



WBGU

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

materialien

**Gerhard Petschel-Held, Diana Sietz,
Oliver Walkenhorst, Carsten Walther unter
Mitarbeit von Nick Brooks:**

**Armut und Umwelt in Burkina Faso und
NO-Brasilien: Entwicklung und Anwendung
eines Matrixkonzepts zur Beschreibung
differenzieller Vulnerabilitäten gegenüber
dem globalen Wandel**

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten
"Welt im Wandel: Armutsbekämpfung
durch Umweltpolitik"**

Berlin 2004

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten
"Welt im Wandel: Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik"
Berlin: WBGU
Verfügbar als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2004.html

Autoren: Gerhard Petschel-Held, Diana Sietz, Oliver Walkenhorst, Carsten Walther unter Mitarbeit von Nick Brooks

Titel: Armut und Umwelt in Burkina Faso und NO-Brasilien: Entwicklung und Anwendung eines Matrixkonzepts zur Beschreibung differenzieller Vulnerabilitäten gegenüber dem globalen Wandel
Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), 2004
Veröffentlicht als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2004_ex05.html

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62
10785 Berlin

Telefon (030) 263948 0
Fax (030) 263948 50
E-Mail wbgu@wbgu.de
Internet <http://www.wbgu.de>

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> in deutscher und englischer Sprache herunter geladen werden.

© 2004, **WBGU**



Tyndall°Centre
for Climate Change Research

**Armut und Umwelt in Burkina Faso und NO-Brasilien:
Entwicklung und Anwendung
eines Matrixkonzepts
zur Beschreibung differenzieller Vulnerabilitäten
gegenüber dem globalen Wandel**

Gerhard Petschel-Held, Diana Sietz, Oliver Walkenhorst und Carsten Walther¹

sowie Nick Brooks²

¹ Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Postfach 601203, 14412 Potsdam, e-mail: gerhard@pik-potsdam.de

² Tyndall Center for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, United Kingdom

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Grundlagen eines differenziellen Vulnerabilitätskonzepts.....	5
2.1	Verallgemeinerte, systemtheoretische Grundlage.....	5
2.2	Begriffsklärungen.....	7
2.3	Operationalisierung des Matrixkonzepts.....	7
3	Exposition.....	9
3.1	Burkina Faso.....	9
3.2	NO-Brasilien.....	10
4	Vulnerabilität.....	11
4.1	Anwendung und Ergebnisse für Burkina Faso und NO-Brasilien.....	11
4.1.1	Burkina Faso.....	11
4.1.2	NO-Brasilien.....	19
4.2	Integrierte Vulnerabilitäten.....	23
4.2.1	Burkina Faso.....	24
4.2.2	NO-Brasilien.....	25
5	Strategien zur Minderung der Vulnerabilität.....	27
5.1	Methode zur Entwicklung von Strategien ausgehend von der Vulnerabilitätsmatrix.....	27
5.2	Ergebnisse.....	30
5.2.1	Burkina Faso.....	30
5.2.2	NO-Brasilien.....	32
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	34
6.1	Zusammenfassung.....	34
6.2	Ausblick.....	35
	Literatur.....	36

Anhang

AI	Vulnerabilitäten der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.....	38
AII	Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.....	46
AIII	Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.....	48
AIV	Vulnerabilitäten der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.....	50
AV	Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.....	58
AVI	Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.....	60

1 Einleitung

Der Begriff der Vulnerabilität hat in den vergangenen Jahren eine breite Verwendung in der Analyse von Mensch-Umwelt Systemen gefunden (e.g. Kasperson & Kasperson 2001; Turner II et al. 2003; Schröter et al. 2005). Auch wenn sich in der Literatur keine eindeutige Definition des Begriffs „Vulnerabilität“ finden lässt, so besitzen die Studien doch eine gemeinsame Grundlinie. Demnach kann Vulnerabilität verstanden werden als Charakteristik eines Systems, Störungen, meist extern und auf Umwelt bezogen, zu antizipieren, zu bewältigen, zu widerstehen oder sich davon zu erholen (Kasperson & Kasperson 2001). Die einzelnen Studien unterscheiden sich zunächst im Hinblick auf die spezifische Störung, deren Auswirkungen untersucht werden, wobei hier in den vergangenen 5-7 Jahren der Klimawandel als sogenannte *Exposition* vorherrscht. Die Arbeiten hierzu werden in jüngerer Zeit durch Untersuchungen zu einer sogenannten „double exposure“ von Klimaänderung und Globalisierung ergänzt (Leichenko & O'Brien et al. 2002). Diese jüngeren Arbeiten knüpfen somit an umfassendere Konzeptionierungen von Vulnerabilität an, die sich beispielsweise bei Watts & Bohle (1993) findet. Dort wurde stärker auf die Art der negativen Beeinträchtigung in Folge allgemein gefasster Störungen fokussiert, insbesondere auf die Probleme des Hungers und der Nahrungsunsicherheit.

Für die Untersuchung der möglichen Auswirkungen eines globalen Klimawandels auf den individuellen Menschen und auf soziale Systeme hat das Konzept seit dem zweiten Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses für den Klimawandel (IPCC) eine beständige Erweiterung gefunden (Füssel & Klein 2005). Insbesondere wurde neueren Erkenntnissen auf dem Gebiet menschlicher Anpassungsfähigkeit Rechnung getragen und die Dynamik des Anpassungsprozesses besser in die Analysen integriert, auch wenn gerade auf diesem Gebiet noch – auch konzeptioneller – Nachholbedarf besteht (Turner II et al. 2003).

Turner II et al. (2003) betonen insbesondere drei wesentliche methodisch-konzeptionelle Herausforderungen:

- Spezifikation der zentralen Analyseeinheit. Zwar besteht inzwischen weitgehend Einigkeit darüber, dass diese Einheit als Mensch-Umwelt System verstanden werden sollte, doch bleiben wichtige Fragen der Beschreibung, methodischen Konkretisierung und Abgrenzung des Systems offen. Auf welche Weise wirkt der Mensch auf seine unmittelbare natürliche Umwelt zurück, wie verändert er sie und wie können diese Veränderungen die Folgen exogener, also beispielsweise globaler, Umweltveränderungen modifizieren? Welche Möglichkeiten besitzt die betroffene Bevölkerung(sgruppe), um auf die Umweltveränderungen zu reagieren? Reagiert sie oder agiert sie proaktiv, beispielsweise durch sogenanntes adaptives Co-management (z.B. Tompkins & Adger 2004; Folke et al. 2002).

Auch wenn die Analyseeinheit eines Mensch-Umwelt Systems dazu verführt, den Menschen nur „abstrakt“ zu berücksichtigen, so wird doch zunehmend versucht, durch sogenannte Akteursmodelle, die Handlungsebene und -logik der betroffenen Bevölkerung(sgruppen) zum zentralen Bestandteil der Analyse zu machen. Letztlich sind es die Aktionen der Menschen, die zu Anpassung und Bewältigung führen oder die möglicherweise katastrophalen Folgen einer externen Störung beseitigen.

Die hier vorliegende Arbeit versucht hier anzuknüpfen und sich dem Mensch-System formal aus mathematischer Perspektive zu nähern, wobei Wert auf einen allgemeinen Ansatz gelegt wird, der etwa in der Lage ist, das wirtschaftswissenschaftliche Paradigma der Optimierung zu berücksichtigen.

- Vulnerabilität als dynamisches Konzept: die Prozesse, die die Vulnerabilität bestimmen, d.h. Sensitivität der natürlichen und sozialen Systeme gegenüber exogenen Störungen oder Adaption und Bewältigung, geschehen in der Zeit und fortlaufend. Systemtheoretisch angewendet, muss das Mensch-Umwelt System also als ein dynamisches System angesehen und interpretiert werden. Doch auf welchen Zeitskalen geschehen die entscheidenden Prozesse? Wie kann Vulnerabilität im

Rahmen einer dynamischen Beschreibung definiert und interpretiert werden? Welche Rolle spielen langsame Prozesse im Gegensatz zu schnellen oder gar abrupten Änderungen? Einige der menschlichen Anpassungsprozesse sind schnell andere, etwa institutioneller oder gar kultureller Art, sind im allgemeinen sehr langsam, können aber mitunter sehr schnell ablaufen (Gibson et al. 2000).

Das hier vorgestellte Konzept versucht die Dynamik durch die Beschreibung des Systems durch Trajektorien zu erfassen. Auf diese Weise erhält man mathematisch sogenannte Funktionalgleichungen, die ganze Trajektorien einzelner Komponenten des Mensch-Umwelt Systems miteinander in Bezug setzen können. Auf diese Weise können – zumindest idealerweise – die relevanten Zeitskalen der Vulnerabilität aus einer ex-post Analyse bekannter Zeitreihen relevanter Basisindikatoren gewonnen werden.

- Schließlich gilt es, die gerade in der Klimadiskussion eingeengte Sicht auf einen einzigen „Stressfaktor“ zu erweitern und multiple Stressoren zu berücksichtigen. Hierbei gilt es zu beachten, welche Umweltveränderungen die Dynamik von Mensch-Umwelt Systemen exogen bestimmen, bzw. endogen und somit integraler Bestandteil des Systems sind. Nicht zuletzt der WBGU hat in zahlreichen seiner Gutachten nicht nur auf die Parallelität dieser Veränderungen hingewiesen, sondern u.a. im Rahmen des Syndromkonzepts deren gegenseitige Abhängigkeit, bzw. die enge Verschränkung vieler dieser Umweltveränderungen mit menschlichen Systemen betont (z.B. WBGU 1997; s.a. Schellnhuber et al. 1997; Petschel-Held et al. 1999).

Die konzeptionelle – und auch wissenschaftshistorische – Nähe des Vulnerabilitätskonzepts zur Risiko- und Katastrophenforschung bringt an dieser Stelle Schwierigkeiten hervor, gerade im Hinblick auf die enge Vernetzung von Umweltveränderungen und gesellschaftlicher oder menschlicher Dynamik. Inwieweit ist es möglich, Vulnerabilität eines Mensch-Umwelt Systems gegenüber Veränderungen zu konzeptionieren, die selbst Teil des Systems sind? Der hier vorgestellte Zugang wird dies mit Hilfe eines Konzepts versuchen, das sich je nach Sichtweise, partieller Ableitungen (mathematisch), eines ceteris paribus Ansatzes (ökonomisch), oder eines multiplen Regressionsverfahrens (statistisch) bedient.

Schließlich wird der Ansatz aber auch im Hinblick auf die Zielvariable, die „negative Beeinträchtigung“ versuchen, expliziter zu werden und die Multidimensionalität dessen zu berücksichtigen, was heute als menschliches Wohlergehen (human well-being) bezeichnet wird. Die Idee des menschlichen Wohlergehens ist zwar eingängig, aber schwer zu konzeptionieren und erfreut sich daher in den vergangenen ca. 20 Jahren einer umfassenden Untersuchung, die hier zusammen zu fassen nicht möglich ist (eine systematische Übersicht findet sich in Gasper (2004)). Es soll hier nur auf die Multidimensionalität rekurriert werden, wobei wir uns der vom Beirat vorgegeben Klassifikation der „menschlichen Armutsdimensionen“ bedienen werden.

Im folgenden Abschnitt werden wir zunächst das Konzept darlegen und seine mathematischen Grundlagen erläutern. Die Abschnitte 3-5 widmen sich dann der Umsetzung in den beiden Beispielregionen Burkina Faso und Nordost-Brasilien³: während in Abschnitt 3 die Expositionen, also die zu analysierenden Störungen kurz diskutiert werden, wird in Abschnitt 4 die Vulnerabilitätsmatrix bestimmt. Der daran anschließende Abschnitt 5 widmet sich der Frage, wie aus den in Abschnitt 4 gewonnenen Ergebnissen, Implikationen für mögliche Maßnahmen zur Minderung der Vulnerabilität gewonnen werden können. Hier muss betont werden dass die Daten, die zur Abschätzung der Vulnerabilitäten herangezogen wurden, nur begrenzt belastbar erscheinen. Daher zielt Abschnitt 5 auf die Darlegung einer Methodik und weniger auf die Bewertung oder gar Empfehlung einzelner Maßnahmen ab. Schließlich fasst Abschnitt 6 die Ergebnisse kurz

³ Während Burkina Faso als Region vom Beirat vorgeschlagen wurde, hat sich die Ausdehnung auf Nordost-Brasilien aus den Arbeiten der Potsdamer Arbeitsgruppe im Rahmen eines DFG Projekts ergeben.

zusammen und gibt einen Ausblick, auch und gerade im Hinblick auf die weitere Forschung auf dem Feld der Vulnerabilität und den möglichen Lehren hierfür aus der hier vorliegenden Studie.

2 Grundlagen eines differenziellen Vulnerabilitätskonzepts

Das Hauptanliegen dieser Studie liegt darin, ein Konzept für die Berücksichtigung multipler Stressfaktoren für das menschliche Wohlbefinden zu entwickeln und erstmals zur Anwendung zu bringen. Als Stressfaktoren sollen insbesondere verschiedene Umweltveränderungen betrachtet werden, die es in der Umsetzungsphase zu spezifizieren gilt. Für die Formulierung des mathematischen Konzepts des Ansatzes genügt es hier zunächst, diese Faktoren abstrakt zu betrachten. Im Folgenden sind sie als *Umweltdimensionen* bezeichnet. Ebenso sollen auch die einzelnen Faktoren, die menschliches Wohlergehen bestimmen zunächst unspezifiziert bleiben – auch um die für das formale Konzept nicht notwendige Diskussion über diese Faktoren zu vermeiden. Wir wollen sie im Folgenden als *Armutsdimensionen* bezeichnen. Bisweilen werden allerdings Beispiele für die Illustration des Ansatzes gebraucht ohne dies jedoch als Vorgriff auf eine Festlegung auf die genannten Güter verstehen zu wollen. Als räumliche Skala für die Analysen wird eine Mikroregion oder auch eine soziale Gruppe angenommen. Die Betrachtung erfolgt dynamisch, so dass sich die zeitliche Skala aus der Analyse selbst ermittelt.

Einige der Maßnahmen, mit denen die von Veränderungen in den Umweltdimensionen betroffene Bevölkerung auf die Auswirkungen auf ihre Armutsdimensionen reagiert und diese zu bewältigen versucht, können wiederum die Umweltdimensionen selbst beeinflussen. So können etwa landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmethoden umgestellt werden, um den Ertragsverlust durch Klimaveränderungen oder Bodendegradation aufzufangen. Andererseits verändert sich durch diese Umstellung aber auch der Druck auf den Boden selbst, aber auch auf Biodiversität oder Wasserverfügbarkeit. Mit anderen Worten, das gekoppelte System zwischen Mensch und Umwelt schließt die Armutsdimensionen und Umweltdimensionen zumindest teilweise ein und bildet somit ein gekoppeltes dynamisches System, das auch in der Literatur vermehrt als Analyseeinheit für eine Vulnerabilitätsbetrachtung diskutiert wird (Turner II et al. 2003)..

Wie lassen sich nun im Falle eines solchen Systems Maße dafür definieren, wie weit sich eine Veränderung einer Umweltdimension in Änderungen der einzelnen Armutsdimensionen niederschlägt? An dieser Stelle kann uns die Mathematik weiterhelfen, die zunächst ohne weitere Interpretation zum Einsatz kommen soll und erst in den folgenden Abschnitten mit konkreten Inhalten gefüllt werden soll, wobei leider festzustellen sein wird, dass aufgrund der Datenlage der ideal vorgegebene Weg zur Beschreibung einer differenziellen Vulnerabilität nicht gangbar ist. Daher wird auf ein einfacheres, indikatorenbasiertes Verfahren ausgewichen, das in den beiden Fallstudienregionen Verwendung fand.

2.1 Verallgemeinerte, systemtheoretische Grundlage

Auf einer regionalen Skala sind die wechselwirkenden Prozesse zwischen Mensch und Umwelt eingebettet in globale Veränderungen, die im Folgenden mit F bezeichnet seien. Die Gesamtheit der Armutsdimensionen wird durch den Vektor s bezeichnet, dessen einzelne Komponenten s_1, s_2, \dots, s_n die einzelnen Armutsdimensionen symbolisieren. Schließlich sind die regionalen Umweltveränderungen mit dem Vektor f bezeichnet, wobei hier die einzelnen Umweltveränderungen durch die Komponenten f_1, f_2, \dots, f_m repräsentiert seien. Der Vektor f schließt neben den regionalen Ausprägungen der globalen Umweltveränderungen auch die allein durch regionale Ursachen hervorgebrachten Veränderungen in den Umweltdimensionen ein. Weiterhin wird angenommen, dass sich globale Veränderungen zunächst in regionale Umweltveränderungen übersetzen und erst diese eine Auswirkung auf einzelne Armutsdimensionen haben. Formal lässt sich dies schreiben als

$$\begin{aligned} s_i(t) &= G_i[f, s](t), & i = 1, 2, \dots, n \\ f_i(t) &= H_i[s, f; F](t), & i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

Die eckigen Klammern weisen darauf hin, dass es sich um so genannte Funktionalgleichungen handelt, d.h. nicht der Wert einer Größe in den Klammern zu einem bestimmten Zeitpunkt t ist entscheidend, sondern der gesamte Zeitverlauf. Hiermit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich die Auswirkungen einer Veränderung, etwa einer Dürre, unter Umständen erst sehr viel später bemerkbar machen und langfristige Folgen hervorrufen können. Man beachte, dass auf diese Art und Weise die Rückkopplungen von s auf sich selbst zwar berücksichtigt, aber in dem Funktional \mathbf{G} quasi „versteckt“ sind.

Im Allgemeinen ist es nicht möglich, die Funktionale \mathbf{G} und \mathbf{H} vollständig zu bestimmen. Daher geht es im Folgenden darum, die *allgemeine systemanalytische Beschreibung* - die die möglichen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des regionalen Mensch-Umwelt Systems formal beschreibt - zu nutzen, um einen Ansatz für eine differenzielle Vulnerabilitätsanalyse zu gewinnen.

Die differenzielle Vulnerabilität soll die Veränderungen in *einer* Armutsdimension gegenüber Veränderungen *einer* Umweltdimension beschreiben, unter der Annahme, dass alle anderen Umweltdimensionen unverändert bleiben. Der gewählte lineare Ansatz, der bei nicht zu großen Störungen Gültigkeit besitzt, erlaubt es dann durch die entsprechende Kombination dieser Einzelvulnerabilitäten ein Gesamtmaß für die Veränderung in den Armutsdimensionen zu bestimmen.

Um eine lineare Näherung zu ermöglichen wird eine Referenzdynamik $\mathbf{X}^0 = (\mathbf{f}^0, \mathbf{s}^0, \mathbf{F}^0)$ eingeführt, die beispielsweise einer Entwicklung ohne globale Umweltveränderungen entsprechen kann und aus historischen Betrachtungen gewonnen werden kann. In einem ersten Schritt gilt es zunächst die Funktionalgleichungen durch ein passendes System „konventioneller“ Gleichungen anzunähern. Hierzu werden die Trajektorien für die einzelnen Größen $\mathbf{f}(t)$, $\mathbf{s}(t)$ und $\mathbf{F}(t)$ diskretisiert, indem nur die Werte zu n verschiedenen Zeitpunkten betrachtet werden. Somit wird jede einzelne Komponente ihrerseits durch einen Vektor beschrieben, d.h. beispielsweise für die erste Komponente der Umweltdimension 1 erhält man:

$$f_i(t) \approx (f_i(t_1), f_i(t_2), \dots, f_i(t_n)). \quad (2)$$

Dies ist beispielweise auch dadurch zu rechtfertigen, dass Informationen über die Trajektorien auch nur für diskrete Zeitpunkte vorliegen. Der Einfachheit halber soll im Folgenden die Bezeichnung \mathbf{f} wieder die auf diese Art und Weise diskretisierte Gesamtheit der regionalen Umweltdimensionen bezeichnen. Analoges gilt auch für \mathbf{s} und \mathbf{F} und die Referenzdynamik \mathbf{X} . Für eine dieser Referenzdynamik ähnliche Entwicklung in den Armutsdimensionen, \mathbf{s} , lässt sich dann auf der Basis der Gleichung (1a) formulieren:

$$\mathbf{s} - \mathbf{s}^0 = \underline{\mathbf{U}} (\mathbf{f} - \mathbf{f}^0) + \underline{\mathbf{B}} (\mathbf{s} - \mathbf{s}^0) \quad (3)$$

mit den Elementen

$$u_{ik,jl} = \left. \frac{\partial G_i}{\partial f_j(t_l)} \right|_{\mathbf{X}^0(t_k)} \quad \text{und} \quad b_{ik,jl} = \left. \frac{\partial G_i}{\partial s_j(t_l)} \right|_{\mathbf{X}^0(t_k)}. \quad (4)$$

Dabei ist darauf zu achten, dass die sich auf die Zeitpunkte beziehenden Indizes l und k jeweils mit den entsprechenden Komponenten der Vektoren \mathbf{f} und \mathbf{s} identisch sind die ihrerseits die Zeitpunkte beschreiben. Die Gleichung lässt sich nach $\mathbf{s} - \mathbf{s}^0$ auflösen und man erhält:

$$\mathbf{s} - \mathbf{s}^0 = (\mathbf{1} - \underline{\mathbf{B}})^{-1} \underline{\mathbf{U}} (\mathbf{f} - \mathbf{f}^0) = \underline{\mathbf{V}} (\mathbf{f} - \mathbf{f}^0) \quad (5)$$

wobei $\mathbf{1}$ die Einheitsmatrix bezeichnet, in der die Diagonalelemente 1 und alle anderen Elemente 0 sind.

Aus dieser formalen Herleitung ist ersichtlich, dass in der Nähe einer Referenzdynamik – im sogenannten linearen Bereich – Armuts- und Umweltdimensionen durch eine *Vulnerabilitätsmatrix* $\underline{\mathbf{V}}$ miteinander in Verbindung gesetzt werden können und somit die \mathbf{G} -Funktionalgleichungen aus (1) durch Linearisierung und zeitliche Diskretisierung in eine Matrixgleichung übergehen. Dabei gibt ein einzelnes Matrixelement an, wie sich eine Armutsdimension zu einem bestimmten Zeitpunkt gegenüber der Referenz ändert, wenn sich die Umwelt zu einem bestimmten – im allgemeinen anderen – Zeitpunkt ändert bzw. geändert hat.

2.2 Begriffsklärungen

Die mathematische Formulierung von Vulnerabilität gemäß Gleichung (5) erlaubt es nun, die in der Literatur verwendeten Konzepte einer Vulnerabilitätsanalyse für die hier vorliegende Studie genauer zu spezifizieren. Die folgenden Begriffe sind dabei zu nennen:

- *Exposition* ist die spezifische Störung, die auf das System wirkt, beispielsweise eine Änderung der klimatischen Bedingungen. In der mathematischen Formulierung ist die Exposition durch $f - f^0$ gegeben.
- *Sensitivität* beschreibt die Stärke der Auswirkung einer Exposition auf eine Armutsdimension, wenn keine expliziten Maßnahmen zur Bewältigung getroffen werden. Die Sensitivität ist in Gleichung (5) durch die Matrix \underline{U} beschrieben und formal durch die partiellen Ableitungen des Operators G nach den einzelnen Expositionsfaktoren bestimmt. Es sei daran erinnert, dass G die Entwicklung der einzelnen Armutsdimensionen in Abhängigkeit von Umweltdimensionen und Armutsdimensionen selbst beschreibt.
- *Bewältigungskapazität* als Bestandteil der Vulnerabilität beschreibt die Fähigkeit der betroffenen Gruppen oder Akteure, durch endogene Reaktionen, z. B. Einkommensdiversifikation oder Produktionsumstellung, die Folgen einer Exposition dynamisch abzufangen. Hier ist also die endogene Anpassung gemeint. Die exogene Anpassung, d. h. Anpassungsmaßnahmen, die über individuelle Aktivitäten hinausgehen (z. B. nationale Entwicklungsprogramme), sind in der Modellanalyse nicht explizit berücksichtigt. Sofern die Bewältigung auf eine Modifikation der Umweltbedingungen abzielt, beispielsweise durch Veränderung der landwirtschaftlichen Anbaumethoden, wird die Bewältigung durch die Matrix \underline{B} beschrieben, die als $(\mathbf{1}-\underline{B})^{-1}$ in die Berechnung der Vulnerabilität eingeht.
- *Vulnerabilität* beschreibt den Zusammenhang zwischen einer Exposition und ihrem Impact, d.h. sie ist durch die einzelnen Elemente der Matrix \underline{V} gegeben. Der durch eine bestimmte Exposition verursachte Impact ist umso größer, je höher die Vulnerabilität ist. Die Gesamtvulnerabilität wird gemäß Gleichung (5) als Matrixprodukt aus Sensitivität und fehlender Bewältigungskapazität berechnet.
- *Impact* erfasst die Folgen einer Exposition auf eine bestimmte Armutsdimension. Der Impact kann beispielsweise eine Erhöhung der Einkommensarmut oder der Unterernährung sein. Der Impact wird durch Exposition und Vulnerabilität bestimmt. In Gleichung (5) ist der Impact durch $s - s^0$ beschrieben.

Da die Operatoren G und H nicht bekannt sind, ist es nicht möglich, die Matrizen aus Gleichung (3) direkt zu berechnen. Im folgenden Abschnitt werden daher zwei Methoden diskutiert, die Abschätzungen der Matrix liefern können. Zunächst sollen aber die in dieser Studie verwendeten Begriffe exakt definiert werden.

2.3 Operationalisierung des Matrixkonzepts

Zwei prinzipielle Möglichkeiten zur Bestimmung der Vulnerabilitätsmatrix V sind die *multiple Regressionsanalyse* und ein *prozessbasiertes Indikatorverfahren*, beide werden im folgenden vorgestellt. Welches der beiden Konzepte in einer konkreten Anwendung zu verfolgen ist, hängt von diversen Faktoren ab, insbesondere: wie gut ist die Datenlage; existieren Zeitreihen der wichtigsten Basisdaten; soll eine ex-post oder eine ex-ante Analyse verfolgt werden; liegen qualitative Prozessinformationen vor. Im Folgenden sollen beide Konzepte vorgestellt werden, in den beiden Fallstudienregionen kann dann nur das Indikatorverfahren realisiert werden (Abschnitt 3 und 4).

Multiple Regressionsanalyse

Im Grunde stellt Gleichung (5) einen idealen Ausgangspunkt für eine multiple Regressionsanalyse dar. Hat man ausreichend Daten für Armutsdimensionen und Umweltdimensionen zu verschiedenen Zeitpunkten, so lassen sich nach Bestimmung eines geeigneten Referenzzeitraumes die Matrixkoeffizienten von V aus einer statistischen Analyse dieser Zeitreihen gewinnen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Veränderung in einer Armutsdimension zu einer bestimmten Zeit aus den Veränderungen der Umweltdimensionen zu mehreren,

u.U. sehr lange zurück reichenden Zeitpunkten errechnet. Dies trägt der Forderung nach einer adäquaten Berücksichtigung der Zeitskalen im System Rechnung und das Verfahren stellt sogar eine Möglichkeit dar, die relevanten Zeitskalen zu identifizieren: die diese Zeitverschiebungen beschreibenden Koeffizienten werden sich als besonders signifikant herausstellen. Auch kann durch eine auf Gleichung (3) basierende Analyse nach Sensitivität und (umweltorientierter) Bewältigung unterschieden werden.

Die multiple Regression stellt eine ex-post Analyse dar, d.h. es werden Zeitreihen der jüngsten Entwicklung analysiert. Zum Einen können aus so einer ex-post Studie Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wo in der jüngeren Zeit Veränderungen in der einen oder anderen Umweltdimension Bedeutung für menschliches Wohlergehen hatte, zum anderen können aber auch Folgerungen über die Bedingungen wann dies der Fall sein kann. Schließlich stellt unter der Annahme, dass die durch die Koeffizienten dargestellte Sensitivität und Bewältigungskapazität der betroffenen Menschen sich in allernächster Zukunft nicht ändern, jedes Matrixelement ein Maß dafür dar, wie sich die zukünftige Veränderung der jeweiligen Umweltdimension in einer Veränderung der jeweiligen Armutsdimension niederschlagen wird. Die Gesamtheit aller einzelnen Regressionskoeffizienten bildet schließlich die sogenannte *Vulnerabilitätsmatrix*.

Zwar lässt sich diese Vorgehensweise anhand von „fiktiven“ aus konzeptionellen Modellen gewonnen Daten nachvollziehen (z.B. das Modell zum Sahel-Syndrom in Petschel-Held et al. 1999), doch sind die für die beiden Fallstudienregionen vorliegenden Daten nicht ausreichend. Allgemein besteht ein Mangel an geeigneten Daten zur Beschreibung der Armutsdimensionen Boden und Biodiversität, was angesichts der politischen Brisanz beider Themen besonders unangenehm auffällt. Generell ist ein unzureichende Informationsbasis in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Änderungen zu konstatieren. Aus diesem Grunde muss eine andere Vorgehensweise gewählt werden, die sich zwar am Konzept der Vulnerabilitätsmatrix orientiert, diese aber nicht direkt aus einer Multiregressionsanalyse bestimmt, sondern indirekt mit Hilfe von Indikatoren. Gleichwohl wird am PIK in Bereichen mit besserer Datenlage für einen anderen Kontext derzeit versucht, die multiple Regressionsanalyse in diesem Zusammenhang zum Einsatz zu bringen.

Prozessorientiertes Indikatorverfahren

Der Multiregressionsanalyse als ein statistisches Verfahren zur Bestimmung der Vulnerabilität kann ein prozessbasiertes Verfahren gegenüber gestellt werden. Dieses geht zunächst von konkreten Vorstellungen der Prozesse ausgeht, die zu einer Vulnerabilität einer Armutsdimension gegenüber einer bestimmten Umweltdimension führen. Auf diese Weise werden somit die Determinanten für einzelne Matrixelemente bestimmt. Hierbei soll unterschieden werden zwischen

- der Sensitivität, d.h. den Prozessen, die generell eine Beeinflussung der Armutsdimension hervorrufen und
- der Bewältigung, mit der die betreffenden Akteure auf eine Veränderung der Umweltdimension reagieren und so die Minderung der negativen Auswirkungen der Veränderungen der jeweiligen Armutsdimensionen zu verhindern suchen.

Sowohl die Sensitivität als auch die Fähigkeit zur Bewältigung sind abhängig von zahlreichen naturräumlichen und sozio-ökonomischen Faktoren vor Ort. So können z.B. im Falle eines ausreichenden alternativen Einkommens Ernteauffälle aufgefangen werden und durch Zukäufe am Markt kompensiert werden. Die vorliegende Arbeit versucht daher, auf der Basis von Prozessvorstellungen einzelner Matrixelemente, die Sensitivität *und* die Bewältigungsfähigkeit durch verfügbare Daten zu indizieren. Der Komplexität der jeweiligen Prozesse muss durch eine adäquate Aggregation der Indikatoren Rechnung getragen werden.

Während in einem Multiregressionsverfahren die Matrixelemente ohne weitere Annahmen aus den Daten der Vektoren s - s^0 und f - f^0 abgeleitet würden, müssen im vorliegenden Verfahren umfangreiche Annahmen über Prozesse getroffen werden, die zu den einzelnen Matrixelementen beitragen. Aus den Gleichungen (3) und (4) zur systemanalytisch basierten Bestimmung der Matrixelemente lässt sich der Charakter dieser Prozesse ablesen: Unter der Bedingung, dass alle übrigen Armut- und Umweltdimensionen konstant bleiben, ist nach jenen Mechanismen zu fragen, die eine Variation einer einzelnen Umweltdimension in eine Änderung einer

bestimmten Armutsdimension überführen können. Auf der Basis der jeweils spezifizierten Prozessannahmen und mit Hilfe der *ceteris-paribus*-Bedingung kann in einem zweiten Schritt eine *Indizierung* des jeweiligen Matrixelementes auf der Basis statistischer Daten versucht werden, wobei zunächst zwischen Sensitivität und Bewältigung differenziert wird und die beiden jeweils resultierenden Teil-Indikatoren in einem nächsten Schritt zusammengeführt werden. Das genaue Vorgehen wird anhand eines Beispiels für Burkina Faso im nächsten Abschnitt (3.2.1) erläutert.

3 Exposition

Eigentlich müsste hier ein konsistenter Satz von Expositions-Szenarien entwickelt werden. Dies würde allerdings den Rahmen dieser Studie übersteigen, so dass hier nur eine grobe synoptische Zusammenschau der in der Literatur diskutierten Szenarien wiedergegeben wird. Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie soll auf der Vulnerabilitätsanalyse (Abschnitt 4) und der Entwicklung von Maßnahmen zur Minderung der Vulnerabilität (Abschnitt 5) liegen.

In diesem Abschnitt sollen die Erwartungen an zukünftige Umweltveränderungen für Burkina Faso und NO-Brasilien anhand von gängigen Szenarien für die vier Umweltdimensionen dargestellt werden. Ziel ist dabei nicht, quantitative Szenarien für jede Armutsdimension zu erstellen, sondern vielmehr Aussagen über die relative Bedeutung der Armutsdimensionen insgesamt zu ermöglichen.

3.1 Burkina Faso

Klima: Die Veränderung der Umweltdimension Klima wird ausgehend von Simulationen globaler Zirkulationsmodelle diskutiert, wie sie dem Dritten Sachstandsbericht (TAR) des IPCC zugrunde liegen (IPCC 2001). Trotz aller Unsicherheiten bezüglich der Wahl der Klimamodelle und der Szenarien scheint sich für Westafrika abzuzeichnen, dass bis zum Jahr 2050 die Mittelwerte von Jahresniederschlägen leicht zunehmen, während sich die Jahresmitteltemperatur gleichzeitig leicht erhöht. Überschlagsrechnungen zeigen, dass sich die Zunahme der Niederschläge und die mit der Temperaturerhöhung verbundene Zunahme der Evapotranspiration in etwa kompensieren und somit der Mittelwert des insgesamt verfügbaren Wassers unverändert bliebe. Die im TAR generell vorausgesagte Zunahme der Variabilität des Niederschlags bedeutet allerdings für Burkina Faso eine eventuelle Erhöhung der Gefahr von Dürren und Unwettern. Jedoch sind Aussagen über diesen generellen Trend hinaus aufgrund der großen Unsicherheit der Modelle gerade im Hinblick auf die intra- und interannuelle Variabilität des Niederschlags nicht möglich.

Wasserverfügbarkeit: Gemäß den oben angeführten gängigen IPCC-Szenarien kann erwartet werden, dass sich in Burkina Faso die gesamte mittlere Wasserverfügbarkeit aufgrund des anthropogenen Treibhauseffekts in den nächsten Jahrzehnten kaum verändert. Allerdings ist es sehr wahrscheinlich, dass die Menge des pro Kopf verfügbaren Trinkwassers in den nächsten Jahren aufgrund von Bevölkerungswachstum (derzeitige jährliche Wachstumsrate 2,7%), Änderung der Konsumgewohnheiten und zunehmender landwirtschaftlicher und industrieller Wassernutzung abnehmen wird, so dass eine mangelnde Wasserverfügbarkeit die Lebensumstände sicher stärker beeinträchtigt als die Klimaveränderung allein.

Boden: Die häufigsten Arten von Bodendegradation in Burkina Faso sind Wasser- und Winderosion, wobei erstere in den südlichen und letztere in den nördlichen Landesteilen dominiert. Sowohl die GLASOD-Studie zur weltweiten anthropogenen Bodendegradation (Oldeman et al. 1990) als auch jüngere Studien (SP-CONAGESE 2002, Gray & Kevane 2001) geben eine weite Verbreitung und Schwere dieser Degradationsarten an und nennen als Ursachen vor allem die unangepasste landwirtschaftliche Nutzung als Acker oder Weide und die Entwaldung. Zumindest gegenwärtig stellt die Bodendegradation die wichtigste Umweltveränderung dar (WBGU, pers. com. 2004). Da zu erwarten ist, dass sich die genannten Ursachen in Zukunft nicht abschwächen werden und besser angepasste Landnutzungstechniken sich nur langsam ausbreiten, dürfte Bodendegradation auch zukünftig das größte Umweltproblem von Burkina Faso bleiben.

Biodiversität: Die Ursachen, die zum Verlust von Biodiversität in Burkina Faso führen können, umfassen zum einen klimatisch bedingte Verschiebungen von Habitaten und zum anderen direkte menschliche Eingriffe in Ökosysteme wie Ackerbau, Weidenutzung, Buschfeuer und die Entnahme von biologischen Ressourcen durch Sammeln oder Jagd. Der offizielle Bericht zum Zustand der Umwelt von Burkina Faso (SP-CONAGESE 2002) und der offizielle Bericht für die Convention on Biological Diversity (SP-CONAGESE 1999) weisen verschiedene Bereiche der Nutzung der biologischen Diversität als wichtig aus, vor allem landwirtschaftliche Nutzpflanzen und -tiere, Brenn- und Bauholz, Medizinalpflanzen und die Tier- und Pflanzenwelt der Nationalparks und Reservate. Aufgrund der immer noch großen Unsicherheit im Hinblick auf die Wirkungsweisen des Biodiversitätsverlustes auf menschliches Wohlergehen, ist es sehr schwierig, die relative Exposition in der nächsten Zukunft abzuschätzen.

