



**Institut für Meteorologie
Universität für Bodenkultur**

 **Met**

Universität für Bodenkultur Wien
Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Meteorologie (BOKU-Met)

Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Tempera- turszenarien für Wien und ausgewählte Analy- sen bezüglich Adaptionstrategien

Bericht 1. Teil

Herbert Formayer

Patrick Haas

Michael Hofstätter

Sabine Radanovics

Helga Kromp-Kolb

Wien, im Dezember 2007

Im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung - MA 22 der Stadt Wien
gemeinsam mit der MA 27 - EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung

Inhaltsangabe

0	EINLEITUNG - MOTIVATION.....	3
0.1	KERNERGEBNISSE DIESER ARBEIT:	5
1	KLIMAMODELLE UND KLIMASZENARIEN	6
1.1	EINLEITUNG	6
1.2	ZUSAMMENFASSUNG	7
1.3	Globale Klimamodellierung	8
1.4	Regionalmodelle und Klimatrends für Europa	11
1.5	Lokale Klimaszenarien für Wien	15
2	ANALYSEN DER TEMPERATURSZENARIEN	20
2.1	EINLEITUNG	20
2.2	ZUSAMMENFASSUNG	21
2.3	AUSWERTE- UND DARSTELLUNGSMETHODEN.....	22
2.4	AUSWERTUNG VON SCHWELLENWERTEN.....	22
2.4.1	<i>Eis- und Frosttage</i>	22
2.4.2	<i>Hitzetage</i>	24
2.4.3	<i>Hitzeperioden</i>	26
2.4.4	<i>Vegetationsperiode</i>	28
2.5	AUSWERTUNG VON TEMPERATURSUMMEN.....	29
2.5.1	<i>Heizgradtage</i>	29
2.5.2	<i>Kühlgradtage</i>	30
2.5.3	<i>Temperatursumme nach Harlfinger (Weinqualität)</i>	32
2.6	VERGLEICH INNENSTADT ZU STADTRAND.....	33
3	STRAHLUNGSEVALUIERUNG	36
3.1	EINLEITUNG	36
3.2	ZUSAMMENFASSUNG	37
3.3	MONATSSUMMEN.....	38
3.4	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER TAGESSUMMEN DER GLOBALSTRAHLUNG...	40
4	DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	45
5	LITERATURVERZEICHNIS.....	46
6	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	48
7	ANHANG.....	51

0 Einleitung - Motivation

Nach dem 2007 erschienenen Grünbuch der EU „Anpassung an den Klimawandel – Optionen für Maßnahmen der EU“ (KOM(2007)) stellt der Klimawandel „heute eine doppelte Herausforderung dar. Erstens können die schwerwiegenden Folgen der Klimaänderung nur durch eine frühzeitige und drastische Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) verhütet werden. Zweitens sehen sich Gesellschaften, da die Klimaänderung bereits im Gang ist, weltweit gleichzeitig vor die Herausforderung gestellt, sich den Auswirkungen des Klimawandels anzupassen, da ein bestimmtes Maß an Klimaänderung in diesem Jahrhundert und darüber hinaus nicht mehr aufzuhalten ist, selbst wenn die weltweiten Klimaschutzmaßnahmen in den kommenden Jahrzehnten erfolgreich sind. Obgleich Anpassungsmaßnahmen daher eine unvermeidbare und unerlässliche Ergänzung zum Klimaschutz geworden sind, sind sie keine Alternative zur Verringerung der THG-Emissionen“. Die Anpassung hat ihre Grenzen. Sobald bestimmte Temperaturschwellen überschritten werden, muss mit bestimmten schweren und irreversiblen Klimaauswirkungen (z. B. Umsiedlung von Bevölkerungen) gerechnet werden. Es geht daher nicht um ein entweder Klimaschutz oder Klimaanpassung, sondern immer um ein sowohl Minderungsmaßnahmen als auch Anpassung.

Dies zu verstehen und auch der Öffentlichkeit zu vermitteln ist wichtig, da der Erfolg der Politik an beidem gemessen werden wird: die Minderungsmaßnahmen drücken sich in Zahlen wie dem Erreichungsgrad der Kyoto-Ziele aus oder in Tonnen CO₂-Reduktion und sind derzeit prominent in den Medien, sie sind aber für den Einzelnen / die Einzelne nicht direkt erlebbar. Fehlende Anpassungsmaßnahmen sind jedoch für jeden Einzelnen / jede Einzelne spürbar und drücken sich in Verlust an Lebensqualität oder gar in Toten pro Hitzewelle oder Überschwemmung aus. Wird auch heute noch so manches Wetterereignis als „höhere Gewalt“ hingenommen, so ist doch davon auszugehen, dass immer häufiger die Frage nach der grundsätzlichen Vorhersehbarkeit der Entwicklung gestellt wird. Dann wird auch verglichen werden, wie unterschiedliche Staaten und Regionen, aber auch Städte sich auf diese absehbaren Entwicklungen vorbereitet haben.

Nach dem oben zitierten Grünbuch der EU dienen Anpassungsmaßnahmen „der Bewältigung der Folgen eines sich wandelnden Klimas (z.B. verstärkte Niederschläge, höhere Temperaturen, Wasserknappheit oder häufiger auftretende Stürme) bzw. der Vorwegnahme künftiger solcher Veränderungen. Anpassung zielt darauf ab, die Risiken und Schäden gegenwärtiger und künftiger negativer Auswirkungen kostenwirksam zu verringern oder potenzielle Vorteile zu nutzen. Beispiele für Anpassungsmaßnahmen umfassen u.a. die effizientere Nutzung knapper Wasserressourcen, die Anpassung von Baunormen an künftige Klimabedingungen und Witterungsextreme, den Bau von Infrastrukturen für den Hochwasserschutz und die Anhebung der Deiche gegen den Anstieg des Meeresspiegels, die Entwicklung trockenheitstoleranter Kulturpflanzen, die Verwendung sturm- und brandresistenterer Baumarten und Forstbewirtschaftungspraktiken sowie die Aufstellung von Raumplänen und die Anlage von Korridoren zur Förderung der Artenmigration. Die Anpassung beinhaltet sowohl nationale als auch regionale Strategien sowie praktische Maßnahmen auf Gemeinschaftsebene oder von Privatpersonen; sie kann vorgreifend oder reaktiv sein, und sie betrifft sowohl natürliche als auch Humansysteme.“

Während manche Anpassungsmaßnahmen in erster Linie in der Hand der Betroffenen liegen, sind andere eindeutig Aufgaben der Kommunen, und wieder andere die der Regierungen. Bei der Anpassung an den Klimawandel kommt es zu ebenenübergreifenden Entscheidungen, an denen von einzelnen Bürgern und Behörden bis zur EU-Ebene alle Akteure beteiligt sind. Auf Nationaler Ebene geht es vor allem um die Entwicklung von Anpassungsstrategien und die Verbesserung des Katastrophen- bzw. Krisenmanagements. Auf Regionaler Ebene stehen vor allem Planungsbehörden vor der Herausforderung Mindestanforderungen für Raumplanung, Flächennutzung und Änderungen der Flächennutzung unter Anpassungsgesichtspunkten zu erstellen und gegebenenfalls auch spezifische technische Leitfäden, Fallstudien und bewährte Praktiken bekannt zu machen. So könnte auch ein Beitrag zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit, der politischen Entscheidungsträger und der Berufstände geleistet werden.

Das Grünbuch geht aber davon aus, dass „viele Entscheidungen, die die Anpassung an den Klimawandel direkt oder indirekt beeinflussen, auf lokaler Ebene getroffen (werden), wo außerdem genaue Informationen über die natürlichen und humanen Bedingungen vor Ort zur Verfügung stehen. Insofern haben die örtlichen Behörden eine wichtige Rolle zu spielen. Verhaltensänderungen innerhalb von Gesellschaften und Gemeinschaften hängen weitgehend vom Problembewusstsein ab. Bürger und Akteure sind sich möglicherweise noch nicht im Klaren über Ausmaß und Umfang dessen, was auf sie zukommt, und wie dies ihre Tätigkeiten beeinflussen wird.“

Maßnahmen sollten auf der jeweils geeignetsten Ebene getroffen werden. Proaktives Vorgehen auf allen Ebenen wird eine Schlüsselrolle spielen, denn frühzeitiges Interervenieren bringt deutliche wirtschaftliche Vorteile, weil potenziellen Schäden vorgegriffen wird und Gefahren für Ökosysteme, menschliche Gesundheit, wirtschaftliche Entwicklung, Besitztum und Infrastrukturen minimiert werden. Außerdem könnten europäische Unternehmen, die bei Anpassungsstrategien und –technologien führend sind, Wettbewerbsvorteile erwirtschaften. Bei glaubhaft prognostizierten Klimaauswirkungen muss der Anpassungsprozess daher jetzt beginnen.

0.1 Kernergebnisse dieser Arbeit:

- **Hauptergebnis dieser Arbeit sind fehlerkorrigierte Klimaszenarien für die Temperatur auf Tagesbasis (Temperaturmaximum und Temperaturminimum) an fünf Standorten in Wien für das gesamte 21. Jahrhundert. Weiters erfolgt eine Evaluierung der Ergebnisse von regionalen Klimamodellen hinsichtlich der Sonnenstrahlung.**
- **Um das Potenzial der möglichen Anwendung dieser Szenarien aufzuzeigen, wurden ausgewählte Temperaturindizes ausgewertet und grafisch dargestellt. Hierbei wurden sowohl Überschreitungen von Grenzwerten (z.B. Hitzetage) untersucht, als auch kumulierende Effekte (z.B. Temperatursummen).**
- **Alle regionalisierten Temperaturszenarien zeigen eine deutliche Erwärmung. Diese allgemeine Erwärmung und der überproportionale Anstieg der sehr heißen Temperaturen, werden markante Auswirkungen auf die Vegetation, die Behaglichkeit der Menschen, den Energieverbrauch, aber auch auf die Infrastruktur haben.**
- **Alle Regionalen Klimamodelle haben Probleme die Sonnenstrahlung in Wien zu reproduzieren. In allen Jahreszeiten zeigen die Modelle eine Überschätzung der Strahlung. Im Winterhalbjahr dürfte dies an der Unterschätzung der Hochnebellagen liegen, im Sommer hingegen an einer Unterschätzung der konvektiven Bewölkung (Quellwolken).**
- **Auf Monatsbasis ist eine Korrektur der Strahlung möglich, auf Tagesbasis hingegen müsste ein komplexes Korrekturverfahren erst entwickelt werden.**
- **Die Temperaturszenarien können ab der Mitte des 21. Jahrhunderts als sehr verlässlich angesehen werden. Speziell für den Zeitraum 2070 bis 2100 stehen 6 verschiedene Szenarien aus 3 verschiedenen Klimamodellen zur Verfügung, welche eine große Bandbreite möglicher Temperaturentwicklungen in Wien aufzeigen.**
- **Die Anwendungsmöglichkeiten der in dieser Studie produzierten Temperaturszenarien sind vielfältig. Hier einige Beispiele:**
 - **Thermische Verhältnisse in Gebäuden**
 - **Thermische Belastung der Menschen**
 - **Auswirkungen auf die Vegetation (Landwirtschaft, Parkanlagen)**
 - **Auswirkungen auf das Freizeitverhalten**
 - **Auswirkungen auf die Infrastruktur (Straßenbelag, etc.)**
 - **Auswirkungen auf den Energiebedarf**

1 Klimamodelle und Klimaszenarien

1.1 Einleitung

Dieser Teil der Arbeit basiert groÙteils auf den Ergebnissen einer Studie im Auftrag der Klimaschutzkoordinationsstelle Wien (Formayer et. al, 2007), welche eine Synthese aller bisherigen Untersuchungen bezuglich Klimawandel und Auswirkungen in Wien beinhaltet. Dieses Kapitel enthalt allgemeine Informationen bezuglich regionaler Klimamodellierung. Zusatztlich gibt es eine Zusammenschau aller bisherigen, fur Wien durchgefuhrtten Klimaanderungsuntersuchungen.

1.2 Zusammenfassung

- **Aufgrund der Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen, sowie der Aussagen der globalen Klimamodelle für Mitteleuropa und der Regionalisierungsverfahren sollten immer mehrere regionale Szenarien betrachtet, also Ensembleuntersuchungen durchgeführt werden.**
- **Die Unsicherheiten der globalen Modelle und der Regionalisierungsverfahren hängen von dem betrachteten meteorologischen Parameter ab.**
- **Aussagen über die künftigen Temperaturentwicklungen sind am besten abgesichert; es können daher auch Aussagen über Extremwerte abgeleitet werden.**
- **Aussagen über die Entwicklungen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts sind deutlich stabiler, als jene für die kommenden Dekaden.**
- **Beim Niederschlag sind die Unsicherheiten deutlich größer. Die saisonale Verlagerung der Niederschläge und eine Zunahme der Niederschlagsintensität sind jedoch gut abgesichert.**
- **Aussagen bezüglich kleinräumiger, kurzfristiger, extremer Starkniederschläge sind derzeit noch nicht direkt aus regionalen Modellen ableitbar, Plausibilitätsüberlegungen machen jedoch einen Anstieg wahrscheinlich.**
- **Trockenperioden können von den Klimamodellen recht verlässlich modelliert werden, da diese durch großräumige Hochdruckgebiete verursacht werden.**
- **Die Zunahme der Trockenperioden in Kombination mit dem Anstieg der Verdunstung wird zu einer signifikanten Abnahme des Bodenwassergehaltes führen.**
- **Die räumliche Differenzierung von regionalen Klimamodellen reicht derzeit nicht aus, um die Unterschiede innerhalb des Stadtgebietes, oder überhaupt den „Stadteffekt“ direkt zu reproduzieren.**
- **Alle bisher für Wien untersuchten regionalen Klimaszenarien beziehen sich auf die Bedingungen an den meteorologischen Stationen „Hohe Warte“ bzw. „Innere Stadt“. Eine Übertragung der standardisierten Messungen auf die realen Bedingungen in den Straßenschluchten und eine räumliche Differenzierung innerhalb des Stadtgebietes aufgrund der Bebauung usw. wurde bisher noch nicht durchgeführt.**

1.3 Globale Klimamodellierung

Klimamodelle simulieren mit mathematischen Gleichungen das Klimasystem der Erde auf Grundlage von physikalischen Gesetzen und können daher auch zur Berechnung von Veränderungen eingesetzt werden. Sie stellen die Komponenten des Klimasystems und ihre komplexen Wechselwirkungen vereinfacht dar und sind damit kein exaktes Abbild der Realität. Abhängig von den eingesetzten Näherungen können sich die Ergebnisse der einzelnen Modelle unterscheiden. Die Erde wird mit einem fiktiven dreidimensionalen Gitternetz überzogen und für die Gitterpunkte werden die meteorologischen Größen wie Temperatur, Feuchte, Wind berechnet. Die Maschenweite wird durch die Rechenleistung der Computer limitiert. Je enger die Punkte zusammen liegen, desto größer ist die räumlich Auflösung, aber eben auch benötigte Rechenleistung. Die räumliche Auflösung liegt derzeit bei einigen hundert Kilometern. Modelle, mit denen das Weltklima simuliert wird, werden Globale Klimamodelle genannt (GCM). (Kasang, 2007, Kromp-Kolb und Formayer, 2005)

Um verschiedene zukünftige Entwicklungen erfassen zu können, werden unterschiedliche Emissionsszenarien von anthropogene Treibhausgasen entwickelt, mit deren Hilfe dann mögliche Klimaentwicklungen modelliert werden können.

Die bekanntesten Szenarien sind jene des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Es werden vier verschiedene Basisszenarien (A1, A2, B1, B2) und mehrere Szenarienvarianten (A1B, A1FI, A1T ...) unterschieden. Insgesamt gibt es 40 Szenarien mit unterschiedlichen Ausprägungen.

Tabelle 1: Die vier Basisszenarien des "Third Assessment Report" des IPCC. (Döll et al., 2000)

	eher ökonomisch/ materiell orientiert	eher ökologisch/ auf gesell- schaftliche Innovation orientiert
Globalisierung (homogene Welt)	A1	B1
Regionalisierung (heterogene Welt)	A2	B2

Die größte Menge an Treibhausgasen werden im Szenario A2, die geringste im Szenario B1 emittiert. Innerhalb der Szenarienfamilie können wiederum Variationen unterschieden werden.

Die geläufigsten sind A1B, A1FI und A1T. Sie unterscheiden sich im Nutzungsverhältnis von fossilen zu nicht-fossilen Rohstoffen: Im A1FI-Szenario findet eine intensive Nutzung fossiler Rohstoffe statt, das A1T-Szenario setzt verstärkt auf alternative Energiequellen und das A1B-Szenario liegt in der Mitte der beiden zuvor genannten. Es trachtet nach einer ausgewogenen Nutzung aller Rohstoffe. (IPCC, 2002)

Ebenfalls vom IPCC entwickelt, aber älteren Datums, sind die IS 92a Szenarien. Sie „liegen in Hinblick auf die mögliche globale Temperaturzunahme im Mittelfeld der neuen SRES ... Szenarien ...“ (Formayer et al., 2003) und stehen für ein business-as-usual (BAU, weitermachen wie bisher) Verhalten.

Die Verlässlichkeit der Modelle kann überprüft werden, indem sie zur Berechnung des Klimas der Gegenwart herangezogen werden, und die Ergebnisse mit den Aufzeichnungen verglichen werden (Bony et al., 2007). Das Ergebnis eines solchen Versuches ist in Abbildung 1 dargestellt. Die schwarze Linie stellt das beobachtete, die rote das aus mehreren Modellen berechnete mittlere Klima dar. Die Schwankungsbreite der einzelnen Simulationen ist durch den gelben Bereich gekennzeichnet. Die weitgehende Übereinstimmung der Verläufe beider Kurven ist gut zu erkennen.

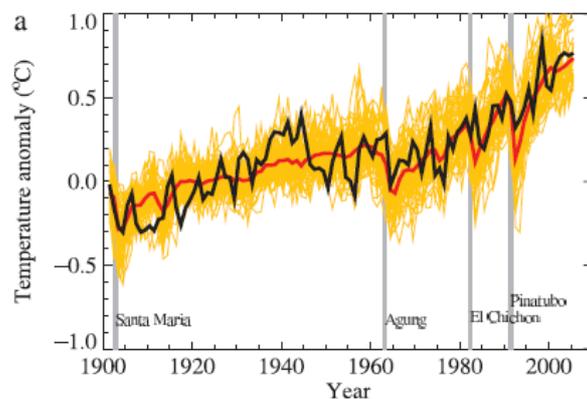


Abb. 1: Vergleich zwischen berechnetem (rot) und beobachteter (schwarz) globalen Mitteltemperatur mit anthropogenem Einfluss (Braconnot et al., 2007)

Vereinzelt wird noch bestritten, dass der Mensch für den Klimawandel verantwortlich sei. Auch diese Aussage kann mit Hilfe von Klimamodellen entkräftet werden. Im Gegensatz zur vorigen Abbildung werden nun in Abbildung 2 die anthropogenen Einflüsse auf das Klima negiert. Deutlich zeigt sich ab den 60ern eine Diskrepanz zwischen modelliertem und beobachtetem Klima.

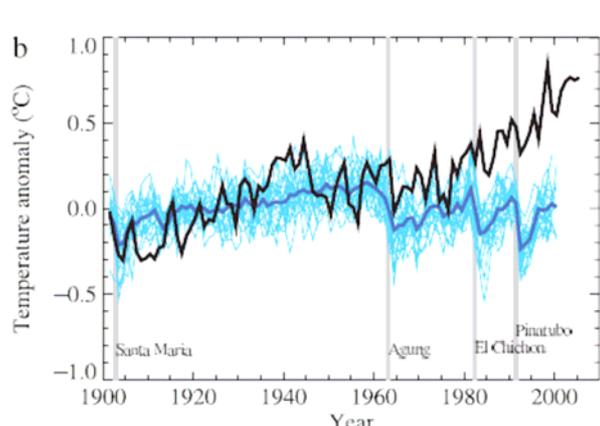


Abb. 2: Vergleich zwischen der ohne anthropogenem Einfluss berechneten (blau) und beobachteten (schwarz) globalen Mitteltemperatur (Braconnot et al., 2007)

Die folgenden Abbildungen sind aus dem vierten Sachstandsbericht des IPCC entnommen. Es werden die A1, A1B und A2 Szenarien für die globale Oberflächentemperatur, sowie das Szenario A1B für den globalen Niederschlag dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die projizierte Änderung der Erdoberflächentemperatur. „Die größte Erwärmung wird über dem Land und in den meisten hohen nördlichen Breiten erwartet, die kleinste über den südlichen Ozean und über Teilen des Nordatlantischen Ozeans.“ (IPCC, 2007) Die mittleren und rechten Grafiken zeigen die Projektion für die oben genannten drei Szenarien. Die Grafiken auf der linken Seite bilden die entsprechenden Unsicherheiten als relative Wahrscheinlichkeiten der geschätzten mittleren globalen Erwärmung aus unterschiedlichen Studien für denselben Zeitraum ab.

Für Mitteleuropa bedeuten die Szenarien einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von 0,5 bis 1,5°C für die Periode 2020 bis 2029, wobei kaum ein Unterschied zwischen den Emissionsszenarien zu erkennen ist. Für den Zeitraum 2090 bis 2099 fällt der Anstieg wesentlich stärker aus. Es kann mit einer Temperaturerhöhung von bis zu 4,5°C für das Szenario A2 gerechnet werden. Gegen Ende des Jahrhunderts zeigt sich auch, wie wichtig die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist.

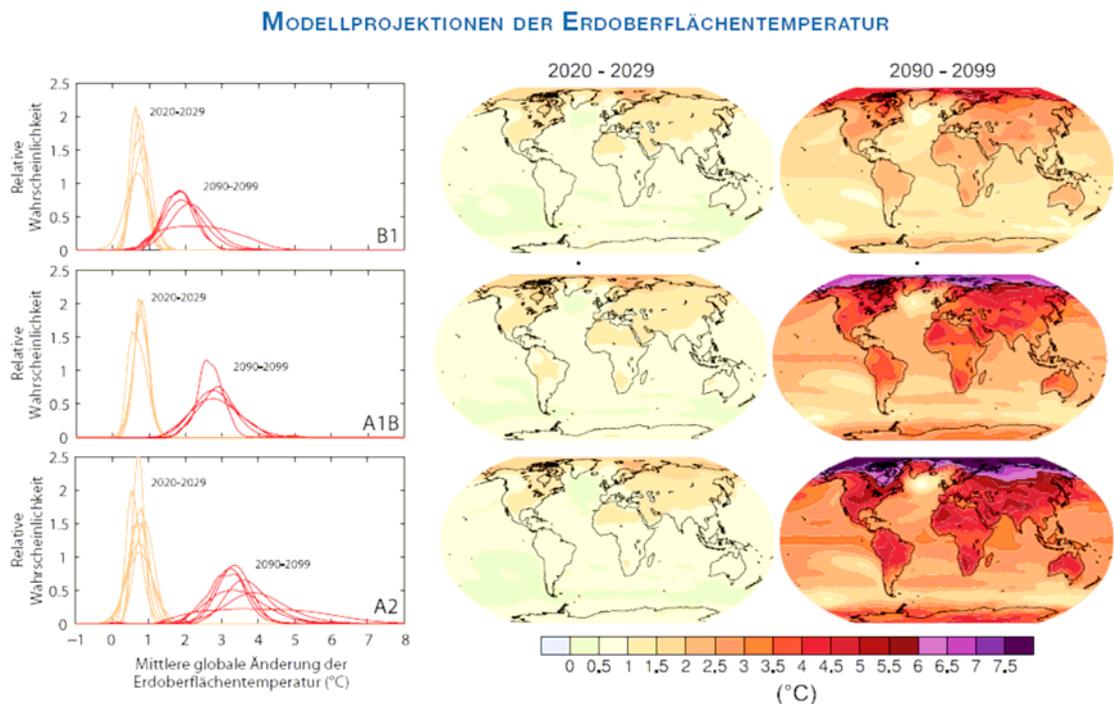


Abb. 3: Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999. (IPCC, 2002)

Auch für den Niederschlag zeigen sich deutliche Veränderungen. Abbildung 4 ist die relative Niederschlagsänderung für die Wintermonate Dezember bis Februar (links) sowie für die Sommermonate Juni bis August (rechts) dargestellt. Die Werte basieren auf dem A1B Szenario. Allgemein werden die Niederschlagsmengen in höheren Breiten sehr wahrscheinlich zunehmen, während eine Abnahme über den meisten subtropischen Landregionen wahrscheinlich ist (IPCC, 2007). Für Mitteleuropa ist in den

Wintermonaten mit einer Niederschlagszunahme zu rechnen (10 bis 20 Prozent), für die Sommermonate muss mit einer Abnahme von bis zu 20 Prozent gerechnet werden.

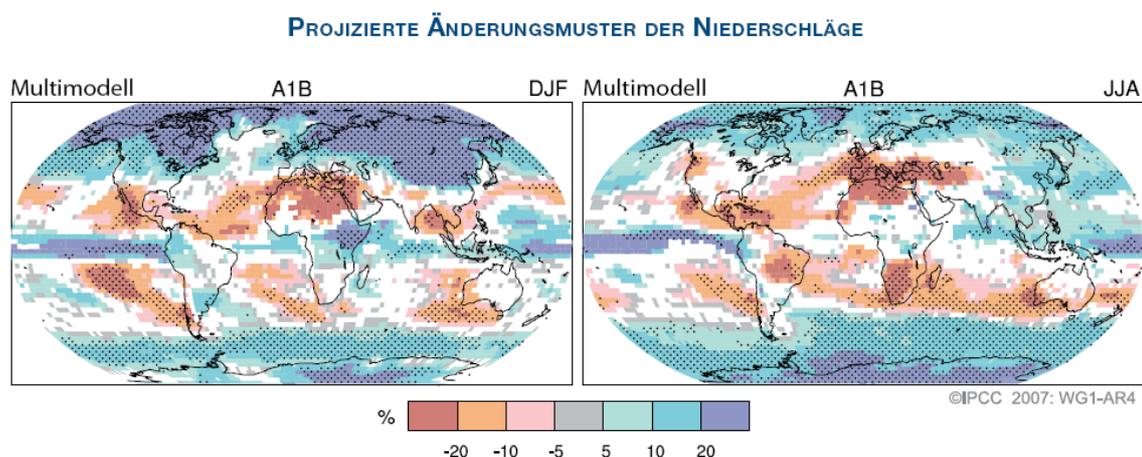


Abb. 4: Relative Änderung der Niederschläge (in Prozent) für die Perioden 2090 bis 2099 im Vergleich zu 1980 bis 1999 (IPCC, 2007)

1.4 Regionalmodelle und Klimatrends für Europa

Wegen der geringen räumlichen Auflösung der GCMs ist eine Interpretation der Ergebnisse nur auf globaler, höchstens aber auf kontinentaler Ebene zulässig (Kromp-Kolb und Formayer, 2005) Um dennoch Aussagen auf regionaler Ebene treffen zu können, bedient man sich verschiedenster Verfahren. Sie sind unter dem Begriff „Downscaling-Methoden“ (auch „Regionalisierung“) zusammengefasst. Dabei kommen Strategien zur Anwendung, die die GCM-Ergebnisse mit regionaler Information konsistent verbinden. (Matulla et al., 2002)

Abbildung 5 zeigt den Vorgang des Downscalings mittels regionaler Klimamodelle (RCM). Alle Modelle werden von GCMs angetrieben. Die Auflösung reicht von rund 300 km für ein GCM bis 10 km für ein regionales Klimamodell.

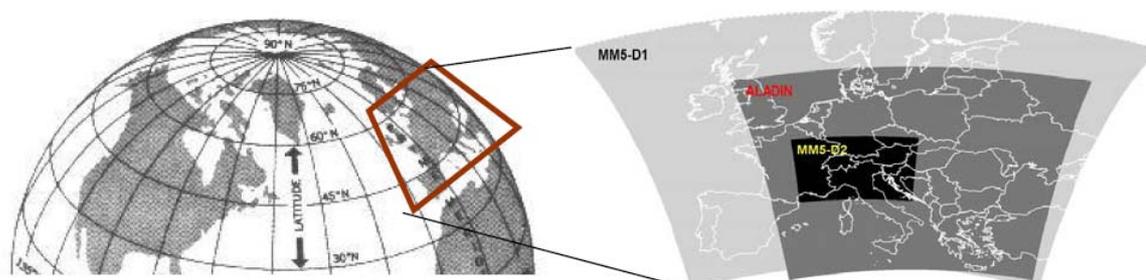


Abb. 5: Schematische Darstellung des Downscaling für Reclip:More (Reclip:More, 2007)

Im Zuge des Reclip:More Projektes wurde ein Downscaling für Österreich verwirklicht. Ziel war es die künftige regionale Klimaentwicklung für Österreich über längere Zeiträume für ein feines Raster (10 km Gitter) zu berechnen. Dabei kamen zwei RCMs (Aladin und MM5) mit nachgeschaltetem statistischem Downscaling zur An-

wendung, sodass sogar eine Zielauflösung von 1 km erreicht werden konnte. Es wurden aktuelle (1981 bis 1990) und künftige (2041 bis 2050) Klimadatensätze in hoher raum-zeitlicher Auflösung generiert. Die RCMs kamen nicht immer zu übereinstimmenden Ergebnissen, sodass noch weiterer Untersuchungsbedarf gegeben ist. Zur Simulation diente das IS 92a Szenario, wo ein gemäßigter Anstieg der CO₂-Konzentration von 350ppm (1990) auf ca. 500 ppm bis 2050 angenommen wird, herangezogen (Reclip:More, 2007)

Abbildung 6 zeigt die Änderung des Temperaturdurchschnittes für den Zeitraum 2041 bis 2050 im Vergleich zu 1981 bis 1990.

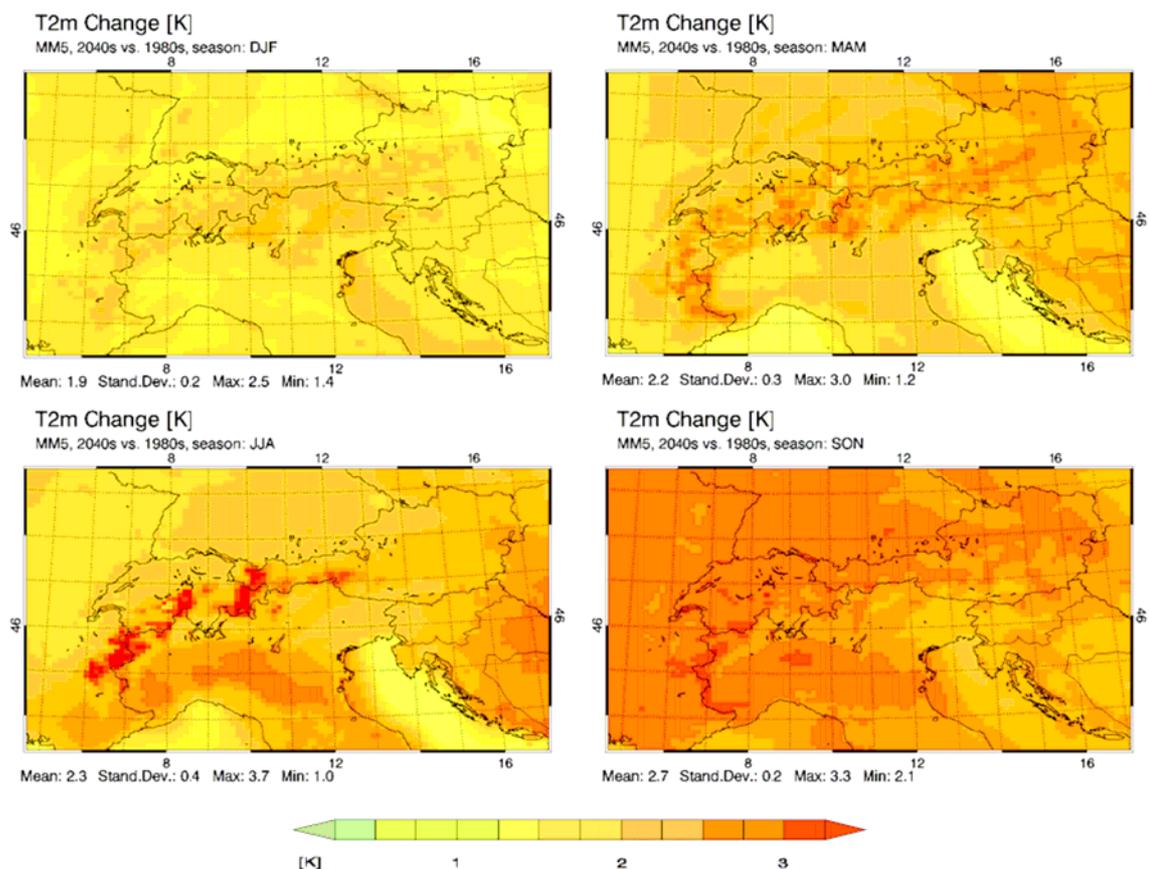


Abb. 6: Änderung des saisonalen Temperaturdurchschnitts (T2m) in °C für 2041 bis 2050 im Vergleich zu 1981 bis 1990. Dargestellt für das Regionalmodell MM5. (Loibl et al., 2007)

Trotz der offenen Fragen, können gewisse Aussagen auch schon auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse getroffen werden. Der Temperaturanstieg wird regional und saisonal unterschiedlich ausfallen. Für die Wintermonate Dezember, Jänner und Februar rechnet man für den Osten Österreichs mit einer Temperaturänderung von plus 1,3 bis plus 1,8°C. Die Monate März, April und Mai werden durchschnittlich um plus 1,8 bis plus 2,5°C wärmer sein als noch 1981 bis 1990. Auch für den Sommer wird mit einem Temperaturanstieg um rund plus 2 bis plus 2,5°C gerechnet. Für den Herbst (September, Oktober und November) erwartet man den stärksten Anstieg. Er bewegt sich zwischen plus 2,5 und plus 3°C. Dieser stärkere Temperaturanstieg im Sommer

und Herbst ist hauptsächlich auf den Niederschlagsrückgang in diesen Jahreszeiten zurück zu führen.

Änderungen sind auch im Niederschlagsmuster sowie in der Niederschlagshäufigkeit zu erwarten (Abbildung 7). Die Niederschläge werden insgesamt abnehmen, vor allem im Osten.

