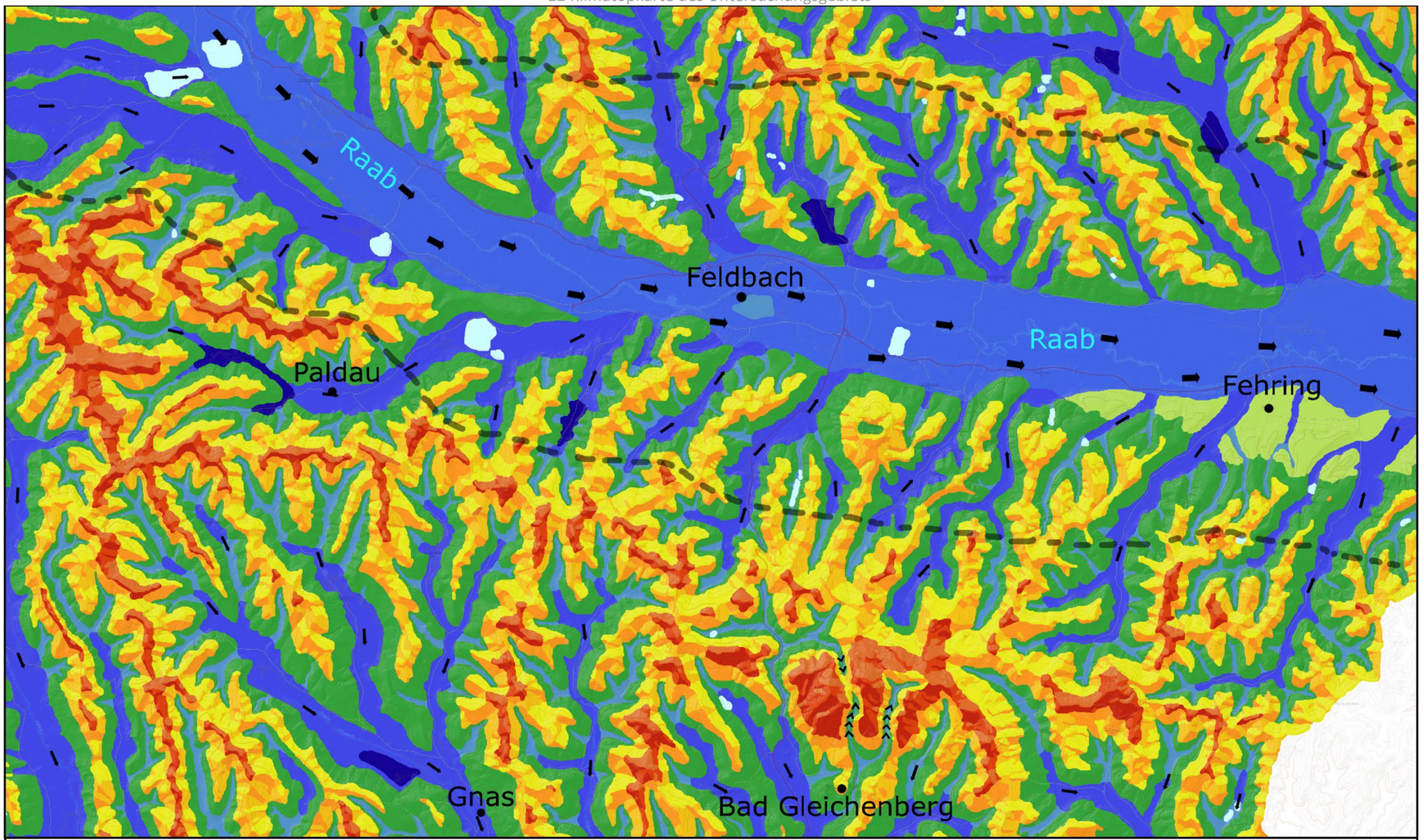
13) Sehr begünstigte obere Riedellage

In dieser Zone sind Süd-, Südost- und Südwest-exponierte obere Hang- und Kammlagen zusammengefasst. Das Jahresmittel beträgt 10,5-11 °C, das Jännermittel 0,5 °C und das Julimittel 20,5-21 °C. Die Frosthäufigkeit ist mit knapp 50 Tagen im Jahr nur halb so hoch wie am Talboden und die Vegetationsperiode ist mit knapp 250 Tagen im Jahr vergleichsweise lang. *Digitaler Atlas: Jahresmittel 9,3-9,6 °C, Jännermittel -1,2 bis -1,5 °C.*

Zusätzlich gibt es in der Karte folgende Informationen mittels Signaturen:

a) Starke nächtliche Winde (1,5-2,4 m/s): durch einen breiteren Pfeil dargestellte Hauptwindrichtung
b) Mäßig starke nächtliche Winde (0,5-1,4 m/s): durch einen dünnen Pfeil dargestellte Hauptwindrichtung
c) Einfluss des Raabtal-Windsystems: Darstellung mittels gestrichelter Linie mit der ungefähren Grenze des Einflussgebietes
d) Kerbtäler: Im Bereich der Gleichenberger Kogel mittels einer „v“ - Signatur

Nachfolgend ist die Klimatopkarte dargestellt (Abb. 122: Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets in der Südost-Steiermark. *(Datengrundlage: Wegener Center 2013, eigene Bearbeitung*).



Legende

- Sehr kalte Seitentallage
- Kalte Seitentallage
- Kalte Haupttallage
- Begünstigte Haupt- und Seitentallage
- Begünstigte Terrassenlage
- Teichzone
- Untere Riedellage
- Mäßig begünstigte mittlere Riedellage
- Begünstigte mittlere Riedellage
- Sehr begünstigte mittlere Riedellage
- Mäßig begünstigte obere Riedellage
- Begünstigte obere Riedellage
- Sehr begünstigte obere Riedellage

0 — 5 km

- Nächtliche starke Winde (1,5-2,4 m/s)
- Nächtliche mäßige Winde (0,5-1,4 m/s)
- Kerbtäler
- Grenze Einfluss Raabtal

N

©Borovsky 2017

12.4 Beispiel Bad Gleichenberg

Als stellvertretendes Beispiel für Schwierigkeiten mit der richtigen Einschätzung und möglichst genauen Darstellung der realen Verhältnisse wurde der Raum um den Ort Bad Gleichenberg gewählt, der nachfolgend sowohl mit der Darstellung im Digitalen Atlas der Steiermark, als auch mit einer Darstellung von LAZAR (2005) verglichen wird. Der Ort liegt im Süden der Gleichenberger Kogel auf einer kleinflächigen Erhebung und wird einerseits von den Seitentälern aus dem Bereich der beiden Kogel, anderseits durch das größere Tal im Westen beeinflusst. Die Schwierigkeit liegt in diesem Fall vor allem darin abzuschätzen, wie stark bzw. wie weit nach oben der Einfluss des Tals im Westen reicht. Die kleinen Seitentäler aus Norden sind durch ihre geringe Ausdehnung eher als begünstigt einzuschätzen. Die Vegetation spielt zwar auch eine Rolle, wird in dieser Kartierung aber (wie in Kap. 12.1 erwähnt) nicht berücksichtigt. Eine ausgeprägte Stausituation gibt es in diesem Bereich nicht.

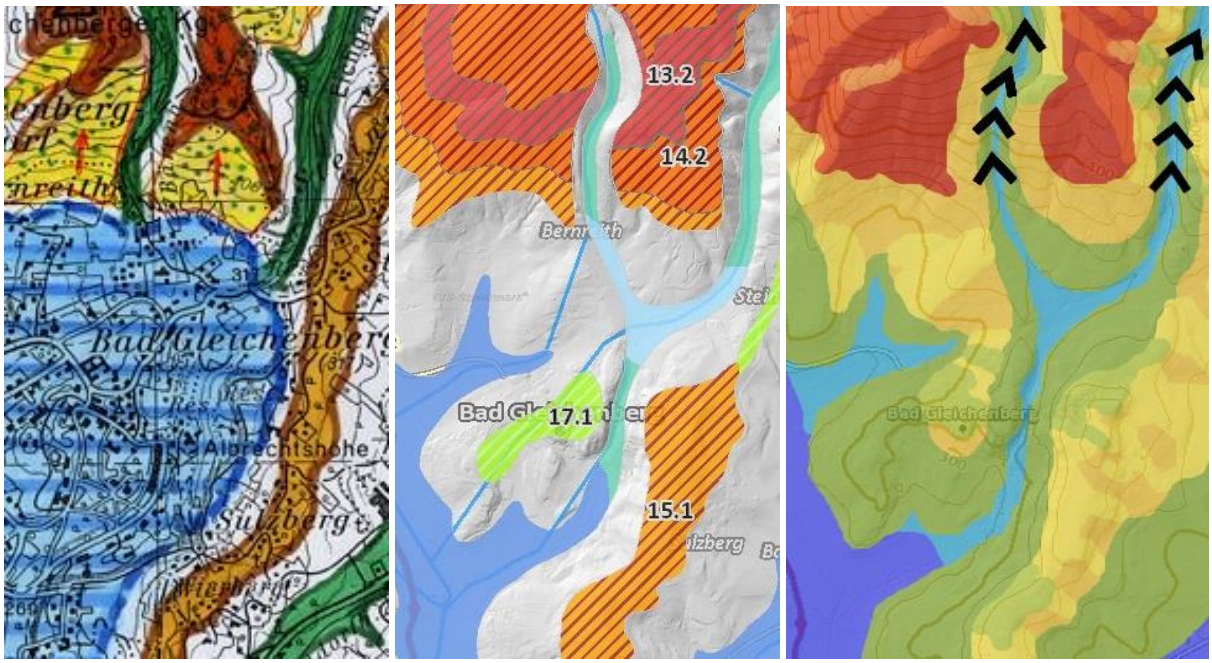


Abb. 123: Unterschiedliche Darstellungen einer Klimatopkarte des Raums Bad Gleichenberg. Links aus LAZAR, mittig aus dem Digitalen Atlas der Steiermark, rechts aus dieser Arbeit. *(Quellen: LAZAR 2005, Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Die grundsätzliche Charakteristik der Gleichenberger Kogel am oberen Rand der Darstellungen ist bei allen drei Karten gleich: in verschiedenen Gelb- und Rottönen wird auf die Gunst der mittleren und oberen Hangbereiche hingewiesen. Die dazwischen verlaufenden Kerbtäler, welche im WegenerNet-Gebiet nur dort auftreten, sind übereinstimmend als begünstigte Talbereiche dargestellt. Während im Digitalen Atlas eine Abstufung nach Seehöhe erfolgt,

wird in der Klimatopkarte dieser Arbeit die Exposition zusätzlich miteinbezogen und sorgt für eine weitere Unterteilung der Hangregionen.

Die niedrigeren Regionen um den Ort Bad Gleichenberg sind unterschiedlich dargestellt. Bei LAZAR ist das gesamte Ortsgebiet bis zu den unteren Hangbereichen blau schraffiert gekennzeichnet und weist damit auf Eigenschaften ähnlich den Talbereichen hin. Die Verhältnisse sind thermisch etwas günstiger als im Tal und die Durchlüftung ist schlecht (LAZAR, pers. Mitt.). Im Digitalen Atlas der Steiermark ist ein Großteil dieses Gebietes durch die (nicht näher beschriebene) Übergangsregion dargestellt, nur der erhöht liegende Ortskern von Bad Gleichenberg ist als Zone 17.1 (Untere Riedellage) definiert und weist somit auf begünstigte Verhältnisse hin. Blau und somit als benachteiligte Talregion sind die zwei Seitentäler nördlich und südlich des Ortes gekennzeichnet. In der Darstellung aus der Klimatopkarte dieser Arbeit sind ebenfalls nur die beiden Seitentäler als (begünstigte) Talbereiche definiert, während ein großer Teil auch als Untere Riedelzone (dunkleres grün) gekennzeichnet ist. Der Ortskern sowie die unteren Hangbereiche der Gleichenberger Kogel sind je nach Exposition als begünstigte, neutrale sowie benachteiligte untere Hangbereiche ausgewiesen. Der schmale Höhenzug im Osten der Karte wird in allen 3 Karten (in unterschiedlicher Detailgenauigkeit) ähnlich dargestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in der Karte dieser Arbeit vor allem aufgrund der Trennung nach unterschiedlichen Expositionen sowie der genauen Definition sämtlicher Hangbereiche am meisten Details herauszulesen sind. Grundsätzlich weisen alle drei Darstellungen auf eine ähnliche Charakteristik hin, wobei bei LAZAR der Ortsbereich von Bad Gleichenberg als am stärksten benachteiligt dargestellt wird.

12.5 Vergleich mit der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und die Darstellung der Klimatopkarte dieser Arbeit herangezogen, um sie mit jener des Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) zu vergleichen.

Der Vergleich mit der Darstellung im Digitalen Atlas (siehe Abb. 118, Kap. 11) wird auf drei Bereiche aufgeteilt: Talregionen, Übergangsgebiete / Sonderflächen sowie Hangzonen.

a) Talregionen

Grundsätzlich stimmen die Talregionen gut überein, und auch die Farbgebung wurde sehr ähnlich und in Einklang mit den gängigen Standards in wissenschaftlichen Karten gewählt. Das Raabtal stellt in beiden Darstellungen durch den größeren Einfluss des Windes bedingt, eine eigene Zone dar, und auch die kältesten Gebiete mit Kältestauzonen stimmen überein. Im Detail ergeben sich einige Unterschiede, die in der Folge genauer analysiert werden.

Die Zone des Raabtals ist im Digitalen Atlas der Steiermark auch auf die im Nordwesten gelegenen Seitentäler ausgeweitet. Diese Seitentäler bei Kirchberg an der Raab sind an dieser Stelle tatsächlich sehr breit, allerdings nur auf kurzer Strecke. Die Windströmungen des nahen Raabtals haben zwar einen gewissen Einfluss, reichen aber nicht für erhöhte Windgeschwindigkeiten. Aus diesem Grund wurden diese Seitentäler nicht in die Zone des Raabtals miteinbezogen, da ihr Charakter mehr denen eines (vom Raabtal beeinflussten) Seitentales entspricht. Außerdem ist die farbliche Darstellung mehrerer Seitentäler offenbar falsch, da sie in die Zone des „Haupttals“ zugehörig definiert werden (siehe Abb. 124: Zone 28.1 auch in den Seitentälern).

Bei den Einmündungen der Seitentäler in das Raabtal wurde im Digitalen Atlas meist dem Einfluss der Seitentäler mit einer kurzen Ausdehnung ins Haupttal Rechnung getragen. Eine genaue Abgrenzung des Einflusses der Seitentäler erscheint unmöglich, allerdings dürfte der stärkere Raabtalwind diesen meist überlagern. Daher werden in der Darstellung dieser Arbeit die Seitentäler meist scharf mit der Einmündung ins Raabtal abgegrenzt (in Abb. 124 im Norden und Süden von Feldbach realisiert). Diese Maßnahme müsste durch zusätzliche Messungen und Stationen im fraglichen Bereich aber noch verifiziert werden.

Die größte Schwäche der Darstellung im Digitalen Atlas liegt bei den begünstigten Seitentalregionen. Abgesehen davon, dass der Raum Feldbach als „begünstigte Seitentalzone“ definiert wurde (in Abb. 124 (links), Zone 27.1 bei Feldbach), sind diese Zonen nicht konsequent umgesetzt worden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass enge Täler (wie beispielsweise im Bereich von Talschlüssen) durch die Überwärmung der Hänge begünstigt sind. Dies wurde in der Darstellung dieser Arbeit auch so umgesetzt, während im Digitalen Atlas eher wahllos kalte oder begünstigte Verhältnisse beschrieben werden (in Abb. 124 gut erkennbar, wobei einmal ein See ins Haupttal mündet (weiße Fläche in der rechten Darstellung)).

Im Gegensatz zum Digitalen Atlas werden in der Darstellung dieser Arbeit nur drei verschiedene Temperaturzonen der Seitentäler definiert (anstatt vier). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Zonen sind so gering, dass die zusätzliche Zone „Kaltes Haupttal“ nicht notwendig erscheint.

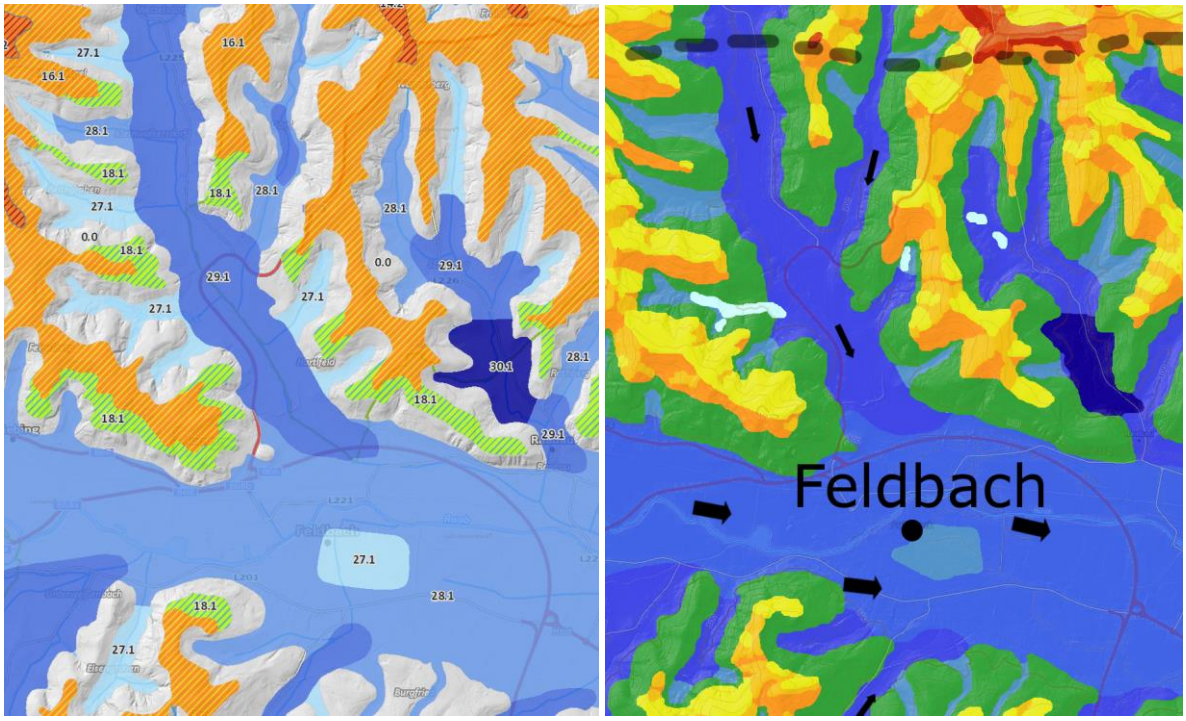


Abb. 124: Vergleich der Darstellung der Talregionen im Raum Feldbach in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark (links) und der Darstellung in dieser Arbeit (rechts). *(Quellen: Land Steiermark 2013, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

b) Übergangsgebiete und Sonderflächen

Die Terrassenlagen im Osten des Gebiets wurden im Digitalen Atlas in „mäßig begünstig“ und „begünstigt“ unterteilt, in der Darstellung dieser Arbeit wurden die beiden Zonen in eine gemeinsame Terrassenzone zusammengefasst. Im Gegensatz zur Einteilung im Digitalen Atlas wurden die Seitentäler konsequent durch diese Zone geführt, da auch in diesem Bereich klar von Tälern mit den dazugehörenden Eigenschaften gesprochen werden muss. Auch wurde diese Zone auf Kosten der unteren Riedelzone (bzw. des „Übergangsbereichs“ im Digitalen Atlas) ausgeweitet (siehe Abb. 125 jeweils im oberen Bereich).

Die Zone mit stehenden Gewässern ist gut übereinstimmend mit der Darstellung im Digitalen Atlas. Es wurden allerdings auch kleinere Seen berücksichtigt und der Bereich im Osten von Feldbach auf das tatsächliche Gebiet mit Wasseroberfläche beschränkt (kleinere Wasserflächen sind in der rechten Darstellung der Abb. 125 z.B. am rechten Bildrand erkennbar).

Die „Übergangszone“ des Digitalen Atlas der Steiermark, die als Bereich zwischen benachteiligten Talregionen und begünstigten Hügellagen nur dürftig beschrieben wird, ist in der Darstellung dieser Arbeit als „Untere Riedellage“ beschrieben und mit grüner Farbe eingezeichnet. Der größte Unterschied besteht jedoch in der Ausdehnung dieser Zone, die im

Digitalen Atlas durchgehend ähnlich breit ausgebildet ist (siehe Abb. 125 links: ähnlich breite Ausdehnung der Übergangszone im gesamten Talverlauf). In der Darstellung dieser Arbeit variiert die Breite zwischen sehr breit (nahe des Raabtales) und sehr schmal (vor allem im Bereich von Talschlüssen, siehe Abb. 125 rechts: sehr breit im Einflussbereich des Raabtals, sehr schmal in Talschlussregionen). Dies erscheint logisch und wurde auch durch stichprobenartige Erhebungen bestätigt, da einerseits das Raabtal einen größeren und höher reichenden Einfluss auf die umliegenden Riedel hat als kleinere Täler.

Andererseits sind Talschlussgebiete meist nur wenig von Kaltluftprozessen beeinträchtigt und die Luftmassen werden direkt talabwärts transportiert, wodurch dort meist nur eine sehr schmale untere Riedelzone definiert wird. In diesen Gebieten folgt nach der Talregion und der sehr schmalen unteren Riedelzone bereits der begünstigte Bereich mittlerer Riedellage. Auch die begünstigten Gebiete oberer Riedellage beginnen dementsprechend bereits weiter unten am Hang.

