

Kapitel 4

Strahlung



Foto: Sonnenscheinautograph, Modell Campbell Stokes. (Foto: A. Podesser)

Autor:
Friedrich Wölfelmaier

Inhaltsverzeichnis

- 4 Strahlung89
 - 4.1 Einleitung 91
 - 4.2 Globalstrahlung 91
 - 4.2.1 Einfluss von Atmosphäre und Gelände auf die solare Direktstrahlung 91
 - 4.2.2 Einfluss von Atmosphäre und Gelände auf die diffuse Himmelsstrahlung.....92
 - 4.2.3 Messung der Globalstrahlung92
 - 4.2.4 Berechnung der Globalstrahlung93
 - 4.2.5 Regionale Verteilung und zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung.....93
 - 4.2.5.1 Globalstrahlung auf die ebene Fläche.....93
 - 4.2.5.2 Globalstrahlung auf die reale Fläche.....94
 - 4.3 Sonnenscheindauer 97
 - 4.3.1 Messung der Sonnenscheindauer 97
 - 4.3.2 Astronomische Bedingungen – die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer 97
 - 4.3.3 Terrestrische Bedingungen – die effektiv mögliche (wirkliche) Sonnenscheindauer 97
 - 4.3.4 Witterungsbedingungen – die tatsächliche Sonnenscheindauer98
 - 4.3.5 Relative Sonnenscheindauer98
 - 4.3.5.1 Jahresgang und regionale Verteilung der relativen Sonnenscheindauer99

4.1 Einleitung

Die Strahlung der Sonne liefert den Antrieb für die „Wärmemaschine“ Atmosphäre. Für die zunehmende Nutzung solarer Energie durch den Menschen ist nicht nur die Kenntnis der Sonnenscheindauer alleine, sondern auch die an einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche zur Verfügung stehende solare Bestrahlungsstärke von Interesse. Der Bedarf an Sonnenenergie in Technik, Industrien, aber auch in privaten Haushalten sowie die Schätzung der Energiebilanz an der Bodenoberfläche für die Wasser-, Agrar- und Forstwirtschaft erfordern daher eine flächenhafte Darstellung des Einstrahlungsangebotes auf der mikroklimatischen Skala.

Die Sonne

Fast ausschließliche Energiequelle für das Wettergeschehen auf der Erde ist die Sonne. Bei einer mittleren Oberflächentemperatur der Sonne von 5700°C ergibt sich dabei eine enorme Strahlungsleistung von $6,15 \times 10^4 \text{ kW/m}^2$! Die am äußeren Rand der Erdatmosphäre auftreffende Strahlungsenergie der Sonne auf einer senkrecht zur Einstrahlungsrichtung stehenden Fläche beträgt im Mittel 1368 W/m^2 und wird als Solarkonstante bezeichnet. Diese Bestrahlungsstärke wird vom Querschnitt der Erdkugel aufgefangen. Da der Querschnitt einer Kugel ein Viertel ihrer Oberfläche beträgt, empfängt die Erdoberfläche im Durchschnitt

$0,342 \text{ kW/m}^2$. Diese Wärmemenge reicht beispielsweise aus, um an einem Tag eine 9 cm dicke Eisschicht zu schmelzen oder um eine 7 cm dicke Wasserschicht um 100°C zu erwärmen! Je nach Jahreszeit und geographischer Breite ändert sich dieser Betrag, dazu kommen Unterschiede in der Solarkonstante zwischen dem Perihel (sonnennächster Punkt im Nordwinter) und Aphel (sonnenfernster Punkt im Nordsommer).

4.2 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung umfasst die gesamte an der Erdoberfläche auf eine horizontale Empfangsfläche eintreffende solare Strahlung. Sie setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung. Die Direktstrahlung legt den kürzesten Weg von der Sonne zur Erdoberfläche zurück. Die Diffusstrahlung hingegen wird an Hindernissen wie zum Beispiel Wassertropfen oder Aerosolen gestreut, gebrochen oder reflektiert und trifft aus allen Himmelsrichtungen am Erdboden ein.

4.2.1 Einfluss von Atmosphäre und Gelände auf die solare Direktstrahlung

Die solare Direktstrahlung erfährt auf ihrem Weg durch die Atmosphäre eine durch Ab-

sorption und Streuung verursachte Abschwächung. Die Verminderung der Direktstrahlung über den gesamten Strahlungspfad wird durch die optische Dicke dargestellt.

Je niedriger der Sonnenstand, desto größer ist die Weglänge durch die Atmosphäre. Gegenüber einer senkrechten Sonneneinstrahlung ergibt sich in Meereshöhe bei einer Sonnenhöhe von 30° eine Verdoppelung der Weglänge, bei einer Sonnenhöhe von nur 10° verlängert sich der Weg bereits um das 5,8-fache. Somit nimmt die optische Dicke der Atmosphäre mit zunehmender Sonnenhöhe ab, die Transmission entsprechend zu.

Ebenso verkürzt sich mit zunehmender Seehöhe der Strahlungspfad durch die Atmosphäre, die optische Dicke nimmt ab, die Transmission entsprechend zu. In 3000 m werden bei einer Sonnenhöhe von 70° nur $3/4$, bei 30° das 1,4-fache und bei 10° das 4-fache des Strah-

lungspfades auf Meeresniveau und 90° Sonnenhöhe durchstrahlt (siehe Tabelle 4.1).

Die solare Direktstrahlung an einem Punkt der Erdoberfläche ist grundsätzlich von der geographischen Lage und letztlich vom Jahresgang der Sonnenhöhe abhängig, wobei die Strahlungsintensität mit dem Sinus des Einfallswinkels der Sonnenstrahlen abnimmt. Dabei spielt auch die Tageslänge mit den entsprechenden Zeiten für Sonnenauf- und -untergang eine wesentliche Rolle.

In Gebieten mit großer Horizontüberhöhung kommt es zu Abschattungen an sonnenabgewandten Hängen. Dieser Effekt tritt besonders bei niedrigem Sonnenstand in den Morgen- und Abendstunden auf. Trotz des Schlagschattens wird es in dem betroffenen Gebiet nicht vollständig dunkel, da die diffuse Himmelsstrahlung alle beschatteten Geländebereiche gleichmäßig ausleuchtet.



Foto 4.1: Die Globalstrahlung setzt sich aus der direkten Solarstrahlung sowie der kurzweiligen Diffusstrahlung zusammen, welche über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreicht. Im Bild werden die in der Luft befindlichen Wassertropfchen auch durch Lichtbrechung der einfallenden Sonnenstrahlen sichtbar gemacht. (Foto: H. Kain)

Tabelle 4.1: Von den Sonnenstrahlen zurückgelegte Weglänge in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe β und der Seehöhe (normiert auf den Strahlungspfad auf Meeresniveau bei einer Sonnenhöhe von $\beta = 90^\circ$).

Seehöhe [m]	Sonnenhöhe β (Neigungswinkel)							
	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	5°
3000	0,74	0,81	0,91	1,09	1,40	2,03	3,92	7,28
2000	0,83	0,90	1,01	1,21	1,56	2,26	4,37	8,11
1000	0,94	1,02	1,16	1,38	1,78	2,58	4,98	9,26
0	1,06	1,15	1,31	1,56	2,00	2,91	5,76	11,47

Der Betrag der solaren Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche hängt nur von der Sonnenhöhe ab. Die Exposition (Ausrichtung) und Inklination (Neigung) von Hängen führen dann zu unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnissen. Im geeigneten Gelände bestimmen Sonnenhöhe, Sonnenazimut (Einstrahlungsrichtung), Inklination und Exposition den Betrag der verfügbaren Direktstrahlung.

4.2.2 Einflüsse von Atmosphäre und Gelände auf die diffuse Himmelsstrahlung

Ein Teil der extraterrestrischen Solarstrahlung gelangt nicht als direkte Einstrahlung, sondern als diffuse Streustrahlung (Himmelsstrahlung) zur Erdoberfläche. Die eine Hälfte der diffusen Strahlung wird zur Erdoberfläche (Vorwärtsstreuung) und die andere Hälfte zurück in den Weltraum (Rückwärtsstreuung) gestreut. Grundsätzlich ergibt sich auch bei der diffusen Strahlung eine Abhängigkeit von der Weglänge durch die Atmosphäre mit einem

Anstieg des diffusen Anteils bei zunehmend niedriger Sonnenhöhe. Ebenso nimmt wegen der Verkürzung der Weglänge mit zunehmender Seehöhe der diffuse Strahlungsanteil ab. Bei geringer Lufttrübung werden hauptsächlich die kurzwelligen Strahlungsanteile gestreut, weshalb klarer Himmel blau erscheint, während bei stärkerer Trübung auch größere Wellenlängen gestreut werden, wodurch der Himmel etwa bei Sonnenuntergang sogar rötlich erscheint. Bei wolkenlosem Himmel bleibt die Himmelsstrahlung weit hinter der des bedeckten Himmels zurück, wobei die Unterschiede im Winter, speziell in den Niederungen, am geringsten sind. Die größten Unterschiede ergeben sich im Sommer, wo die Himmelsstrahlung beispielsweise in 3000 m siebenmal so groß ist wie bei wolkenlosem Himmel. Die Globalstrahlung wird bei bedecktem Himmel ausschließlich durch die Himmelsstrahlung gebildet, bei wolkenlosem Himmel ist sie hingegen nur etwas stärker als die solare Direktstrahlung. Bei starker Bewölkung und gleichzeitigem Sonnenschein ist die Global-

strahlung hingegen deutlich stärker als die solare Direktstrahlung. Für die Beschreibung von Tages- und Jahresgang der Globalstrahlung über tatsächlich gemessene Summen ist daher der Einfluss der Witterung, insbesondere der Bewölkung zu berücksichtigen. Außerdem wird das Gesichtsfeld eines Punktes durch das umgebende Relief eingeschränkt, was vor allem einschränkende Auswirkungen auf die diffuse Himmelsstrahlung hat. Letztlich beeinflusst auch die Oberflächenbedeckung über die Albedo den Nettogewinn der Globalstrahlung einer Fläche.

4.2.3 Messung der Globalstrahlung

Die Direktmessung der Globalstrahlung erfolgt an den Stationen der GeoSphere Austria über die Wärmewirkung der Strahlung. Die dabei eingesetzten Stern-Pyranometer (Fa. Schenk) arbeiten nach dem thermoelektrischen Prinzip. Dabei wird eine Breitbandstrahlung auf einer ebenen Fläche im Spektralbereich zwischen 0,2 und 3 μm registriert. In einer Reihenschaltung von Thermoelementen, welche aus schwarzen und weißen Kontaktstellen besteht, kommt es entsprechend dem Absorptionsvermögen zu unterschiedlichen Erwärmungsbeträgen zwischen den „heißen“ und „kalten“ Elementen. Die Übertemperatur der Schwarzkörper gegenüber den weißen Elementen induziert eine Thermospannung, die proportional zur Einstrahlung erfolgt. Zumindest zweimal pro Jahr ist eine Eichung der