Zusammenfassung: Zusammenfassend lässt sich auf der Basis der obigen Szenarien und der zugehörigen Fallstudien-Literatur sagen, dass für die Umweltdimensionen *Wasserverfügbarkeit* und *Bodenqualität* in der nahen Zukunft in Burkina Faso die größten und auch bedrohlichsten Veränderungen zu erwarten sind.

3.2 NO-Brasilien

Klima: Die Exposition NO-Brasiliens gegenüber Veränderungen der Umweltdimension Klima wird ausgehend von den Ergebnissen des Dritten Sachstandsberichts des IPCC für die Region Südamerika (IPCC 2001) in grundlegenden Zügen umrissen. Modellunabhängig ist zunächst eine deutliche Zunahme der Jahresmitteltemperatur zu erwarten. Demgegenüber zeigen jedoch die einzelnen Modelle variable Veränderungen im Niederschlagsverhalten. Darunter ist in zwei Modellen eine abnehmende Niederschlagstätigkeit erkennbar (HAD3, CGCM2), während sie in NCAR zunimmt und in CSIRO unverändert bleibt. Insgesamt zeichnet sich ein leichter abnehmender Trend der Jahresniederschläge ab, der auch anhand regionaler Modelle von Gerstengarbe & Werner (2003) bestätigt wird. Im Zusammenhang mit der erhöhten Jahresmitteltemperatur steht eine zunehmende Evapotranspiration, die vor allem bei verringerten Jahresniederschlägen auf eine geringere Wasserverfügbarkeit hinweist. Zusätzlich bedeutet die im IPCC-Bericht (2001) genannte Zunahme der Klimavariabilität ähnlich wie in Burkina Faso eine Häufung von bereits regelmäßig auftretenden Dürren in NO-Brasilien.

Wasserverfügbarkeit: Basierend auf den IPCC-Klimaszenarien für Südamerika (IPCC 2001) und regionalen Studien (Voerkelius et al. 2003) kann für NO-Brasilien von einer insgesamt abnehmenden Wasserverfügbarkeit für die nächsten Jahrzehnte ausgegangen werden. Unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums von durchschnittlich 2%, einer weiteren Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion und der Ausrichtung ruraler Lebensgewohnheiten an städtischem Niveau ist zu erwarten, dass sich die Verfügbarkeit sowohl an Haushaltswasser als auch an landwirtschaftlichem Nutzwasser in zunehmendem Maße verschlechtern wird.

Boden: Bodendegradation tritt in NO-Brasilien vor allem in Form von Wassererosion und Versalzung auf. Dazu weisen sowohl globale Studien zur anthropogenen Bodendegradation (Oldeman et al. 1990, Eswaran et al. 1999) als auch regionale Untersuchungen (Instituto Desert 2003) auf starke Erosionsschäden in NO-Brasilien hin. Als Ursachen gelten in erster Linie die intensive Landnutzung, unangepasste Bewässerungssysteme und Entwaldungsprozesse. Dabei bezieht die landwirtschaftliche Nutzung immer marginalere Gebiete mit ein, die von hohen Reliefenergien und flachgründigen Böden geprägt sind (Mutter 1991: 368, Gomes 2001). Da bodenschonende Maßnahmen in der Regel nicht in genügendem Umfang zur Anwendung gelangen (Lemos 2001: 407), schreitet die Bodendegradation schnell voran. Auch in Zukunft ist bei einer wachsenden Bevölkerung damit zu rechnen, dass der Produktionsdruck auf den Boden zunehmen wird und daher ein hohes Risiko für weitere Bodendegradation gegeben ist.

Biodiversität: Besonders die intensive Landnutzung und der Klimawandel beeinträchtigen in NO-Brasilien die biologische Vielfalt. Neben der anthropogen bedingten Erosion, der Versalzung von Böden und der Brennholzgewinnung sind veränderte Niederschlagsmuster und damit einhergehende

Desertifikationsprozesse als Hauptursachen degradierender Böden, Vegetationsbestände und Gewässer zu nennen (Governo de Pernambuco 2002). Dabei sind die Bundesstaaten Pernambuco und Ceará in weiten Bereichen bereits stark bis sehr stark degradiert, während Piauí aufgrund geringerer Bevölkerungs- und Nutzungsdichten weniger stark degradiert ist, jedoch eine hohe Anfälligkeit gegenüber einem Verlust an Biodiversität aufweist (MMA 1998).

Als Reaktion auf die Rio Konferenz 1992 wurden zwei wesentliche Programme zum Erhalt der Biodiversität in Brasilien gegründet: Das Nationale Biodiversitäts-Programm PRONABIO und der brasilianische Biodiversitäts-Fonds FUNBIO. Beide vereinen die Leistungen staatlicher, privater, akademischer Akteure und NROs zur Formulierung einer nationalen Strategie zum Schutz der Biodiversität. Des Weiteren trägt der Plano Nacional de Combate a Desertificação (MMA 1998) dazu bei, Ursachen für den Verlust biologischer Vielfalt zu identifizieren und Handlungsoptionen zu deren Erhalt aufzuzeigen. Inwieweit diese Maßnahmen in NO-Brasilien Wirkung zeigen und die Exposition gegenüber Biodiversitätsverlust mitbestimmen werden, kann hier kaum ermessen werden.

Zusammenfassung: Aus den Betrachtungen zur Exposition gegenüber den einzelnen Umweltveränderungen lässt sich ableiten, dass in NO-Brasilien wahrscheinlich vor allem weniger Wasser verfügbar sein wird und die Qualität der Böden als landwirtschaftlicher Produktionsfaktor abnimmt.

4 Vulnerabilität

In diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 2 vorgestellte Verfahren zur Bestimmung einer differenziellen Vulnerabilität für die beiden Beispielregionen Burkina Faso und Nordost-Brasilien umgesetzt. Wie bereits angedeutet sind für keine der beiden Regionen ausreichend Daten für das multiple Regressionsverfahren vorhanden, so dass das prozessbasierte Indikatorverfahren zum Einsatz kommt.

4.1 Anwendung und Ergebnisse für Burkina Faso und NO-Brasilien

Aufgrund der Datenlage in den beiden Fallstudienregionen war ein idealtypisches multiples Regressionsverfahren zur Bestimmung der Vulnerabilitätsmatrix nicht möglich. Deshalb fand das prozessorientierte Indikatorverfahren Anwendung. Dabei müssen zunächst die wesentlichen Prozesse identifiziert werden, die Änderungen in den Umweltdimensionen mit Änderungen in den Armutsdimensionen verknüpfen und die somit Sensitivität und Bewältigungsfähigkeit bestimmen. Die relative Stärke dieser Prozesse – d.h. die Größe der einzelnen Elemente der Vulnerabilitätsmatrix – werden durch statistische Daten auf subnationaler Ebene für die 1990er Jahre indiziert. Dabei wird generell zwischen Prozessen, die die Sensitivität beeinflussen und Prozessen, die die Bewältigungsfähigkeit beeinflussen, unterschieden. Im folgenden werden – getrennt für beide Fallstudienregionen – für jedes der 20 Matrixelemente (vier Umweltdimensionen mal fünf Armutsdimensionen) die wesentlichen Prozesse, die zugehörigen Indikatoren und deren Zusammensetzung zu Gesamtindikatoren beschrieben.

Es ist dabei generell vorzuschicken, dass durch die begrenzte räumliche Auflösung der zur Verfügung stehenden statistischen Daten (Provinzebene bzw. Munizipebene) Inhomogenitäten innerhalb der Provinzen bzw. Munizipe natürlich nicht analysiert werden können. Das hat zur Folge, dass bedeutende Disparitäten z.B. zwischen arm und reich, zwischen den Geschlechtern oder auch zwischen verschiedenen ethnischen Gruppen aus dem Blickfeld geraten (vgl. Reardon & Taylor 1996). Obwohl eine solche differenziertere Untersuchung nicht möglich war, kann aber davon ausgegangen werden, dass die im folgenden als vulnerabel ausgewiesenen Provinzen robust gegenüber den durch die Datenauflösung auftretenden Unsicherheiten sind.

4.1.1 Burkina Faso

Zunächst soll das generelle Schema der Indizierung der Matrixelemente anhand eines Beispiels vorgestellt werden: der Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation. Danach werden die

Grundlagen der Indizierung aller Matrixelemente vorgestellt, die zugehörigen Karten befinden sich im Anhang.

Der Gesamtindikator für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation, $v_{n,b}$, setzt sich für Burkina Faso aus sieben Indikatoren zusammen:

$$v_{n,b} = (e_a + (1 - |G_0 - \bar{G}|) + B_{\text{deg}}) \cdot ((1 - E) + (1 - V) + d_m + (1 - a_\alpha))$$

mit	e_a	Anteil des landwirtschaftlichen Einkommens am gesamten monetären Einkommen
	\bar{G}	durchschnittlicher Selbstversorgungsgrad der Provinz mit Grundnahrungsmitteln
	G_0	erforderliche Versorgungsmenge mit Grundnahrungsmitteln
	B_{deg}	Schwere der Bodendegradation
	E	Gesamteinkommen pro Person
	V	gesamter Viehbestand pro Person
	d_m	durchschnittliche Entfernung zum nächstgelegenen Markt
	a_α	Alphabetisierungsrate

Zunächst zur formalen Struktur des Vulnerabilitäts-Gesamtindikators: die Verknüpfung der Sensitivitätsindikatoren (erste Klammer) und der Bewältigungsindikatoren (zweite Klammer) zu einem Gesamtindikator erfolgt in jedem Matrixelement nach dem gleichen Prinzip:

- (1) z-Transformation aller Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren (d.h. lineare Transformation von $[\min, \max]$ auf $[0, 1]$, wobei "min" bzw. "max" den jeweils kleinsten bzw. größten Wert des Indikators innerhalb der Gesamtheit der Provinzen bezeichnet)⁴
- (2) Addition aller Sensitivitätsindikatoren und Addition aller Bewältigungsindikatoren (teilweise gehen von eins subtrahierte Indikatoren in die Summe ein⁵, so dass generell große Werte der Terme in der Summe der Sensitivitätsindikatoren große Sensitivitäten bedeuten und große Werte der Terme in der Summe der Bewältigungsindikatoren geringe Bewältigungsfähigkeit bedeuten).
- (3) Multiplikation der Summe der Sensitivitätsindikatoren mit der Summe der Bewältigungsindikatoren.
- (4) z-Transformation des resultierenden zusammengesetzten Indikators zum Gesamtindikator, der dann wieder zwischen 0 und 1 liegt.

Die Addition (2) entspricht einer ODER-Verknüpfung und soll die parallele Wirksamkeit innerhalb der Sensitivitäten und die Austauschbarkeit innerhalb der Bewältigungsmöglichkeiten widerspiegeln. So erhöht sich beispielsweise die Sensitivität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation gleichermaßen durch eine größere Abhängigkeit vom landwirtschaftlichen Einkommen, einer zunehmenden Abweichung des Selbstversorgungsgrads von der erforderlichen Grundversorgungsmenge und einer zunehmenden Schwere der derzeitigen Bodendegradation. In diesem Sinne steigt die Sensitivität der Regionen daher im ersten *oder* im zweiten *oder* im dritten Fall. Die Multiplikation (3) entspricht einer UND-Verknüpfung in dem Sinne, dass bei verschwindender Sensitivität oder bei perfekter Bewältigungsfähigkeit (d.h. alle Bewältigungsindikatoren maximal) keine Vulnerabilität der entsprechenden Provinz zu erwarten ist. Auf eine zusätzliche Gewichtung der einzelnen Indikatoren oder kompliziertere funktionale Zusammenhänge wurde bei der Zusammensetzung verzichtet, da die einfache Addition und Multiplikation eine robuste Indizierung in erster Näherung lieferte.

⁴ Einzige Ausnahme: Der durchschnittliche Selbstversorgungsgrad \bar{G} unterliegt einer "zweiseitigen" z-Transformation, so dass $|G_0 - \bar{G}| = 1$ für $\bar{G} = \min$ und $|G_0 - \bar{G}| = 1$ für $\bar{G} = \max$.

⁵ Einzige Ausnahme: im Fall des durchschnittlichen Selbstversorgungsgrads als $1 - |G_0 - \bar{G}|$.

Nun zur inhaltlichen Bedeutung der Indikatoren, getrennt nach Sensitivität und Bewältigung. Den drei Sensitivitätsindikatoren liegen dabei folgende Prozessvorstellungen zugrunde:

- Der Anteil des landwirtschaftlichen Einkommens e_a – die wichtigste Einnahmenquelle in Burkina Faso – am Gesamteinkommen ist sensitiv gegenüber Bodendegradation und somit auch die Möglichkeit, von diesem Teil des Einkommens Grundnahrungsmittel zu kaufen.
- Je größer die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Selbstversorgungsgrad der Provinz mit Grundnahrungsmitteln \bar{G} und der erforderlichen Grundversorgungsmenge G_0 , umso kleiner ist das Risiko aufgrund von Bodendegradation die Versorgung nicht mehr sicherstellen zu können. Für $\bar{G} < G_0$ steigt die Sensitivität mit zunehmendem Selbstversorgungsgrad, für $\bar{G} > G_0$ sinkt die Sensitivität mit zunehmendem Selbstversorgungsgrad.
- Je größer die derzeitige Schwere der Bodendegradation B_{deg} , umso anfälliger sind die Böden für weitere Degradation.

Zu den vier Bewältigungsindikatoren gehören folgende Prozessvorstellungen:

- Je größer das Gesamteinkommen pro Person E , umso eher kann ein Haushalt mit den negativen Auswirkungen von Bodendegradation umgehen.
- Je größer der gesamte Viehbestand pro Person V , umso eher kann ein Haushalt durch den Verkauf von Vieh in Notzeiten die negativen Auswirkungen von Bodendegradation kompensieren.
- Je kleiner die Entfernung zum nächstgelegenen Markt d_m , umso leichter ist bei Nahrungsmittelknappheit infolge von Bodendegradation die Versorgung mit Grundnahrungsmitteln.
- Die Alphabetisierungsrate a_a drückt die Möglichkeit der Menschen aus, durch Zugang zu zusätzlichen Informationen eher Bodendegradation vermeiden zu können und besser mit Bodenveränderungen umgehen zu können.

Abbildung 4.1 zeigt die räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation für Burkina Faso. Man erkennt die höchste Vulnerabilität im Norden des Landes, gefolgt von ‚verstreuten‘ Regionen im Osten und Süden. Verantwortlich dafür ist nicht die Wirkung eines einzelnen Indikators, sondern vielmehr das Zusammenwirken verschiedener Faktoren, besonders wenn Indikatoren Extremwerte aufweisen. So lässt sich hier in erster Linie das gleichzeitige Auftreten bereits stark degradierter Böden und der hohe Anteil der Bevölkerung, der direkt von der Landwirtschaft abhängt, sowie die erschwerte Bewältigungsfähigkeit bei mittleren bis geringen Einkommen als wesentliche Ursache der hohen Vulnerabilität identifizieren. Anhand der vorliegenden Expertenaussagen erscheinen diese Ergebnisse plausibel. Die Unsicherheiten des Gesamtindikators, die aus Datenunsicherheiten der einzelnen Indikatoren resultieren, erreichen Werte zwischen 9% und 24%.

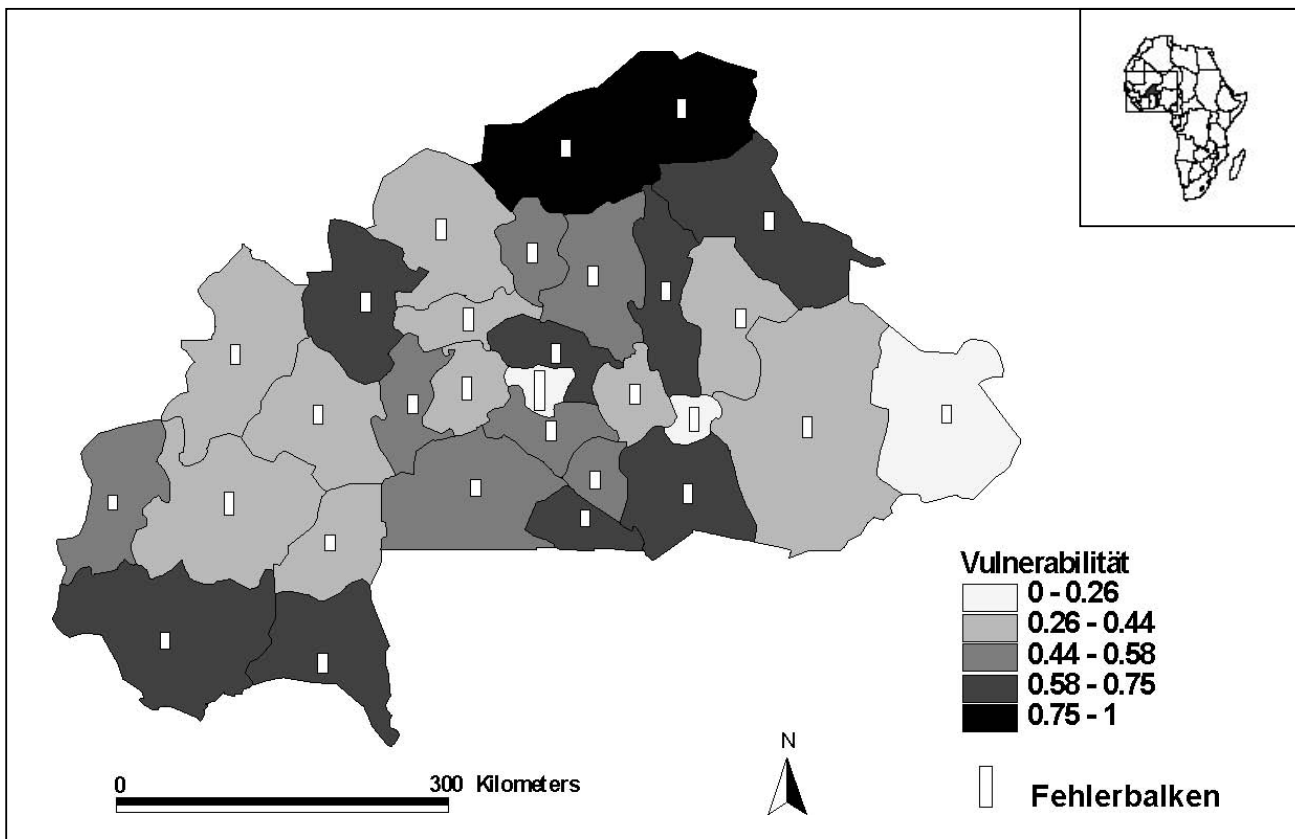


Abbildung 4.1: Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation für Burkina Faso. Die weißen Balken geben den relativen Fehler an (zwischen $\pm 9\%$ und $\pm 24\%$): Zur Fehlerabschätzung siehe Ausführungen am Ende dieses Abschnitts.

Zur Indizierung der wesentlichen Prozesse zur Abschätzung der Vulnerabilität für Burkina Faso wurden insgesamt 21 naturräumliche und sozioökonomische Indikatoren auf Provinzebene aus verschiedenen statistischen Quellen verwendet. Zur Übersicht sind in Tabelle 3.1 alle verwendeten Indikatoren, deren Wirkung auf die Vulnerabilität und die Datenquellen zusammengestellt.

In Tabelle 4.2 ist die Verwendung dieser 21 Indikatoren zur Indizierung der einzelnen Matrixelemente zusammengefasst. Drei Matrixelemente sind nicht indiziert, da der Zusammenhang als unklar und zudem als schwach im Vergleich zu den übrigen Matrixelementen eingeschätzt wurde. Diese Tabelle erlaubt zusammen mit der Spalte "Wirkung" aus Tabelle 3.1 die Rekonstruktion der Gesamtindikatoren aller Matrixelemente nach dem oben beschriebenen Schema am Beispiel des Matrixelementes "Nahrungsmittelsicherheit und Bodendegradation". Tabelle 3.3 enthält zusammengefasst die den 21 Indikatoren zugrunde liegenden Prozess-Hypothesen. Die Karten der räumlichen Verteilung der übrigen Gesamtindikatoren finden sich im Anhang I.

Drei Matrixelemente sind nicht indiziert, da der Zusammenhang als unklar und zudem als schwach im Vergleich zu den übrigen Matrixelementen eingeschätzt wurde. Tabelle 4.3 enthält zusammengefasst die den 21 Indikatoren zugrunde liegenden Prozess-Hypothesen.

Table 4.1: Liste aller verwendeten Indikatoren, deren Wirkung auf die Vulnerabilität (+: steigende Vulnerabilität mit steigendem Indikator; -: fallende Vulnerabilität mit steigendem Indikator, V-: umgekehrt v-förmiger Zusammenhang) und Datenquellen für Burkina Faso (INSD 94 = Enquete Prioritaire 1994; INSD 98 = Enquete Prioritaire 1998; CRU = CRU Klimadatensatz 1960-1990; GLA = GLASOD-Datensatz zur Bodendegradation 1990; TBF = Tourisme au Burkina Faso 2000 (<http://membres.lycos.fr/monburkinafaso/>); FEWS = FEWS Current Vulnerability Assessment 1997/98; HDR = Human Development Report Burkina Faso 2001; INSD 2000 = Annuaire Statistique du Burkina Faso 1999).

Symbol	Indikator	Einheit	Wirkung	Quelle
a_d	Anteil der Haushalte mit Stroh- oder Lehmdach	-	+	INSD 98
a_h	Anteil der Haushalte, die Holz oder Holzkohle als Küchenenergiequelle benutzen	-	+	INSD 98
a_{ja}	Anteil der Menschen <15 Jahre oder >50 Jahre an der Gesamtbevölkerung	-	+	INSD 98
a_m	Anteil der Haushalte mit Stroh- oder Lehmaußenwänden	-	+	INSD 98
a_o	Anteil der Haushalte, die offene Gewässer als primäre Trinkwasserquelle benutzen	-	+	INSD 98
a_α	Alphabetisierungsrate der Menschen über 15 Jahre	%	-	HDR
B_{deg}	Schwere der Bodendegradation	-	+	GLA
d_g	Anteil der Haushalte, deren nächstes Gesundheitszentrum mehr als 1 Stunde entfernt ist	-	+	INSD 98
d_m	Anteil der Haushalte, deren nächster Markt mehr als 1 Stunde entfernt ist	-	+	INSD 98
d_w	Anteil der Haushalte, deren nächste Trinkwasserstelle mehr als 1 Stunde entfernt ist	-	+	INSD 98
E	Anteil der Haushalte mit einem Pro-Kopf-Einkommen von weniger als 35.000 FCFA (extreme Armut)	-	+	INSD 98
e_a	Anteil des Haushalte, bei denen die Landwirtschaft mehr als die Hälfte zum Gesamteinkommen beiträgt	-	+	INSD 98
f_p	Flächenanteil von Nationalparks und Reservaten an der gesamten Provinzfläche	-	+	TBF
\bar{G}	durchschnittlicher Selbstversorgungsgrad der Provinz mit Grundnahrungsmitteln (1990-1998)	%	V-	FEWS
G_0	erforderliche Grundversorgungsmenge an Nahrungsmitteln (1990-1998)	190kg/cap	V-	FEWS
L	durchschnittliche Lebenserwartung bei Geburt (1999)	Jahre	-	UDR
\bar{N}	mittlerer Jahresniederschlag	mm	-	CRU
V	Anteil der Haushalte, die kein Vieh besitzen	-	+	INSD 94
ρ_b	Bevölkerungsdichte	1/km ²	-	INSD 98
$\sigma(A_g)$	normierte Standardabweichung der Anbauflächen der sieben wichtigsten Grundnahrungsmittel (1999/2000)	-	+	INSD 2000
$\sigma(e_a)$	normierte Intra-Haushalts-Standardabweichung des Landwirtschafts-Einkommens	-	+	INSD 98
$\sigma(N)$	normierte Standardabweichung des mittleren monatlichen Niederschlags	%	-	CRU

Tabelle 4.2: Indikatoren der Vulnerabilitätsmatrix für Burkina Faso. Die obere Zeile innerhalb eines Matrixelements enthält jeweils die Sensitivitätsindikatoren, die untere Zeile enthält die Bewältigungsindikatoren.

	Klima	Trinkwasser	Boden	Biodiversität
Einkommen	d_w, e_a, L, \bar{N} $a_\alpha, E, V, \sigma(N)$	d_w, L, \bar{N} a_α, E, V	B_{deg}, e_a a_α, E, V, ρ_b	$a_h, e_a, f_p, \sigma(e_a)$ a_α, E, V
Nahrungssicherheit	$e_a, \bar{G}, G_o, \bar{N}$ $d_m, E, V, \sigma(N), \rho_b$	$a_{ja}, a_o, d_w, L, \bar{N}$ d_g, E, V	$B_{deg}, e_a, \bar{G}, G_o$ d_m, E, V, ρ_b	$e_a, \bar{G}, G_o, \sigma(A_g)$ d_m, E, V
Wohnqualität	a_d, a_h, a_m E, V, ρ_b			a_h E, V
Gesundheit	$a_{ja}, a_o, d_w, L, \bar{N}$ $a_\alpha, d_g, E, V, \sigma(N)$	$a_{ja}, a_o, d_w, L, \bar{N}$ a_α, d_g, E, V		d_g a_α, E, V
Bildung	a_h, d_w, \bar{N} $a_\alpha, E, \sigma(N)$	d_w, \bar{N} a_α, E	a_h, B_{deg} a_α, E, ρ_b	a_h a_α, E

Tabelle 4.3: Zugrundeliegende Prozesshypothesen zu den 21 Indikatoren für Burkina Faso in alphabetischer Reihenfolge.

a_d	Haushalte mit Stroh- oder Lehmdach sind gegen klimatische Extremereignisse wie Unwetter schlecht geschützt.
a_h	Haushalte, die Holz oder Holzkohle als Primärenergiequelle benutzen, sind besonders von Veränderungen, die die Holzverfügbarkeit reduzieren, wie z.B. Dürren, Bodendegradation, aber Zeitmangel zum Sammeln des Materials aufgrund gesundheitlicher Beeinträchtigungen, betroffen.
a_{ja}	Junge (<15 Jahre) und alte (>50 Jahre) Menschen sind von den negativen Folgen klimatischer Extremereignisse, besonders von Dürren und Trinkwassermangel auf die Gesundheit, besonders betroffen.
a_m	Haushalte mit Stroh- oder Lehmaußenwänden sind gegen klimatische Extremereignisse wie Unwetter schlecht geschützt.
a_o	Haushalte, die offene Gewässer als primäre Trinkwasserquelle benutzen, sind bei Wasserknappheit infolge von Dürren besonders stark betroffen und einem entsprechend höheren Gesundheitsrisiko ausgesetzt.
a_α	Die Alphabetisierungsrate drückt zunächst die Möglichkeit der Menschen aus, sich zusätzliche Informationsquellen zu erschließen und daher besser mit Umweltveränderungen umgehen sowie alternative Einkommensquellen erschließen zu können. Die Realität der oralen und multilinguistischen Kultur Burkina Fasos wird damit vorerst nur in Ansätzen erfasst.
B_{deg}	Je größer die derzeitige Schwere der Bodendegradation, umso anfälliger sind die Böden für weitere Degradation.
d_g	Je kleiner die Entfernung zur nächstgelegenen Gesundheitsstation, umso einfacher kann im Falle von auftretenden Krankheiten medizinische Hilfe in Anspruch genommen werden.
d_m	Je kleiner die Entfernung zum nächstgelegenen Markt, umso leichter ist bei Nahrungsmittelknappheit infolge von Umweltveränderungen die Versorgung mit Grundnahrungsmitteln.

Tabelle 4.3 Fortsetzung: Zugrundeliegende Prozesshypothesen zu den 21 Indikatoren für Burkina Faso in alphabetischer Reihenfolge.

d_w	Je größer die Entfernung zur nächsten Trinkwasserstelle, umso zeitaufwändiger ist während einer Dürre die Beschaffung von Trinkwasser, das dann nicht mehr aus näher gelegenen offenen Gewässern bezogen werden kann. Dieser erhöhte Zeitaufwand geht von der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit ab und beeinflusst dementsprechend die Nahrungsmittelversorgung, Gesundheits- und Bildungssituation.
e_a	Je größer der Anteil des landwirtschaftlichen Einkommens – die wichtigste Einnahmenquelle in Burkina Faso – am Gesamteinkommen, umso sensibler ist die Provinz gegenüber Veränderungen von Klima, Boden und Biodiversität, die die landwirtschaftliche Produktion direkt beeinflussen.
E	Je größer das Gesamteinkommen pro Person, umso eher kann ein Haushalt mit den negativen Auswirkungen von Umweltveränderungen umgehen.
f_p	Je größer der Flächenanteil von Nationalparks und Reservaten an der gesamten Provinzfläche, umso mehr Arbeitsplätze sind dann im Tourismusbereich von Biodiversitätsverlusten betroffen.
\bar{G}, G_o	Je größer die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Selbstversorgungsgrad der Provinz mit Grundnahrungsmitteln \bar{G} und der erforderlichen Grundversorgungsmenge G_o , umso kleiner ist das Risiko aufgrund von Bodendegradation die Versorgung nicht mehr sicherstellen zu können. Für $\bar{G} < G_o$ steigt die Sensitivität mit zunehmendem Selbstversorgungsgrad, für $\bar{G} > G_o$ sinkt die Sensitivität mit zunehmendem Selbstversorgungsgrad.
L	Die durchschnittliche Lebenserwartung bei Geburt wird als Ausdruck des Ernährungs- und Gesundheitszustands der gesamten Bevölkerung betrachtet. Je kleiner L in einer Provinz, umso anfälliger sind die dortigen Menschen für die gesundheitlichen Auswirkungen von klimatischen Veränderungen. Das schlägt sich wiederum in einer Verringerung der eigenen Arbeitskraft und Arbeitszeit bzw. in der Erhöhung des zeitlichen Aufwands für die Pflege von Angehörigen nieder.
\bar{N}	Je niedriger der mittlere Jahresniederschlag, umso größer ist das Risiko, dass der verfügbare Niederschlag bei Klimaveränderungen unter eine bestimmte für die jeweilige landwirtschaftliche Produktion und Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser erforderliche Menge sinkt. Dieser Indikator trägt vor allem der möglichen Zunahme der Häufigkeit von Dürren Rechnung.
V	Je größer der gesamte Viehbestand pro Person, umso eher kann ein Haushalt durch den Verkauf von Vieh in Notzeiten die negativen Auswirkungen von Umweltveränderungen kompensieren. Der Viehbestand fungiert damit als Kapitalstock.
ρ_b	Die Bevölkerungsdichte gibt einen Hinweis darauf, ob genügend Arbeitskräfte für Maßnahmen zum Erhalt der natürlichen Ressourcen, für die Nahrungsmittelproduktion sowie die Errichtung und den Erhalt von Unterkünften verfügbar sind. Diese Maßnahmen müssen zusätzlich zu anderen Arbeiten geleistet werden und setzen daher eine entsprechende Arbeitskraftreserve voraus.
$\sigma(A_g)$	Je größer die Diversität der angebauten Grundnahrungsmittel, umso eher wird Biodiversitätsverlusten entgegengewirkt und umso breiter ist die Risikostreuung hinsichtlich drohender Biodiversitätsverluste.
$\sigma(e_a)$	Je größer die Diversität der landwirtschaftlichen Produktion, umso eher wird Biodiversitätsverlusten entgegengewirkt und umso breiter ist die Risikostreuung hinsichtlich drohender Artenverluste.
$\sigma(N)$	Je größer die Varianz des mittleren monatlichen Niederschlags, umso angepasster sind die Menschen an die natürliche Klimavariabilität und umso leichter fällt es ihnen, mit neu auftretenden klimatischen Veränderungen umzugehen.

Im Folgenden wird eine auf Datenunsicherheiten beruhende Unsicherheitsanalyse der Gesamtindikatoren beschrieben. Dabei ist die Datenunsicherheit der Indikatoren durch den jeweiligen ‘‘Messfehler‘‘ gegeben. Für die verschiedenen Datenquellen wurde jeweils ein einheitlicher relativer Fehler – im Sinne der Standardabweichung – für alle aus dieser Datenquelle stammenden Indikatoren angenommen. Im folgenden sind die relativen Fehler der Indikatoren aus den einzelnen Datenquellen zusammengestellt, wobei durchweg eine konservative Abschätzung der Fehler vorgenommen wurde:

- Der relative Fehler der Indikatoren aus dem CRU-Datensatz (Klima), dem GLASOD-Datensatz (Boden) und der FEWS-Fallstudie (Grundnahrungsmittel-Versorgung) wurde aufgrund der Angaben in den Begleitdokumenten zu 20% abgeschätzt.
- Der relative Fehler der Indikatoren aus dem Enquete Prioritaire 1994/1998 (Bevölkerungs-Zensus), dem Annuaire Statistique 1999 (Statistisches Jahrbuch) und dem Human Development Report 2001 der UN ist nicht in den Begleitdokumenten angegeben, er wurde jedoch – u.a. aufgrund von Überlegungen aus der Stichprobentheorie – zu maximal 10% abgeschätzt.
- Der relative Fehler des Indikators aus der TBF-Karte (Größe der Nationalparks und Reservate) resultiert vor allem aus Digitalisierungsfehlern und liegt bei maximal 10%.

Die Fehler der Indikatoren führen zu Fehlern der Gesamtindikatoren der Vulnerabilitäten. Der Gesamtindikator der Vulnerabilität $v_{i,j}$ für den Einfluss der j -ten Umweltdimension auf die i -te Armutsdimension setzt sich aus Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren zusammen und kann allgemein geschrieben werden als

$$v_{i,j} = v_{i,j}(x_1, \dots, x_{n_{i,j}})$$

wobei $x_1, \dots, x_{n_{i,j}}$ für die $n_{i,j}$ Indikatoren stehen, die in die Berechnung der Vulnerabilität $v_{i,j}$ eingehen.

Unter der Annahme, dass die einzelnen Indikatoren unabhängige normalverteilte Zufallsvariablen sind, lässt sich der absolute Fehler der Vulnerabilität $\Delta v_{i,j}$ gemäß der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wie folgt berechnen:

$$(\Delta v_{i,j})^2 = \sum_{k=1}^{n_{i,j}} \left(\frac{\partial v_{i,j}}{\partial x_k} \right)^2 (\Delta x_k)^2$$

wobei die Δx_k , $k = 1, \dots, n_{i,j}$ die absoluten Fehler der einzelnen Indikatoren sind. Unter Verwendung der obigen Datenunsicherheiten können so die absoluten Fehler aller Vulnerabilitäten berechnet werden. Die relativen Fehler der Vulnerabilitäten ergeben sich dann jeweils zu

$$\Delta v_{i,j}^{(rel)} = \frac{\Delta v_{i,j}}{v_{i,j}}.$$

4.1.2 NO-Brasilien

Exemplarisch wird hier wieder das Beispiel "Nahrungsmittelsicherheit und Bodendegradation" ausgeführt. Wie auch für Burkina Faso werden anschließend die grundlegenden Indikatoren und Prozesshypothesen für die Bestimmung der anderen Matrixelemente dargestellt. Auch die Karten zu Nordost-Brasilien befinden sich im Anhang.

Der Gesamtindikator für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation, $v_{n,b}$, setzt sich für NO-Brasilien aus acht Indikatoren zusammen:

$$v_{n,b} = (B_h + B_t + (1 - |G_0 - \bar{G}|) + w_a) \cdot ((1 - a_\alpha) + (1 - E) + (1 - V) + (1 - \rho_b))$$

mit	B_h	Hangneigung
	B_t	Bodentiefe
	\bar{G}	durchschnittliche Produktion an Grundnahrungsmitteln des Munizips
	G_0	durchschnittliche Produktion an Grundnahrungsmitteln in NO-Brasilien
	w_a	Anteil der in der Landwirtschaft beschäftigten Personen an der Gesamtbevölkerung
	a_α	Alphabetisierungsrate
	E	Gesamteinkommen pro Person
	V	gesamter Viehbestand pro Person
	ρ_b	Bevölkerungsdichte

Die Verknüpfung und Normierung der Indikatoren folgt dem gleichen Schema wie oben für Burkina Faso beschrieben⁶. Abbildung 4.2 zeigt die räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation für NO-Brasilien.