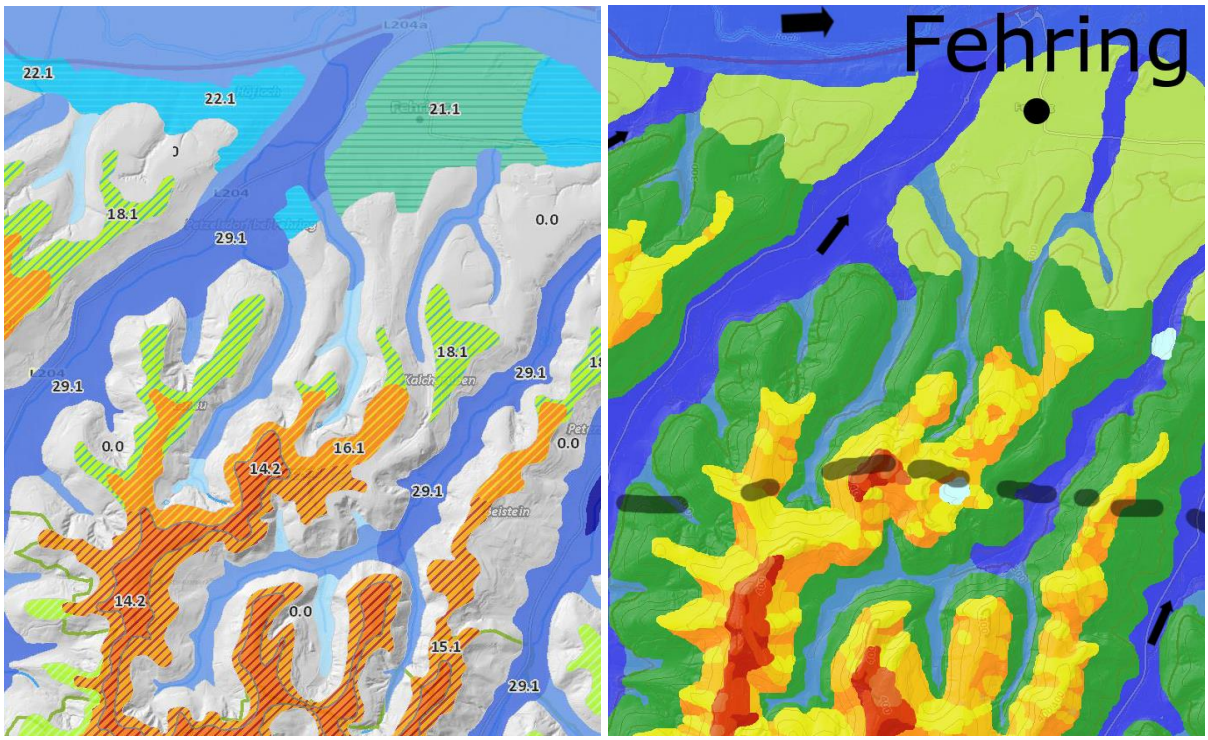


Abb. 125: Vergleich der Darstellung der Übergangsregionen und Sondergebiete im Raum Fehring in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark (links) und der Darstellung in dieser Arbeit (rechts). *(Quellen: Land Steiermark 2013, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

c) Hangzonen

Bei den Hangzonen treten die deutlichsten Unterschiede zwischen dem Digitalen Atlas und der Darstellung in dieser Arbeit auf. Im Digitalen Atlas werden diese Bereiche vorwiegend über die Seehöhe definiert. Die „Untere Riedellage“ sowie „Untere Riedellage in Talnähe“ sind fast nur nördlich des Raabtales zu finden, während im Süden des Raabtales nach der Übergangszone meist Bereiche in mittlerer Hanglage folgen. Diese Unterscheidung erscheint wenig konsequent und kann mit den vorhandenen Daten auch nicht bestätigt werden.

In der Darstellung dieser Arbeit folgen nach der „Unteren Riedelzone“ jeweils drei Zonen mittlerer sowie oberer Hanglage, wobei neben der Seehöhe bzw. Höhe über Tal vor allem auf die Exposition Rücksicht genommen wird. Diese ist (wie in Kap. 6.8.1 beschrieben) ein sehr wichtiger Faktor hinsichtlich der thermischen Gunst. Die Darstellung kann dadurch deutlich detaillierter und in guter Übereinstimmung mit den Messwerten aus dem Kap. 6.1 gestaltet werden und unterscheidet sich teilweise deutlich von jener im Digitalen Atlas. Beiden liegt jedoch die Tatsache zugrunde, dass in größeren Höhen die Temperaturgunst zunimmt.

Die nachfolgende Abb. 126 zeigt einen Ausschnitt des Gebietes mit den Hügelzonen in unterschiedlichem Detailgrad. Während im Digitalen Atlas der Steiermark (links) vor allem drei Zonen häufig vorkommen, sind es in der Darstellung dieser Arbeit (rechts) durch die Hinzunahme des Parameters Exposition sechs Zonen. In der höchsten Region des Untersuchungsgebietes im Norden von Bad Gleichenberg, wo eine Seehöhe von knapp 600 m erreicht wird, sind die Zonen der oberen Riedellage großflächig realisiert. Dieses Gebiet liegt außerhalb des Einflussbereichs des Raabtales (im rechten Bild am oberen Rand durch die gestrichelte Linie dargestellt). Die Kerbtäler sind durch zusätzliche Signaturen gekennzeichnet (v-Signaturen der rechten Darstellung), da solche Talformen im Untersuchungsgebiet nur hier auftreten und daher eine Sonderform darstellen. Die sehr detaillierte Darstellung in der Darstellung dieser Arbeit (rechts) ist hier besonders auffallend.

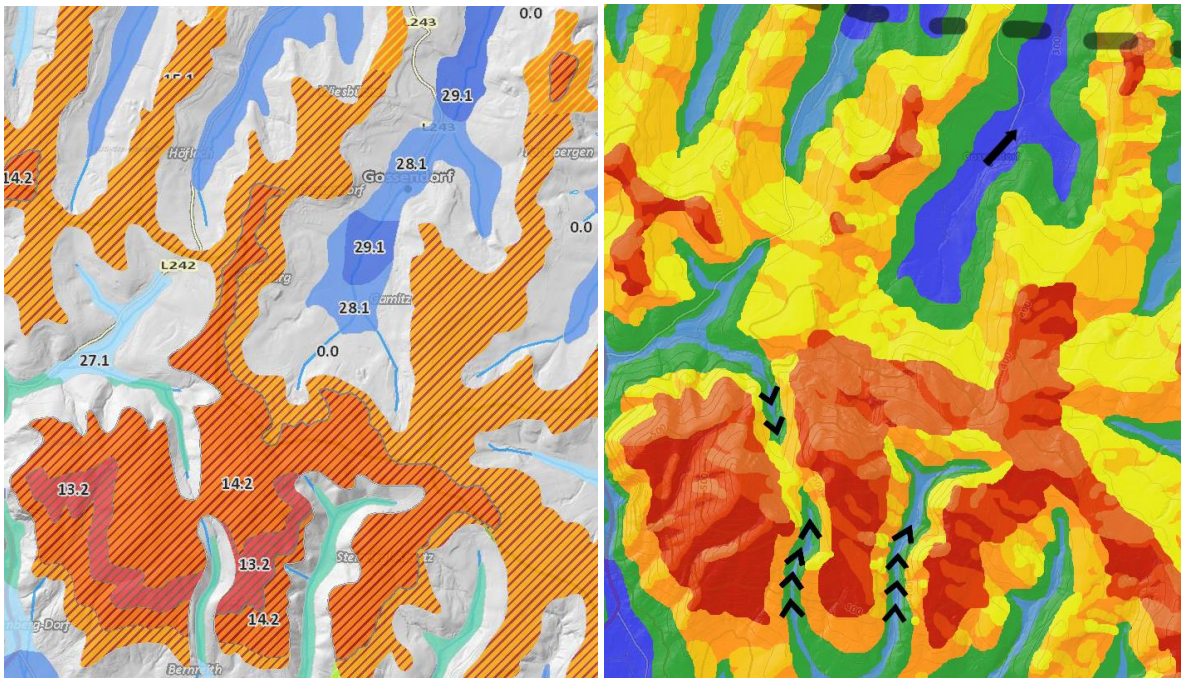


Abb. 126: Vergleich der Darstellung der Hügelregionen im Raum Bad Gleichenberg in der Klimatopkarte des Digitalen Atlas der Steiermark (links) und der Darstellung in dieser Arbeit (rechts). *(Quellen: Land Steiermark 2013, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Grundsätzlich kann also festgehalten werden, dass sich die Darstellung der Karte dieser Arbeit gegenüber jener im Digitalen Atlas vor allem durch eine höhere Komplexität und Detailliertheit, eine konsequentere Umsetzung der Messdaten nach geländeklimatischen Überlegungen sowie die Einbindung von Erfahrungswerten unterscheidet.

Abschließend folgt eine Darstellung der Gitterdaten aus dem Datenportal WegenerNet (vgl. Wegener Center 2013), die allerdings nicht mit den Klimatopkarten dieser Arbeit bzw. des Digitalen Atlas der Steiermark vergleichbar ist. Die Erstellung der Karte erfolgte mittels Stationsdaten durch eine Inverce Distance Weighted Interpolation mit fixem Radius (für die Temperatur mit dem Faktor 1/r) auf ein 200x200 m UTM Gitter. Die Temperaturdaten werden für diesen Vorgang auf die mittlere Gebietshöhe von ca. 300 m reduziert (FUCHSBERGER, pers. Mitt.).

Diese Abbildung soll die Schwierigkeiten und Schwächen aufzeigen, die bei einer automatisierten Kartengenerierung dieser Art auftreten. In erster Näherung scheinen die Werte ganz gut zu passen, da die Täler meist als kalt (blau) und Anhöhen wie die Gleichenberger Kogel im Süden als warm (rot) dargestellt werden. Jedoch fällt bei genauerer Betrachtung auf, dass die Interpolation zwischen den einzelnen Stationen nur stellenweise funktioniert und auf die Reliefformen kaum Rücksicht genommen wird. Das Raabtal ist

beispielsweise nur bis Feldbach als kalt definiert; der leichte Wärmeinseleffekt der Stadt wird in der Folge viel zu großflächig auf die nähere Umgebung ausgeweitet. Südlich von Feldbach gibt es einen tiefroten Bereich, der nicht erklärbar ist. Einige Talbereiche sind deutlich zu warm dargestellt (z.B. bei Gnas im Südwesten, einem der kältesten Bereiche des Untersuchungsgebietes).

Man kann zusammenfassend festhalten, dass (auch wenn die Karte in einigen Bereichen durchaus plausibel erscheint) diese Methodik der Kartenerstellung aus geländeklimatischer Sicht unbrauchbar zur Darstellung realer Verhältnisse ist. In einem (wenn auch schwach) akzentuierten Gebiet wie diesem ist eine Station pro km² deutlich zu wenig, um derart automatisiert eine realistische flächenhafte Darstellung generieren zu können.

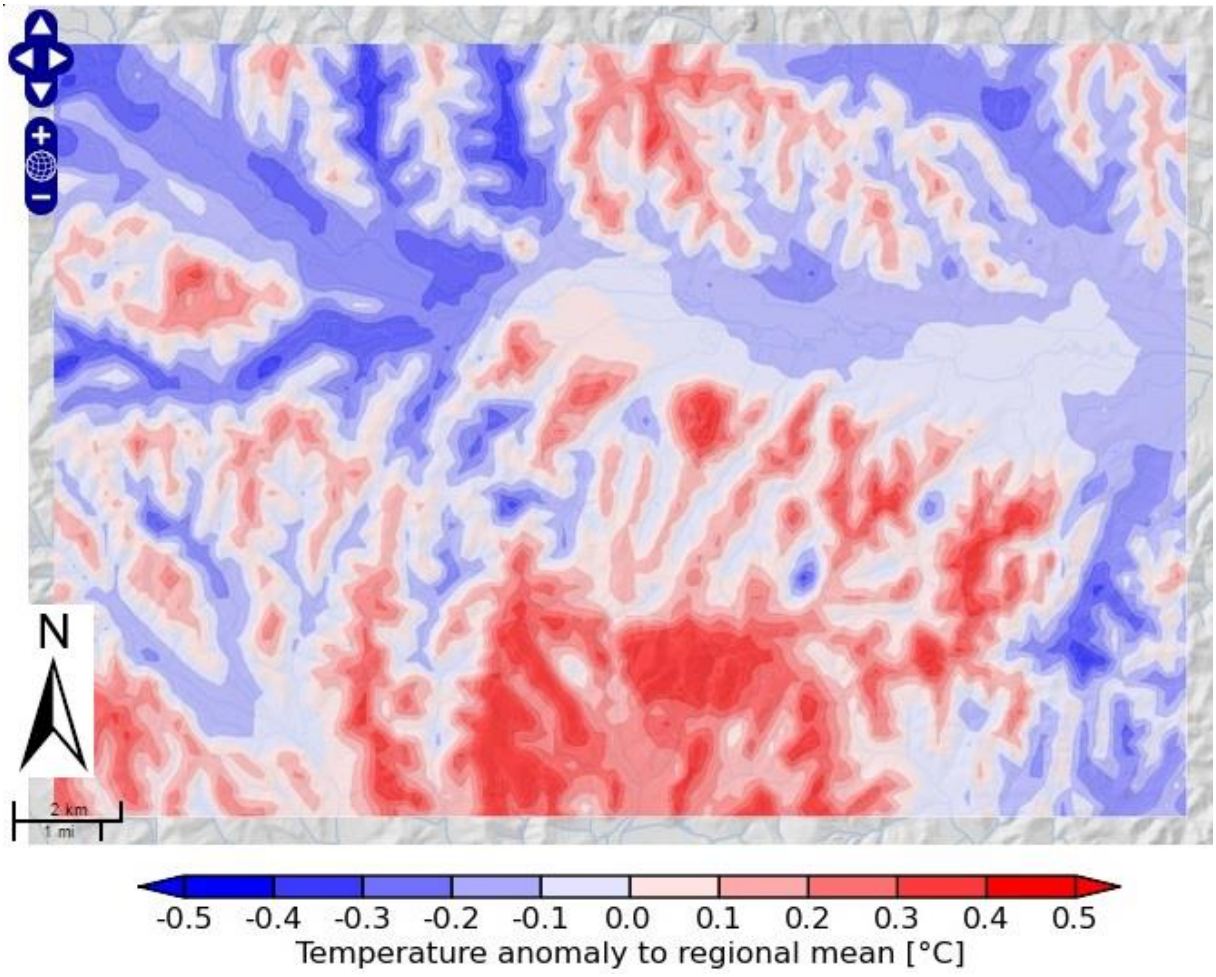


Abb. 127: Mittlere Temperaturverhältnisse im WegenerNet-Gebiet als Abweichung vom Jahresmittelwert (10,10 °C) sämtlicher Stationen im Jahr 2011 in [°C]. Maximalwert: 10,87 °C, Minimalwert: 9,45 °C, Standardabweichung: 0,21 °C. *(Quelle: Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

12.6 Analyse der Ergebnisse und Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erstellung der Klimatopkarte des Untersuchungsgebietes trotz bereits vorhandener Darstellungen und Modellierungen dieses Gebiets einen deutlichen Mehrwert gebracht hat. Durch die detaillierte Ausarbeitung unter Einbeziehung von Mess- und Erfahrungswerten konnte besser auf lokale Bedingungen eingegangen werden, als dies mit Modellierungen allein hätte erreicht werden können. Auch die Einteilung der Hangstufen, welche neben der Seehöhe die Exposition und Höhe über dem Tal als wichtige Faktoren miteinbezieht, liefert neue Rückschlüsse. Die Einteilung der einzelnen Zonen beruht dabei direkt auf den Ergebnissen dieser Arbeit in den Kap. 6 bis 11, die dort (soweit möglich) quantifiziert wurden. Auch die unscharf definierte Übergangsregion zwischen Tal- und Hangbereichen, wie beispielsweise im Digitalen Atlas der Steiermark beschrieben, wurde klarer definiert.

Als Ergebnis liegt nun eine Darstellung klimatischer Verhältnisse vor, die, vor allem auf der Datengrundlage der 151 WegenerNet-Stationen und den Analysen und Auswertungen dieser Arbeit basierend, ein sehr detailliertes und realistisches Ergebnis der tatsächlichen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet liefert. Diese Darstellungsvariante, vor allem hinsichtlich der Verhältnisse an Hängen unter Einbeziehung der Exposition, könnte wichtige Erkenntnisse für die Erstellung zukünftiger Klimatopkarten liefern und diese verbessern. Da nicht anzunehmen ist, dass ein ähnliches Stationsmessnetz in anderen Regionen zur Verfügung steht, sollten die Ergebnisse dieser Arbeit analysiert, an die jeweiligen Verhältnisse vor Ort adaptiert und schließlich in die Karte eingebunden werden.

Im Speziellen könnte diese Klimatopkarte des Untersuchungsgebiets in der Südost-Steiermark als Grundlage für zahlreiche Anwendungsgebiete herangezogen werden. Als wichtiges Beispiel wären die Land- sowie Forstwirtschaft zu nennen, die neue Erkenntnisse bezüglich der optimalen Anbaugebiete und Anbausorten gewinnen könnte (unter Einbeziehung des aktuellen Klimawandels, der in Kap. 14 behandelt wird). Aber auch der Tourismus und die Politik könnten davon profitieren, indem wichtige Entscheidungen und neue touristische Möglichkeiten auf Grundlage dieser Karte gefunden werden.

Darüber hinaus könnte diese Karte als Beispiel für andere (ähnlich strukturierte) Regionen dienen, wo ebenfalls eine Klimatopkarte erstellt werden soll. Auch für die Modellierung und digitale Erstellung solcher Karten können wichtige Informationen gewonnen werden, vor allem hinsichtlich der Relevanz und quantitativen Ausprägung der einzelnen relevanten Parameter.

13. Erstellung einer Karte des potenziellen Weinbaugebiets

Nachfolgend wird die Erstellung der Karte mit potenziellen Weinbauflächen im Untersuchungsgebiet zunächst methodisch beschrieben. Danach folgt in Kap. 13.2 die Darstellung der Karte.

13.1 Grundlagen und Methodik

Für eine spezielle Analyse potenzieller Weinbaugebiete im Untersuchungsgebiet sprechen mehrere Faktoren:

- Weinbau hat in Österreich eine lange Tradition und ist nur bei einem ganz speziellen Klima mit ausreichend Wärme, Sonnenschein und Niederschlag möglich.
- Das Untersuchungsgebiet liegt mitten in der Weinregion „Vulkanland Steiermark“ und ist demnach als gut geeignetes Weinbaugebiet definiert.
- Tatsächlich gibt es in dieser Region aber nur vereinzelt Weinbau.
- Die sanften Riedel sowie eine geringe Bebauungsdichte schaffen beste Voraussetzungen für einen Ausbau des Weinbaus in der Region.

Insgesamt gibt es im Weinbaugebiet „Vulkanland Steiermark“ 1900 Weinbauern, die eine Fläche von 1400 ha bewirtschaften. Die meisten sind Klein- und Kleinstbauern, da durch die Oberflächengestaltung kaum großflächiger Weinbau möglich ist. Die größten Anbauflächen (und auch die größten zusammenhängenden Flächen) befinden sich im Raum des Ortes Klöch, der südlich des Untersuchungsgebietes liegt. Die Hauptsorten umfassen Traminer, Welschriesling, Weissburgunder, Morillon und Blauer Zweigelt (Steirische Spezialitäten Magazin 2015).

Die grundsätzliche Erlaubnis zum Weinanbau ist im Weinbaukataster Steiermark gesetzlich geregelt. Es darf also nicht an beliebig vielen und großen Flächen Wein angebaut werden, und zusätzlich muss eine spezielle Genehmigung eingeholt werden. In unregelmäßigen Abständen gibt es Erweiterungen des Anbaugebiets; die letzte wurde im Jahr 2012 beschlossen, wo eine Ausweitung der Flächen für den Weinanbau um 100 ha festgesetzt wurde (Landwirtschaftskammer Steiermark 2012).

Nachfolgend werden zunächst die allgemeinen Grundvoraussetzungen für Weinbau definiert und dabei vor allem auf klimatische Faktoren und die Topographie eingegangen. Danach wird die Karte der potenziellen Weinbaugebiete vorgestellt und analysiert.