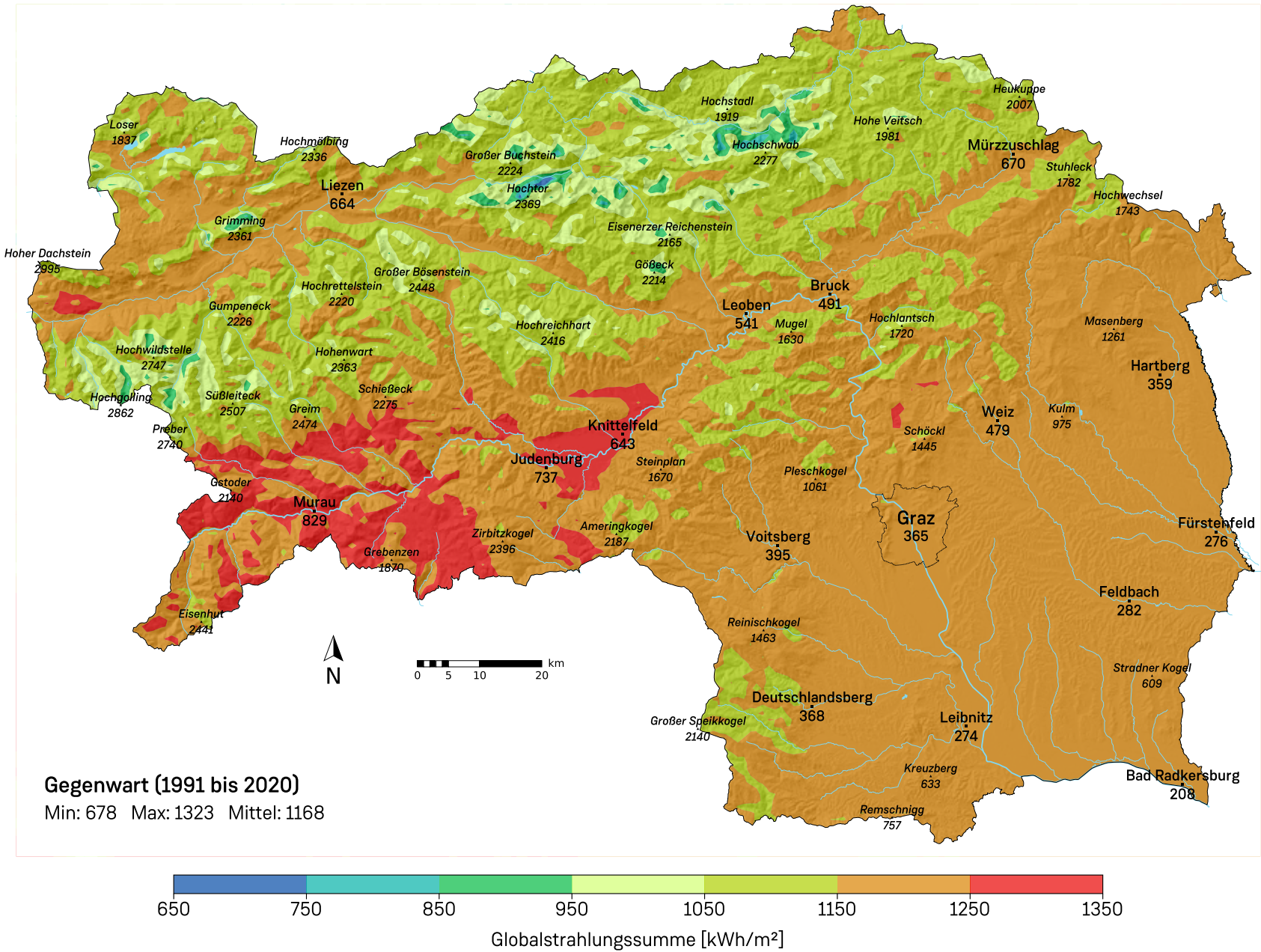


Abbildung 4.1: Mittlere jährliche Globalstrahlungssumme auf die ebene Fläche für die Periode 1991 – 2020.

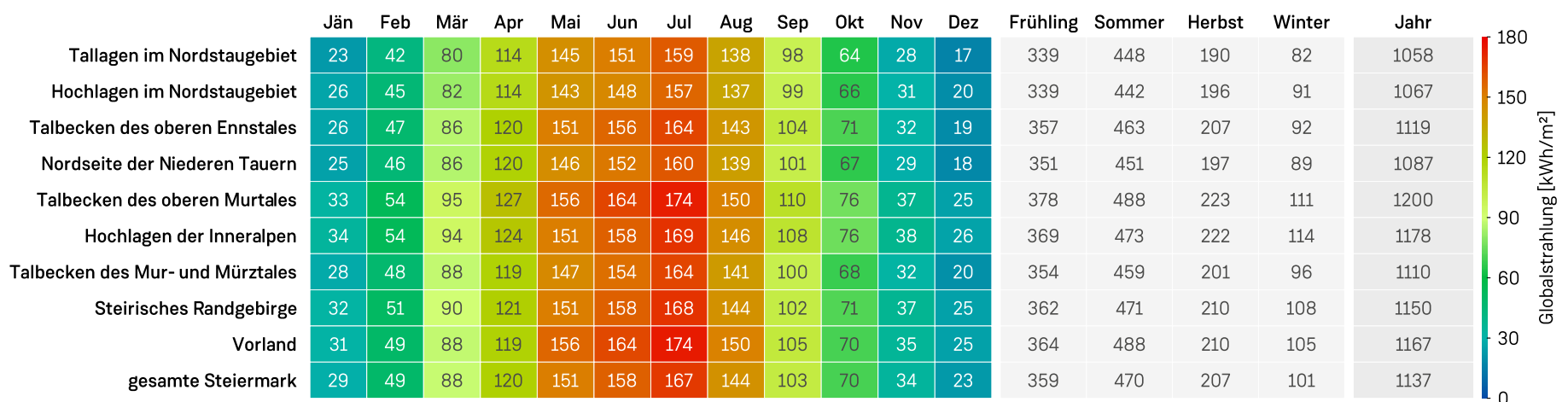


Abbildung 4.2: Jahresgang der Globalstrahlungssumme auf die ebene Fläche für die Periode 1961 – 1990.

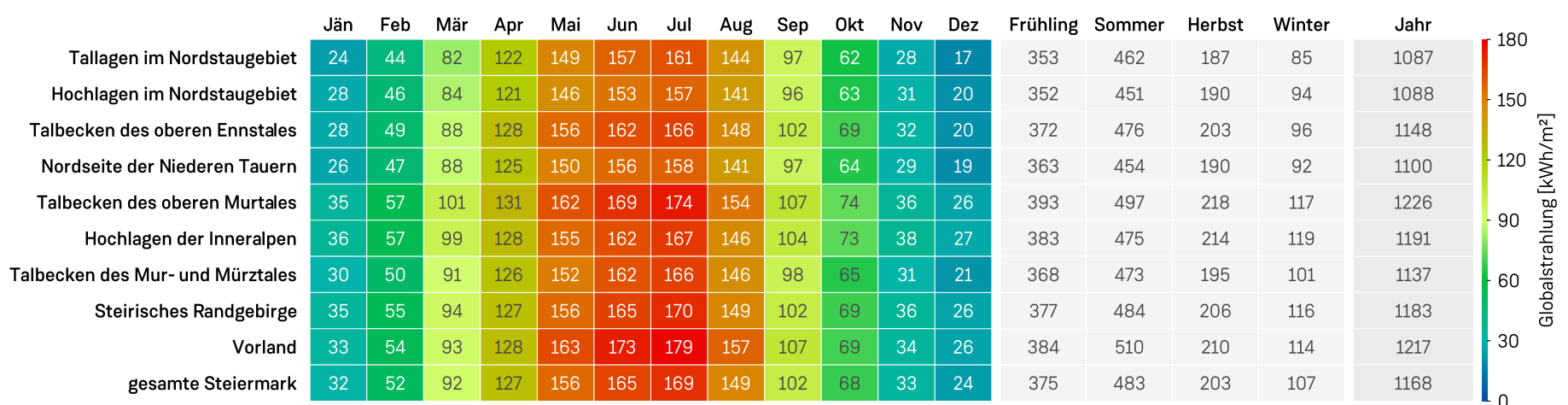


Abbildung 4.3: Jahresgang der Globalstrahlungssumme auf die ebene Fläche für die Periode 1991 – 2020.

Geräte notwendig, der Wechsel des Trockenmittels verlangt eine entsprechende Wartung. Die Auswertung dieses kostspieligen und technisch sehr aufwendigen Messverfahrens erfolgt auf Stundensummen-Basis pro Tag (Integral der Bestrahlungsstärke).

Zu Beginn der Periode 1991 – 2020 wurde die Globalstrahlung nur an wenigen Messstationen in der Steiermark registriert. Im Lauf der Zeit wurden während der 30-jährigen Periode immer mehr automatische Messstationen der GeoSphere Austria mit einer elektronischen Messung der Globalstrahlung mittels Stern-Pyranometer ausgestattet.

Die Globalstrahlung in einem bestimmten Moment wird in Einstrahlungsleistung (Bestrahlungsstärke) pro Fläche mit der Einheit W/m² angegeben. Die Globalstrahlungssumme über einen bestimmten Zeitraum ist als Einstrahlungsenergie pro Fläche definiert. Die Einheit der Globalstrahlungssumme ist entweder kWh/m² oder J/cm² (1 kWh/m² = 360 J/cm²).

4.2.4 Berechnung der Globalstrahlung

Aufgrund der erwähnten geringen Stationsdichte mit unzureichender Messdauer wurde die Globalstrahlung aus verschiedenen Parametern abgeleitet. Der hier verwendete gegitterte Globalstrahlungsdatensatz basiert auf einer Parametrisierung aus relativer Sonnenscheindauer (relSSD), Globalstrahlung zu wolkenlosen Bedingungen (Q_c) und langjährigen Stationsmessungen der Globalstrahlung (Q_r). Hierbei kommen sowohl Beobachtungen als auch Simulationsergebnisse zum Einsatz. Der Gitterdatensatz zur relativen Sonnenscheindauer (siehe Kapitel 1 „Daten und Methodik“) wird durch das SPARTACUS-Interpolationssystem generiert und steht mit Daten ab 1961

zur Verfügung. Für die Abschätzung der theoretisch möglichen Globalstrahlung zu wolkenlosen Bedingungen werden STRAHLGRID-Simulationen (Olefs und Schöner, 2012) eines Referenzjahres herangezogen. Diese Daten stehen auf horizontaler und geneigter Fläche täglich zur Verfügung und berücksichtigen unter anderem topographische Abschattungseffekte. Mit Hilfe des Ångström-Ansatzes (Ångström, 1924) wird eine Beziehung zwischen der relativen Sonnenscheindauer und dem Quotienten der tatsächlichen und der theoretisch möglichen Globalstrahlung hergestellt:

$$\frac{Q_r}{Q_c} = a + b \cdot \text{relSSD}$$

Diese Beziehung wird an Stationen mit langjähriger Messzeitreihe kalibriert und die resultierenden Parameter (a und b) über die Fläche des gesamten Bundeslandes räumlich interpoliert. Damit kann für jeden Gitterpunkt die Globalstrahlung auf horizontaler und geneigter (realer) Fläche berechnet werden. Dabei werden sowohl die Neigung als auch die Exposition berücksichtigt. Die Seehöhe geht bei der Berechnung der Strahlung zu wolkenlosen Bedingungen über die Pfadlänge ein, außerdem werden über die Seehöhe zusätzliche Beschattungseffekte der umliegenden Topographie berücksichtigt.

4.2.5 Regionale Verteilung und zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung

Die berechneten Summen der Globalstrahlung sind wesentlich von der Witterung (Bewölkung) abhängig, weil die relative Sonnenscheindauer einbezogen wird. In der relativen Sonnenscheindauer wird der Einfluss der Be-

wölkung deutlich sichtbar (siehe Kapitel 4.3.5). Die Höhenabhängigkeit wird über die Pfadlänge bei der Berechnung der Globalstrahlung zu wolkenlosen Bedingungen berücksichtigt. Für die Darstellung der regionalen Verteilung der Globalstrahlung auf die ebene Fläche gehen Abschattungseffekte – beispielsweise als Schlagschatten – an sonnenabgewandten Hängen in die Berechnungen ein. Diese werden in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Sonnenhöhe) und der Seehöhe berücksichtigt. In die Berechnung der Globalstrahlung auf die reale Fläche gehen zusätzlich die Exposition (Hangausrichtung) und die Geländeneigung ein.

4.2.5.1 Globalstrahlung auf die ebene Fläche

Bei der Globalstrahlung auf die ebene Fläche gehen die Witterung, die Seehöhe und die topographiebedingten Abschattungseffekte in die Berechnung ein. Exposition und Hangneigung spielen dabei keine Rolle. Zudem kann eine Information über die räumliche Verteilung der berechneten Werte auch nützlich für den Ertrag von Photovoltaik-Anlagen sein.

