

Institut für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Benjamin Giebl

**Klimaszenarien und historische Extreme im
Jordan-Einzugsgebiet**

**Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg im Breisgau, April 2008**

Institut für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Benjamin Giebl

Klimaszenarien und historische Extreme im Jordan-Einzugsgebiet

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Koreferent: Dr. J. Lange

Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg im Breisgau, April 2008

Danksagung

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. Christian Leibundgut und Dr. Jens Lange für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und für die abwechslungsreiche Ausbildung während des gesamten Studiums. Ein weiterer Dank geht an Anne Gunkel für ihre Hilfestellungen und Anregungen.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, die mich während meiner gesamten Studienzeit vielfältig und ausdauernd unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen im Text	III
Verzeichnis der Tabellen im Text	VI
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang	VII
Zusammenfassung, Stichworte	X
Extended Summary, Keywords	XII
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung	2
3. Regionales Klima	3
3.1 Klimazonen	3
3.2 Klimaelemente	5
3.2.1 Lufttemperatur	5
3.2.2 Niederschlag	6
3.2.3 Globalstrahlung	8
3.2.4 Windgeschwindigkeit	8
3.2.5 Relative Luftfeuchte	9
4. Klimamodellierung	10
4.1 Globale und Regionale Klimamodelle	10
4.2 Emissionsszenarien	11
4.3 Klimaprojektionen für den Mittelmeerraum	13
5. Datengrundlage	14
5.1 Klimamodelldaten	14
5.2 Stationsdaten	16

6. Vergleich von Stations- und Modelldaten	17
6.1 Vorgehensweise	17
6.2 Lufttemperatur	17
6.2.1 Jahresmittel	17
6.2.2 Jahresgang	19
6.3 Niederschlag	21
6.3.1 Jahresmittel	21
6.3.2 Jahresgang	23
6.4 Fazit	25
7. Ergebnisse der Szenariorechnungen	26
7.1 Vorgehensweise	26
7.2 Jahresmittel	26
7.2.1 Lufttemperatur	26
7.2.2 Niederschlag	28
7.2.3 Globalstrahlung	28
7.2.4 Windgeschwindigkeit	31
7.2.5 Relative Luftfeuchte	31
7.3 Saisonale Unterschiede	34
7.3.1 Lufttemperatur	34
7.3.2 Niederschlag	37
7.4 Niederschlagsindizes	40
7.4.1 SDII	40
7.4.2 R10	40
7.4.3 Maximaler Tagesniederschlag	43
7.5 Fazit	44
8. Ergebnisse für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan	46
8.1 Übersicht	46
8.2 Jahresgänge	47
8.3 Häufigkeitsverteilungen	49
8.4 Fazit	52
9. Diskussion und Ausblick	53
Literaturverzeichnis	55
Anhang	57

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abb. 3.1:	Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes (URL 1)	3
Abb. 3.2:	Köppen Klima Klassifikation für Israel; Cs – Mediterranes Klima, BS – Semi-arides Klima, BW – Arides Klima (Goldreich, 2003)	4
Abb. 3.3:	Verteilung der mittleren Lufttemperatur in Israel: Jahr (Links), Januar (Mitte), August (Rechts) (Atlas of Israel, 1985 in Goldreich, 2003)	5
Abb. 3.4:	Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Untersuchungsgebiet (USGS, 1998)	6
Abb. 3.5:	Mittlere Monatswerte der solaren Strahlung für Be’er Sheva (nach Kudish & Ianetz, 1992 in Goldreich, 2003)	8
Abb. 3.6:	Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für verschiedene Stationen (Goldreich, 2003)	9
Abb. 4.1:	Modellkette zur Simulation regionaler Klimafolgen (Kleinn (2002) in Schär et al. (2003))	11
Abb. 4.2:	Schematische Darstellung der Szenariofamilien (IPCC, 2001)	11
Abb. 4.3:	Verlauf der CO ₂ Emissionen für die verschiedenen Szenarien (IPCC, 2001)	12
Abb. 4.4:	Abb. 4.4: Temperatur- und Niederschlagsänderungen in Europa gemittelt über 21 Modellsimulationen (A1B-Szenario) für die Perioden 1980-99 und 2080-99 (IPCC, 2007)	13
Abb. 5.1:	Räumliche Lage der Gitterpunkte des ECHAM4-MM5 Datensatzes	15
Abb. 5.2:	Räumliche Lage der Gitterpunkte des ECHAM5-RegCM3 Datensatzes	15
Abb. 6.1:	Simulierte Jahresmitteltemperatur für die Periode 1961-90 mit ECHAM4-MM5 (links) und ECHAM5-RegCM3 (rechts) und Lage der verwendeten Messstationen	18
Abb. 6.2:	Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Har Kenaan und die dazugehörigen Modellsimulationen	20
Abb. 6.3:	Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Tel Aviv und die dazugehörigen Modellsimulationen	20
Abb. 6.4:	Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Amman Airport und die dazugehörigen Modellsimulationen	20
Abb. 6.5:	Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Be’er Sheva und die dazugehörigen Modellsimulationen	21
Abb. 6.6:	Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für die Periode 1961-90 mit ECHAM4-MM5 (links) und ECHAM5-RegCM3 (rechts) und Lage der verwendeten Messstationen	22
Abb. 6.7:	Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Har Kenaan und die dazugehörigen Modellsimulationen	24
Abb. 6.8:	Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Tel Aviv und die dazugehörigen Modellsimulationen	24
Abb. 6.9:	Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Amman Airport und die dazugehörigen Modellsimulationen	25

Abb. 6.10:	Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Be'er Sheva und die dazugehörigen Modellsimulationen	25
Abb. 7.1:	Absolute und relative Änderung der mittleren Jahrestemperatur für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	27
Abb. 7.2:	Absolute und relative Änderung der mittleren Jahrestemperatur für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	27
Abb. 7.3:	Absolute und relative Änderung des mittleren Jahresniederschlags für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	29
Abb. 7.4:	Absolute und relative Änderung des mittleren Jahresniederschlags für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	29
Abb. 7.5:	Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Globalstrahlung für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	30
Abb. 7.6:	Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Globalstrahlung für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	30
Abb. 7.7:	Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	32
Abb. 7.8:	Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	32
Abb. 7.9:	Absolute (links) und relative (rechts) Änderung der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	33
Abb. 7.10:	Absolute (links) und relative (rechts) Änderung der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	33
Abb. 7.11:	Absolute und relative Änderung der mittleren Wintertemperatur (DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	35
Abb. 7.12:	Absolute und relative Änderung der mittleren Sommertemperatur (JJA) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	35
Abb. 7.13:	Absolute und relative Änderung der mittleren Wintertemperatur (DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	36
Abb. 7.14:	Absolute und relative Änderung der mittleren Sommertemperatur (JJA) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	36
Abb. 7.15:	Absolute und relative Änderung des mittleren Winterniederschlags (DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	38
Abb. 7.16:	Absolute und relative Änderung des mittleren Niederschlags im Restjahr (Jahr - DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	38
Abb. 7.17:	Absolute und relative Änderung des mittleren Winterniederschlags (DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	39
Abb. 7.18:	Absolute und relative Änderung des mittleren Niederschlags im Restjahr (Jahr - DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	39

Abb. 7.19:	Absolute und relative Änderung des SDII für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	41
Abb. 7.20:	Absolute und relative Änderung des SDII für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	41
Abb. 7.21:	Absolute und relative Änderung des R10-Index für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	42
Abb. 7.22:	Absolute und relative Änderung des R10-Index für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	42
Abb. 7.23:	Absolute und relative Änderung des maximalen Tagesniederschlags für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)	43
Abb. 7.24:	Absolute und relative Änderung des maximalen Tagesniederschlags für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)	44
Abb. 8.1:	Simulierter Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet	48
Abb. 8.2:	Simulierter Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet	48
Abb. 8.3:	Simulierter Jahresgang der mittleren Monatsniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet	48
Abb. 8.4:	Simulierter Jahresgang der mittleren Monatsniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet	49
Abb. 8.5:	Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2	50
Abb. 8.6:	Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B	50
Abb. 8.7:	Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2	51
Abb. 8.8:	Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B	51

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tab. 3.1:	Mittlerer, maximaler und minimaler Monatsniederschlag und maximaler Tagesniederschlag im Januar für verschiedene Stationen im Zeitraum 1970/71-1999/2000 (in mm) (URL 2)	7
Tab. 3.2:	Mittlerer, maximaler und minimaler Monatsniederschlag und maximaler Tagesniederschlag im April für verschiedene Stationen im Zeitraum 1970/71-1999/2000 (in mm) (URL 2)	7
Tab. 5.1:	Überblick der verwendeten Klimamodelldaten	14
Tab. 5.2:	Verwendete Messstationen mit Klimaregion und Klimaparameter	16
Tab. 6.1:	Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM4-MM5 Simulation für die Jahresmitteltemperatur (1961-90)	19
Tab. 6.2:	Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM5-RegCM3 Simulation für die Jahresmitteltemperatur (1961-90)	19
Tab. 6.3:	Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM4-MM5 Simulation für den mittleren Jahresniederschlag (1961-90)	23
Tab. 6.4:	Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM5-RegCM3 Simulation für den mittleren Jahresniederschlag (1961-90)	23
Tab. 8.1:	Simulierte Klimaparameter und Änderungen mit ECHAM4-MM5/A2 für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan	46
Tab. 8.2:	Simulierte Klimaparameter und Änderungen mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan	47

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A.1: Jahresgang der Monatsmittel der Lufttemperatur (1961-90) für die Messstation Haifa und die dazugehörigen Modellsimulationen	57
Abb. A.2: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Irbid und die dazugehörigen Modellsimulationen	57
Abb. A.3: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Jerusalem und die dazugehörigen Modellsimulationen	58
Abb. A.4: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Elat und die dazugehörigen Modellsimulationen	58
Abb. A.5: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Haifa und die dazugehörigen Modellsimulationen	58
Abb. A.6: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Irbid und die dazugehörigen Modellsimulationen	59
Abb. A.7: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Jerusalem und die dazugehörigen Modellsimulationen	59
Abb. A.8: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Elat und die dazugehörigen Modellsimulationen	59
Abb. A.9: Simulierte Jahresmitteltemperatur für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	60
Abb. A.10: Simulierte Jahresmitteltemperatur für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	60
Abb. A.11: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	61
Abb. A.12: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	61
Abb. A.13: Simulierte mittlere jährliche Globalstrahlung für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	62
Abb. A.14: Simulierte mittlere jährliche Globalstrahlung für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	62
Abb. A.15: Simulierte mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	63
Abb. A.16: Simulierte mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	63
Abb. A.17: Simulierte mittlere jährliche relative Luftfeuchte für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	64

Abb. A.18: Simulierte mittlere jährliche relative Luftfeuchte für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	64
Abb. A.19: Simulierte mittlere Wintertemperaturen (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	65
Abb. A.20: Abb. A.20: Simulierte mittlere Wintertemperaturen (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	65
Abb. A.21: Simulierte mittlere Sommertemperaturen (JJA) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	66
Abb. A.22: Simulierte mittlere Sommertemperaturen (JJA) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	66
Abb. A.23: Simulierter mittlerer Winterniederschlag (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	67
Abb. A.24: Simulierter mittlerer Winterniederschlag (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	67
Abb. A.25: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	68
Abb. A.26: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	68
Abb. A.27: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	69
Abb. A.28: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	69
Abb. A.29: Simulierter maximaler Tagesniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation	70
Abb. A.30: Simulierter maximaler Tagesniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation	70
Abb. A.31: Simulierter Jahresgang der mittleren Globalstrahlung für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet	71
Abb. A.32: Simulierter Jahresgang der mittleren Globalstrahlung für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet	71
Abb. A.33: Simulierter Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet	71

- Abb. A.34: Simulierter Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet 72
- Abb. A.35: Simulierter Jahresgang der mittleren relativen Luftfeuchte für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet 72
- Abb. A.36: Simulierter Jahresgang der mittleren relativen Luftfeuchte für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet 72

Zusammenfassung

Auf der Basis von zwei regionalen Klimasimulationen wurden mögliche Klimaänderungen für das Jordaneinzugsgebiet und die umliegende Region untersucht. Das Gebiet erstreckt sich über drei Klimazonen, die in verhältnismäßig kurzen Distanzen aufeinander folgen. Besonders Niederschläge haben eine große räumliche und zeitliche Variabilität. Im nordwestlichen Teil der Region herrscht mediterranes Klima vor. Der Jahresniederschlag fällt dort fast ausschließlich im Winterhalbjahr. Die Sommer sind heiß und trocken. Auf eine semi-aride Übergangszone folgen schließlich aride Wüstengebiete im Süden Israels und Jordaniens.

Grundlage für die Untersuchungen sind Datenreihen bestehender Klimasimulationen. Diese wurden mit regionalen Klimamodellen (MM5 und RegCM3) erzeugt mit deren Hilfe die Ergebnisse globaler Modelle (ECHAM4 bzw. ECHAM5) dynamisch auf das Untersuchungsgebiet regionalisiert wurden. Die Zeitreihen beschreiben zum einem das bestehende Klima (1961-90), zum anderen enthalten sie Klimaprojektionen bis zum Jahr 2050. Diese beruhen wiederum auf definierten Emissionsszenarien. Die betrachteten Klimaelemente sind Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte.

Mit Hilfe von gemessenen Stationsdaten für die Lufttemperatur und den Niederschlag wurde zunächst untersucht, inwiefern die Modelldaten das bestehende Klima nachbilden können. Dabei zeigten sich für die Lufttemperatur größtenteils gute Übereinstimmungen. Beim Niederschlag konnte zwar die saisonale Charakteristik stimmig modelliert werden, beim Vergleich von gemessenen und simulierten Niederschlagshöhen traten für beide Modelle jedoch teilweise große Differenzen auf. Im nächstens Schritt wurden die Zukunftsprojektionen der Modelle den simulierten Referenzzeitreihen gegenübergestellt. Das Ziel dabei war das Änderungsverhalten der Klimaelemente und besonders von Lufttemperatur und Niederschlag zu untersuchen. Betrachtete Aspekte sind das Jahresmittel, die Saisonalität, das Extremwertverhalten, sowie räumliche Muster und regionale Unterschiede. Nach einem Überblick über die Gesamtregion wird in einem zweiten Schritt das Einzugsgebiet des Unteren Jordan detaillierter behandelt.

Insgesamt ergeben sich aus den beiden Klimaänderungssimulationen differenzierte Ergebnisse. Ein klarer Trend ist die Zunahme bei der Lufttemperatur. Für das Untere Jordaneinzugsgebiet wird für die Periode 2021-50 ein Anstieg der mittleren Jahrestemperatur von 1.7 °C (ECHAM4-MM5/A2) bzw. 1.4 °C (ECHAM5-RegCM3/A1B) prognostiziert. Allerdings gibt es Unterschiede bei der saisonalen Ausprägung der Erwärmung. Darüber hinaus ist ein Zuwachs bei der Anzahl heißer Tage zu erwarten. Beim Niederschlag zeigen die Modelle unterschiedliche Tendenzen. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt einen Anstieg des Jahresniederschlags um 15 Prozent im Unteren Jordaneinzugsgebiet. Die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation zeigt eine leicht negative Tendenz für das ganze Jahr. Diese resultiert allerdings aus einem starken Niederschlagsrückgang (ca. 20 Prozent) in den Wintermonaten (DJF) und einem

positiven Trend für das Restjahr. Bei den restlichen Klimaelementen gibt es größtenteils nur sehr moderate, bzw. gar keine signifikanten Veränderungen. Klare Trends für Niederschlagsextreme lassen sich höchsten in Teilgebieten feststellen. Allerdings je nach Modell in sehr unterschiedlicher Ausprägung.

Stichworte:

Klimawandel, Klimamodelle, Regionale Klimaprojektionen, Israel, Jordan-Einzugsgebiet, mediterranes Klima, Temperatur- und Niederschlagsänderungen

Extended Summary

Based on two regional climate simulations possible changes in climate were examined for the Jordan River basin and the surrounding region. The area comprises three climate zones which follow in relatively short distances on each other. Especially precipitation has a big spatial and temporal variability. Mediterranean climate prevails in the north-western part of the region. The annual precipitation falls there almost exclusively in the winter half-year. The summers are hot and dry. Separated by a semi-arid transitional zone, arid desert follows in the south of Israel and Jordan.

Time series of existing climate simulations are the basis of the investigations. The data were generated with regional climate models (MM5 and RegCM3). With their help the results of global models (ECHAM4 or ECHAM5) were downscaled dynamically for the investigation area. On the one hand the time series describe the existing climate (1961-90), on the other hand they contain climate projections up to 2050. The global models are based on certain emission scenarios. The examined climate elements are air temperature, precipitation, global radiation, wind speed and relative air humidity.

First, the model data for the present climate were compared to measured station data (air temperature and precipitation). The comparison of the air temperatures shows mainly good accordance. Also the modeled precipitation data agree with the typical seasonal behaviour. But the comparison of measured and simulated precipitation heights partly shows big differences for both models. The major interest of the work is the assessment of the climate change behaviour, especially for air temperature and precipitation. Discussed aspects are the annual means, seasonal changes, extreme values, as well as spatial patterns and regional differences. After an overview about the whole region, the catchment area of the Lower Jordan River is treated more detailed.

Generally the two climate change simulations show variable results. A clear trend is the increasing air temperature. In the Lower Jordan catchment area a mean annual temperature increase of 1.7 °C (ECHAM4-MM5/A2) and 1.4 °C (ECHAM5-RegCM3/A1B) is forecasted for the future period 2021-50. It must be noted that there are seasonal differences between the two simulations. In addition, an increase of the number of hot days is expected. For precipitation the models show different trends. The ECHAM4-MM5/A2 simulation shows an increase of the annual precipitation about 15 percent in the lower Jordan catchment area. The ECHAM5-RegCM3/A1B simulation shows a slightly negative trend for the whole year. However, this results from a strong precipitation decline (approx. 20 percent) during the winter months (DJF) and a positive trend for the rest year. For the remaining climate elements exist mainly only very moderate or no significant changes. Clear trends for precipitation extremes could be ascertained only in certain parts of the region. But they differ from model to model.

Keywords:

climate change, climate models, regional climate projections, Israel, Jordan River catchment, Mediterranean climate, change in temperature and precipitation

1. Einleitung

Den Sachstandsberichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zufolge hat sich das Klimasystem der Erde seit der vorindustriellen Zeit nachweislich verändert. Ein großer Teil der Veränderungen ist dabei auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Darüber hinaus prognostizieren Klimamodelle für die Zukunft eine zunehmende Verstärkung des Klimawandels. Im aktuellen IPCC Bericht (IPCC, 2007) wird beispielsweise für das ungünstigste Emissionsszenario eine globale Erwärmung zwischen 2.4 °C und 6.4 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts vorausgesagt.

Mit der globalen Klimaänderung verändern sich auch der Wasserkreislauf und das Verhalten von Extremereignissen. Dies führt in manchen Regionen zu heftigeren Niederschlägen und verstärkten Hochwässern, andere Regionen sind von längeren und häufigeren Trocken- und Dürreperioden betroffen. Die Abschätzung der zukünftigen räumlichen und zeitlichen Verteilung der Wasserverfügbarkeit stellt deshalb eine zentrale Herausforderung dar. Dies gilt besonders für klimasensitive Regionen, die jetzt schon mit knappen Wasserressourcen auskommen müssen und in denen geringe Änderungen der klimatischen Bedingungen große Auswirkungen nach sich ziehen können. Eine solche Region ist das Jordaneinzugsgebiet. Das Gebiet verfügt über die wichtigsten Wasserressourcen der Region und ist deshalb von großer wirtschaftlicher und politischer Bedeutung für die angrenzenden Staaten.

Um Erkenntnisse über Klimaentwicklungen in der Zukunft zu erhalten, wurden mittlerweile zahlreiche Klimamodellprojektionen generiert, welche wiederum auf verschiedenen Emissionsszenarien basieren. Globale Modelle können aufgrund ihrer geringen räumlichen Auflösung in der Regel nur großräumig gültige Aussagen über meteorologische Größen liefern. Um die regionalen Klimaausprägungen des Jordaneinzugsgebiets zu erfassen, müssen die Vorhersagen der Globalmodelle regionalisiert werden. Dies ist zum Beispiel durch die Einbindung regionaler Klimamodelle möglich. Die so gewonnenen Informationen über regionale Klimaänderungen dienen wiederum als Grundlage um Änderungen des Wasserhaushalts abschätzen zu können.

2. Zielsetzung

Regionale Klimasimulationen sind mittlerweile ein gebräuchliches Mittel in der Klimaforschung. Mit ihrer Hilfe lassen sich die niedrig aufgelösten Ergebnisse der Globalmodelle auf regionale Skalen übertragen. Allerdings sind damit nach wie vor relativ große Unsicherheiten verbunden. Grundlage dieser Arbeit sind die Ergebnisse zweier regionalen Klimasimulationen für einen Teilausschnitt des Nahen Ostens. Die Modelldatensätze beinhalten Zeitreihen für verschiedene Klimaparameter, die zum einen das bestehende Klima abbilden und zum anderen Zukunftsprojektionen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts umfassen.

Zunächst soll überprüft werden inwiefern die Modelle in der Lage sind die bestehenden Klimaverhältnisse wiederzugeben. Dazu werden den Modelldaten, Beobachtungswerte verschiedener Messstationen gegenübergestellt. So lassen sich erste Hinweise über Charakteristik und Unsicherheit der Modellrealisationen gewinnen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt schließlich darin mögliche Änderungen des regionalen Klimas aus den Modellzeitreihen herauszuarbeiten und zu quantifizieren. Hierfür werden Untersuchungen hinsichtlich Mittelwert, Saisonalität und Extremwertverhalten der verschiedenen Klimagrößen unternommen. Die Darstellung der Ergebnisse in Karten soll zusätzlich dazu dienen, räumliche Muster und regionale Unterschiede im Gebiet auszumachen. Zum einen ist dabei das Verhalten innerhalb der jeweiligen Modelle von Interesse. Um die Bandbreite möglicher Unsicherheiten abschätzen zu können, sollen die zwei Modellsimulationen auch miteinander verglichen werden. Nach einem Überblick über die Gesamtregion wird das Einzugsgebiet des Unteren Jordan detaillierter betrachtet. Dazu werden die untersuchten Klimagrößen über die Fläche des Einzugsgebietes gemittelt. Weitere Hinweise auf das Änderungsverhalten der Klimagrößen sollen mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen erlangt werden.

3. Regionales Klima

3.1 Klimazonen

In diesem Kapitel sollen die grundlegenden klimatischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes kurz dargestellt werden. In diesem Abschnitt wird zunächst eine Übersicht der wichtigsten Klimazonen der Region gegeben. Im folgenden Unterkapitel 3.2 werden dann die in der Arbeit untersuchten Klimaelemente näher beschrieben. Als Untersuchungsgebiet im weiteren Sinn wird in dieser Arbeit der in Abbildung 3.1 gezeigte Ausschnitt betrachtet. Das Gebiet umfasst Israel und die palästinensischen Autonomiegebiete, sowie die daran angrenzenden Teile Jordaniens, Syriens und des Libanons.



Abb. 3.1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes (URL 1)

Die Region lässt sich allgemein in drei Klimazonen einteilen. Ein Gebiet mit mediterranem Klima, welches den Libanon, große Bereiche Zentral- und Nordisraels, sowie Teile des jordanischen und syrischen Hochlandes umfasst. Es folgt eine Übergangszone mit semi-aridem Steppenklima und schließlich ein Bereich mit heißem Wüstenklima. Dieser erstreckt sich über Teile des Jordangrabens, die südliche Negev und die Jordanische

Wüste. Grundsätzlich ist die Unterteilung von Klimazonen definitionsabhängig. Eine der gängigsten Methoden ist die Klassifikation nach Köppen. Nach Goldreich (2003) gibt sie ein realistisches Bild der bestehenden regionalen Klimaverhältnisse wieder. Die Köppen-Klassifikation orientiert sich an den Verbreitungsgrenzen der natürlichen Vegetation. Dabei werden Schwellenwerte für die mittleren Monats- bzw. Jahreswerte der Temperatur und des Niederschlags definiert (Strahler & Strahler, 2002). Abbildung 3.2 zeigt die Einteilung der Klimazonen nach Köppen für Israel. Die Abkürzung Cs ist definiert als warmes, sommertrockenes Klima. Der kälteste Monat hat eine Mitteltemperatur unter 18°C, aber über -3°C. Der trockenste Sommermonat hat weniger als 3 cm Niederschlag und es fällt dreimal weniger Niederschlag als im feuchtesten Wintermonat. Die angehängten Buchstaben a bzw. b unterscheiden zusätzlich noch zwischen heißem Sommer (Mitteltemperatur des wärmsten Monats ist höher als 22°C) und warmen Sommer (Mitteltemperatur des wärmsten Monats liegt unter 22°C). Die Cs-Klima werden allgemein auch als mediterranes Klima bezeichnet. Die anderen in der Karte verzeichneten Klimazonen sind die sogenannten Trockenklima, welche mit dem Buchstaben B beginnen. Die Trockenklima werden mit Hilfe einer Niederschlag-Temperatur Beziehung weiter in ein semi-arides Steppenklima BS und ein mit BW bezeichnetes arides Wüstenklima unterteilt. Die Zusätze h und k unterscheiden noch in heiß und trocken bzw. kalt und trocken, je nachdem ob die mittlere Jahrestemperatur eine Grenze von 18 °C über- oder unterschreitet (Strahler & Strahler, 2002). Vergleicht man die Klimazonen mit der regionalen Niederschlagsverteilung, so stimmt die Grenze des mediterranen Klimas (Cs) in etwa mit der 400 mm Isohyete überein. Die Grenze zwischen ariden und semi-ariden Gebiet liegt bei ca. 150 mm in der Negev und 200 mm im Jordangraben (Goldreich, 2003).

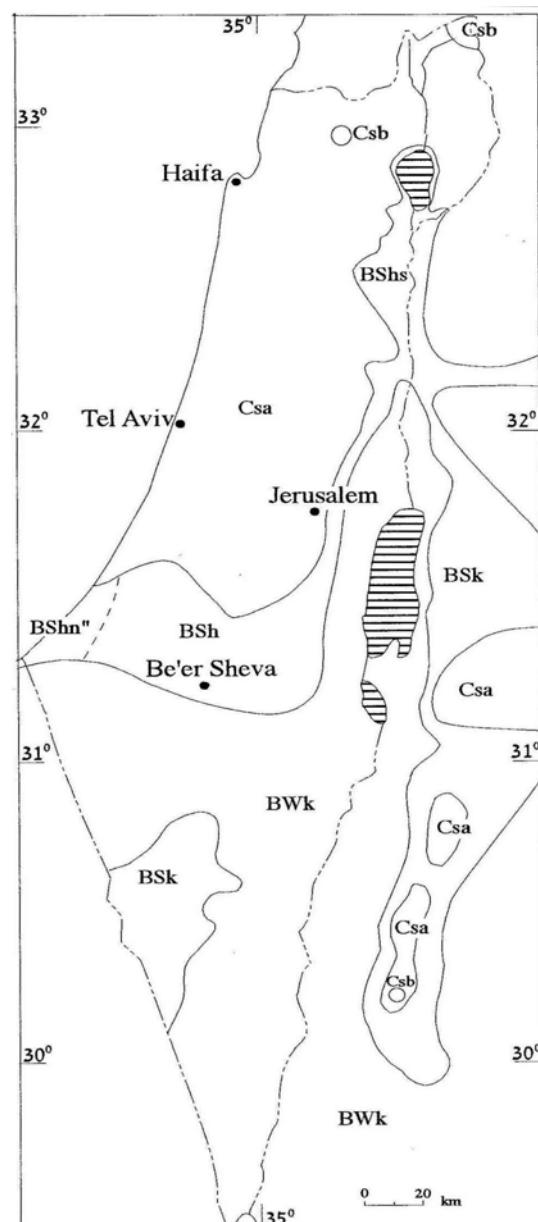


Abb. 3.2: Köppen Klima Klassifikation für Israel; Cs – Mediterranes Klima, BS – Semi-arides Klima, BW – Arides Klima (Goldreich, 2003)

3.2 Klimaelemente

3.2.1 Lufttemperatur

Die mittleren Jahrestemperaturen im Untersuchungsgebiet bewegen sich etwa in einem Bereich zwischen 15 °C und 25 °C. Der wärmste Monat ist in der Regel der August, der kälteste Monat ist der Januar. Abbildung 3.3 zeigt die räumliche Verteilung der mittleren Lufttemperatur in Israel für das ganze Jahr und die Monate Januar und August. Nach Goldreich (2003) lassen sich folgende allgemeine Regeln für die räumliche Verteilung formulieren:

- Die mittlere Lufttemperatur nimmt in nördlicher Richtung ab.
- Die mittlere Lufttemperatur sinkt mit zunehmender Höhe.
- Die Differenz zwischen dem wärmsten und kältesten Monat steigt mit zunehmender Entfernung vom Mittelmeer.
- Die mittleren Lufttemperaturen sind höher in urbaner Umgebung.

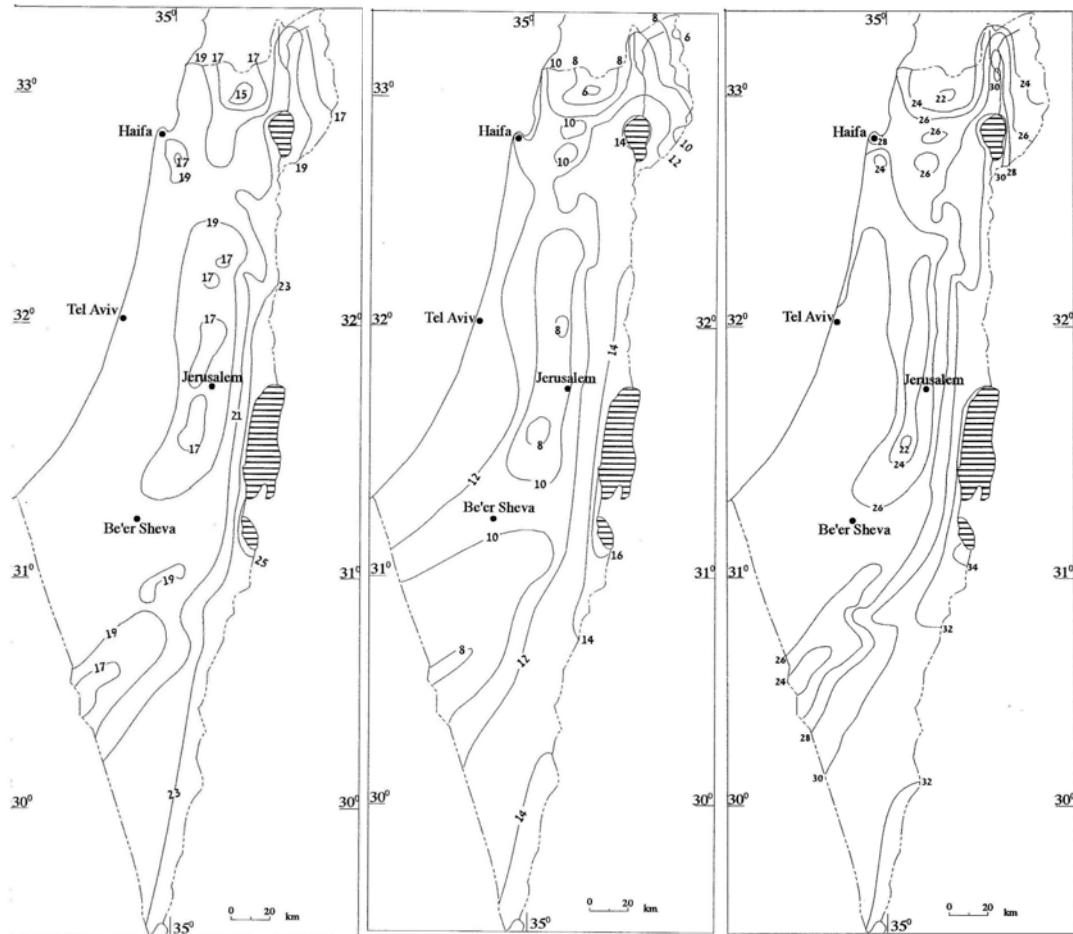


Abb. 3.3: Verteilung der mittleren Lufttemperatur in Israel: Jahr (Links), Januar (Mitte), August (Rechts) (Atlas of Israel, 1985 in Goldreich, 2003)

3.2.2 Niederschlag

Der Niederschlag ist wohl der Klimaparameter mit der größten Bedeutung für die Region. Gleichzeitig ist er eine sehr variable Größe. Niederschlag fällt fast ausschließlich in den Monaten Oktober bis April, wobei etwa zwei Drittel des Jahresniederschlags auf die Monate Dezember, Januar und Februar entfallen. Abbildung 3.4 zeigt die räumliche Verteilung des mittleren Jahresniederschlags. Die Werte rangieren zwischen etwa 1500 mm am Mt. Hermon und unter 50 mm in den südlichen Wüstengebieten. Auffällig sind die großen Veränderungen innerhalb sehr kurzer Distanzen. So beträgt die Entfernung der Station Efrata im Hochland von Judäa (700 mm Jahresniederschlag) bis zur Station En Fesh'ha am Toten Meer (80 mm) gerade mal 25 Kilometer (Goldreich, 2003). Allgemein lassen sich einige grundlegende Faktoren für die räumliche Verteilung des Niederschlags nennen. Zum einen die Abnahme der Niederschlagshöhe in südlicher Richtung und mit zunehmender Distanz zum Mittelmeer. Ein anderer Punkt ist die Zunahme des Niederschlags mit der Geländehöhe. Zudem ist bei Gebirgszügen die parallel zur Küste verlaufend ein Regenschatteneffekt erkennbar (Goldreich, 2003).

