

GVO-Monitoring: Beobachtung ökologischer Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen

Hrsg.: Winfried Schröder^{1*} und Frieder Hofmann²

¹ Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Hochschule Vechta, PF 1553, D-49364 Vechta (wschroeder@iuw.uni-vechta.de)

² Ökologiebüro, Rennstieg 25, D-28205 Bremen (f.hofmann@oekologiebuero.de)

Auswahl repräsentativer Standorte zur Modellierung der Ausbreitung von gentechnisch veränderten Pflanzen in Nord-Deutschland

Gunther Schmidt* und Winfried Schröder

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Hochschule Vechta, Postfach 1553, D-49364 Vechta,

* Korrespondenzautor (gschmidt@iuw.uni-vechta.de)

Otto Fränze zum 75. Geburtstag gewidmet

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2007.11.230>

Bitte zitieren Sie diesen Beitrag wie folgt: Schmidt G, Schröder W (2008): Auswahl repräsentativer Standorte zur Modellierung der Ausbreitung von gentechnisch veränderten Pflanzen in Nord-Deutschland. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 20 (1) 9–22

Zusammenfassung

Ziel und Hintergrund. Die Nutzung von gentechnisch veränderten Kulturpflanzen (GVP) in der Landwirtschaft bekommt weltweit eine immer größere Bedeutung. Während in Nord- und Südamerika der Einsatz von GVP bereits weit verbreitet ist, steht der flächenhafte Anbau von GVP in Deutschland noch bevor. Risikoanalysen zu möglichen Auswirkungen der freigesetzten Genkonstrukte basieren allerdings bisher zumeist auf Versuchen mit geringer räumlicher Aussageweite (Laboranalysen, Feldversuche). Das BMBF-Verbundvorhaben 'Generische Erfassung und Extrapolation von gentechnisch verändertem Raps (GenEERA)' hatte zum Ziel, die Ausbreitung und Persistenz von gentechnisch verändertem Kulturraps (*Brassica napus*) erstmals im überregionalen Kontext abzuschätzen. Der Schwerpunkt des vorliegenden Artikels ist es, das Konzept und die Ergebnisse vorzustellen, die zur Auswahl von repräsentativen Modellstandorten für die räumliche Extrapolation der an diesen Lokalitäten berechneten Modellergebnisse für ganz Norddeutschland (Schleswig-Holstein und Hamburg, Niedersachsen und Bremen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg) geführt haben.

Methoden. Für die statistisch begründete Auswahl von Modellstandorten wurden solche Messgrößen kompiliert und in einem Geografischen Informationssystem (GIS) zusammengeführt, die für die Entwicklung, Ausbreitung und Persistenz von Kulturraps eine besondere Bedeutung haben und flächenhaft zur Verfügung standen. Die an bis zu 1.200 Messstationen als 30-jährige Monatsmittel der Klimanormalperiode (1961–1990) vorliegenden meteorologischen Messgrößen zu den Niederschlags-(N), Temperatur (T) und Sonnenscheinverhältnissen (S) wurden ebenso wie die langjährigen Monatsmittel der Windrichtungen und -geschwindigkeiten (W) separat multivariat-statistisch (Clusteranalyse nach Ward) ausgewertet. Eine ökologische Landschaftsgliederung diente zur weiteren Charakterisierung Norddeutschlands. Phänologische Angaben zu den Blühterminen der Rapspflanzen aus zwei verschiedenen Zeiträumen (1961–1990 / 1991–1999) wurden mittels Variogramm-Analyse und Kriging-Interpolation flächenhaft verallgemeinert und dienten zur Auswahl von Satellitenszenen für die Rapsfelddetektion sowie zur Festlegung des Blühzeitraums für die individuenbasierte Modellierung.

Ergebnisse. Die separat generierten N-T-S-W-Cluster wurden frequenzanalytisch zu vier Klimaregionen zusammengefasst. Durch Kombination mit regionalen Clustern zur Anbausituation (Fruchtfolgen, Anbaumanagement) in Norddeutschland konnten acht Modellregionen ausgewiesen werden, die die klimatische und agronomische Variabilität des Untersuchungsraums repräsentieren. Stellvertretend für jede Modellregion wurde eine repräsentative Klimamessstation für die Individuen-basierte Modellierung ausgewählt. Die Modellierungsergebnisse wurden zuletzt durch entsprechende GIS-Abfragen in die jeweilige Modellregion extrapoliert.

Diskussion. Die abgeleiteten Klimaregionen spiegeln den Übergang von maritim geprägten Klimaten an der Nordsee-Küste hin zu kontinental geprägten Klimaten in Nordostdeutschland wider. Die Unterschiede in den Blühterminen, die für die beiden Untersuchungszeiträume festgestellt wurden, decken sich mit anderen Untersuchungen zur Veränderung der Eintrittstermine verschiedener Pflanzenphasen von Kultur- und Wildarten.

Schlussfolgerungen. Aufgrund des enormen Rechenaufwands und wegen nicht zur Verfügung stehender parzellenscharfer Anbaukarten ist es nicht möglich, die potenzielle Ausbreitung von gentechnisch verändertem Raps für jedes reale Rapsfeld in Norddeutschland zu modellieren. Daher sind Generalisierungen notwendig, die dazu dienen, die Variabilität der für die Verbreitung von GV-Raps wirksamen Umweltfaktoren auf einem hinreichend hohen Differenzierungsniveau abzubilden. Hierfür hat sich die Zusammenfassung dieser Faktoren zu homogenen Klimaregionen bewährt.

Empfehlungen und Ausblick. Aufgrund der eingeschränkten empirischen Datengrundlage ist es notwendig, die Modellierungsergebnisse durch ein statistisch fundiertes Monitoring zur Ausbreitung, zum Verbleib und zur Wirkung von GVP in der Umwelt zu validieren und zu konkretisieren. Das nach EU-Richtlinie 2001/18/EG zur Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) in die Umwelt geforderte fallspezifische und allgemeine Monitoring, für das nach deutschem Gentechnikgesetz die Betreiber verantwortlich sind, sollte daher schnellstmöglich umgesetzt werden, zumal die Freisetzung und der Anbau von GVP in Deutschland bereits begonnen haben. Ein solches GVO-Monitoring sollte aus technischer Sicht durch ein web-basiertes Geoinformationssystem (WebGIS) begleitet werden, das es ermöglicht, Geobasisdaten ebenso wie die Monitoring-Ergebnisse selbst allgemein verfügbar und über implementierte GIS-Funktionen auswertbar zu machen.

Schlagwörter: Clusteranalyse; gentechnisch veränderte Organismen (GVO); GIS; Raps; Regionalisierung

Abstract**Selection of representative sites for modelling the dispersal of genetically modified plants in Northern Germany**

Goal and Scope. The use of genetically modified plants (GMP) in agriculture is increasing rapidly. While GMP in North and South America are already established an extensive cultivation in Germany is yet to come. Risk assessment on possible effects of released GMP are mainly based on empirical studies with a small spatial extent (laboratories, small-scale field trials). The joint research project 'Generic detection and extrapolation of genetically modified rape (GenEERA)' aimed at estimating the dispersal and persistence of genetically modified oilseed rape (*Brassica napus*) by the use of individual based models. The objective of the article at hand is to give a detailed account of the spatial variability of climate in Northern Germany (German Federal States of Brandenburg, Lower Saxony and Bremen Mecklenburg Western Pomerania, Schleswig-Holstein and Hamburg). Based on this, a method was developed that includes both, the determination of representative oilseed rape fields for modelling the dispersal of GM oilseed rape at field scale, and the subsequent generalisation of the results to landscapes.

Data and Methods. The statistically founded selection of modelling sites was performed by a compilation of available indicators within a GIS environment which are supposed to be important for the dispersal and the persistence of oilseed rape. Meteorological data on precipitation (P), air temperature (T), and sunshine duration (S) collected at up to 1,200 monitoring sites from 1961–1990 were as well as data on wind conditions (W) aggregated multivariate-statistically by Ward cluster analysis. An ecoregionalisation was used for characterising Northern Germany ecologically. Phenological data on the start of the oil seed rape bloom differentiated in the monitoring periods 1961–1990 and 1991–1999, respectively, were regionalised by performing variogram analysis and kriging interpolation. These maps were used to select appropriate Landsat images to identify rape fields by remote sensing algorithms as well as to define the respective flowering periods for individual based modelling.

Results. The separately generated P-T-S-W-Cluster were aggregated to four homogenic climatic regions. In combination with agricultural clusters defining typical landuse patterns (crop rotation, cultivation management) eight model regions were derived which describe the climatic and agronomic variations in Northern Germany. For each of these regions a representative monitoring site was selected serving for individual based modelling. At last, the modelling results were extrapolated back to the model regions applying corresponding GIS queries.

Discussion. The generated climatic regions reflect the transition of marine climate at the North Sea to continental climate in Northeast Germany. The shift in flowering of oil seed rape coincides with other studies on phenological changes of agricultural crops and wild plants.

Conclusions. Due to the huge calculation efforts and the lack of adequate land registers it was not possible to simulate the potential dispersal of GM oil seed rape at farm scale. Thus, generalisations were used to describe the variations of relevant ecological drivers affecting the dispersal of GMP. It could be shown that the aggregation of those factors to homogenic climatic regions was a successful approximation.

Recommendations and Perspectives. Due to the limited empirical data base it is necessary to validate and substantiate the modelling results by a GMP monitoring. The EU Directive 2001/18/EC on the deliberate release of genetically modified organisms into the environment stipulates assessment of direct and indirect effects of GMP on humans and the environment by case-specific monitoring and general surveillance. It should be realised as soon as possible, since the release and the cultivation of GMP in Germany have been started, already. The monitoring should be complemented by the implementation of a web-based geoinformation system (WebGIS) which enables access to relevant geodata and monitoring data and assists in analysing possible GMP impacts.

Keywords: Clustering; genetically modified plants (GMP); GIS; oil seed rape; regionalisation

1 Hintergrund und Ziel

Die Nutzung von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP) in der Landwirtschaft nimmt weltweit immer stärker zu. Nicht nur die Anbaufläche, sondern auch die Anzahl gentechnisch veränderter Sorten steigt dabei an. In Nordamerika (Kanada, USA) und in Südamerika (Argentinien, Brasilien) ist der Anbau von GVP wie Sojabohnen, Mais, Baumwolle oder Raps weit verbreitet (Haniotis 2001). So werden nach US Agrarstatistik in den USA nur noch auf 10% Anbauflächen konventionelle Soja- oder Baumwollsorten kultiviert, der Anteil an GV-Mais beträgt 2007 bereits 73%. Trotz des großflächigen Anbaus gibt es aber kein Wirkungs-Monitoring, wie es in Europa durch die EU-Richtlinie 2001/18/EG vorgeschrieben ist. In Deutschland liegen nur Ergebnisse von kleinräumigen Versuchen vor (Andow und Zwahlen 2006, Castellazzi et al. 2007, Chapman und Burke 2006, Devaux et al. 2007, Pilon und Prendville 2004, Squire et al. 2003, Spök et al. 2005). Demgegenüber sieht die EU-Richtlinie 2001/18/EG zur Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) in die Umwelt ein fallspezifisches (Case Specific Monitoring) und ein allgemeines (General Surveillance) Monitoring zur Abschätzung von direkten und indirekten Wirkungen der GVO-Freisetzung für Mensch und Umwelt vor. Hinsichtlich der Zuständigkeit und den Inhalten einer General Surveillance im GVO-Monitoring existiert allerdings offensichtlich noch Uneinigkeit darüber, ob Betreiber oder Administrative das im GenTG § 16 vorgeschriebene GVO-Monitoring durchzuführen haben. Trotzdem werden bereits seit einigen Jahren gentechnisch veränderte Kulturpflanzen (GVP) in Deutschland freigesetzt bzw. angebaut. Im Jahr 2007 beträgt die Anbaufläche von GVP – zu 99% insektenresistenter *B.t.t.*-Mais (MON 810-6) – nach dem Standortregister des Bundesamts für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) bereits mehr als 3.000 ha. 61% der GVO-Felder liegen demnach in Brandenburg (Stand: Mai 2007), gefolgt von Mecklenburg-Vorpommern (18,9%) und Sachsen (11,5%).