Bei der Globalstrahlungssumme (Abbildung 4.1) gibt es im Bereich der großen Täler der Obersteiermark sowie dem Vorland keine großen Unterschiede. Die höchsten Werte treten im Bereich des Bezirks Murau auf. Dies ist vor allem auf die vermehrt sonnige Witterung mit einer geringeren Neigung zu Nebel im Herbst und Winter zurückzuführen. Auch bei den Gebirgsregionen sind die teilweise im Bezirk Murau gelegenen Hochlagen der Inneralpen begünstigt. Die Globalstrahlung auf ebener Fläche ist an der Südseite der Niederen Tauern sowie von der Turrach bis zur Seetaler Alpe am höchsten. Auch im Bereich des Randgebirges finden sich noch relativ hohe Werte

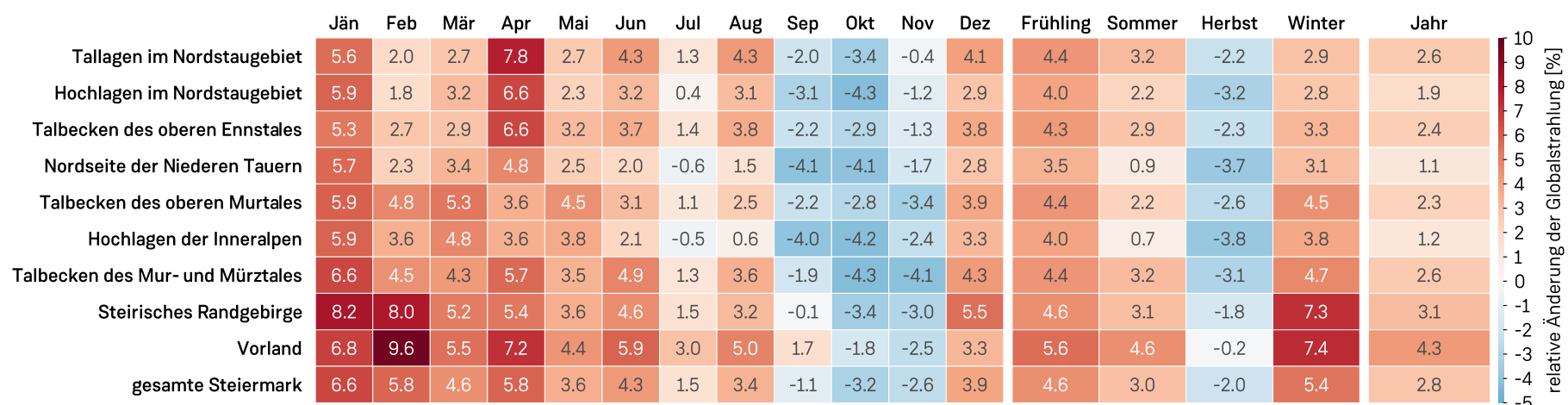


Abbildung 4.4: Relative Änderung des Jahresganges der Globalstrahlungssumme auf die ebene Fläche in Prozent für die einzelnen Regionen und die gesamte Steiermark im Vergleich zwischen Gegenwart (1991 – 2020) und Vergangenheit (1961 – 1990).

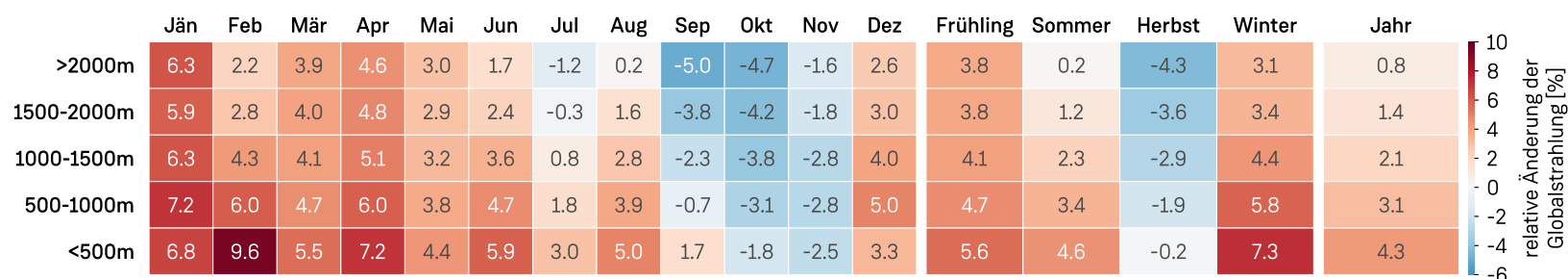


Abbildung 4.5: Relative Änderung des Jahresganges der Globalstrahlungssumme auf die ebene Fläche in Prozent für verschiedene Seehöhen im Vergleich zwischen Gegenwart (1991 – 2020) und Vergangenheit (1961 – 1990).

der Globalstrahlung, dort spielt ebenfalls die vom Sonnenschein begünstigte Witterung eine wesentliche Rolle.

Anders verhält sich die Situation in den Bergregionen nördlich des Alpenhauptkammes, wo viele Gipfel über 2000 m hinausragen. Dort liegen besonders von den Niederen Tauern bis zum Hochschwab die niedrigsten Einstrahlungswerte. Vor allem Staueffekte und Konvektion sorgen für einen hohen Bewölkungsanteil und damit auch geringere Strahlungswerte.

In Abbildung 4.3 ist der Jahresgang der monatlichen Globalstrahlungssumme der Gegenwart (1991 – 2020) für die einzelnen Regionen der Steiermark aufgelistet. Die höchsten Werte im Jahresschnitt von etwa 1230 kWh/m² treten in den Talbecken des oberen Murtales auf, gefolgt vom Vorland mit rund 1220 kWh/m². Bei der großräumig vorherrschenden Nordwestströmung sind diese Regionen durch die abschirmende Wirkung der Niederen Tauern und des Randgebirges vom Sonnenschein begünstigt. Im Vorland gibt es zwar im Herbst und Winter eine erhöhte Nebelbereitschaft, dies wird aber durch die geringere Konvektionsbewölkung im Frühjahr und Sommer wieder kompensiert. Wie schon in Abbildung 4.3 ersichtlich, ergeben sich die geringsten Werte der Globalstrahlungssumme in den Tal- und Hochlagen im Nordstaugebiet und der Nordseite der Niederen Tauern. Vor allem Staueffekte sorgen dort für mehr Bewölkung und weniger Globalstrahlung, die Werte erreichen rund 1090 bis 1100 kWh/m². Über die gesamte Fläche der Steiermark gemittelt, liegt die durchschnittliche Globalstrahlung auf ebener Fläche bei etwa 1170 kWh/m². Im Vergleich dazu lag der steiermarkweite Mittelwert in der Vergangenheit (1961 – 1990) noch bei rund 1140 kWh/m² (Abbildung 4.2).

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass in Mitteleuropa zwischen den 1950er und den 1980er Jahren ein leichter Rückgang der Globalstrahlung zu verzeichnen war („Glo-

bal Dimming“, globale Verdunkelung). Seitdem steigt die mittlere jährliche Globalstrahlungssumme wieder langsam an, die Globalstrahlung nimmt an vielen Orten auch weltweit wieder zu („Global Brightening“). Die Ursachen dieser Änderungen liegen in Vorgängen innerhalb der Erdatmosphäre und nicht in externen Einflüssen durch die Sonne. Dabei dürften vor allem eine Abnahme der Wolkenbedeckung und Änderungen der Aerosolkonzentration durch eine geringere Luftverschmutzung eine Rolle spielen (Wild, 2009; Schillinger et al., 2024).

Abbildung 4.4 zeigt die relative Änderung des Jahresganges der Globalstrahlungssumme zwischen Gegenwart (Periode 1991 – 2020) und Vergangenheit (Periode 1961 – 1990). Über das ganze Jahr ergibt sich in allen Regionen eine relative Zunahme der Globalstrahlungssumme, in der gesamten Steiermark um knapp 3%. Im Vorland ist die relative Zunahme um über 4% am stärksten. In den Hochlagen der Niederen Tauern und der Inneralpen findet sich mit etwa 1% die geringste relative Zunahme. In den verschiedenen Seehöhenbereichen (Abbildung 4.5) zeigt sich die größte relative Zunahme mit über 4% in Seehöhen unter 500 m, die geringste mit unter 1% in Höhen über 2000 m.

Über die Jahreszeiten gesehen nimmt die Globalstrahlung im Herbst in allen Regionen ab, in den übrigen Jahreszeiten in allen Regionen zu. In den einzelnen Regionen schwankt die relative Abnahme im Herbst zwischen nur -0,2% im Vorland und -3,8% über den Hochlagen der Inneralpen. Auch über den Hochlagen der anderen Gebirgsgruppen ist diese herbstliche relative Abnahme mit mehr als -3% deutlich. Über die verschiedenen Höhenlagen gesehen zeigt sich die stärkste relative Abnahme im Herbst in Höhenlagen oberhalb von 2000 m (siehe Abbildung 4.5).

Betrachtet man die Bewölkung über die beiden Zeitperioden (vgl. Kapitel 5.3.5), geht die Abnahme der Globalstrahlung im Herbst mit

einer Bewölkungszunahme einher. Gleichzeitig ist die Temperaturzunahme im Herbst deutlich geringer als in anderen Jahreszeiten (vgl. Kapitel 3.2.2).

Die stärkste relative Zunahme der Globalstrahlungssumme zeigt sich steiermarkweit im Winter, wobei im Vorland und in Höhenlagen unter 500 m mit über 7% die größte relative Steigerung beobachtet wurde. Diese winterliche Zunahme ist in Höhenlagen oberhalb von 2000 m mit rund 3% deutlich geringer. Bei der Betrachtung der Einzelmonate fallen die Zu- und Abnahmen zum Teil noch deutlicher aus als in den verschiedenen Jahreszeiten (Abbildungen 4.4 und 4.5).

4.2.5.2 Globalstrahlung auf die reale Fläche

Bei der Globalstrahlung auf die reale Fläche gehen neben der Witterung, der Seehöhe und der topographiebedingten Abschattungseffekte auch die Exposition und Hangneigung in die Berechnung ein.

Die Verteilung der Strahlungsverhältnisse im Jänner ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die höchsten Werte der Globalstrahlungssumme finden sich an Südhängen, dies vor allem im Bereich der Niederen Tauern sowie nördlich des Ennstales mit bis zu knapp 92 kWh/m². Geringe Strahlungswerte gibt es an den Nordhängen, nördlich des Alpenhauptkammes sowie in manch abgeschattetem Alpental. Eine verringerte Einstrahlung durch Nebel kommt vor allem im Südosten des Landes und beispielsweise auch im Mürztal zum Tragen.

Die Strahlungsverhältnisse im Juli sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Die höchsten Werte finden sich dabei im Vorland und in den großen Tälern der Obersteiermark mit über 180 kWh/m². Auch für die Hochlagen der Inneralpen ergeben sich recht hohe Werte. Besonders entlang der Gipfel und Gebirgskämme findet eine Reduktion der Einstrahlung durch

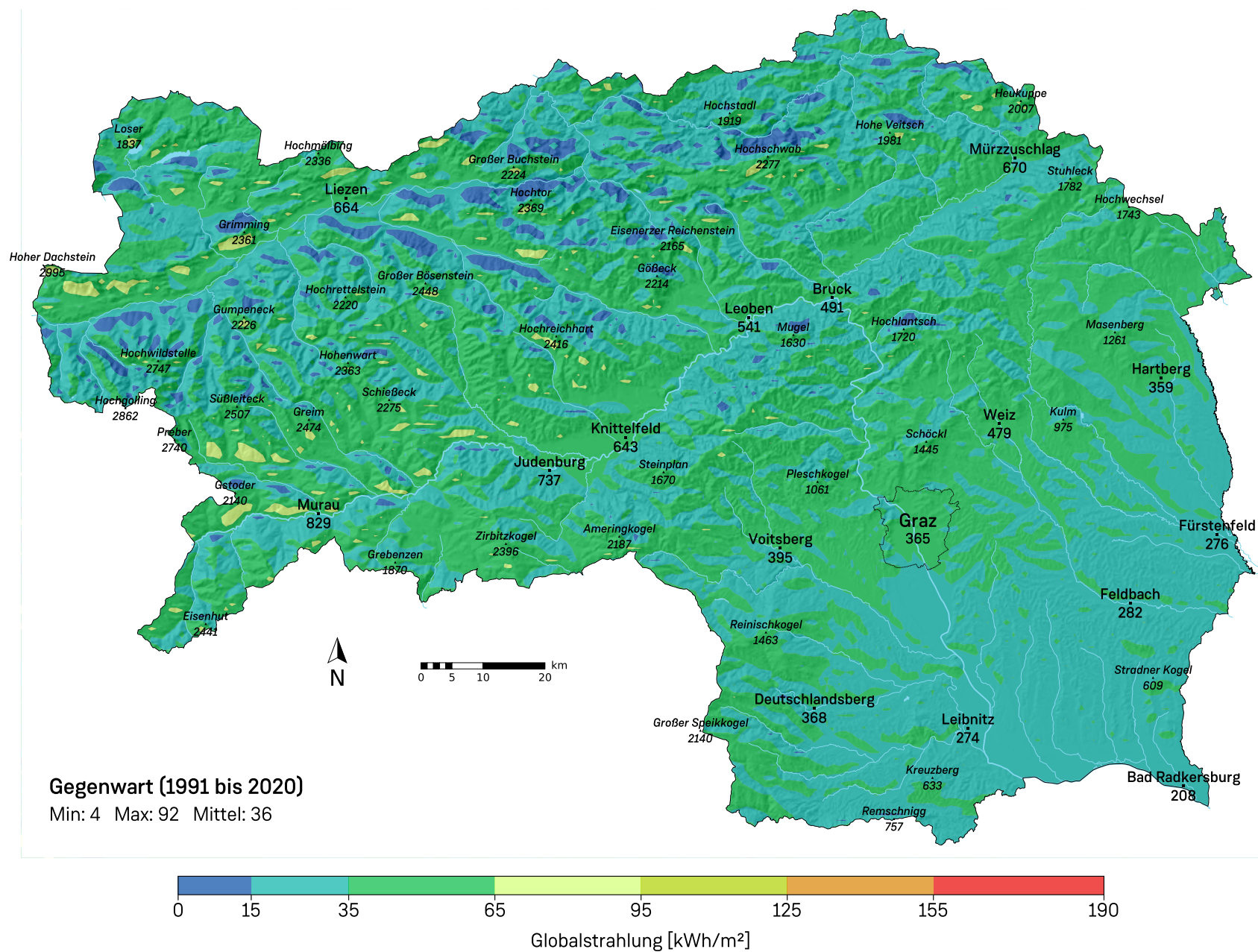


Abbildung 4.6: Globalstrahlungssumme [kWh/m²] auf die reale Fläche im Jänner in der Periode 1991 - 2020.