Die vulnerabelsten Munizipe befinden sich im Sertão der Bundesstaaten Piauí und Ceará. Die hohe Vulnerabilität bestimmt sich aus dem Zusammenwirken mehrerer Faktoren und lässt sich daher nicht auf einen einzigen Indikator zurückführen. Jedoch lassen sich wie für Burkina Faso auch hier Indikatoren identifizieren, die Extremwerte aufweisen und somit die Verteilung der Vulnerabilität entscheidend mitbeeinflussen. Dazu gehören der hohe Anteil der in der Landwirtschaft Beschäftigten, zum Teil gering mächtige Böden und geringe Einkommen. Die weniger vulnerablen Munizipe konzentrieren sich entlang der urbanen Zentren, der Küsten im Norden und Osten sowie in Zentral-Piauí. Diese Munizipe sind vor allem dadurch charakterisiert, dass sie dichter besiedelt sind und sich damit bessere Marktstrukturen entwickelt haben, weniger Menschen in der Landwirtschaft arbeiten und die Böden - wie im Fall von Zentral-Piauí - wesentlich tiefgründiger als im Durchschnitt sind.

⁶ Die den Indikatoren zugrunde liegenden Prozesshypothesen können der Tabelle 4.6 entnommen werden.

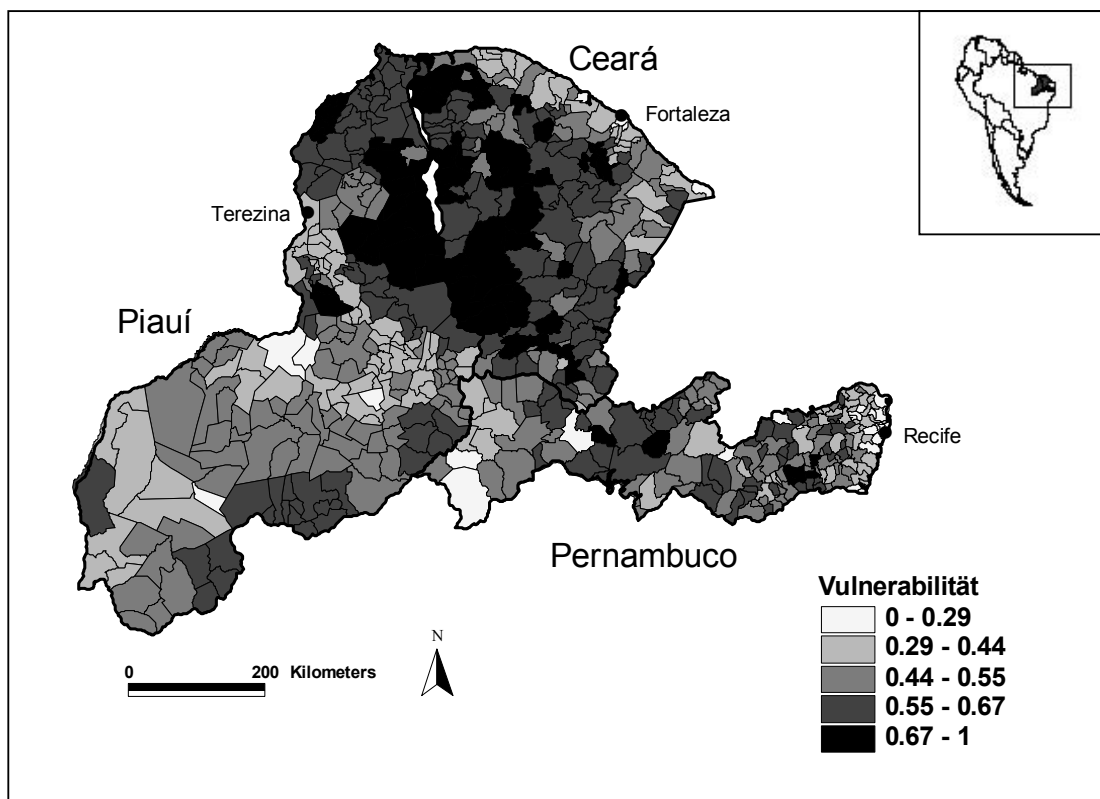


Abbildung 4.2: Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Bodendegradation für NO-Brasilien. Der relative Fehler des Gesamtindikators bewegt sich zwischen $\pm 7\%$ und $\pm 22\%$ (Fehlerbalken aus graphischen Gründen nicht eingezeichnet).

Insgesamt wurden zur Indizierung der wesentlichen Prozesse zur Abschätzung der Vulnerabilität für NO-Brasilien auf Munizipebene 19 verschiedene naturräumliche und sozioökonomische Indikatoren aus verschiedenen statistischen Quellen verwendet. Zur Übersicht sind in Tabelle 4.4 alle verwendeten Indikatoren, deren Wirkung auf die Vulnerabilität und die Datenquellen zusammengestellt.

In Tabelle 4.5 ist die Verwendung dieser 19 Indikatoren zur Indizierung der einzelnen Matrixelemente zusammengefasst. Diese Tabelle erlaubt zusammen mit der Spalte "Wirkung" aus Tabelle 4.4 die Rekonstruktion der Gesamtindikatoren aller Matrixelemente nach dem oben beschriebenen Schema. Die Karten der räumlichen Verteilung der übrigen Gesamtindikatoren finden sich im Anhang IV.

Drei Matrixelemente sind nicht indiziert, da der Zusammenhang als unklar und zudem als schwach im Vergleich zu den übrigen Matrixelementen eingeschätzt wurde. Tabelle 4.6 enthält zusammengefasst die den 19 Indikatoren zugrunde liegenden Prozess-Hypothesen.

Tabelle 4.4: Liste aller verwendeten Indikatoren, deren Wirkung auf die Vulnerabilität (+: steigende Vulnerabilität mit steigendem Indikator; -: fallende Vulnerabilität mit steigendem Indikator; V-: umgekehrt V-förmiger Zusammenhang) und Datenquellen für NO-Brasilien (CD91 = Censo Demográfico 1991; CD00 = Censo Demográfico 2000; CAP96 = Censo Agropecuário 1996; CRU = CRU Klimadatensatz 1960-1990; GAEZ = Global Agro-Ecological Zones (CD-ROM FAO/IIASA 2000); PAM = Produção Agrícola Municipal 1990-2001; PEV = Produção Extrativa Vegetal 1990-2001; ZANE = Zoneamento Agroecológico do Nordeste do Brasil (EMBRAPA 2000)).

Symbol	Indikator	Einheit	Wirkung	Quelle
a_b	Anteil der Haushalte, die in Wohnungen mit Dach und Mauern aus haltbarem Material leben	-	-	CD91
a_{ja}	Anteil der Menschen <15 Jahre oder >50 Jahre an der Gesamtbevölkerung	-	+	CD00
a_p	Anteil der Eigentümer-Betriebe an der Gesamtzahl der landwirtschaftlichen Betriebe unter 100 ha	-	-	CAP96
a_w	Anteil der Haushalte mit Trinkwasseranschluss	-	-	CD00
a_α	Alphabetisierungsrate der Menschen über 15 Jahre	%	-	CD00
B_h	Hangneigungs-Limitation für die landwirtschaftliche Nutzung	-	+	GAEZ
B_t	Bodentiefe	cm	-	ZANE
E	Anteil der Haushaltsvorstände mit einem Einkommen von weniger als drei Mindestlöhnen	-	+	CD00
\bar{G}	durchschnittliche Produktion an Grundnahrungsmitteln des Munizips	kg/cap	V-	PAM
G_0	durchschnittliche Produktion an Grundnahrungsmitteln in NO-Brasilien	kg/cap	V-	PAM
\bar{H}	durchschnittlicher Holz-/Holzkohleertrag (1997-2001) pro Einwohner	kg/cap	+	PEV
L	HDI-Index der durchschnittlichen Lebenserwartung bei Geburt (2000)	-	-	CD00
\bar{N}	mittlerer Jahresniederschlag	mm	-	CRU
V	Viehbestand auf Flächen unter 100 ha / Gesamtbevölkerung	GVE/cap	-	CAP96
w_a	Anteil der in der Landwirtschaft beschäftigten Personen an der Gesamtbevölkerung	-	+	CAP96
ρ_a	Ärzte pro 1000 Einwohner	-	-	CD00
ρ_b	Bevölkerungsdichte	1/km ²	-	CD00
$\sigma(G)$	normierte Standardabweichung der Erträge der fünf wichtigsten Grundnahrungsmittel (Mittelwert 1997-2001)	-	+	PAM
$\sigma(F)$	normierte Standardabweichung der Erträge aller angebauten Feldfrüchte (Mittelwert 1997-2001)	-	+	PAM
$\sigma(N)$	normierte Standardabweichung des mittleren monatlichen Niederschlags	%	-	CRU

Tabelle 4.5: Indikatoren der Vulnerabilitätsmatrix für NO-Brasilien. Die obere Zeile innerhalb eines Matrixelements enthält jeweils die Sensitivitätsindikatoren, die untere Zeile enthält die Bewältigungsindikatoren.

	Klima	Trinkwasser	Boden	Biodiversität
Einkommen	a_w, \bar{N}, L, w_a $a_\alpha, E, V, \sigma(N)$	a_w, L, \bar{N} a_α, E, V	B_h, B_t, w_a a_α, E, V, ρ_b	$\bar{H}, w_a, \sigma(F)$ a_α, E, V
Nahrungssicherheit	$\bar{G}, G_o, \bar{N}, w_a$ $a_\alpha, E, V, \rho_b, \sigma(N)$	a_{ja}, a_w, L, \bar{N} a_α, E, V, ρ_a	$B_h, B_t, \bar{G}, G_o, w_a$ a_α, E, V, ρ_b	$\bar{G}, G_o, w_a, \sigma(G)$ a_α, E, V, ρ_b
Wohnqualität	a_b, \bar{H} a_α, E, V, ρ_b			\bar{H} a_α, E, V
Gesundheit	a_{ja}, a_w, L, \bar{N} $a_\alpha, E, V, \rho_a, \sigma(N)$	a_{ja}, a_w, L, \bar{N} a_α, E, V, ρ_a		ρ_a a_α, E, V
Bildung	a_w, \bar{H}, \bar{N} $a_\alpha, E, \sigma(N)$	a_w, \bar{N} a_α, E	B_h, B_t, \bar{H} a_α, E, ρ_b	\bar{H} a_α, E

Tabelle 4.6: Zugrundeliegende Prozesshypothesen zu den 19 Indikatoren für NO-Brasilien in alphabetischer Reihenfolge.

a_b	Haushalte, die über Gebäude mit Dächern und Wänden aus haltbaren Materialien verfügen, werden von Unwettern weniger stark geschädigt.
a_p	Kleinbauern (Flächen <100ha), die über Eigentum an Boden verfügen, können ihre Produktionsentscheidungen langfristig ausrichten und sind weniger abhängig von unsicheren und kurzfristigen Pachtverträgen.
a_{ja}	Junge (<15 Jahre) und alte (>50 Jahre) Menschen sind von klimatischen Auswirkungen auf die Gesundheit, besonders von Dürren und Trinkwassermangel besonders betroffen.
a_α	Die Alphabetisierungsrate drückt die Möglichkeit der Menschen aus, durch Zugang zu zusätzlichen Informationen besser mit Umweltveränderungen umgehen zu können. Darüber hinaus können sie einfacher alternative Einkommensquellen erschließen.
a_w	Haushalte, die direkt an die zentrale Wasserversorgung angeschlossen sind, sind weniger von Wasserknappheit infolge von Dürren betroffen und einem entsprechend geringerem Risiko von schlechter Wasserqualität ausgesetzt.
B_h	Je stärker die landwirtschaftlich genutzten Flächen geneigt sind, umso anfälliger sind die Böden für Erosions- und andere Degradationsprozesse.
B_t	Je tiefer die Böden der landwirtschaftlich genutzten Flächen entwickelt sind, desto größer ist ihre Pufferkapazität gegenüber Bodenabtrag.
E	Je größer das Gesamteinkommen pro Person, umso eher kann ein Haushalt mit den negativen Auswirkungen von Umweltveränderungen umgehen.
\bar{G}, G_o	Je größer die Differenz zwischen der durchschnittlichen Grundnahrungsmittelproduktion eines Munizips \bar{G} und der durchschnittlichen Grundnahrungsmittelproduktion in NO-Brasilien G_o , umso kleiner ist das Risiko aufgrund von Bodendegradation die Versorgung nicht mehr sicherstellen zu können. Für $\bar{G} < G_o$ steigt die Sensitivität mit zunehmender durchschnittlicher Grundnahrungsmittelproduktion eines Munizips, für $\bar{G} > G_o$ sinkt die Sensitivität mit zunehmender durchschnittlicher Grundnahrungsmittelproduktion eines Munizips.
\bar{H}	Der Ertrag an Holz/Holzkohle weist auf die Nutzung der Rohstoffe als Energiequelle hin. Haushalte, die Holz/Holzkohle als Hauptenergiequelle benutzen, sind von extremen Umweltveränderungen, die die Holzverfügbarkeit reduzieren, wie z.B. Dürren oder Bodendegradation, stärker betroffen.

Tabelle 4.6 Fortsetzung: *Zugrundeliegende Prozesshypothesen zu den 19 Indikatoren für NO-Brasilien in alphabetischer Reihenfolge.*

L	Die durchschnittliche Lebenserwartung bei Geburt wird als Ausdruck des Ernährungs- und Gesundheitszustands der gesamten Bevölkerung betrachtet. Je kleiner L in einem Munizip, umso anfälliger sind die dortigen Menschen für die gesundheitlichen Auswirkungen von klimatischen Veränderungen. Das schlägt sich wiederum in einer Verringerung der eigenen Arbeitskraft und Arbeitszeit bzw. in der Erhöhung des zeitlichen Aufwands für die Pflege von Angehörigen nieder.
\bar{N}	Je niedriger der mittlere Jahresniederschlag, umso größer ist das Risiko, dass der verfügbare Niederschlag bei Klimaveränderungen unter eine bestimmte für die jeweilige landwirtschaftliche Produktion und Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser erforderliche Menge sinkt. Dieser Indikator trägt vor allem der möglichen Zunahme der Häufigkeit von Dürren Rechnung.
V	Je größer der gesamte Viehbestand im kleinbäuerlichen Sektor (Flächen <100ha), umso eher kann ein Kleinbauernhaushalt durch den Verkauf von Vieh in Notzeiten die negativen Auswirkungen von klimatischen Veränderungen kompensieren. Der Viehbestand fungiert damit als Kapitalstock.
w_a	Je größer der Anteil der in der Landwirtschaft Tätigen an der Gesamtbevölkerung, umso sensitiver ist der das Munizip gegenüber Veränderungen von Klima, Boden und Biodiversität, die die landwirtschaftliche Produktion direkt beeinflussen.
ρ_a	Je kleiner die Entfernung zur nächstgelegenen Arztpraxis, umso einfacher kann im Falle von auftretenden Krankheiten medizinische Hilfe in Anspruch genommen werden.
ρ_b	Die Bevölkerungsdichte gibt einen Hinweis darauf, ob genügend Arbeitskräfte für Maßnahmen zum Erhalt der natürlichen Ressourcen, für die Nahrungsmittelproduktion sowie die Errichtung und den Erhalt von Unterkünften verfügbar sind. Diese Maßnahmen müssen zusätzlich zu anderen Arbeiten geleistet werden und setzen daher eine entsprechende Arbeitskraftreserve voraus.
$\sigma(G)$	Je größer die Diversität der angebauten Grundnahrungsmittel, umso eher wird Biodiversitätsverlusten entgegengewirkt und umso breiter ist die Risikostreuung hinsichtlich drohender Biodiversitätsverluste.
$\sigma(F)$	Je größer die Diversität der landwirtschaftlichen Produktion, umso eher wird Biodiversitätsverlusten entgegengewirkt und umso breiter ist die Risikostreuung hinsichtlich drohender Artenverluste.
$\sigma(N)$	Je größer die Varianz des mittleren monatlichen Niederschlags, umso angepasster sind die Menschen an die natürliche Klimavariabilität und umso leichter fällt es ihnen, mit neu auftretenden klimatischen Veränderungen umzugehen.

4.2 Integrierte Vulnerabilitäten

In diesem Abschnitt erfolgt – getrennt für Burkina Faso und NO-Brasilien – eine integrierende Analyse der räumlichen Verteilung aller in Abschnitt 3.2 indizierten Vulnerabilitäten. Dazu wurde eine Clusteranalyse der 17 indizierten Vulnerabilitäten über alle 30 Provinzen (Burkina Faso) bzw. 432 Munizipe (NO-Brasilien) durchgeführt, um Provinz-Cluster bzw. Munizip-Cluster mit jeweils ähnlicher Vulnerabilitätsstruktur zu finden. Als Clusterverfahren wurde ein hierarchisches Verfahren mit einem nachgeschalteten Minimaldistanz-Austauschverfahren verwendet. Die Abstände im Parameterraum wurden mit der euklidischen Metrik berechnet, was natürlich nur unter Vorbehalt erlaubt ist, da im Raum der Vulnerabilitäten strenggenommen keine metrischen Abstände definiert sind. Um eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse zu erlauben, wurden vier Cluster gebildet, was sich hierfür als am geeignetsten erwies.

4.2.1 Burkina Faso

In Tabelle 4.7 sind die Charakteristika der vier Cluster für Burkina Faso zusammengestellt und Abbildung 4.3 zeigt die räumliche Verteilung der Cluster.

Tabelle 4.7: Burkina Faso: Relative Werte der Clustermittelpunkte der vier Cluster innerhalb aller 17 Vulnerabilitäts-Dimensionen (Abkürzungen der Umweltdimensionen: Klima (K), Trinkwasser (W), Boden (B), Biodiversität (D)). Die Symbole {+,o,-} wurden entsprechend der Lage des Clustermittelpunkts – nach äquidistanter Drittelung der jeweiligen Intervalle zwischen kleinstem und größtem Clustermittelpunkt – zugeordnet: der Clustermittelpunkt liegt entweder im unteren Drittel (-), im mittleren Drittel (o) oder im oberen Drittel (+).

Armutsdimension	Einkommen				Nahrung				Wohnen		Gesundheit			Bildung			
Umweltdimension	K	W	B	D	K	W	B	D	K	D	K	W	D	K	W	B	D
Cluster 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Cluster 2	+	o	o	+	+	o	o	o	+	+	o	o	o	o	-	o	+
Cluster 3	o	o	o	o	o	o	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o
Cluster 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

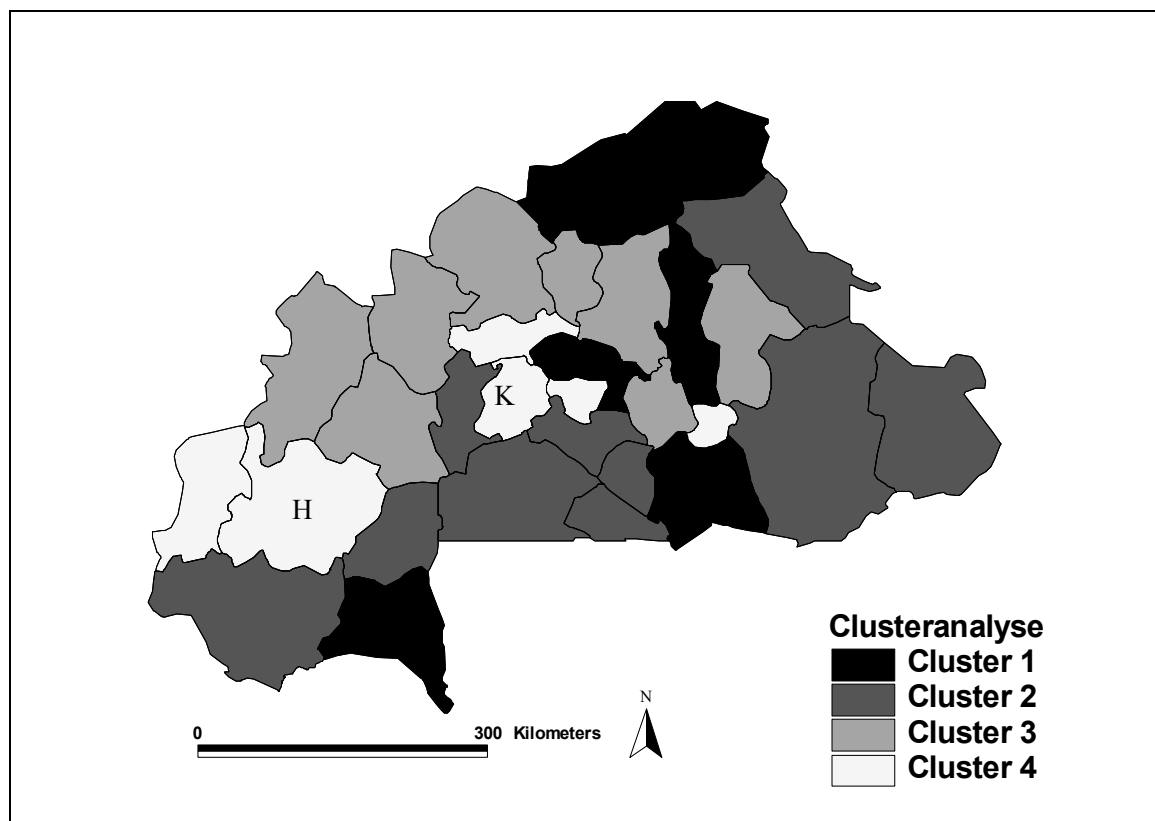


Abbildung 4.3: Räumliche Verteilung der vier Vulnerabilitäts-Cluster für Burkina Faso. In aufsteigender Reihenfolge beschreiben die Cluster Provinzen mit abnehmender Vulnerabilität gegenüber den Umweltveränderungen. Während die Provinzen in Cluster 1 etwa eine hohe Vulnerabilität gegenüber allen Umweltveränderungen zeigen, sind die Provinzen in Cluster 4 kaum vulnerabel. (K = Kadiogo, H = Houet).

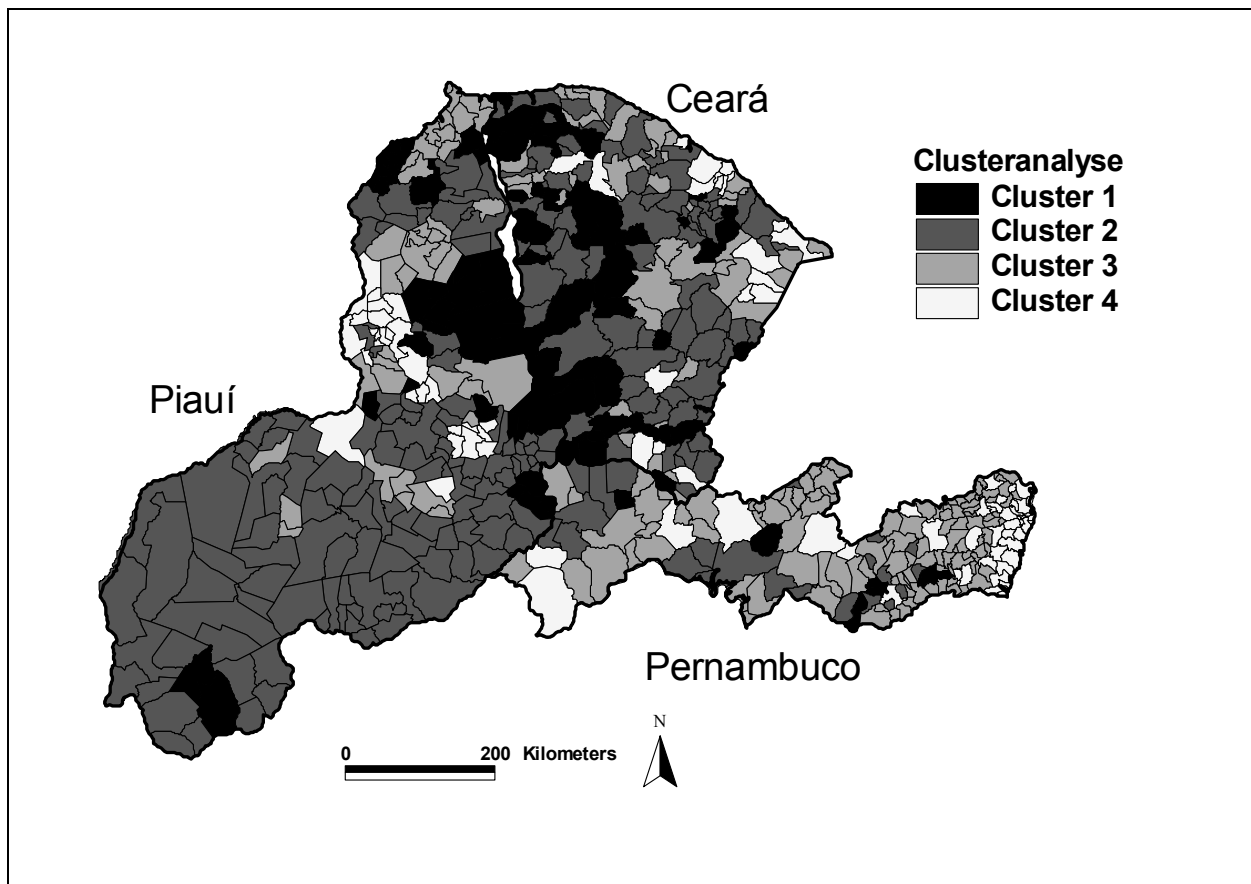


Abbildung 4.4: Räumliche Verteilung der vier Vulnerabilitäts-Cluster für NO-Brasilien. Analog zu Abbildung 4.3 beschreiben auch hier die Cluster in aufsteigender Reihenfolge Munizipe mit abnehmenden Vulnerabilitäten gegenüber den Umweltveränderungen.

Die gefundenen Cluster in NO-Brasilien lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Cluster 1 zeigt durchweg relativ hohe Vulnerabilitäten. Die entsprechenden Munizipe befinden sich überwiegend in Piauí und Ceará.
- Cluster 2 zeigt vor allem relativ hohe Vulnerabilitäten der Armutsdimensionen Nahrungsmittelsicherheit, Gesundheit und Bildung gegenüber den Einflüssen von Klimawandel und Trinkwasserknappheit. Vor allem Munizipe im Süden Piauí, in weiten Bereichen Ceará und im Westen Pernambucos zeigen diese Charakteristik.
- Cluster 3 gibt besonders die Vulnerabilität gegenüber Klimawandel und Veränderungen der Biodiversität wieder. So zeigen die Munizipe eine relativ hohe Vulnerabilität für die Gesundheit, während das Einkommen, die Wohnqualität und die Bildung gering vulnerabel gegenüber den genannten Umweltveränderungen sind. Diese Munizipe befinden sich vor allem in Pernambuco sowie dispers verteilt im Norden Ceará und Piauí.
- Cluster 4 weist durchweg relativ niedrige Vulnerabilitäten auf und umfasst unter anderem die urban geprägten Munizipe und die Küstenregionen.

Auch hier sind die Cluster nach abnehmender Anzahl von Dimensionen des globalen Umweltwandels, gegenüber denen die jeweiligen Munizipe hoch vulnerabel sind, aufgeführt. So sind die Munizipe in Cluster 1 gegenüber allen vier Umweltveränderungen, die Munizipe in Cluster 4 dagegen gegenüber keiner der Umweltveränderungen hoch vulnerabel.

Vergleicht man die Ergebnisse der Vulnerabilitätsuntersuchungen in Burkina Faso mit NO-Brasilien, finden sich in beiden Regionen administrative Einheiten, in denen alle Armutsdimensionen hoch vulnerabel (Cluster 1) bzw. kaum vulnerabel (Cluster 4) gegenüber allen Dimensionen des globalen Umweltwandels sind. Das ist zunächst erstaunlich und kann kein Artefakt des verwendeten Clusterverfahrens sein, sondern liegt in der Struktur der Daten begründet. Dazwischen, d.h. in Cluster 2 und Cluster 3, gibt es in beiden Regionen Einheiten, in denen die Vulnerabilität spezifischer Armutsdimensionen gegenüber bestimmten Umweltveränderungen hoch und andere hingegen niedrig sind.

5 Strategien zur Minderung der Vulnerabilität

Die mit Hilfe der Matrixindikation gewonnene Vulnerabilitätsmatrix kann im nächsten Schritt als Grundlage für die Entwicklung geeigneter Strategien zur Minderung der Vulnerabilität dienen. Hierbei kann grundsätzlich zwischen Maßnahmen unterschieden werden, die auf eine Verringerung der Sensitivität oder eine Erhöhung der Bewältigungskapazität zielen. Aufgrund des hohen Grades der Interaktion zwischen natürlichem und anthropogenem System, als auch der internen Komplexität jedes Teilsystems, wird sich jede Strategie, also jeder „zielorientierte Eingriff von außen“, in verschiedenster Weise in der Matrix niederschlagen. Es kommt mithin darauf an, Strategien zu identifizieren, die durch Synergieeffekte mehrere Matrixelemente gleichzeitig positiv beeinflussen, also parallel mehrere Vulnerabilitäten reduzieren.

In Abschnitt 5.1 wird ein Verfahren vorgestellt, das zunächst aus der Analyse der Matrix den für eine Region im Hinblick auf eine bestimmte Umweltdimension vorrangigen, d.h. limitierenden, Sensitivitäts- bzw. Bewältigungsindikator ermittelt. Diese vorrangigen Indikatoren können dann die Grundlage für die Formulierung entsprechender Strategien bilden. Dabei muss zunächst die Frage nach den Kosten und der Umsetzbarkeit solcher Strategien in den Hintergrund treten, diese wäre der vorgelegten Analyse nachzuschalten. Abschnitt 5.2 enthält die konkreten Ergebnisse für Burkina Faso und NO-Brasilien, die in Abschnitt 5.3 miteinander verglichen werden.

5.1 Methode zur Entwicklung von Strategien ausgehend von der Vulnerabilitätsmatrix

In diesem Abschnitt wird eine formale Methode vorgestellt, wie die in Abschnitt 4 dargelegten Ergebnisse der Analyse in die Bewertung von Maßnahmen zur Vulnerabilitätsreduktion übergeführt werden können. Es wird auch versucht werden, diese Bewertungen in Empfehlungen zu gießen, indem als „Zielvorgabe“ als beste Maßnahme jene zu betrachten ist, die die Vulnerabilität am stärksten reduziert, als zweitbeste jene die am zweitstärksten reduziert, usw. Es ist offensichtlich, dass die Ergebnisse dieser formalen Analyse unter dem Vorbehalt der „Anwendungstauglichkeit“ betrachtet werden müssen, d.h. sie müssen – ganz im Sinne eines „erfolgreichen“ assessments - für die Entscheidungsträger nachvollziehbar und transparent sein und der Prozess muss glaubwürdig und entsprechend legitimiert sein (s.a. Farrel et al. 2001). Diese Voraussetzungen sind durch diese Studie – schon aus Zeitgründen – nicht gegeben (gewesen), so müsste beispielsweise die erwähnte Zielvorgabe mit den Entscheidungsträgern abgeklärt sein.

Das methodische Vorgehen bei der Entwicklung der räumlich expliziten Strategien basiert auf einem Vergleich der relativen Größe der einzelnen normierten Indikatoren (z-Transformation) innerhalb jeder einzelnen Provinz bzw. Munizip. Die relative Größe eines Indikators innerhalb eines Gesamtindikators (d.h. eines Matrixelements) wird dabei als Ausdruck für die relative Bedeutung dieses Indikators innerhalb des Gesamtindikators angesehen. In diesem Sinne wird für jede Provinz bzw. Munizip der jeweils größte Indikator⁷ unter den Sensitivitätsindikatoren als der für die Sensitivität dieser Provinz bzw. Munizip wichtigste Faktor interpretiert. Analog wird für jede Provinz bzw. Munizip der jeweils größte Indikator unter

⁷ Teilweise gehen in diesen Größenvergleich – wie schon in Abschnitt 3 ausgeführt – von eins subtrahierte Indikatoren ein (bzw. ein etwas komplizierterer Term im Falle von \bar{G}), so dass generell große Werte des Terms große Sensitivitäten bedeuten. Analog sind die in den Vergleich eingehenden Bewältigungsindikatoren so konstruiert, dass jeweils große Werte der Terme geringe Bewältigungsfähigkeiten bedeuten.

den Bewältigungsindikatoren als der für die Bewältigungsfähigkeit dieser Provinz bzw. Munizip wichtigste Faktor interpretiert.

Unsere Hypothese ist, dass durch eine Verringerung der jeweils vorrangigen Indikatoren der größte Beitrag zur Verringerung der Vulnerabilität der jeweiligen Provinz bzw. Munizip zu erwarten ist. Durch eine direkte Übersetzung der Indikatoren in zugehörige Strategien, die sich grundsätzlich auf alle Ebenen zwischen der Haushaltsebene und der nationalen Ebene beziehen können, können somit Hinweise für eine Priorität innerhalb der Strategien gegeben werden. Dabei werden insbesondere auch Kombinationen von Sensitivitäts-Strategien und Bewältigungs-Strategien diskutiert.

Aufgrund der Datenunsicherheiten der Indikatoren können jeweils nur Wahrscheinlichkeiten für die "Vorrangigkeit" eines Indikators angegeben werden. Im folgenden wird die Methode zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für die "Vorrangigkeit" eines Indikators erläutert. Die Grundannahme ist, dass die einzelnen Indikatoren voneinander unabhängige normalverteilte Zufallsvariablen sind. Die Wahrscheinlichkeitsdichte für die Verteilung eines Indikators x_k ist dann gegeben durch

$$\rho_k(x_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} \exp\left(-\frac{(x_k - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)$$

wobei μ_k der Erwartungswert und σ_k die Standardabweichung des Indikators ist.

Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte $\rho(x_1, \dots, x_n)$ für die Verteilung von n unabhängigen Indikatoren ergibt sich als Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichten zu

$$\rho(x_1, \dots, x_n) = \rho_1(x_1) \cdots \rho_n(x_n)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass nun beispielsweise x_1 unter den n Indikatoren der vorrangige Indikator ist, berechnet sich zu

$$P(1 : x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{x_1} dx_2 \cdots \int_{-\infty}^{x_1} dx_n \rho(x_1, \dots, x_n)$$

Analog lässt sich die Wahrscheinlichkeit für die Vorrangigkeit der übrigen Indikatoren berechnen. Wegen der Normierung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte gilt für die Summe der Wahrscheinlichkeiten der Vorrangigkeit der einzelnen Indikatoren

$$\sum_{k=1}^n P(1 : x_k) = 1$$

Auf dieser Grundlage kann nun – jeweils getrennt nach Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren – die mittlere Wahrscheinlichkeit dafür angegeben werden, dass der Indikator x_k in Spalte j der Vulnerabilitätsmatrix (beschreibt Veränderungen gegenüber Änderungen in der Umweltdimension j) der vorrangige Indikator ist. Die Mittelung erfolgt über die einzelnen Matrixelemente (Zeilen) der Spalte, d.h. es wird nach der mittleren Wirkung des Indikators im Hinblick auf alle Armutsdimensionen gefragt. Dazu müssen zunächst für jedes Matrixelement (i,j) der betreffenden Spalte j die Wahrscheinlichkeiten $P_{i,j}(1 : x_k)$ für die Vorrangigkeit von x_k unter den Indikatoren für das Matrixelement (i,j) berechnet

werden. Dabei gilt $P_{i,j}(1 : x_k) = 0$ falls das Matrixelement (i,j) nicht indiziert ist bzw. falls x_k im Matrixelement (i,j) nicht vorkommt. Es ist anzumerken, dass die Wahrscheinlichkeiten $P_{i,j}(1 : x_k)$ für die Vorrangigkeit der einzelnen x_k in einer bestimmten Provinz bzw. Munizip umso trennschärfer werden, je kleiner die Fehler der einzelnen Indikatoren sind, d.h. je schmalere die Wahrscheinlichkeitsdichten der einzelnen Indikatoren x_k sind. Im Grenzfall absolut fehlerfreier und verschieden großer Indikatoren gäbe es ein $x_{k,\max}$ mit $P_{i,j}(1 : x_{k,\max}) = 1$ und alle übrigen $P_{i,j}(1 : x_k)$ wären gleich Null.

Die mittlere Wahrscheinlichkeit $P_j(1 : x_k)$ für die Vorrangigkeit von x_k in Spalte j ergibt sich dann zu

$$P_j(1 : x_k) = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{i,j}(1 : x_k)}{N_j}$$

wobei die Summe $i = 1, \dots, 5$ über alle Armutsdimensionen läuft und N_j die Anzahl der nicht-verschwindenden Matrixelemente der j -ten Spalte ist². Da die $P_j(1 : x_k)$ nur durch die Anzahl der nicht-verschwindenden Matrixelemente geteilt werden, ergibt sich bei Summation über alle in der Spalte vorkommenden Indikatoren die Normierung

$$\sum_{k=1}^{n_j} P_j(1 : x_k) = 1$$

wobei n_j die Anzahl der in der j -ten Spalte vorkommenden Indikatoren ist.