Kulturraps (Gesamtproduktion in Dt. 2006: rd. 5 Mio. t, 1,5 Mio. ha) (Schraa et al. 2007), der insbesondere zur Herstellung von Biodiesel und Speiseöl angebaut wird, spielt bei der Risiko-Analyse aufgrund seines großen Potenzials für einen horizontalen und vertikalen Gentransfer eine besondere Rolle. Die veränderten Genkonstrukte können sowohl über den Samen (Crawley und Brown 1995, Pessel et al. 2001) als auch über die Rapspollen (Ramsey et al. 2003, Timmons et al. 1995) auf Kreuzungspartner, Wildrapspopulationen oder konventionellen Kulturraps übertragen werden. Die Rapsamen können mehr als 10 Jahre in der Bodenamenbank überleben (Lutman et al. 2005, Schlink 1998) und so u.a. auch in die Erbsubstanz von Bodenmikroben (Eckelkamp et al. 1998) eingebaut werden – ein 'contained use' scheint unmöglich (Ellstrand 2003, Jenczweski et al. 2003, Marvier und Van Acker 2005). Ein besonderes Problem stellt u.a. die Einkreuzung von Transgenen in verwandte Wildkräuter wie dem Hederich (*Raphanus raphanistrum*) oder dem Ackersenf (*Sinapis arvensis*) dar (Ammann und Vogel 1999, Menzel 2006, Pascher et al. 2000) und die damit verbundene potenzielle Resistenz gegenüber Herbiziden (Beckie et al. 2003, Legere 2005). Dies kann u.a. einen er-

höhten Einsatz von Spritzmitteln zur Folge haben (Benbrook 2004), wodurch sich nicht nur die Zusammensetzung der Phyto- und Zoozönosen verändern kann (Bartsch et al. 1999, Tiedtje et al. 1989, Watkinson et al. 2000), sondern auch vermehrt Herbizide in oberirdische Fließgewässer und das Grundwasser eingetragen werden (Liess 1995).

2 Modellkonzept

Vor dem oben beschriebenen Hintergrund wurde in dem BMBF-Verbundvorhaben 'Generische Erfassung und Extrapolation von gentechnisch verändertem Raps (GenEERA)' (Breckling et al. 2003) versucht, die Ausbreitung und Persistenz von gentechnisch verändertem Kulturrap (Brassica napus) erstmals im überregionalen Kontext abzuschätzen. Der Schwerpunkt des vorliegenden Artikels ist es, das Konzept und die Ergebnisse vorzustellen, die zur Einteilung des Untersuchungsraums Norddeutschland (Schleswig-Holstein und Hamburg, Niedersachsen und Bremen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg) in ökologisch und agronomisch charakteristische Modellregionen geführt haben. Für jede dieser Modellregionen wurden anschließend repräsentative Standorte für die Individuen-basierte Modellierung der Ausbreitung von GV-Raps ausgewählt. Die Modellierungsergebnisse wurden schließlich wieder der entsprechenden Modellregion zugeordnet und in die Fläche extrapoliert, um so großräumige Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Dynamik der potenziellen Ausbreitung von GV-Raps zu erhalten.

2.1 Räumliche Verallgemeinerungen

Standorte der Umweltbeobachtung ebenso wie z.B. Standorte für eine Modellierung sollten so ausgewählt werden, dass sie es erlauben, die jeweiligen Mess- oder Modellierungsergebnisse von kleinräumiger Ebene, z.B. einem Acker in einer bestimmten Landschaft, auf eine großräumige Bezugsebene, z.B. Landschaften oder Regionen, zu übertragen (Dungan et al. 2002, Ferretti 2001, Miller et al. 2004, Turner et al. 1989). Daher sollte eine Methode, die Landschaften nach ihren ökologischen Eigenschaften klassifiziert, sicherstellen, dass die jeweils gebildeten Landschaftstypen hinsichtlich ökologisch relevanter Größen wie Vegetationszusammensetzung, Bodenverhältnisse, Relief und Klima möglichst homo-

gen sind (Ferretti 2001). In diesem Sinne stellen Landschaften bzw. Ökoregionen komplexe Habitat-Indikatoren dar, die für das Umweltmonitoring oder die Umweltmodellierung mit Expositions-Indikatoren, wie Umweltschadstoffe oder Pollen von GVP, sowie Reaktionsindikatoren wie ökotoxikologischen Grenzwerten oder Auskreuzungsraten verbunden werden sollten. Der vorliegende Artikel konzentriert sich auf die Darstellung einer Methodik, Expositionsindikatoren, deren zeitliche und räumliche Dynamik für kleinräumige Areale mit charakteristischen Anbau- und Umweltbedingungen modelliert wurden, im Landschaftsmaßstab abzubilden.

2.2 Operationalisierung

Die Untersuchungen zielten darauf ab, die potenzielle Ausbreitung von GV-Raps in Norddeutschland mit Hilfe Individuen-basierter Modelle abzuschätzen. Die Modellierungen wurden für solche Rapsschläge durchgeführt, die hinsichtlich der für die Ausbreitung relevanten ökologischen und agronomischen Eigenschaften ihrer Umgebung repräsentativ sind. Der gesamte Extrapolationsprozess zur Übertragung der Modellergebnisse von der räumlichen Ebene der Modellsimulation, dem Ackerschlag, auf größere Räume, die Natur- bzw. Kulturlandschaft, ist in **Abb. 1** dargestellt.

Zunächst mussten die langfristigen Klimabedingungen in Norddeutschland, die für die Ausbreitung der Rapspollen und -samen von Bedeutung sind (Breckling et al. 2003, Menzel 2006), analysiert und zu charakteristischen Klimaregionen zusammengefasst werden (Schritt 1). In ähnlicher Weise mussten auch die Anbauregionen Norddeutschlands hinsichtlich Fruchtfolgen und Anbaumanagement klassifiziert werden (Breckling et al. 2003). Für das ontogenetische Modell ebenso wie zur Identifikation von Satelliten-Szenen (Landsat 5) zur Detektion von Rapsfeldgeometrien und zur Ableitung von Anbaudichtekarten (Laue 2004) wurden Daten zur Phänologie des Winterrapses in Norddeutschland geostatistisch ausgewertet. Im zweiten Schritt wurden die Informationen zu den ökologischen und agronomischen Verhältnissen in Norddeutschland zu statistisch beschreib- und voneinander unterscheidbaren Modellregionen verdichtet. Die Definition von zusätzlichen zeitlichen und räumlichen Variationen wie Nachbarschaftsstrukturen, Fruchtfolgen,

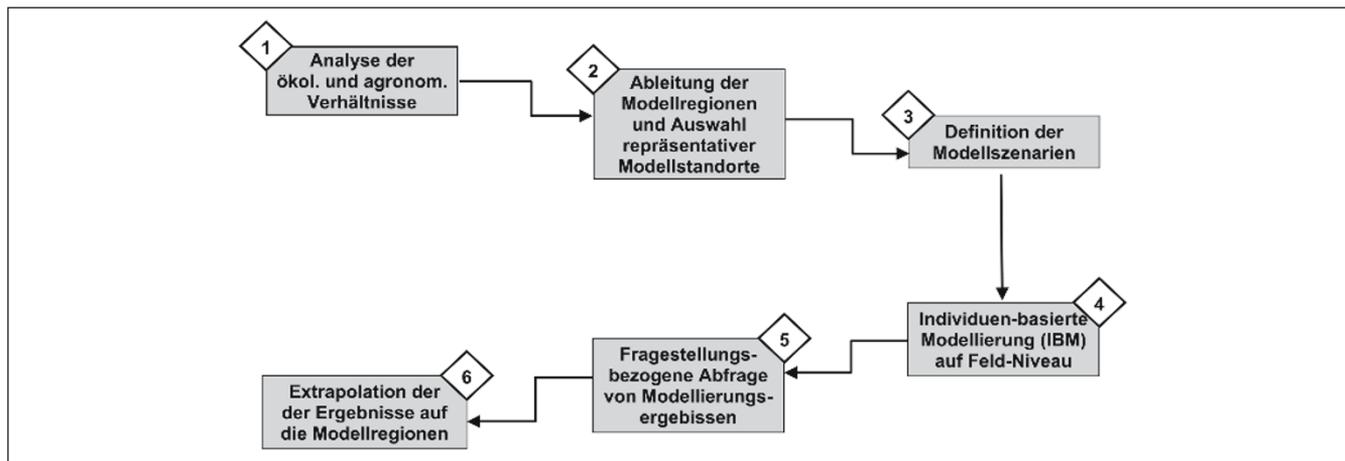


Abb. 1: Untersuchungskonzept zur Modellierung der Ausbreitung von GV-Raps in GenEERA

Anbaujahren etc. führte zur Festlegung einer Vielzahl von Anbau- und Modellzenarien (Schritt 3). Diese wurden im Ausbreitungsmodell jeweils für einen Zeitraum von 10 Jahren für jede Modellregion auf der räumlichen Ebene einzelner Rapsschläge simuliert (Schritt 4). Die Anzahl der Simulationsläufe erhöhte sich zudem durch weitere stochastische Variationen von Ernte- und Transportverlusten, Durchwuchsraten, Wildpopulationen, Befruchtungsraten sowie Überdauerung von Rapssamen im Boden (Middelhoff und Breckling 2003). Die daraus resultierende mehr als 150.000 Simulationsläufe umfassende Ergebnisdatenbank musste anschließend fragestellungsbezogen gefiltert werden, um den Verlauf der Ausbreitung differenziert darstellen und generalisieren zu können (Schritt 5). Die Datenbankauszüge wurden schließlich mit Hilfe von GIS-Abfragen und Verschneidungsoperationen für jede Modellregion flächenhaft kartografisch aufbereitet und dargestellt (Schritt 6). Der Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der Beschreibung der ersten beiden Schritte des Up-Scaling-Konzepts: Mit Hilfe von Cluster-Verfahren wurde Norddeutschland in charakteristische Klimaregionen untergliedert (Schritt 1) und zu Modellregionen für die Individuen-basierte Modellierung aggregiert (Schritt 2). Die Modellierungsergebnisse wurden zuletzt wieder auf die Modellregionen übertragen (Schritt 6).

3 Datengrundlage und -verarbeitung

3.1 Datengrundlage

Zur Beschreibung der räumlichen Variabilität der die Pollenausbreitung und die Samenpersistenz beeinflussenden Klimafaktoren wurden in einem GIS umfangreiche meteorologische Datensätze von mehr als 1.200 Klimamessstationen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) zusammengeführt und anschließend mit Hilfe statistischer Verfahren analysiert. Es handelt sich dabei um langjährige Monatsmittelwerte der Klimanormalperiode 1961–1990 zur Niederschlagsmenge, zur Lufttemperatur und zur Sonnenscheindauer (Tab. 1).