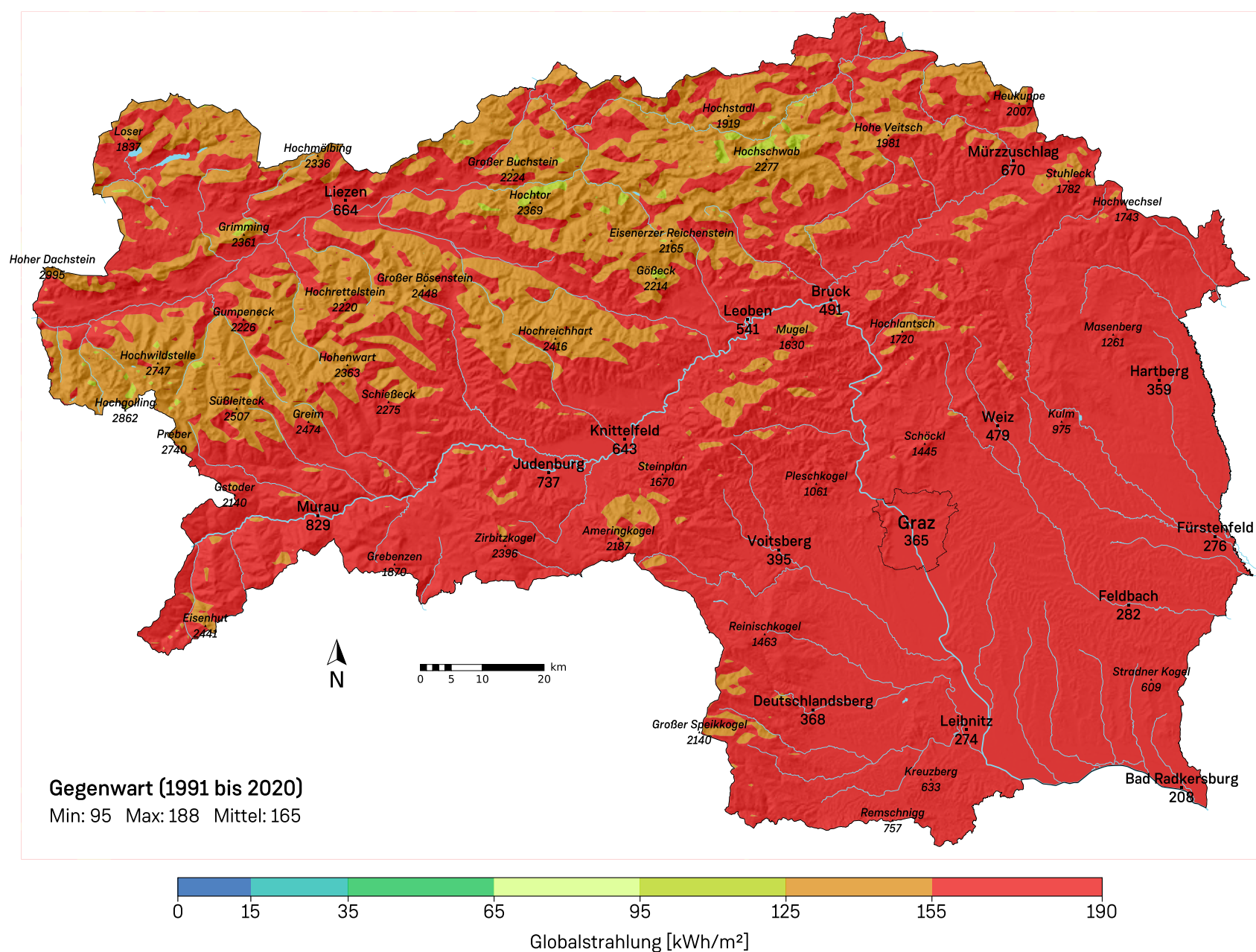


Abbildung 4.7: Globalstrahlungssumme [kWh/m²] auf die reale Fläche im Juli in der Periode 1991 - 2020.

sommerliche Konvektionsbewölkung statt. An nordseitigen Expositionen reduzieren die Abschattungen die Strahlungssumme. Es wurde für die Globalstrahlung auch der Vergleich zwischen Gegenwart (1991 – 2020) und Vergangenheit (1961 – 1990) angestellt, exemplarisch für die Monate Jänner (Abbildung 4.8) und Juli (Abbildung 4.9). Die Balkendiagramme zeigen die Ergebnisse für die einzelnen Regionen der Steiermark und die gesamte Steiermark. Für den Monat Jänner ergeben sich in den Hochlagen der Inneralpen die höchsten Werte beider Perioden. Auch die Talbecken des oberen Murtales weisen besonders im Bezirk Murau aufgrund geringerer Ne-

belneigung und verminderter Bewölkung (Wakonigg, 1978) erhöhte Einstrahlungssummen auf. Insgesamt liegen die Regionsmittel der Strahlung zwischen 27 und 45 kWh/m². Die relativen Jännerwerte in der Periode 1991 – 2020 sind um 5% bis 8% höher als 1961 – 1990 (Abbildung 4.10). Auch hier dürfte die Ursache in dem in Kapitel 4.2.5.1 erwähnten „Global Brightening“ (Wild, 2009) liegen, besonders in der damit verbundenen verminderten Bewölkung. Für den Monat Juli (Abbildung 4.9) liegen die Regionsmittel der Strahlung zwischen 149 und 178 kWh/m² mit den höchsten Werten im Vorland und in den Talbecken des oberen Murta-

les. Abseits der im Gebirge verstärkt auftretenden sommerlichen Konvektionsbewölkung ist der Strahlungsgenuss im Juli im Vorland am größten. In den Talbecken des oberen Murtales ist auch durch die Leewirkung der Gebirge entlang des Alpenhauptkamms mit weniger Bewölkung und Niederschlag zu rechnen. Vergleicht man die beiden Zeitperioden miteinander, zeigt sich in den Tallagen und im Vorland sowie dem Steirischen Randgebirge eine relative Zunahme um 1% bis 3%, in den Hochlagen und der Nordseite der Niederen Tauern hingegen nur eine sehr geringe Zunahme bzw. sogar eine Abnahme von -0,6% (siehe Abbildung 4.10).

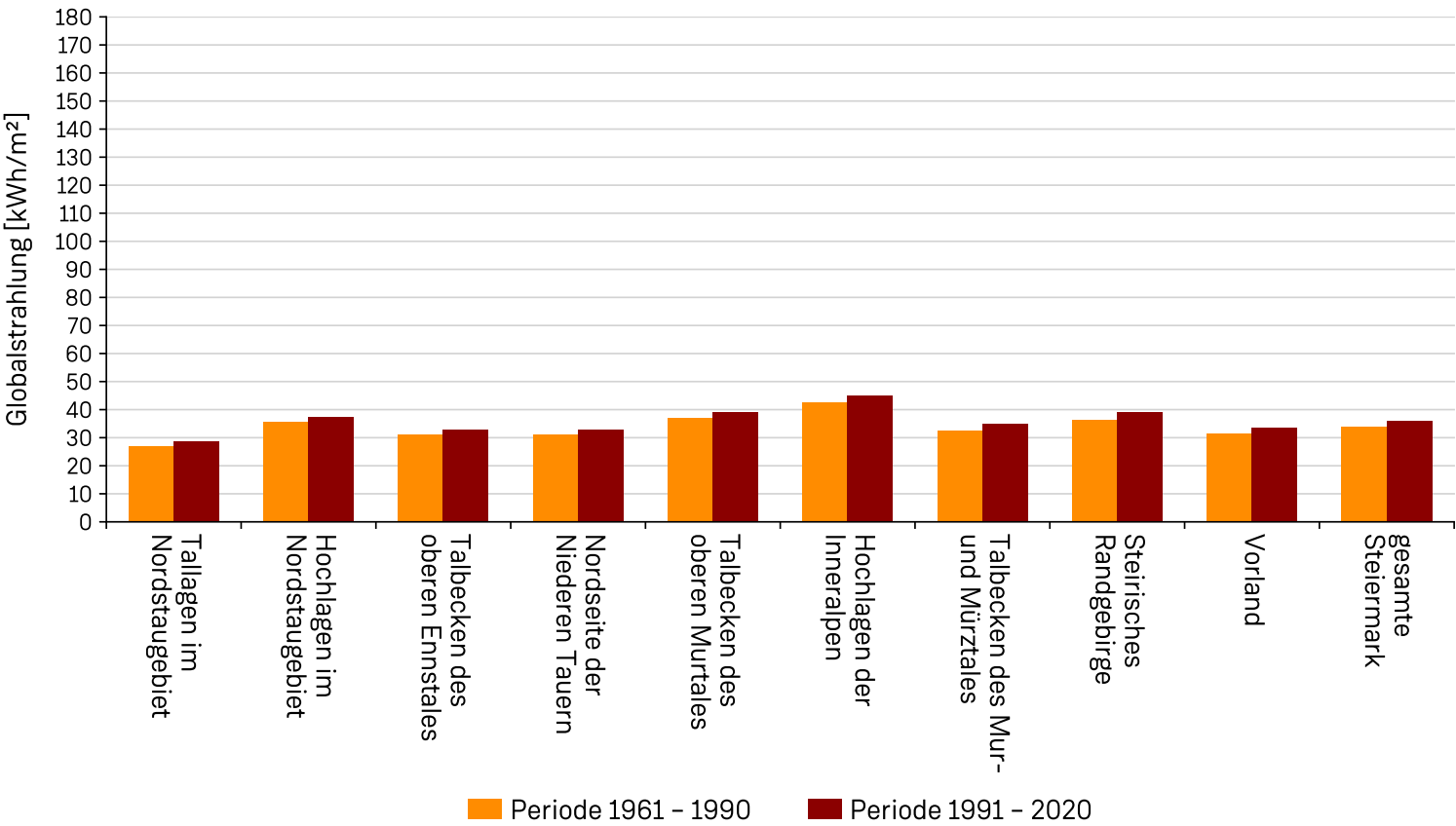


Abbildung 4.8: Globalstrahlungssumme auf die reale Fläche im Jänner in den Perioden 1961 – 1990 und 1991 – 2020.