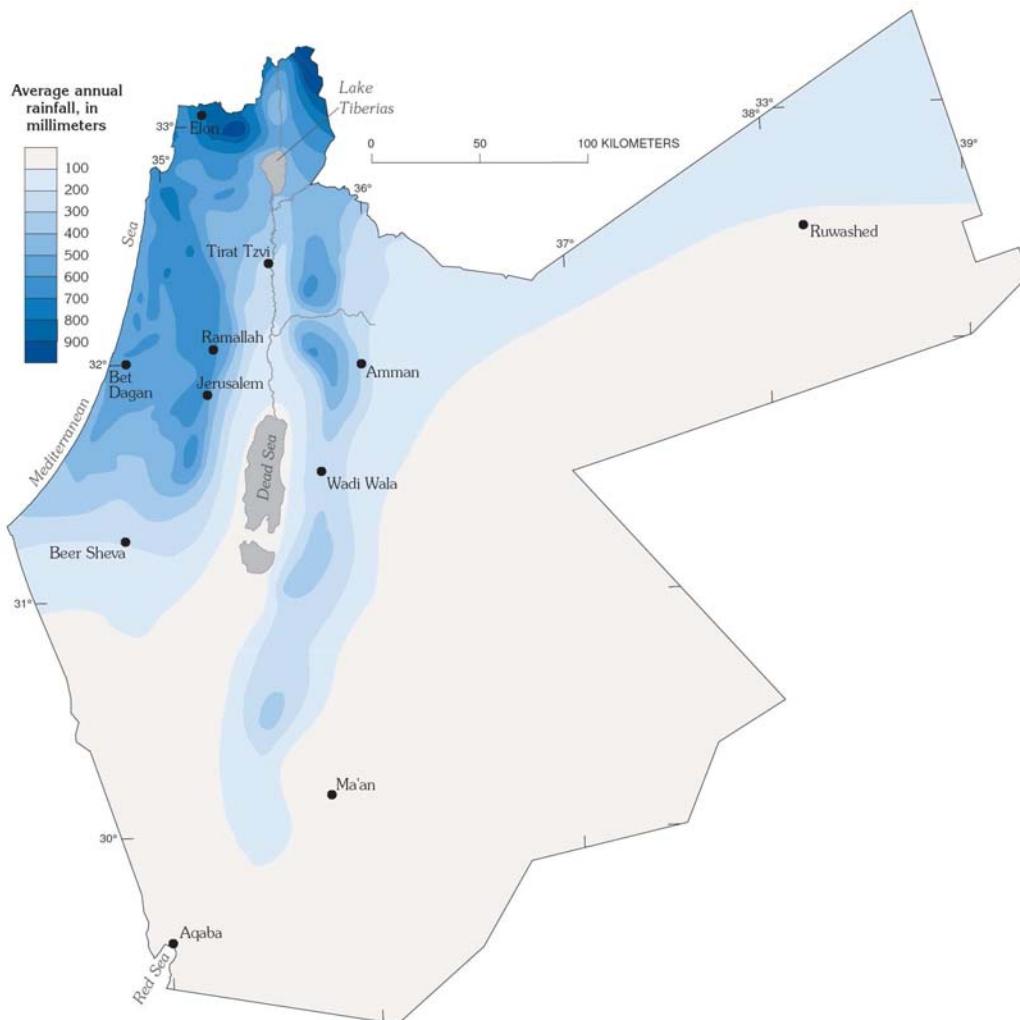


Abb. 3.4: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Untersuchungsgebiet (USGS, 1998)

Einen Hinweis auf die hohe saisonale Variabilität des Niederschlags geben die Tabellen 3.1 und 3.2. Für die Monate Januar und April wird dort der mittlere Monatsniederschlag dem Monatsmaximum und Minimum gegenübergestellt. Zudem ist der maximale Tagesniederschlag für eine 30-jährige Periode aufgeführt. Es zeigt sich, dass die maximalen Monatsniederschläge das Mittel um ein Vielfaches übertreffen können. Genauso kann im Winter auch nur ein Bruchteil des im Mittel erwarteten, bzw. in den Übergangsjahreszeiten gar kein Niederschlag fallen. In Jerusalem beträgt der Unterschied zwischen Maximum und Minimum ca. 400 mm im Januar und über 200 mm im April. Auffallend sind zudem die hohen möglichen Tagesniederschläge.

Tab. 3.1: Mittlerer, maximaler und minimaler Monatsniederschlag und maximaler Tagesniederschlag im Januar für verschiedene Stationen im Zeitraum 1970/71-1999/2000 (in mm) (URL 2)

Station	Monatsmittel	Max Monat	Min Monat	Max Tag
Har Kenaan (Zefat)	158.8	384.5	65.5	70.9
Haifa	124.9	356.1	19.5	77.3
Tel Aviv	126.9	424.9	36.5	107.2
Jerusalem	133.2	418.2	18.4	72.2
Beer Sheva	49.6	151.9	0.7	38.1
Elat	3.5	26.0	0.0	12.9

Tab. 3.2: Mittlerer, maximaler und minimaler Monatsniederschlag und maximaler Tagesniederschlag im April für verschiedene Stationen im Zeitraum 1970/71-1999/2000 (in mm) (URL 2)

Station	Monatsmittel	Max Monat	Min Monat	Max Tag
Har Kenaan (Zefat)	43.1	238.7	0.0	92.4
Haifa	23.6	114.4	0.0	57.2
Tel Aviv	18.0	98.9	0.0	51.4
Jerusalem	24.5	220.3	0.0	90.0
Beer Sheva	12.9	73.9	0.0	52.4
Elat	1.7	8.9	0.0	6.1

3.2.3 Globalstrahlung

Aufgrund ihrer Breitenlage und des geringen Bewölkungsgrades ist die Region sehr sonnenreich. Die mittlere jährliche Globalstrahlung für Israel liegt bei etwa 235 W/m^2 (Goldreich, 2003). Abbildung 3.5 zeigt den Jahresgang der Globalstrahlung und weiterer Strahlungskomponenten für die Station Be'er Sheva. Dabei entspricht $1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ etwa 11.6 W/m^2 . Die höchsten Werte für die Globalstrahlung zeigt der Juni, der Monat mit der längsten Sonnenscheindauer. Das Minimum liegt im Dezember. In den wolkenlosen Sommermonaten erreichen die Globalstrahlungswerte an der Oberfläche etwa drei Viertel der außeratmosphärischen Strahlung.

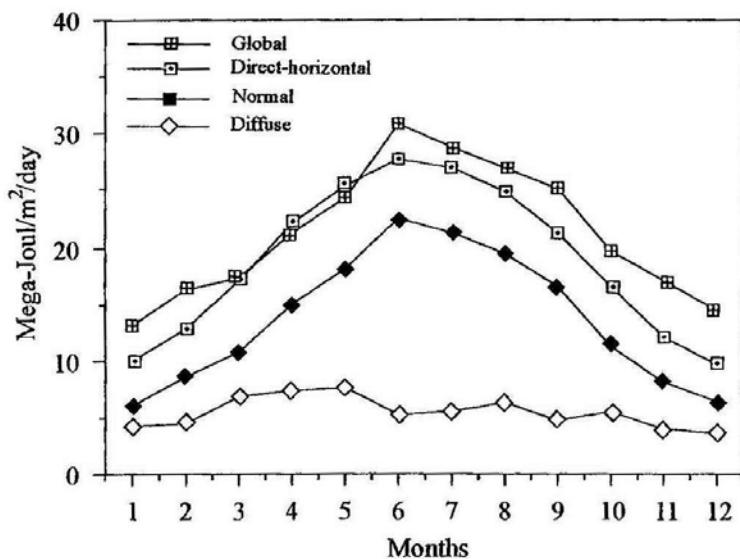


Abb. 3.5: Mittlere Monatswerte der solaren Strahlung für Be'er Sheva (nach Kudish & Ianetz, 1992 in Goldreich, 2003)

6.2.4 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit ist eine räumlich und zeitlich hoch variable Klimagröße. Gemittelte Werte geben diese hohe Variabilität nur eingeschränkt wieder. Abbildung 3.6 zeigt den Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit an verschiedenen Messstationen im Untersuchungsgebiet. Maxima und Minima können, je nach Station, zu sehr unterschiedlichen Zeiten des Jahres auftreten. Auch zeigen sich große Differenzen in den Amplituden. Es lassen sich jedoch einige grundlegende Gesetzmäßigkeiten beschreiben. Für Wüstenstationen ist die Amplitude im Jahresgang relativ gering. Im Jordangraben zeigt sich im Jahresgang meist ein Maximum im Sommer und ein Winterminimum. In Gebirgsregionen treten in der Regel zwei Maxima auf. Das Erste im Winter und das Zweite im Sommer. Unweit der Küste und an Westhängen dominiert dabei eher das

Wintermaximum, in Nähe des Jordangrabens und an Osthängen eher das Sommermaximum (Goldreich, 2003).

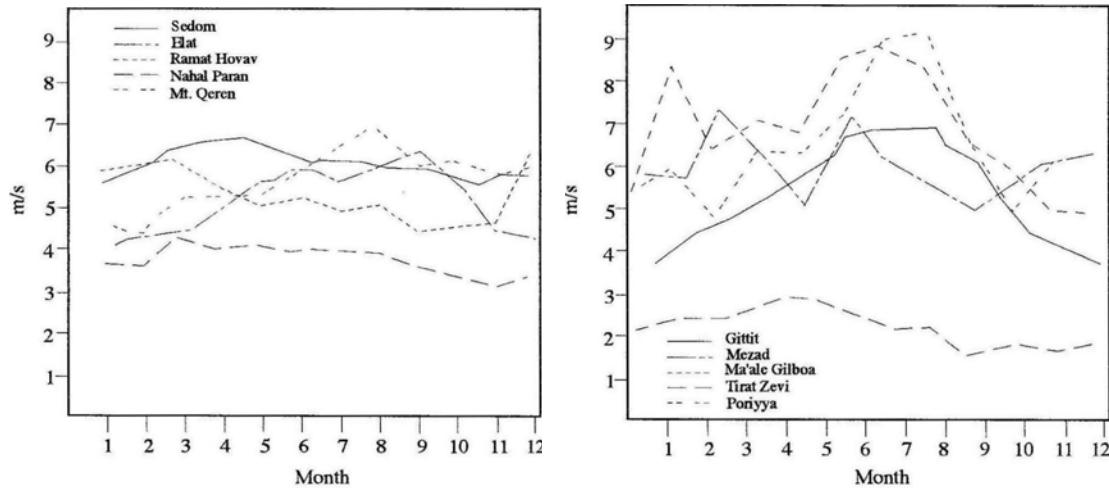


Abb. 3.6: Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für verschiedene Stationen (Goldreich, 2003)

6.2.5 Relative Luftfeuchte

Die räumliche Verteilung der mittleren relativen Luftfeuchte im Untersuchungsgebiet folgt einer relativ einfachen Regel. Die relative Luftfeuchte nimmt mit wachsender Entfernung zum Mittelmeer ab. Die Geländehöhe spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Während die mittlere jährliche relative Luftfeuchte in Küstennähe etwa 70 Prozent beträgt, sind es in Jerusalem und Be'er Sheva noch ca. 60 Prozent. In der südlichen Negev werden nur noch Werte um 35 Prozent erreicht (Goldreich, 2003).

Beim Jahresgang der relativen Luftfeuchte zeigt sich ein weniger eindeutiges Bild. Im Bereich der Mittelmeerküste herrscht in der Regel ein eher ausgeglichenes Profil ohne ausgeprägten Jahresgang vor. Viele israelische Stationen im Landesinneren zeigen eine Kurve mit einem Hauptminimum im Mai und einem sekundären Minimum im Oktober. In der Region des Toten Meeres und am Roten Meer gibt es dagegen ein klares Profil mit Wintermaximum und Sommerminimum. Dabei kann das Maximum den doppelten Wert des Minimums betragen (Goldreich, 2003).

4. Klimamodellierung

4.1 Globale und Regionale Klimamodelle

Mit Hilfe von Klimamodellen werden Zusammenhänge und Prozesse im Klimasystem qualitativ und quantitativ erforscht. Unter globalen Klimamodellen werden in der Klimaforschung in der Regel dreidimensionale Zirkulationsmodelle (General Circulation Models, GCM) verstanden. In aktuellen Ansätzen werden meist atmosphärische mit ozeanischen Zirkulationsmodellen (AOGCM) gekoppelt. Atmosphärische Zirkulationsmodelle weisen im Grundprinzip die gleiche Struktur wie die Modelle auf, die bei der Wettervorhersage verwendet werden (Schönwiese, 2003). Für Klimaprojektionen werden die physikalischen Gleichungen der atmosphärischen und ozeanischen Strömungen auf einem dreidimensionalen Gitter in die Zukunft weitergerechnet. Dafür werden Szenarien der zukünftigen Entwicklung von atmosphärischen Gas- und Aerosolkonzentrationen benötigt. Aufgrund des hohen Rechenaufwands sind globale Klimamodellierungen derzeit nur in sehr grober Auflösung möglich. In der Regel werden Rasterweiten von einigen 100 Kilometern verwendet.

Für detaillierte Regionalanalysen oder hydrologische Modelle reicht die Auflösung der Globalmodelle in der Regel nicht aus, weshalb die Anwendung von Regionalisierungsverfahren notwendig ist. Grundsätzlich kann man zwei Grundtypen unterscheiden (Spekat et al., 2007). Die erste Möglichkeit stellen statistische Verfahren dar. Dabei werden aus bestehenden Messdaten statistische Zusammenhänge zwischen den großräumigen Mustern und den lokalen Auswirkungen identifiziert. Die gewonnenen Beziehungen werden dann auf die Vorausrechnungen der Globalmodelle übertragen. Ein zweiter Ansatz sind dynamische Verfahren. Hierfür werden Teilgebiete eines Globalmodells fokussiert und ein räumlich höher aufgelöstes regionales Klimamodell aufgesetzt. An den Rändern des Teilgebiets kommen die Antriebsdaten aus dem globalen Klimamodell zum Einsatz. Diese Strategie wird allgemein als Nesting bezeichnet. Grundsätzlich lässt sich dieses Verfahren auch mehrmals hintereinander anwenden. Auch ist eine Koppelung mit anderen Modelltypen möglich. Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft eine solche Modellkette.

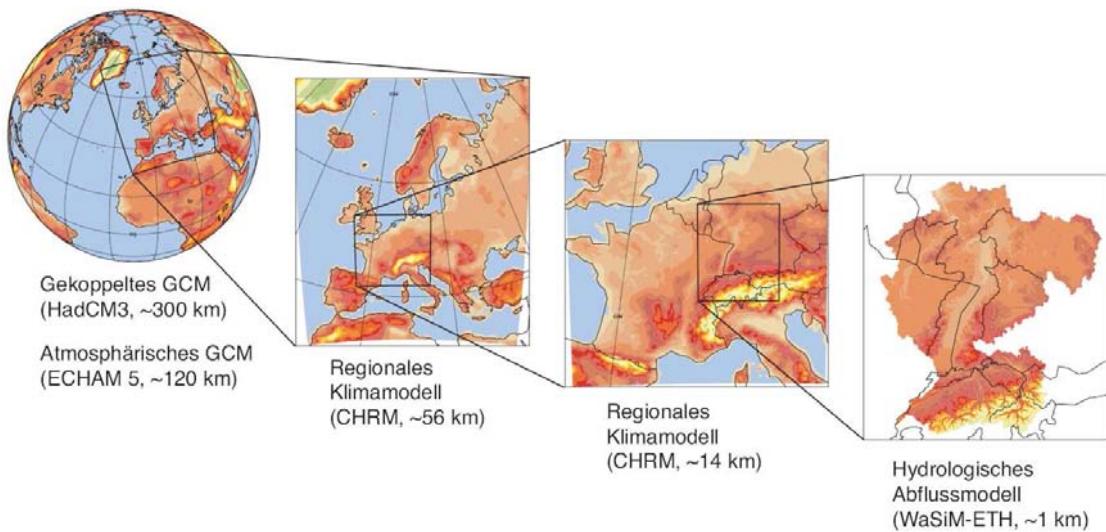


Abb. 4.1: Modellkette zur Simulation regionaler Klimafolgen (Klein (2002) in Schär et al. (2003))

4.2 Emissionsszenarien

Um Klimaprojektionen generieren zu können, benötigen Klimamodelle Informationen über die Emissionsentwicklung als Eingangsgröße. Im Rahmen des IPCC-Prozesses wurden deshalb Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 entwickelt, die auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel beruhen. Ausführlich beschrieben werden diese im IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES) (IPCC, 2001). Grundsätzlich werden dabei vier Hauptfamilien (A1, A2, B1 und B2) unterschieden, die in Abbildung 4.2 zusammengefasst sind.

Die A1-Szenarien beschreiben eine zukünftige Welt mit sehr starkem Wirtschaftswachstum und einer zunehmenden Globalisierung. Die Weltbevölkerung erreicht Mitte des 21. Jahrhunderts ihr Maximum und ist dann wieder rückläufig. Je nach vorherrschender Nutzung der Energiequellen unterscheidet man weiter in die Untergruppen A1FI, A1T und A1B. Beim A1FI-Szenario überwiegen fossile, beim AT-Szenario nicht-fossile Energieträger. Das A1B-Szenario beschreibt eine ausgewogene Mischung beider Energiearten.

Die A2-Szenarien gehen von einer heterogenen Welt aus, in der die lokalen Besonderheiten bewahrt bleiben. Ökonomische und technologische Entwicklung sind regional sehr unterschiedlich. Insgesamt nimmt die Weltbevölkerung ständig zu.

Die Welt der B1-Szenarien entwickelt sich ähnlich global orientiert wie die A1 Gruppe. Jedoch findet ein schneller Wandel der wirtschaftlichen Struktur statt mit einer Reduktion des Materialverbrauchs und der Einführung sauberer und Ressourcen schonender Technologien. Die Entwicklung ist auf Nachhaltigkeit und eine ausgewogene Wohlstandsverteilung ausgerichtet.

Die B2-Szenarien setzen auf lokale Lösungen der wirtschaftlichen, sozialen und umweltorientierten Nachhaltigkeitsfragen. Die Weltbevölkerung nimmt ständig zu, wenn auch weniger stark als bei den A2 Szenarien. Wirtschaftsentwicklung und technologischer Wandel bewegen sich auf mittlerem Niveau. Umweltschutz und ausgeglichener Wohlstand spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, aber auf lokaler und regionaler Ebene (IPCC, 2001). Nach diesen Vorgaben wurden Emissionsszenarien für die wichtigsten klimawirksamen Gase und Aerosole erstellt und daraus mit Hilfe von biochemischen Modellen der zeitliche Verlauf der atmosphärischen Konzentration als Input für Klimamodelle berechnet. Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft den Verlauf der CO₂ Emissionen für die verschiedenen Szenarien.

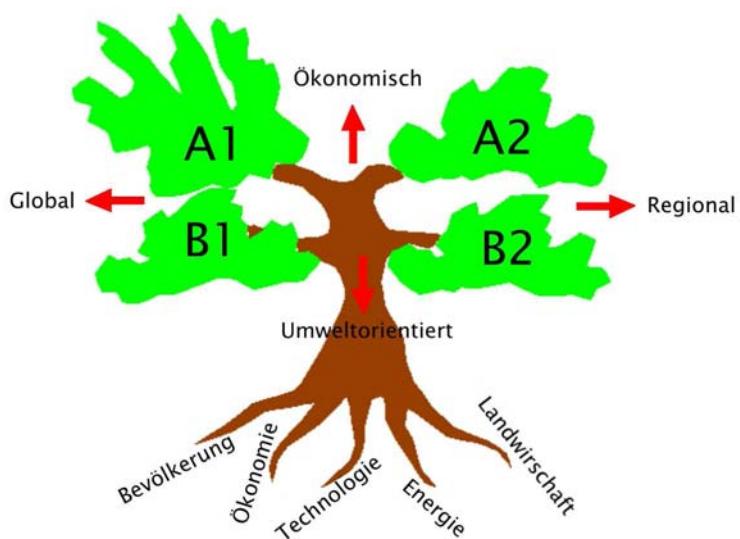


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Szenariofamilien (IPCC, 2001)

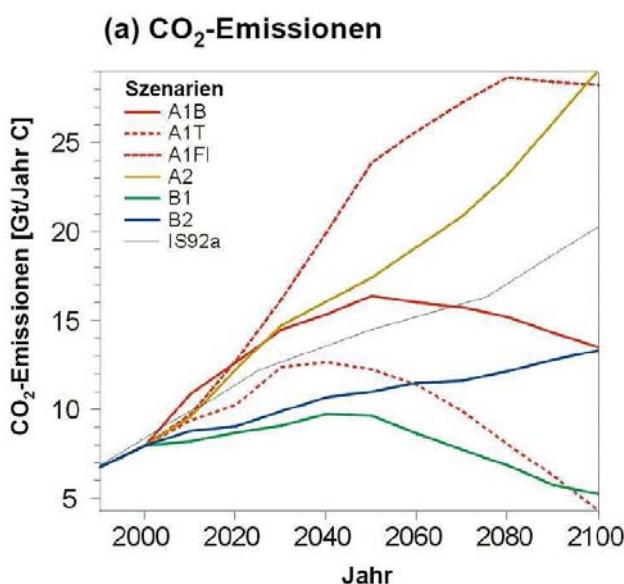


Abb. 4.3: Verlauf der CO₂ Emissionen für die verschiedenen Szenarien (IPCC, 2001)

4.3 Klimaprojektionen für den Mittelmeerraum

Als letzter Punkt in diesem Kapitel soll noch ein kurzer Überblick über aktuelle Klimaprojektionen für den Mittelmeerraum gegeben werden. Die Daten wurden im vierten IPCC-Sachstandsbericht (IPCC, 2007) veröffentlicht und fassen die Ergebnisse von insgesamt 21 Klimasimulationen zusammen. Dabei wurde jeweils das A1B Szenario zugrundegelegt und die Zeithorizonte 1980-99 und 2080-99 miteinander verglichen. Für die mittlere Jahrestemperatur zeigen die Modelle eine Erwärmung zwischen 2.2 °C und 5.1 °C. Der über alle 21 Modellsimulationen gemittelte Anstieg beträgt 3.5 °C. Anders als im nördlichen Europa ist die Erwärmung in Wintermonaten eher moderat. Dafür zeigt sich in den Sommermonaten ein überproportionaler Zuwachs.

Für den mittleren Jahresniederschlag zeigen die Modelle für den gesamten Mittelmeerraum eine klar negative Tendenz. Die Modelle zeigen eine Abnahme zwischen -4 und -27 Prozent. Der mittlere Niederschlagsrückgang liegt bei -12 Prozent. Dabei ist die relative Änderung im Sommer größer als im Winter. Abbildung 4.4 zeigt die räumliche Darstellung der Änderungen für Lufttemperatur und Niederschlag für Gesamteuropa.

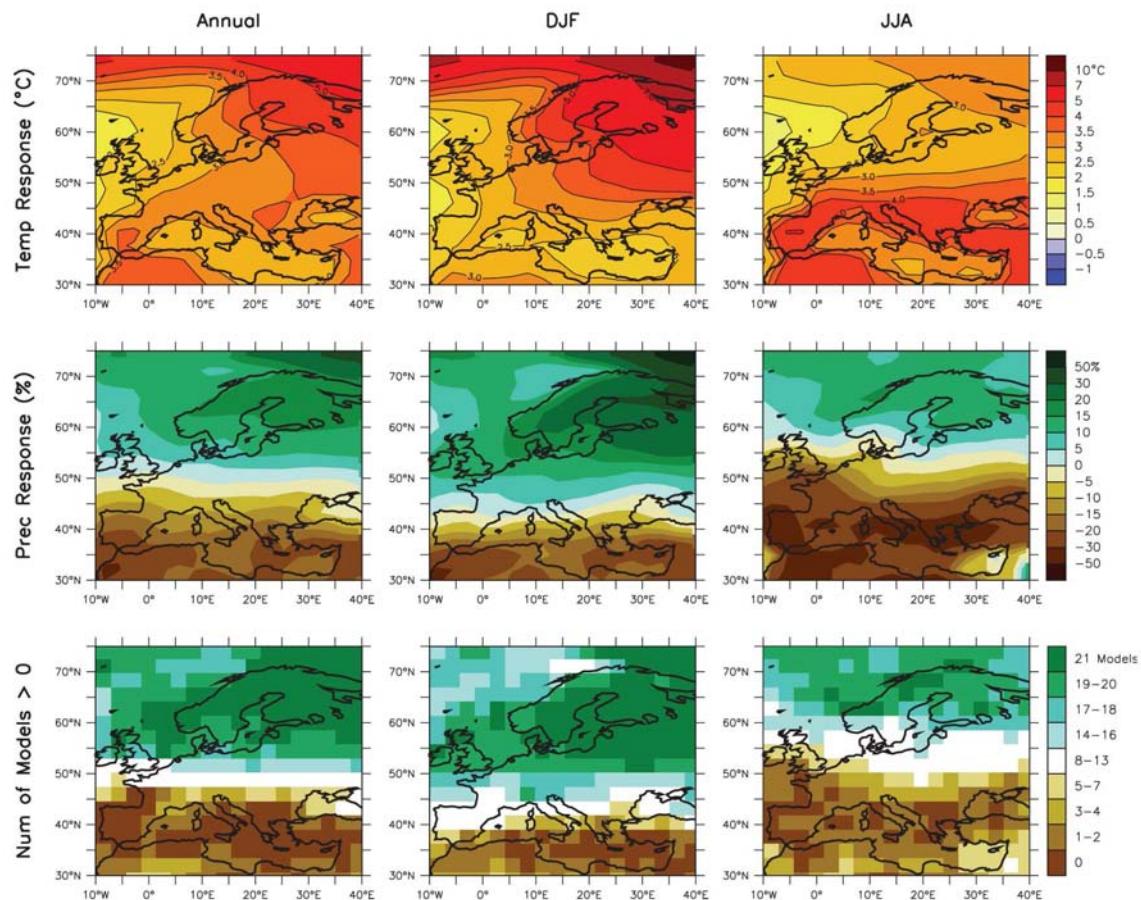


Abb. 4.4: Temperatur- und Niederschlagsänderungen in Europa gemittelt über 21 Modellsimulationen (A1B-Szenario) für die Perioden 1980-99 und 2080-99 (IPCC, 2007)

5. Datengrundlage

5.1 Klimamodelldaten

Hauptdatenbasis der Arbeit ist das Ergebnis zweier Klimasimulationen. Erzeugt wurden die Daten mit Hilfe regionaler Klimamodelle, welche wiederum von einem globalen Klimamodell angetrieben werden. Um Zukunftsprojektionen zu realisieren, wurde den globalen Modellen zusätzlich ein Emissionsszenario zugrunde gelegt. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die in der Arbeit verwendeten Klimasimulationen.

Tab. 5.1: Überblick der verwendeten Klimamodelldaten

Globales Modell	Emissions-szenario	Regionales Modell	Klima-parameter	Räumliche Auflösung	Zeitreihen
ECHAM4	SRES A2	MM5	Lufttemperatur Niederschlag Globalstrahlung Windgeschwindigkeit Relative Luftfeuchte	54 km	1961-90 2021-50
ECHAM5	SRES A1B	RegCM3	Lufttemperatur Niederschlag Globalstrahlung Windgeschwindigkeit Relative Luftfeuchte	ca. 50 km	1961-90 2021-50

Quelle des ECHAM4-MM5/A2 Datensatzes ist das Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU) des Forschungszentrums Karlsruhe. Der ECHAM5-RegCM3/A1B Datensatz wurde an der Universität Tel Aviv generiert. ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) und das Nachfolgemodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) sind atmosphärische Zirkulationsmodelle (AGCM), die am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelt wurden. Eingebettet in diese globalen Modelle, wurden die regionalen Modelle MM5 (Mesoscale Model Version 5) (Grell et al., 1995) und RegCM3 (Regional Climate Model Version 3) (Pal et al., 2005). Die verwendeten Emissionsszenarien A1B und A2 (siehe Kapitel 4) unterscheiden sich in dem hier betrachteten Zeitraum bis 2050 kaum.

Für beide Datensätze wurden jeweils zwei Zeitreihen von 30 Jahren betrachtet. Zum einen die Klimanormalperiode 1961-90 als Referenzzeitreihe. Zum anderen die Periode 2021-50 für die Zukunftsprognosen. Die Klimadaten liegen jeweils als Tageswerte vor, d.h. Tagessummen beim Niederschlag und Tagesmittel bei den vier anderen in Tabelle 5.1 genannten Klimaparametern. Die räumliche Lage der Klimadaten wird mit Hilfe von jeweils 168 Gitterpunkten beschrieben, welche in einem 12x14 Gitter angeordnet sind. Die Punkte sind in geographischen Koordinaten gegeben und repräsentieren eine Zelle. Jedem Gitterpunkt ist eine Zeitreihe der entsprechenden Klimaparameter zugeordnet. Diese Werte sind als Mittelwert über die gesamte Fläche der jeweiligen Zelle zu verstehen. Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen die räumliche Lage der Gitterpunkte beziehungsweise Gitterzellen für beide Datensätze auf einer Karte.

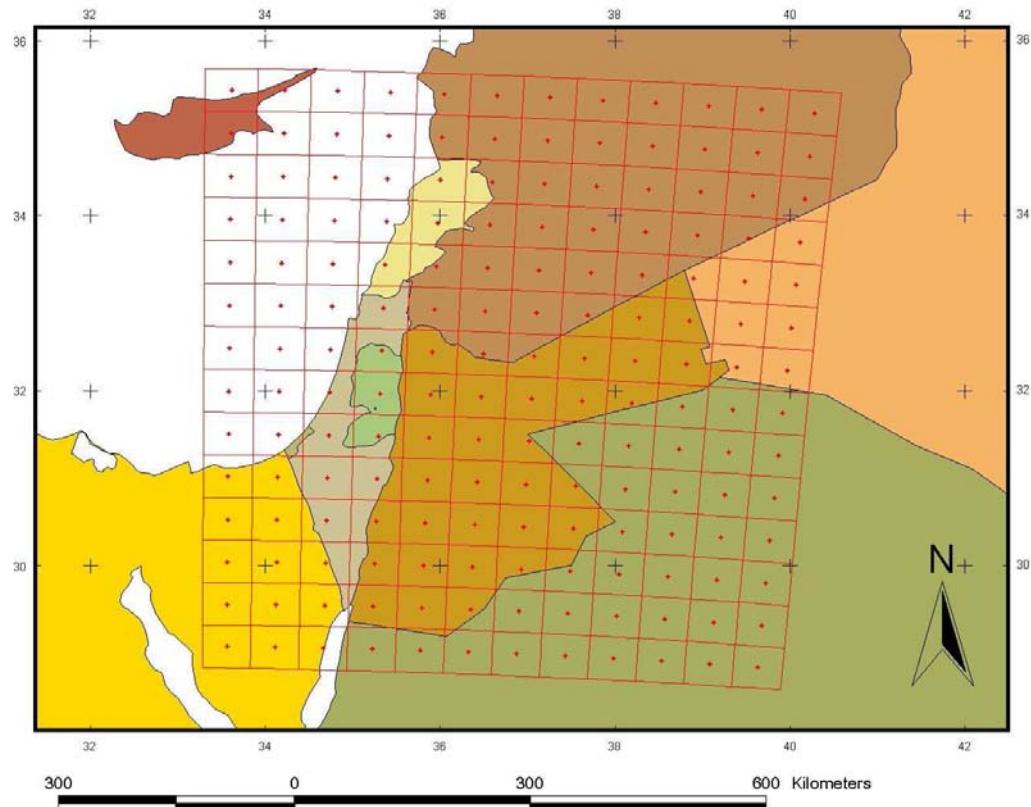


Abb. 5.1: Räumliche Lage der Gitterpunkte des ECHAM4-MM5 Datensatzes

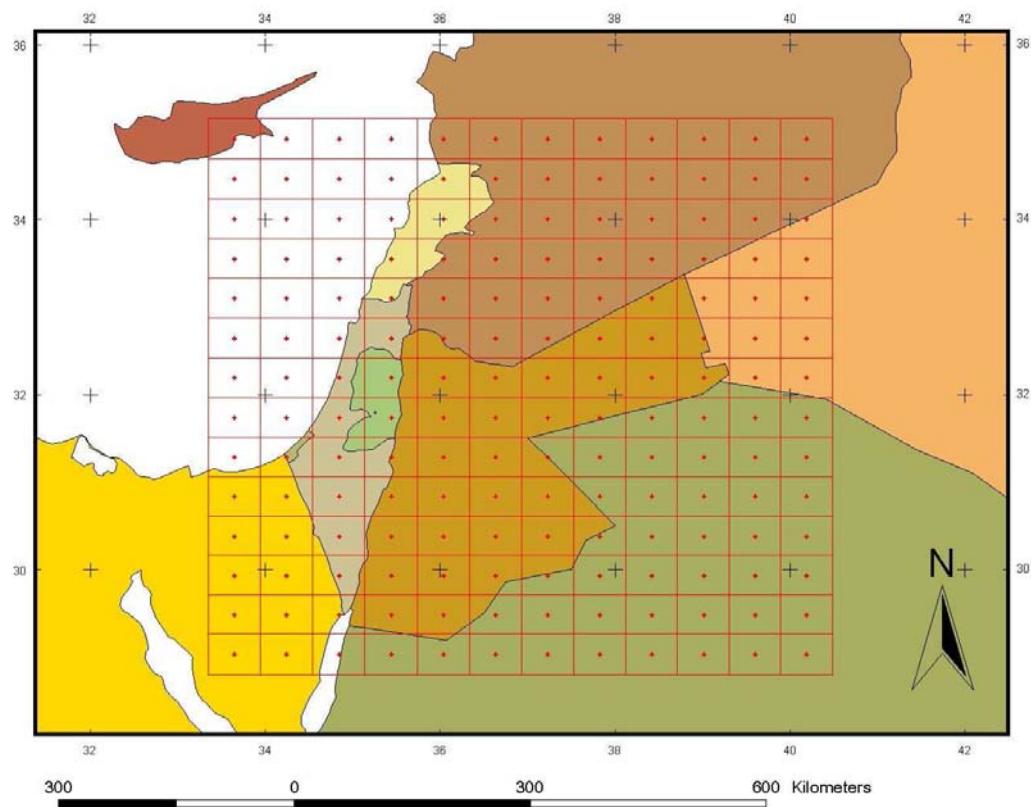


Abb. 5.2: Räumliche Lage der Gitterpunkte des ECHAM5-RegCM3 Datensatzes

5.2 Stationsdaten

Neben den Klimamodelldaten werden in der Arbeit auch gemessene Klimadaten verwendet. Diese stammen von sechs israelischen und zwei jordanischen Messstationen, welche in Tabelle 5.2 aufgeführt sind. Die Stationen decken die grundlegenden Klimazonen des Untersuchungsgebietes ab: Mediterranes Klima im nord-westlichen Teil, gefolgt von einer semi-ariden Übergangszone bis hin zu heißen Wüstenklima im süd-östlichen Teil des Gebietes. Die Angabe der Klimaregion in Tabelle 5.2 orientiert sich an der Einteilung von Rubin et al. (1992) in Goldreich (2003). Soweit verfügbar, umfassen die untersuchten Zeitreihen die Klimanormalperiode 1961-90. Abweichende Zeitreihen sind in Tabelle 5.2 angegeben. Die zeitliche Auflösung der beiden untersuchten Klimaparameter Niederschlag und Lufttemperatur beträgt ein Tag.