Die Ausbreitung der Rapspollen in der Atmosphäre wird in erster Linie durch Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Turbulenzzustand und die von der vertikalen Temperaturverteilung abhängige Stabilität der Atmosphäre während der Blühperiode beeinflusst. Daten zur Windgeschwindigkeit und -richtung werden in Norddeutschland an 225 Messstationen

erhoben. Die Windrichtung bestimmt die Transportrichtung des Pollens und definiert so die potenziellen Expositionsgebiete. Bei einer konstanten Quellstärke beeinflusst die Windgeschwindigkeit sowohl die Geschwindigkeit als auch die Reichweite der Pollenausbreitung. Hohe Windgeschwindigkeiten führen dabei zu einer Verdünnung (spraying) der Pollenkonzentration, da dann der Anteil des Transportmediums Luft je überströmter Flächeneinheit entsprechend zunimmt (Oke 1987). Der gesamte Datensatz zu den Windverhältnissen in Norddeutschland umfasste mehr als 800.000 Messungen, die stündlich von 1991 bis 2001 aufgenommen wurden. Der Datensatz wurde zunächst entsprechend der geostatistisch ausgewerteten Beobachtungen zur Raps-Phänologie (s.u.) für die an der jeweiligen Windmessstation herrschende einmonatige Blühzeitdauer des Winterraps (ca. April-Mai) ausgedünnt und für die spätere Modellierung zu Tages- bzw. Monatsmittelwerten von Windgeschwindigkeit und -richtung verdichtet. Für die Clusteranalysen wurden schließlich noch langjährige Monatsmittel für den Zeitraum 1991–2001 gebildet.

Zur Modellierung der Pollenausbreitung in Zeit und Raum wurden wie oben beschrieben ebenfalls Angaben zur Phänologie des Winterraps ausgewertet. Vor dem Hintergrund, dass sich die Blühtermine des Raps aufgrund der globalen Klimaerwärmung wie bei anderen Pflanzenphasen nachgewiesen (Schröder et al. 2006a) zum Jahresbeginn hin verschoben haben, wurden die Daten von 766 phänologischen Beobachtungsstandorten des DWD zum Blühbeginn des Winterraps für zwei Zeiträume (1961–1990 bzw. 1991–1999) getrennt voneinander geostatistisch ausgewertet.

Zusätzlich zur Analyse der Klimaverhältnisse in Norddeutschland anhand von Messungen an einer Vielzahl von meteorologischen Messstandorten wurde eine bestehende Landschaftsgliederung verwendet, um die großräumigen ökologischen Verhältnisse des Untersuchungsraums zu beschreiben. Diese mit Hilfe eines hierarchischen Klassifikationsverfahrens (CART) (Breiman et al. 1984) abgeleitete Landschaftsgliederung integriert mit einer räumlichen Auflösung von 2x2 km sowohl klimatische als auch pedologische, vegetationsökologische und orografische Eigenschaften Deutschlands zu in sich jeweils homogenen, statistisch beschreibbaren Landschaftseinheiten (Schröder et al. 2006b).

Tabelle 1: Datengrundlage zur Ableitung von Modellregionen und zur Auswahl von repräsentativen Modellstandorten

Information	Quelle	Zeitraum	Standorte	Verwendung	Kapitel
Monatsmittelwerte Niederschlag	DWD	1961–1990	1.221	Cluster-Analyse nach Ward	4.1.1
Monatsmittelwerte Lufttemperatur		1961–1990	163		4.1.2
Monatsmittelwerte Sonnenscheindauer		1961–1990	135		4.1.3
Monatsmittelwerte Windrichtung, -geschwindigkeit		1991–2001	225		4.3
Blühbeginn des Winterraps	DWD	1961–1999	766	Feststellung des Blühzeitraums	4.2
Landschaftsgliederung nach Schröder et al. (2006b)	HS Vechta	–	1 (Karte)	Ökologische Charakterisierung	4.5
Stundenmittel von Windrichtung, -geschwindigkeit	DWD	1991–2001	8	Eingangsdaten für die Modellierung	4.6
Tägliche Niederschlagsmenge		1991–2001	8		
Tagesextrema Lufttemperatur		1991–2001	8		
Tagessumme Sonnenscheindauer		1991–2001	8		

3.2 Datenverarbeitung

3.2.1 Ward Clustering

Zweck multivariater Clusterverfahren ist die statistisch fundierte Zusammenfassung einzelner Objekte zu Klassen, Gruppen oder Clustern. Die Kriterien, die zur Clusterbildung herangezogen werden, leiten sich aus der Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit aller betrachteten Objekte hinsichtlich ausgewählter Merkmale ab. Im vorliegenden Falle sind Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes die Objekte, die anhand der an ihnen gemessenen Daten über die Ausprägung der Merkmale Niederschlag, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer und Wind gruppiert werden. Es gibt unterschiedliche Cluster-Algorithmen, die unterschiedliche Clusterbildungen erzeugen (Mucha 1994).

Das Verfahren nach Ward (1963) ist ein agglomeratives hierarchisches Clusterverfahren für metrische Daten (Backhaus et al. 2000). Derartige hierarchische Clusterverfahren führen die Gesamtanzahl der vorhandenen Objekte, hier die DWD-Klimastationen, schrittweise zu Clustern zusammen. Das Optimierungskriterium ist hierfür beim Verfahren nach Ward auf Minimierung der Zunahme der Messwertvarianz innerhalb der Gruppen ausgerichtet (Shwartz et al. 2001). Diese Varianz wird ausgedrückt durch die so genannte Fehlerquadratsumme (FQS). Es werden nur diejenigen Objekte bzw. Standorte zusammengeführt, die einen minimalen Zuwachs der FQS hervorrufen. Der Vorteil des Verfahrens nach Ward besteht neben einer optimierten Klassenbildung darin, dass aus der Zunahme der FQS Anhaltspunkte für die Anzahl der zu bildenden Klassen abgeleitet werden können. Der Nachteil besteht in dem hohen Speicherplatzbedarf bei den Berechnungen, so dass nur relativ geringe Fallzahlen miteinander verrechnet werden können. Cluster-Analysen werden u.a. für Regionalisierungen des Klimas (Knapp et al. 2002) oder zur Ableitung von Landschaftsgliederungen verwendet (Xie et al. 2004, Zhou et al. 2003).

Für jedes der vier Klimaelemente Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer und Wind wurden mit dem Ward-Algorithmus aus den jeweiligen Monatsmittelwerten der Klimanormalperiode 1961–1990 bzw. 1991–2001 (Windverhältnisse) Gruppen (Cluster) von Messstationen gebildet. Ziel ist es dabei, die gruppeninterne Homogenität bei möglichst klarer Trennung der Gruppen zu optimieren. Die Klassifikation erfolgte nicht multivariat, d.h. nicht anhand aller vier Klimaelemente in einer Berechnung, da sie nicht in jedem Falle an denselben Messstationen erhoben werden. Legt man der Klassifikation nur diejenigen Stationen zu Grunde, an denen alle drei Messgrößen erhoben werden, wären räumliche Lücken entstanden, die sich durch eine messgrößen-spezifische Klassifikation vermeiden lassen.

3.2.2 Geostatistik

Die Geostatistik beruht auf der Annahme, dass nahe zusammen liegende Standorte in einem Messraster eine höhere Ähnlichkeit zueinander aufweisen als weit entfernte (ortsabhängige Variablen) (Matheron 1971). Ein großer Vorteil geostatistischer Methoden ist die Möglichkeit, nicht nur den Schätzwert, sondern auch die Schätzvarianz als Maß für die Zuverlässigkeit der berechneten Werte zu erhalten (Olea 1999).

Das wichtigste Werkzeug bei der rechnerischen Ermittlung der räumlichen Abhängigkeit der Proben- und Analysenwerte untereinander ist das (Semi-)Variogramm (Journel und Huijbregts 1997, Webster und Oliver 2001). Es beschreibt die räumlichen Verteilungseigenschaften und -strukturen der auszuwertenden ortgebundenen Veränderlichen. Mit der Variogrammanalyse lässt sich prüfen, ob Messwerte näher beieinander liegender Messpunkte einander ähnlicher sind als diejenigen voneinander weiter entfernt liegender Messflächen. Nach einer positiven geostatistischen Prüfung des Datenmaterials per Variogrammanalyse wird zur Regionalisierung der Datenpunkte, d.h. zur flächenhaften Interpolation, das Kriging-Verfahren angewendet. Hierbei wird in einem definierten Interpolationsraster (Block-/Punktraster) unter der Bedingung der Minimierung der Schätzvarianz eine nach Entfernung gewichtete Berechnung der Schätzwerte durchgeführt. Die Berechnung des Schätzwertes erfolgt durch eine Wichtung der umgebenden Messwerte nach ihrer Entfernung und Richtung.

Mit Hilfe der Geostatistik wurden die phänologischen Beobachtungen zur Blüte des Winterapses in Norddeutschland ausgewertet. Dafür standen Daten von insgesamt 766 Beobachtungsstandorten zur Verfügung, die in Form von langjährigen Stationsmittelwerten (1961–1990 bzw. 1991–1999) nach erfolgreicher Variogramm-Analyse zu Flächenkarten interpoliert wurden (s. Abb. 3).

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse beschrieben, die aus der statistischen Auswertung der in Kapitel 3.1 aufgeführten Daten mit den in Kapitel 3.2 umrissenen Methoden erhalten wurden. Im Ergebnis führte die Datenauswertung zu charakteristischen Modellregionen und darauf basierend zu einer Liste von repräsentativen Standorten, die für die individuenbasierte Modellierung vorgeschlagen wurden. Diese Standorte sollen im Sinne der folgenden sechsstufigen Operationalisierungskaskade repräsentativ sein und für die Modellierung der potenziellen Ausbreitung von GV-Raps ausgewählt werden:

- Kap. 4.1. Klimaklassifikation: In welche Cluster lässt sich Norddeutschland anhand der Monatsmittelwerte von Niederschlag, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer (1961 bis 1990) einteilen (Clusteranalyse)?
- Kap. 4.2. Phänologie-Abgleich: Wann blüht wo innerhalb dieser Klimaregionen Norddeutschlands der Raps (Geostatistik)?
- Kap. 4.3. Klassifikation Winddaten: Welche Verteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit lässt sich für den nach 4.2 festgestellten Blühzeitraum des Raps zwischen 1991 und 2001 in Norddeutschländermitteln (Clusteranalyse)?
- Kap. 4.4. Festlegung Klimaregionen und Verschneidung mit Wind-Clustern: Wie sind die Klimaregionen definiert und wie sind sie mit den Wind-Clustern verknüpft (Kreuztabellierung im GIS)?
- Kap. 4.5. Verschneidung Klimaregionen und ökologische Raumgliederung: Wie sind die Modellregionen und die Klassen der landschaftsökologischen Raum-

gliederung häufigkeitsstatistisch miteinander verknüpft (Kreuztabellierung im GIS)?

Kap. 4.6. Ableitung Modellregionen: Festlegung von nach 4.1–4.5 repräsentativen Teilräumen Norddeutschlands und Bestimmung von geeigneten Windmessstationen als Modellstandorte

Im letzten Schritt schließlich wird beispielhaft gezeigt, wie die Modellierungsergebnisse wieder auf diejenigen Modellregionen extrapoliert wurden, für die die Modellstandorte jeweils repräsentativ waren (Kap. 4.7).

4.1 Klima-Regionalisierung

Die für die Klimatelemente Niederschlagshöhe und Lufttemperatur jeweils getrennt durchgeführte Ward-Klassifikation gliedert Norddeutschland in fünf Teilräume. Einer der Cluster bildet jeweils den Harz als paläozoisches Mittelgebirge ab. Die Analyse der Daten zur Sonnenscheindauer dagegen ergab für diese Region keinen separaten Cluster. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Clusteranalysen kurz beschrieben.

4.1.1 Niederschlags-Cluster

Die Ward-Analyse der an 1.221 Messstandorten registrierten und zu langjährigen Monatsmittelwerten aggregierten Niederschlagswerte ergab fünf Cluster. Der durchschnittliche Verlauf der Niederschläge in den jeweiligen Klassen ist in den Jahressgangkurven in **Abb. 2** dargestellt.