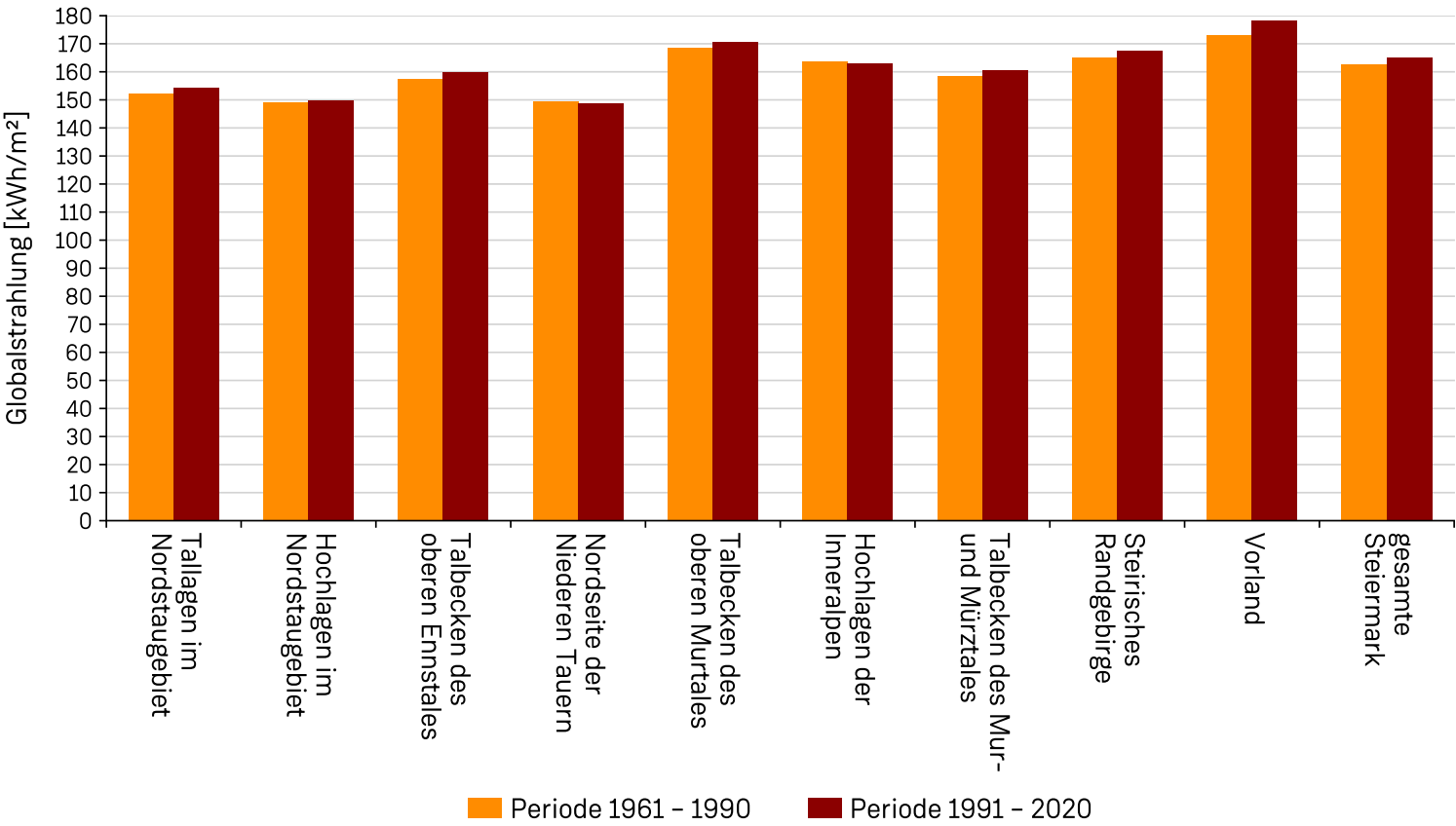


Abbildung 4.9: Globalstrahlungssumme auf die reale Fläche im Juli in den Perioden 1961 – 1990 und 1991 – 2020.

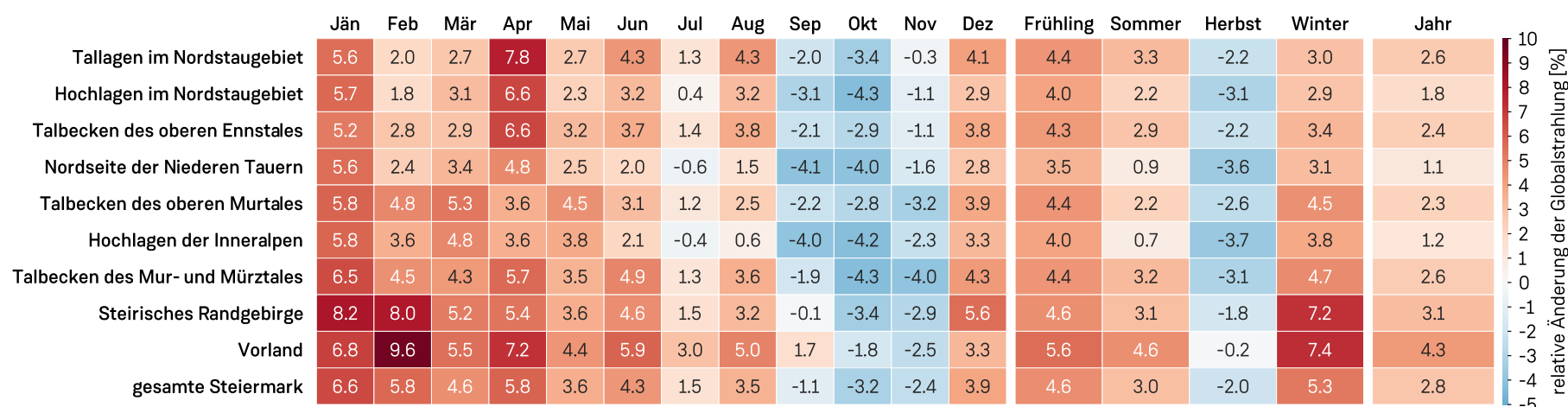


Abbildung 4.10: Relative Änderung des Jahresganges der Globalstrahlungssumme auf die reale Fläche in Prozent für die einzelnen Regionen und die gesamte Steiermark im Vergleich zwischen Gegenwart (1991 – 2020) und Vergangenheit (1961 – 1990).

4.3 Sonnenscheindauer

Der Einfluss der Sonnenscheindauer, welcher durch den zum Erdboden gerichteten Strahlungsfluss für die Erwärmung der Erdoberfläche verantwortlich ist, hat weitreichende Folgen für den Strahlungshaushalt eines Ortes. In der angewandten Klimatologie ist die Kenntnis der Sonnenscheindauer ein wichtiger Aspekt für alle Aussagen im Hinblick auf die Eignung eines Ortes als Heil-, Kur-, Erholungs- oder Badeort.

Strahlungsintensität

Über die Angabe der Sonnenscheinstunden pro Zeiteinheit lassen sich keine Rückschlüsse auf die Strahlungsintensität machen, da auch die Sonnenscheindauer in Abhängigkeit von geographischer Breite und Seehöhe charakteristische Tages- und Jahresgänge aufweist, welche je nach Höhe des Sonnenstandes und der Seehöhe zu unterschiedlichen Strahlungsintensitäten führt. So ist am Morgen und Abend bzw. allgemein im Winter bei niedrigem Einfallswinkel mit geringerem Strahlungsge-nuss zu rechnen, als dies um die Mittagszeit bzw. im Sommer der Fall ist. Abgesehen von den astronomischen Bedingungen hängen die Sonnenscheinverhältnisse eines Ortes stark von den terrestrischen Verhältnissen sowie vom Einfluss der Witterung ab.

4.3.1 Messung der Sonnenscheindauer

Seit etwa 1880 wurde die Sonnenscheindauer in Mitteleuropa mit der sogenannten Brandspurmethode gemessen. Der am meisten verwendete „Sonnenscheinautograph“ von Campbell-Stokes besteht aus einer Glaskugel mit einem Durchmesser von ca. 10 cm, welche die Funktion einer optischen Linse hat und die einfallenden Sonnenstrahlen bricht. Der Brennpunkt an der Rückseite der Kugel erzeugt in Abhängigkeit vom Tagbogen und der Bewölkung auf einem dunkel gefärbten Registrierpapier Brandspuren. Die Skala der Papierstreifen weist dabei eine zeitliche Auflösung von 1/10-Stunden (6 Minuten) auf und erfordert eine händische Auswertung. Nach empirischen Empfindlichkeitsbestim-

mungen liegt die Ansprechschwelle bei ca. 120 W/m². Dieses einfache Messprinzip erfordert aber eine laufende Wartung, da das Gerät vor Verschmutzung (Staub) und Niederschlag (Schnee, Tau, Reif) geschützt werden muss. Aus diesem Grund waren in Österreich etwa im Vergleich mit Temperatur- oder Niederschlagsmessstellen deutlich weniger Sonnenscheinautographen in Betrieb.

Umstellung auf Solarzellen

Seit 1981 wurden die meteorologischen Messstationen in Österreich nach und nach auf teilautomatischen Betrieb umgestellt. An die Stelle der Brandspurmethode trat ein neues Messprinzip, welches die Strahlung über Solarzellen misst. Beim System Haenni Solar 111 werden lichtempfindliche Zellen von einem laufend rotierenden Bügel kurzzeitig abgedeckt, die dabei auftretenden Helligkeitsunterschiede können dann ab einer bestimmten Differenz als Sonnenschein interpretiert werden.

Obwohl beide Messprinzipie („Sonnenscheinautograph“ und Solarzellen) sehr ähnliche Empfindlichkeitsschwellen aufweisen, ergibt sich über die unterschiedliche Messmethode und das händische bzw. teilautomatische Auswerteverfahren ein Homogenitätssprung (Hiebl et al., 2024). Vergleichsmessungen zeigen, dass die Werte der älteren Messungen mit dem „Sonnenscheinautograph“ Campbell-Stokes um 6 bis 9% (Olefs et al., 2013; Mohnl und Koch, 2006) über jenen des Systems Haenni Solar 111 liegen.

4.3.2 Astronomische Bedingungen – die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer

Die geographische Breite eines Ortes bestimmt über die Jahreszeit (Deklination der Sonne) und die unterschiedlich langen Tagbögen der Sonne die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer mit den Sonnenauf- und -untergangszeiten am geometrischen Horizont. Dabei werden die Horizontüberhöhung und der Einfluss der Witterung (Bewölkung) ausgeklammert.

Diese maximale Sonnenscheindauer kann aus astronomischen Daten berechnet werden. So beträgt die längste Dauer in Graz (47°04' Breite) zum Zeitpunkt der Sommersonnenwende (21. Juni) 15 h 54 min, zum Zeitpunkt der Wintersonnenwende (21. Dezember) 8 h 30 min. Am südlichsten Punkt der Steiermark (am Poßbruck, 46°36' Breite) ist die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer gegenüber Graz zu Sommerbeginn um 3 min kürzer, zu Winterbeginn um 3 min länger. Am nördlichsten Punkt (nördlich von Mariazell, 47°49' Breite) verlängert sich die Sonnenscheindauer zu Sommerbeginn um 7 min, zu Winterbeginn verkürzt sie sich um 7 Minuten im Vergleich zu Graz.

4.3.3 Terrestrische Bedingungen – die effektiv mögliche (wirkliche) Sonnenscheindauer

Durch den Einfluss der Horizontüberhöhung verkürzt sich die Zeit unter Annahme eines wolkenlosen Himmels zwischen Sonnenauf- und -untergang. Diese Verminderung des astronomischen Tagbogens führt besonders in Gebirgsländern zu großen Unterschieden in der effektiv möglichen Sonnenscheindauer. Während auf freistehenden Gipfeln und Orten im Flachland die Beeinflussung am geringsten ist, erfahren tief eingeschnittene Täler durch die Gebirgsumrahmung die stärkste Beeinträchtigung. So weisen in Abhängigkeit von der Talorientierung beispielsweise nord-süd-verlaufende Täler eine stärkere Verkürzung der Sonnenscheindauer auf als west-ost-verlaufende Talabschnitte.

Schatt- und Sonnhänge

Entsprechend dem niedrigen Sonnenstand während der kalten Jahreszeit ist der Verlust der effektiv möglichen Sonnenscheindauer gegenüber der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer im Winter am größten. Zwar ist diese Verkürzung der Sonnenscheindauer für den Strahlungshaushalt von nur geringer Bedeutung, da die Abschirmung zur Zeit niedriger Sonnenstände und somit niedriger Strahlungsintensitäten erfolgt, doch prägt die-

