

**Methoden der Künstlichen Intelligenz in
Radarmeteorologie und
Bodenerosionsforschung**

Dissertation zur Erlangung des

naturwissenschaftlichen Doktorgrades

der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Peter Löwe

aus

Erbach im Odenwald

Würzburg 2003

Eingereicht am: 21. Juli 2003

1. Gutachter der Dissertation: Professor Dr. D. Busche
2. Gutachter der Dissertation: Professor Dr. F. Puppe

1. Prüfer der mündlichen Prüfung: Professor Dr. D. Busche
2. Prüfer der mündlichen Prüfung: Professor Dr. F. Puppe

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2003
Gesamtnote: Ausgezeichnet (summa cum laude)

Meiner Familie und meinen Lehrern

Inhaltsverzeichnis

1	Fragestellung und Untersuchungsansatz	15
1.1	Fragenkomplexe	15
1.1.1	Infrastruktur	15
1.1.2	Umsetzungsprobleme	15
1.1.3	Analyse der Radardaten	16
2	Gliederung der Arbeit	17
3	Vorwort	19
3.1	Der Untersuchungsraum Südafrika	19
3.1.1	Regionale Abgrenzung	19
3.1.2	Topographie	19
3.1.3	Wetter und Klima	20
3.1.4	Böden und Landwirtschaft	21
3.1.5	Die historische Dimension	23
4	Erfassung der Bodenerosion	27
4.1	Erfassung von Bodenerosionsprozessen	27
4.1.1	Bodenerosionsdefinition	27
4.1.2	Erosionsformen	28
4.2	Bodenerosionsformeln	30
4.2.1	Universal Soil Loss Equation	30
4.2.2	Soil Loss Estimation Model for Southern Africa	32
4.3	Der Faktor Klima	33
4.3.1	Empirische Ansätze	35
4.3.2	Abgeleitete Erosivitäts-Indizes	36
4.3.3	Rainfall Erosivity Index	38
4.4	Zusammenfassung der Modellierungsansätze	41
4.5	Die Punktdatenproblematik	41
4.5.1	Messungen von Niederschlagsmengen	41
4.5.2	Punktmessungen und Erosionsdaten	42
4.5.3	REI-Interpolation	42
4.5.4	Flächendeckende Daten	43

5	Radarmeteorologie	45
5.1	Fehlerquellen	50
5.1.1	Geometrie-Probleme	50
5.1.2	Atmosphärische Effekte	51
5.1.3	Verarbeitungsprobleme	51
5.2	Radarmeteorologie in Südafrika	52
5.2.1	Historischer Abriss	52
5.2.2	Radarinfrastuktur und Verarbeitung	53
5.2.3	Datenarchivierung und -verbreitung	53
6	Datenaufbereitung	55
6.1	Freie Software	55
6.2	SAWS-Software: TITAN	56
6.2.1	Datenaufbereitung	57
6.3	Geographische Informations-Systeme	58
6.3.1	GRASS GIS	58
6.3.2	Darstellung thematischer Produkte	59
6.3.3	Verarbeitungsrelevante Faktoren	61
6.3.4	Das Datenbanksystem	64
6.4	Zusammenfassung	64
7	Südafrikanische Daten	67
7.1	Informationsinhalte	67
7.1.1	Probleme bei der Datenerhebung	67
7.1.2	Datenkomposit-Probleme	70
7.1.3	Die Folgeprodukt-Problematik	71
7.1.4	Datenvalidität für Endnutzer	76
7.1.5	Fazit	81
7.2	Möglichkeiten der Kalibration	81
7.3	Niederschlagswertgewinnung	88
7.4	Sturmzellenklassifikation	89
7.4.1	Hintergrund zur thematischen Interpretation	89
7.4.2	Lokale Wetter-Klassifikation	90
7.5	GIS-Umsetzung	94
7.5.1	Karten-Algebra	94
7.5.2	Wissensbasierte Ansätze	94
7.5.3	Probleme der Abbildung von Wissen	96
7.5.4	Zusammenfassung	97
8	Informationslogistik	99
8.1	Informationsnutzung	99
8.2	Informationslogistik als Lösungsansatz	100
8.3	Informationsverteilung	101
8.4	Entscheidungsunterstützung	102

8.4.1	Anwendungsbeispiele	103
8.4.2	Wissensbasierter räumlicher Decision Support	104
8.5	Umsetzungsmöglichkeiten	106
8.5.1	Informationsinhalte	106
8.5.2	Pull-Übertragung	111
8.5.3	Messaging Services	113
8.5.4	Wissenschaftliches Potential	120
9	Radarbasierte Erosivitätswerte	121
9.1	Anwendung des REI	121
9.1.1	Analyse der REI-Umsetzung	121
9.1.2	Wissensbasierte Umsetzung	123
9.1.3	Simulationsentwicklung	126
9.1.4	Zellagenten	127
9.2	Erweiterungsmöglichkeiten	128
10	Ergebnisse	131
10.1	Datenquellen und Resultate	131
10.2	Analyse der Ergebnisse	133
10.2.1	Raummuster	134
10.2.2	REI-Wertespektrum	135
10.2.3	Summenbildung	135
10.2.4	Entwicklungspotential	147
10.2.5	Abgleichmöglichkeiten	148
11	Zusammenfassung	151
11.1	Fragen und Antworten	152
11.1.1	Infrastrukturfragen	152
11.1.2	Aufgaben der Umsetzung	153
11.1.3	Analysemöglichkeiten	154
A	Datenbankstrukturen	157
B	GRASS GIS	163
B.1	MDV-Import	163
B.2	GRASS-Skripte	164
B.3	Modulliste	164
B.4	mdv.macro3	173
B.5	HTML-Kartenerstellung	178
B.6	CFAD-Diagramm	182
C	GRASSCAPE	185
C.1	GRASSCAPE Kommandos	185
C.2	GRASSCAPE Wissensbasis	189
C.3	Räumliche Suche mit GRASSCAPE	191

D r.infer-Wissensbasen	195
D.1 Storm Severity Structure	196
D.2 CONSTRAT	197
D.3 Niederschlagsmengen	197
E REI-Graphiken	199
F Radarnetzwerk Südafrika	201
F.1 MRL-5 Radar Spezifikation	203
F.2 Radarmeteorologische Klassifikationsansätze	204
F.2.1 CONSTRAT	204
F.2.2 Storm Severity Structure	204
G Die Geländehöhenproblematik	207
H Digitales Satellitenradio	217
I Beilage: GISIX-CDROM	221
J Glossar	223

Abbildungsverzeichnis

1	Niederschlagsereignis	14
4.1	SLEMSA-Struktur	32
4.2	Der Einfluss von Wasser auf Erosionsprozeß	35
4.3	EI30-Karte von Südafrika	39
5.1	Radarschema	46
5.2	Bethlehem C-Band Radar	48
6.1	Verfügbare Raumdaten im östlichen Freestate	60
6.2	Aster-DEM 4650	61
6.3	Datenverarbeitungsprozess	66
7.1	Sonnenstandseffekte: Beispiel Kapstadt	69
7.2	Sonnenstandseffekte: CFAD-Darstellung	70
7.3	Höhen- und Vertikalprofil von CAPPI-Daten	73
7.4	CAPPI-Distanzfunktion	74
7.5	Radar-Abdeckung	75
7.6	Radarcoverage	76
7.7	Vaal Catchment Niederschlagssumme vom 19.11.1998	77
7.8	Überregionale Niederschlagssumme des 19. Novembers 1998	80
7.9	Regionale Nutzung von Raumdaten	83
7.10	Regionale Nutzung von Fernerkundungsdaten	84
7.11	Niederschlagssammler	86
7.12	Übersicht über die CONSTRAT-Klassifikation	91
7.13	Übersicht über die SSS-Klassifikation	92
7.14	Umsetzung der ZR-Beziehung mit Kartenalgebra	93
8.1	Diagramm zur Erzeugung von WWW-Inhalten	109
8.2	Internetportal	112
8.3	Übersicht der XML/XSL-Transformation	115
8.4	D3 im XML/XSL-Transformationsprozess	116
8.5	Graphische Oberfläche von D3	116
8.6	Beispiel zur XML-HTML-Transformation	117
8.7	Informationswandlung	118

9.1	Datenstromstransformation für zelluläre Automaten	123
9.2	Zustandsautomat des Zellularen Agenten	126
9.3	Schema des Verarbeitungswegs	127
10.1	Reflektivitätsmaxima-Zeitreihe vom 15.12.1998	133
10.2	Zeitreihe der Simulationsergebnisse des 15.12.1998	134
10.3	Tagessummen des 15.12.1998 in Grauwerten	138
10.4	Tagessummen des 15.12.1998 in Farbdarstellung	139
10.5	Tagessummen des 15.12.1998 (NVIZ)	140
10.6	REI-Indexsumme des 15.12.1998 (NVIZ)	141
10.7	REI-Indexsumme des 15.12.1998 (NVIZ), vergrößert	142
10.8	REI-Indexsumme des 15.12.1998 (NVIZ), Detail	143
10.9	REI-Indexsumme des 15.12.1998 (NVIZ), Ausschnitt	144
10.10	Tagessummen des 16.12.1998	146
10.11	Tagessummen des 15.12.1998, CONSTRAT	148
11.1	Die Komponenten des Verarbeitungsprozesses	152
B.1	Detailansicht des MDV-Imports	165
B.2	Interaktives WWW-Kartenprodukt	182
B.3	CFAD-Diagramm des 30.12.2001 (5:03 Uhr)	183
B.4	CFAD-Diagramm des 30.12.2001 (11:52 Uhr)	184
B.5	CFAD-Diagramm des 30.12.2001 (23:32 Uhr)	184
E.1	Tagessummen des 19.11.1998	200
F.1	Das MRL5-Radar der südafrikanischen Water Research Com- mission.	203
G.1	Radarstationen-Terrainerfassungsgraph	209
G.2	Erfassungsgebiete der gruppierten Radarstationen	210
G.3	Radarstation 1: Topographie-Histogramm	211
G.4	Radarstation 2: Topographie-Histogramm	211
G.5	Radarstation 3: Topographie-Histogramm	211
G.6	Radarstation 4: Topographie-Histogramm	212
G.7	Radarstation 5: Topographie-Histogramm	212
G.8	Radarstation 6: Topographie-Histogramm	212
G.9	Radarstation 7: Topographie-Histogramm	213
G.10	Radarstation 8: Topographie-Histogramm	213
G.11	Radarstation 9: Topographie-Histogramm	213
G.12	Radarstation 10: Topographie-Histogramm	214
G.13	Radarstation 11: Topographie-Histogramm	214
G.14	Radarstation 12: Topographie-Histogramm	214
G.15	Radarstation 13: Topographie-Histogramm	215
G.16	Radarstation 14: Topographie-Histogramm	215

H.1	Infrastruktur des Worldspace Data Casting	219
H.2	Africa Learning Channel HTML-Seite	219
H.3	Worldspace ALC-Zeitplan	220

Tabellenverzeichnis

4.1	SLEMSA-Parameter	33
4.2	SLEMSA-Faktoren	34
6.1	Vergleich TITAN-GRASS	65
7.1	Schätztabelle Reflektivitäten/Niederschlag	88
7.2	SSS-Klassifikationsebenen	92
8.1	Push/Pull Übertragungswege	101
8.2	Informationsinfrastruktur in Südafrika	102
8.3	Vergleich Wissensmanagementkomponenten	105
8.4	XML-Textbeispiel für eine Sturmzelle	117
A.1	KEEP-Datenbanktabelle	159
A.2	STORM-Datenbanktabelle	160
A.3	CAPPI-Datenbanktabelle	161
C.1	SSS Wissensbasis in GRASSCAPE	191
C.2	Laufzeitverbesserung durch Quadtree-Einsatz	194
D.1	SSS-Wissensbasis für r.mapcalc	196
D.2	CONSTRAT-Wissensbasis für r.infer	197
D.3	Regenmengen-Wissensbasis für r.infer	197
F.1	Südafrikanische Wetterradarstationen	202
F.2	Technische Beschreibung des MRL-5-Radarsystems.	203



Abbildung 1: Durchgang einer Sturmzelle im Golden Gate National Park, Südafrika.

Kapitel 1

Fragestellung und Untersuchungsansatz

Diese Arbeit betrachtet die Frage, ob - und gegebenenfalls wie - Wetterrardaten zur Verbesserung von Bodenerosionsschätzungen genutzt werden können. Diese Betrachtung in Form realitätsnaher Regenerositätswerte wird für das Gebiet der Republik Südafrika ausgeführt. Aus diesem Ansatz ergeben sich mehrere Fragenkomplexe, die nacheinander untersucht werden müssen:

1.1 Fragenkomplexe

1.1.1 Infrastruktur

Welche Voraussetzungen müssen geschaffen werden, um Radardaten einsetzen zu können?

- Wie sind die Wetterradarinformationen beschaffen?
- Auf welchen Medien und in welchen Formaten sind sie verfügbar?
- Sind spezielle Softwarewerkzeuge zur Verarbeitung nötig?

1.1.2 Umsetzungsprobleme

Welche Optionen bestehen, die Radardaten im Erosionskontext, speziell für den niederschlagsgesteuerten Faktor Erosivität, zu nutzen? Entstehen Folgeprobleme aus diesem Ansatz?

- Wie kann eine GIS-Arbeitsumgebung zur Auswertung der Radardaten für Erosivitätswerte genutzt werden?
- Welche Umsetzung durch Geoinformationssysteme (GIS) zur Erstellung von Kartenprodukten bieten sich vor dem Hintergrund des Schwellenlandes Südafrika an?

- Welche zusätzlichen Raumdatenquellen sind für die Fragestellung sinnvoll und einsetzbar?

1.1.3 Fragen der Analyse der Radardaten

Sofern der Zugriff auf die Radardaten möglich ist und ein Arbeitsumfeld zur Umsetzung in Erosivitätswerte geschaffen wurde, müssen folgende Fragen erörtert werden:

- Welche erosionsrelevanten Informationen enthalten die Radardatensätze?
- Welche Resultate können erzeugt werden?
- Können die bekannten Verfahren zur Beschreibung des Erosivitätsfaktors unter Verwendung des Informationsgehalts von Wetterradardaten sinnvolle Ergebnisse liefern?
- Wie kann ihre Qualität im Vergleich zu den sonst verfügbaren Datenquellen eingestuft werden?
- Kommen durch den neuen Ansatz zusätzliche Fehler- und Störquellen hinzu?
- Ergeben sich neue Möglichkeiten für die Forschung und wirtschaftliche Nutzung?

Kapitel 2

Gliederung der Arbeit

Hier wird eine Übersicht über die Gliederung der Arbeit und die Inhalte der einzelnen Kapitel gegeben.

Die Situation in Südafrika Das Vorwort (Kapitel 3) gibt eine Einführung in die naturräumliche Ausstattung Südafrikas und die Entwicklung der Bodenerosionssituation unter Berücksichtigung anthropogener Einwirkungen.

Möglichkeiten zur Erfassung von Bodenerosionsprozessen in Südafrika

In Kapitel 4 werden zunächst unterschiedliche Formen von Bodenerosion vorgestellt und Möglichkeiten zur Quantifizierung der durch die Prozesse bewegten Sedimentmengen vorgestellt. Danach wird auf spezialisierte Ansätze für das südliche Afrika eingegangen und die verfügbaren Datenquellen betrachtet, aus denen Aussagen über die Bodenerosion gewonnen werden.

Radarmeteorologie Dieses Kapitel 5 bildet den Ausgangspunkt für die Einführung von Wetterradardaten als sich anbietende Alternative. Auf diese wird in Folge detailliert eingegangen und deren Beschränkungen werden aufgezeigt. Danach wird die Situation in Südafrika bezüglich der vorhandenen Wetterradar-Infrastruktur und der aufgezeichneten Datenprodukte dargestellt.

Datenaufbereitung Das folgende Kapitel 6 führt Geographische Informationssysteme als generisches Werkzeug zur Nutzung der Wetterradardaten im Vergleich zu spezieller Radarsoftware ein. Dabei wird auf die Verfügbarkeit eines freien Softwareproduktes, *GRASS GIS*, eingegangen und dessen Anwendungspotential für Wetterradardaten beleuchtet.

Nutzung der südafrikanischen Reflektivitätsdaten Nachdem die Grundlagen der Erzeugung und Verarbeitung von Wetterradardaten in GIS gelegt worden sind, erfolgt die Analyse der Daten.

Es werden zwei Klassifizierungsalgorithmen des südafrikanischen Wetterdienstes (South African Weather Service, SAWS) vorgestellt. Dabei werden sowohl die originalen Formulierungen, imperativ-programmierte, Rasterkarten-Algebra-basierte Umsetzungen und regelbasierte Versionen gezeigt. Auch wird kritisch auf die Leistungsfähigkeit dieser Ansätze vor dem Hintergrund der vorhandenen Radarinfrastruktur eingegangen.

Nunmehr werden die Möglichkeiten von GRASS GIS zur wissensbasierten Klassifikation kritisch erörtert, um daraufhin eine neue Alternative dazu vorzustellen.

Effektive Verbreitung und Nutzung von Radardatenprodukten

Im Anschluss, in Kapitel 8, erfolgt die Betrachtung von Methoden der Informationslogistik und von Entscheidungsunterstützungssystemen zur optimierten Nutzung von Wetterradardaten.

Es wird auf die Transformation von Radardaten - von thematisch klassifizierten Karten bis hin zu Produkten für den Endanwender - eingegangen, außerdem werden Verbreitungswege und -formate beleuchtet. Den Schluss des Kapitels bildet die Vorstellung eines automatisierten Systems zur Erzeugung eines webbasierten Informationssystems mit interaktiven thematischen Kartendarstellungen von Sturmzellen.

