Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Bayerischer Solaratlas

Solare Energiegewinnung

www.stmwi.bayern.de

Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Bayerischer Solaratlas

Solare Energiegewinnung

1. Einleitung 5

2. Grundlagen und Methodik 7

2.1 Definitionen 8
2.2 Datengrundlage 8
2.3 Methodik der Kartenerstellung 8
2.4 Großräumige Abhängigkeiten 9
2.5 Kleinräumige Abhängigkeiten und Einflüsse 9
2.6 Kartographische Darstellung 13

3. Karten 15

3.1 Beschreibung der Karten 16
3.2 Karten der Sonnenscheindauer 16
Karten der Sonnenscheindauer (Jahres und Monatskarten) 17
3.3 Karten der Globalstrahlung 30
Karten der Globalstrahlung (Jahres und Monatskarten) 31

4. Nutzung der Sonnenenergie 45

4.1 Solarthermische Anlagen 47
4.2 Photovoltaik-Anlagen 48

5. Anwendungsbeispiele 49

5.1 Nutzbare Strahlung auf geneigte Flächen 50
5.2 Dimensionierung von thermischen Solaranlagen zur Warmwassererzeugung mit Heizungsunterstützung 53
5.3 Erträge von Photovoltaik-Anlagen 54

6. Rechtliche Rahmenbedingungen für den Bau von Solaranlagen 55

6.1 Bauaufsichtliches Verfahren 56
6.2 Bauplanungsrechtliche Anforderungen 57
6.3 Naturschutzrechtliche Anforderungen 58

7. Verwendete und weiterführende Literatur 59

1. Einleitung

Die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie beträgt das Mehrtausendfache des weltweiten Energieverbrauchs. In Europa variiert das mittlere jährliche Strahlungsangebot zwischen 850 kWh/m² im Norden und 1.750 kWh/m² im Süden. Auf Deutschland wird im langjährigen Mittel eine Energiemenge von etwa 1.000 kWh/m² pro Jahr eingestrahlt. Dies entspricht dem Energiegehalt von rund 100 Litern Heizöl oder 100 Kubikmetern Erdgas. Wie viel Energie letztendlich davon genutzt werden kann, hängt von Faktoren wie etwa dem Anlagenwirkungsgrad, dem Kollektortyp oder der Flächenneigung bzw. -ausrichtung ab.

Sonnenenergie kann für viele Zwecke genutzt werden. So lässt sich Strahlungsenergie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung einsetzen. Eine Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung kann beispielsweise 30 bis 60% der erforderlichen Heizenergie einsparen. Mittels Photovoltaik kann solare Strahlung auch direkt in Strom umgewandelt werden.

Vor der Errichtung solcher Anlagen sollten die mittleren Strahlungsverhältnisse bekannt sein, um die Anlagen in ihrer Größe anpassen und die Kosten abschätzen zu können.

Die Karten der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung sollen helfen, die Eignung eines Standorts für Solaranlagen abzuschätzen. In diesem Atlas sind für jeden Monat Karten der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung enthalten. Zusammen mit den Jahressummenkarten zeigen sie die mittleren Verhältnisse über den Zeitraum 1971 bis 2000. Dabei beziehen sich die in den Karten dargestellten Werte immer auf eine horizontale Fläche. Zusätzliche Tabellen und Abbildungen, die angeben, wie sich die Strahlung einer beliebig geneigten Fläche im Vergleich zur waagrechten Ebene verändert, sind wichtige Ergänzungen, um das nutzbare Sonnenenergiepotenzial eines Standorts berechnen und die Auslegung einer Solaranlage abschätzen zu können.

Die Monats- und Jahreskarten der Sonnenscheindauer und Globalstrahlung wurden einheitlich in einer Auflösung von 200 m gerechnet.

Anhand von Beispielsberechnungen wird die Methodik näher erläutert. Optimal ist eine Ausrichtung der Anlagen nach Süden. Kleinere Abweichungen nach Osten oder Westen mindern den Energieertrag jedoch nicht erheblich.

2. Grundlagen und Methodik

2.1 Definitionen

Die Sonnenscheindauer stellt eine einfach zu messende Größe dar. Das Monatsmittel der Sonnenscheindauer gibt die Zahl der Stunden an, an der die Sonne im Durchschnitt in einem Monat pro Tag scheint.

Demgegenüber ist es weitaus aufwändiger, die Globalstrahlung exakt zu erfassen. Außerhalb der Atmosphäre beträgt die Sonnenstrahlung im Mittel 1.368 W/m². Diese Leistungsdichte variiert im Jahresverlauf um ±3 %. Bei der Passage durch die Erdatmosphäre gehen etwa 30 % der Strahlung durch Reflexion, Streuung und Absorption verloren, sodass noch etwa 70 % der extraterrestrischen Solarstrahlung auf die Erdoberfläche treffen. Dieser mit Globalstrahlung bezeichnete Anteil lässt sich in eine direkte und eine diffuse Strahlung unterteilen. Während die direkte Strahlung nur von der Sonne abgegeben wird, kommt die diffuse Strahlung aus der gesamten Himmelshalbkugel mit Ausnahme der Sonnenscheibe und wirft keinen Schatten.

2.2 Datengrundlage

Die Grundlage der in diesem Atlas dargestellten Monats- und Jahressummenkarten bilden Messwerte der Globalstrahlung, der Sonnenscheindauer und der Bewölkung. Die Werte entstammen dem Strahlungs- und Klimamessnetz des Deutschen Wetterdienstes aus dem Zeitraum von 1971 bis 2000. Für die Auswertung wurden nur die Standorte verwendet, bei denen für mehr als 20 Jahre Werte vorlagen, da nur diese repräsentative klimatische Mittelwerte gewährleisten. Für die Karten der Sonnenscheindauer ergaben sich bis zu 45 Stationen, die diese Bedingung erfüllten. Zur Berechnung der flächenhaften Verteilung der Sonnenscheindauer konnten zudem bis zu 40 Stationen, an denen die Bewölkung beobachtet wurde, verwendet werden. Desweiteren wurden für die Erstellung der Globalstrahlungskarten zusätzlich sieben bayerische Standorte, an denen die Globalstrahlung direkt gemessen wird, herangezogen.

2.3 Methodik der Kartenerstellung

Die Übertragung der monatlichen Stationswerte der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung in die Fläche erfolgte mittels einer multiplen Regressionsanalyse mit anschließender Interpolation des nicht durch die Regression erklärten Restes (Residuum). Bei der multiplen Regressionsanalyse wurde dabei die Abhängigkeit der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung von ausgewählten Geofaktoren zum Ansatz gebracht.

Für die Größen Sonnenscheindauer und Globalstrahlung wurden neben den Standardgeofaktoren Höhe über NN sowie Geographische Länge und Breite zusätzlich Indizes wie die Reliefform oder der klein- und großräumigen Kaltlufteinfluss einbezogen. Die einzelnen Geofaktoren wurden anhand von statistischen Tests auf ihre Signifikanz und den funktionalen Zusammenhang geprüft.

Die flächenhafte Interpolation der Residuen, die sich aus der Differenz der berechneten Stationswerte und der Werte der Regressionsgleichung ergaben, erfolgte mit komplexen geostatistischen Verfahren. Die Monats- und Jahreskarten der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung errechneten sich abschließend aus der Addition von Regressionswert und Residuum. Folglich stimmen die Messwerte der Klimastationen exakt mit den berechneten Werten überein.

Die statistischen Kennwerte der den Karten zu Grunde gelegten Modelle zeigen, dass die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung realistisch für die einzelnen Standorte abgebildet werden. Dennoch darf man nicht übersehen, dass die Übertragung der Werte in die Fläche wie jede Form der Interpolation eine gewisse Unschärfe

in sich birgt. Auch wenn die Auflösung der Karten hoch ist, beschreiben alle verwendeten Geofaktoren lediglich makroklimatische Einflüsse. Dies bedeutet, dass jeder einzelne Rasterpunkt zwar exakt beschrieben werden kann, wodurch die großklimatischen Einflüsse im Vergleich zu niedriger aufgelösten Karten erheblich besser dargestellt werden können, jedoch sind damit kleinräumige Einflüsse wie etwa Geländeneigung oder Horizontüberhöhung nicht berücksichtigt. Der Wert eines Pixels entspricht immer dem Wert, der anhand der eingegangenen Geofaktoren berechnet worden ist und zeigt somit seine Abhängigkeit von Höhe, Länge, Breite und den verwendeten Indizes.

2.4 Großräumige Abhängigkeiten

Sowohl die Sonnenscheindauer als auch die Globalstrahlung hängen vor allem von der Höhe über NN, der geographischen Breite, der Reliefform und dem kleinräumigen Kaltluftindex ab. Aber auch die Landnutzung und die Luv- bzw. Lee-Lage eines Standorts beeinflussen Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in einzelnen Monaten signifikant. Durch die Geofaktoren lässt sich ein Großteil dieser regionalen Unterschiede erklären. Die Einflüsse der Höhe über NN oder der Luv-/Lee-Indizes auf die Sonnenscheindauer bzw. die Globalstrahlung lassen sich durch Wolkenbildungen aufgrund von Aufwinden an der Luvseite von Bergketten bzw. durch Wolkenauflösungen an der Leeseite erklären. Häufige Nebelbildung im Flachland und in Tälern kann durch die Geofaktoren klein- bzw. großräumiger Kaltluftindex beschrieben werden. Die unterschiedliche Erwärmung von Oberflächen, die zu einer mehr oder weniger starken Konvektion führt und so die Bewölkung und die Sonnenscheindauer verändert, spiegelt sich in der Abhängigkeit von den einzelnen Geofaktoren wie den Landnutzungsindizes wieder. Aufgrund solcher statistisch abgesicherter und erklärbarer Zusammenhänge lassen sich regional hoch aufgelöste Monatskarten der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung erstellen.

2.5 Kleinräumige Abhängigkeiten und Einflüsse

In den dargestellten Karten der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung wurden aufgrund des Maßstabs großräumige Einflüsse wie etwa die geographische Breite oder die Höhe über NN berücksichtigt. Kleinräumige Abhängigkeiten wie etwa die Neigung einer Fläche oder die Abschattung konnten jedoch nicht beachtet werden. Die Sonnenscheindauer und damit auch die Globalstrahlung werden aber auch von diesen Effekten geprägt. So können der Neigungswinkel und die Ausrichtung einer Fläche sowie die Horizontüberhöhung die Anzahl der Sonnenscheinstunden bzw. die Strahlung eines Standorts deutlich verändern.

Die in den Karten dargestellten Werte beziehen sich immer auf eine horizontale Fläche. Durch den jahreszeitlichen Wechsel des Einfallswinkels der Sonne und der Veränderung von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang im Jahresverlauf wird die Strahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene zum Teil erheblich verändert. Die Abbildungen 1 bis 4 zeigen diese Änderungen. Dargestellt sind die Abweichungen der Globalstrahlung in Abhängigkeit der Hangausrichtung und der Hangneigung in Bezug auf die Strahlung auf eine waagrechte Ebene.

Abb. 1: **Faktor ς zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene für den Frühling (März–Mai)**

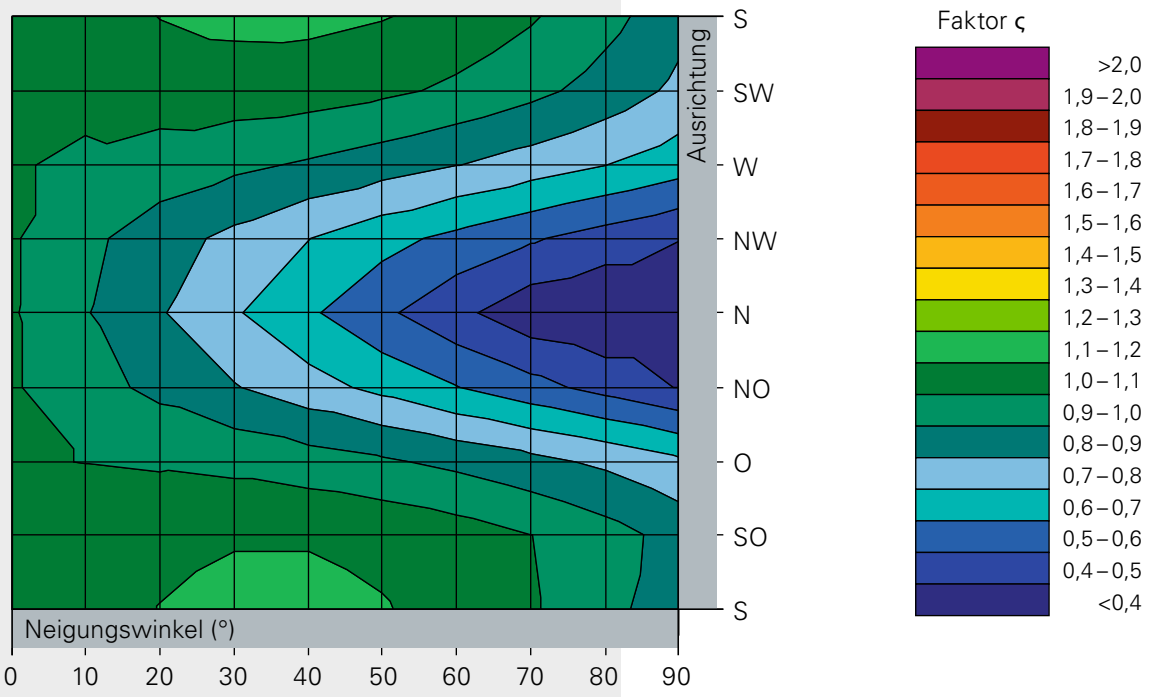


Abb. 2: **Faktor ς zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene für den Sommer (Juni–August))**

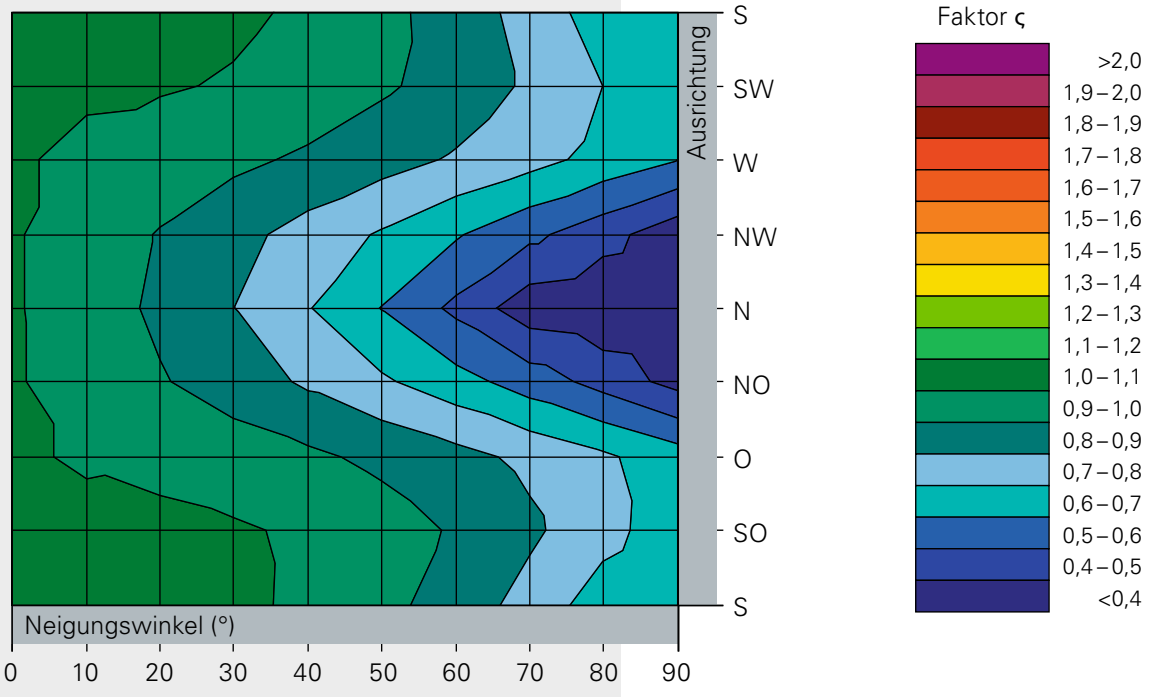


Abb. 3: **Faktor ς zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene für den Herbst (September–November)**

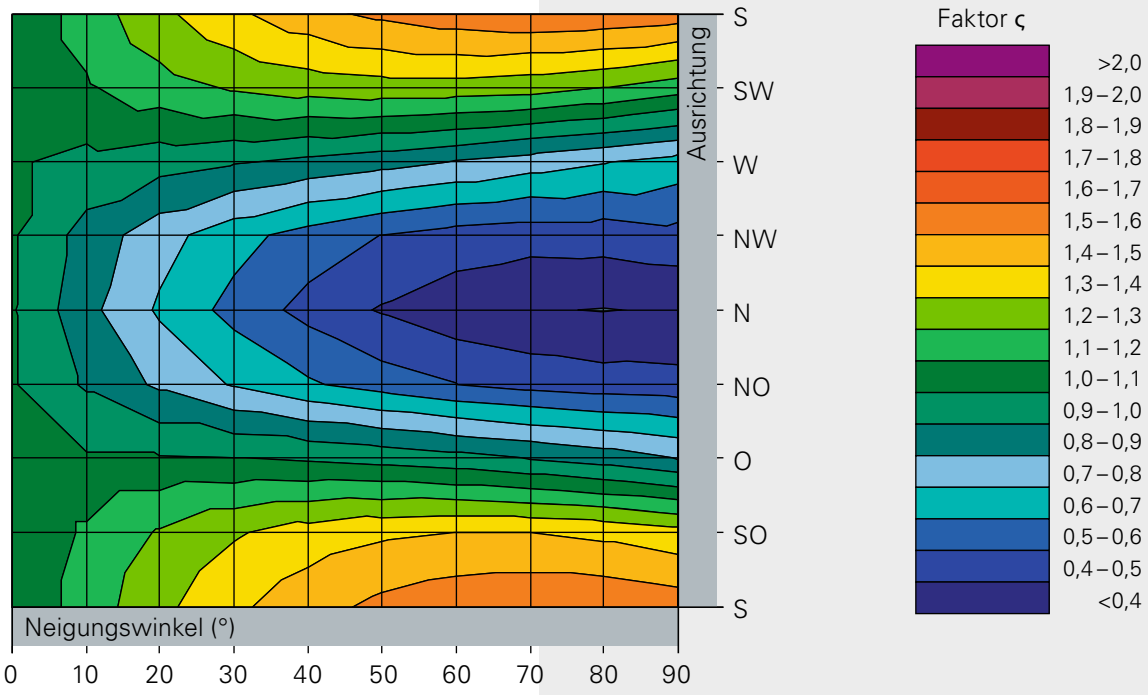
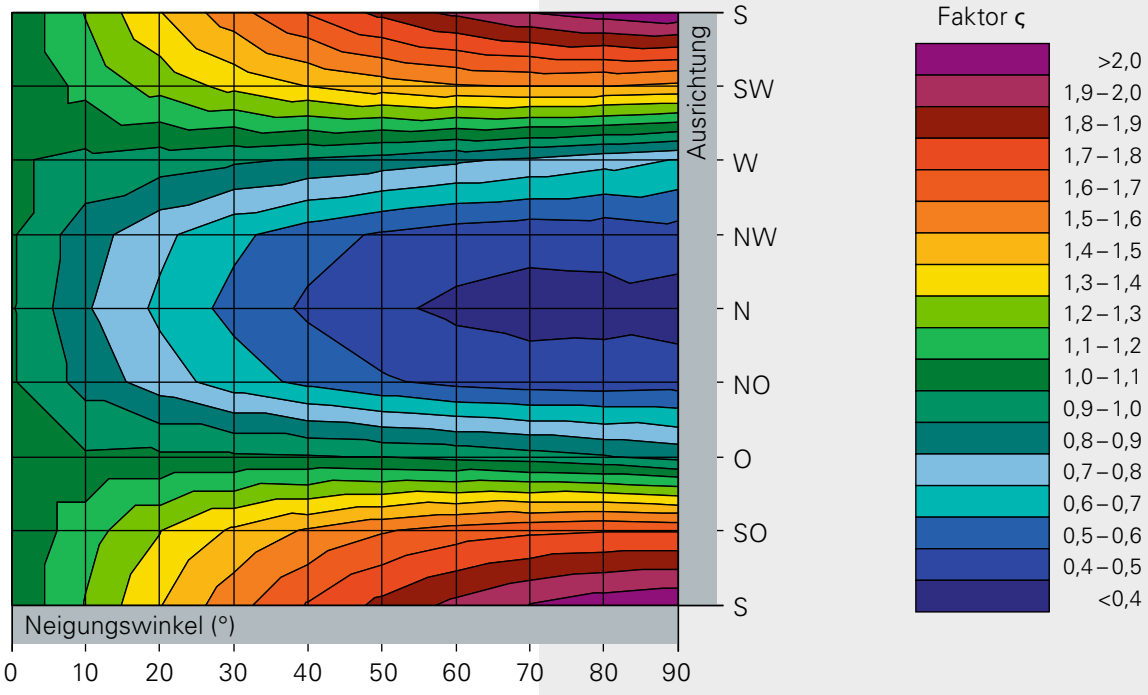


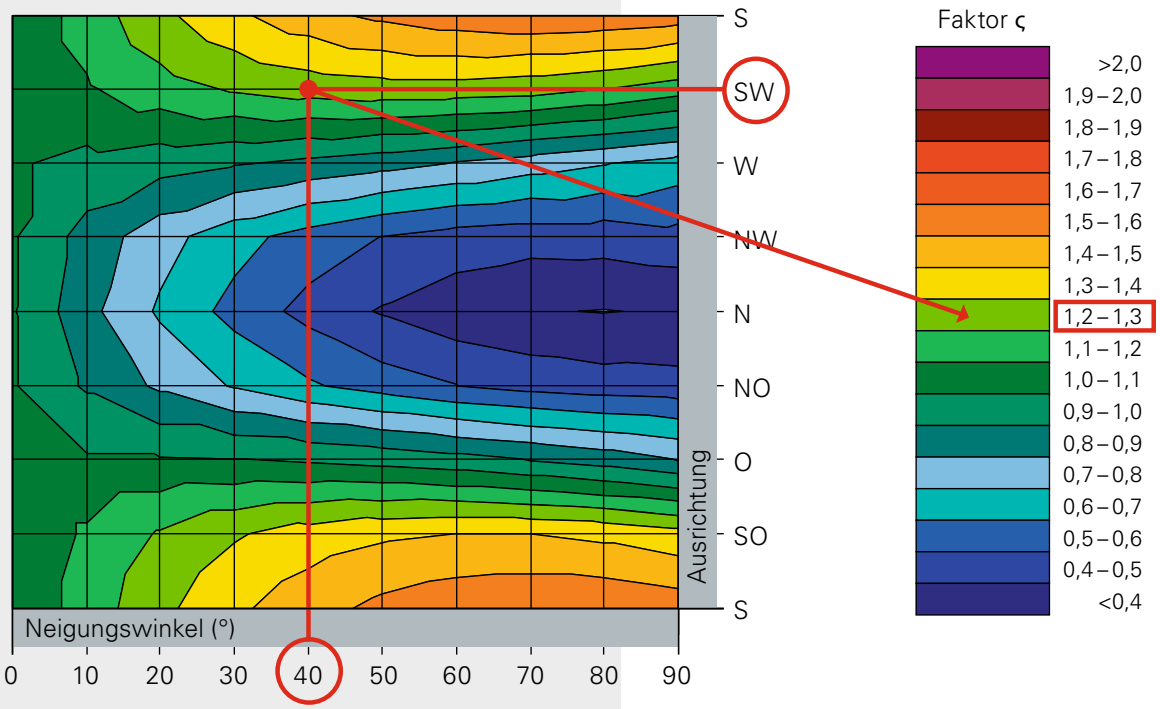
Abb. 4: **Faktor ς zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene für den Winter (Dezember–Februar)**



Eine südwestausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 40° erhält in den Herbstmonaten September bis November das 1,2–1,3fache an Strahlung (Abbildung 5, Farbklasse: gelbgrün) im Vergleich zur Ebene.