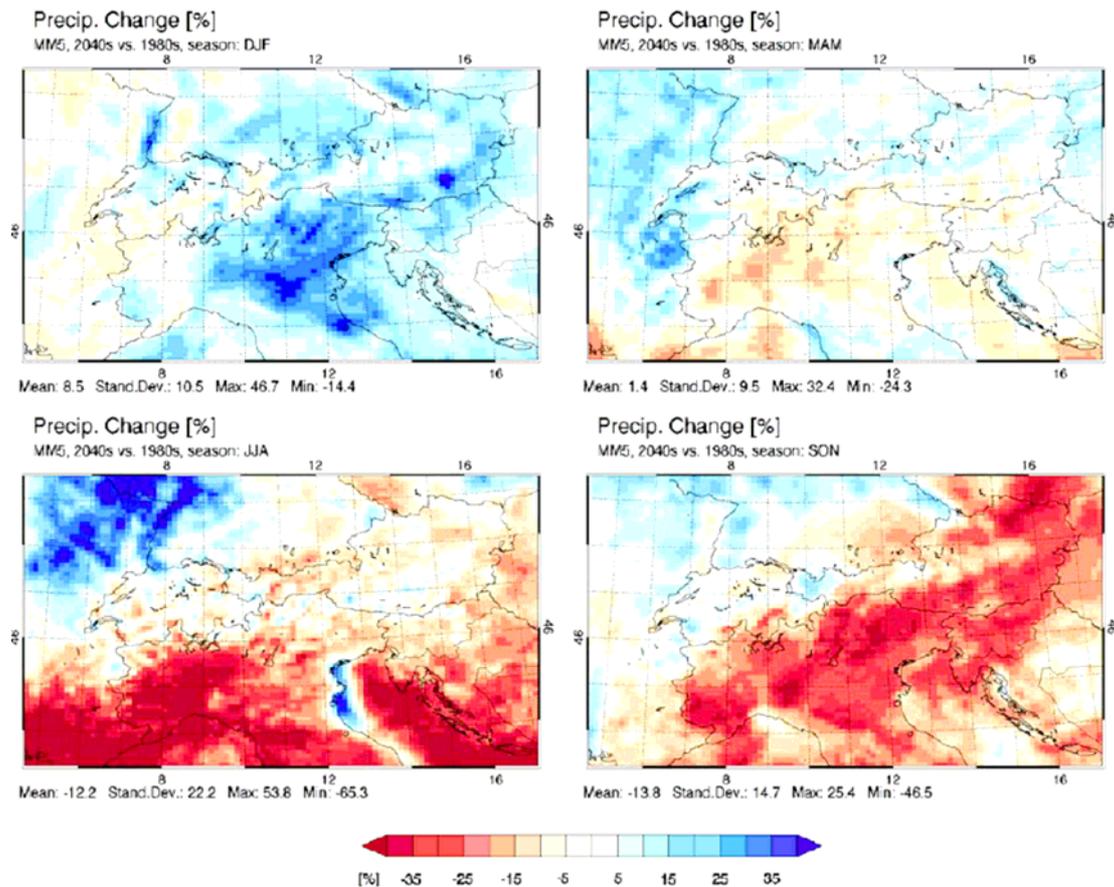


Abb. 7: Änderung des saisonalen Niederschlages in Prozent für 2041 bis 2050 im Vergleich zu 1981 bis 1990. Dargestellt für das Regionalmodell MM5. (Loibl et al., 2007)

Für die Wintermonate Dezember, Jänner und Februar rechnet man für den Osten Österreichs mit einer Niederschlagszunahme von plus 15 bis plus 30 Prozent. Die Monate März, April und Mai werden durchschnittlich mit bis zu 15 Prozent weniger Regen rechnen müssen. Für den Sommer kommen die Modelle zu unterschiedlichen Trends. Die Spanne reicht von minus 5 bis plus 30 Prozent. Auch für den Herbst wird sowohl mit einer Abnahme von minus 25 Prozent als auch mit einer Zunahme von plus 35 Prozent gerechnet. Es zeigt sich hierbei wieder dass es schwieriger ist, Niederschläge richtig zu erfassen, als Temperaturen.

Im Rahmen des EU-Projektes PRUDENCE (Christensen und Christensen, 2007) wurden zwei globale Klimamodelle und 9 regionale Klimamodelle in Europe für den Zeitraum 2070 bis 2100 und mit verschiedenen Emissionsszenarien betrieben. Die Ergebnisse für den Alpenraum für Temperatur und Niederschlag sind in Abbildung 8

hundert keinen signifikanten Unterschied. Im B1 Szenario fällt hingegen dieser Anstieg um 2 Grad schwächer aus.

Die Differenzierung des Temperaturanstieges zwischen den Emissionsszenarien erfolgt jedoch erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. Auffallend bei den REMO-UBA Szenarien ist der geringe Temperaturanstieg in den ersten drei Dekaden des 21. Jahrhundert. Dies dürfte auf das treibende globale Klimamodell ECHAM5 zurück zu führen sein. Bei diesem dürften modellinterne Schwingungen auf dekadischer Zeitskala den Temperaturanstieg aufgrund der Zunahme der Treibhausgase in Mitteleuropa kompensiert haben. Diese geringe Erwärmung während der ersten drei Jahrzehnte sollte nicht überinterpretiert werden. Die REMO-UBA Szenarien stellen für die erste Hälfte des Jahrhunderts eher eine untere Grenze der möglichen Entwicklung dar. So beträgt der Temperaturanstieg bis in die 2040er Jahre rund 1 Grad und ist damit nur halb so groß wie die Ergebnisse von reclip:more.

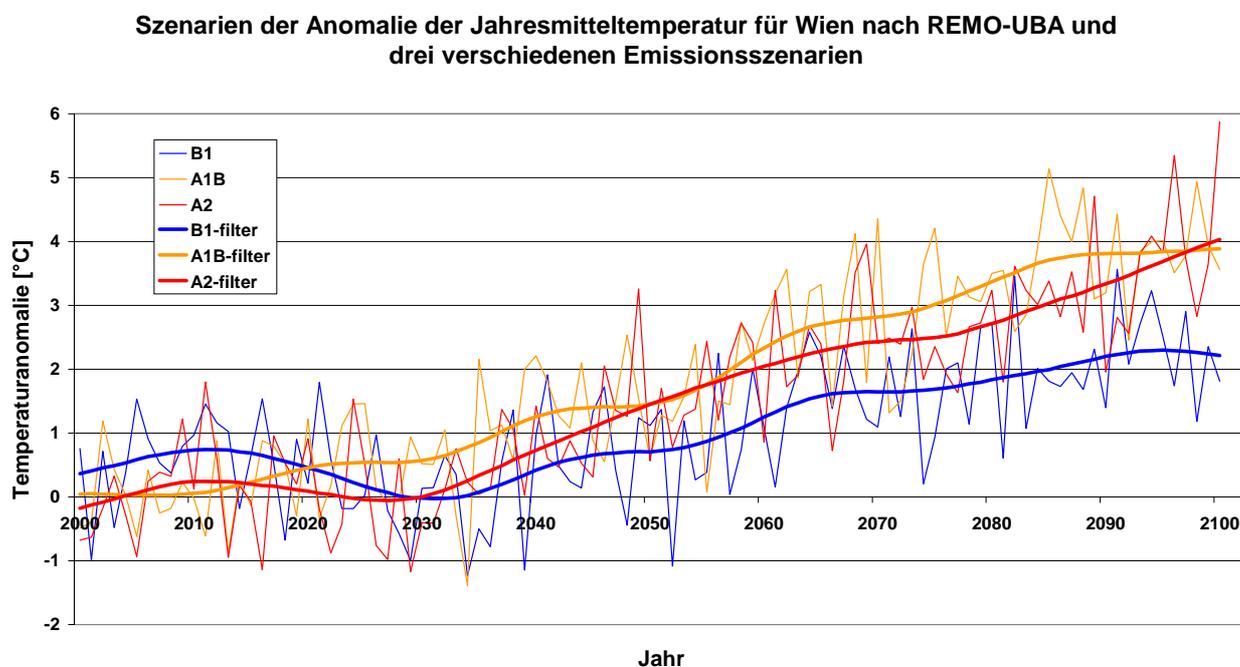


Abb. 9: Anomalie der Jahresmitteltemperaturen in Wien für das 21. Jahrhundert nach REMO-UBA und drei Emissionsszenarien (Einzeljahre und 30 jähriger Gaußfilter).

1.5 Lokale Klimaszenarien für Wien

Lokale Klimaprojektionen müssen auf Basis von globalen Klimamodellergebnissen abgeleitet werden. Durch die Nachschaltung von regionalen Klimamodellen können physikalisch konsistente Ergebnisse erreicht werden, die mesoskalige Effekte wie den Einfluss der Alpen auf die Witterungsverhältnisse berücksichtigen. Dennoch sind die Ergebnisse der Modelle noch nicht so gut, dass sie direkt für die Klimafolgenforschung verwendet werden können. Die Ergebnisse müssen vielmehr anhand von Messdaten fehlerkorrigiert werden. Dieser Schritt wird in Fachkreisen auch als „output localization“ bezeichnet.

Für die Fehlerkorrektur der RCMs werden die Ergebnisse der Kontrollläufe (Mittel aus 9 Gitterpunktwerten über Wien), das sind jene RCM-Läufe die mit den beobachteten Treibhausgaskonzentrationen von 1961 – 1990 betrieben wurden, verwendet. Diese Ergebnisse kann man klimatologisch mit gemessenen Daten vergleichen. Hierzu wurden 5 Wiener meteorologische Stationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet. Monatweise werden dazu die Tageswerte von Temperaturminimum und –maximum der Größe nach gereiht und die Perzentilwerte bestimmt. Für jedes Perzentil wird danach die Temperaturdifferenz zwischen RCM-Ergebnis und den Messungen an der Station bestimmt. Danach werden die Szenarien für die Zukunft ebenfalls gereiht und für jedes Perzentil der aus dem Kontrolllauf bestimmte Modellfehler abgezogen. Dadurch erhält man fehlerkorrigierte Szenariodaten, die dann für die Auswertung verwendet werden können. In Abbildung 10 und 11 ist diese Vorgehensweise für das REMO-UBA Modell im Juli für Wien Hohe Warte dargestellt. Man erkennt, dass die Abweichung bei den sehr niedrigen und sehr hohen Werten höher ist als in den mittleren Bereichen. Die Korrekturfunktion kann je nach Parameter, RCM und Monat sehr unterschiedlich ausfallen.

Die Fehlerkorrektur anhand der Perzentile liefert speziell für sehr hohe und sehr niedrige Werte wesentlich bessere Ergebnisse als eine simple Korrektur mit der mittleren Abweichung. Da für die Klimafolgenforschung jedoch gerade diese Extremwerte - sei es Hitze oder Frost - relevant ist, lohnt sich dieser Mehraufwand. Für diese Methode müssen aber hinreichend viele Tageswerte pro Monat zur Verfügung stehen, um robuste Häufigkeitsverteilungen bestimmen zu können. Deshalb wurden für diese Auswertung nur RCMs verwendet, von denen mindestens 30 Jahre Kontrolllaufdaten zur Verfügung standen. Dadurch musste jedoch auf eine Verwendung der reclip:more Szenarien verzichtet werden.

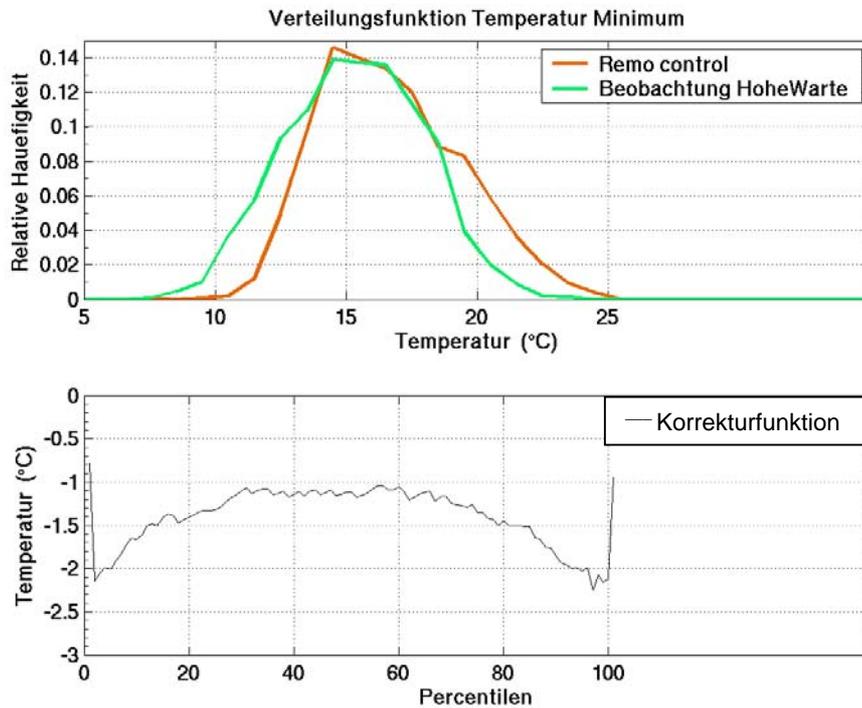


Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Tagesminimumtemperatur im Juli in Wien Hohe Warte beobachtet und REMO-Punkt看wert (oben) und Korrekturfunktion in Abhängigkeit zum Rang des Temperaturwertes (unten).

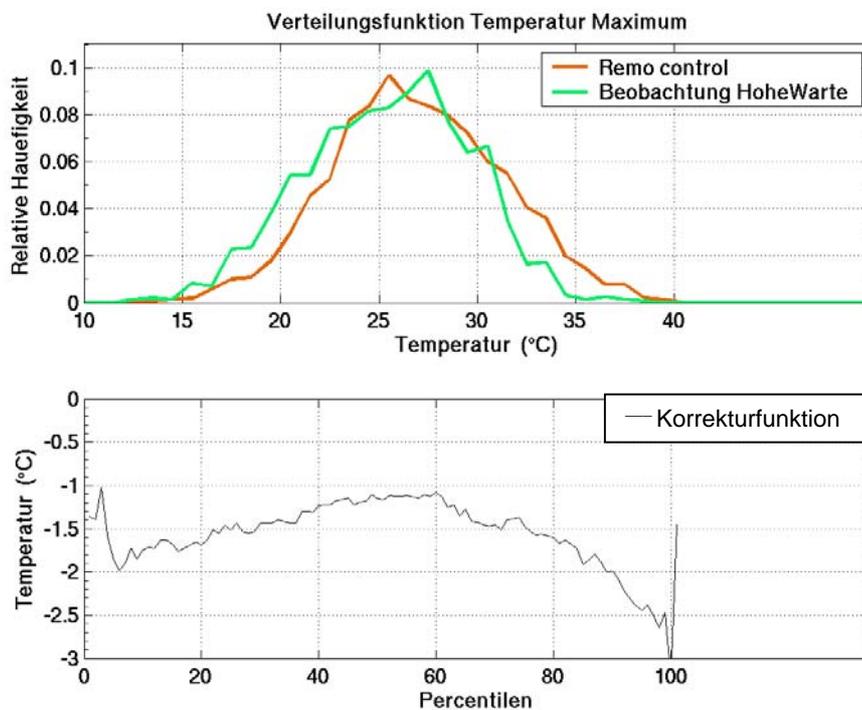


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximumtemperatur im Juli in Wien Hohe Warte beobachtet und REMO-Punkt看wert (oben) und Korrekturfunktion in Abhängigkeit zum Rang des Temperaturwertes (unten)

Bei dem RCM REMO-UBA zeigte sich eine ungewöhnliche Häufung von Temperaturen zwischen 0 und 0.5 °C, wodurch in Monaten in denen dieser Wertebereich vorkommt nicht mit der Perzentilmethode korrigiert werden konnte. Für diese Monate wurde die beobachtete Verteilungsfunktion an der Station mit der mittleren Temperaturänderung (Szenario minus Kontrolllauf) verschoben und der jeweilige Rang im gereihten Szenarienlauf abgegriffen. Wodurch es zu dieser ungewöhnlichen Häufung der Temperaturen in diesen Bereich kommt, konnte noch nicht geklärt werden, es wurde mit der Forschungsgruppe, welche das REMO-Modell betreibt Kontakt aufgenommen.

Durch die Verwendung von 5 meteorologischen Stationen in Wien für die Bestimmung der Korrekturfunktionen, werden den Szenarien die Eigenheiten der jeweiligen Station aufgeprägt. Die Stationsinformationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Leider gibt es jedoch nur von Groß-Enzersdorf und Wien Hohe Warte meteorologische Aufzeichnungen seit 1961, jedoch sind von jeder Station mindestens 10 Jahre Beobachtungsdaten vorhanden. Um für jeden der fünf Standorte Daten für den Zeitraum 1961 bis 2005 zu generieren, wurde für Wien – Donauefeld, Innere Stadt und Mariabrunn pro Monat, Parameter und Perzentil der Unterschied zu Wien Hohe Warte bestimmt und anhand dieser klimatischen Differenz die fehlenden Werte aus den Werten von Wien Hohe Warte approxiiert.

Die durch die Schätzung verursachten Fehler sind im klimatologischen Sinne gering, vorausgesetzt, dass sich die klimatischen Unterschiede zwischen Wien Hohe Warte und dem jeweiligen Standort im jeweiligen Zeitraum nicht verändern. Dies gilt auch für die zukünftigen Szenarien, das heißt Effekte von größeren Landnutzungsänderungen sind in den lokalen Szenarien nicht berücksichtigt. Dies bedeutet aber nicht, dass auch die Unterschiede von Temperaturindizes konstant bleiben müssen.

Tabelle 2: Verwendete meteorologische Stationen der ZAMG

Name	Seehöhe	Charakteristik
Groß-Enzersdorf	153 m	Landwirtschaftlich geprägt. Typisch für den Stadtrand östlich der Donau.
Wien - Donauefeld	161 m	Donaunähe. Typisch für den dicht bebauten Donaueferbereich.
Wien - Hohe Warte	203 m	Locker bebautes Villenviertel. Typisch für den Stadtrand Richtung nördlichen Wienerwald.
Wien – Innere Stadt	171 m	Typisch für das dicht verbaute Stadtgebiet innerhalb des Gürtels.
Wien - Mariabrunn	227 m	Landwirtschaftlich geprägt, leichte Beckenlage. Typisch für den Stadtrand Richtung Westen.

In Tabelle 3 sind die RCMs und Emissionsszenarien, aus denen lokale Zeitreihen für Temperaturminimum und –maximum generiert wurden zusammengestellt. Neben dem bereits besprochenen REMO-UBA Modell wurden auch Szenarien von zwei PRUDENCE Modellen verwendet. Das Modell HIRHAM (Christensen et al., 1996) wird vom dänischen meteorologischen Dienst betrieben und der hier verwendete Modelllauf besitzt mit seinen 12 km eine ähnlich hohe räumliche Auflösung wie die REMO-UBA oder die reclip:more Läufe. Das HadRM3H (Jones et al., 2001) wird vom Hadley Center in England betrieben und ist ein typischer Vertreter der PRUDENCE-Läufe mit 50 km räumlicher Auflösung, wobei dieses Modell eher zu den PRUDENCE-Modellen die eine wärmeren Charakteristik aufweisen, gehört.

Tabelle 3: Verwendete regionale Klimamodelle

Modell	Emissionsszenario	Zeitraum	Räumliche Auflösung	Zusätzliche Parameter
REMO-UBA	B1, A1B, A2	2001-2100	10 km	Globalstrahlung, Niederschlag
HIRHAM	A2	2070-2100	12 km	Globalstrahlung
HadRM3H	B2, A2	2070-2100	50 km	Globalstrahlung

Da das REMO-UBA Modell mit dem globalen Modell ECHAM5 aus Hamburg betrieben wurden und die beiden PRUDENCE-Modelle mit dem englischen globalen Modell HadAM3 besteht das hier für Wien produzierte lokale Ensemble für die Temperatur nicht nur aus drei verschiedenen RCMs sondern auch aus zwei verschiedenen GCMs.

2 Analysen der Temperaturszenarien

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden neue, für diese Studie erstellte regionale Temperaturszenarien für den Großraum Wien vorgestellt. Die Szenarien decken das gesamte 21. Jahrhundert ab und sind für fünf Wiener Standorte fehlerkorrigiert. Die Szenarien werden von verschiedenen regionalen Klimamodellläufen abgeleitet, sodass für den Zeitraum 2070 bis 2100 sogar 6 Szenarien für Ensembleuntersuchungen zur Verfügung stehen. Neben den Szenarien werden auch statistischen Auswertungen verschiedenster Temperaturindizes analysiert und dargestellt. Natürlich stehen dem Auftraggeber alle Daten und Analysen auch in digitaler Form für eigene Auswertungen zur Verfügung. Innerhalb dieses Kapitels werden zu jedem berechneten Temperaturindex nur exemplarische Darstellungen gezeigt. Eine vollständige Darstellung aller Ergebnisse für das REMO-UBA A1B Szenario befindet sich im Anhang.

2.2 Zusammenfassung

- **Wien zeigt einen deutlichen Wärmeinseleffekt. Dieser wirkt sich in erster Linie in den Nachttemperaturen aus (rund 60 Frosttage in der Innenstadt und mehr als 80 Tage am Stadtrand), aber auch die Hitzebelastung ist in der Innenstadt größer (etwa 4 Hitzetage (40 %) mehr in der Innenstadt).**
- **Der Temperaturanstieg seit Mitte der 1970er Jahre zeigt bereits jetzt deutliche Folgen. Die Hitzetage haben um etwa 40 % zugenommen, die Vegetationsperiode ist im Mittel um 5 Tage länger geworden und der Heizbedarf ist um etwa 4 % gesunken.**
- **Das REMO-UBA Modell zeigt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts nur eine langsame Erwärmung. Für diesen Zeitraum kann man diese Szenarien als eine untere Grenze der zu erwartenden Erwärmung betrachten.**
- **Die Hitzebelastung wird im 21. Jahrhundert stark zunehmen. Um 2085 muss man im Mittel mit 23 bis 60 Hitzetagen rechnen (2003 waren es 40). In einzelnen Jahren können sogar mehr als 100 derartige Tage vorkommen. Dies führt zu Hitzewellen, die mehrere Wochen lang anhalten.**
- **Extrem heiße Tage mit Tagesmaxima über 35 °C nehmen überproportional zu. Muss man derzeit etwa alle 5 Jahre mit einem derartigen Ereignis rechnen, so sind diese um 2085 bereits so häufig wie derzeit Hitzetage. Dies kann zu extremer Belastung der Infrastruktur (Straßenbeläge, Schienen) aber natürlich auch der Menschen führen.**
- **Die Erwärmung führt bis 2085 zu einer Reduktion des Heizbedarfs von etwa 20 bis 30 Prozent, gleichzeitig verdreifacht sich jedoch der Kühlbedarf.**
- **Massive Auswirkungen auf die Vegetation sind zu erwarten. Die Vegetationsperiode wird im Mittel um 1,5 Monate länger werden, in Extremszenarien sogar 2 Monate. In Einzeljahren findet überhaupt keine Unterbrechung der Vegetationsperiode mehr statt.**
- **Die Temperatursummen, ein guter Indikator für die Vegetationsentwicklung oder den Zuckergehalt des Traubensaftes nimmt um etwa 25 % zu. Selbst in den kältesten Jahren um 2085 sind die Temperatursummen höher, als derzeit im Mittel.**

2.3 Auswerte- und Darstellungsmethoden

Die Auswertung der beobachteten Temperaturen und der zukünftigen Szenarien erfolgte an allen fünf Stationen. Für die Analysen wurden jeweils 30 jährige Zeitscheiben verwendet. Für die Beobachtungen wurde hierzu die Klimanormalperiode 1961-1990 verwendet und der Zeitraum 1976-2005. Die zweite Zeitscheibe dient der Quantifizierung der bereits beobachteten Erwärmung in Wien. Natürlich wäre es besser, wenn sich die Zeiträume nicht überlappen würden, aber aufgrund der hohen interannualen Variabilität ist für die meisten Analysen unbedingt ein Zeitraum von 30 Jahren zu verwenden. Die dennoch festgestellten Verschiebungen zwischen diesen beiden Perioden wiegen umso schwerer, da ja 15 der jeweils 30 Jahre identisch sind.

Bei den Szenarien wurden die Zeitscheiben 2011 – 2040, 2036 – 2065 und 2071-2100 verwendet. Diese Perioden repräsentieren die mittleren Bedingungen für 2025, 2050 und 2085. Für die ersten beiden Perioden stehen jeweils nur die drei Ensembles von REMO-UBA zur Verfügung, für die letzte Zeitscheibe hingegen liegen 6 verschieden RCM Ergebnisse vor.

Zur Darstellung der umfassenden Auswertungen werden „Box and Whiskers“ Darstellungen verwendet. Bei der „Box and Whiskers“ Darstellung befinden sich 60 Prozent aller Daten im Wertebereich der Box (Grenzen 20er bzw. 80er Perzentil), innerhalb der Querstriche 90 Prozent (Grenzen 5er bzw. 95er Perzentil), die Kreuze markieren die Extreme und die rote Line markiert den Median. Zusätzlich wird das arithmetische Mittel als Zahl dazugeschrieben.

Bei den Szenarien wurden nur die Mediane (Symbole) und der Wertebereich aus allen Modellen (graue Fläche) dargestellt, da ansonsten die für jedes regionale Modell eine eigene Abbildung gemacht werden müsste, was die Vergleichsmöglichkeit verringern würde. Im Fließtext sind die Ergebnisse der Station Wien Hohe Warte dargestellt. Die Ergebnisse der anderen vier Standorte befinden sich im Anhang.

2.4 Auswertung von Schwellwerten

Für viele Fragestellungen in Zusammenhang mit der Temperatur sind nicht die mittleren Verhältnisse relevant, sondern die Über- bzw. Unterschreitung bestimmter kritischer Grenzwerte. Neben den klassischen Kennzahlen Eis- Frost- Vegetationsperiode- und Hitzetage wurden auch spezielle Kennzahlen für Hitzeperioden und sehr heiße Tage (Temperaturmaximum größer oder gleich 35 °C) untersucht.

2.4.1 Eis- und Frosttage

Frosttage spielen speziell in der Landwirtschaft eine große Rolle, da sie die Vegetationsperiode begrenzen bzw. beim Auftreten von Spätfrösten schwere Schäden an den Kulturen anrichten können. Ein meteorologischer Frosttag ist dann gegeben, wenn das Temperaturminimum niedriger als 0 °C ist. Ein Eistag liegt hingegen dann vor, wenn das Temperaturmaximum den ganzen Tag unter dem Nullpunkt liegt.

In Abbildung 12 sind die Analysen zu Frost- und Eistagen an den 5 Wiener Stationen für den Zeitraum 1961-1990 dargestellt. Der Wertebereich bei den Frosttagen reicht von nur 25 Tagen im wärmsten Jahr an der Station Wien Innere Stadt bis zu mehr als 130 Tagen im kältesten Jahr in Wien-Mariabrunn. Bei der Station Wien Hohe Warte liegen das arithmetische Mittel und der Median nahe zusammen bei knapp über 70 Tagen (rote Linie und schwarzer Punkt). In 20 % aller Jahre, also etwa alle 5 Jahre kommen weniger als 55 Tage vor (unterer Rand der blauen Box) und ebenso häufig kommen Jahre mit mehr als 87 Tagen vor. Das Minimum liegt bei der Hohen Warte bei knapp unter 50 Tagen und das Maximum bei 115. Die Station Innere Stadt hat deutlich weniger Frosttage als Donaufeld und Hohe Warte (etwa 15 Tage im Mittel), aber noch mehr Frosttage gibt es ganz am Stadtrand. So hat Mariabrunn im Mittel fast doppelt so viele Frosttage wie Wien Innere Stadt. Dies zeigt, dass das unbebaute Umland von Wien in der Nacht deutlich stärker auskühlt als die dicht verbaute Innenstadt.

Bei den Eistagen zeigen sich weit geringere Unterschiede zwischen den Stationen als bei den Frosttagen. Dennoch kommen im dicht bebauten Gebiet (Innere Stadt und Donaufeld) im Mittel um rund 5 Eistage weniger vor.

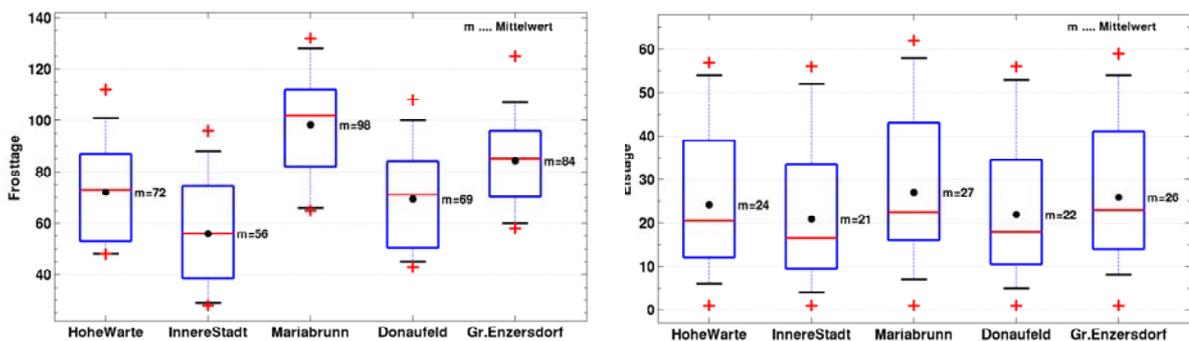


Abb. 12: Häufigkeit von Frosttagen (links) und Eistagen (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

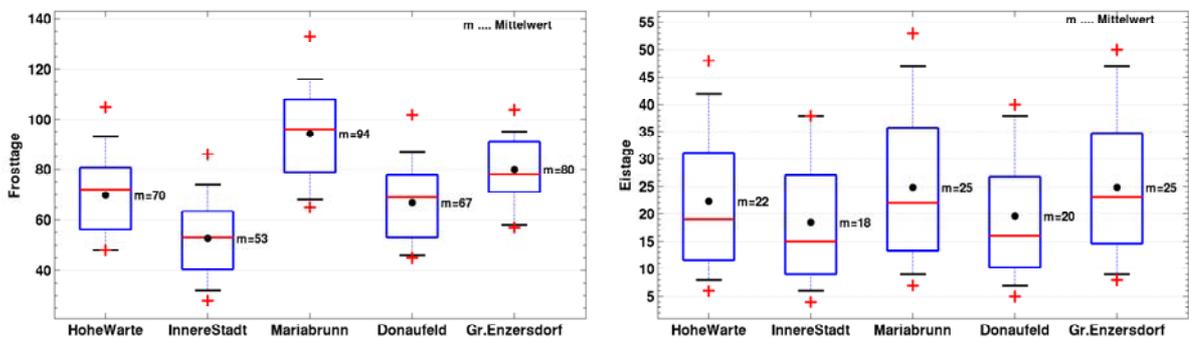


Abb. 13: Häufigkeit von Frosttagen (links) und Eistagen (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

Abbildung 13 zeigt dieselbe Analyse wie Abbildung 12 jedoch für den Zeitraum 1976 bis 2005. An allen Stationen haben sowohl die Frost- als auch die Eistage abgenommen. Generell sind die hohen Perzentilen stärker zurückgegangen. So ist die 80er Per-

zentile bei den Eistagen (oberer Rand der blauen Box) bei Wien Hohe Warte von 39 Tage auf 31 Tage zurückgegangen, der Median hingegen nur um zwei Tage. Dies ist auf den Wegfall einiger besonders kalter Winter in den 1960er Jahren in der zweiten Periode zurück zu führen.

In Abbildung 14 sind die Szenarien für die Frost- und Eistage für Wien Hohe Warte dargestellt. Die Frost- und Eistage werden im Laufe des Jahrhunderts sukzessive abnehmen. Um 2085 wird es im Mittel (Median) nur mehr rund 25 bis 40 (je nach Szenario) Frosttage geben und die Eistage werden zwischen 5 und 10 Tagen liegen. Besonders bei den Frosttagen ist der Rückgang markant und die mittleren Bedingungen um 2085 sind deutlich niedriger als das bisher wärmste Jahr. Dies würde bedeuten, dass man zu diesem Zeitpunkt nur etwa einen Monat mit Frost rechnen muss.

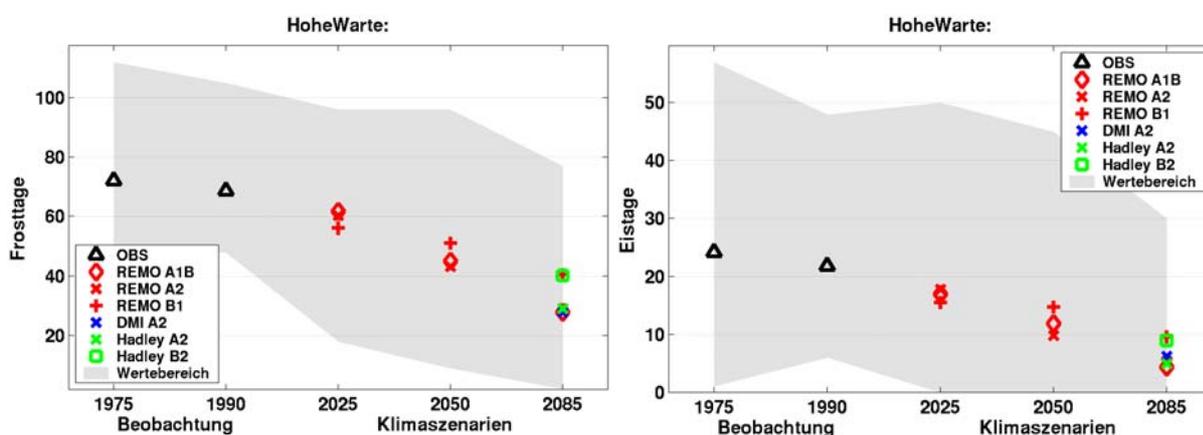


Abb. 14: Szenarien der Häufigkeit von Frosttagen (links) und Eistagen (rechts) für die Station Wien Hohe Warte.

2.4.2 Hitzetage

Der Sommer 2003 hat gezeigt, dass die Hitzebelastung auch in Europa lebensbedrohende Ausmaße annehmen kann. In dieser Analyse verwenden wir die „klassische“ Definition eines Hitzetages mit einem Tagesmaximum von mindestens 30 °C zusätzlich verwenden wir auch den Grenzwert 35 °C, um besonders heiße Tage zu quantifizieren.

In Abbildung 15 sind die Ergebnisse für 1961-1990 dargestellt. Diesmal zeigen die zwei Stationen im dicht bebauten Gebiet bei den klassischen Hitzetagen deutlich mehr Tage als die anderen drei Stationen. In dieser Periode musste man im bebauten Gebiet alle fünf Jahre mit mehr als 20 Hitzetagen rechnen. Am Stadtrand hingegen nur mit etwa 15 Tagen. Die Anzahl an Tagen mit mehr als 35 °C war in dieser Periode noch so selten, sodass hier keine verlässliche Statistik berechnet werden kann.

Für den Zeitraum 1976-2005 (Abbildung 16) zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Hitzetage. Jetzt muss auch am Stadtrand alle fünf Jahre mit mehr als 20 Hitzetagen rechnen und in Wien Donauefeld kommen alle 5 Jahre bereits mindestens 30 Hitzetage vor.

Besonders drastisch ist der Anstieg bei dem Grenzwert 35 °C. Hier muss man jetzt schon an allen Stationen alle fünf Jahre mit einem derartigen Tag rechnen und in Wien Donauefeld gab es ein Jahr wo 7 derartige Tage vorgekommen sind.