Grundvoraussetzungen für Weinbau

Die folgenden Beschreibungen stammen (sofern nicht anders angegeben) aus Wein-Info (2016).

a) Der Boden

Die Beschaffenheit des Untergrunds wirkt sich stark auf die Charakteristik und den Geschmack des Weins aus. Grundsätzlich sollte der Boden leicht, warm, durchlässig und gut zu entwässern sein. Der im Untersuchungsgebiet auf den Riedeln weit verbreitete Bodentyp Pseudogley ist kein optimaler Untergrund, da er aufgrund der geringen Durchlässigkeit und der Wechselfeuchte (Staunässe und Austrocknung) bestenfalls als mittelmäßig geeignet eingestuft wird; der hohe Tongehalt im Oberboden sowie ein relativ hoher Verdichtungsgrad erschweren die Durchwurzelung (Landwirtschaftliche Umweltberatung Steiermark 2011). Mehrere Beispiele aus der Region des WegenerNet-Gebietes beweisen aber, dass auch unter diesen Bedingungen Weinbau möglich ist. Besser geeignet als der Pseudogley sind die Vulkanböden im Bereich der Gleichenberger Kogel.

b) Die Topographie

Aufgrund der in dieser Arbeit ausführlich beschriebenen Kaltluftprozesse sowie Gunstlagen am Hang, ist der optimale Bereich für Weinbau an Südost- bis Südwest-geneigten Hängen in mittlerer bis oberer Hanglage. Durch die Neigung des Geländes wird darüber hinaus auch die Wirkung und Intensität der Sonneneinstrahlung optimiert. Zu steile Hänge würden hingegen die maschinelle Bewirtschaftung erschweren und die Erosionsgefahr erhöhen, jedoch kommen solche Hänge im Untersuchungsgebiet kaum vor. Die vergleichsweise geringen Höhen der Riedel im Untersuchungsgebiet lassen Weinbau bis zu den Kämmen der höchsten Erhebungen problemlos zu.

c) Das Klima

Optimale klimatische Bedingungen für Weinbau sind grundsätzlich kaum erreichbar, da verschiedene klimatische Faktoren einander zumindest teilweise widersprechen. So kann beispielsweise eine ausreichende Wasserversorgung dazu führen, dass die Sonnenscheindauer zu kurz ausfällt.

Die Niederschläge sollen mindestens 500 mm im Jahr betragen, wobei auch die Verteilung eine wichtige Rolle spielt: Starke Regenfälle zur Zeit der Blüte können großen Einfluss auf Erntemenge und –qualität nehmen. Die Verteilung der Niederschläge im Untersuchungsgebiet weist mit einer ausreichenden Menge und dem Maximum im Sommer gut geeignete Verhältnisse auf.

Hinsichtlich der Temperaturen ist vor allem eine ausreichend lange Vegetationsperiode mit durchschnittlichen Temperaturen über 10 °C förderlich, was zumindest im Untersuchungszeitraum im WegenerNet-Gebiet großflächig der Fall ist (siehe Kap. 6.1, 6.4 bzw. 6.7). Mit einer Dauer der Vegetationszeit von durchschnittlich 240 Tagen im Jahr (siehe Kap. 6.4) ist diese ausreichend. Sehr negativ kann sich Spätfrost auswirken, der aber im Untersuchungsgebiet nur selten auftritt (siehe Kap. 6.4). Im Sommer liegt das Temperaturoptimum für eine bestmögliche Reifung bei ca. 25 °C, was in den Monaten Juli und August im Untersuchungsgebiet flächendeckend erreicht bzw. übertroffen wird (siehe Kap. 6.1). Auch hohe tageszeitliche Schwankungen sind eher negativ, wodurch die höchsten Gebiete der Region (mit der geringsten Schwankungsbreite) am geeignetsten erscheinen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die klimatischen und topographischen Bedingungen auf den Südost- bis Südwest-geneigten, mittleren bis oberen Hangbereichen des Untersuchungsgebiets sehr gut für Weinbau geeignet sein sollten. Problematisch sind hingegen die Bodenverhältnisse, die vor der Auspflanzung der Weinreben wahrscheinlich eine dementsprechende Melioration notwendig machen würden. Aktuelle Beispiele aus dem Untersuchungsgebiet zeigen aber, dass Weinbau durchaus möglich ist und auch erfolgreich umgesetzt wird.

Die Erstellung der Karte

Die Erstellung der Karte mit potenziellen Weinbaugebieten erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst wurde mittels des Flächennutzungsplans das als „Freiland“ festgelegte Gebiet ermittelt. Dieses ist üblicherweise für die landwirtschaftliche Nutzung vorgesehen; Bebauungen sind hier mit wenigen Ausnahmen ausschließlich im Rahmen der Land- und Forstwirtschaft erlaubt. Damit wurden auch sämtliche Flächen ausgeschlossen, die als „Wald“ ausgewiesen sind und damit nicht ohne weiteres zur Verfügung stehen würden.

Der Flächenwidmungsplan ist allerdings nicht flächendeckend verfügbar, und darüber hinaus sind viele bewaldete Flächen nicht als Wald, sondern als Freiflächen ausgewiesen. Daher wurde im nächsten Schritt die Waldmaske des Digitalen Atlas der Steiermark miteinbezogen (Land Steiermark 2013).

Danach wurde die Klimatopkarte der Region aus Kap. 12 herangezogen und sämtliche als gut bzw. sehr gut ausgewiesene Abschnitte mittlerer und oberer Hanglagen ausgewählt. Diese Regionen sind durch ihre (in Kap. 6 beschriebene) Temperaturgunst am besten für den Weinbau geeignet. Es wurde dabei zwischen den sehr gut geeigneten Zonen mittlerer und oberer Hanglage (in Südost- bis Südwest-Exposition) auf der einen, und den gut geeigneten

Zonen mittlerer und oberer Hanglage (in Südost- bis Nordost- sowie Südwest- bis Nordwest-Exposition) auf der anderen Seite unterschieden. Die thermischen Unterschiede zwischen mittlerer und oberer Hanglage sind gering, allerdings spielt die Exposition eine große Rolle und wird somit zum dominanten Faktor.

Die Kombination der Freiflächen des Flächenwidmungsplans (unter Ausschluss sämtlicher bewaldeten Gebiete) mit den als gut bzw. sehr gut ausgewiesenen Zonen ergibt nun eine Darstellung des potenziellen Weinbaugebietes. Die Zonen wurden per Hand im Programm GIMPshop in die Karte übertragen. Es wurden dabei nur Gebiete berücksichtigt, die eine ausreichend große, zusammenhängende Fläche (ab 10.000 m² = 1 ha) ohne Unterbrechungen durch Straßen, Wald und ähnliches als potenzielles Weinbaugebiet ermöglichen.

13.2 Die Karte potentieller Weinbauflächen

Als Ergebnis der im vorangehenden Kapitel beschriebenen methodischen Überlegungen wurde eine Karte mit potenziellen Weinbaugebieten im Untersuchungsgebiet erstellt (Abb. 128), wobei die Besitzverhältnisse, derzeitige Nutzung, Hindernisse u. ä. nicht berücksichtigt wurden.

Auf geographische Inhalte wie Orts-, Straßen- und Flussnamen wurde verzichtet, diese können in Kap. 3.1, Abb. 10 nachvollzogen werden.

Sehr gut geeignete Standorte (Südost bis Südwest exponiert) sind violett, gut geeignete (Nordost bis Südost bzw. Südwest bis Nordwest exponiert) rosa gekennzeichnet. Das nachfolgend beschriebene Weingut Hutter ist mit einem Pfeil verortet.

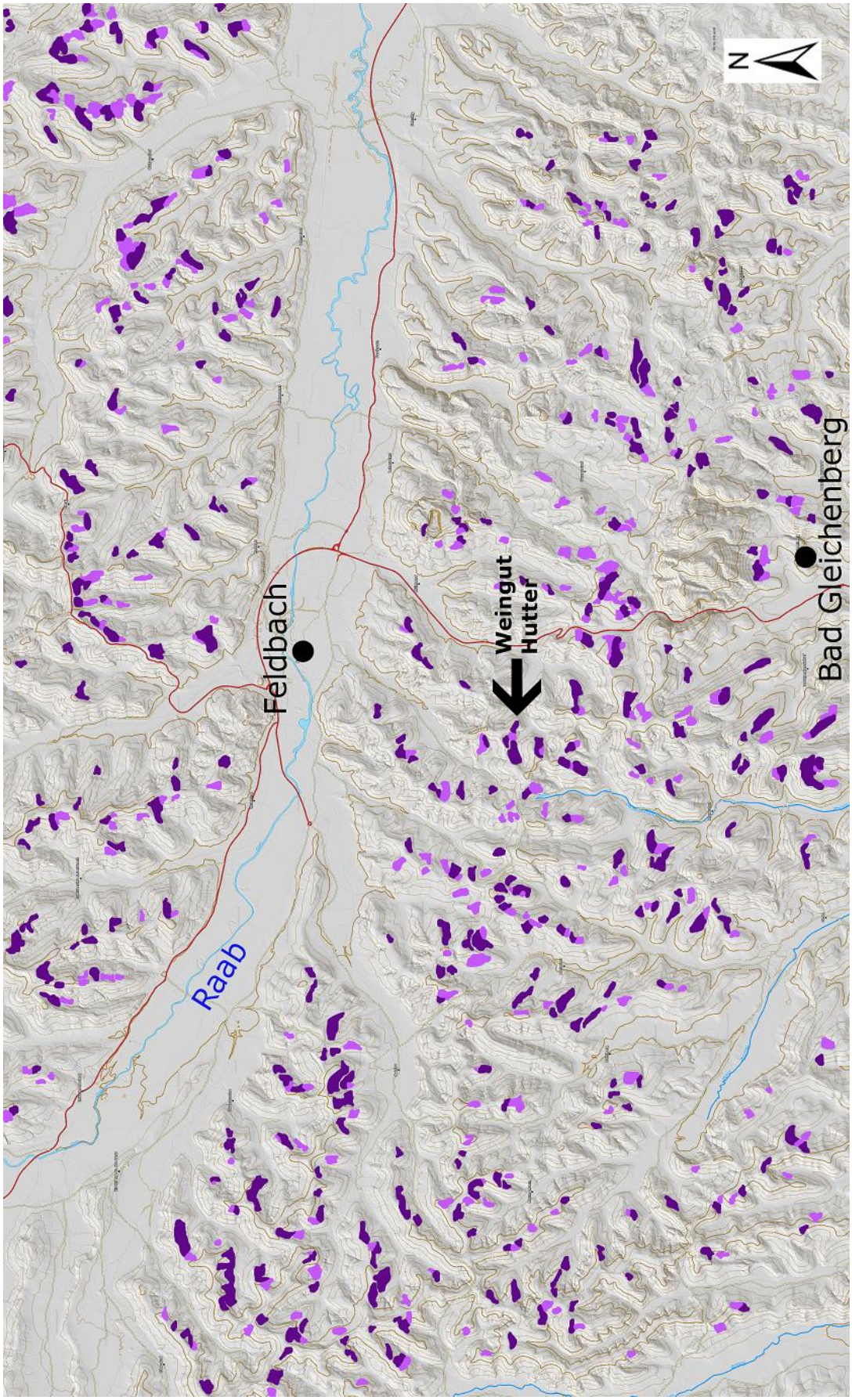


Abb. 128: Karte der potenziellen Weinbaugebiete in der Region des WegenerNet-Gebietes in der Steiermark. *(Quellen: Google Maps 2015, Land Steiermark 2013; eigene Bearbeitung)*

Diese Darstellung soll vor allem einen Überblick verschaffen, wo überall in der Region Weinbau möglich wäre. Das Raabtal ist aufgrund der fehlenden Erhebungen demnach nicht gut geeignet. Vor allem im Raum um Bad Gleichenberg sowie nach Norden Richtung Feldbach gibt es zahlreiche Möglichkeiten. Sehr große zusammenhängende Flächen gibt es kaum, meist handelt es sich um einzelne Hangabschnitte. Die Gleichenberger Kogel sind fast durchgehend bewaldet und scheiden somit in dieser Analyse als mögliche Standorte aus, wobei die Bodenbedingungen dort am besten wären (siehe Bodenanalyse in Kap. 13.1).

Als Beispiel für einen funktionierenden Weinbau in dieser Region wird das „Naturweingut Hutter“ bei Reiting (genaue Position in Abb. 128 mit Pfeil gekennzeichnet) herangezogen. Dieses liegt nur teilweise auf optimal geeignetem Gebiet und ist nach Osten, Süden und Westen ausgerichtet. Die nächste Abb. 129 zeigt ein Luftbild des Standorts. Dieses Beispiel zeigt, dass Weinbau in dem Gebiet durchaus (und nicht zwingend nur bei optimalen Klimaverhältnissen) möglich ist.

Abb. 129: Das „Naturweingut Hutter“ bei Reiting im WegenerNet-Gebiet. *(Quelle: Google 2015, eigene Bearbeitung)*

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Untersuchungsgebiet aufgrund der guten (gelände-)klimatischen Verhältnisse sehr viele, meist kleinräumige Flächen für den Weinbau geeignet sind. Größere zusammenhängende Flächen wären auf den Gleichenberger Kogeln möglich, die aber aufgrund der Bewaldung laut Methodik in Kap. 13.1 nicht berücksichtigt werden konnten.

Das Potenzial für Weinbau ist demnach in dieser Region sehr hoch, wird aber noch wenig genutzt. Neben den anspruchsvollen klimatischen Anforderungen ist die Zusammensetzung der Böden das größte Problem, die in den meisten Gebieten (ausgenommen die Gleichenberger Kogel) vorab melioriert werden müssten. Ein möglicher Ausbau dieser Flächen hängt auch von alternativen land- und forstwirtschaftlichen Nutzungsformen, gesetzlichen Bestimmungen, regionalen Entwicklungsplänen und dem Wunsch der ansässigen Bevölkerung ab.

14. Faktor Klimawandel

In diesem Kapitel werden zunächst die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels im Untersuchungsgebiet beleuchtet, und anschließend Ergebnisse aus den gewonnenen Daten im Rahmen dieser Arbeit bewertet. Der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren ist grundsätzlich für einen solchen Vergleich zu kurz, allerdings können sehr wohl Tendenzen bewertet werden.

14.1 Prognosen für die Periode von 2021 - 2050

Hinsichtlich der Prognosen für die Region um Feldbach und Bad Gleichenberg gibt es eine Studie des Wegener Centers (GOBIET et al. 2012), die sich mit der Steiermark im Allgemeinen, aber auch der Region Südost-Steiermark im Speziellen befasst. Sie enthält Ergebnisse nationaler und internationaler Klimaforschung und besteht aus den Ergebnissen von 24 Klimasimulationen. Darüber hinaus hat auch das Austrian Panel on Climate Change (APCC) im Jahr 2014 eine Studie veröffentlicht, in der es um Prognosen bis zum Jahr 2100 geht (KROMP-KOLB et al. 2014). Die Hauptaussagen dieser Studien werden nachfolgend erläutert.

Die Abb. 130 zeigt einen Vergleich der Klimanormalperiode von 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050. Die größten Unterschiede werden demnach im Winter erwartet, wo in der Südost-Steiermark Steigerungen um 1,65 - 1,8 K vorhergesagt werden; auch in den übrigen Jahreszeiten sind Steigerungen von über 1 K zu erwarten, was einen Anstieg des Jahresmittels um rund 1,3 K ergibt.

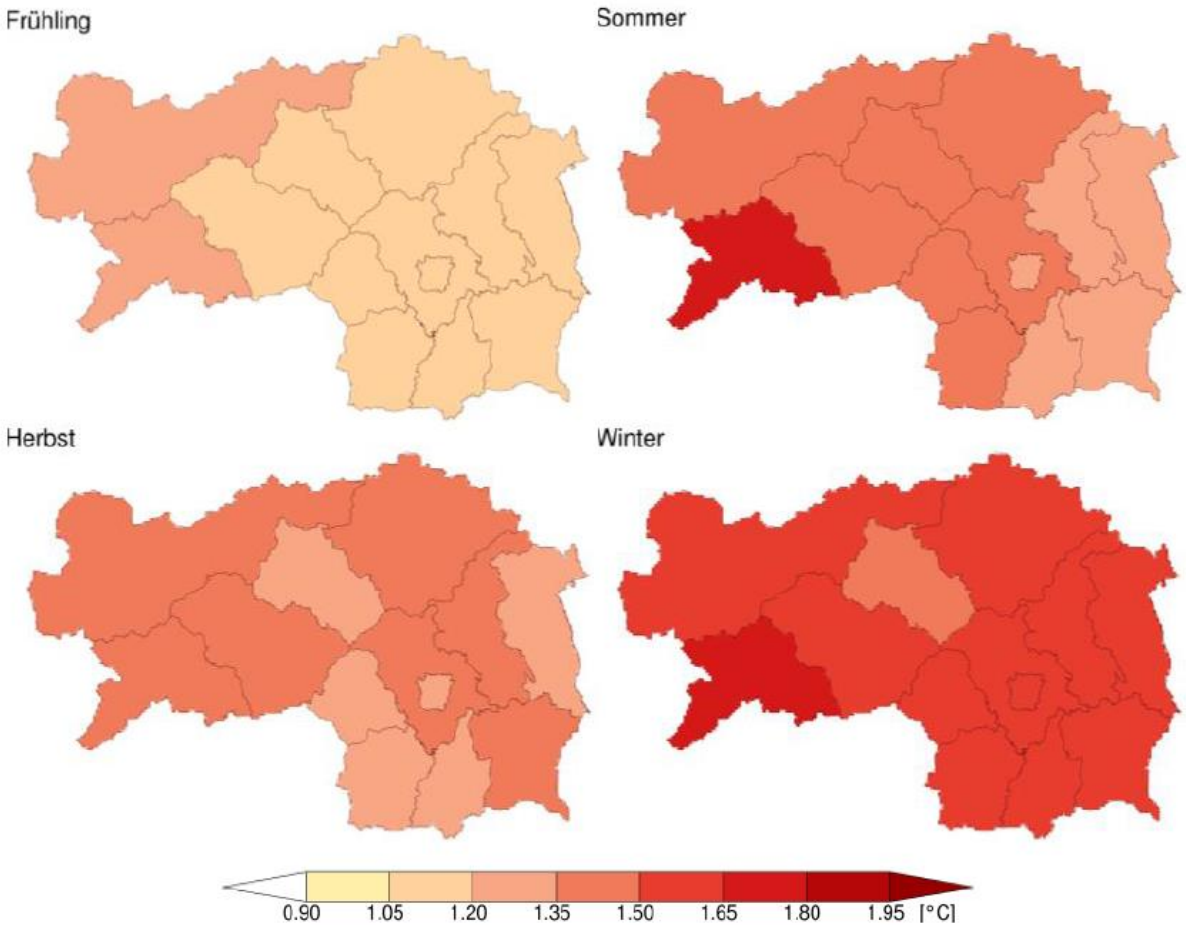


Abb. 130: Erwartete saisonale Temperaturänderung in [°C] als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050. *(Quelle: GOBIET et al. 2012, S. 20)*

In der nächsten Abb. 131 sind die Kühlgradtage (KGT) dargestellt. Kühlgradtage sind die Summe von Temperaturdifferenzen (= Tagesmittel - 18,3 °C) an Tagen mit einer Mitteltemperatur von mindestens 18,3 °C. Sie sind ein gutes Maß für den Energieverbrauch, der an heißen Tagen zur Kühlung von Gebäuden aufgewendet werden muss. Die Änderung tritt dementsprechend auch fast ausschließlich im Sommer auf, und gerade in der Südost-Steiermark ist mit einer deutlichen Zunahme um 58,4 KGT pro Jahr zu rechnen.

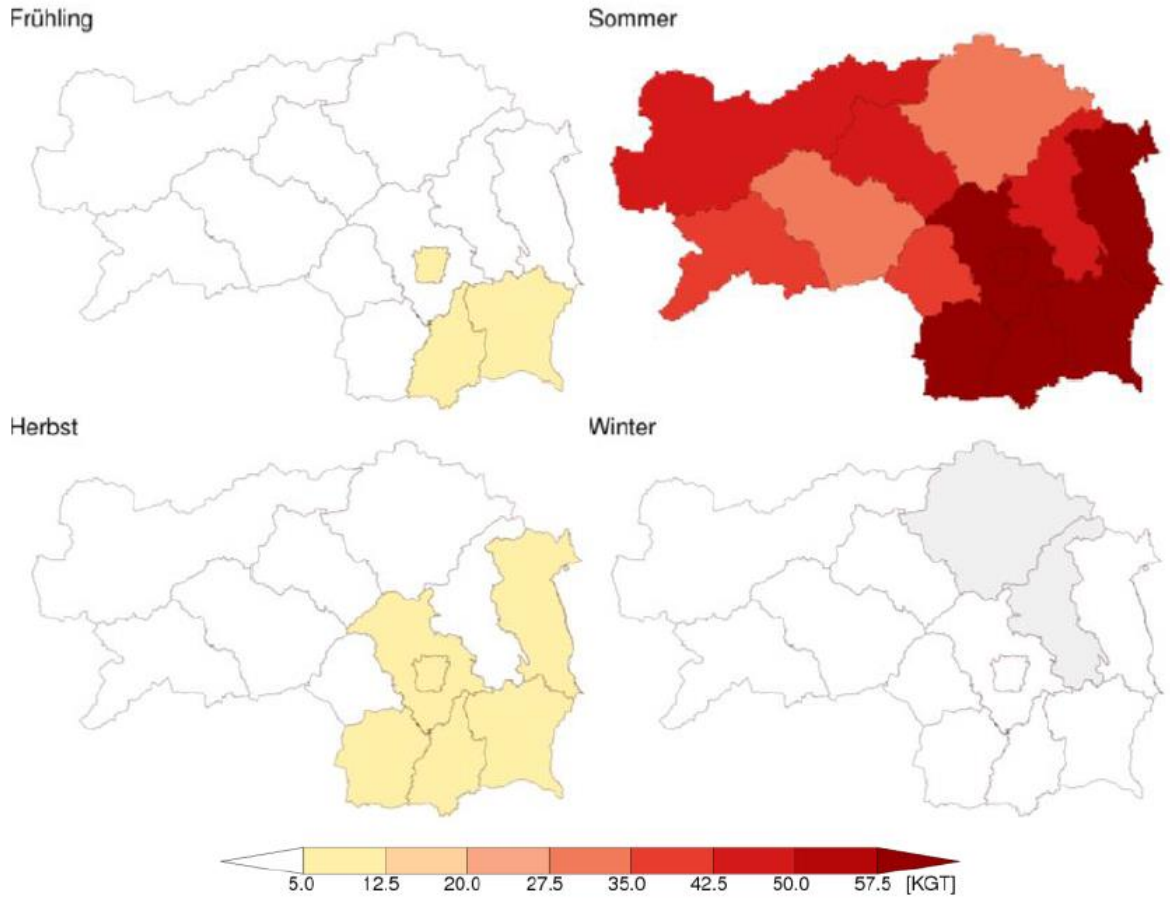


Abb. 131: Erwartete saisonale Änderung der Kühlgradtage als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050. Gebiete mit nicht signifikanten Änderungen sind in grau gehalten. *(Quelle: GOBIET et al. 2012, S. 25)*

Im Sachstandsbericht Klimawandel (KROMP-KOLB et al. 2014, S. 85) wird von einer deutlich steigenden Anzahl an heißen Tagen ausgegangen; so soll die Anzahl von Hitzewellen österreichweit bis zum Jahr 2100 von derzeit 5 auf 15 steigen, wobei vor allem der urbane Raum stark betroffen sein soll.