Das beschriebene Verfahren zur Ermittlung der mittleren Wahrscheinlichkeiten $P_j(1 : x_k)$ für alle in einer Spalte vorkommenden Indikatoren kann in folgenden drei Schritten – die nacheinander jeweils getrennt nach Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren durchzuführen sind – zusammengefasst werden:

1. Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für die Vorrangigkeit aller Indikatoren für ein einzelnes Matrixelement der betreffenden Spalte.
2. Summieren der Wahrscheinlichkeiten für die Vorrangigkeit eines jeden Indikators über alle Matrixelemente der betreffenden Spalte liefert eine mittlere Wahrscheinlichkeit für diese Spalte.
3. Abschließend werden die Indikatoren gemäß der Größe der mittleren Wahrscheinlichkeit der Vorrangigkeit – und somit ihrer angenommenen Bedeutung nach – sortiert: derjenige Indikator mit der größten mittleren Wahrscheinlichkeit ist der "vorrangige Indikator".

Die vorgestellte Methodik führt aus, wie die Vulnerabilitätsmatrix prinzipiell für die Entwicklung und Prioritätensetzung von Strategien verwendet werden kann. Selbstverständlich kann der Einsatz von Strategien auch in Regionen sinnvoll sein, wo diese nicht zu den ermittelten vorrangigen Indikatoren korrespondieren. Im Rahmen unseres Ansatzes könnte man beispielsweise noch die "zweitrangigen" oder "drittrangigen" Indikatoren der jeweiligen Spalte für jede Provinz bzw. Munizip berücksichtigen.

² Eine Ausnahme besteht bei denjenigen Matrixelementen der Biodiversitäts-Spalte, in denen nur ein einziger Sensitivitätsindikator vorkommt, der dann sozusagen "konkurrenzlos" ist. Diese Matrixelemente werden bei der Ermittlung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Biodiversitäts-Spalte nicht berücksichtigt, um eine ungerechtfertigte Übergewichtung der betreffenden Indikatoren zu vermeiden. Für die Sensitivitätsindikatoren der Biodiversitäts-Spalte ist also $N_j = 2$.

5.2 Ergebnisse

Generell soll vorausgeschickt werden, dass angesichts der limitierten Datenbasis und der notwendigen Weiterentwicklung des methodischen Ansatzes die hier ermittelten vorrangigen Indikatoren und Strategien nicht im Sinne praxisorientierter konkreter Handlungsempfehlungen, sondern vor allem als Illustration zu verstehen sind. Für die Strategieentwicklung kann das hier vorgestellte Verfahren also wichtige Hinweise bieten, welche lokal geeignete Maßnahmen besonders große Wirkungen erwarten lassen. Diese Hinweise müssen aber durch weitere Informationen ergänzt und mit dem Sachverstand von mit der lokalen Situation vertrauten Akteuren abgestimmt werden.

5.2.1 Burkina Faso

Wasserknappheit zählt in Burkina Faso zu den gravierendsten Umweltproblemen. Angesichts der wachsenden Bevölkerung wird sich die Trinkwasserversorgung in einigen Regionen auch in Zukunft weiter verschärfen (vgl. Abschnitt 3.1). Als Beispiel sind daher in Abbildung 5.1 für alle Provinzen in Burkina Faso die vorrangigen Indikatoren der Sensitivität gegenüber Trinkwassermangel (d.h. für alle Provinzen jeweils derjenige Sensitivitätsindikator, der die größte Wahrscheinlichkeit für Vorrangigkeit besitzt) sowie deren Wahrscheinlichkeit für Vorrangigkeit (Schraffur) dargestellt.

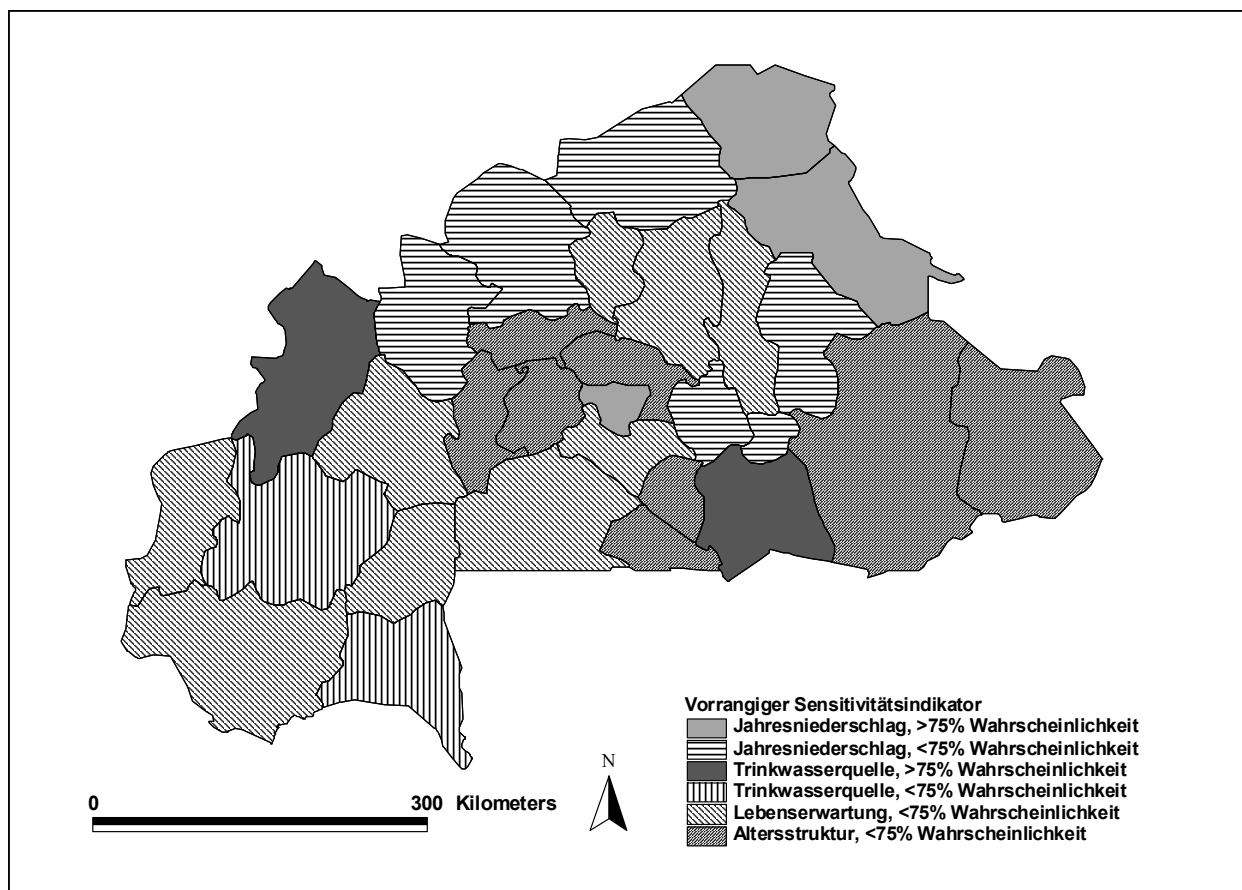


Abbildung 5.1: Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Trinkwassermangel in Burkina Faso. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).

Die Provinzen tragen jeweils den Graton des vorrangigen Indikators. Die Schraffur gibt den Wert der Wahrscheinlichkeit an: Flächendeckend dargestellt sind die vorrangigen Indikatoren, die mehr als 75% Wahrscheinlichkeit erreichen, während die Wahrscheinlichkeiten unter 75% durch eine Schraffur gekennzeichnet sind. Die Sensitivität gegenüber Trinkwassermangel wird im Norden Burkina Fasos demnach vorrangig vom mittleren Jahresniederschlag bestimmt. Die Hauptrolle im Südwesten des Landes spielen die Erreichbarkeit der Trinkwasserquellen sowie die durchschnittliche Lebenserwartung bei der Geburt, die als Indikator für den Ernährungs- und Gesundheitszustand der Bevölkerung verwendet wird. Im Osten ist vor allem die Altersstruktur der Bevölkerung bestimmend. Es fällt auf, dass die Wahrscheinlichkeit für die Vorrangigkeit des jeweiligen Sensitivitätsindikators meist unter 75% liegt, so dass vermutlich in diesen Regionen auch die nachfolgenden Indikatoren nicht zu vernachlässigen sind. Nur im äußersten Norden des Landes tritt beispielsweise der mittlere Jahresniederschlag als vorrangiger Indikator mit mehr als 75% Wahrscheinlichkeit auf, was den regionalen Einfluss des Klimas auf die Sensitivität gegenüber Trinkwassermangel widerspiegelt.

Das vorgestellte Verfahren, mit dem die vorrangigen Sensitivitätsindikatoren gegenüber Trinkwassermangel bestimmt werden, kann analog für die Ermittlung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren angewendet werden. Um Ansatzpunkte für mögliche Strategien zu finden, müssen die als vorrangig identifizierten Indikatoren interpretiert werden. Wenn ein Indikator sich als vorrangig herausstellt, dann hat er einen maßgeblichen Einfluss auf die Sensitivität bzw. Bewältigungskapazität. Die geringen Wahrscheinlichkeiten für die Vorrangigkeit von Indikatoren in den meisten Provinzen im obigen Beispiel belegen, dass hier meistens mehr als ein Indikator maßgeblich ist. Strategien, die auf die Verringerung der Sensitivität gegenüber dem Trinkwassermangel zielen, sollten daher nicht ausschließlich am vorrangigen Indikator ansetzen, sondern die nachrangigen Indikatoren ebenfalls berücksichtigen. So würde beispielsweise eine Strategie, die allein auf die Verringerung der Sensitivität gegenüber niedrigen Niederschlägen im Nordwesten des Landes oder gesundheitsfördernde Maßnahmen zur Beeinflussung von Lebenserwartung bzw. Altersstruktur im Osten setzt, die Sensitivität nicht wirkungsvoll vermindern können. Notwendige ergänzende Ansatzpunkte können sich aus einer Analyse ergeben, die auch die Indikatoren zweiten oder höheren Ranges berücksichtigt. Diese Analysemethode kann wichtige regionalspezifische Ansatzpunkte zeigen, um die Sensitivität zu verringern bzw. die Bewältigungskapazität zu erhöhen und somit die gesamte Vulnerabilität zu verringern. Die Karten der vorrangigen Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren für die übrigen Spalten für Burkina Faso finden sich im Anhang II und III.

Da es – wie an obigem Beispiel ersichtlich – keine einzelne Masterstrategie gibt, die allein dazu befähigen würde, die Vulnerabilität wirkungsvoll zu vermindern, erweist es sich als sinnvoll, die Kombinationen von Indikatoren in einzelnen Regionen zu betrachten. Die Methode wird beispielhaft anhand der vorrangigen Indikatoren der Sensitivität und Bewältigung der gesamten Vulnerabilitätsmatrix für Burkina Faso dargestellt. Hierzu wird die Häufigkeit ermittelt, mit der die einzelnen Kombinationen von Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren in allen vier Spalten (Umweltdimensionen) der Matrix in allen Provinzen Burkina Fasos auftreten. Tabelle 5.1 zeigt die häufigsten Kombinationen von vorrangigen Sensitivitäts- (Zeile) und Bewältigungsindikatoren (Spalte) in Burkina Faso.

Tabelle 5.1: Burkina Faso: Kombination der vorrangigen Sensitivitäts- (Zeilen) und Bewältigungsindikatoren (Spalten). Die Zahlen geben die relative Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens in einer Provinz wieder.

	Alphabetisierungsrate	Einkommen	Bevölkerungsdichte	Summe
Landwirtschafts-Anteil am Einkommen	8%	7%	7%	22%
Holznutzung	6%	8%	-	14%
Mittlerer Jahresniederschlag	10%	2%	-	12%
Bodenzustand	4%	6%	2%	12%
Summe	28%	23%	9%	60%

Die Prozentzahlen in Tabelle 5.1 geben den kombinierten Anteil unter allen 30 Provinzen und allen vier Umweltdimensionen an (d.h. insgesamt 120 Fälle), in denen die jeweilige Kombination als vorrangig eingestuft wurde. Die relative Häufigkeit von 8% in der linken oberen Ecke von Tabelle 4.7 bedeutet also, dass in 8% der Fälle (ein „Fall“ ist hier jeweils die Vulnerabilität in einer Provinz gegenüber einer der vier Umweltveränderungen) sowohl die Alphabetisierungsrate vorrangiger Bewältigungsindikator als auch der Anteil der Landwirtschaft am Einkommen vorrangiger Sensitivitätsindikator ist. Die Zahlen addieren sich insgesamt nicht zu 100%, da andere, seltenere Kombinationen hier nicht berücksichtigt wurden.

Als dominierender Bewältigungsindikator stellt sich hier die Alphabetisierung (28%) heraus, was allerdings aufgrund der oralen Kultur und der Multilingualität des Landes nur sehr eingeschränkt gelten dürfte. Diese beiden Aspekte bedingen, dass die Aussagekraft dieses Indikators für den Faktor "Wissen" begrenzt ist und keine voreiligen Schlüsse zur Ableitung von Maßnahmen gezogen werden sollten. Als dominanter Sensitivitätsindikator ergibt sich der Landwirtschafts-Anteil am Einkommen (22%).

Das methodische Vorgehen bedingt Einschränkungen hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse aufgrund von mindestens drei Dingen. So kann beispielsweise der Fall auftreten, dass Maßnahmen allein deshalb nur begrenzt oder gar nicht identifiziert werden, weil der korrespondierende Indikator nur in einigen wenigen Matrixelementen verwendet wird. Da der Indikator in eben diesen Elementen aber durchaus besonders hervorstechen kann, können Maßnahmen deutlich relevanter sein als mit der vorliegenden Methode ermittelt. Eine ähnliche Unterschätzung kann durch eine geographische Unterrepräsentation auftreten, d.h. die Maßnahme wird für das Land als Ganzes unterschätzt, besitzt aber für einzelne Regionen durchaus eine besondere Bedeutung. Schließlich werden vergleichbare Skalen der Indikatoren zugrunde gelegt, d.h. gleiche Abstände bedeuten gleiche „Vorrangigkeitsdifferenzen“. Dies ist für viele Indikatoren sicherlich nur eine grobe Näherung und muss durch die Verwendung angepasster „semantischer“ Abstandsmaße verbessert werden.

5.2.2 *NO-Brasilien*

Auch für NO-Brasilien werden als Beispiel in Abbildung 5.2 die vorrangigen Indikatoren der Sensitivität gegenüber Trinkwassermangel (d.h. für alle Provinzen jeweils derjenige Sensitivitätsindikator, der die größte Wahrscheinlichkeit für Vorrangigkeit besitzt) sowie deren Wahrscheinlichkeit für Vorrangigkeit (Schraffur) für alle Munizipe dargestellt. Die Art der Darstellung ist dabei an das entsprechende obige Beispiel für Burkina Faso angelehnt.

Der Graton eines Munizips gibt hier ebenfalls den entsprechenden Indikator, die Schraffur jeweils die Wahrscheinlichkeit seiner Vorrangigkeit an. In der überwiegenden Mehrzahl der Munizipe stellt der mittlere Jahresniederschlag den vorrangigen Indikator der Sensitivität gegenüber Trinkwassermangel dar. Auffallend hohe Wahrscheinlichkeiten von >75% sind dabei vor allem für die Bundesstaaten Pernambuco, Ceará und in S-Piauí zu erkennen, die hier den prägenden Einfluss des Klimas hervorheben. Im Norden von Ceará sowie im Norden und Süden von Piauí sind vor allem die Dichte der Wasseranschlüsse, die Lebenserwartung und die Altersstruktur wesentliche Bestimmungsfaktoren. Da ihre Wahrscheinlichkeiten <75% betragen, sind die nachfolgenden Indikatoren ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Daher ist wie in Burkina Faso auch hier festzustellen, dass nicht ein einzelner Indikator isoliert als Ursache der Sensitivität auftritt und es daher einer gezielten Kombination von Strategien bedarf, um die Vulnerabilität wirkungsvoll zu mindern. Die Karten der vorrangigen Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren der übrigen Umweltdimension-Spalten sind im Anhang V und VI enthalten.

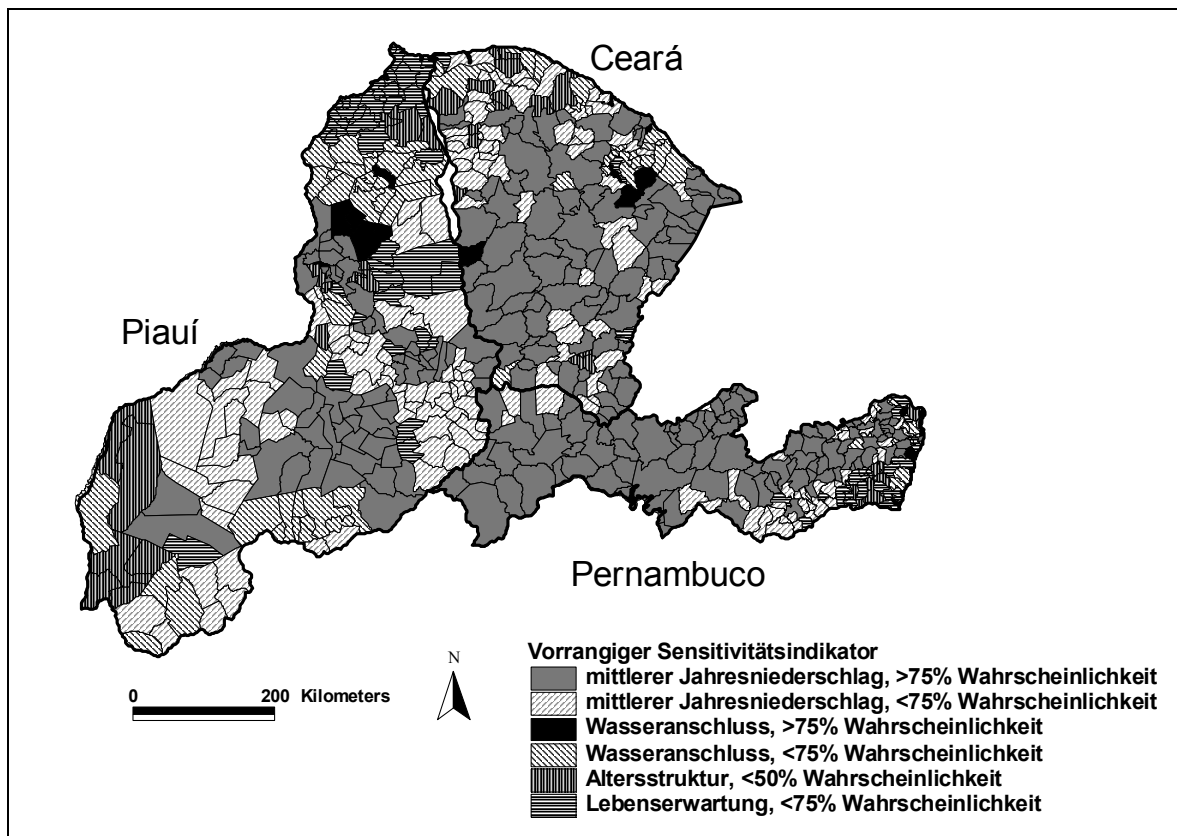


Abbildung 5.2: Räumliche Verteilung der jeweils vorrangigen Sensitivitätsindikatoren für NO-Brasilien. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).

In Tabelle 5.2 sind die Kombinationen der häufigsten vorrangigen Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren für NO-Brasilien zusammengestellt. Insgesamt zeigt sich, dass unter den Sensitivitätsindikatoren besonders der mittlere Jahresniederschlag von Bedeutung ist. Er erreicht in der Summe über alle genannten Kombinationen 27%. Unter den Bewältigungsindikatoren erlangt das Einkommen den höchsten Stellenwert mit 28%. Die Kombination beider Indikatoren erreicht demzufolge die höchste relative Bedeutung und ist für 13% der Munizipe vorrangig. Die jeweils vorrangigen Indikatoren müssten nun in entsprechende Maßnahmen übersetzt werden.

Tabelle 5.2: NO-Brasilien: Kombination der vorrangigen Sensitivitäts- (Zeilen) und Bewältigungsindikatoren (Spalten). Die Zahlen geben die relative Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens in einer Provinz wieder.

	Einkommen	Viehbestand	Alphabetisierungsrate	Summe
Mittlerer Jahresniederschlag	13%	8%	6%	27%
Bodentiefe	5%	6%	2%	13%
Mittlerer Grundnahrungsmittelanbau	6%	4%	3%	13%
Anteil der in der Landwirtschaft Beschäftigten	4%	1%	2%	7%
Summe	28%	19%	13%	60%

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird ein neuartiges Konzept zur Beschreibung der Vulnerabilität menschlicher Systeme gegenüber Umweltveränderungen vorgestellt und davon ausgehend werden Hinweise zur Entwicklung von Strategien zur Bekämpfung der wesentlichen Armuts- und Umweltprobleme gegeben. Das Konzept wird in zwei Regionen angewendet - Burkina Faso und NO-Brasilien. Aufgrund der allgemeinen mathematischen Formulierung ist die vorgestellte Methode generell anwendbar und weder auf die beiden Fallstudienregionen noch auf die konkret in der Studie betrachteten Armuts- und Umweltdimensionen beschränkt.

Das vorgestellte Vulnerabilitätskonzept zeichnet sich zunächst dadurch aus, dass es Mensch-Umwelt Systeme (MUS) als die grundlegenden Analyseeinheiten einer jeden Vulnerabilitätsanalyse als dynamische Systeme begreift. Weiterhin ermöglicht es, die multiplen Stressoren und die Vieldimensionalität menschlichen Wohlergehens als „Impaktvariablen“ einer Vulnerabilitätsanalyse zu berücksichtigen. Insgesamt besteht das Vulnerabilitätskonzept aus den Komponenten Sensitivität und Bewältigungsfähigkeit. Im Zentrum des neuen Ansatzes steht die sogenannte Vulnerabilitätsmatrix, die die linearisierte Auswirkung der Änderung jeweils einer Umweltdimension auf verschiedene Armutsdimensionen abbildet. Die lineare Approximation erzeugt zwar gewisse Grenzen für die Gültigkeit des Verfahrens, so können beispielsweise keine abrupten Änderungen betrachtet werden, doch sind diese bei Wahl eines geeigneten Referenzpfades durchaus handhabbar. Die hier betrachteten Umweltdimensionen umfassen Klima, Trinkwasser, Boden und Biodiversität, die betrachteten Armutsdimensionen sind monetäres Einkommen, Nahrungsmittelsicherheit, Wohnqualität, Gesundheit und Bildung. Basierend auf naturräumlichen und sozio-ökonomischen Daten auf Provinz- bzw. Munizipebene für die 1990er Jahre werden dann durch die Konstruktion geeigneter Indikatoren die Werte der einzelnen Elemente der Vulnerabilitätsmatrix für jede der 30 Provinzen bzw. 432 Munizipe bestimmt. Dieses prozessorientierte Indikator-Verfahren musste aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit vor allem für die Umweltdimensionen Boden und Biodiversität anstelle eines sich eigentlich anbietenden multiplen Regressions-Verfahrens verwendet werden.

Zentraler Bestandteil des Gutachtens sind die Vulnerabilitätskarten, die die räumliche Verteilung der Gesamtindikatoren der Vulnerabilität wiedergeben. Sie reflektieren besonders die kombinierte Wirkung der verschiedenen Faktoren und unterstreichen damit, dass die Vulnerabilität kaum auf das Wirken eines einzelnen Indikators zurückzuführen ist. Zur integrierenden Analyse der Vulnerabilität werden unter Verwendung eines Clusterverfahrens in Burkina Faso und NO-Brasilien vier Provinz- bzw. Munizipcluster mit jeweils ähnlicher Vulnerabilitätsstruktur identifiziert. Auffallend ist, dass es in beiden Regionen sowohl administrative Einheiten gibt, in denen alle Armutsdimensionen hoch vulnerabel gegenüber Veränderungen aller Umweltdimensionen sind, als auch solche Einheiten, die durch allseits geringe Vulnerabilitäten gekennzeichnet sind.

Abschließend wird ein Verfahren beschrieben, wie die Vulnerabilitätsmatrix prinzipiell für die Entwicklung und Prioritätensetzung von räumlich expliziten Strategien verwendet werden kann. Aus dem Verfahren resultieren raumspezifisch „vorrangige“ Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren. Diese Indikatoren können dann von lokalen Experten in entsprechende Strategien und Maßnahmen übersetzt werden. Die Analyse liefert darüber hinaus Hinweise darauf, welche Kombination von Strategien am ehesten erfolgversprechend sind.

6.2 *Ausblick*

Aus der vorhergehenden Zusammenfassung ergeben sich aus der Studie die folgenden, teilweise verknüpften Hauptrichtungen zukünftiger Forschung. Diese lassen sich in zwei grobe Schritte unterteilen.

1. Schritt: Validierung und Konkretisierung der Anwendung auf Burkina Faso und NO-Brasilien

- Validierung: Die quantitativen Daten und die Annahmen zu den Prozessen sollten durch qualitative sozialwissenschaftliche Forschung validiert werden. Hier bietet sich an, eine Kooperation mit (lokalen) Forschungsgruppen zu suchen, die im Rahmen internationaler und interdisziplinärer Projekte bereits eine Vulnerabilitätsanalyse für die beiden Fallstudienregionen durchgeführt haben. Dies würde es erlauben, die Brücke zwischen dem mathematisch-formalen Rahmen des hier vorgelegten Konzepts und den meist qualitativen Methoden solcher Vulnerabilitätsanalysen zu schlagen, was die Aussagekraft und somit Verwendbarkeit der Ergebnisse für Entscheidungsträger deutlich verbessern könnte.
- Konkretisierung: Die Übersetzung der vorrangigen Sensitivitäts- und Bewältigungsindikatoren in entsprechende Strategien und Maßnahmen erfordert ebenfalls die Expertise aus den Sozialwissenschaften und von Praktikern und Beteiligten vor Ort.

2. Schritt: Erweiterung der Methode und Übertragung auf andere Regionen

- Das Konzept selbst muss noch weiter entwickelt werden. Das betrifft zum einen die dynamische und spezifische Integration der Exposition. Zum anderen ist hier insbesondere die jüngere Diskussion zur sogenannten adaptive capacity zu beachten (Füssel & Klein 2005). Dies würde beispielsweise verlangen, die Kosten der in Abschnitt 4 ermittelten vorrangigen Strategien abzuschätzen und deren Realisierbarkeit in ein Gesamtmaß der Anfälligkeit einzubetten.
- Ergänzende mathematische Modelle: Um einzelne Aspekte des Gesamtsystems besser zu integrieren, bieten sich bereits vorhandene Modelle für den landwirtschaftlichen Ertrag oder anderer Ökosystemleistungen ebenso an, wie die eben erst im Entstehen begriffenen aktorsorientierten Modelle zur Beschreibung und Abschätzung von Bewältigungsstrategien. Mit Hilfe solcher Modelle kann es gelingen, einige der Matrixelemente direkt mit Hilfe sogenannter konjugierter Modelle zu bestimmen.
- Verbesserung der Datengrundlagen: Es besteht großer Bedarf an räumlich und zeitlich hoch aufgelösten, sowohl sozioökonomischen als auch naturräumlichen Daten für die analysierten Umwelt- und Armutsdimensionen. Die Datenerhebungsprogramme sollten homogenisiert und standardisiert werden, um Vergleiche zwischen Regionen und verschiedenen Zeitpunkten zu ermöglichen.
- Anwendung des Verfahrens auf andere Regionen, möglichst mit einer für das idealtypische Vorgehen ausreichenden Datengrundlage. Hier bietet sich an, eine Kooperation mit Forschungsgruppen zu suchen, die im Rahmen internationaler und interdisziplinärer Projekte bereits ein umfassendes "vulnerability assessment" für bestimmte Regionen durchführen oder durchgeführt haben. Letztlich muss eine „gute“ Vulnerabilitätsstudie für Entscheidungsträger aussagekräftig und verwendbar sein. Die Nützlichkeit des Matrixkonzepts für eine solche Anwendung kann sich daher am besten im Rahmen eines bestehenden vulnerability assessments zeigen.

Literatur

- DFID, EC, UNDP und World Bank (2002): Linking poverty reduction and environmental management. Policy challenges and opportunities. World Bank, Washington, Juli 2002.
- Eswaran, H., Reich, P., Beinroth, F. (1999) Global desertification Tension Zones. In: USDA (ed.) Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, pp 24-28.
- Farrel, A., VanDeer, S. and Jaeger, J. (2001): *Environmental Assessments: Four under-appreciated elements of design*. Global Environmental Change, **11**, 311.
- FEWS (1998) Current vulnerability assessment. Burkina Faso 1997/98. Early Famine Warning System Project, US Agency for International Development, Februar 1998.
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C., Walker, B., Bengtsson, J., Berkes, F., Colding, J., Danell, K., Falkenmark, M., Gordon, L., Kasperson, R., Kautsky, N., Kinzig, A., Levin, S., Mäler, K-G., Moberg, F., Ohlsson, L., Olsson, P., Ostrom, E., Reid, W., Rockström, J., Savenij, H. and Svedin, U. (2002): *Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations*. Report 2002:1, Swedish Environmental Advisory Council, Stockholm, Sweden.
- Füssel, HM. and Klein, R.J.T. (2005): *Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking*. Climatic Change, accepted pending revisions
- Gasper, D. (2004): *Human Well-Being: Concepts and Conceptualization*. Working Paper 388, Institute for Social Studies, The Hague.
- Gerstengarbe, FW. and Werner PC. (2003): *Climate Analysis and Scenarios for Northeast Brazil*. In: Gaiser T, Krol M, Frischkorn H, Araujo JC de (eds) Global Change and Regional Impacts. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brazil. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 137-151.
- Gibson, CC., Ostrom, E. and Ahn, TK. (2000): *The Concept of Scales and the Human Dimensions of Environmental Change: A Survey*. Ecological Economics, **32**, 217.
- Gomes, GM. (2001) Velhas Secas em Novos Sertões. Brasília
- Governo de Pernambuco (2002) Atlas da biodiversidade de Pernambuco. Governo de Pernambuco, secretaria de ciencias, tecnologia e meio ambiente y IPAD.
- Gray, LC. und Kevane, M. (2001): *Evolving tenure rights and agricultural intensification in Southwestern Burkina Faso*. World Development **29**, 4, 573-587.
- INSD (1994) Analyse des resultats de l'Enquête Prioritaire sur les conditions de vie des ménages en 1994. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Ouagadougou, Burkina Faso.
- INSD (1998) Analyse des resultats de l'Enquête Prioritaire sur les conditions de vie des ménages en 1998. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Ouagadougou, Burkina Faso.
- INSD (2000) Annuaire Statistique du Burkina Faso 1999. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Ouagadougou.
- Instituto Desert (2003) Programma de Combate a Desertificacao em Pernambuco. Informe Final. Teresina
- IPCC (2001) Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the IPCC. [Houghton, JT. et al. (Hg.)]. Cambridge University Press.
- Kasperson, JX. und Kasperson, RE. (2001) Climate Change, Vulnerability and Social Justice. Workshop Report, Stockholm Environment Institute.
- Leichenko, R. and O'Brien., K. (2002) The Dynamics of Rural Vulnerability to Global Change. *Mitigation and Adaptation to Global Change* 7(1): 1-18.
- Lemos JS (2001) Niveis de degradacao no Nordeste Brasileiro. Revista Economica do Nordeste 32, 3: 406-429.
- MMA (1998) Plano nacional de combate a desertificação. Ministerio do meio ambiente, dos recursos hídricos e da Amazônia legal, proj. BRA 93/036, Brasília.
- Mutter, T. (1991) Fehlt es nur an Wasser? Zur Agrarpolitik im Sertão , Nordost-Brasilien. Nord-Süd aktuell 3: 365-375.

- Oldeman, LR., Hakkeling, RTA. und Sombroek, WG. (1990) World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: An explanatory note. ISRIC/UNEP, Wageningen, Netherlands.
- Petschel-Held, G., Block, A., Cassel-Gintz, M., Kropp, J., Lüdeke, MKB., Moldehauer, O., Reusswig, F. and Schellnhuber, H-J. (1999): *Syndromes of global change: a qualitative modelling approach to assist global environmental management*. Environmental Modelling and Assessment, **4**, 295-314.
- Reardon, T. und Taylor, JE. (1996) *Agroclimatic shock, income inequality and poverty: Evidence from Burkina Faso*. World Development **24**(5), 901-914.
- Schellnhuber, H-J., Block, A., Cassel-Gintz, M., Kropp, J., Lammel, G., Lass, W., Lienenkamp, R., Loose, C., Lüdeke, MKB., Moldenhauer, O., Petschel-Held, G., Plöchl, M. and Reusswig, F. (1997), *Syndromes of Global Change*. GAIA, **6**(1) 19-34.
- Schröter, D., Polsky, C. and Patt, A. (2005): *Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, in press.
- SP-CONAGESE (1999) Country Study on Burkina Faso Biodiversity. Secrétariat Permanent du Conseil National pour la Gestion de l'Environnement, Ouagadougou.
- SP-CONAGESE (2002) État de l'Environnement au Burkina Faso. Secrétariat Permanent du Conseil National pour la Gestion de l'Environnement, Ouagadougou.
- Tompkins, EL. und Adger, WN. (2004): Does Adaptive Management of Natural Resources enhance Resilience to Climate Change? Ecology and Society **9**(2), Article 10. Downloadable at: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art10>
- Turner II, BL., Kasperson, RE., Matson, PM., McCarthy, JJ., Corell, RW., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, JX., Luers, A., Martello, M., Polsky, C., Pulsipher, A. and Schiller, A., (2003): *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*, Proceedings of the National Academy of Sciences, **100** (14), 8074-8079.
- UNDP (2001) Human Development Report – Burkina Faso 2001. The fight against HIV/AIDS. www.pnud/bf/ (12.5.2004)
- Voerkelius, S., Külls, C., Santiago, MMF., Frischkorn, H., Alves dos Santos Semrau, L., Heinrichs, G., López Gil, MM. (2003) Investigation on water management and water quality in Picos/PI and Tauá/CE. In: Gaiser, T., Krol, M., Frischkorn, H., Araujo, JC. de (eds) Global change and regional impacts. Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid Northeast of Brazil. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 173-184.
- Watts, MJ. and Bohle, H-G. (1993): The Space of Vulnerability: the Causal Structure of Hunger and Famine. Progress in Human Geography **17** (1), 43-67.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung “Globale Umweltveränderungen” (1997): Die Welt im Wandel – Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Jahresgutachten 1997. Springer-Verlag. Berlin/Heidelberg/New York.

Anhang I Vulnerabilitäten der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.

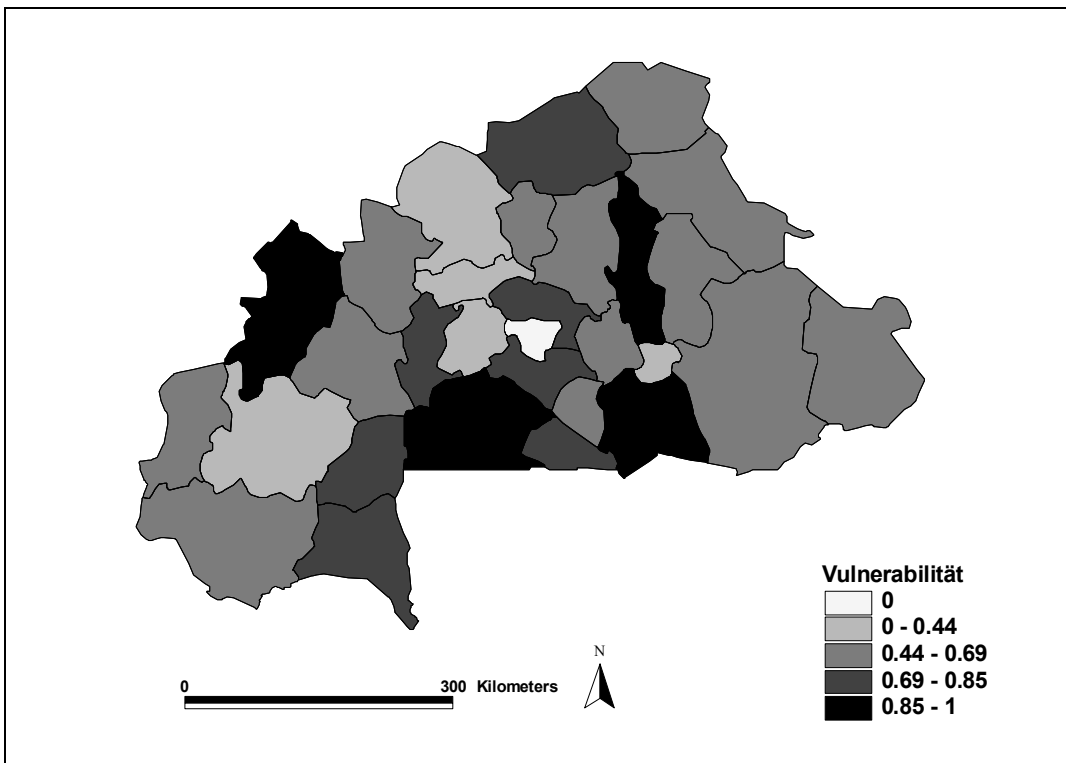


Abbildung AI.1 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Klimaveränderungen für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$)*.