Tab. 5.2: Verwendete Messstationen mit Klimaregion und Klimaparameter

Stationsname	Lat.	Long.	Höhe ü. NN (m)	Klimaregion	Parameter	Zeitreihe
Har Kenaan	32.97	35.50	934	Obergaliläa	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990
Haifa	32.80	35.03	9	Karmelberge/ Küste	Lufttemperatur Niederschlag	1980-2005 1971-2000
Irbid	32.53	35.85	555	Jordanisches Hochland	Lufttemperatur Niederschlag	1979-2006 1961-1990
Tel Aviv	32.01	34.77	4	Zentrale Küstenebene	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990
Amman Airport	31.98	35.98	779	Jordanisches Hochland	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990
Jerusalem	31.75	35.20	800	Bergkette von Samaria u. Judäa	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990
Be'er Sheva	31.25	34.80	280	Nördliche Negev	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990
Elat	29.54	34.95	20	Arava/Südliche Negev	Lufttemperatur Niederschlag	1961-1990 1961-1990

5.3 Fazit

Hinsichtlich der scharfen Klimagradienzen des Untersuchungsgebietes ist die räumliche Auflösung der Modelldaten immer noch recht niedrig. Die Klimaparameter werden über eine Zellfläche von ca. 3000 km² gemittelt. Teilräume, wie das etwa 15 000 km² umfassende Einzugsgebiet des Unteren Jordan, lassen sich so kaum räumlich differenziert betrachten. Die zeitliche Auflösung der Daten von einem Tag ist dagegen für die meisten Klimauntersuchungen ausreichend. Die 30 Jahre umfassende Beobachtungsperiode gilt im allgemeinen als hinreichend verlässlich, um das Klima eines Ortes oder einer Region zu kennzeichnen.

6. Vergleich von Stations- und Modelldaten

6.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel soll überprüft werden, inwiefern die Modelle in der Lage sind das bestehende Klima im Mittel nachzubilden. Dies gilt als eine Grundvoraussetzung um ein Modell für Szenariorechnungen einsetzen zu können. Dazu werden an Bodenstationen gemessene Werte der Lufttemperatur und des Niederschlags mit den Modelldaten verglichen. Die dabei betrachtete Zeitreihe ist die Klimanormalperiode 1961-90, wobei die Zeitreihen der Stationen Haifa und Irbid von dieser Periode abweichen, wie in Tabelle 5.2 angegeben. Verglichen werden Jahresmittel und der Jahresgang der Monatsmittel für die beiden Klimaelemente und die angegebene Zeitspanne.

Grundsätzlich muss bei dem Vergleich beachtet werden, dass Stationsdaten, also Punktwerte, den flächengemittelten Werten der Modellzellen gegenübergestellt werden. Aus diesem Grund sind selbst bei sehr guter Modellierung geringe Abweichungen zu erwarten. Besonders zum Tragen kommt dieser Effekt, wenn innerhalb einer Gitterzelle große Höhenunterschiede vorhanden sind oder Teile der Zelle die Meeresoberfläche abdecken. Trotz dieser Einschränkung kann überprüft werden, ob die Modelldaten die richtige Größenordnung aufweisen und die bestehende Charakteristik im Jahresgang nachbilden können.

6.2 Lufttemperatur

6.2.1 Jahresmittel

Die erste untersuchte Klimagröße ist die mittlere Jahrestemperatur. Abbildung 6.1 zeigt zunächst die simulierte Jahresmitteltemperatur aus den beiden Modellläufen auf einer Karte. Der gewählte Ausschnitt zeigt nur einen Teil des gesamten Datensatzes und soll in diesem und dem nächsten Kapitel als Betrachtungsgrundlage dienen. Außerdem ist die räumliche Lage der Messstationen in den Karten verzeichnet. Bei Betrachtung der beiden Simulationen lassen sich zunächst zwei Grundtendenzen ausmachen. Zum einen liefert die ECHAM5-RegCM3 Simulation deutlich höhere Werte, im Mittel etwa um 2 °C. Zum anderen simuliert dieses Modell das Gebiet einheitlicher, so weisen über zwei Drittel der Gebietsfläche eine Jahresmitteltemperatur zwischen 19 und 21 °C auf.

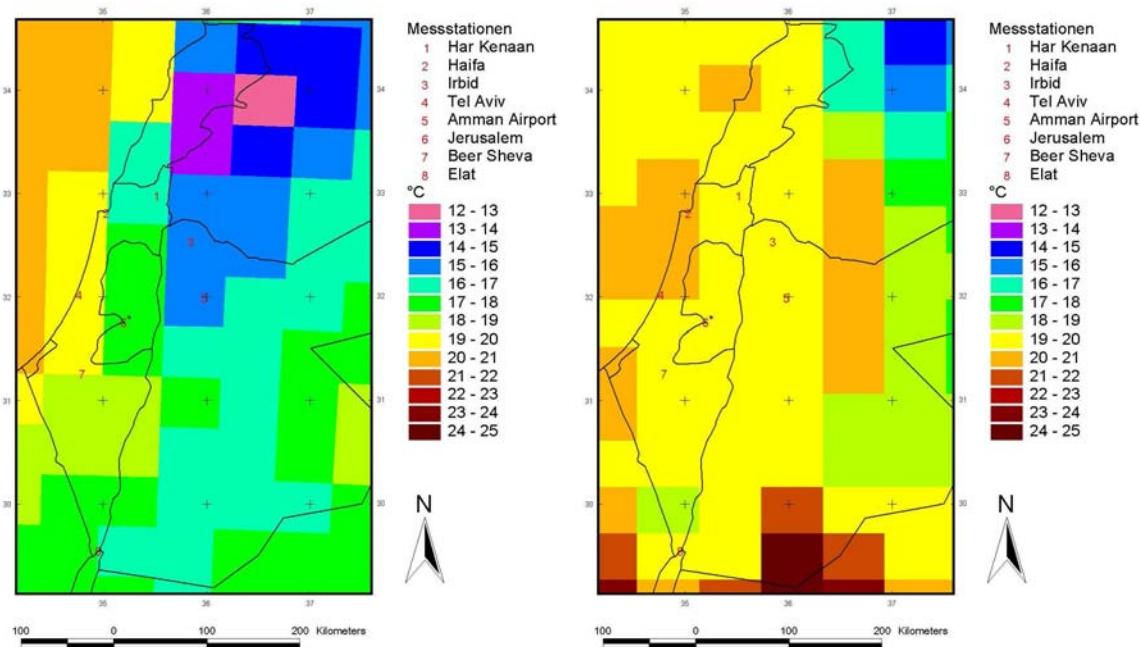


Abb. 6.1: Simulierte Jahresmitteltemperatur für die Periode 1961-90 mit ECHAM4-MM5 (links) und ECHAM5-RegCM3 (rechts) und Lage der verwendeten Messstationen

In den Tabellen 6.1 und 6.2 werden die Modellsimulationen den Beobachtungsdaten der acht Messstationen gegenübergestellt. Die Stationswerte reichen von 16.1 °C für die nördlichste, 934 m hoch gelegene Station Har Kenaan, bis 24.7 °C für die südlichste Station Elat. Tabelle 6.1 zeigt zunächst den Vergleich mit der ECHAM4-MM5 Simulation. Bis auf die Station Har Kenaan liegen die simulierten Werte alle niedriger als die Beobachtungswerte. Berücksichtigt man die relativ große Zellweite des Modells und die in Abschnitt 6.1 angesprochene Problematik, kann man jedoch feststellen, dass die Modellwerte die Messwerte recht gut erfüllen. Die Abweichung liegt für sieben Stationen bei unter 10 Prozent. Eine Ausnahme stellt allerdings die Station Elat dar, welche eine Differenz von über 7 °C aufweist. Zum Teil lässt sich diese Abweichung dadurch erklären, dass die entsprechende Gitterzelle des Modells sowohl einen Teil des Golfes von Akaba abdeckt, als auch Gebirge beinhaltet. Abbildung 6.1 zeigt aber auch, dass das Modell den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes allgemein mit zu niedrigen Temperaturen simuliert.

Der Vergleich der ECHAM5-RegCM3 Simulation mit den Stationswerten ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Zunächst kann man feststellen, dass sich alle Modellwerte in einer Bandbreite von nicht einmal 1 °C befinden. Im Gegensatz zur ECHAM4-MM5 Simulation werden die Beobachtungswerte hier in der Mehrzahl übertragen. Die größte Temperaturdifferenz, mit über 5 °C, ist auch bei der ECHAM5-RegCM3 Simulation für die Station Elat zu beobachten. Zudem ist auffällig, dass die Simulation für höher gelegene Stationen, besonders für die Station Har Kenaan, relativ hohe Abweichungen aufweist. Insgesamt gibt die ECHAM5-RegCM3 Simulation die Messstationsdaten deshalb etwas schlechter wieder.

Tab. 6.1: Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM4-MM5 Simulation für die Jahresmitteltemperatur (1961-90)

Stationsname	Stationswert (°C)	Modellwert (°C)	Differenz (°C)	Differenz (%)
Har Kenaan	16.1	16.9	0.8	5.1
Haifa	20.7	19.9	-0.7	-3.4
Irbid	17.6	15.9	-1.7	-9.6
Tel Aviv	19.9	19.4	-0.6	-2.9
Amman Airport	17.3	15.9	-1.5	-8.4
Jerusalem	17.4	17.0	-0.4	-2.2
Be'er Sheva	20.4	19.3	-1.2	-5.7
Elat	24.7	17.2	-7.4	-30.2

Tab. 6.2: Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM5-RegCM3 Simulation für die Jahresmitteltemperatur (1961-90)

Stationsname	Stationswert (°C)	Modellwert (°C)	Differenz (°C)	Differenz (%)
Har Kenaan	16.1	19.6	3.5	21.8
Haifa	20.7	20.1	-0.6	-2.9
Irbid	17.6	19.3	1.8	10.1
Tel Aviv	19.9	20.0	0.1	0.5
Amman Airport	17.3	19.2	1.8	10.6
Jerusalem	17.4	19.2	1.8	10.5
Be'er Sheva	20.4	19.8	-0.7	-3.2
Elat	24.7	19.4	-5.3	-21.3

6.2.2 Jahresgang

Das im vorangehenden Abschnitt behandelte Jahresmittel der Lufttemperatur gibt erste Hinweise über die Güte der Modellsimulationen. Im folgenden soll nun der Jahresgang der Monatsmittel näher betrachtet werden. Die Abbildungen 6.2 bis 6.5 zeigen den Jahresgang an den Messstationen Har Kenaan, Tel Aviv, Amman Airport und Be'er Sheva und die dazugehörigen Modellsimulationen. Die Diagramme für die restlichen Stationen befinden sich im Anhang.

Die Beobachtungsdaten haben ihr Minimum im Januar und das Maximum in den Monaten Juli oder August. Bis auf wenige Ausnahmen weisen auch die simulierten Daten diese Charakteristik auf. Vergleicht man den gesamten Jahresgang der Mess- und Modelldaten, zeigen sich jedoch sehr unterschiedliche Ergebnisse. Für einige Stationen weicht die simulierte Ganglinie ganzjährig, relativ gleichmäßig vom gemessenen Jahresgang ab. An anderen konzentriert sich die Differenz auf bestimmte Monate. Die küstennahen Stationen Haifa und Tel Aviv zeigen für beide Modelle eine Unterschätzung der Messwerte im Sommerhalbjahr und eine Überschätzung im Winterhalbjahr. Dies lässt sich wohl dadurch erklären, dass große Teile der entsprechenden Modellzellen sich über dem Mittelmeer befinden und es so zu einem Ausgleicheffekt kommt. Andere signifikante Abweichungen, wie zum Beispiel die große Differenz der ECHAM5-RegCM3 Simulation im Winterhalbjahr für die Station Har Kenaan, lassen sich kaum schlüssig nachvollziehen.

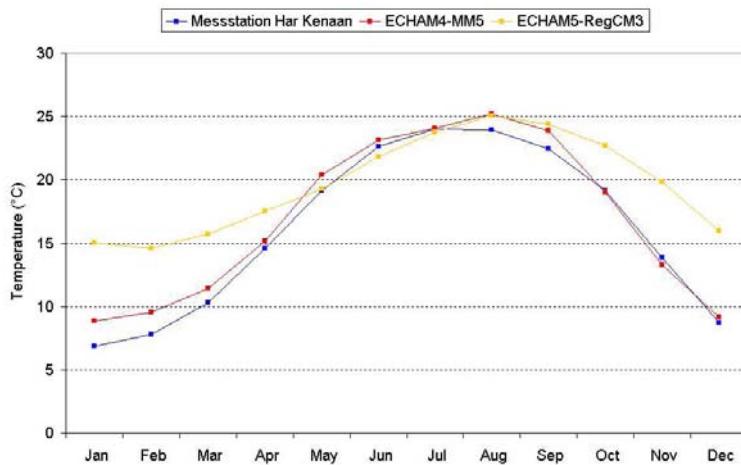


Abb. 6.2: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Har Kenaan und die dazugehörigen Modellsimulationen

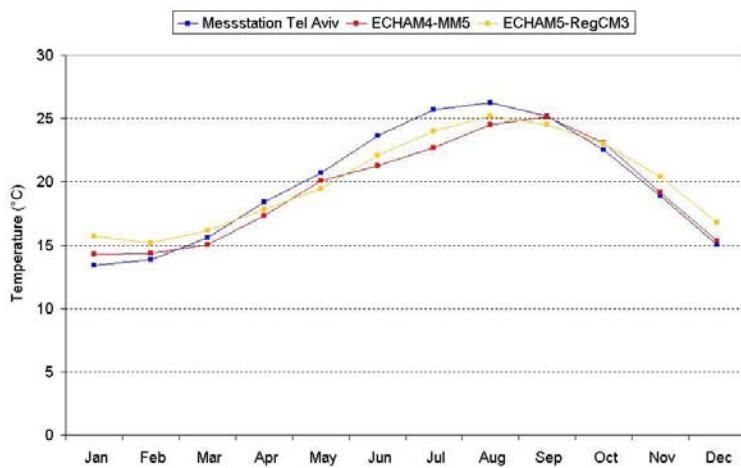


Abb. 6.3: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Tel Aviv und die dazugehörigen Modellsimulationen

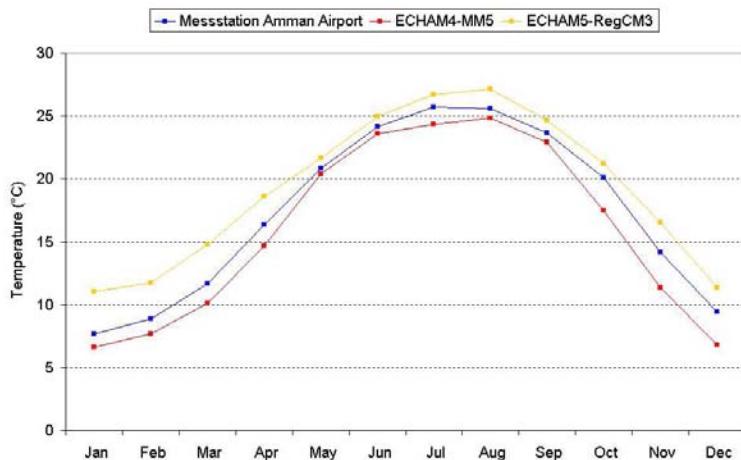


Abb. 6.4: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Amman Airport und die dazugehörigen Modellsimulationen

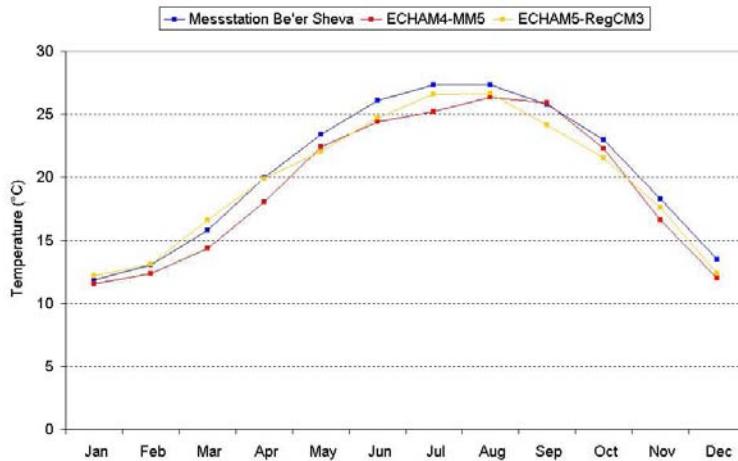


Abb. 6.5: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Be'er Sheva und die dazugehörigen Modellsimulationen

6.3 Niederschlag

6.3.1 Jahresmittel

Erste untersuchte Größe beim Niederschlagsvergleich ist wiederum das Jahresmittel, in diesem Fall die mittlere Jahressumme des Niederschlags. Abbildung 6.6 zeigt das Ergebnis beider Modellsimulationen für den Zeitraum 1961-90, sowie die Lage der Vergleichsstationen. Die ECHAM4-MM5 Simulation besitzt ein Maximum im nordwestlichen Teil des Kartenausschnitts und eine relativ gleichmäßige Abnahme des Niederschlags in südlicher, beziehungsweise östlicher Richtung. Der gesamte südliche Teil wird mit einem Niederschlag von unter 100 mm simuliert. Auch die ECHAM5-RegCM3 Simulation zeigt sehr geringe Niederschläge im südlichen Teil des Gebiets. Der Rest des Ausschnitts zeigt in diesem Fall ein eher unregelmäßiges Muster.

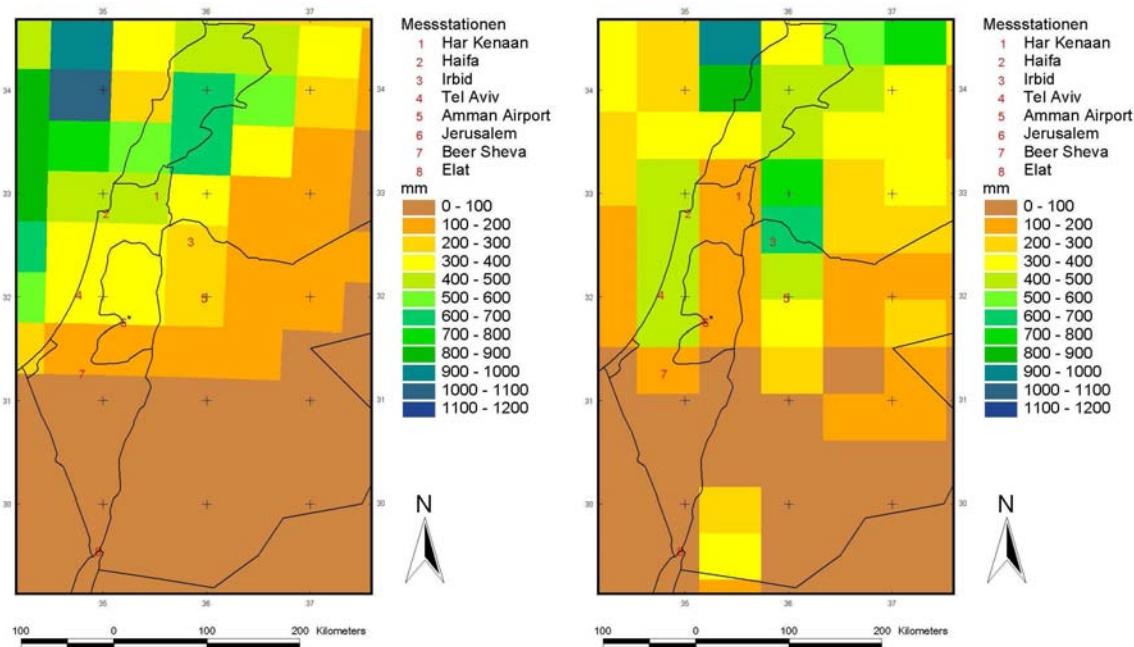


Abb. 6.6: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für die Periode 1961-90 mit ECHAM4-MM5 (links) und ECHAM5-RegCM3 (rechts) und Lage der verwendeten Messstationen

Die Tabellen 6.3 und 6.4 zeigen den Vergleich der gemessenen Stationswerte mit den simulierten Werten der Modelle. Die Beobachtungswerte reichen von etwa 660 mm an der Station Har Kenaan, bis ca. 30 mm für die Station Elat. Beim Vergleich mit der ECHAM4-MM5 Simulation in Tabelle 6.3 zeigt sich, dass das Modell die meisten Stationswerte unterschätzt. Die Abweichungen sind dabei bedeutend größer als beim Temperaturvergleich. Die Differenzen liegen teilweise bei über 200 mm, beziehungsweise bei über 40 Prozent. Tendenziell ist Fehler bei Stationen mit verhältnismäßig hohen Jahresniederschlägen größer.

Auch die ECHAM5-RegCM3 Simulation unterschätzt die Mehrzahl der Beobachtungswerte, wie Tabelle 6.4 zeigt. Die zwei jordanischen Stationen Amman Airport und Irbid werden allerdings deutlich überschätzt. Das Modell weist in diesem Bereich ein lokales Maximum auf, wie in Abbildung 6.6 ersichtlich ist. Die Abweichung ist insgesamt im Mittel noch größer als bei der ECHAM4-MM5 Simulation. Besonders auffällig sind die Stationen Har Kenaan und Jerusalem, die Differenzen von fast 500 mm aufweisen. Eine Erklärung für diese großen Fehler lässt sich auf den ersten Blick nicht ausmachen.

Tab. 6.3: Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM4-MM5 Simulation für den mittleren Jahresniederschlag (1961-90)

Stationsname	Stationswert (mm)	Modellwert (mm)	Differenz (mm)	Differenz (%)
Har Kenaan	657.4	408.2	-249.2	-37.9
Haifa	538.3	495.7	-42.6	-7.9
Irbid	466.9	265.7	-201.2	-43.1
Tel Aviv	512.0	394.6	-117.3	-22.9
Amman Airport	264.1	276.1	11.9	4.5
Jerusalem	550.4	325.7	-224.7	-40.8
Be'er Sheva	206.3	166.4	-39.9	-19.4
Elat	32.4	33.3	0.9	2.8

Tab. 6.4: Vergleich der Stationswerte mit der ECHAM5-RegCM3 Simulation für den mittleren Jahresniederschlag (1961-90)

Stationsname	Stationswert (mm)	Modellwert (mm)	Differenz (mm)	Differenz (%)
Har Kenaan	657.4	165.8	-491.6	-74.8
Haifa	538.3	441.9	-96.4	-17.9
Irbid	466.9	641.4	174.5	37.4
Tel Aviv	512.0	440.8	-71.2	-13.9
Amman Airport	264.1	451.8	187.7	71.1
Jerusalem	550.4	100.2	-450.2	-81.8
Be'er Sheva	206.3	122.0	-84.4	-40.9
Elat	32.4	56.8	24.4	75.2

6.3.2 Jahresgang

Der Jahresgang des Niederschlags zeigt für die Beobachtungsdaten die für die Region typische Charakteristik. Der gesamte Jahresniederschlag fällt fast ausschließlich im Winterhalbjahr. Das Maximum liegt in fünf Fällen im Januar, für drei Stationen im Dezember. Die Monate Mai bis September sind nahezu ohne Niederschlag. Die Abbildungen 6.7 bis 6.10 zeigen den Vergleich der Stationsdaten mit den Modellsimulationen. Die Diagramme der restlichen Stationen befinden sich im Anhang. Auch die Modellsimulationen zeigen die typische Aufteilung in ein niederschlagsreiches Winterhalbjahr und ein fast trockenes Sommerhalbjahr. Allerdings zeigen beide Modelle eine Verschiebung beim Maximum. Bei der ECHAM5-RegCM3 Simulation liegt das Maximum im Dezember, die Jahresgänge der ECHAM4-MM5 Simulation haben ihr Maximum im November. Ausnahme ist in beiden Fällen die Station Elat, die sich im ariden Süden befindet. Im Gegensatz zu den Messdaten sind die Sommermonate bei den Modellsimulationen im Mittel auch nicht völlig niederschlagsfrei. Allerdings sind die Monatssummen dort minimal.

Wie bei den Jahresmitteln gibt es auch bei den Monatsmitteln große Abweichungen zwischen Mess- und Modellwerten, wie die Diagramme zeigen. Bei der ECHAM5-RegCM3 Simulation verteilt sich die Unter- bzw. Überschätzung in der Regel relativ gleichmäßig auf die Niederschlagssaison. Bei der ECHAM4-MM5 Simulation zeigt sich ein anderes Bild. Hier werden die Monate Oktober und vor allem November vom Modell überschätzt. Dies gilt auch für Stationen, deren Messwerte ein deutlich höheres Jahresmittel aufweisen als die Modellwerte. Dementsprechend werden die restlichen Monate der Niederschlagssaison stark unterschätzt.

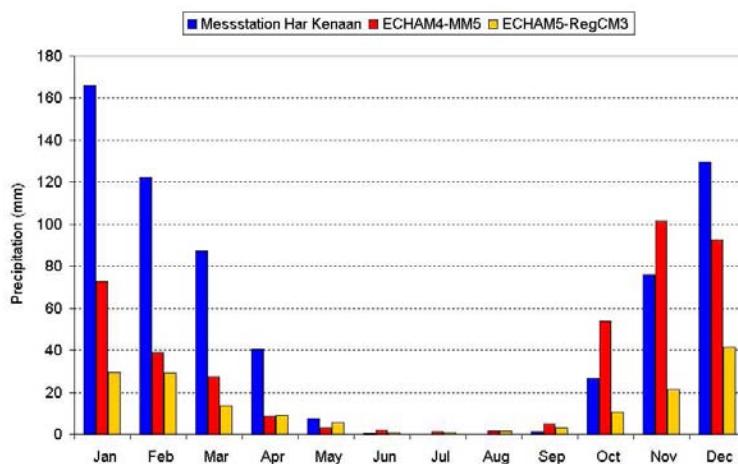


Abb. 6.7: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Har Kenaan und die dazugehörigen Modellsimulationen

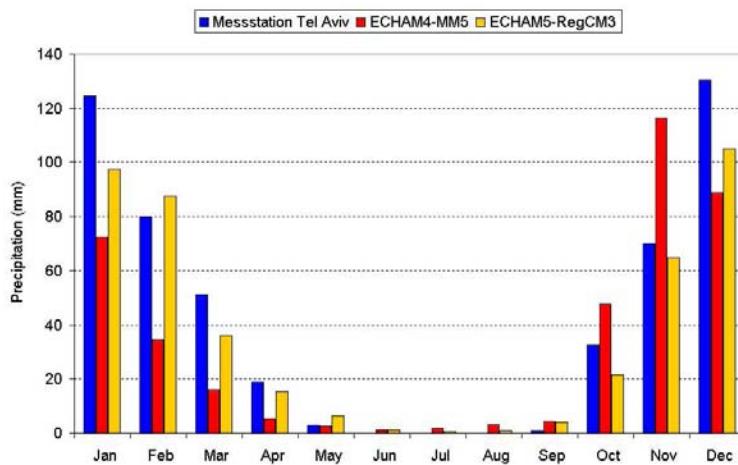


Abb. 6.8: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Tel Aviv und die dazugehörigen Modellsimulationen

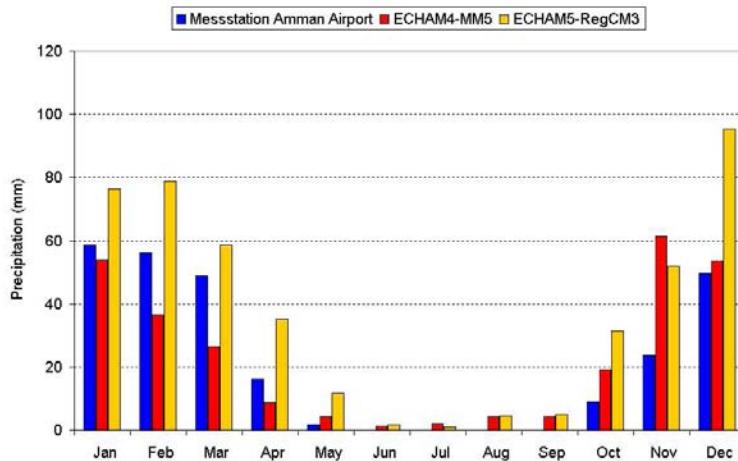


Abb. 6.9: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Amman Airport und die dazugehörigen Modellsimulationen

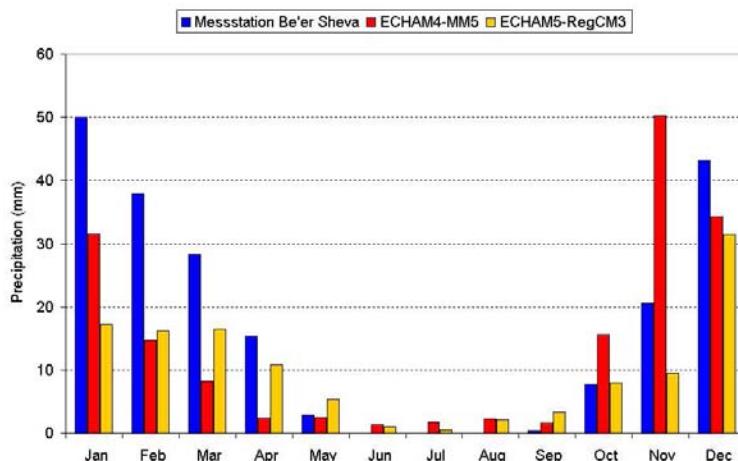


Abb. 6.10: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Be'er Sheva und die dazugehörigen Modellsimulationen

6.4 Fazit

Berücksichtigt man die in Abschnitt 6.1 angesprochene Probleme beim Vergleich von Mess- und Modelldaten, geben die beiden Modellsimulationen die Messwerte für die Lufttemperatur relativ realistisch wieder. Allerdings gibt es auch Ausnahmen, wie beispielsweise die großen Abweichungen für die Station Elat zeigen. Ein anderes Bild zeigt sich beim Niederschlagsvergleich. Hier ergeben sich große Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Jahres- und Monatsmitteln. Die regionale Charakteristik im Jahresgang wird dagegen recht gut nachgebildet.

Beim Vergleich der Modelle lässt sich feststellen, dass die ECHAM4-MM5 Simulation für beide Klimagrößen insgesamt ein etwas besseres Ergebnis liefert als die ECHAM5-RegCM3 Simulation.

7. Ergebnisse der Szenariorechnungen

7.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Ergebnisse der Klimaszenariorechnungen gegeben werden. Dazu werden die von den beiden Klimamodellen erzeugten Zukunftszeitreihen 2021-50 den jeweiligen Referenzzeitreihen 1961-90 gegenübergestellt. Für die räumliche Visualisierung der Ergebnisse wurden jeweils Kartenausschnitte der Region erzeugt. Anders als in Kapitel 6 sind die Werte nicht in den ursprünglichen Modellrastern, sondern in interpolierter Form dargestellt. Hierfür wurden die Gitterpunkte der regionalen Modelle als imaginäre Klimastationen betrachtet und die zugehörigen Werte mit Hilfe der Spline-Methode auf ein sehr viel feineres Raster interpoliert. Die Kartendarstellungen in diesem Kapitel zeigen die Änderung der jeweiligen Klimagrößen, das heißt die Wertedifferenz zwischen Zukunftszeitreihe und Referenzzeitreihe. Dargestellt ist jeweils die absolute und die relative Änderung. Im Anhang befinden sich für beide Zeithorizonte zusätzlich Karten mit den Werten der simulierten Klimaelemente. In allen Karten ist außerdem die Grenze des Unteren Jordaneinzugsgebiets (LJRC) verzeichnet. Eine detailliertere Betrachtung für dieses Gebiet folgt in Kapitel 8.

Im folgenden Unterkapitel 7.2 werden zunächst die Ergebnisse für die Jahresmittel aller in der Arbeit untersuchten Klimaelemente (Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Relative Luftfeuchte) betrachtet. In Abschnitt 7.3 wird näher auf die saisonalen Unterschiede bei der Lufttemperatur und dem Niederschlag eingegangen. Unterkapitel 7.4 behandelt zusätzlich einige Niederschlagsindizes.

7.2 Jahresmittel

7.2.1 Lufttemperatur

Die Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die Änderungen der mittleren Jahrestemperaturen, die sich aus den beiden Klimasimulationen ergeben. Beide Modelle zeigen für das Untersuchungsgebiet eine deutliche Zunahme. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation, mit einem Anstieg zwischen 1.1 °C und 2.3 °C, fällt die Erwärmung höher aus. Die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation zeigt eine Temperaturzunahme zwischen 1.1 °C und 1.7 °C. Aus der Darstellung der relativen Änderungen wird ersichtlich, dass mit wachsender Entfernung zum Mittelmeer tendenziell ein höherer Temperaturanstieg stattfindet.