Anhand der Jahressgangkurven zum Niederschlag ist zu erkennen, dass die höchsten Niederschläge an den zu Cluster 5 gehörenden Messstationen im Harz fallen. Mit Werten von 90–140 mm/mon sind die Niederschlagsmengen hier etwa 50 mm je Monat höher als im Gesamtmittel. Die mit

etwa 10 mm/mon unter dem Gesamtmittel liegenden niedrigsten Niederschläge sind an den Stationen von Cluster 1 zu verzeichnen, die über das Land Brandenburg verteilt sind. Während die Werte an den Stationen des Clusters 2 (Ostseeküste, südliches Niedersachsen) in etwa dem Gesamtdurchschnitt nachzeichnen, liegen die Werte im übrigen Binnenland Niedersachsens sowie im Süden Schleswig-Holsteins um etwa 10 mm/mon höher (Cluster 3). An den Stationen, die an der Nordseeküste gelegen sind (Cluster 4), fallen in den Herbst- und Wintermonaten um bis zu 30 mm/mon höhere Niederschläge als durchschnittlich in ganz Norddeutschland.

4.1.2 Temperatur-Cluster

Für die Clusteranalyse der Lufttemperaturen standen langjährige Monatsmittel von 162 Messstationen zur Verfügung. Auch hierbei wurden 5 Cluster als geeignete Klassenanzahl ermittelt. Die niedrigsten Temperaturen finden sich erwartungsgemäß an den Standorten von Cluster 1, der die Verhältnisse im Harz abbildet. Dort liegen die Werte ca. 2°C unterhalb des Gesamtmittels. Um etwa 1°C höhere Sommertemperaturen als im Gesamtmittel finden sich dagegen in Brandenburg (Cluster 4). Der Verlauf der Jahressgangkurven der drei anderen Cluster ist recht ähnlich, Unterschiede treten hier mit Abweichungen von ±0,5°C insbesondere in den Sommer- und Wintermonaten auf.

4.1.3 Sonnenscheindauer-Cluster

Deutlich Unterschiede in der Sonnenscheindauer an den 134 Messstationen sind insbesondere in den Frühjahrs- und Sommermonaten zu beobachten, in denen die Variation in der Länge des Sonnenscheins zwischen den vier Clustern bis zu 70 Stunden betragen kann. Am längsten schien demnach die Sonne an den Stationen von Cluster 4, die entlang der

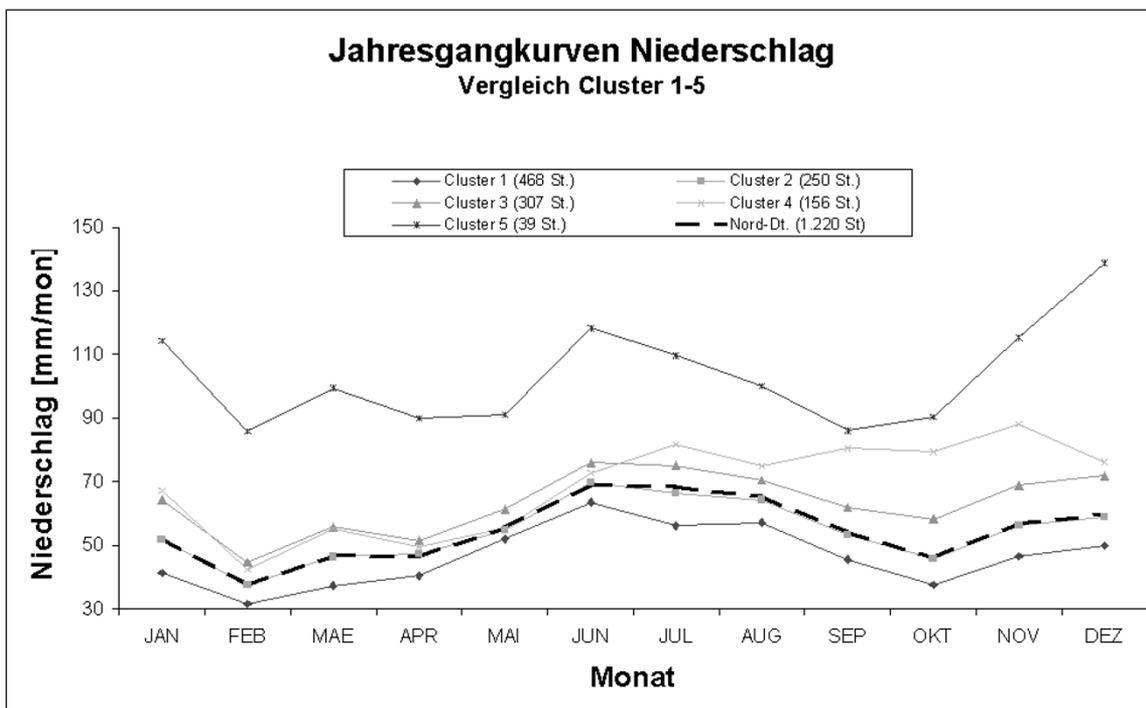


Abb. 2: Jahressgangkurven des Niederschlags (langjährige Monatsmittel für 1961–1990) in den 5 Ward-Clustern

Ostseeküste verteilt sind, und an denen von Cluster 3 (Brandenburg). Demgegenüber ist an den Standorten von Cluster 1 (Südwest- und Süd-Niedersachsen) mit wesentlich weniger Sonnenschein zu rechnen, hier scheint die Sonne bis zu 40 Stunden weniger als im Gesamtdurchschnitt.

4.2 Blüte des Winterrapses

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, spielt die zeitliche und räumliche Analyse der Blühperiode des Winterrapses für die Modellierung der Ausbreitung des Pollens eine wichtige Rolle. Daher wurden die an 766 Standorten in Norddeutschland aufgenommenen phänologischen Beobachtungen zur Rapsblüte aus dem Zeitraum 1961–1990 bzw. 1991–1999 zusammengestellt und geostatistisch ausgewertet. Die Analyse enthüllte drei wichtige Aspekte: 1) Der Beginn der Blühperiode des Winterraps fällt je nach Standort unterschiedlich aus. Insbesondere in den küstennahen Regionen, an den Mittelgebirgsrändern im Süden sowie in Nordostdeutschland beginnt die Rapsblüte mehrere Tage später als im übrigen Norddeutschland. Für den jüngeren Untersuchungszeitraum verwischen diese räumlichen Unterschiede allerdings deutlich. 2) Der zeitliche Vergleich der gegenübergestellten Erhebungsperioden zeigt deutlich, dass sich der Blühbeginn während der Neunziger Jahre zum Jahresbeginn verschoben hat. Während die Rapsblüte zwischen 1961 und 1990 durchschnittlich erst am 11. Mai begann, verfrühte sich der Beginn zwischen 1991 und 1999 um durchschnittlich 9 Tage (2. Mai) (Abb. 3). Die zeitliche Variabilität in der letzten Dekade ist allerdings sehr hoch. Ein Vergleich der beiden Extremjahre 1995 und 1996 zeigt, dass aufgrund milder Temperaturen die Rapsblüte 1995 bereits am 28. April begann, nach einem sehr kalten Winter ein Jahr später dagegen erst durchschnittlich 20 Tage später, am 18. Mai.

Auf der Grundlage dieser Auswertung konnten passende Satelliten-Bilder (Landsat 5) ausgewählt werden, um mit Hilfe entsprechender Detektions-Algorithmen aktuell blühende Rapsfelder zu identifizieren, aus denen dann Karten zu jeweiligen Anbaudichte abgeleitet wurden (Laue 2004). Außerdem flossen die räumlich aufgelösten Angaben zur Rapsblüte in die individuenbasiert Modellierung ein, da sie den jeweiligen Blühzeitraum der Rapspflanzen definieren.

4.3 Wind-Cluster

Die Analyse der Klimaverhältnisse in Norddeutschland wurde ergänzt durch die statistische Auswertung von Daten zur Windgeschwindigkeit und -richtung, die zwischen 1991 und 2001 an 225 Messstationen erhoben wurden. Nach Durchführung der in Kap. 4.2 beschriebenen Vorarbeiten wurden die für den jeweiligen Blühzeitraum zu Monatsmittelwerten aggregierten Winddaten ebenfalls mit Hilfe der Ward-Analyse klassifiziert. Die dadurch erzeugten fünf Windcluster beschreiben somit die durchschnittlichen Windverhältnisse in Norddeutschland während der Blühperiode des Winterrapses für den Zeitraum 1991–2001 (Abb. 4).

Wie zu erwarten war, erreichen die Windgeschwindigkeiten an den Messstellen entlang der Nordseeküste und auf Rügen die höchsten Werte (Median 6,3 m/s) (Cluster 1). Bis zu Cluster 5 nehmen die mittleren Windgeschwindigkeiten bis auf 2,5 m/s ab. Für ausgewählte Standorte, die später für die Modellierung verwendet wurden, wurden zusätzlich aus den Daten zur Windrichtung Windrosen erzeugt, die die Variation der Windrichtung während der Blühperiode des Rapses illustrieren.

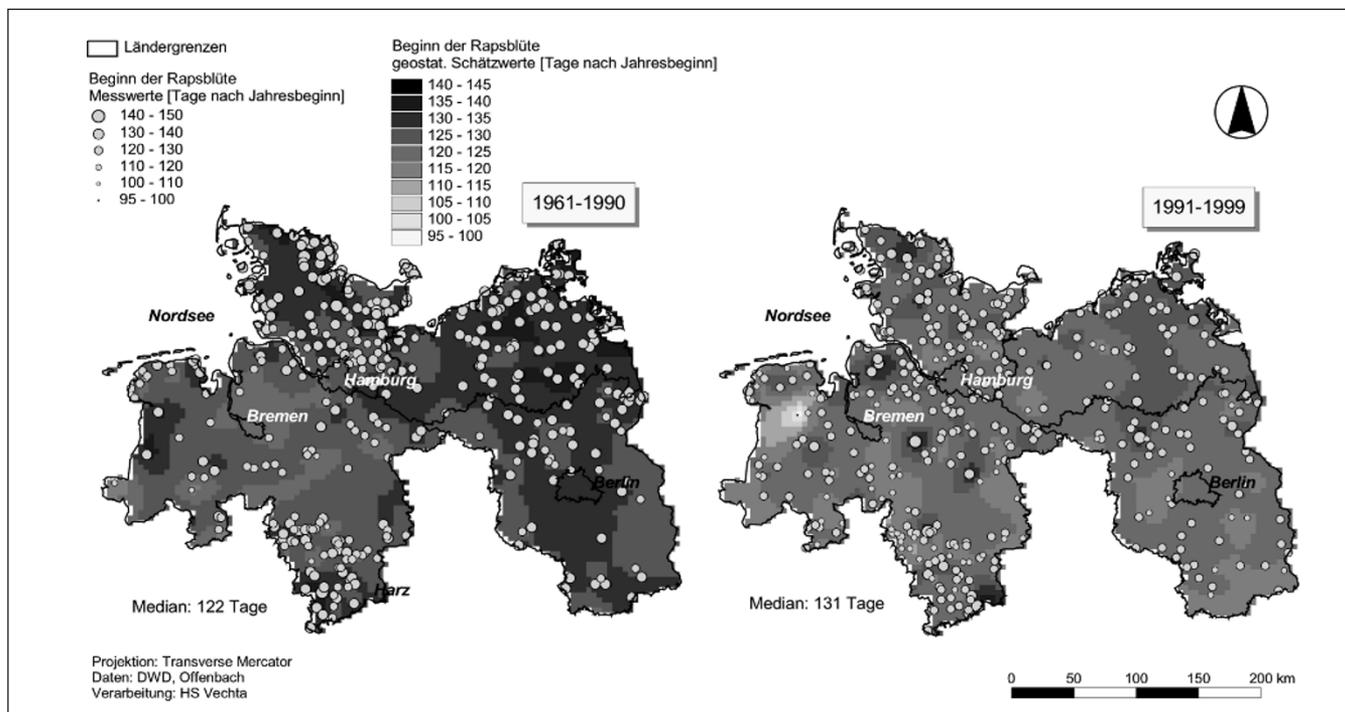


Abb. 3: Mittlere Blühtermine von Winterraps für die Zeiträume 1961 bis 1990 und 1991 bis 1999