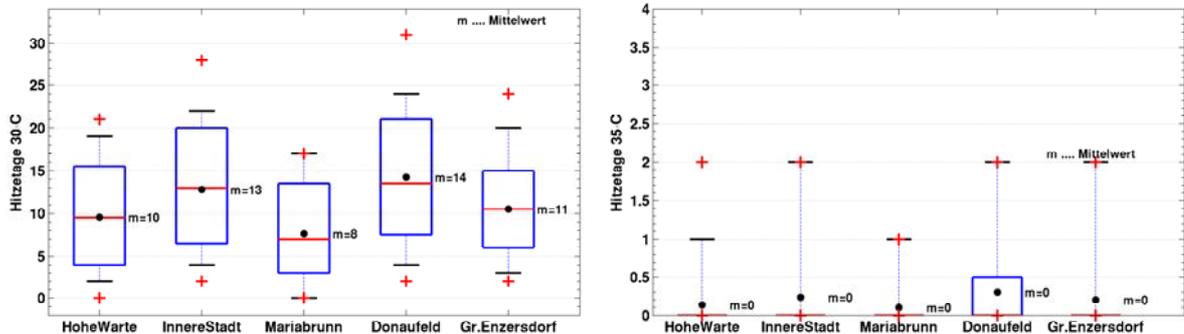


Abb. 15: Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30\text{ °C}$ (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35\text{ °C}$ (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

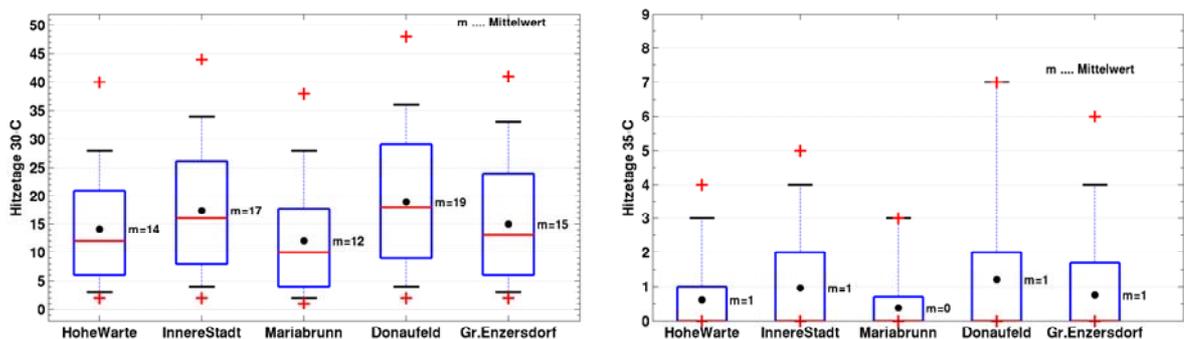


Abb. 16: Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30\text{ °C}$ (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35\text{ °C}$ (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

Abbildung 17 zeigt die Szenarien für die Hitzetage. Bis zur Mitte des Jahrhunderts zeigen die REMO-UBA Szenarien nur einen moderaten Anstieg, um 2085 liegen die Werte bei den klassischen Hitzetagen im Mittel bei mehr als 20 bis hin zu 60 Tage. In einzelnen Jahren kommen jedoch sogar deutlich mehr als 100 Hitzetage vor. Bei den Tagen mit mehr als 35 °C muss man am Ende des Jahrhunderts davon ausgehen, dass diese so häufig sind wie derzeit Tage mit mehr als 30 °C.

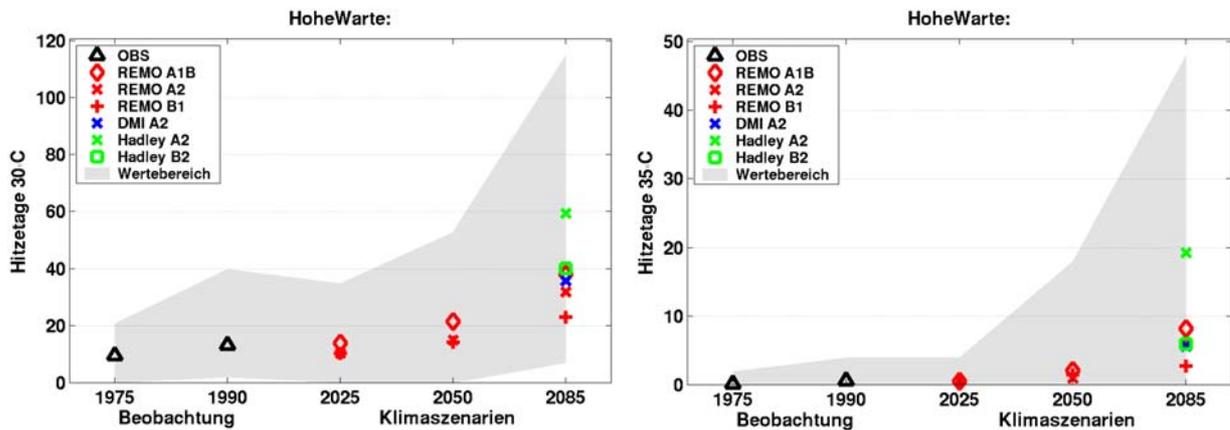


Abb. 17: Szenarien der Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35 \text{ °C}$ (rechst) für die Station Wien HoheWarte.

2.4.3 Hitzeperioden

Für die Belastung des Menschen durch Hitze sind weniger einzelne heiße Tage relevant, sondern zusammenhängende Hitzeperioden. Für die Analyse werden hier zwei Definitionen von Hitzeperioden verwendet. Die erste stammt vom Kollegen Kysely aus Tschechien (Kysely et al 2000), wobei drei wesentliche Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Mindestens 3 aufeinander folgende Tage müssen jeweils ein Temperaturmaximum von zumindest 30°C aufweisen.
2. Die Periode gilt danach als fortlaufend wenn das Maximum der einzelnen darauf folgenden Tage nicht unter 25°C liegt sowie
3. das mittlere Temperaturmaximum während der gesamten Periode 30°C nicht unterschreitet.

Die zweite Definition wurde innerhalb eines StartClim Projektes in Zusammenarbeit mit Medizinern (Gerersdorfer et al., 2006) erarbeitet. Eine Hitzewelle bilden hier Tage mit mindestens 30 °C Tagesmaxima und bei denen es in der Nacht dazwischen nicht unter 18 °C abkühlt (sog. „heiße Nächte“). Derartige Perioden sind besonders belastend für den menschlichen Körper.

In Abbildung 18 sind die Auswertungen für 1961-1990 dargestellt. Man erkennt, dass sowohl Hitzeperioden nach Kysely (links) als auch jene mit heißen Nächten (rechts) bisher durchaus als Ausnahmefälle zu Betrachten waren. An den Stadtrandstationen kamen in 20 % aller Jahre gar keine derartigen Perioden vor. In der Hälfte aller Jahre kamen an den beiden dicht verbauten Standorten mehr als 10 Hitzetage nach Kysely vor, an den drei anderen Stationen nur etwa 5 Tage. Die Maxima betragen knapp 30 Tage im verbauten Gebiet. Die heißen Nächte sind sogar noch seltener und die Mittelwerte betragen im verbauten Gebiet etwa 5 Tage und die Maxima rund 15 Tage. Bei den heißen Nächten zeigt sich der Stadteffekt besonders stark.

Bei diesen Kennzahlen zeigt sich die bisherige Erwärmung besonders deutlich. So liegt die 80 % Perzentile (oberer blauer Rand) im Zeitraum 1976-2005 (Abbildung 19) in Wien Donaufeld bei den Kyselytagen mit 32 Tagen höher als das Maximum der Periode 1961-1990. Die Mittelwerte erreichen im verbauten Gebiet knapp 20 Tage und die Maxima haben sich gegenüber 1961-1990 verdoppelt.

Auch die heißen Nächte haben stark zugenommen und die Mittelwerte im verbauten Gebiet sind jetzt knapp unter 10 Tage und womit man derzeit alle 5 Jahre rechnen muss war 1961-1990 noch das Maximum

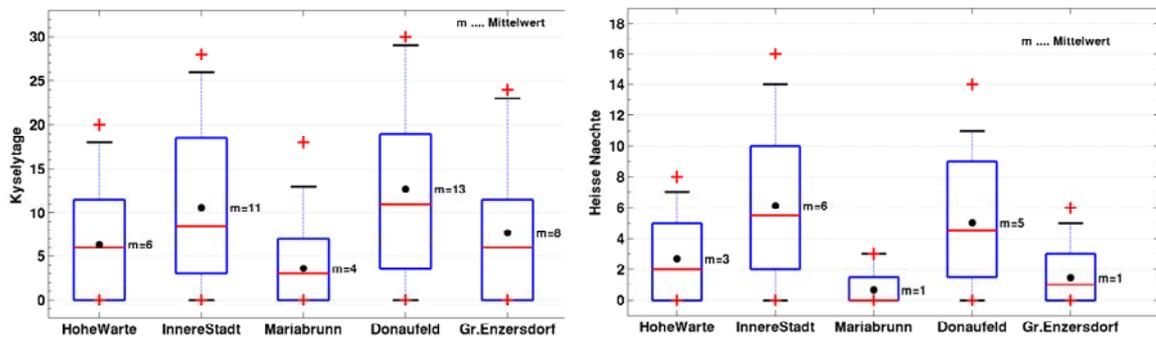


Abb. 18: Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten verbunden sind ($T_{min} \geq 18^\circ C$, rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

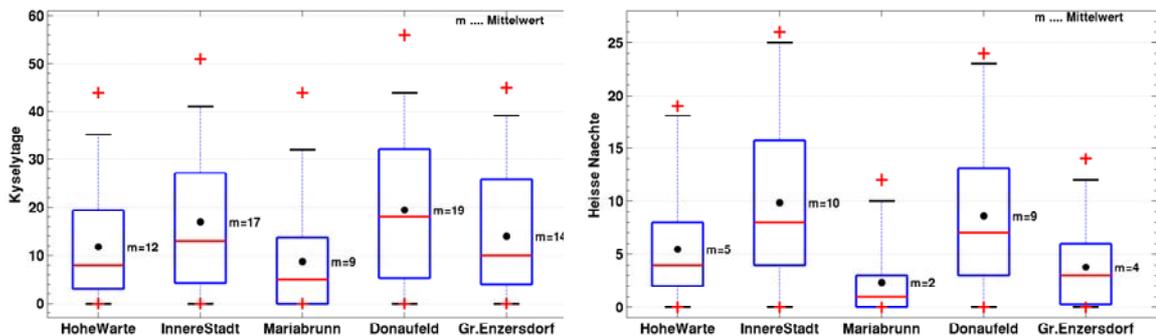


Abb. 19: Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten verbunden sind ($T_{min} \geq 18^\circ C$, rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

In Abbildung 20 sind die Szenarien für die Hitzeperioden dargestellt. Am Ende des Jahrhunderts muss man im Mittel mit 20 bis 65 Kyselytagen rechnen, was im Extremfall einer Verzehnfachung gegenüber 1961-1990 darstellt. In Extremjahren sind sogar 125 Kyselytage möglich. Dies bedeutet dass von Anfang Mai bis Ende August jeder Tag ein Kyselytag ist. Auch die heißen Nächte nehmen stark zu und am Ende des Jahrhunderts muss man im Mittel mit 10 bis 50 derartiger Tage rechnen.

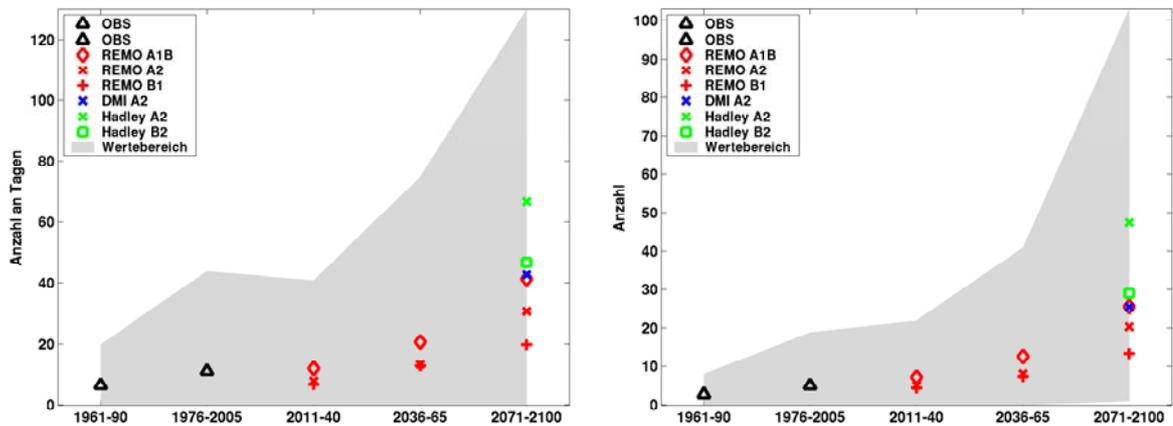


Abb. 20: Szenarien der Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten ($T_{min} \geq 18^\circ\text{C}$, rechts) für die Station Wien Hohe Warte.

2.4.4 Vegetationsperiode

Für die Definition der Vegetationsperiode wird die Tagesmitteltemperatur (hier der Mittelwert aus Temperaturminimum und Temperaturmaximum) verwendet. Damit ein Tag zur Vegetationsperiode zählt muss das Tagesmittel mindestens 5°C erreichen. Für den Beginn der Vegetationsperiode müssen jedoch mindestens 5 Tage hintereinander diesen Grenzwert erreichen. Dadurch wird verhindert, dass einzelne warme Tage oder kurze Perioden mitten im Winter dazu gezählt werden. Eine laufende Vegetationsperiode gilt als unterbrochen wenn an 5 aufeinander folgenden Tagen die Tagesmitteltemperatur unter 5°C bleibt.

In der Periode 1961-1990 betrug die mittlere Länge der Vegetationsperiode (Abbildung 21 links) zwischen etwa 230 Tage in Mariabrunn und mehr als 250 Tage in der Inneren Stadt. Die Schwankungsbreite, also der Unterschied zwischen einem sehr kalten und einem sehr warmen Jahr beträgt etwa 2 Monate. An allen Stationen zeigt sich bei der Periode 1976-2005 (Abbildung 21 rechts) ein Anstieg der Länge der Vegetationsperiode von etwa 5 Tagen im Mittel. Bei den Szenarien (Abbildung 21 unten) zeigt sich wiederum ein kontinuierlicher Anstieg der Länge der Vegetationsperiode im Laufe des 21. Jahrhunderts und erreicht im Extremfall am Ende mehr 300 Tage. In Einzeljahren findet das ganze Jahr hindurch keine Unterbrechung der Vegetationsperiode statt.

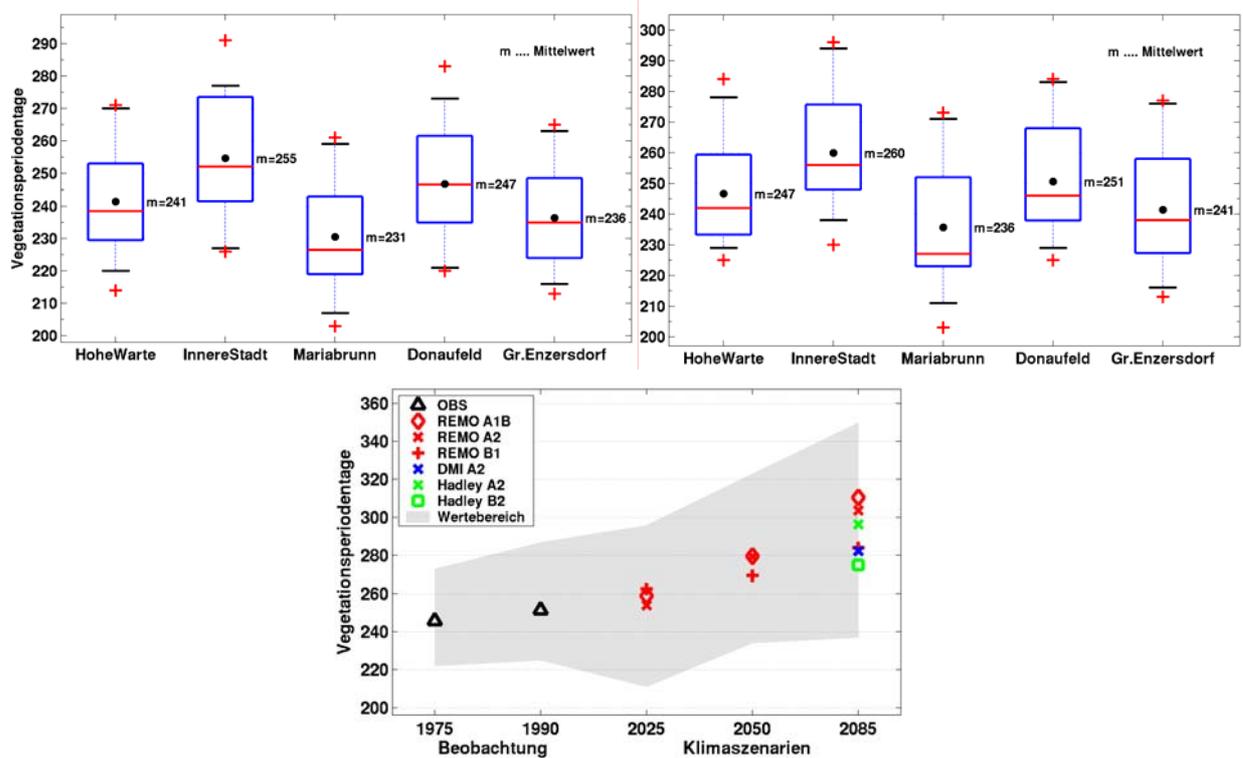


Abb. 21: Länge der Vegetationsperiode 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten)

2.5 Auswertung von Temperatursummen

Neben der Auswertung von Schwellwerten bilden Temperatursummenmethoden ein wichtiges Werkzeug um kumulative Temperatureffekte darzustellen. Besonders beliebt sind Temperatursummen um physiologische Vorgänge bei Pflanzen abzubilden. Exemplarisch ist eine Temperatursumme nach Harlfinger (Harlfinger und Knees, 1999), welche für die Bestimmung des Zuckergehaltes des Traubensaftes und damit für die Eignung von Weinbaugebieten verwendet werden kann, dargestellt.

Eine weitere wichtige Anwendung liegt bei der Abschätzung des Energiebedarfs durch Heizen und Kühlen.

2.5.1 Heizgradtage

Heizgradtage finden in der Praxis häufige Verwendung. Bei der in Österreich am häufigsten verwendeten Definition der Heizgradtage (ÖNORM 8135) wird während der Heizperiode (September bis August) die Summe der Differenz 20 -Tagesmitteltemperatur [$^{\circ}\text{C}$] gebildet, solange die Tagesmitteltemperatur kleiner oder gleich 12°C ist. Die Annahme hierbei ist, dass man an Tagen die kälter als Tagesmittel 12°C sind die Heizung aufdreht und die Raumtemperatur 20°C beträgt.

In Abbildung 22 sind die Analysen für die Heizgradtage in Wien zusammengefasst. 1961-1990 (links) betragen die Heizgradtagssummen im Mittel etwa 2900 in der Innenstadt und am Stadtrand etwa 3200. In Mariabrunn liegt das Mittel sogar über 3400. Der Unterschied zwischen einen sehr kalten und sehr milden Jahr beträgt etwa 1000,

wobei jedoch 60 % aller Jahre in einem Bereich von 500 rund um den Median liegen. Der Unterschied zwischen Wien Innere Stadt und Mariabrunn beträgt rund 20 Prozent.

Die Erwärmung führt in der Periode 1976-2005 an allen Stationen zu einer Abnahme der Heizgradtagssummen in der Größenordnung von etwa 100 Grad. Besonders groß sind die Unterschiede auch hier bei den hohen Perzentilen. Dies ist wiederum auf den Wegfall besonders kalter Winter in den 1960er zurück zu führen.

Bei den Szenarien zeigt sich ein weiterer massiver Rückgang, wobei gegen Ende des Jahrhunderts die Werte für Wien Hohe Warte in dem Bereich zwischen 2200 und 2600 liegen. Dies entspricht einer Reduktion des Heizenergiebedarfs von etwa 20 bis 30 Prozent.

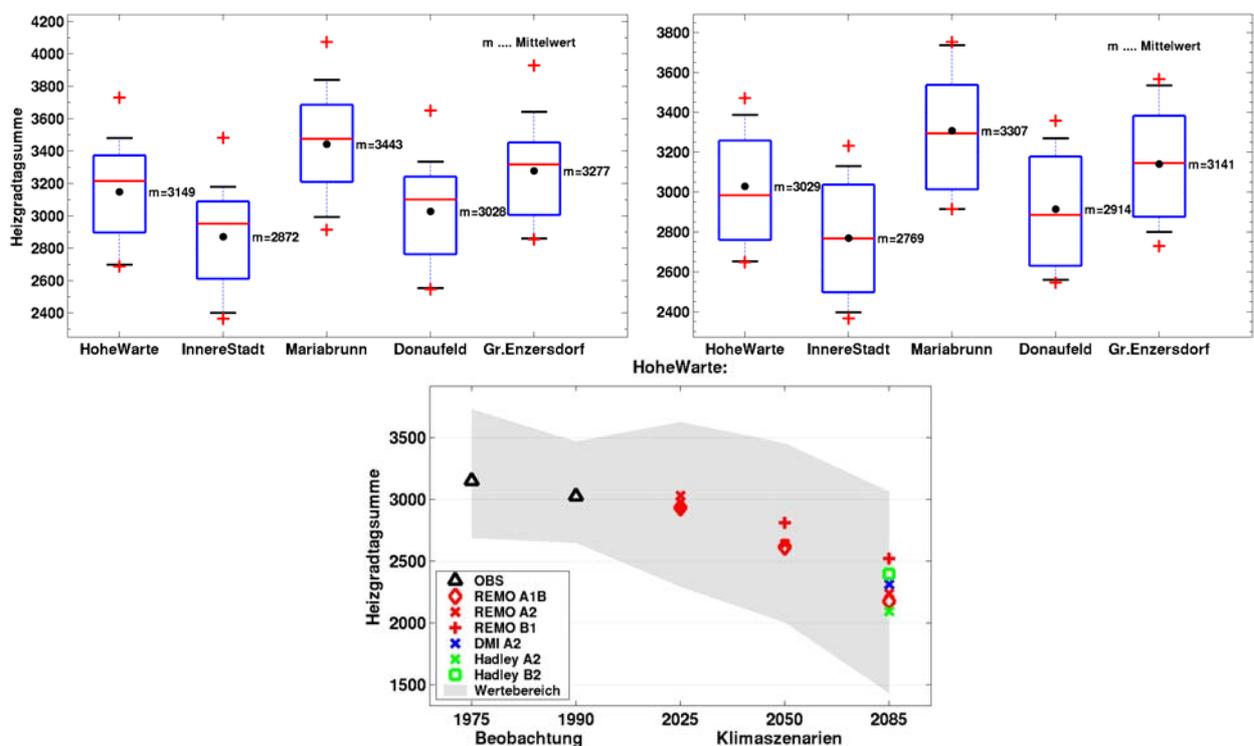


Abb. 22: Heizgradtagsumme 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten)

2.5.2 Kühlgradtage

In den USA wird das Temperatursummenverfahren auch für die Bestimmung des Kühlenergiebedarfes angewandt. Die Methode ist dieselbe wie bei den Heizgradtagen. Als Schwellwert wird in den USA 65 ° Fahrenheit (18.3 °C) verwendet. Unter 65 ° Fahrenheit wird geheizt und darüber wird gekühlt. Ob dieser lineare Ansatz für die Abschätzung des Kühlenergiebedarfes wirklich zulässig ist, ist jedoch fragwürdig, da hierbei der Energiebedarf linear mit der Temperaturdifferenz zunimmt. Es ist jedoch anzunehmen, dass zumindest in Wohnungen bis zu einem Grenzwert der deutlich hö-

her als 18.3 °C Tagesmitteltemperatur liegt überhaupt keine Kühlenergie benötigt wird, da Lüften am Morgen und in der Nacht ausreicht. Um nur diese besonders heißen Tage zu Berücksichtigen haben wir eine zweite Temperatursumme gebildet, wobei nur Tage mit einem Tagesmittel von mehr als 25 °C zur Temperatursumme beitragen.

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse für die Periode 1961-1990 dargestellt. Links die klassische Definition aus den USA und rechts die 25 °C Auswertung. Der Kühlbedarf ist im verbauten Gebiet deutlich höher als am Stadtrand und im Mittel etwa doppelt so hoch wie in Mariabrunn. Tage mit mehr als 25 °C Tagesmitteltemperatur sind in dieser Periode in Mariabrunn und Groß-Enzersdorf kaum vorgekommen, im verbauten Gebiet werden Summen von 5 bis 10 Grad erreicht.

In der Periode 1976-2005 sind die Kühlgradtagsummen an allen Stationen um etwa 60 Grad angestiegen (links). Besonders heiße Tage kommen nun mit Ausnahme von Mariabrunn in mehr als 80 Prozent aller Jahre vor.

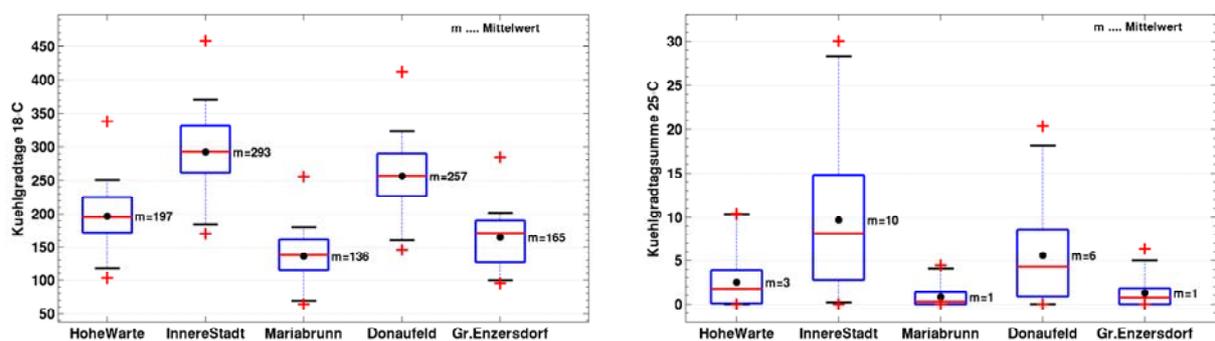


Abb. 23: Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 18.3$ °C, (link) und Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 25$ °C (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

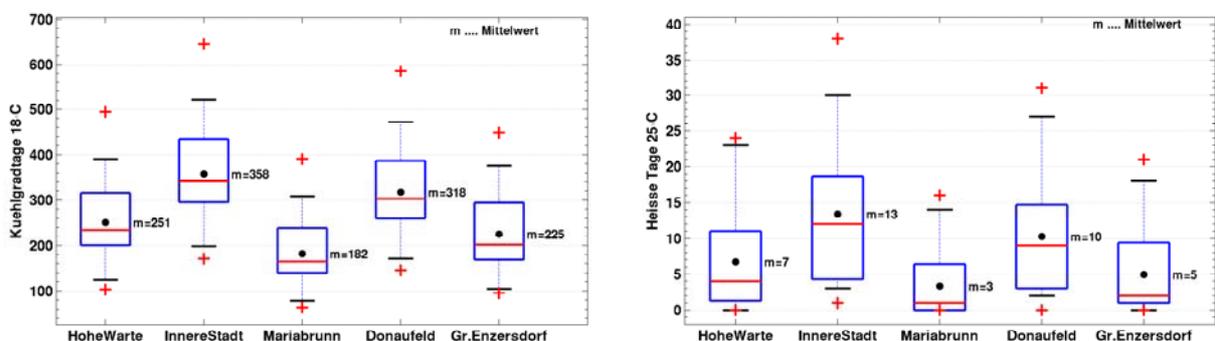


Abb. 24: Heizgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 18.3$ °C, (link) und Heizgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 25$ °C (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.

Bei den Szenarien zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg des Kühlenergiebedarfes. Nach der klassischen Definition wird er sich bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel zumindest verdoppeln oder sogar vervierfachen. In Einzeljahren wird der Verbrauch sogar sechsmal so hoch sein derzeit im Mittel. Bei den besonders heißen Tagen steigt die Temperatursumme von derzeit faktisch Null im Mittel auf einen Bereich zwischen 40 und 170. Dies bedeutet, dass an besonders heißen Tagen, die Anzahl der Räume die ansonsten keine Kühlung benötigen würden überproportional zunehmen werden.

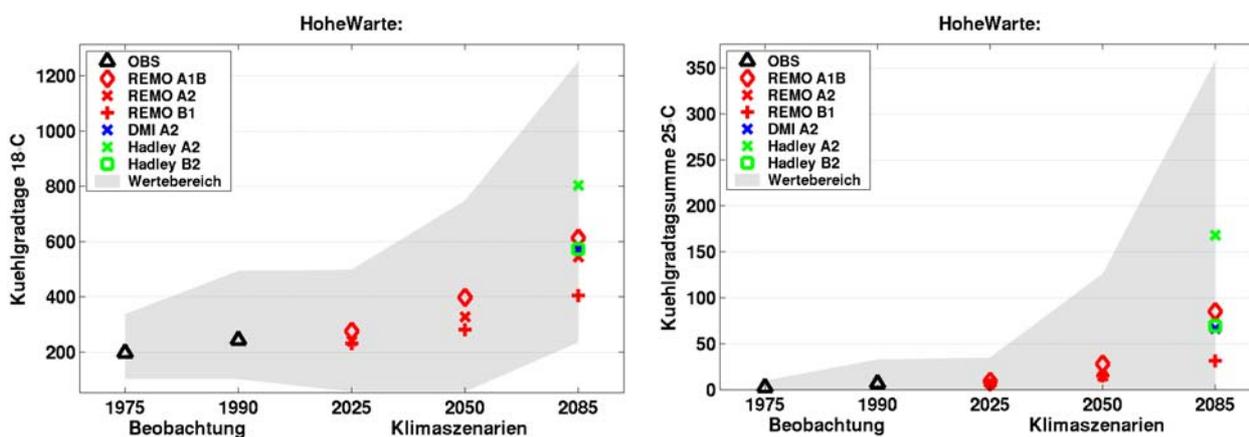


Abb. 25: Szenarien der Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 18.3 \text{ } ^\circ\text{C}$, (link) und Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{\text{mittel}} \geq 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ (rechts) für die Station Wien Hohe Warte.

2.5.3 Temperatursumme nach Harlfinger (Weinqualität)

Die Temperatursumme nach Harlfinger ist eine gute Methode um die klimatologische Eignung von Weinbaugebieten auszuweisen und bei Verwendung von Einzeljahren ist es möglich anhand der Temperatursumme den Zuckergehalt des Traubensaftes zu schätzen (Formayer et al., 2004). Damit ein Tag zur Temperatursumme beiträgt, müssen zwei Grenzwerte erreicht werden. Erstens muss das Minimum mindestens $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ erreichen und zweitens das Maximum mindestens $15 \text{ } ^\circ\text{C}$. Sind beide Kriterien erfüllt, wird die Temperatur um 14.00 Uhr aufsummiert. Da die 14.00 Uhr Temperatur sehr hoch mit der Strahlung korreliert, ist diese Temperatursumme implizit auch stark von der Strahlung beeinflusst. Weinbaugebiete müssen im Mittel eine Temperatursumme von 3500 Grad erreichen. Um genügend Zucker im Traubensaft aufzubauen, muss in jedem Jahr zumindest eine Summe von 3000 Grad erreicht werden.

Da bei den Klimaszenarien keine Temperaturen für 14.00 berechnet werden können, wurde das Temperatursummenverfahren nach Harlfinger insofern modifiziert, dass anstatt der 14.00 Werte das Temperaturmaximum verwendet wurde. Dies führt zu einer systematischen Erhöhung der Temperatursumme, die über die gesamte Saison akkumuliert im Mittel rund 250 Grad beträgt. Daher ist als Grenze für den Weinbau bei dieser modifizierten Temperatursumme als Grenze 3750 anzusehen.

In Abbildung 26 sind die Analysen dieser Temperatursumme dargestellt. Die klimatologische Grenze für den Weinbau von 3750 wird mit Ausnahme von Mariabrunn an allen Standorten bereits in der Periode 1961-1990 überschritten. Die Schwankungs-

breite beträgt rund 1000 Grad, sodass an allen Standorten in kühlen Jahren mit einem geringen Zuckergehalt gerechnet werden muss.

Bereits in der Periode 1976-2005 wird an allen Standorten der Grenzwert von 3750 im Mittel überschritten und selbst kühle Jahre mit denen man alle 5 Jahre rechnen muss, liegen mit Ausnahme von Mariabrunn über dem Grenzwert.

Betrachtet man die Szenarien so sieht man, dass Ende des Jahrhunderts selbst die kühlestn Jahre eine Temperatursumme von über 4000 aufweisen.

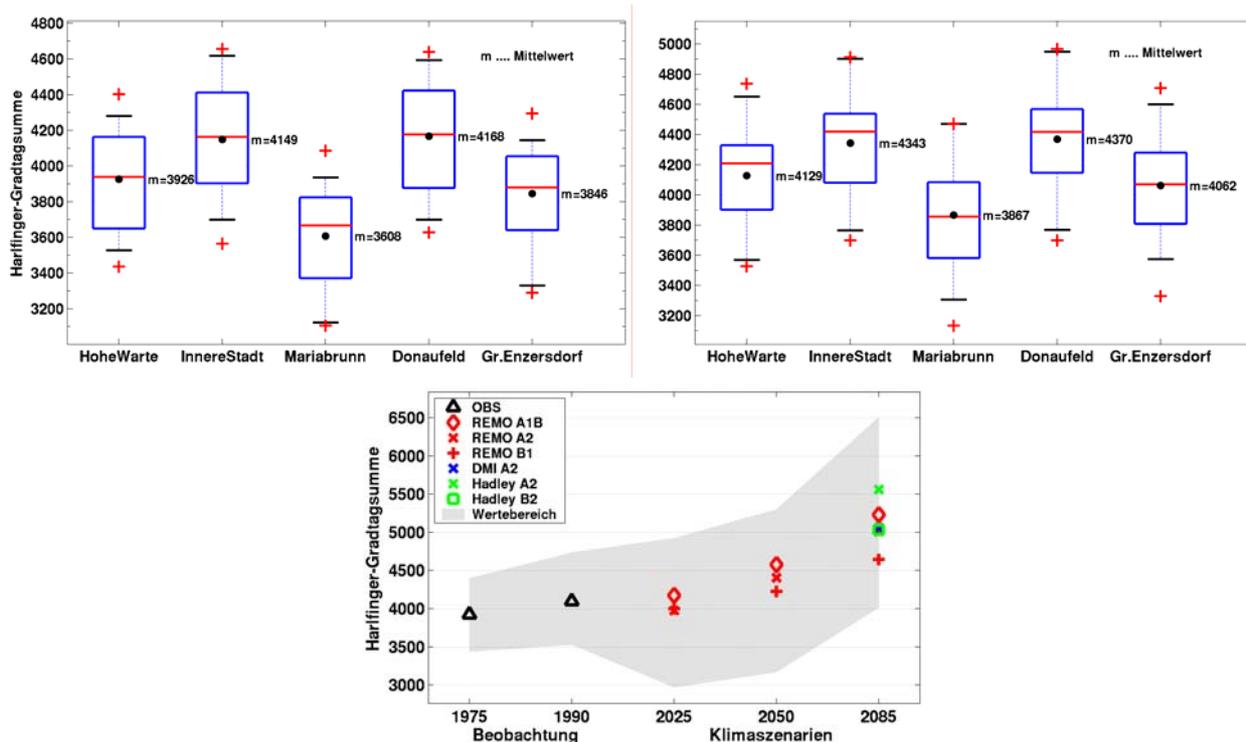


Abb. 26: Temperatursummen nach Harfinger für 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten)

2.6 Vergleich Innenstadt zu Stadtrand

Bereits bei den Darstellungen den Einzelanalysen wurden die Unterschiede bei den fünf verschiedenen Standorten aufgezeigt. Um den Unterschied zwischen dem dicht bebauten Bereich im Stadtzentrum (Station Wien Innere Stadt und Donauefeld) und dem locker bebautem Stadtrand (Wien Hohe Warte, Mariabrunn und Groß Enzersdorf) zu verdeutlichen, sind in Abbildung 27 noch einmal für acht Kenngrößen die mittleren Bedingungen (Mediane) der Beobachtung und des REMO-UBA Szenarien A1B dargestellt.