Erzeugung von Erosivitätsindizes aus Wetterdaten Das folgende Kapitel 9 kehrt zum Ausgangspunkt, der Beschäftigung mit Erosionsparametern, zurück. Stellvertretend für die weiteren vorgestellten Erosions- und Erosivitätsformeln wird der REI-Ansatz in Form von zellulären Automaten eingeführt. Dieses Simulationssystem für Erosionsparameter aus Wetterradardaten wird mit eben diesen beschickt und die Ergebnisse werden diskutiert.

Ergebnisse Die in der Simulationsumgebung erzeugten Daten werden an Beispielen in Kartenform vorgestellt (Kapitel 10) und ihre Inhalte diskutiert. Zusätzlich wird auf Phänomene und Effekte aufmerksam gemacht, die erst bei der Betrachtung von Datenreihen ersichtlich werden.

Ausblick Ausgehend von den umgesetzten Ansätzen werden Optionen für die weitere Arbeit erörtert.

Zusammenfassung Analog zu dieser Übersicht werden am Ende der Arbeit (Kapitel 11) die zu Anfang gestellten Fragen in der Rückschau betrachtet und zusammenfassend beantwortet.

Anhänge In den Anhängen befindet sich eine nähere Auflistung und Beschreibung der verarbeitungsrelevanten Fakten und Algorithmen.

Kapitel 3

Vorwort: Die Situation in Südafrika

Bevor auf die in dieser Arbeit diskutierten Fragen eingegangen wird, erfolgt ein Überblick über die Situation und Entwicklung der Bodenerosionsproblematik in Südafrika.

3.1 Südafrika und die lokale Bodenerosionssituation

3.1.1 Regionale Abgrenzung

Der Untersuchungsraum dieser Arbeit ist die Republik Südafrika. Sie beschließt den afrikanischen Kontinent nach Süden von 22° bis 35° südlicher Breite und 17° bis 33° östlicher Länge. Der vom südafrikanischen Staatsgebiet umschlossene Binnenstaat Lesotho und das teilumschlossene Swasiland werden nicht gesondert behandelt.

Astronomisch kann der Wendekreis des Steinbocks ($23.5^{\circ}S$) als Annäherung der nördlichen Grenze des Untersuchungsgebietes dienen; lediglich ein kleiner Abschnitt Südafrikas an seiner Nordgrenze zu Zimbabwe, Namibia und Mosambik erstreckt sich weiter in die (astronomischen) Tropen. Damit kann der Hauptteil des Landes als subtropisch bezeichnet werden. Die südlichen Küstengebiete erstrecken sich bis in temperierte Zonen, wobei das Klima der Südküste (teilweise) mediterran geprägt ist.

3.1.2 Topographie

Die Topographie des Landes wird durch den Gegensatz zwischen dem zentralen Hochland ('Highveld') und den Küstenebenen charakterisiert. Die mittlere Höhe der Hochebene variiert von ca. 500m ü.NN im Westen bis zu über 1000m ü.NN im Osten. Die höchsten Lagen finden sich im Königreich Le-

sotho mit über 3000 m. Die Trennung der beiden Landschaftsformen bildet ein ausgeprägtes Randschwelligebirge (Leser 1980).

3.1.3 Wetter und Klima

Das Wettergeschehen und Klima Südafrikas müssen in Relation zur Lage zu den globalen Zirkulationsmustern gesehen werden (Vogel 2000). Ein Gürtel absinkender Luftmassen der Hadley-Zellen dominiert das Wettergeschehen für den größten Teil des Jahres. Das Klima des Binnenlandes wird deswegen durch Hochdruckgebiete und das Eindringen von Tropikluftmassen aus Nordosten geprägt. Wettersysteme wie Kaltfronten, die aus Westen herandrängen, sowie tropische Systeme aus östlicher Richtung haben starken Einfluß auf das landesweite Wettergeschehen.

Das Landesinnere Die Temperaturen des Landesinneren sind stark vom Hochdruckgebiet über der Region abhängig. Absinkende Luftmassen bringen für einen großen Teil des Jahres Schönwetterlagen. Jedoch verändern die Antizyklonen ihre Intensität und Position mit den Jahreszeiten. Diese ruhige, wolkenfreie Witterung wird von durchziehenden Kaltfronten oder dem Einfluss von warmfeuchter Tropikluft unterbrochen, was zur Entstehung von Gewitterstürmen führt. Im Landesinneren existiert ein Ost-West-Trend des Niederschlags: Nordöstliche Luftmassen beeinflussen das östliche Highveld und bringen Jahresniederschlagssummen von 800mm mit einem Sommermaximum. Nach Westen sinken die Jahressummen auf unter 125mm und führen zu ariden Bedingungen in der Kalahari. Während der warmen Sommermonate kommt es im Hochland zu intensiven Gewittern und teilweise auch zu Hagel.

Küstensaum Das generell ozeanische Küstenklima hängt im Westen vom Atlantik, im Osten vom Indik und weiterhin von den Windverhältnissen ab. An der Ostküste dominiert der warme Agulhas-Strom, der Äquatorwasser bis zu den Kap-Provinzen leitet. Dagegen steht die Westküste unter dem Einfluss des Benguela-Stroms, der kaltes Wasser aus der Antarktis mit sich führt. An der Südküste vermischen sich beide Strömungen: das dortige Wetter hängt von der Schwankung der Meerestemperatur ab. Der Einfluß der kontinentalen Hochdruckgebiete aus dem Landesinneren kann sich bis in die Küstengebiete ausdehnen, was zu föhnartigen Bergwinden führt. Die Küsten werden auch regelmäßig von Frontensystemen der gemäßigten westlichen Tiefdruckgebiete beeinflusst, die, nordwärts über die Region ziehend, kühles Wetter und erhöhte Niederschläge mit sich bringen. Somit können die Küstengebiete durch starke Wetterumschwünge von heiss-trockenen Bergwinden bis zu kaltfeuchten Frontendurchgängen charakterisiert werden. Orographische Hindernisse wie die Kapberge und das Eskarpment führen zu

starken Niederschlägen in diesen Gebieten¹. Der Jahresgang der Niederschläge entlang der Küste variiert von West nach Ost: Die Kap-Halbinsel hat ein starkes Winterregen-Maximum, während an der Südküste die Niederschläge über das gesamte Jahr verteilt sind und das Ost-Kap wie auch Natal zu einem Sommerregenmaximum tendieren: im Osten ist es im Juni und Juli meist durchgängig trocken, Starkniederschläge sind im Frühling und Herbst jedoch häufiger. In den Drakensbergen kann es auch zu Schneefall kommen (Vogel 2000).

3.1.4 Böden und Landwirtschaft

Das landwirtschaftliche Potential Südafrikas ist gering und wird von ökologischen Faktoren begrenzt: lediglich im östlichen Drittel Südafrikas (mit Ausnahme der Südküste) liegt der mittlere Jahresniederschlag bei über 400 mm. Nur dort übersteigt die Biomassen-Produktion $5 t/km^2/a$, wobei die verfügbare Wassermenge der begrenzende Faktor ist (Laker 2000; Leser 1980). Im Westen Südafrikas, abgesehen von Teilen der Küstenregionen und der Küstenberge², ist nur regional begrenzt Schafzucht möglich. Große Gebiete bleiben jedoch landwirtschaftlich ungenutzt (Laker 2000).

Die Böden des Landes tragen ihren Teil zu dieser Situation bei: Das größte Problem ist die große Fläche, die sowohl wegen hoher Erodibilität als auch geringmächtiger Bodentiefe nicht nutzbar ist und sich auf Regionen mit mehr als 500mm Regen pro Jahr erstreckt. Dieser Wert für den mittleren Jahresniederschlag wird generell als ausreichend für auf Niederschläge angewiesene Landwirtschaft angesetzt. In einigen Regionen wie der Ostkap-Provinz sind jedoch 600mm das Minimum aufgrund der geringmächtigen Böden und der geringen saisonalen Verteilung des Niederschlages (Laker 2000). Das häufige Vorkommen steiler Hanglagen in Gebieten mit stärkeren Niederschlägen erschwert die Situation. Nur 11 Prozent der südafrikanischen Landfläche ist bewirtschaftbar (Walton 1994), wovon ein großer Teil aus marginalen Regionen für Trockenlandbau besteht.

Die niedrigen Getreideerträge des Landes beruhen hauptsächlich auf der schlechten naturräumlichen Ausstattung durch Böden und Klima. Nur drei Prozent des Landes werden mit hohem Anbaupotential bewertet (Fox 2000). Ein nicht unbeträchtlicher Teil dieses Gebietes liegt in ehemaligen Homelands, wo es aufgrund traditioneller Landwirtschaftsformen nur suboptimal genutzt wird. Auch versiegeln urbane und industrielle Gebiete große Teile des prinzipiell besten Farmlandes. Dieser Prozess dauert aufgrund von Migrationsbewegungen durch die veränderte politische Situation nach 1990 an. Im Highveld der Provinz Mpumalanga fallen die attraktivsten landwirtschaftlichen Regionen mit der größten Konzentration von Kohle-Tagebauten

¹Die höchsten Jahresniederschläge finden sich in den Hex Rivier Bergen der Provinz Westkap (lokal $> 3000mm$) und dem Drakensberg in Natal ($> 1500mm$) (Vogel 2000).

²Sonderkultur: Weinbau

zusammen (Laker 2000). Wenn von 0.4 ha Ackerland pro Person ausgegangen wird, hat Südafrika eine Tragfähigkeit von 35 Millionen Einwohnern, was schon durch die derzeitige Bevölkerung übertroffen wird³. Das Bevölkerungswachstum trägt dazu bei, dass das Missverhältnis weiter wächst.

Sedimenttransport und -verluste Der durchschnittliche Sedimentverlust über die gesamte Landfläche von Südafrika wird mit 3 - 3.5t/ha/a (Tainton 1999) angegeben, wobei die natürliche Erosion auf 2t/ha/a geschätzt wird. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verlust von 10 Tonnen pro Person und Jahr. Im Vergleich dazu liegt der durchschnittliche weltweite Verlustwert bei 0.5t/Person/a. Der Bodenabtrag ist dabei nicht gleichmäßig über das Land verteilt, sondern stark auf die feuchtere Osthälfte mit seiner höheren Bevölkerungsdichte konzentriert (Tainton 1999). Es kann abgeschätzt werden, dass der auftretende Sedimentverlust die Bodenbildungsrate weit übersteigt. Dies hat zum Schluss geführt, dass Bodenerosion als das größte Umweltproblem Südafrikas einzuschätzen ist ((Beckedahl 1998) nennt Vertster, et al., 1994).

Im Jahr 1989 beliefen sich die Bodenverluste auf derart hohe Werte, dass pro Tonne an produziertem Mais, Weizen, Zucker oder anderer Ackerfrüchte der Verlust von 20 Tonnen Boden gekommen ist (Huntley u. a. 1989).

Die Sedimentfrachten der Flüsse werden in RSA vom Department of Water Affairs and Forestry und dessen Vorgängerorganisationen seit 1918 aufgezeichnet (Morgan 1995). Damit lassen sich auch langfristige Aussagen über den Sedimentverlust machen. Der größte Verlust von Bodenmaterial erfolgte im frühen zwanzigsten Jahrhundert und wurde als Sedimentfracht in die See gespült (Huntley u. a. 1989). Als Beispiel wird dabei die Sedimentfracht des Orange Rivers mit 120 Millionen Tonnen 1920 genannt, die bis 1935 auf 35 Millionen Tonnen gefallen war. Seit den 1960er Jahren sind die Verluste weiter bis auf Werte unter 20 Millionen Tonnen in den 1980ern bedingt durch Baumaßnahmen wie die Errichtung der H.F. Verwoerd und P.K. le Roux Dämme gesunken. Zwar wurde das Symptom, der Sedimenttransport in das Meer, unterbunden, jedoch wurde die Ursache, die Bodenerosion, nicht gestoppt.

Als extremes Beispiel gilt der Damm am Caledon River: Er wurde 1973 mit einem Fassungsvermögen von 114 Millionen Kubikmetern fertig gestellt und sollte die Wasserversorgung der Stadt Bloemfontein sichern. Innerhalb von zwanzig Jahren war das Fassungsvermögen 1993 auf 17 Millionen Kubikmeter gefallen; die eingebrachten Sedimente hatten damit 85% des Dammvolumens gefüllt (Laker 2000).

Weitere negative Effekte der Bodenerosion Der erhöhte Oberflächenabfluß in schon erodierten Einzugsgebieten führt zu häufigeren und

³(Hannes und van der Merwe 2000) nennt 38 Millionen Einwohner für das Jahr 1996

stärkeren Sturmfluten ('Flashfloods'), deren Rolle als herausragende Ereignisse zunehmend der Normalität weicht. Dadurch kann es auch zu einer Bedrohung der urbanen Bevölkerung sowie der Industrie kommen, die von verlässlicher und ausreichender Wasserlieferung abhängen. Die Verluste an Stickstoff, Phosphor und Potasche von südafrikanischen Böden aufgrund von fluvialer Erosion beliefen sich auf 365 Millionen Rand pro Jahr in 1985er Währung ((Laker 2000) zitiert Van der Merwe 1995, S. 357): die Bodenverluste entziehen der Wirtschaft Kapital für Investitionen.

3.1.5 Die historische Dimension

Die heutige Republik Südafrika ist das vorläufige Endprodukt eines vierhundert Jahre anhaltenden Entwicklungsprozesses und der Interaktion mehrerer stark unterschiedlicher Kulturkreise und Wirtschaftssysteme. Die abgelaufenen und noch laufenden Bodenerosionsprozesse lassen sich nicht ausschließlich durch natürliche Prozesse und Faktoren erklären. Gerade im 20. Jahrhundert wurden sie sowohl durch technischen Fortschritt als auch durch wandelndes Umweltverständnis und Ideologie stark beeinflusst.

Es folgt nun ein Überblick über die anthropogene Beeinflussung des Erosionsgeschehens seit Gründung der ersten Kapkolonie 1657 durch van Riebeeck für die Niederländische Vereenigde Oost-Indische Compagnie (VOC) bis in die jüngste Vergangenheit (Tainton 1999; Huntley u. a. 1989).

1657 - ca. 1850 Die Landwirtschaft dient der Eigenbedarfsdeckung, da es kaum vorhandene Märkte und Kommunikationsmittel gibt. Weidewirtschaft wird als Wanderwirtschaft betrieben: durch Migration werden neue Weidegründe erschlossen. Das hochwertige Land wird von den einwandernden Europäern als brachliegende und frei verfügbare Ressource wahrgenommen. Die agrikulturellen Voraussetzungen sind gut.

Bonanza und Bodenerosion Die *Ausbeutung* der Ressourcen erfolgt erst ab 1875 im Anschluss an Gold- und Mineralfunde: Die Entwicklung verläuft ungeplant und bedarfsorientiert. Die Inlandsmärkte und Kommunikationswege entwickeln sich entsprechend der wachsenden Immigrantenzahlen.

Viele Leute ohne landwirtschaftliches Wissen werden als Landwirte und Viehzüchter tätig. In diesem Prozess kommt es zu Fehleinschätzungen der Ressourcen, fehlgeleiteter Weidewirtschaft und Anbauformen. Insgesamt führt dies zu einer großflächigen Degradation der landwirtschaftlichen Ressourcen.

Mit dem Anwachsen der Bevölkerungszahl steigt der Bodenpreis und Grundbesitz wird erstmals eine begrenzte Ressource. Dies führt nach dem Prinzip der Erbteilung zur Stückelung der Anwesen in immer kleinere Parzellen bis unter die Rentabilitätsgrenze. Dabei ist der allgemeine Degradationsprozess an das Wachstum der Märkte und Kommunikationswege gekoppelt.

Boden wird dabei (noch) als unerschöpfliche Ressource wahrgenommen. Als Ergebnis nimmt die Bodenerosion größere Ausmaße an. Die Hauptursache hierfür liegt im mangelnden Wissen über sinnvolle Landnutzungsmethoden im Weide-Ökosystem: Beratungsstellen für Landwirte werden erst 1925 eingerichtet (Tainton 1999).

Der Fencing Act und seine Folgen Ein weiterer Faktor der die Übernutzung verstärkt, ist der 'Fencing Act' (Act No. 17) von 1912 ((Tainton 1999) zitiert Roux und Oppermann, 1986).

Aufgrund dieses Reports werden Einzäunungsmaßnahmen für Umtriebsweide im großen Stil durchgeführt ('Kamps') (Leser 1980). Die Tierbestände erhöhten sich bis zu einem Maximalbestand von 40,2 Millionen im Jahr 1933. Diese Menge übersteigt definitiv die vertretbaren Bestückungszahlen für das Landwirtschaftssystem dieser Ära. Es wird angenommen, dass große Gebiete des südafrikanischen Velds noch immer unter der Degradation aus dieser Epoche leiden (Tainton 1999).

Vor der weiträumigen Einzäunung von 'Kamps' und der damit verbundenen Zunahme von Wasserstellen waren die Viehbestände oft auf die Flußniederungen konzentriert. Dies führte zu Schädigungen der Böden und der Vegetation der sensitiven Gebiete und hatte extensive Flächen- und Grabenerosion zur Folge. Die Einzäunungsmaßnahmen übertrugen dieses Problem durch die Verteilung des Viehbestandes auf ein größeres Areal. Das Problem der überhöhten Bestände ('overstocking') wird seit 1969 mit dem 'Stock Reduction Scheme' angegangen. Dies führte zu Bestandsreduktionen in ariden und semiariden Gebieten. In jüngerer Zeit hat sich die National Grazing Strategy (1985) mit dem gleichen Problem beschäftigt. Dabei wird dem weitem Themenkreis Bodenerosion mit seinen sozialen, finanziellen, technischen und schulischen Aspekten breiter Raum eingeräumt (Tainton 1999).