Demgegenüber fällt auf eine nordwestausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 30° in der gleichen Jahreszeit lediglich das 0,6–0,7fache an Strahlung (Abbildung 5, Farbklasse: mittelblau).

Abb. 5: **Beispiel für die Bestimmung des Faktors ς der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche im Vergleich zur Ebene**



Ein weiterer Faktor, der die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung beeinflusst, ist die Horizontüberhöhung. Sie gibt an, welcher Anteil des Horizonts durch Bauwerke oder Bäume, aber auch durch Berge und andere Erhebungen verdeckt ist. Da die Horizontüberhöhung eines Standorts sehr spezifisch und vielfältig ist, können hierzu keine allgemeingültigen Angaben gemacht werden.

Die in diesem Atlas gezeigten Werte der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung beziehen sich deswegen immer auf einen Horizont, der nach allen Seiten frei ist. Für die exakte Berechnung der Sonnenscheindauer und der Strahlung eines Standorts muss daher immer eine genaue Beschreibung der Geländeformen mit einbezogen werden.

2.6 Kartographische Darstellung

Die Monats- und Jahreskarten der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung wurden einheitlich in einer Auflösung von 200 m gerechnet. Die Originaldatenätze enthalten für jede Rasterzelle kontinuierliche, mittlere Monatswerte der täglichen Sonnenscheindauer in Stunden und der Globalstrahlung in kWh/m² bzw. die jeweiligen Jahressummen. Für eine bessere Lesbarkeit der Karten ist es notwendig, diskrete Werteklassen zu definieren. Der Übergang von einer Klasse in eine andere sollte aber nicht als exakte Wertegrenze, sondern als Mittelpunkt eines Bereiches, in dem sich der allmähliche Übergang zwischen den Klassen vollzieht, interpretiert werden.

3. Karten

3.1 Beschreibung der Karten

Die Karten zeigen für jeden Monat die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung als mittleren Tageswert der Klimaperiode 1971 bis 2000. Die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung für das gesamte Jahr sind als Summen aller Tageswerte angegeben. Die Globalstrahlung gibt die Strahlungssumme auf eine horizontale Fläche wieder.

Die Werte der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung können anhand einer klassifizierten Farbskala abgelesen werden.

3.2 Karten der Sonnenscheindauer

Die Karten der Sonnenscheindauer geben für jeden Monat die Anzahl der Sonnenscheinstunden an, die ein Standort an einem Tag im Mittel eines Monats empfangen hat.

In den Monaten Januar und Februar erhalten die Hochlagen in den Gebirgen die höchsten Werte. Insgesamt weist das Alpenvorland und hier vor allem das Allgäu ein Sonnenscheinangebot von bis zu drei Stunden im Januar bzw. bis zu vier Stunden im Februar auf. Nach Norden hin nimmt dieser Wert schrittweise ab, sodass die Sonnenscheindauer im Nordwesten Bayerns zum Teil geringer als eine Stunde im Januar und geringer als zwei Stunden im Februar ausfällt.

Im Laufe der Monate März bis Juni erhöht sich die Sonnenscheindauer von maximal 4,5 Stunden im März, die im Südosten Bayerns erreicht werden, auf bis zu sechs Stunden, die im Mai in weiten Teilen Bayerns zu beobachten sind.

In den Sommermonaten Juni, Juli und August steigt die Sonnenscheindauer auf bis zu acht Stunden, wobei der Süden Bayerns deutlich höhere Werte als der Norden zeigt. Höher gelegene Regionen wie etwa die Rhön oder der Bayerische Wald weisen Werte unter sechs Stunden auf. Eine noch geringere Sonnenscheindauer mit Werten unter fünf Stunden ist in den Tallagen der Alpen zu finden.

Zum Herbst hin verringert sich die Sonnenscheindauer auf 4,5 bis 6 Stunden im September, was vor allem in der Südhälfte Bayerns gut zu erkennen ist. Im Oktober sind nahezu bayernweit Sonnenscheindauern von drei bis vier Stunden sichtbar. Einige Regionen wie etwa der Nordwesten Bayerns zeigen sogar Werte von weniger als drei Stunden Sonnenscheindauer pro Tag. In den Herbstmonaten bewirken häufige Inversionslagen, dass auf den Hochlagen der Berge die Sonnenscheindauer deutlich höher als in den Tallagen ausfällt. So werden im Oktober in den Hochlagen der Alpen und des Bayerischen Waldes Sonnenscheindauern von bis zu fünf Stunden erreicht.

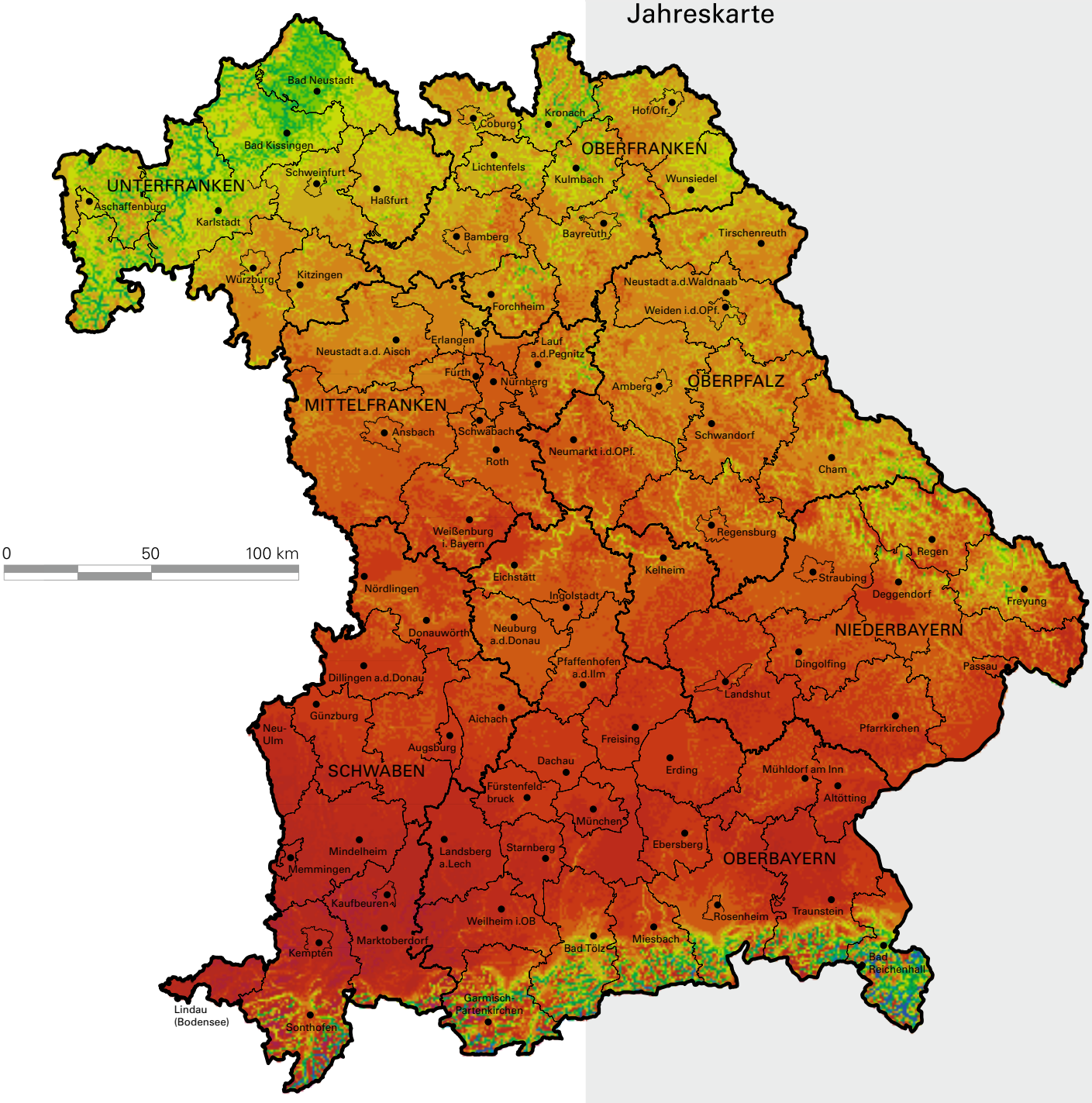
Der Süden Bayerns bleibt auch im November und Dezember die Region mit den höchsten mittleren Tageswerten der Sonnenscheindauer von über zwei Stunden im November und über 1,5 Stunden im Dezember. Im Norden Bayerns muss in diesen Monaten im Durchschnitt mit weniger als zwei Stunden Sonnenscheindauer im November und weniger als 1,5 Stunden im Dezember gerechnet werden.

Aufsummiert über das gesamte Jahr ergeben sich im langjährigen Mittel für Bayern Sonnenscheindauern von 1.400 bis 1.700 Stunden pro Jahr. Im Nordwesten Bayerns, in der Rhön aber auch in den Tallagen der Alpen werden die geringsten Summen mit weniger als 1.300 Stunden erreicht. Die höchsten Werte bis zu 1.800 Stunden wurden für den Südwesten Bayerns ermittelt.

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere jährliche Werte in Stunden

Jahreskarte



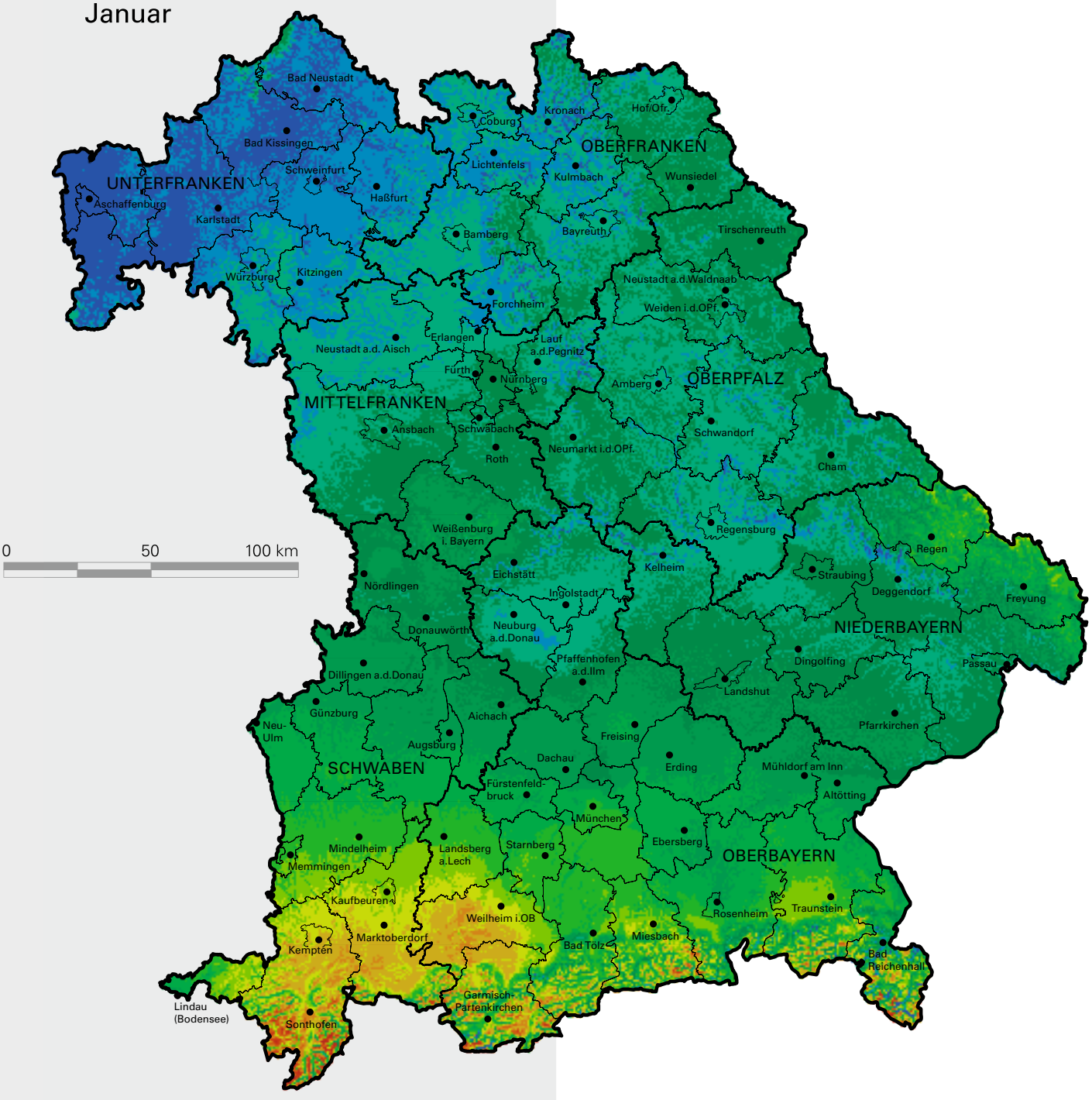
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Januar



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

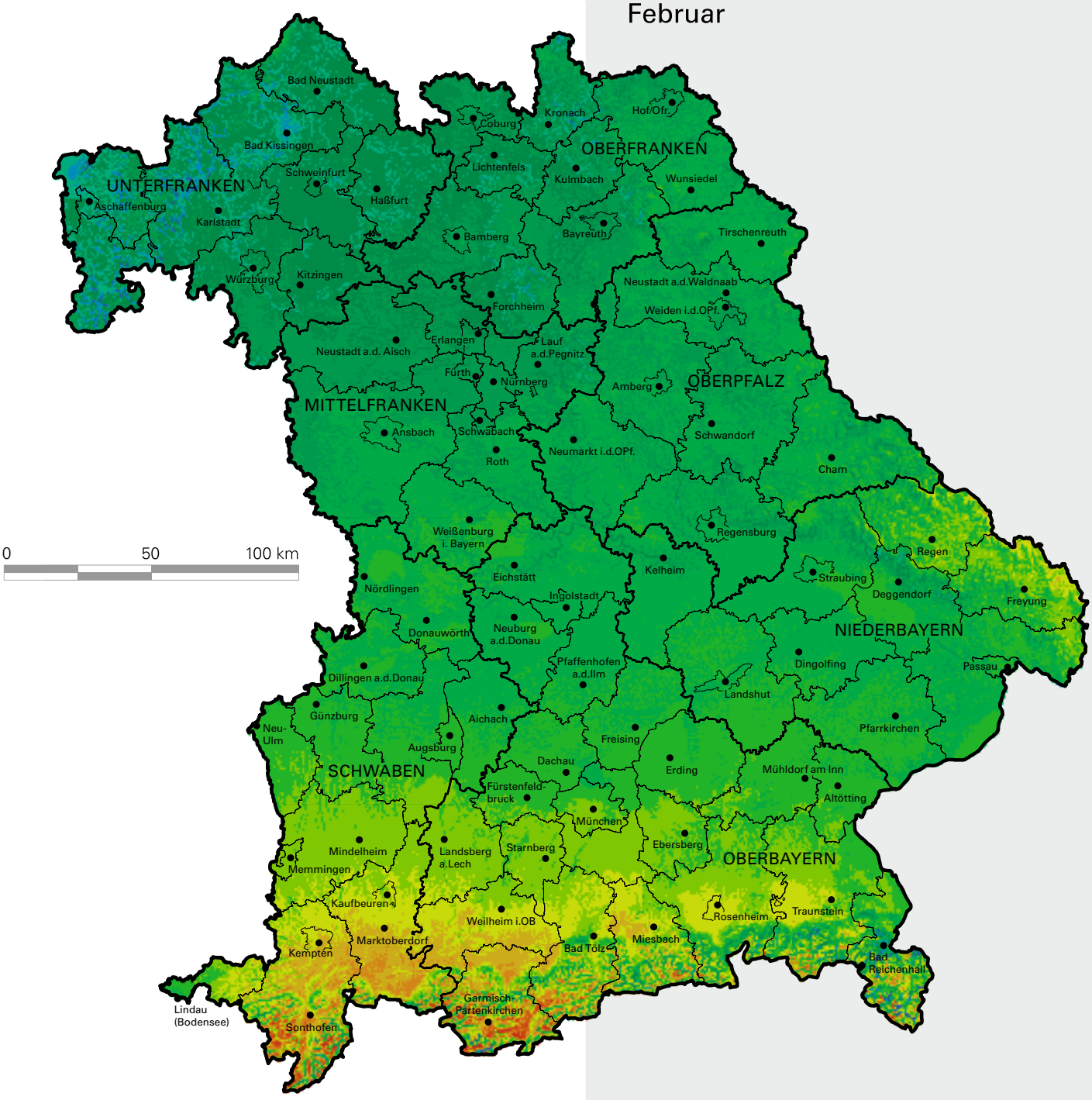
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Februar