Bei den Eistagen treten in der Innenstadt derzeit rund 20 % weniger auf als am Stadtrand. Bei den Frosttagen ist der Unterschied sogar noch deutlicher und beträgt bis zu 50 %. Auch bei der Anzahl der Hitze- bzw. Hitzeperiodentage treten in der Innenstadt rund 20 bis 30 % mehr auf. Die Hitzebelastung ist an der Station Donauefeld sogar noch größer als in der Wiener Innenstadt. Bei den Heizgradtagen beträgt die Differenz

derzeit zwischen 300 und mehr als 400 Grad und somit mehr als 10 % (bezogen auf Wien Hohe Warte). Bei den Kühlgradtagen beträgt der Unterschied bis zu 250 Grad. Dies entspricht jedoch einem prozentuellen Unterschied von 50 % bezogen auf die Station Hohe Warte. Bei diesen beiden Kennzahlen bleibt bei den Szenarien jedoch der absolute Unterschied zwischen den Stationen konstant und nicht der relative Unterschied.

Bei den REMO-UBA Szenarien verändert sich bei den Hitzekennzahlen bis zum Zeitraum um 2025 sehr wenig, nur bei den Eis- und Frosttagen gibt es eine leichte Abnahme. Wie bereits mehrmals erwähnt, sollte dies geringe Änderung im Zeitraum 2011-2040 bei diesem Szenario nicht überbewertet werden.

Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden nach REMO-UBA am Stadtrand gerade jene Werte erreicht, wie sie derzeit in der Innenstadt herrschen. In der Innenstadt selbst sind dann die mittleren Bedingungen auf einem Niveau, wie es derzeit nur bei warmen Jahren zu beobachten ist, d.h. wie sie derzeit nur alle fünf bis zehn Jahre vorkommen.

Für das Ende des Jahrhunderts kann man grob sagen, dass bei den Szenarien mit hohen Emissionen (A1B und A2) die derzeitigen Extremjahre der Status quo sein werden.

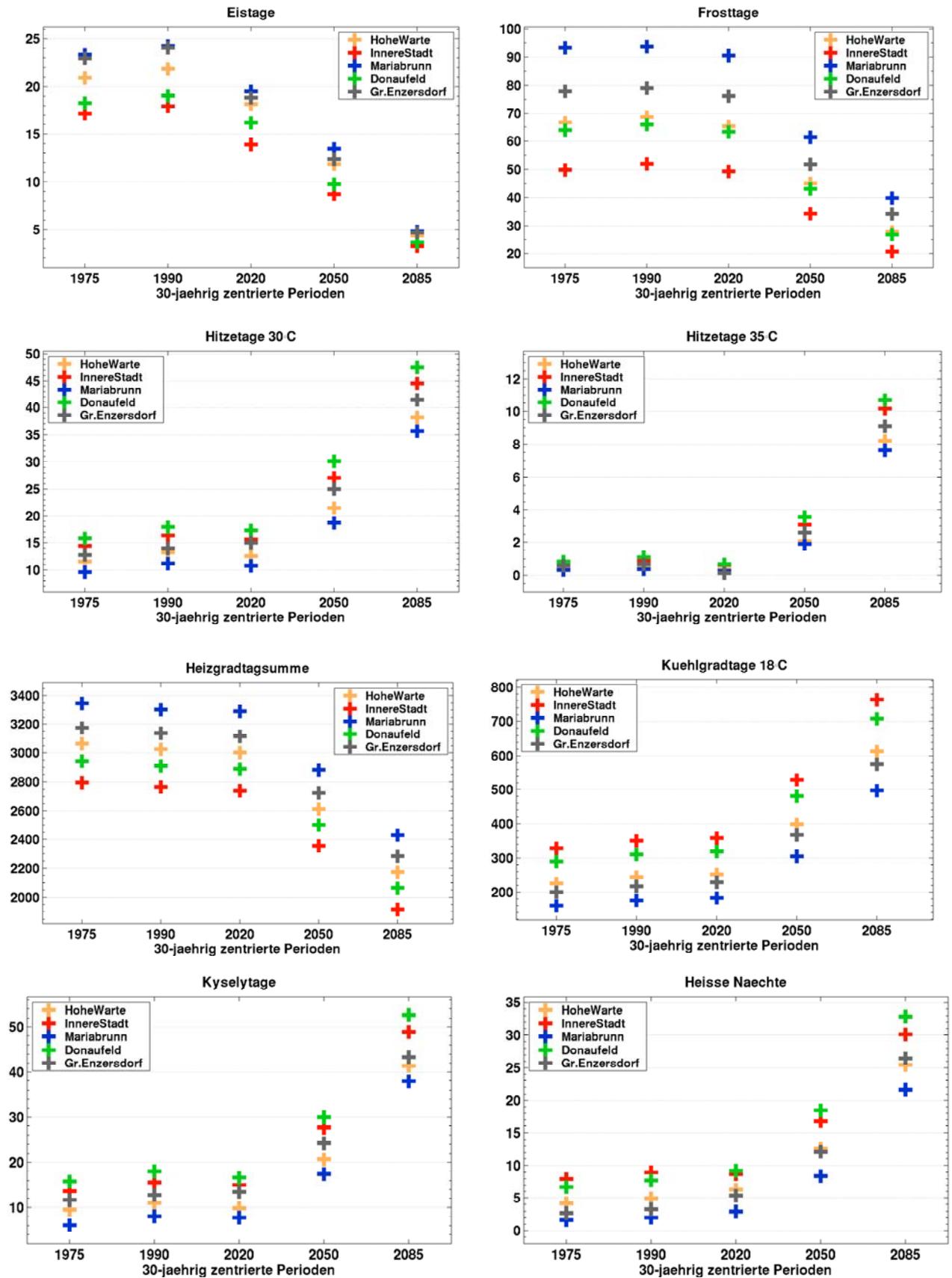


Abb. 27: Vergleich der fünf Wiener Standorte für das REMO-UBA Szenario A1B und ausgewählten Temperaturkenngrößen.

3 Strahlungsevaluierung

3.1 Einleitung

Neben den thermischen Verhältnissen, spielen auch die Strahlungsbedingungen einen wichtigen Faktor bei der thermischen Belastung, speziell in Gebäuden. Für die Berechnung des Kühlbedarfs eines Gebäudes ist neben der Temperatur die Strahlung die wichtigste Kenngröße.

Im Juni und Juli beträgt die Sonneneinstrahlung während der Mittagszeit beinahe 1000 W/m^2 . Dieser Energiefluss wird an den Fassaden und den Dächern in Wärme umgewandelt und je nach Dämmung in das Gebäudeinnere weitergeleitet. Besonders markant ist der Einfluss der Strahlung bei Dachbodenausbauten ohne hinreichende Dämmung der Dachflächen spürbar.

Jedoch nicht nur bei der älteren Bausubstanz spielt die Sonnenstrahlung eine wichtige Rolle, sondern gerade bei Neubauten wird sie derzeit immer wichtiger. Im Gegensatz zu den Fassaden und Dächern wird bei Glasflächen die Sonnenenergie fast ungestört in das Gebäudeinnere eingelassen und die Strahlungsenergie wird erst im Inneren in Wärme umgewandelt. Dieser Effekt wirkt sich bei den Glashochhäusern stark aus, da hier der Glasflächenanteil besonders groß ist. Aber auch bei den energieeffizienten Niedrigenergie- und Passivhäusern kann es zu Problemen führen. Bei diesen Bauformen wird ja die Sonnenenergie aktiv genutzt (siehe „Solar City“ in Linz), um den Heizbedarf zu minimieren. Deshalb ist bei diesen Typen besonders auf eine gute Abschattung durch Außenmarkisen oder durch teilreflektierende Folien zu achten, denn wenn die Strahlung ins Innere des Gebäudes kommt, bringt man die Wärme aufgrund der guten Dämmung nur wieder schwer hinaus.

Neben der Wirkung der Sonnenstrahlung auf die Gebäude und die gesamte verbaute Stadtstruktur, wirkt sich die Strahlung auch direkt auf das Wohlbefinden der Menschen aus. Dies erkennt man gut an den Verhaltensweisen der Menschen. Bis zu Temperaturen von etwa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bewegt sich die Mehrheit lieber auf den sonnigen Seiten der Straßen. Ab etwa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sucht man hingegen die schattige Seite auf, da man ansonsten überhitzt und zu schwitzen beginnt. In den mediterranen Regionen wurde nicht umsonst die „Siesta“ rund um den Sonnenhöchststand eingeführt, da es in dieser Zeit faktisch keinen Schatten in den Straßenschluchten der Städte gibt und daher der Aufenthalt im Freien äußerst unangenehm werden kann. Der kombinierte Effekt von höheren Temperaturen und einer Zunahme der am Boden ankommenden Sonnenstrahlung sollte daher auch bei der Arbeitszeitplanung von Berufsgruppen, die im Freien arbeiten müssen, berücksichtigt werden.

Ziel dieses Abschnittes ist es, eine Evaluierung der Qualität der Strahlungsdaten aus regionalen Klimamodellen durchzuführen. Hierzu wurden von den drei hier verwendeten regionalen Klimamodellen aus den Kontrollläufen sowohl die Monatssummen (Mittelwerte, interannuale Variabilität), als auch die Verteilung der Tagessummen saisonal untersucht.

3.2 Zusammenfassung

- **Die Sonnenstrahlung spielt eine zentrale Rolle bei der Wärmebelastung. Dies nicht nur bei den Gebäuden, sondern auch bei allen verbauten Strukturen, sowie beim Menschen selbst.**
- **Alle regionalen Klimamodelle zeigen zu hohe Monatssummen der Sonnenstrahlung, wobei das REMO-UBA Modell noch die relativ besten Ergebnisse zeigt.**
- **Die relative Überschätzung ist in den Wintermonaten am stärksten und beträgt teilweise mehr als 50 %. Bei dem Hadley- und dem DMI Modell sind sie faktisch immer höher als 10 %.**
- **Die Schwankungen der Monatssummen der Sonnenstrahlung werden hingegen größtenteils unterschätzt. Dies vor allem wieder im Winter.**
- **Bei Untersuchung der Tagesdaten zeigen alle Jahreszeiten eine Überschätzung der wolkenlosen Tage und eine Unterschätzung der ganztags bedeckten Tage. Dies speziell im Herbst und Winter.**
- **Die regionalen Modelle scheinen im Winterhalbjahr Schwierigkeiten zu haben, die Hochnebellagen im Wiener Becken realistisch zu reproduzieren. Im Sommerhalbjahr wiederum dürfte die konvektive Bewölkung (Gewitterwolken) unterschätzt werden, wodurch die Abschattung am Nachmittag zu gering ausfällt.**
- **Eine Korrektur der Monatsdaten kann durch eine einfache Fehlerkorrektur durch die mittlere Abweichung durchgeführt werden.**
- **Bei Tageswerten ist dieser Ansatz jedoch nicht zielführend, dafür müsste ein komplexeres Verfahren entwickelt werden. Dieses muss auch die Wechselwirkung der Sonnenstrahlung mit der Temperatur und der relativen Luftfeuchte berücksichtigen. Ein derartiges Korrekturverfahren steht derzeit noch nicht zur Verfügung.**
- **Die sehr hohen Strahlungssummen einzelner Modelle im Sommer bedeuten, dass bereits bei derzeitigem Klima zum Teil nahezu wolkenlose Bedingungen in den Regionalmodellen über Wien vorkommen. Daher ist in diesen Modellen eine Abnahme der Bewölkung aufgrund der Klimaänderung kaum noch möglich. Hier darf deshalb selbst das Klimaänderungssignal der Strahlung nur mit Vorsicht verwendet werden.**

3.3 Monatssummen

Bei den Monatssummen der Globalstrahlung zeigen alle regionalen Klimamodellen in allen Monaten zu hohe Werte (Abbildung 28). Am Besten liegt noch REMO-UBA und am Schlechtesten schneidet das Hadley-Center Modell ab. Besonders hoch (absolut) sind die Überschätzungen von Mai bis September beim Hadley Modell und bei Hirham. Die deutet auf eine Unterschätzung der konvektiven Bewölkung hin.

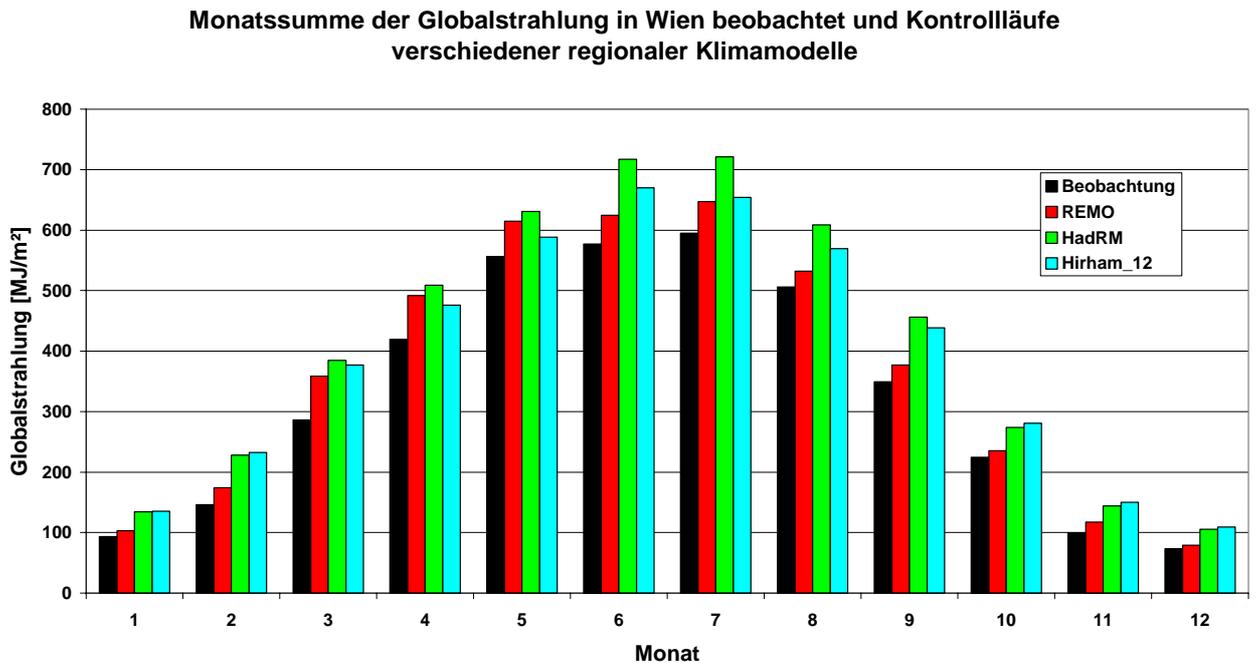


Abb. 28: Monatssummen der Globalstrahlung in Wien gemessen (schwarz) und die Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.

Die relativen Fehler sind in allen Modellen im Winterhalbjahr bei geringer Strahlung am Größten (Abbildung 29). Hier zeigt sich die bessere Übereinstimmung von REMO-UBA mit der Beobachtung besonders deutlich. Die relative Überschätzung bewegt sich bei REMO-UBA nur zwischen 5 Prozent im August und Oktober und etwa 25 Prozent im März. Beim HadRM und Hirham sind die relativen Fehler sehr ähnlich und bewegen sich zwischen um oder unter 10 Prozent im Sommerhalbjahr und mehr als 50 Prozent im Winterhalbjahr. Anscheinend kommt es bei diesen beiden Modellen zu den Hochnebellagen, die für das Wiener Becken im Winter typisch sind. Warum jedoch die Abweichung im Februar am höchsten ausfällt kann damit nicht erklärt werden, da die Hochnebellagen im Februar schon wieder stark abnehmen.

Relativer Fehler der Monatssumme der Globalstrahlung in Wien für die Kontrollläufe verschiedener regionaler Klimamodelle

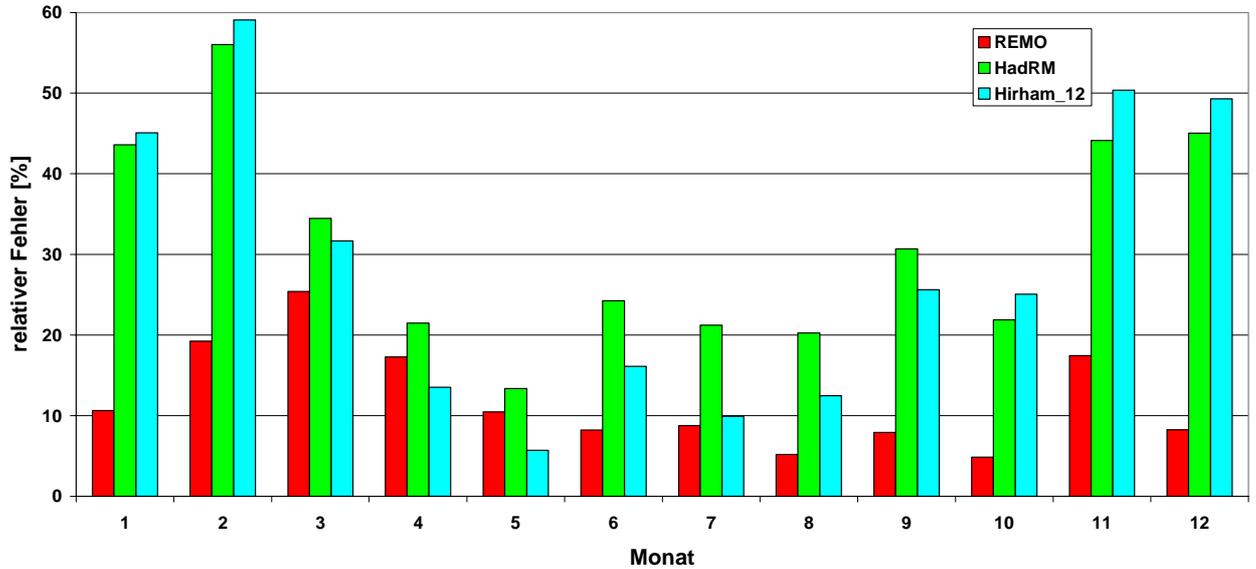


Abb. 29: Relativer Fehler (%) der Monatssummen der Globalstrahlung in Wien bei den Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.

Neben den mittleren Verhältnissen ist auch die Reproduktion der Unterschiede von Jahr zu Jahr ein wesentliches Qualitätskriterium. In Abbildung 30 ist hierzu als Maß die Standardabweichung der Monatssummen dargestellt. Die Variabilität der Sommermonate wird von den Modellen einigermaßen richtig reproduziert, in den Wintermonaten wird sie systematisch unterschätzt. Auch dies dürfte wieder auf den fehlenden Hochnebel zurück zu führen sein, da eben sehr trübe Monate mit wenig Strahlung in den Modellen nicht vorkommen.

Relative Standardabweichung der Monatssumme der Globalstrahlung beobachtet und Regionale Klimamodelle

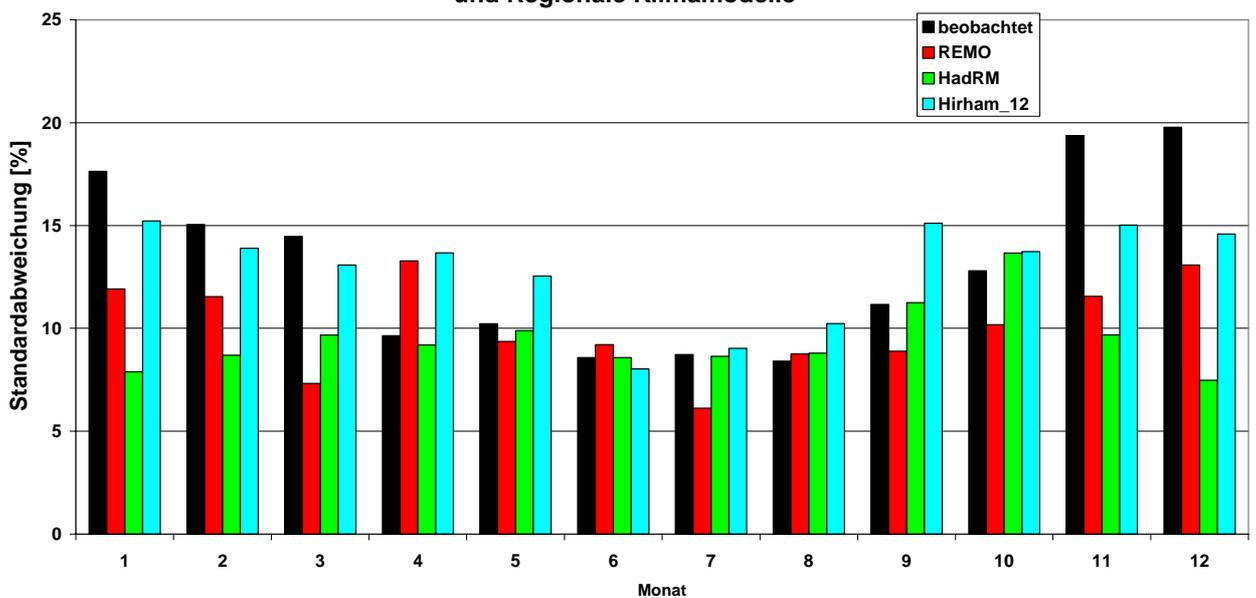


Abb. 30: Vergleich der interannualen Variabilität der Monatssummen der Globalstrahlung in Wien gemessen und bei den Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.

3.4 Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung

In den Abbildungen 31 bis 34 sind die Häufigkeitsverteilungen der Tagessummen der Globalstrahlung beobachtet und die Kontrollläufe der RCMs dargestellt. Im Winter, Frühjahr und Herbst werden in erster Linie die sehr trüben Tage unterschätzt. So sind zum Beispiel im Winter in Wien am häufigsten Tage mit einer Tagessumme an Globalstrahlung von 2 MJ/m² zu beobachten, bei dem Modell REMO_UBA liegt das Maximum bei 4 MJ/m², beim HadRM bei 5 MJ/m² und bei Hirham sogar bei 6 MJ/m².

Diese Unterschätzung in diesen Jahreszeiten dürfte auf den fehlenden, oder zumindest viel zu selten vorkommenden Hochnebel in den Modellen zurück zu führen sein. Dadurch ist auch die Überschätzung der wolkenlosen Bedingungen erklärt, da diese Hochnebellagen gerade bei Hochdrucklagen mit wolkenlosen Bedingungen über der Nebeldecke vorkommen.

Im Sommer gibt es auch zu viele wolkenlose Tage, dabei werden hier eher Tage mit mittleren Strahlungsbedingungen unterschätzt. Dies dürfte auf eine Unterschätzung der konvektiven Wolken am Nachmittag zurück zu führen sein. In Realität gibt es im Sommer am Nachmittag häufig eine Abschattung durch Gewitterwolken, die über der Rax-Semmering Region entstehen. Dieser Vorgang dürfte von den Modellen unterschätzt werden. Bei dem Modell Hirham werden zusätzlich noch zu hohe Tagesmaxima erreicht. So kommen in diesem Modell Tagessummen von mehr als 32 MJ/m² vor, was bei den Messungen nie erreicht wird.

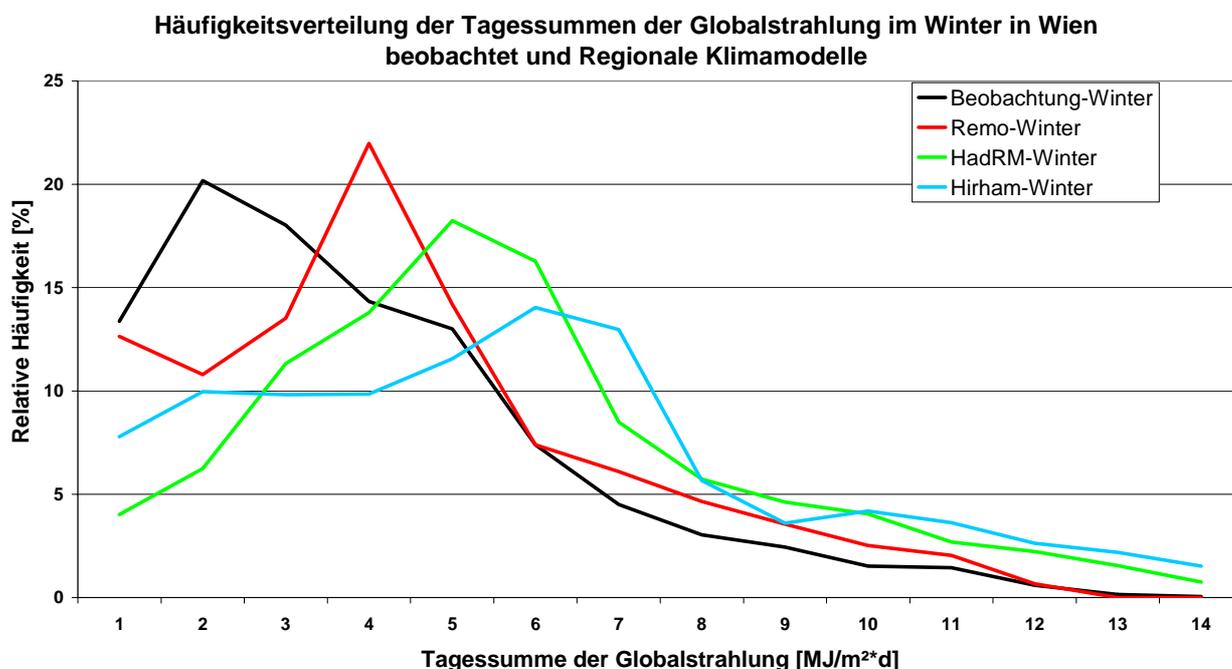


Abb. 31: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Winter (DJF) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.

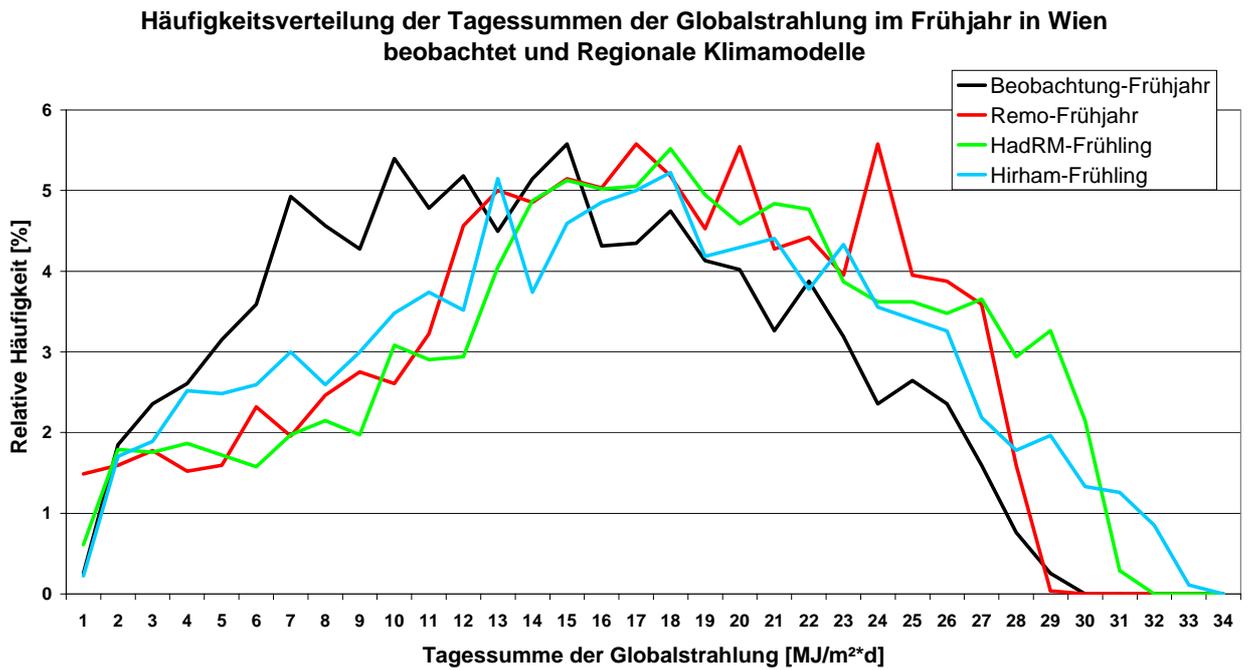


Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Frühjahr (MAM) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.

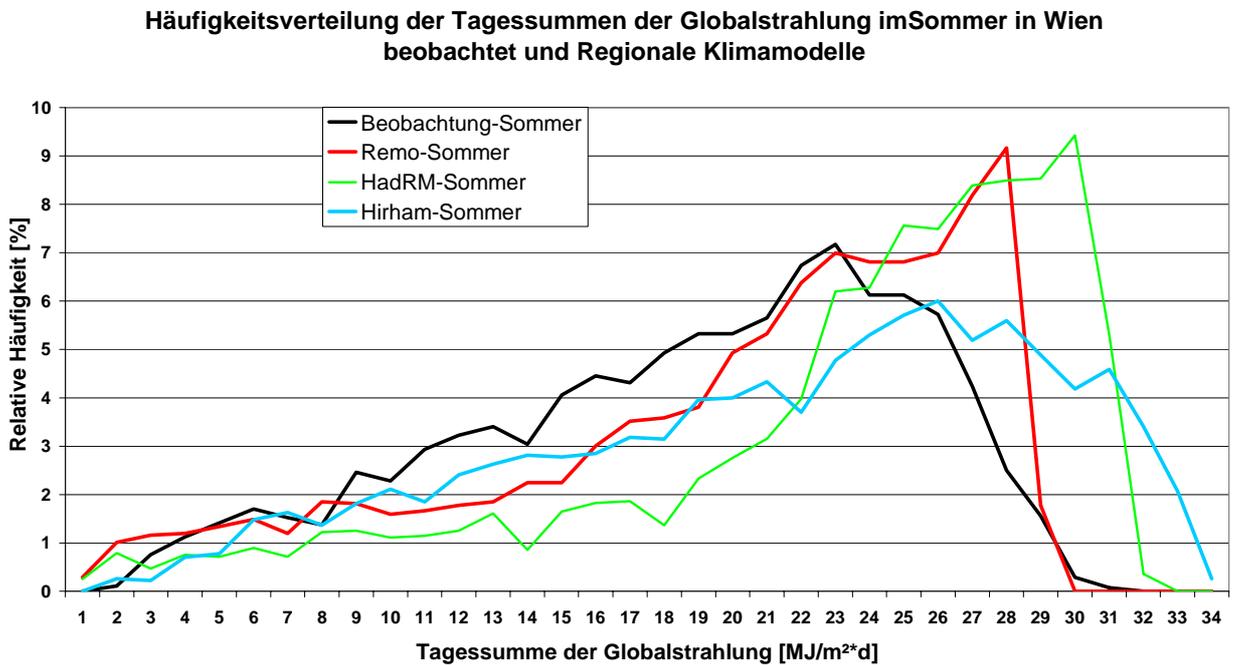


Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Sommer (JJA) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.

Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung im Herbst in Wien
beobachtet und Regionale Klimamodelle

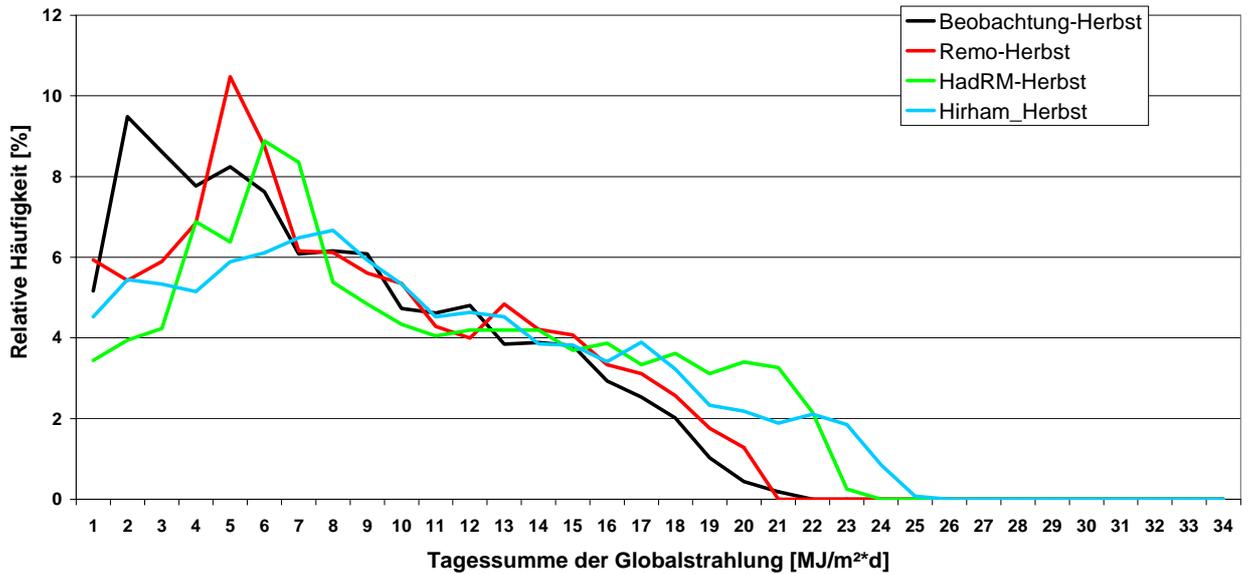


Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Herbst (SON) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.

In Abbildung 35 sind die Abweichungen der Modelle bei eher trüben Tagen und eher strahlungsreichen Tagen zusammengefasst. Tage mit einer Tagessumme von weniger als 8 MJ/m² werden von REMO-UBA um etwa 3 Prozent unterschätzt, bei HadRM und Hirham sind es sogar 8 Prozent. Strahlungsreiche Tage mit mehr als 25 MJ/m² kommen in REMO-UBA fast doppelt so häufig vor wie in Realität und beim HadRM sogar mehr als dreimal so häufig.

Relative Häufigkeit der Tage mit weniger als 8 MJ/m² bzw. mehr als 25 MJ/m² an Tagessumme an Globalstrahlung in Wien beobachtet und Regionale Klimamodelle

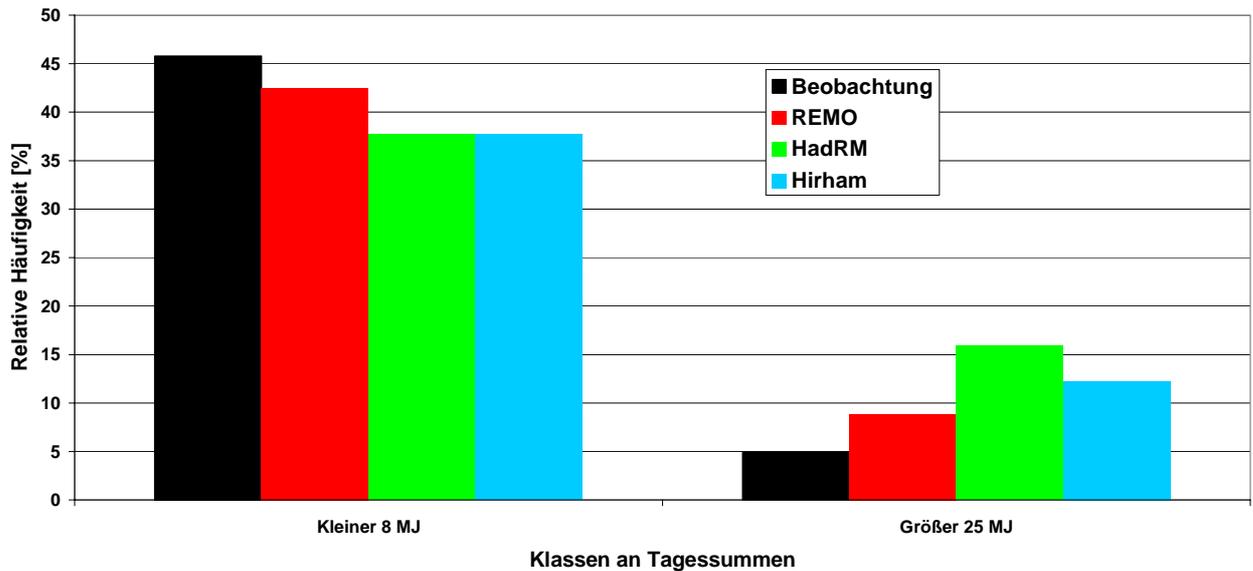


Abb. 35: Häufigkeit von strahlungsarmen und strahlungsreichen Tagen in Wien beobachtet und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.