Erzwungene Migrationen nach 1950 Zu Beginn der 1950er Jahre lebte noch ein Drittel der schwarzen Südafrikaner auf den von weißen Südafrikanern geführten Farmbetrieben, die wiederum 80% der Landesfläche ausmachten (Klugmann 1991). Am Ende der 1960er begann die Zahl der Arbeitsplätze in der Landwirtschaft abzunehmen. Der Apartheid-Staat reagierte mit Migrationsbeschränkungen; Das freigesetzte Personal konnte sich nicht in den Städten ansiedeln, sondern wurde in die sogenannten *Homelands* umgesiedelt. Zwischen 1950 und 1980 wurden 1.4 Millionen Menschen von den Farmen entfernt, und weitere 90 000 mussten aus den Siedlungen in die Homelands migrieren ((Klugmann 1991) nennt Simkins 1983, S.59-61, zitiert nach Wilson und Ramphele, 1989, S.223)).

Der Einfluß der Apartheid-Doktrin auf die Landnutzung Die Fläche nutzbaren Landes lag in der späten Apartheidphase 1989 bei 101

Millionen ha (Huntley u. a. 1989). Seinerzeit war die Diskrepanz der Besitzverhältnisse besonders ausgeprägt: Das 'weiße' Südafrika besaß 85.4 Millionen der 101 Millionen ha Gesamtfläche, wogegen die 'Homelands' lediglich 15.1 ha besaßen. Dabei waren von den 85.4 Millionen ha 14.3 Millionen ha nutzbar, während in den Homelands von 15.1 Millionen ha lediglich 2.3 Millionen ha blieben. Zur Einordnung dieser Verhältnisse muß die Bevölkerungsverteilung betrachtet werden: Von der Gesamtbevölkerung des Raums Südafrika (33 Millionen) wurden 14 Millionen in den Homelands angesiedelt, womit 42% der Bevölkerung 12% des Landes bewohnten. In den Homelands standen 1989 etwa 0.16 ha nutzbaren Ackerlandes pro Person zur Verfügung, wogegen es im restlichen Südafrika 0.51 Hektar waren. Der weltweite Standardwert liegt im Vergleich bei 0.4 Hektar.

Das ehemalige Homeland QuaQua in der Provinz Freestate wird als extremes, jedoch nicht als einziges Beispiel des explosionsartigen Bevölkerungsanstiegs genannt. Seine Bevölkerung wurde 1970 auf 24 000 Einwohner geschätzt, was einer Verfünfachung seit dem ersten Weltkrieg gleichkam. Schon damals war QuaQua von einer Regierungskommission als überbevölkert bezeichnet worden (Klugmann 1991). In der Mitte der 1980er war die Bevölkerung QuaQuas auf 500 000 Menschen gestiegen ((Klugmann 1991) zitiert Wilson u. Ramphela 1989, S.223).

Für Familien in den Homelands, die Zugang zu Ackerland hatten, standen etwa zwei Hektar pro Familie zur Verfügung. Die extrem hohe Bevölkerungsdichte und die Ungleichverteilung des Grundbesitzes führten zur Bewirtschaftung marginaler, oftmals hochgradig erosionsgefährdeter Gebiete. Somit kann das großflächige Auftreten von 'Dongas'⁴ in den Homelands nicht nur mit unsachgemäßen Landbaumethoden erklärt werden, die ebenfalls auf die politisch motivierten sozialen Umstände und Siedlungsmuster zurückzuführen sind.⁵ Ein anderes, weiter bestehendes Problem ist die Viehhaltung in den ehemaligen Homelands. In der 'Transkei' wurden seinerzeit jährlich lediglich 5% der Herdenbestände geschlachtet, im Gegensatz zu 20 - 25% bei kommerzieller Landwirtschaft im 'weißen' Südafrika, wobei die Bestockung in der Transkei die vertretbare Bestockungsrate um das Doppelte überstieg. Die Situation ist in der heutigen Provinz KwaZulu-Natal ähnlich: Zwischen 1957 und 1973 kamen auf jedes geschlachtete Rind durchschnittlich zwei, die eines natürlichen Todes starben. Erschwerend wirken sich traditionelle kulturelle Wertvorstellungen aus, da Rinder als Statussymbol und Anlagekapital gesehen werden⁶.

⁴Grabenerosion

⁵Die Erfolge ideologisch unbehinderter traditionell-afrikanischer Landwirtschaft sind für das Ostkap und dem westlichen Transvaal in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts belegt, bevor schwarze Landwirte durch den Glen Grey Act (1894) auf zehn Acres Anbaufläche beschränkt wurden (Huntley u. a. 1989).

⁶Die nationale Herde des Homelands 'KwaZulu' hatte 1989 mit einem Bestand von 1,7 Millionen Tieren einen geringfügig höheren Wert als die gesamte zuckerverarbeitende

Zusammenfassung der Faktoren für Bodenerosion in RSA Die generell hohen Bodenverlustraten in Südafrika können mehreren Faktoren zugeschrieben werden, wobei die folgenden die wichtigsten zu sein scheinen (Tainton 1999):

1. Oft für die Nutzungsform unpassendes Terrain in steilen Hanglagen,
2. verbreitet hoch erodierbare und geringmächtige Böden,
3. (sehr) hohe Regenintensitäten über großen Teilen der Sommerregenregion,
4. fehlendes Bewusstsein für die Erhaltung der Ressourcen,
5. die Degradation der Vegetationsbedeckung und -zusammensetzung aufgrund von Überstockung und schlechter Weidenutzung,
6. komplexe ökonomische Faktoren, die aus der Wettbewerbssituation in der Landwirtschaft entstehen,
7. unrealistisch hohe Bodenpreise, die zu Übernutzung führen,
8. unkontrollierte Anwendung von Bränden in dafür ungeeigneten Gebieten,
9. verfehlte Ressourcenerhaltungspolitik und
10. staatliche Subventionierungsmaßnahmen der Landwirtschaft.

Die Nutzbarkeit des Naturraums Südafrika für den Menschen wird durch den Minimumfaktor Wasser beschränkt. Jedoch ist die heutige Nutzungssituation vor dem Hintergrund von Fehlentwicklungen der letzten Jahrhunderte bis in die jüngste Zeit zu sehen. Die derzeit ablaufenden Bodenverluste durch Erosionsprozesse sind in ihrer Höhe, gemessen an der zu versorgenden Bevölkerungszahl, dramatisch. Deswegen ist die möglichst genaue Erfassung der die Erosionsprozesse auslösenden und steuernden Faktoren sowie ihre präzise räumliche Lokalisierung für die Versorgung der südafrikanischen Bevölkerung äußerst relevant.

Ein Beispiel für die bisherigen Kartierungsansätze von Erosionsparametern (EI30-Index) wird in Abbildung 4.3 gegeben.

Kapitel 4

Möglichkeiten zur Erfassung von Bodenerosionsprozessen in Südafrika

4.1 Erfassung von Bodenerosionsprozessen

Die Erfassung und Reduzierung der Bodensubstratverluste sind für die südafrikanische Gesellschaft von großer Wichtigkeit. Nachdem die Ursachen, Symptome und Prozesse dargestellt worden sind, wird nun auf Möglichkeiten zur Quantifizierung eingegangen.

4.1.1 Definition: Bodenerosion

Begriffklärung

*Bodenerosion*¹ ist der Prozess der Bodenzerstörung, ein eigentlich natürlicher Vorgang, der durch die anthropogene Nutzung verstärkt oder erst ausgelöst wird. Da die Krume zuerst von der Erosion erfasst wird und diese meist der ökologisch günstigste Teil des Bodens ist, kann Bodenerosion die Ertragfähigkeit der Böden erheblich senken (Scheffer und Schachtschabel 1992).

Physikalischer Prozeß Der unmittelbare Erosionsprozeß setzt sich aus zwei Teilaspekten zusammen: in einem ersten Schritt werden Bodenaggregate durch die kinetische Energie der fallenden Regentropfen zerschlagen (Plantschwirkung/'Splash') und Feinmaterial gebildet, das im zweiten Schritt im Oberflächenwasser abtransportiert wird

¹Der Begriff stammt aus den 1930er Jahren und wurde von Pencks (1894) Verwendung des Begriffs 'Erosion' abgeleitet, um die Verlagerung von Festmaterial durch fluviale Prozesse zu beschreiben. Seine moderne Bedeutung umfasst jedoch die Zerstörung von Böden durch das Einwirken von Wind und Wasser ((Beckedahl 1998) zitiert Zachar,1982).

(Scheffer und Schachtschabel 1992). Dabei übertrifft die kinetische Energie der Regentropfen die kinetische Energie des anschließenden Abflusses bei weitem (Hudson 1995). Die Transportkapazität des Abflusses wird allerdings durch das weitere Auftreffen von Regentropfen verstärkt (Reining 1992) zitiert Smith und Wischmeier 1962).

Wenn der Boden mit Wasser gesättigt ist oder die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate übertrifft, kommt es zu Oberflächenabfluss. Auch tritt durch Bildung des neuen transportierbaren Lockermaterials oft ein Versiegelungseffekt des Oberbodens auf, bei dem Ton und Schluff die Bodenporen verschlammern (Scheffer und Schachtschabel 1992). Die erstgenannte Form wird als gesättigter Oberflächenabfluß bezeichnet, die zweite als Horton-Oberflächenabfluß (Seuffert u. a. 1999). Oberflächenabfluß kann weiter in linearen und laminaren Abfluß unterteilt werden.

Erosivität Unter *Erosivität* wird die Fähigkeit des Niederschlags zur Verursachung von Bodenerosion verstanden (Reining 1992). Sie ist eine Funktion der physikalischen Eigenschaften des Niederschlags (Hudson 1995), wobei die wichtigsten Eigenschaften die kinetische Energie der Regentropfen und des 'shear stress' des Oberflächenabflusses sind ((Reining 1992) nennt Jansson, 1982).

Die kinetische Energie korreliert stark mit der Regenmenge ((Reining 1992) nennt Foster et al., 1982b)².

Die Energiegleichung

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.1)$$

besagt, dass die Energie einer Masse m proportional zum Quadrat ihrer Geschwindigkeit ist: Mit der Zunahme der Niederschlagsintensität (Menge der auftreffenden Tropfen pro Zeiteinheit) steigt die mittlere Tropfengröße. Deswegen besteht eine enge Korrelation zwischen kinetischer Energie und Niederschlagsintensität (Hudson 1995).

Im Folgenden wird abweichend von der in der Physik üblichen Benennung der kinetischen Energie als E_{kin} die in der Bodenerosionsforschung traditionell angewandte Schreibweise als EK verwendet.

4.1.2 Erosionsformen

Die Effekte der Erosionsprozesse äußern sich im Gelände in unterschiedlichen Negativformen:

²Weiterhin kann die aktuell gefallene Regenmenge von den Messungen von Regenmessern abweichen, je nach dem ob die Regentropfen auf ebenen Grund oder einen Hang treffen. Dies bedeutet, dass die Regenmenge pro Fläche auch vom Winkel abhängt, in dem die Regentropfen auf den Boden treffen (Reining 1992).

Flächenerosion Um Flächenerosion handelt es sich beim Abtrag dünner Bodenlagen über die gesamte anstehende Bodenoberfläche. Regentropfen, Splash- und Oberflächenabfluss lösen diese aus, wobei Splash den Hauptteil der Ablösungsenergie liefert und die Abflußmenge die Transportkapazität bestimmt. Flächenerosion ist im Gelände schwer zu erkennen. Das erste Anzeichen ist das Durchscheinen der Färbung unterer Bodenhorizonte, wenn diese durch die landwirtschaftliche Nutzung erreicht und durchmischt werden. Dies tritt zumeist auf den oberen Abschnitten konvex geformter Hänge auf (Flörchinger 1998).

Rillenerosion Bei Rillen handelt es sich um kleine kanalartige Hohlformen, die durch Überpflügen ausgelöscht werden können. Rillenerosion tritt auf, wenn sich der Abfluß zu Gerinnen sammelt. Damit steigt die Erosivität des Abflusses, da nun Material verstärkt an den Rändern und im Bett der Gerinne abgeführt wird. Rillen treten vermehrt zwischen Pflanzungsreihen und entlang von Pflugspuren auf. Die Anbaunutzung verflacht die Bodenoberfläche, womit der Langzeiteffekt der Rillenerosion ähnlich dem der Flächenerosion ist (Scheffer und Schachtschabel 1992; Meiklejohn 2000).

Graben-Erosion Hierbei handelt es sich um ausgedehnte Hohlformen, meist in sehr leicht erodierbaren Böden, die Zehnermeter erreichen können. Hohlformen, die nicht mehr durch Pflügen verschlossen werden können, werden international als 'Gullies' bezeichnet, der südafrikanische Lokalname des Phänomens ist 'Donga'.

Tunnelerosion (Piping) Die Verfrachtung von Material durch Wasser *unterhalb* der Bodenoberfläche kann von diversen Prozessen ausgelöst werden ((Beckedahl 1998) nennt Jones 1990, S.15). Generell handelt es sich um die Schaffung unterirdischer Leitungsbahnen durch den Abtransport der Lehm- und Tonfraktion im klastischen Material.

Massenerosion Bei Massenerosion werden große Mengen Bodensubstrat gleichzeitig hangabwärts verlagert. Dies kann beispielsweise durch Entwaldung an Böden mit starkem Gefälle ausgelöst werden, wenn das Wurzelwerk zuvor die Stabilität der Böden gewährleistet hatte. Der Prozeß wird auch oft bei Straßenbaumaßnahmen im Gebirge beobachtet.

Anthropogene/beschleunigte Erosion Obwohl die theoretische Unterscheidung zwischen geologisch natürlicher Bodenerosion und anthropogen-beschleunigter Bodenerosion in der Theorie möglich ist, mangelt ihr die praktische Umsetzbarkeit, da die Prozessraten räumlich und zeitlich stark

fluktuieren (Beckedahl 1998). Fast jede Form von Landnutzung wird zu beschleunigter Erosion führen, die Verluste können jedoch durch Erosionsschutzmaßnahmen minimiert werden. Damit stellt sich die Frage, welche Menge von Bodenerosion als tolerabel für eine Gemeinschaft, eine Region oder die Nachhaltigkeit der Landwirtschaft angesehen werden kann. Diese Definition vermeidet die Schwierigkeit, eine natürliche Erosionsrate quantifizieren zu müssen. Eine Bodenabtragsrate kann als exzessiv betrachtet werden, wenn sie die Menge der Boden Neubildung übersteigt. Gerade in Südafrika erfolgen die Neubildungsprozesse, klimatisch bedingt, nur sehr langsam ((Beckedahl 1998) zitiert duPlessis,1986).

4.2 Formeldarstellung von Bodenerosionsparametern

Um die Frage nach der *tolerierbaren* Erosion stellen zu können, welche die Nachhaltigkeit des Systems nicht gefährdet, müssen die beteiligten Faktoren beschrieben werden: Für die Erfassung der Parameter der ablaufenden Teilprozesse werden Formelausdrücke gebildet, um quantitativ-gestützte Prognosen über zukünftige Bodenerosion treffen zu können. Abhängig von der benutzten Formel können Voraussagen über Erosionswahrscheinlichkeit oder konkrete Volumenangaben der Sedimentverluste für längere Zeiträume gemacht werden.

4.2.1 Universal Soil Loss Equation

Nach Sammlung und Erfassung der relevanten Aspekte niederschlagsbedingter Bodenerosion in den gemäßigten Breiten (USA) durch Wischmeier und Smith wurde 1978 die Universal Soil Loss Equation (USLE) publiziert (Reining 1992). Sie prognostiziert Bodenabtragsmengen aufgrund von Niederschlägen, wenn mehrere Parameter bekannt sind. Die Universal Soil Loss Equation wird weltweit als Standardformel für Bodenerosion eingesetzt. Sie ist definiert als:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4.2)$$

A Mittlerer jährlicher Substratverlust

R Niederschlagsfaktor

K Bodenerodibilitätsfaktor

LS Dimensionsloser Topographiefaktor (Hänglängenfaktor L, Hangneigungsfaktor S)

C Dimensionsloser Oberflächenbedeckungsfaktor

P Dimensionsloser Faktor für Erosionsschutzmaßnahmen

K Die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Bodens bestimmen seine natürliche Anfälligkeit für Erosion. Dieser Faktor wird als *Erodibilität* bezeichnet und wird in der USLE als der K-Faktor eingebracht. Dieser quantitative Wert wird experimentell bestimmt. K wird aus dem Quotienten des Bodenverlustes und der Regenerosität berechnet:

$$K = BA/EI_{30} \quad (4.3)$$

Dabei wird der Bodenverlust unter standardisierten Bedingungen auf Feldern (Plots) von 22m Länge und einer Neigung von neun Prozent bestimmt (Morgan 1995; Ruppenthal 1995). Bei dieser Standardkonfiguration können die anderen Faktoren der USLE auf den Wert 1 gesetzt werden.