Beim Niederschlag (Abb. 132) gibt es im Frühling und Sommer in der Südost-Steiermark keine aussagekräftige Prognose, im Herbst und Winter ist mit einer Zunahme um bis zu 10 % zu rechnen. Durch die wenig signifikanten Analysen gibt es eine hohe Schwankungsbreite der Ergebnisse, aber insgesamt ist im Jahresdurchschnitt mit einer Steigerung um rund 3,8 % zu rechnen.

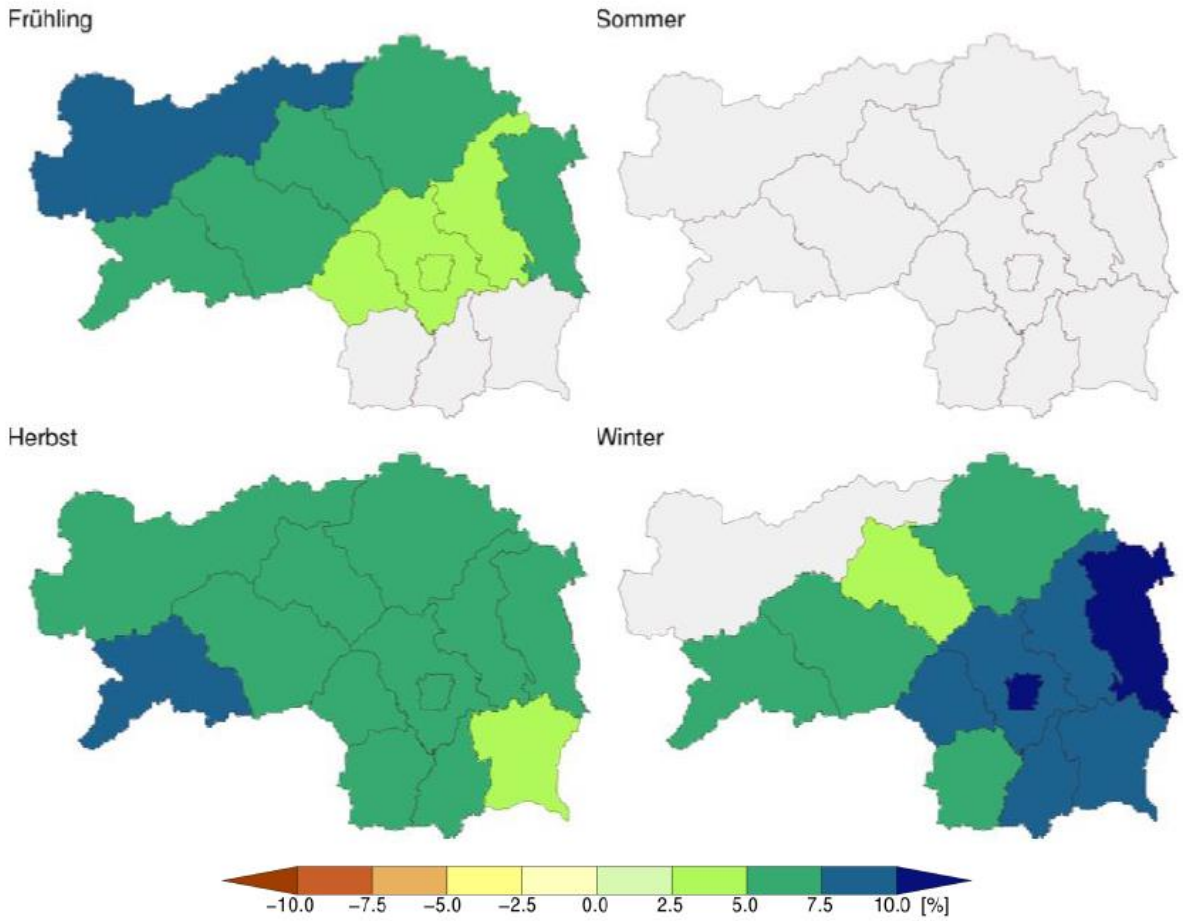


Abb. 132: Erwartete saisonale Niederschlagsänderung in [%] als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050. Gebiete mit nicht signifikanten Änderungen sind in grau gehalten. *(Quelle: GOBIET et al. 2012, S. 22)*

Damit entspricht diese Studie auch dem Ergebnis des Österreichischen Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (KROMP-KOLB et al. 2014), der im Rahmen des Programms „Austrian Climate Research Program“ erstellt wurde. Hier wird von einer Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr, aber einer Abnahme im Sommerhalbjahr ausgegangen (KROMP-KOLB et al. 2014, S. 30); im Jahresdurchschnitt sind bis 2100 keine nennenswerten Veränderungen zu erwarten (Abb. 133).

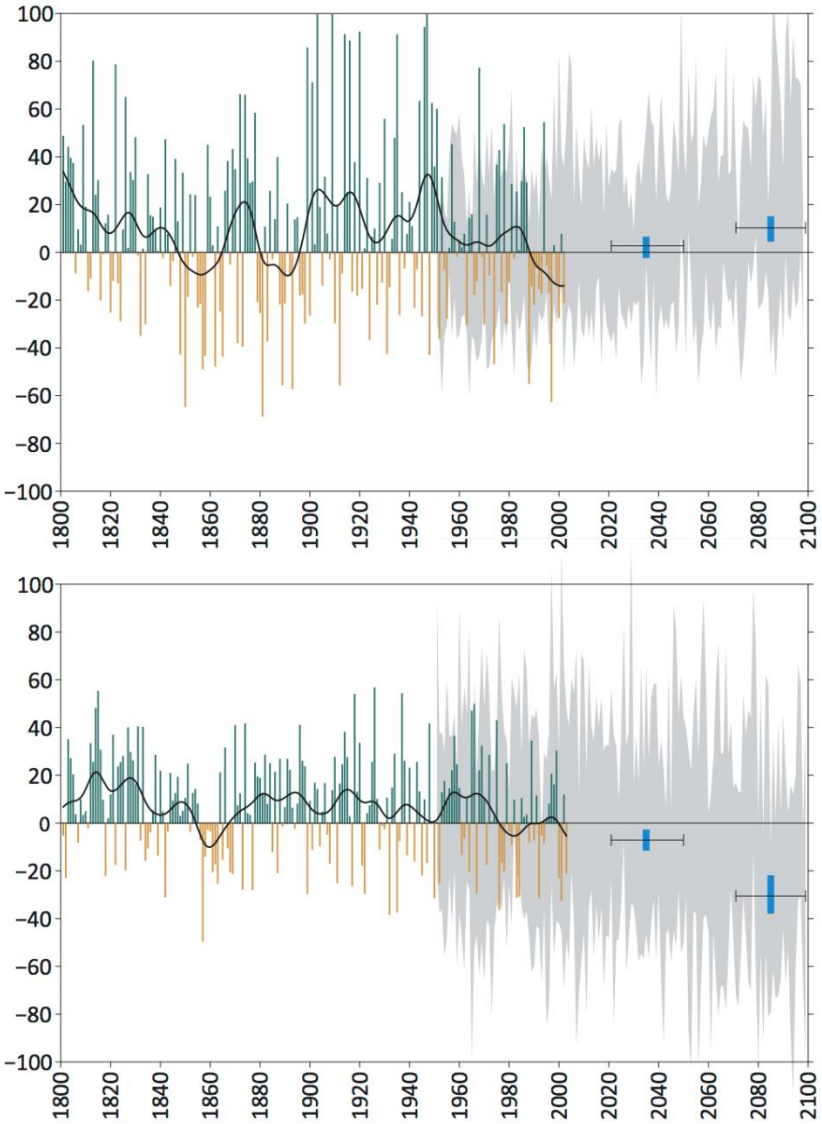


Abb. 133: Niederschlagsentwicklung in Südost-Österreich seit 1800 aus Niederschlagsdaten sowie Prognosen für den Zeitraum bis 2100 in [%]. Oben: Winter, unten: Sommer. Graue Balken: Schwankungsbereich der ENSEMBLES Simulationen; blaue Balken: Schwankungsbereich RECLIP Simulationen, graue horizontale Linien: Mittelwert der RECLIP Simulationen. *(Quelle: KROMP-KOLB et al. 2014, S. 84; eigene Bearbeitung)*

Vor allem hinsichtlich der Landwirtschaft sind Starkniederschlagsereignisse von großer Bedeutung; die prognostizierte Änderung ist in Abb. 134 dargestellt. Die Unsicherheit ist allerdings sehr hoch. Wahrscheinlich ist eine leichte Zunahme der Tage mit Starkniederschlägen in der Südost-Steiermark vor allem im Frühling und Herbst mit bis zu 0,3 Tagen, was im Jahresdurchschnitt eine Steigerung um etwa 0,5 Tage ergibt.

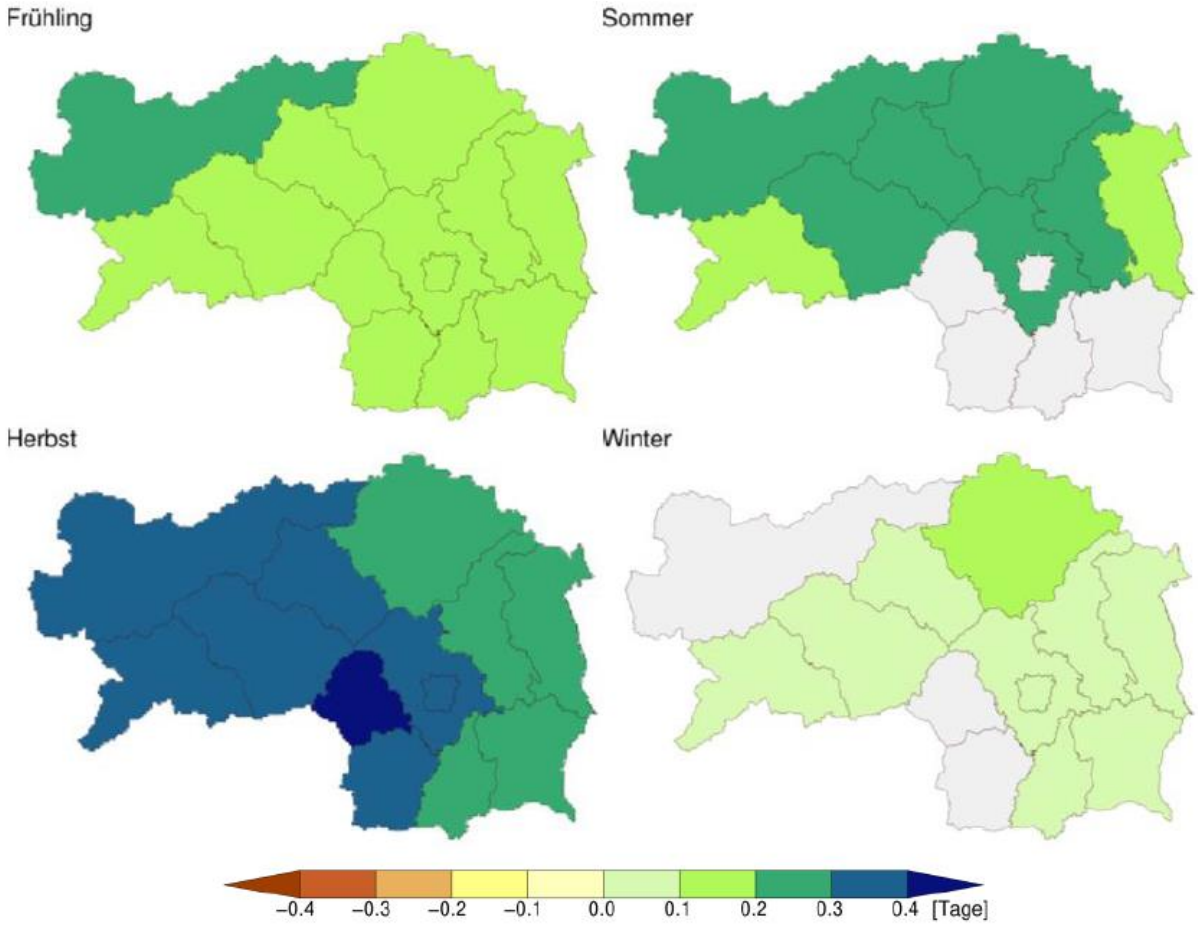


Abb. 134: Erwartete saisonale Änderung der Tage mit starkem Niederschlag (über 30 mm Niederschlagssumme pro Tag) in [Tage/Saison] als Vergleich der Periode 1971-2000 mit der Prognose für die Periode 2021-2050. Gebiete mit nicht signifikanten Änderungen sind in grau gehalten. *(Quelle: GOBIET et al. 2012, S. 28)*

Ähnlich lautet auch die Prognose des Sachstandberichts Klimawandel (Kromp-Kolb et al. 2014, S. 85-87), wonach die Wahrscheinlichkeit für starke Niederschläge von Herbst bis Frühling zunehmen wird; ganz allgemein soll die Wahrscheinlichkeit für Extremereignisse zunehmen.

Hinsichtlich der Trockenperioden, die eine wichtige Rolle vor allem in der Landwirtschaft spielen, gibt es in einer anderen Studie von FORMAYER et al. (2005, S. 10) ein aussagekräftiges Ergebnis: Im verwendeten CHRM-Szenario zeichnet sich in der Region „Süd“, die also weit mehr als nur die Südost-Steiermark abdeckt, ein starker Anstieg der Trockenperioden ab (Abb. 135). Vor allem bei einer Dauer von zwei Wochen und mehr ist mit einem häufigeren Auftreten zu rechnen; im Falle der Trockenperioden mit einer Dauer von zwei Wochen ist beispielsweise mit einem Anstieg von 0,2 aus der Periode 1961-1990 auf 1,4 Ereignissen pro Jahr in der Periode 2070 – 2100 zu rechnen. Hier wurde also ein noch weiter in der Zukunft

liegender Vergleichszeitraum herangezogen, der naturgemäß auch einer stärkeren Unsicherheit unterliegt. Dabei wurde aber nicht auf Jahreszeiten Rücksicht genommen.

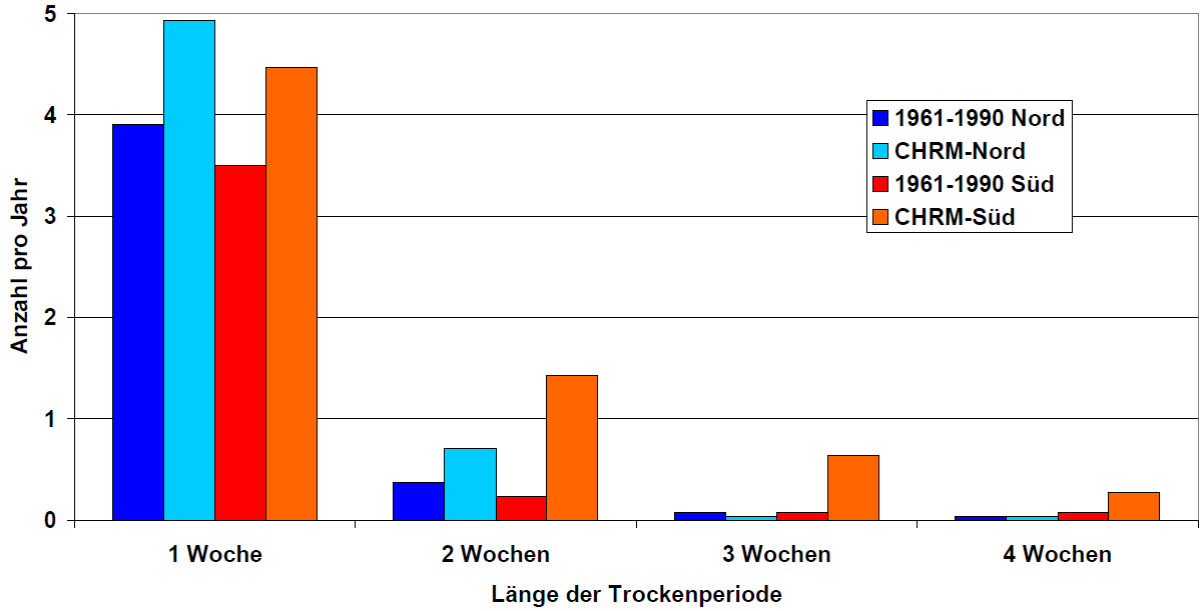


Abb. 135: Häufigkeit von Trockenperioden (Niederschlag ≤0,1 mm pro Tag) in den Regionen Nord und Süd, beobachtet und als Ergebnis der CHRM-Szenarien für die Periode von 2070-2100 (korrigiert). *(Quelle: FORMAYER et al. 2005, S. 14)*

14.2 Vergleich des Untersuchungszeitraums 2007 – 2011 mit der Klimanormalperiode 1971 – 2000

In diesem Kapitel werden nun die Aussagen aus dem vorangehenden Kapitel mittels Messdaten evaluiert, wobei nur der Jahresnormalwert der Temperatur sowie die Auswertung der speziellen Tage behandelt werden. Die übrigen Parameter wurden entweder nicht erhoben oder sind praktisch nicht zu verifizieren, da eine Schwankung von vielen verschiedenen Faktoren abhängen kann und der Klimawandel nur eine der möglichen Erklärungen ist (wie bei den Niederschlagsverhältnissen).

Zu Beginn dieses Kapitels folgt der Vergleich der ZAMG-Station Bad Gleichenberg (Zeitraum 1971-2000) mit den Daten der sehr nahe gelegenen Station 145 (2007-2011). Die Daten der Periode von 1981-2010 konnten leider nicht verwendet werden, da sie seitens der ZAMG für Bad Gleichenberg nicht zur Verfügung stehen. Die Station 145 liegt etwa 300 m Luftlinie im Südosten der ZAMG-Station auf einem flach ansteigenden Hang. Dadurch ist die Station etwas

begünstigt, was beim Jahresnormalwert einen durchschnittlichen Unterschied von +0,5 K ausmacht.

Die folgende Abb. 136 zeigt den Verlauf der Jahresnormalwerte der ZAMG-Stationen von Feldbach und Bad Gleichenberg sowie der Station 145 im WegenerNet-Gebiet.

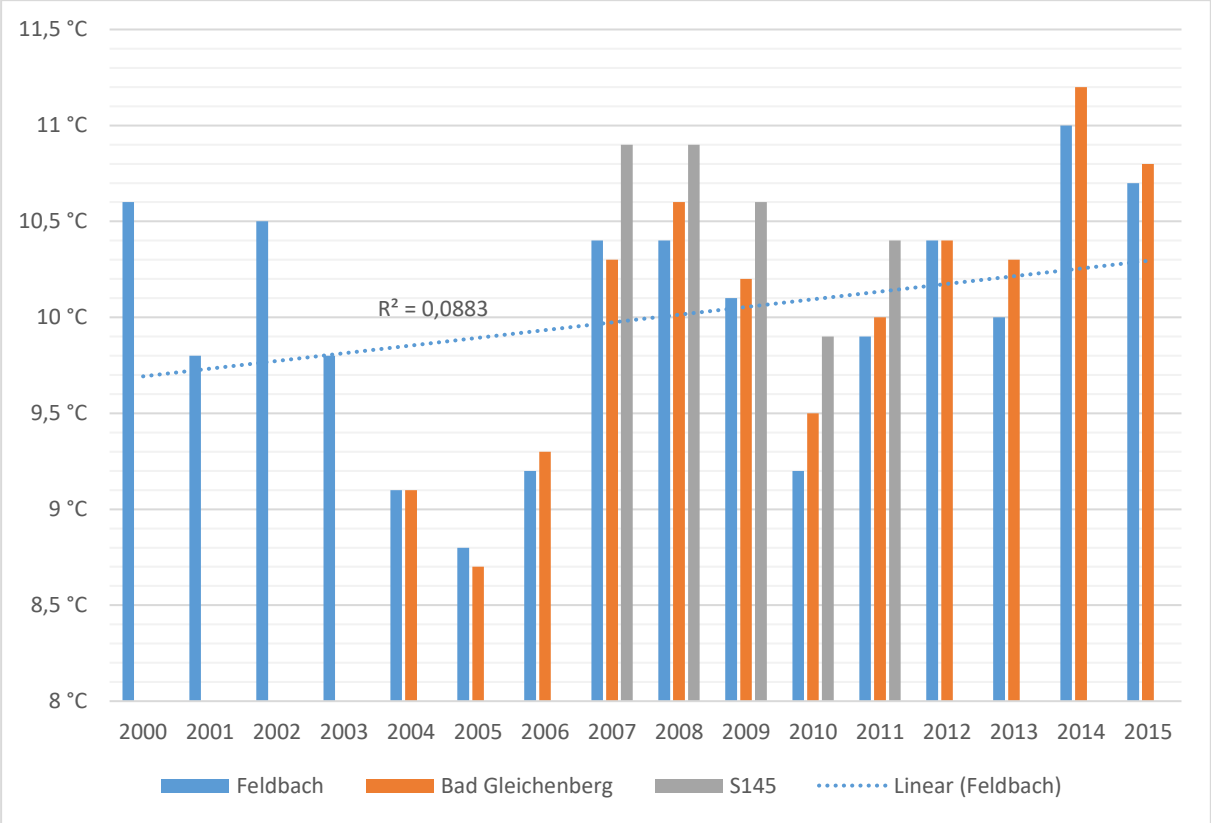


Abb. 136: Jahresnormalwerte der Temperatur im Vergleich der WegenerNet-Station 145 (2007-2011) und der ZAMG-Stationen Bad Gleichenberg (2004-2015) sowie Feldbach (2000-2015) in [°C] mit linearem Trend. *(Quellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2016, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Dieser Vergleich zeigt, dass die auf einem leicht ansteigenden Hang gelegene Station 145 bereits knapp 0,5 K wärmere Jahresmitteltemperaturen als die in 300 m Luftlinie (in Tallage) befindliche ZAMG-Station Bad Gleichenberg erreicht. Aus methodischer Sicht muss erwähnt werden, dass durch den Beginn der y-Achse bei 8 °C die Unterschiede ausgeprägter erscheinen als in der Realität. Der Trend der Station Feldbach zeigt einen Anstieg der Lufttemperatur, wobei die Aussage mit dem sehr geringen Bestimmtheitsmaß von 0,09 nur wenig signifikant ist. Es ist aber gut erkennbar, dass vor allem die Jahre von 2010-2015 extrem warm sind (laut ZAMG sind die Jahre 2014 und 2015 die wärmsten der Messgeschichte, vgl. ZAMG 2015).