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

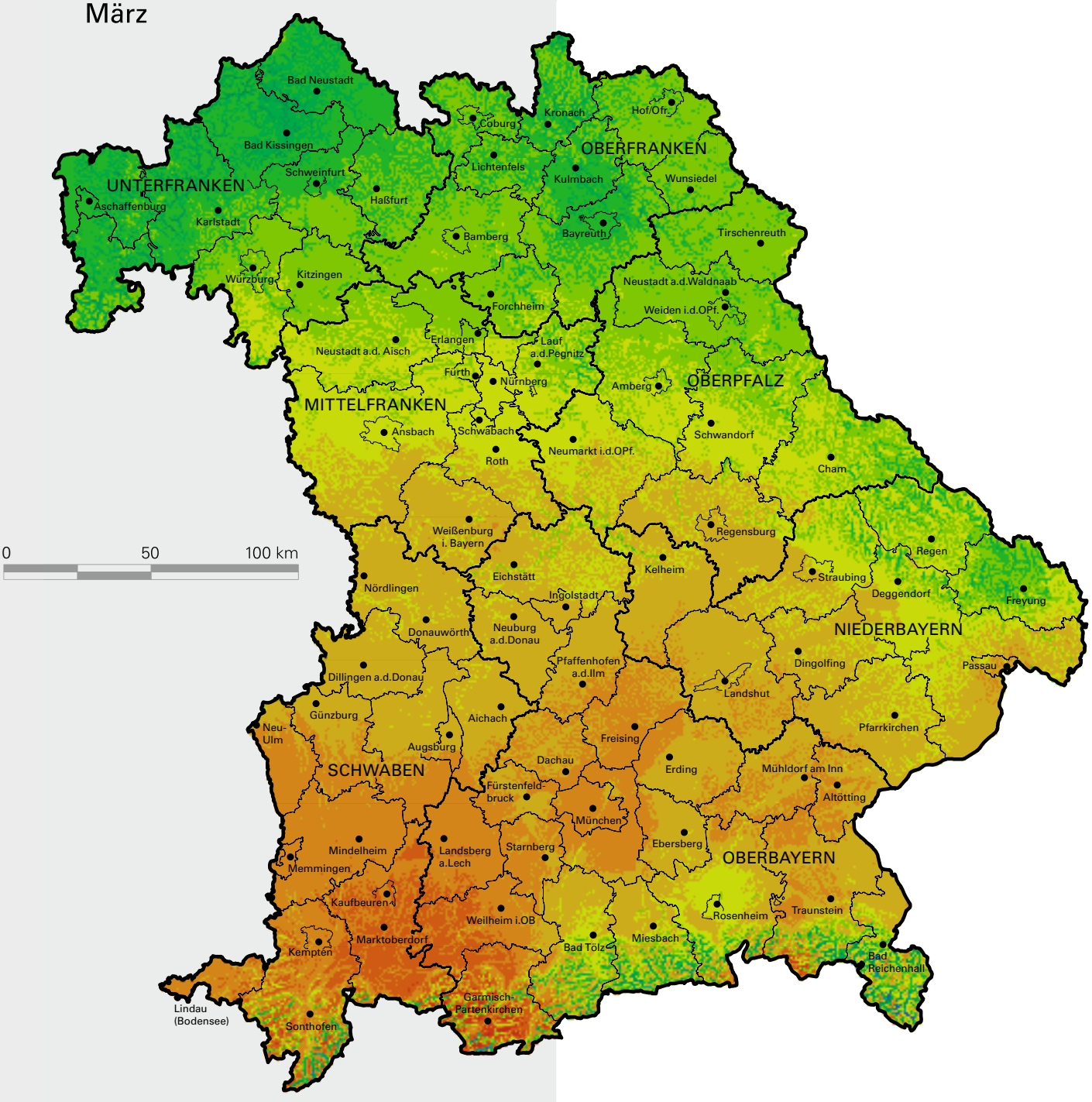
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

März



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

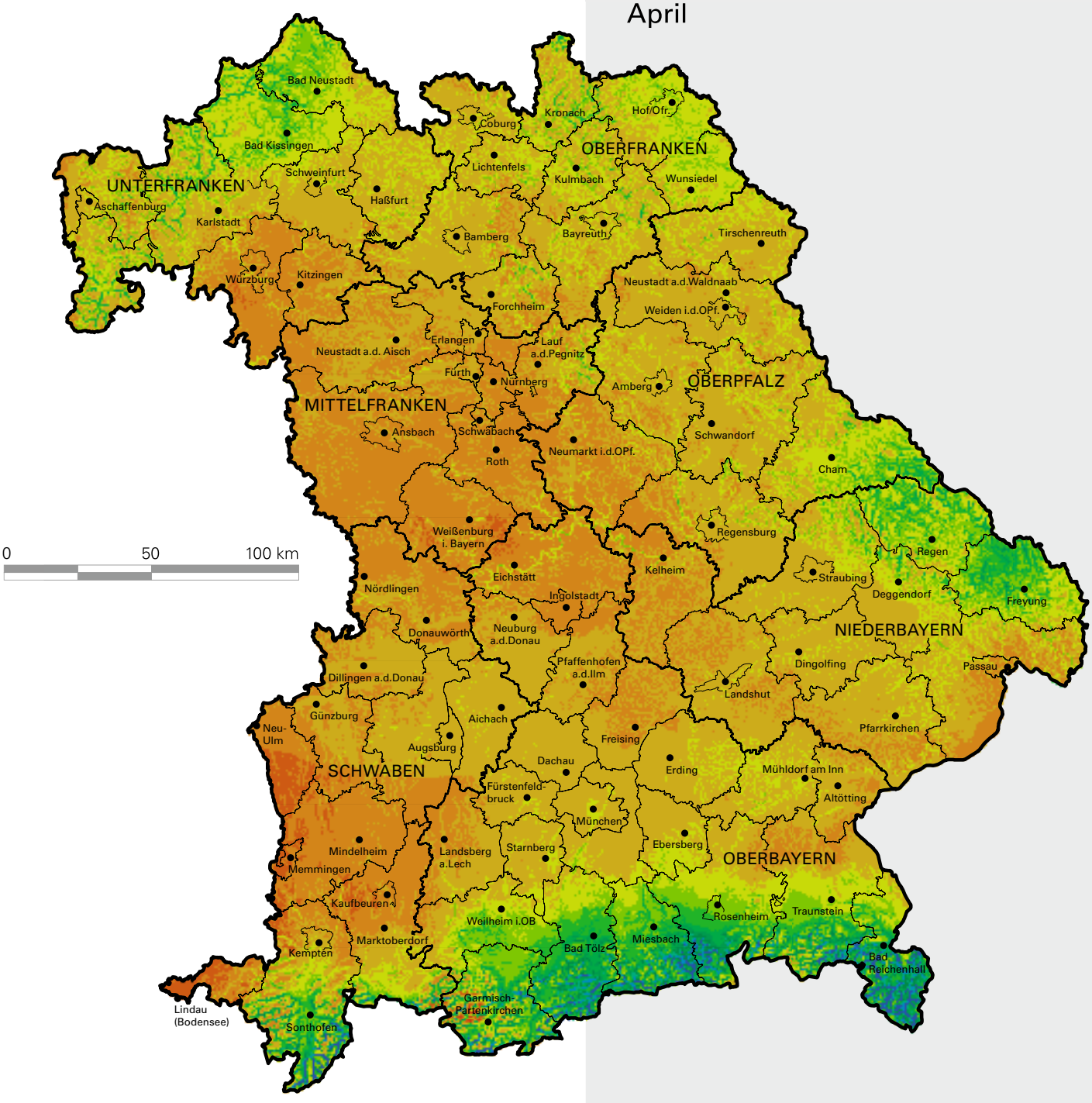
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

April



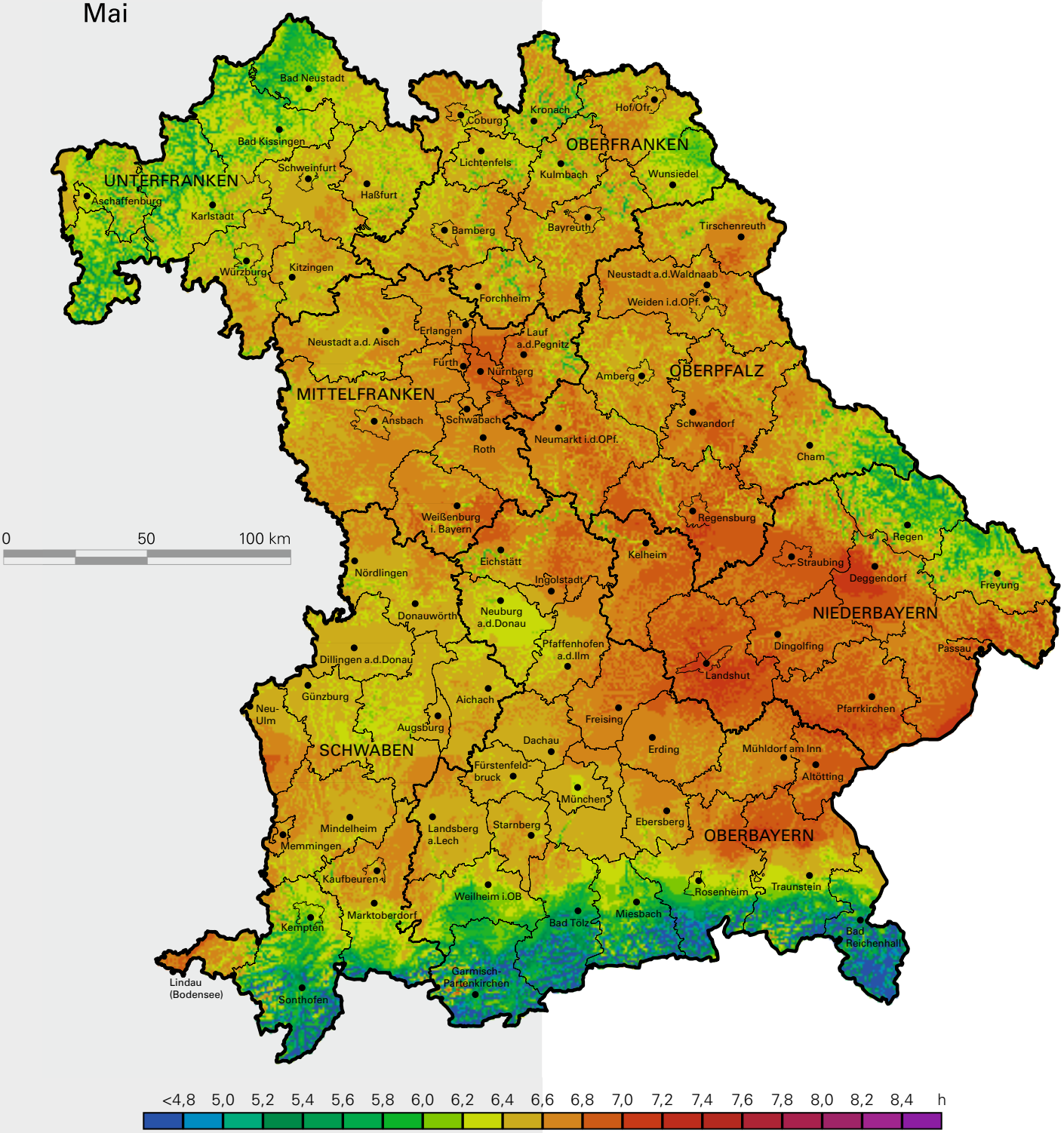
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Mai



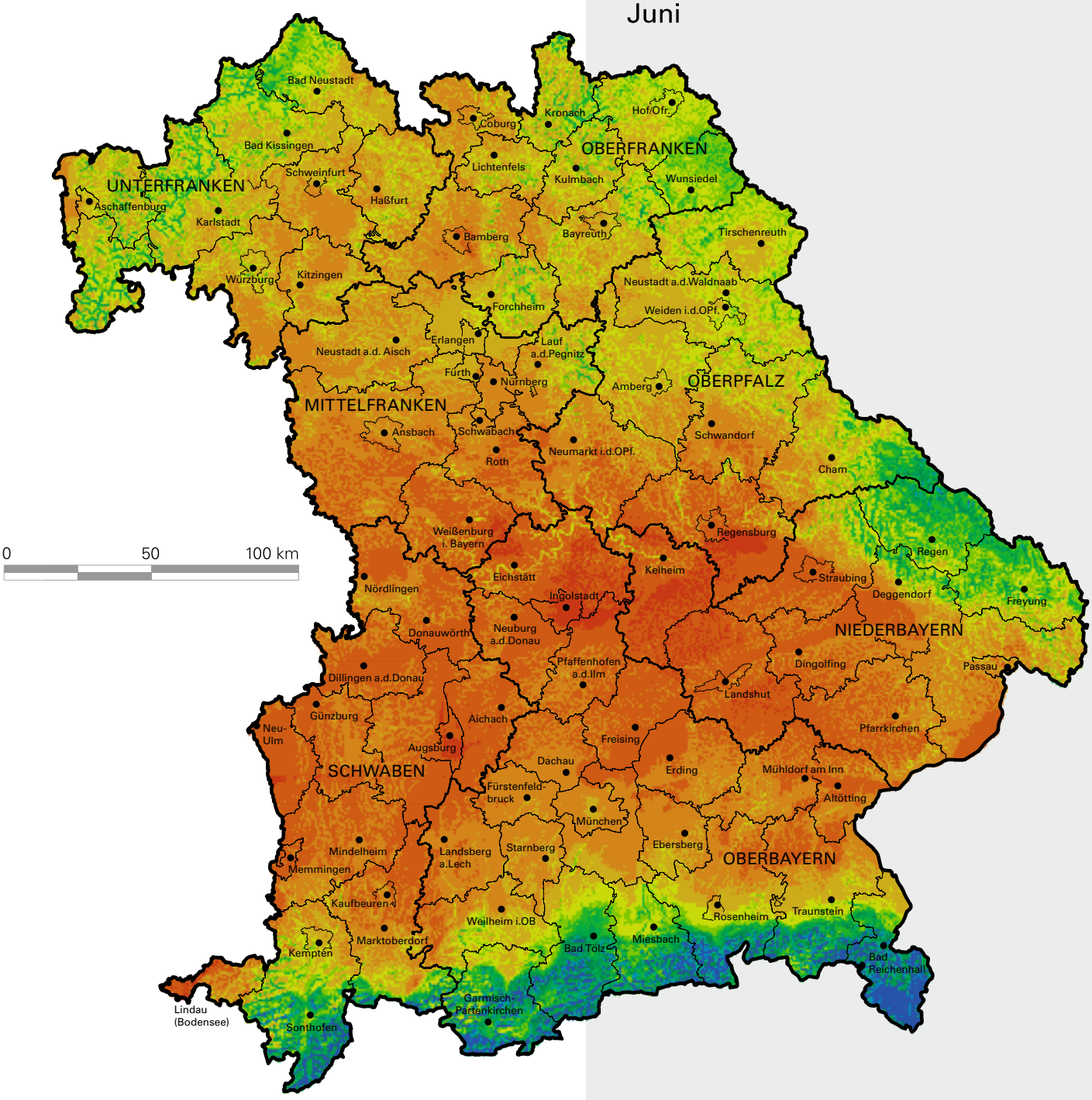
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Juni



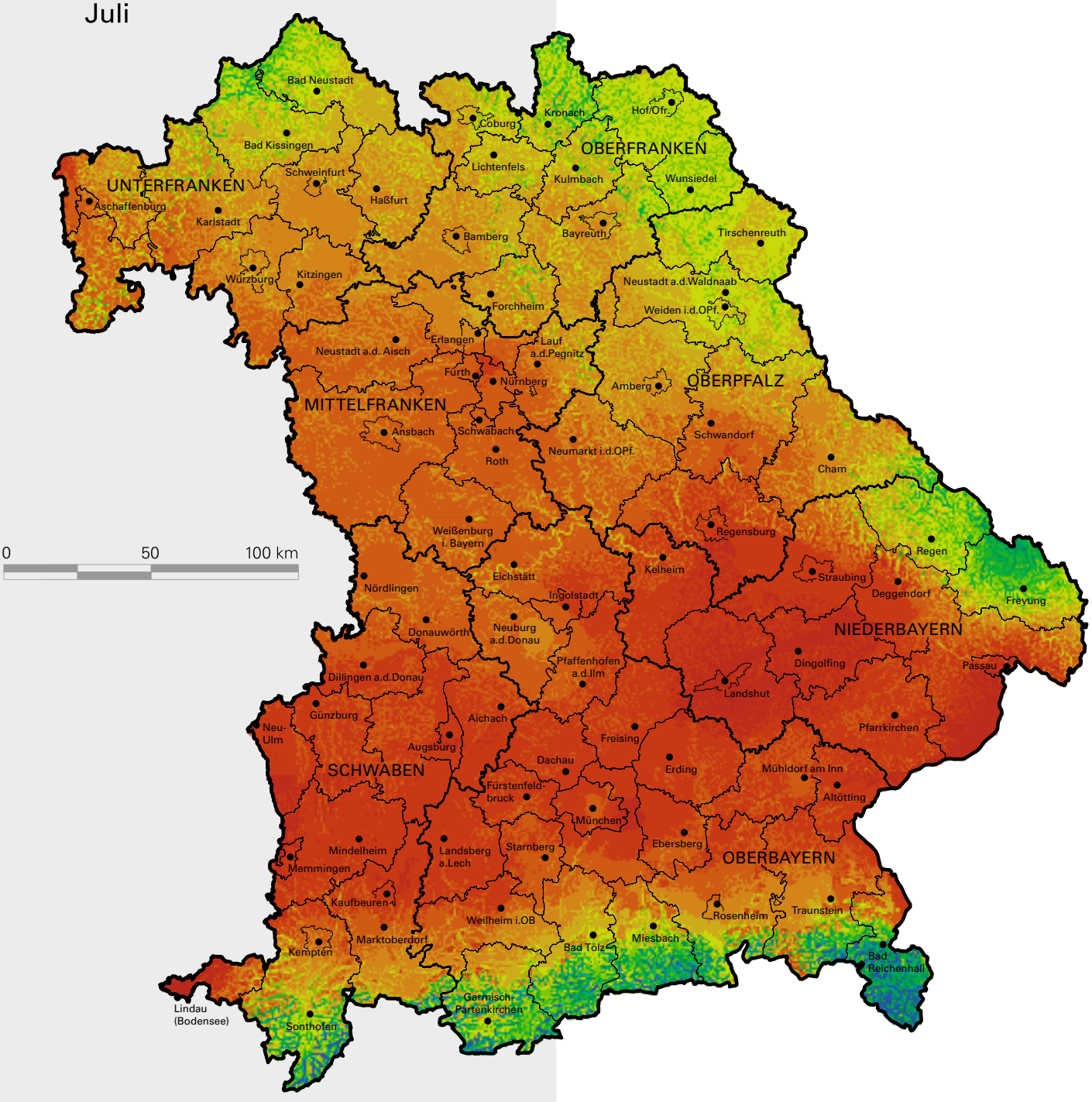
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Juli



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

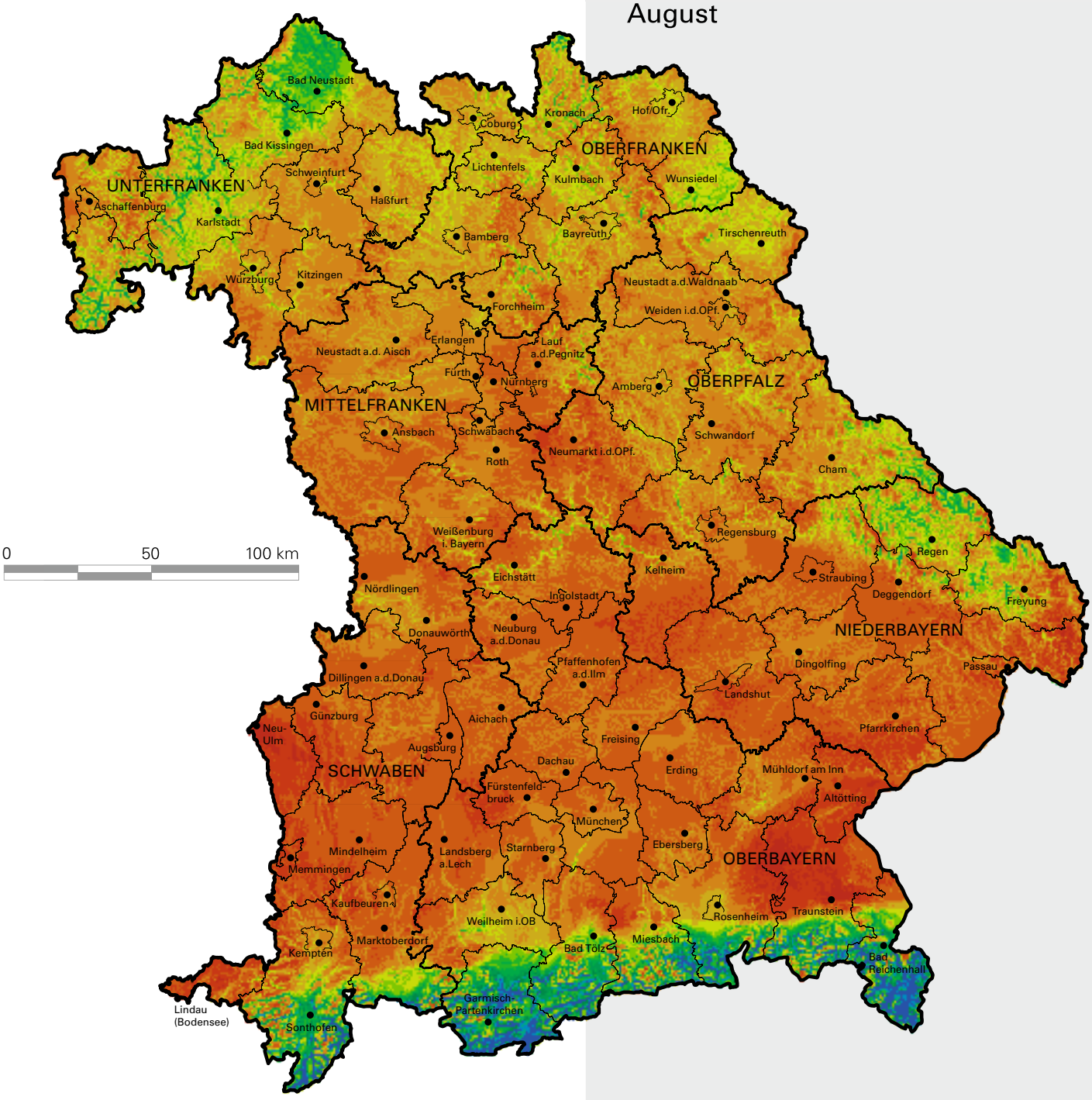
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