R Der R- oder Regenerositätsfaktor der USLE ist das Produkt der kinetischen Energie eines Regens und seiner maximalen 30-minütigen Intensität (I_{30}) (Ruppenthal 1995): Dieser Faktor wurde im Osten der USA ermittelt, wo die auftretenden Bodenverluste stark mit dem auslösenden Sturmereignis variieren, was jedoch mit dem Produkt aus der Gesamtenergie des Regens und der maximalen 30-Minuten-Intensität korreliert. Dieses Produkt

$$E_u \cdot I_{30} \quad (4.4)$$

ist der R-Faktor. Der Regenerositätsindex basiert auf dem mittleren jährlichen EI_{30} . Er wird ausgedrückt in E [J/m²] und I30 [mm/h], also

$$R = EI_{30}/1000 \quad (4.5)$$

(Morgan 1995).

Diskussion Die USLE liefert als empirisches Modell langjährige Mittelwert Angaben für die Bodenverluste. Als Modellparameter werden über längere Zeiträume gewonnene Mittelwerte verwendet, die auch aus zeitlich gering auflösenden Daten gewonnen werden können³. Für die resultierenden langfristigen Ergebnisse der USLE ist zu beachten, dass die aktuellen Jahres- bzw. Saisonwerte in beide Richtungen stark vom errechneten Mittel abweichen können. Aussagen über die kleinräumlichen Effekte einzelner Niederschlagsereignisse sind durch die USLE als empirisches, auf linearer Regression basierendes Modell nicht möglich.

³Beispiel: Tages- oder Monatssummen des Niederschlags

4.2.2 Soil Loss Estimation Model for Southern Africa

Das 'Soil Loss Estimation Model for Southern Africa' (SLEMSA), wie von Stocking, Chakela und Elwell definiert, betrachtet ähnliche Faktoren wie die USLE. Es liefert jedoch statt Materialverlustzahlen das Erosionsrisiko in Form von 'Erosion Hazard Units' (Elwell 1988; Elwell 1988). Es wird für die Tropen, insbesondere das südliche Afrika benutzt (Hudson 1995; Elwell 1988).

Das SLEMSA korrigiert einige problematische Aspekte der USLE: Nicht-lineare Abhängigkeiten wie Erosion und Vegetationsbedeckung werden im Modell betrachtet, die Faktoren werden besser gewichtet und Interaktionen werden berücksichtigt. Dabei werden vier Faktoren zur Beschreibung des Erosionsrisikos Z herangezogen (siehe auch Tabellen 4.2.2 und 4.3):

$$Z = K \cdot C \cdot X \quad (4.6)$$

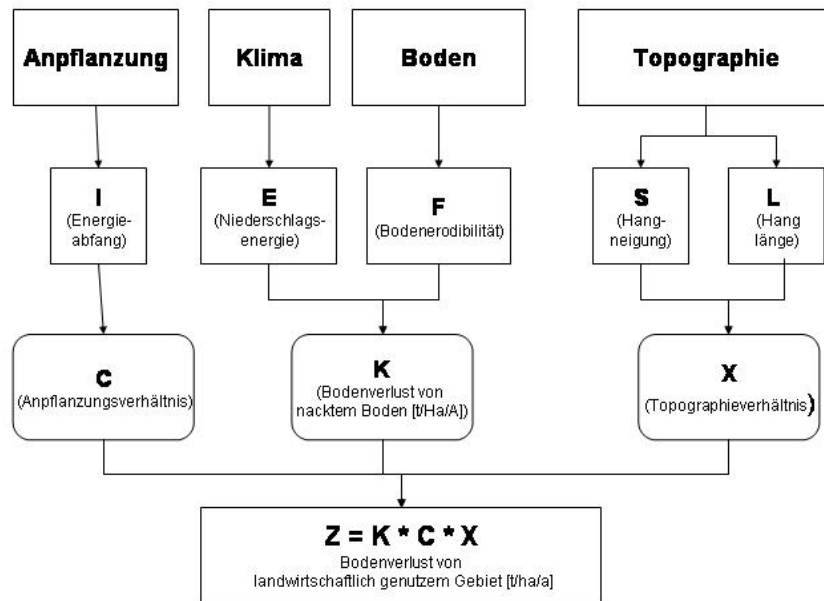


Abbildung 4.1: Die Struktur des SLEMSA (nach (Hudson 1995), verändert))

Relief Anders als bei der USLE wird hier die variable, mittlere Hanglänge gemessen, die unmittelbar aus topographischen Karten gelesen werden kann.

Vegetation Sie ist ein wichtiger Faktor, weil sie durch den Menschen beeinflusst wird und in Studien der Grad der Vegetationsbedeckung die

hauptsächliche Determinante der Erosionsraten darstellt.

Boden Die Bodenerodibilität beschreibt die Widerstandskraft der Böden gegen Erosion. Parameterwerte für das SLEMSA existieren aufgrund von Erfahrungen in Simbabwe, die mit FAO-Klassifikationen korreliert werden können, um Beurteilungen in anderen afrikanischen Regionen zu ermöglichen.

Niederschlag Die ursprüngliche Version der SLEMSA benutzte $EI30^4$. Die überarbeitete Version verwendet stattdessen die absolute kinetische Energie des Niederschlages in $Joule/m^2$, da diese eine rationale Beschreibung des Energietransfers durch Splash-Erosion ist und mit dem Vegetationsfaktor zusammenhängt (Hudson 1995).

Physikalisches System	Kontrollvariable	Teilmodell
Vegetation	Energie Interzeption: I	Crop Ratio
Klima	Niederschlagsenergie: E	Bodenverlust von unbedeckten Boden: K
Boden	Erodibilität: F	Bodenverlust von unbedeckten Boden: K
Topographie	Gefälle: S	Topographisches Verhältnis: X
Topographie	Gefälledlänge: L	Topographisches Verhältnis: X

Tabelle 4.1: Die in der SLEMSA vorkommenden Parameter und Teilmodelle

4.3 Die besondere Rolle des Faktors Klima dargestellt durch Erosivitätsindizes

Lediglich Klima und anthropogene Einwirkung (Landwirtschaft) sind *aktive Faktoren* beim Erosionsprozeß (Abbildung 4.3).

Bei der Modellierung von Bodenerosionsprozessen durch Formeldarstellungen spielt der Faktor Klima eine herausragende Rolle. Er setzt sich aus den Komponenten Wind und Wasser zusammen und spielt eine *aktive* Rolle bei den ablaufenden Verlagerungsprozessen (Motzer 1988).

Dabei beeinflußt das Klima den Erosionsprozess auf zwei unterschiedliche Weisen: Die Komponente Wind ist für die Fragestellung dieser Arbeit nicht relevant und wird nicht weiter betrachtet. Die Komponente Wasser hingegen ist entscheidend für die Erosion, da sie die *Erosionswaffe* darstellt. Es muss betrachtet werden, wie dieser Faktor berechnet werden kann:

⁴ $EI30$:= Kinetische Energie der Niederschlagsmenge, multipliziert mit dem Maximum der Intensität für ein 30 Minuten Intervall.

Faktor	Variable	Einheit	Maß
Relief	Mittleres Gefälle	Gefälle in Prozent	Wentworth's Methode des Zählens der Dichte der Isohypsenkreuzungen auf Transsektlinien eines Rasters
Niederschlag	Kinetische Energie	Joules pro Quadratmeter	Von automatisch erstellten Regensammelerkarten abgeleitet, die die Intensitäten messen und die Gleichung anwenden.
Vegetation	Vegetationsbedeckung	Abdeckung in Prozent	Abhängig von bekannten Bedeckungswerten für bestimmten Pflanzen und Landnutzungen
Boden	Erodierbarkeits-Index	-	Korreliert mit F-Werten für Böden in Simbabwe, angepasst für bekannte lokale Abweichungen.

Tabelle 4.2: Die in der SLEMSA vorkommenden Faktoren und ihre Modellierung (nach (Hudson 1995), verändert)

Ansätze zur Bildung von Niederschlags-Erosivitäts-Indizes Die bisher beste Möglichkeit zur Charakterisierung der Erosivität des Niederschlags sind Index-Werte, die auf der kinetischen Energie des Regens basie-

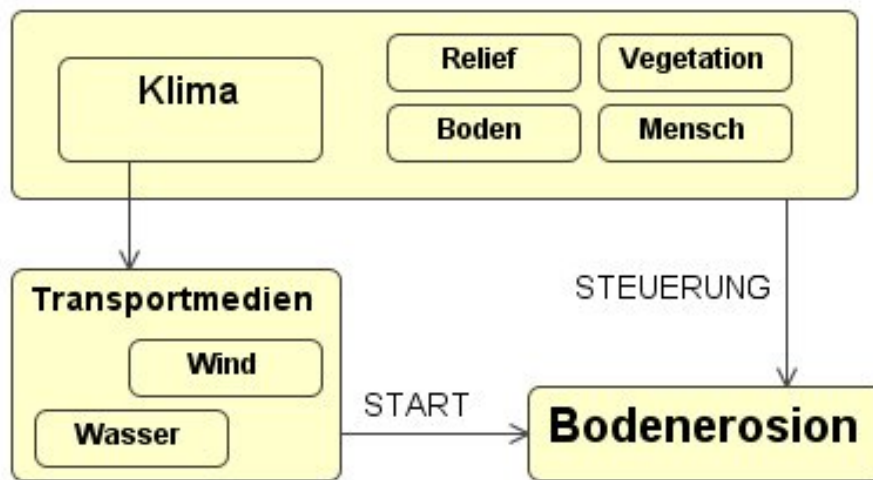


Abbildung 4.2: Die doppelte Rolle von Wasser im Erosionsprozeß, ((Motzer 1988) S.17, verändert.)

ren. Damit ist die Erosivität eines Regensturms eine Funktion seiner Intensität und Dauer.

Es scheint, dass Erosion von zwei unterschiedlichen Arten von Niederschlagsereignissen abhängt: zum einen von kurzzeitigen intensiven Stürmen, bei denen die Infiltrationskapazität der Böden überstiegen wird, und andererseits von lange anhaltenden Stürmen niedrigerer Intensität, welche die Böden mit Wasser sättigen. In vielen Fällen ist es schwierig, die Effekte beider Typen für Bodenverluste voneinander abzugrenzen (Motzer 1988; Hudson 1995).

4.3.1 Empirische Ansätze zur kinetischen Energie

Tropfengröße Die Berechnung der Erosivität erfordert die Analyse der Tröpfchengröße-Verteilung des Regens. Basierend auf Studien von Niederschlagsereignissen in den östlichen USA wurde gezeigt, dass Tröpfchengrößen-Verteilungen mit der Intensität des Regens variieren und mit dem mittleren Tropfendurchmesser (d_{50}) und mit steigender Intensität zunehmen ((Hudson 1995) nennt Laws und Parsons, 1943)). Studien von tropischen Niederschlägen deuten an, dass diese Beziehung nur für Niederschläge bis zu 100 mm/h zutrifft ((Morgan 1995) nennt Hudson, 1963). Bei stärkeren Intensitäten nimmt die mittlere Tropfengröße mit steigender Intensität wieder ab, vermutlich weil die erhöhte Turbulenz größere Tropfen instabil macht. Bei Intensitäten größer als 200 mm/h verbinden sich die kleineren Tropfen wieder, so dass die mittlere Tropfengröße wieder steigt ((Morgan 1995)

nennt Carter et. al, 1974).

Da die Beziehung zwischen mittlerer Tropfengröße und Intensität nicht konstant ist, variiert sowohl die mittlere Tropfengröße wie die Tropfengrößenverteilung für Regen der gleichen Intensität an unterschiedlichen Orten. Dennoch ist es möglich, allgemeine Beziehungen zwischen kinetischer Energie und Regenintensität herzustellen. Einige der oft eingesetzten Beziehungen werden in Folge dargestellt

(Seuffert u. a. 1999):

Klassischer Empirischer Ansatz Basierend auf der Arbeit von Laws und Parsons (1943) haben Wischmeier und Smith folgende Gleichung empirisch ermittelt, basierend auf Tropfengrößewerten in den USA:

$$KE = 11.87 + 8.73 \log_{10} I \quad (4.7)$$

mit I der Niederschlagsintensität (mm/h) und KE der kinetischen Energie ($Jm^{-2}mm^{-1}$).

Weit verbreiteter Ansatz: Marshall-Palmer Diese Formel zur Berechnung von KE wird für viele Szenarien eingesetzt (Seuffert u. a. 1999):

$$KE = 8.95 + 8.44 \log_{10} I \quad (4.8)$$

Tropische Variante Für tropischen Regen gibt Hudson (1965) nach Messungen in Zimbabwe folgende Formel:

$$KE = 29.8 - (127.5/I) \quad (4.9)$$

Zusammenfassung Die aufgeführten Gleichungen 4.7, 4.8 und 4.9 zeigen in der Anwendung, dass bei Niederschlagsintensitäten über 75 mm/h die kinetische Energie bei einem Wert von etwa $29Kmm^{-2}mm^{-1}$ ein Plateau erreicht, das für viele Situationen und Orte repräsentativ erscheint. Jedoch werden in der Literatur auch vereinzelt höhere Werte angegeben, wie etwa eine Regenintensität von $340mm/h$ im südlichen Afrika, die einige Minuten anhielt (Hudson 1995).

Auch variiert die Niederschlagsenergie mit der Höhe und nimmt mit ihr zu, da die Regenenergie von der Luftdichte abhängt ((Morgan 1995) nennt Tracy, Renard und Fogel, 1984).

4.3.2 Abgeleitete Erosivitäts-Indizes

Die Güte eines Erosivitäts-Index kann durch seine Korrelation mit realen Bodenverlustwerten beurteilt werden.

Der EI30-Index nach Wischmeier & Smith Grundlage dieses Indexes ist die Annahme, dass der Substratverlust durch den Erosionsprozeß dem Produkt aus der summierten kinetischen Energie KE und der maximal auftretenden 30-minütigen Intensität I_{30} entspricht ((Morgan 1995) zitiert Wischmeier und Smith (1958)).

$$EI_{30} = KE \cdot I_{30} \quad (4.10)$$

Für die Berechnung dieses Indexes, der dem R-Faktor der USLE entspricht, werden zuerst die relevanten Niederschlagsmessdaten isoliert: Niederschlagsereignisse mit weniger als 12.7 mm, die außerdem mehr als sechs Stunden von anderen Niederschlägen getrennt auftreten, werden vernachlässigt, außer wenn mehr als 6.35mm innerhalb von 15 Minuten nieder gehen. Der Niederschlag wird in Kategorien gleicher Intensitäten (I) unterteilt und daraus die kinetische Energie E_u errechnet:

1. Isolierung von relevanten Niederschlagsmessdaten
2. Einteilen in Kategorien anhand der Intensitätswerte und entsprechende Ermittlung der Energiewerte.

für $I \leq 76 \text{ mm/h}$ $E_u(\text{USLE}) = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$

für $I > 76 \text{ mm/h}$ $E_u(\text{USLE}) = 0.283$

mit I in Einheiten von mm/h und E_u in Megajoule pro Hektar pro Millimeter Niederschlag [$\text{MJ}/(\text{ha} \cdot \text{mm})$].

Es wird postuliert, dass Bodenerosion auch bei gering-intensiven Regnen erfolgt. Die Einführung von I_{30} in den Index ist ein Versuch, die Überschätzung des Einflusses der geringen Niederschläge zu korrigieren. Um die Wahrscheinlichkeit der Überbewertung des Bodenabtrags von hochintensivem Niederschlag zu kompensieren, wird geraten, den Gültigkeitsbereich der Indexwerte einzuschränken: So wird ein Maximalwert von $28.3 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2 \cdot \text{mm}}$ für die E-Komponente aller Niederschläge über 76.2mm/h und einen Maximalwert von 63.5 mm/h für den I_{30} Term definiert ((Morgan 1995) zitiert Wischmeier und Smith (1978)). Durch die beschriebene Einteilung der Intensitätswerte mit einem Maximalwert ist die Aussagekraft gerade für hochintensive Regenfälle beschränkt.

Ansatz von Hudson Einen alternativen Erosivitäts-Index benutzt Hudson:

$$KE > 25 \quad (4.11)$$

Bei der Betrachtung von Bodenerosionsphänomenen auf Basis der Effekte einzelner Stürme bedeutet dies, dass die kinetische Energie derjenigen

Zeittakte summiert wird, bei denen die Regenintensität größer oder gleich 25 mm/h ist. Bei Meßwerten aus Zimbabwe ergab sich damit eine verbesserte Korrelation zwischen diesem Index und der Bodenerosion als zwischen Bodenverlust und EI30 (Hudson 1995; Morgan 1995).

Überarbeitete Version des EI30 Stocking und Elwell (1973a) haben Formel 4.11 überarbeitet und unter Einbezug aktuellerer Informationen vorgeschlagen, dass EI30 dennoch der bessere Index sei (Seuffert u. a. 1999).

Dabei wird der EI30 nur für Stürme berechnet, die über 12.5mm Niederschlag liefern und auf eine maximale Intensität von mehr als 25mm/h anhand der anteilig betrachteten 5-Minuten-Intervalle aufweisen. Damit konnten fast alle Einwände gegen den ursprünglichen EI30 Index ausgeräumt werden.

Vergleich Wenn Erosivitätswerte von einzelnen Stürmen über Zeiträume von 20 bis 25 Jahren addiert werden, können monatliche und mittlere jährliche Summen erzeugt werden. Jedoch weichen die Ergebnisse der beiden Formeln (EI30 und Formel 4.11) durch Einfluß des I30-Faktors stark voneinander ab. Deswegen können die beiden Indexwerte nicht gegeneinander ausgetauscht werden. Für die Variante von Hudson (Formel 4.11) sprechen jedoch weiterhin ihre einfachere Einsetzbarkeit und die geringeren Anforderungen an die Ausgangsdaten.