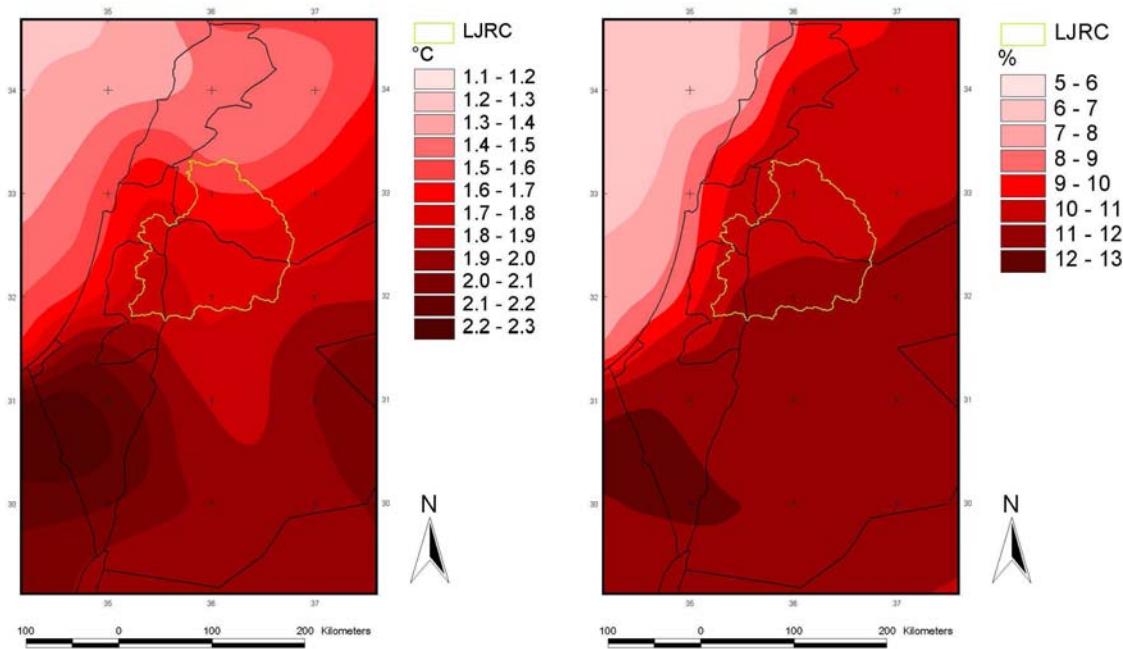


Abb. 7.1: Absolute und relative Änderung der mittleren Jahrestemperatur für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

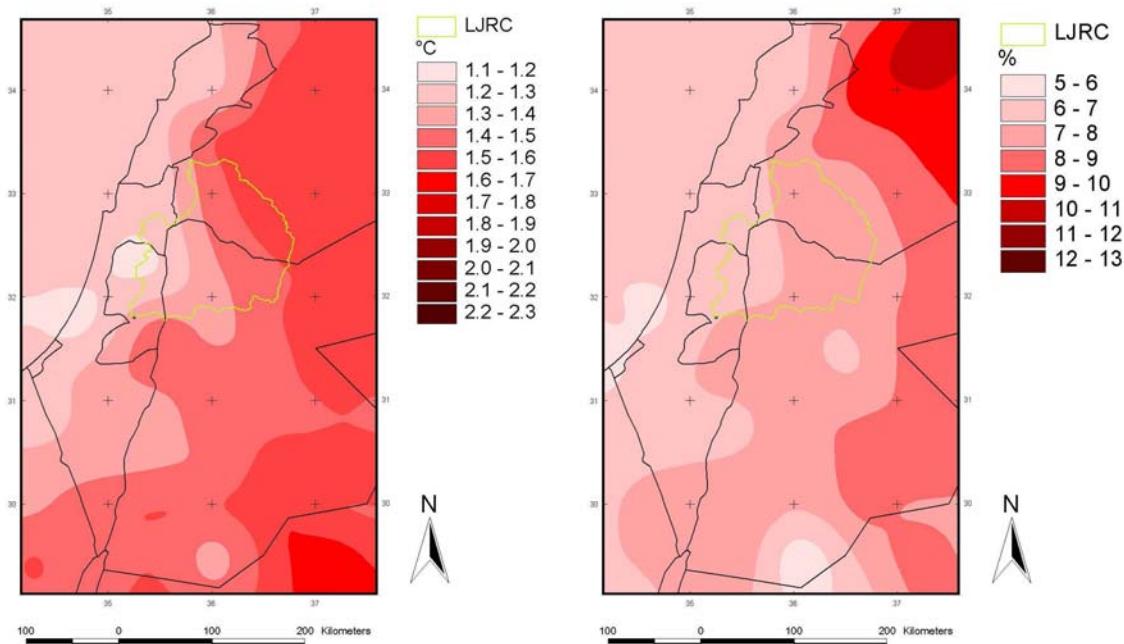


Abb. 7.2: Absolute und relative Änderung der mittleren Jahrestemperatur für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.2.2 Niederschlag

Die Darstellungen der Änderung des mittleren Jahresniederschlags finden sich in Abbildung 7.3 und 7.4. Die beiden Simulationen liefern hier unterschiedliche Ergebnisse. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt sich für fast das gesamte Untersuchungsgebiet eine Niederschlagszunahme. Der Anstieg beläuft auf bis zu 250 mm über dem Mittelmeer und etwa 50-100 mm in einem ca. 100 km breiten Streifen entlang der Küste. Der Rest des Gebietes zeigt einen Zuwachs von unter 50 mm. Ausnahme ist die sowieso fast niederschlagslose südliche Negev. Sie weist eine leicht negative Tendenz auf. Betrachtet man die relativen Veränderungen, so zeigen sich die größten Zuwächse im ariden südöstlichen Teil des Gebietes und im Bereich des Gazastreifens.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation. Die mittleren Jahresniederschläge von Zukunfts- und Referenzzeitraum unterscheiden sich hier nur wenig. Für den größten Teil des Untersuchungsgebietes liegt die Änderung in einem Bereich von ± 25 mm. Dabei konzentriert sich die Zunahme tendenziell auf den südlichen Teil, die Abnahme auf nördlichen Teil des Gebietes.

7.2.3 Globalstrahlung

Die Änderungen für die mittlere, jährliche Globalstrahlung sind in den Abbildungen 7.5 und 7.6 dargestellt. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt sich über der Landfläche ein leichter Rückgang der mittleren Globalstrahlung. Die Differenz nimmt mit wachsender Entfernung vom Mittelmeer zu und beträgt maximal etwa 6 Prozent. Grundsätzlich passt dies gut mit dem zunehmenden Niederschlag und der damit verbundenen zunehmenden Bewölkung bei dieser Simulation zusammen. Auffällig ist jedoch die Steigerung der mittleren, jährlichen Globalstrahlung über einem Teil des Mittelmeers. Sie beträgt bis zu 5 Prozent.

Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation bleibt die mittlere, jährliche Globalstrahlung beim Vergleich der beiden Zeitreihen im Grunde unverändert. Die Abweichung liegt für das gesamte Gebiet bei unter einem Prozent.

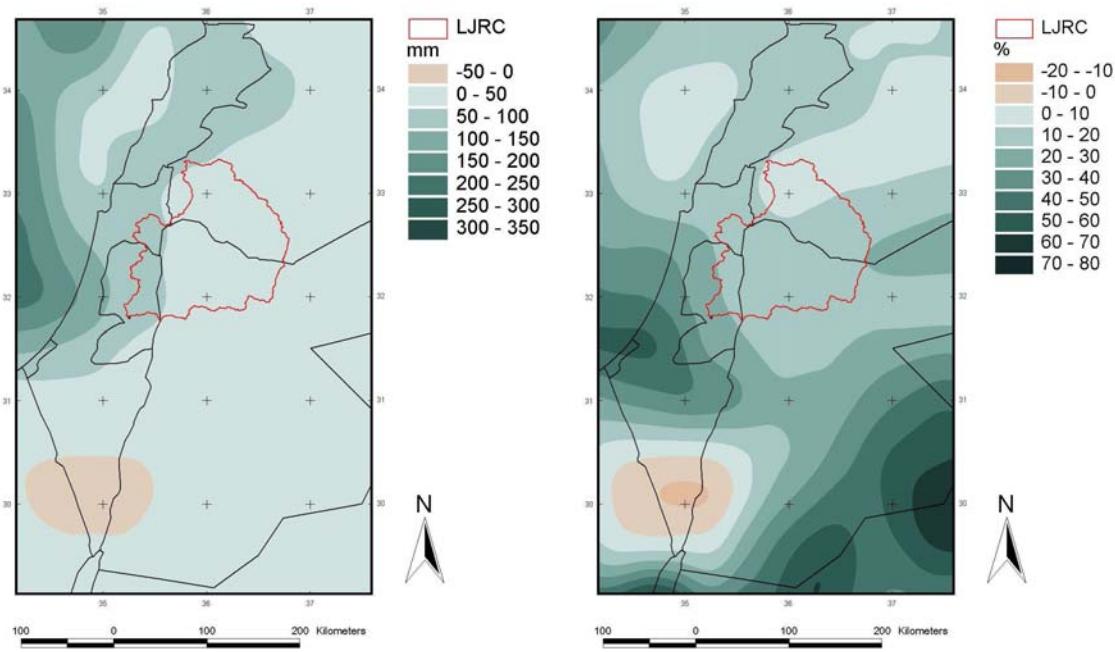


Abb. 7.3: Absolute und relative Änderung des mittleren Jahresniederschlags für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

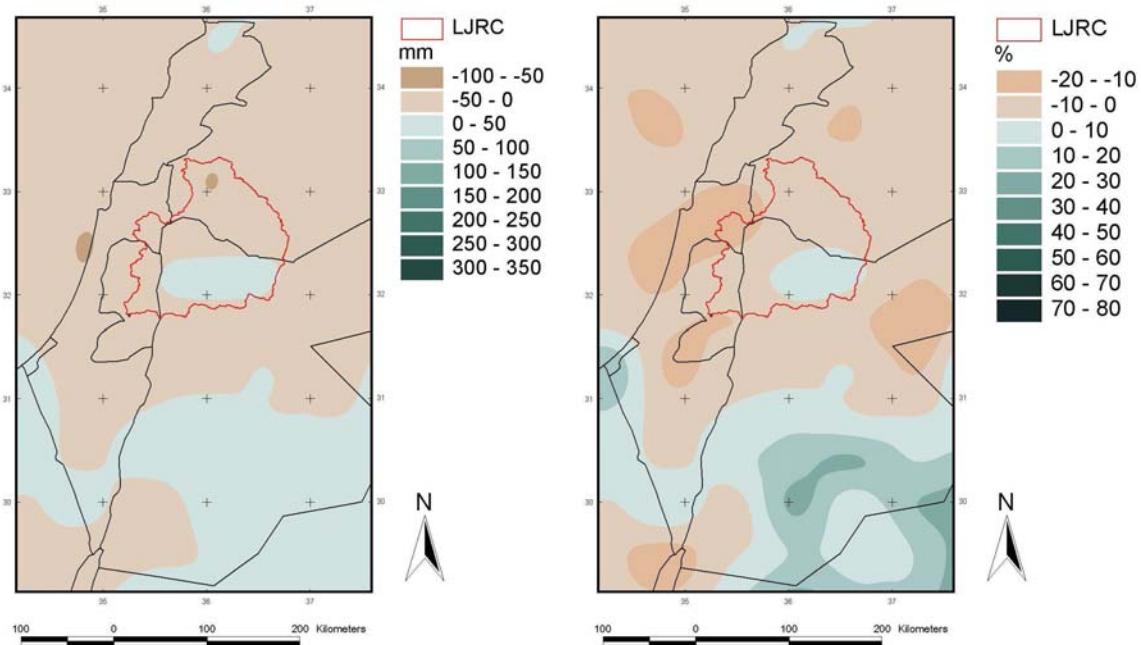


Abb. 7.4: Absolute und relative Änderung des mittleren Jahresniederschlags für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

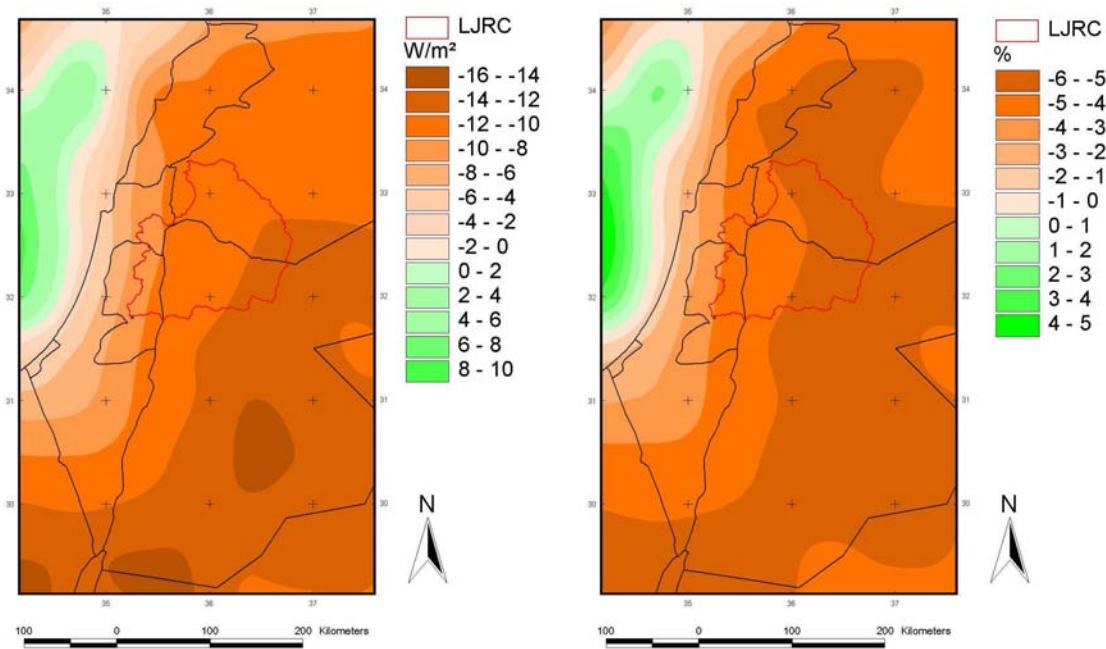


Abb. 7.5: Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Globalstrahlung für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

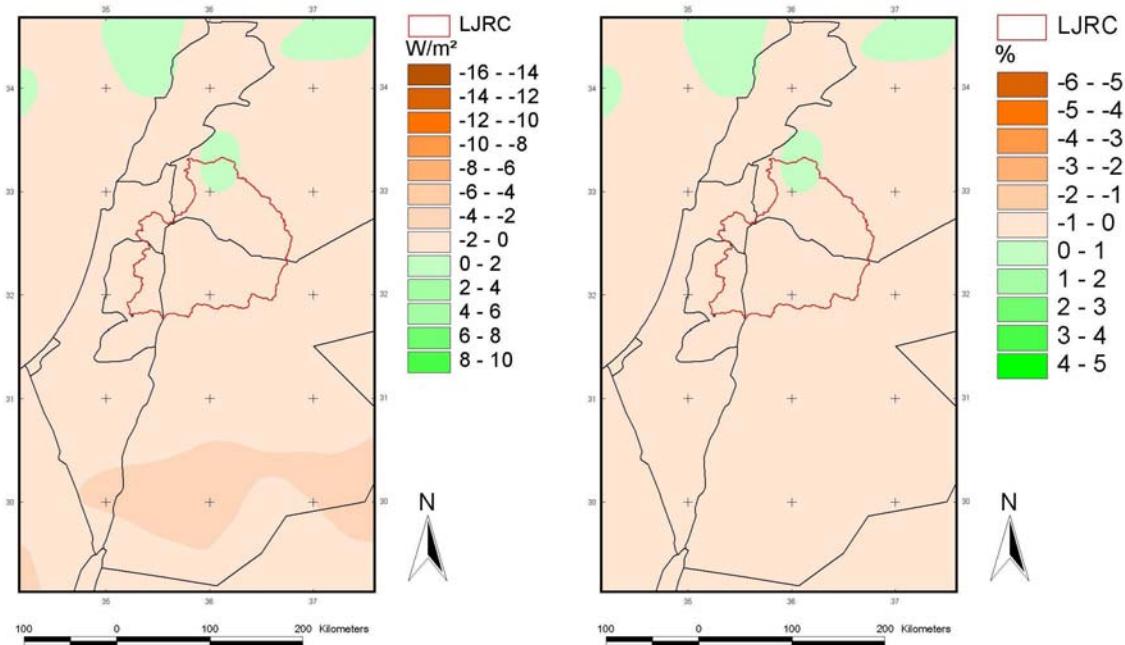


Abb. 7.6: Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Globalstrahlung für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.2.4 Windgeschwindigkeit

Die Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen die Änderung der mittleren, jährlichen Windgeschwindigkeiten für die beiden Modellsimulationen. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt ein relativ uneinheitliches Bild. Über dem Mittelmeer ist ein relativer Rückgang der mittleren Windgeschwindigkeit von bis zu 6 Prozent zu erkennen. Auf der Landfläche gibt es sowohl Bereiche mit leicht zunehmenden, als auch mit leicht abnehmenden Werten. Die Änderungen betragen für den Großteil allerdings nicht mehr als 2 Prozent.

Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation ergibt sich fast für die gesamte Region ein leichter Rückgang von meist unter 0.1 m/s und maximal 0.2 m/s. Ausnahme ist der äußerste Süden, der eine minimale Zunahme bei der mittleren Windgeschwindigkeit zeigt.

7.2.5 Relative Luftfeuchte

Das letzte hier untersuchte Klimaelement ist die relative Luftfeuchte, deren simulierten Änderungen in den Abbildungen 7.9 und 7.10 dargestellt sind. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt absolute Abweichungen zwischen –3 Prozent und 2 Prozent bei der relativen Luftfeuchte für das Zukunftsszenario. Dabei tritt die größte negative Differenz genau in dem Bereich auf, der den größten Anstieg bei der Lufttemperatur zeigt. Die Bereiche mit einem Anstieg bei der relativen Luftfeuchte sind meist diejenigen, die einen relativ geringen Temperaturzuwachs verzeichnen.

Die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation zeigt für fast das gesamte Untersuchungsgebiet eine absolute Differenz von weniger als 1 Prozent. Es lässt sich deshalb keine signifikante Änderung für die mittlere relative Luftfeuchte feststellen.

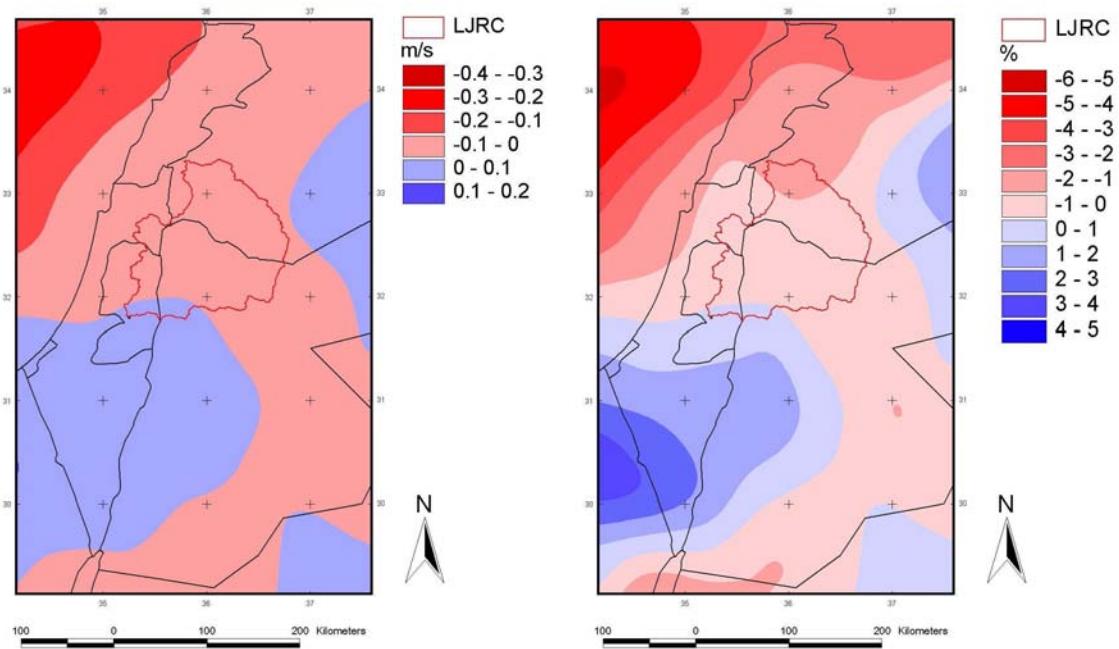


Abb. 7.7: Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

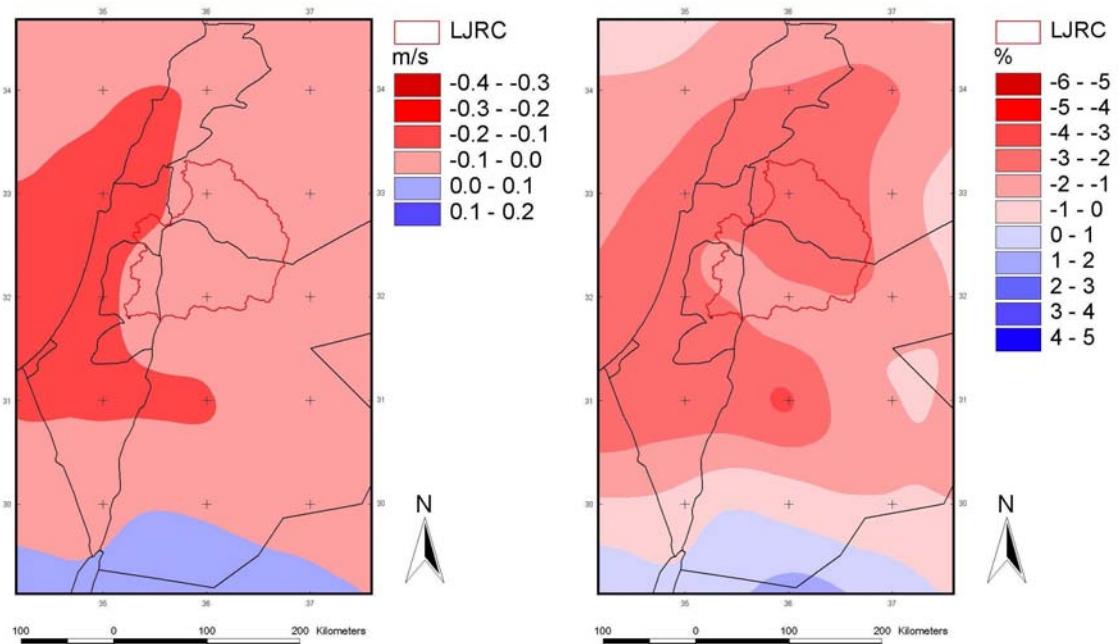


Abb. 7.8: Absolute und relative Änderung der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

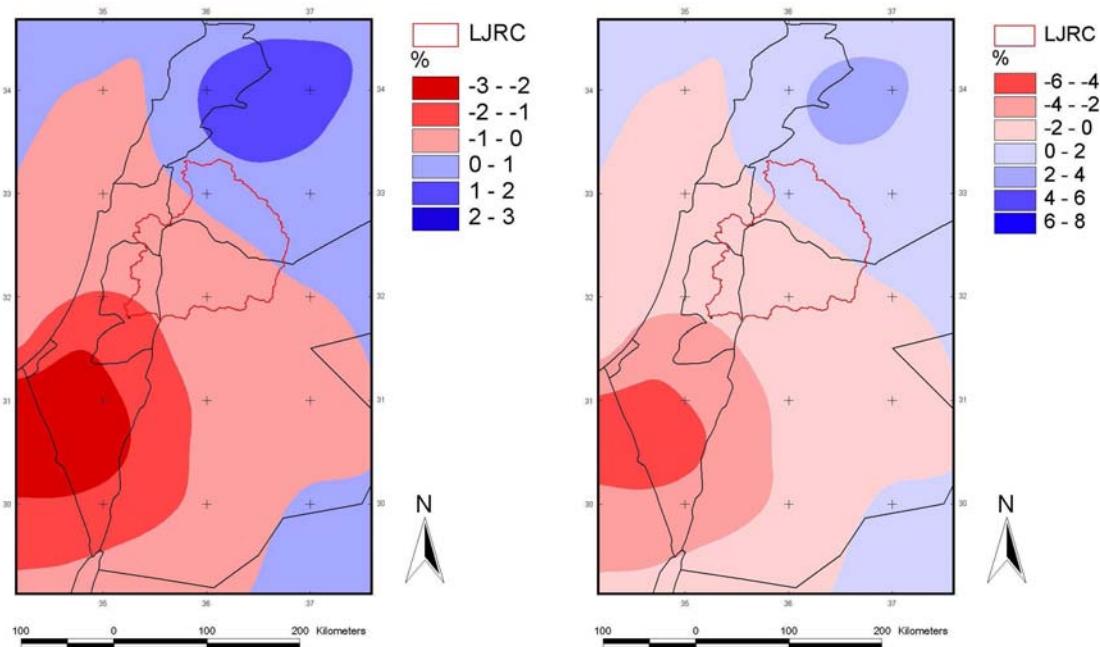


Abb. 7.9: Absolute (links) und relative (rechts) Änderung der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

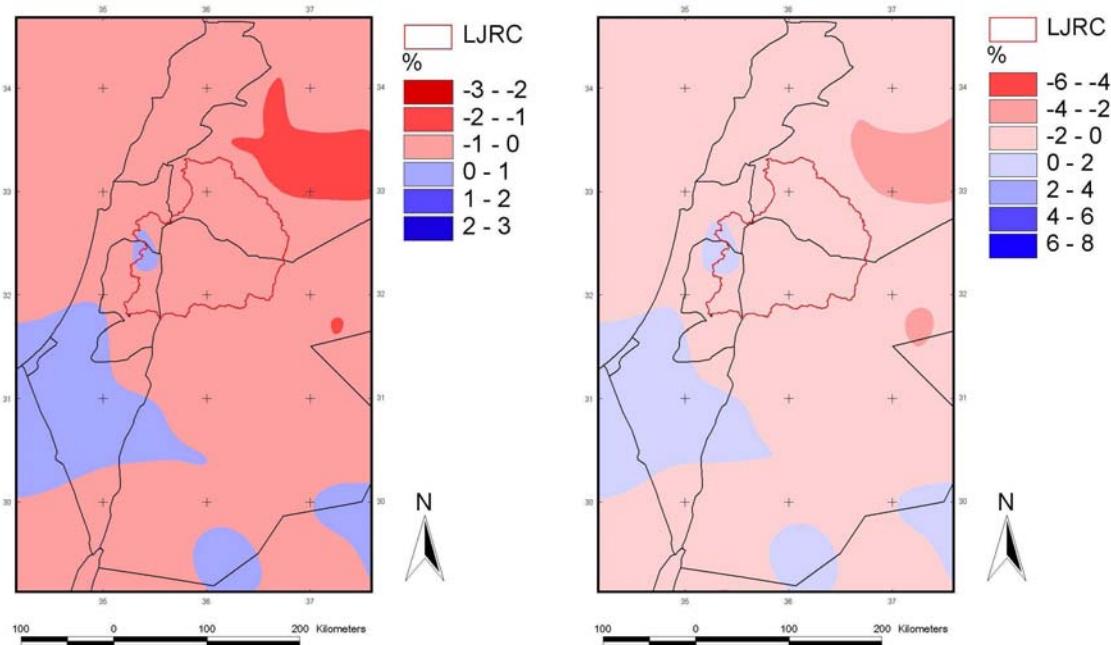


Abb. 7.10: Absolute (links) und relative (rechts) Änderung der mittleren jährlichen relativen Luftfeuchte für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.3 Saisonale Unterschiede

7.3.1 Lufttemperatur

In diesem Abschnitt soll die Temperaturänderung jahreszeitlich differenzierter betrachtet werden. Dazu werden für beide Modellsimulationen die mittleren Lufttemperaturen für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar (DJF) und die Sommermonate Juni, Juli und August (JJA) untersucht.

Die Abbildungen 7.11 und 7.12 zeigen zunächst die Änderungen der Winter- und Sommertemperatur für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation. Für den Winter ergibt sich eine absolute Temperaturerhöhung um 1 °C. Die Sommertemperaturen zeigen einen deutlich höheren Anstieg zwischen 1 °C und 4 °C. Betrachtet man die relativen Änderungen, ergibt sich ein anderes Bild. Hier zeigen die Wintertemperaturen insgesamt die größeren Zuwächse. Auch bei der räumlichen Verteilung zeigen sich saisonale Unterschiede. Im Sommer besitzt der süd-westliche Teil des Untersuchungsgebietes den größten Temperaturanstieg. In östlicher und nördlicher Richtung ist die Tendenz abnehmend. Im Winter drehen sich diese Verhältnisse gerade um.

Für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation sind die Änderungen der Winter- und Sommertemperaturen in Abbildung 7.13 bzw. 7.14 dargestellt. Hier liegt der absolute Temperaturanstieg für beide Jahreszeiten in einem Bereich zwischen 1.2 °C und 2 °C. Auch die räumliche Verteilung der Temperaturänderung ist für Sommer und Winter nahezu identisch. Sie zeigt eine zunehmende Erwärmung mit wachsender Entfernung zum Mittelmeer. Die relative Temperaturänderung zeigt dementsprechend hohe Werte für die Wintermonate und im Sommer nur einen leichten relativen Anstieg um 5 Prozent.

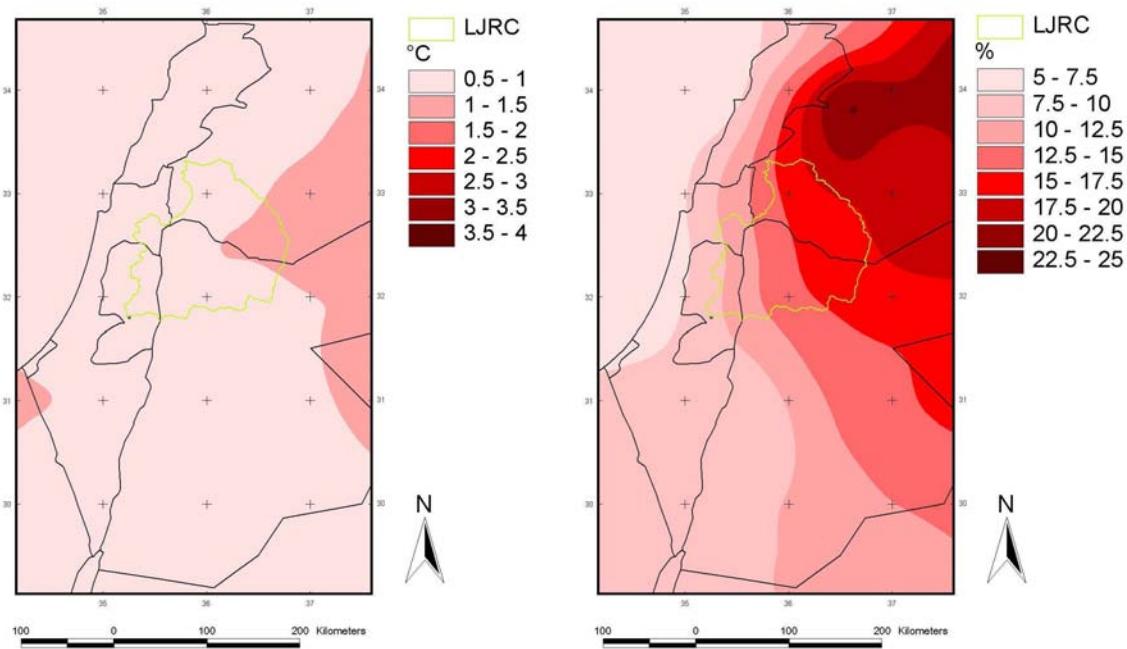


Abb. 7.11: Absolute und relative Änderung der mittleren Wintertemperatur (DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

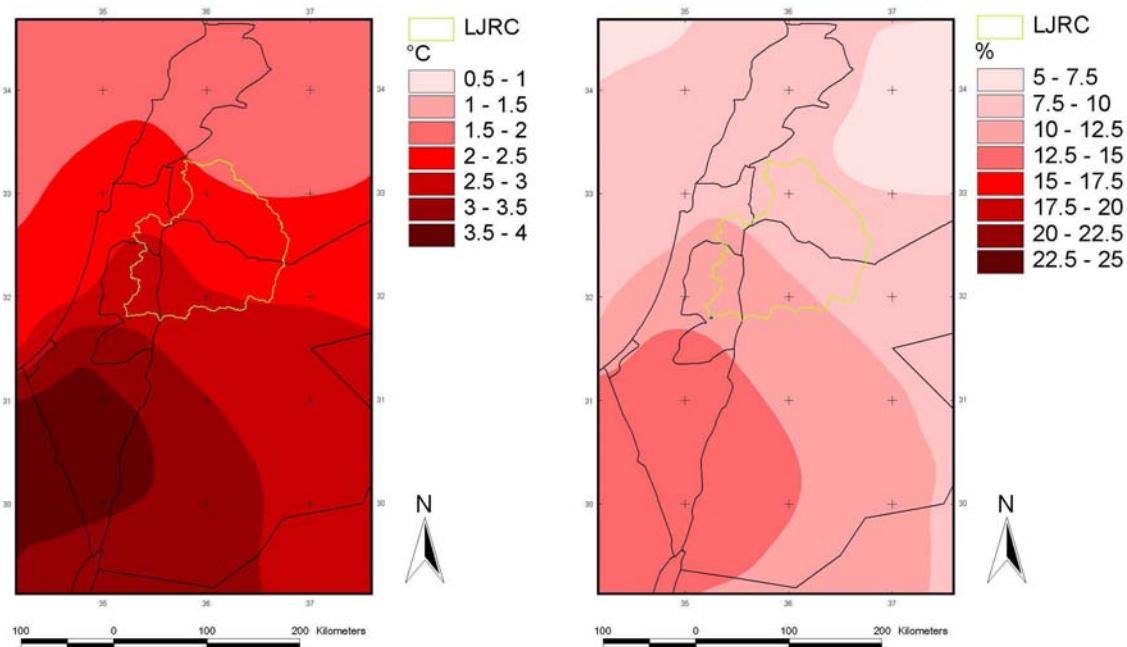


Abb. 7.12: Absolute und relative Änderung der mittleren Sommertemperatur (JJA) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

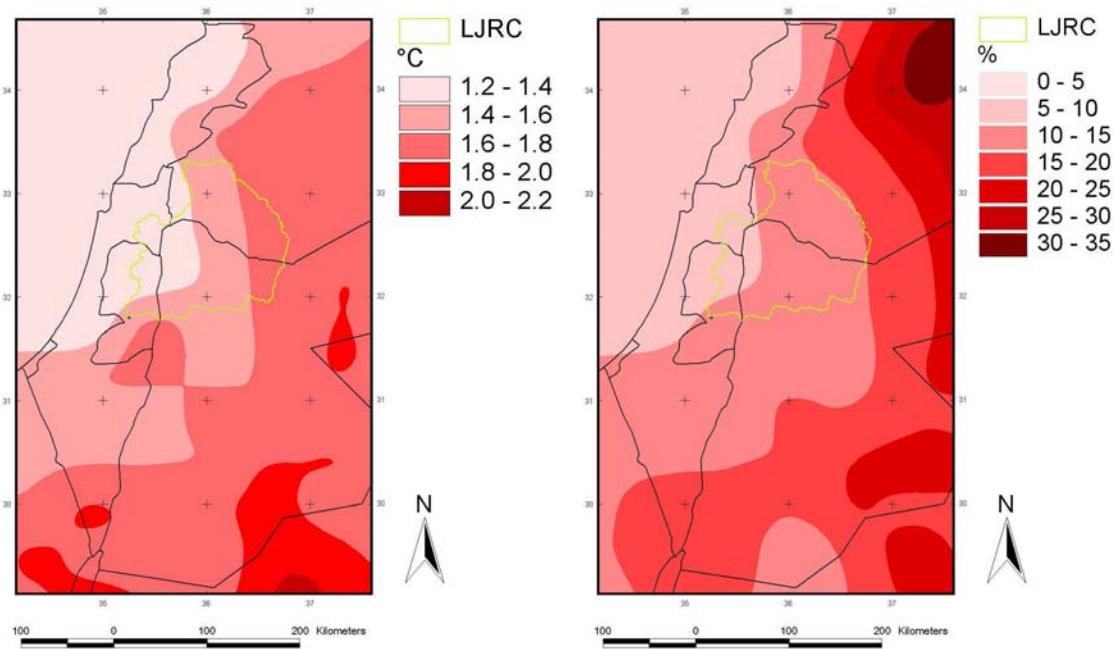


Abb. 7.13: Absolute und relative Änderung der mittleren Wintertemperatur (DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

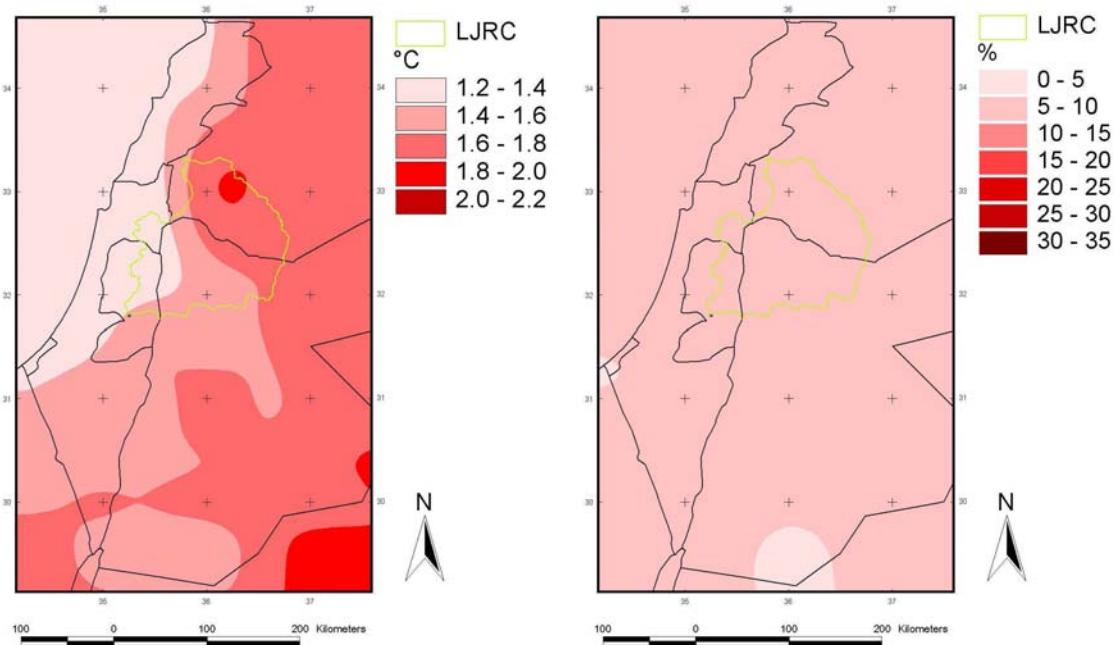


Abb. 7.14: Absolute und relative Änderung der mittleren Sommertemperatur (JJA) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.3.2 Niederschlag

Wie in Kapitel 3 beschrieben, fällt im Untersuchungsgebiet fast der gesamte Jahresniederschlag in den Monaten Oktober bis April, wobei etwa zwei Drittel allein auf die Monate Dezember, Januar und Februar entfallen. In diesem Abschnitt werden die Änderungen für diese drei Wintermonate näher untersucht und mit den Niederschlagsänderungen des Restjahrs, das heißt im wesentlichen die Übergangsmonate März, April, Oktober und November, verglichen.