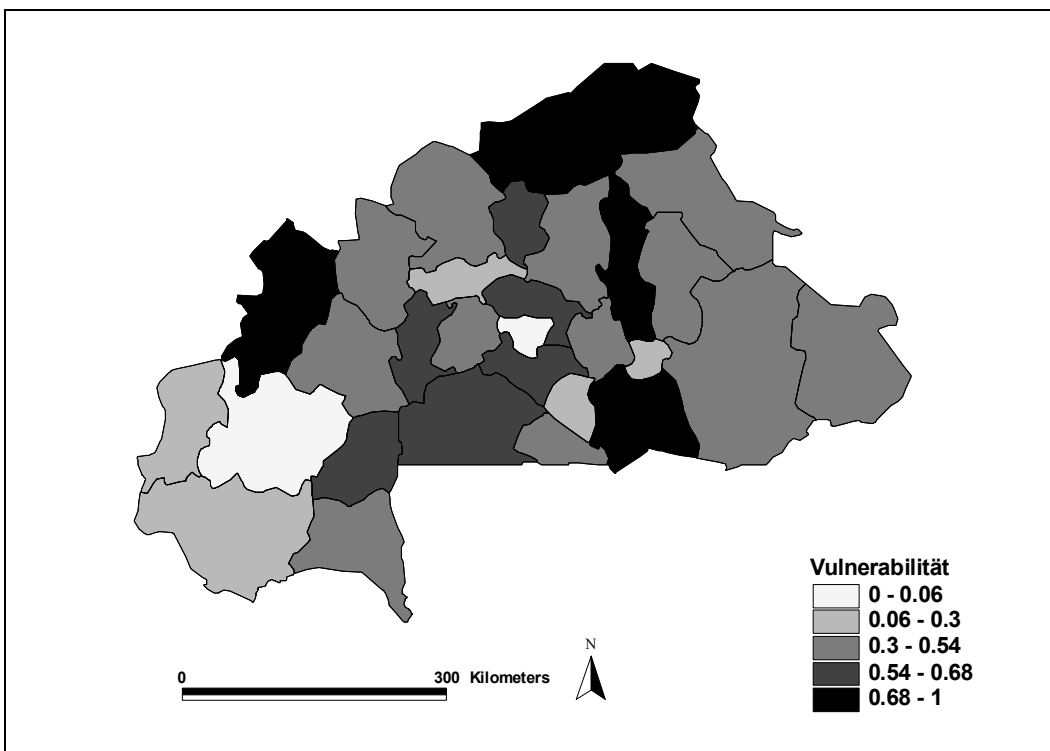


Abbildung AI.2 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Trinkwassermangel für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 13\%$).

* Im weiteren werden hier nur die durchschnittlichen relativen Fehler aufgeführt. In seltenen Ausnahmen betragen die relativen Fehler in einzelnen Provinzen bis $\pm 94\%$.

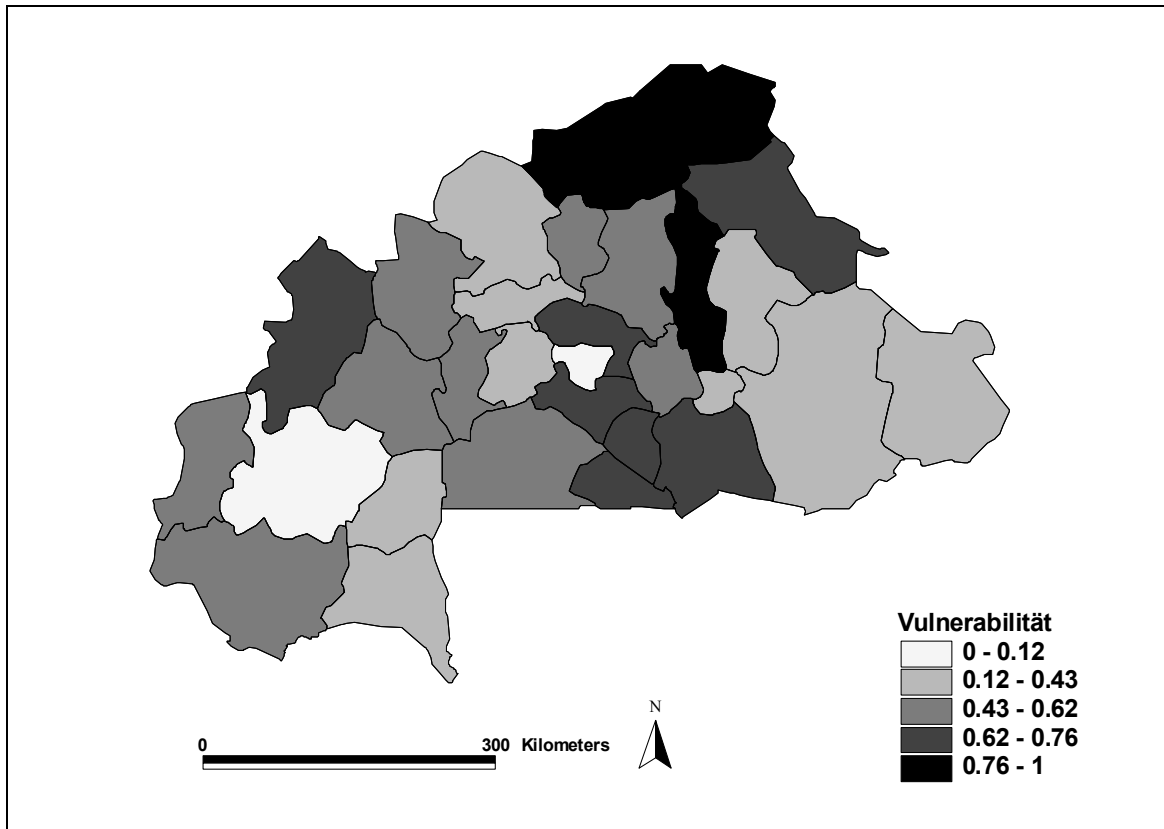


Abbildung AI.3 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Bodendegradation für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 12\%$).

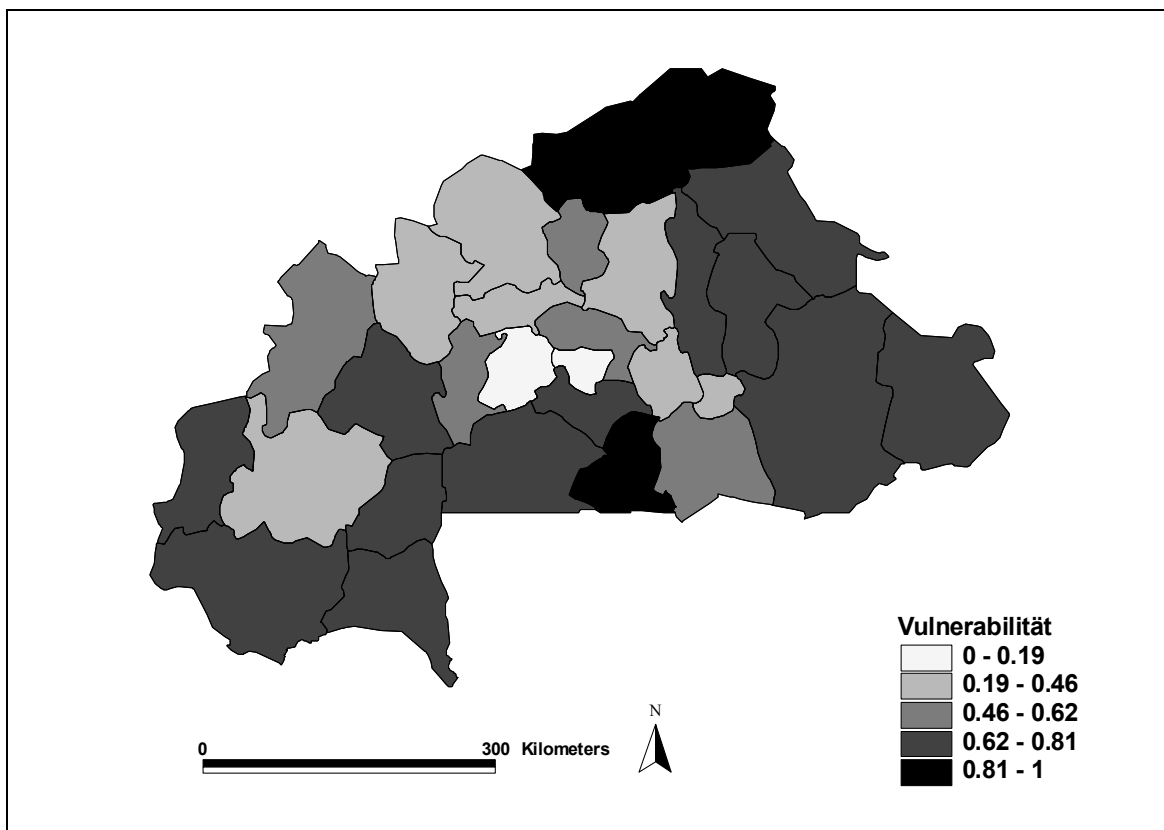


Abbildung AI.4 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Biodiversitätsverlust für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 8\%$).

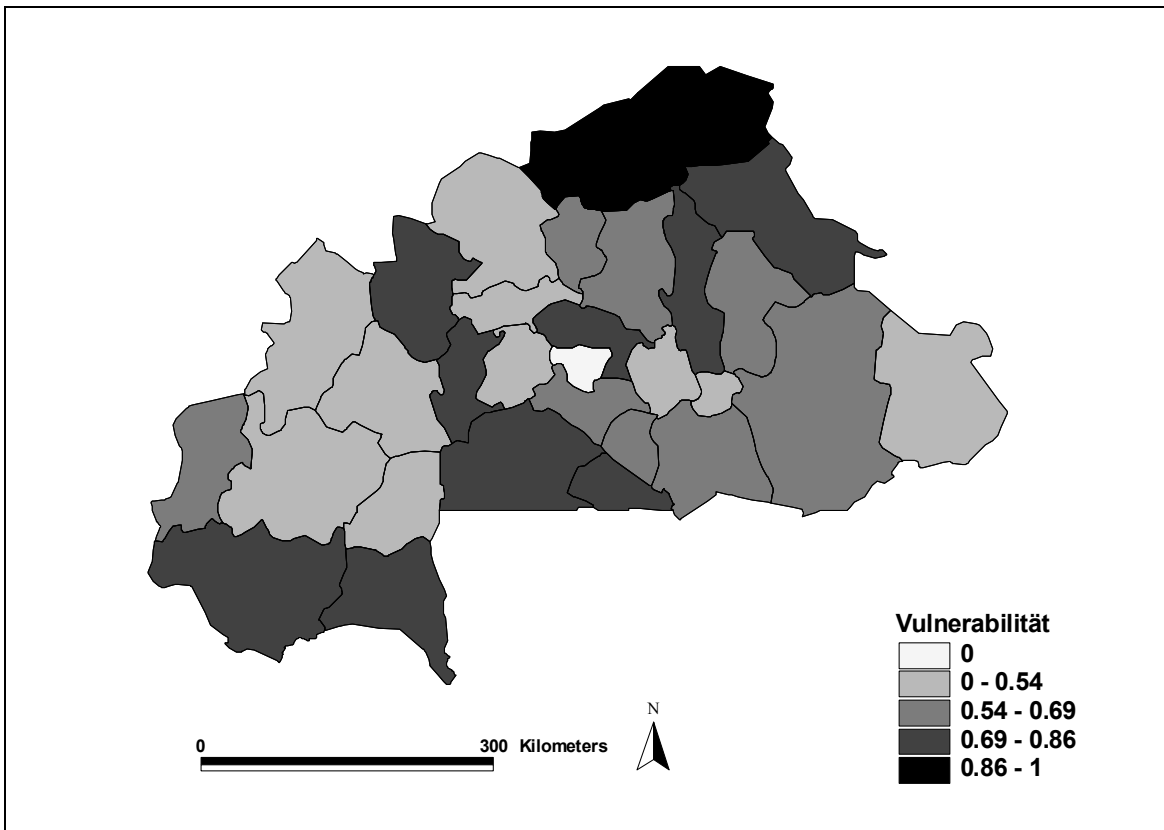


Abbildung AI.5 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Klimaveränderungen für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 13\%$).

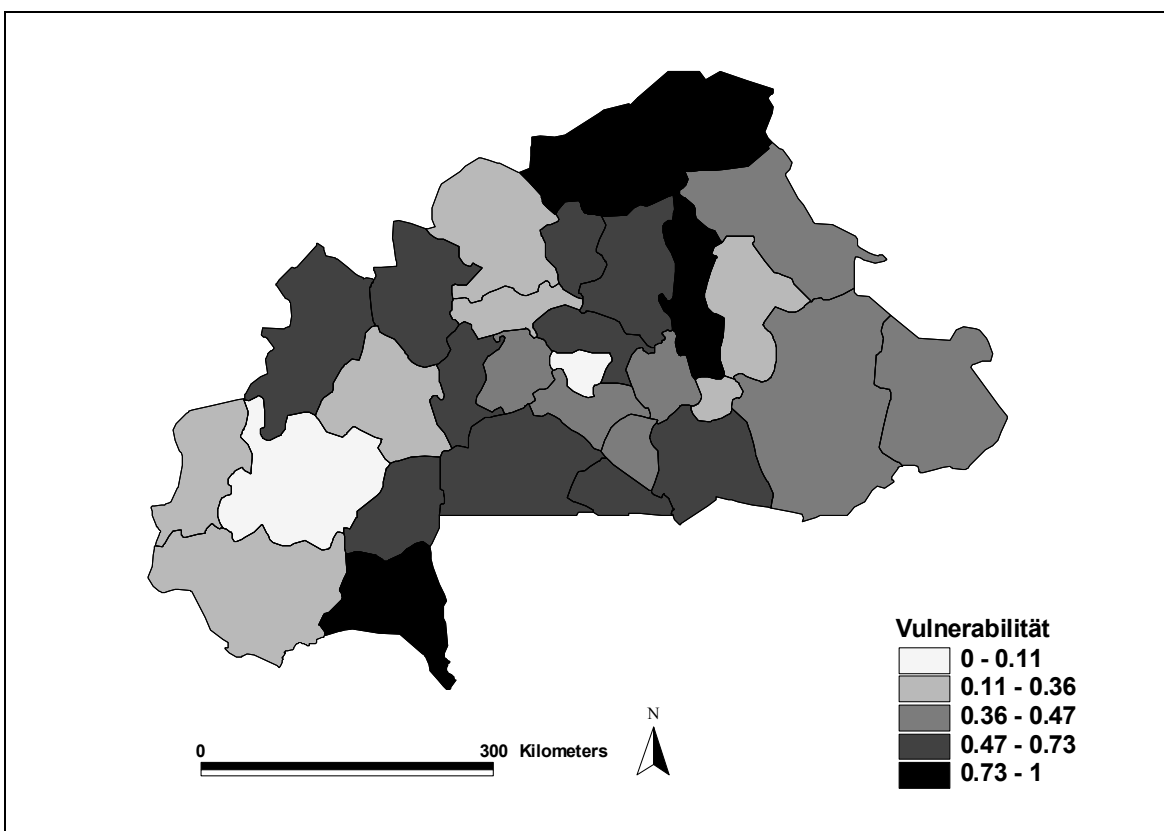


Abbildung AI.6 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Trinkwassermangel für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$).

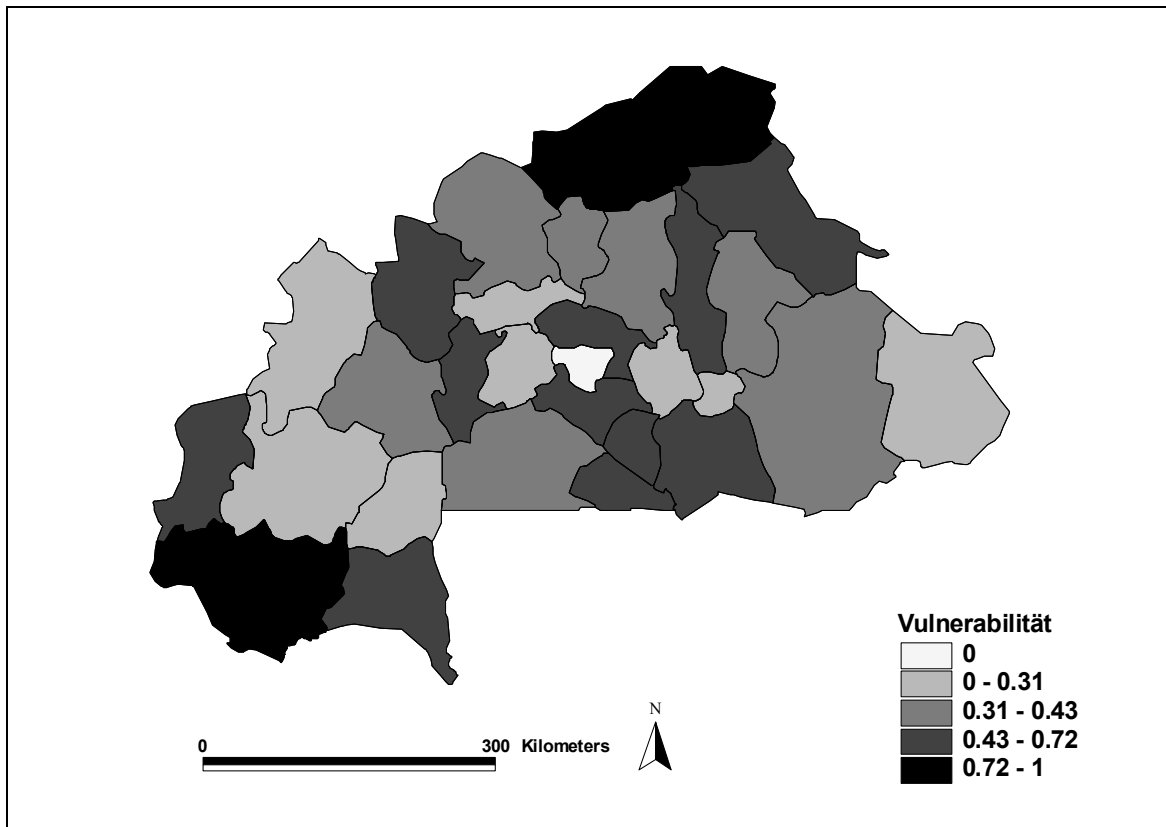


Abbildung AI.7 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Biodiversitätsverlust für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 12\%$).

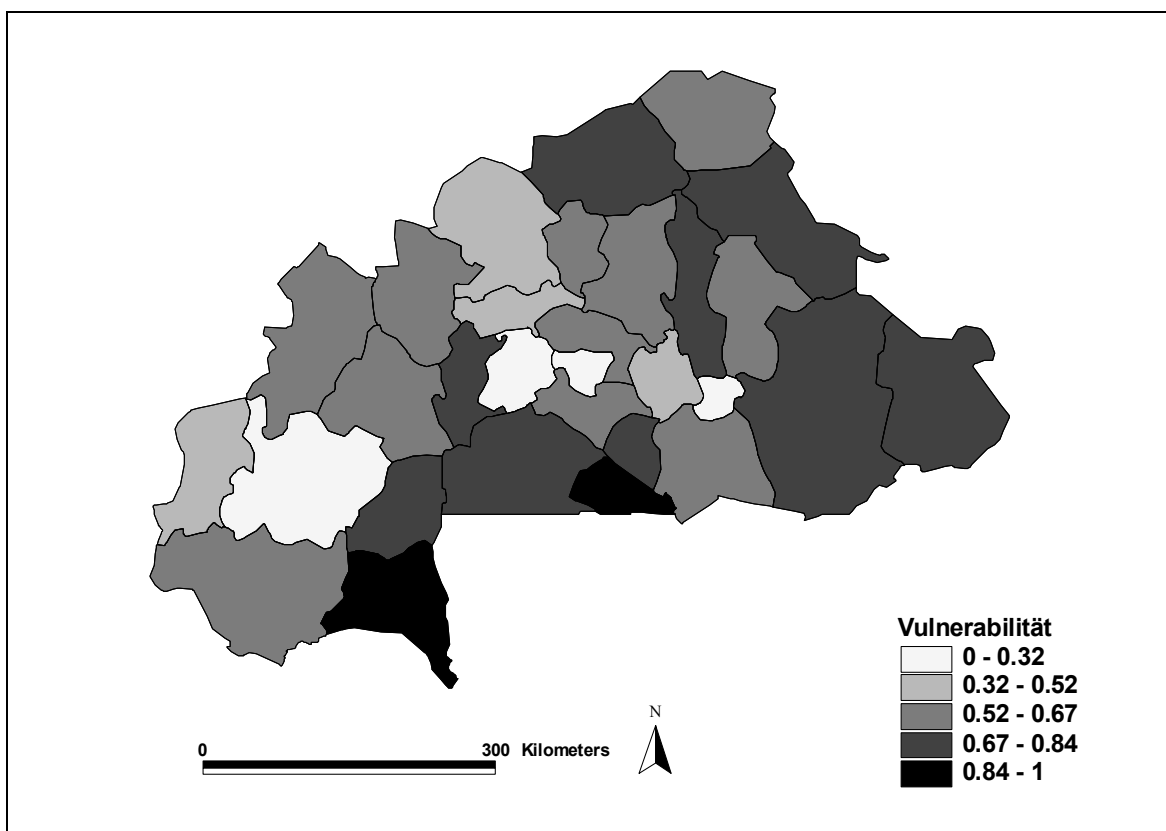


Abbildung AI.8 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Wohnqualität gegenüber Klimaveränderungen für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 8\%$).

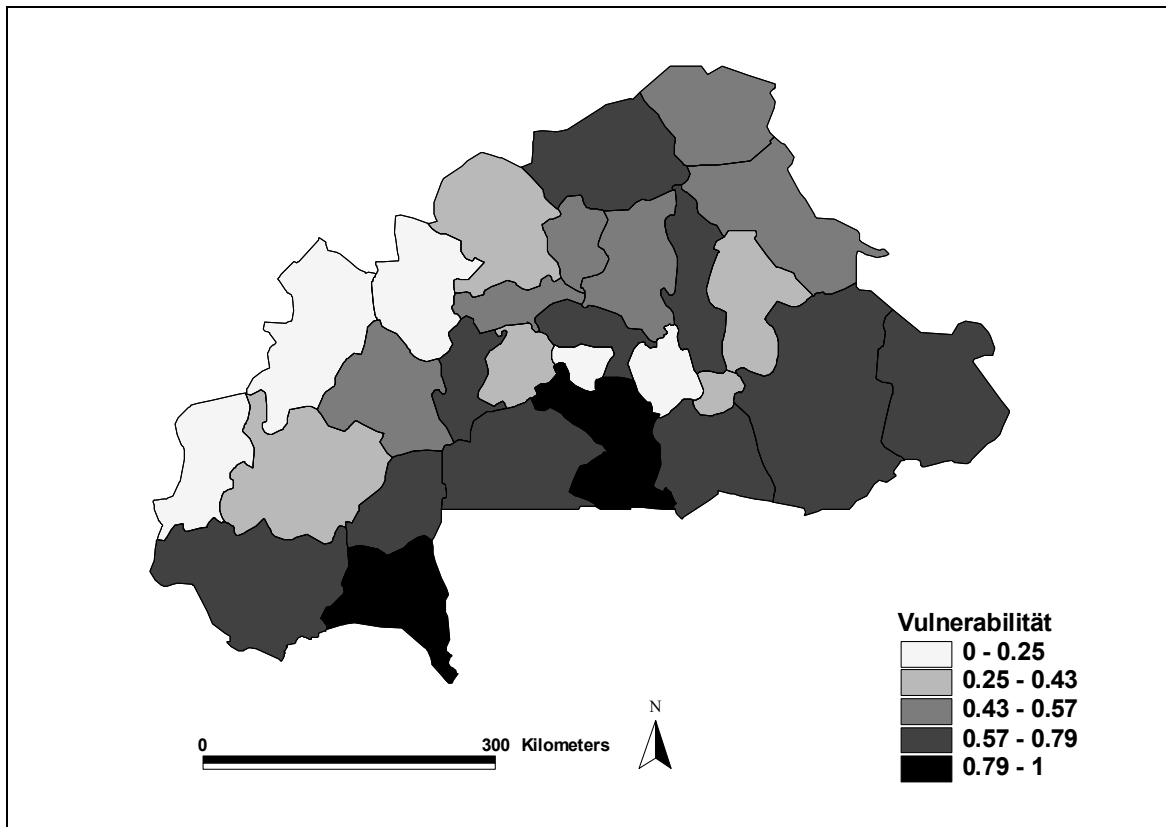


Abbildung AI.9 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Wohnqualität gegenüber Biodiversitätsverlust für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 12\%$).

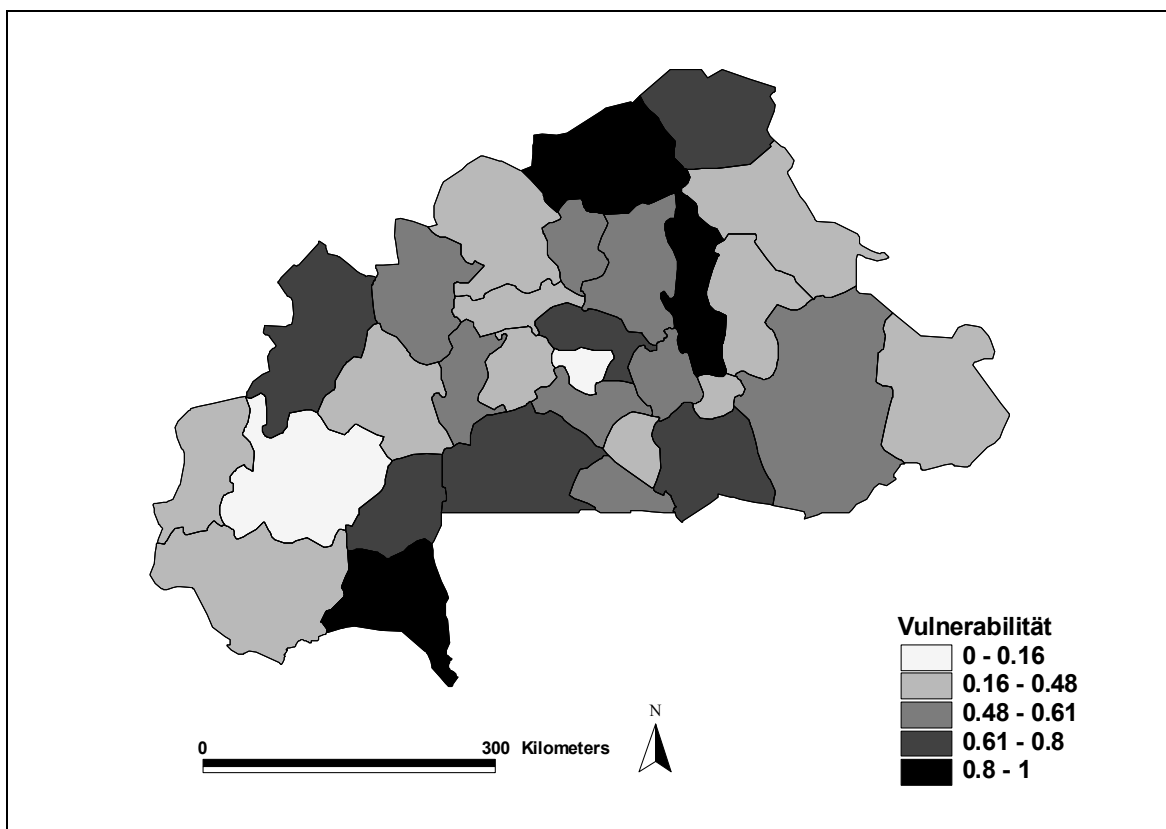


Abbildung AI.10 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Klimaveränderungen für Burkina Faso für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 10\%$).

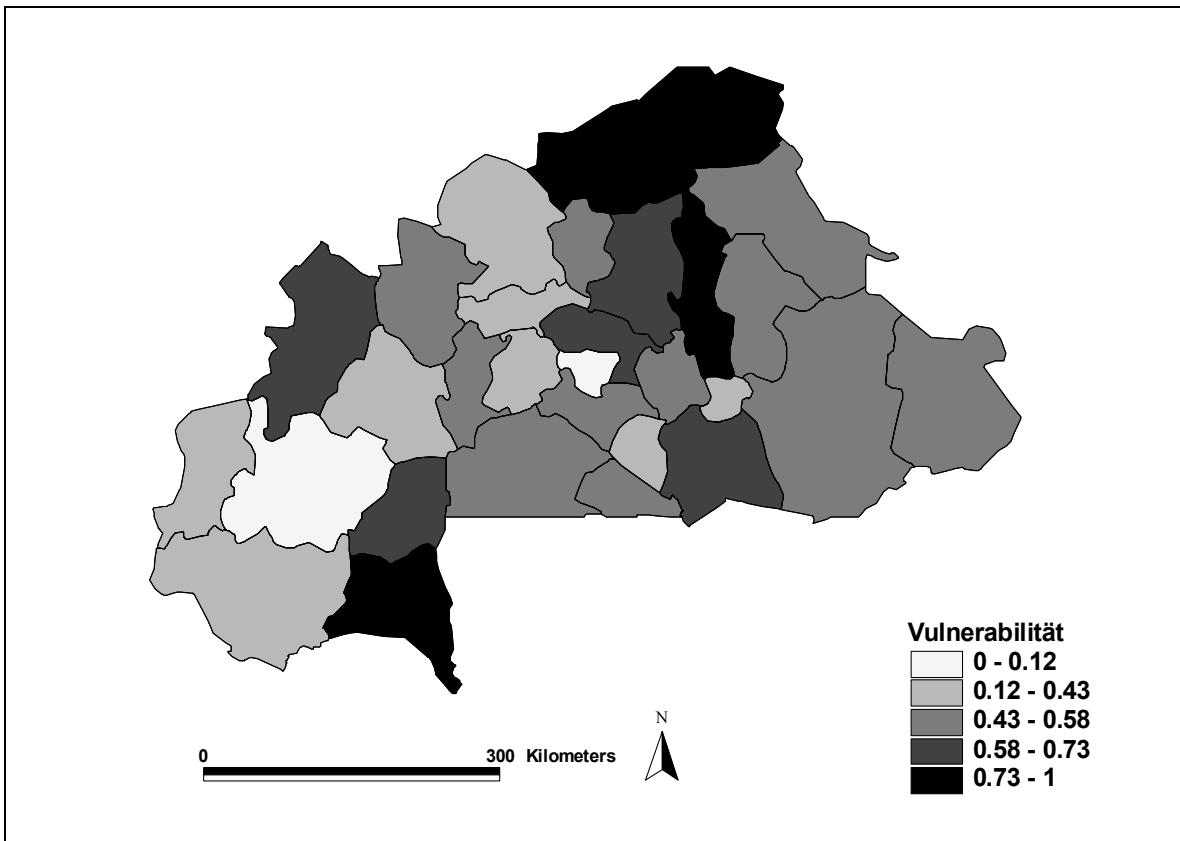


Abbildung AI.11 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Trinkwassermangel für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 9\%$).

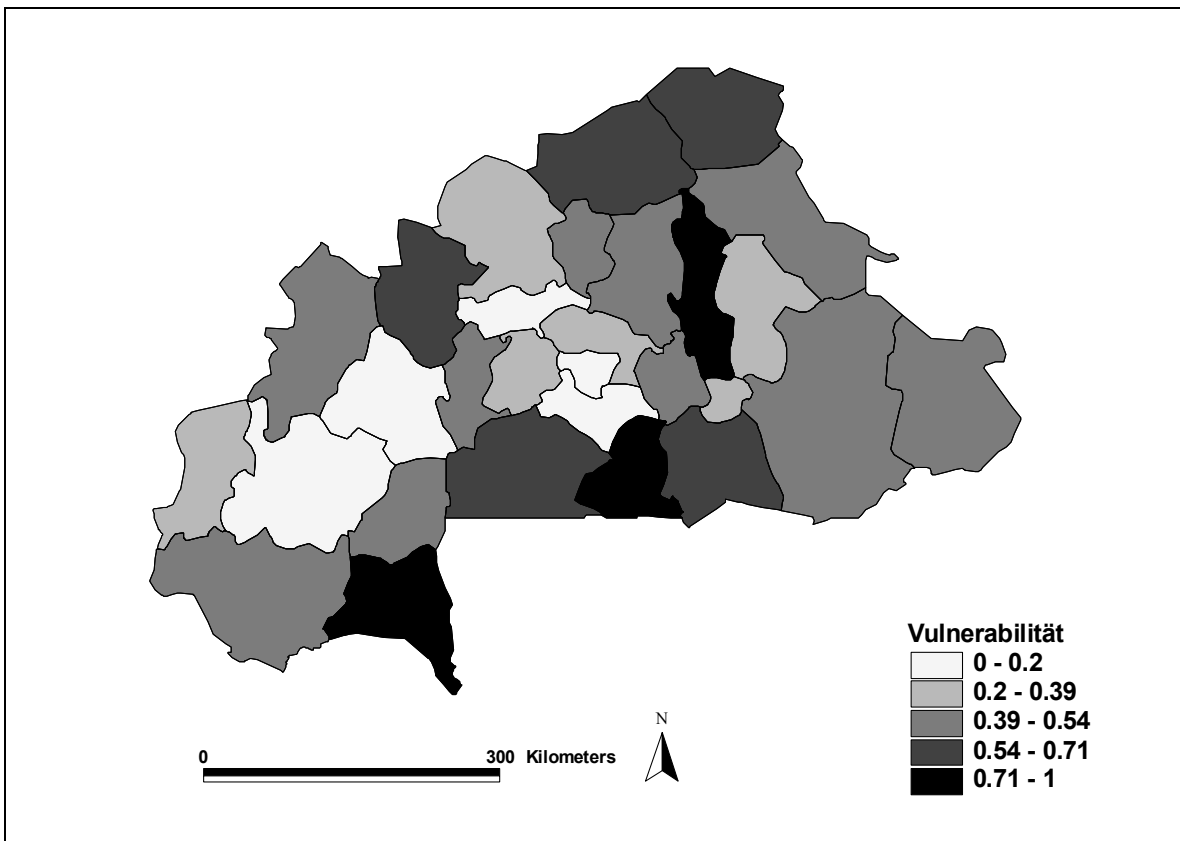


Abbildung AI.12 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Biodiversitätsverlust für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$).

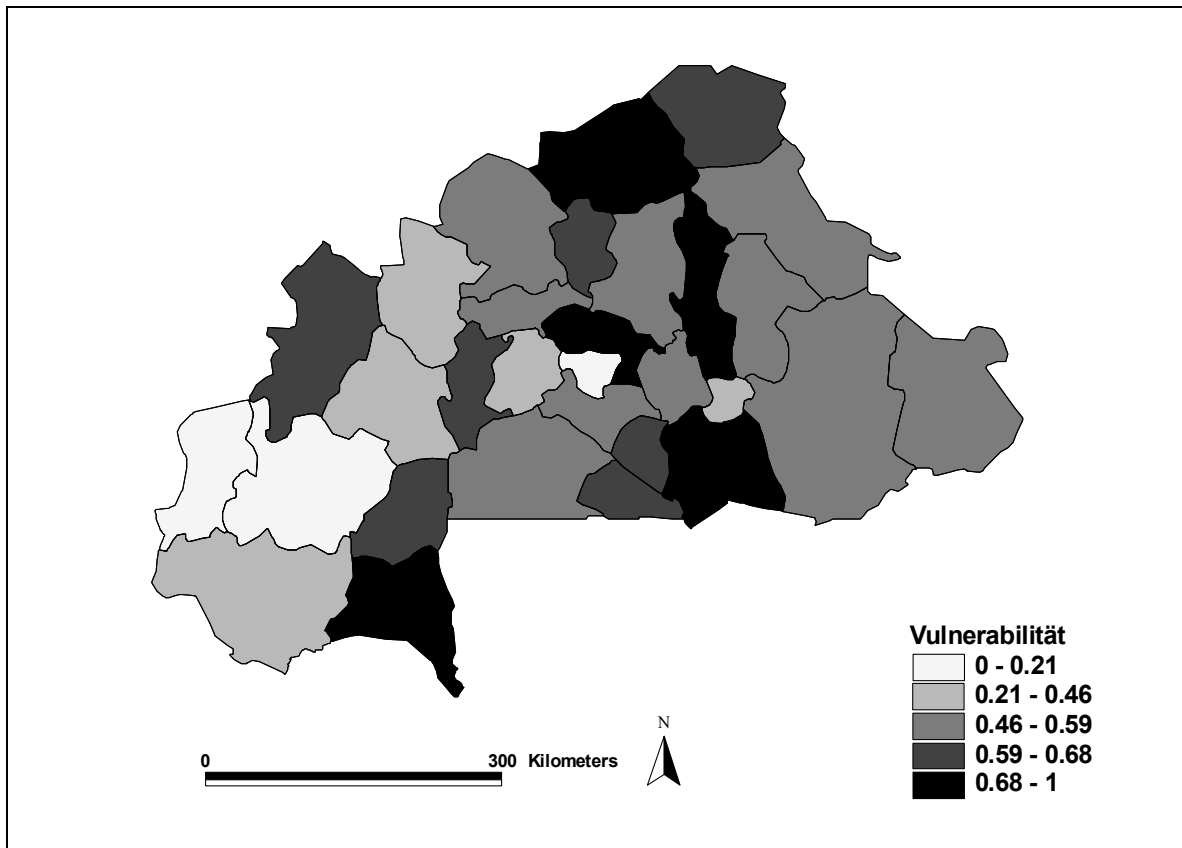


Abbildung AI.13 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Klimaveränderungen für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 14\%$).