August



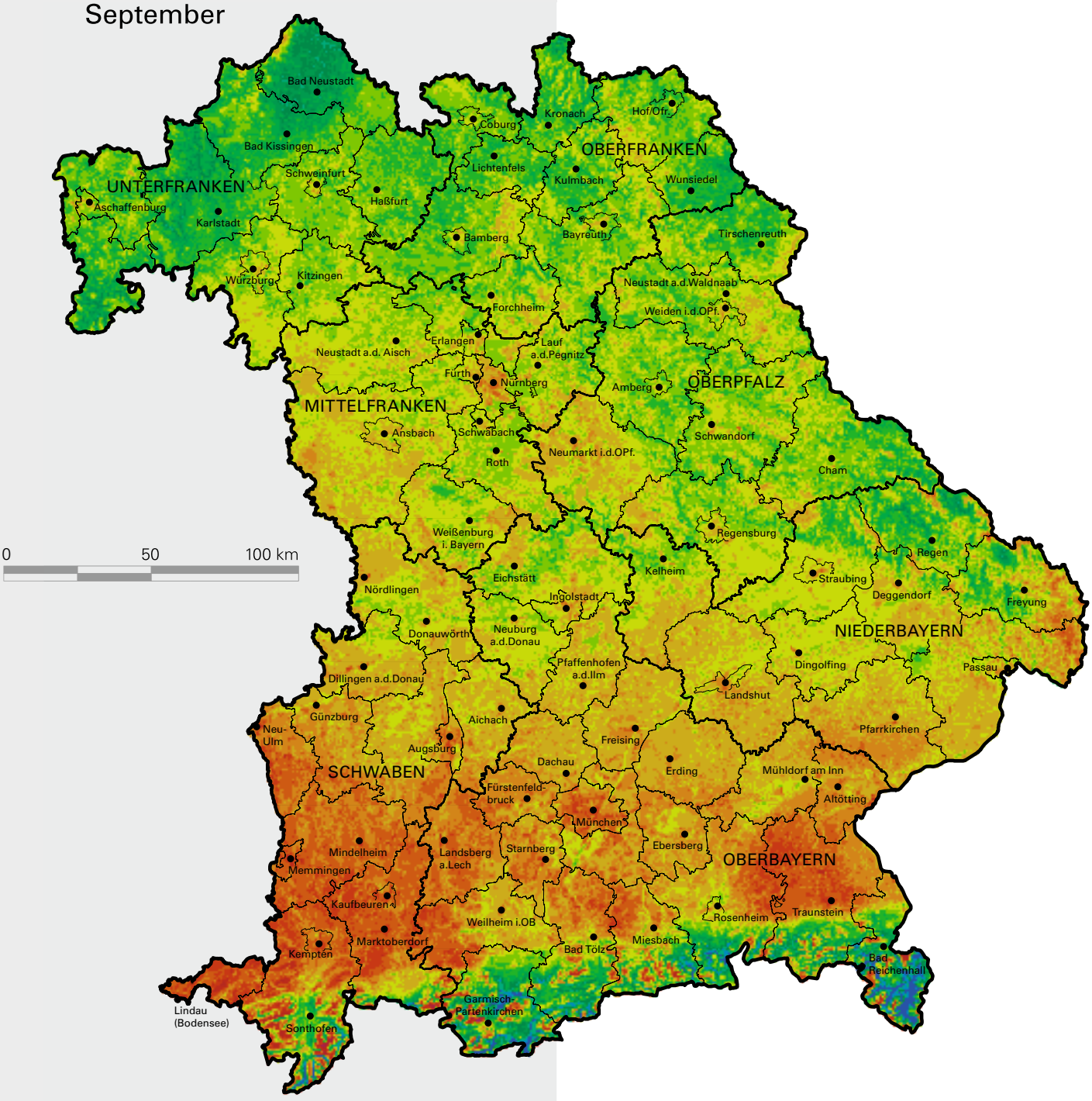
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

September



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

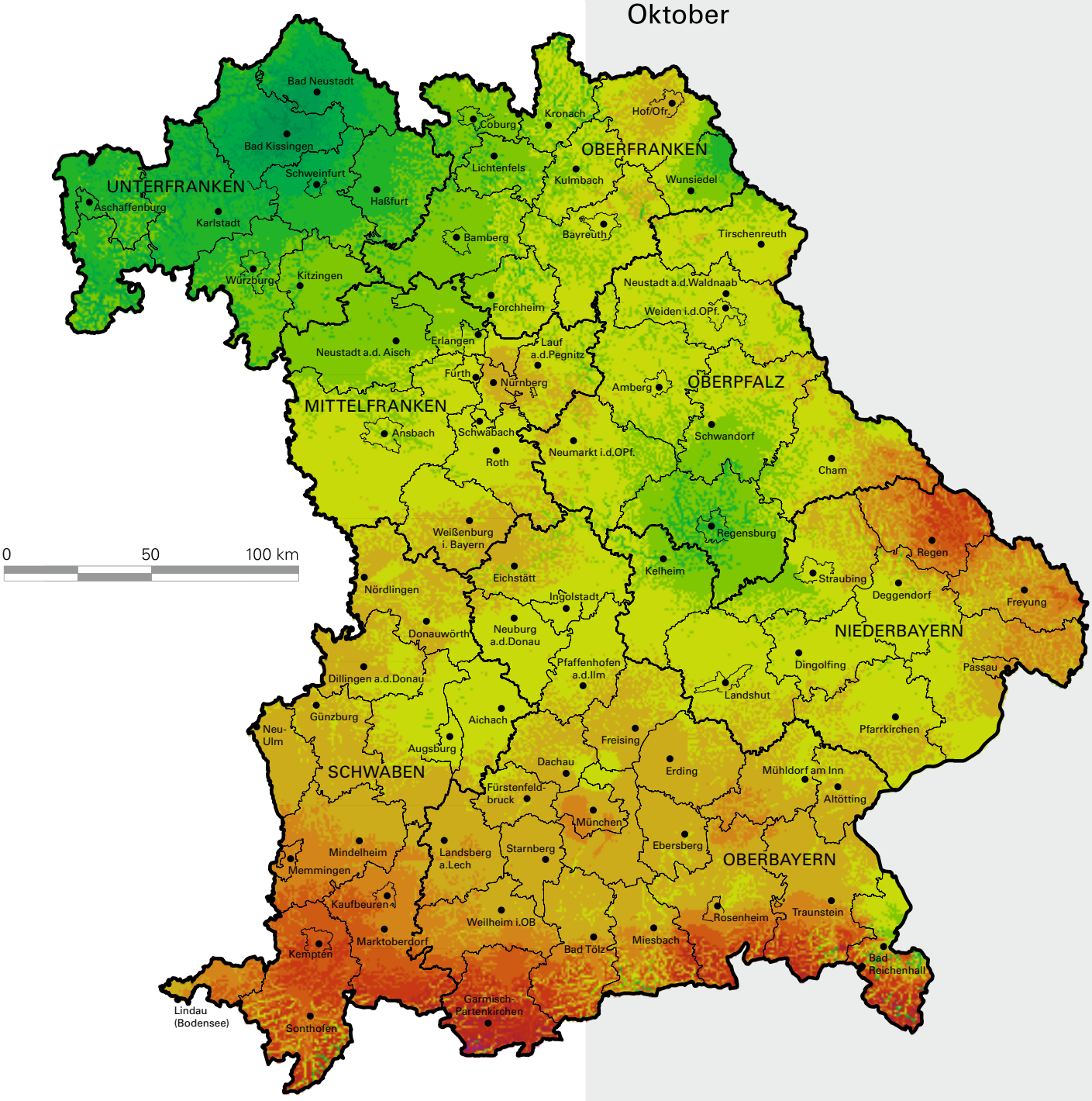
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Oktober



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

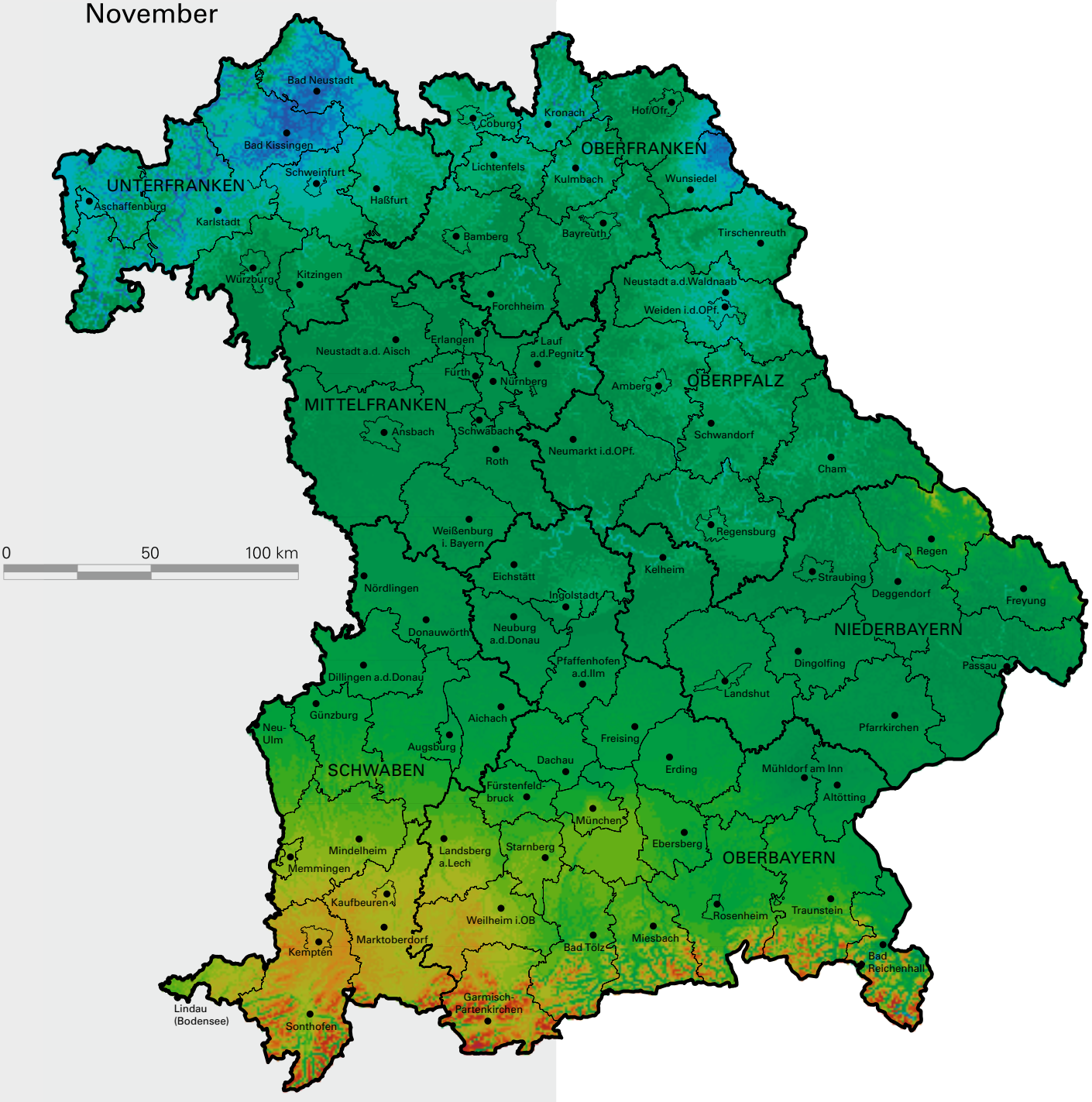
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

November



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

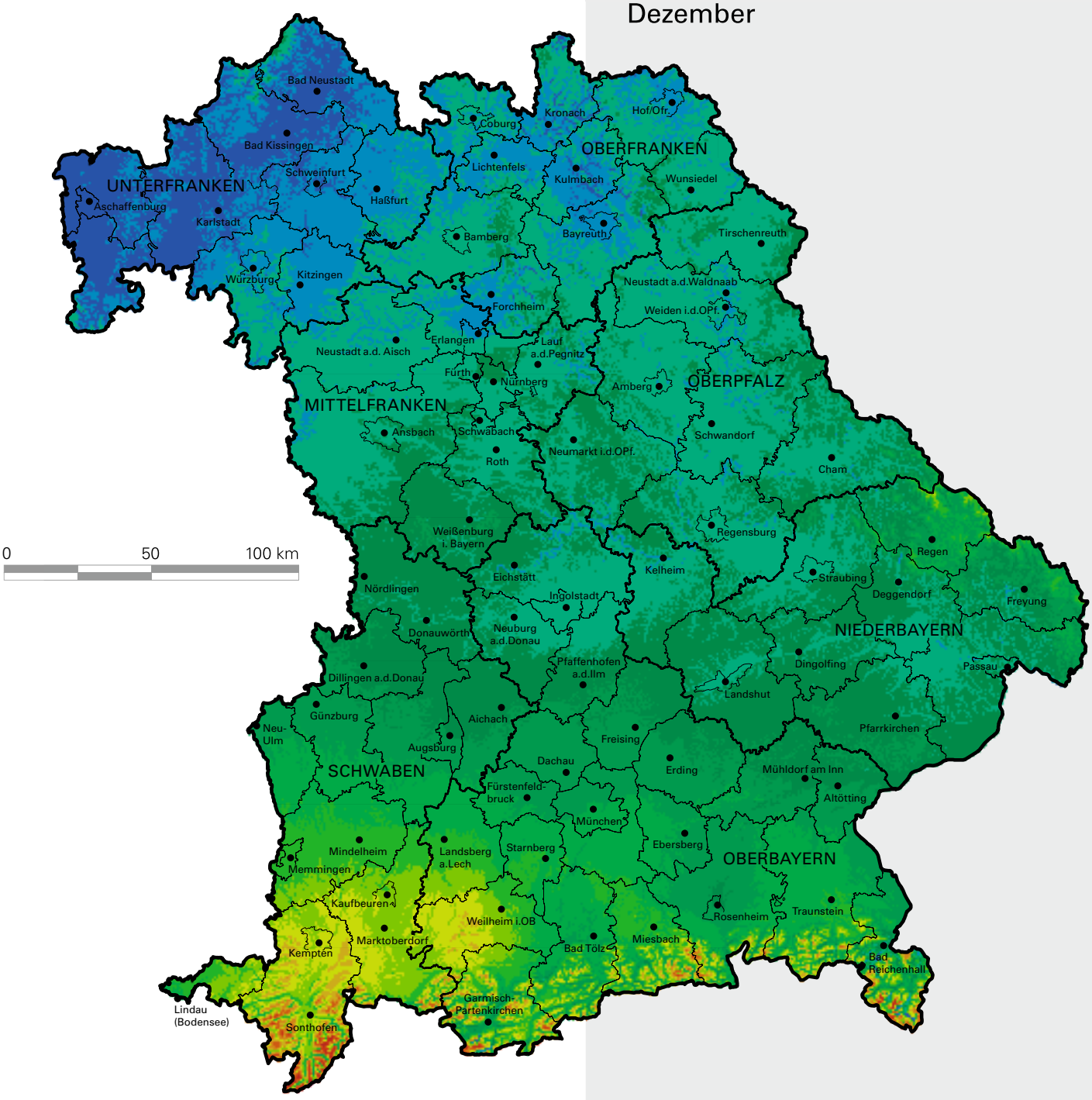
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Sonnenscheindauer in Bayern

Mittlere Tageswerte in Stunden

Dezember



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

3.3 Karten der Globalstrahlung

Die Karten der Globalstrahlung zeigen tägliche Werte der Strahlung im Mittel für jeden Monat an. Multipliziert mit der Anzahl der Tage eines Monats ergibt sich die Globalstrahlungssumme für den jeweiligen Monat.

Die Globalstrahlung der Monate Januar und Februar weist eine deutliche Abhängigkeit von der geographischen Breite auf. Von Süd nach Nord nimmt die von der Tageslänge gesteuerte Strahlung deutlich ab. Während im Südwesten Bayerns die Globalstrahlung bei Werten von zum Teil über 1,4 kWh/m² im Januar bzw. über 2,1 kWh/m² im Februar liegt, fällt sie im Norden auf Werte unter 0,7 kWh/m² im Januar bzw. 1,4 kWh/m² im Februar ab. Die Höchstwerte in den Monaten Januar, Februar und März werden auf den strahlungsbegünstigten Gipfellagen der Alpen erreicht.

In den Frühlingsmonaten März und April liegen die höchsten Strahlungswerte wiederum im Südwesten Bayerns mit Werten über 3,2 kWh/m² (März) und über 4,2 kWh/m² (April). Im Nordwesten Bayerns liegt die Strahlung dagegen bei weniger als 2,2 kWh/m².

Die im Frühjahr verstärkte Dynamik der Atmosphäre bewirkt eine Veränderung der Muster in den Karten. Durch den Stau der Luftmassen an den (Mittel-)Gebirgen wie der Rhön, dem Bayerischen Wald oder den Alpen wird die anströmende Luft zum Aufsteigen gezwungen, in der Folge kommt es zu einer verstärkten Wolkenbildung und reduzierter Strahlung. So zeigen in den Monaten April, Mai und Juni diese Regionen deutliche geringere Werte unter 4,0 kWh/m² im April und unter 4,5 kWh/m² im Mai und Juni. Im Flachland dagegen werden im Mittel der 30 Jahre im Mai wie auch im Juni Werte zwischen 5,1 bis 5,6 kWh/m² erreicht, wobei im Süden Bayerns jeweils die höheren Werte liegen.

Regional sehr ausgeglichen fällt die Globalstrahlung im Juli aus. Weite Teile Bayerns zeigen Werte zwischen 5,2 und 5,6 kWh/m². Mittelgebirge und Alpen, die durch stärkere Konvektion und Wolkenbildung beeinflusst sind, zeigen geringere Werte von 5,1 bis 5,2 kWh/m² an.

Geringe Werte von weniger als 4,6 kWh/m² in der Rhön, dem Bayerischen Wald und dem Alpenraum zeigen sich auch im August. Im übrigen südbayerischen Raum sind Strahlungswerte von 4,7 bis 5,1 kWh/m² zu beobachten, während sie in Nordbayern bei Werten zwischen 4,5 bis 4,8 kWh/m² liegen.

Ein Breiteneffekt, der auf der abnehmenden Tageslänge und der damit verbundenen kürzeren Einstrahlungszeit basiert, ist in den Monaten September und Oktober zu beobachten. So liegt die Globalstrahlung in Nordbayern bei Werten zwischen 2,7 und 3,3 kWh/m² im September bzw. zwischen 1,6 und 2,0 kWh/m² im Oktober. In Südbayern variiert sie zwischen 3,2 bis 3,8 kWh/m² im September bzw. zwischen 1,9 und 2,5 kWh/m² im Oktober. Zu erkennen ist, dass im Oktober die Hochlagen der Alpen und des Bayerischen Waldes aufgrund der herbstlichen Hochdrucklagen und der häufigen Nebelbildung im Flachland wieder deutlich strahlungsbegünstigt sind.

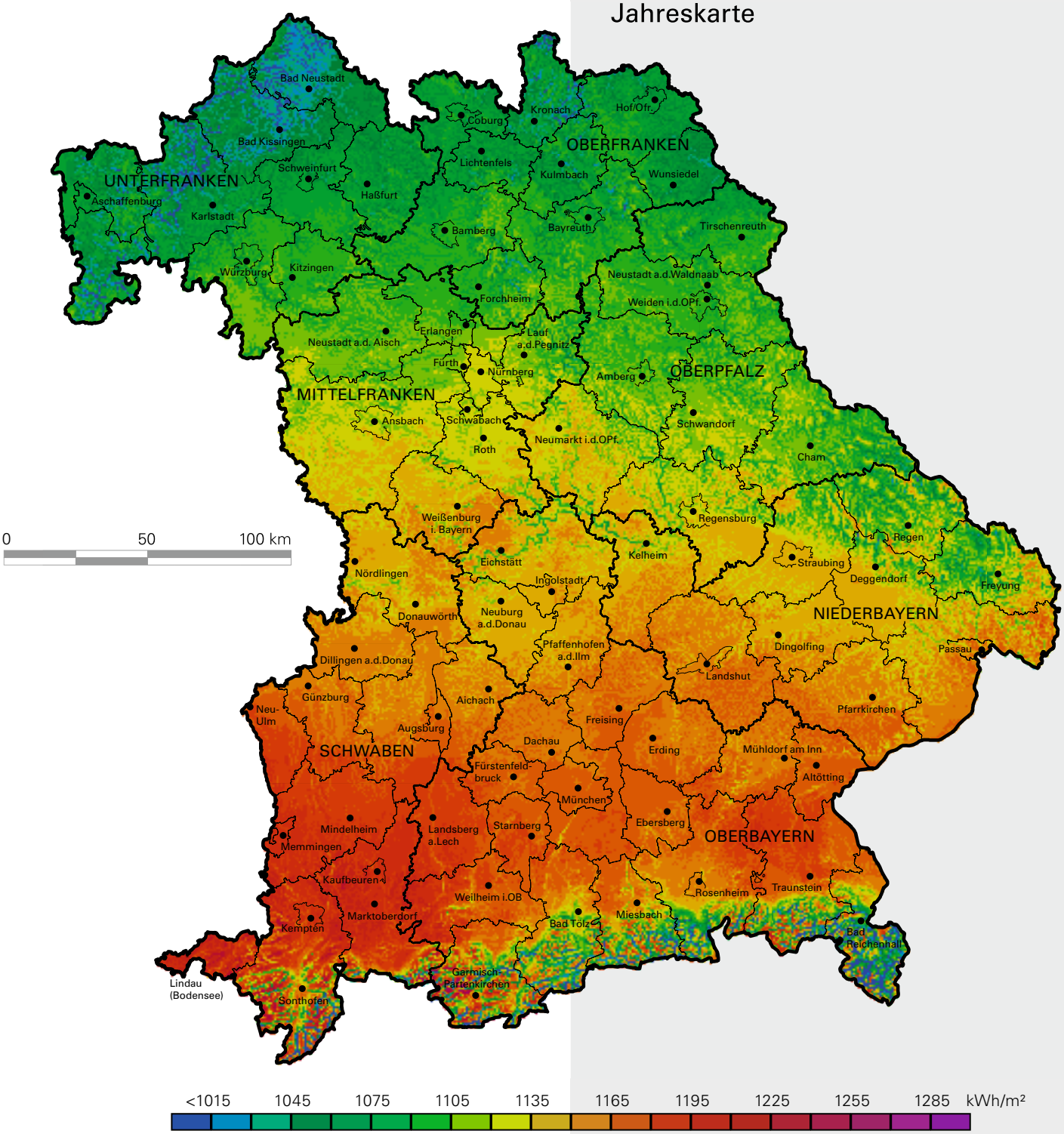
Die Karten für die Monate November und Dezember weisen geringe Werte in Nordbayern auf. Im November ist hier eine mittlere Strahlung von 0,5 bis 1,0 kWh/m² im November und 0,4 bis 0,8 kWh/m² im Dezember zu verzeichnen. Demgegenüber stehen Werte von 1,0 bis 1,5 kWh/m² im November und 0,8 bis 1,1 kWh/m² im Dezember. Maximalwerte mit über 1,3 kWh/m² werden in den Gipfellagen der Alpen erreicht.