Es existieren jedoch kritische Stimmen bezüglich der Aussagekraft der erzeugten Werte:

'The bulk of the data used for calculating and predicting soil erosion for all kinds of planning purposes are simply wrong, being nothing but meaningless numbers extremely remote from reality'
(Seuffert u. a. 1999).

4.3.3 Rainfall Erosivity Index

Der 'Rainfall Erosivity Index' (REI) stellt eine Alternative und Erweiterung der vorgestellten Erosivitätsindizes für das südliche Afrika dar (Seuffert u. a. 2000). Ähnlich wie in Formel 4.9 wird davon ausgegangen, dass die konvektiven Niederschlagsverhältnisse der Tropen und Subtropen eine abweichende Struktur von den bei den Standardformeln angenommenen Verhältnissen haben (Hudson 1995). Der REI stellt die derzeit aktuellste Version einer Reihe von Erosivitätsindizes (wie MOSES und SEMOS) dar (Seuffert u. a. 1999). Dabei wurde der Heterogenitätsindex H in den Rainfall Erosivity Index integriert (Seuffert u. a. 1999; Seuffert u. a. 1999). Bei allen publizierten Versionen des REI handelt es sich um den gleichen Typ eines Berechnungsschemas, der auf der Erfassung einzelner Niederschlagsereignisse basiert:

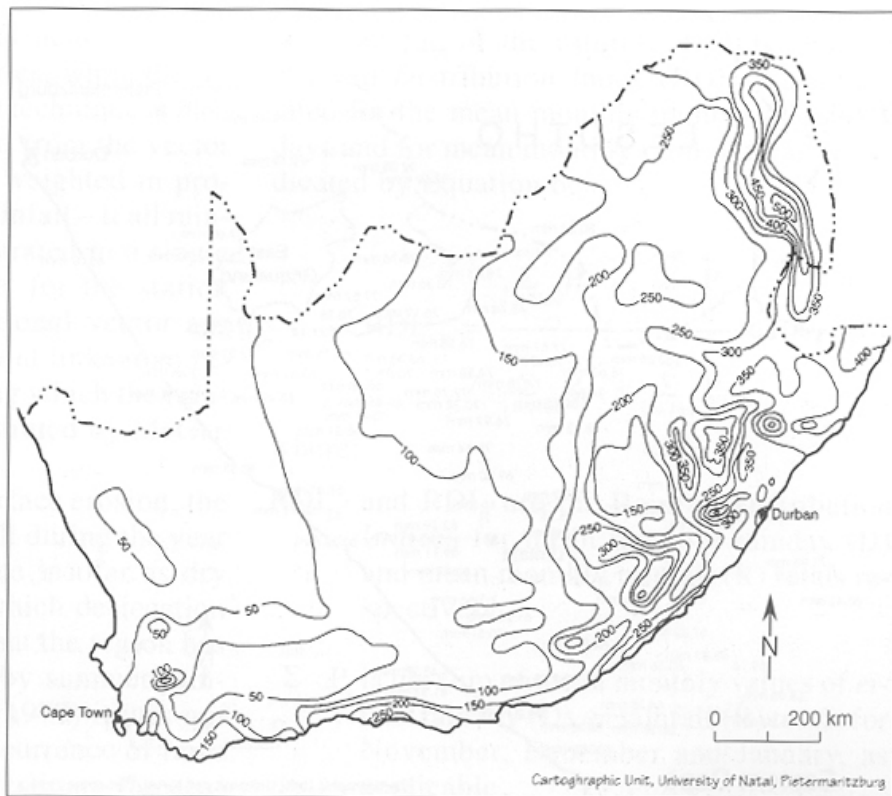


Abbildung 4.3: Die Darstellung des EI30-Index für Südafrika ((Beckedahl 1998)) ist ein Beispiel für eine Kartierung eines Erosivitätsparameters auf nationaler Ebene.

Die Verfügbarkeit zeitlich hochauflösender Niederschlagsdaten voraussetzend, wird die zeitliche Entwicklung der Niederschlagsereignisse für jede aufzeichnende Meßstation erfasst und analysiert: Wenn sie eine minimale Dauer überschreiten und eine bestimmte Dynamik aufweisen, wird ein Regen-Erosivitäts-Indexwert nach folgender Formel errechnet:

$$REI = \frac{KE(1 + R_{HI}I_{\phi HI})(1 + R_{FOL})H}{10^6} \quad (4.12)$$

KE Die kinetische Energie des Niederschlagsereignisses [$J/m^{-2}mm^{-1}$] gemäß Formel 4.9, (mit I als Niederschlagsintensität [mm/h])

R_{HI} Der Anteil der hocherosiven Segmente des Niederschlages, die mit einer Intensität über $0.2mm/min$, bzw. $\geq 12mmh^{-1}$ fallen.

$I_{\phi HI}$ Die mittlere Intensität der hocherosiven Segmente (R_{HI}) des Ereignisses [mmh^{-1}].

R_{FOL} Die Regenmenge, die nach der ersten fünfminütigen Intensitätsspitze des Niederschlagsereignisses noch fällt und Oberflächenabfluß auslösen kann.

H Der Parameter Niederschlagsheterogenität:

$$H = \sqrt{\frac{ND_{abs}}{ND_{eff}}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{max_i} - N_{\phi})^2}{i^2}} \quad (4.13)$$

Aus der Sicht eines einzelnen Niederschlagssammlers drückt sich eine durchziehende Sturmzelle lediglich durch eine *Sequenz* von hohen Messwerten aus. Diese Funktion wird über die Zeitachse betrachtet, durch den Heterogenitätswert erfasst.

ND_{abs} Gesamtlänge des Niederschlagsereignisses inklusive aller Pausen.

ND_{eff} Gesamtlänge des Ereignisses ohne Pausen.

N_{ϕ} Durchschnittliche Niederschlagsintensität, basierend auf ND_{eff} .

ND_{max_i} Die Summe der n Niederschlagsimpulse, welche die durchschnittliche Intensität um 200% übersteigen.

i Die Anzahl der Messwerte.

Die Kombination der Betrachtung der kinetischen Energie in *Verbindung* mit den hocherosiven Anteilen des Niederschlagsereignisses *und* dem Heterogenitätsmaß hebt den REI-Ansatz von den vorher vorgestellten Erosivitätsindizes ab.

4.4 Zusammenfassende Betrachtung der Modellierung von Bodenerosion

Über die Möglichkeiten zur Erfassung von Bodenerosionsprozessen kann folgendes gesagt werden:

Die dabei allgemein wirkenden Faktoren sind zwar bekannt, die Kombination und Gewichtung in Formeln (wie USLE und SLEMSA) erfolgt allerdings durch empirische Ansätze. Die Ergebnisse regionaler Experimente können nur sehr eingeschränkt verallgemeinert und übertragen werden. Für die kinetische Energie des Niederschlags, einen wichtigen Parameter der Regen-Erosivität, existieren mehrere empirisch gewonnene Terme. Die daraus gewonnenen Resultate lassen sich nur bedingt miteinander vergleichen.

4.5 Problem der Aussagekraft von punktuellen Ergebnissen

4.5.1 Messungen von Niederschlagsmengen

Bei einer Niederschlagsmessung am Boden handelt es sich um eine Stichprobe aus der Menge aller Raumstellen des bestehenden Raums. Damit stellt sich die Frage, wie repräsentativ die erhobene Stichprobe ist (Hudson 1995):

- Zum einen ist die *Stichprobengröße* wichtig: Die Anzahl der verfügbaren Niederschlagsmesser ist immer verschwindend klein im Verhältnis zur betrachteten Fläche. Bei sehr gut erfassten Gebieten kommt ein Niederschlagsmesser auf 25km^2 , in Schwellenländern sind jedoch meist wesentlich schlechtere Verhältnisse anzutreffen: Der Wert für Mali liegt bei 20000km^2 , während er für Deutschland $3,6\text{km}^2$ beträgt (Hess 2002).
- Die *Anordnung* des Messnetzwerkes (Auswahl der Stichprobe) der verfügbaren Anzahl von Niederschlagsmessern orientiert sich meist nach Zugangsmöglichkeit/Erreichbarkeit und nicht an der Repräsentativität.
- Die *Messgüte* ist oft nicht bekannt. Form und Größe des Messinstruments, Anbringungshöhe sowie die Art des Windschutzes beeinflussen stark die Niederschlagsmessungen.

Daraus folgt, dass die auf den ersten Blick einfache Frage nach der Menge des gefallenen Regens (und seiner Intensität) aus derartigen Messungen nicht präzise beantwortet werden kann.

4.5.2 Punktdaten als Quelle für Erosionsinformation

Wie kann in der Praxis, basierend auf punktuell erhobenen Daten, das Niederschlagsgeschehen und die Prozesse, die es auslösen, abgeleitet werden?

Gebietsweise Erfassung Bei der Betrachtung einer Region wird der durch alle Messstationen erhobene Datenstrom nicht gefiltert, sondern zu jedem Messtakt werden die aktuellen Messwerte aller Stationen kartiert: Durch wiederholtes Ausführen dieses Prozesses kann man durch Interpolation alle aktuell vorhandenen Sturmzellen in der Darstellung verfolgen.

Beobachtung und Verfolgung isolierter Sturmzellen Für die Berechnung der kinetischen Energie einer bestimmten Sturmzelle wird der Verlauf der Zugbahn ihrer Niederschläge aus den Daten der Niederschlagssammler isoliert. Aus diesen Daten werden dann die Intensitätswerte ermittelt und die kinetische Energie summiert.

4.5.3 Beispiel der Interpolation von REI-Werten für Südafrika

Der Regen-Erosivitäts-Index (REI) wurde vor dem Hintergrund zeitlich hochauflösender Datenreihen von südafrikanischen Niederschlagssammlern erarbeitet.

Der bisherige Einsatz erfolgte retrospektiv auf Datenbestände des südafrikanischen Wetterdienstes SAWS (Seuffert u. a. 1999). Aus den punktuellen Ergebnissen der Analyse auf Stationsebene wurden Flächenkartenprodukte interpoliert. Es wird nun eine Übersicht über die bisherige Umsetzung des REI-Ansatzes aufgrund des vorhandenen Datenmaterials in Kartenprodukte gegeben:

Datengrundlage

Als Ausgangsdatenmaterial wurden Datenarchive des Niederschlagsmessnetzwerks des SAWS sowohl auf landesweiter Ebene (120 Stationen) wie auf lokaler Ebene (Messnetzwerk im Liebenbergsvlei, siehe auch Kapitel 7) verwendet⁵.

Es wurden zwei Ansätze zur Auswertung umgesetzt, auf denen basierend nach einer ersten Lösung durch eine Datenbank eine objektorientierte Modellierung erstellt wurde (Seuffert u. a. 1999; Seuffert u. a. 1999). Insgesamt wurde die Verarbeitung durch fehlerbehaftete Messwerte und Datenfehler erschwert.

⁵Abschätzung: 1 m² Messfläche pro Regensammler, entsprechend maximal 120 m² für das ganze Land. Damit werden von der Gesamtfläche: 1 223 410 m² - 1%=12234,1 m², etwa 1/100 Prozent wird durch die Regensammler abgedeckt.

Diskussion der Umsetzung

Die erzeugten REI-Werte wurden jeweils punktuell für die Messreihen der einzelnen Regensammler errechnet, aufsummiert und in die Fläche interpoliert. Durch diese Verarbeitung ergeben sich Probleme, die unabhängig von der *Aussage* der REI-Formel zu betrachten sind: Die im Rahmen des südafrikanischen Wettergeschehens auftretenden Niederschläge sind, wie in Kapitel 3 beschrieben, mehrheitlich konvektiver Natur und gehen in räumlich eng begrenzten Arealen nieder. Wie zuvor erörtert, ist es fraglich, ob die Aussagekraft von aus den Stationsdaten errechneten Erosivitätsindexwerten von oftmals kleinräumlichen Konvektivereignissen über Distanzen in der Kilometerskala interpoliert werden kann, ohne massiv an Informationsgehalt einzubüßen. Dies gilt besonders für die durch den REI-Ansatz erzeugten Werte, welche auch die *Dynamik* der lokalen Niederschlagsereignisse berücksichtigen.

Die Summenbildung für Monats- und Jahreswerte erfolgt auf der Ebene der isolierten Messstationen. Die Interpolation zu Flächeninformationen schließt sich erst in einem zweiten Schritt an: Auch hierbei stellt sich das Problem der Repräsentativität der Karteninhalte für die Erosivitätsfragestellung.

4.5.4 Flächendeckende Daten als Quelle

Für die notwendige Betrachtung der Bodenerosion in Südafrika liegen mit der SLEMSA- und der REI-Formel an die Region angepasste Modelle für die Erosionsparameter und im Besonderen für die Erosivität vor.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Verwendung von zeitlich hochauflösenden und flächendeckenden Wetterradardaten zur Erzeugung von Erosivitätsindexwerten als eine vielversprechende Möglichkeit, um eine qualitativ bessere Kartierung der Indexwerte zu erhalten (Abbildung 4.3). Wenn Niederschlagsdaten flächendeckend aus den Wetterradardaten gewonnen werden können, entfällt der problematische Interpolationsschritt des bisherigen Verfahrens. Jedoch bleibt zu klären, ob die Radardaten in ihrer Auflösung mit den Ergebnissen von Niederschlagssammlern vergleichbar sind.

Dabei ist die Verfügbarkeit *flächendeckender* Daten als wichtiger zu bewerten als die durch den Einsatz der Radartechnik potentiell neu hinzukommenden Fehlerquellen: Auch die verfügbaren Regensammlerdaten werden von Systemfehlern beeinflusst. Es gilt nun, die Radardaten in geeigneter Form auszuwerten und die REI-Indizes als potentielle Eingangsdaten für die USLE daraus abzuleiten. Sofern dieser Schritt mit einem Geoinformationssystem realisiert werden kann, ist die sich anschließende Kartierungsaufgabe trivial.

Kapitel 5

Radarmeteorologie

Dieses Kapitel stellt vor, wie Wetterradar­daten erhoben werden. Es wird auf die systembedingten Einschränkungen dieser Fernerkundungstechnik eingegangen; außerdem werden mögliche Quellen verfälschter Daten angesprochen. Danach wird die Realisierung in der Republik Südafrika betrachtet.

Einleitung 'Regen', der auf die Landoberfläche fällt, ist in seiner zeitlichen und räumlichen Dynamik eine zweidimensionale Abbildung des dreidimensionalen Geschehens in der darüber liegenden Atmosphäre. Für das Verständnis des Niederschlagsgeschehens auf kleinräumlicher Ebene sind dreidimensionale Informationen über die Verteilung der Wassertropfen, Eis- und Hagelkörner, sowie von Schneekristallen in der Atmosphäre nötig. Diese werden im weiteren zusammenfassend auch als Hydrometeore bezeichnet.

Der Fachbegriff 'Radar' (*Radio Detection and Ranging*) spiegelt die Ursprünge dieser Technologie in der Radiotechnik wieder (Rhinehart 1997)¹. Vorläufer der modernen Radar-Instrumente existieren seit 1922 und entwickelten sich während des Zweiten Weltkrieges parallel in mehreren Staaten im Bereich der Wehrtechnik. Nach Kriegsende stieg die Zahl der zivilen Anwendungen, wobei ausgemusterte Militärsysteme Verwendung fanden. Radar hat seitdem eine rasante weitergehende Entwicklung in vielen Einsatzbereichen durchgemacht.

Übersicht über die Funktionsweise von Wetterradar Die in dieser Arbeit ausschließlich betrachteten Wetterradarsysteme bestehen aus mehreren Hardware-Einheiten, die miteinander die gewünschte Funktionalität erzeugen. Ein schematischer Überblick wird in Abbildung 5.1 gegeben.

¹So beeinflusste im September 1922 ein hölzernes Dampfschiff auf dem Potomac Hochfrequenz-Funkexperimente der US Navy. Die Erfassung von Luftzielen erfolgte ebenfalls ungeplant 1934, als ein Flugzeug die Radiosignale des gleichen Teams wie im Jahr 1922, Albert Hoyt Taylor und Leo C. Young, beeinflusste (Rhinehart 1997)

Das getroffene Ziel sowie dessen Reflektivität können durch Winkel und Höhe der Antenne, der Laufzeit zwischen Aussendung des Signals und dem Empfang des Echos sowie dessen Stärke bestimmt werden.

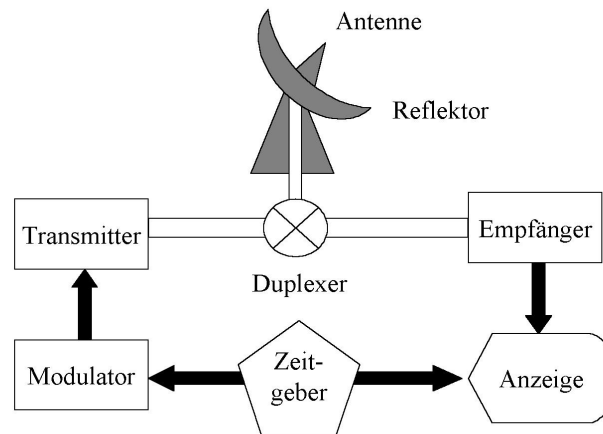


Abbildung 5.1: Einfaches Blockschema eines Radars (*Radio Detection and Ranging*) (nach (Rhinehart 1997), verändert): Die Transmitter-Einheit erzeugt in einem festen Takt Energiepulse konstanter Länge und Frequenz in einem Magnetron. Diese werden über die Antenneneinheit gebündelt und mit Lichtgeschwindigkeit abgestrahlt ('Radio'). Nach einem solchen Takt schaltet der Duplexer das System um, und die Antenne arbeitet als Empfänger. Sie zeichnet die Echos der zuvor ausgestrahlten Impulse auf, die von Reflektoren ('Zielen': *Detection*) zurückgeworfen werden. Aus der zwischen Ausstrahlung des Pulses und dem Eingehen des Echos vergangenen Laufzeit kann die Entfernung zum reflektierenden Objekt ermittelt werden ('*Ranging*'). Zusätzlich werden die Signalstärken der Echos verarbeitet und in geeigneter Form dargestellt.