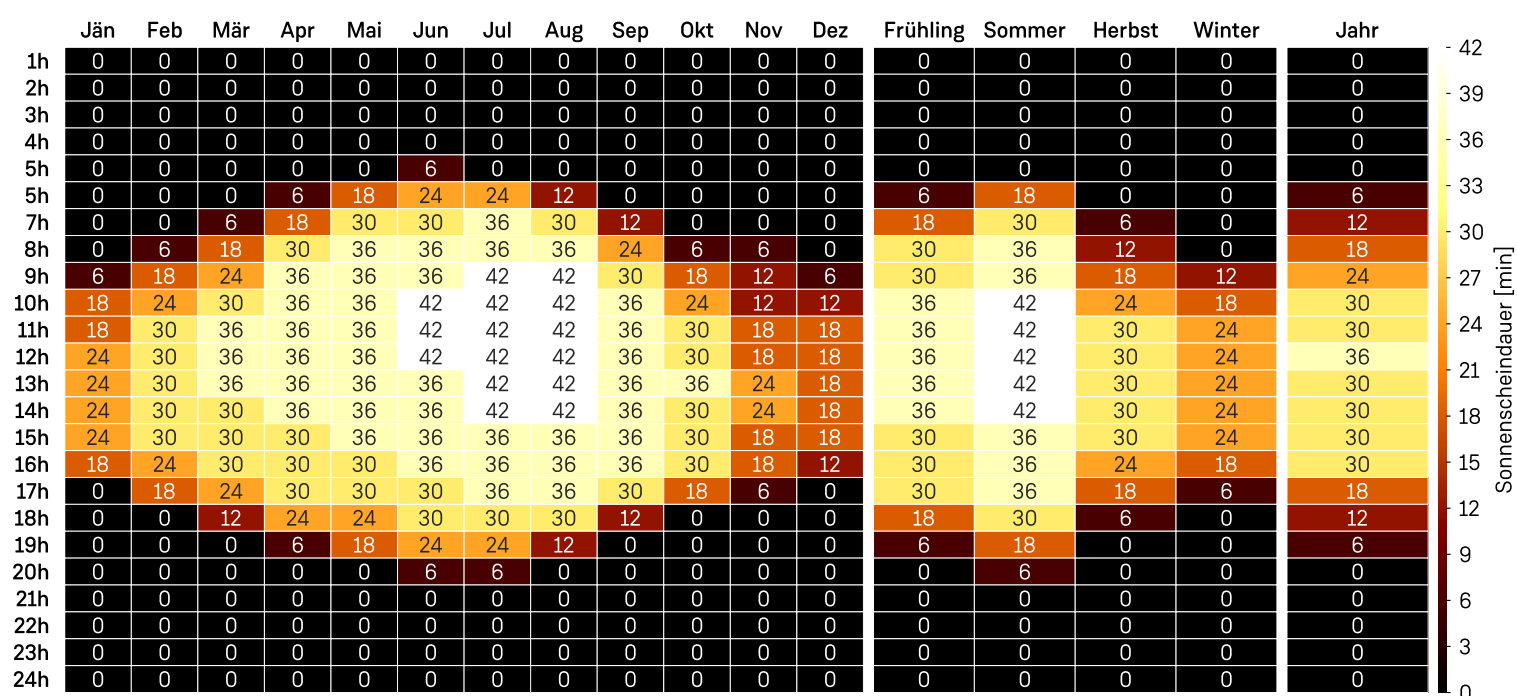


Abbildung 4.11: Mittlerer Tages- und Jahresgang der tatsächlichen Sonnenscheindauer an der Station Graz-Flughafen in Minuten für die Periode 1991 – 2020.

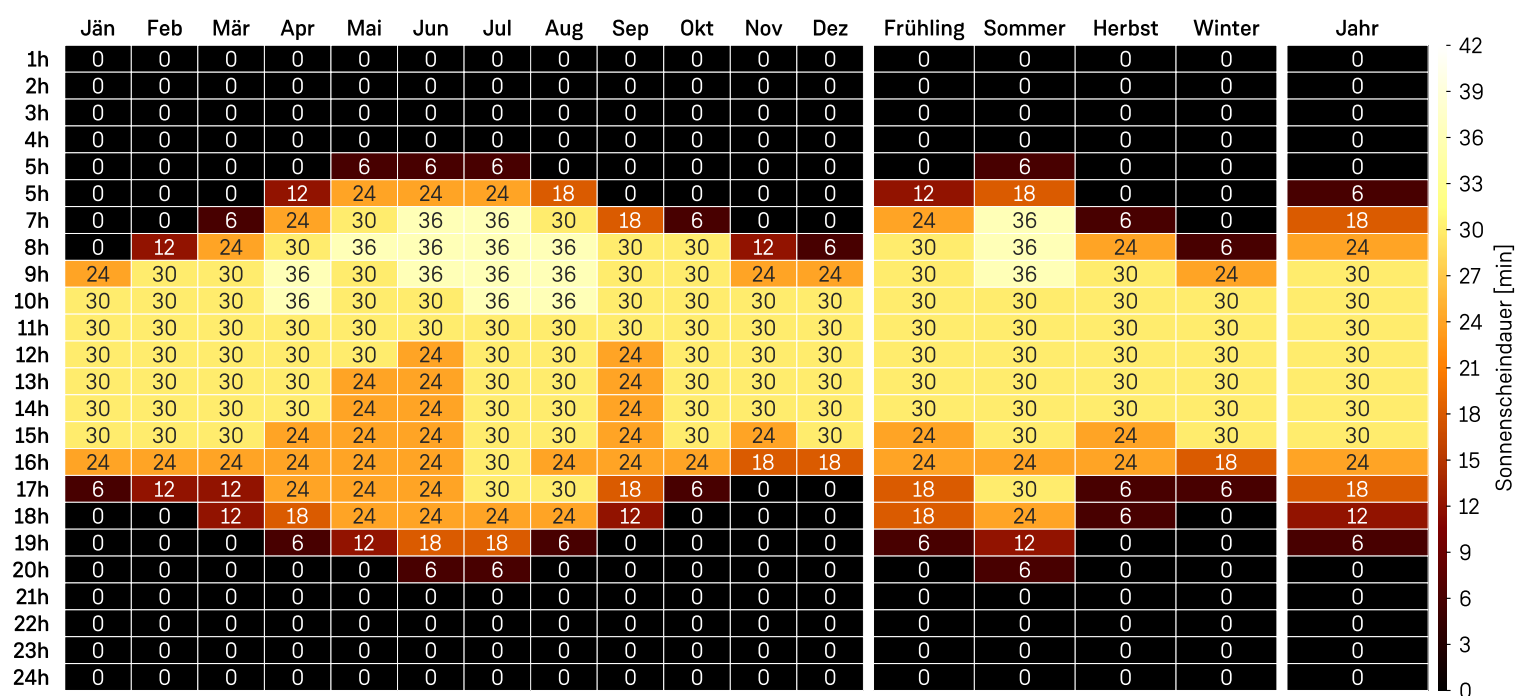


Abbildung 4.12: Mittlerer Tages- und Jahresgang der tatsächlichen Sonnenscheindauer an der Station Schöckl in Minuten für die Periode 1991 – 2020.

ser Strahlungsnachteil trotzdem die gesamte alpine Kulturlandschaft (Bätzing, 1991). In diesem Zusammenhang sei nur auf die unterschiedliche agrarische Nutzung oder Siedlungstätigkeit an Schatt- und Sonnhängen gedacht. Auch die schattseitige Verlängerung der Schneedeckendauer und ihre hydrologische Bedeutung in einem späteren Abschmelzen hat letztendlich ihre Ursachen in der geländebedingten Verminderung der Sonnenscheindauer im Winterhalbjahr. Die Mindesthöhe des Südhorizontes für eine völlige Abschirmung der Sonne am 21./22. Dezember beträgt in 47° Breite 19,5°. Aus diesem Grund bleibt zu Weihnachten der Ort Gstatteboden ohne Sonne.

4.3.4 Witterungsbedingungen – die tatsächliche Sonnenscheindauer

Durch den Einfluss von Nebel und Bewölkung wird die effektiv mögliche Sonnenscheindauer zur tatsächlich gemessenen Sonnenscheindauer verkürzt. Diese Verkürzung durch den Witterungseinfluss erreicht in der Steiermark im Jahresschnitt nur 40% bis 50% der effektiv möglichen Sonnenscheindauer (Wakonigg, 1978). Über die tatsächliche Sonnenscheindauer lassen sich zwar Aussagen über das Strahlungs-

klima eines Ortes machen, was für kur- und heilklimatische Fragestellungen von Wichtigkeit ist, ein regionaler Vergleich dieses Klimaelements (etwa kartographisch) ist aber wenig zielführend, da wegen des Einflusses der Horizontüberhöhung keine Rückschlüsse auf die Witterung gezogen werden können.

Vergleich Berg und Tal

Als Beispiel zu dieser Problematik sei hier ein Vergleich zwischen einer Talstation und einer Gipfelstation angeführt: Im Dezember beträgt die Summe der gemessenen Sonnenscheinstunden an der Station Graz Flughafen (Abbildung 4.11) nur 2,0 Stunden pro Tag, am Schöckl (Abbildung 4.12) scheint die Sonne hingegen 3,8 Stunden pro Tag (Normalwerte 1991 – 2020). Somit wird an der Station Graz-Flughafen im Dezember nur etwa die Hälfte der Sonnenscheindauer des Schöckls erreicht. Der Unterschied ergibt sich einerseits aus der deutlich größeren Häufigkeit von Boden- und Hochnebel am Standort Graz Flughafen, andererseits spielt auch der unterschiedliche Horizontverlauf der beiden Standorte eine Rolle. Im Juli kehrt sich die Verteilung der Sonnenstunden an den beiden Standorten um. An der Station Graz Flughafen werden im Juli 8,6 Sonnenstunden gemessen, am Schöckl nur 7,2 Stunden. Eine wesentliche Rolle spielt

dabei die sich im Tagesverlauf verstärkt bildende Quellbewölkung im Grazer Bergland im Vergleich zum südlichen Grazer Feld. Durch den unterschiedlichen Horizontverlauf ist ein direkter Vergleich der witterungsbedingten Besonnung an den beiden Stationen durch die tatsächliche Sonnenscheindauer aber nicht möglich.

4.3.5 Relative Sonnenscheindauer

Darunter versteht man den Anteil der tatsächlichen Sonnenscheindauer an der effektiv möglichen Sonnenscheindauer, ausgedrückt in Prozent. Dabei werden unterschiedliche Tagbogenlängen aufgrund verschiedener geographischer Breite und Horizontüberhöhung ausgeschaltet. Über den direkten regionalen Vergleich der Besonnung ermöglicht die relative Sonnenscheindauer Rückschlüsse auf die unterschiedliche Witterung an verschiedenen Orten. Für derartige Vergleiche ist allerdings zu beachten, dass die relative Sonnenscheindauer einen charakteristischen Tagesgang aufweist, durch den die Tagesmittel je nach Sonnenauf- und -untergang verfälscht werden können (Wakonigg, 1978). Besonders bei Orten mit größerer Tagbogenlänge bzw. größerer effektiv möglicher Sonnenscheindauer wirken

sich beispielsweise morgendliche Nebelfelder nachteilig aus. Durch den früheren Stand der Sonne über dem Horizont verkürzt sich die relative Sonnenscheindauer im Tagesmittel, während an Orten, deren effektive Sonnenscheindauer nur in die Mittagsstunden fällt, der Einfluss des Frühnebels unerkannt bleibt.

4.3.5.1 Jahresgang und regionale Verteilung der relativen Sonnenscheindauer

Wie bereits beim Jahresgang der tatsächlichen Sonnenscheindauer aufgezeigt, verläuft auch der Jahresgang der relativen Sonnenscheindauer invers zur Bewölkungs- und Nebelhäufigkeit. Wakonigg (1978) unterscheidet in der Steiermark beim Jahresgang der relativen Sonnenscheindauer drei Haupttypen. Die Klimaregionen der Steiermark können in diese Typen eingeteilt werden beziehungsweise ergeben sich auch Mischformen davon:

• **Vorlandtypus**
Dem nebel- und hochnebelbedingten Winterminimum steht ein Maximum im Sommer bei aufgelockerter Bewölkung gegenüber. Dieser Typus kann der Region Vorland zugeordnet werden. Wie in Abbildung 4.14 ersichtlich, besitzt die Region Vorland im Winter nebelbedingt die geringsten Werte. Im Frühling und Sommer werden hingegen die höchsten Werte in der Steiermark erreicht. Dies ist vor allem bedingt durch die abseits der Gebirge geringere Konvektionsbewölkung. Auch der September ist im Vorland noch sehr sonnenreich, während dann vor allem ab November Nebel und Hochnebel den Sonnenschein vermindern.

• **Berglandtypus**
Dieser Typus ist charakterisiert durch eine höhere Sonnenscheindauer im Winter infolge einer geringeren Nebelhäufigkeit, aber auch durch eine geringere Sonnenscheindauer im Frühling und Sommer durch eine bereits verstärkt auftretende Konvektionsbewölkung. Vor allem im Steirischen Randgebirge, dem oberen Murtal und den Talbecken des oberen Ennstales treten diese Charakteristika in Erscheinung (siehe Abbildung 4.14).

• **Hochgebirgstypus**
Im Hochgebirge sind der Frühwinter (Dezemberminimum durch Häufung von Nordstauwetterlagen) sowie das Frühjahr und der Frühsommer (verstärkte Konvektionsbewölkung) die im Vergleich zu anderen Regionen sonnenscheinärmste Zeit. Hingegen zählen der Spätwinter, wenn durch die Reflexionsstrahlung der Schneedecke noch keine Labilisierung erfolgen kann und der Herbst, wenn infolge schwächerer Einstrahlung keine Labilisierung mehr möglich ist, zu den sonnenscheinreichsten Abschnitten des Jahres. Wie in Abbildung 4.14 ersichtlich ist, repräsentieren die Regionen der Hochlagen im Nordstaugebiet und die Nordseite der Niederen Tauern am ehesten diesen Typus.