Aufsummiert über das gesamte Jahr zeigt sich, dass die höchsten Globalstrahlungssummen im Süden Bayerns erreicht werden. Im Südwesten wie auch im Südosten Bayerns erhält man jährliche Strahlungssummen von bis zu 1.200 kWh/m². Die meisten Regionen zeigen Werte zwischen 1.060 und 1.180 kWh/m² pro Jahr. Geringe Strahlungswerte erhalten die Hochlagen der Rhön und die tief eingeschnittenen Täler der Mittelgebirge mit Jahressummen um 1.020 kWh/m². Neben der jahreszeitlich variierenden, breitenabhängigen Dauer der solaren Einstrahlung und Intensität basieren die regionalen Unterschiede vor allem auf orografischen Effekten über dem Bergland oder auf Föhneffekten.

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Jahreswerte in kWh/m²

Jahreskarte



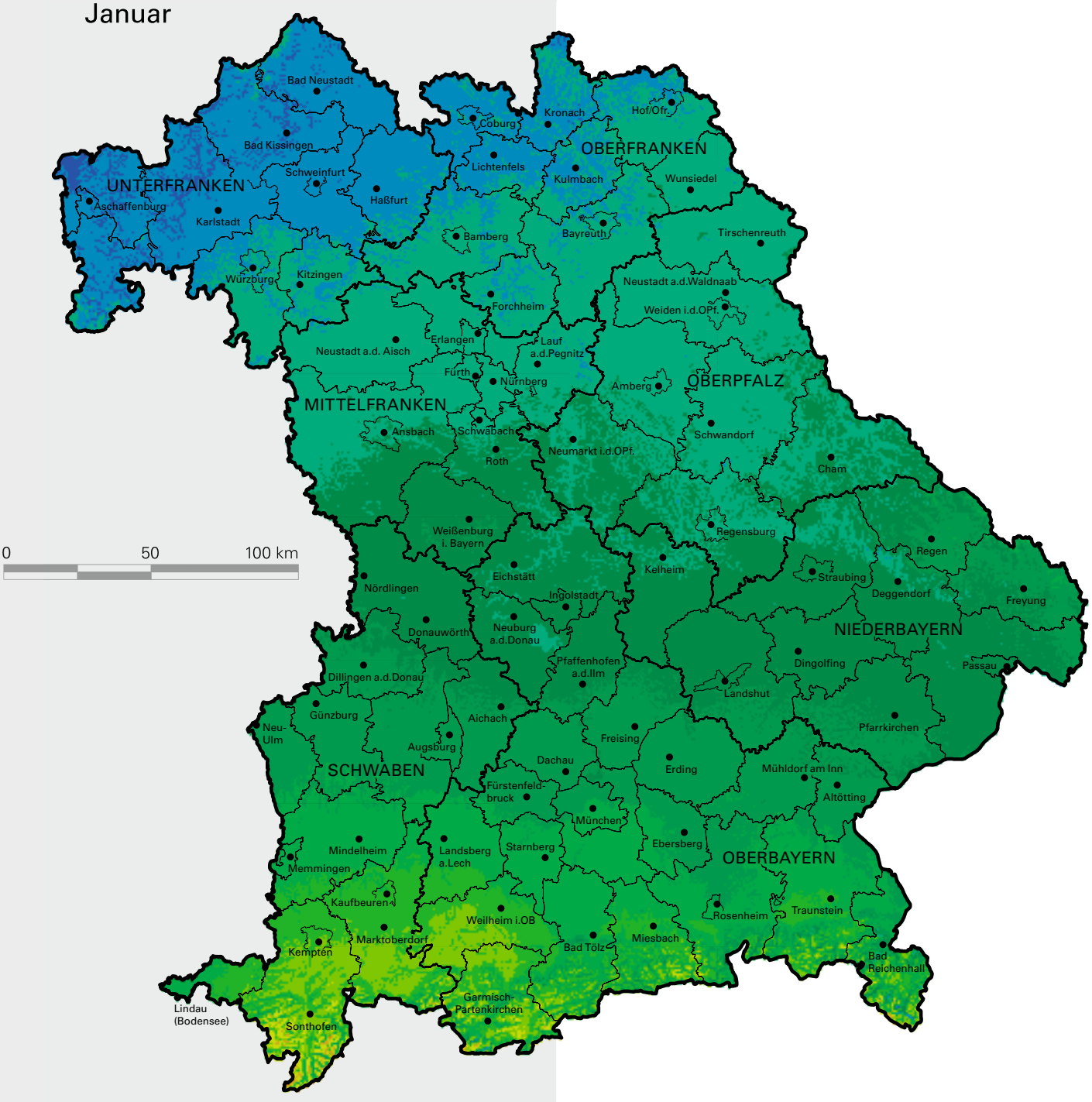
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Januar



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

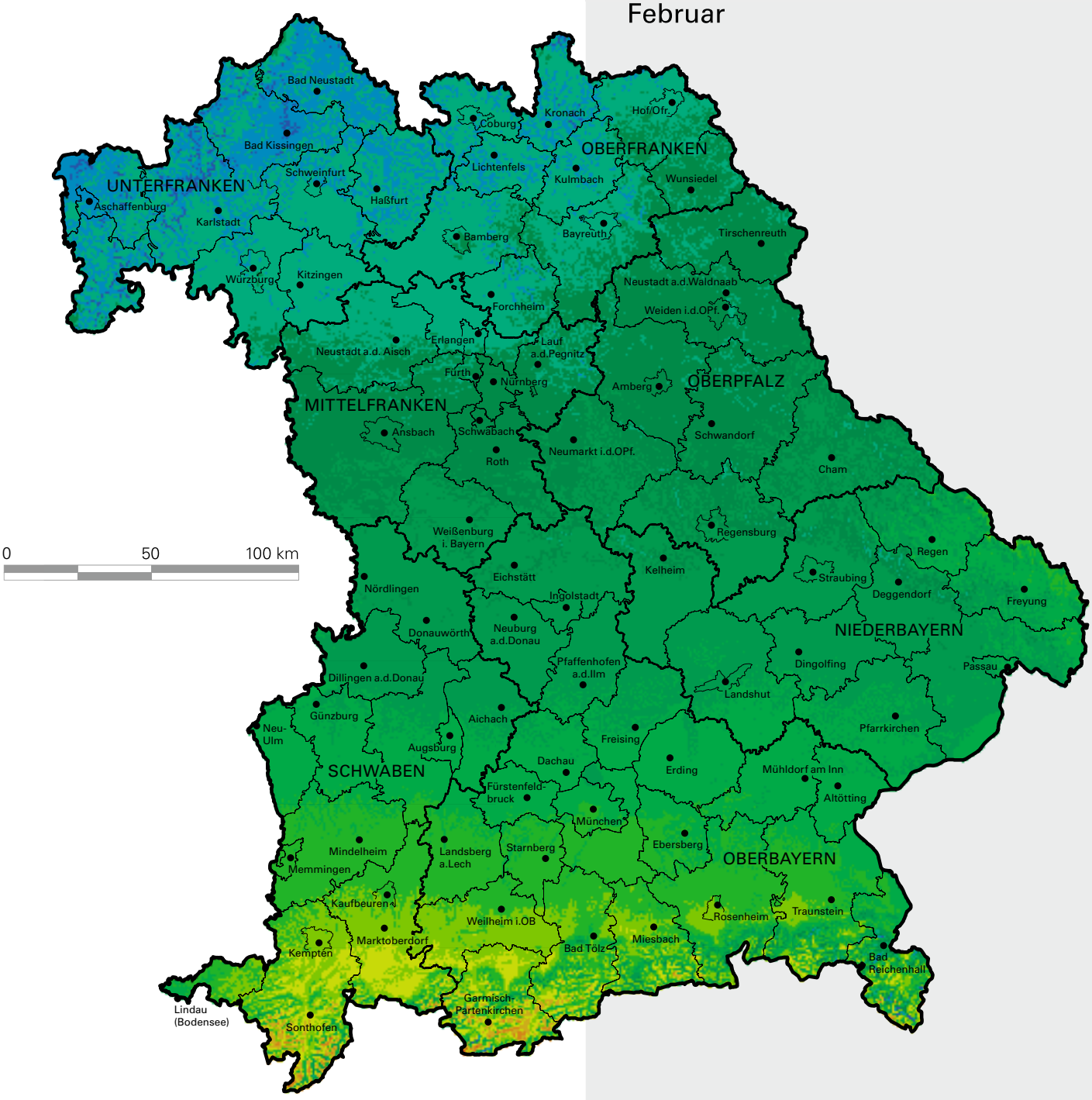
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Februar



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

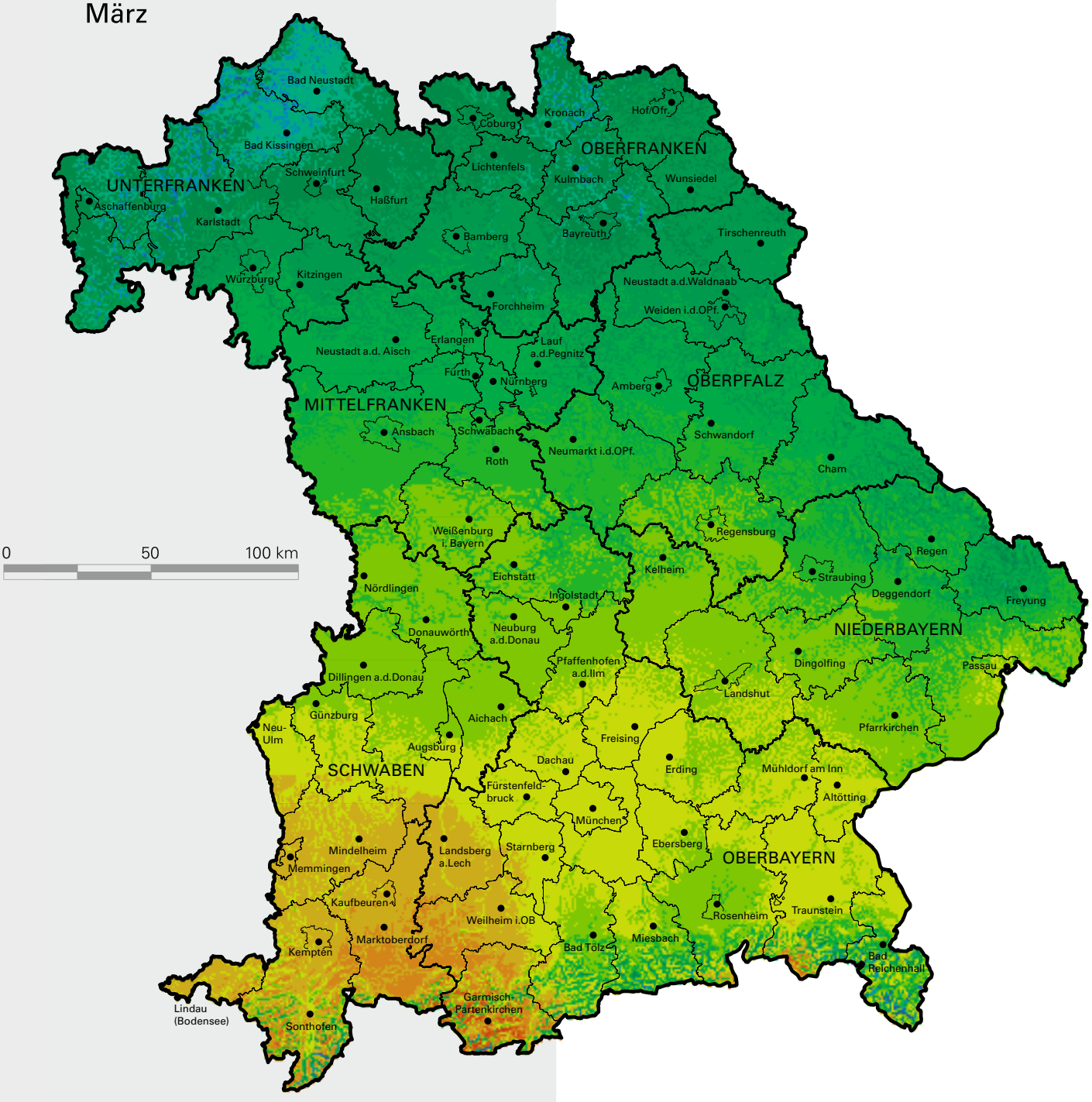
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

März



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

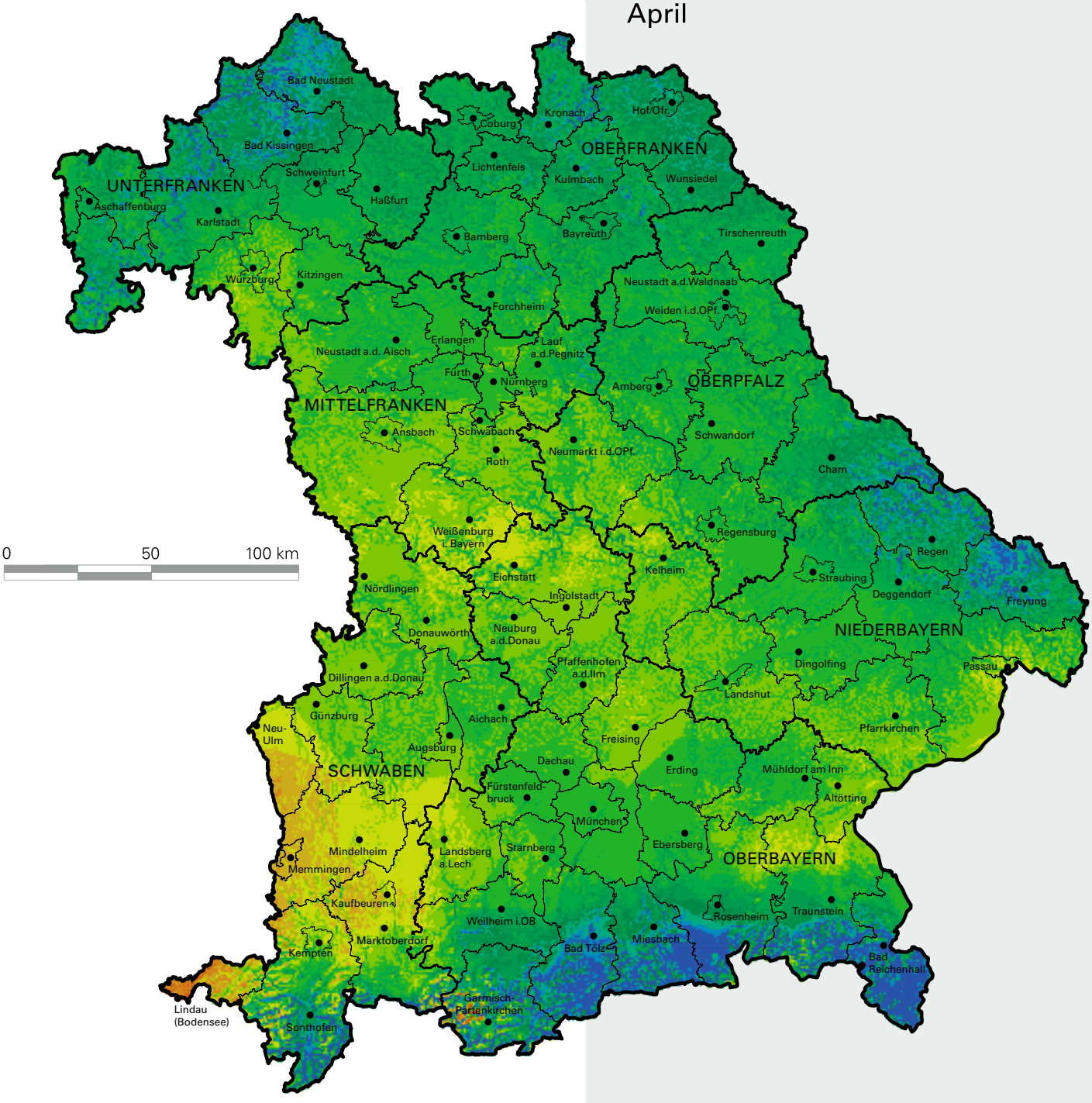
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

April



3,5 3,6 3,7 3,8 3,9 4,0 4,1 4,2 4,3 4,4 4,5 4,6 4,7 4,8 4,9 5,0 5,1 5,2 5,3 kWh/m²

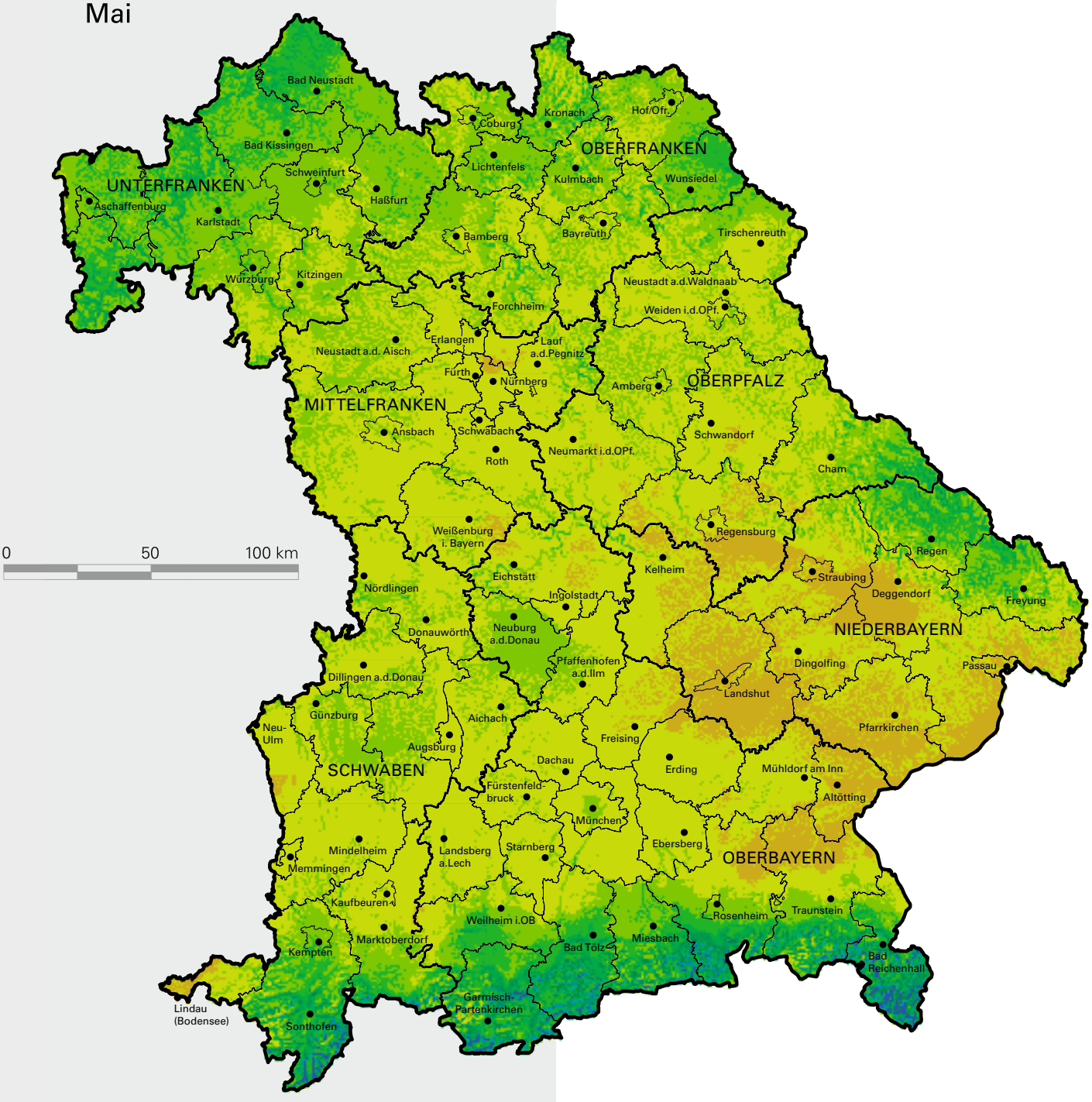
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Mai