Die folgende Abb. 137 zeigt die Jahresnormalwerte sowie mittlere tägliche Minima und Maxima der ZAMG-Station Bad Gleichenberg (1971-2000) sowie der WegenerNet-Station 145 (2007-2011). Die durchschnittlichen Jahresnormalwerte betragen 9,1 °C (ZAMG-Station) bzw. 10,5 °C (Station 145 WegenerNet), woraus sich ein Unterschied von 1,4 K ergibt. Davon sollte allerdings der Wert von 0,5 K abgezogen werden, da die WegenerNet-Station begünstig liegt (siehe vorhergehende Abb. 136); man kann also realistisch von einem Unterschied von rund 1 K ausgehen. Vorangehende Analysen (siehe Kap. 6.1) haben schon gezeigt, dass der Zeitraum von 2007-2011 als sehr warm einzustufen ist und auch aufgrund des kurzen Zeitraums nicht für zukünftige Entwicklungen herangezogen werden sollte; allerdings zeigen die Daten eindeutig, dass wärmere Jahresnormalwerte sogar um 11 °C hinsichtlich des voranschreitenden Klimawandels keineswegs utopisch, sondern als wahrscheinlich gelten.

Die größten Unterschiede gibt es von November bis August, nur in den Herbstmonaten September und Oktober sind die Unterschiede gering. Bei den mittleren täglichen Maxima zeigt sich ein ähnliches Bild, hier erreichen die Unterschiede im April über 3 K; im September und Oktober sind die Werte annähernd gleich. Bei den mittleren täglichen Minima gibt es die geringsten Unterschiede, da sind die Werte im September und Oktober sogar unter jenen der Klimanormalperiode von 1971-2000.

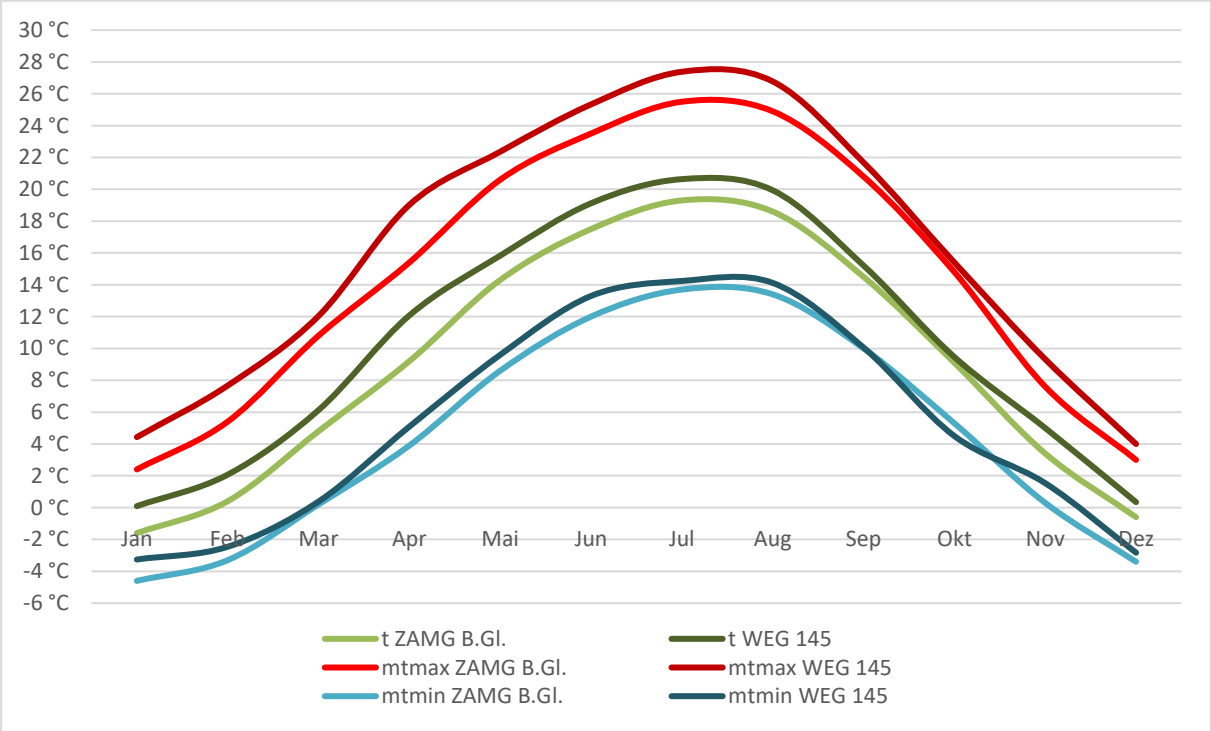


Abb. 137: Mittelwerte der Temperatur sowie mittlere tägliche Minima und Maxima im Vergleich der WegenerNet-Station 145 (im Zeitraum 2007-2011) mit der ZAMG-Station Bad Gleichenberg (im Zeitraum 1971-2000) in [°C]. *(Quellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2002, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Bei den Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentagen (Definitionen siehe Kap. 6.5) gibt es ebenfalls teils gravierende Unterschiede im Jahresverlauf (Abb. 138). Die Anzahl der Frosttage ist in der Periode 2007-2011 in den Monaten Dezember und Jänner stark gesunken, die Unterschiede zur Klimanormalperiode von 1971-2000 betragen hier jeweils rund zehn Tage (18 statt 28 Tage sowie 16 statt 25); die übrigen Monate sind ähnlich, nur im April gab es im Zeitraum von 2007-2011 kaum Frosttage mehr.

Bei den Eistagen sind die Unterschiede prozentuell durchaus markant, aufgrund des relativ seltenen Auftretens aber nicht besonders auffällig. Die Häufigkeiten sind durchwegs leicht gesunken, am stärksten im Jänner und Februar (von zehn auf acht bzw. vier auf zwei).

Umgekehrt sind die Verhältnisse bei Sommer- und Tropentagen, die jeweils häufiger geworden sind. Eine Ausnahme bildet der Juli bei den Sommertagen – hier ist die Anzahl der Tropentage so stark gestiegen, dass die Sommertage deutlich abgesunken sind. In diesem Monat gab es in der Periode 1971-2000 nur drei Tropentage, im Zeitraum von 2007-2011 aber sogar zehn. Das ist ein äußerst markanter Anstieg, der wiederum von den sehr warmen Verhältnissen in den Jahren 2007-2011 herrührt, aber auch ein Hinweis auf eine stärkere Häufung der Tropentage ist.

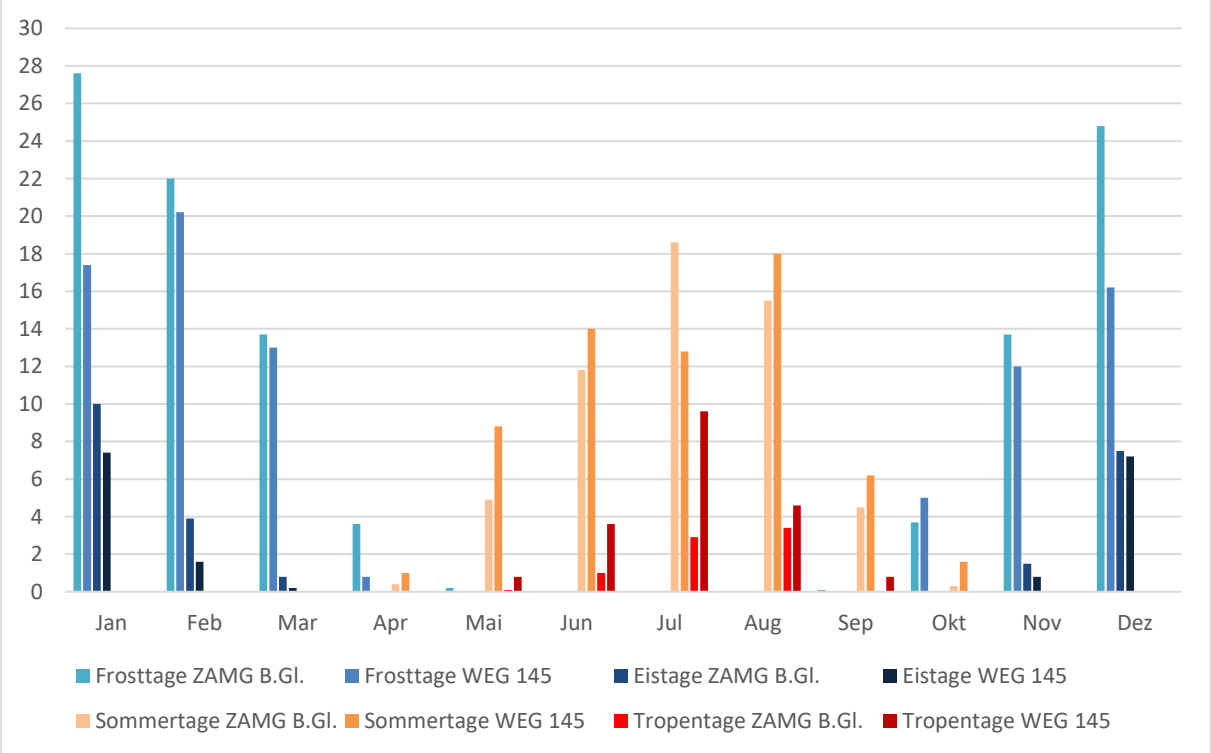


Abb. 138: Frost-, Eis-, Sommer- und Tropentage im Vergleich der WegenerNet-Station 145 (im Zeitraum 2007-2011) und der ZAMG-Station Bad Gleichenberg (im Zeitraum 1971-2000) in [Tagen/Jahr]. *(Quellen: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2002, Wegener Center 2013; eigene Bearbeitung)*

Die Entwicklungen in den Jahren 2007-2011 zeigen deutlich mildere bzw. im Sommer heißere Temperaturen an, die sogar einen noch stärkeren Anstieg der Jahresnormalwerte vermuten lassen, als in den Szenarien prognostiziert wird.

Wie schwierig eine gute Prognose ist, zeigt eine Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2013). Diese analysiert die Klimaszenarien der IPCC (International Panel of Climate Change), die im Zusammenhang mit dem Klimawandel stets zitiert werden. Es stellte sich heraus, dass die Prognosen bis 2012 nur bei drei von 114 Klimamodellsimulationen zutreffend waren und die Entwicklung am unteren Rand der Simulationen liegen.

Die Klimaszenarien sind darüber hinaus von globaler Bedeutung und können regional völlig unterschiedlich aussehen; für den Raum der Südost-Steiermark wird aber aufgrund der Szenarien, Messergebnisse und der Auswertungen dieser Arbeit ein weiterer Anstieg der Temperatur erwartet. Dieser könnte stärker ausfallen, als die bisherigen Prognosen vermuten lassen, vor allem die Sommer- und Tropentage dürften in den kommenden Jahrzehnten eine starke Zunahme erleben.

14.3 Auswirkungen und Strategien für Land- und Forstwirtschaft

Der Klimawandel, im Speziellen der Temperaturanstieg und die stärkere Häufung von Extremereignissen wie Hagel, Trockenperioden und Starkniederschlägen, kann gravierende Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft haben. Während man in der Landwirtschaft kurzfristig reagieren kann, muss in der Forstwirtschaft langfristig geplant und verstärkt auf die Zukunftsprognosen geachtet werden.

<u>Landwirtschaft:</u>

Bezüglich der Veränderungen in der Landwirtschaft kann die Masterarbeit von POTOTSCHNIK (2010) an der Uni Graz herangezogen werden, in welcher die Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft in der Steiermark behandelt wurden. Als wichtigste Kulturpflanzen werden Mais, Apfel, Ölkürbis und Wein genannt, wobei nur letzterer sensibel auf Veränderungen reagieren würde (vgl. POTOTSCHNIK 2010, S. 7 ff.). Mais, Apfel und Kürbis sind wärmeliebende Pflanzen und die meisten Sorten überstehen eine Erwärmung um wenige Kelvin unbeschadet. Wichtig ist die Wasserverfügbarkeit, die auch durch den Klimawandel begründet in den Sommermonaten schwieriger werden könnte. Problematisch sind für sämtliche

Kulturpflanzen die Zunahme von Hagelereignissen sowie Trockenperioden und Starkniederschlägen.

Sinnvolle Anpassungsstrategien (vgl. POTOTSCHNIK 2010, S. 66 ff.):

- Optimierung des Wasserhaushaltes (z.B. Erhöhung der Speicherfähigkeit des Bodens mittels reduzierter Bodenbearbeitung und Auflage einer Mulchschicht)
- Anpassen der Fruchtfolge (z.B. Bevorzugung von Winterkulturen)
- Verschiebung der Saat- und Erntetermine (individuelle Anpassung je nach Wettervorhersage)
- Anpassung der Düngung (Vermeidung von Nährstoffverlagerung durch Pflanzung einer Zwischenfrucht)
- Anpassung der Pflanzenschutzmittel auf mögliche neuartige Schädlinge
- Züchtung neuer, besser angepasster Pflanzenarten

Hinsichtlich dieser Anbaupflanzen ist im Untersuchungsgebiet demnach auch bei einer zu erwartenden weiteren Erwärmung mit kaum Schwierigkeiten zu rechnen. Problematischer ist ein Spätfrost im Frühling, der auch in den letzten Jahren (vor allem 2011 und 2016) für massive Ernteausfälle in der Region gesorgt hat. Darüber hinaus stellt das häufige Auftreten von Hagelereignissen ein zusätzliches Problem dar.

Auch der Sachstandbericht Klimawandel (KROMP-KOLB et al. 2014, S. 35-37) beschäftigt sich mit diesem Thema. Die größten Probleme sind demnach einerseits der Humusverlust und Treibhausgas-Emissionen aus dem Boden, die durch den Temperaturanstieg und häufigere Extremereignisse hervorgerufen werden. Daneben vergrößern menschliche Eingriffe den Flächenanteil von Böden mit geringerer Widerstandskraft gegen den Klimawandel, was diese Effekte noch verstärken könnte. Weitere Probleme sind die Ausbreitung wärmeliebender Schädlinge und das Leiden der Nutztiere unter der Hitze. Als Beispiel für die möglichen Anbauänderungen von Nutzpflanzen werden verschiedene Weinsorten genannt, die in Abb. 139 dargestellt sind.

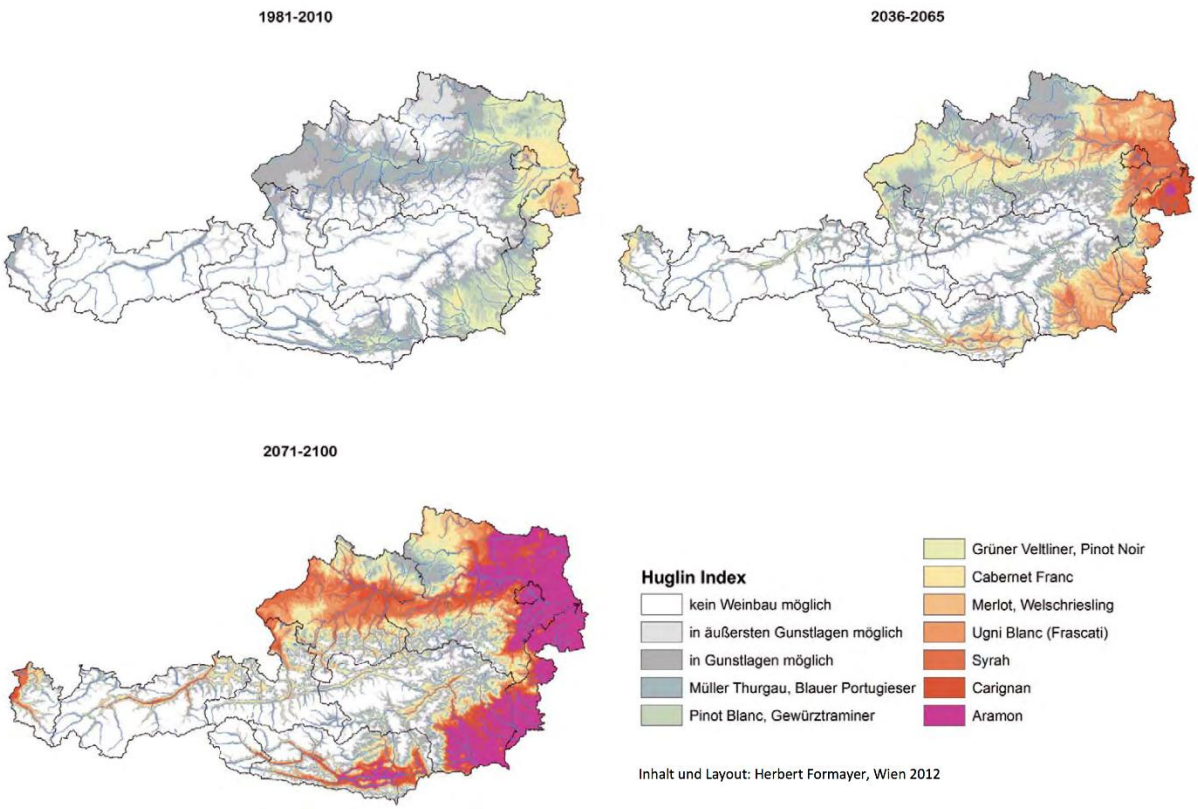


Abb. 139: Entwicklung der klimatischen Anbaueignung verschiedener Weinsorten in vergangenen Klimaperioden sowie einem Klimaszenario bis 2100. Die Farbtöne von grau über gelb bis violett bedeuten zunehmende Wärmesummen und ausschließlich darauf beruhende Sortenzuordnung des optimalen Anbaus. *(Quelle: KROMP-KOLB et al. 2014, S. 36)*

Für das Untersuchungsgebiet in der Südost-Steiermark werden demnach als aktuell günstige Sorten Blauer Portugiese, Gewürztraminer und Grüner Veltliner ausgewiesen. Durch die prognostizierten Veränderungen des Klimas werden diese allerdings bereits in den nächsten 20 Jahren von Welschriesling und Frascati abgelöst, bis in etwa 60 Jahren vor allem die Sorte Aramon als günstig genannt wird.

Dies wird auch von den Ergebnissen dieser Arbeit bestätigt und in den nächsten Jahrzehnten umzusetzen sein. Nach der Darstellung potentiell gut geeigneter Weinbaugebiete im Untersuchungsgebiet (siehe Kap. 13.2, Abb. 128) ist davon auszugehen, dass aufgrund der guten Verhältnisse der Weinbau in dieser Region intensiviert werden wird. Dabei werden durch den Klimawandel auch flache Gebiete bzw. Ost- oder West-exponierte Zonen geeignet sein.

Forstwirtschaft:

Auch die Forstwirtschaft steht vor großen Herausforderungen, da ein wärmeres Klima die Biomasseproduktivität der Wälder stark beeinflussen wird. In Berglagen und niederschlagsreichen Gebieten wird sie zunehmen, in den Tieflagen aber aufgrund häufigerer Trockenperioden abnehmen. Auch das Waldökosystem wird intensiveren und häufigeren Störungen unterliegen (KROMP-KOLB et al. 2014, S. 36).