• **Mischformen**
In den Talbecken des Mur- und Mürztales ist im Winter ähnlich wie im Vorland vermehrt mit Nebel zu rechnen, im Sommer tritt bereits vermehrt Konvektionsbewölkung auf. In den Tallagen im Nordstaugebiet ist im Winter die Sonnenscheindauer

aufgrund der Stauwirkung der Gebirge bei vorherrschender Nordwestströmung reduziert. Im Sommer kommt es zu moderater Quellbewölkung. Diese Regionen sind somit im Winter eher dem Vorlandtypus, im Sommer eher dem Berglandtypus zuzuordnen.
Die Hochlagen der Inneralpen weisen im Winter eine höhere Sonnenscheindauer auf und entsprechen damit eher dem Berglandtypus, im Sommer ist die Konvektionsbewölkung aber sehr ausgeprägt und ähnelt eher dem Hochgebirgstypus.

Über das ganze Jahr gemittelt sind die regionalen Unterschiede der relativen Sonnenscheindauer mit unter 6% eher gering. Dies zeigt sich sowohl in der Vergangenheit (Abbildung 4.13) als auch in der Gegenwart (Abbildung 4.14). In beiden 30-jährigen Perioden scheint die Sonne über das ganze Jahr in den Talbecken des oberen Murtales am längsten. Die Zunahme der relativen Sonnenscheindauer von der alten zur neuen Klimaperiode ist im Vorland am größten. Die geringsten Werte in beiden Perioden werden in den Hochlagen im Nordstaugebiet, der Nordseite der Niederen Tauern und den Talbecken des Mur- und Mürztales erreicht, dort scheint die Sonne kürzer. Betrachtet man die flächenhafte Verteilung der Sonnenscheindauer im Dezember, zeigen sich besonders im Bereich der Südoststeiermark durch Nebel geringere Werte (siehe Abbildung 4.15). Auch im Bereich von Knittelfeld bis Mürzzuschlag kommt es durch Boden- und Hochnebel zu einer Reduktion der Sonnenscheindauer. Im Bereich der Alpennordseite bringen Nordstauwetterlagen dichtere Wolken und somit auch weniger Sonne. Am längsten

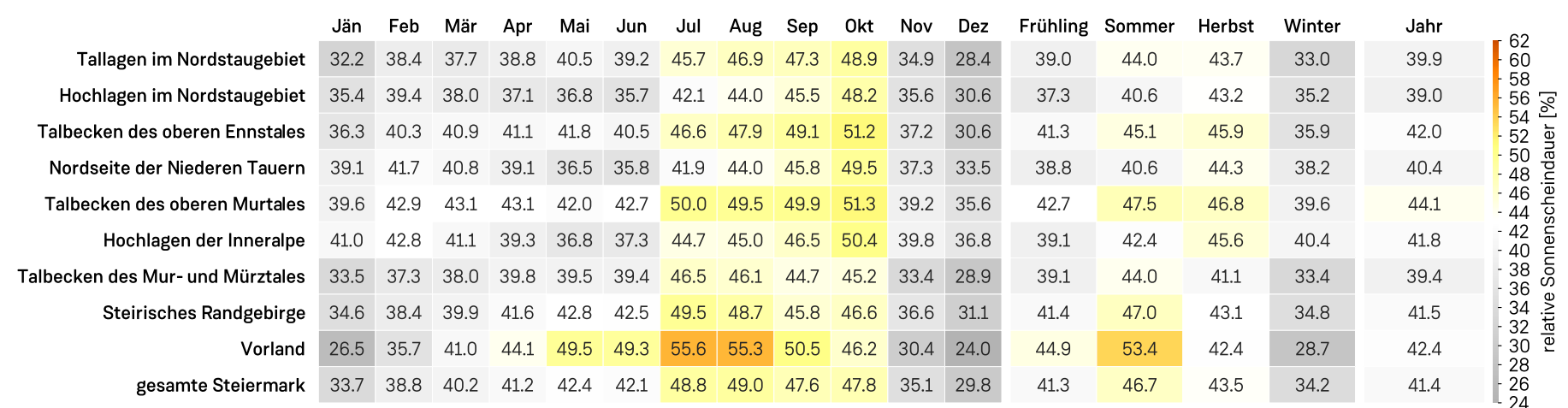


Abbildung 4.13: Mittlerer Jahresgang der relativen Sonnenscheindauer der einzelnen Klimaregionen und der gesamten Steiermark für die Vergangenheit (Periode 1961 – 1990).

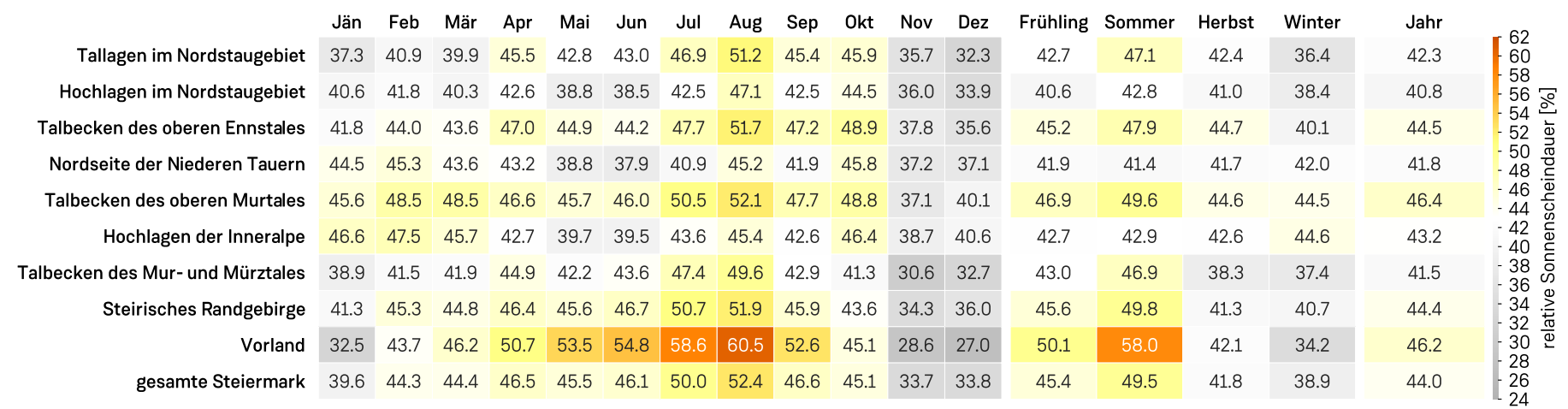


Abbildung 4.14: Mittlerer Jahresgang der relativen Sonnenscheindauer der einzelnen Klimaregionen und der gesamten Steiermark für die Gegenwart (Periode 1991 – 2020).

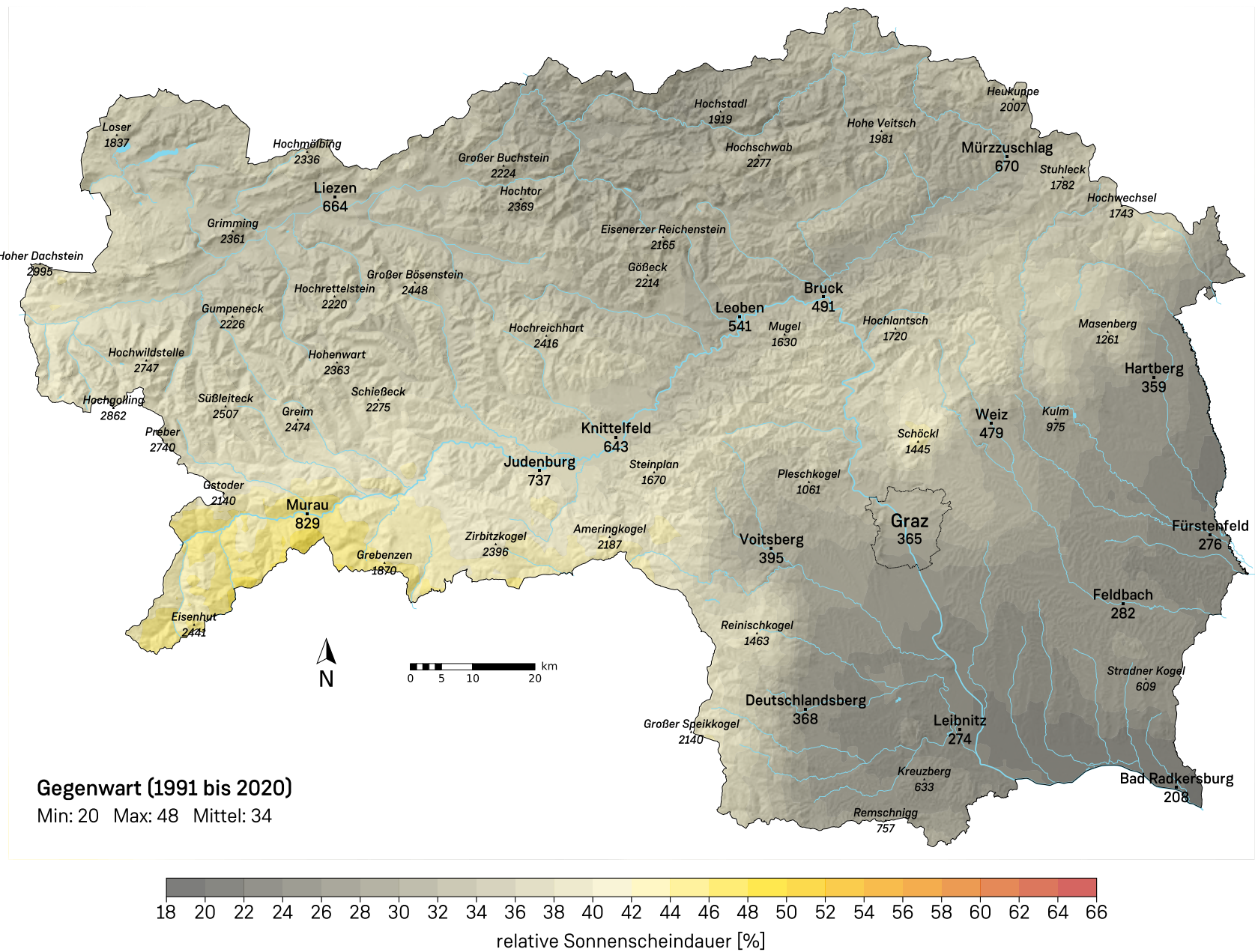


Abbildung 4.15: Mittlere relative Sonnenscheindauer im Dezember für die Periode 1991 - 2020.

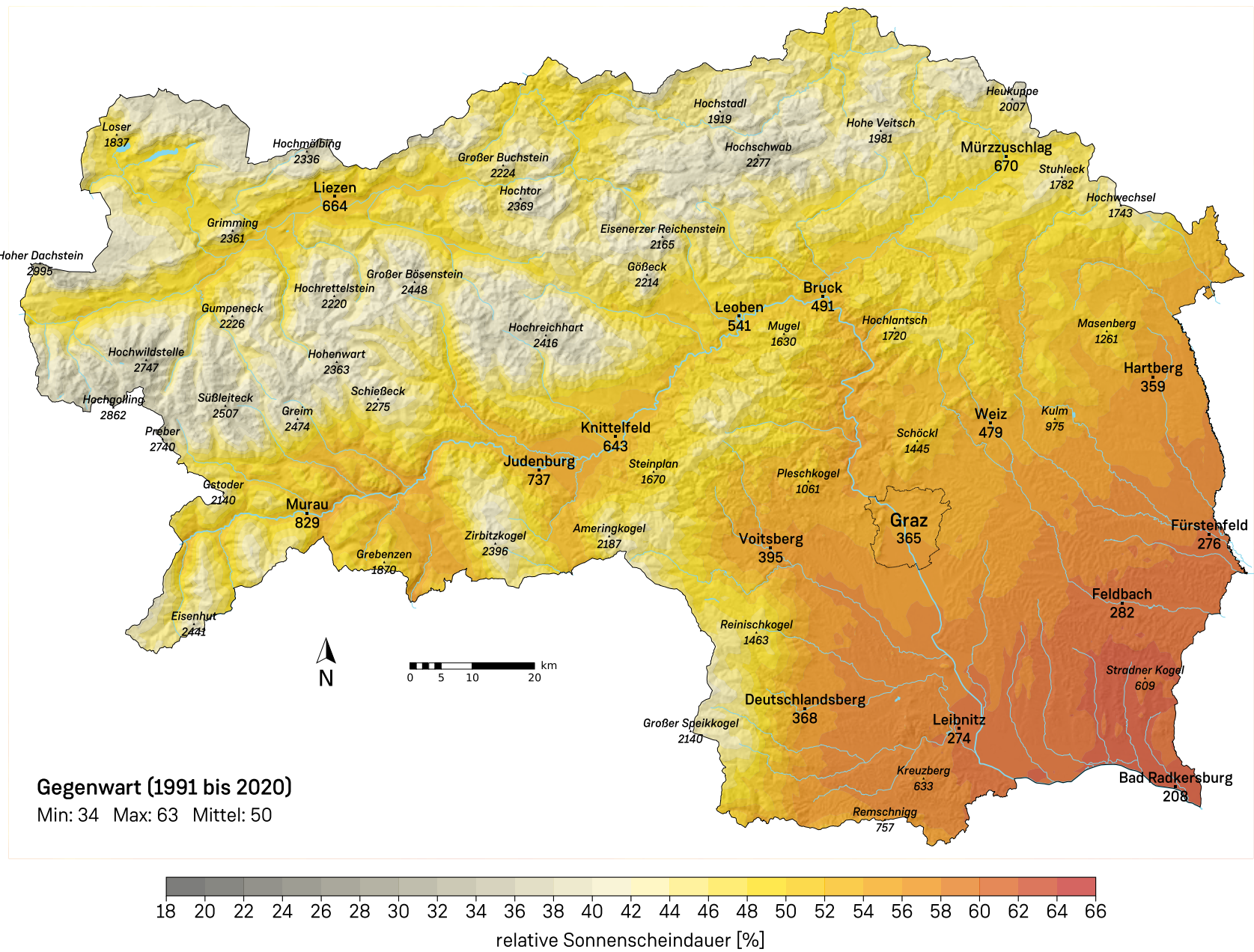


Abbildung 4.16: Mittlere relative Sonnenscheindauer im Juli für die Periode 1991 - 2020.