Signalverhalten Die von der Radar-Antenne abgestrahlten Impulse können analog zu einem gepulsten Strahl einer Taschenlampe verstanden werden. Der Öffnungswinkel der Antenne liegt meist zwischen 0.5 und zwei Grad. Der kreisförmige Strahlquerschnitt wächst dabei mit zunehmender Distanz zur Sendeantenne. Diese Werte (Distanz und Durchmesser) begrenzen das auflösbare Raumvolumen, das meist als 'gate' oder 'bin' bezeichnet wird. Wie in der Taschenlampen-Analogie nehmen die vom Radarstrahl erfassten Volumenabschnitte nahe an der Antenne kleinere Volumina ein als die weiter außen liegenden.

Abtastverfahren Die Abtastung der durch die Radarinfrastruktur maximal erfassbaren Atmosphärenvolumen kann in unterschiedlicher Weise erfolgen:

Im *Vertical Pointing Mode* verhält sich das vertikal nach oben gerichtete Radar wie ein Regensammler und liefert Informationen über das Vertikalprofil der Hydrometeorverteilung in einer 20 km hohen Säule über dem Radar.

Beim *Base Scan Mode* erfasst das Radar ein Volumen² in einem festen Winkel oberhalb der Erdoberfläche. Somit wird nur das unterste erfassbare Niveau gescannt, ausgehend von der Annahme, dass Niederschläge nur aus dem so erfassten Bereich auftreten und obere Atmosphärenschichten vernachlässigt werden können.

Der *Volume Scan Mode* tastet dagegen den gesamten vom Radar erfassbaren Luftraum ab. Ausgehend von der Base Scan Konfiguration beleuchtet das Radar ähnlich geformte Flächen mit zunehmenden Anstellwinkeln. In dieser Arbeit werden ausschließlich durch den SAWS verfügbar gemachte Volume Scan Daten verwendet.

Verwendete Wellenlängenbereiche Bei der Verarbeitung der aufgezeichneten Echos wird für die durch das Radar 'beleuchteten' Hydrometeore angenommen, dass es sich um Rayleigh-Streuer handelt, deren Durchmesser um den Faktor zehn kleiner ist als die verwendete Wellenlänge λ . Damit können mit dem 3cm-Band und längeren Wellenlängen Wassertropfen mit Durchmessern unter 3mm aufgelöst werden (Rhinehart 1997).

Aus diesem Grund werden Wetterradarsysteme meist im Wellenlängenbereich zwischen 3 cm (X-Band) und 10 cm (S-Band) betrieben. Die Mehrheit der Systeme arbeitet dabei im 5cm Bereich (C-Band)³. Falls die Volumen der durch das Radar beleuchteten Körper (rückstrahlende Hydrometeore) die Größe der eingesetzten Wellenlänge erreichen, greift die Rayleigh-Approximation nicht mehr. Die rückgestrahlte Energie ist dann nicht mehr proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers und sie, die Hydrometeore, müssen als Mie-Rückstrahler betrachtet werden.

²einen durch den umlaufenden Konus des Radarstrahls gebildete Rotationskörper

³Dies begründet sich aus der sinkenden Anfälligkeit für Dämpfungseffekte ('Attenuation') bei längeren Wellenlängen und den gleichfalls steigenden Infrastrukturkosten (Mittermaier 1999)



Abbildung 5.2: Das C-Band Enterprise Wetterradar am Flughafen in Bethlehem, 2002

Ermittlung des Reflektivitätswerts Nachdem die Empfangseinheit das für ein gate aufgezeichnete Echo in den Energiewert umgewandelt hat, kann der Reflektivitätswert Z durch die Radargleichung bestimmt werden ((Mittermaier 1999) nennt Battan,1973):

$$10\log(P_r) + 20\log(r) - C = 10\log(Z) \quad (5.1)$$

mit P_r der empfangenen Energiemenge aus der Distanz r und der Radarkonstante C . Da sich die Z -Werte über mehrere Magnituden verteilen können, wird die logarithmische Skala benutzt und die Werte in Dezibel [dBZ] angegeben. Bei Niederschlägen kann Z zwischen $20dBZ$ und $60dBZ$ betragen, wobei Werte von 55 bis $60dBZ$ Niederschlägen entsprechen, die schwere Überflutungen auslösen können. In schweren Hagelstürmen können Z -Werte von über $70dBZ$ auftreten.

$$dBZ = 10\log(Z) \quad (5.2)$$

Für die Erfassung der Reflektivität der Hydrometeore wird vorausgesetzt, daß das Volumen des Antennenstrahls in einem gate(bin) gefüllt ist und die Rayleigh-Approximation zutrifft. Da diese Bedingungen jedoch nicht

immer erfüllt sind, muss auf die Konsequenzen daraus für die Messungen eingegangen werden:

Die Beziehung von rückgestrahlter Energie und Niederschlag
Radarsysteme sind im Gegensatz zu Niederschlagssammlern nicht geeignet, um absolute Niederschlagsmengen über Punkten der Erdoberfläche zu erfassen. Stattdessen können Näherungswerte der Niederschlagsmengen R für *Flächen* aus den Reflektivitätsdaten Z abgeleitet werden. Dabei entspricht der Reflektivitätswert η dem rückgestreuten Signal der Menge Hydrometeore einer Volumeneinheit (Serafin 1991). Nach der Rayleigh-Abschätzung ist η proportional zur sechsten Potenz der Verteilung der Tropfen pro Volumen $n(D)$, wobei D den Tropfendurchmesser beschreibt (Dotzek und Beheng 2001) nennen Doviak und Zrinc (1993)). Dies kann berechnet werden als:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (5.3)$$

mit

$$Z = \int_0^{\infty} n(D) D^6 dD \quad (5.4)$$

Bei konstanter Wellenlänge λ können Variationen in η durch

1. unterschiedliche Hydrometeor-Typen (Phasenübergänge), welche die Dielektrizitätskonstante $|K|^2$ beeinflussen
2. Variationen in der Dichteverteilung $n(D)$, die die Radarreflektivität Z beeinflusst,

oder beide Effekte zusammen auftreten.

Die abgeleitete Niederschlagsmenge R ist definiert als die vertikale Dichte der Massebewegungen von Hydrometeoriten mittlerer Dichte:

$$R = \frac{\pi}{6} \rho_h \int_0^{\infty} n(D) D^3 w_s dD \quad (5.5)$$

Dabei ist R , wie auch Z , abhängig von Variationen in $n(D)$. Dies hängt weiterhin stark von der effektiven vertikalen Sedimentationsbeschleunigung w_s der Hydrometeore ab. Allgemein wird jedoch von Hydrometeoriten in ruhiger Luft ausgegangen.

Für die Ableitung von Werten der Regenintensität R [mm/h] aus Reflektivitätsmesswerten wird eine empirisch gewonnene Beziehung verwendet:

$$Z = aR^b \quad (5.6)$$

Die am meisten eingesetzte Konfiguration der Parameter a und b ist die ZR-Beziehung nach Marshall-Palmer ((Mittermaier 1999) nennt Battan 1973) für stratiformen Regen:

$$Z = 200R^{1.6} \quad (5.7)$$

Für die Parameter a und b existieren diverse Varianten (Dotzek und Fehr 2002) nennen Battan,1973 und Sauvaget,1992), wobei allgemein der a-Koeffizient mit der Magnitude der Regenintensität ansteigt und der b-Koeffizient invers dazu fällt.

5.1 Mögliche Fehlerquellen bei der Ermittlung von Niederschlagswerten

Nicht anders als bei Niederschlagsmessern existieren diverse Fehlerquellen, sowohl bei der Erfassung der Wettersituation durch Reflektivitätswerte, als auch bei der sich anschließenden Ableitung von Niederschlagswerten. Sie können in mehrere Kategorien eingeteilt werden: Bei einem wohlkalibrierten Radar ist die Hauptquelle für fehlerhafte Niederschlagsschätzungen die Unfähigkeit des Radars, nahe genug über Grund aufzuzeichnen (Mittermaier 1999).

Auch hat Wetterradar eine generelle Tendenz, leichten Niederschlag zu überzeichnen und intensiven Regen durch zu niedrige Werte zu erfassen ((Mittermaier 1999) nennt Wilson, Brandes, 1979). Die exakte Beschreibung und Erfassung möglicher Systemfehler verbessert die abgeleiteten Niederschlagsmessungen qualitativ.

5.1.1 Geometrie-Probleme

Hier werden die Probleme genauer betrachtet, die sich aus der Geometrie des Radarstrahls und der betrachteten Landoberfläche ergeben.

Strahlblockade Die vom Radar abgestrahlten Wellen werden auf der Oberfläche von hohen Objekten⁴ reflektiert.

Partial Volume Fill Bei unvollständiger Ausfüllung des Radarstrahls ('partial beam filling effects') wird die Grundannahme des Verarbeitungsprozesses verletzt, nämlich dass ein verteiltes Ziel (Hydrometeor) das gate vollständig ausfüllt. Wenn die gate-Größe mit der Distanz ansteigt, muss dies nicht mehr zwingend erfüllt sein. Aus diesem Grund steigen die Unterschiede zwischen Radarregionalniederschlagsschätzungen und den von Niederschlagsmessern abgeleiteten Werten an (Serafin 1991).

⁴Wie etwa Bäume, Masten, Gebäude, Schiffe, Hügel und Berge

5.1.2 Besondere atmosphärische Effekte

Strahlverbiegung Strahlverbiegung durch Dichteschichtungen in der Atmosphäre ('anomalous propagation', 'beam bending') entsteht bei besonderen Wetterlagen: Temperaturinversionen der unteren Atmosphäre führen zu einer Verbiegung des Radarstrahls, weswegen Bodenechos aufgezeichnet werden, die unter normalen atmosphärischen Bedingungen die Messung nicht beeinflussen (Rhinehart 1997).

Sonnenstandphänomene Aus den südafrikanischen Datensätzen lässt sich das Phänomen von Pseudoechos beim Sonnenauf- und -untergang nachweisen, das abhängig von der Antennenposition im Südwesten bzw. Südosten des erfassten Bereichs auftritt.

Attenuationseffekte/Signalerosion Bei Signalerosion handelt es sich um die Dämpfung der aufgezeichneten Reflektivitäten durch andere atmosphärische Bestandteile wie Gase, Wolkenröpfchen, Regen, Hagel und Schnee. Dieses Phänomen ist wellenlängenabhängig. Differentielle Messungen mit Dual-Wellenlängen Radar⁵ können helfen, wenn Wetterechos durch Zonen starken Niederschlags hindurch beobachtet werden (Serafin 1991).

Helles Band/Bright Band Der Phasenübergang von Eis zu Wasser (Schmelzzone) mit der verbundenen Änderung der Dielektrizitätskonstante führt zum Entstehen einer bandartigen hellen Zone (*bright band*) mit verstärkter Reflektivität⁶ bei der Darstellung des Radarsignals. Sie tritt meist in einer eng umrissenen Höhenlage knapp unterhalb der 0°C Isotherme auf.

5.1.3 Verarbeitungsprobleme

Reflektivitäten-Niederschlag-Transformation Die Annahme, eine fest gewählte Z-R-Beziehung könne über eine längere Zeitperiode und größere Gebiete repräsentativ für das Niederschlagsgeschehen sein, ist eine sehr starke Vereinfachung der Realität: Gebiete mit Steig- und Fallwinden in Sturmzellen verletzen ständig die Arbeitshypothese unbewegter Luftmassen.

'Deswegen können in großen Cumuli die Z-R-Beziehungen fast beliebig schwanken, was die Annahme einer generischen Z-R-Beziehung fragwürdig erscheinen lässt' (Dotzek u. a. 2002).

⁵mit mindestens einer Wellenlänge mit Attenuation

⁶Der Refraktionsindex des Radarpulses ist fünffach größer für teilweise aufgeschmolzene Schneekristalle als für reinen Schnee.

Niederschlagssammler Für den Abgleich der errechneten Niederschlagswerte mit den real gefallenen Mengen und deren Intensitäten werden Niederschlagssammlerdaten eingesetzt. Auch diese sind fehlerbehaftet.

Bei räumlich ausgedehntem Niederschlag liegt der größte Fehler in den inadäquaten Erfassungsfähigkeiten: Bei Niederschlagssammlern ist eine Fehlerspanne von fünf bis zehn Prozent zu erwarten

((Mittermaier 1999) nennt Seed et al., 1996). Diese Messfehler werden durch Turbulenzen und verstärkte Windströmungen um die Niederschlagsmesser selbst erzeugt (Hudson 1995).

Wenn mehrere Radarsysteme für die Erzeugung von Datenflächenkompositen eingesetzt werden, nimmt die Genauigkeit des Verfahrens mit der Distanz ('Range') ab. Dies geschieht selbst dann, wenn die Radarstationen in flachem Gelände stehen, wo Strahlblockaden oder orographisch bedingten Störungen ausgeschlossen sind (Dotzek u. a. 2002): Selbst bei einem kleinen Antennen-Öffnungswinkel erfolgt ein base-level scan mit zunehmender Distanz von der aussendenden Radarantenne einige Kilometer über der Erdoberfläche. Aufgrund dieser Höhe des Radarstrahls über Grund wird die Korrelation zwischen Radarreflektivität in der Atmosphäre und der Niederschlagsmenge über Grund erschwert. Dies liegt an der mit der Höhe abnehmenden Luftdichte: R nimmt mit der Höhe zu (Kapitel 3), während Z bei konstant bleiben der Hydrometeorverteilung unverändert bleibt.

5.2 Radarmeteorologie in Südafrika

Nach diesen theoretischen Überlegungen zum Fernerkundungswerkzeug Radar wird nun auf die heute in Südafrika eingesetzte Radarinfrastruktur und deren Entwicklung eingegangen.

5.2.1 Historischer Abriss

Der Standort Bethlehem Schon 1971 stufte die damalige südafrikanische Regierung Wasser als eine der kritischsten Ressourcen des Landes ein. Das in Folge gestartete Bethlehem Weather Modification Experiment (BEWMEX) beschäftigte sich anfangs mit Regensimulation und Hagelstudien, was von der Versicherungsindustrie und dem SAWB (South African Weather Bureau) finanziert wurde.

In der Mitte der 1980er hatte sich der Forschungsschwerpunkt auf die Betrachtung großer Sturmsysteme verschoben, die wichtige Niederschlagsproduzenten über dem Highveld darstellen.

Ab 1990 arbeitete das mittlerweile umbenannte Bethlehem Precipitation Research Projekt (BPRP) mit der Firma CloudQuest in Nelspruit in

Form des nationalen Niederschlags-Forschungsprogramms (NPRP) zusammen. Dieses wurde gemeinsam vom SAWB und der WRC (Water Research Council) finanziert.

Seit dem Beginn des NPRP begann die Forschungsgruppe in Bethlehem, ihre Tätigkeit auf andere Themengebiete auszudehnen. Dazu gehört die Nutzung von Radar für Flächenniederschlagsmessungen, die Entwicklung von Kalibrationsverfahren, sowie Softwareentwicklung. Der Diversifikationsprozess wurde durch den Erwerb eines Dualwellenlängen-Radar vom Typ 'MRL5' durch das WRC verstärkt.

Ab 1997 (Einstellung des NPRP) nahmen die Dienstleistungen der in Bethlehem vorhandenen Infrastruktur für Anwender in den Bereichen Flut-Management, Flächenniederschlagserfassung und flugzeugbasierte Messungen zu. Auch wurde das ursprüngliche Wettermodifikationsprogramm in Form des SAREP-Projekts wieder aufgenommen.

METSYS⁷ stellt heute eine unabhängig operierende Untereinheit des neuen südafrikanischen Wetterdienstes SAWS (South African Weather Service) dar, die aus dem BPRP des SAWB entstand und die Kommerzialisierung der Datenprodukte vorantreibt (METSYS 2003).

5.2.2 Radarinfrastruktur und Verarbeitung

Eingesetzte Radarsysteme In Südafrika werden zwei Sorten von Wetterradar eingesetzt. Der am weitesten verbreitete Typ ist das Enterprise C-Band Radar, das auf allen großen Flughäfen (und einigen kleineren) aufgestellt worden ist und von dem sich 1997 neun Einheiten im Einsatz befanden. Desweiteren existiert ein MRL-5 dual-band Radar (bei Witbankfontein) (Pegram und Seed 1998). Eine Übersicht über die Radarssysteme wird im Anhang F gegeben. Die meisten in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden mit dem MRL-5 aufgezeichnet.

Spezifikationen des MRL-5 Die Reichweite des MRL5 im Base oder Volumenscan liegt bei 144 km Radius, beginnend in einer Distanz von 9 km zum Radar. In 150km Entfernung von der Radarantenne liegt das Base Scan Niveau auf einer Höhe von 5000 Metern.

Ein Volume Scan braucht beim MRL5 circa 4.5 Minuten. Er beginnt mit einem Anstellwinkel von 1.5 Grad, der gefolgt von 18 Scanzyklen bis zu einem Winkel von 55° ansteigt. Darauf folgt ein letzter Schritt von fünf Grad, bevor sich der Zyklus wiederholt (Mittermaier 1999).