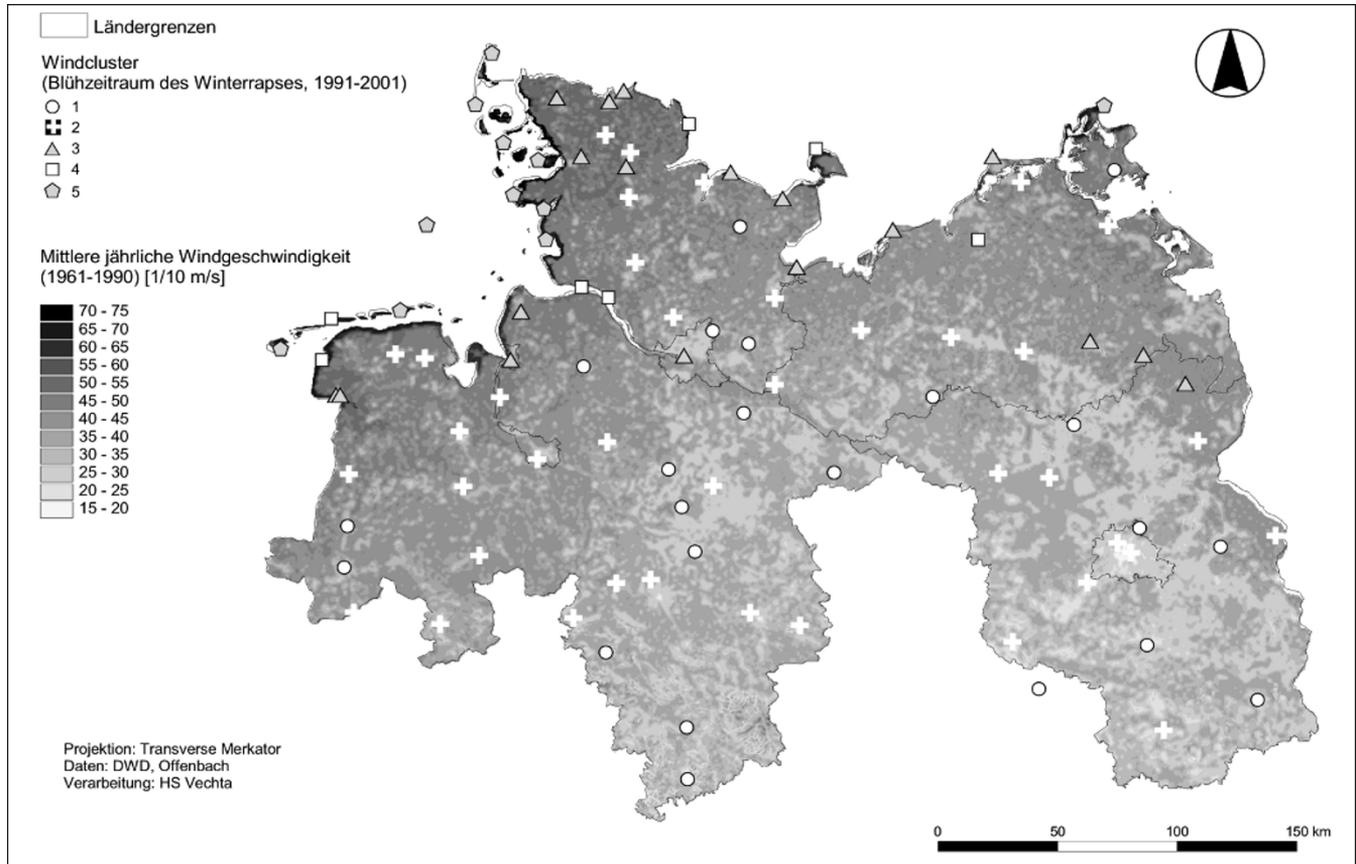


Abb. 4: Räumliche Verteilung der nach dem Ward-Algorithmus klassifizierten Windmessstationen (mittlere Windgeschwindigkeiten im Blühzeitraum für die Jahre 1991–2001) projiziert auf eine Karte der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeiten im Zeitraum 1961–1990 in Norddeutschland

4.4 Klimaregionen

Zur Auswahl repräsentativer Modellstandorte wurden zunächst die mit Hilfe der Ward-Klassifikation ermittelten 4 bzw. 5 separaten Klimacuster (Kap. 4.1.1–4) durch Frequenzanalyse zu 4 Klimaregionen zusammengefasst, die die Variation der unterschiedlichen Klimaverhältnisse in Norddeutschland widerspiegeln. Mit Hilfe von GIS-Abfragen wurde dabei für jede der unterschiedlichen Klimamessstationen untersucht, zu welchem Cluster die jeweils nächste Messstation eines der anderen Klimaparameter gehörte. Dies war notwendig, da die Klimaparameter Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer und Wind nicht an kongruenten Messstandorten erhoben wurden (Kap. 3.2.1). Sortiert nach den Windclustern ergaben sich folgende Häufigkeiten (Tab. 2).

Die räumliche Auswertung führte schließlich zu vier homogenen Klimazonen, die den Übergang von ozeanisch beeinflussten Regionen im Nordwesten zu kontinental geprägten Klimaten im Südosten abbilden (Abb. 5). Die Abgrenzung dieser vier Regionen spiegelt in erster Linie die Verteilung der Temperatur- und Niederschlagscluster wider, während die Verteilung der Sonnenscheindauer- und Windcluster keine deutlichen Unterschiede zwischen Küstenraum zum Binnenland anzeigen.

4.5 Landschaftsklassifikation

In Ergänzung zu den klimatologischen Untersuchungen (Kap. 4.1, 4.3) wurde Norddeutschland anhand einer landschaftsökologischen Raumlagerung beschrieben. Es konnten neun

Tabelle 2: Gruppierung der häufigsten Klimacuster-Konstellationen in den jeweiligen Klimazonen (fett: jeweilige Cluster-Nr., grau unterlegt: relative Häufigkeit in %)

Wind-Cluster	Niederschlags-Cluster	Temperatur-Cluster	Sonnenschein-Cluster
1	4	2	3
	91,0	73,0	60,0
	1	2	2/4
2	9,0	27,0	20,0
	4	2	3
	57,0	57,0	43,0
3	1	5	2
	29,0	29,0	29,0
	4	2	3
4	39,0	50,0	56,0
	1/2	5	2
	22,0	28,0	33,0
5	1	5	3
	39,0	36,0	45,0
	2	4	3
5	25,0	25,0	40,0
	3	5	2/3
	41,0	36,0	43,0
5	1	3	2/3
	32,0	32,0	43,0

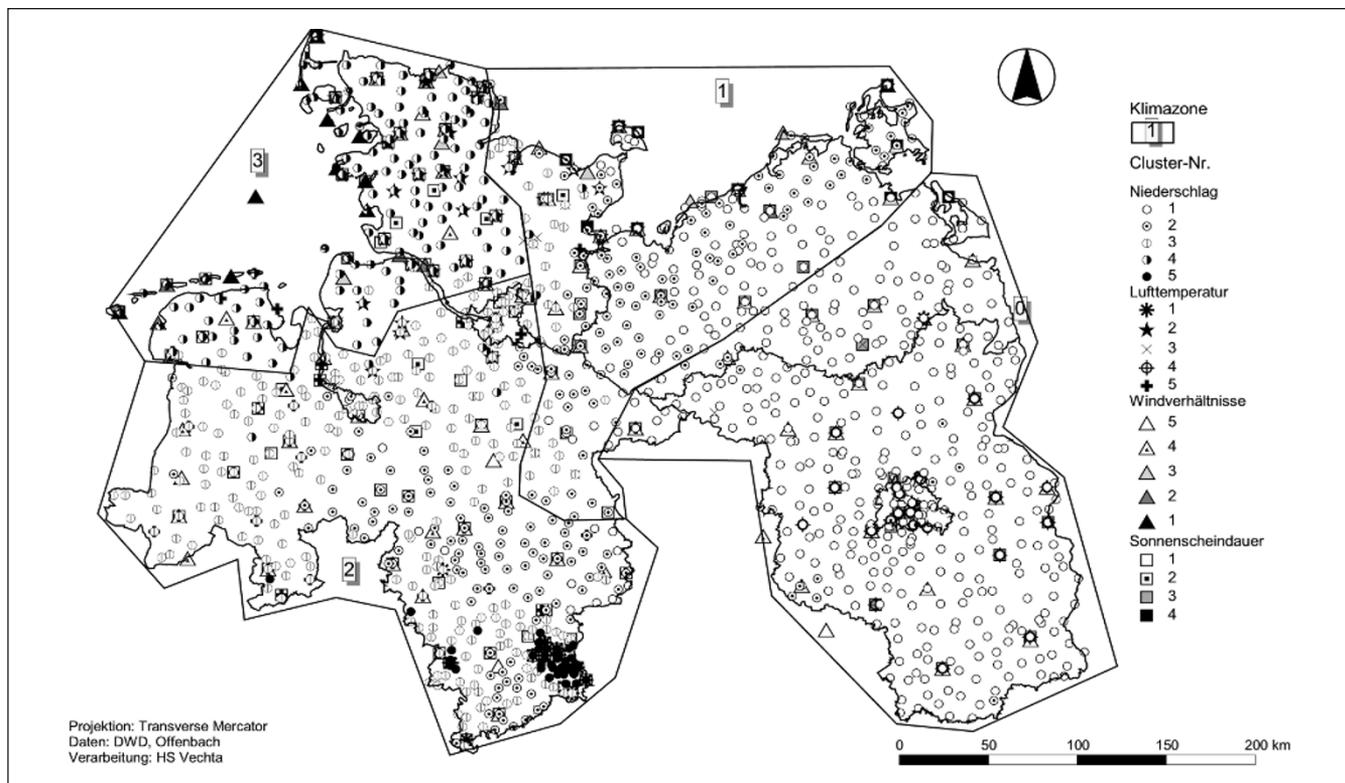


Abb. 5: Klimazonen in Norddeutschland

ökologische Raumklassen (RK) identifiziert werden, die etwa 98% der Untersuchungsregion abdecken (Tab. 3). Nach Schröder et al. (2006b) lassen sich diese Regionen wie folgt charakterisieren: Die in der Norddeutschen Tiefebene vorkommenden Landschaften sind in der Hauptsache während des Pleistozäns durch verschiedene Gletschervorstöße geformt worden und zeichnen sich genetisch durch glaziale und periglaziale Ablagerungen sowie deren Verwitterungsprodukte aus. Entlang der Nordseeküste finden sich holozäne Marschablagerungen (RK 22), die im Landesinnern durch saalezeitliche Geschiebelehne und Geschiebesande (Geest) abgelöst werden (RK 42), die dort als Grund- oder Endmoränen abgelagert wurden. Während der Weichseleiszeit wurden diese glazigenen Sedimente teilweise von Löss-Ablagerungen (RK 47) verhüllt, die je nach Entfernung zu den Gletscherloben aus Flugsanden oder Schluffen bestehen. Im

östlichen Niedersachsen bis hinauf zur Westküste Schleswig-Holsteins finden sich insbesondere glazifluviale Sande, die während des Alt-Pleistozäns aufgeschüttet wurden (RK 43). Entlang der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns schoben weichselzeitliche Gletscher eine v.a. aus Geschiebemergeln bestehende Jungmoränenlandschaft auf (RK 46). In Brandenburg finden sich südlich von Berlin weite Ebenen, die insbesondere durch saalezeitliche Schmelzwassersande gebildet wurden (RK 18), während sich nach Norden die Auenlandschaften der Havel und der Prignitz anschließen (RK 8). Die Mecklenburgische Seenplatte, die durch eine Vielzahl von Schmelzwasser- und Toteis-Seen sowie Endmoränenwällen charakterisiert ist, wird von Raumklasse 20 nachgezeichnet. Das triassische Harzvorland (RK 62) schließlich markiert den Übergang der Norddeutschen Tiefebene zu den Mittelgebirgen Süd-Niedersachsens. Die Landschaftsgliederung wurde im GIS mit den Klimaregionen verschnitten, um letztere weiter charakterisieren und darauf basierend repräsentative Standorte bestimmen zu können (Kap. 4.6).