Die Anpassungsstrategien in der Forstwirtschaft müssen langfristig Wirkung zeigen und auf die unterschiedlichen Szenarien der Klimasimulationen reagieren können. Folgende Maßnahmen sollten sich als wirkungsvoll erweisen (vgl. Waldwissen 2013):

- Baumarten- und Strukturvielfalt erhöhen (Mischbestände, Verjüngung)
- Keine destabilisierende Durchforstung zulassen
- Minimale Pflegemaßnahmen (auch aus Kostengründen)
- Schaffung größerer Betriebseinheiten (einfacher zu bewirtschaften)
- Wirksames Controlling waldbaulicher Maßnahmen schaffen
- Aufforstung alternativer Baumarten (Douglasie, Schwarzkiefer)

Diese Maßnahmen werden auch im Untersuchungsgebiet umzusetzen sein, wobei aus den untersuchten Parametern diesbezüglich keine weiteren Erkenntnisse abzuleiten sind.

15. Diskussion und Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse dieser Arbeit

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert, die Forschungsfragen aus dem Kap. 5.1 beantwortet und Anwendung der Forschungsergebnisse auf andere Regionen untersucht. Der Fokus liegt dabei auf den Analysen zur Lufttemperatur, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen.

Darüber hinaus werden Vorschläge für die zukünftige Erstellung ähnlicher Klimatopkarten erarbeitet, welche die Qualität der Darstellungen durch eine realistischere Abbildung der tatsächlichen klimatischen Verhältnisse steigern könnten.

15.1 Diskussion relevanter Untersuchungsergebnisse

Autochthone Witterung

Hinsichtlich der Auswertungen des Parameters Lufttemperatur sind jene bei autochthoner Witterung am relevantesten, da sie die lokal typischen Verhältnisse ohne Beeinflussung von außen zeigen.

An den Tagesgängen ausgewählter Stationen (Kap. 6.7.1) kann man deutliche Unterschiede zwischen Oberhang- bzw. Kammlage und Tallagen erkennen. Diese Differenzen sind tagsüber weit weniger ausgeprägt als in der zweiten Nachthälfte, wo sich Kaltluftprozesse auswirken. Die niedrigeren Maxima tagsüber resultieren aus der weniger starken Aufheizung der bodennahen Luftschichten an Hängen und Kämmen im Gegensatz zu den Talbereichen. Dabei scheint die Jahreszeit kaum eine Rolle zu spielen: sowohl im Winter (Abb. 54), als auch im Sommer (Abb. 55) sind die Werte der Stationen in Tallage tagsüber bis zu 3 K höher bzw. in der Nacht bis zu 6 K niedriger als jene der Stationen in Oberhang- oder Kammlage. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die Temperaturgunst der Riedellagen, an denen tagsüber gemäßigt warme, und während der Nacht deutlich mildere Temperaturen als in Tallage vorherrschen. Vor allem für die Landwirtschaft hat das Auswirkungen, da die Temperatur an den Hängen während der Nacht nicht so stark absinkt, was vor allem bei Spätfrostereignissen entscheidend sein kann.

Hinsichtlich des vertikalen Temperaturgradienten führen oben genannte Verhältnisse dazu, dass bei autochthoner Witterung die durchschnittliche Temperatur nach oben hin deutlich stärker zunimmt (Inversionswetterlagen, siehe Tab. 21, Kap. 6.7.4), als dies im

Jahresdurchschnitt der Fall ist (Tab. 27, Kap. 6.12). Zieht man die Höhenbereiche von 250-299 und 350-399 m heran, die beide durch ausreichend Stationen abgedeckt sind, so ergibt sich im Jahresdurchschnitt eine Zunahme nach oben bei autochthoner Witterung um 1,1 K. Im Winter beträgt dieser Wert 1,5 K, im Sommer 0,9 K. Dies resultiert fast ausschließlich aus den günstigeren Bedingungen an Hängen und Kämmen in den Nachtstunden, da die Temperaturen auch bei autochthoner Witterung tagsüber in den Tälern höher sind, als auf den Riedeln. Die an den Hängen produzierte und in die Täler abgeleitete Kaltluft hat in dieser Region eine ausgeprägte Wirkung.

Bei Schneebedeckung und autochthoner Witterung sind die Unterschiede zwischen Tal- und Hanglagen nicht so ausgeprägt (Abb. 60, Kap. 6.7.5): Tagsüber bleiben die Unterschiede unter 2 K, während der Nacht sind die Oberhang- und Kammlagen um maximal 4 K begünstigt. Der Schnee bewirkt also nicht nur allgemein einen ausgeglicheneren Tagesgang (durch die praktisch fehlende Erwärmung der Erdoberfläche durch Sonneneinstrahlung), sondern modifiziert auch die Kaltluftprozesse und verhindert somit größere Unterschiede zwischen Tal- und Hanglagen in der Nacht. Aufgrund der Seltenheit dieser Witterungsbedingungen (elf Tage im Untersuchungszeitraum von fünf Jahren) muss diese Analyse allerdings vorsichtig betrachtet und sollte durch umfangreicheres Datenmaterial verifiziert werden.

Diese Analysen lassen den Schluss zu, dass in der Südost-Steiermark generell damit gerechnet werden kann, dass sämtliche Hang- und Kammlagen in Höhen von bis zu 600 m gegenüber den Tal- und niedrigen Hanglagen thermisch begünstigt sind. Dies ist ein nach aktuellem Stand der Wissenschaft zu erwartendes Ergebnis, jedoch wurden in der Literatur bislang kaum Angaben über die quantitativen Unterschiede zwischen Hang- und Kammlagen, vor allem auch hinsichtlich der unterschiedlichen Expositionen, gemacht. Darüber hinaus stammen solche Werte meist aus nicht langfristig angelegten bzw. mit (für eine wissenschaftlich fundierte Aussage) zu wenigen Stationen durchgeführten Studien.

Durch die allgemein geringen Seehöhen der Riedel (meist unter 500 m) war es nicht möglich, die Temperaturgunst in größeren Höhen umfassend zu untersuchen; es wird aber angenommen und durch die wenigen Stationsdaten auch bestärkt, dass zumindest bis in eine Seehöhe von 600 m die Temperaturgunst anhält und erst danach abnimmt.

Mittlere tägliche Minima

Vor allem hinsichtlich der Eignung für land- und forstwirtschaftliche Nutzung sind die mittleren täglichen Minima (mTmin) von Interesse, da sie Aufschluss über die Frostgefährdung im Frühling und Herbst geben. In Kap. 6.1, Abb. 48 werden unter anderem diese Mittelwerte

angegeben und zeigen einen deutlichen Trend der Zunahme mit steigender Seehöhe von 4 °C auf bis zu 7 °C.

In Kap. 6.7.2, Abb. 57 werden die mTmin bei autochthoner Witterung dargestellt und weisen wiederum sowohl in den Sommer-, als auch Wintermonaten mit der Seehöhe ansteigende Werte auf. Die Spannweite der Werte liegt dabei im Winter bei 5 K, im Sommer bei 6 K. Erwartungsgemäß sind die Unterschiede zwischen den begünstigten Hang- und Kammlagen und den benachteiligten Unterhang- und Tallagen bei autochthoner Witterung sehr ausgeprägt. Das ist vor allem hinsichtlich der für die Landwirtschaft problematischen Spätfrostereignisse im Frühjahr von Bedeutung, da diese fast ausschließlich bei autochthoner Witterung auftreten. Dahingehend sind die begünstigten Hang- und Kammlagen also deutlich weniger anfällig und dürften von den meisten Spätfrostereignissen, bei denen die Lufttemperaturen in den Tälern selten unter -5 °C fallen, verschont bleiben.

Geländeklimatische Parameter

Um die Auswirkungen der geländeklimatischen Parameter auf die Lufttemperatur bestmöglich quantifizieren zu können, wurden zwei verschiedene Zugänge gewählt:

a) Auswertung der Stationen ohne vorhergehende Datenmanipulation

Bei dieser Methodik konnten bei den Parametern Exposition, Hanglage und Seehöhe realistische Ergebnisse erzielt werden. Der Faktor Tallage konnte aufgrund der Überlagerung durch andere Parameter wie Seehöhe nicht zufriedenstellend erfasst werden.

Im Jahresdurchschnitt ist bei der Exposition ein Unterschied von 0,5 K zwischen Nord- und Südhängen bei der tageszeitlichen Höchsttemperatur feststellbar (Abb. 64, Kap 6.8.1). In der Nacht gibt es hingegen kaum Unterschiede, was durch die fehlende Sonneneinstrahlung realistisch erscheint. Auch im Jänner bzw. Juli bewegen sich die Unterschiede im Bereich von 0,5 K zum Zeitpunkt der höchsten Temperatur, womit solche Differenzen während des gesamten Jahres angenommen werden können. Die Stationen in Ost- bzw. West-Exposition liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse und es muss angenommen werden, dass an diesen Stationen oft andere geländeklimatische Faktoren mehr Einfluss auf die Temperaturverhältnisse haben als die Exposition. Grundsätzlich sollten Hänge in West-Exposition aufgrund der stärkeren Wärmespeicherung nachmittags höhere Werte erreichen, als jene in Ost-Exposition; dies ist jedenfalls bei den meisten Stationen gut erkennbar.

Hinsichtlich der Hanglage folgen die Ergebnisse der Feststellung, dass die Temperaturen des Tagesgangs mit zunehmender Höhe eine ausgeglichenere Kurve beschreiben. Während die Temperatur in Oberhang- bzw. Kammlage in der Nacht durchschnittlich 1,5 K über jener im

Tal liegt, so ist sie tagsüber um 0,5 K niedriger (Abb. 71, Kap. 6.8.2). Diese Unterschiede sind dabei im Sommer (Abb. 73) etwas ausgeprägter als im Winter (Abb. 72).

Bei den Auswertungen zum Faktor Seehöhe werden Unterschiede von durchschnittlich 1,5 K zum Zeitpunkt der höchsten und 2 K zu jenem der niedrigsten Temperatur erreicht (Abb. 78, Kap. 6.8.3), wobei in höheren Lagen erwartungsgemäß in der Nacht mildere und tagsüber kühlere Werte erreicht werden als in niedrigen Lagen. Diese Feststellung stimmt sowohl für den Jahresmittelwert als auch im Jänner und Juli, womit für das gesamte Jahr ähnliche Differenzen zu erwarten sind.

b) Auswertung der Stationen nach Nivellierung der Seehöhe

Beim Jahresnormalwert wurde diesbezüglich der Faktor von -0,32 K/hm verwendet (also eine Abnahme der Temperatur nach oben), der im Digitalen Atlas der Steiermark für dieses Gebiet angegeben wird (PRETTENTHALER, PODESSER und PILGER 2010, S. 67). Dieser Wert stimmt mit den Auswertungen dieser Arbeit nicht überein, nach denen die Temperatur im Untersuchungsgebiet mit zunehmender Seehöhe stets zunimmt. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind daher rein statistischer Natur und werden nicht näher analysiert.

Anders ist die Vorgehensweise bei den mittleren täglichen Minima und Maxima, bei denen ein anderes Verfahren gewählt wurde. Es wurden die Untersuchungsergebnisse aus dem Kap. 6.1 herangezogen, die bis 380 m sowohl eine Zunahme der Minima, als auch eine Abnahme der Maxima um 1 K/hm ergeben; über 380 m wird mit stagnierenden Werten gerechnet (siehe detaillierte Erklärung in Kap. 6.9.1).

Die Tab. 22 (Kap. 6.9.4) fasst die Ergebnisse hinsichtlich unterschiedlicher Exposition übersichtlich zusammen, nach denen vor allem bei den Maxima im Winter (0,8 K), aber auch im Sommer (0,4 K) Unterschiede feststellbar sind. Die größeren Unterschiede im Winter resultieren hauptsächlich durch die flachere Sonneneinstrahlung, durch welche Nord-exponierte Hänge stark benachteiligt werden. Bei den Minima gibt es kaum Unterschiede.

Hinsichtlich der Hanglagen (Tab. 23, Kap. 6.9.4) ist vor allem das mittlere tägliche Maximum interessant: während dieses im Sommer bei Kammlagen niedriger ist als bei Tallagen, sind die Verhältnisse im Winter genau umgekehrt. Dies resultiert aus den häufigen Bodennebelereignissen im Winter, die dann eine stärkere Erwärmung der bodennahen Luftschichten verhindern.

Die Unterschiede betragen jeweils rund 0,5 K.

Bei diesen Analysen muss festgehalten werden, dass es sich dabei um durchschnittliche Unterschiede im Jahresverlauf handelt. Würde man nur Tage mit autochthonen Bedingungen heranziehen, ist mit deutlich größeren Unterschieden zu rechnen. Bei starker Bewölkung bzw. Niederschlagsereignissen tendieren die Differenzen zwischen den einzelnen Zonen hingegen gegen Null.

Vertikaler Temperaturgradient

Die Tab. 27 (Kap. 6.12) bestätigt die vorangehenden Analysen, dass die sowohl die Jahresmitteltemperatur, als auch Jänner- und Julimitteltemperatur im Untersuchungsgebiet mit zunehmender Seehöhe ansteigen. Durch die geringe Stationsdichte in Höhen über 400 m sind die Auswertungen von für höhere Lagen leider nur bedingt verwendbar. Die verfügbaren Daten lassen vermuten, dass ab 400 m eine gewisse Stagnation des Jahresnormalwerts eintritt. Die Tagesgänge beschreiben einen nach oben einen zunehmend ausgeglichenen Verlauf. Die Temperaturgunst (vor allem hinsichtlich landwirtschaftlicher Nutzung) nimmt nach oben hin trotz stagnierender Jahresnormalwerte weiter zu, da die Extrema abgeschwächt auftreten (Hitze, Spätfrost).

Niederschlagsverteilung

Die Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet (Abb. 97. Kap. 7.2) stimmt mit der Erwartungshaltung eines Sommermaximums und Winterminimums überein. Der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren ist nicht lang genug, um detaillierte Tendenzen herausfiltern und beschreiben zu können. Grundsätzlich nehmen die Niederschlagssummen mit der Höhe leicht zu, was durch die geringe Reliefenergie im Untersuchungsgebiet aber nur eine nebensächliche Rolle spielt. Die Tab. 29 (Kap. 7.3) zeigt, dass es vergleichsweise wenige Starkniederschlagsereignisse (etwa eines pro Jahr) gibt, was auch mit der allgemein geringen Seehöhe und fehlenden Stauwirkung naher Gebirge zusammenhängt.

Vor allem für die Landwirtschaft ist der Umstand entscheidend, dass während der Vegetationsperiode (Mai – September) durchschnittlich so viel und häufig Niederschlag fällt, dass die Trockenperioden meist nur eine untergeordnete Rolle spielen (410–550 mm Gesamtniederschlag in der Vegetationsperiode von Mai – September, siehe Tab. 31, Kap. 7.4). Trockenperioden dauern durchschnittlich 2-3 Tage, während Trockenperioden von mindestens sieben Tagen maximal drei Mal im Jahr auftreten (Tab. 32). Diesbezüglich kann man also von sehr guten Bedingungen für die Landwirtschaft sprechen.

Die Auswertungen nach geländeklimatischen Parametern in Kap. 7.5 brachten als Ergebnis, dass es im Untersuchungsgebiet praktisch keine diesbezüglichen Unterschiede gibt. Die

Kleinräumigkeit des Gebiets sowie die geringe Reliefenergie sorgen dafür, dass die Niederschläge über alle Hanglagen, Seehöhen und Expositionen hinweg annähernd gleich verteilt sind.

Windverhältnisse

Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist an den Stationen im Untersuchungsgebiet meist sehr gering, und die Hauptwindrichtungen orientieren sich meist an den vorherrschenden Talverläufen; davon ausgenommen sind die Kammstationen und die Station 044, die sich in 55 m über Grund im Raabtal befindet (vgl. Abb. 103, Kap. 8.1). Aber auch dort bleiben die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten niedriger als erwartet bzw. auch im Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) angegeben.

Die Daten liefern also zwei Ergebnisse: Einerseits ist die Windgeschwindigkeit im Raabtal (und damit dessen Einfluss auf die angrenzenden Hang- und Seitentalbereiche) nicht so hoch wie erwartet, andererseits sind die Windgeschwindigkeiten allgemein vergleichsweise niedrig und die Kalmenhäufigkeit hoch. Für wissenschaftlich fundierte Aussagen ist der Untersuchungszeitraum auch in diesem Fall zu kurz, aber zumindest der erstgenannte Parameter dürfte auch bei langfristiger Untersuchung festgestellt werden können.

Hinsichtlich der tages- und jahreszeitlichen Verteilung der Windgeschwindigkeit liegt das Maximum bei allen Stationen im Frühjahr um die Mittagszeit, wo Werte über 4 m/s erreicht werden können (siehe Tab. 36 - 38, Kap. 8.2). Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten werden generell in den frühen Morgenstunden erreicht, wobei diese auch deutlich unter 1 m/s liegen können.

Starkwinde (Tab. 39, Kap. 8.3) treten an allen Stationen vergleichsweise selten auf, sind aber in größeren Höhen über Grund durchaus häufig – dies zeigt die Station 044, die in 55 m. ü. Gr. errichtet wurde und diesbezüglich eine Ausnahme darstellt. An dieser Station wurde an insgesamt 536 Fünf-Minuten-Werten eine Windgeschwindigkeit von zumindest 6 Bft (Starker Wind) festgestellt, was eine Häufigkeit von rund 0,1 % des gesamten Untersuchungszeitraums bedeutet.

Bei autochthoner Witterung unterscheidet sich die Charakteristik der Windverhältnisse nur unwesentlich von jener während des gesamten Jahres. Die Abb. 104 (Kap. 8.4) zeigt die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet getrennt nach Tages- und Nachtstunden. Vor allem in der Nacht ist die Kalmenwahrscheinlichkeit teilweise sehr hoch und erreicht beispielsweise an der Station 139 knapp 90 %. Die Verhältnisse sind je nach geländeklimatischen Faktoren (Verlauf des Tals) sehr unterschiedlich und von den lokalen Tal- bzw. Hangwinden geprägt.

15.2 Beantwortung der gestellten Forschungsfragen

Aufbauend auf der Diskussion relevanter Ergebnisse im vorangehenden Kapitel werden nun die in Kap. 5.1 aufgestellten Forschungsfragen dieser Arbeit beantwortet.

a) Entsprechen die geländeklimatischen Auswertungen den Erwartungen auf Basis der Erkenntnisse aus wissenschaftlicher Literatur?

Diese Frage wird auf zwei Ebenen beantwortet. In erster Näherung werden die Studien und Analysen wissenschaftlicher Literatur bestätigt, wonach beispielsweise die Temperaturgunst auf den Riedeln nach oben hin zunimmt oder die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Raabtal am höchsten ist.

Bei genauerer Betrachtung ergeben sich allerdings Unterschiede zu Standardwerken wie dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013). Zu den wichtigsten Abweichungen, die in den Kap. 11 bzw. 15.1 detailliert erörtert werden, zählt die Zunahme des vertikalen Temperaturgradienten bis zu den höchsten Stationen im Untersuchungsgebiet und die auffallend geringe Windgeschwindigkeit im Raabtal.

Die Erkenntnisse könnten teilweise auf die kurze Untersuchungsdauer von fünf Jahren zurückzuführen sein, aber hinsichtlich der Temperaturzunahme mit ansteigender Seehöhe kann von einem allgemein gültigen Umstand ausgegangen werden. Im Digitalen Atlas der Steiermark wird hingegen von einer Abnahme der Temperatur mit steigender Seehöhe um 0,32 K/hm ausgegangen. Dieser Wert wurde modellhaft für den gesamten Raum der Südoststeiermark berechnet, wobei der Besonderheit der Riedel offenbar keine Beachtung geschenkt wurde.

Die Temperaturgunst auf den Riedeln in der Südost-Steiermark wurde in der wissenschaftlichen Literatur oft beschrieben. Es war damit gemeint, dass vor allem im Winter mit deutlich milderen Temperaturen und im Sommer mit abgeschwächten Maxima gerechnet werden darf. Dies bestätigen auch die Auswertungen dieser Arbeit, aber die Temperaturgunst sorgt sogar beim Jahresmittelwert für höhere Werte als im Tal. Dies war bisher nicht bekannt, womit von einer noch umfassenderen Temperaturgunst auf den Riedeln ausgegangen werden kann.

Einige Faktoren wie die Ausbildung von Kaltluftseen oder die Verhältnisse der Windgeschwindigkeit konnten aufgrund der diesbezüglich zu geringen Anzahl an Stationen nicht zufriedenstellend untersucht werden. Die Tendenzen bzw. Teilergebnisse lassen aber darauf schließen, dass die grundsätzlichen Erkenntnisse in der wissenschaftlichen Literatur zutreffen.

b) Wie können die geländeklimatischen Parameter Hanglage, Seehöhe und Exposition quantitativ beurteilt werden? Unter welchen Voraussetzungen (Witterung, Tages- und Jahreszeit) sind die Unterschiede besonders deutlich?

Diese Fragen werden in den Kap. 6.8, 6.9 und 7.5 umfassend untersucht. Hinsichtlich der Hanglage ist der Umstand entscheidend, wie hoch der Standort über dem Tal liegt und wie mächtig der Einflussbereich des Talwindsystems ist. Eine Klassifizierung rein nach der Hanglage ist dementsprechend schwierig und liefert unterschiedliche Ergebnisse, da oft andere Faktoren wichtiger sind. Grundsätzlich werden die klimatischen Verhältnisse mit steigender Hanglage bis hinauf zum Kamm des Riedels günstiger.

Hinsichtlich der Seehöhe gilt dasselbe: eine Auswertung nur nach diesem Parameter ist nicht zielführend, da vor allem der Höhenunterschied zum darunter liegenden Tal sowie die Mächtigkeit des Talwindsystems entscheidend sind. An einem Standort in 350 m Seehöhe, der 50 m über einem breiten Tal liegt, herrschen klimatisch deutlich ungünstigere Verhältnisse als an einem zweiten Standort auf 350 m, der 100 m über einem engen Seitental liegt.