Diese Fehler bei den Tagessummen der Globalstrahlung erlauben keine direkte Verwendung der direkten Werte der regionalen Klimamodelle für Klimafolgenstudien. Eine Fehlerkorrektur wie sie hier bei der Temperatur durchgeführt wurde ist bei der Strahlung nicht möglich. Eine mittlere Korrektur aller zu hohen Werte würde dazu führen, dass keine Strahlungstage mit wolkenlosen Bedingungen mehr vorkommen. Daher müsste eine Auswahl von Tagen getroffen werden, bei denen die Werte korrigiert werden und andere müssten gleich gelassen werden. Unter Einbeziehung weiterer Parameter wie Niederschlag, Wind und eventuell auch vertikale Informationen könnte eine Strahlungskorrektur durchgeführt werden. Dies übersteigt jedoch weit den Rahmen dieser Studie.

Eine Darstellung des Änderungssignals bei der Globalstrahlung (2071-2100 versus 1961-1990) ist in Abbildung 36 gegeben. Alle Modelle und Emissionsszenarien zeigen eine Strahlungsabnahme im Winterhalbjahr (der Novemberwert von Hirham scheint ein Ausreißer zu sein). Dies deckt sich mit der Zunahme der Niederschläge, wie im Übrigen alle Modelle für diesen Zeitraum zeigen. Die Abnahmen sind am größten bei den REMO-UBA Läufen im März. Dies könnte aber auch daran liegen, dass im Kontrolllauf von REMO-UBA gerade der März eine besonders hohe Überschätzung gezeigt hat. Eventuell gibt es hier Probleme bei REMO-UBA im Kontrolllauf. Allgemein ist die Strahlungsabnahme in der Größenordnung zwischen 0 und 10 Prozent.

Speziell die PRUDENCE Modelle zeigen eine Strahlungszunahme in den Sommermonaten mit einem Maximum von 5 Prozent im August. Auch bei REMO-UBA kommt es beim A1B Szenario zu einer leichten Strahlungszunahme im Sommer. Die anderen beiden Emissionsszenarien zeigen keine Änderung oder eine leichte Abnahme.

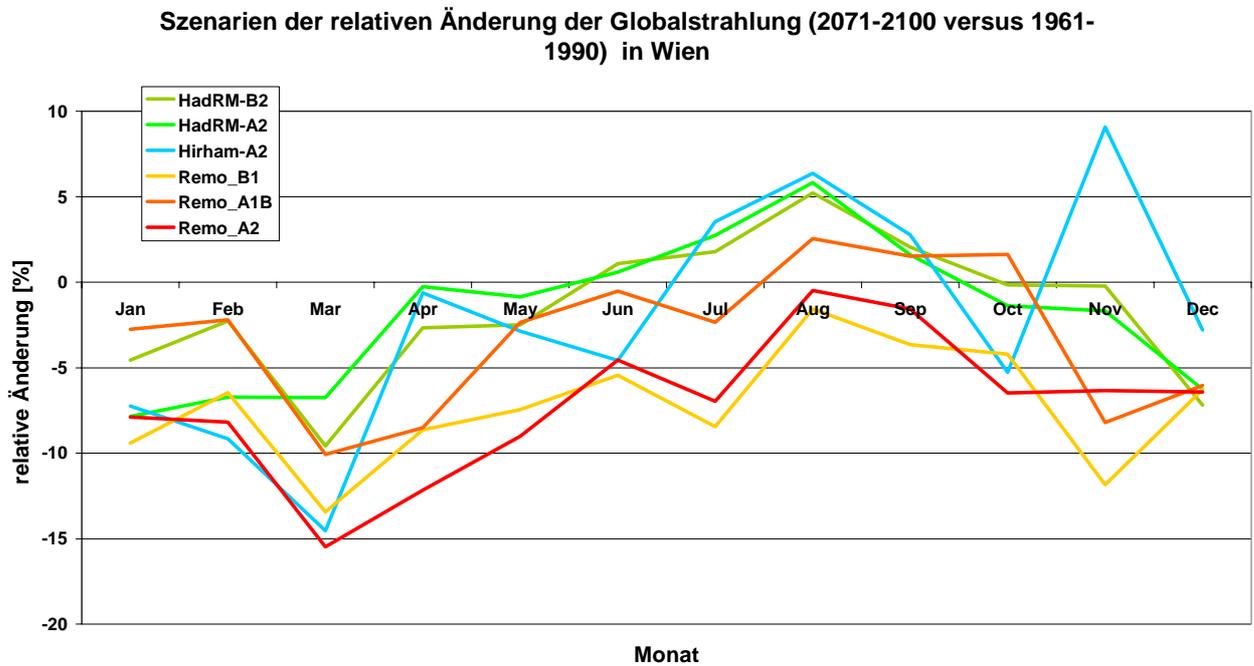


Abb. 36: Jahresgang der Änderung der Globalstrahlung (in Prozent) in Wien. 2071-2100 versus 1961-1990, alle RCMs und Emissionsszenarien.

4 Diskussion und Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde erstmals ein Ensemble der regionalen Klimamodell-Ergebnisse für das Temperaturminimum und das Temperaturmaximum auf Tagesbasis für fünf Wiener Standorte fehlerkorrigiert aufbereitet. Damit stehen die Ergebnisse von 3 regionalen Klimamodellen betrieben mit zwei verschiedenen globalen Klimamodellen und vier unterschiedlichen Emissionsszenarien zur Verfügung.

Das vollständige Ensemble von 6 Szenarien liegt zwar nur für den Zeitraum 2071 bis 2100 vor, durch die Verwendung der REMO-UBA Szenarien gibt es aber auch drei transiente Szenarienläufe für den Zeitraum vor 2071. Dies bedeutet, dass für die Emissionsszenarien B1, A1B und A1 kontinuierliche Tageswerte vom 1. Jänner 2001 bis 31. Dezember 2100 fehlerbereinigte Temperaturwerte vorliegen. Alle bearbeiteten Daten werden dem Auftraggeber natürlich für die weitere Verwendung zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse von REMO-UBA zeigen in den ersten Dekaden des Jahrhunderts nur eine geringe Erwärmung und diese hauptsächlich im Winter. Erst zur Mitte des Jahrhunderts steigen die Temperaturen signifikant an sowie wird eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Emissionsszenarien erkennbar. Gegen Ende des Jahrhunderts zeigt sich die volle Auswirkung des menschlichen Verhaltens, da bei den Szenarien mit geringen Emissionen der Temperaturanstieg nur etwa halb so groß ist wie bei den Szenarien mit hohen Emissionen.

In dieser Arbeit wurde eine große Auswahl an Temperaturkennzahlen, basierend auf Schwellwerten oder auf Temperatursummen, analysiert und grafisch aufbereitet. Anhand der Überschreitungshäufigkeit von Extremwerten wie etwa Hitzetage zeigt sich die Auswirkung der Klimaänderungen wesentlich deutlicher, als wenn man nur die Veränderung der mittleren Verhältnisse betrachtet.

Temperaturverhältnisse, wie sie die Modelle für das Ende des Jahrhunderts für Wien beschreiben, würden gravierende Veränderungen in den Lebensbedingungen in Wien bedeuten. Die Hitzebelastung im Sommer würde Dimensionen erreichen, die man sie derzeit nur aus mediterranen Städten wie beispielsweise Rom oder Florenz kennt.

Bei der Evaluierung der Strahlungsergebnisse der regionalen Modelle zeigt sich, dass die Modelle große Schwierigkeiten haben die Strahlungsverhältnisse in Wien richtig abzubilden. Generell scheinen die Modelle nicht in der Lage zu sein die Hochnebellagen in den Übergangsjahreszeiten und im Winter zu reproduzieren. Im Sommer wiederum scheint das Problem bei der konvektiven Bewölkung (Quellwolken) zu liegen. Daher zeigen alle Modelle jeden Monat zu hohe Strahlungswerte, wobei die Ergebnisse von REMO-UBA noch am Besten abschneiden.

Da dieser Strahlungsfehler auf Tagesbasis nicht einfach korrigiert werden kann, sollten derzeit bei Klimafolgenuntersuchungen eher Strahlungsmodelle verwendet werden, die mit Monatsdaten das Auslangen finden. Monatswerte können durch Abzug des mittleren Fehlers korrigiert werden.

5 Literaturverzeichnis

- Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shuka J., Srinivasan J., Stouffer R. J., Sumi A., und E. T. K. (2007). Climate Models and their Evaluation. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, [Hrsg.] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, S. 589-662. Cambridge u.a.
- Braconnot P., Gillett N. P., Luo Y., Orsini J. A. M., Nicholls N., Penner J. E., und Stott P. A. (2007). Understanding and Attributing Climate Change. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, [Hrsg.] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, S. 663-745. Cambridge u.a.
- Christensen, J., Christensen, O., Lopez, P., Meljgaard, E. V., and Botzet, M. (1996). The HIRHAM4 atmospheric climate model. Technical report, DMI report 96-4.
- Christensen, J. H. and Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*.
- Döll P., Fuhr D., Herfort J., Jaeger A., Printz A., und Voerkelius S. (2000). *Wasser-
verfügbarkeit sowie ökologische, klimatische und sozioökonomische Wechsel-
wirkungen im semiariden Nordosten Brasiliens*.
- Formayer H., Matulla C., Haas P., und Groll N. (2003). *Möglichkeiten statistischer
Downscalingverfahren zur Ableitung von Extremereignissen in Österreich aus
GCM-Feldern*. Teilprojekt von StartClim 2003 "Startprojekt Klimaschutz:
Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Öster-
reich". Wien
- Formayer, H., Harlfinger, O., Mursch-Radlgruber, E., Nefzger, H., Groll, N., Kromp-
Kolb, H. (2004): Objektivierung der geländeklimatischen Bewertung der
Weinbaulagen Österreichs in Hinblick auf deren Auswirkung auf die Qualität
des Weines am Beispiel der Regionen um Oggau und Retz.. EndberichtBun-
desministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Formayer, H., Clementschisch, L. und Kromp-Kolb H. (2007): Auswirkungen des
Klimawandels auf Wien unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszena-
rien. Studie im Auftrag der Klimaschutzkoordinationsstelle Wien.
- Gerersdorfer T., Formayer H., Moshhammer H., Frank A., Haas P., und Leitner B.
(2006). *Untersuchung zur nächtlichen Abkühlung in einem sich ändernden
Klima*. Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit!“ Wien
- Harlfinger O. und G. Knees, 1999: Klimahandbuch der österreichischen Bodenschät-
zung. 1. Teil. Universitätsverlag Wagner. 196 pp.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adoptions and Vulnerability - Sum-
mary for Policymakers*.
- IPCC (2002). *Klimaänderung 2001: Zusammenfassung für politische Entschei-
dungstäger*. Bern

-
- JACOB, 2005: REMO A1B SCENARIO RUN, UBA PROJECT , 0.088 DEGREE RESOLUTION, RUN NO. 006211, 1H DATA. CERA-DB "RE-MO_UBA_A1B_1_R006211_1H",
http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H
- Jones, R., J. Murphy, D. Hassell, and R. Taylor, 2001: Ensemble mean changes in a simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modelling system HadAM3H/HadRM3H
- Kasang D. 2007. Klimamodelle. <http://www.hamburger-bildungsserver.de/index.phtml?site=themen.klima>, 20. November 2007
- Kom (2007): Grünbuch "Anpassung an den Klimawandel in Europa - Optionen für Maßnahmen der EU" (KOM(2007)0354).
- Kromp-Kolb H., und Formayer H. (2005). *Schwarzbuch Klimawandel. Wie viel Zeit bleibt uns noch?* Ecwin-Verlag. Salzburg.
- Kromp-Kolb H., und Schwarzl I. [Hrsg.] (2005). *Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich*. Endbericht von StartClim2004 „Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich“. Wien
- Krüger B. C., Schicker I., Formayer H., und Moshammer H. (2007). *Feinstaub und Klimawandel - Gibt es Zusammenhänge in Nordost-Österreich?* Teilprojekt von StartClim 2006 "Klimawandel und Gesundheit, Tourismus, Energie". Wien
- Kysely, J., Kalvová, J. and Kveton, V. (2000): Heat Waves in the South Moravian Region during the Period 1961 – 1995. In: *Studia geoph. Et geod.* 44 (20000), 57-72. Studia-Geo s.r.o., Prague.
- Loibl W., Beck A., Dorninger M., Formayer H., Gobiet A., und Schöner [Hrsg.] W. (2007). *Reclip:More (Research for Climate Protection: Model Run Evaluation)*. Wien
- Matulla C., Penlap E. K., und von Storch H. (2002). Empirisches Downscaling - Überblick und zwei Beispiele. In *Klimastatusbericht 2002*, [Hrsg.] Deutscher Wetterdienst, S. 20-31. Offenbach.
- Reclip:More (2007). *Klimazukunft Österreich. Kleinräumige Klimaszenarien 1981-1990 und 2041-2050. Signale des Klimawandels. Medieninformation zum Projektabschluss*.
- Spörk J., Hochbichler E., Schönthaler K., Köck R., Rigler E., und Holtermann C. (2003). *Modelle der Vegetationsentwicklung unter veränderten Nutzungs- und Klimaverhältnissen und ihre Auswirkung auf den Karstwasserhaushalt in den Quelleinzugsgebieten der Stadt Wien; Teilgebiet Hochlagenvegetation (A), Teilgebiet Wald (B)*. Wien

6 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die vier Basisszenarien des Third Assessment Report des IPCC. (Döll et al., 2000)	8
Abb. 1: Vergleich zwischen berechnetem (rot) und beobachteter (schwarz) globalen Mitteltemperatur mit anthropogenem Einfluss (Braconnot et al., 2007)	9
Abb. 2: Vergleich zwischen berechnetem (bau) und beobachteter (schwarz) globaler Mitteltemperatur ohne anthropogenen Einfluss (Braconnot et al., 2007).....	9
Abb. 3: Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999. (IPCC, 2002)	10
Abb. 4: Relative Änderung der Niederschläge (in Prozent) für die Perioden 2090 bis 2099 im Vergleich zu 1980 bis 1999 (IPCC, 2007).....	11
Abb. 5: Schematische Darstellung des Downscaling für Reclip:More (Reclip:More, 2007)	11
Abb. 6: Änderung des saisonalen Temperaturdurchschnitts (T2m) in °C für 2041 bis 2050 im Vergleich zu 1981 bis 1990. Dargestellt für das Regionalmodell MM5. (Loibl et al., 2007)	12
Abb. 7: Änderung des saisonalen Niederschlages in Prozent für 2041 bis 2050 im Vergleich zu 1981 bis 1990. Dargestellt für das Regionalmodell MM5. (Loibl et al., 2007)	13
Abb. 8: Ergebnisse des Projektes PRUDENCE bezüglich Temperatur- und Niederschlagsänderung im Alpenraum (2071-2100 versus 1961-1990).....	14
Abb. 9: Anomalie der Jahresmitteltemperaturen in Wien für das 21. Jahrhundert nach REMO-UBA und drei Emissionsszenarien (Einzeljahre und 30 jähriger Gaußfilter). 15	
Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Tagesminimumstemperatur im Juli in Wien Hohe Warte beobachtet und REMO-Punktwert (oben) und Korrekturfunktion in Abhängigkeit zum Rang des Temperaturwertes (unten).	17
Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximumstemperatur im Juli in Wien Hohe Warte beobachtet und REMO-Punktwert (oben) und Korrekturfunktion in Abhängigkeit zum Rang des Temperaturwertes (unten)	17
Tabelle 2: Verwendete meteorologische Stationen der ZAMG.....	18
Tabelle 3: Verwendete regionale Klimamodelle	19
Abb. 12: Häufigkeit von Frosttagen (link) und Eistagen (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	23
Abb. 13: Häufigkeit von Frosttagen (link) und Eistagen (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.....	23
Abb. 14: Szenarien der Häufigkeit von Frosttagen (links) und Eistagen (rechst) für die Station Wien Hohe Warte.	24
Abb. 15: Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30$ °C (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35$ °C (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	25

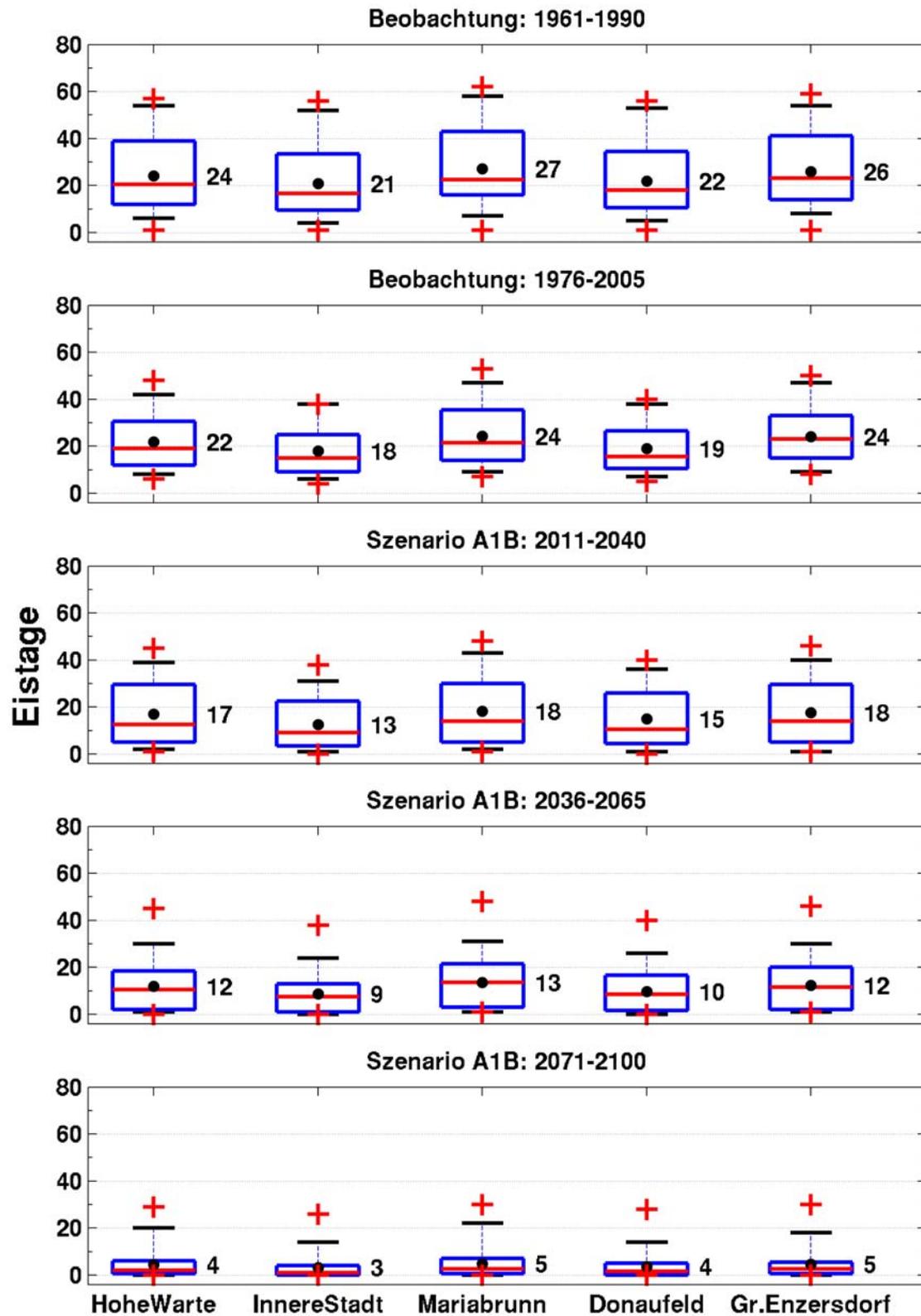
Abb. 16: Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	25
Abb. 17: Szenarien der Häufigkeit von Hitzetagen mit $T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (link) und Hitzetagen mit $T_{max} \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechst) für die Station Wien Hohe Warte.....	26
Abb. 18: Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten verbunden sind ($T_{min} \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$, rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	27
Abb. 19: Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten verbunden sind ($T_{min} \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$, rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	27
Abb. 20: Szenarien der Häufigkeit von Tagen während einer Hitzewelle nach Kysely (link) und Hitzetagen die mit warmen Nächten ($T_{min} \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$, rechts) für die Station Wien Hohe Warte.	28
Abb. 21: Länge der Vegetationsperiode 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten).....	29
Abb. 22: Heizgradtagsumme 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten).....	30
Abb. 23: Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 18.3 \text{ }^\circ\text{C}$, (link) und Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.	31
Abb. 24: Heizgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 18.3 \text{ }^\circ\text{C}$, (link) und Heizgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechts) in der Periode 1976-2005 an fünf Wiener meteorologischen Stationen.....	31
Abb. 25: Szenarien der Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 18.3 \text{ }^\circ\text{C}$, (link) und Kühlgradtagsumme mit Grenzwert $T_{mittel} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechts) für die Station Wien Hohe Warte.	32
Abb. 26: Temperatursummen nach Harlfinger für 1961-1990 (links oben) und 1976-2005 (rechts oben), sowie Szenarien für die Station Wien Hohe Warte (unten).....	33
Abb. 27: Vergleich Wien Hohe Warte mit Wien Innere Stadt für das REMO-UBA Szenario A1B und ausgewählten Temperaturkenngrößen.....	35
Abb. 28: Monatssummen der Globalstrahlung in Wien gemessen (schwarz) und die Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.	38
Abb. 29: Relativer Fehler (%) der Monatssummen der Globalstrahlung in Wien bei den Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.	39
Abb. 30: Vergleich der interannualen Variabilität der Monatssummen der Globalstrahlung in Wien gemessen und bei den Kontrollläufe von drei regionalen Klimamodellen.....	39
Abb. 31: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Winter (DJF) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.....	40

Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Frühjahr (MAM) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.....	41
Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Sommer (JJA) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.....	41
Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Globalstrahlung in Wien im Herbst (SON) gemessen (schwarz) und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.....	42
Abb. 35: Häufigkeit von strahlungsarmen und strahlungsreichen Tagen in Wien beobachtet und bei den Kontrollläufen von drei Klimamodellen.....	43
Abb. 36: Jahresgang der Änderung der Globalstrahlung (in Prozent) in Wien. 2071-2100 versus 1961-1990, alle RCMs und Emissionsszenarien.	44

7 Anhang

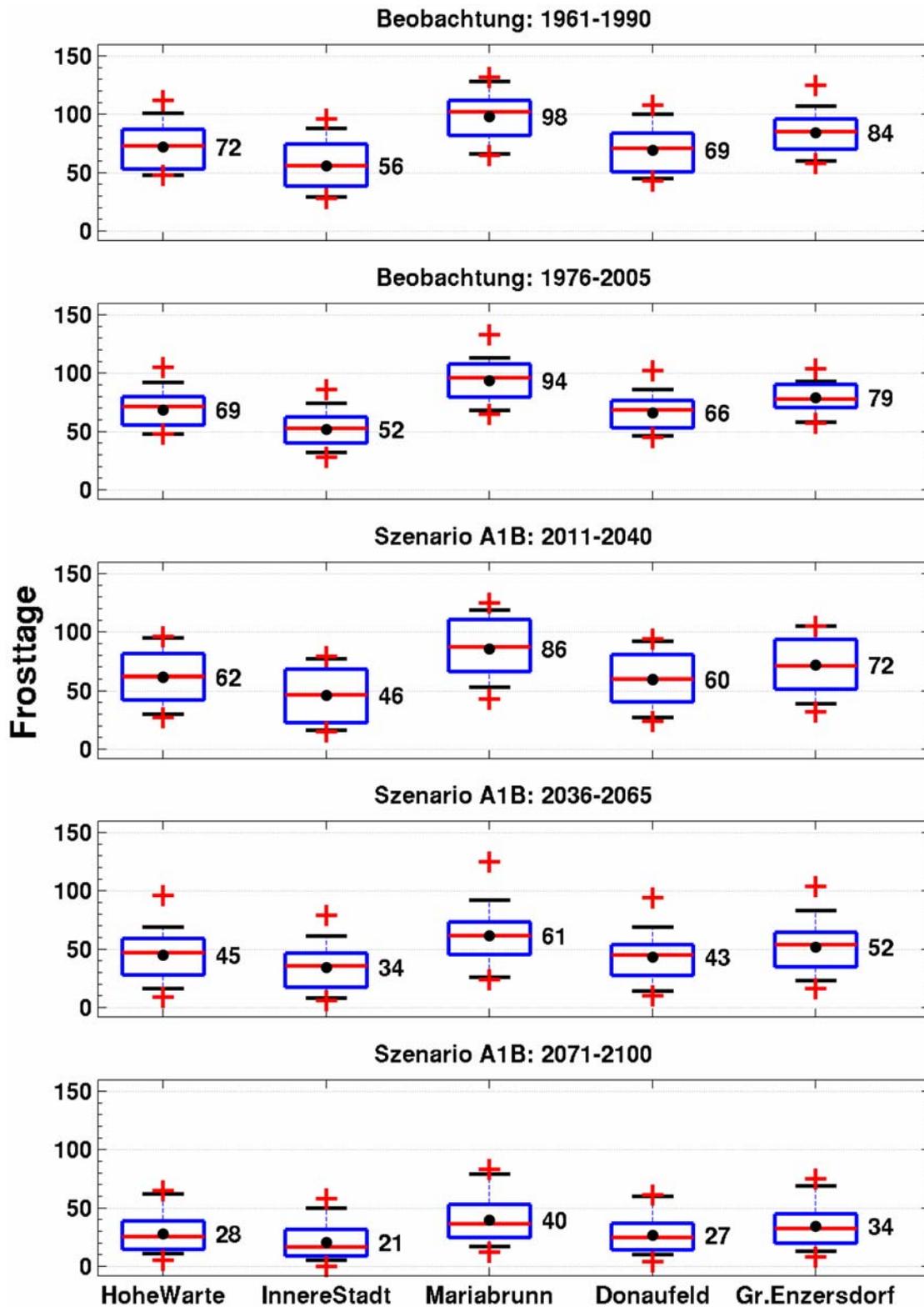
1) „Eistage“

Kriterium: Das Maximum der Temperatur bleibt am entsprechenden Tag unter 0 °C.



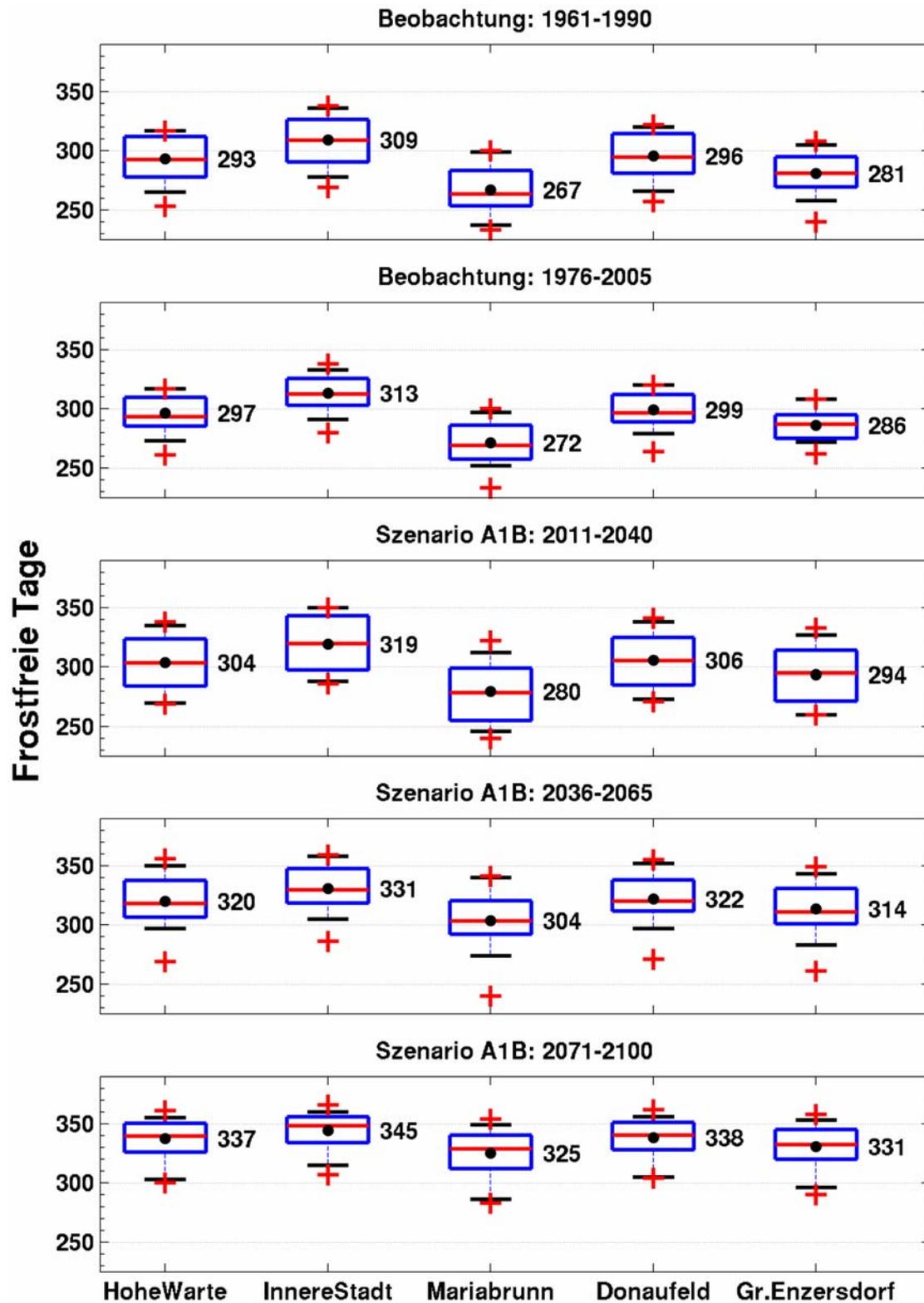
2) „Frosttage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur bleibt am entsprechenden Tag unter 0 °C. (Maximum und Tagesmitteltemperatur können dennoch positiv sein).



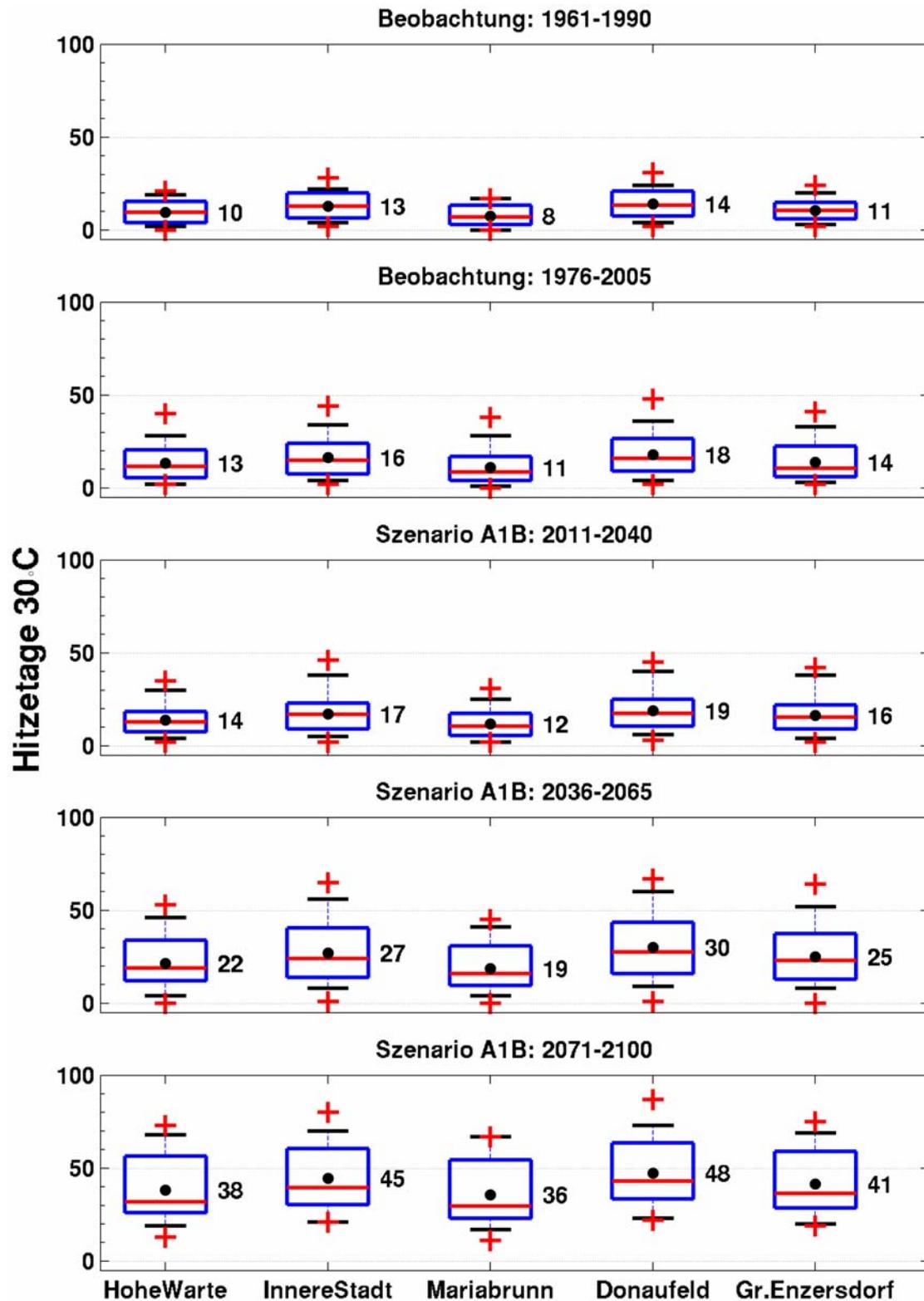
3) „Frostfreie Tage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur erreicht am entsprechenden Tag 0 °C oder mehr. (Maximum und Tagesmitteltemperatur zwingend positiv).