Die Abbildungen 7.15 und 7.16 zeigen zunächst die Ergebnisse der ECHAM4-MM5/A2 Simulation. Wie beim mittleren Jahresniederschlag ist für große Teile des Untersuchungsgebiets auch ein Anstieg beim Winterniederschlag und beim Niederschlag im restlichen Jahr zu beobachten. Allerdings mit unterschiedlichen Schwerpunkten, wie die Karten zeigen. Im Vergleich zum gesamten Jahresniederschlag steigt der Winterniederschlag für das Gesamtgebiet unterproportional. Der Niederschlag im Restjahr dementsprechend überproportional.

Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation waren beim mittleren Jahresniederschlag nur sehr geringe Zu- bzw. Abnahmen zu beobachten. In Abbildung 7.17 und 7.18 sind nun die Änderungen für den Winterniederschlag bzw. den Niederschlag des Restjahres dargestellt. Dabei zeigt sich beim Winterniederschlag ein deutlicher Rückgang für fast die gesamte Region. Die Differenz beträgt teilweise über 100 mm. Demgegenüber steht ein Anstieg beim Niederschlag im restlichen Jahr. Dieser gleicht das Defizit aus den Wintermonaten in etwa wieder aus. Für Wasserhaushaltsbetrachtungen hat diese Verschiebung aber durchaus Bedeutung, da der Zuwachs in Monaten mit höherem Verdunstungspotential stattfindet.

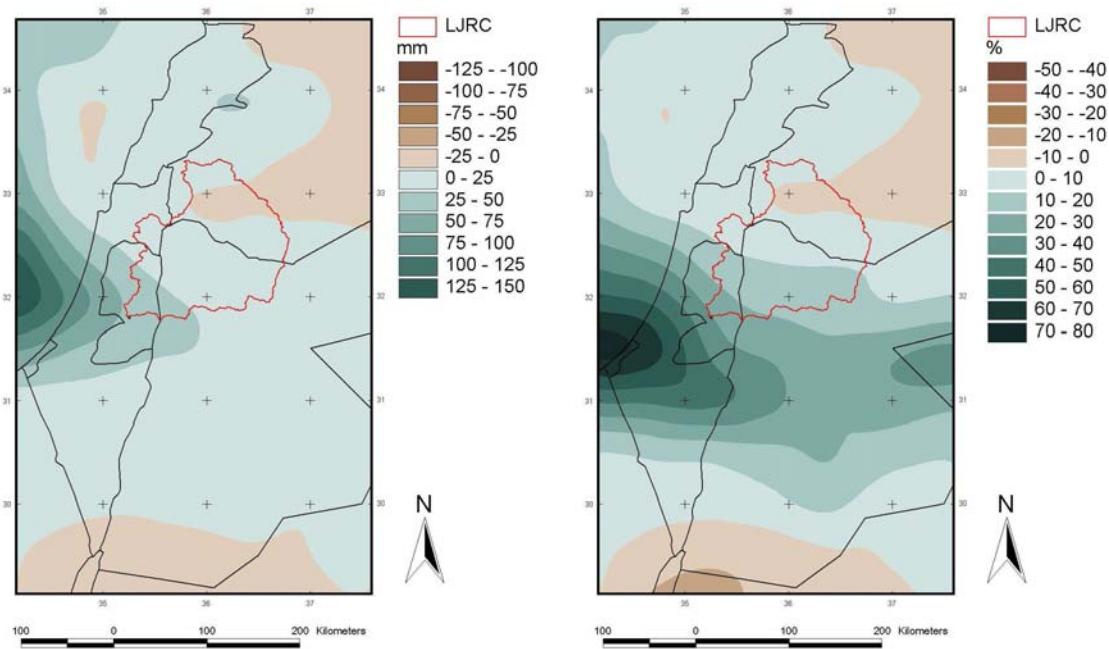


Abb. 7.15: Absolute und relative Änderung des mittleren Winterniederschlags (DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

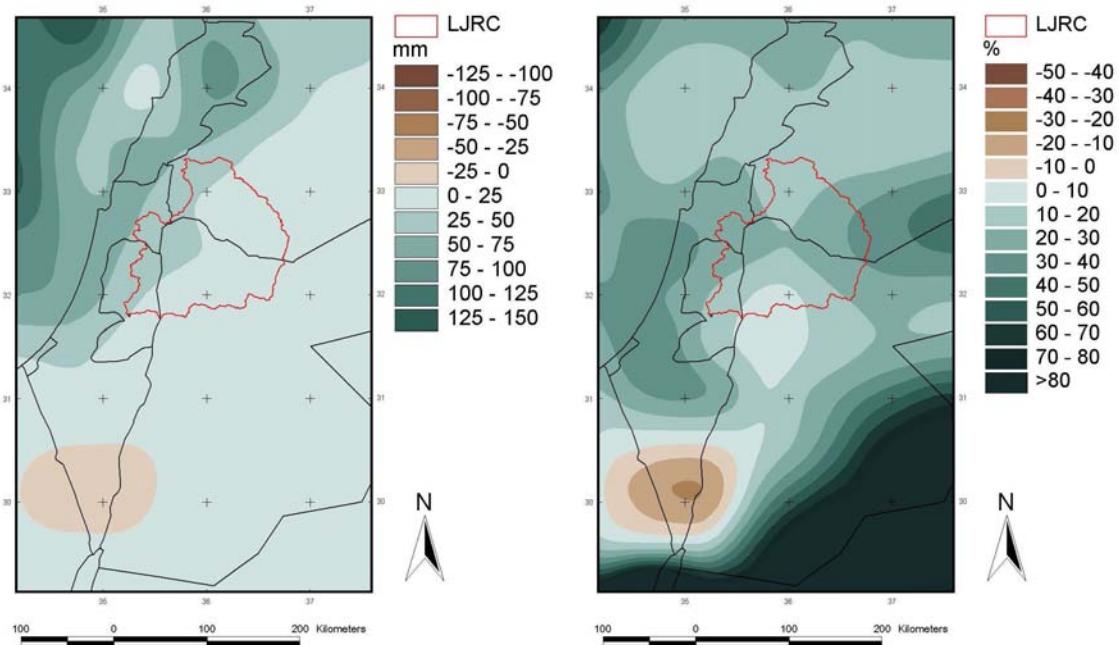


Abb. 7.16: Absolute und relative Änderung des mittleren Niederschlags im Restjahr (Jahr - DJF) für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

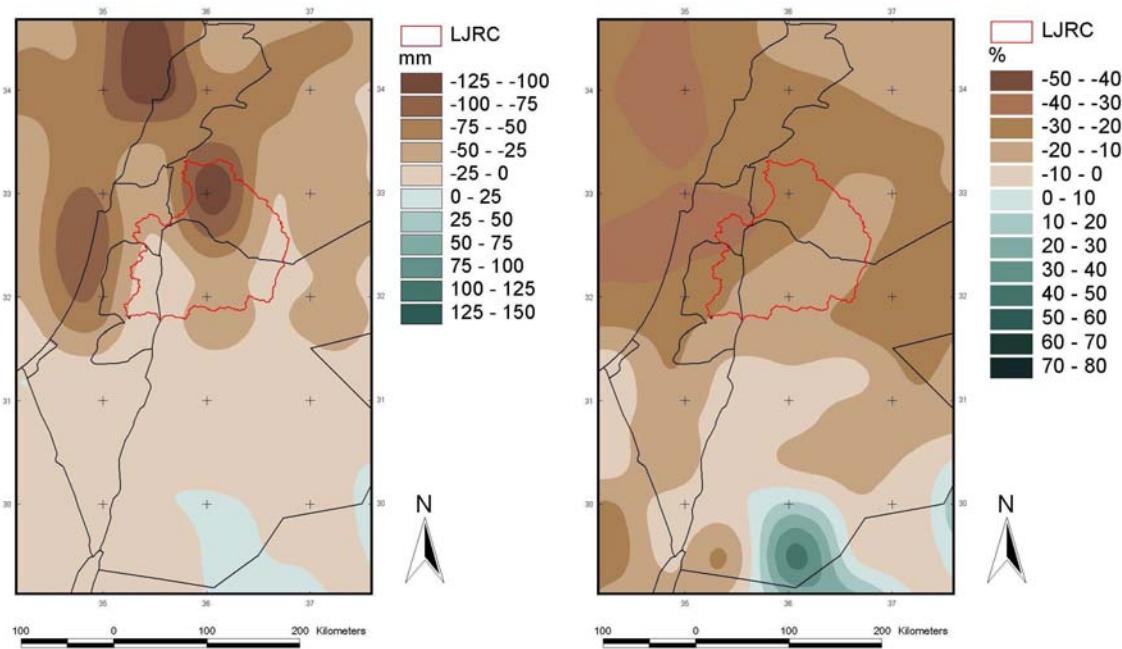


Abb. 7.17: Absolute und relative Änderung des mittleren Winterniederschlags (DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

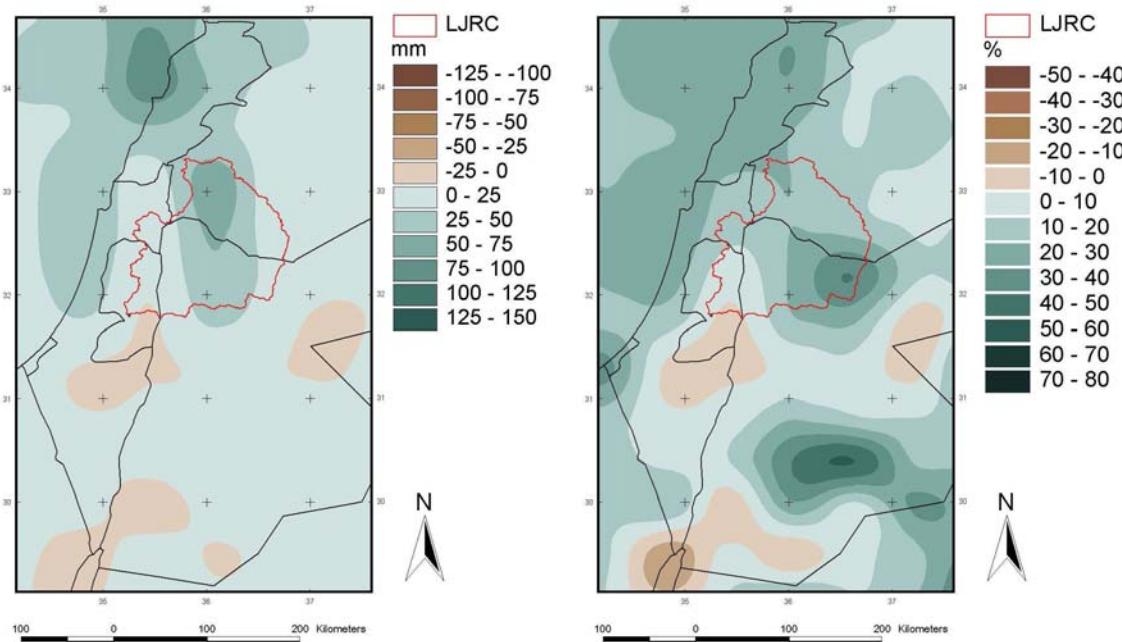


Abb. 7.18: Absolute und relative Änderung des mittleren Niederschlags im Restjahr (Jahr - DJF) für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.4 Niederschlagindizes

7.4.1 SDII

Der SDII (Simple Daily Intensity Index) gibt die mittlere Niederschlagshöhe für Regentage an, wobei ein Regentag hier als Tag mit mindestens 1 mm Niederschlag definiert ist. Der SDII ist somit ein Maß für die Intensität von Niederschlagsereignissen. Karten mit den simulierten SDIIs und auch den anderen in diesem Unterkapitel untersuchten Indizes befinden sich im Anhang, jeweils für beide Modelle und Zeithorizonte.

Für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation ist die Differenz zwischen Zukunfts- und Referenzperiode in Abbildung 7.19 dargestellt. Für das Gesamtgebiet lässt sich kein eindeutiger Trend ausmachen. Weite Teile der Region, wie der Libanon, fast ganz Jordanien und der syrische Abschnitt zeigen einen leichten Intensitätsrückgang von unter einem Millimeter pro Regentag. Ein beachtlicher Anstieg zeigt sich dagegen entlang bzw. vor der Küste Israels. Hier steigt der SDII für das Zukunftsszenario zwischen 1 mm und 4 mm pro Regentag.

Auch bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation ergibt sich insgesamt ein eher uneinheitliches Bild, wie Abbildung 7.20 zeigt. Die Änderung liegt für fast das gesamte Gebiet bei unter einem Millimeter pro Regentag. Wie in der Karte zu sehen ist, gibt es dabei Regionen mit leicht zunehmenden und Gebiete mit leicht abnehmenden Werten. Dabei zeigt sich ein positiver Trend vor allem in dem Bereich, in dem auch der Jahresniederschlag leicht zulegt.

7.4.2 R10

Der R10-Index gibt die Anzahl der Tage pro Jahr mit mindesten 10 mm Niederschlag an. Er beschreibt also die Anzahl der Tage im Jahr mit starken Regenfällen. Die Abbildungen 7.21 und 7.22 zeigen die prognostizierten Änderungen für beide Modellsimulationen.

Wie beim gesamten Jahresniederschlag zeigt sich für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation auch beim R10-Index ein positiver Trend für den größten Teil des Gebietes. Ein Schwerpunkt ist dabei wiederum das Mittelmeer und der Küstenbereich Israels. Hier werden 2 bis 4 Tage mit starken Regenfällen mehr pro Jahr vorausgesagt. Allerdings gibt es auch Gebiete in denen die Anzahl der Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag sinkt, obwohl beim Jahresniederschlag ein positiver Trend besteht.

Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation folgt die Änderung des R10-Index in etwa der, des mittleren Jahresniederschlags. Dort wo der Jahresniederschlag leicht ab- oder zunimmt, verringert bzw. vergrößert sich auch der R10-Index leicht.

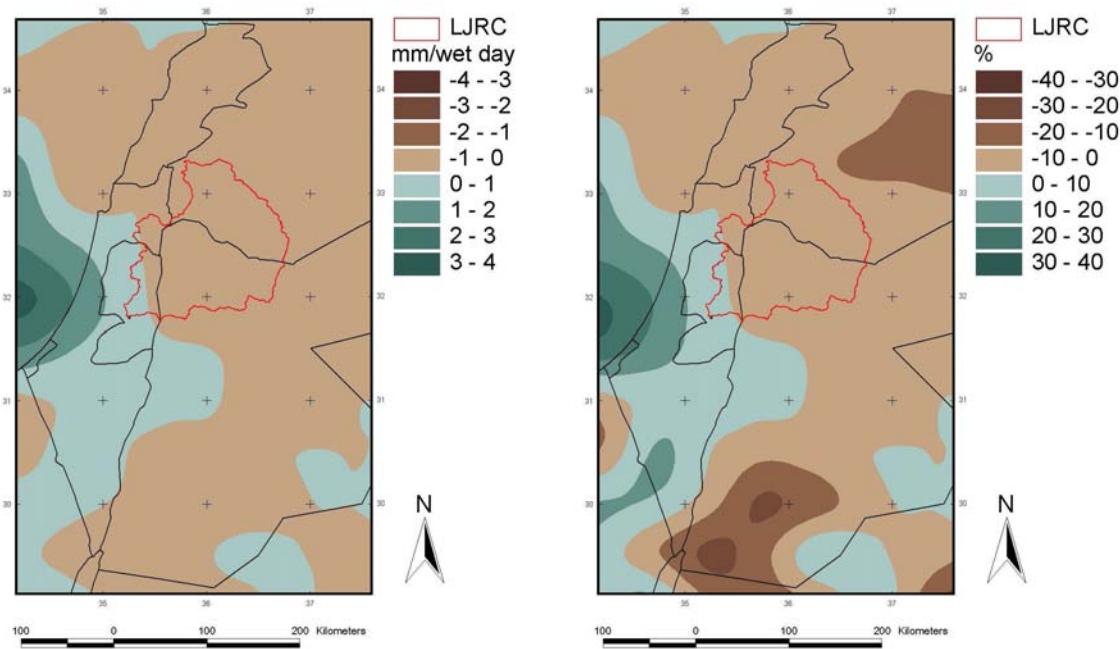


Abb. 7.19: Absolute und relative Änderung des SDII für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

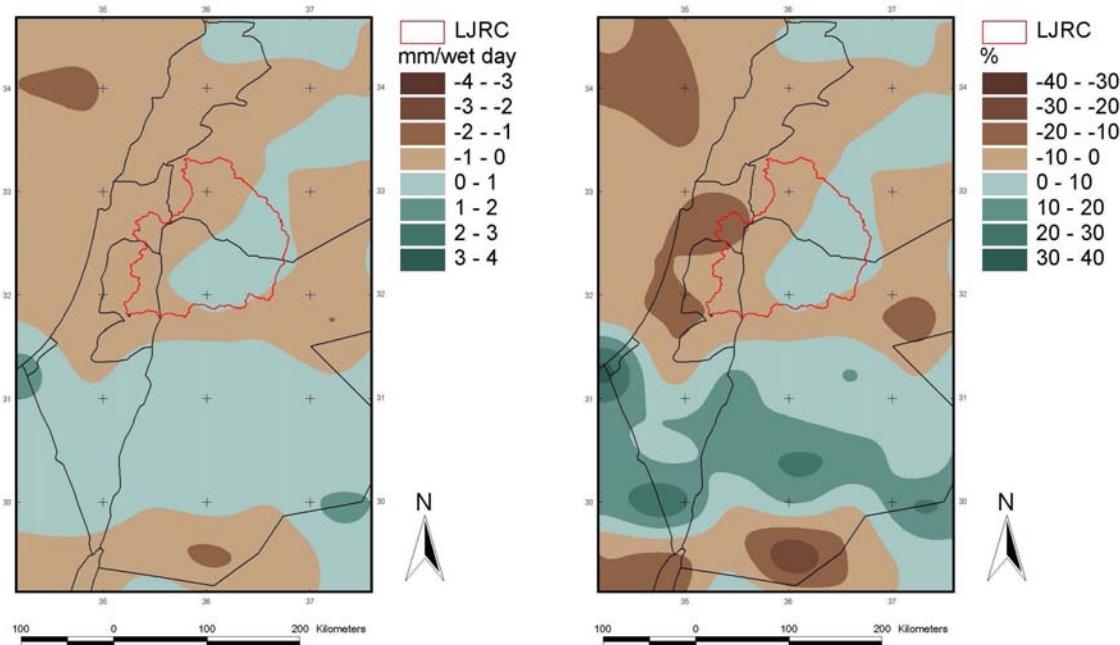


Abb. 7.20: Absolute und relative Änderung des SDII für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

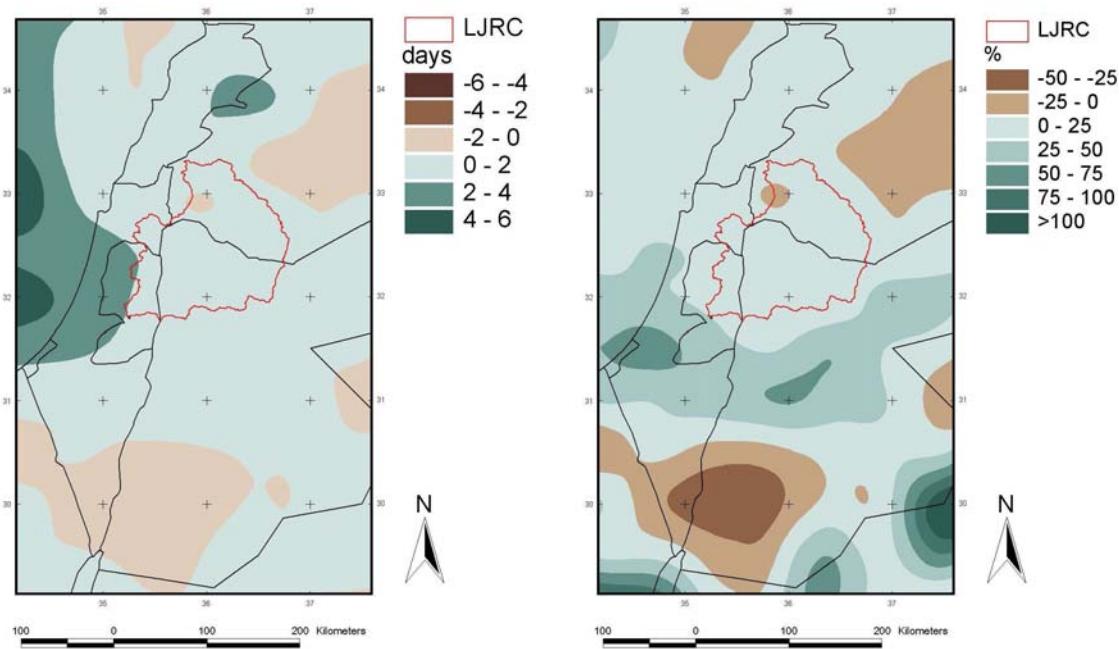


Abb. 7.21: Absolute und relative Änderung des R10-Index für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

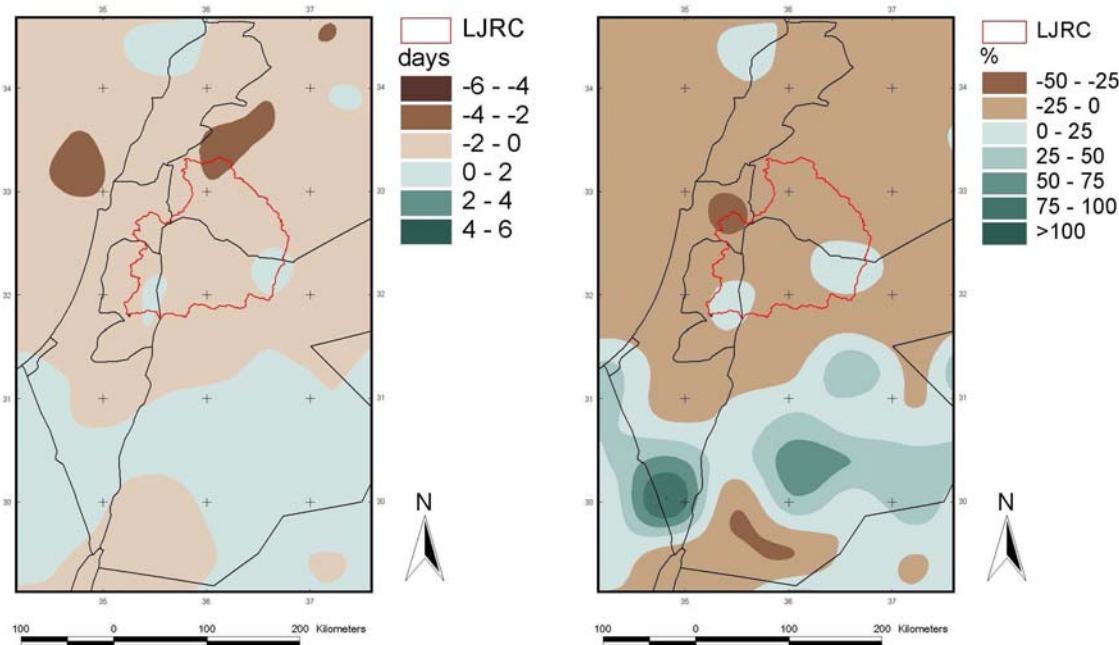


Abb. 7.22: Absolute und relative Änderung des R10-Index für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.4.3 Maximaler Tagesniederschlag

Als letzter Punkt soll noch die Veränderung beim maximalen Tagesniederschlag untersucht werden. Das Maximum bezieht sich auf den 30 Jahre umfassenden Zeitraum der Referenzperiode (1961-90) bzw. des Zukunftshorizonts (2021-50). Es gibt somit einen Hinweis auf das Änderungsverhalten von außergewöhnlichen Extremereignissen. Die Abbildungen 7.23 und 7.24 zeigen die Ergebnisse für die beiden Modellsimulationen.

Das ECHAM4-MM5/A2 Modell simuliert die höchsten Tagesniederschläge über dem Mittelmeer und im Küstengebiet. Betrachtet man die Änderungen, zeigen sich sowohl Bereiche mit zunehmendem, als auch mit abnehmendem Tagesmaximum. Ein Schwerpunkt für einen positiven Trend sind die Küstengebiete. Hier kann das Tagesmaximum über 100 mm bzw. 100 Prozent zulegen.

Auch die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation liefert differenzierte Trends für den maximalen Tagesniederschlag. Die größten Zuwächse zeigen hier die ariden bzw. semi-ariden Bereiche im Süden des Untersuchungsgebietes. Dies ist auch generell der Bereich für den das Modell die höchsten Tagesniederschläge anzeigt, wie die Karten im Anhang zeigen. Auch bei diesem Modell sind Steigerungen über 100 mm möglich.

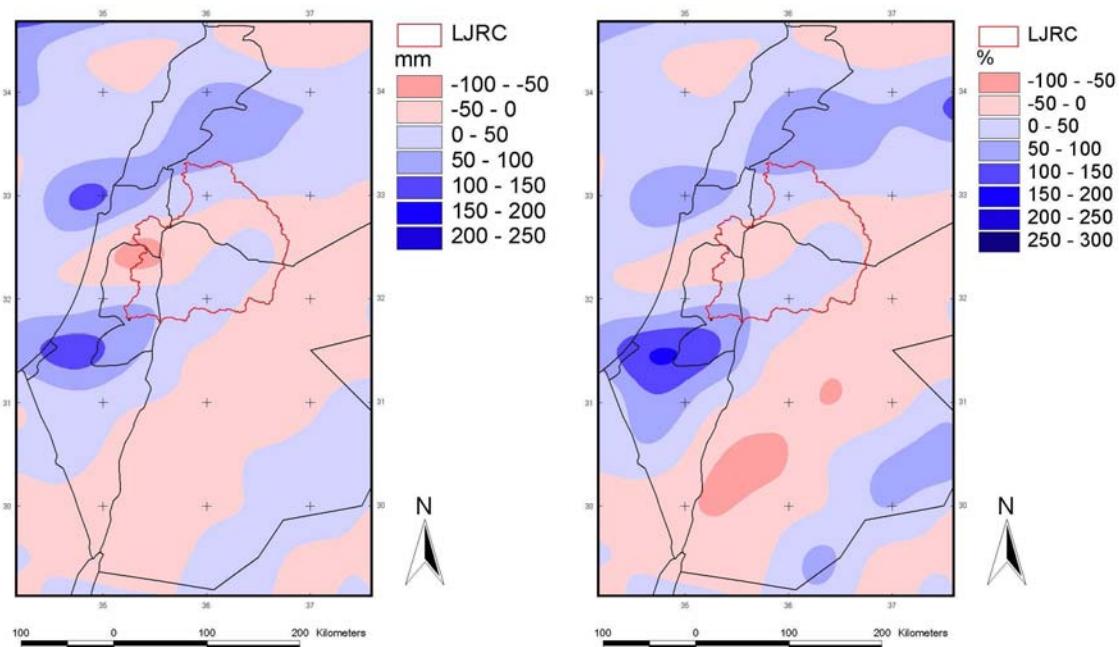


Abb. 7.23: Absolute und relative Änderung des maximalen Tagesniederschlags für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation (2021-50 minus 1961-90)

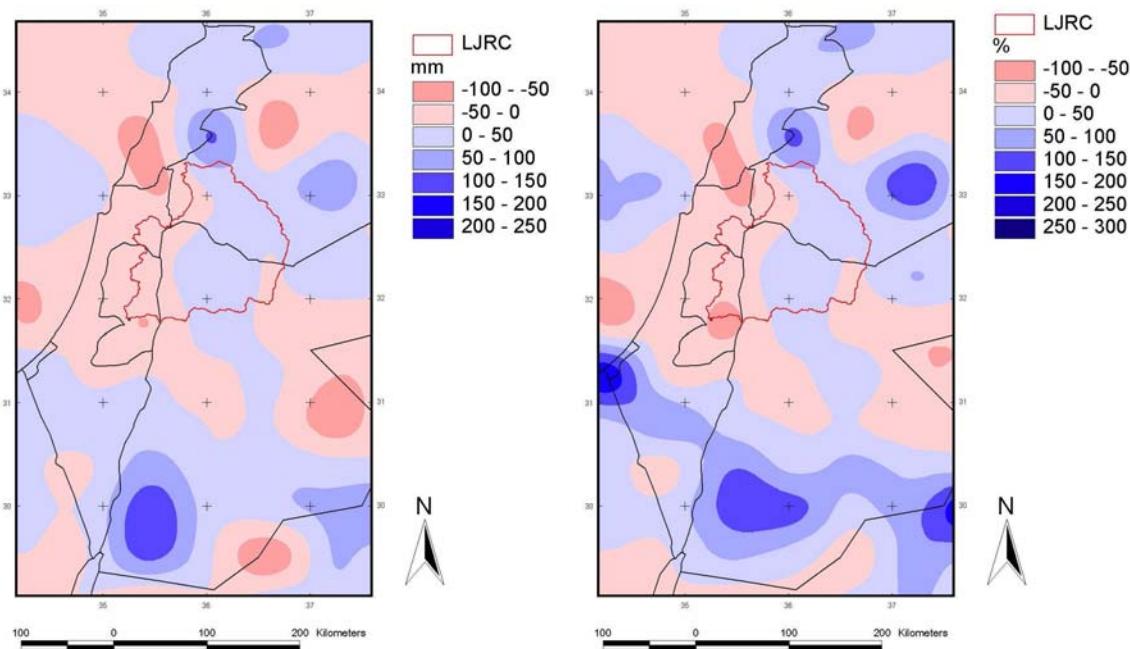


Abb. 7.24: Absolute und relative Änderung des maximalen Tagesniederschlags für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation (2021-50 minus 1961-90)

7.5 Fazit

Allgemein lässt sich zunächst feststellen, dass teilweise deutliche Unterschiede zwischen den beiden Modellsimulationen bestehen. Dies gilt für das Trendverhalten, die Größenordnung der Änderungen und nicht zuletzt für die räumlichen Muster. Besonders deutlich wird dies beim Niederschlag. Zwar liegen den Simulationen unterschiedliche Emissionsszenarien zugrunde, allerdings unterscheiden diese sich für den untersuchten Zeitraum kaum. Generell kann man die Differenzen als Hinweis auf die relativ hohen Unsicherheiten werten, die in den Modellsimulationen liegen.