5.2.3 Archivierung und Verbreitung der Daten

Die Daten der einzelnen Radarstationen werden über Standleitungen in das METSYS-Hauptquartier in Bethlehem übertragen. Dort werden sie verar-

⁷Meteorological Systems and Technology

beitet⁸ und später als Meteorological Data Volumes (MDV-Datensätze) auf CDROM gesichert. Dies gilt sowohl für die regionalen Daten der einzelnen Radars, als auch für die abgeleiteten Sturmweglinien und die landesweiten QPE-Komposit Datenprodukte. Die CDROM-Archive werden vom Systemadministrator verwahrt.

Auf der Internetpräsenz von METSYS⁹ werden diverse weitere aus den originalen Radardaten abgeleitete Produkte verfügbar gemacht. Dazu zählen thematische Interpretationen der Reflektivitäten für die Luftfahrtindustrie, aktuelle Darstellungen der jeweils aktiven Radarsysteme sowie 'Radarpluviogramme': Dies sind Kartenprodukte (Seuffert 2002) mit den abgeleiteten Niederschlagsraten für bestimmte hydrologische Einzugsgebiete (siehe auch Kapitel 7).

⁸durch das Radar Data Acquisitioning System (RDAS)

⁹<http://metsys.weathersa.co.za>

Kapitel 6

Datenaufbereitung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die beim südafrikanischen Wetterdienst erfolgende Verarbeitung der Radardaten durch das TITAN-System. Darauffolgend wird die in dieser Arbeit entwickelte Nutzungsoption durch ein Geographisches Informationssystem (GIS) für die Auswertung der Daten im Rahmen der Erosivitätsfragestellung vorgestellt.

6.1 Das Potential Freier Software für die Forschung

Bei 'Freier Software' handelt es sich um ein alternatives Paradigma zum kommerziellen Modell des Umgangs mit Computerprogrammen. Im Gegensatz zum Verständnis von Computerprogrammen als *Produkten* wird Freie Software von ihren Verfassern und Nutzern als eine *Dienstleistung* verstanden. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten haben die hier vorgestellte Forschung erst möglich gemacht (Neteler und Mitasova 2002).

Freie Software basiert auf den sogenannten 'vier Freiheiten': der Möglichkeit zur uneingeschränkten Nutzung, unbegrenzter Kopier- und Weitergabemöglichkeit, der Offenlegung des Programmcodes und dem Recht, selbst Änderungen unter diesen Bedingungen vorzunehmen. Damit ergeben sich weitreichende Konsequenzen, zumal wenn die fraglichen Software-Pakete zum Selbstkostenpreis bzw. kostenlos verfügbar sind: Es ist möglich, den in der Software umgesetzten Verarbeitungsweg zu verstehen, an andere Stelle nachzubilden, ihn zu verbessern und weiterzuentwickeln (FSF Europe 2003; Reiter 2002).

Für die Bearbeitung der Erosivitätsfragestellung war es nötig, diverse Softwarewerkzeuge zu evaluieren und die Geeigneten einzusetzen. Wie im Folgenden näher beschrieben, wurde ein GIS mit einem Datenbanksystem, einer Expertensystem-Shell und diversen Zusatzprogrammen verbunden. Alle eingesetzten Produkte sind zumindest für die Forschung frei verfügbar und bei der Mehrzahl handelt es sich um Freie Software. Selbst wenn beachtliche

Finanzmittel verfügbar gewesen wären, um für jede der verwendeten Kategorien von Software ein kommerziell vertriebenes Produkt zu erwerben, wäre die Arbeit so kaum durchführbar gewesen: Die zusätzlich notwendige Einsichtnahme in die Programm-Internia - mit freier Möglichkeit zur direkten Kommunikation mit den Entwicklern - ist nur bei Freier Software möglich. Für die Umsetzung von Softwareprojekten durch Studierende z.B. an deutschen Universitäten sowie in Schwellenländern wie Südafrika ist die Möglichkeit der freien Weitergabe der Software sehr attraktiv, da so die beschränkten finanziellen Mittel in die Rechnerinfrastruktur investiert werden können.

Durch die Erzeugung von frei verfügbaren Softwareumgebungen als Dienstleistung, die von CD/DVD unabhängig der Konfiguration des Wirtscomputers ablaufen können, ergeben sich neue Optionen für den Einsatz von Rauminformationen (Knopper 2003).

Die GISIX-CD zu dieser Arbeit (beiliegend, siehe auch Anhang I) demonstriert dies, da außer dem Text dieses Dokuments und Animationsprodukten ein vollständiges nutzbares GIS mit einem Teil der bearbeiteten Raumdaten zur Verfügung steht.

6.2 Die Software-Infrastruktur des SAWS zur Radardatenverarbeitung

Das vom SAWS eingesetzte 'Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting'-System (TITAN) (Wiener 1993) verarbeitet die Radarrohdaten: Es wandelt sie in Standard-Datenformate, identifiziert Sturmwellen, verfolgt diese und liefert Kurzzeit-Prognosen über deren Zugbahnen. Die Software läuft auf UNIX/Linux-Rechnern unter der graphischen Oberfläche X-Windows. Für Forschungszwecke wird es von den Entwicklern kostenfrei weitergegeben, wie es auch bei der Nutzung durch die südafrikanischen Institutionen der Fall ist. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung einer Sturmtracking-Software der Firma CloudQuest (Kapitel 6) durch das US National Centre for Atmospheric Research (NCAR), USA.

TITAN wird unter anderem in den USA, Australien, Frankreich, Italien und Südafrika eingesetzt¹ (Mather u. a. 1997). Beim SAWS wird TITAN außer als Analysewerkzeug zur automatischen Verarbeitung der eingehenden Daten (der Radarstationen) auch zur Erstellung von Folgeprodukten und Graphiken verwendet. Die Prozesskette zur Erzeugung der für diese Arbeit vorliegenden Radardatensätze wird nun beschrieben:

¹E-mail Mitteilung von Dr. Mike Dixon, Februar 2003

6.2.1 Stufen der Datenaufbereitung

Dieser erste Verarbeitungsschritt ist wichtig, weil aus den Ursprungsdaten gemittelte, geometrisch veränderte Produkte erzeugt werden, aus denen nicht mehr auf die originalen Meßdaten geschlossen werden kann. Diese neu erzeugten Datenprodukte bilden die Basis für weitere Verarbeitung hin zur Gewinnung von Erosivitätsparametern (siehe Abbildung 6.3).

Sphärische Koordinatendarstellung Die aus den Rohdaten der einzelnen Radarsysteme gewonnenen Reflektivitätsdaten werden in sphärischen Koordinaten als Plan Position Indicator (PPI)-Daten aufgezeichnet, wobei es sich um Schichten ineinander liegender Halbkugeln handelt ('halbe Zwiebel')². Jede Schale setzt sich wiederum aus *gates* (Alternative Bezeichnung: *bins*) der gleichen Abmessungen zusammen ('Iglu'). Wie im Kapitel 5 beschrieben, sind diese in der Nähe des Radars entsprechend klein, mit zunehmender Distanz und Schalenumfang wachsen sie jedoch: In 150km Distanz haben die gates bereits eine Ausdehnung von 3.75km erreicht (METSYS 2003).

Wandlung in kartesische Darstellung Für die Darstellung in Kartenform erfolgt eine Projektionswandlung von PPI in eine kartesische Projektion durch den *DISPLACE*-Algorithmus (Terblanche 1996). Dabei werden die PPI-*gates* (*bins*) zu Punktmesswerten in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem aufbereitet. So wird aus der hemisphärischen Datenorganisation ein leichter mit anderen Raumdaten kombinierbares Format in Form eines rechteckigen dreidimensionalen Quaders erzeugt. Die Inhalte (Reflektivitätswerte) der gates werden zu einem Stapel von zweidimensionalen Kartenrastern von Raumpunkten bzw. einem Raumvolumen von Voxeln gewandelt (Terblanche 1997).

Die neue Darstellungsform wird als CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) bezeichnet (METSYS 2003). Da bei der Aufbereitung eine CAPPI-Informationseinheit aus acht PPI-Informationen erzeugt wird, lässt sich anhand der CAPPI-Werte nicht mehr auf die ursprünglichen Meßwerte schließen.

Archivierung Die nunmehr als CAPPI organisierten Reflektivitätsdaten müssen für die weitere Nutzung und Archivierung als digitale Daten gesichert werden. Dafür wird das *Meteorologic Data Volume (MDV)*-Format eingesetzt:

MDV ist ein sehr flexibles Format und unterstützt eine Vielzahl von Zahlenformaten und Kompressionsansätzen. Es eignet sich besonders zur Aufbereitung von drei- und mehrdimensionalen Daten (Dixon 1997).

²von 600 mm Dicke

Das Potential des MDV-Formats wird bei den durch TITAN kodierten CAPPI-Daten jedoch nur teilweise genutzt, wie in Anhang B.1 näher beschrieben wird.

6.3 Geographische Informations-Systeme

In der nächsten Verarbeitungsstufe werden die Spezialfunktionen von TITAN zum Management von Radarstationen nicht mehr benötigt. Zwar beinhaltet TITAN Visualisierungs- und bedingte Importmöglichkeiten für Raumdaten, jedoch sind diese Funktionen bei einer universell einsetzbaren Software besser ausgeprägt. Dagegen kann dafür der Leistungsumfang eines professionellen GIS mit komplexen Datenverschneidungs- und Darstellungsmöglichkeiten für die weitere Verarbeitung eingesetzt werden (Truelson 2001).

6.3.1 Geographical Resources Analysis Support System GIS (GRASS)

Mit dem geographischen Informationssystem GRASS GIS ist ein solches professionelles GIS als Freie Software verfügbar (GRASS ITC-Developer Team 2003; Reiter 2002). Die Entwicklung von GRASS begann bei den US Army Corps of Engineers Research Laboratories (US Army CERL 2003) und wurde danach auf universitärer Ebene gepflegt (GRASS Entwicklergruppe Hannover 2003; GRASS Developer Team, Baylor University 2003). Seit 1999 hat es sich mit Unterstellung unter die GNU Public Licence (FSF Europe 2003) zu einem der zehn größten Freien Software-Projekte entwickelt. Es muss zwischen den beiden Versionen GRASS4.x und GRASS5.x unterschieden werden: Die GRASS4.x-Versionen sind die Vorgänger der GRASS5.x-Reihe (seit 1999 ist GRASS4.3 stabil) und erlauben lediglich die Verarbeitung von ganzzahligen Werten.

Radarmeteorologische Anwendungen von GRASS

Vergangenheit Erste Experimente zur Nutzung von Radardaten in GRASS erfolgten schon in den 1990er Jahren in den USA und gipfelten im GRASS4 Modul r.stage3. Diese Entwicklung blieb jedoch experimentell. Neuere Ansätze in den USA erfolgten unabhängig davon (O'Donnell 2002).

Aktuelle Entwicklungen im südlichen Afrika Beim SAWS wird GRASS von der METSYS Gruppe für Forschungszwecke und zur Erzeugung von Bildprodukten für deren Internetpräsenz eingesetzt. Die steigende Zahl von lokalen Software-Spiegeln der GRASS Software-Archive im südlichen

Afrika³ belegt den regionalen Bedarf in Forschung, Lehre und Wirtschaft nach GIS-Funktionalitäten .

Verwendete GRASS-Module in dieser Arbeit Die Umsetzung der GIS-Funktionalität erfolgt bei GRASS in der für UNIX-Systeme typischen Weise: Einzelne, voneinander unabhängige Programme greifen als sogenannte 'Module' auf eine einheitliche Datenhaltung zu. Für die Verarbeitung von Radarreflektivitäts- und anderen Geodaten werden GIS-Module über den GRASS-Kommandozeileninterpreter (Shell) ausgeführt. Die Bündelung der erarbeiteten Verarbeitungsschritte zu neuen GIS-Modulen erfolgt in Form von Perl- und Unix-Shell-Skripten. Sie steuern auch die Kommunikation mit den Zusatzkomponenten, wie etwa den Datenbank- und Expertensystemen. Eine Übersicht über die neu entwickelten Module und ihren Leistungsumfang findet sich im Anhang B.2.

6.3.2 Visualisation und Kartierung thematischer Produkte

Datenlage Für Südafrika sind eine große Zahl von Raumdatenquellen verfügbar. In dieser Arbeit werden digitale Daten des südafrikanischen Water Research Council, des Departments for environmental affairs and tourism (GisLab 1996), sowie Landsat TM-Szenen aus dem SAFARi2000-Projekt (Swap und Annegarn 1999) und digitale Geländemodelle verwendet (Abbildung 6.1). Die so verfügbaren Daten können mit dem GIS in verschiedene Kartendarstellungsformen umgesetzt werden:

zweidimensionale Kartenprodukte (2D) Ähnliche wie im TITAN-System lassen sich zweidimensionale Darstellungsformen nutzen. Durch die bei Geoinformationssystemen gegebene größere Flexibilität und Palette der verfügbaren Werkzeuge bieten sich mehr Freiheitsgrade als bei TITAN (Beispiel: Abbildung 6.1).

pseudo-dreidimensionale Darstellung (2.5D) Bei diesen Visualisierungsformen wird die über die Fläche verteilte Menge von Attributwerten als Höheninformation interpretiert und in Form von geschummerten Ansichten (mit Schattenwurf) dargestellt.

dreidimensionale Visualisierung (3D) Dreidimensionale Darstellungen können in GRASS durch die NVIZ- und G3d-Module erzeugt werden. Diese Arbeit beschränkt sich auf den Einsatz von NVIZ (Beispiel: Abbildung 6.2)(Mitasova 1999).

Animationen (> 4D) Durch Kombination der GIS-Komponente mit zusätzlichen Programmen (GIFSICLE, MPG-Encoder) können die im

³In Namibia und Südafrika, Stand 2002

GIS erstellten Karten zu Animationsfilmen von Zeitreihenentwicklungen kombiniert werden (Beispiel: Abbildung 9.3).

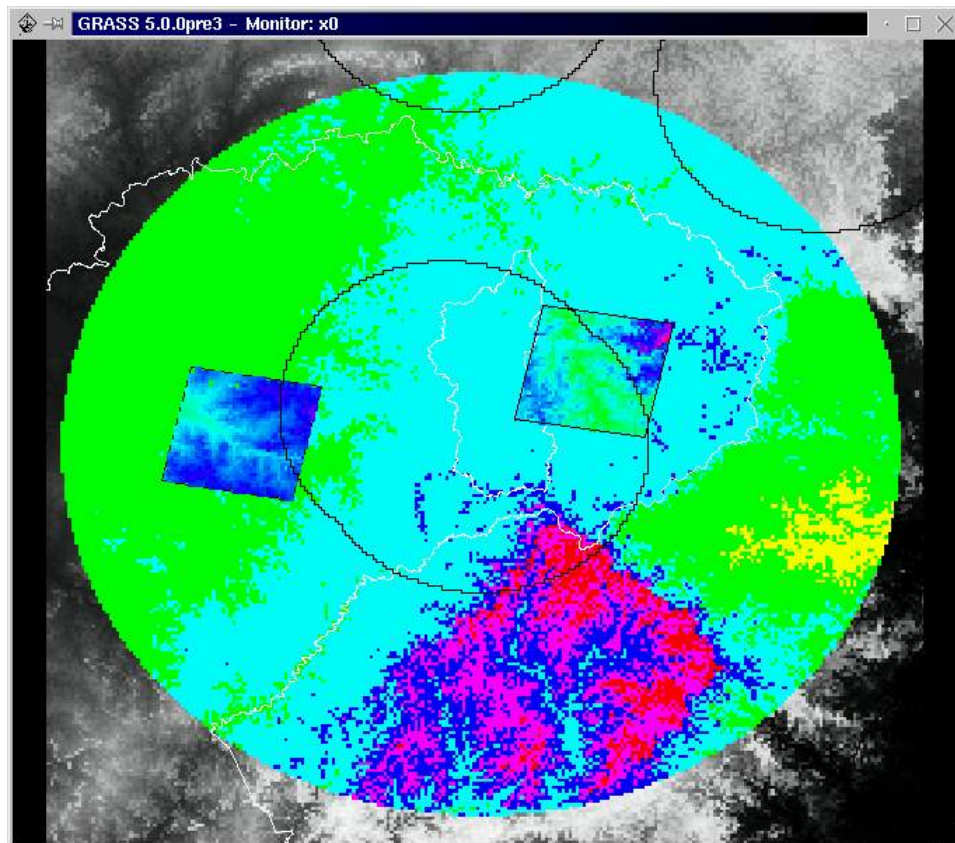


Abbildung 6.1: Beispiel für die Nutzungspotentiale von Raumdaten: Vor dem Hintergrund des GTOPO30-Geländemodells sind die Umrisslinien der Provinz Freestate und des Einzugsgebiets Liebenbergvlei in weiss eingezeichnet. Darüber liegen die überlappenden 100km- und 200km-Radien der beiden im Liebenbergvlei verfügbaren Wetterradarstationen. Im Norden sind die 100km-Radien zweier Stationen aus dem Ballungsraum Witwatersrand teilweise dargestellt. Die räumliche Auflösung der Darstellung liegt bei ca. $400 \cdot 400$ km.

Die beiden ausgewiesenen rechteckigen Teilgebiete entsprechen den Regionen, für die hochauflösende Geländemodelle (ASTER-Daten) verfügbar sind. Im Westen ist dies die ASTER Granule 20020522104650, im Osten Granule 20020411152824 (Stand Mai 2003).