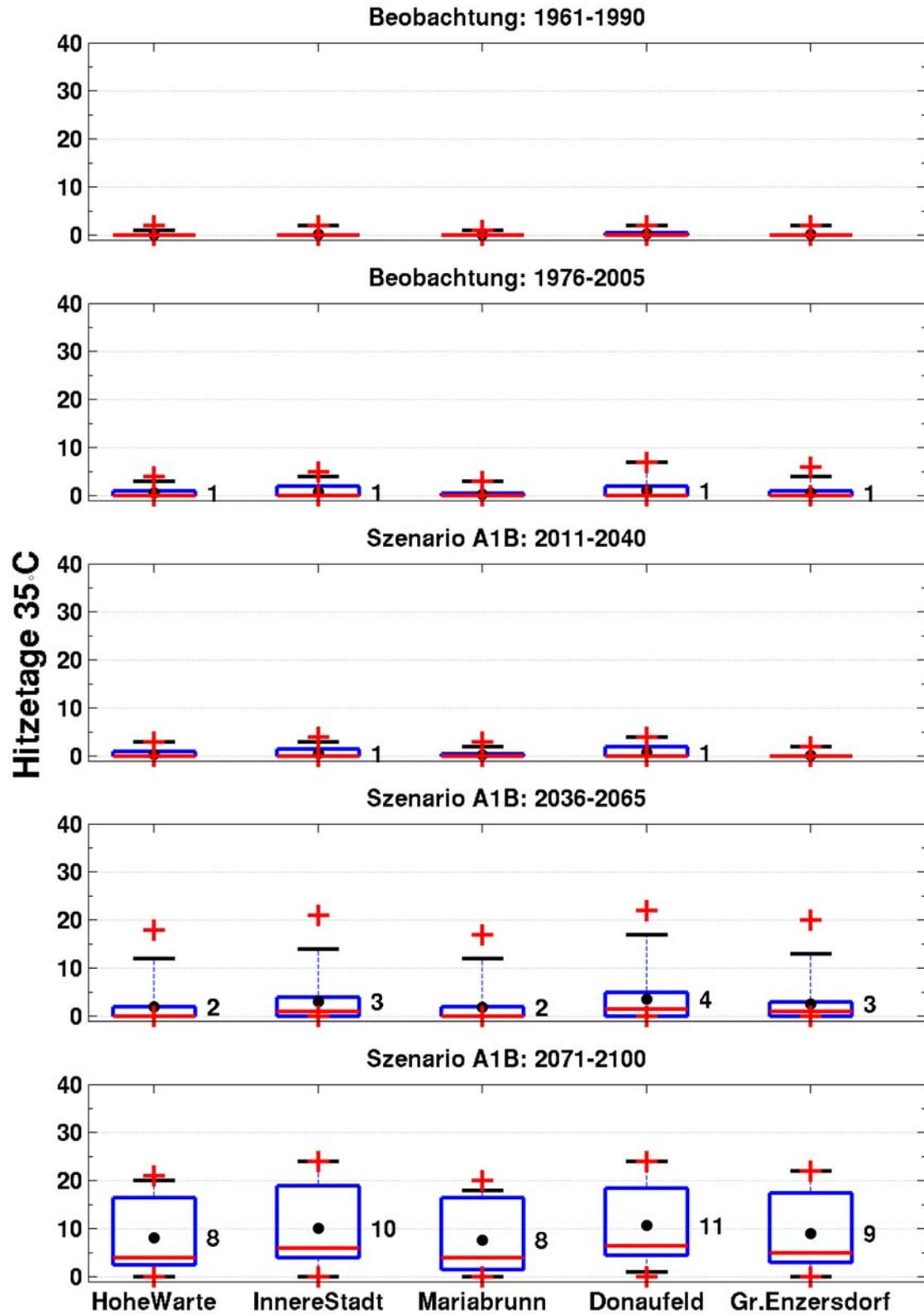
4) „Hitzetage 30 °C“

Kriterium: Tagesmaximum der Temperatur am betreffenden Tag 30 °C oder darüber.



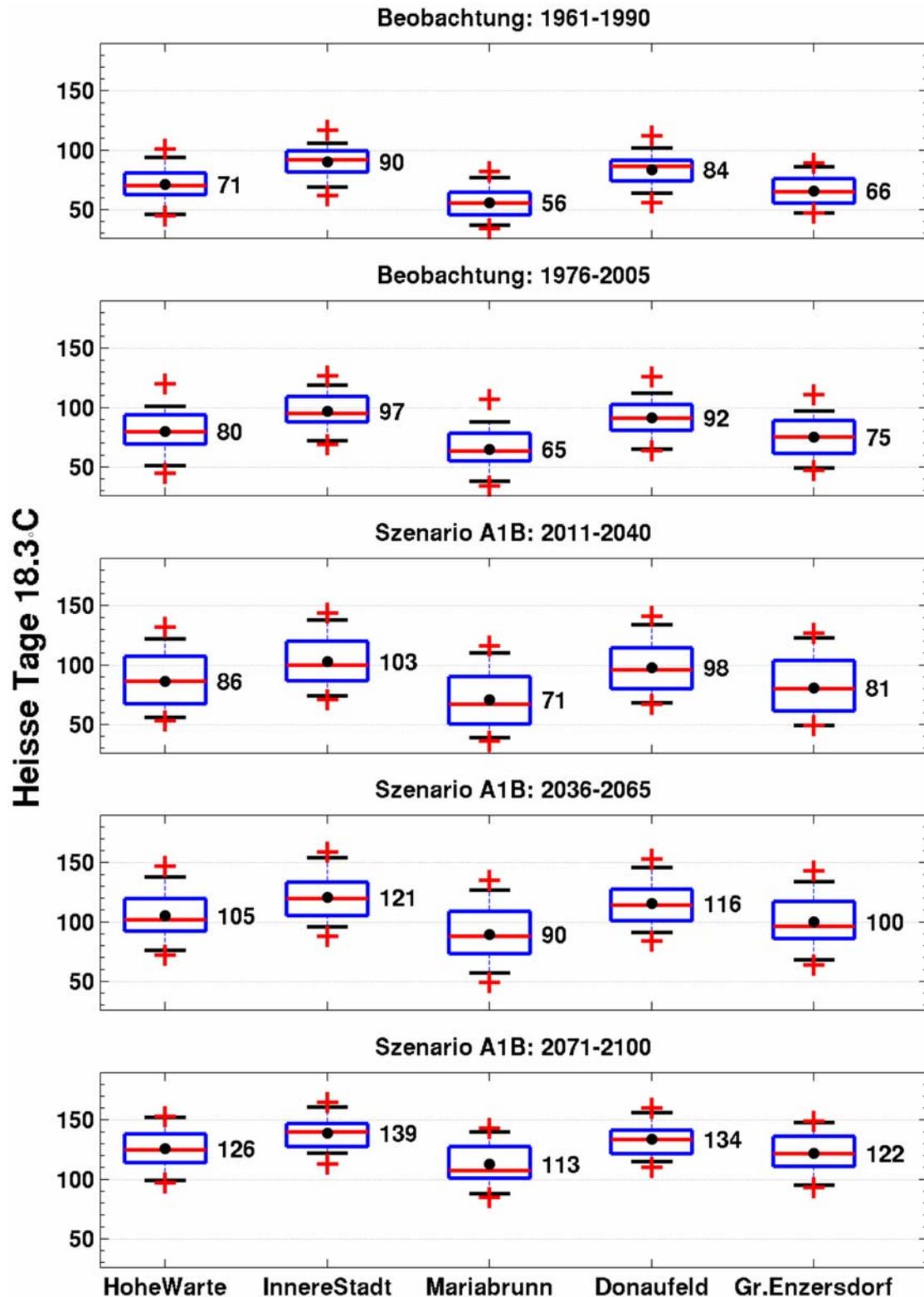
5) „Hitzetage 35 °C“

Kriterium: Tagesmaximum der Temperatur am betreffenden Tag 35 °C oder darüber.



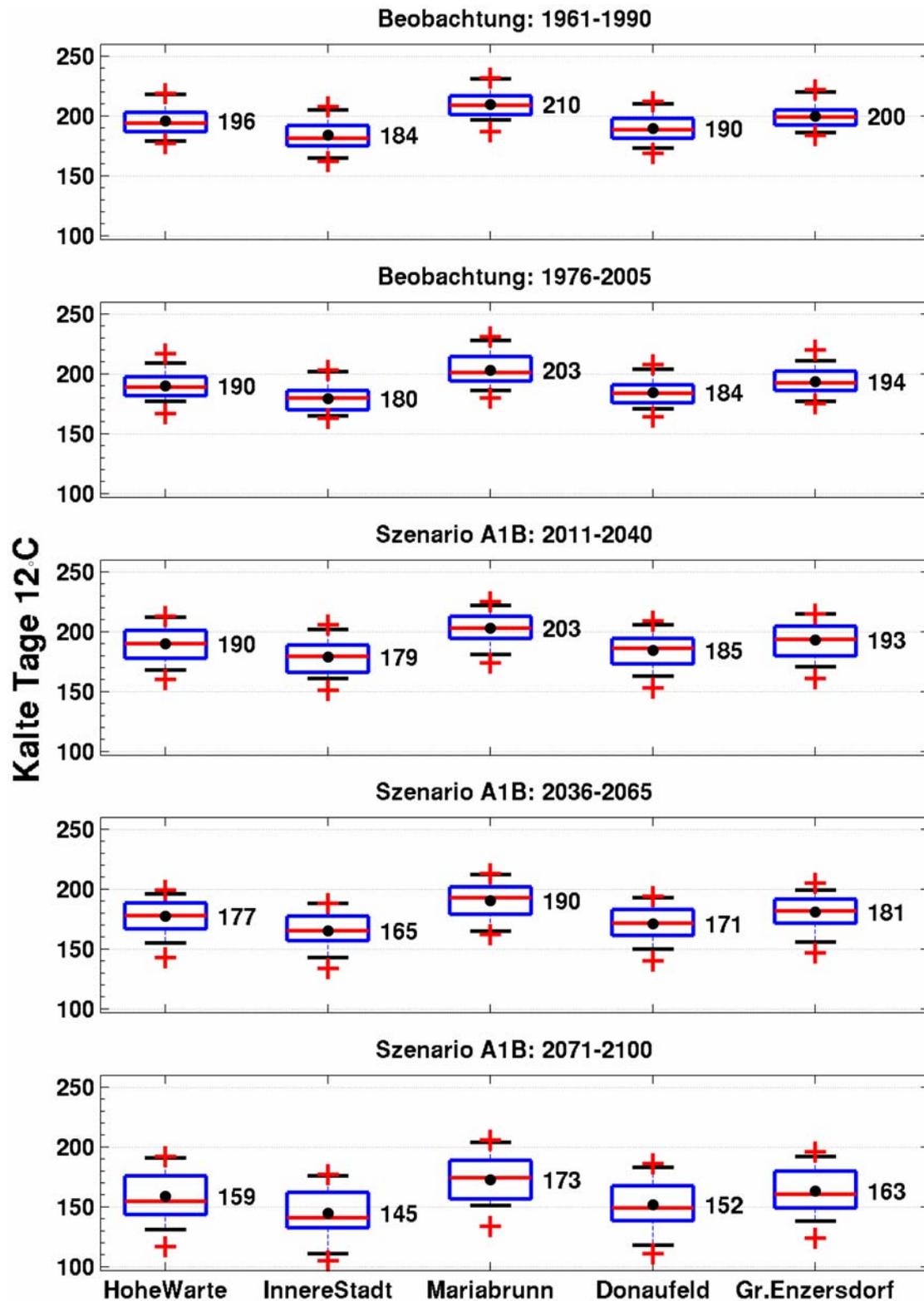
6) „Heisse Tage 18.3 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 18.3 °C oder darüber. (Internationale Definition)



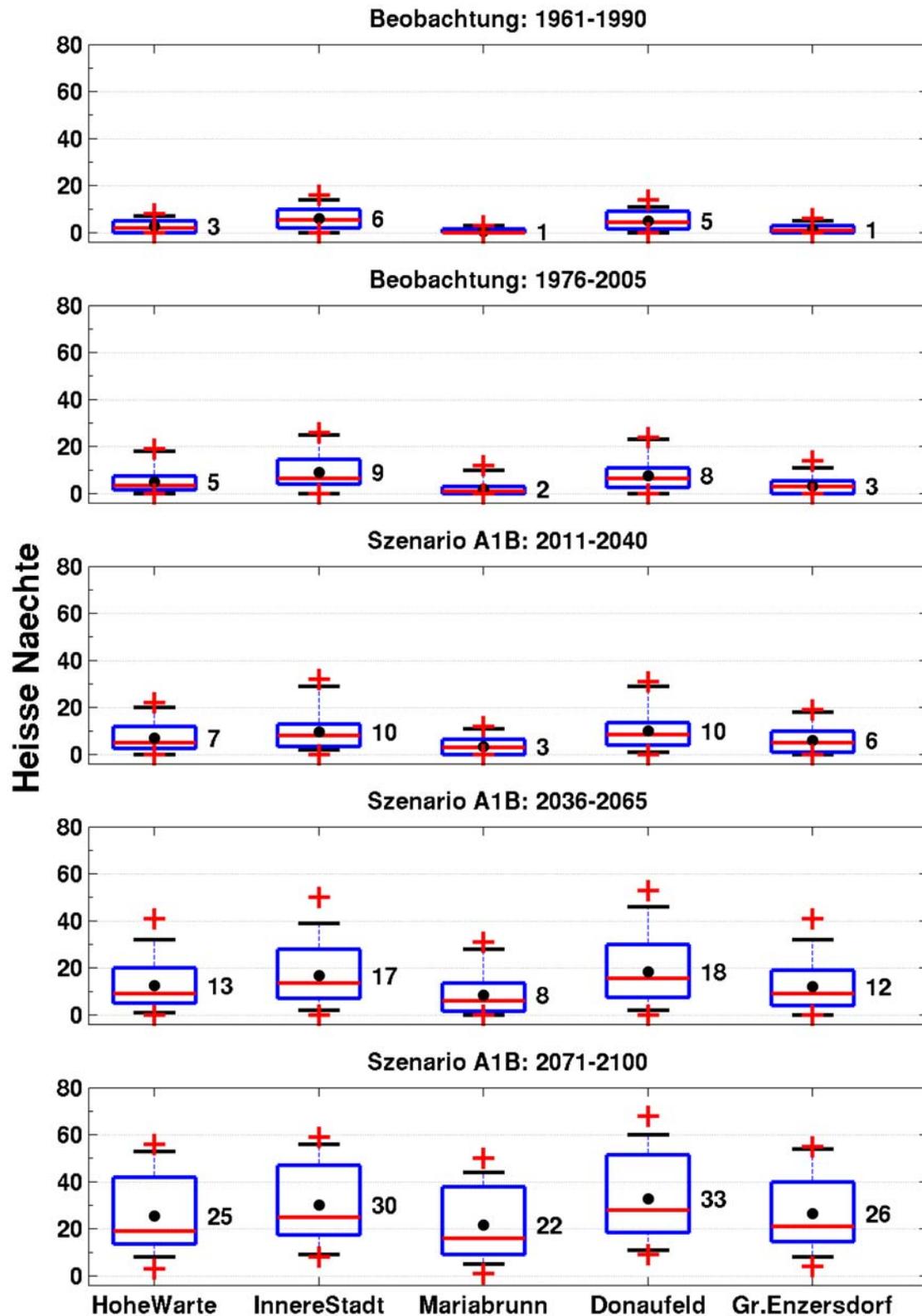
7) „Kühle Tage 12 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag bleibt unter 12 °C.



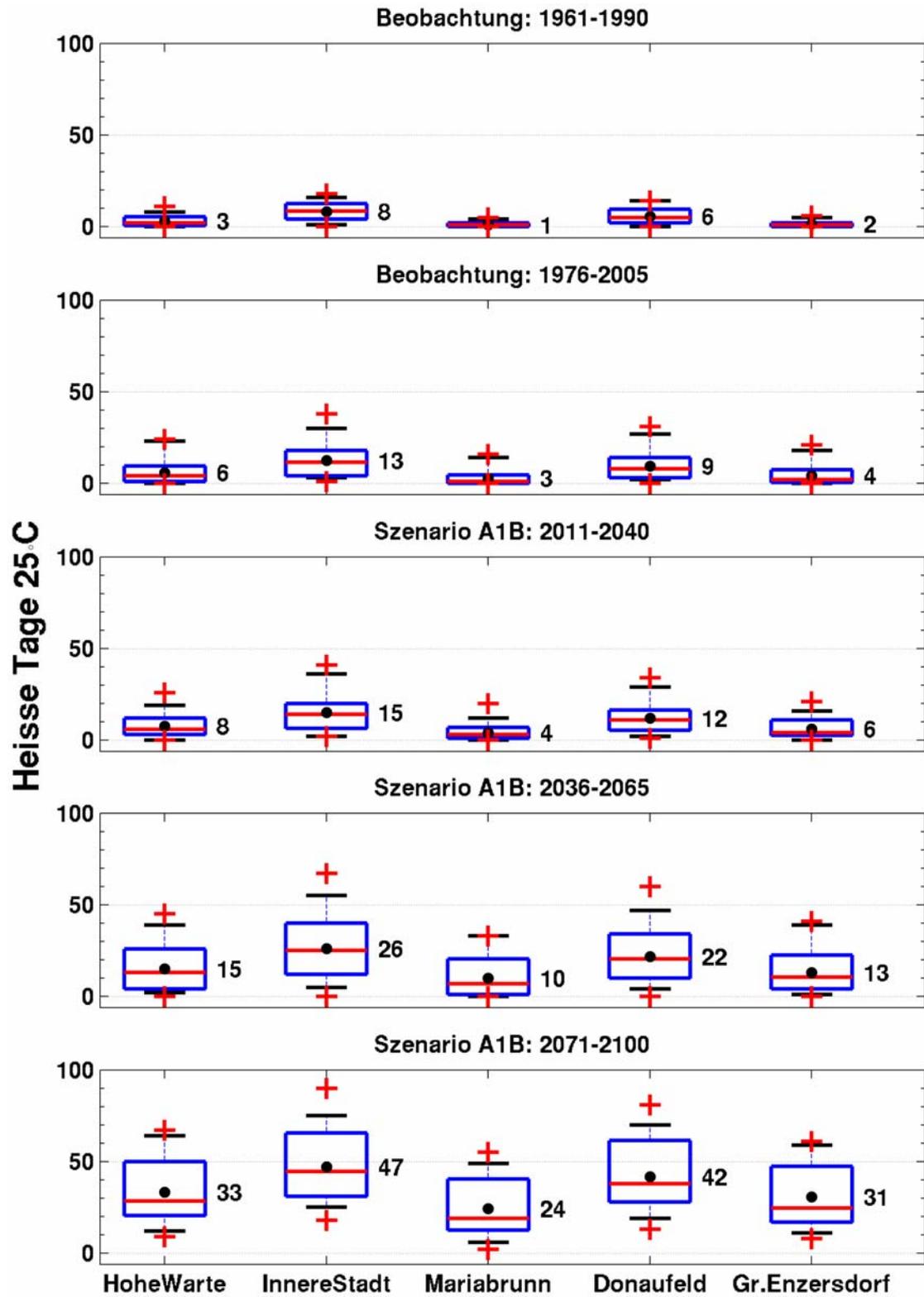
8) „Heisse Nächte“

Kriterium: Wenn das Tagesmaximum der Temperatur an zwei hintereinander folgenden Tagen zumindest 30 °C erreicht (Hitzetag) und das Temperaturminimum in der Nacht dazwischen nicht unter 18 °C sinkt.



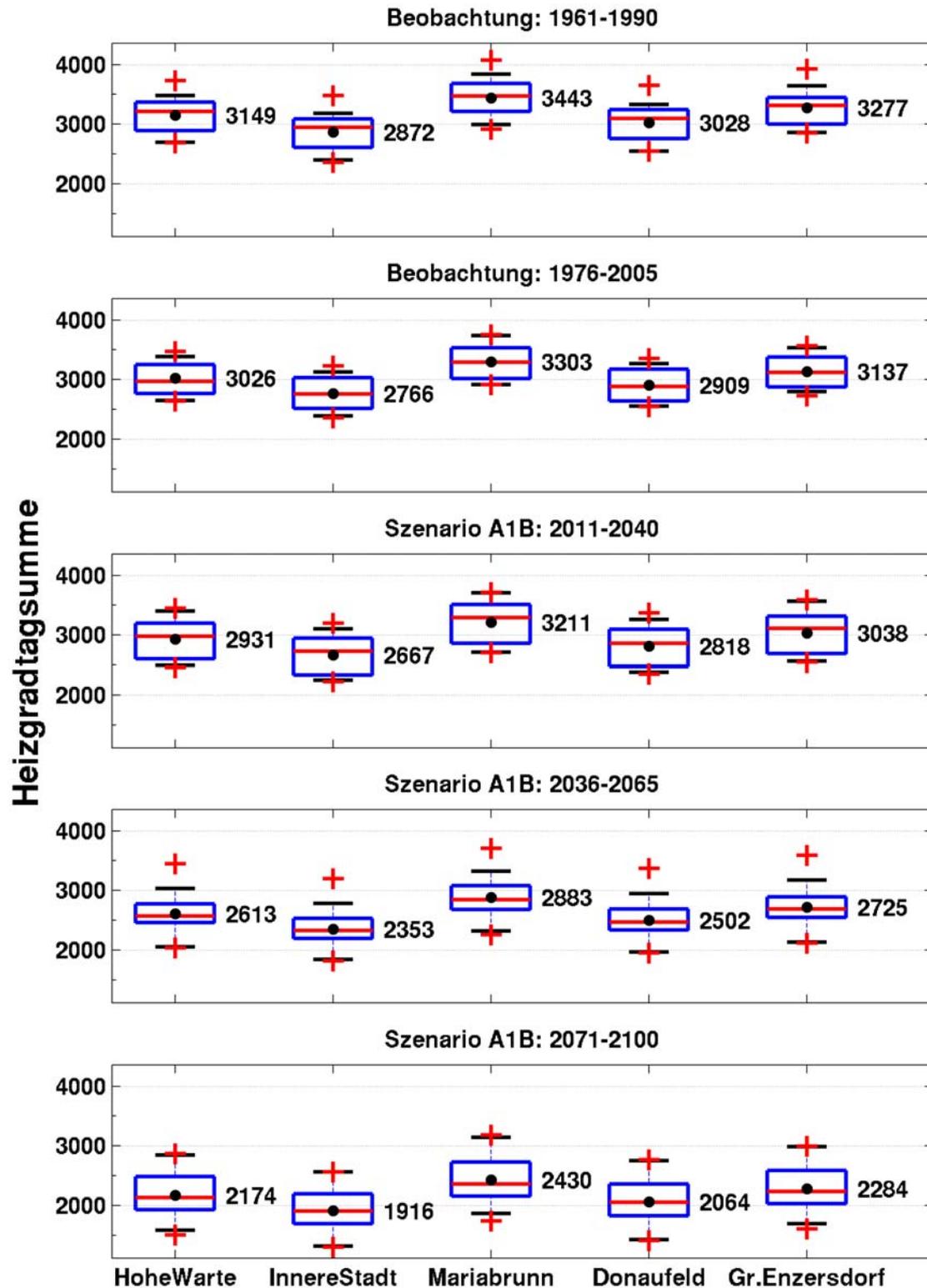
9) „Sehr heisse Tage 25 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 25 °C oder darüber.



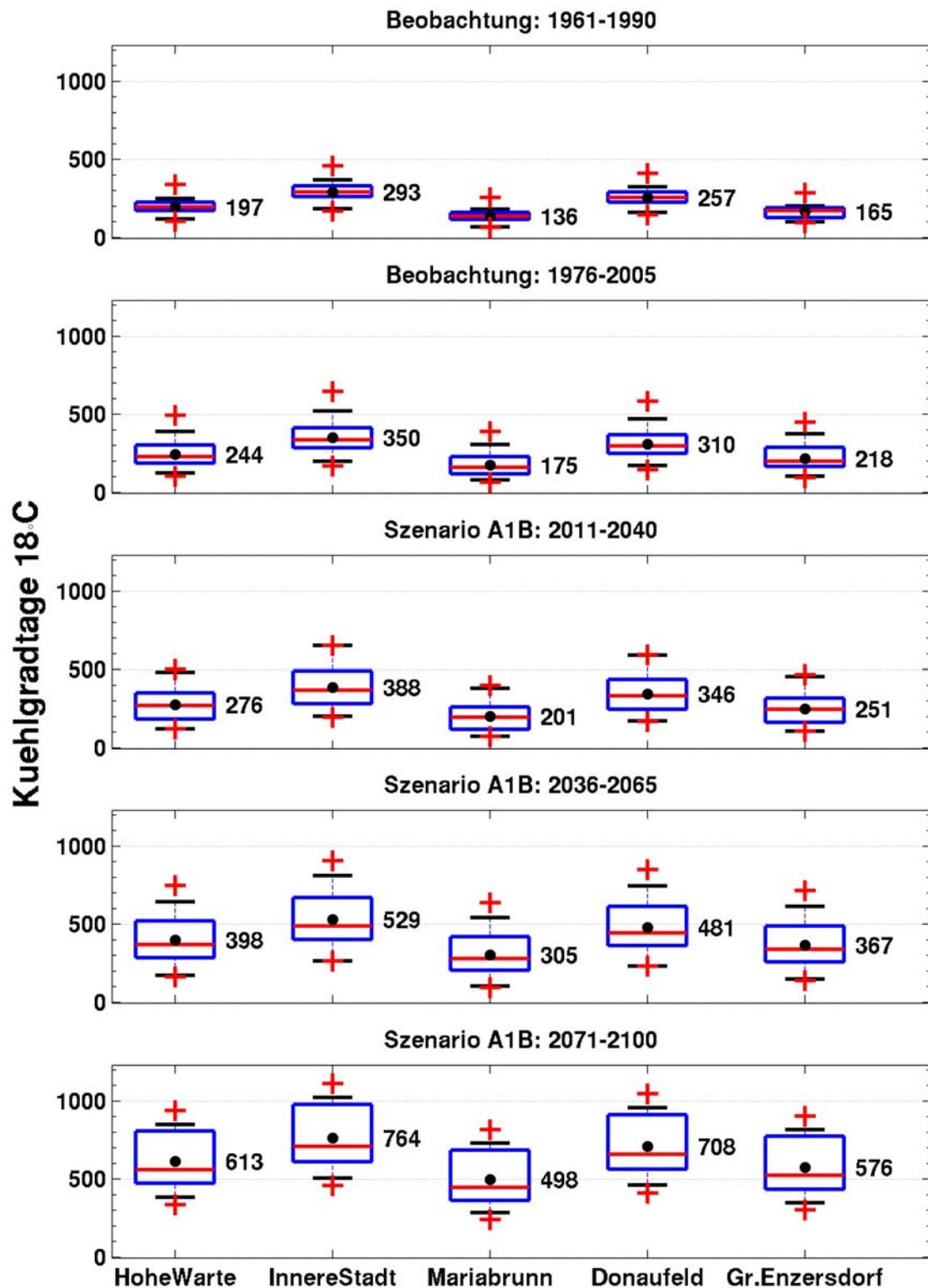
10) „Heizgradtage 20/12“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur unter 12 °C bleibt, so wird die Temperatursumme berechnet: (20-Tmittel)



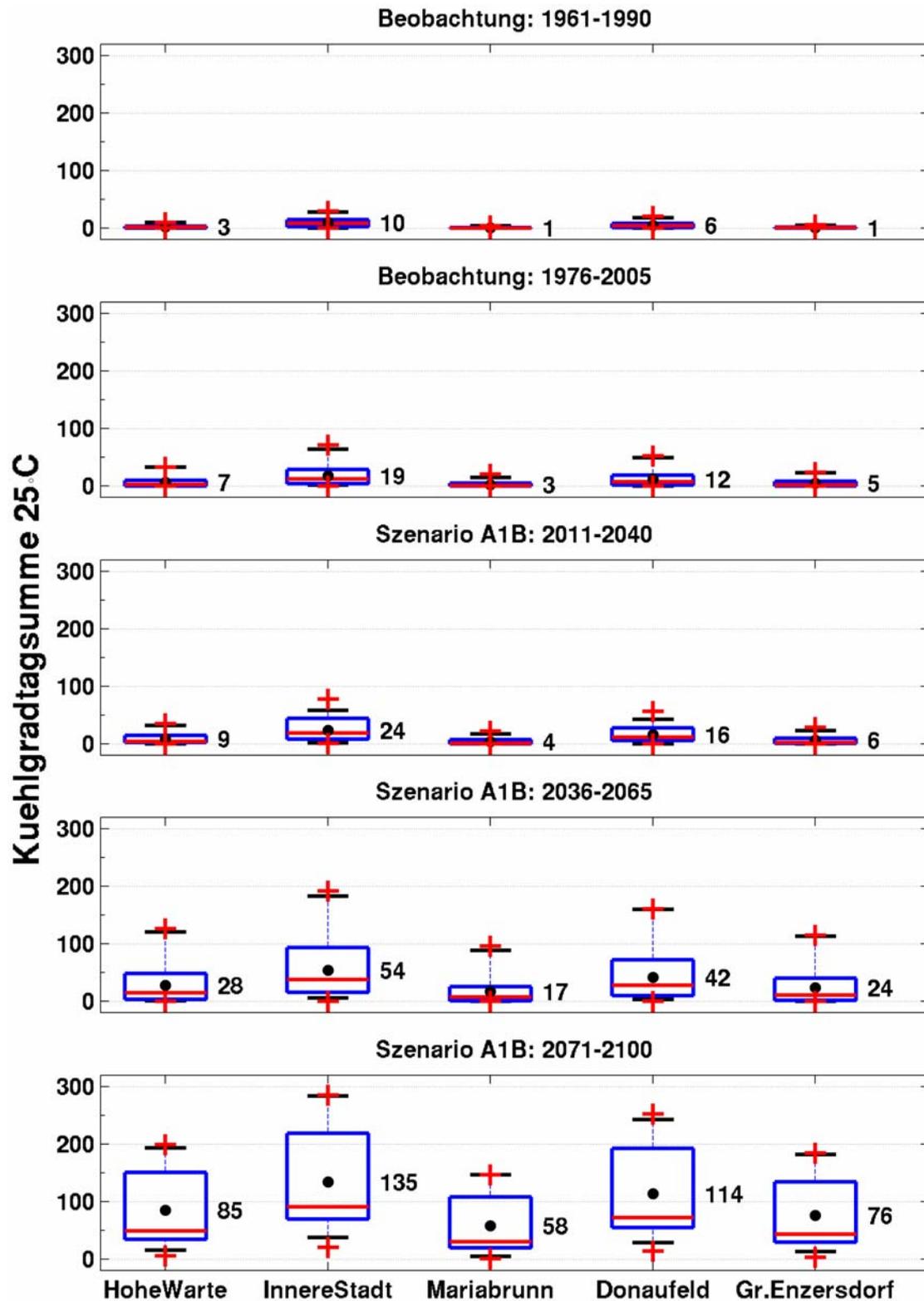
11) „Kühlgradtagssumme 18.3 °C“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 18.3 °C oder darüber erreicht, dann wird die Temperatursumme berechnet: (Tmittel-18.3°)



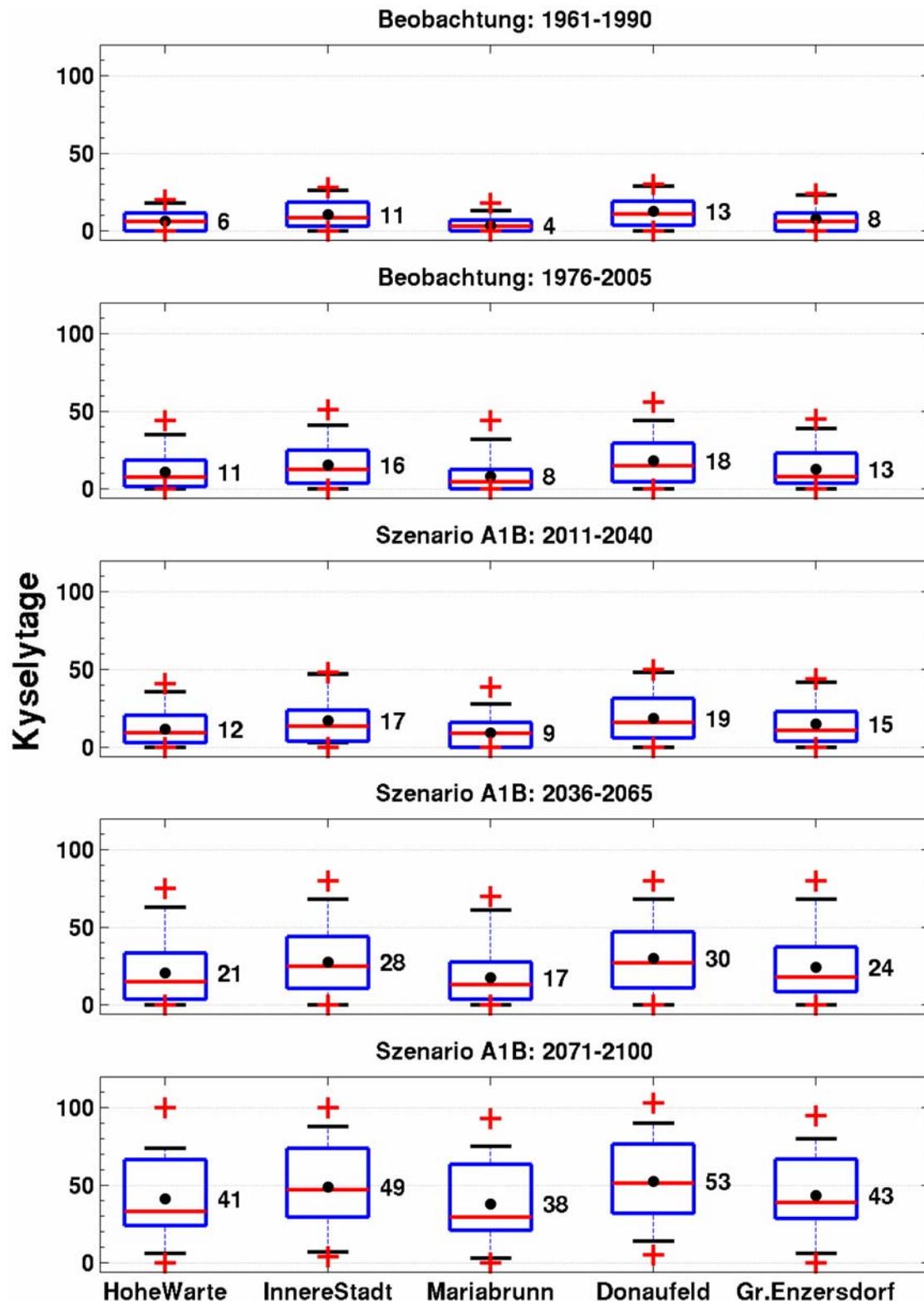
12) „Kühlgradtagsumme 25 °C“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 25.0 °C oder darüber erreicht, dann wird die Temperatursumme berechnet: $(T_{\text{mittel}} - 25^\circ)$



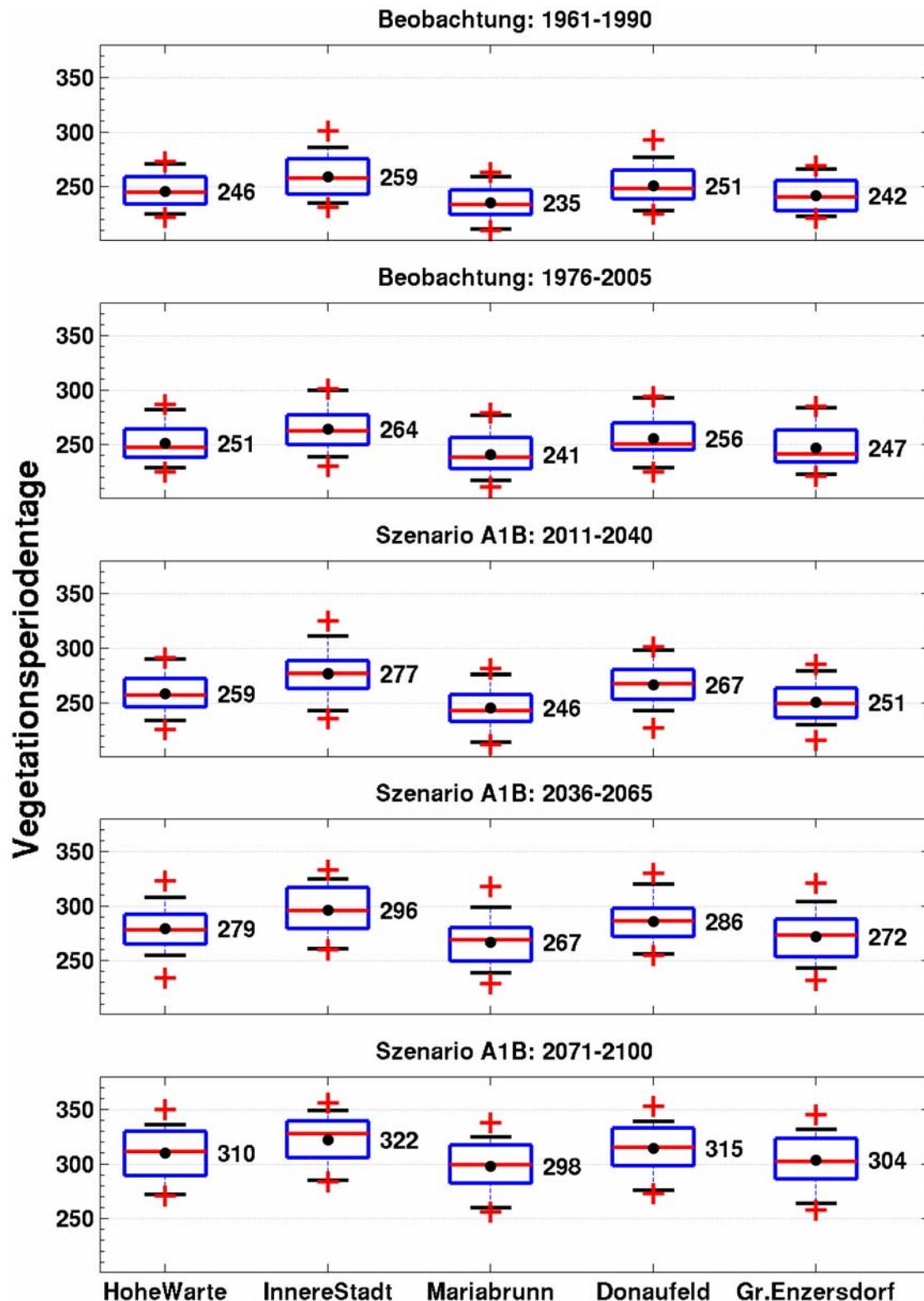
13) „Kyselytage“

Kriterium: Das Maximum der Temperatur erreicht zumindest an drei hintereinander folgenden Tagen 30 °C. Alle darauf folgenden Tage sind ebenfalls Kyselytage, solange das Tagesmaximum weiterhin 25 °C erreicht und das Mittel der Maxima aller Tage nicht unter 30 °C sinkt.