Tabelle 3: Raumklassen nach Schröder et al. (2006b) in Norddeutschland

Raumklassen-Nr.	Fläche [km ²]	%
43	25.176	21,8
42	17.196	14,9
18	16.296	14,1
46	14.060	12,2
20	11.436	9,9
8	10.804	9,4
47	8.336	7,2
22	5.384	4,7
62	4.072	3,5

4.6 Modellregionen und -standorte

Eine weitere Klassifikation kennzeichnet die räumliche und zeitliche Variation der regionalen Anbauverhältnisse in Norddeutschland mit Hilfe von Angaben zum Anbaumanagement und den nach Agrarstatistik praktizierten Fruchtfolgen (Breckling et al. 2003). Diese so genannten 'Agrarcluster' wurden mit den Klimaregionen zu acht Modellregionen kombiniert. Diese abstrahieren jeweils die ty-

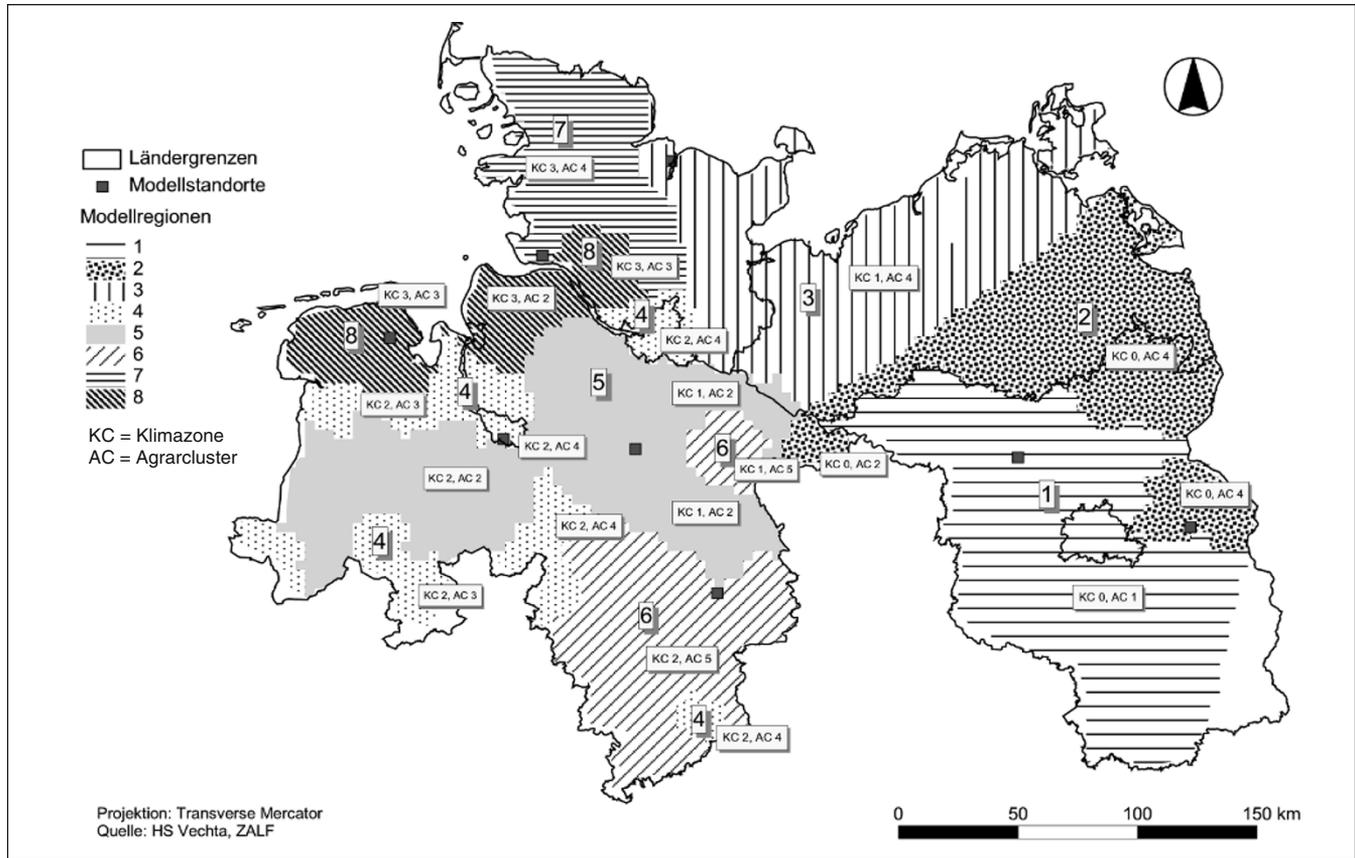


Abb. 6: Modellregionen für die Individuen-basierte Modellierung

pischen ökologischen und agronomischen Verhältnisse in Norddeutschland (Abb. 6) und sind durch eine, wie oben ermittelte, repräsentative Messstation vertreten.

Tabelle 4: Merkmalskombinationen von Klimazone (KC) und Agrarcluster (AC) im Untersuchungsraum sowie daraus abgeleitete Modellraumklassen (grau unterlegt diejenigen Kombinationen, die durch einen Modellstandort vertreten sind)

Modellraum	KC	AC	Fläche [ha]	Flächenanteil [%]
1	0	1	2.224.036	20,2
2	0	4	1.453.798	13,2
2	0	2	71.609	0,7
3	1	4	1.756.482	16,0
4	2	3	556.090	5,1
4	2	4	377.658	3,4
5	2	2	1.645.186	14,9
5	1	2	296.661	2,7
6	2	5	1.063.609	9,7
6	1	5	136.127	1,2
7	3	4	770.595	7,0
8	3	3	611.936	5,6
8	3	2	46.879	0,4
	Summe		11.010.666	100

Da aus Kapazitätsgründen nicht für alle Modellregionen entsprechende Szenario-Standorte ausgewählt und dafür Modellrechnungen durchgeführt werden konnten, bildeten einige Kombinationen einen gemeinsamen Modellraum ab, für den dann stellvertretend die Ergebnisse der berücksichtigten Kombination gelten. Insgesamt waren von den 13 im Untersuchungsraum vorkommenden Kombinationen 8 in Form von Modellraumklassen durch die Szenariostandorte repräsentiert (Tab. 4).

Für jede der zuvor beschriebenen Modellregionen galt es im nächsten Schritt, für die dort herrschenden ökologischen und agronomischen Rahmenbedingungen repräsentative Messstationen nach folgendem Schema auszuwählen (Schröder und Schmidt 2006):

- (1) Identifikation der häufigsten Windcluster innerhalb der jeweiligen Klimaregion;
- (2) Bestimmung der häufigsten ökologischen Raumklasse;
- (3) Bestimmung der jeweils häufigsten Klimacluster von Niederschlag, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer;
- (4) Bestimmung der vorherrschenden Agrarcluster;
- (5) Identifikation passender Messstationen, die jeweils die Kriterien 1-4 erfüllen und an denen alle vier Klimamessgrößen am selben Ort aufgenommen werden.

Als Beispiel sei dies für Klimazone 0 (Brandenburg) erläutert. Demnach lässt sich Klimazone 0 den beiden Landschaften 'Altmark, Havelland und Uckermark' (RK 8) und 'Brandenburger Jungmoränenlandschaft' (RK 18) zuordnen. In diesen beiden Regionen finden sich in der Hauptsache Wind-

Tabelle 5: Szenariostandorte für die individuen-basierte Modellierung der Rapsausbreitung

Modell-Raum	Klimamess-Station	Raumklasse	Raps Blüte ^a	Windgeschw. ^b	Wind-Cluster	Nied.-Cluster	Temp.-Cluster	Sonn.-Cluster
1	Neuruppin	8	127	3,0	4	1	4	3
2	Muencheberg	18	116	2,0	5	1	4	3
3	Kiel-Holtenau	46	126	3,1	4	3	2	3
4	Bremen	22	118	3,8	2	2	5	2
5	Soltau	43	120	2,7	5	3	3	2
6	Braunschweig	47	123	3,0	4	2	5	2
7	Gluecksburg	22	123	5,0	2	4	2	2
8	Jever	42	124	3,1	4	4	5	2

^a Tage nach Jahresbeginn

^b Jahresmittel 1991–2001 (m/s)

messstationen des Clusters 4 bzw. 5. Weiterhin waren in diesen beiden Regionen Klimamessstationen vorhanden, die dem Niederschlags-Cluster 1, dem Temperatur-Cluster 4 und dem Sonnenscheindauer-Cluster 3 angehören. Durch die Agrarcluster (AC 1, AC 4) ist Klimazone 0 in die Modellregionen (MR) 1 und 2 aufgliedert. Diesen Merkmalskombinationen entsprachen die Standorte Neuruppin einerseits (MR 1) und Muencheberg andererseits (MR 2) am besten. Hier wurden auch alle 4 Klimaparameter gleichzeitig gemessen. Nach diesem Verfahren wurden für alle 8 Modellregionen verfahren, so dass für jede dieser Regionen ein entsprechend geeigneter, repräsentativer Modellstandort identifiziert werden konnte (Tab. 5).

Für jeden dieser Szenariostandorte wurden schließlich zeitlich hoch aufgelöste Klimadaten (Tagessummen Niederschlag und Temperatur, Tagesextrema Lufttemperatur, stündliche Windverhältnisse) für den Blühzeitraum der Jahre 1991–2001 für die Individuen-basierte Modellierung bereitgestellt.

4.7 Extrapolation der Modellierungsergebnisse

Entsprechend dem in Kap. 2.2 umrissenen Ablaufschema wurden für alle acht ökologisch und agronomisch charakteristischen Modellstandorte entsprechende Modellrechnungen zur potenziellen Rapsausbreitung durchgeführt. Insgesamt wurden für einen Zeitraum von 10 Jahren rd. 150.000 Modellszenarien gerechnet mit stochastischen Variationen von Ernte- und Transportverlusten, Durchwuchsraten und Überdauerungsraten von Rapssamen im Boden. Diese wurden anschließend nach Modellregion und Anbaujahr gefiltert, zu Mittelwerten aggregiert und kartographisch dargestellt. Ein Beispiel dieser Extrapolation zeigt Abb. 7. Hier ist die durchschnittliche Anzahl von gentechnisch veränderten Rapssamen pro Hektar in der Bodensamenbank nach einem Jahr Anbau und nach fortwährendem Anbau über 10 Jahre je Rasterzelle (5 x 5 km) dargestellt.