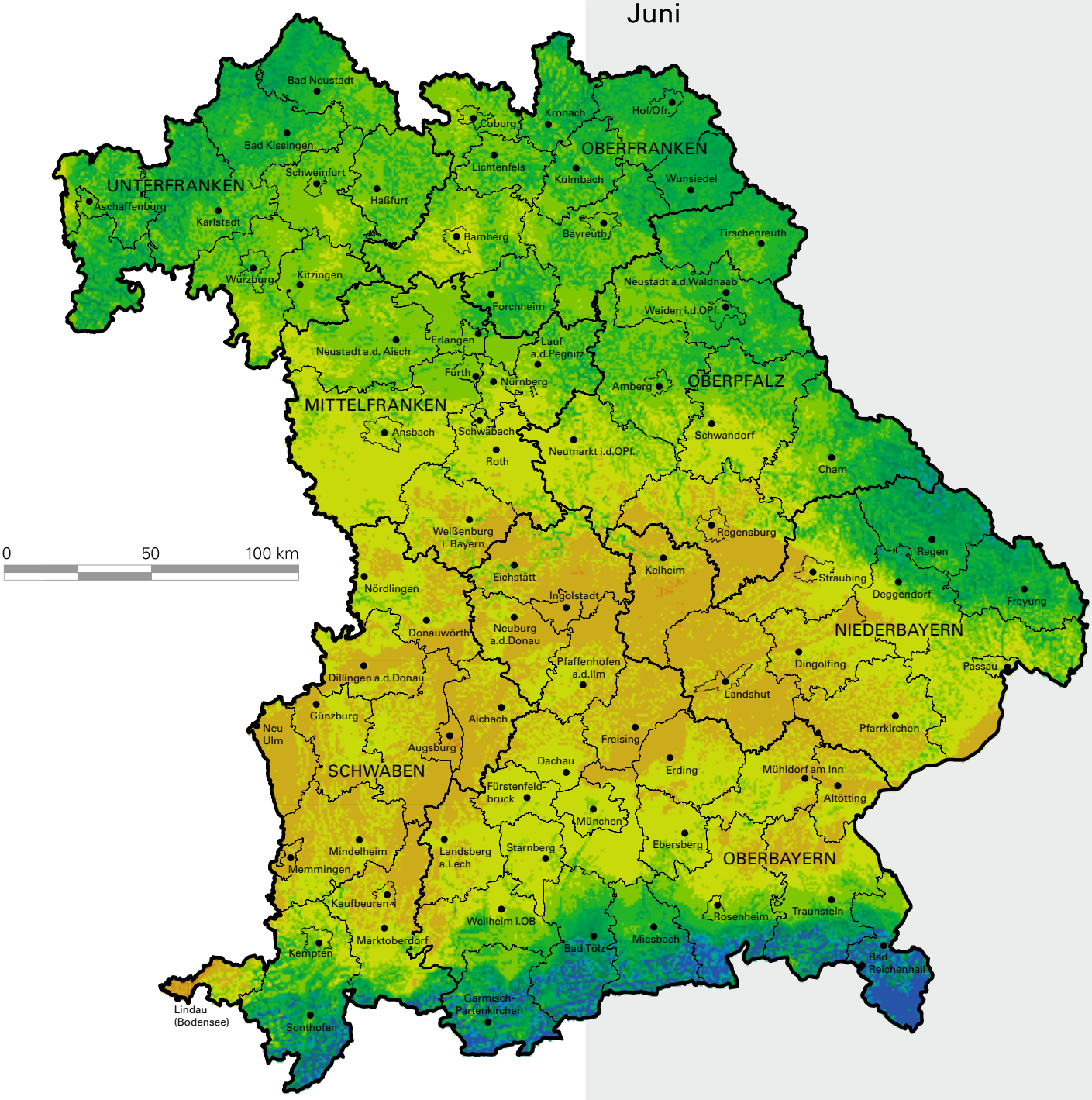
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Juni



4,5 4,6 4,7 4,8 4,9 5,0 5,1 5,2 5,3 5,4 5,5 5,6 5,7 5,8 5,9 6,0 6,1 6,2 6,3 kWh/m²

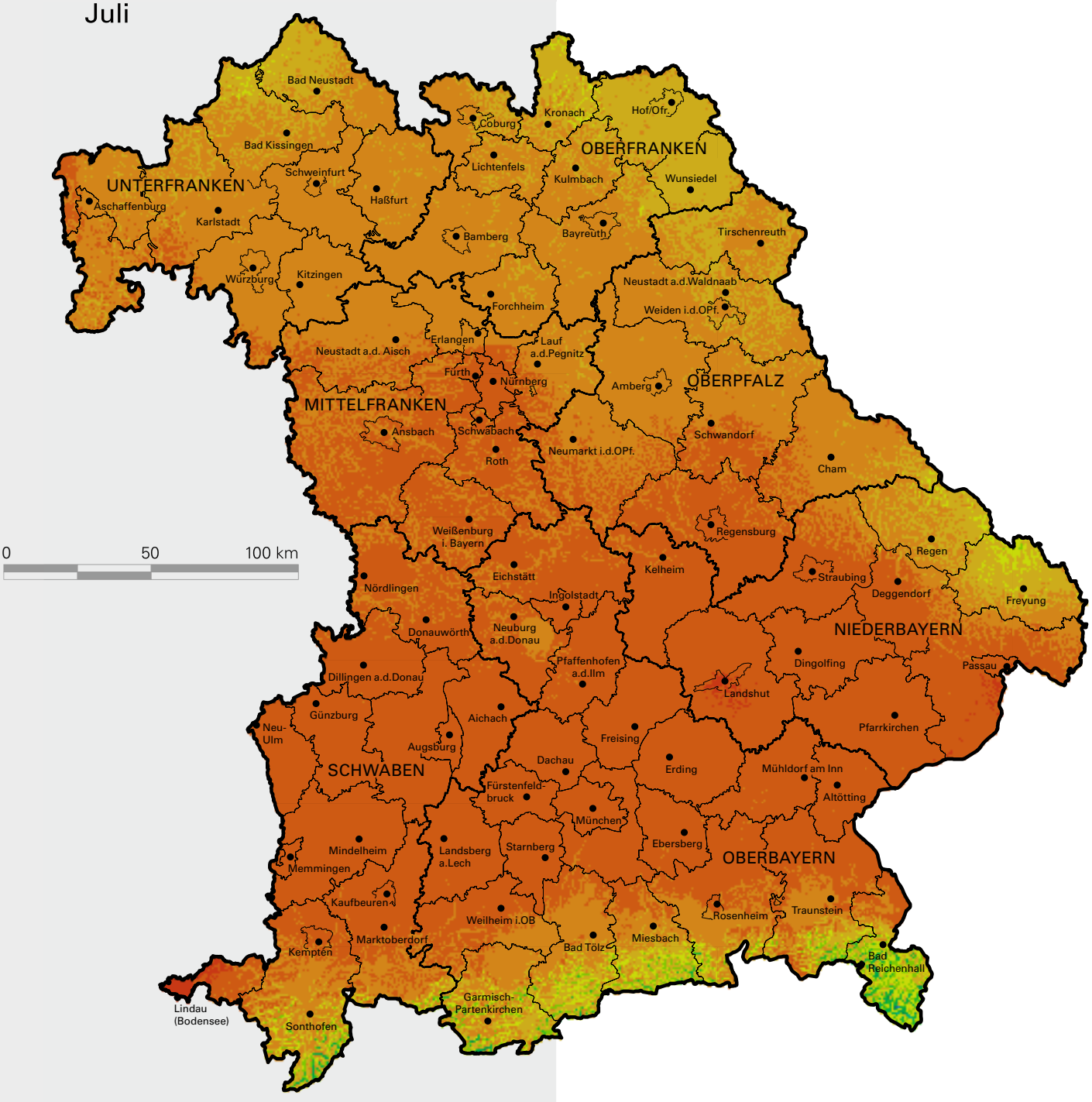
Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Juli



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

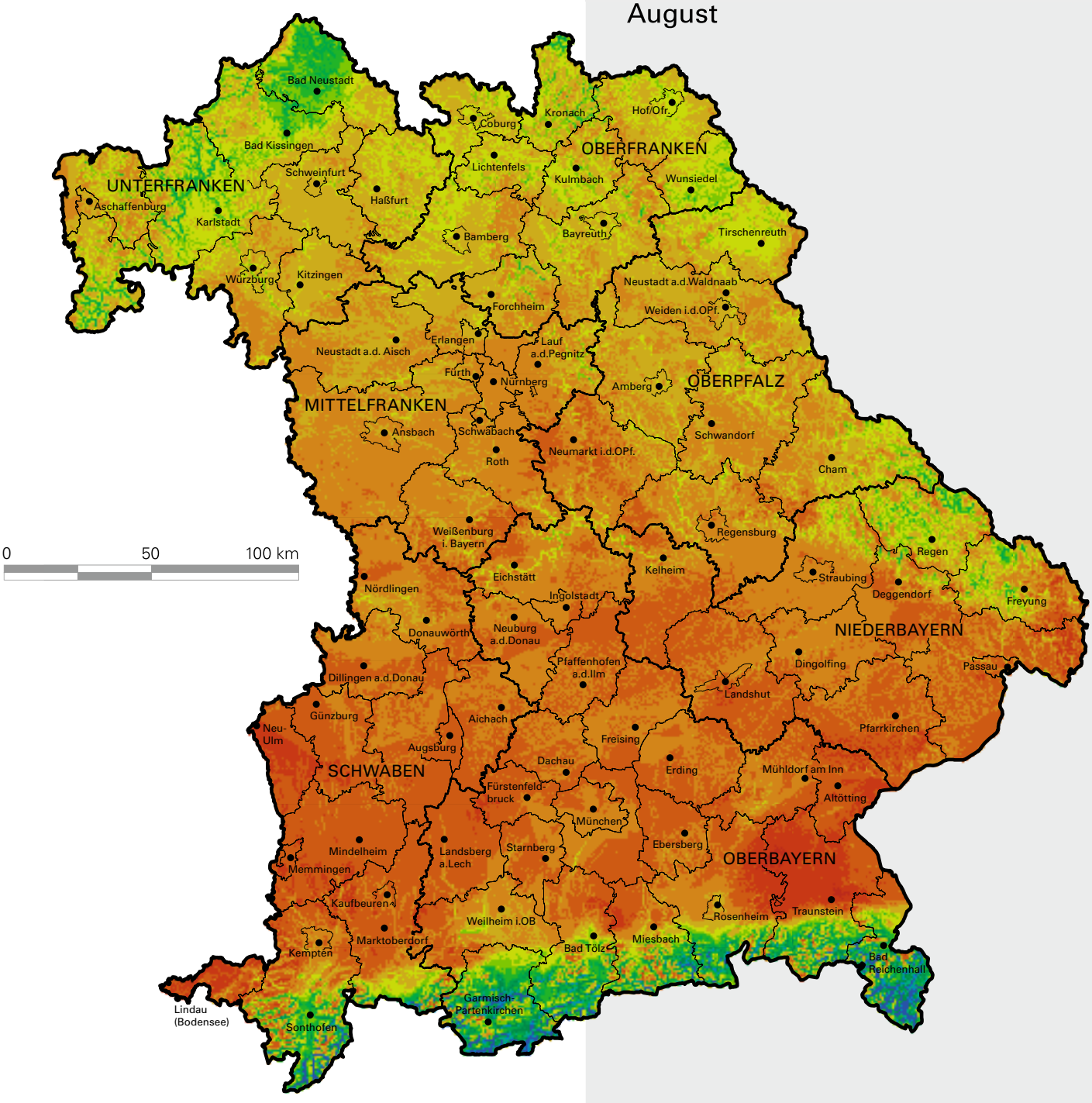
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

August



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

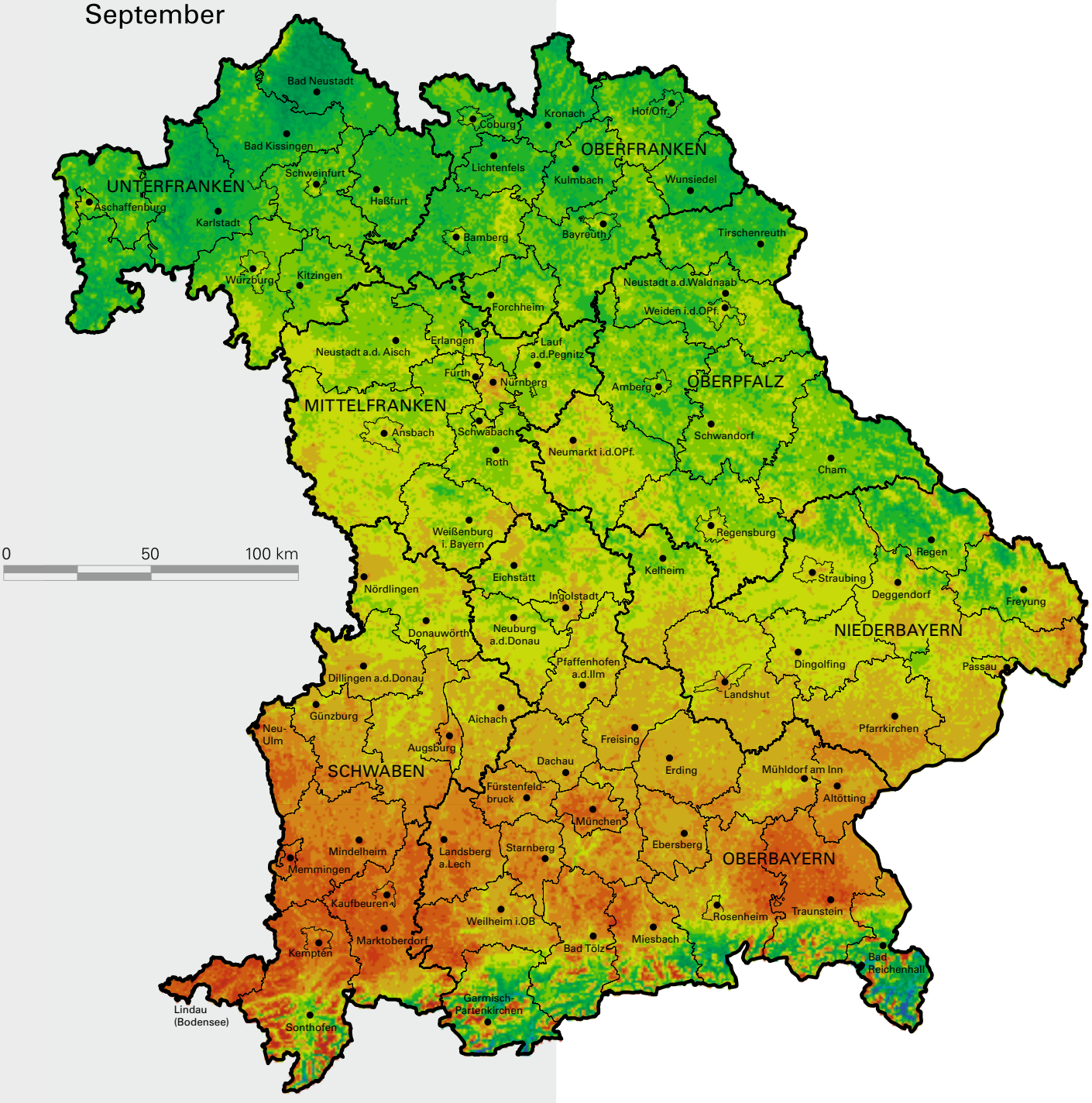
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

September



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

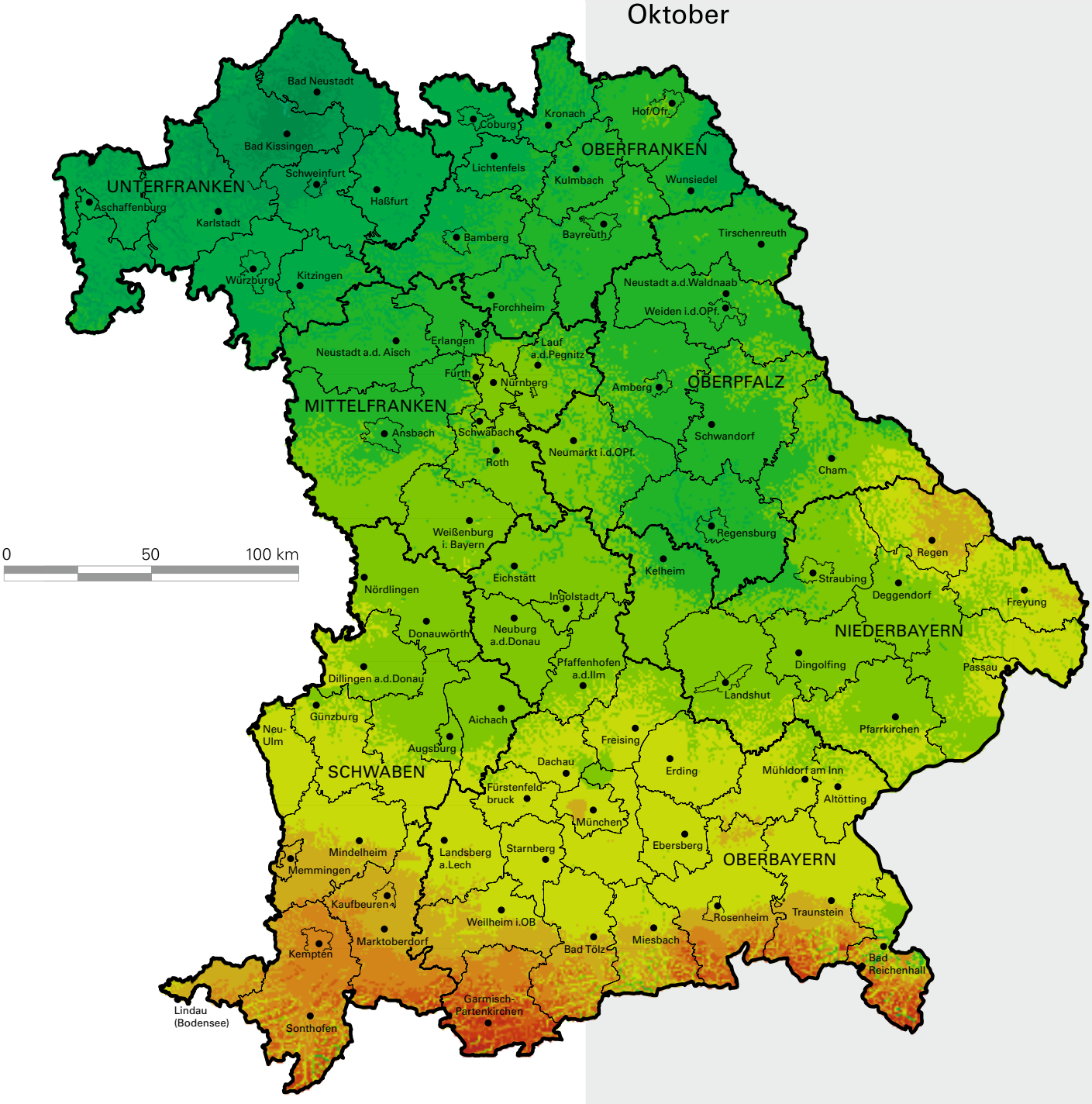
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Oktober