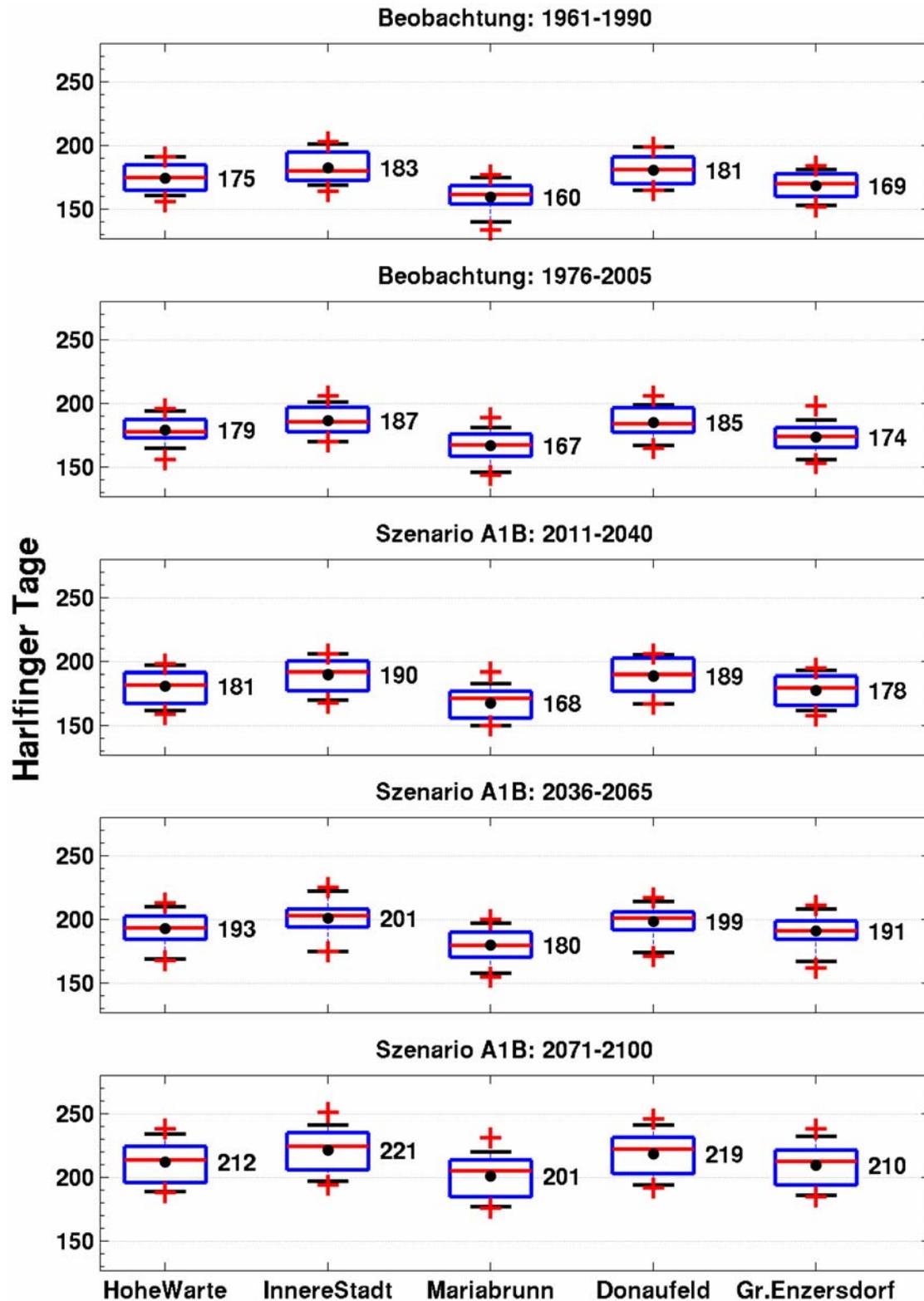
14) „Vegetationsperiodentage“

Kriterium: Jeder Tag an dem die Mitteltemperatur zumindest 5 °C erreicht. Beginn der Vegetationsperiode bei fünf aufeinander folgenden Tagen, mit mehr als 5 °C. Eine solche Periode kann dann durch fünf aufeinander folgende Tage mit $T_{\text{mittel}} < 5 \text{ °C}$ jederzeit ausgesetzt werden.



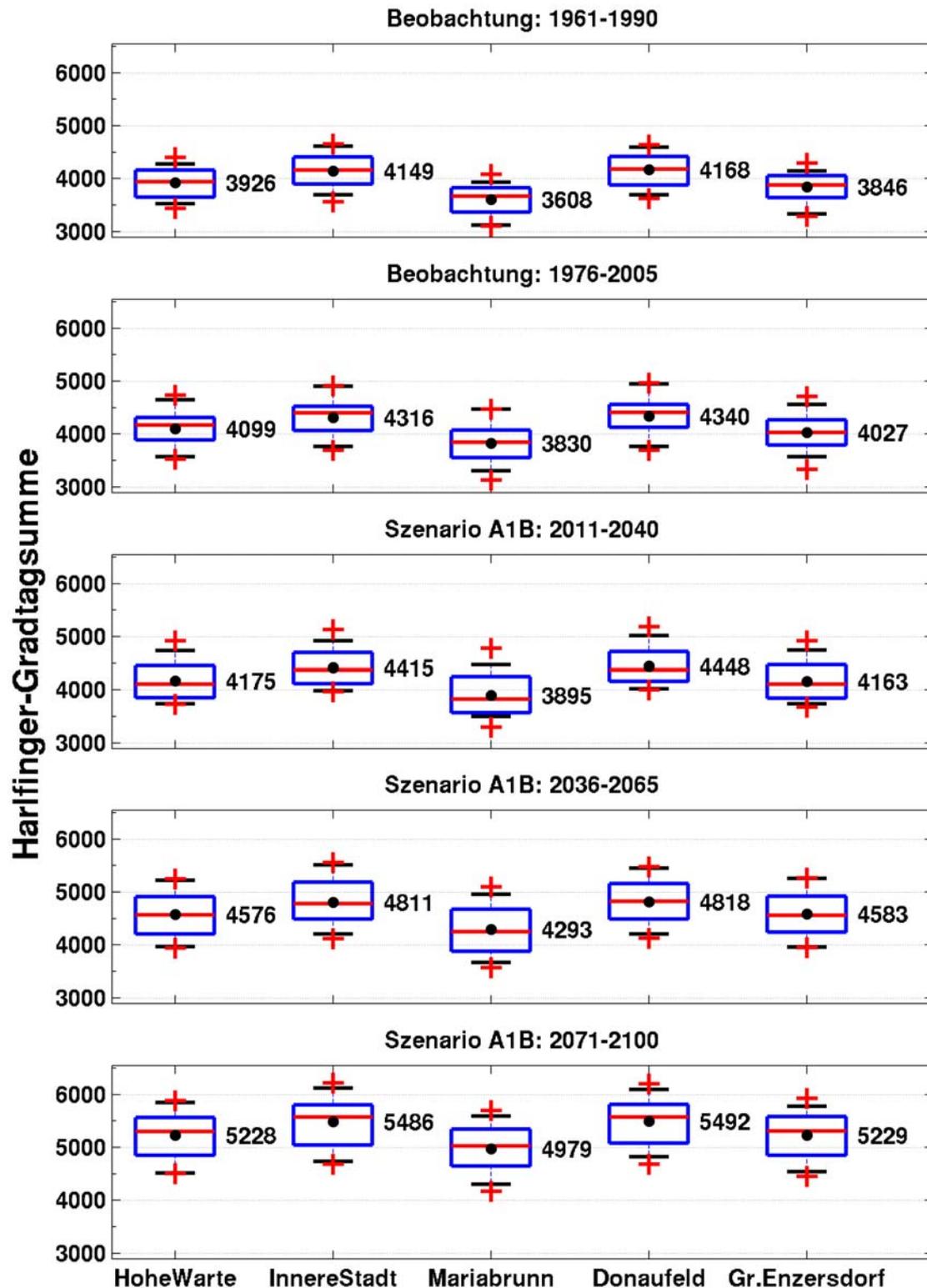
15) „Harlfinger Tage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur sinkt nicht unter 5 °C, sowie das Maximum der Temperatur erreicht 15 °C oder mehr.



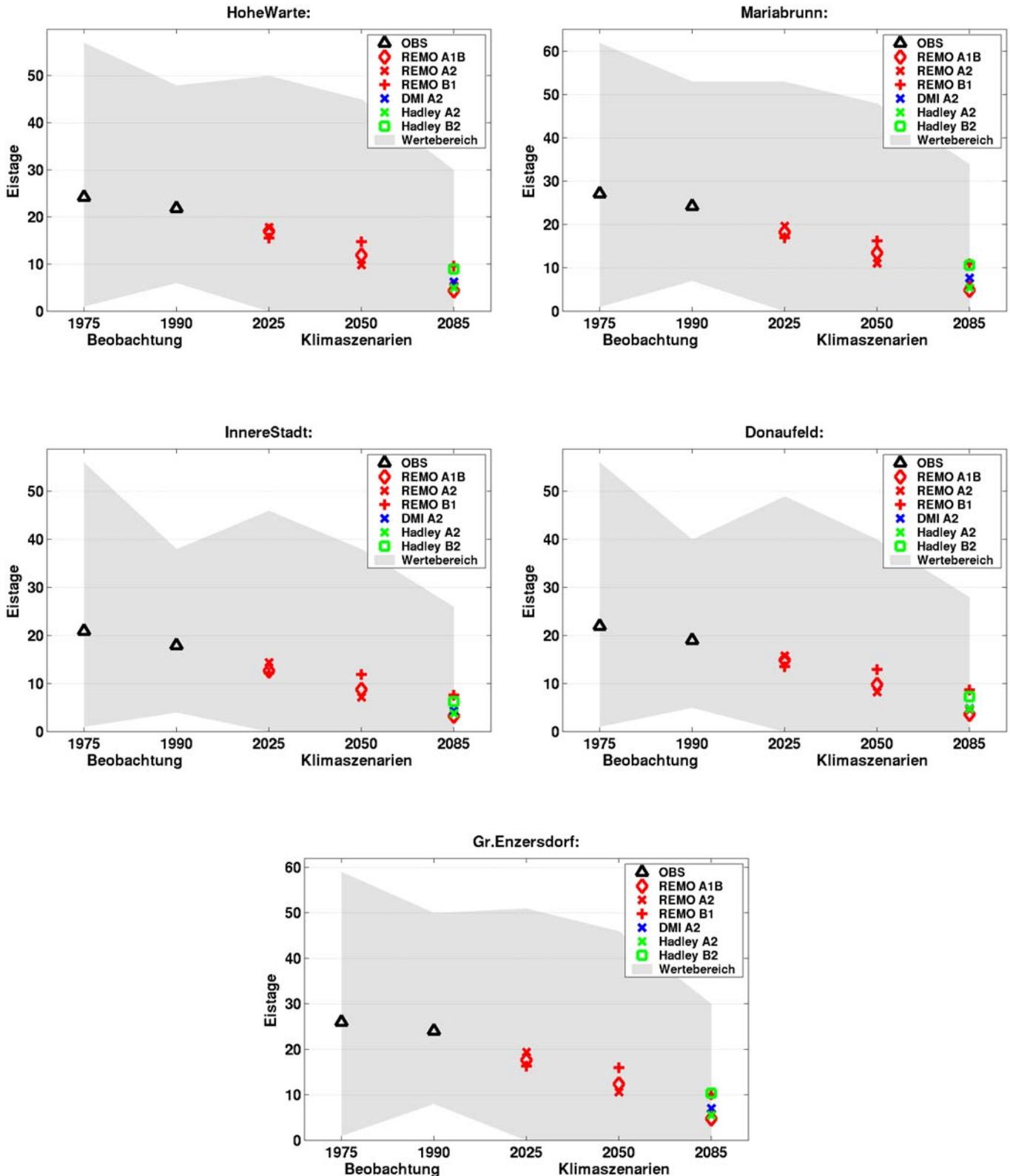
16) „Harlfinger Gradtagsumme“

Kriterium: Wenn das Minimum der Temperatur nicht unter 5 °C sinkt, sowie das Maximum der Temperatur erreicht 15 °C oder mehr, so wird die Temperatursumme berechnet: (=Tmax)



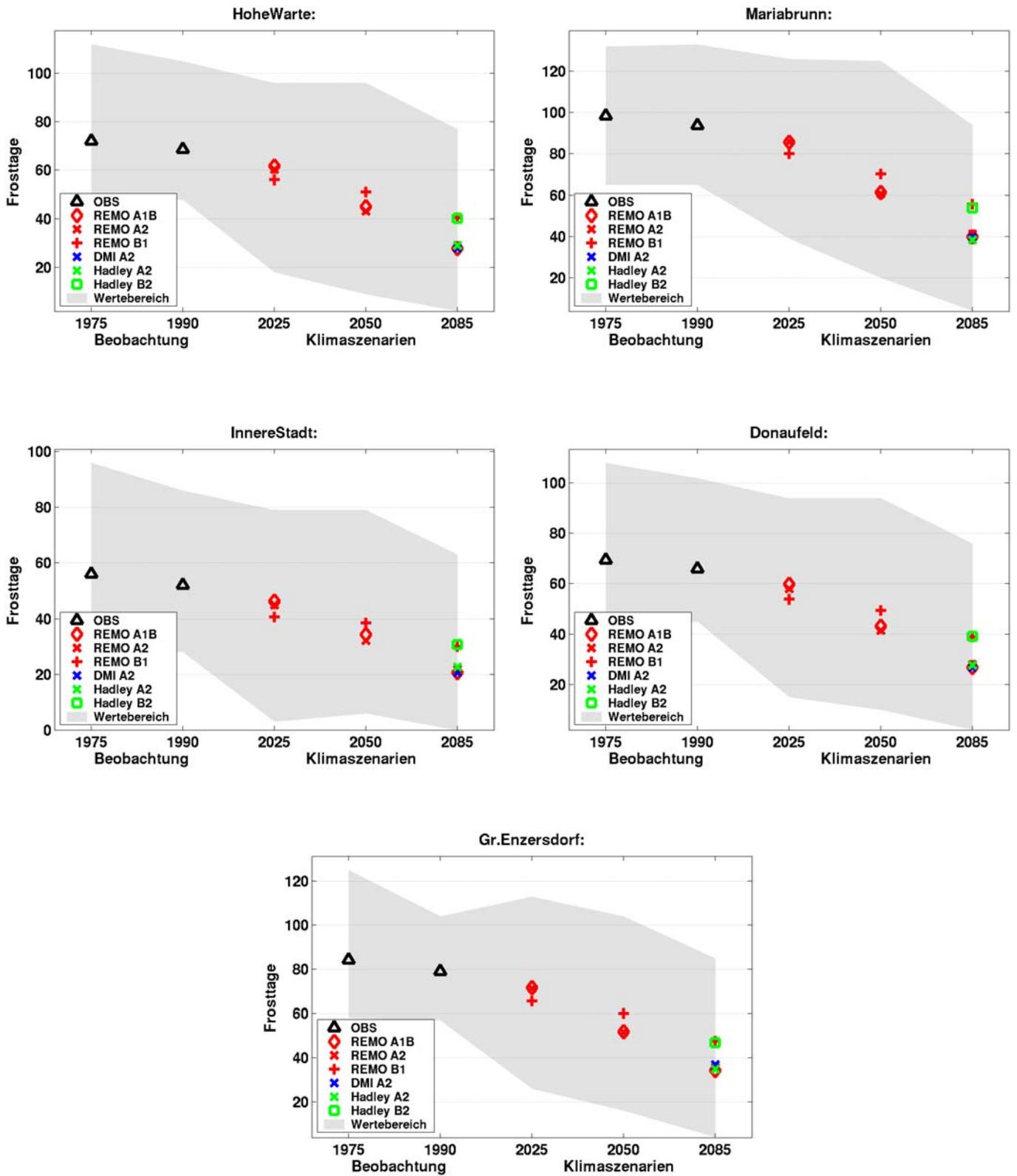
1) „Eistage“

Kriterium: Das Maximum der Temperatur bleibt am entsprechenden Tag unter 0 °C.



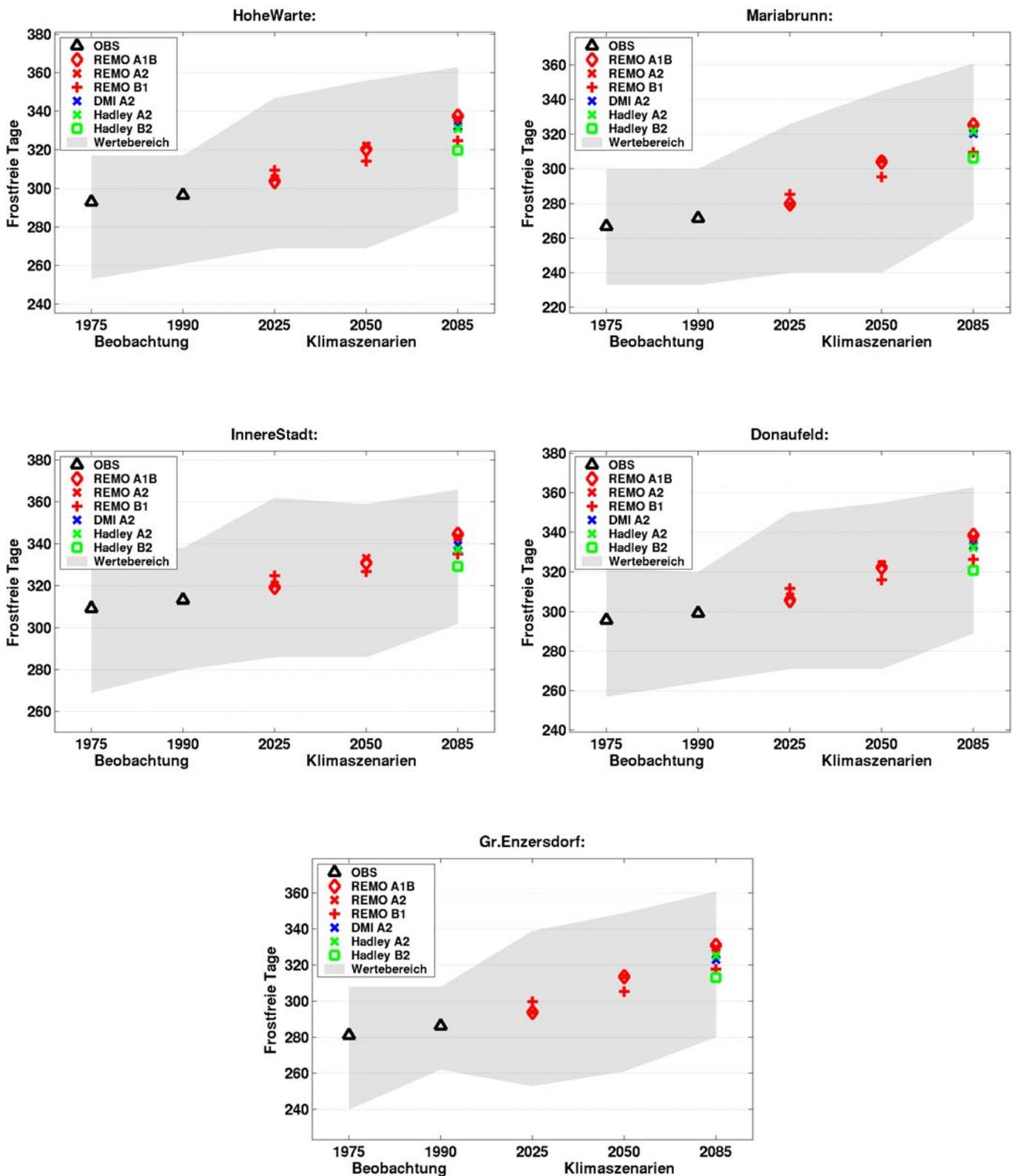
2) „Frosttage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur bleibt am entsprechenden Tag unter 0 °C. (Maximum und Tagesmitteltemperatur können dennoch positiv sein).



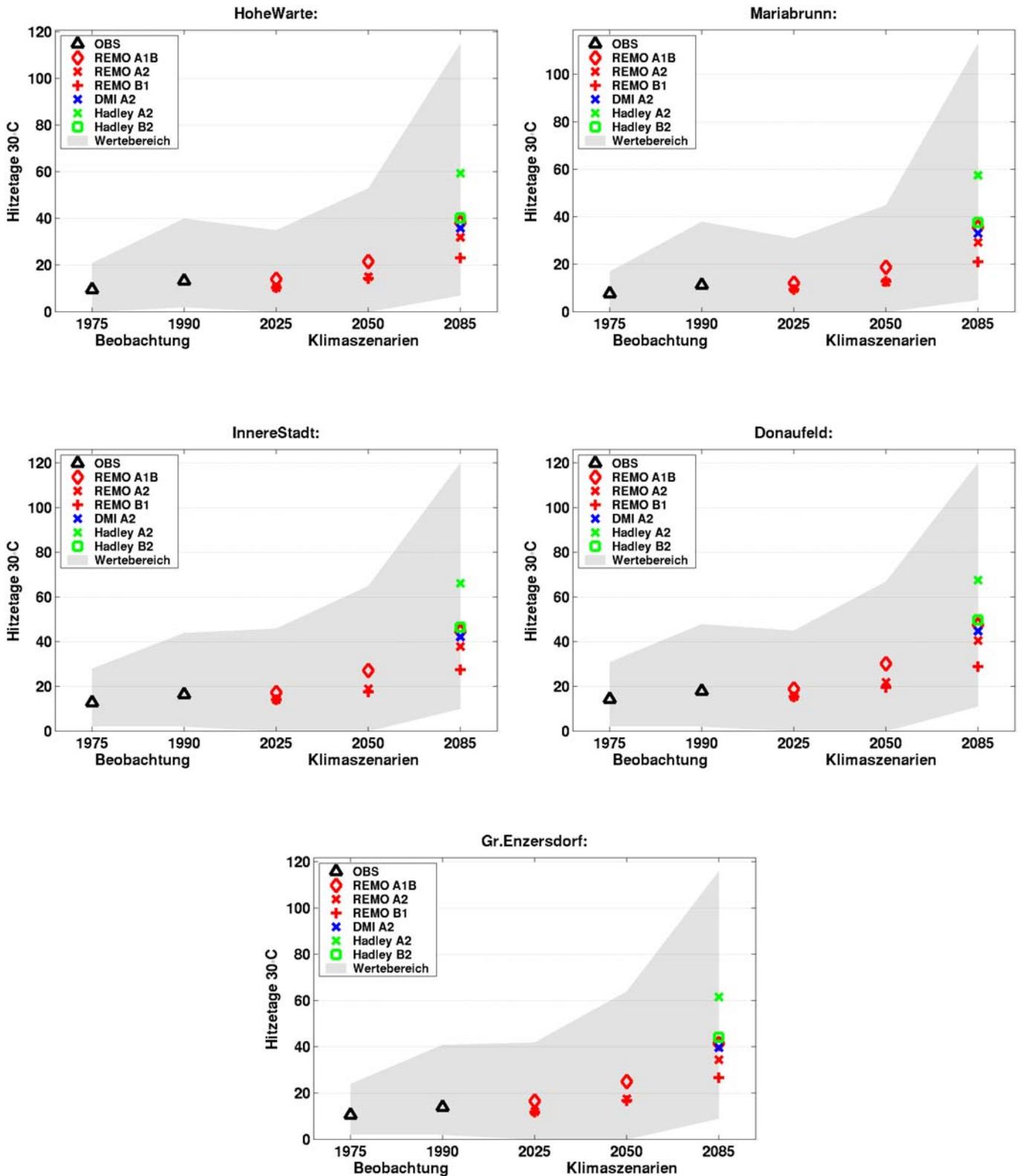
3) „Frostfreie Tage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur erreicht am entsprechenden Tag 0 °C oder mehr. (Maximum und Tagesmitteltemperatur zwingend positiv).



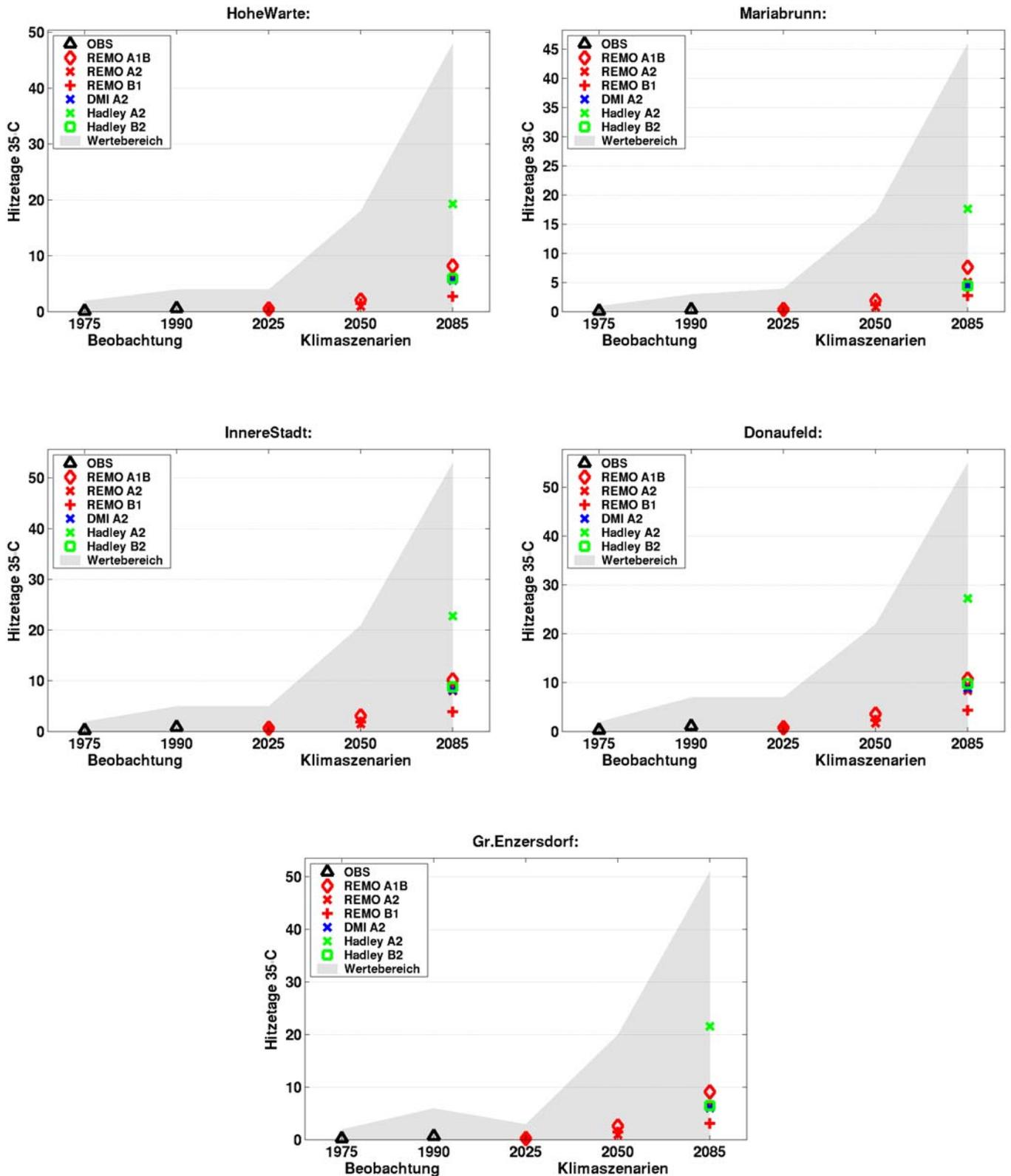
4) „Hitzetage 30 °C“

Kriterium: Tagesmaximum der Temperatur am betreffenden Tag 30 °C oder darüber.



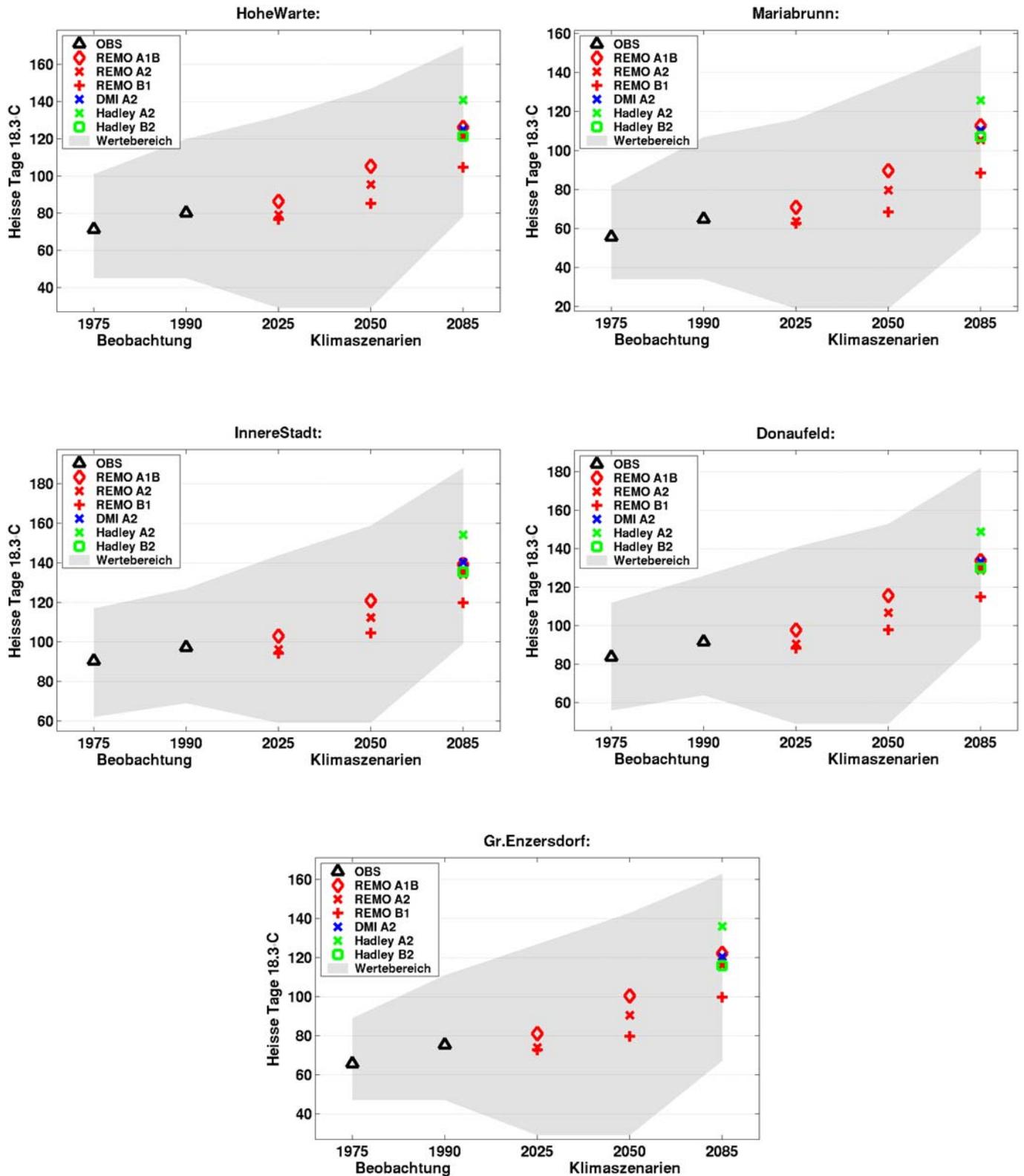
5) „Hitzetage 35 °C“

Kriterium: Tagesmaximum der Temperatur am betreffenden Tag 35 °C oder darüber.