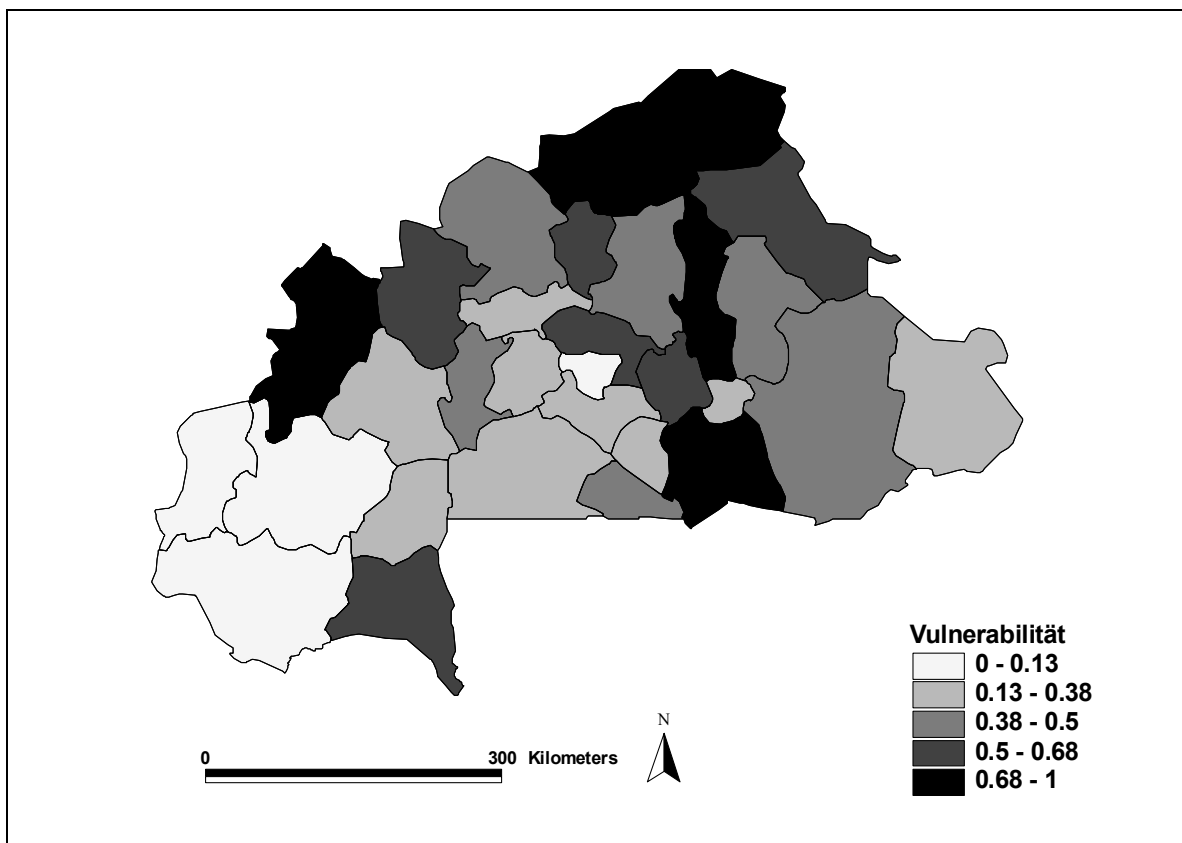


Abbildung AI.14 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Trinkwassermangel für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 21\%$).

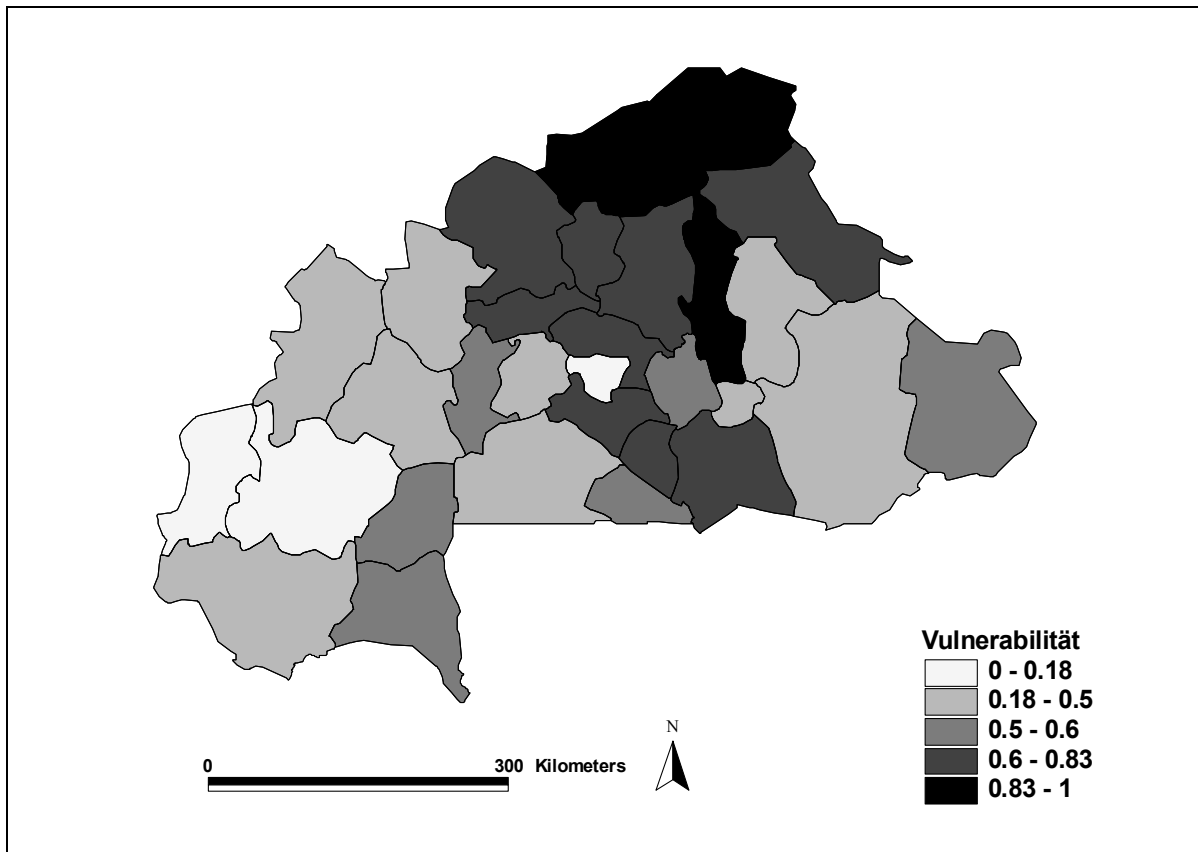


Abbildung AI.15 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Bodendegradation für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$).

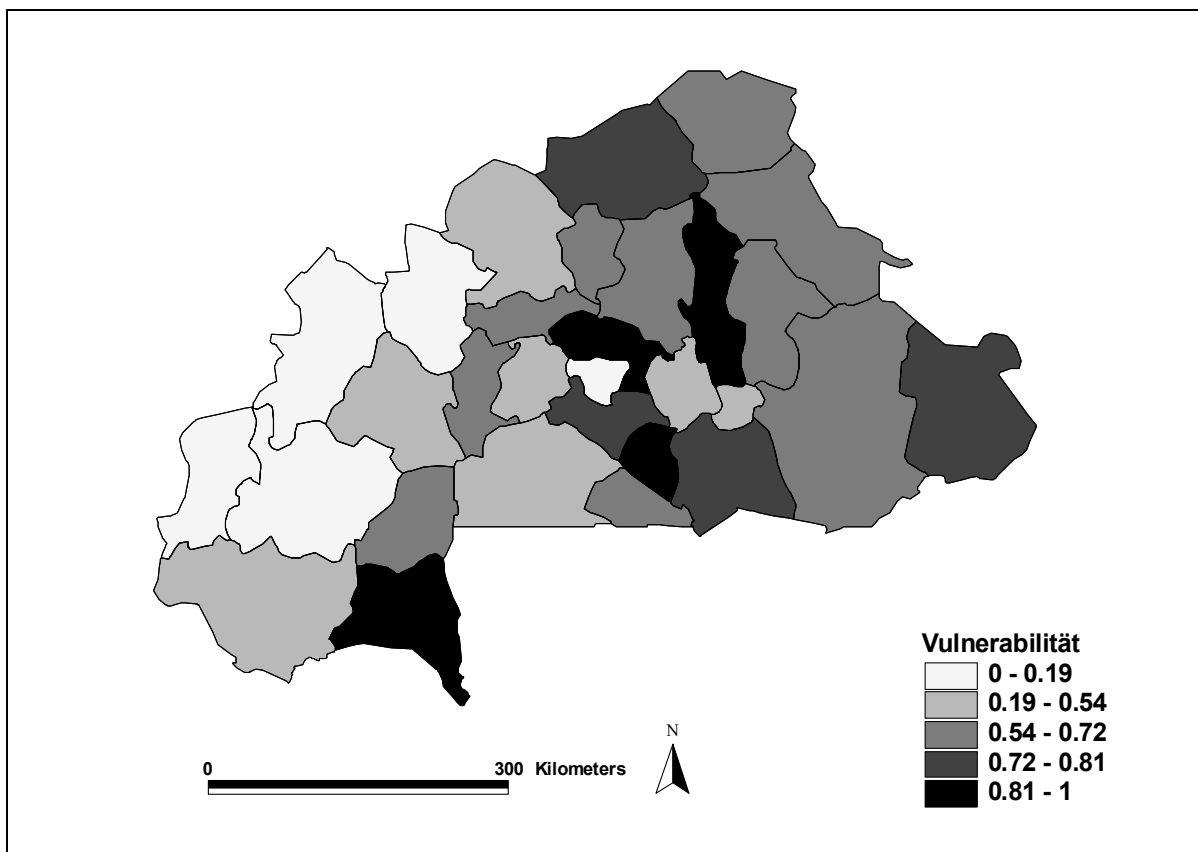
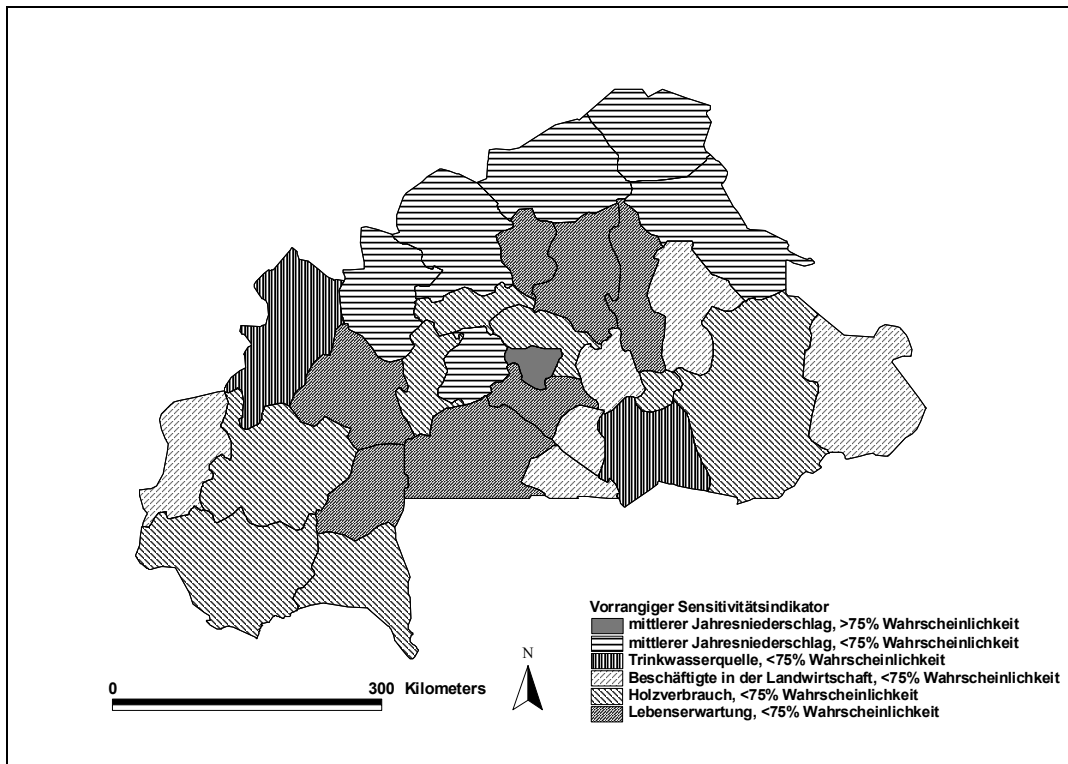
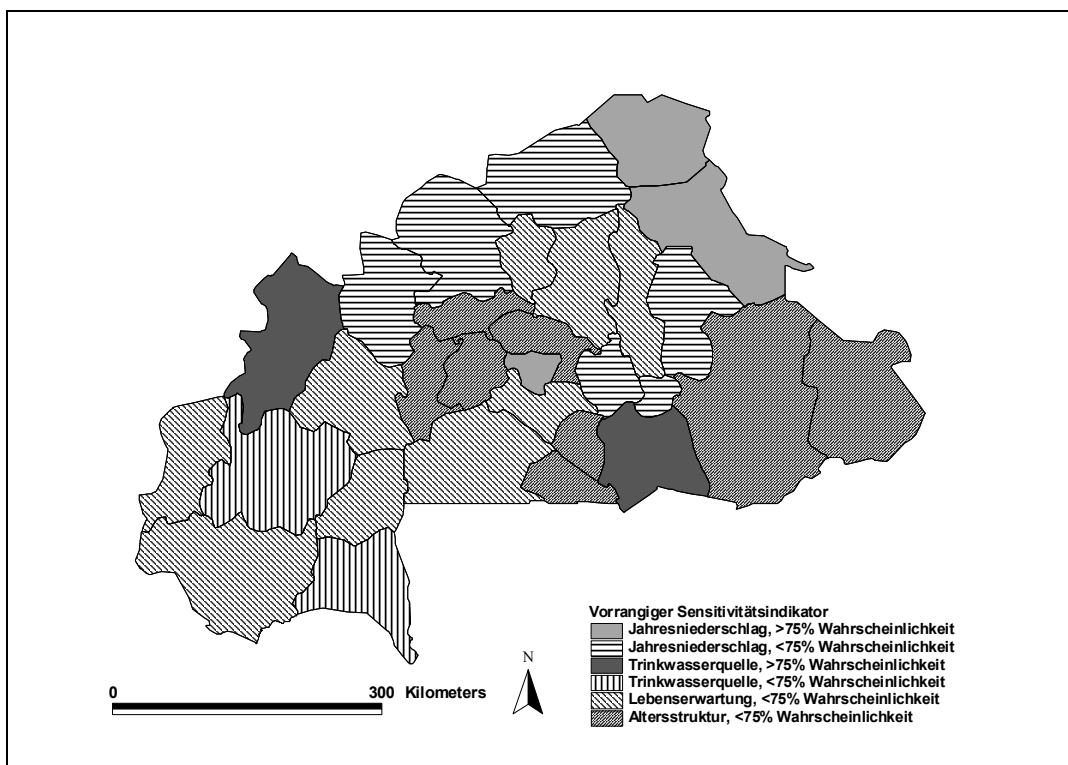


Abbildung AI.16 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Biodiversitätsverlust für Burkina Faso (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$).

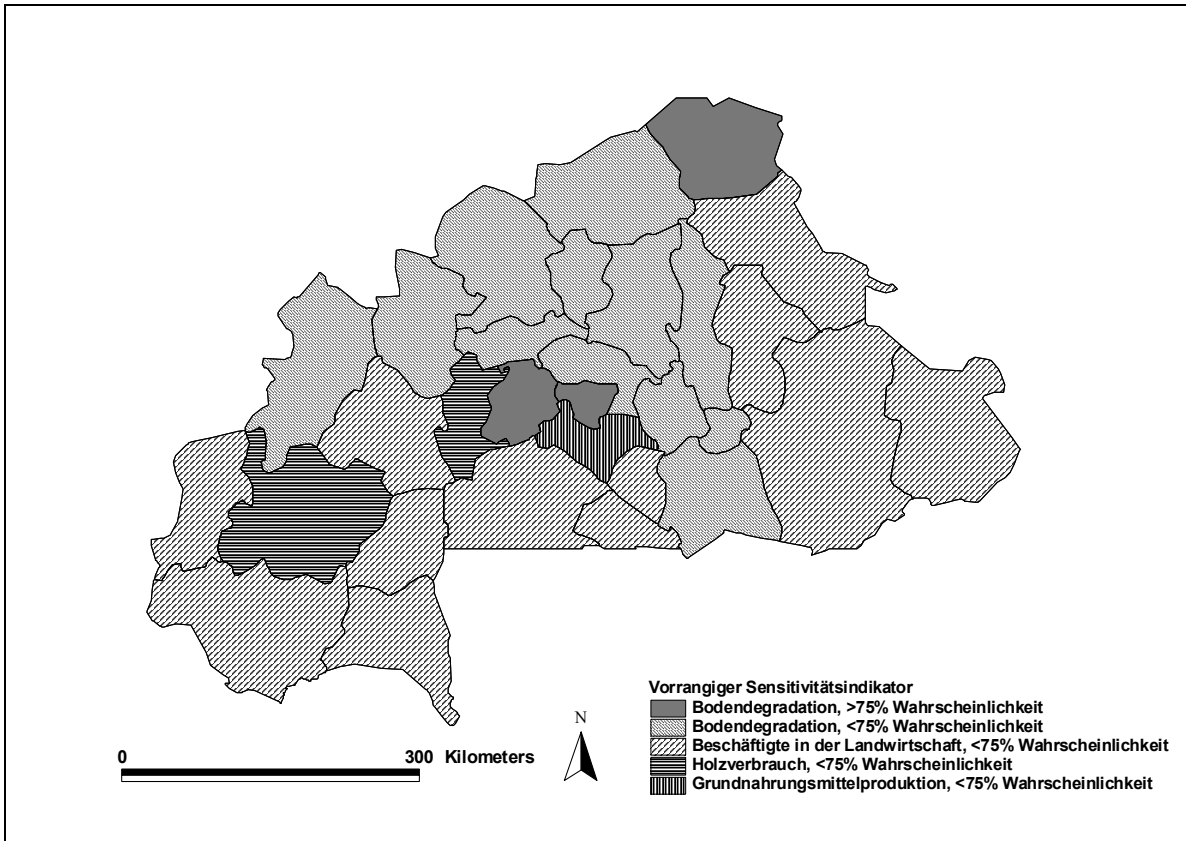
Anhang II Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.



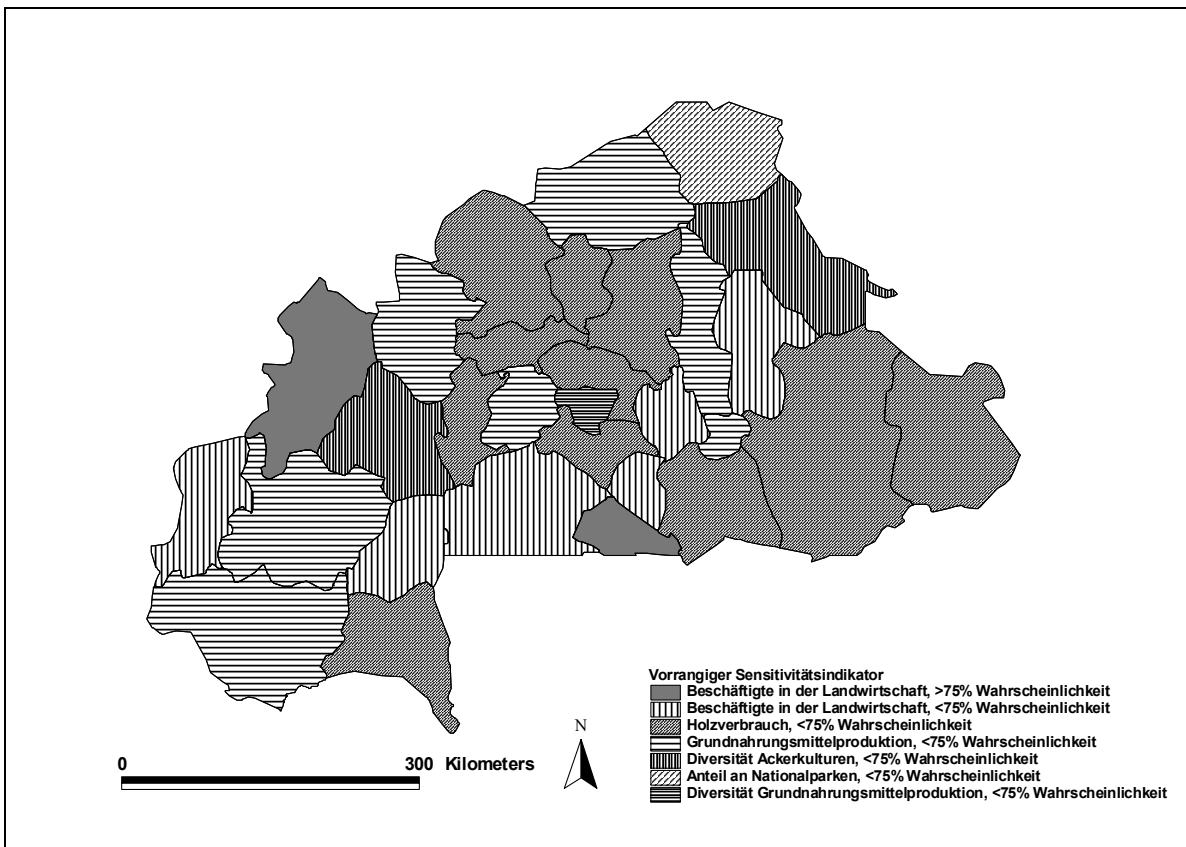
AII.1 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Klimawandel in Burkina Faso. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).



AII.2 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Trinkwassermangel in Burkina Faso.

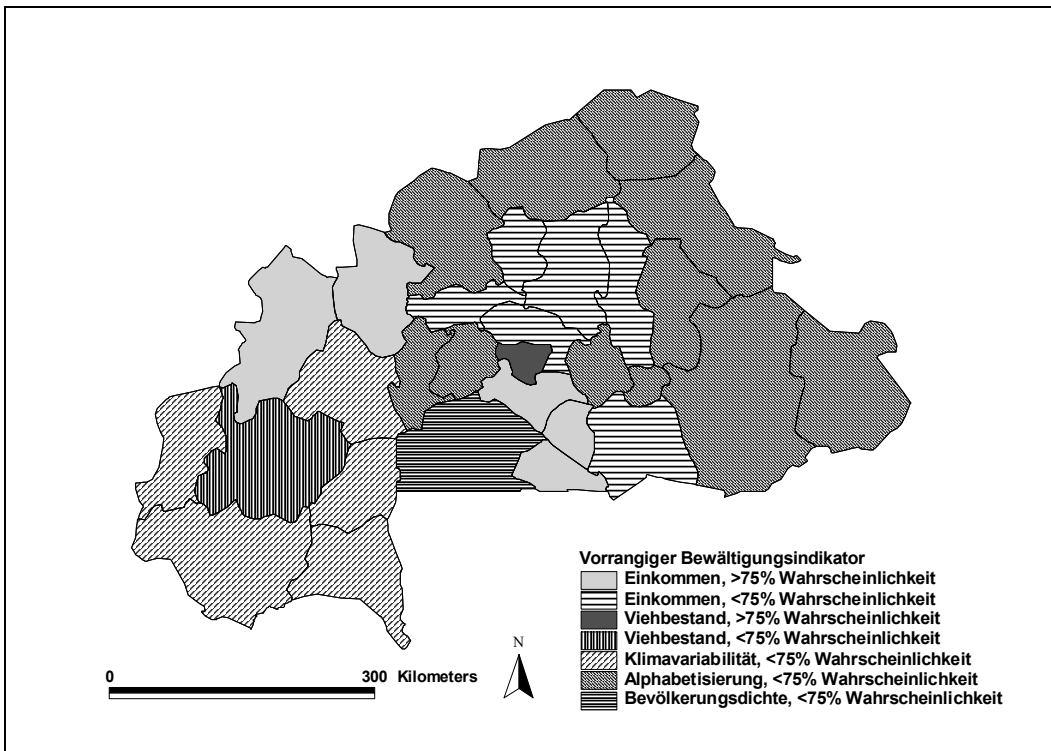


AII.3 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Bodendegradation in Burkina Faso.

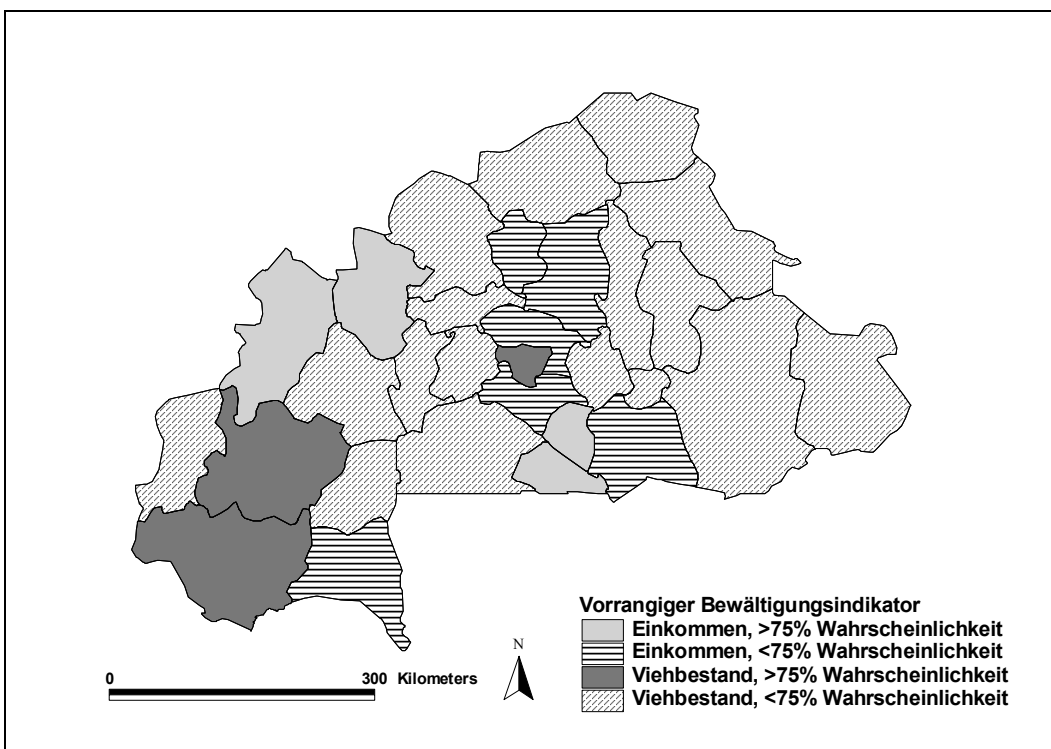


AII.4 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Biodiversitätsverlust in Burkina Faso.

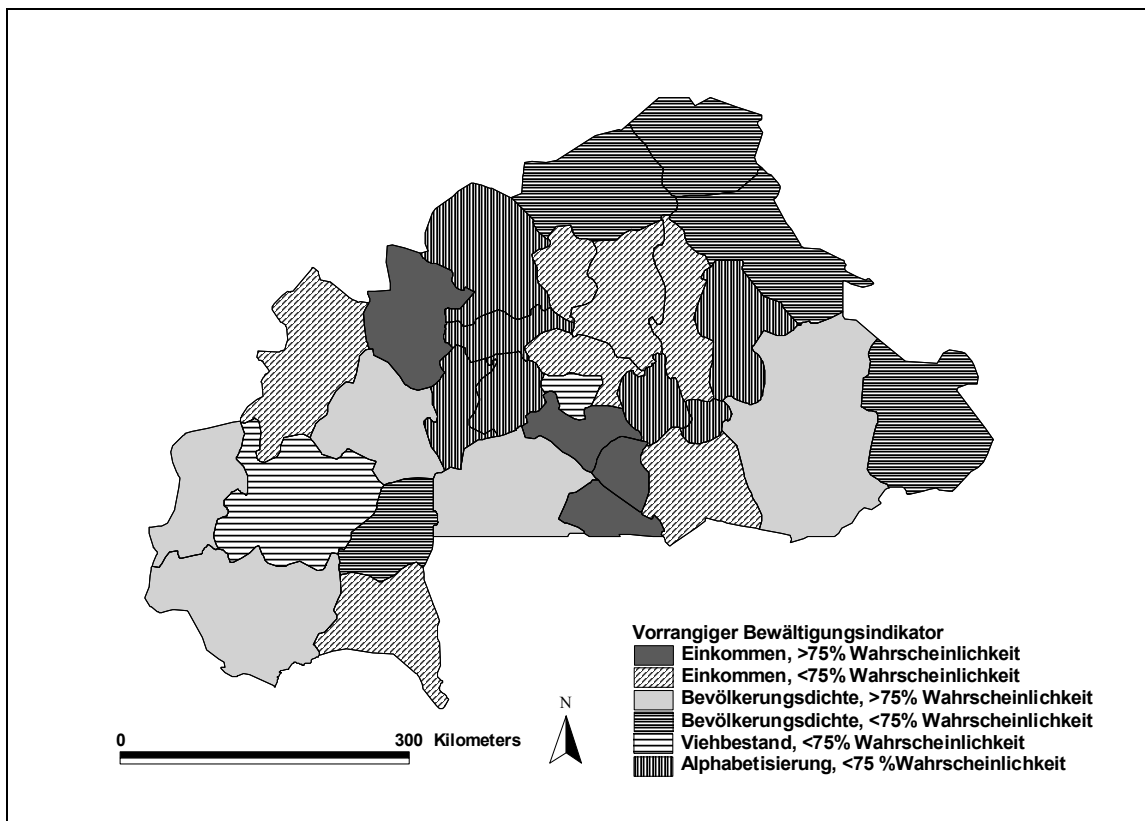
Anhang III Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in Burkina Faso.



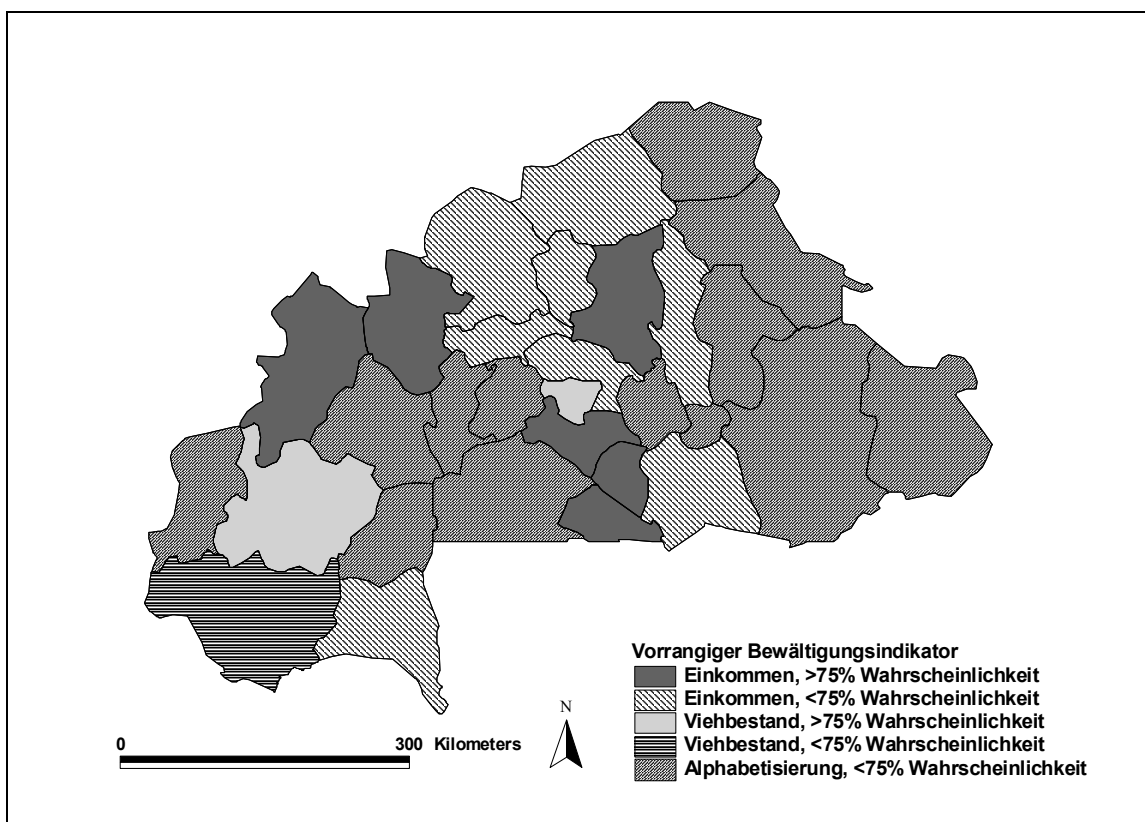
AIII.1 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Klimawandel in Burkina Faso. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).



AIII.2 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Trinkwassermangel in Burkina Faso.



AIII.3 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Bodendegradation in Burkina Faso.



AIII.4 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Biodiversitätsverlust in Burkina Faso.

Anhang IV Vulnerabilitäten der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.

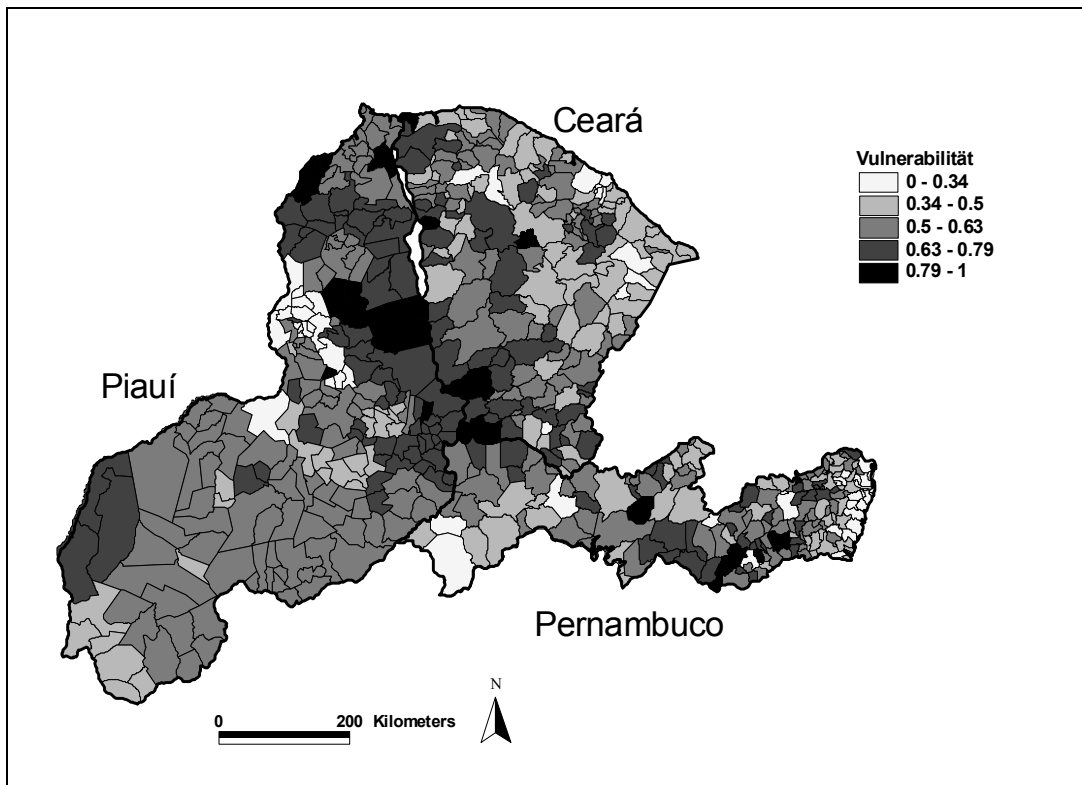


Abbildung AIV.1 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Klimaveränderungen für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 9\%$)*.