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

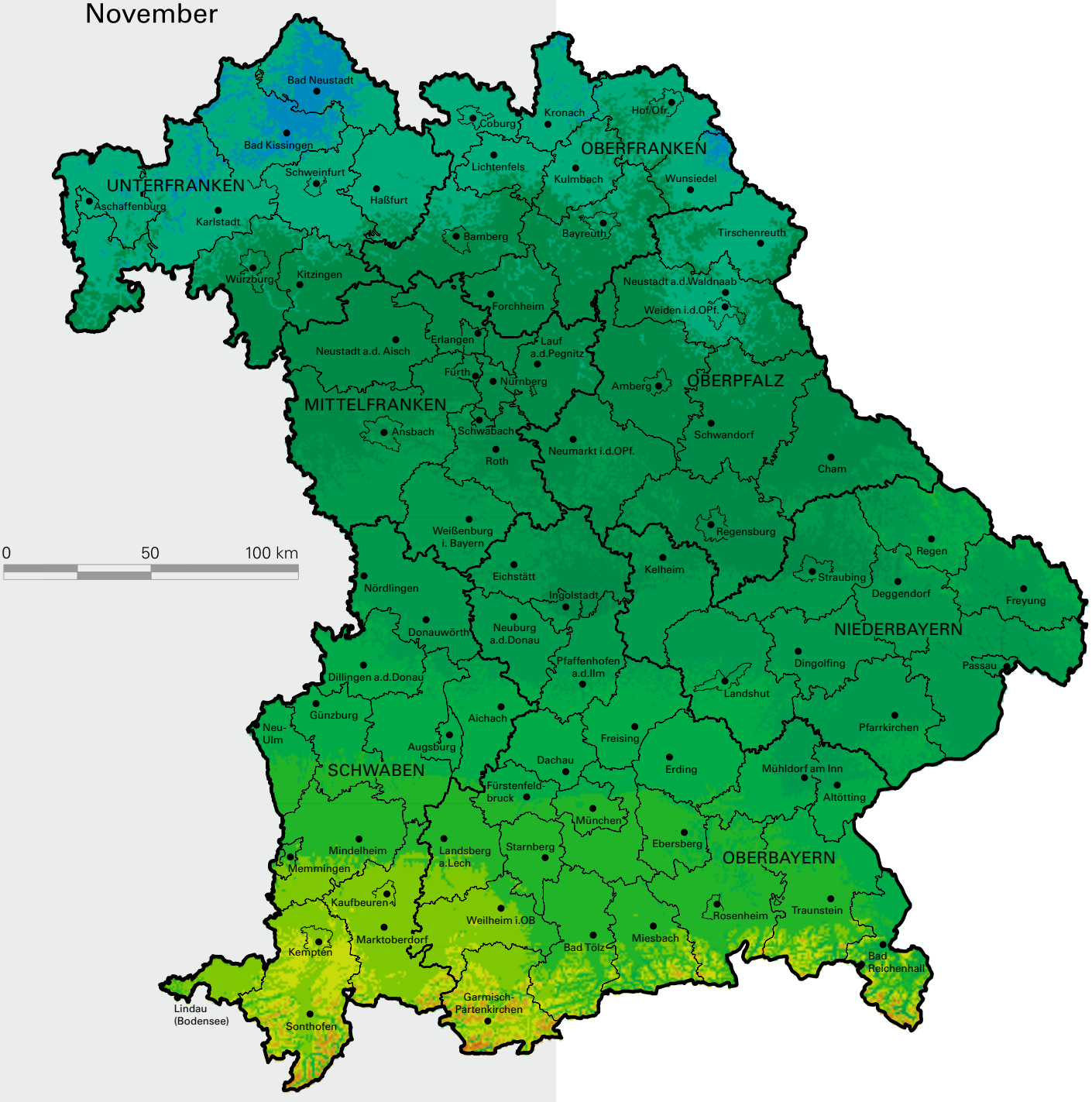
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

November



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

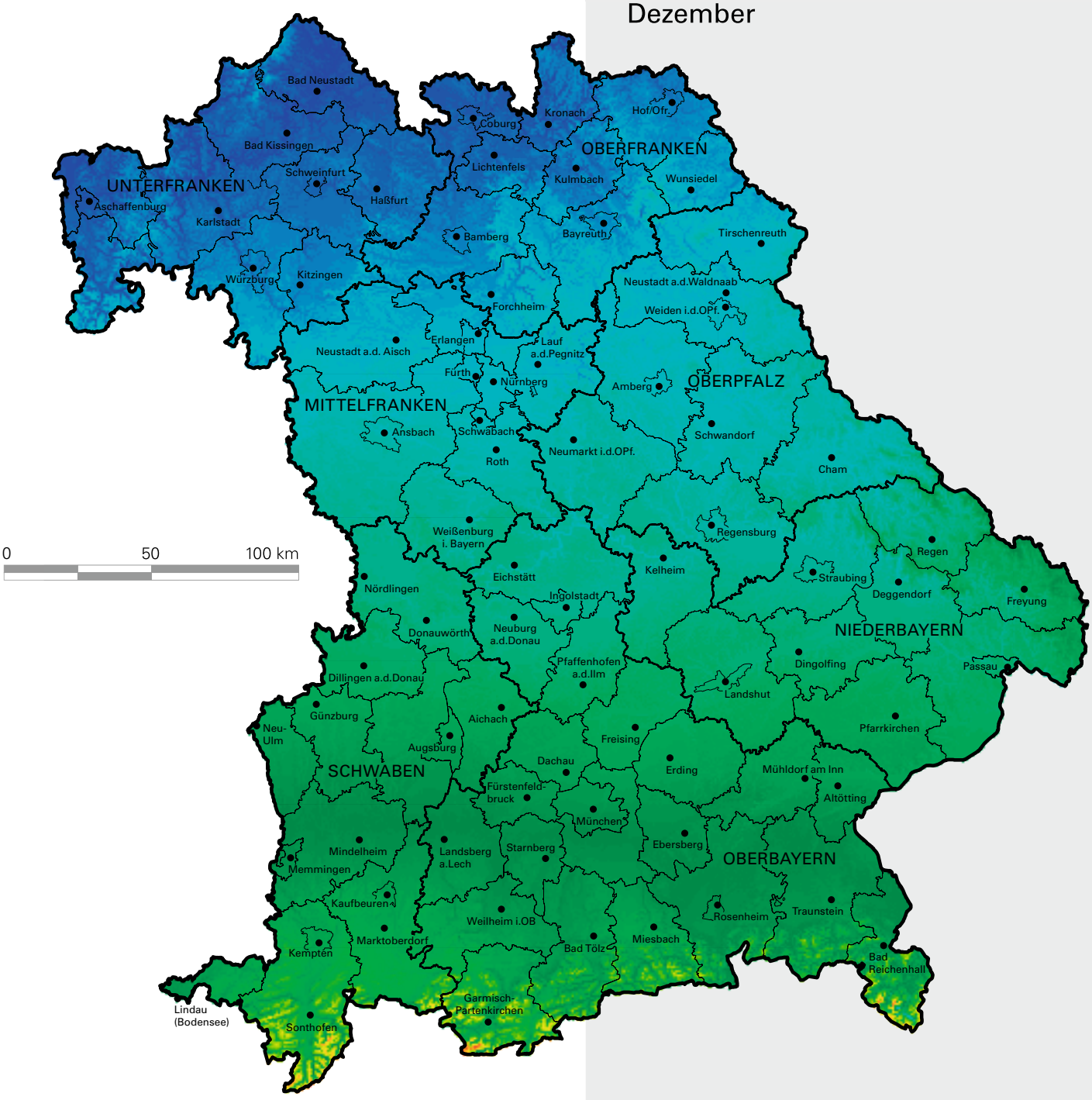
geoKLIM consulting

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

Globalstrahlung in Bayern

Mittlere Tageswerte in kWh/m²

Dezember



Messzeitraum: 1971–2000
Datenquelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Bearbeitung: geoKLIM consulting
Kartenprojektion: Gauß-Krüger-Abbildung (12°)

4. Nutzung der Sonnenenergie

Die vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass der solare Energieertrag an einem Standort von der geographischen Breite des Standorts sowie von der Ausrichtung und Neigung der Fläche abhängt.

Optimal ist eine Ausrichtung nach Süden. Kleinere Abweichungen nach Osten oder Westen mindern den Energieertrag jedoch nicht wesentlich. Bei der Frage des optimalen Neigungswinkels ist zu unterscheiden, ob es sich um eine photovoltaische oder eine solarthermische Anlage handelt. Für eine nach Süden ausgerichtete Photovoltaikanlage liegt der optimale Neigungswinkel bei 30° bis 45°. Je weiter die Ausrichtung einer Fläche nach Osten oder Westen abweicht, desto günstiger sind geringere Neigungswinkel. Der optimale Neigungswinkel einer thermischen Solaranlage ist gegenüber Photovoltaikanlagen um 15° bis 20° höher, wenn neben der Warmwasserbereitung in der Übergangszeit und im Winter eine Heizungsunterstützung beabsichtigt ist. Für eine nach Süden ausgerichtete thermische Solaranlage errechnet sich so ein optimaler Neigungswinkel zwischen 45° und 60°.

Der Wirkungsgrad einer Solaranlage stellt die Kenngröße für die Effizienz der Umwandlung von Sonnenstrahlung in nutzbare Wärme oder Strom dar. Er berechnet sich aus dem Verhältnis der nutzbaren zur eingesetzten Energie. Bei Photovoltaikanlagen mit monokristallinem Silizium liegt der Wirkungsgrad der Module zwischen 14 und 17 %, bei Anlagen mit amorphem Silizium bei Werten von 5 bis 7 %. Darüber hinaus gibt es weitere Dünnschichttechnologien (z.B. Cadmium-Tellurid-Schichtsysteme) deren Module Wirkungsgrade über 9 % erreichen. Im Vergleich zu Modulen von Photovoltaikanlagen ergibt sich für thermische Solaranlagen ein Wirkungsgrad zwischen 25 und 40 %.

4.1 Solarthermische Anlagen

Solarthermische Anlagen werden in unseren Breiten vorwiegend für die Warmwasserbereitung und für Heizzwecke (Raumheizung) genutzt. Thermische Solaranlagen können auch den diffusen Anteil der Sonnenstrahlung in Energie umwandeln, der – regional unterschiedlich – zum Teil mehr als 50 Prozent der gesamten Strahlung betragen kann. Der Wirkungsgrad einer solarthermischen Anlage ist neben der Kollektorbauart, der Wärmedämmung und der Speicherart von der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung und der Strahlungsintensität am Standort abhängig.

Der Flächenbedarf einer Solarthermieanlage ist zum einen vom Anlagentyp abhängig, denn Flachkollektoren benötigen mehr Fläche als Vakuumröhrenkollektoren. Zum anderen beeinflusst die Nutzungsart (Warmwasser oder Kombinutzung) den Flächenbedarf. Ein weiteres entscheidendes Kriterium ist die Anzahl der Personen, die mit der Anlage versorgt werden sollen.

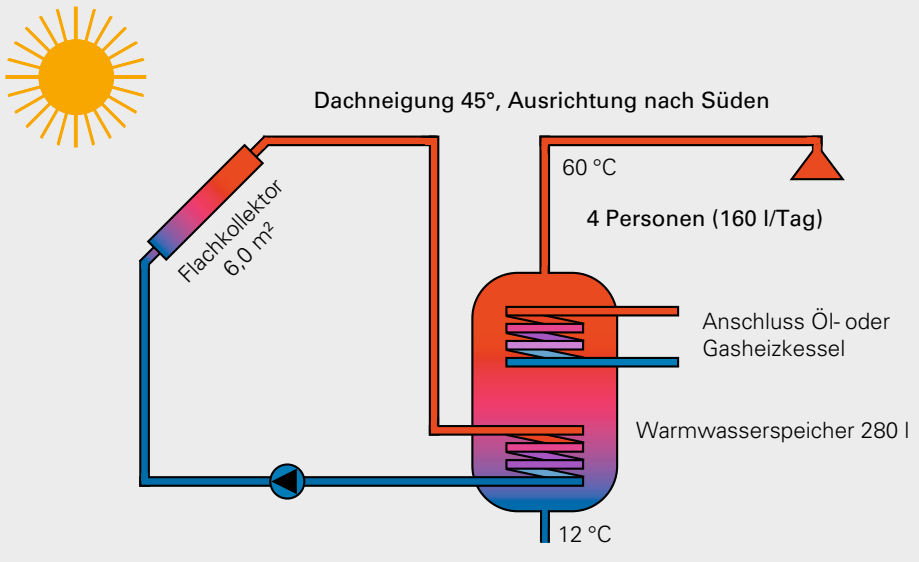
Die zentrale Komponente einer thermischen Solaranlage ist der Kollektor, in dem die solare Strahlungsenergie absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Im Kollektor zirkuliert ein frostsicheres Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf, das das Brauchwasser im Warmwasserspeicher mittels eines Wärmetauschers erwärmt. Von dort gelangt das Brauchwasser in den häuslichen Wasserkreislauf (Abbildung 6).

Aufgrund der Schwankungen der solaren Einstrahlung im Tagesverlauf ist eine Speicherung der Energie wichtig, um einen Ausgleich zwischen Energieangebot und Energiebedarf zu schaffen. Wichtig ist dabei eine gute Isolierung des Speichers, um Wärmeverluste zu vermeiden. Die Auswahl und Dimensionierung des Speichervolumens spielt zudem für die optimale Nutzung der Solaranlage eine wichtige Rolle. Wird der Speicher z. B. zu klein bemessen, kann der Solarkreis seine Wärme nicht vollständig an das Brauchwasser abgeben. Der Warmwasserspeicher sollte – auf sein Volumen bezogen – etwa das 1,5 bis 2fache des täglichen Warmwasserverbrauchs umfassen.

Als Kollektortypen werden entweder Flach- oder Vakuum-Röhrenkollektoren eingesetzt. Dabei zeichnen sich Flachkollektoren durch ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis und durch variable Montagemöglichkeiten aus. Vakuumkollektoren bieten den Vorteil, dass sie weniger Fläche brauchen und auch bei hohen Absorbertemperaturen und niedrigen Einstrahlungen mit einem guten Wirkungsgrad arbeiten und höhere Temperaturen erreichen.

Für die Dimensionierung von **thermischen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung** kann nach der VDI-Richtlinie 2067, Blatt 12 von einem durchschnittlichen Warmwasserbedarf von 30–60 Litern pro Person und Tag ausgegangen werden.

Abb. 6: **Schema einer solarthermischen Anlage**



Für Beispielsrechnungen wird zumeist ein Wert von 40 Litern pro Person angegeben. Als Faustregel sollte man bei Flachkollektoren 1,0 bis 1,5 m² Kollektorfläche pro Person, bei Vakuumröhren 0,8–1,2 m² pro Person annehmen (Abbildung 6).

Eine zusätzliche Heizquelle muss jedoch vorhanden sein, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wenn das Kollektorsystem nachts, am frühen Morgen oder während sonnenarmer Tage den Wärmekreislauf nicht aufrecht erhalten kann. Eine richtig dimensionierte Solaranlage kann jährlich rund 60 % des Warmwasserbedarfs eines Haushalts decken.

Auch eine **solare Raumheizung** wird im Allgemeinen nur als Zusatzheizung verwendet. Für Anlagen zur Heizungsunterstützung werden meist Kombispeicher verwendet, bei denen die Solaranlage, die Warmwasserbereitung und die Heizung verschaltet sind. Kombisysteme mit einer Kurzzeit-Wärmespeicherung werden meist in Ein- oder Zweifamilienhäusern eingesetzt. Diese Speicherart ermöglicht im Falle der Raumheizung die Überbrückung sonnenarmer Perioden. Die dafür installierte Kollektorenfläche beträgt für Ein- oder Zweifamilienhäuser ca. 10 bis 20 m². Kombisysteme liefern in der Übergangsjahreszeit, d.h. im Frühjahr und Herbst, einen Beitrag zur Raumheizung und gewähren die solare Volldeckung der Warmwasserbereitung im Sommer. Je nach Heizwärmebedarf des Gebäudes können solche Systeme im Jahresdurchschnitt 10 bis 40 % des Gesamtwärmebedarfs für Warmwasser und Raumheizung decken. Solare Kombianlagen eignen sich besonders in gut gedämmten Gebäuden mit niedrigem Heizenergiebedarf, beim Einsatz von Niedrigtemperaturheizungen und für Regionen, die durch niedrige Außentemperaturen bei gleichzeitig hoher Sonneneinstrahlung charakterisiert sind, wie etwa in Gebirgen. In diesen Regionen ist meist ganzjährig eine Raumheizung nötig, wobei das hohe Potenzial an Sonneneinstrahlung optimal genutzt werden kann.

4.2 Photovoltaik-Anlagen

In den Modulen von Photovoltaikanlagen wird das Sonnenlicht in elektrischen Strom umgewandelt. Die meisten derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen liefern den erzeugten Strom an das öffentliche Netz. Eine solche netzgekoppelte Anlage besteht im Wesentlichen aus den Photovoltaik-Modulen, einem oder mehreren Wechselrichtern, einer Schutzeinrichtung zur automatischen Abschaltung bei Störungen im Stromnetz sowie dem Zähler zur Erfassung der eingespeisten Strommenge.

Der Flächenbedarf einer Photovoltaikanlage hängt von der zu installierenden Leistung ab, die in Kilowatt-Peak (kWp) gemessen wird. Ein kWp gibt die maximal abgegebene elektrische Leistung bei senkrechter Einstrahlung an. 6 bis 8 m² Modulfläche entsprechen einer Leistung von etwa 1 kWp. Mit einer 1 kWp-Anlage können in Deutschland zwischen 700 und 1000 kWh Strom pro Jahr erzeugt werden. Zum Vergleich: Der jährliche Stromverbrauch eines typischen Vier-Personen-Haushalts liegt bei etwa 4000 kWh.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Nutzbare Strahlung auf geneigte Flächen

Für die Dimensionierung einer Solaranlage müssen zunächst die Strahlungsverhältnisse am Standort bekannt sein. Ausgehend von den in den Karten dargestellten monatlichen Globalstrahlungswerten, die für eine waagrechte Ebene gültig sind, lässt sich die Strahlung für eine geneigte Fläche wie beispielweise für ein Dach oder einen Hang nach folgenden 6 Schritten berechnen:

Schritt 1:
Entnahme der Monatswerte der mittleren täglichen Globalstrahlung G für den Standort aus den Karten

Schritt 2:
Berechnung der Monatssummen der Strahlung G_{sum} aus der mittleren täglichen Globalstrahlung und Zahl der Tage des jeweiligen Monats z_m:

$$G_{sum} = G \cdot z_m$$

Schritt 3:
Abschätzung der Anteile der diffusen Strahlung G_{dif} und direkten Strahlung G_{dir} von der monatlichen Strahlungssumme:

$$G_{dif} = G_{sum} \cdot f_{dif}$$

$$G_{dir} = G_{sum} \cdot f_{dir}$$

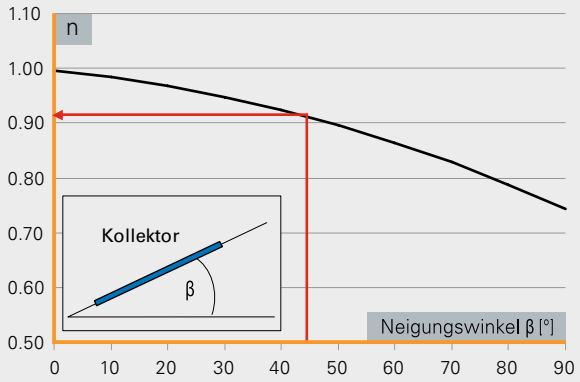
Die für die Gleichungen benötigten monatlichen Faktoren f_{dif} und f_{dir} sind für ganz Bayern anwendbar (Tabelle 1).

Tab. 1: **Faktoren f_{dif} und f_{dir} für die einzelnen Monate**

	Janar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
f_{dif}	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
f_{dir}	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3

Schritt 4:
Bestimmung des Faktors n für den Neigungswinkel β, der als Winkel zwischen der geneigten Fläche und der Horizontalen definiert ist

Abb. 7: **Neigungsabhängigkeit des diffusen Strahlungsanteils**



Durch Multiplikation des diffusen Strahlungsanteils mit dem Faktor n (Abbildung 7) erhält man den nutzbaren diffusen Strahlungsanteil für die geneigte Fläche:

$$GN_{dif} = G_{dif} \cdot n$$

Schritt 5:
Berechnung des nutzbaren direkten Strahlungsanteils auf die geneigte Fläche aus dem jahreszeitlich variierenden Faktor ς in Abhängigkeit von Flächenausrichtung und Neigungswinkel:

$$GN_{dir} = G_{dir} \cdot \varsigma$$

Faktor ς kann dabei aus den Abbildungen 1 bis 4 abgelesen werden.

Schritt 6:
Die gesamte nutzbare Strahlungssumme auf eine geneigte Fläche ergibt sich aus dem nutzbaren diffusen Strahlungsanteil und dem nutzbaren direkten Strahlungsanteil:

$$GN = GN_{dif} + GN_{dir}$$

Im folgenden Beispiel soll die nutzbare Strahlungssumme für eine nach Süden geneigte Fläche mit einem Neigungswinkel von 45° für den Standort Würzburg berechnet werden.

Nach dem Auslesen der mittleren täglichen Globalstrahlung G aus den jeweiligen Karten errechnet sich die Strahlungssumme G_{sum} des Monats Januar aus

$$G_{sum} = 0{,}8\ kWh/m^2 \cdot 31 = 24{,}8\ kWh/m^2$$

Die nach Schritt 1 und 2 erhaltenen Werte aller Monate sind in Tabelle 2 dargestellt.

Im 3. Schritt werden die diffusen und direkten Strahlungsanteile anhand der in Tabelle 1 dargestellten monatlichen Faktoren berechnet. Für den Monat Januar ergibt sich

$$G_{dif} = 24{,}8\ kWh/m^2 \cdot 0{,}7 = 17{,}4\ kWh/m^2$$

$$Gdir = 24{,}8\ kWh/m^2 \cdot 0{,}3 = 7{,}4\ kWh/m^2$$

Wiederum sind in Tabelle 2 alle berechneten Monatswerte der diffusen und direkten Strahlung aufgelistet.