Der Parameter Exposition liefert die deutlichsten und aussagekräftigsten Ergebnisse. Es gelten auch hier die gleichen Einschränkungen wie bei Hanglage und Seehöhe, die oben beschrieben wurden. Die Unterschiede zwischen ungünstiger Nord- und günstiger Südlage konnten plausibel analysiert werden.

An Westhängen wurden meist höhere mittlere Temperaturen als an Osthängen gemessen, was in dieser Form in der Literatur kaum beschrieben wird. Dort wird von annähernd gleichen Verhältnissen bei Ost- und Westlage ausgegangen (siehe auch Kap. 2.1). Dabei liegt der Grund dafür auf der Hand: Die direkte Sonneneinstrahlung am Nachmittag (zur Zeit der höchsten Temperatur und stärksten Einstrahlung) wird an Westhängen optimal gespeichert und sorgt bis in die späten Abendstunden für höhere Temperaturen als an Osthängen. Dadurch werden an Westhängen Werte erreicht, die teilweise sogar jenen an Südhängen entsprechen.

Die deutlichsten Unterschiede sind bei sämtlichen Parametern, unabhängig von der Tages- und Jahreszeit, bei autochthoner Witterung zu erwarten, was in Kap. 6.7 analysiert wird. Ohne störende Beeinflussung von außen können sich die geländeklimatischen Vorgänge und daraus resultierenden Differenzen optimal und am deutlichsten ausbilden. Die Unterschiede sind in den Sommermonaten aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung am größten, während in den Wintermonaten die Kaltluftprozesse den wichtigsten Faktor darstellen. Die an den Hängen gebildete Kaltluft wird rasch abtransportiert und sorgt dort für eine Überwärmung (siehe auch Kap. 2.2), während sie sich in den Tälern sammelt und im extremsten Fall aufgestaut wird.

Bei allochthoner Witterung werden die typischen geländeklimatischen Vorgänge von Großwetterlagen überprägt, was zu einem Ausgleich der Verhältnisse über sämtliche Lagen und Seehöhen hinweg führen kann.

c) Wie gestaltet sich die vertikale Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet?

Dieser Punkt wird vor allem in Kap. 6.12 behandelt und stellt einen wesentlichen Unterschied zu den Angaben im Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) dar, was in Kap. 11.1 eingehend behandelt wird. Im Untersuchungszeitraum von 2007-2011 ergeben die Auswertungen, dass der vertikale Temperaturgradient zumindest bis in eine Seehöhe von 400 m nach oben hin zunimmt; darüber ist kaum eine Analyse möglich, da sich in diesem Höhenbereich leider kaum Messstationen befinden bzw. wenige Riedel bis in Höhen über 500 m reichen.

Die verfügbaren Messergebnisse, ergänzt durch jene des nahen Stradner Kogels und des Kapfensteiner Kogels, deuten auf eine Stagnation des Jahresmittelwerts der Temperatur (und somit der Temperaturgunst) von 400 m bis in Höhen von 500-600 m Seehöhe hin. Der relative Höhenunterschied zur beschriebenen Gunstzone bei 400 m ist gering, während sich beispielsweise bei hoch liegenden Tälern erst dort die Höhe über dem Tal positiv auswirkt. Jedenfalls ist durch die Messwerte keine Abnahme der Temperaturgunst bis in eine Höhe von 600 m festgestellt worden.

d) Inwiefern stimmt die erstellte Klimatopkarte mit bestehenden Produkten überein bzw. wo gibt es Unterschiede? Worin besteht der Mehrwert der erstellten Karte?

Dieses Thema wird in den Kap. 12 und speziell 12.5 ausführlich behandelt, weshalb an dieser Stelle nur die wichtigsten Faktoren kurz zusammengefasst werden.

Grundsätzlich ergibt sich eine vergleichbare Charakteristik, jedoch bewirkt die Miteinbeziehung des Faktors Exposition teils deutliche Unterschiede bei der Zonengestaltung der Hanglagen. Dies ist auch als wichtigster Mehrwert der erstellten Karte gegenüber vergleichbaren Produkten wie dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) zu nennen. Darüber hinaus wurden einige Anpassungen beispielsweise bei den Talbereichen und Unterhangbereichen vorgenommen, die eher den geländeklimatischen Charakteristika und Erfahrungswerten entsprechen.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die erstellte Karte durch die konsequente Umsetzung geländeklimatischer Faktoren, der Berücksichtigung der Exposition sowie der

Einbindung von Fachkenntnissen über die Region detaillierter und realistischer erscheint, als vergleichbare Produkte.

e) Wie realistisch ist der Anbau vor allem thermisch anspruchsvoller Nutzpflanzen wie z.B. Wein und wie groß bzw. verbreitet sind diese Gebiete im Untersuchungsraum?

Diese Frage wird mit den Analysen sowie der Erstellung einer Karte potentieller Weinanbaugebiete in Kap. 13 am Beispiel des Weins beantwortet. Demnach sind die klimatischen Voraussetzungen großflächig sehr gut; problematisch sind hingegen die Bodenverhältnisse, die für Weinbau nur bedingt geeignet sind. Auf einigen Flächen im Untersuchungsgebiet wird aktuell bereits Wein angebaut und somit die grundsätzliche Möglichkeit bewiesen. Die erstellte Karte schließt Waldflächen aus (da eine Umwidmung nur schwer möglich wäre), wodurch die geeigneten Gebiete meist nur kleinflächig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind.

Die Möglichkeit einer Intensivierung bzw. eines Ausbau des Weinanbaus in der Region ist demnach als positiv einzuschätzen, wobei die am besten geeigneten Böden im Bereich der Gleichenberger Kogel durch die Widmung als Waldflächen praktisch nicht zugänglich sind. Aus klimatischer Sicht muss vor allem auf häufigen Spätfrost Rücksicht genommen werden, der sich auf den Hängen der Riedel weniger stark auswirkt.

f) Welche Änderungen sind aufgrund des Klimawandels in der Region zu erwarten, und inwiefern stimmen die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Trends überein? Welche Anpassungen werden in Zukunft voraussichtlich notwendig werden?

Diesen Fragen wird das Kap. 14 gewidmet, wobei die Aussagen nur sehr allgemein gehalten werden. Der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren ist zu kurz, um daraus wissenschaftlich fundierte Ergebnisse ableiten zu können. Grundsätzlich stimmen die Temperaturverhältnisse mit den Modellprognosen z.B. aus KROMP-KOLB et al. (2014) überein. Die zukünftig notwendigen Anpassungen werden in Kap. 14.3 behandelt und sind eine Zusammenfassung des aktuellen Wissenstands mit Bezugnahme auf die Relevanz im Untersuchungsgebiet.

g) Für welche Regionen außerhalb des Untersuchungsgebietes sind die Untersuchungsergebnisse anwendbar?

Diese Frage wird in Kap. 15.4 behandelt und kann grundsätzlich mit Gebieten mit ähnlichen klimatischen Bedingungen beantwortet werden. Diese sind in vergleichbarer Breitenlage in vor allem in Europa zu finden, beispielsweise in Slowenien und Deutschland.

Grundlegende Ergebnisse dieser Arbeit, wie beispielsweise die Auswirkungen der Exposition auf die Temperaturverhältnisse, können jedoch auch in anderen Regionen (nach entsprechenden Anpassungen) angewendet werden.

15.3 Verbesserungsvorschläge für Zoneneinteilungen in Klimatopkarten

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit und im Speziellen der Analysen aus dem Kap. 12.5 und dem Vergleich mit dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) werden folgende Vorschläge für eine allgemeine qualitative Verbesserung bei Klimazonierungen bzw. der Erstellung von Klimatopkarten gemacht:

a) Berücksichtigung der Exposition

Der Parameter Exposition konnte nach den Ergebnissen des Kap. 6.8 als jener Faktor ermittelt werden, der (abgesehen von der Seehöhe, die standardmäßig ohnehin in die Kartenerstellung einbezogen wird) den größten Einfluss auf lokalklimatische Verhältnisse hat. Vor allem zwischen Nord- und Südlagen konnten teils deutliche Unterschiede aufgezeigt werden, die in klimatischen Karten keinesfalls ignoriert werden sollten. Die Exposition sollte in den meisten Fällen auch als verwendbare Datengrundlage für die Erstellung der Karte zur Verfügung stehen. Die quantitativen Auswirkungen müssten für jeden Einzelfall individuell bestimmt werden, da sich diese je nach geographischer Breite und weiteren klimatischen Faktoren sehr unterschiedlich gestalten können.

b) Berücksichtigung der zunehmenden Temperaturgunst mit steigender Seehöhe in derartigen Riedelgebieten

Die Auswertungen dieser Arbeit konnten deutlich zeigen, dass zumindest in Seehöhen bis 400 m die durchschnittliche Jahrestemperatur mit steigender Seehöhe zunimmt; darüber hinaus ist anzunehmen, dass diese bis zumindest in Höhen von 600 m zumindest stagniert (was allerdings durch zusätzliche Messkampagnen verifiziert werden müsste). Der vertikale

Temperaturgradient nimmt zu jeder Jahreszeit nach oben hin zu (siehe Kap. 6.12), was den Angaben im Digitalen Atlas der Steiermark widerspricht. Diese Analyse stimmt nur für das Untersuchungsgebiet, aber es ist anzunehmen, dass es in ähnlich gearteten Regionen ebenfalls zutrifft.

Es sollte demnach nicht automatisch von abnehmender Temperaturgunst mit steigender Seehöhe ausgegangen werden. Im Digitalen Atlas wurde beispielsweise ein zu großes Gebiet für die Festlegung des vertikalen Temperaturgradienten gewählt, wodurch die besonderen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet nicht berücksichtigt werden konnten.

c) Konsequente Umsetzung der Klassifikation von engen Seitentälern, die aufgrund der geländeklimatischen Verhältnisse beinahe ausschließlich begünstigte Bedingungen aufweisen

Die Klassifikation enger Seitentäler ist beispielsweise im Digitalen Atlas der Steiermark sehr inkonsequent gestaltet (siehe Kap. 12.5), wo gleichartige Talabschnitte teilweise kühl, dann wieder gemäßigt dargestellt werden. Dies ist nicht realistisch und kann durch die Ergebnisse dieser Arbeit sowie Analogieschlüsse widerlegt werden. In engen Seitentälern, die horizontal und vertikal weit genug von größeren Seitentälern entfernt sind, herrschen durch die Gegenstrahlung der Hänge (bei fehlenden Kaltluftstauzonen) grundsätzlich begünstigte Bedingungen.

d) Anpassung des Detailgrads von Klimatopkarten bei besonderen Anforderungen

Es ist von Nachteil, wenn eine Klimatopkarte einer größeren Region (wie beispielsweise der Steiermark) grundsätzlich über die gesamte Fläche mit demselben Detailgrad erstellt wird. Während sich bei inneralpinen Bereichen die Verhältnisse aufgrund der hohen Reliefenergie meist bereits auf kurzen Entfernungen stark ändern, gilt dies nicht für eine wenig akzentuierte Region wie jene des Südost-Steirischen Riedellandes. Als Resultat werden die dortigen Verhältnisse oft in einheitlichen Farben (und somit gleichen klimatischen Bedingungen) dargestellt, was nicht der Realität entspricht (siehe Digitaler Atlas der Steiermark, Land Steiermark 2013).

Für solche Gebiete wäre eine Zwischenstufe bei der Zonierung ratsam, mit welcher sich auch geringe (aber klimatisch oft wichtige) Unterschiede darstellen lassen. Eine Einteilung der Jahresmitteltemperatur in Zonen mit Abständen von 2 °C führt beispielsweise zu einer Darstellung des Riedellandes in einer einzigen Farbe, was nach den Ergebnissen dieser Arbeit sowie der wissenschaftlichen Standardliteratur zur Temperaturgunst auf den Riedeln als nicht zielführend erscheint.

e) Versuch der Definition und Beschreibung sämtlicher Zonen eines Gebietes

Es sollte versucht werden, auch komplexe Regionen durch Analysen und Beschreibungen bestmöglich zu definieren. Im Digitalen Atlas der Steiermark gibt es etwa einen „Übergangsbereich“ zwischen den Tallagen und den begünstigten Hanglagen, die ja erst in einer gewissen Höhe über dem Tal beginnen (siehe dazu Kap. 6.8.2). Dieser Übergangsbereich wird überhaupt nicht beschrieben, was ein Versäumnis ist: trotz der Schwierigkeit des Zusammenspiels von Gunst durch Hanglage und Ungunst durch nahe Talregion können Kennzahlen der Jahresmitteltemperatur, Inversionshäufigkeit, Nebelwahrscheinlichkeit und ähnliche Faktoren beschrieben werden.

15.4 Evaluierung der Anwendungsmöglichkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind grundsätzlich auf sämtliche klimatisch ähnlichen Gebiete übertragbar. Das betrifft vor allem die Parameter Lufttemperatur und Wind, die stark von den jeweiligen geländeklimatischen Verhältnissen abhängig sind. Die Auswertungen hinsichtlich des Niederschlags haben ergeben, dass das Oberflächenrelief im Untersuchungsgebiet kaum Einfluss auf die Verteilung im Gebiet nimmt. Hinsichtlich der Strahlung und des Luftdrucks gibt es nur eine Station im Untersuchungsgebiet, was eine geländeklimatische Auswertung bzw. eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete verhindert.

Bei der Anwendung der Ergebnisse auf andere Gebiete sind vor allem die Faktoren geographische Breite, Reliefenergie sowie Prägungen maritimer bzw. kontinentaler Art zu berücksichtigen. Je unterschiedlicher diese Parameter im Vergleich zu den Verhältnissen im Untersuchungsgebiet sind, desto eher müssen die Ergebnisse dementsprechend angepasst werden.

Die nachfolgende Abb. 140 zeigt der Südost-Steiermark ähnliche Gebiete in einer Darstellung des Wegener Centers (2007). Es werden die nicht näher definierten Regionen Osteuropa, Westalpen und Südostasien genannt. Diese sind allerdings nur bedingt vergleichbar. Während die Gebiete in Osteuropa deutlich kontinentaler geprägt sind als die Südost-Steiermark, wodurch mit größeren Schwankungen der Temperatur und unregelmäßigeren Niederschlägen gerechnet werden muss, weisen die Westalpen eine deutlich höhere Reliefenergie auf. In Südostasien beherrscht das Monsunklima das Wettergeschehen, wodurch diese Region nur bedingt mit der Südost-Steiermark vergleichbar ist.

Die benachbarten Regionen des Burgenlands bzw. der Untersteiermark in Slowenien sind hingegen sehr gut mit der Südost-Steiermark vergleichbar, wo aufgrund der geographischen Nähe mit ähnlichen Bedingungen gerechnet werden darf. Auch flachhügelige Regionen in

Deutschland, der Schweiz, Frankreich und Norditalien weisen sehr ähnliche klimatische Charakterzüge auf, wobei das Klima dort meist maritimer geprägt ist. Für diese Regionen kann festgehalten werden, dass die Untersuchungsergebnisse mit nur geringen Anpassungen gültig sein dürften.

Außerhalb Europas lassen sich nur bedingt ähnliche Gebiete ausmachen: in niedrigeren Breiten in den USA (durch den fehlenden Einfluss des Nordatlantikstroms sind Gebiete ähnlicher Breite deutlich kühler als in Europa) sowie in Teilen Chinas wären nur geringe Anpassungen notwendig. Auf der Südhalbkugel gibt es in vergleichbaren Breiten kaum Landmasse, nur in Chile und Neuseeland wären ähnliche Gebiete (mit meist deutlich maritimerem Klima) zu finden.

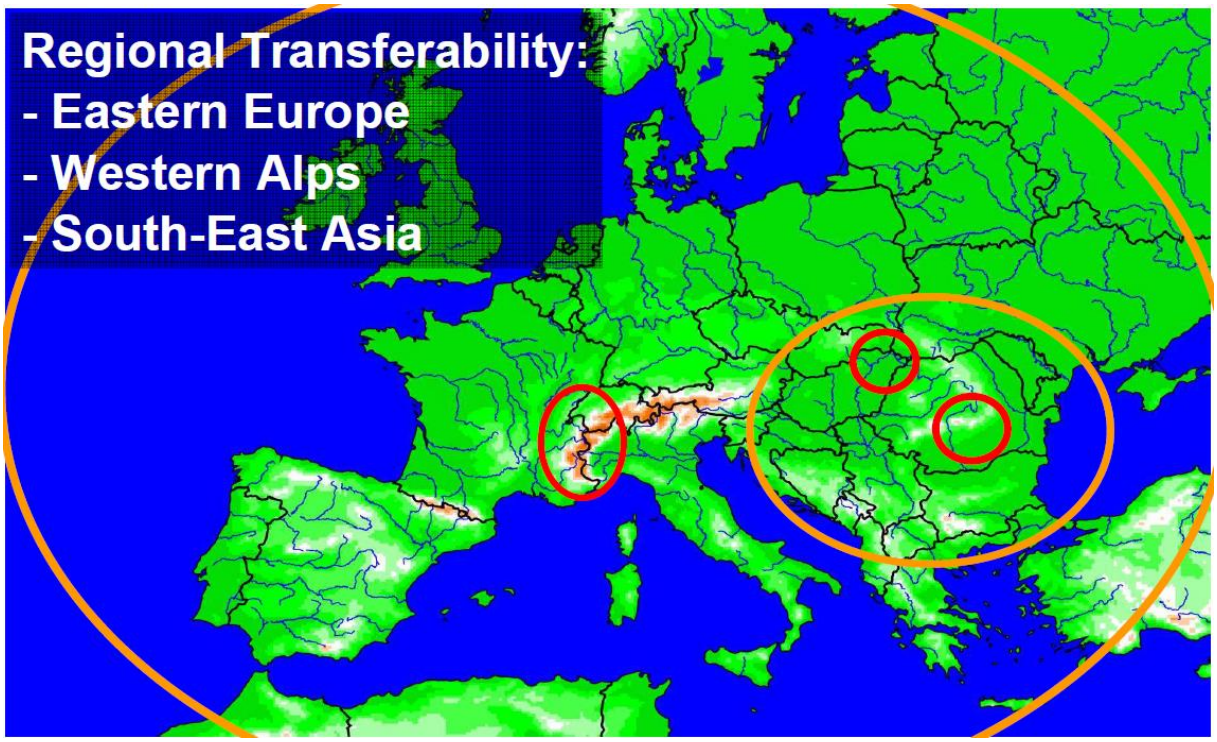


Abb. 140: Vorschläge für dem Untersuchungsgebiet in der Südost-Steiermark klimatisch ähnliche Regionen. *(Quelle: Wegener Center 2007)*

16. Schlussfolgerungen

Diese Arbeit ist unter der Prämisse zu betrachten, dass „nur“ ein Zeitraum von fünf Jahren untersucht wurde. Dieser Zeitraum ist hinsichtlich einer wissenschaftlich fundierten Untersuchung der klimatisch typischen Verhältnisse einer Region deutlich zu kurz (vgl. die 30-jährige Klimanormalperiode der ZAMG). Davon abgesehen hat diese Arbeit durchaus interessante und aussagekräftige Ergebnisse geliefert.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Erwartungen basierend auf der relevanten wissenschaftlichen Standardliteratur weitgehend erfüllt wurden. Vor allem wurde in zahlreichen Auswertungen und Analysen bestätigt, dass die oberen Hang- und Kammbereiche gegenüber den Unterhang- und Talbereichen thermisch begünstigt sind. Die Charakteristik des Untersuchungsgebietes bringt es mit sich, dass die Riedel kaum über eine Seehöhe von 500 m reichen, wodurch die maximale Reliefenergie nur rund 300 m beträgt. Daher wurden als zusätzliche Datenquellen die Werte von Stationen nahe liegender Erhebungen wie Stradner Kogel und Kapfensteiner Kogel hinzugezogen. Die Temperaturgunst nimmt nach Auswertung der Daten der ausgewählten Stationen im Untersuchungsgebiet des WegenerNet von den niedrigsten Stationen in 270 m bis in eine Seehöhe von 400 m zu. Die Daten der wenigen Stationen darüber legen die Vermutung nahe, dass bis in eine Seehöhe von zumindest 600 m mit thermisch begünstigten Bedingungen zu rechnen ist. Diese Theorie könnte durch Forschungen in ähnlich gearteten Gebieten, die auch in höhere Lagen reichen (beispielsweise bis 800 m), untersucht und verifiziert werden.

Die kältesten Bereiche in Tallage, wo die Kaltluft durch Hindernisse oder Senken aufgestaut wird, konnten nur teilweise mit Stationsdaten belegt werden; an mehreren relevanten Stellen steht keine Messstation, um die Analysen diesbezüglich durch eine höhere Datendichte abzusichern. Die Auswertung der Stationen in solchen Gebieten (wie beispielsweise bei Paldau im Westen des Untersuchungsgebietes) legen nahe, dass die thermische Ungunst nicht so ausgeprägt ist wie angenommen: die Differenzen bewegen sich bei den Jahresmittelwerten innerhalb weniger Zehntel Kelvin. Bei autochthoner Witterung sind diese deutlicher ausgeprägt. Diesbezüglich wären Nachfolgeuntersuchungen interessant, welche die Lage und Ausdehnung der kältesten Stellen des Gebiets verifizieren würden.