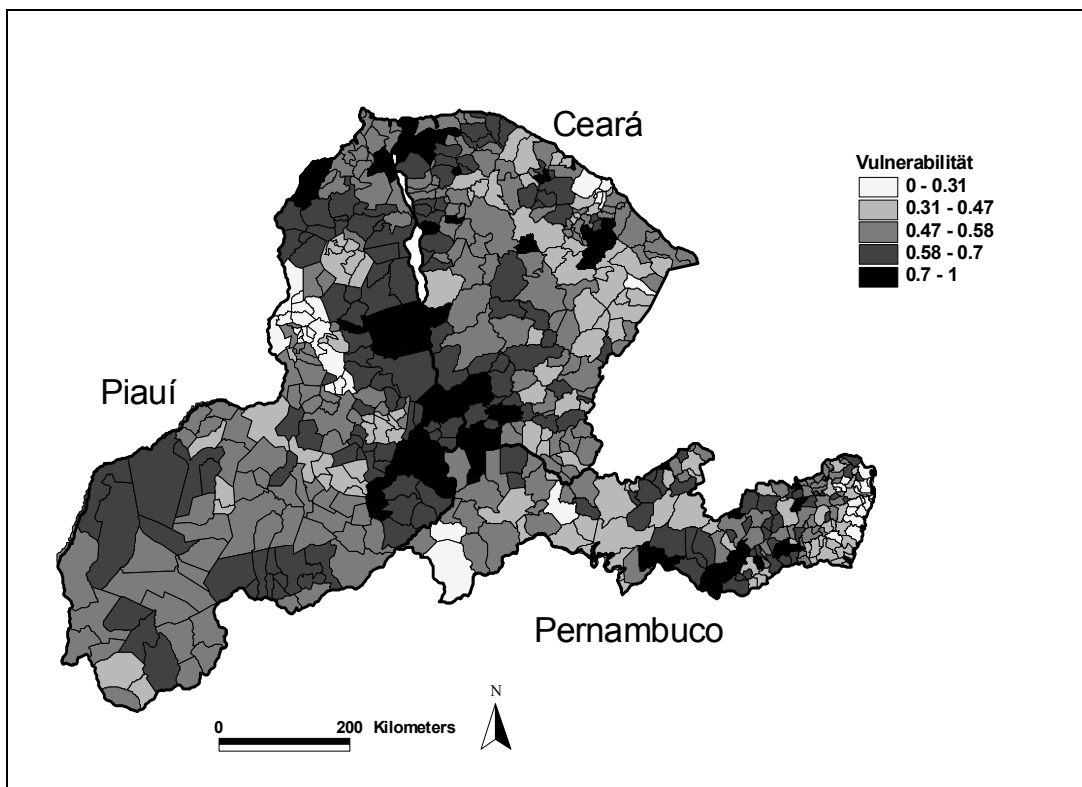


Abbildung AIV.2 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Trinkwassermangel für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 9\%$).

* Im weiteren werden hier nur die durchschnittlichen relativen Fehler aufgeführt. In seltenen Ausnahmen betragen die relativen Fehler in einzelnen Munizipen bis $\pm 380\%$.

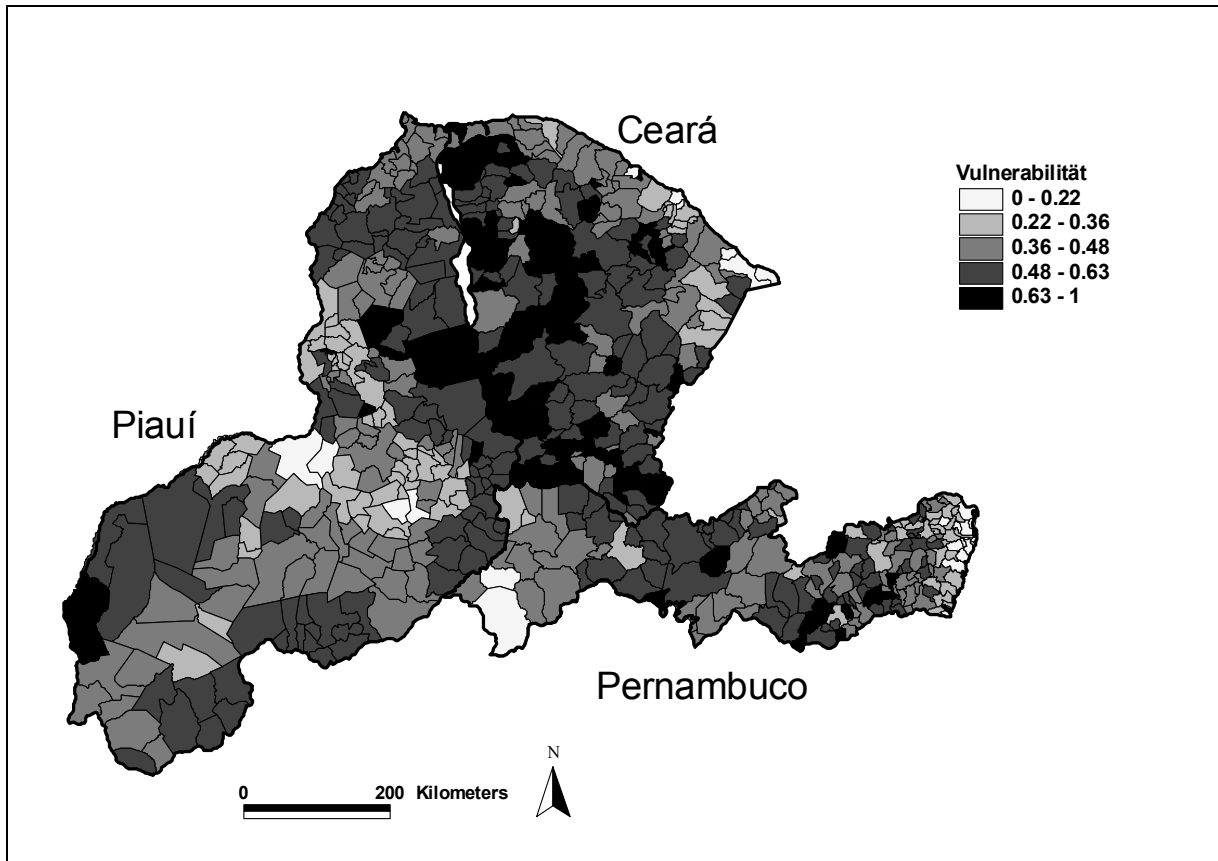


Abbildung AIV.3 Räumliche Verteilung des Gesamtindicators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Bodendegradation für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 11\%$).

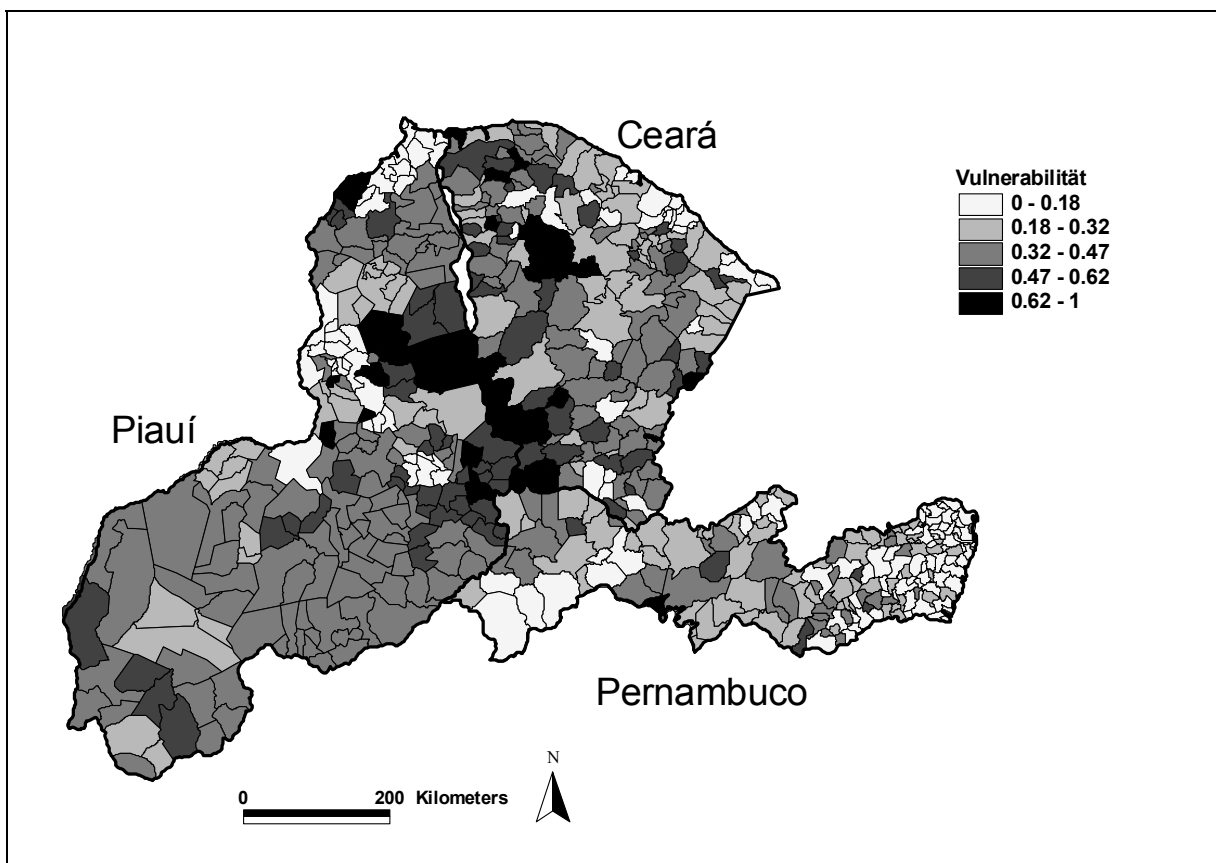


Abbildung AIV.4 Räumliche Verteilung des Gesamtindicators für die Vulnerabilität des Einkommens gegenüber Biodiversitätsverlust für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 7\%$ und $\pm 22\%$).

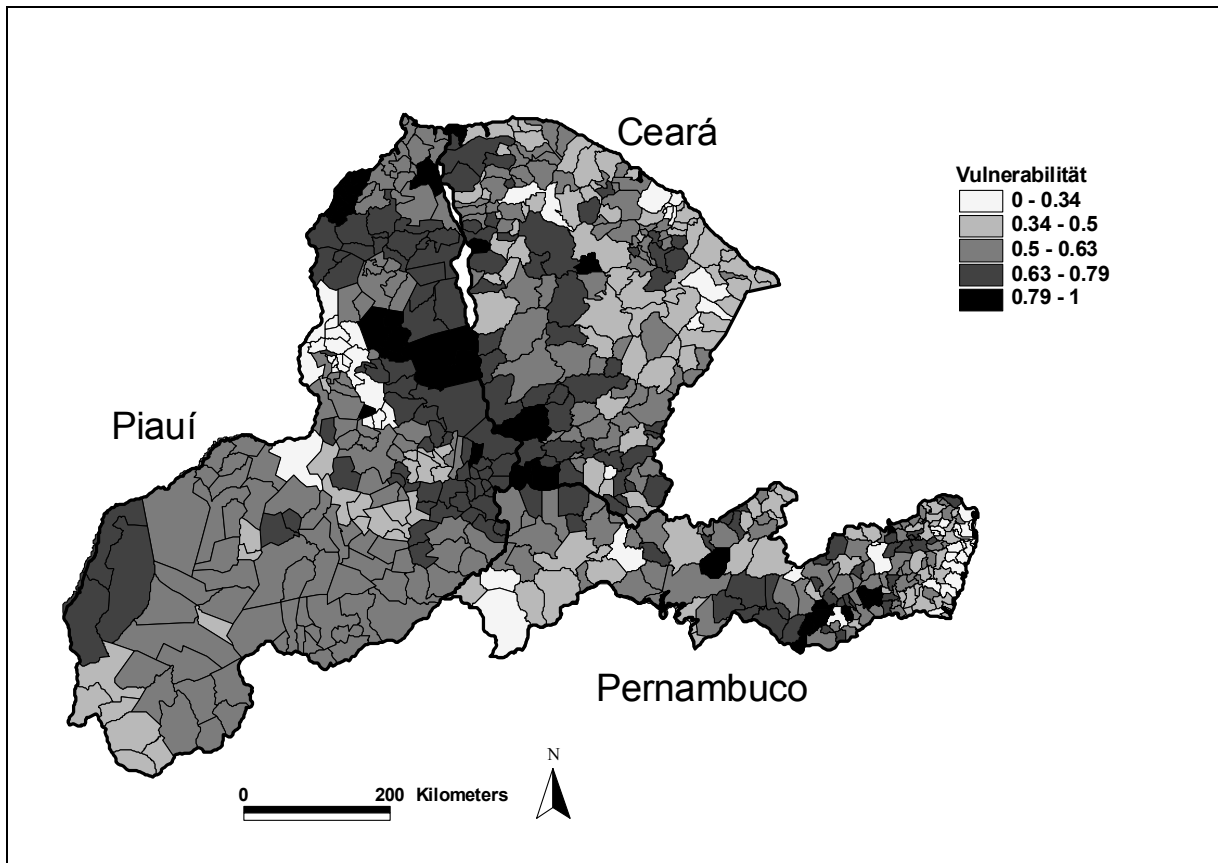


Abbildung AIV.5 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Klimaveränderungen für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 43\%$).

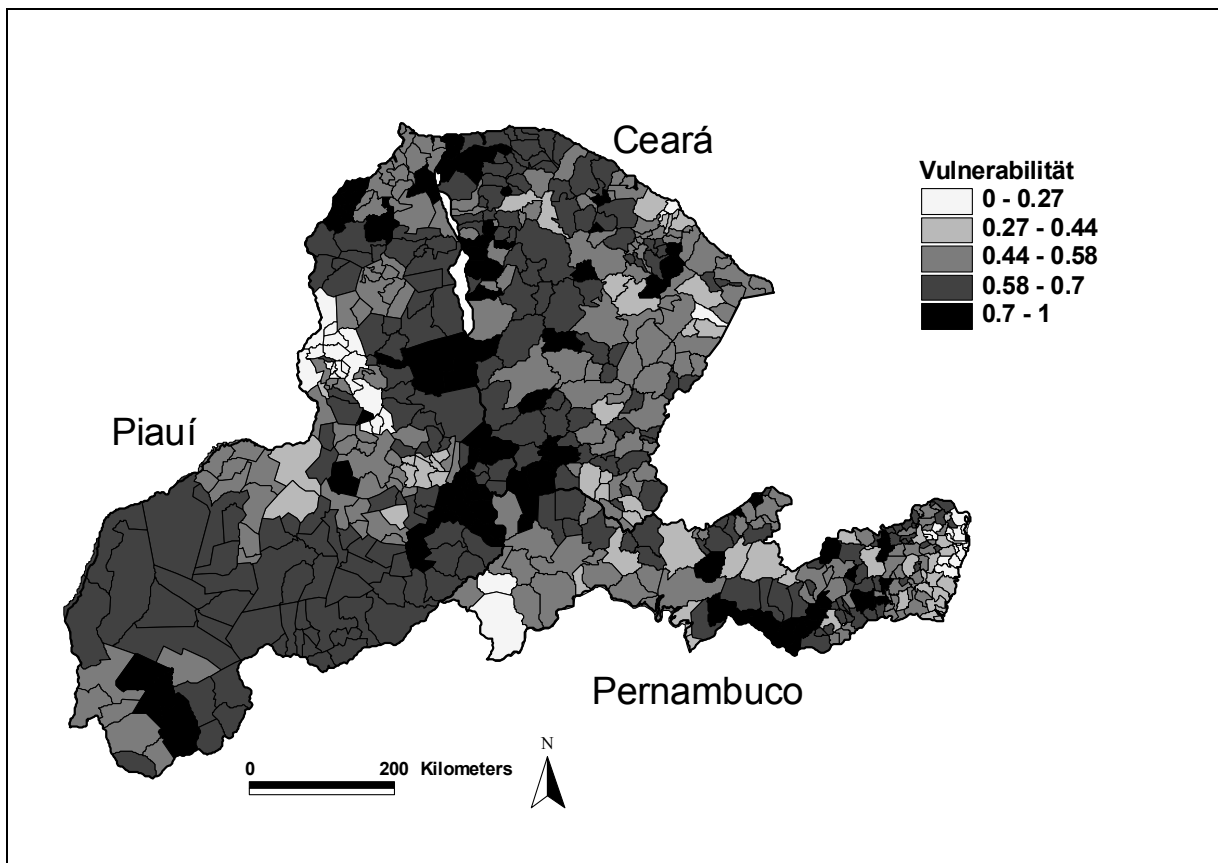


Abbildung AIV.6 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Trinkwassermangel für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 3\%$ und $\pm 199\%$).

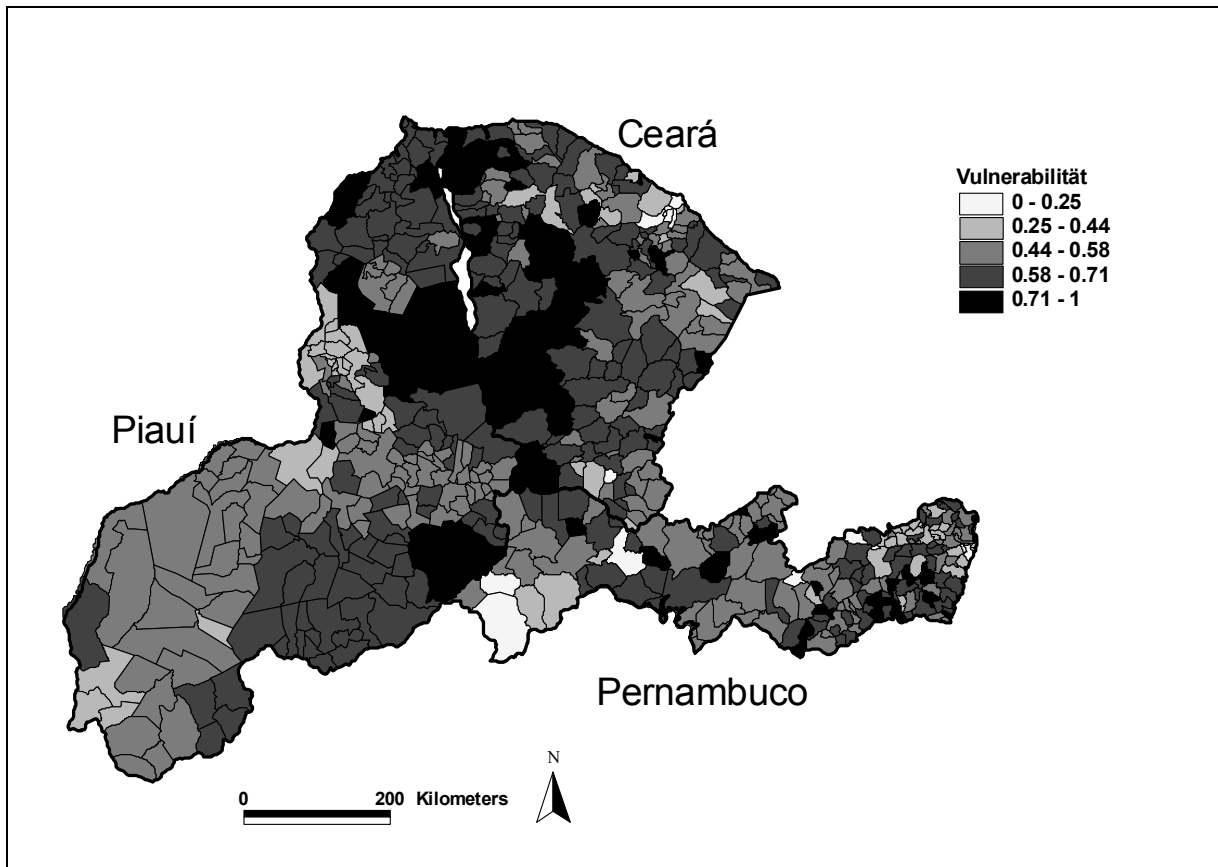


Abbildung AIV.7 Räumliche Verteilung des Gesamtindicators für die Vulnerabilität der Nahrungsmittelsicherheit gegenüber Biodiversitätsverlust für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 9\%$ und $\pm 22\%$).

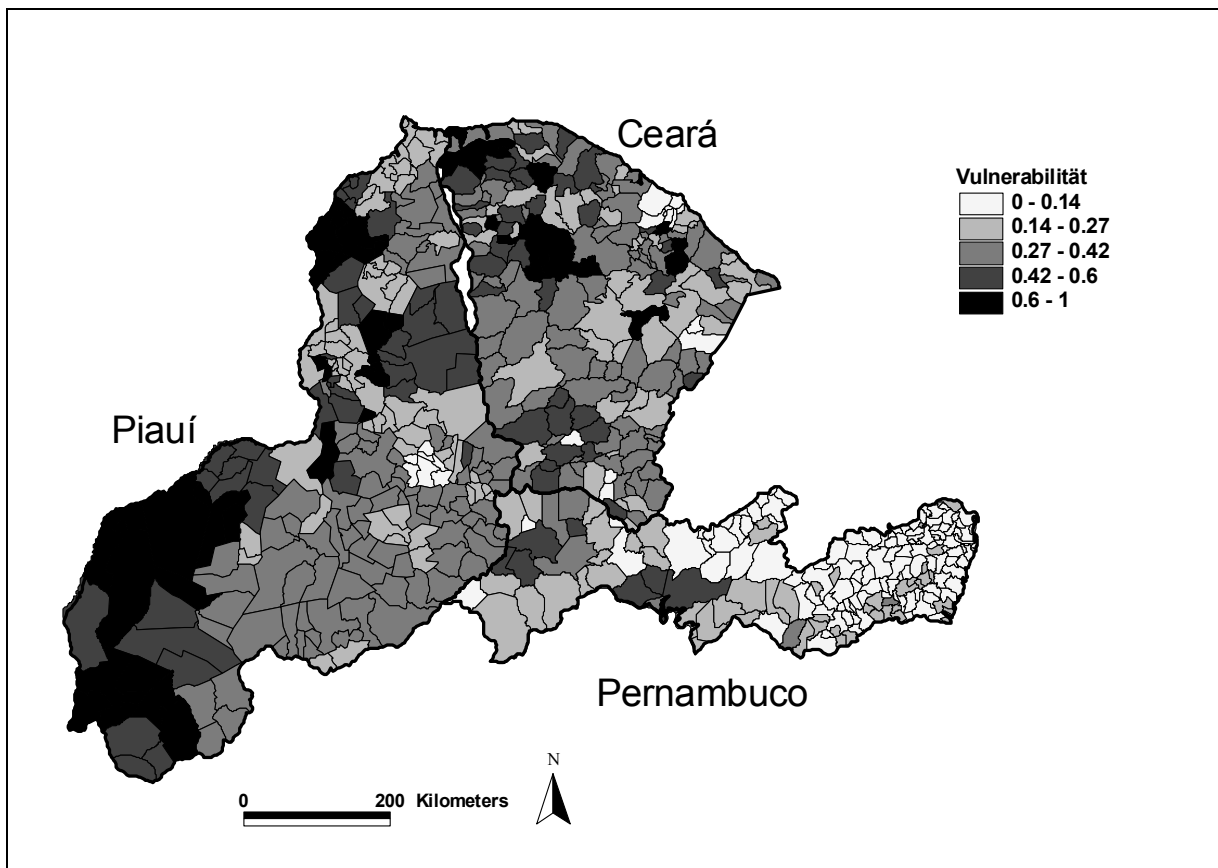


Abbildung AIV.8 Räumliche Verteilung des Gesamtindicators für die Vulnerabilität der Wohnqualität gegenüber Klimaveränderungen für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 0\%$ und $\pm 375\%$).

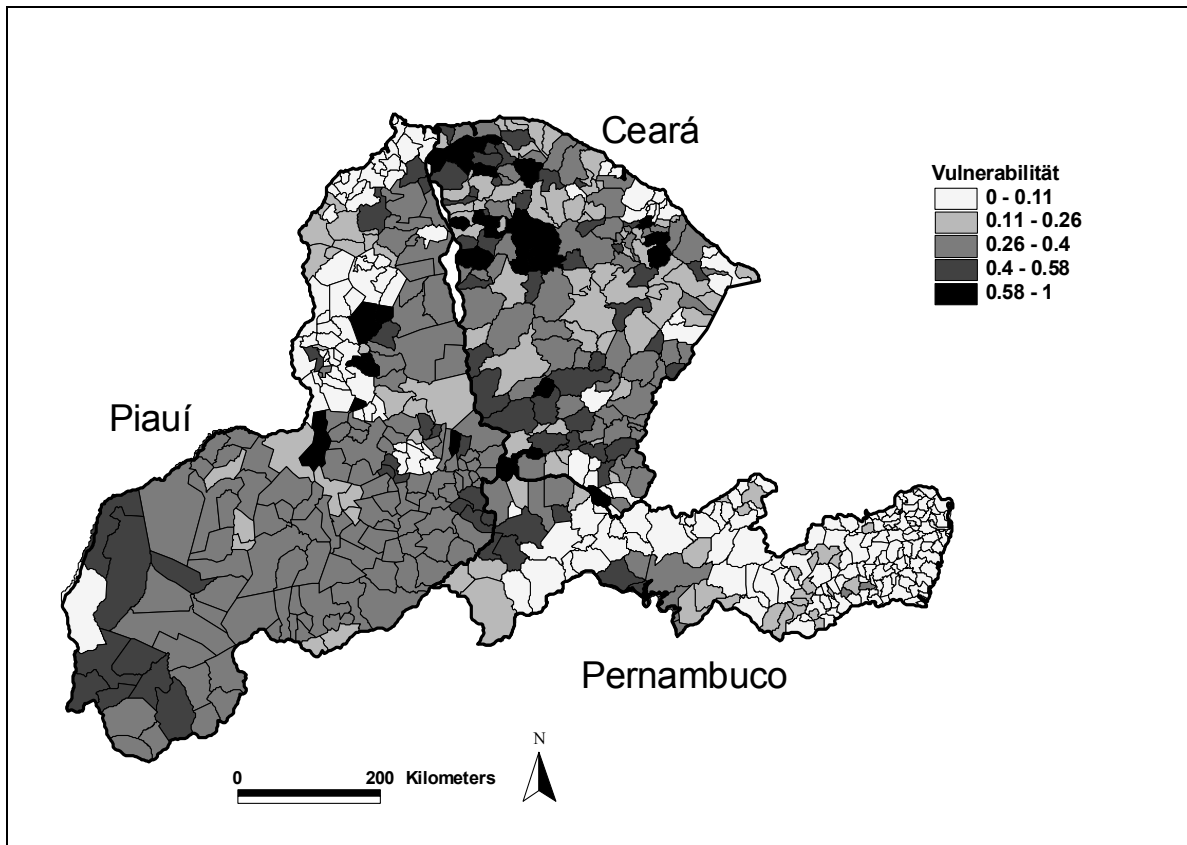


Abbildung AIV.9 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Wohnqualität gegenüber Biodiversitätsverlust für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 0\%$ und $\pm 14\%$).

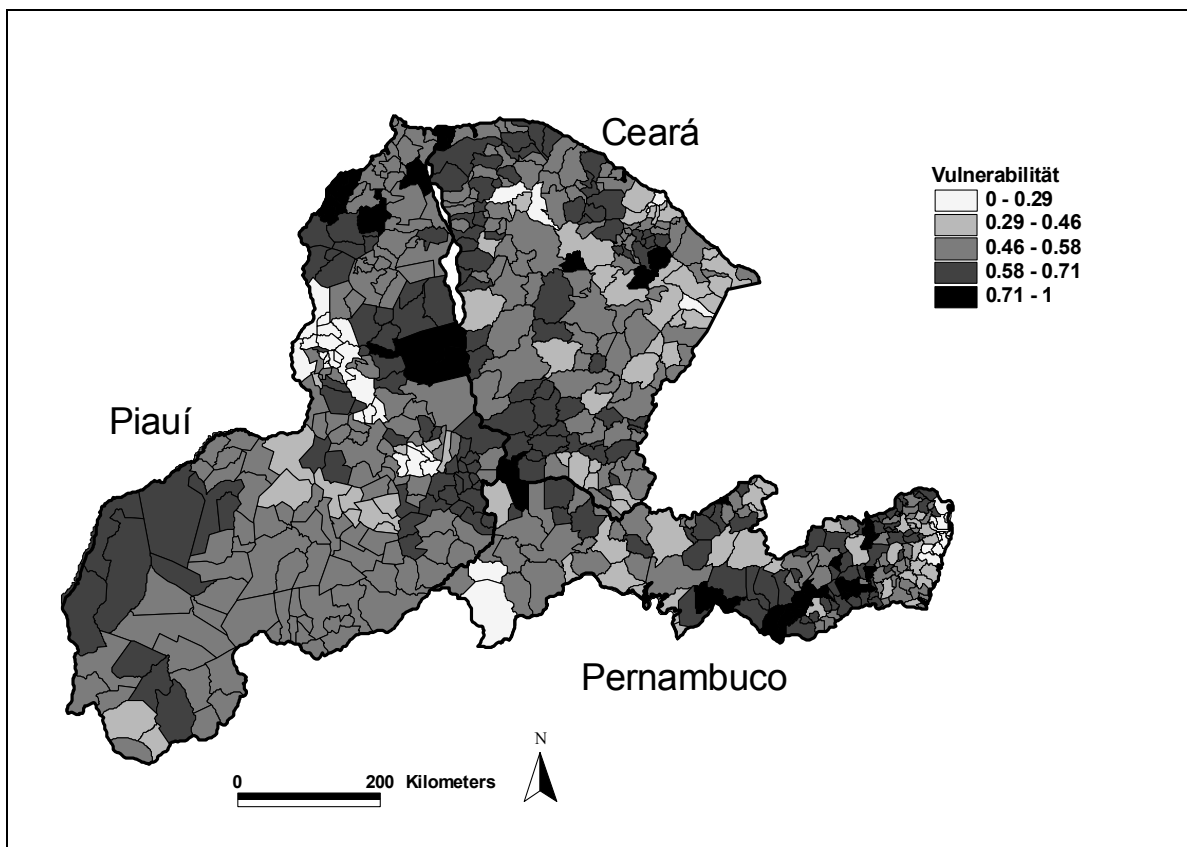


Abbildung AIV.10 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Klimaveränderungen für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 4\%$ und $\pm 119\%$).

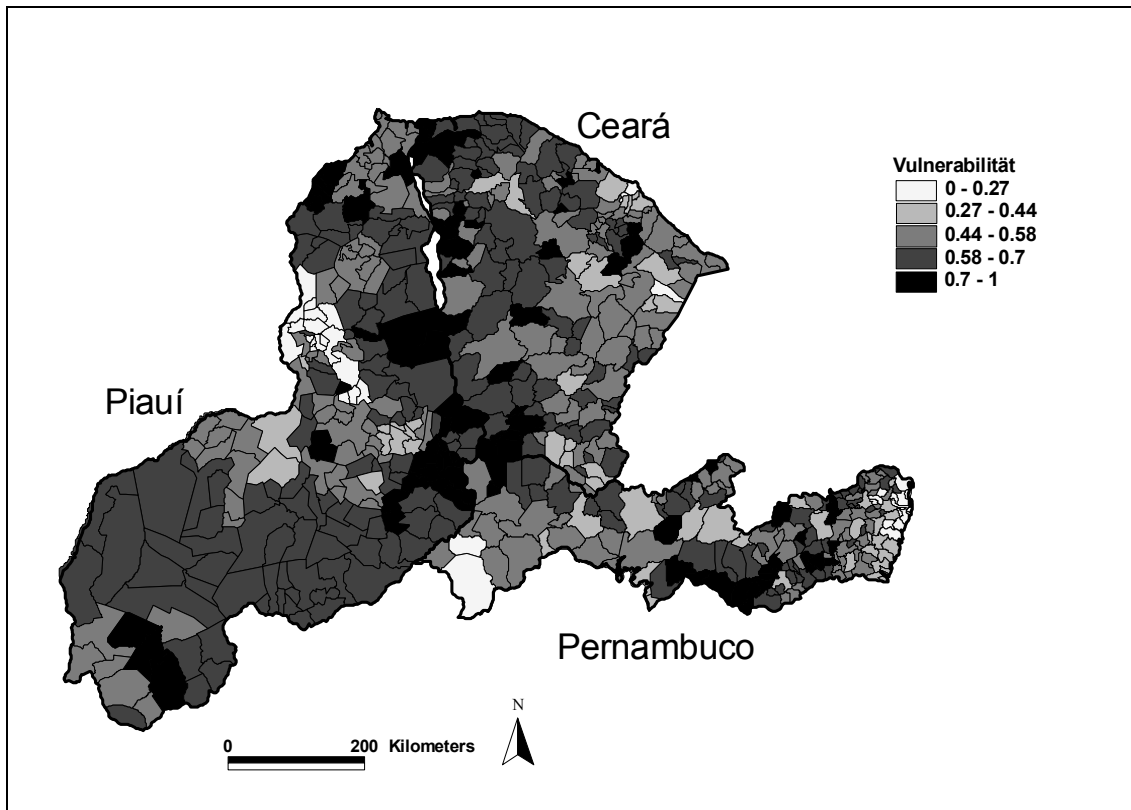


Abbildung AIV.11 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Trinkwassermangel für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 3\%$ und $\pm 199\%$).

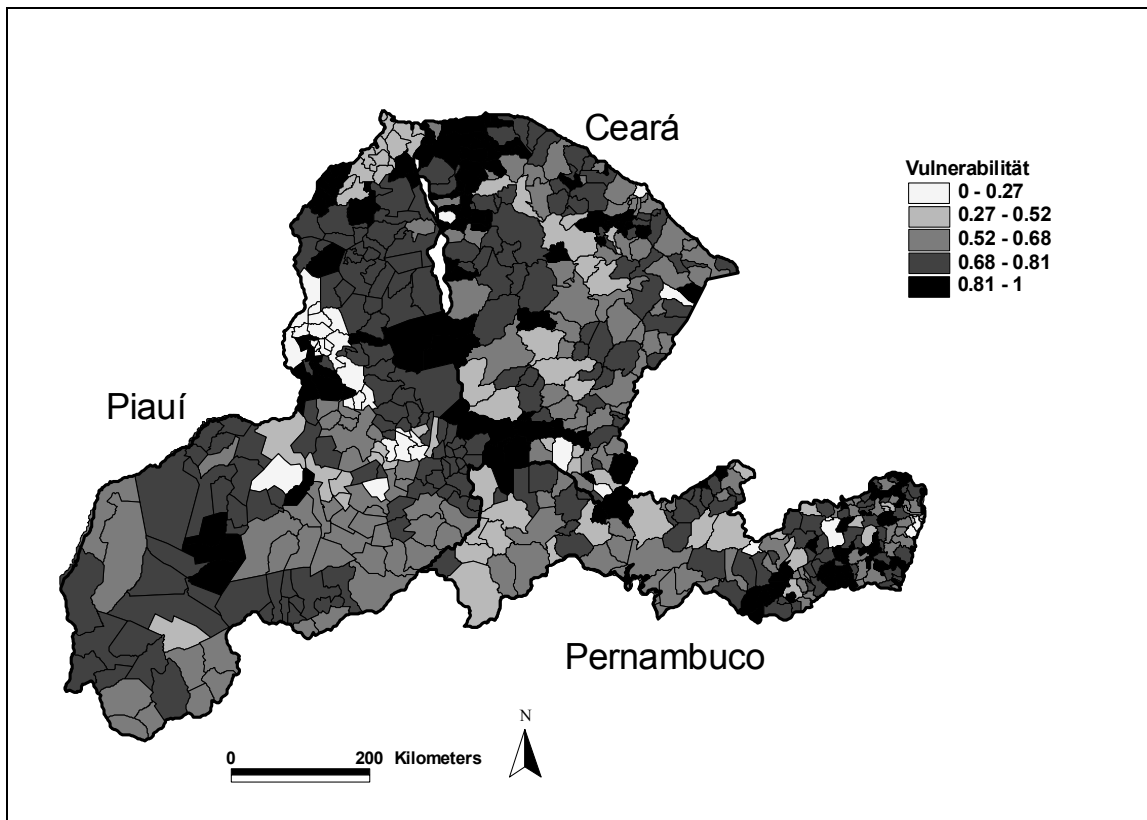


Abbildung AIV.12 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Gesundheit gegenüber Biodiversitätsverlust für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 0\%$ und $\pm 383\%$).