Zwei wichtige Erkenntnisse lassen sich u.a. aus dieser kartographischen Aufbereitung der Modellierungsergebnisse

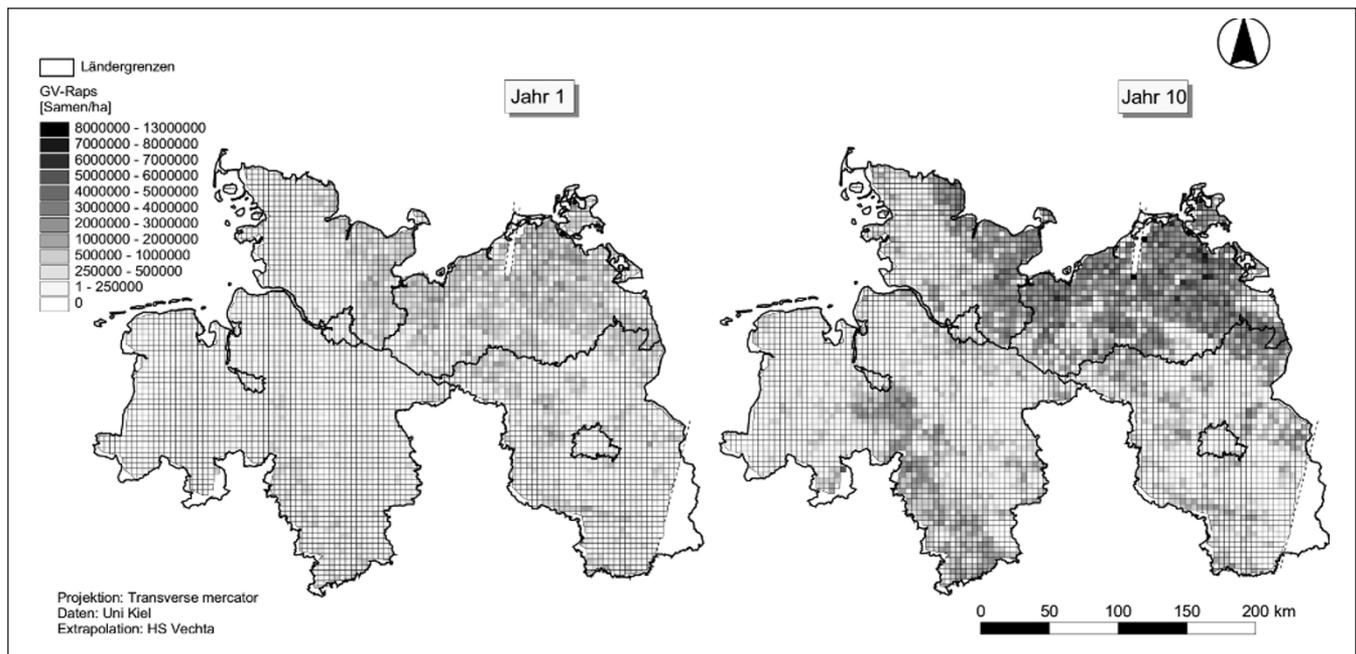


Abb. 7: Extrapolation der Modellierungsergebnisse zur Anzahl an GV-Rapssamen in der Bodensamenbank nach dem ersten Anbaujahr und nach 10 Jahren fortwährendem Anbau

festhalten: 1) Die meisten transgenen Rapssamen treten in solchen Räumen auf, wo die Anbaudichte von konventionellem Raps am höchsten ist, nämlich in den Jungmoränenlandschaften des Ostseeküstenraums und in fruchtbaren Lössböden Südniedersachsens. Dies ist sowohl in den ersten fünf Jahren zu beobachten, in denen im Modell der Anteil von GV-Rapssaatgut auf 10 % gesetzt wurde, als auch in den folgenden 5 Jahren, in denen der Anteil auf 50 % erhöht wurde. 2) Selbst in Regionen, in denen kein Winteraps angebaut wird, würden nach 10 simulierten Jahren z.B. aufgrund von Wildrapspopulationen und Transportverlusten GV-Rapssamen zu finden sein. Die Anzahl und die Geschwindigkeit der Verbreitung dürften sich noch weiter erhöhen, wenn das Auftreten von Wildkreuzungspartnern im Ausbreitungsmodell berücksichtigt wird.

5 Diskussion

Die Klimaklassifikation mit Hilfe des Ward-Verfahrens führte im Ergebnis zur Ausgrenzung von vier Klimaregionen. Die vier bzw. fünf Cluster lassen einen Übergang von kontinental geprägtem Klima im Südosten (Brandenburg) mit relativ niedrigen Niederschlägen, häufigem Sonnenschein und hohen Lufttemperaturen hin zu einem maritimen Klima an der Nordseeküste im Nordwesten Norddeutschlands erkennen, das durch kühlere Lufttemperaturen und höhere Niederschlagsbeträge gekennzeichnet ist (Flohn 1954). Siegmund und Frankenberg (1999) definieren den Kontinentalitäts- bzw. Maritimitätsgrad nach der Jahresamplitude der monatlichen Durchschnittstemperatur (TA). Demnach sind alle Temperatur-Cluster der maritimen Klimazone ($10^{\circ}\text{C} < \text{TA} \leq 20^{\circ}\text{C}$) zuzuordnen, wobei Cluster 4 (Brandenburg) mit $18,7^{\circ}\text{C}$ dem Schwellenwert hin zum kontinentalen Klima (20°C) bereits recht nahe kommt. Darüber hinaus kennzeichnet der Quotient aus Sommer- und Winterniederschlägen (Ni) die Natur der Niederschlagsverteilung zusammenfassend (Siegmund und Frankenberg 1999). Während die Niederschlagscluster 2 bis 5 demnach alle auf eine ausgeglichene Niederschlagsverteilung über das Jahr hindeuten (Ni = 92 bis 119), fallen im Bereich von Cluster 1 (Brandenburg, Vorpommern) (s. Abb. 2) im klimatologischen Sommer (Mai bis Oktober) deutlich mehr Niederschläge (Ni = 126), so dass dieser Bereich zu den Sommerregenklimate der humiden Mittelbreiten zu zählen ist. Als weitere wichtige Kennwerte fungieren die Jahresmitteltemperaturen, die als Mediane für die 5 Cluster zwischen $8,9\text{--}8,2^{\circ}\text{C}$ (Norddeutsche Tiefebene) bzw. $6,5^{\circ}\text{C}$ (Harz) variieren, sowie die Jahressumme des Niederschlags, die zwischen $559\text{--}823\text{ mm/a}$ (Norddeutsche Tiefebene) bzw. 1.239 mm/a (Harz) liegt.

Die Beobachtungen über die Verschiebung des Blühbeginns der Rapspflanzen aufgrund der in den letzten 100 Jahren um $0,95^{\circ}\text{C}$ gestiegenen Lufttemperaturen (EEA 2004) erweitern die Erkenntnisse, die Menzel (1997) für Waldbäume in Bayern, Hartenstein (1994) an mehreren Phänotypen in Karlsruhe sowie Chmielewski & Rötzer (2002) bzw. Chmielewski et al. (2004) anhand von Auswertungen von Daten der internationalen phänologischen Gärten (IPGs) in Europa bzw. Deutschland gewonnen haben. Schröder et al. (2005, 2006) konnten anhand verschiedener Pflanzenphasen in Baden-Württemberg zeigen, dass insbesondere der phänologi-

sche Frühling, aber auch der Sommer in den Neunziger Jahren gegenüber der Klimanormalperiode 1961–1990 im Mittel um bis zu 15 Tage früher begann (Haselblüte). Bundesweite Untersuchungen zum Eintritt von 18 verschiedenen Pflanzenphasen haben ebenfalls bestätigt, dass sich der an den phänologischen Leitphasen abzulesende Frühlingsbeginn verfrüht hat (Englert et al. 2007). Die Phaseneintrittstermine für die beiden Zeiträume 1961–1990 bzw. 1991–2002 wurden zu Perzentilklassen (1=sehr früh, 10=sehr spät) aggregiert und bundesweit sowie für verschiedene Ökoregionen (Schröder et al. 2006b) differenziert ausgewertet. Demnach verringert sich der Median des Frühlingsbeginns von 7,5 auf 3,5. Auch bundesweite Untersuchungen zur Phänologie von Frühlingsphasen verschiedener Pflanzen führte zu solchen Ergebnissen (Schröder et al. 2007). So konnte für den gewöhnlichen Flieder (*Syringa vulgaris*) festgestellt werden, dass sich der Blühbeginn an etwa 1.000 Beobachtungsstandorten in Deutschland in der letzten Dekade im Mittel um rd. 6 Tage verfrüht hat.

6 Schlussfolgerungen

Aufgrund des enormen Rechenaufwands und wegen nicht zur Verfügung stehender parzellenscharfer Anbauarten ist es nicht möglich, die potenzielle Ausbreitung von gentechnisch verändertem Raps für jedes reale Rapsfeld in Norddeutschland zu modellieren. Daher sind Generalisierungen notwendig, die dazu dienen, die Variabilität der für die Verbreitung von GV-Raps wirksamen Umweltfaktoren auf einem hinreichend hohen Differenzierungsniveau abzubilden. Hierfür hat sich die Zusammenfassung dieser Faktoren zu homogenen Klimaregionen bewährt. Erste Untersuchungen der Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Pflanzen im Landschaftsmaßstab beginnen gerade erst. Das Verbundprojekt 'Generische Erfassungs- und Extrapolationsmethoden der Rapsausbreitung (GenEERA)' war Teil des BMBF-Forschungsprogramms 'Biologische Sicherheitsforschung'. Dieses Programm umfasst auch zwei Projektverbünde, in denen Monitoring-Methoden entwickelt werden. Die dabei zum Einsatz gelangenden Untersuchungsverfahren und die mit ihnen erzielten Ergebnisse werden bislang noch nicht so datenbanktechnisch erfasst, wie das für eine effiziente Welternutzung wie beispielsweise für Prognosen erforderlich und möglich ist (Schröder et al. 2003). Dies ist ein Grund dafür, dass die Modellierung und die Auswahl der Modellräume sowie die Verallgemeinerung ihrer Ergebnisse mit methodischen Vorbehalten zu betrachten sind und bestenfalls als plausible Szenarien einzustufen sind. Als solche sind sie von Erkenntnis förderndem Wert. Der hier verwendete Untersuchungsansatz wurde mittlerweile auch für andere Forschungsprojekte angepasst und erfolgreich angewendet (Graef et al. 2003, Graef et al. 2005).

7 Ausblick und Empfehlungen

Die Auswahl der Modellräume, die Modellierung sowie die Verallgemeinerung ihrer Ergebnisse basieren auf einer thematisch und räumlich eingeschränkten empirischen Grundlage. Daher ist es notwendig, die Modellierungsergebnisse durch ein statistisch fundiertes Monitoring zur Ausbreitung, zum Verbleib und zur Wirkung von GVP in der Umwelt zu

validieren und zu konkretisieren. Das nach EU-Richtlinie 2001/18/EG zur Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) in die Umwelt geforderte fallspezifische und allgemeine Monitoring, für das nach deutschem Gentechnikgesetz (§ 16 GenTG) die Betreiber verantwortlich sind, sollte daher schnellstmöglich umgesetzt werden, zumal die Freisetzung und der Anbau von GVP in Deutschland bereits begonnen haben. Für die Planung eines GVO-Monitorings sowie für die Analyse und Bewertung von Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Kulturpflanzen sollten solche Informationen erhoben und zusammengeführt werden, die dafür gemäß VDI (2006) erforderlich sind. Ein solches GVO-Monitoring sollte aus technischer Sicht durch ein webbasiertes Geoinformationssystem (WebGIS) begleitet werden, wie es Aden et al. (2007) vorschlagen. Ein solches WebGIS ermöglicht es, Geobasisdaten, Feldgeometrien, GVP-Anbauflächen und Naturschutzgebiete ebenso wie die Monitoring-Ergebnisse selbst allgemein verfügbar und über implementierte GIS-Funktionen ohne zusätzliche GIS-Software dezentral auswertbar zu machen. Dies würde nicht nur die Arbeit der Genehmigungsbehörde erleichtern, sondern auch bereits in der Planungsphase potenzielle Konfliktsituationen zwischen GVP-Anbau und konventioneller bzw. ökologischer Landwirtschaft sowie dem Naturschutz aufdecken und vermeiden helfen.