Für die mittlere Jahrestemperatur zeigen die beiden Modelle noch ein relativ einheitliches Bild, nämlich einen deutlichen Temperaturanstieg im Untersuchungsgebiet zwischen 1.1 °C und 2.3 °C. Unterschiede zeigen sich allerdings bei der saisonalen Betrachtung. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation ist besonders in den Sommermonaten ein hoher Anstieg der Lufttemperatur zu erkennen. Der Zuwachs im Winter fällt dagegen moderat aus. Für die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation ist die Erwärmung im Winter und Sommer etwa gleich groß.

Weitaus größere Differenzen zwischen den Modellen treten beim Niederschlag auf. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation prognostiziert einen signifikanten Anstieg des mittleren Jahresniederschlags im Untersuchungsgebiet. Dieser kann über der Landfläche bis zu 100 mm betragen. Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation ist vor allem der starke Niederschlagsrückgang in den Wintermonaten auffällig. Da der Niederschlag im Restjahr einen positiven Trend zeigt, gibt es in der Jahresbilanz allerdings nur eine sehr geringe, mehrheitlich negative Veränderung. Bei den Niederschlagsindizes, die Hinweise für das Verhalten von Extremereignissen geben, lassen sich für das Gesamtgebiet keine eindeutigen Trends feststellen. Es gibt aber für beide Modelle Regionen, für die eine Zunahme in Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen simuliert wird. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation ist das vor allem die israelische Mittelmeerküste und Teile Zentralisraels. Die ECHAM5-RegCM3/A1B zeigt eine Zunahme von Extremereignisse vor allem im ariden bzw. semi-ariden Süden des Untersuchungsgebiets.

Bei den restlichen untersuchten Klimaelementen zeigen sich mehrheitlich nur sehr geringe Änderungen und meist keine eindeutigen Trends. Ausnahme ist der Rückgang der Globalstrahlung für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation um etwa 5 Prozent.

8. Ergebnisse für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan

8.1 Übersicht

Nach der Darstellung der simulierten Klimaänderungen in der Gesamtregion, soll im folgenden das Einzugsgebiet des Unteren Jordans detaillierter betrachtet werden. Die Begrenzung des Einzugsgebiets, also der Zustrombereich des Jordans vom Ausfluss am See Genezareth bis zum Toten Meer, ist in den Karten in Kapitel 7 verzeichnet. In diesem Abschnitt sollen zunächst die Flächenmittel für das Einzugsgebiet betrachtet werden, die aus den Modelldaten berechnet wurden. Die Tabellen 8.1 und 8.2 zeigen eine Übersicht aller untersuchten Klimaparameter für beide Modellsimulationen.

Für die meisten Klimagrößen im Einzugsgebiet gelten dieselben Grundtendenzen wie für das in Kapitel 7 beschriebene Gesamtgebiet. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1.7 °C. Auch der Jahresniederschlag zeigt einen positiven Trend, mit ca. 40 mm Zuwachs. Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation fällt der Temperaturanstieg mit 1.4 °C etwas moderater aus. Beim Niederschlag zeigt sich bei diesem Modell das schon in Kapitel 7 angesprochene Verhalten. Ein deutlicher Rückgang in den Wintermonaten steht einem Anstieg im Restjahr gegenüber. Die Jahresbilanz fällt mit ca. 15 mm Niederschlagsverlust leicht negativ aus. Für die Niederschlagsindizes zeigen sich für beide Modelle keine eindeutigen Tendenzen. Bei der mittleren Niederschlagsintensität zeigt sich jeweils ein leichter Rückgang, wohingegen die maximalen Tagesniederschläge für die Zukunftsperiode etwas höher ausfallen.

Tab. 8.1: Simulierte Klimaparameter und Änderungen mit ECHAM4-MM5/A2 für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan

Klimaparameter	1961-90	2021-2050	Änderung	Änderung (%)
Lufttemperatur (°C)	16.0	17.7	1.7	10.8
Niederschlag (mm)	264.6	301.9	37.3	14.1
Globalstrahlung (W/m ²)	226.0	215.0	-11.0	-4.9
Windgeschw. (m/s)	3.2	3.2	0.0	-0.7
Rel. Luftfeuchte (%)	58.6	58.4	-0.2	-0.3
Temp. DJF (°C)	6.9	7.9	1.0	13.9
Temp. JJA (°C)	24.7	27.1	2.4	9.6
Nied. DJF (mm)	138.2	150.6	12.5	9.0
Nied. Restjahr (mm)	126.4	151.2	24.8	19.6
SDII (mm/wet days)	7.5	7.3	-0.2	-3.3
R10 (days)	7.8	8.7	0.9	11.4
Max. Tagesnied. (mm)	75.6	79.6	4.0	5.3

Tab. 8.2: Simulierte Klimaparameter und Änderungen mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan

Klimaparameter	1961-90	2021-2050	Änderung	Änderung (%)
Lufttemperatur (°C)	19.6	21.0	1.4	7.1
Niederschlag (mm)	376.0	361.8	-14.2	-3.8
Globalstrahlung (W/m ²)	263.7	262.8	-0.9	-0.3
Windgeschw. (m/s)	3.5	3.5	-0.1	-2.1
Rel. Luftfeuchte (%)	61.0	60.6	-0.4	-0.6
Temp. DJF (°C)	12.3	13.8	1.5	12.1
Temp. JJA (°C)	26.1	27.7	1.6	6.0
Nied. DJF (mm)	215.4	170.4	-45.0	-20.9
Nied. Restjahr (mm)	160.6	191.4	30.8	19.2
SDII (mm/wet days)	7.2	7.2	-0.1	-0.9
R10 (days)	10.9	10.3	-0.7	-6.2
Max. Tagesnied. (mm)	79.2	82.1	2.9	3.7

8.2 Jahresgänge

Ergänzend zu den in Abschnitt 8.1 dargestellten Werten, soll in diesem Unterkapitel der Jahresgang von Lufttemperatur und Niederschlag näher betrachtet werden (Diagramme mit den Jahresgängen der restlichen Klimagrößen befinden sich im Anhang). Dazu werden die über das Einzugsgebiet flächengemittelten Monatsmittel für Referenzperiode (1961-90) und Zukunftshorizont (2021-50) miteinander verglichen.

Die Abbildungen 8.1 und 8.2 zeigen die Jahresgänge der Lufttemperatur für beide Modellsimulationen. Die ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt im Sommer den größten Temperaturanstieg. Bei der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation ist der Zuwachs das ganze Jahr über relativ gleichmäßig. Ausnahme ist der November mit nur 0.4 °C Erwärmung.

Die Jahresgänge für den Niederschlag sind in Abbildung 8.3 und 8.4 dargestellt. Der simulierte Anstieg beim Jahresniederschlag des ECHAM4-MM5/A2 Modells verteilt sich auf das ganze Jahr. Ein Monat mit Niederschlagsrückgang ist der Januar. Das Diagramm der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation zeigt die starken Verluste für die Zukunftsperiode in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar. Das restliche Jahr und besonders die Herbstmonate zeigen mehrheitlich eine positive Bilanz.

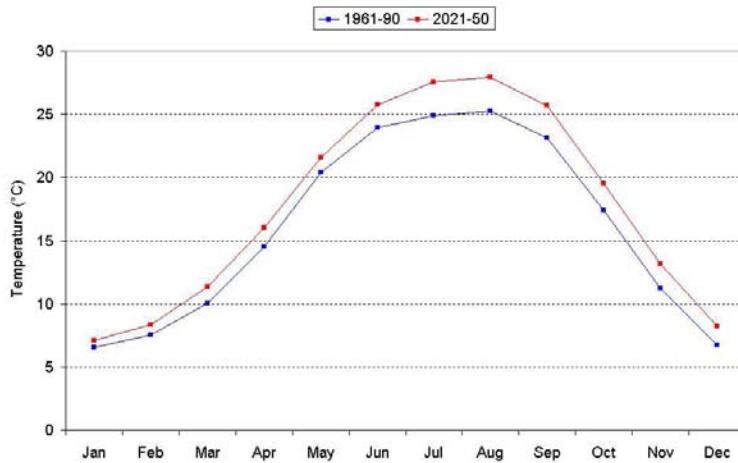


Abb. 8.1: Simulierter Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet

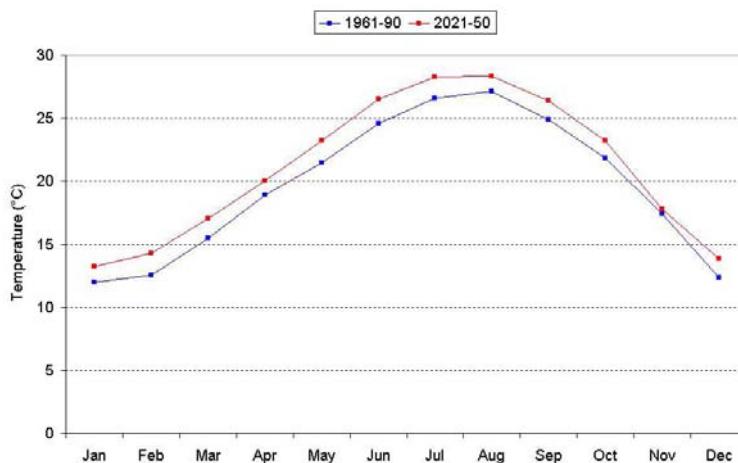


Abb. 8.2: Simulierter Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet

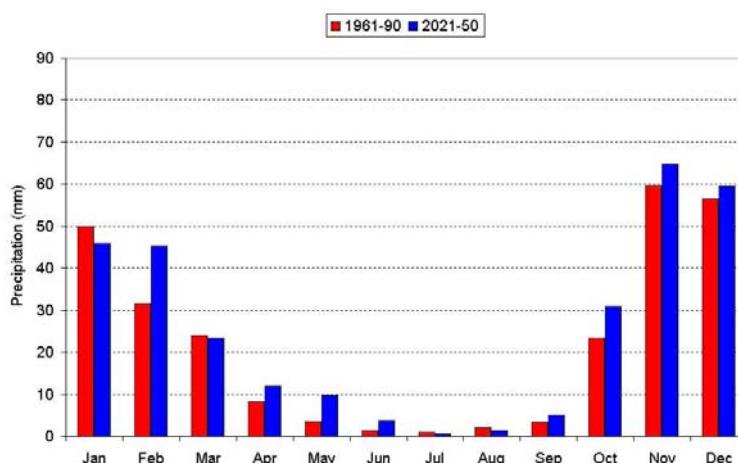


Abb. 8.3: Simulierter Jahresgang der mittleren Monatsniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet

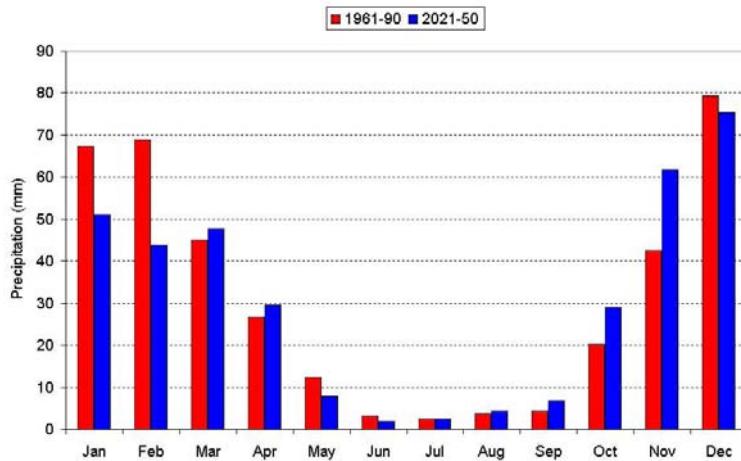


Abb. 8.4: Simulierter Jahresgang der mittleren Monatsniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet

8.3 Häufigkeitsverteilungen

Als dritter Punkt in diesem Kapitel sollen noch Häufigkeitsverteilungen für Lufttemperatur und Niederschlag untersucht werden. Dabei werden beispielhaft die Zeitreihen einer Zelle für jedes Modell betrachtet. Die ausgesuchten Modellzellen decken das Gebiet um die Messstation Irbid ab (siehe Kapitel 6) und nehmen somit eine zentrale Lage im Unteren Jordaneinzugsgebiet ein. Zur Erstellung der Häufigkeitsverteilungen wurden Klassen gebildet. Als Klassenbreite wurde 1 °C bei der Temperatur und 5 mm beim Niederschlag gewählt. Die Häufigkeitsverteilungen geben an, wie oft die Tageswerte aus den 30 jährigen Referenz- und Zukunftszeitreihen in den jeweiligen Klassen auftreten.

Die Abbildungen 8.5 (ECHAM4-MM5/A2) und 8.6 (ECHAM5-RegCM3/A1B) zeigen zunächst die Häufigkeitsverteilungen für die Lufttemperatur. Für beide Modelle zeigt sich eine Verteilung mit zwei Maxima. Für die Zukunftszeitreihen verschiebt sich die Verteilung für beide Modelle in Richtung der höheren Werte. Dabei bleibt die Form der Verteilungen weitgehend erhalten. Allerdings ist ein überproportionaler Zuwachs bei den hohen Werten ersichtlich. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation verdoppelt sich die Anzahl der Tage mit einer mittleren Lufttemperatur von mindestens 25 °C fast. Die Anzahl der Tage mit mehr als 30 °C vervierfacht sich sogar. Für die ECHAM5-RegCM3/A1B ist dieser Effekt nicht ganz so stark.

Bei den Niederschlagsverteilungen muss zunächst erwähnt werden, dass die beiden Modelle die untersuchte Zelle sehr unterschiedlich simulieren. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Häufigkeitsverteilungen stark. Beim Vergleich der jeweiligen Referenz- und Zukunftszeitreihen lassen sich nur schwer eindeutige Trends ausmachen. Bei der ECHAM4-MM5/A2 Simulation zeigt sich in den meisten Intensitätsklassen ein leichter Zuwachs für die Zukunftszeitreihe. Die ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation zeigt keine klare Tendenz.

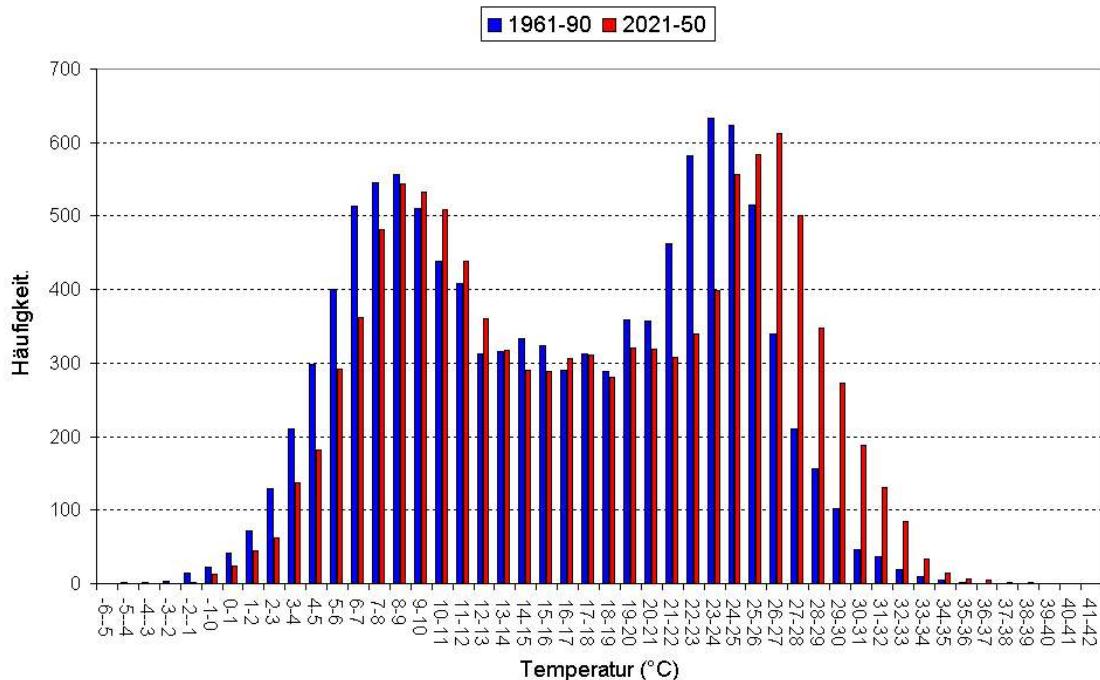


Abb. 8.5: Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2

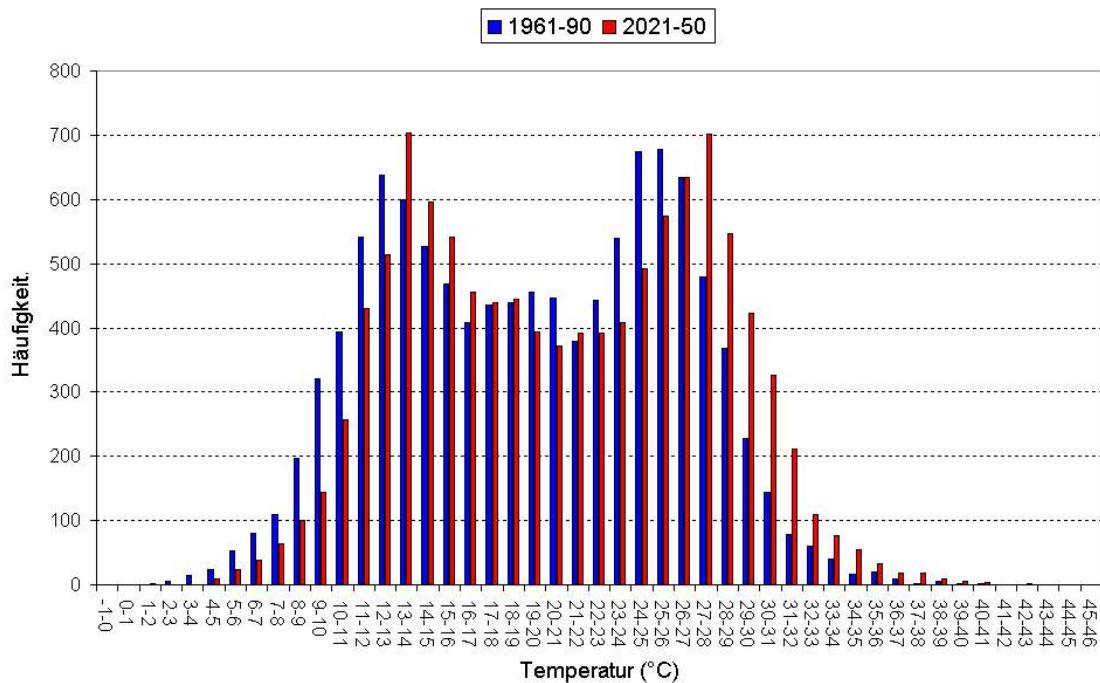


Abb. 8.6: Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B

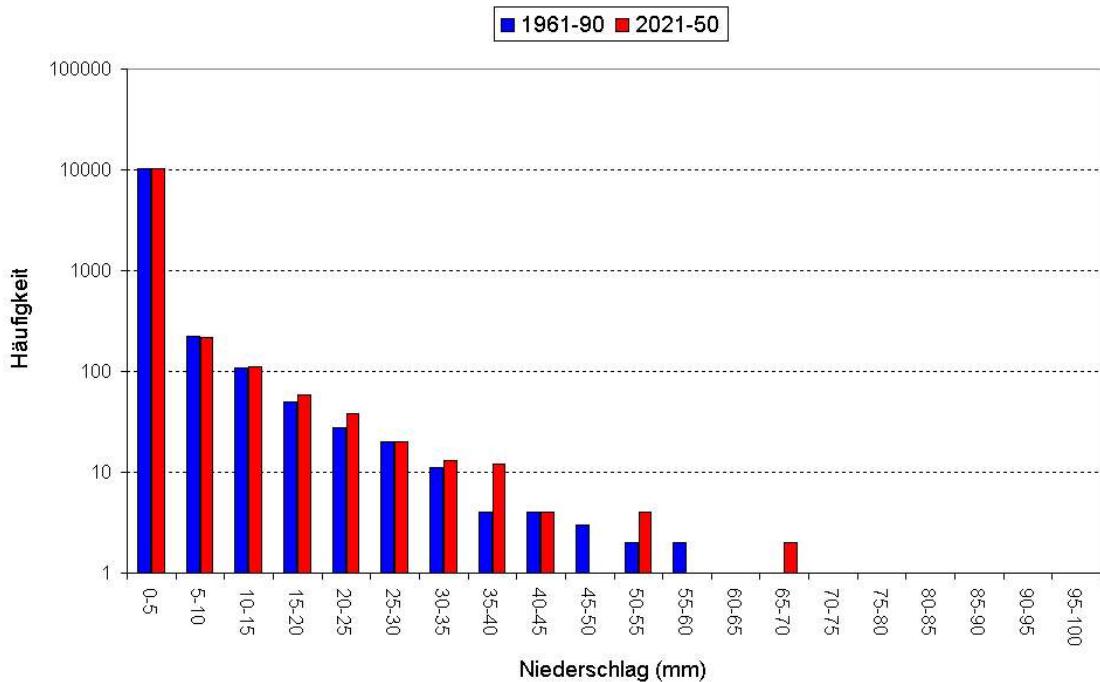


Abb. 8.7: Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2

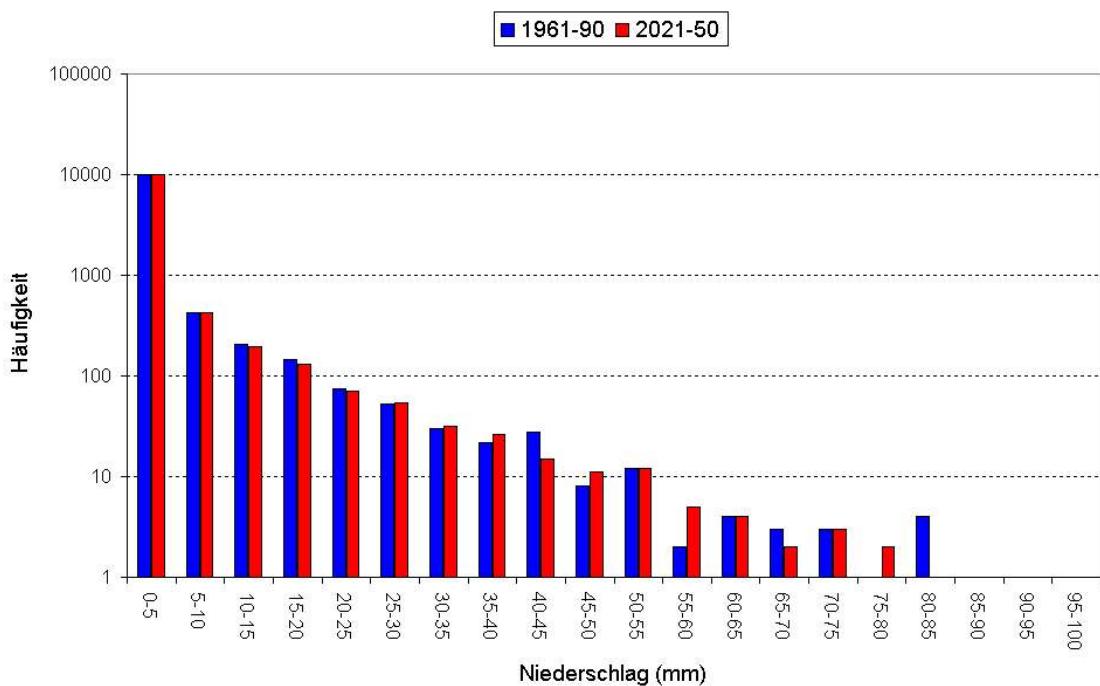


Abb. 8.8: Simulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge für Referenz- (1961-90) und Zukunftszeitreihe (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B

8.4 Fazit

Insgesamt zeigen sich für das Einzugsgebiet des Unteren Jordan die gleichen Tendenzen, die auch für die übergeordnete Region beobachtet wurden. Dementsprechend bestehen auch hier teilweise deutliche Unterschiede zwischen den beiden Modellsimulationen. Besonders auffällig sind wiederum die Winterschläge (DJF). Hier steht ein 10-prozentiger Zuwachs für die ECHAM4-MM5/A2 Simulation einem Niederschlagsrückgang von etwa 20 Prozent bei der ECHAM-RegCM3/A1B Simulation gegenüber. Eine signifikante Zunahme von Niederschlagsextremen ist aus den Häufigkeitsverteilungen und der Änderung der Niederschlagsindizes nicht ersichtlich. Bei der Lufttemperatur zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Zukunftsszenarien dagegen eine starke Zunahme von heißen Tagen im Einzugsgebiet.

9. Diskussion und Ausblick

Klimamodelle sind mittlerweile das gebräuchlichste und wohl auch geeignete Mittel um die zu erwartenden globalen und regionalen Klimaentwicklungen abzuschätzen. Trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren und erhöhten Rechenkapazitäten zeigen sich jedoch immer noch zahlreiche Unwägbarkeiten. Ergebnisse verschiedener Modelle weisen oft große Unterschiede und Bandbreiten auf.

Die Unsicherheiten denen Projektionen für das zukünftige Klima unterliegen sind vielfältig. Zum einen liegen sie natürlich in den verwendeten Modellen. Viele Austauschprozesse in der Atmosphäre können nur vereinfacht und auf großen Skalen beschrieben werden. Die verwendeten Ansätze unterscheiden sich von Modell zu Modell. Ein anderer entscheidender Punkt ist die Frage, ob die Modelle Rückkopplungsprozesse richtig erfassen können (Schumann, 2000). So erhöht sich beispielsweise infolge der globalen Erwärmung der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, wodurch sich der anthropogene Treibhauseffekt stark verstärken kann. Ein anderer Punkt ist die Entwicklung der Bewölkung, die einen entscheidenden Einfluss auf die Temperaturentwicklung besitzt. Werden die Ergebnisse von globalen Modellen mit der Hilfe von Regionalmodellen auf kleinere Skalen übertragen, treten für diesen Prozess weitere Unsicherheiten auf. Eine weitere, wesentliche Unsicherheit für die Ergebnisse der Klimamodelle ergibt sich aus den Emissionsszenarien, die den Rechnungen zugrundegelegt werden müssen. Eine exakte Vorhersage des Emissionsverlaufs ist nicht möglich, da weder die sozio-ökonomische Entwicklung noch die menschlichen Verhaltensweisen vorausgesagt werden können. Generell wächst die Unsicherheit für weiter in der Zukunft gelegene Zeiträume. Ein weiterer Punkt, der bei Klimaprojektionen eine Rolle spielt, sind die Unsicherheiten infolge der natürlichen Klimavariabilität. Um Unsicherheiten bei der Klimamodellierung abzuschätzen, ist es üblich die Ergebnisse mehrerer Modelle miteinander zu vergleichen. Die Modellierung muss dabei natürlich mit denselben Randbedingungen erfolgen.

Vor diesem Hintergrund muss man auch die Ergebnisse dieser Arbeit bewerten, die mögliche Klimaänderungen in der Jordanregion untersucht. Im Fokus standen dabei vor allem die Änderungen für die primären Klimagrößen Lufttemperatur und Niederschlag. Ein kurzer Überblick wurde auch für die Globalstrahlung, die Windgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchte gegeben. Bei der Betrachtung von Klimaänderungen können verschiedene Aspekte und Parameter eine Rolle spielen. Wichtige Größen sind Jahresmittel bzw. mittlere Jahresgänge. Einerseits geben diese die Änderungscharakteristik der Klimaelemente zwar nur eingeschränkt wieder, andererseits sind es sehr robuste Größen, was hinsichtlich der großen Unsicherheit bei der Modellierung von großem Wert ist. Detailliertere Erkenntnisse können mit Extremwertanalysen gewonnen werden. Die Auswirkungen von Extremen sind in der Regel von großer Bedeutung. Allerdings zeigen sich bei der Modellierung hier auch die größten, teilweise zu große Unsicherheiten.

Um zukünftige Änderungen mit Klimamodellen zu simulieren, müssen diese das Klima der Jetzt-Zeit sinnvoll nachbilden können. Deshalb wurden die Simulationsergebnisse der Referenzperiode für Lufttemperatur und Niederschlag mit gemessenen Stationsdaten verglichen. Ein Problem dabei war die, trotz Regionalisierung, immer noch sehr niedrige Auflösung der Modelle. Dies spielt besonders vor dem Hintergrund der scharfen

Klimagradienzen der Region eine Rolle. Trotzdem zeigten sich für die Lufttemperatur mehrheitlich akzeptable Ergebnisse. Ein anderes Bild ergab sich für den Niederschlag. Zwar konnte der charakteristische Jahresgang der Region sinnvoll wiedergegeben werden, die simulierten Niederschlagshöhen lagen allerdings zum großen Teil deutlich unter den gemessenen Werten.

Auch bei den Änderungssimulationen der beiden Modelle zeigen sich Unterschiede zwischen Lufttemperatur und Niederschlag. Für die Lufttemperatur zeigen beide Modelle eine klare Erwärmung. Für das Untere Jordaneinzugsgebiet und die Periode 2021-50 beträgt diese 1.4 °C bzw. 1.7 °C. Zwar gibt es zwischen den Modellsimulationen jahreszeitliche Unterschiede, insgesamt ist der Trend jedoch einheitlich und passt auch zu anderen Klimaprojektionen für die Region. Eine andere Bewertung muss für den Niederschlag vorgenommen werden. Die meisten, aktuellen Simulationen prognostizieren einen klaren Niederschlagsrückgang für den gesamten Mittelmeerraum. Die Ergebnisse der beiden in der Arbeit untersuchten Klimamodellierungen zeigen für die Jordanregion insgesamt unterschiedliche Tendenzen. Besonders auffällig ist die Differenz in den regenreichen Wintermonaten (DJF). Für die Zukunftsperiode 2021-50 steht hier einem Rückgang von ca. 20 Prozent, ein Niederschlagszuwachs von ca. 10 Prozent gegenüber. Den Simulationen liegen zwar unterschiedliche Emissionsszenarien zugrunde, allerdings unterscheiden diese sich für den untersuchten Zeitraum kaum. Vor diesem Hintergrund müssen auch die Ergebnisse der untersuchten Niederschlagsindizes kritisch betrachtet werden. Nimmt man die Ergebnisse der beiden hier untersuchten Klimaprojektionen als Grundlage, so muss die zukünftige Entwicklung der Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet, sowie deren räumliche und zeitliche Verteilung als sehr unsicher angesehen werden.

Um die Auswirkungen von sich ändernden Klimabedingungen auf Wasserressourcen, Ökosysteme und menschliche Aktivitäten beschreiben zu können, sind weitere Untersuchungen nötig. Dazu werden häufig hydrologische und andere Modelle verwendet. Deshalb ist es notwendig Konzepte zu entwickeln, mit denen sich die Änderungsinformationen aus den Klimamodellen sinnvoll auf diese Modelle übertragen lassen.

Literaturverzeichnis

Atlas of Israel (1985): Cartography, Physical and Human Geography, third edition. Survey of Israel, Tel Aviv. Macmillan, New York.

Goldreich Y. (2003): The Climate of Israel: Observations, Research and Applications. Kluwer Academic, New York

Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R. (1995): A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). Technical report, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

IPCC (2001): IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., New York, USA.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Kleinn J. (2002): Climate change and runoff statistics in the Rhine Basin, a process study with a coupled climate-runoff model. Ph.D. Thesis No. 14663, ETH Zürich.

Kudish, A.I & Ianetz, A. (1992): Analysis of the solar radiation data for Beer Sheva. Israel, and its environs. Solar Energy.

Pal, J. S. et al. (2005): Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. Submitted to the Bulletin of the American Meteorological Society.

Roeckner, E. et al. (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

Roeckner, E. et al. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part 1: Model Description. Report 349, Max- Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Schär, C., Wernli, H., Frei, C. (2003): Methodik regionaler Klimaszenarien. Extremereignisse und Klimaänderung. ProClim, Bern. S, 2003

Schönwiese, C. D. (2003): Klimatologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Schuhmann, A., Geyrer, J., Antl, M. (2000): Probabilistische Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaänderungen auf den Abfluss der Donau bis oberhalb der Illermündung. Vortrag auf dem Symposium: Klimaänderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, 29-30.11.2000.Karlsruhe.

Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2. Publikationen des Umweltbundesamtes

Strahler,A. H., Strahler, A. N. (2002): Physische Geographie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

U.S. Geological Survey (1998): Overview of Middle East. Water Resource of Palestinian, Jordanian an Israeli Interest: The Executive Action Team, Middle East Water Data Banks Project.