Bei engen Seitentälern konnte hingegen eine zu erwartende Temperaturgunst festgestellt werden, die meist auch bei etwas breiteren Seitentälern auftritt. Durch diesen Umstand ist die Zone mit begünstigten Bedingungen in Tal- und unteren Hangbereichen in der Klimatopkarte deutlich größer als in vergleichbaren Werken wie dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013).

Die unteren Hangbereiche der Riedel bilden eine Art Übergangszone, wo die thermische Begünstigung der Hanglage durch eine thermische Ungunst durch Kaltluftprozesse und Bodennebelereignisse vor allem in den Wintermonaten überlagert wird. Im Digitalen Atlas der Steiermark wird diese Zone aufgrund der komplexen Verhältnisse nicht näher definiert. Die Einschätzung der tatsächlichen Verhältnisse in diesen Bereichen gestaltet sich schwierig, da sie stark von verschiedenen Faktoren wie der Beeinflussung von nahen Talwindsystemen oder der allgemeinen Oberflächenstruktur abhängig ist. Die untere Hanglage ist vor allem bei engen Seitentälern sehr schmal zu definieren, da bereits in geringer Höhe über dem Talboden mit begünstigten Bedingungen gerechnet werden kann. Im Bereich des Raabtales ist hingegen durch verstärkte Kaltluftprozesse und höherem Windeinfluss von einer breiten Übergangszone auszugehen, was auch durch stichprobenartige Messungen bestätigt wurde.

Die höher gelegenen Hanggebiete werden vor allem durch die jeweilige Exposition positiv (südlich bzw. südwestlich) oder negativ (nördlich) beeinflusst. Auch die Nähe zu größeren Talregionen wie dem Raabtal und somit dessen Windsystem mit höheren Geschwindigkeiten und den mächtigen Kaltluftabflüssen, die bis zu den Kämmen angrenzender Riedel reichen können, spielt eine wichtige Rolle. Als Folge werden die günstigsten Zonen der oberen Hanglage in der Nähe des Raabtals kaum erreicht, da durch die genannten Faktoren eine optimale Ausbildung der Temperaturgunst an den Hängen weitestgehend verhindert wird. Zusätzlich erreichen die Riedel in diesen Regionen kaum mehr als 450 m Seehöhe.

Abseits des Raabtales wird meist bereits ab einer relativen Höhe von 100 m über dem Tal davon ausgegangen, dass die Temperaturgunst einer oberen Hanglage entspricht; der negative Einfluss von Kaltluftabflüssen kleinerer Seitentäler reicht nicht bis in eine solche Höhe. Dadurch ist diese oberste Zone nicht nur im Bereich der Gleichenberger Kogel (mit der höchsten absoluten Seehöhe im Untersuchungsgebiet) großflächig ausgebildet, sondern auch auf den Kämmen von zahlreichen Riedeln im gesamten Untersuchungsgebiet (abseits des Einflussbereichs des Raabtales).

All diese Daten, Auswertungen und Analysen wurden in die Gestaltung der Klimatopkarte des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 122, Kap. 12.3) miteinbezogen, die das zentrale Ergebnis dieser Arbeit darstellt. Im Vergleich mit ähnlichen Produkten wie beispielsweise dem Digitalen Atlas der Steiermark (Land Steiermark 2013) sind vor allem die Einbeziehung des Parameters Exposition, eine konsequente Gestaltung der Seitentäler sowie der höhere Detailgrad unter Einbeziehung der Messwerte sämtlicher Messstationen hervorzuheben.

Auch die Karte des potentiellen Weinbaugebiets (Abb. 128, Kap. 13.2) liefert interessante Informationen und könnte durch entsprechende Adaptierung auch für die Einschätzung der Anbaumöglichkeiten anderer (Nutz-)Pflanzen herangezogen werden.

Ein wichtiges Thema ist der Klimawandel, auf den in dieser Arbeit im Kap. 14 eingegangen wird. Wie eingangs erwähnt ist der Untersuchungszeitraum von fünf Jahren allerdings zu kurz, um diesbezüglich fundierte Aussagen und Ergebnisse zu erhalten. Die Trends deuten aber darauf hin, dass die Erwärmung in diesem Gebiet sogar noch stärker sein könnte, als von den meisten Modellen vorhergesagt wird. In der jüngsten Vergangenheit wurden regelmäßig neue Rekordwerte beim Jahresmittelwert seit Beginn der Messaufzeichnung erreicht, und auch die Häufigkeit der extremen Wetterereignisse wie Starkregen und Hagel hat deutlich zugenommen. Dies hat nachhaltige Konsequenzen für die Land- und Forstwirtschaft, deren Anpassungsstrategien in Kap. 14.3 beschrieben werden.

Das Messnetz WegenerNet wird mit Sicherheit noch einige Jahre bzw. Jahrzehnte betrieben werden und interessante Ergebnisse liefern. Möglicherweise kann diese Arbeit einen Teil dazu beitragen, dass das riesige Potential dieses außergewöhnlichen Stationsnetzes erkannt und weiterhin genutzt wird. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind nur ein kleiner Spiegel dessen, was derzeit weltweit in klimatischer Hinsicht vorgeht. Je umfangreicher und detaillierter das Wissen über diese aktuellen Vorgänge ist, desto besser wird man auf zukünftige Veränderungen und Anforderungen vorbereitet sein.

17. Literatur

Austrian Standards (Hrsg.), 1996: ÖNORM M 9440. Ausbreitung von luftverunreinigenden Stoffen in der Atmosphäre - Berechnung von Immissionskonzentrationen und Ermittlung von Schornsteinhöhen. 29 S.

BENDIX, J., 2004: Geländeklimatologie. Studienbücher der Geographie. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 282 S.

Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) (Hrsg.), 2016: Austrian Map Online. http://www.austrianmap.at (Zugriff 06/2016)

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) und Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) (Hrsg.), 2011: Digitale Bodenkarte von Österreich (eBOD). http://gis.lebensministerium.at/ebod (Zugriff: 07/2013).

BLÜTHGEN, J. und WEISCHET, W., 1980: Allgemeine Klimageographie. – Lehrbücher der Geographie. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 887 S.

BOER, W., 1959: Zum Begriff des Lokalklimas. Z. Meteor. 13, 1959, S. 5-11.

Climate Service Center (Hrsg.), 2012: Trockenperiode. http://www.climate-service-center.de/033620/index_0033620.html.de (Zugriff: 07/2014)

CONRAD, V., 1936: Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrestrischen Einflüssen. Borntraeger Verlag, Berlin, 556 S.

DEFANT, F., 1949: Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklima, Serie A, Band 1, S. 421-450.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.), 2012: Tropennacht https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102802 (Zugriff 06/2016)

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.), 2013: Wetterlexikon. http://www.dwd.de/lexikon (Zugriff: 07/2013)

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.), 2014: Schwüle. http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102480 (Zugriff 06/2016)

DIETRICH, H. und BÖHNER, J., 2008: Cold Air Production and Flow in a Low Mountain Range Landscape in Hessia. – In: Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie 19, S.37-48.

DUSCHEK, M., 2012: Klimadaten der Station Stradner Kogel. Unpubliziertes Datenmaterial. Datenerhebung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz.

DUSCHEK, M., 2014: Klimadaten der Station Kapfensteiner Kogel. Unpubliziertes Datenmaterial. Datenerhebung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz.

DUSCHEK, M., 2014: Vertikalmessung von Luftschadstoffen in der Steiermark mit eigens dafür konstruierter Messmethodik sowie deren Prognose mittels eines computerbasierten Berechnungsmodells. Dissertation am Institut für Geographie an der Karl-Franzens-Universität Graz. 194 S.

European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) (Hrsg.), 2010: Drought. http://eca.knmi.nl/ (Zugriff: 07/2014)

FEENSTRA, O. (Hrsg.), 2011: Hitzeschutzplan Steiermark. Landessanitätsdirektion A8/FA Gesundheit und Pflegemanagement. Graz, 25 S.

FLEMMING, G., 1991: Einführung in die angewandte Meteorologie. Akademie-Verlag, Berlin, 168 S.

FOKEN, T., 2006: Angewandte Meteorologie: Mikrometeorologische Methoden. Springer Verlag, Berlin, 326 S.

FORMAYER, H. et al., 2005: Untersuchung regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitze- und Trockenperioden in Österreich. Teilprojekt von StartClim2004. Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur, Wien, 30 S.

FRÜHWIRTH, G., 1994: Ein landschaftsökologischer Vergleich zwischen dem Sausal und dem oststeirischen Vulkangebiet (Gleichenberger Kogel, Stradner Kogel und Klöcher Vulkanmassiv) unter besonderer Berücksichtigung des Naturraumpotentials. Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz, 167 S.

GEIGER, R., ARON, R. H., und TODHUNTER, P., 1995: The climate near the ground. 5. Auflage, Braunschweig und Wiesbaden, 528 S.

GOBIET, A. et al., 2012: Klimaszenarien für die Steiermark bis 2050. Eine Studie des Wegener Centers für Klima und Globalen Wandel im Auftrag des Landes Steiermark. Graz, 31 S.

Google Maps (Hrsg.), 2015: Karte der Steiermark. https://www.google.at/maps (Zugriff: 09/2015)

GOSSMANN, H., 1984: Satelliten-Thermalbilder - ein neues Hilfsmittel der Umweltforschung? Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, Schriftenf. Bundesforschungsanst. f. Landeskunde und Raumordnung, 117 S.

GROSS, G., 2011: Beispielhafte Vorschläge für methodische Vorgehensweisen bei der Verwendung regionaler Klimamodelle, Teil 1: Modellkonzepte und Beispiele. Regionalisierung von Klimadaten für Thüringen. Vortrag am Deutschen Klimakonsortium 2010 in Berlin, 33 S.

HARLFINGER, O., PILGER, H. und RIEDER, H., 2002: Bioklimatische Studie der Steiermark – Planungsgrundlage für den Gesundheits- und Erholungstourismus. Auftragsstudie des Landeshygienikers der Steiermark. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Graz, 51 S.

HÄCKEL, H., 2012: Meteorologie. 7., korrigierte Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 448 S.

HANN, J. v., 1883: Handbuch der Klimatologie. J. Engelhorn Verlag, Stuttgart. 764 S.

HILKENBÄUMER, F. SCHNELLE F. und BREUER, W., 1957: Bestands- und Ertragssicherung im Obstbau. Arbeitsmerkheft 7. Radebeul, Berlin.

HIRTENFELLNER, J., 1998: Geländeklimatische Untersuchungen in der Pöllauer Talbucht. Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz, 127 S.

HUMBOLDT, A., 1845: Kosmos – Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Verlagshaus Cotta, Berlin, 999 S.

INWT Statistics (Hrsg.), 2014: Bestimmtheitsmaß R^2. https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil1.html (Zugriff 06/2016)

KABAS, T., 2005: Das Klima in Südösterreich 1961-2004: Die alpine Region Hohe Tauern und die Region Südoststeiermark im Vergleich. Diplomarbeit am Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, 131 S.

KABAS, T., 2011: WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach: experimenteller Aufbau und hochauflösende Daten für die Klima- und Umweltforschung. Dissertation am Institut für Geographie und Raumforschung an der Karl-Franzens-Universität Graz, 180 S.

KAISER, H., 1958: Über den “Strahlungstyp” und den “Windtyp” des Mikroklimas. In: Met. Rdsch. 11, S. 162-164.

KING, E., 1973: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 130. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 24 S.

KIRCHENGAST et al., 2008: Pionierexperiment WegenerNet Klimastationsnetz: Ein neuartiges Messnetz in der Region Feldbach (Steiermark/Österreich) zur Beobachtung von Wetter und Klima mit sehr hoher Auflösung. Wissenschaftlicher Bericht Nr. 23-2008 des Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz. Wegener Center Verlag, Graz, 76 S.

KLAGHOFER, E., 1985: Einfluß der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Oberflächenabfluß bei Starkregen. In: Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Nummer 30. Petzenkirchen, 105 S.

KNOCH, K., 1949: Die Geländeklimatologie, ein wichtiger Zweig der angewandten Klimatologie. Ber. Dtsch. Landesk. 7, S. 115-123.

KRAUS, H., 2008: Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie. Einführung in die Physik der Atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie. Springer Verlag, Berlin, 211 S.

KUTTLER, W., 2009: Klimatologie. In: Grundriss Allgemeine Geographie. Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn, 260 S.

KROMP-KOLB et al. (Hrsg), 2014: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 1096 S.

Land Steiermark (Hrsg.), 2013: Digitaler Atlas der Steiermark. http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/50190666/DE/ (Zugriff: 07/2013).

Landesumweltinformation Steiermark (LUIS) (Hrsg.), 2013: Luft Onlinedaten. http://www.umwelt.steiermark.at/ (Zugriff: 12/2013)

Landwirtschaftliche Umweltberatung Steiermark (Hrsg.), 2011: Wasserschutzblatt 2/2011. Landwirtschaftskammer Steiermark, 8 S.

Landwirtschaftliches Wochenblatt (Hrsg.), 2014: Steil ist nicht gleich steil. http://www.lw-heute.de/steil-gleich-steil (Zugriff: 07/2015)

Landwirtschaftskammer Steiermark (Hrsg.), 2012: Wein: Neue Pflanzrechte. https://stmk.lko.at/?id=2500,1727524,, (Zugriff: 03/2016)

LAZAR, R., 2005: Bioklimatische Aspekte in Bad Gleichenberg. Institut für Geographie an der Karl-Franzens-Universität Graz. 21 S.

LAZAR, R., KAUFMANN, V., BUCHROITHNER, M., 1995: Stadtklimaanalyse Graz. Magistrat Graz, 163 S.

LAZAR, R., KUNCIC, E., 1997: Bisherige Erfahrungen mit Klimaeignungskarten in der Steiermark. In: Beiträge zur Geographie der Steiermark. Graz, S. 139 ff.

LAZAR, R., SULZER, W., 2013: Stadtklimaanalysen 1986, 1996, 2004 & 2011. Projekt THERMAL 04. Institut für Geographie an der Karl-Franzens-Universität Graz, Steiermärkische Landesdruckerei GmbH, 297 S.

LIEB, G. K., 1991: Eine Gebietsgliederung der Steiermark aufgrund naturräumlicher Gegebenheiten. In: Mitteilungen der Abteilung für Botanik am Landesmuseum Joanneum Graz 20, Graz, S. 1–30.

MALBERG, H., 1997: Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung. 3. erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, 354 S.

MALONE, T. (Hrsg.), 1951: Compendium of Meteorology. American Meteorological Society Boston, Massachusetts. Waverly Press, Inc., Baltimore. 1334 S.

MARTENS, J., 1999: Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. Oldenbourg Wirtschaftsverlag, Oldenbourg, 296 S.

Microsoft (Hrsg.), 2013: Statistik-Funktionen Excel: TREND. http://support.microsoft.com/kb/828801/de (Zugriff 11/2013)

OBERTH, U., 2010: Untersuchung der lokalen Windsysteme im Raum Feldbach unter besonderer Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen. Masterarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung an der Karl-Franzens-Universität Graz, 146 S.

PARLOW, E., 1983: Geländeklimatische Untersuchungen im Bereich der Staufener Bucht unter besonderer Berücksichtigung lokaler Ausgleichsströmungen. In: Freiburger Geographische Hefte 20, 175 S.

PLIENEGGER, M., 2011: Eine Geomorphologische Karte der Steiermark - Herstellung, Interpretation und Übertragung auf ein weiteres Gebiet. Dissertation am Institut für Geographie und Raumforschung an der Karl-Franzens-Universität Graz, 159 S.

POTOTSCHNIK, T., 2010: Der Einfluss des Klimawandels auf die Anbaubedingungen der wichtigsten Kulturpflanzen der Steiermark. Masterarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung. 113 S.

PRETTENTHALER, F., PODESSER, A. und PILGER, H. (Hrsg.), 2010: Klimaatlas Steiermark. Periode 1971 – 2000 – eine anwenderorientierte Klimatographie. Studien zum Klimawandel in Österreich, Band IV. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 361 S.

SCHAUER, M., 2009: Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Ausbreitungsklassenbestimmung gemäß ÖNORM M9440 anhand des 14-jährigen Datensatzes des Sendeturms Dobl/Steiermark. Diplomarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz. 72 S.

SCHÄDLER, G. und LOHMAYER, A., 1996: Kaltluft- und Windfeldberechnungen für den Raum Stuttgart im Zusammenhang mit der Planung für das Projekt „Stuttgart 21“. Untersuchungen zur Umwelt „Stuttgart 21“, Heft 1, 82 S.

SCHÖNWIESE, C.-D., 2013: Klimatologie. 4. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 489 S.

SCHÖNWIESE, C.-D., 2013a: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler: mit 66 Tabellen im Text und 11 Tabellen im Anhang. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart, Borntraeger Verlag, 319 S.

SCHWAB, A., 2000: Reliefanalytische Verfahren zur Abschätzung nächtlicher Kaltluftbewegungen. Freiburger Geographische Hefte 61, Institut für Physische Geographie Freiburg; 120 S.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (Hrsg.), 2010: Untersuchungen zum Klimawandel in Berlin. Dokumentation der im Rahmen des Stadtentwicklungsplans (StEP) Klima durchgeführten Modellrechnungen. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover, 64 S.

SEVRUK, B., 1982: Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. In: Operational Hydrology Report 21. Genf, 91 S.

SIEVERS, U., 2005: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 227, 101 S.

STEINHARDT, U., BLUMENSTEIN, O., BARSCH, H., 2011: Lehrbuch der Landschaftsökologie. 2. Auflage. Springer-Verlag, Heidelberg, 295 S.

Steirische Spezialitäten Magazin (Hrsg.), 2015: Weinbauregionen in der Steiermark. https://www.steirische-spezialitaeten.at/wein/weinbauregionen-steiermark.html

STULL, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Verlag, Dordrecht, 666 S.

SZEREBENYI, K., 2014: Analysis of WegenerNet Precipitation Data and Quality Evaluation for Case Studies and Climatologies. Masterarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung an der Karl-Franzens-Universität Graz. 106 S.

Umweltzentrale (Hrsg.), 2013: Unwetterarten, Starkregen. http://www.uwz.at/at/de/unwetterarten/starkregen (Zugriff: 10/2013)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.), 2003: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Richtlinie der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL. 85 S.

VOGT, J., 1994: Lokale Windsysteme in der angewandten Klimatologie. Fallbeispiele aus dem Raum Tübingen. In: Geograph. Rundsch. 46, S. 335-343.

WAKONIGG, H., 1970: Witterungsklimatologie der Steiermark. Verlag Notring, Wien, 255 S.

WAKONIGG, H., 1978: Witterung und Klima in der Steiermark. Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz 23, Verl. für d. Technische Univ. Graz, 473 S.

Waldwissen (Hrsg.), 2013: Dossier Klimawandel. http://www.waldwissen.net/dossiers/bfw_dossier_klimawandel/index_DE (Zugriff 07/2015)

WANNER, H., 1986: Die angewandte Geländeklimatologie – ein aktuelles Arbeitsgebiet der Physischen Geographie. In: Erdkunde 40, S. 1-14.

Wegener Center (Hrsg.), 2007: Regionale Klimaforschung am Wegener Center - Schwerpunkt Südoststeiermark. https://static.uni-graz.at/fileadmin/urbi-zentren/Wegcenter/8.WegenerNet/igam7www_wegenernet-regioklimaforschungschwerpoststmk-nov07.pdf (Zugriff 06/2017)

Wegener Center (Hrsg.), 2010: Leitfaden für das WegenerNet. http://www.wegenernet.org/misc/WegenerNet-Leitfaden.pdf (Zugriff: 07/2013)

Wegener Center (Hrsg.), 2013: Datenportal WegenerNet. http://www.wegenernet.org (Zugriff: 07/2013)

Wein-Info (Hrsg.), 2016: Grundkurs zur Weinerzeugung. http://www.wein-info.eu/weinerzeugung.html (Zugriff: 03/2016)

Wetterzentrale (Hrsg.), 2011: Kartenarchiv der Reanalyse des NCEP (National Centers for Environmental Prediction). http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html (Zugriff: 07/2013)

WHITEMAN, C. D., 2000: Mountain Meteorology. – Fundamentals and applications. Oxford University Press, New York, 343 S.

WIESNER, K. P., 1986: Programme zur Erfassung von Landschaftsdaten, eine Bodenerosionsgleichung und ein Modell der Kaltluftentstehung = Programmes for the collection of landscape data, a soil erosion equation, and a model showing how cold air arises. Heidelberg, Geographisches Institut der Universität, 83 S.

WINKLER, M., 2002: Bioklimakarten von Österreich. Diplomarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz, 95 S.

YOSHINO, M. Y., 1974: Climate in a small area: An Introduction to Local Meteorology. University of Tokyo Press, Tokyo, 549 S.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2002: Klimadaten von Österreich, 1971-2000. http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (Zugriff 03/2014)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2010: Trockenperioden. http://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_ip-klimawandel/daten-download/klimaindizes-zukunft/laengste-trockenperiode-meta/view (Zugriff: 05/2016)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2011: Astronomische Information. http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/ephemeriden (Zugriff 07/2013)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2012a: Monatsrückblick der Wetterlagen für Wien. http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick (Zugriff 07/2013)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2012b: Stationsliste. https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_messnetze/zamg-stationsliste-als-pdf (Zugriff: 07/2014)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2013: Temperatur-Hiatus. https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/temperatur-hiatus (Zugriff: 07/2015)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2015: Zweitwärmstes Jahr der Messgeschichte. https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/waermstes-jahr-der-messgeschichte (Zugriff 07/2016)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Hrsg.), 2016: Jahrbücher der ZAMG. http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch (Zugriff 07/2016)