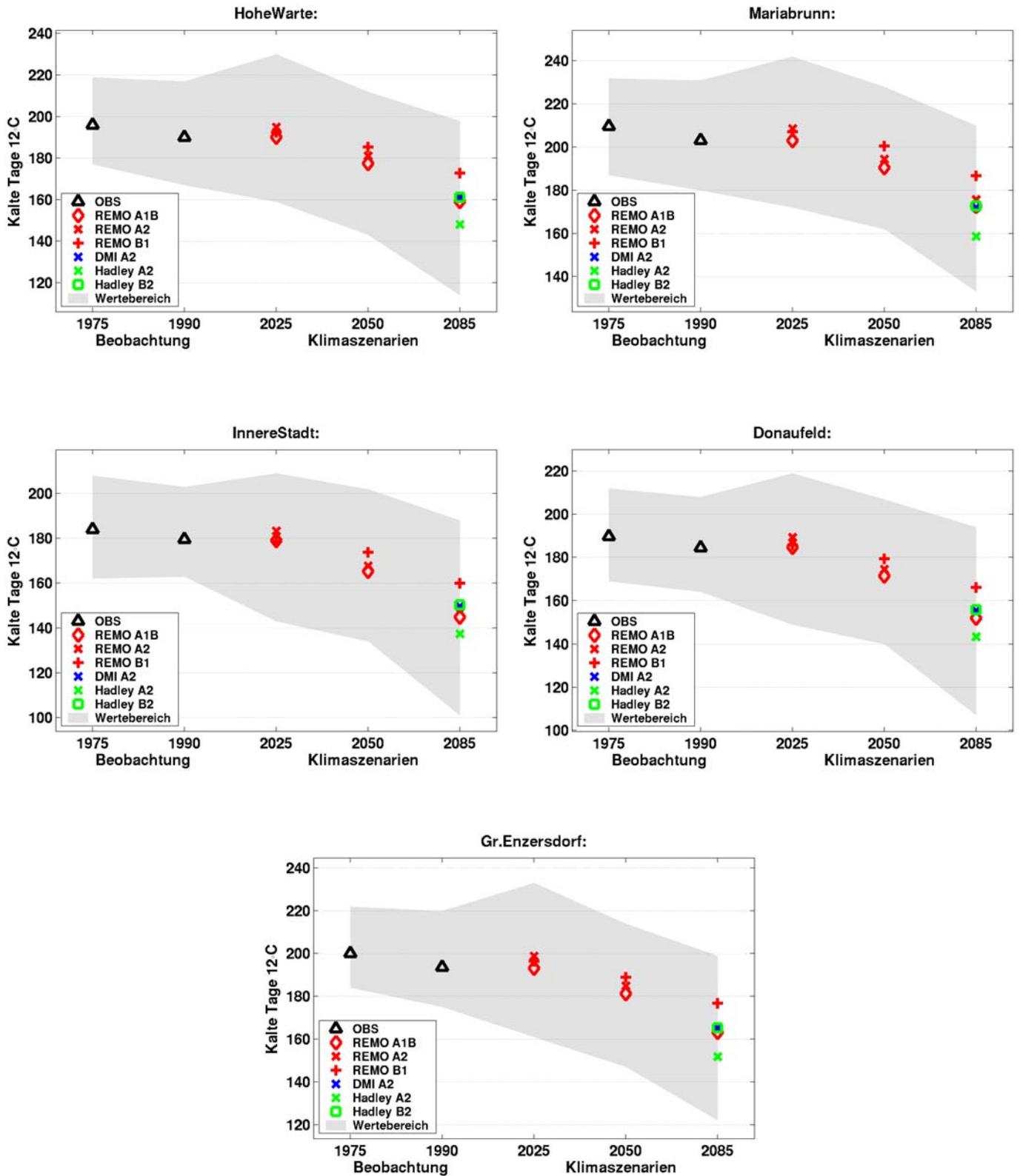
6) „Heisse Tage 18.3 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 18.3 °C oder darüber. (Internationale Definition)



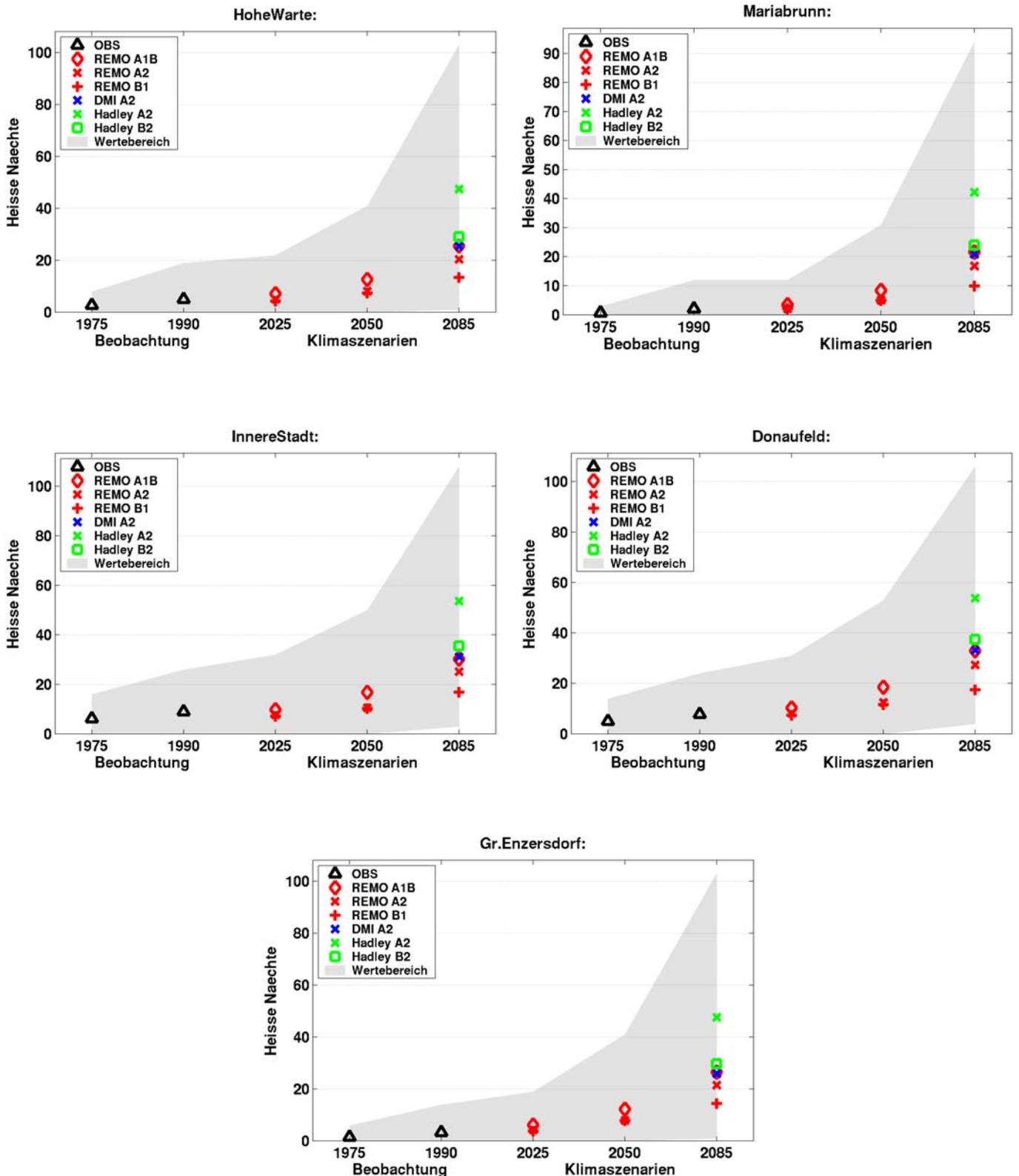
7) „Kühle Tage 12 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag bleibt unter 12 °C.



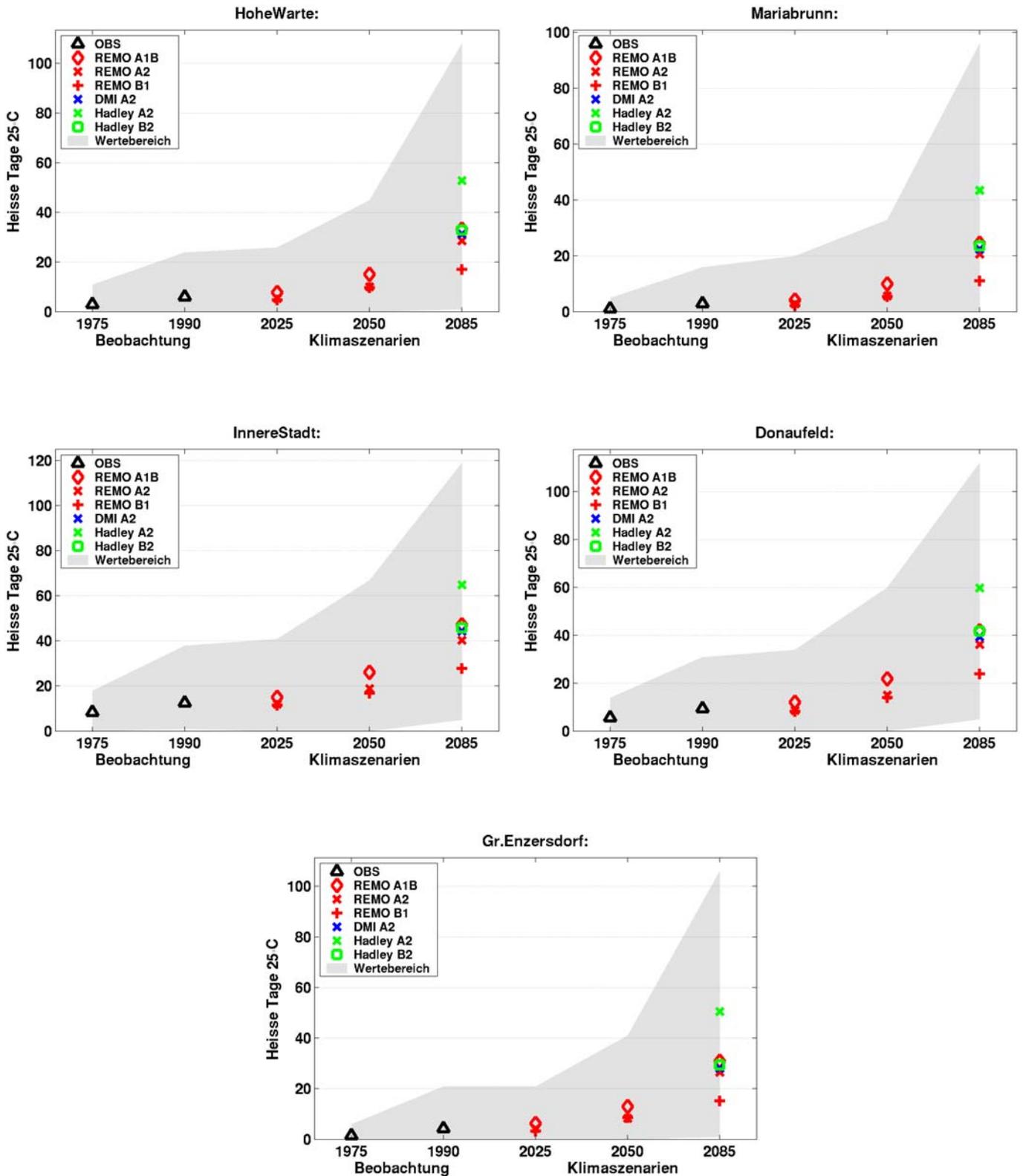
8) „Heisse Nächte“

Kriterium: Wenn das Tagesmaximum der Temperatur an zwei hintereinander folgenden Tagen zumindest 30 °C erreicht (Hitzetag) und das Temperaturminimum in der Nacht dazwischen nicht unter 18 °C sinkt.



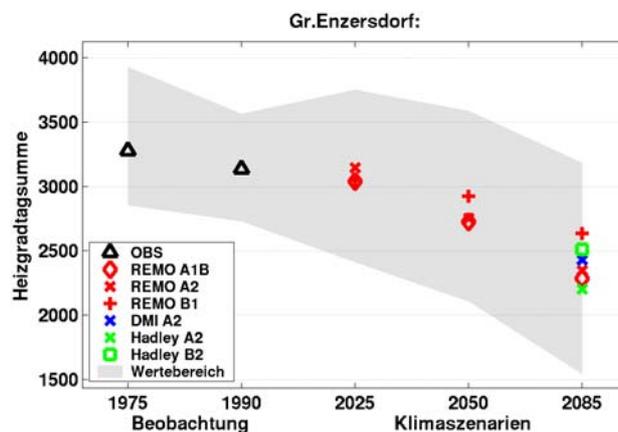
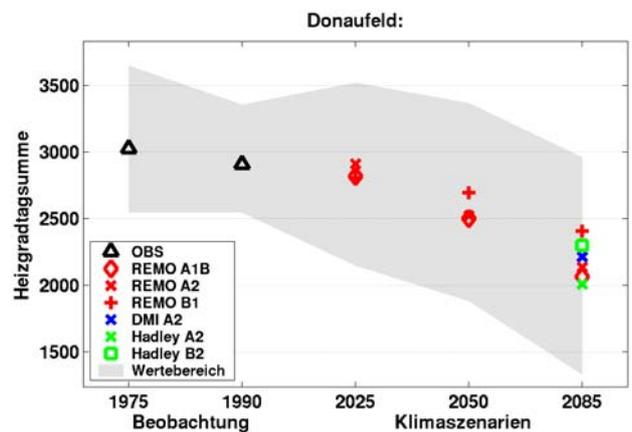
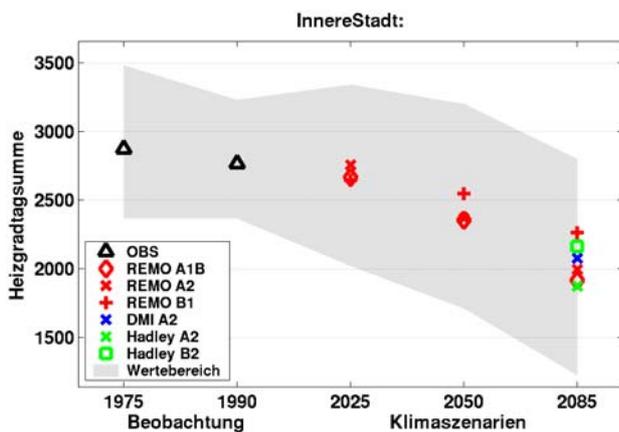
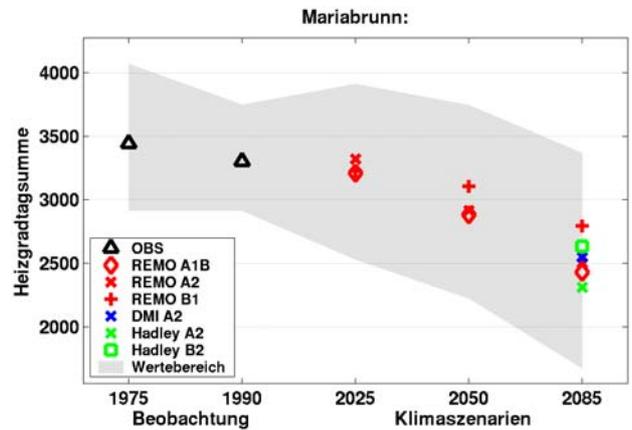
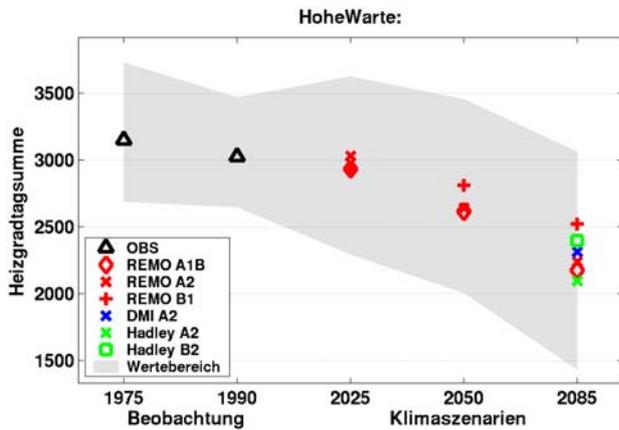
9) „Sehr heiße Tage 25 °C“

Kriterium: Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 25 °C oder darüber.



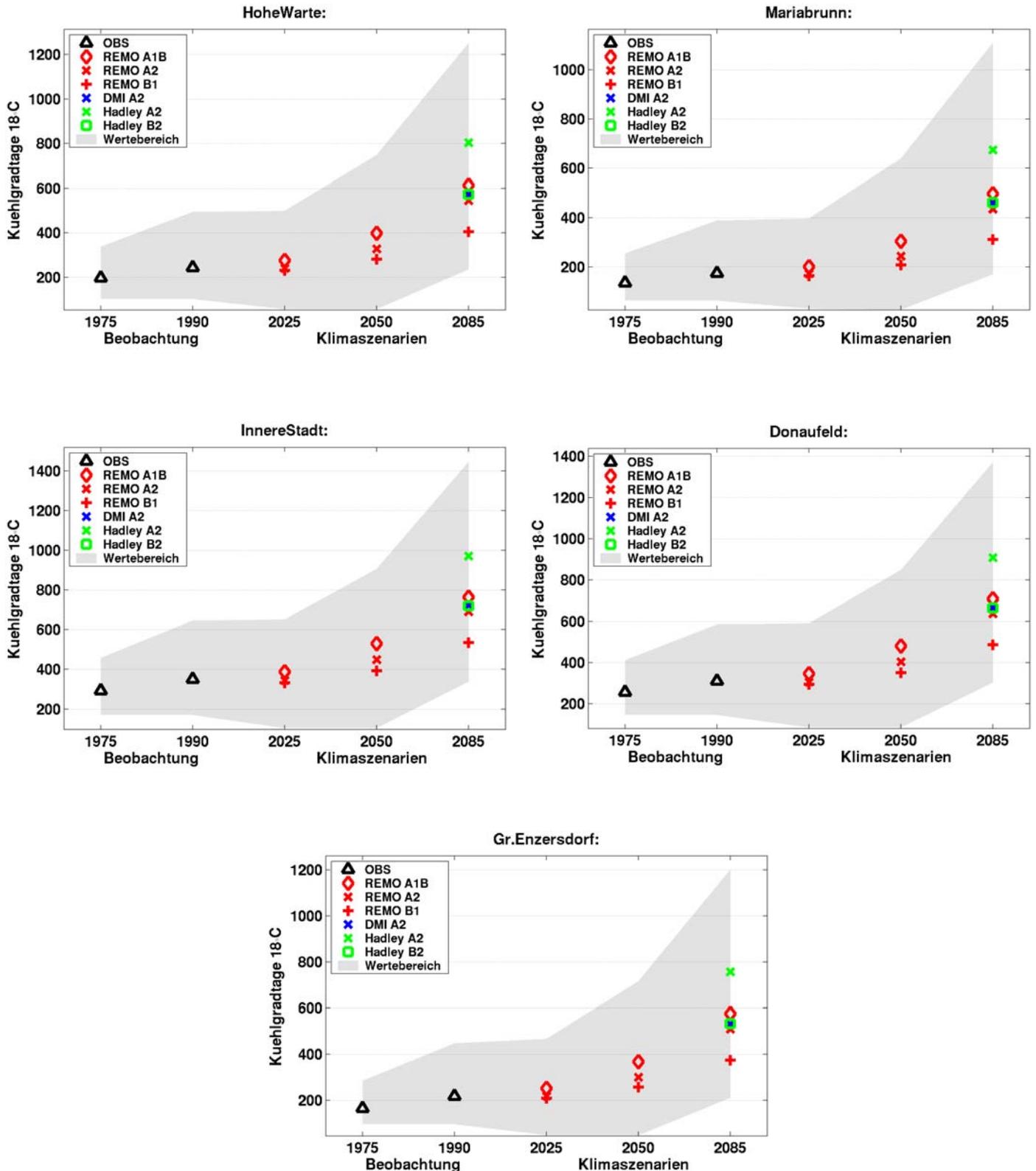
10) „Heizgradtage 20/12“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur unter 12 °C bleibt, so wird die Temperatursumme berechnet: (20-Tmittel)



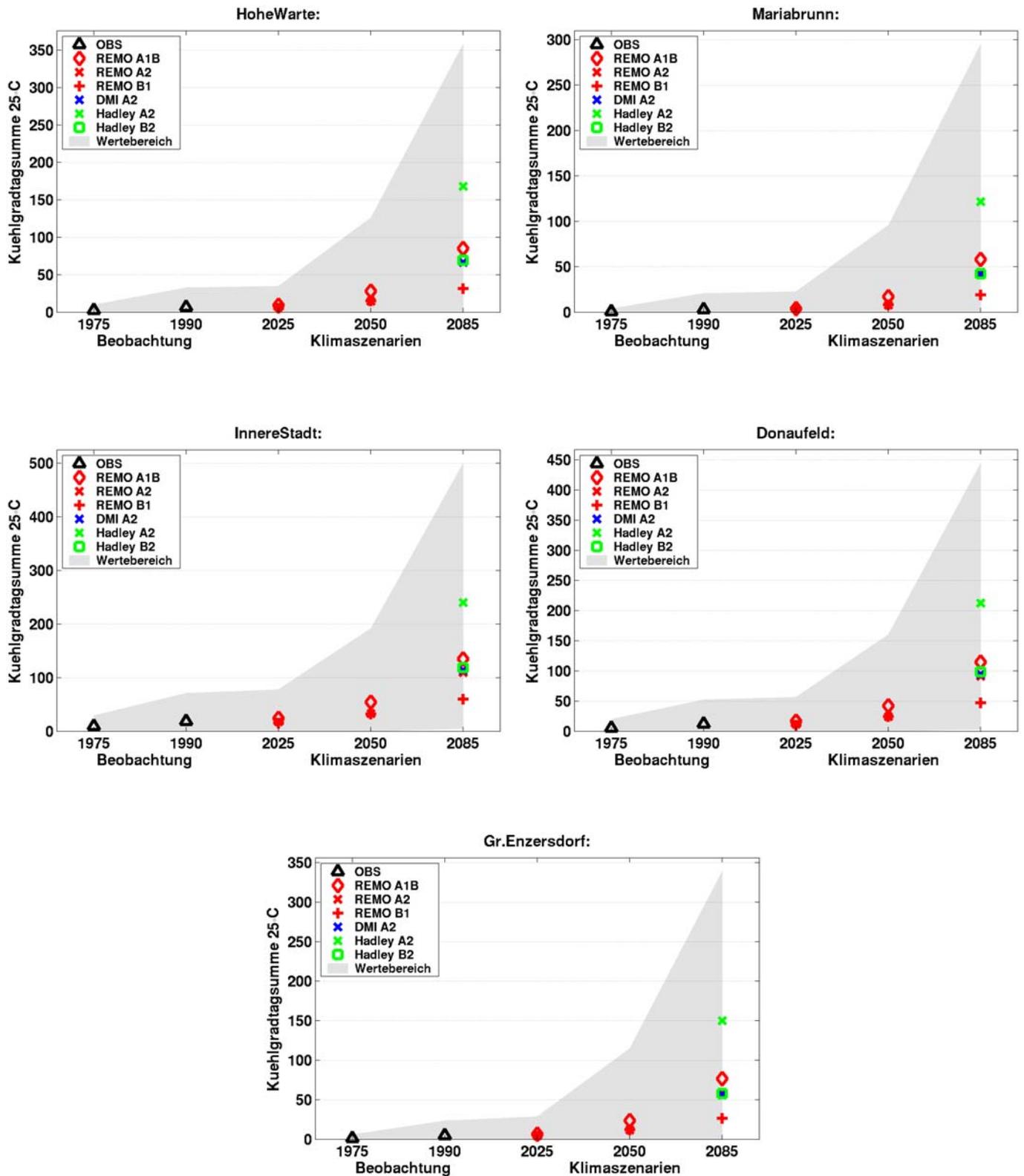
11) „Kühlgradtage 18.3 °C“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 18.3 °C oder darüber erreicht, dann wird die Temperatursumme berechnet: ($T_{\text{mittel}} - 18.3^\circ$)



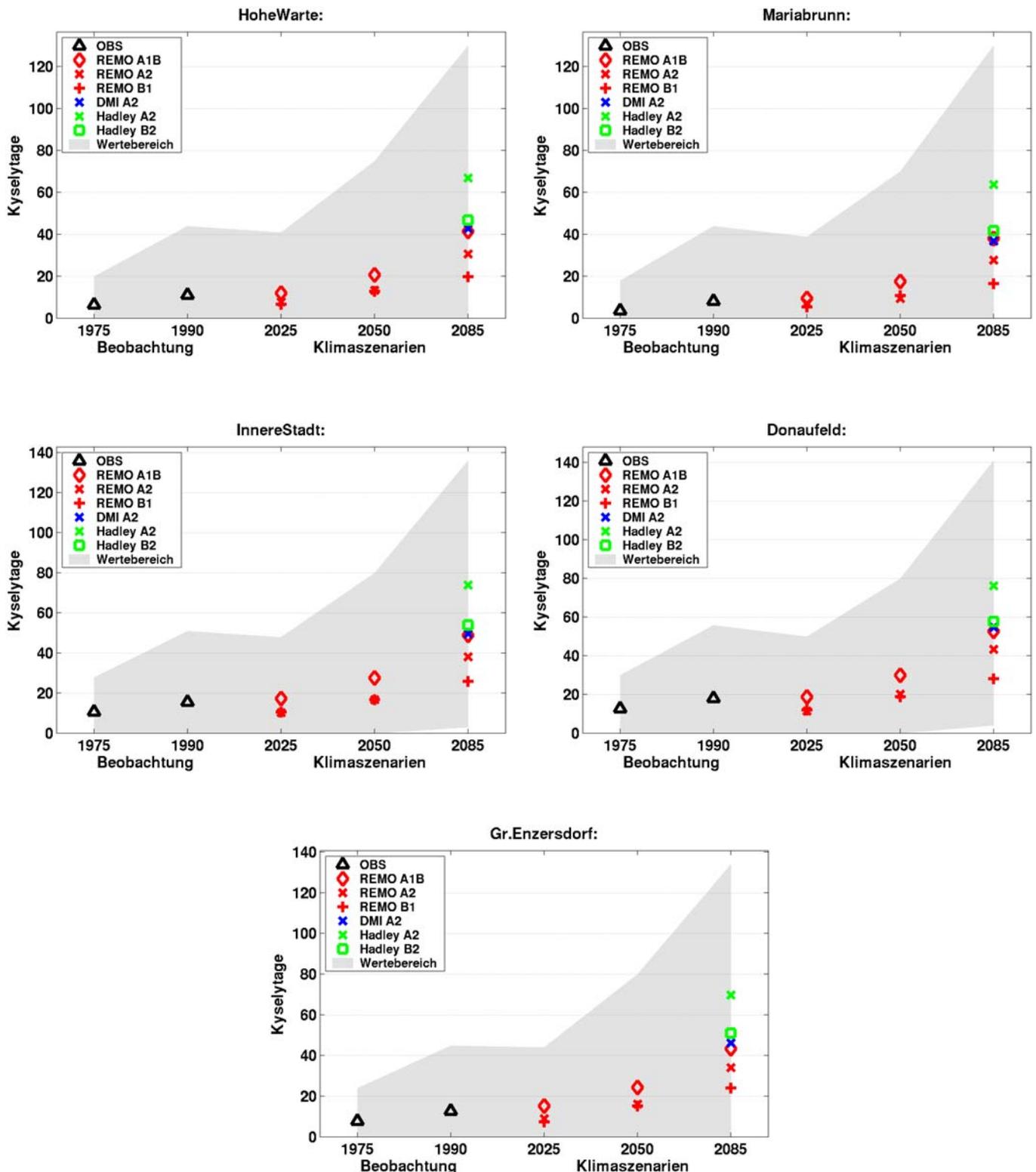
12) „Kühlgradtagssumme 25 °C“

Kriterium: Wenn die Tagesmitteltemperatur am betreffenden Tag 25.0 °C oder darüber erreicht, dann wird die Temperatursumme berechnet: ($T_{\text{mittel}} - 18.3^\circ$)



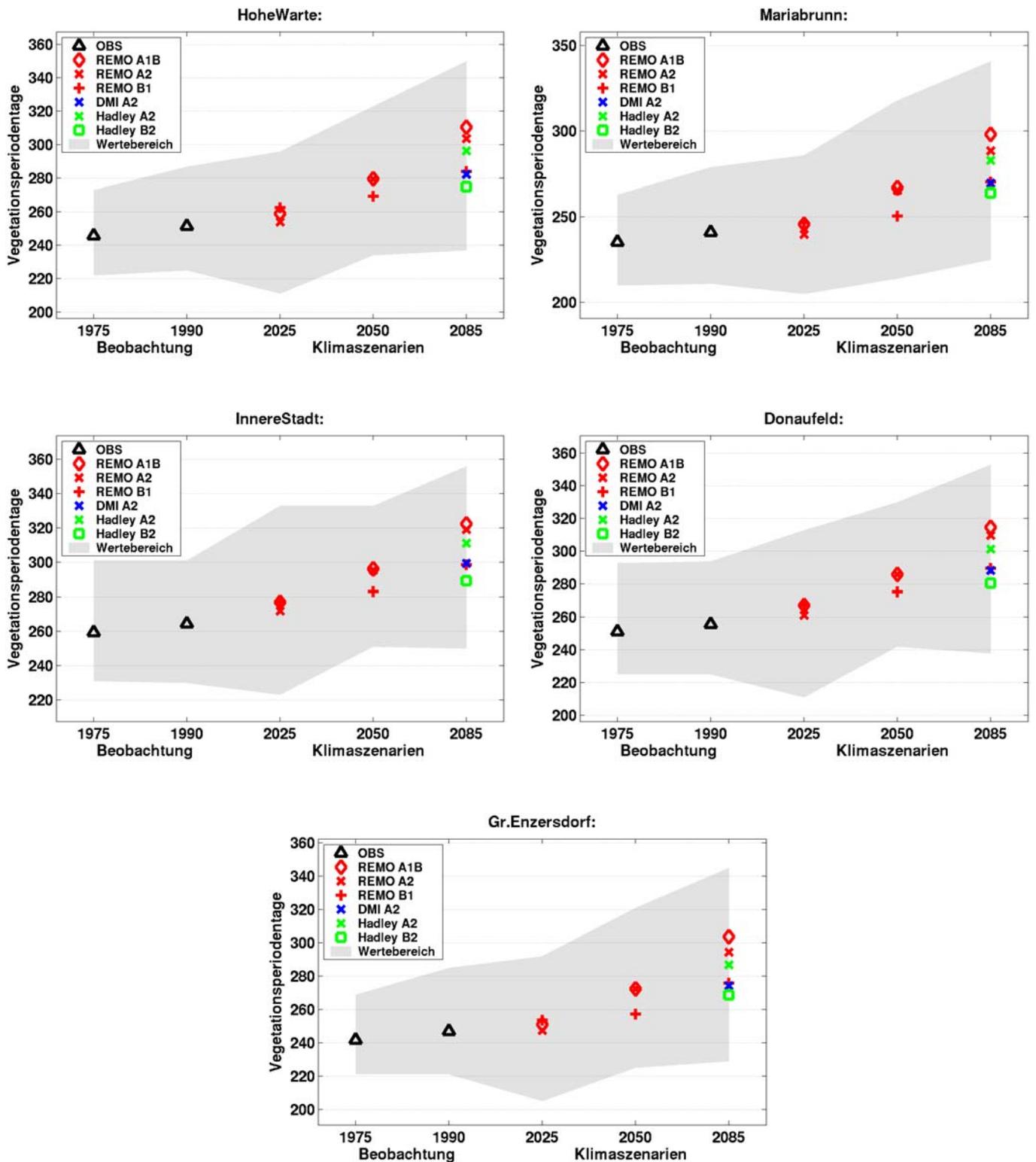
13) „Kyselytage“

Kriterium: Das Maximum der Temperatur erreicht zumindest an drei hintereinander folgenden Tagen 30 °C. Alle darauf folgenden Tage sind ebenfalls Kyselytage, solange das Tagesmaximum weiterhin 25 °C erreicht und das Mittel der Maxima aller Tage nicht unter 30 °C sinkt.



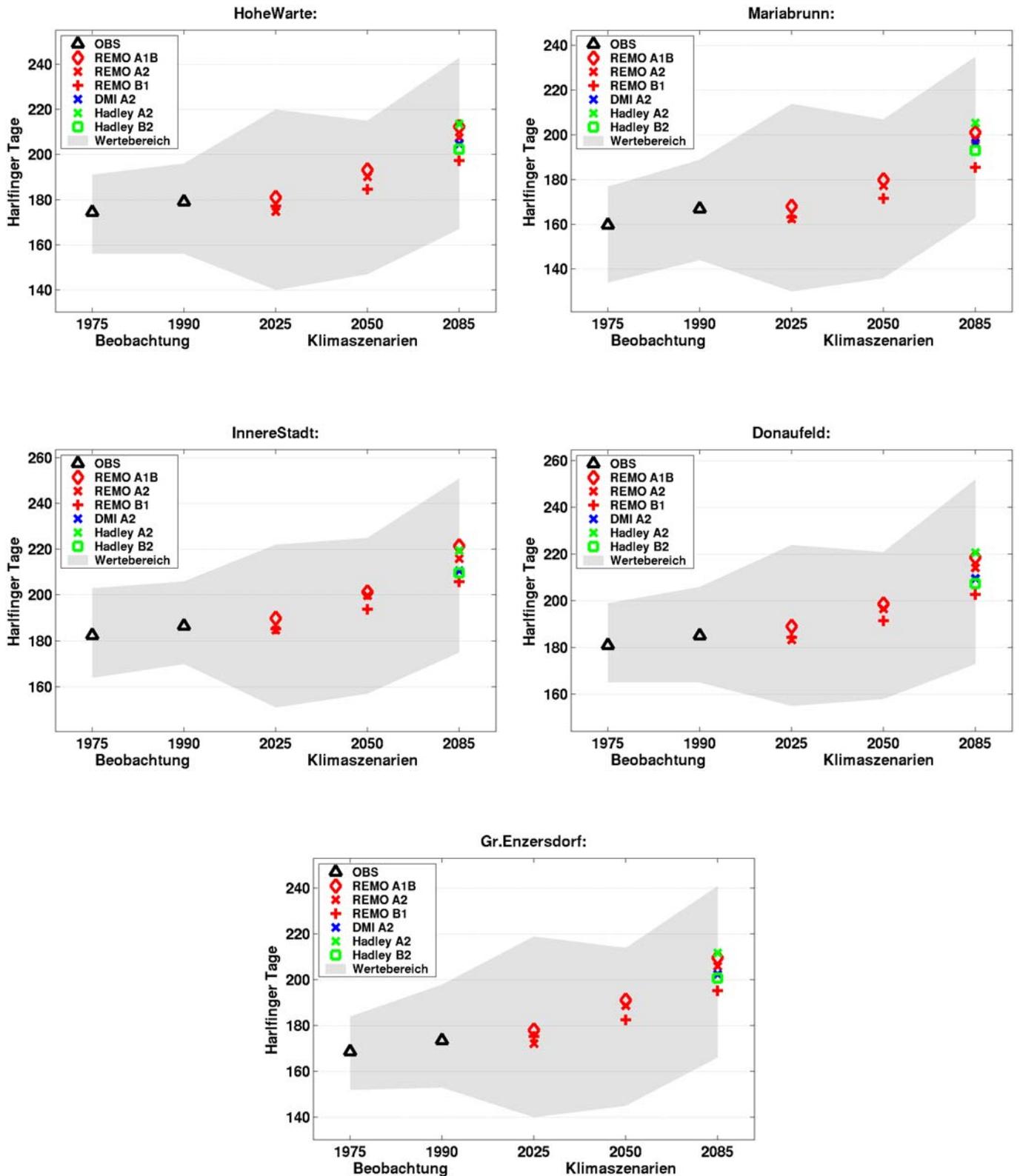
14) „Vegetationsperiodentage“

Kriterium: Jeder Tag an dem die Mitteltemperatur zumindest 5 °C erreicht. Beginn der Vegetationsperiode bei fünf aufeinander folgenden Tagen, mit mehr als 5 °C. Eine solche Periode kann dann durch fünf aufeinander folgende Tage mit $T_{\text{mittel}} < 5 \text{ °C}$ jederzeit ausgesetzt werden.



15) „Harlfinger Tage“

Kriterium: Das Minimum der Temperatur sinkt nicht unter 5 °C, sowie das Maximum der Temperatur erreicht 15 °C oder mehr.



16) „Harlfinger Gradtagsumme“

Kriterium: Wenn Kriterien von 15) erfüllt sind, so wird die Temperatursumme berechnet: (=Tmax)