URL 1: <http://www.glowa.org>

URL 2: <http://www.ims.gov.il>

Anhang

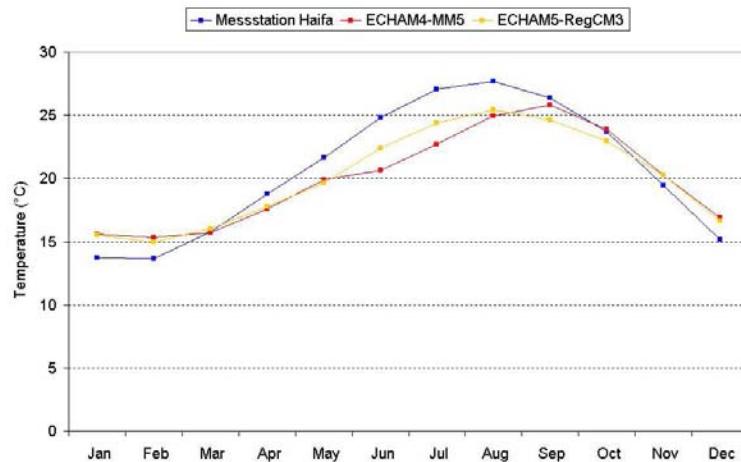


Abb. A.1: Jahresgang der Monatsmittel der Lufttemperatur (1961-90) für die Messstation Haifa und die dazugehörigen Modellsimulationen

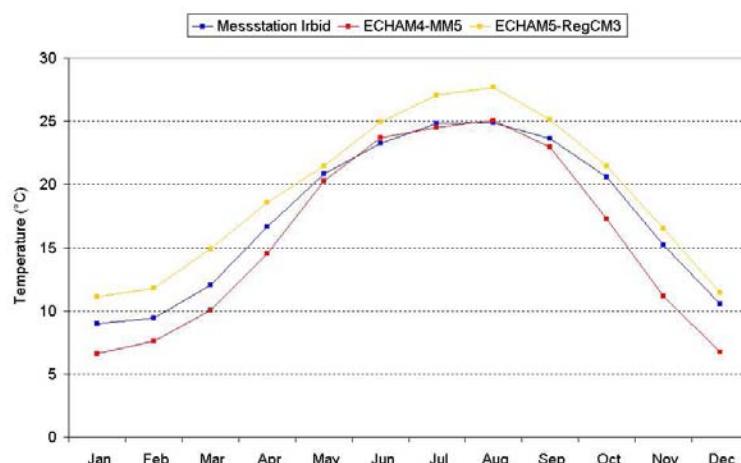


Abb. A.2: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Irbid und die dazugehörigen Modellsimulationen

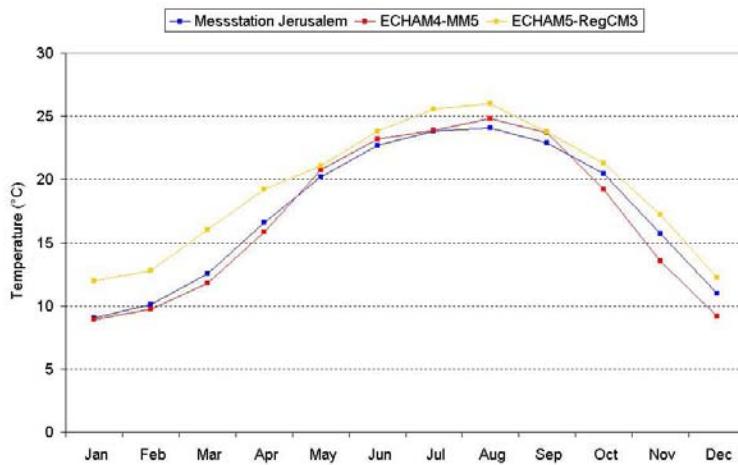


Abb. A.3: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Jerusalem und die dazugehörigen Modellsimulationen

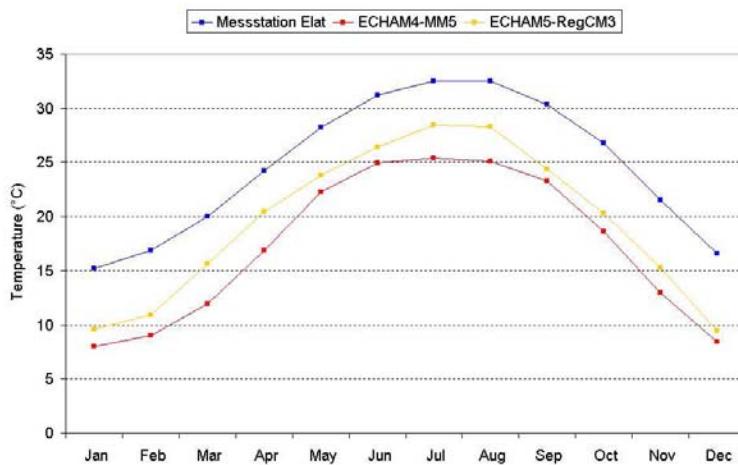


Abb. A.4: Jahresgang der monatlichen Mitteltemperatur (1961-90) für die Messstation Elat und die dazugehörigen Modellsimulationen

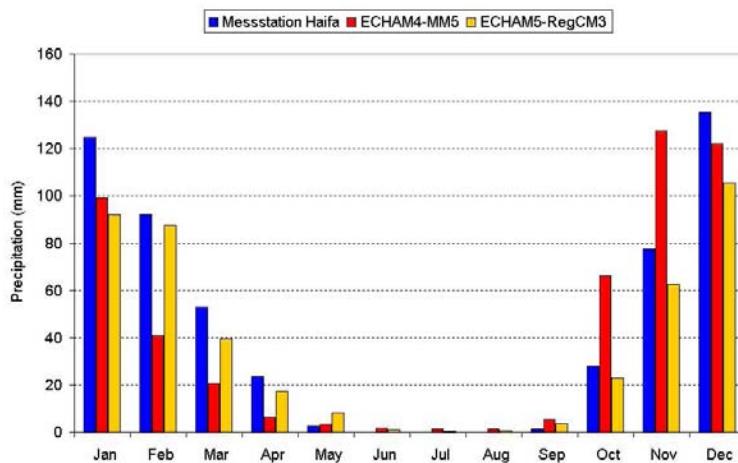


Abb. A.5: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Haifa und die dazugehörigen Modellsimulationen

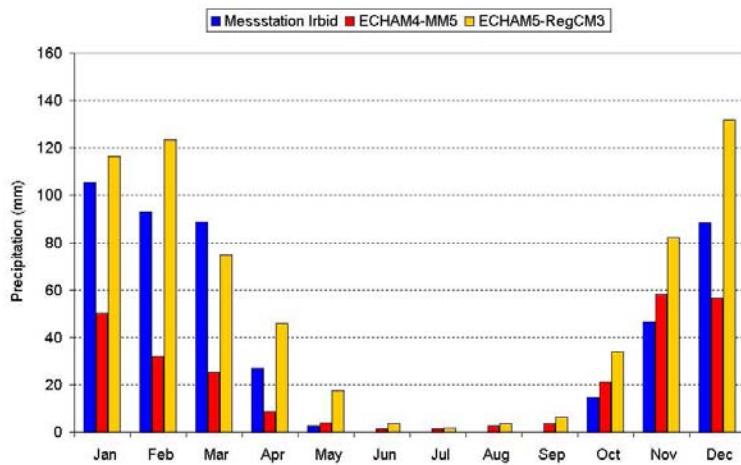


Abb. A.6: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Irbid und die dazugehörigen Modellsimulationen

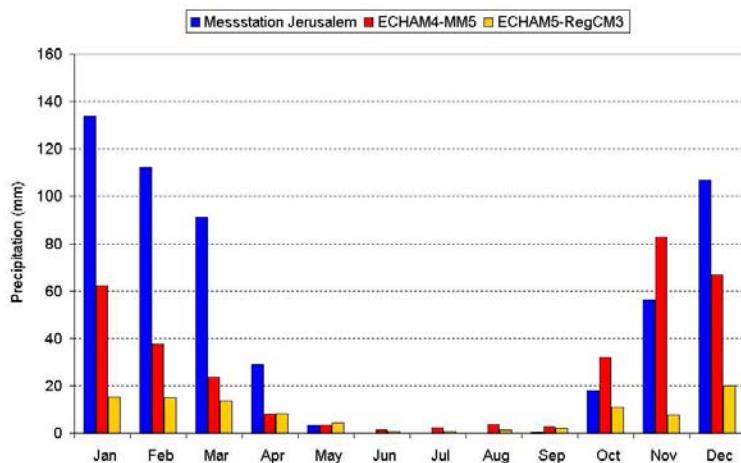


Abb. A.7: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Jerusalem und die dazugehörigen Modellsimulationen

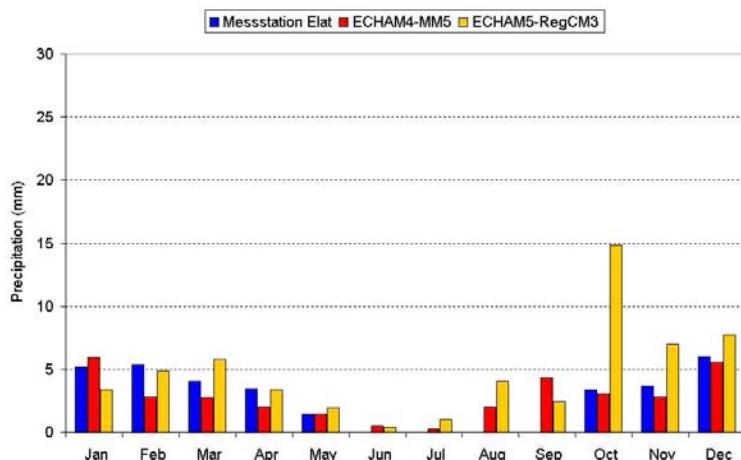


Abb. A.8: Jahresgang der monatlichen Niederschlagssummen (1961-90) für die Messstation Elat und die dazugehörigen Modellsimulationen

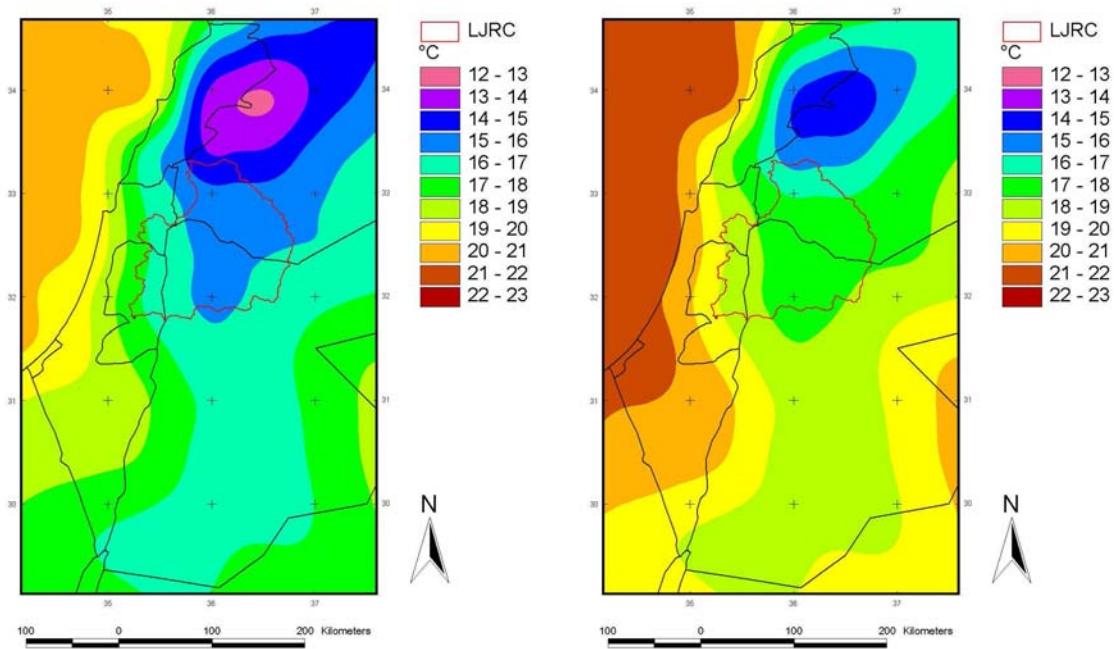


Abb. A.9: Simulierte Jahresmitteltemperatur für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

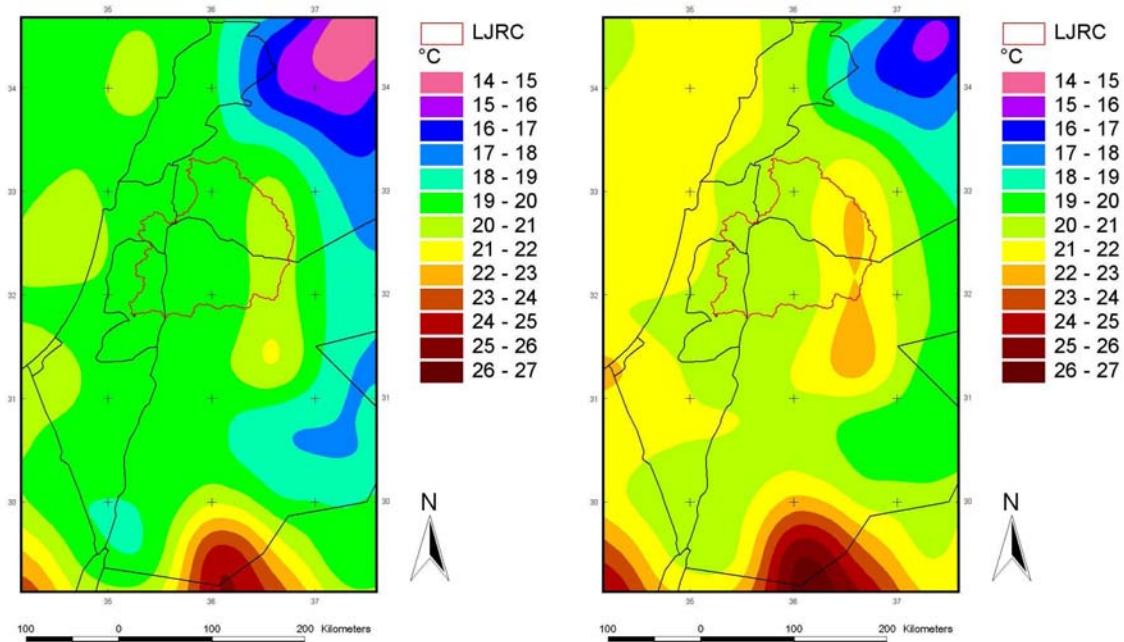


Abb. A.10: Simulierte Jahresmitteltemperatur für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

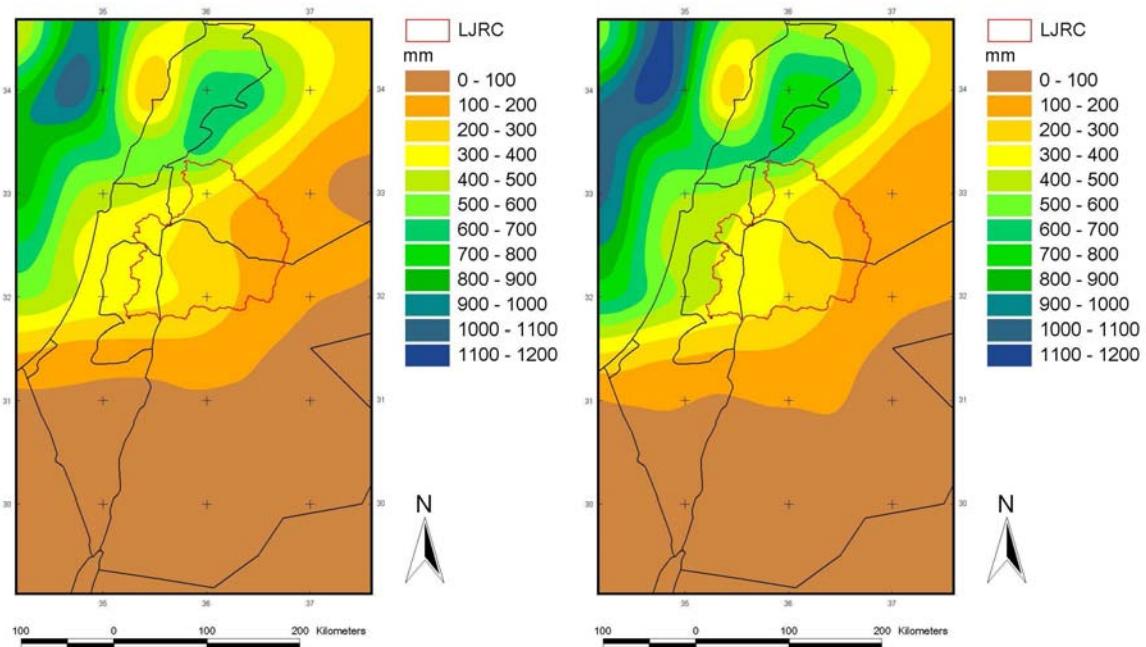


Abb. A.11: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

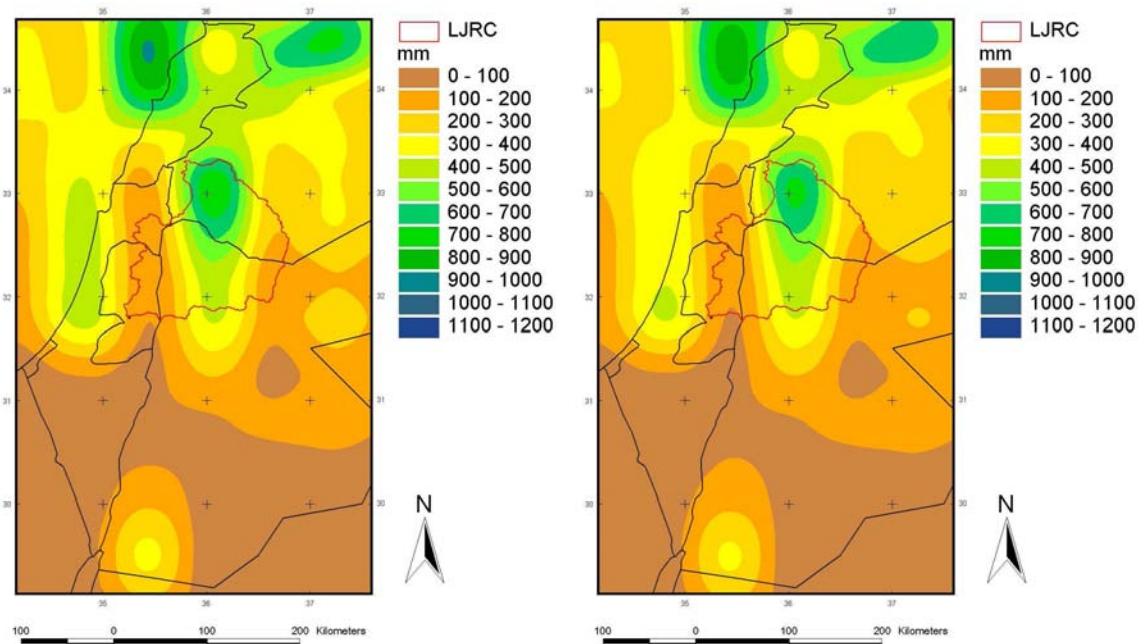


Abb. A.12: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

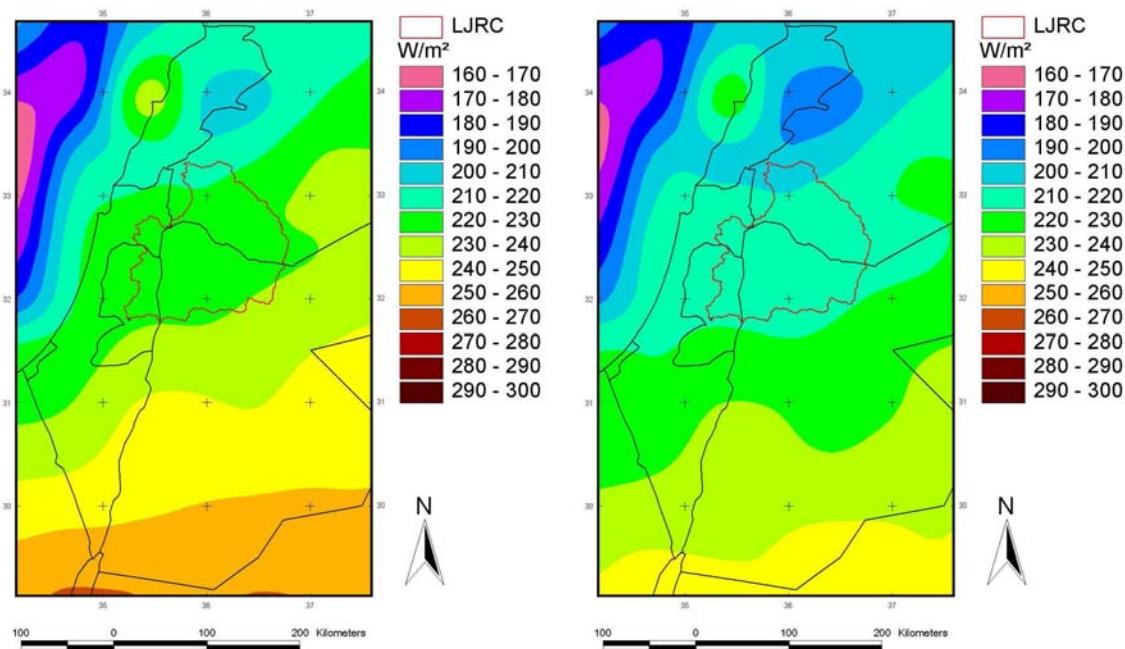


Abb. A.13: Simulierte mittlere jährliche Globalstrahlung für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

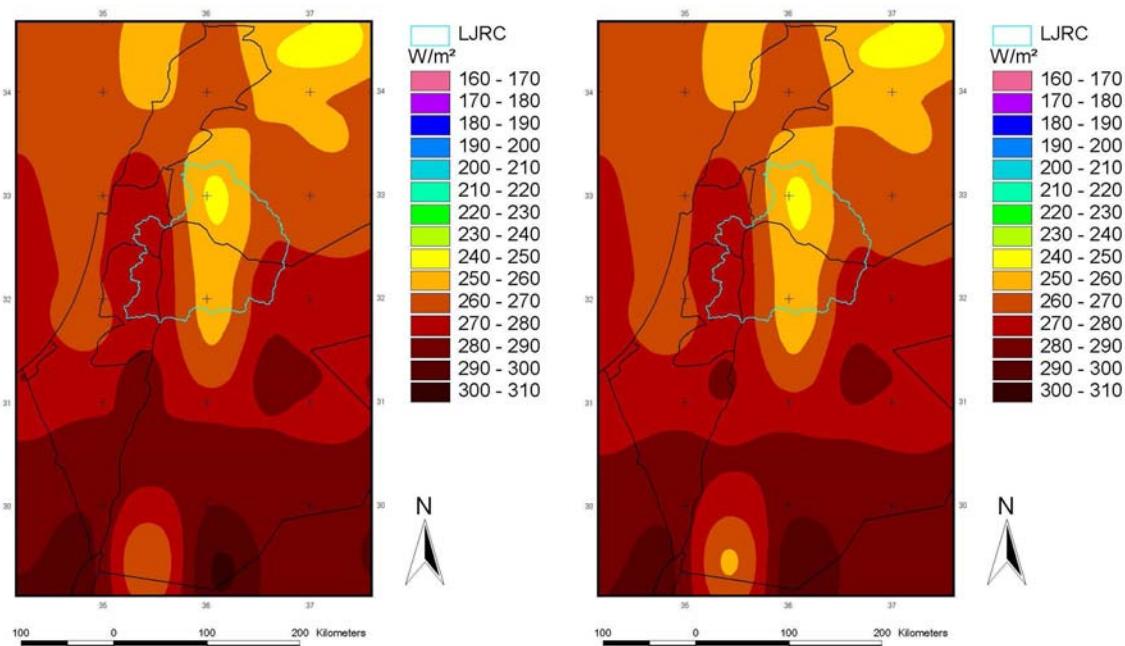


Abb. A.14: Simulierte mittlere jährliche Globalstrahlung für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

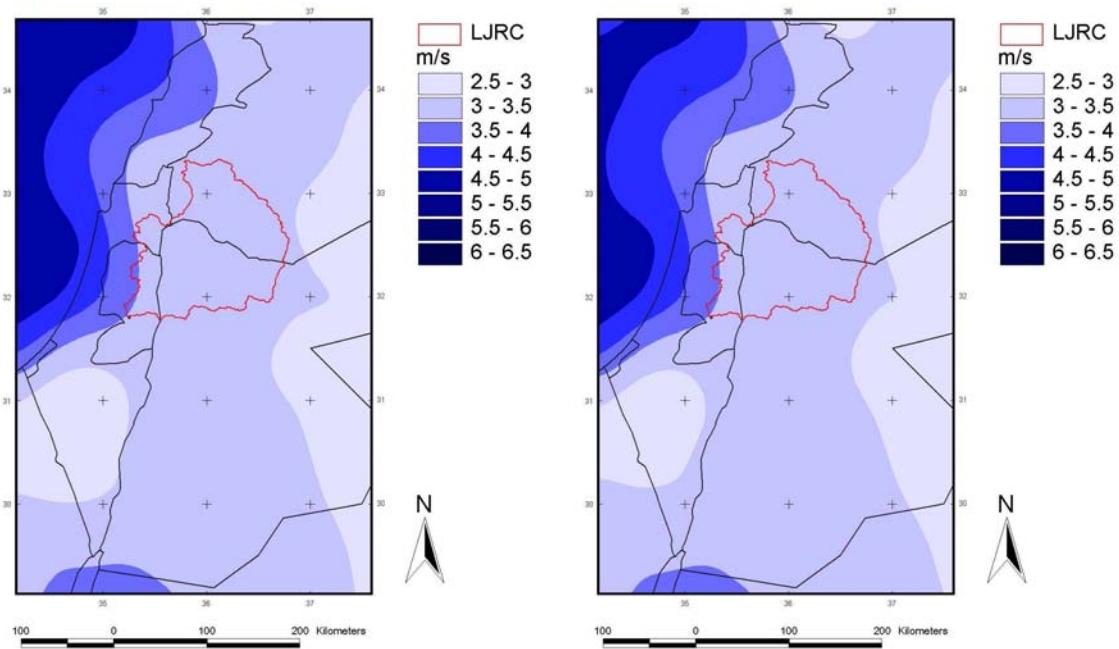


Abb. A.15: Simulierte mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

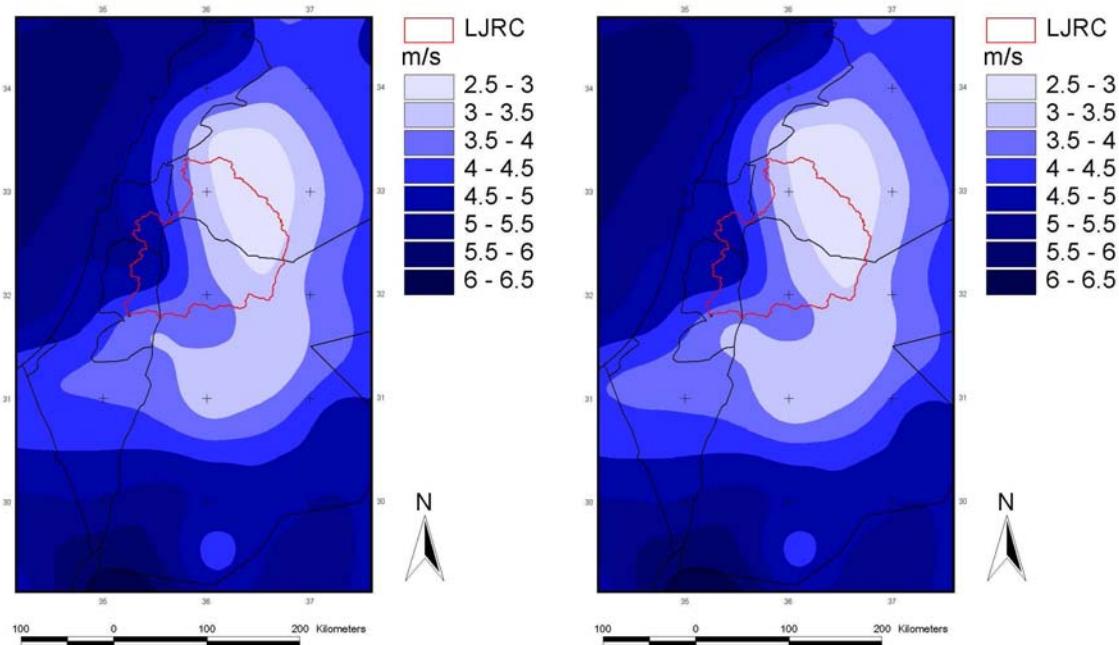


Abb. A.16: Simulierte mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

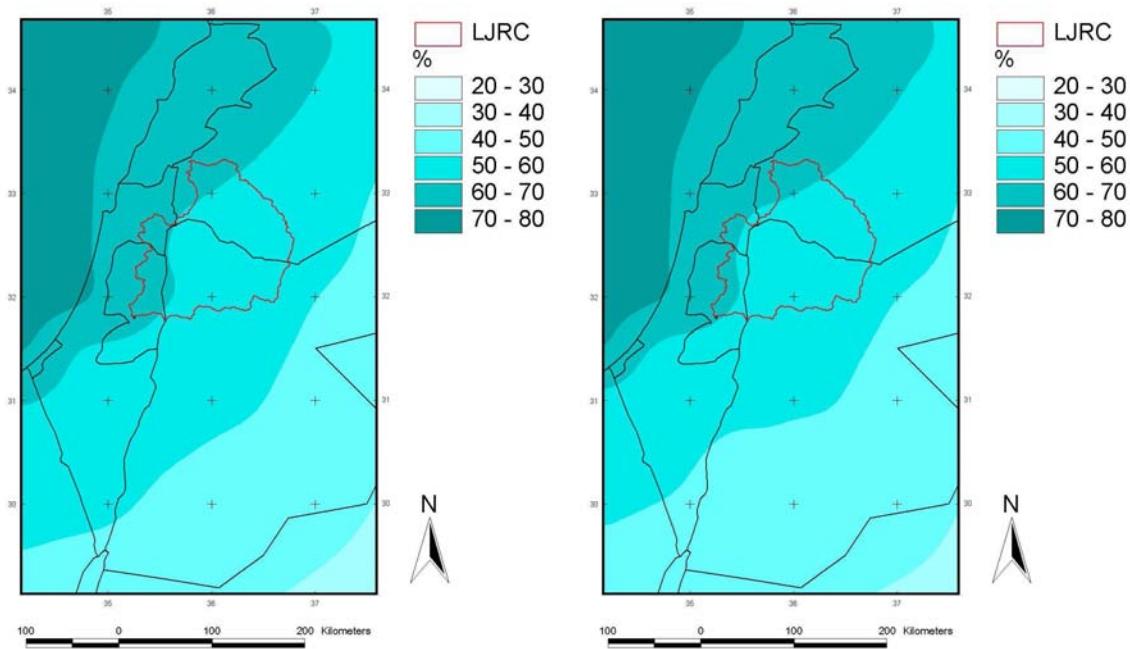


Abb. A.17: Simulierte mittlere jährliche relative Luftfeuchte für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

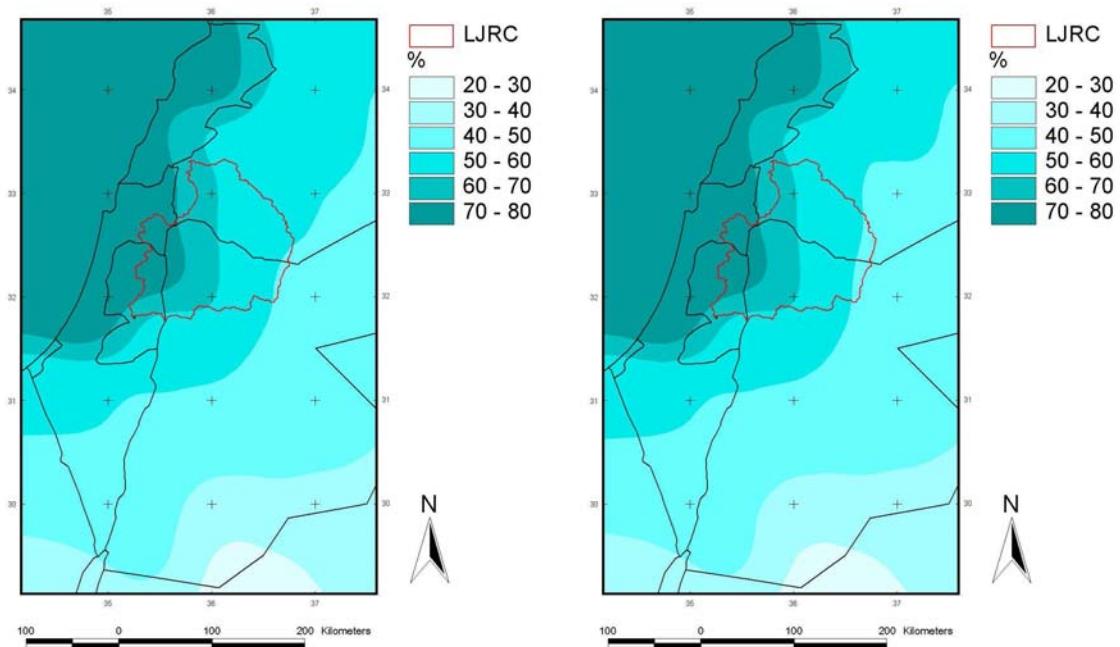


Abb. A.18: Simulierte mittlere jährliche relative Luftfeuchte für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

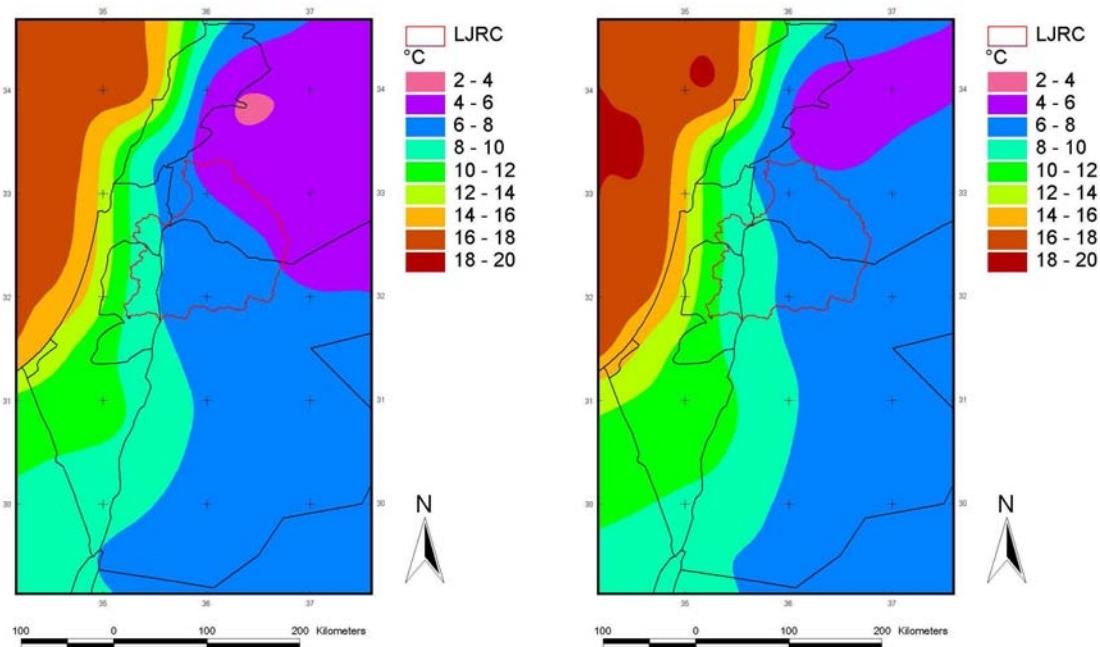


Abb. A.19: Simulierte mittlere Wintertemperaturen (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