Im 4. Schritt muss zunächst der Faktor n für den Neigungswinkel β bestimmt werden. Wie aus Abbildung 8 zu erkennen ist, hat n für einen Neigungswinkel von 45° den Wert 0,91. Demnach errechnet sich für den Januar ein nutzbarer diffuser Strahlungsanteil auf die geneigte Fläche von

$$GN_{dif} = 17{,}4\ kWh/m^2 \cdot 0{,}91 = 15{,}8\ kWh/m^2$$

Die Ergebnisse des 4. Schrittes sind wiederum in Tabelle 2 für alle Monate eingetragen.

Zur Berechnung des nutzbaren direkten Strahlungsanteils in Schritt 5 müssen für die nach Süden ausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 45° die jahreszeitlich variierenden Faktoren ς aus den Abbildungen 1 bis 4 bestimmt werden. Für die Wintermonate ergibt sich ein Wert von 1,75, woraus sich eine nutzbare direkte Strahlung auf die geneigte Fläche für den Januar von

$$GNdir = 7{,}4\ kWh/m^2 \cdot 1{,}75 = 13{,}0\ kWh/m^2$$

errechnet.

Tab. 2: **Berechnung der nutzbaren Strahlung für eine nach Süden ausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 45° für den Raum Würzburg (in kWh/m²)**

Schritt	Größe	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
1	G	0,8	1,6	2,7	4,2	5,2	5,5	5,4	4,7	3,3	1,9	0,9	0,6
2	G_{sum}	24,8	44,8	83,7	126,0	161,2	165,0	167,4	145,7	99,0	58,9	27,0	18,6
3	G_{dif}	17,4	26,9	50,2	63,0	80,6	82,5	100,4	72,9	49,5	35,3	16,2	13,0
	G_{dir}	7,4	17,9	33,5	63,0	80,6	82,5	67,0	72,9	49,5	23,6	10,8	5,6
4	n	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0.,9	0,9	0,9	0,9
	GN_{dif}	15,8	24,5	45,7	57,3	73,3	75,1	91,4	66,3	45,0	32,2	14,7	11,8
5	ς	1,8	1,8	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,6	1,6	1,6	1,8
	GN_{dir}	13,0	31,4	38,5	72,5	92,7	78,4	63,6	69,2	76,7	36,5	16,7	9,8
6	**GN**	**28,8**	**55,8**	**84,2**	**129,8**	**166,0**	**153,5**	**155,0**	**135,5**	**121,8**	**68,7**	**31,5**	**21,6**

Abb. 8: **Monatliche, nutzbare Strahlungssummen für eine Ebene und eine nach Süden ausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 45° für den Raum Würzburg**

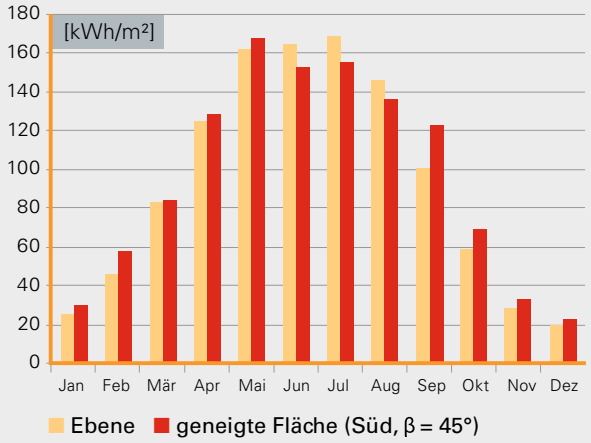
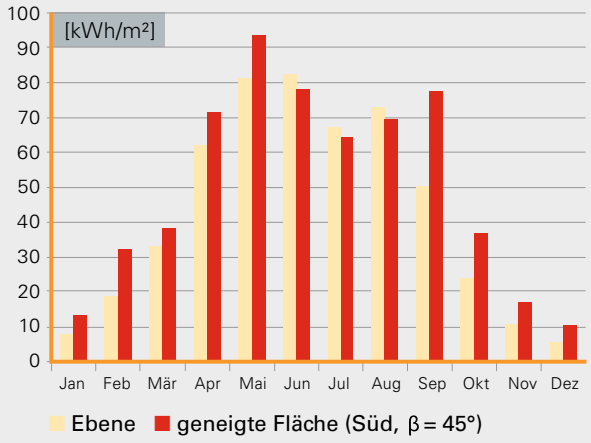


Abb. 9: **Monatliche, nutzbare direkte Strahlungssummen für eine wagrechte Ebene und eine nach Süden ausgerichtete Fläche mit einem Neigungswinkel von 45° für den Raum Würzburg**



Im letzten Schritt wird die gesamte nutzbare Strahlungssumme auf die geneigte Fläche als Summe aus der nutzbaren diffusen und direkten Strahlung berechnet. Für den Monat Januar ergibt sich:

$$GN = 15{,}8\ kWh/m^2 + 13{,}0\ kWh/m^2 = 28{,}8\ kWh/m^2$$

Die Summen der gesamten nutzbaren Strahlung aller Monate sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Klar zu erkennen ist ein deutlicher Jahresgang der nutzbaren Strahlung. Aufsummiert über das Jahr ergibt sich eine nutzbare Strahlung von 1.152 kWh/m².

Vergleicht man die monatlichen Strahlungssummen für die geneigte Fläche mit den entsprechenden Werten der Ebene (Abbildung 8), sieht man zum Teil deutliche Unterschiede in den einzelnen Monaten.

Noch größere Unterschiede zwischen einer Ebene und geneigten Flächen können sich ergeben, wenn lediglich die direkte Strahlung berücksichtigt wird. Dies kommt vor allem bei der Berechnung der nutzbaren Strahlungssummen für Photovoltaikanlagen zum Tragen. Abbildung 9 zeigt dies für das Beispiel Würzburg.

5.2 Dimensionierung von thermischen Solaranlagen zur Warmwassererzeugung mit Heizungsunterstützung

Unter der Annahme eines täglichen Warmwasserverbrauchs von 40 Litern pro Person und einer benötigen Kollektorfläche von 1,5 m² pro Person (Flachkollektor, oberer Wert von 1–1,5 m² pro Person) ergibt sich für einen Vier-Personen-Haushalt eine Gesamtkollektorfläche von

$$4 \cdot 1{,}5\ m^2 = 6\ m^2$$

Das benötigte Speichervolumen der Anlage beträgt in etwa das 1,5–bis 2fache des täglichen Warmwasserverbrauchs. Nimmt man einen mittleren Wert von 1,75 an, ergibt sich für einen Vier-Personen Haushalt ein Speicherbedarf von

$$40\ \ell \cdot 4 \cdot 1{,}75 = 280\ \ell$$

Der benötigte Energiebedarf für die Brauchwassererwärmung lässt sich anhand des Warmwasserbedarfs WB, der Zahl der Verbrauchstage t und dem Faktor σ = 0,05 kWh/l (unter Zugrundelegung einer Aufwärmspanne von 35 K und einem Speicherverlust von 20 %) abschätzen:

$$E_{Be} = WB \cdot t \cdot \sigma$$

Für einen Vier-Personen Haushalt ergibt dies einen Wert von

$$E_{Be} = 280\ \ell \cdot 365 \cdot 0{,}05\ kWh/\ell = 5.110\ kWh$$

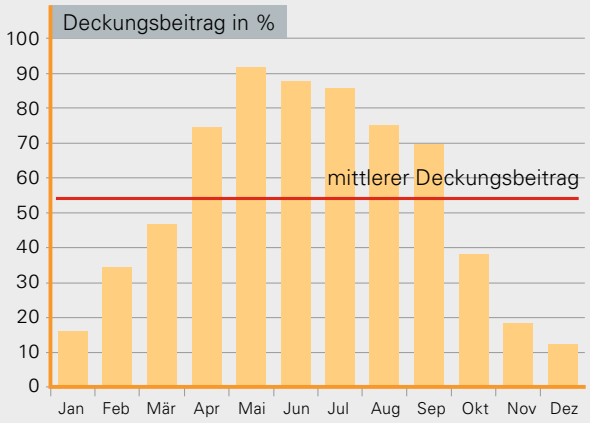
Das jährlich nutzbare Energieangebot eines Standorts EAn errechnet sich aus der nutzbaren Globalstrahlung, der Kollektorfläche A und dem Wirkungsgrad η

$$E_{An} = GN \cdot A \cdot \eta$$

Nimmt man einen Wirkungsgrad von 40 % an, errechnet sich für den Standort Würzburg für eine um 45° geneigte, nach Süden ausgerichtete Fläche für einen Vier-Personenhaushalt ein jährlich nutzbares Energieangebot von rund

$$E_{An} = 1.152\ kWh/m^2 \cdot 6\ m^2 \cdot 0{,}40 = 2.765\ kWh$$

Abb. 10: **Monatliche Verteilung des mittleren solaren Deckungsbeitrages einer thermischen Solaranlage**



Mit der vorgegebenen thermischen Solaranlage lässt sich somit im Mittel über das gesamte Jahr für einen Vier-Personenhaushalt in Würzburg ein solarer Deckungsbeitrag von rund 54 % erzielen. Dabei ist klar, dass große monatliche Differenzen bestehen, wie Abbildung 10 zeigt.

5.3 Erträge von Photovoltaik-Anlagen

Die solaren Stromerträge und die monetären Erträge einer Photovoltaik-Anlage werden beispielhaft für den Standort München dargestellt. Eine nach Süden ausgerichtete Anlage mit einem Neigungswinkel von 30° liefert in dieser Region einen jährlichen Stromertrag von rund 900 kWh pro kWp.

Für eine 4-kWp-Anlage ergibt dies einen Jahresenergieertrag von rund 3.600 kWh (= 900 kWh · 4). Die monetären Erträge errechnen sich aus den solaren Jahresstromerträgen und der Einspeisevergütung nach EEG 2009, die bei einer Inbetriebnahme der Anlage innerhalb der ersten Jahreshälfte 2010 bei 0,3914 €/kWh lag. Dies ergibt einen jährlichen Ertrag von rund

3.600 kWh · 0,3914 €/kWh = 1.409 € pro Jahr.

Dem gegenüber stehen Investitionskosten und Betriebskosten. Die Investitionskosten errechnen sich für eine 4-kWp-Anlage unter Annahme von 3.600 € pro 1 kWp auf 14.400 €. Die jährlichen Betriebskosten, die ca. 1,5 % der Investitionskosten betragen, belaufen sich auf 216 € pro Jahr.

Nach 15 Jahren summiert sich der Ertrag auf 21.136 €, während die Summe aller Kosten bei 17.640 € (14.400 € + 15 · 216 €) liegt. Ohne Berücksichtigung von Abschreibungen und steuerlichen Aspekten beträgt der Gewinn damit nach 15 Jahren 3.496 €.

6. Rechtliche Rahmenbedingungen für den Bau von Solaranlagen

6.1 Bauaufsichtliches Verfahren

Solaranlagen (Photovoltaikanlagen zur Stromerzeugung und Sonnenkollektoren zur Wärmeerzeugung) in Verbindung mit Gebäuden bedürfen keiner Baugenehmigung, wenn sie

- in die Dachfläche integriert („in“) oder an der Dachfläche (wobei sie auch mit einem konstruktiv erforderlichen Abstand (ca. 15–20 cm) parallel zur Dachfläche noch als „an“ der Dachfläche betrachtet werden können),
- in die Außenwandfläche integriert („in“) oder an der Außenwandfläche (d.h. parallel zur Außenwand, s.o.),
- auf Flachdächern (auch aufgeständert),

errichtet werden (Art. 57 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. a Doppelbuchst. aa Bayerische Bauordnung – BayBO).

Anders ausgedrückt bedürfen Solaranlagen an Gebäuden nur dann einer Baugenehmigung, wenn sie mehr als ein Drittel der jeweiligen Dach- oder Außenwandfläche umfassen und zudem aufgeständert auf einem Dach, das kein Flachdach ist, errichtet werden bzw. geneigt aus der Fassade heraustreten.

Gebäudeunabhängig können Solaranlagen mit einer Höhe bis zu 3 m und einer Gesamtlänge bis zu 9 m verfahrensfrei errichtet werden (Art. 57 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. a Doppelbuchst. bb BayBO)

Nach Art. 57 Abs. 2 Nr. 9 BayBO sind Solarenergieanlagen und Sonnenkollektoren – und zwar unabhängig von ihrer Fläche – verfahrensfrei, wenn sie im Geltungsbereich einer städtebaulichen oder einer Satzung nach Art. 81 BayBO liegen, die Regelungen über die Zulässigkeit, den Standort und die Größe der Anlage enthält, und sie den Festsetzungen der Satzung entsprechen.

Verfahrensfreiheit bedeutet insoweit aber lediglich, dass das Bauvorhaben nicht von einer Behörde vorab auf seine baurechtliche Zulässigkeit überprüft wird. Der Bauherr ist für die Einhaltung der Vorschriften, die bei der Errichtung von Solaranlagen beachtet werden müssen, selbst verantwortlich. So können z.B. örtliche Bauvorschriften zum Ensembleschutz oder zum Denkmalschutz einer Errichtung entgegen stehen. Eine Anfrage bei der Gemeinde oder dem Landratsamt ist zu empfehlen.

Im Übrigen findet, soweit die Ausweisung von Flächen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen in qualifizierten Bebauungsplänen nach § 30 Abs. 1 BauGB erfolgt, bei Vorliegen der übrigen Voraussetzungen des Art. 58 Abs. 1, Abs. 2 BayBO das Genehmigungsfreistellungsverfahren statt. Insoweit ist besonders darauf hinzuweisen, dass Freiflächen-Photovoltaikanlagen unabhängig von ihrer Größe keine Sonderbauten – auch nicht nach Art. 2 Abs. 4 Nr. 18 BayBO – darstellen.

Photovoltaikfreiflächenanlagen, die die o.g. Grenzen überschreiten oder nicht die Voraussetzungen des Art. 57 Abs. 2 Nr. 9 BayBO erfüllen, unterliegen prinzipiell einer baurechtlichen Genehmigungspflicht (Art. 55 BayBO).

6.2 Bauplanungsrechtliche Anforderungen

Im Baugenehmigungsverfahren prüft die zuständige Bauaufsichtsbehörde insbesondere die bauplanungsrechtlichen Vorgaben, die in den §§ 29 ff Baugesetzbuch (BauGB) geregelt sind.

Für die Zulässigkeit nach bauplanungsrechtlichen Gesichtspunkten kommt es maßgeblich darauf an, wo das Bauvorhaben ausgeführt werden soll. Das Bauplanungsrecht kennt insoweit drei Bereiche – Vorhaben im Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplanes, innerhalb der im Zusammenhang bebauten Ortsteile oder im Außenbereich. Je nachdem, wo das Vorhaben zur Ausführung kommen soll, werden unterschiedliche rechtliche Zulässigkeitsanforderungen gestellt.

Im planungsrechtlichen Außenbereich soll das Bauen beispielsweise grundsätzlich unterbleiben. Lediglich unter bestimmten Voraussetzungen lässt das Gesetz in § 35 BauGB zu, dass Bauvorhaben im Außenbereich gleichwohl ausgeführt werden dürfen. Dabei ist zwischen sog. privilegierten Vorhaben einerseits und sonstigen Vorhaben andererseits zu unterscheiden.

Die privilegierten Vorhaben sind in § 35 Abs. 1 Nrn. 1 bis 7 BauGB abschließend aufgeführt. Es handelt sich dabei um solche Anlagen, die nach ihrer Zweckbestimmung oder wegen ihrer Auswirkungen auf die Umgebung in den Außenbereich gehören. Sie sind zulässig, wenn ihre Erschließung gesichert ist und – in § 35 Abs. 3 BauGB beispielhaft aufgezählte – öffentliche Belange (z.B. Darstellungen in einem Flächennutzungs- oder Landschaftsplan, Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege oder die natürliche Eigenart der Landschaft) nicht entgegenstehen.

Unter die Privilegierung fallen beispielsweise bauliche Anlagen, die einem landwirtschaftlichen Betrieb dienen. Daneben erfüllen auch Vorhaben zur Nutzung von Windenergie den Privilegierungstatbestand.

Solaranlagen zählen zwar nicht zu dem Kreis privilegierter Vorhaben. Dies hat jedoch nicht zur Folge, dass eine Genehmigung aus bauplanungsrechtlichen Gründen heraus nicht in Betracht käme. Als sog. sonstiges, d.h. nicht privilegiertes Vorhaben sind Solaranlagen jedoch nur zulässig, wenn öffentliche Belange nicht beeinträchtigt werden. Die Formulierung „nicht beeinträchtigt“ zeigt, dass sich die öffentlichen Belange gegenüber sonstigen Vorhaben eher durchsetzen als gegenüber privilegierten und daher die Schwelle, ab der eine Genehmigung versagt werden muss, viel früher erreicht wird. Demgemäß ist im Grundsatz davon auszugehen, dass die planungsrechtliche Zulässigkeit großflächiger Photovoltaikanlagen, die im Außenbereich als selbstständige Anlagen errichtet werden sollen, nur im Wege einer gemeindlichen Bauleitplanung herbeigeführt werden kann. Hierfür bietet sich insbesondere hinsichtlich der Art der baulichen Nutzung die Festsetzung eines sonstigen Sondergebiets (§ 11 Abs. 2 BauNVO) für Solarenergienutzung an. Die entsprechende Bauleitplanung ist den Zielen der Raumordnung anzupassen, § 1 Abs. 4 BauGB.

6.3 Naturschutzrechtliche Anforderungen

Naturschutzrechtlich ist bei der Errichtung von Photovoltaik-Anlagen, die im Außenbereich als selbstständige Anlagen errichtet werden sollen, insbesondere Art. 6 Abs. 1 Bayerisches Naturschutzgesetz (BayNatSchG) zu beachten. Eingriffe in Natur und Landschaft sind nach Art. 6 Abs. 1 BayNatSchG Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können. Erheblich ist die Beeinträchtigung dann, wenn die Veränderung eine gewisse Schwere aufweist, was im Hinblick auf die Ziele von Naturschutz und Landschaftspflege zu bestimmen ist. Vermeidbare Beeinträchtigungen sind vorrangig zu unterlassen, unvermeidbare Beeinträchtigungen sind vorrangig auszugleichen oder in sonstiger Weise zu kompensieren (sog. Eingriffsregelung, Art. 6a BayNatSchG).

Soll die Zulässigkeit von Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Wege einer Bauleitplanung herbeigeführt werden, ist über die Vermeidung und den Ausgleich nach den Vorschriften des BauGB zu entscheiden, § 21 Abs. 1 BNatSchG i.V.m. § 1a Abs. 3 BauGB. Über die Vermeidung des Eingriffs bzw. ggf. dessen Ausgleich ist damit im jeweiligen Bauleitplan zu entscheiden.

7. Verwendete und weiterführende Literatur

- **Häckel, H., (2005):**
  Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- **Hanus, B., Stempel. U., (2008):**
  Alternative Energien im Haus nutzen.
  Das große Praxiswerkbuch. – Poing : Franzis, 378 S.
- **BINE (2008):**
  Solare Wärme. Vom Kollektor zur Hausanlage.
  Klaus Oberzig, Ulrich Luboschik, Jean-Marc Suter
  Hrsg.: Fachinformationszentrum FIZ Karlsruhe,
  Gesellschaft für Wissenschaftlich-Technische
  Information mbH, BINE Informationsdienst, Bonn;
  2. überarbeitete Auflage, 155 S.
- **Oberzig, K., Luboschik, U., Suter, J.M., (2008):**
  Solare Wärme. Vom Kollektor zur Hausanlage.
  BINE-Informationspaket.
  Hrsg.: Fachinformationszentrum FIZ Karlsruhe,
  Gesellschaft für Wissenschaftlich-Technische
  Information mbH, BINE Informationsdienst, Bonn;
  2. überarbeitete Auflage, 159 S.
- **Palz, W., Greif, J. (1996):**
  European Solar Radiation Atlas, Springer-Verlag,
  Berlin/Heidelberg/New York.
- **Schönwiese, C.D. (1994):**
  Klimatologie, UTB-Verlag, Stuttgart, 436 S.
- **Stiftung Warentest,**
  Finanztest, Heft 8/2009
- **VDI 2067, Blatt 12:**
  Energiebedarf für Brauchwassererwärmung

BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung.

Unter Telefon **089 122220** oder per E-Mail unter **direkt@bayern.de** erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

IMPRESSUM

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
Prinzregentenstraße 28 | 80538 München
Postanschrift 80525 München
Telefon 089 2162-0
Telefax 089 2162-2760
poststelle@stmwi.bayern.de
www.stmwi.bayern.de

Inhaltliche Konzeption: geoKLIM consulting
Birkenstraße 33a | 85757 Karlsfeld | www.geoklim.de

Bildnachweis: Bildunion | Oliver Krawczyk
BMU | Bernd Müller
Pitopia | Kornelia Clauss | 2008

Gestaltung: Technisches Büro im StMWi

Stand: August 2010 | Aktualisierte Fassung 2015

www.stmwi.bayern.de
Kosten abhängig vom Netzbetreiber

HINWEIS

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben von parteipolitischen Informationen oder Werbemitteln. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts kann dessen ungeachtet nicht übernommen werden.

Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
www.stmwi.bayern.de