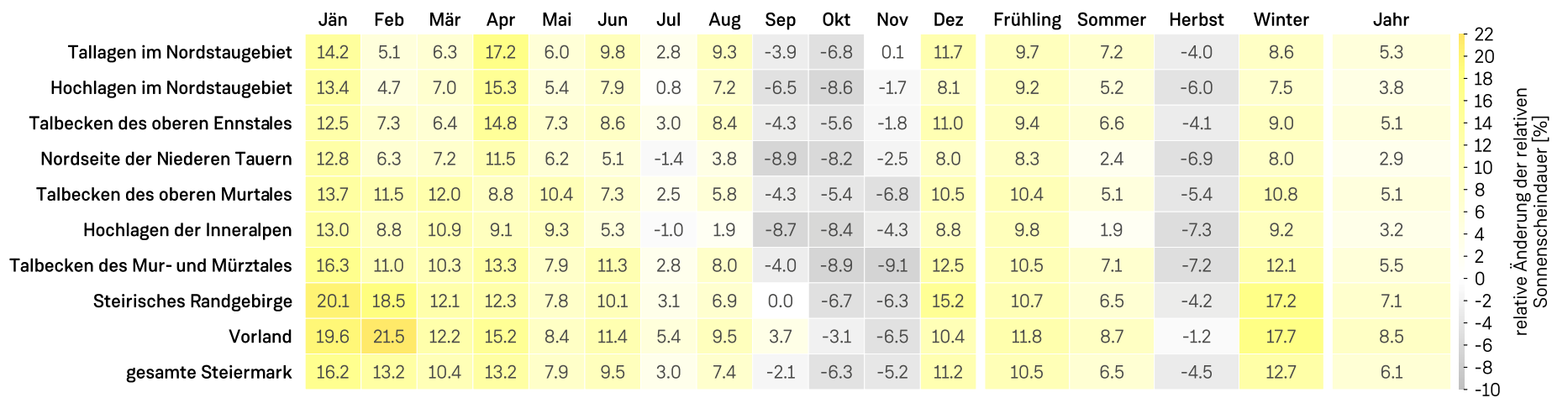


Abbildung 4.17: Relative Änderung des Jahresganges der relativen Sonnenscheindauer im Vergleich der Gegenwart (1991 – 2020) zur Vergangenheit (1961 – 1990) in Prozent.

scheint die Sonne im Dezember rund um die Berge des oberen Murtales und im Bereich des Randgebirges. Abgeschirmt im Lee des Alpenhauptkammes und bei geringerer Nebelneigung kann dort die Sonne im Winter am öftesten bis zum Erdboden durchdringen. Im Sommer hingegen sind die Regionen abseits der Hochgebirgsgruppen vom Sonnenschein begünstigt, wie Abbildung 4.16 für den Monat Juli zeigt. Entlang der höheren Gipfel des Alpenhauptkammes reduziert allerdings die Konvektionsbewölkung die Sonnenscheindauer deutlich. Vergleicht man die relative Sonnenscheindauer der Gegenwart (1991 – 2020) mit der Vergangenheit (1961 – 1990), so hat sie im Jahreschnitt in allen Regionen der Steiermark zugenommen (siehe Abbildung 4.17, letzte Spalte). Betrachtet wird in der Abbildung die

relative Änderung, also immer die prozentuelle Änderung im jeweiligen Monat, der Jahreszeit oder im gesamten Jahr. Bei gleicher absoluter Änderung erscheinen die relativen Werte im Winter somit deutlich höher als im Sommer, weil die Sonnenscheindauer im Winter deutlich geringere absolute Werte besitzt. Die gesamtjährliche relative Änderung der Periode 1991 – 2020 im Vergleich zu 1961 – 1990 beträgt je nach Region 2,9% bis 8,5%, steiermarkweit 6,1%. Die stärkste Zunahme wurde im Vorland verzeichnet, die geringste Zunahme an der Nordseite der Niederen Tauern. Betrachtet man die flächige Verteilung dieser Änderung, zeigt sich in Abbildung 4.18 ein ähnliches, aber doch etwas differenzierteres Bild. In Übereinstimmung mit Abbildung 4.17 finden sich über das ganze Jahr gesehen die stärksten Zunahmen im Vorland und in den angren-

zenden Gebieten des Randgebirges. Auch in einzelnen Talabschnitten des Mur- und Mürztales sowie des Ennstales ist die Zunahme etwas höher. Hingegen blieb in Abbildung 4.18 die Sonnenscheindauer in den Hochlagen entlang des Alpenhauptkammes in etwa gleich. Betrachtet man den Jahresgang der relativen Änderung zwischen den beiden Zeitperioden, fällt in Abbildung 4.17 auf, dass im Herbst die Sonnenscheindauer sogar etwas abnahm, während sie in den übrigen Jahreszeiten zunahm. Die größten monatlichen Zunahmen von bis zu 21,5% fanden in den Winter- und Frühlingsmonaten im Vorland und im Steirischen Randgebirge statt. Die höchsten Abnahmen von bis zu -9,1% wurden in den Herbstmonaten über den Hochlagen der obersteirischen Gebirge und den Talbecken des Mur- und Mürztales verzeichnet.

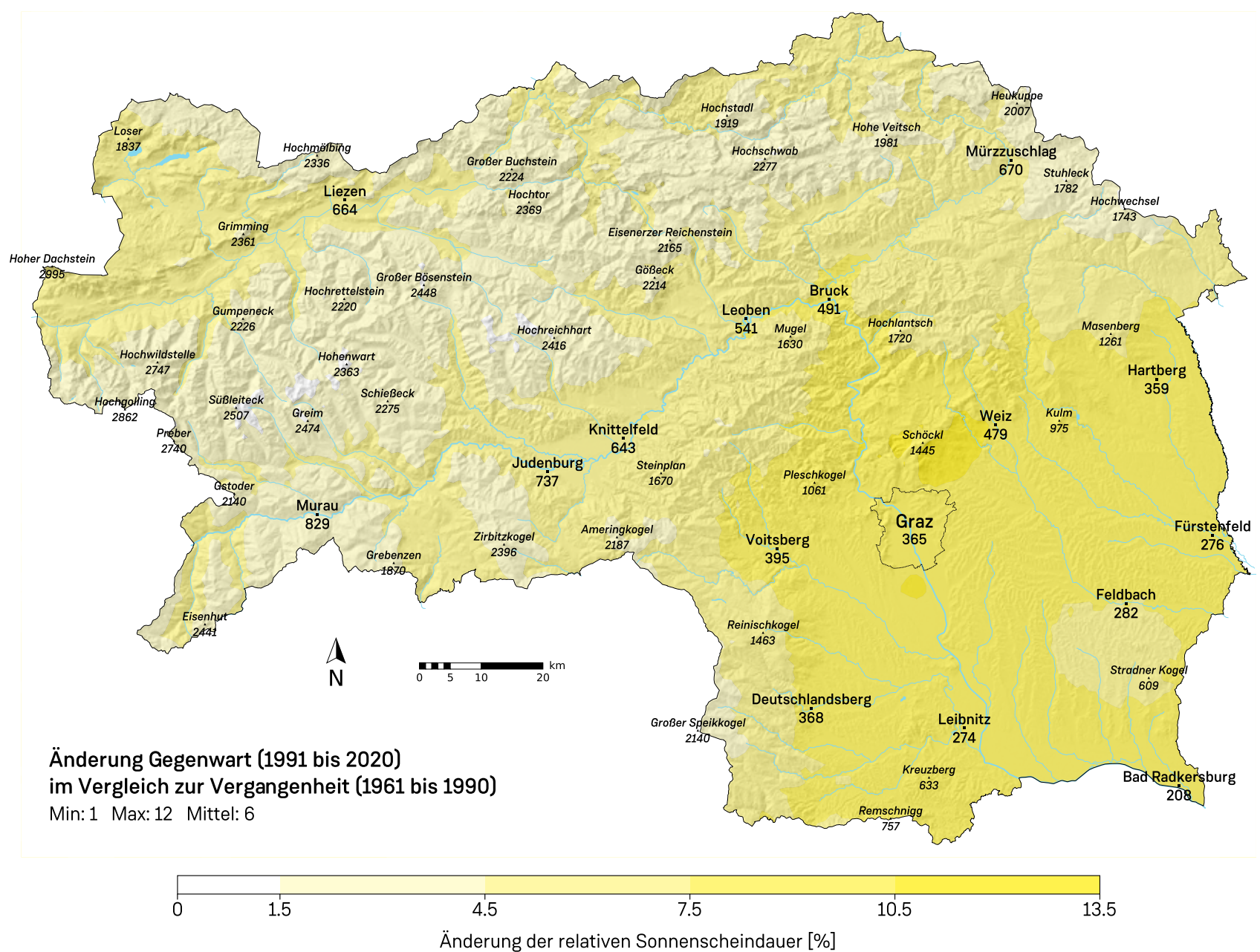


Abbildung 4.18: Relative Änderung der jährlichen relativen Sonnenscheindauer im Vergleich der Gegenwart (1991 – 2020) zur Vergangenheit (1961 – 1990) in Prozent.

Wie bei der Globalstrahlung steht auch der Sonnenscheindauer im Herbst eine Zunahme der Bewölkung gegenüber, während sich in den anderen Jahreszeiten die Bewölkung

eher nur geringfügig ändert (vgl. Kapitel 5 „Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Nebel“). Bei der Temperatur ist im Vergleich zu den anderen Jahreszeiten der Anstieg im Herbst geringer

als in den anderen Jahreszeiten (vgl. Kapitel 3 „Temperatur“).

Literatur

- Ångström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Quart J Royal Meteor Soc 50, 121–126. <https://doi.org/10.1002/qj.49705021008>
- Bätzing, W., 1991. Die Alpen: Entstehung und Gefährdung einer europäischen Kulturlandschaft, Neufassung. ed. C.H. Beck, München.
- Hiebl, J., Bourgeois, Q., Tilg, A.-M., Frei, C., 2024. Daily sunshine grids for Austria since 1961 – combining station and satellite observations for a multi-decadal climate-monitoring dataset. Theor Appl Climatol. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05103-5>
- Mohnl, H., Koch, E., 2006. Comparison between AWS registered Sunshine Duration and the traditional CAMPELL-STOKES.
- Olefs, M., Mair, M., Larsen, J.-A., 2013. Mögliche Reduktion der Anzahl von Sonnenscheindauermessgeräten im TAWES-Netz der ZAMG (Projektbericht REDSOL).
- Olefs, M., Schöner, W., 2012. A new solar radiation model for research and applications in Austria. EGU General Assembly. URL <https://egugeolog.wordpress.com/>
- Schilliger, L., Tetzlaff, A., Bourgeois, Q., Correa, L.F., Wild, M., 2024. An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe using satellite data. <https://doi.org/10.22541/essoar.171136948.88001430/v1>
- Wakonigg, H., 1978. Witterung und Klima in der Steiermark, Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz. Verl. für d. Technische Univ. Graz.
- Wild, M., 2009. Global dimming and brightening: A review. J. Geophys. Res. 114, 2008JD011470. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>