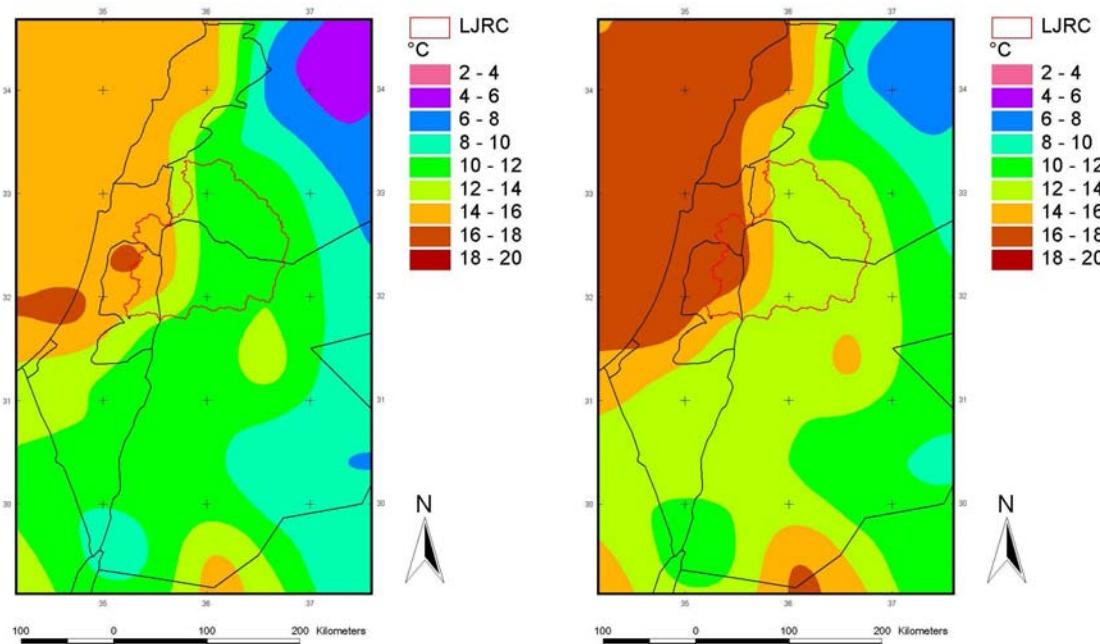


Abb. A.20: Simulierte mittlere Wintertemperaturen (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

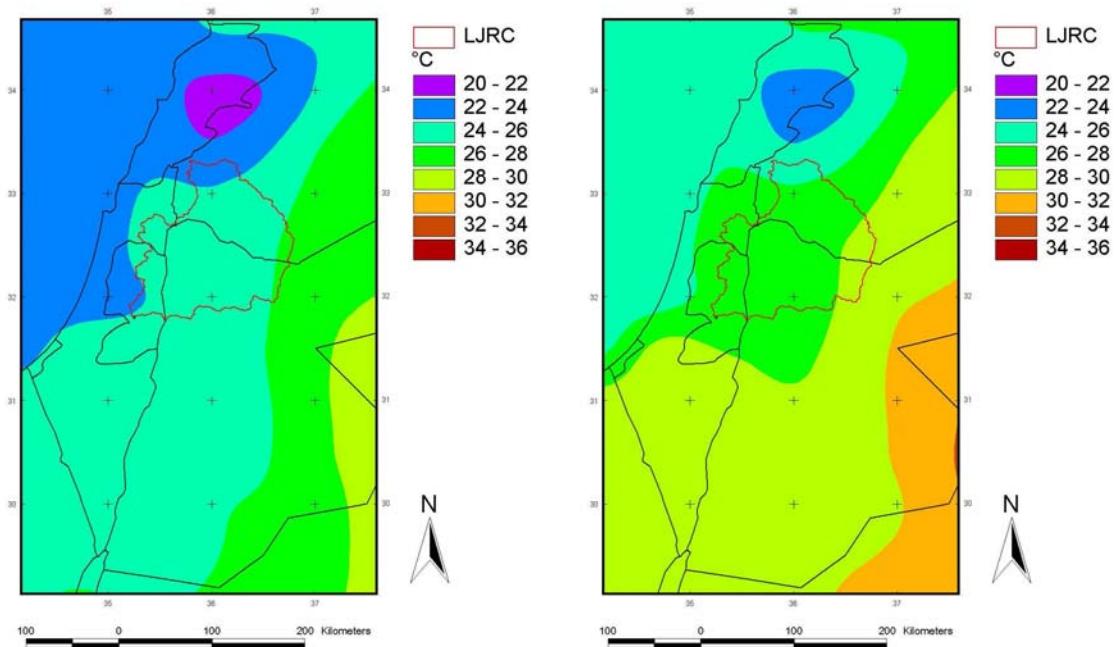


Abb. A.21: Simulierte mittlere Sommertemperaturen (JJA) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

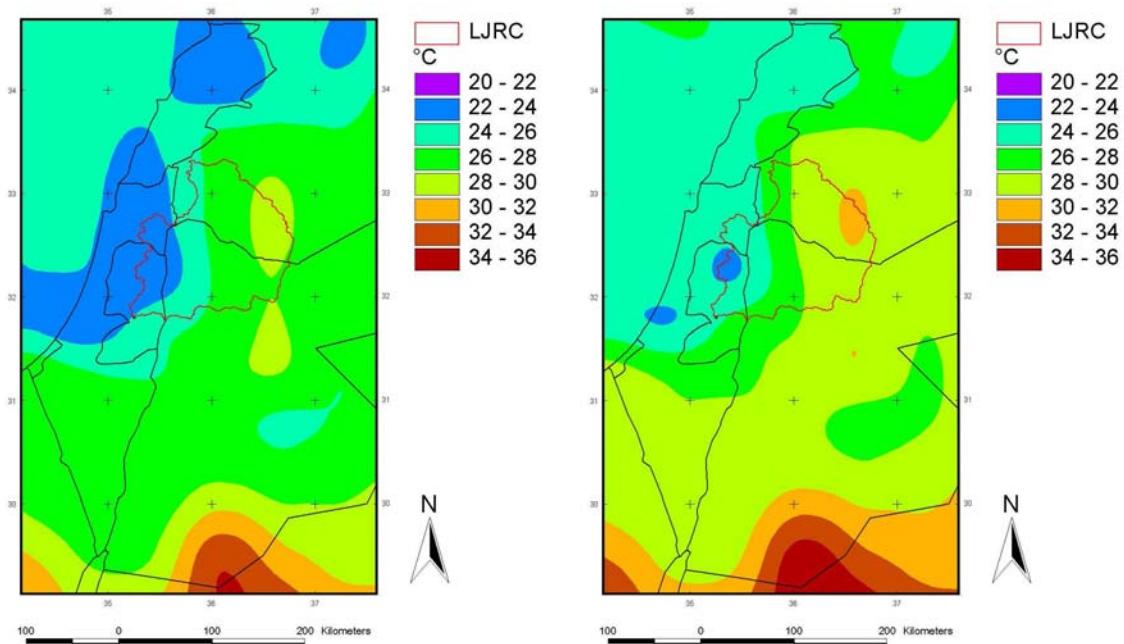


Abb. A.22: Simulierte mittlere Sommertemperaturen (JJA) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

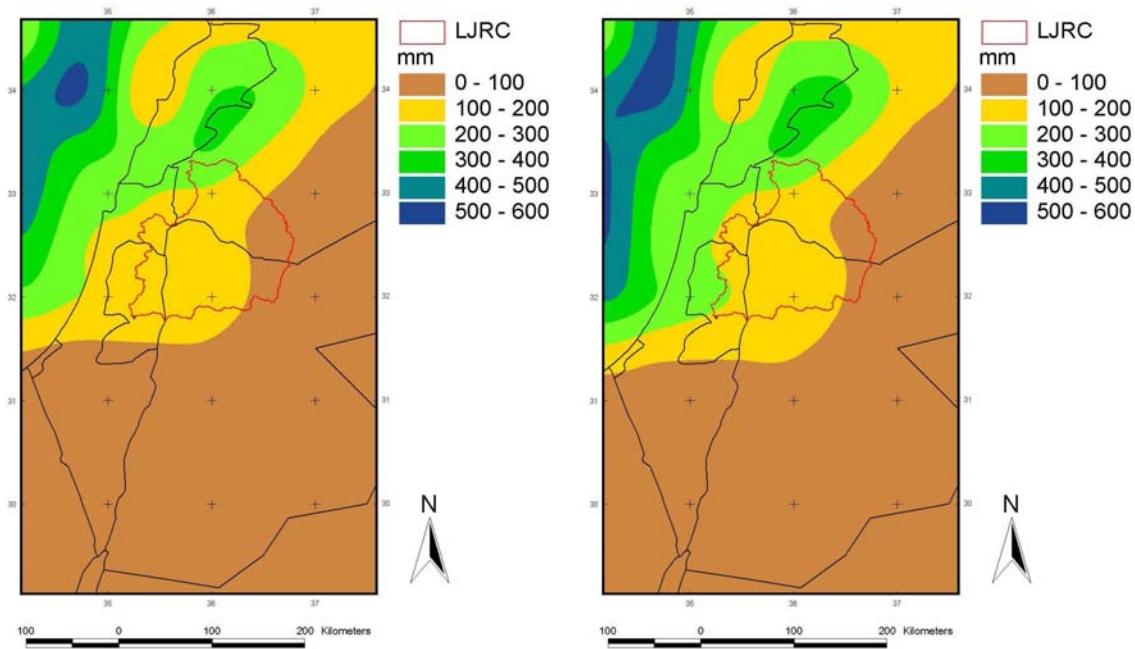


Abb. A.23: Simulierter mittlerer Winterniederschlag (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

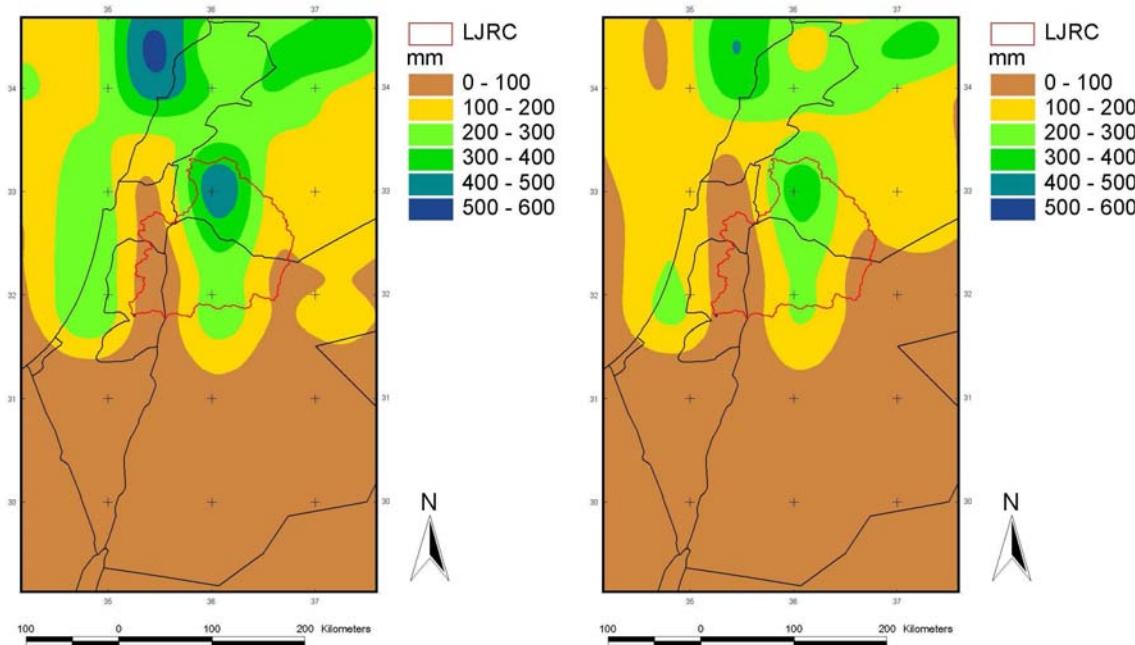


Abb. A.24: Simulierter mittlerer Winterniederschlag (DJF) für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

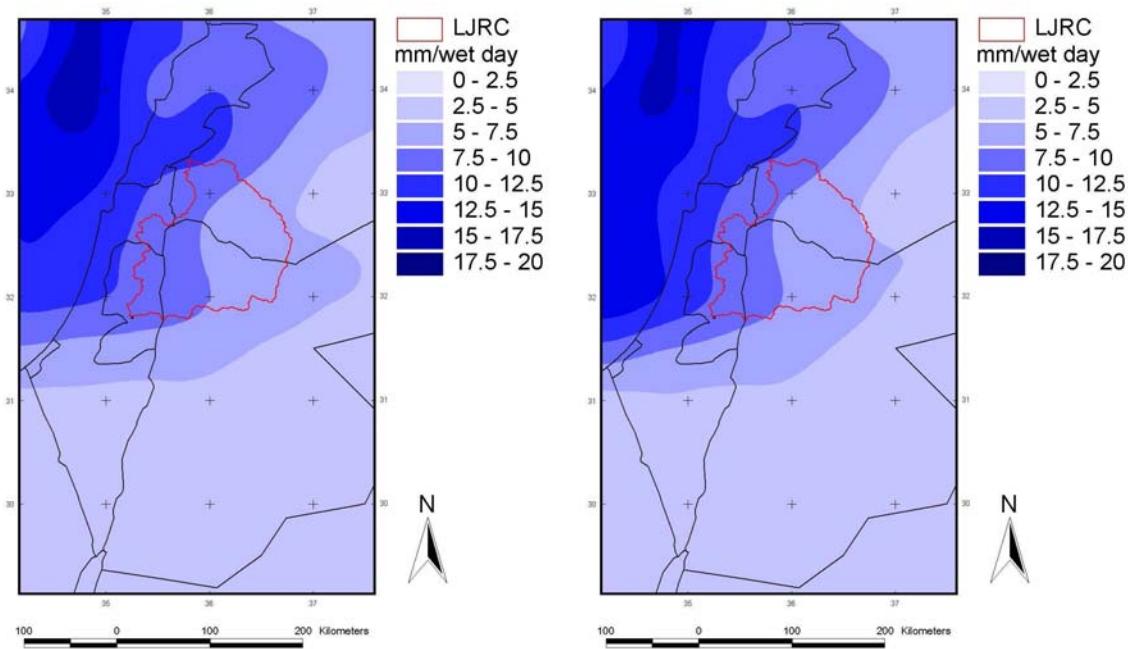


Abb. A.25: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

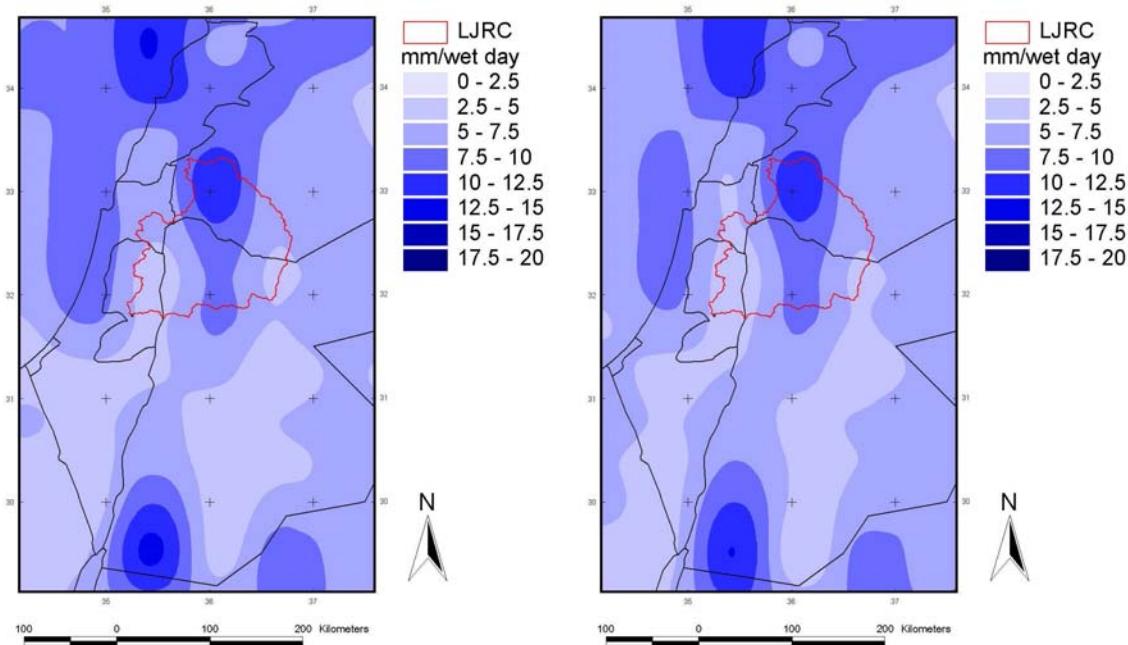


Abb. A.26: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

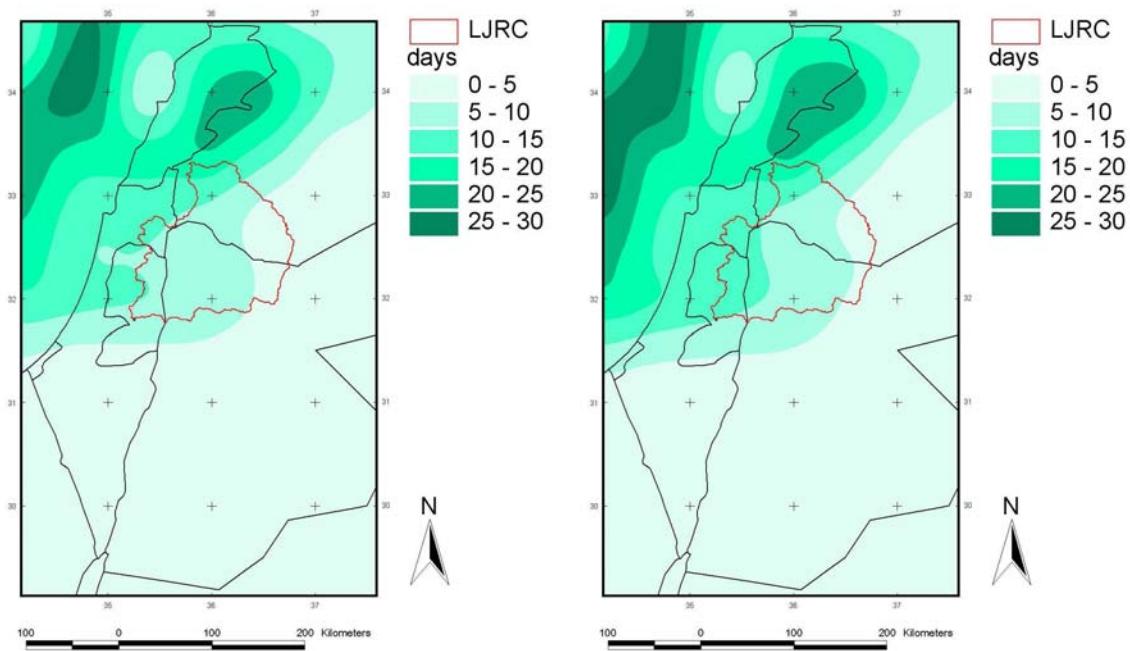


Abb. A.27: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

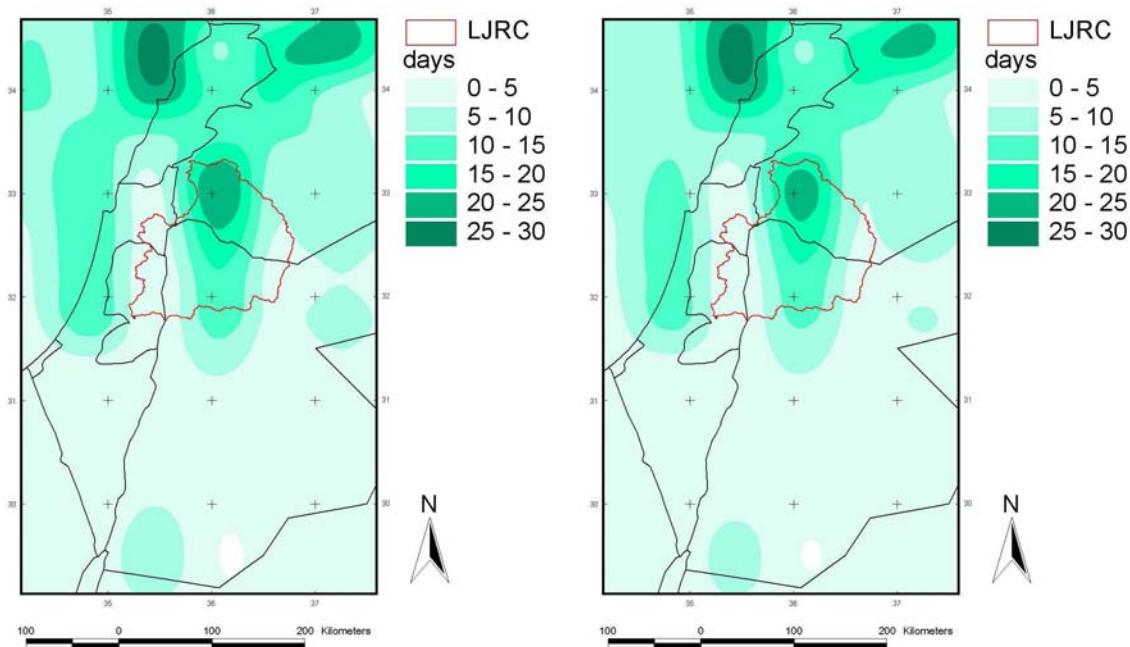


Abb. A.28: Simulierter SDII für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

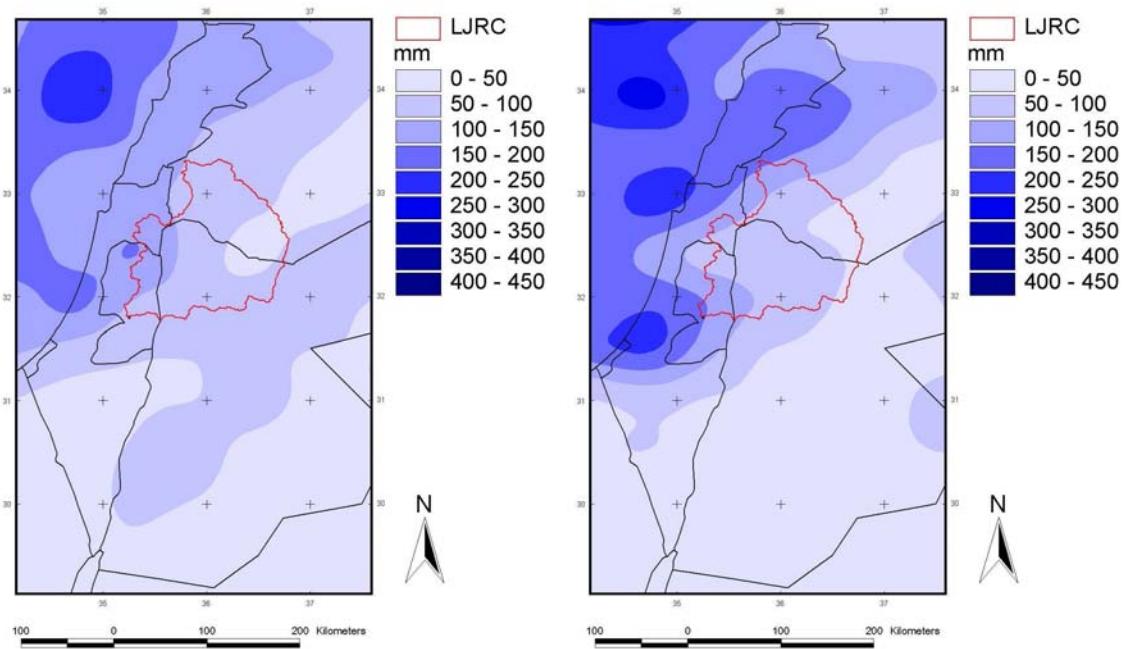


Abb. A.29: Simulierter maximaler Tagesniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM4-MM5/A2 Simulation

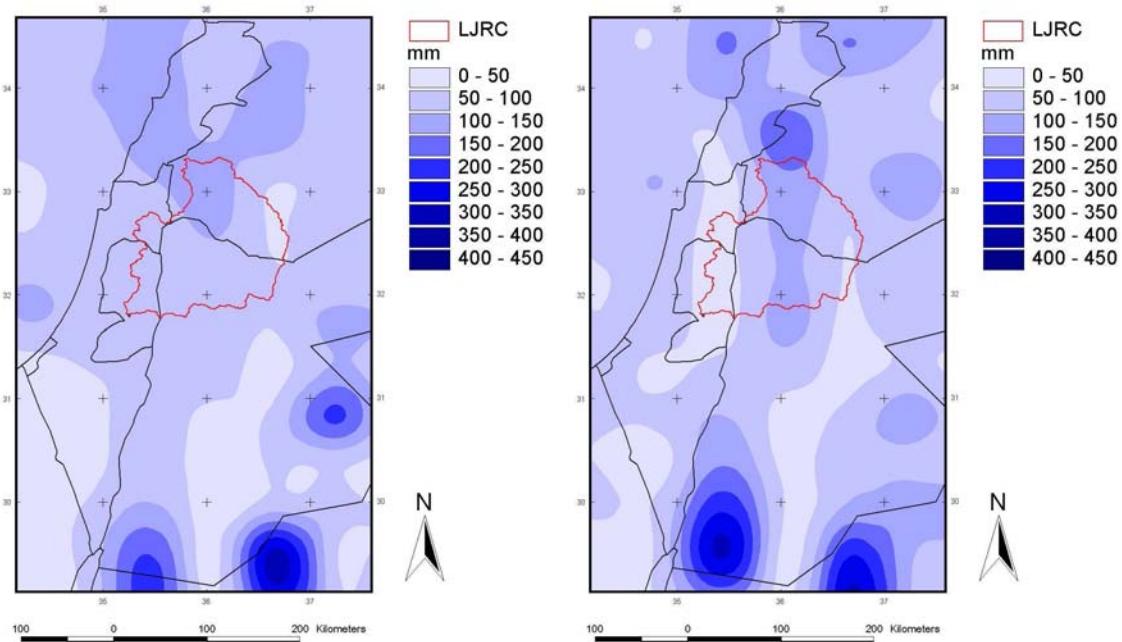


Abb. A.30: Simulierter maximaler Tagesniederschlag für Referenzperiode 1961-90 (links) und Zukunftsperiode 2021-50 (rechts) mit der ECHAM5-RegCM3/A1B Simulation

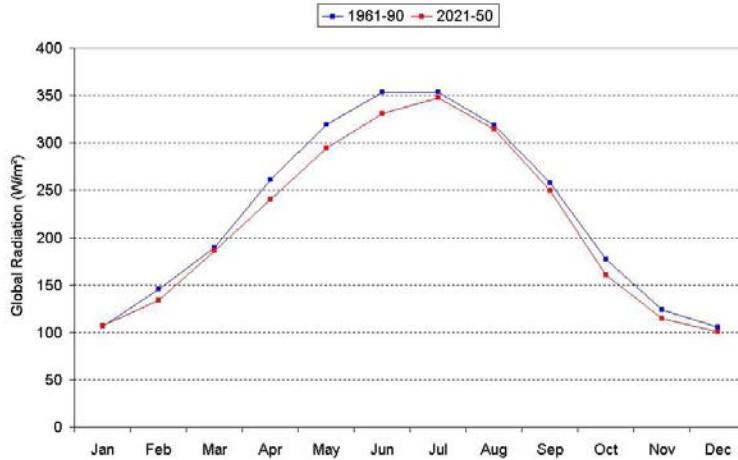


Abb. A.31: Simulierter Jahresgang der mittleren Globalstrahlung für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet

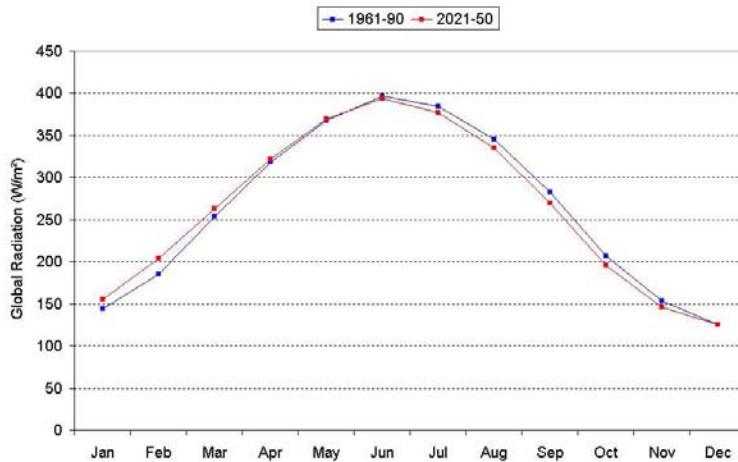


Abb. A.32: Simulierter Jahresgang der mittleren Globalstrahlung für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet

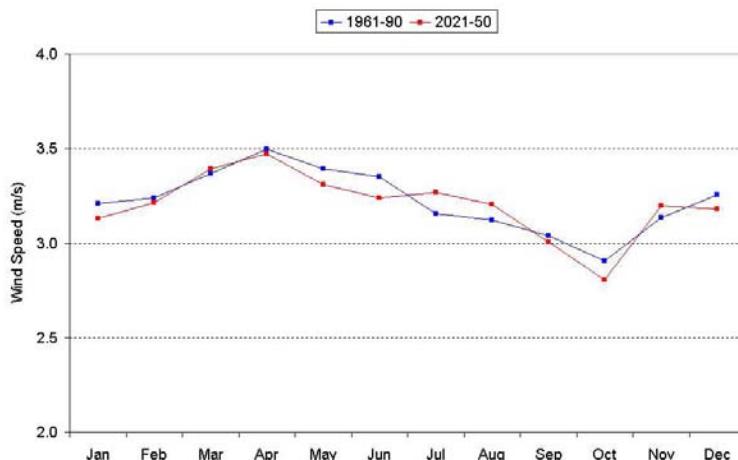


Abb. A.33: Simulierter Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für Referenz- (1961-90) und Zukunftsperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet

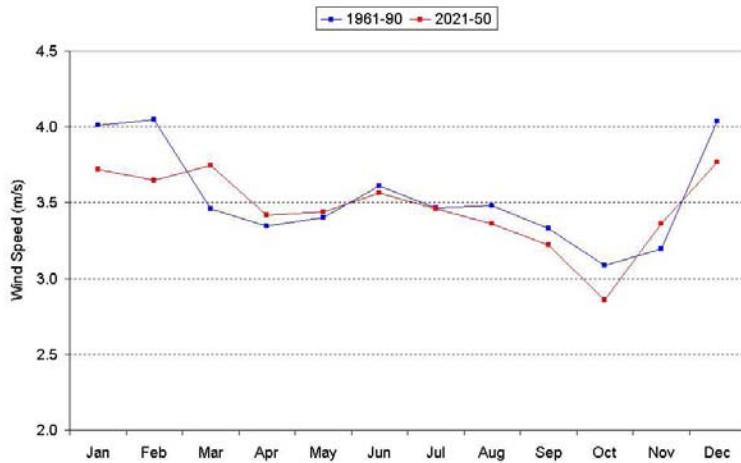


Abb. A.34: Simulierter Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit für Referenz- (1961-90) und Zukunftperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet

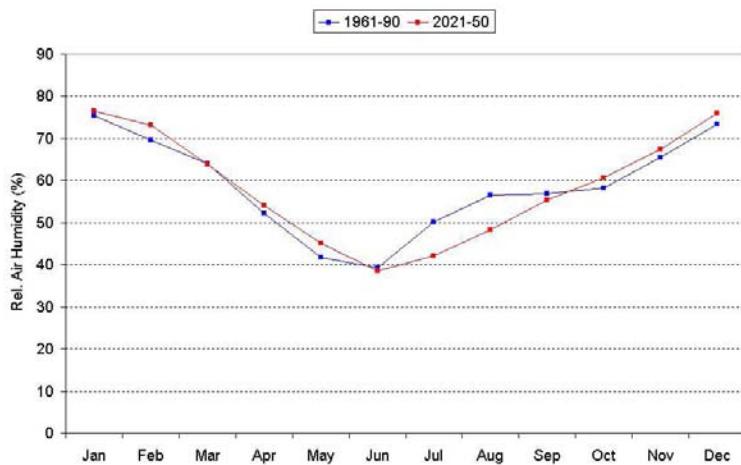


Abb. A.35: Simulierter Jahresgang der mittleren relativen Luftfeuchte für Referenz- (1961-90) und Zukunftperiode (2021-50) mit ECHAM4-MM5/A2 für das Untere Jordaneinzugsgebiet

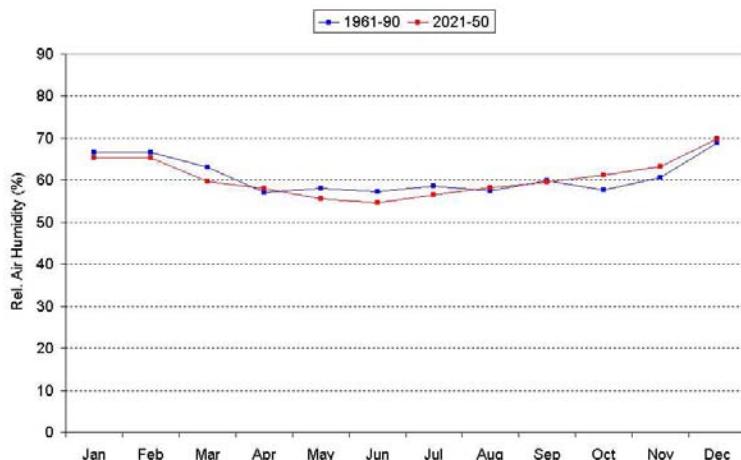


Abb. A.36: Simulierter Jahresgang der mittleren relativen Luftfeuchte für Referenz- (1961-90) und Zukunftperiode (2021-50) mit ECHAM5-RegCM3/A1B für das Untere Jordaneinzugsgebiet

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg im Breisgau, 30. April 2008

B. Giebl