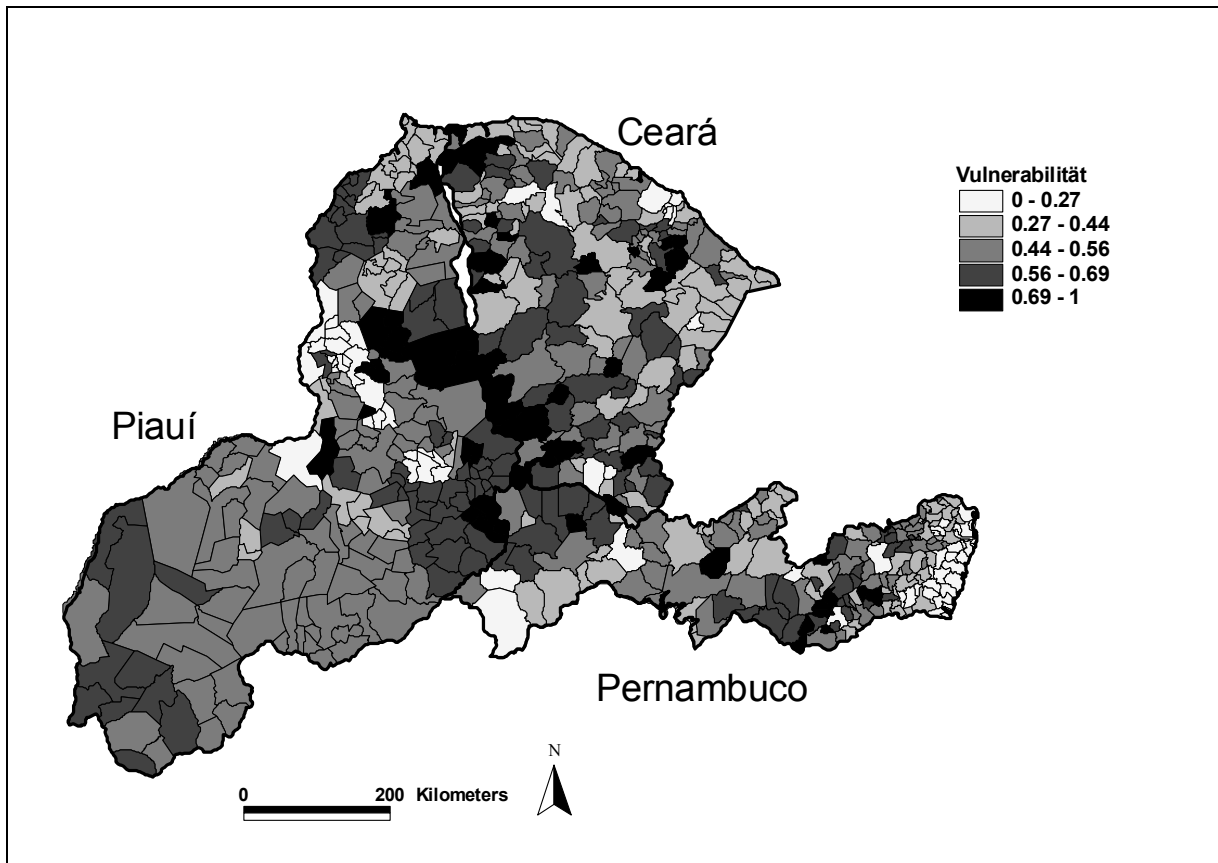


Abbildung AIV.13 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Klimaveränderungen für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 5\%$ und $\pm 333\%$).

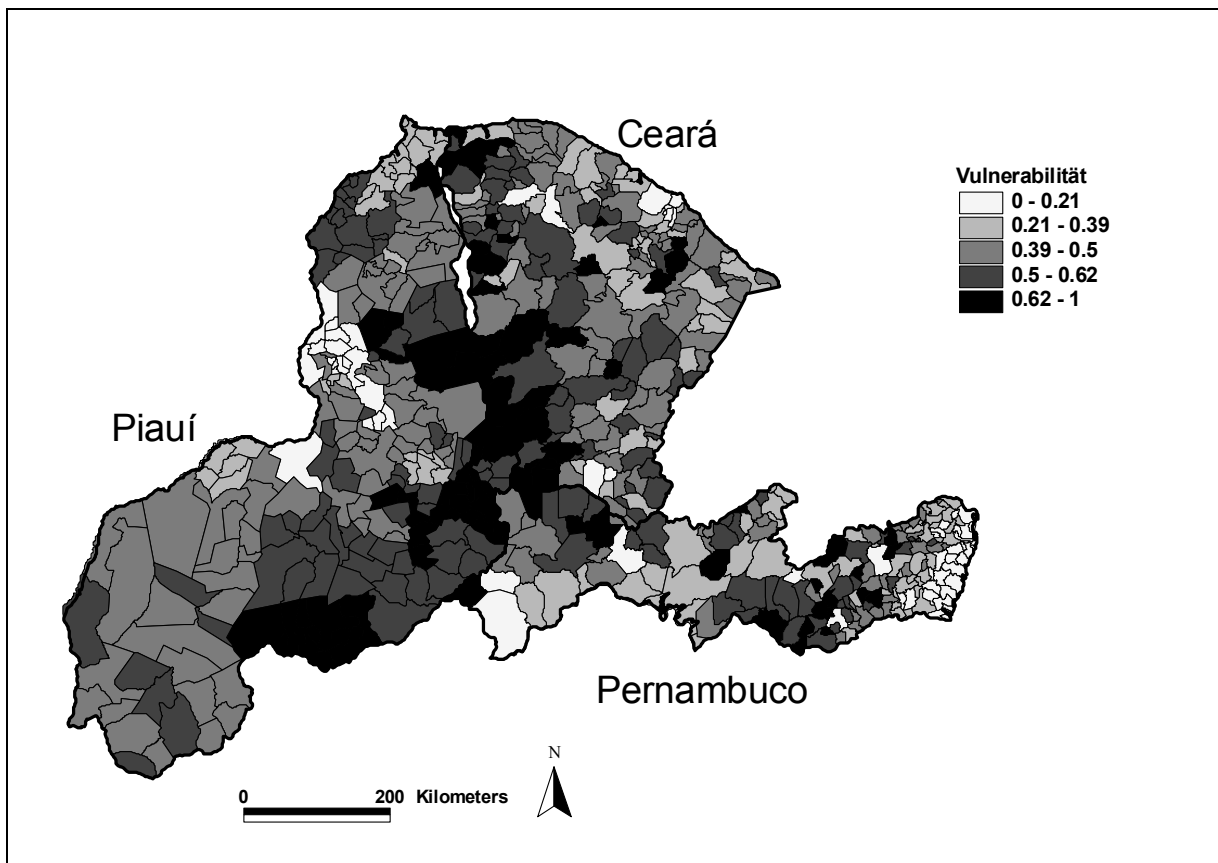


Abbildung AIV.14 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Trinkwassermangel für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm \pm 3\%$ und $\pm 381\%$).

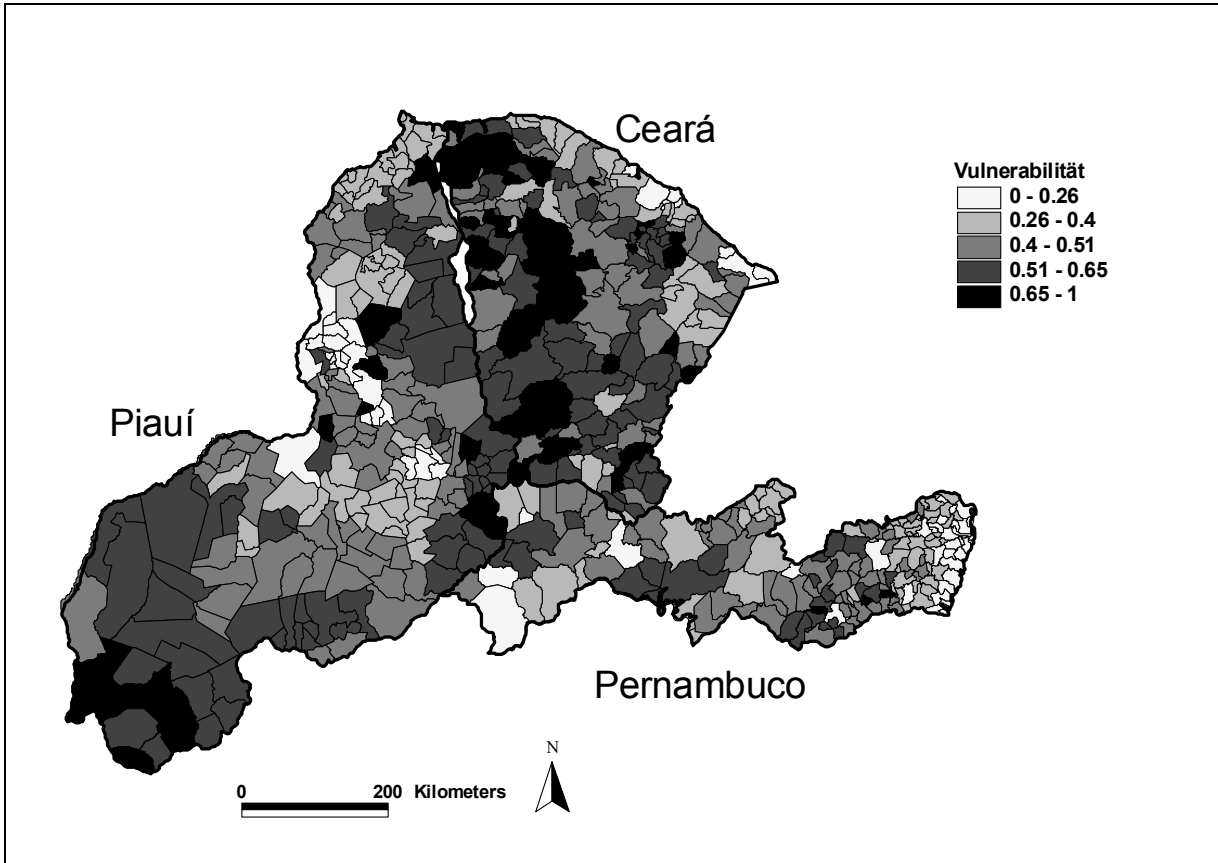


Abbildung AIV.15 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Bodendegradation für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 6\%$ und $\pm 137\%$).

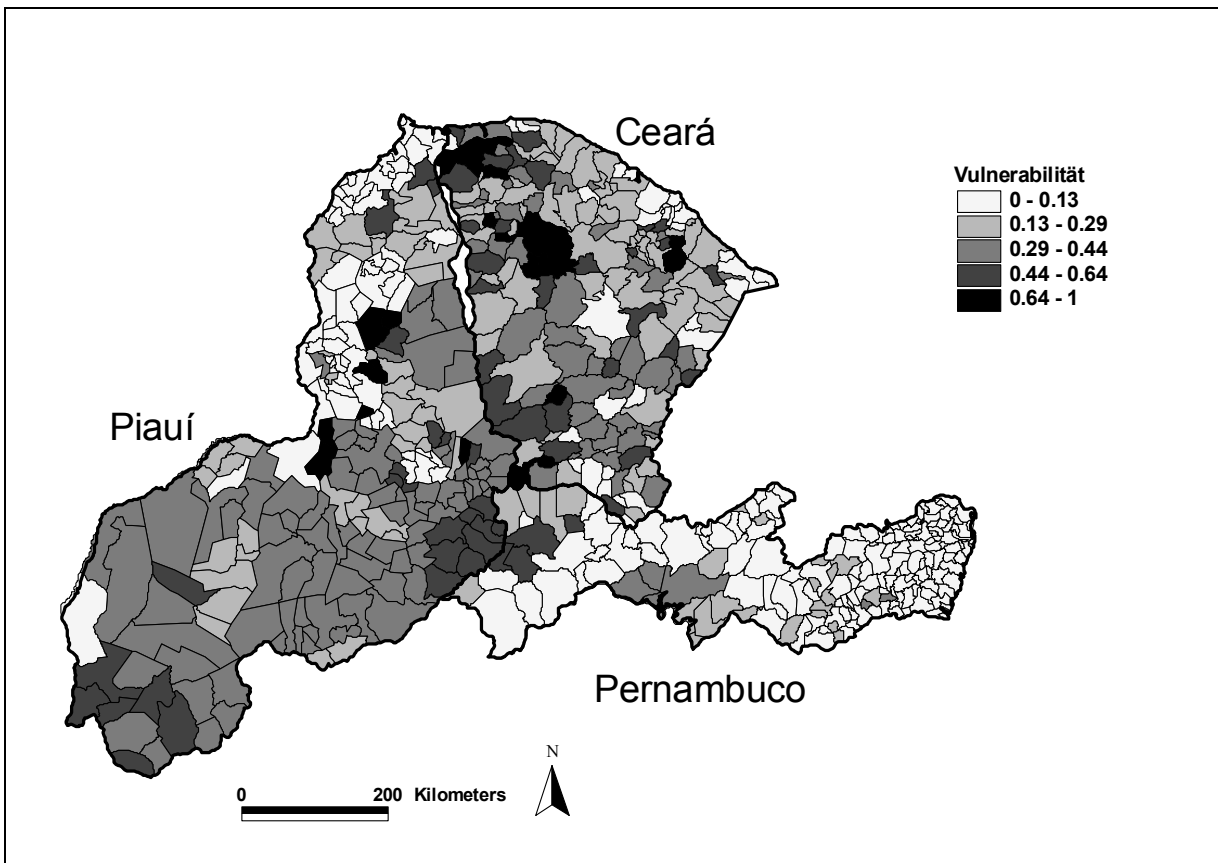
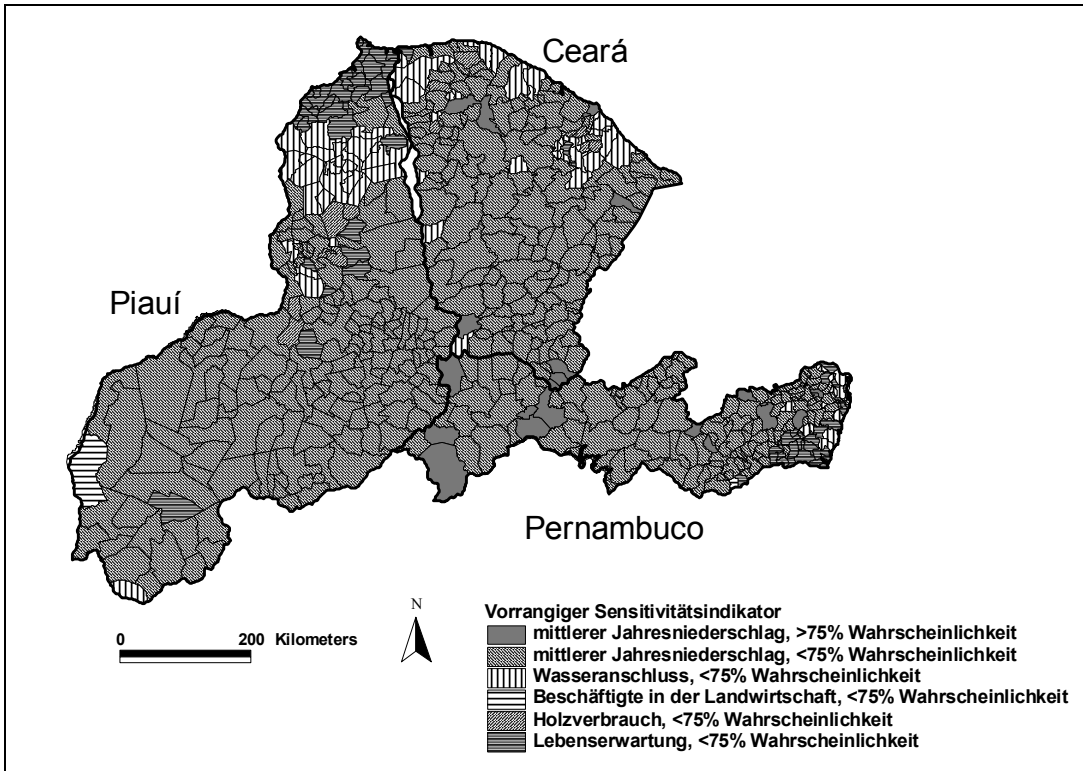
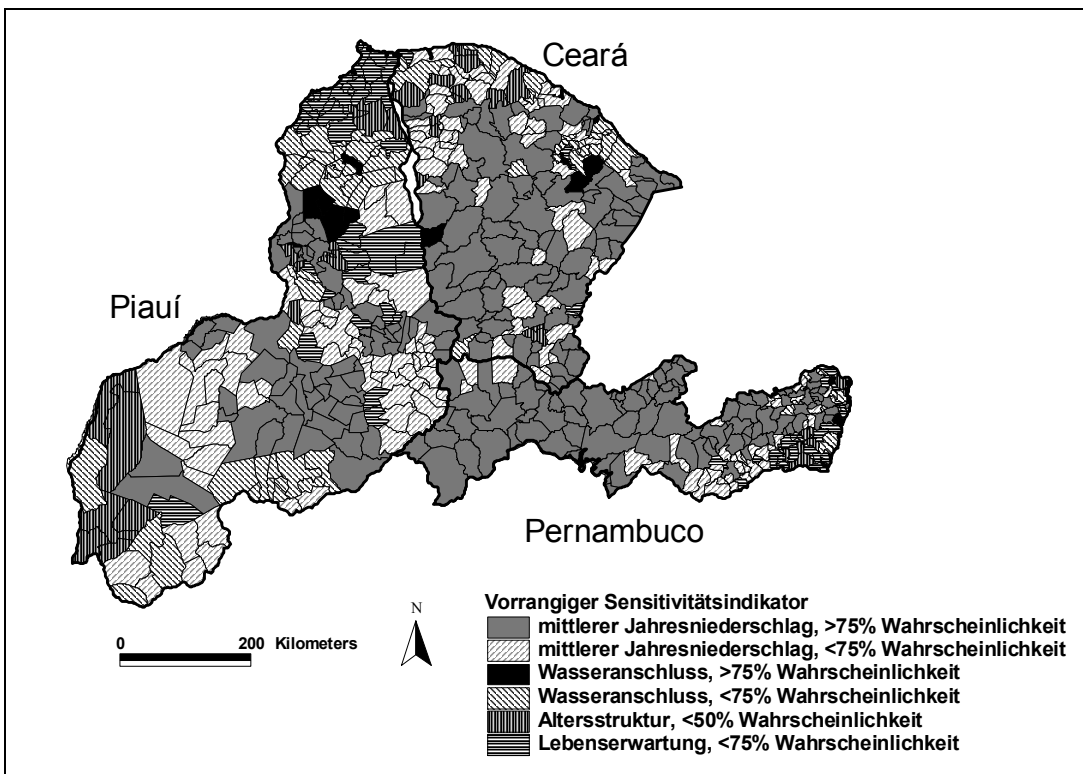


Abbildung AIV.16 Räumliche Verteilung des Gesamtindikators für die Vulnerabilität der Bildung gegenüber Biodiversitätsverlust für NO-Brasilien (durchschnittlicher relativer Fehler $\pm 0\%$ und $\pm 56\%$).

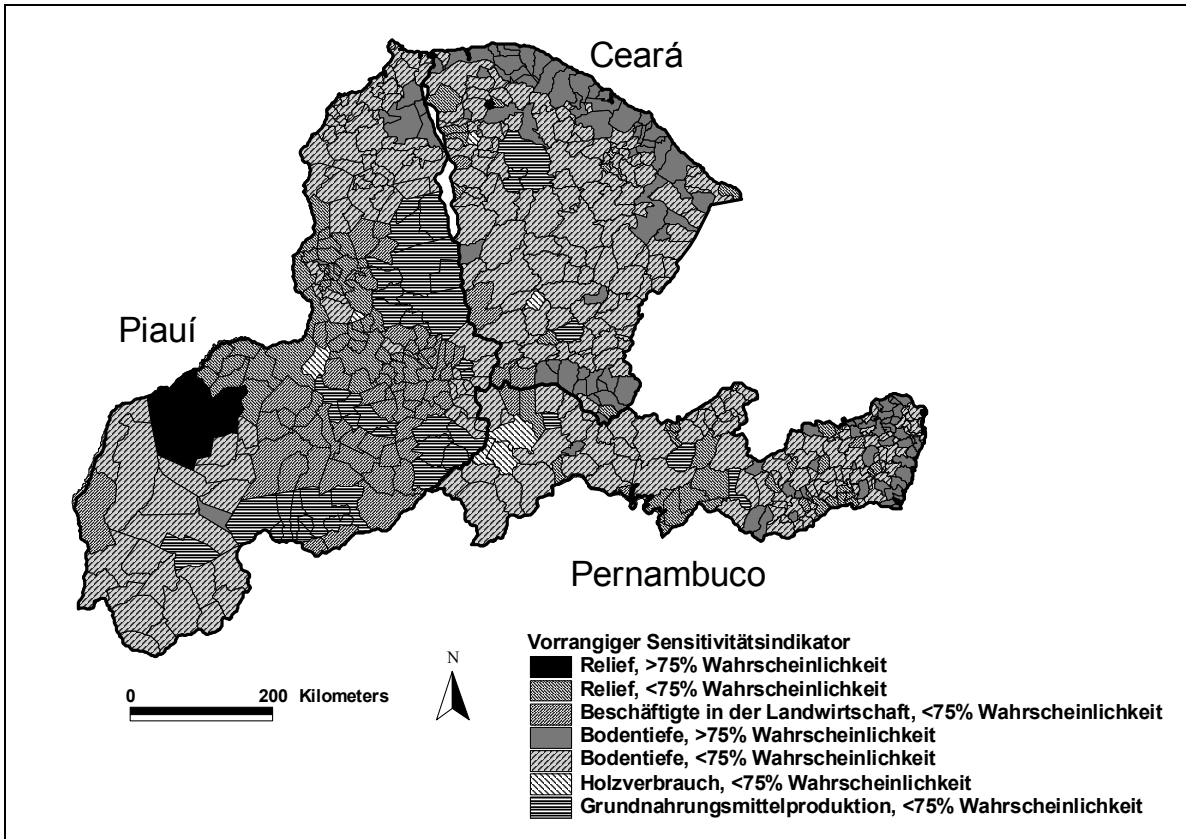
Anhang V Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.



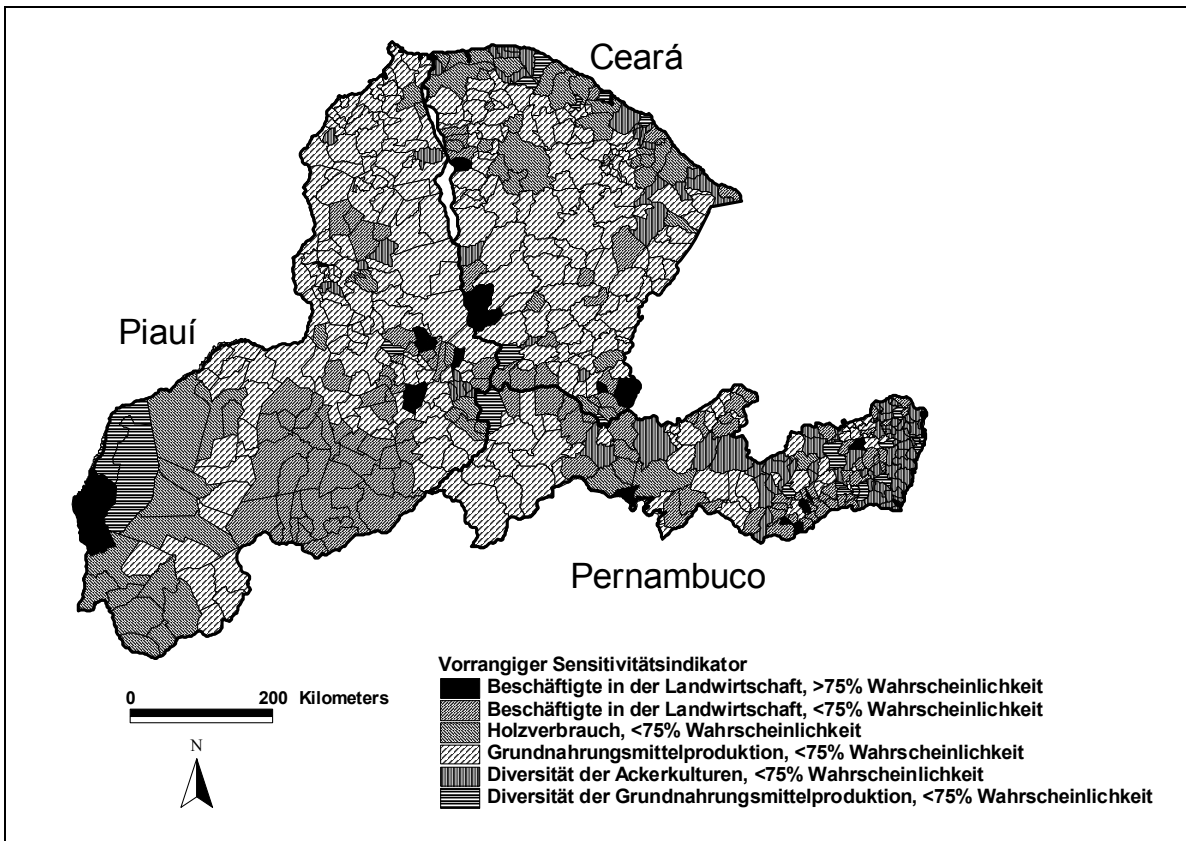
AV.1 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Klimawandel in NO-Brasilien. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).



AV.2 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Trinkwassermangel in NO-Brasilien.

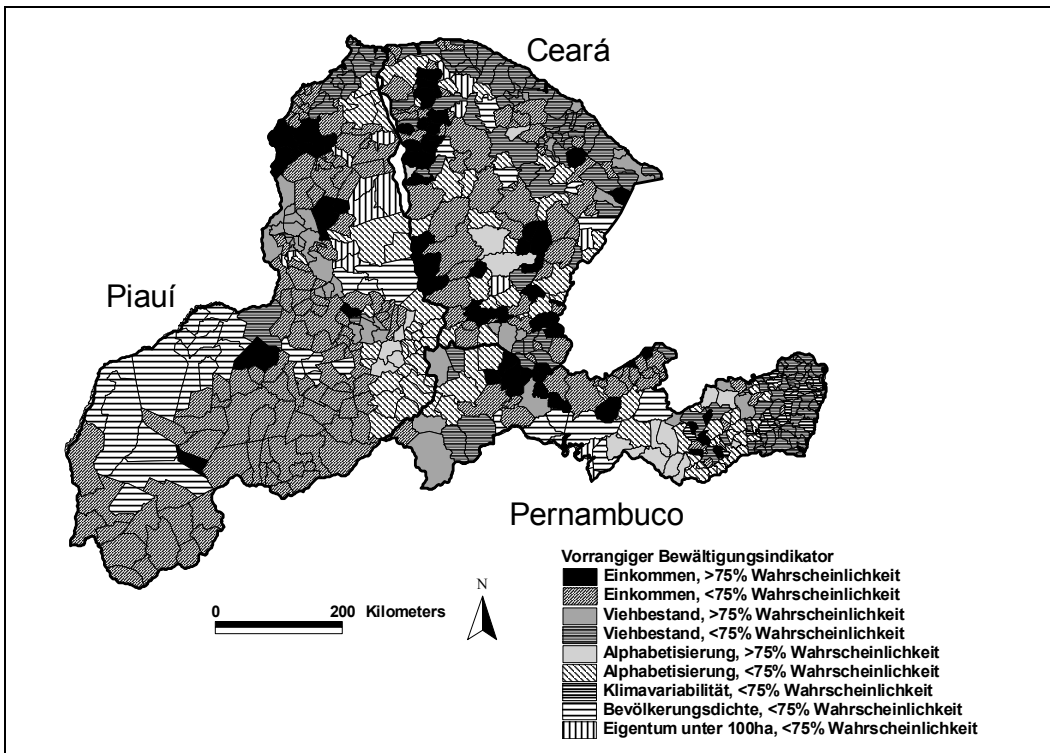


AV.3 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Bodendegradation in NO-Brasilien.

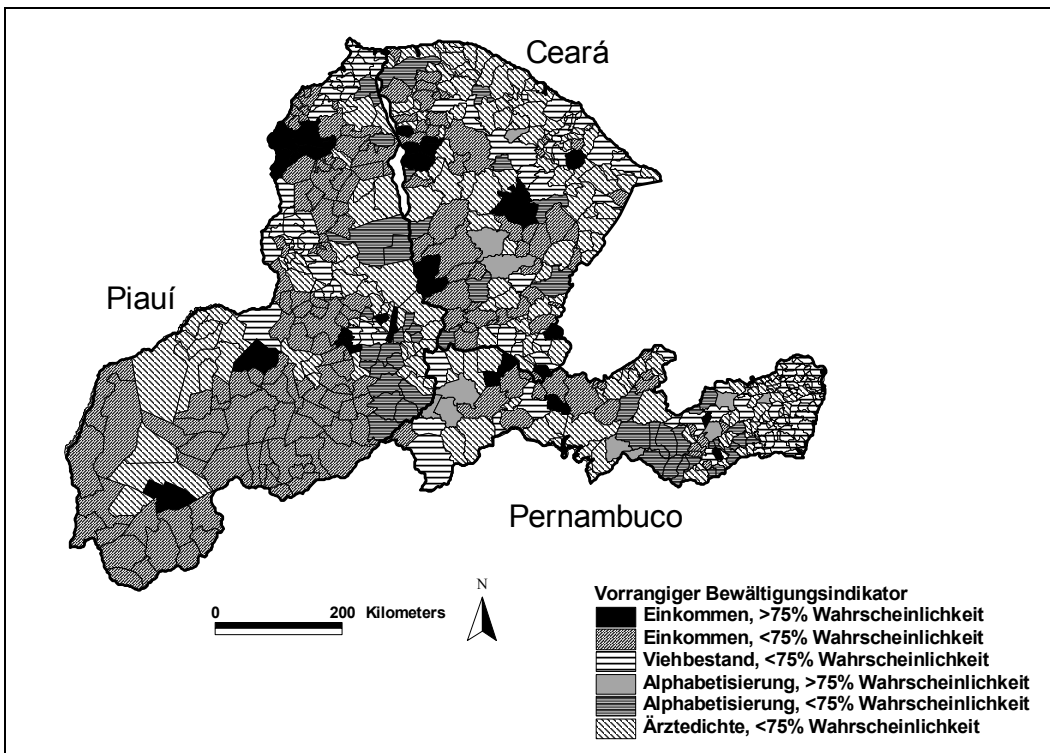


AV.4 Räumliche Verteilung der vorrangigen Sensitivitätsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Biodiversitätsverlust in NO-Brasilien.

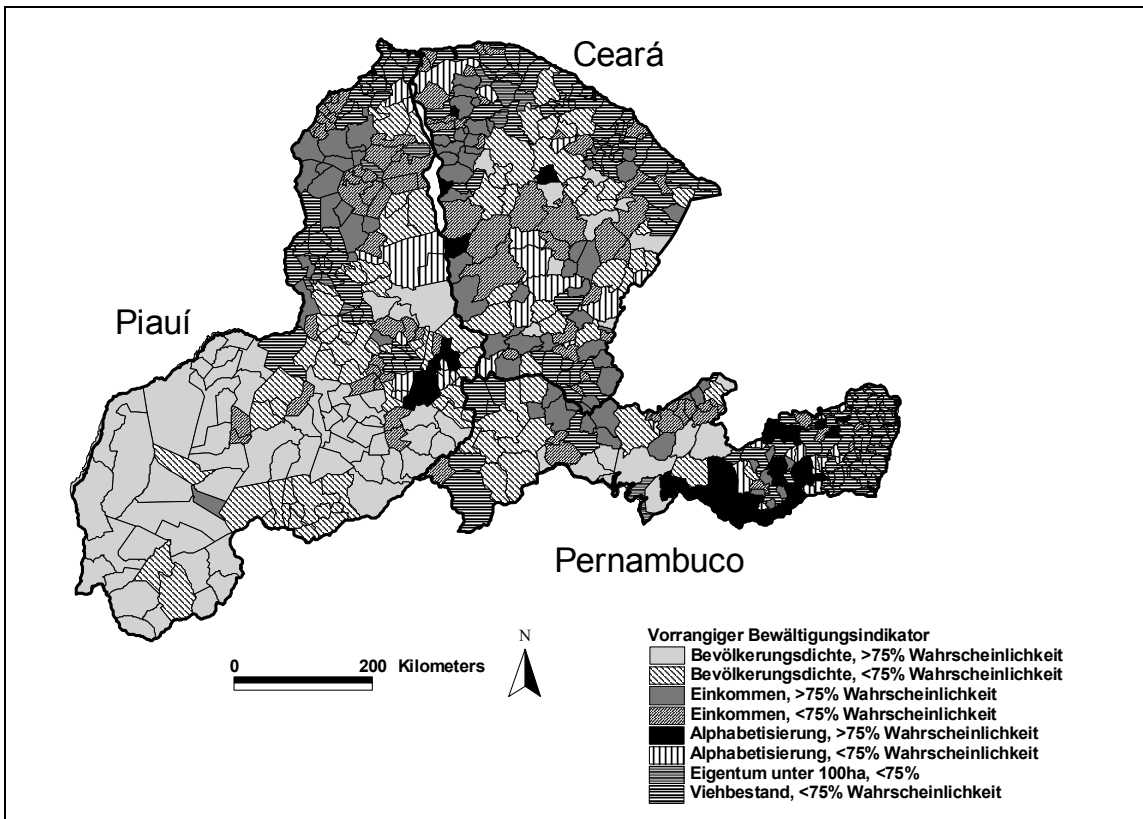
Anhang VI Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität der Armutsdimensionen gegenüber Veränderungen der Umweltdimensionen in NO-Brasilien.



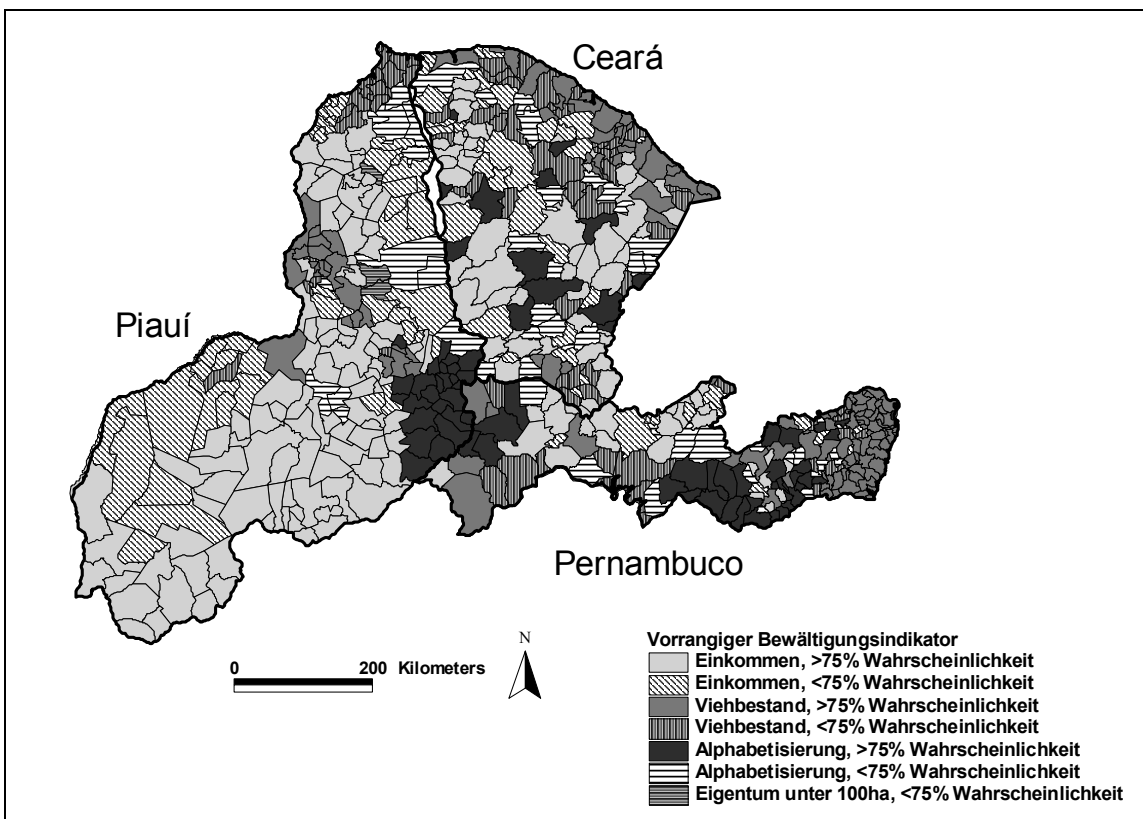
AVI.1 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Klimawandel in NO-Brasilien. Der Grautönung gibt den Indikator, die Schraffur die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, dass der betreffende Sensitivitätsindikator vorrangig ist (ohne Schraffur >75%; mit Schraffur <75%).



AVI.2 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Trinkwassermangel in NO-Brasilien.



AVI.3 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Bodendegradation in NO-Brasilien.



AVI.4 Räumliche Verteilung der vorrangigen Bewältigungsindikatoren der Vulnerabilität gegenüber Biodiversitätsverlust in NO-Brasilien.