Literatur

- Aden C, Schmidt G, Schröder W (2007): The WebGIS 'GMO Monitoring'. Ecological complexity and sustainability. Abstracts of EcoSummit 2007, Beijing, China, p 10
- Ammann D, Vogel B (1999): Langzeitmonitoring gentechnisch veränderter Organismen: Bestandsaufnahme, Fallbeispiele und Empfehlungen. Kantonales Laboratorium Basel-Stadt
- Andow DA, Zwahlen C (2006): Assessing environmental risks of transgenic plants. *Ecology Letters* 9, 196–214
- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2000): Multivariate Analysemethoden. Berlin
- Bartsch D, Lehnen M, Clegg J, Pohl-Orf M, Schuphan I, Ellstrand NC (1999): Impact of gene flow from cultivated beet on genetic diversity of wild sea beet populations. *Molecular Ecology* 8, 1733–1741
- Beckie HJ, Warwick SI, Nair H, Seguin-Swartz G (2003): Gene flow in commercial fields of herbicide-resistant canola (*Brassica napus*). *Ecological Applications* 13, 1276–1294
- Benbrook CM (2004): Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States: The First Nine Years. BioTech InfoNet, Technical Paper No. 7
- Breckling B, Middelhoff U, Borgmann P, Menzel G, Brauner R, Neuffer B, Born A, Laue H, Schmidt G, Schröder W, Wurbs A, Glemnitz M (2003): Biologische Risikoforschung zu gentechnisch veränderten Pflanzen in der Landwirtschaft: Das Beispiel Raps in Norddeutschland. In: Reuter H, Breckling B, Mittwollen A (Hrsg), Gene, Bits und Ökosysteme. Verlag P. Lang, Frankfurt/M., S. 19–45
- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ (1984): Classification and regression trees. Pacific Grove, California
- Castellazzi MS, Perry JN, Colbach N, Monod H, Adamczyk K, ViaudV, Conrad KF (2007): New measures and tests of temporal and spatial pattern of crops in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 339–349
- Chapman MA, Burke JM (2006): Letting the gene out of the bottle: The population genetics of genetically modified crops. *New Phytologist* 170, 429–443
- Crawley MJ, Brown SL (1995): Seed limitation and the dynamics of feral oilseed rape on the M25 motorway. *Proceedings of the Royal Society of London B* 259, pp 49–54
- Devaux C, Lavigne C, Austerlitz F, Klein EK (2007): Modelling and estimating pollen movement in oilseed rape (*Brassica napus*) at the landscape scale using genetic markers. *Molecular Ecology* 16, 487–499
- Dungan JL, Perry JN, Dale MRT, Legendre P, Citron-Pousty S, Fortin MJ, Jakomulska A, Miriti M, Rosenberg MS (2002): A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography* 25, 626–640
- Eckelkamp C, Jäger M, Tappeser B, Danneberg G, Driesel AJ (1998): Verbreitung und Etablierung rekombinanter Desoxyribonukleinsäure (DNA). Berlin (UBA-Texte 51/98)
- EEA (European Environment Agency) (2004): Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment. EEA Report 2/2004. Copenhagen, Denmark
- Ellstrand NC (2003): Current knowledge of gene flow in plants: Implications for transgene flow. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences* 358, 1163–1170
- Englert C, Schmidt G, Schröder W (2007): Bildung eines Frühlings-Indikators für Deutschland auf Grundlage pänologischer Daten. In: Strobl, J, Blaschke TH, Griesebener G (Hrsg): Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. Agit-Symposium, S. 177–186
- Ferretti M (2001): Ecosystem monitoring. From the integration between measurements to the integration between networks. *Publicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Università degli studi di Padova*, pp 3–54
- Flohn H (1954): Witterung und Klima in Mitteleuropa. *Forschungen zur Deutschen Landeskunde* 78, Stuttgart
- Graef F, Schmidt G, Schröder W, Stachow U (2003): Prüfung der Repräsentativität von Bodendauerbeobachtungsflächen an ökologischen Räumen Brandenburgs mit CART (Classification and Regression Trees). *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 102 (2) 481–482
- Graef F, Schmidt G, Schröder W, Stachow U (2005): Determining ecoregions for environmental and GMO monitoring networks. *Environmental Monitoring and Assessment* 108, 189–203
- Haniotis T (2001): The Economics of Agricultural Biotechnology: Differences and Similarities in the US and the EU. In: Nelson GC (ed), *Genetically Modified Organisms in Agriculture. Economics and Politics*, pp 171–177
- Hartenstein M (1994): Phänologische Analysen im Stadtbereich von Karlsruhe. *Karlsruher Berichte zur Geographie und Geoökologie* 5, Karlsruhe
- Jenczweski E, Ronfort J, Chevre AM (2003): Crop-to-wild gene flow, introgression and possible fitness effects of transgenes. *Environmental Biosafety Research* 2, 9–24
- Journel AG, Huijbregts CJ (1997): *Mining Geostatistics*. Academic Press, London
- Knapp PA, Grissino-Mayer HD, Soule PT (2002): Climatic regionalization and the spatio-temporal occurrence of extreme single-year drought events (1500–1998) in the Interior Pacific Northwest, USA. *Quaternary Research* 58 (3) 226–233
- Laue H (2004): Automated Detection of Canola/Rapeseed Cultivation from Space. Dissertation, Universität Bremen
- Legere A (2005): Risks and consequences of gene flow from herbicide-resistant crops: Canola (*Brassica napus L*) as a case study. *Pest Management Science* 61, 192–200
- Lies M (1995): Insektizid-Belastung landwirtschaftlicher Einzugsgebiete. Erfassung und ökotoxikologische Bewertung. *Mitteilungen aus der Norddeutschen Naturschutzakademie* 6 (1) 16–36

- Lutman PJW, Berry K, Payne RW, Simpson E, Sweet JB, Champion GT, May MJ, Wightman P, Walker K, Lainsbury M (2005): Persistence of seeds from crops of conventional and herbicide tolerant oilseed rape (*Brassica napus*). Proceedings of the Royal Society of London B 272, 1909–1915
- Marvier M, van Acker RC (2005): Can crop transgenes be kept on a leash? *Frontiers in Ecology and the Environment* 3, 99–106
- Matheron G (1971): The theory of regionalized variables and its application. Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau
- Menzel A (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen. Forstliche Forschungsberichte München 164
- Menzel G (2006): Verbreitungsdynamik und Auskreuzungspotential von *Brassica napus* L. (Raps) im Großraum Bremen: Basiserhebung zum Monitoring von Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen. GCA-Verlag, Waabs
- Middelhoff U, Breckling B (2003): Modelling population interactions and dispersal of oilseed rape (*Brassica napus* L., *Brassicaceae*). *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 33, 273
- Miller JR, Turner MG, Smithwick EA, Dent CL, Stanley EH (2004): Spatial extrapolation. The science of predicting ecological patterns and processes. *Bioscience* 54, 310–320
- Mucha HJ (1994): Clusteranalyse (Automatische Klassifikation). In: Schröder W, Vetter L, Fränze O (Hrsg), *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. Braunschweig, Wiesbaden, S. 109–127
- Oke TR (1987): *Boundary layer climates*. Routledge, London and New York
- Olea RA (1999): *Geostatistics for engineers and earth scientists*. Kluwer Academic Publishers, Boston
- Pascher K, Macalka-Kamper S, Reiner H (2000): Vegetationsökologische und genetische Grundlagen für die Risikobeurteilung von Freisetzung von transgenem Raps und Vorschläge für ein Monitoring. Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen Sektion IX, Forschungsberichte 7/2000, Wien
- Pessel FD, Lecomte J, Emeriau V, Krouti M, Messean A, Gouyon PH (2001): Persistence of oilseed rape (*Brassica napus* L.) outside of cultivated fields. *Theoretical and Applied Genetics* 102, 841–846
- Pilson D, Prendeville HR (2004): Ecological effects of transgenic crops and the escape of transgenes into wild populations. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 35, 149–174
- Ramsay G, Thompson C, Squire G (2003): Quantifying landscape-scale gene flow in oilseed rape. Final Report of DEFRA Project RG0216, available at: http://www.defra.gov.uk/ENVIRONMENT/gm/research/pdf/epg_rg0216.pdf (May 10th 2006)
- Schlink S (1998): 10 Jahre Überdauerung von Rapssamen (*Brassica napus* L.) im Boden. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 11, 221–222
- Schraa M, Menz M, von Schenck W, Schaack D (2007): *ZMP-Marktbilanz Getreide, Ölsaaten, Futtermittel 2007*. Verlag ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH, Bonn
- Schröder W, Schmidt G (2006): A methodological approach of site selection and data analysis to provide model input data for an up-scaling of population effects of transgenic oilseed rape in Northern Germany. *Ecological Indicators* 6, 168–183
- Schröder W, Pesch R, Schmidt G (2003): Harmonization of Environmental Monitoring. Instruments for the Examination of Methodical Comparability and Spatial Representativity. *Gate to EHS* 3 (7) 1–13, DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/ehs2003.07.010>
- Schröder W, Schmidt G, Hasenclever J (2005): Korrelation meteorologischer und phänologischer Indikatoren des Klimawandels? *Statistische Analyse am Beispiel Baden-Württembergs*. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 17 (2) 94–105
- Schröder W, Schmidt G, Hasenclever J (2006a): Geostatistical analysis of data on air temperature and plant phenology from Baden-Württemberg (Germany) as a basis for regional scaled models of climate change. *Environmental Monitoring and Assessment* 130 (1–3) 27–43
- Schröder W, Schmidt G, Hornsmann I (2006b): Landschaftsökologische Raumgliederung Deutschlands. In: Fränze O, Müller F, Schröder W (Hrsg) (1997–2006), *Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung*. Landsberg am Lech, München, Zürich, Kap. V–1.9, 17. Erg.Lfg., S. 1–100
- Schröder W, Pesch R, Schmidt G (2007): Analysis of climate change affecting German forests by combination of meteorological and phenological data within a GIS environment. *The Scientific World* 7 S1, 84–89
- Shwartz M, Payne SMC, Restuccia JD, Ash AS (2001): Does it Matter How Small Geographic Areas are Constructed? Ward's Algorithm Versus the Plurality Rule. *Health Services and Outcomes Research Methodology* 2 (1) 5–18
- Siegmund A, Frankenberg P (1999): Klimatypen der Erde. *Geographische Rundschau* 51 (9) 494–499
- Spök A, Hofer H, Lehner P, Valenta R, Stirn S, Gaugitsch H (2005): Risk Assessment of GMO Products in the European Union. Toxicity assessment, allergenicity assessment and substantial equivalence in practice and proposals for improvement and standardisation. *Berichte* 253, Wien
- Squire GR, Brooks DR, Bohan DA, Champion GT, Daniels RE, Haughton AJ, Hawes C, Heard MS, Hill MO, May MJ, Osborne JL, Perry JN, Roy DB, Woiwod IP, Firbank LG (2003): On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358 (1439) 1779–1799
- Tiedje JMR, Colwell RL, Grossman YI, Hodson RE, Lenski RE, Mack RN, Regal PJ (1989): The planned introduction of genetically engineered organisms: Ecological considerations and recommendations. *Ecology* 70, 298–315
- Timmons AM, O'Brien ET, Charters YM, Dubbels SJ, Wilkinson MJ (1995): Assessing the risks of wind pollination from field of genetically modified *Brassica napus* ssp. *oleifera*. *Euphytica* 85, 417–423
- Turner MG, Dale VH, Gardner RH (1989): Predicting across scales. Theory development and testing. *Landscape Ecology* 3, 245–252
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 1 (2006): *Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO): Gentechnisch veränderte Pflanzen – Grundlagen und Strategien*. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/ DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- Ward JH (1963): Hierarchical grouping methods to optimise an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58, 236–244
- Watkinson AR, Freckleton RP, Robinson RA, Sutherland WJ (2000): Predictions of Biodiversity Response to Genetically Modified Herbicide-Tolerant Crops. *Science* 289, 1554–1557
- Webster R, Oliver MA (2001): *Geostatistics für environmental scientists*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, New York
- Xie Y, MacKinnon J, Li D (2004): Study on biogeographical divisions of China. *Biodiversity and Conservation* 13 (7) 1391–1417
- Zhou Y, Narumalani S, Waltman WJ, Waltman SW, Palecki MA (2003): A GIS-based spatial pattern analysis model for eco-region mapping and characterization. *International Journal of Geographical Information Science* 17 (5) 445–462

Eingegangen: 29. August 2007
 Akzeptiert: 29. November 2007
 OnlineFirst: 29. November 2007