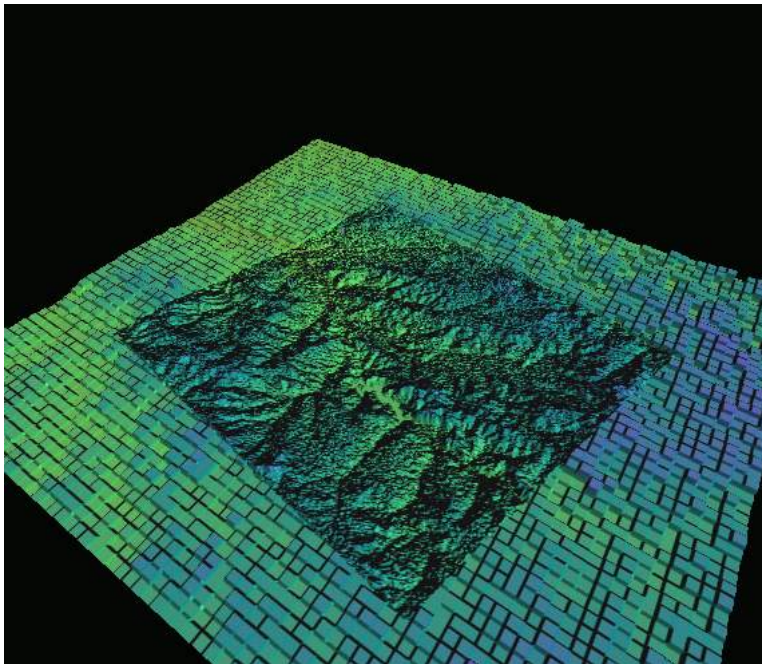


Abbildung 6.2: Beispiel für die Qualität von Geländemodellen, die aus ASTER-Datensätzen abgeleitet wurden. Hier wurde ein ASTER-Geländemodell (Granule 20020522104650) mit 30m Pixel-Auflösung in das frei verfügbare GTOPO30-DEM mit einer Auflösung von ca. einem $1km^2$ gelegt. Die Visualisierung wurde durch das GRASS-Modul NVIZ durchgeführt.

6.3.3 Die Faktoren Zeit und Zugriff für die Verarbeitung

Wenn der Vorteil der unmittelbaren Verfügbarkeit (*Nowcasting*) der Radar-daten für weitere Nutzungsschritte erhalten bleiben soll, muss die Verarbeitung im GIS möglichst ohne Zeitverlust erfolgen.

Die bei komplexen Verarbeitungsschritten notwendige Rechenleistung schlägt sich in der Laufzeit der Software nieder. Auch wenn bei den ständig steigenden Verarbeitungsgeschwindigkeiten durch schnellere Hauptprozessoren dieser Faktor stetig sinkt, macht die Prozessierung großer Datenmengen dennoch Überlegungen zur Optimierung nötig.

Eine effektive und umgehende Verarbeitung der Daten erfordert eine gut strukturierte Verarbeitungsstrategie und eine effiziente Datenhaltung mit möglichst wenig Redundanz.

Teilung der Arbeitslast GRASS5.0 erlaubt nicht, mehrere seiner Instanzen auf dem gleichen Rechner laufen zu lassen. Auch kann der gemeinsame Zugriff mehrerer GRASS-Instanzen über vernetzte Dateisysteme (Network File System, NFS) zu Inkonsistenzen im Datenbestand führen. Deswegen wurden alternative Lösungen erwogen.

- 'Pony'-Lösung: ein zweites GIS wird durch eine GRASS4.3 Installation mit einem Teil der Aufgaben betraut ⁴.

Der geänderte interne Komprimierungsalgorithmus der neuen GRASS5 Versionen und die Beschränkung von GRASS4.x auf Ganzzahlwerte relativieren jedoch die Einsatzmöglichkeiten dieser Lösung.

- Das Verlagern von zeitintensiven Prozessen in einen Rechnercluster von mehreren Linux-Rechnern ist eine vielversprechende Option, da nur eine GRASS-Version als Frontend laufen muss und sich die einzelnen GRASS-Prozesse, wie auf einer Ein-Prozessor-Lösung, nicht behindern. Diese Lösung wurde mangels verfügbarer Cluster oder Multiprozessorsysteme verworfen, die Aufstellung einer eigenen Rechnerfarm hätte den zeitlichen und finanziellen Rahmen der Arbeit überstiegen.

Da die nötigen Radar-Daten für die Untersuchung der Erosivitätsfragestellung retrospektiv benutzt wurden (Kapitel 9), wurden diese Ansätze zur Beschleunigung der Produktion erster, prototypischer Analyseergebnisse letztendlich nicht umgesetzt.

Möglichkeiten zur Erstellung von Endprodukten

Unabhängig von den vorgestellten Visualisierungsmöglichkeiten innerhalb der GIS-Umgebung stellt sich die Frage, in welchen Formen die abgeleiteten Datenprodukte potentiellen Nutzern verfügbar gemacht werden können.

Die Erzeugung von ausgedruckten Karten oder Tabellen stellt eine konventionelle Lösung dar, die durch den flüchtigen Charakter der aktuellen Radarinformationen jedoch nur bedingt einsetzbar ist. Dagegen bieten sich Computergraphiken und Animationen für die Verbreitung auf Computermedien an. Für die Nutzung der Rauminformationen im WorldWideWeb können sie als Graphiken in Markup-Kodierung mit Hyperlinks versehen werden. Letztlich bietet sich auch die Option, die durch das GIS graphisch aufbereiteten Zahlen- und Textsequenzen in ein Datenbanksystem zu übertragen.

Umsetzung in GRASS In GRASS wird die Ausgabe von Kartenprodukten und anderen Darstellungsformen durch sogenannte *Dri-*

⁴Die Pony-Lösung hat ihren Namen von Zusatzflaschen im Tauchsport, den Pony-Flaschen, und basiert auf einer einfachen Idee: Zwar darf nicht mehr als eine GRASS5.0 bzw GRASS4.3-Version auf einem Rechner laufen, der parallele Betrieb jeweils einer Programminstanz ist jedoch möglich.

ver gehandhabt. Es existieren spezialisierte Driver für unterschiedliche Ausgabeprodukte, wie etwa unterschiedliche Graphikformate und Markup-Darstellungen, die auch in dieser Arbeit intensiv genutzt werden.

Probleme der Archivierung Die in GRASS5.0 verfügbare Datenbank-Funktionalität reicht für die Verarbeitung und Archivierung der aus den Radardaten abgeleiteten Informationen nicht aus⁵. Dieser Engpass wird durch den Einsatz eines externen Datenbanksystems behoben: Die Notwendigkeit, nach erfolgter Prozessierung auch die aus den Reflektivitätsdaten abgeleiteten Rauminformationen zu nutzen, erfordert den Einsatz eines Datenbanksystems, da die Verfügbarkeit der Daten in einem insularen GIS einem Flaschenhals entspräche: Die unter beachtlichem Infrastrukturaufwand gewonnenen Informationen sollen einem großen Publikum verfügbar gemacht werden.

Über die ODBC-Schnittstelle in GRASS5.0 lässt sich prinzipiell jede Datenbank nutzen, für die ODBC-Treiber zur Verfügung stehen. Dies ist bei allen verbreiteten Open Source Datenbanksystemen wie MySQL und PostgreSQL der Fall, ebenso bei proprietären Produkten.

Für diese Aufgabe wird in dieser Arbeit PostgreSQL, ein Objektrelationales Datenbank Management System (ORDBMS), eingesetzt (PostgreSQL 2003).

Erweiterte Zugriffsmöglichkeiten Im Vergleich zu anderen Datenbanklösungen verfügt PostgreSQL über einen erweiterten Befehlsumfang im Bereich raumbaumbasierter Abfragen ('spatial queries'). Damit bieten sich alternative Zugriffsmöglichkeiten auf die gewonnenen Rauminformationen in der Datenbank (Momjian 2000).

Die Informationen können auch in weiteren Datenbanken genutzt werden, von anderen GIS-Systemen importiert und über geeignete WWW-Schnittstellen verfügbar gemacht werden⁶.

Umgesetzte Anbindung von GIS und Datenbanksystem Basierend auf der ODBC-Funktionalität von Perl wurde bei der eigenen Entwicklung von Programmcode ein alternativer Weg zu den mittlerweile verfügbaren spezialisierten GRASS-Befehlen

⁵GRASS verwaltet bei Rasterdaten zusätzlich zu den Koordinaten nur einen einzigen Attributwert.

⁶Mit dem PostGIS-System (PostGIS Project 2003) ist eine GIS-ähnliche Schnittstelle als Freie Software verfügbar.

(GRASS ITC-Developer Team 2003) zur direkten Anbindung von PostgreSQL beschränkt: Bei der Verfassung dieser Arbeit befanden sich diese noch in der Entwicklung. Eine Übersicht über die entwickelte Funktionalität wird in Anhang A gegeben.

6.3.4 Das Datenbanksystem

Die Tabellenstruktur der verwendeten Datenbankumgebung Das umgesetzte Datenbanksystem ist aus drei Tabellen aufgebaut:

KEEP In KEEP werden die Meta-Daten der verarbeiteten MDV-Datensätze vorgehalten: Aufzeichnungsdatum und -zeit dienen als Schlüssel/Referenzen und auch für die Index-Bildung der anderen Tabellen. Dazu werden Quicklook-Graphiken für eine schnelle Übersicht über die Inhalte der Daten vorgehalten.

STORMS Diese Tabelle enthält Informationen über einzelne Sturmzellen: Quicklooks im GIF-Format und thematische Klassifikationsergebnisse in Textform.

CAPPIDATA Sie enthält die im GIS aufbereiteten, georeferenzierten Reflektivitätsdaten als komprimierte ARC-Datensätze und Meta-Informationen für späteren Zugriff auf die Grunddaten.

Archivierung und Datensicherheit Der Einsatz eines Datenbanksystems dient auch der Datensicherheit. So lassen sich auf einfache Weise Datenarchive aus dem aktuellen Datenbestand ableiten, die später wieder in Datenbanksystemen und auch für GIS verfügbar sind. Damit kann einfacher auf die Informationen zugegriffen werden, als es bei einem 'offline' archivierten Stapel von CDROMs mit komprimierten MDV-Datensätzen der Fall ist.

6.4 Zusammenfassung: Das Ganze übersteigt die Summe der Teile

Wie gezeigt wurde, existieren frei verfügbare Softwarelösungen für die einzelnen unmittelbaren Teilaufgaben der Aufzeichnung und Verarbeitung von Wetterradar- und Wetterdaten.

Zwar wäre es möglich, die vorgestellten, auf ihre Domänen spezialisierten Programmpakete TITAN und GRASS jeweils um die im Vergleich zum anderen Paket fehlenden Funktionalitäten zu erweitern, dies wäre jedoch mit bedeutendem Entwicklungsaufwand verbunden. Unter der Annahme, dass die Durchführung des Verarbeitungsprozesses, also die Methode im Vordergrund steht und unter der Prämisse des freien Zugriffs auf die Interna der

Softwarepakete, erweist sich die *Kombination* der Systeme für den Verarbeitungsprozess als relativ unaufwendiger und effektiver Ansatz. Eine Übersicht der jeweiligen Stärken von TITAN und GRASS wird in Tabelle 6.1 gegeben.

Dieser Ansatz der Bündelung von vorhandenen isolierten Funktionalitäten wird auch bei der Anbindung der Datenbankkomponente verfolgt und im folgenden Kapitel bei der Betrachtung von Expertensystem-Shells weitergeführt.

Option	TITAN	GRASS
Linux OS	+	+
Windows OS	-	+
MDV-Lesen	+	+
MDV-Schreiben	+	-
Auxiliardaten	(+)	++
3d Darstellung	-	+
Schnitte	++	(+)
Sturmisolierung	++	+
Sturmtracking	++	-
Prognose	++	-
Interpretation	+	++
Simulation	(+)	++
Statistik	+	+

Tabelle 6.1: Übersicht über die in TITAN und GRASS verfügbaren Funktionalitäten

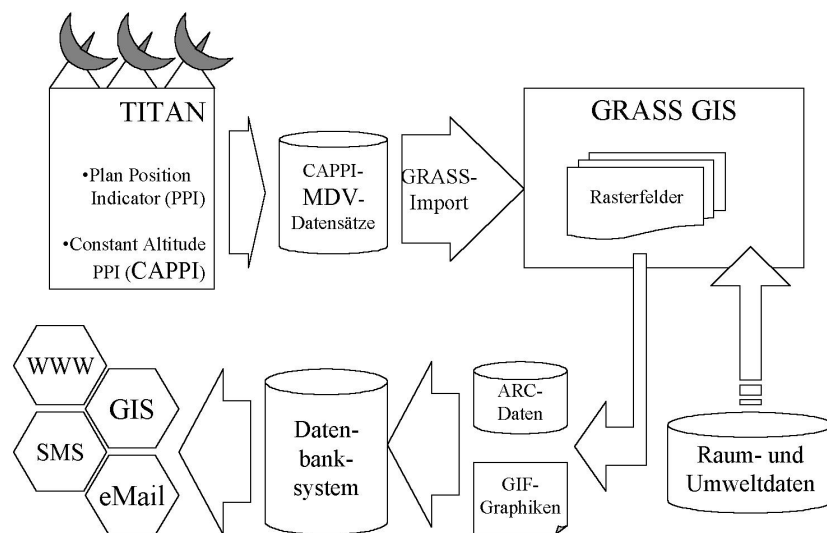


Abbildung 6.3: Übersicht über den beschriebenen, durch die Kombination von TITAN und GRASS GIS realisierten Verarbeitungsprozess für Wetterradar-Daten.

Kapitel 7

Nutzung der südafrikanischen Reflektivitätsdaten

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die in Südafrika aufgezeichneten Reflektivitätsdaten beschrieben und die Nutzungsmöglichkeiten durch ein Geographisches Informationssystem umrissen. Nun wird auf die in der Praxis auftretenden Eigenheiten und Probleme eingegangen, die sich bei der Nutzung der vorhandenen Datenbasis ergeben.

7.1 Nutzungsmöglichkeiten der Informationsinhalte der Reflektivitätsdaten

In Kapitel 5 wurden die theoretischen Beschränkungen bei der Erfassung von Hydrometeoren in der Atmosphäre durch Radar beschrieben. Nun werden die bei den südafrikanischen Daten real auftretenden Phänomene vorgestellt.

7.1.1 Probleme bei der Datenerhebung

Bei der Datenaufzeichnung durch die Radarstationen schlagen sich regelmäßig Artefakte in den Datensätzen nieder, die sowohl aus Systemfehlern, als auch aus der aktuellen Umweltsituation des betrachteten Gebietes stammen:

Geometrie probleme Bei den von einem einzelnen Radar aufgezeichneten CAPPI-Datensätzen sind die bodennahen Datenlagen mit zunehmender Distanz zur Antenne frei von Informationsgehalt. Dies liegt nicht an fehlendem 'Wetter', sondern resultiert aus den notwendigen Anstellwinkeln

der Radarantenne für das unterste erfasste Höhenniveau (Kapitel 6). Diese CAPPI-Raumvolumen sind somit nicht *frei* von Hydrometeoren, es kann allerdings *keine Aussage* über die Tropfenverteilung gemacht werden (Siehe auch Abbildung 7.4). Weiterhin steigt mit zunehmender Distanz zum Radar die Größe der aufgelösten Raumvolumen: Damit wächst auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Volumen nicht vollständig durch Hydrometeore ausgefüllt wird. Dies führt zu falschen Skalierungen bei der Transformation der Echos zu Reflektivitätswerten.

Signalerosionseffekte Ein weiterer Grund für eine kritische Betrachtung der Daten sind die zu erwartenden Signalerosionseffekte (Attenuation), bei denen die Echos entfernt gelegener Wetterphänomene durch näher am Radar gelegene Reflektivitätsfelder gemindert werden. Bei Komposit-Daten fallen solche Signalerosionseffekte nur bei Flächen auf, die durch mehrere Radarstationen erfasst werden. Diese Phänomene sind in dieser Verarbeitungsphase nicht korrigierbar und der Informationsgehalt des Datensatzes ist kritisch zu betrachten¹.

Effekte von Oberflächenechos Aufgrund der südafrikanischen Topographie beinhalten die Reflektivitätsdaten teilweise Störechos hochgelegenen Geländes. Dieser 'ground return' ist beispielsweise beim MRL5 Radar in Form der Rooiberge im Südosten der regionalen Reflektivitätsdatensätze ständig vorhanden (Siehe Abbildung 7.4). Sofern meteorologische Reflektivitätswerte über solchen Regionen aufgezeichnet werden, sind sie durch das Geländesignal verfälscht. Die Reduktion der Daten um Korrekturfaktoren ist prinzipiell möglich und wird in den Kapiteln 5 und 9 betrachtet. Weiter können noch Strahlbiegungseffekte bei Inversionen in der Atmosphäre auftreten, bei denen die Reflektivitätsdaten nur kurzzeitig Bodenechos enthalten.

Sonnenstandsphänomene Bei vielen der installierten Radars lassen sich in den einzelnen Datensätzen Sonnenaufgangs- und Untergangsstreifen als vom Radar ausgehende, sich über mehrere CAPPI-Lagen erstreckenden radiale Keile beobachten. Dies erklärt sich durch den Effekt der über dem Horizont stehenden Sonne, welche die empfangenen Echo-Informationen verfälscht. Beispiele sind in den Abbildungen 7.1, 7.2 und 10.10 dargestellt:

¹(Auch) wegen dieser Effekte scheint es sinnvoll, die CAPPI-Daten nicht bis zur maximalen erzeugten Distanz von 200km zu benutzen.

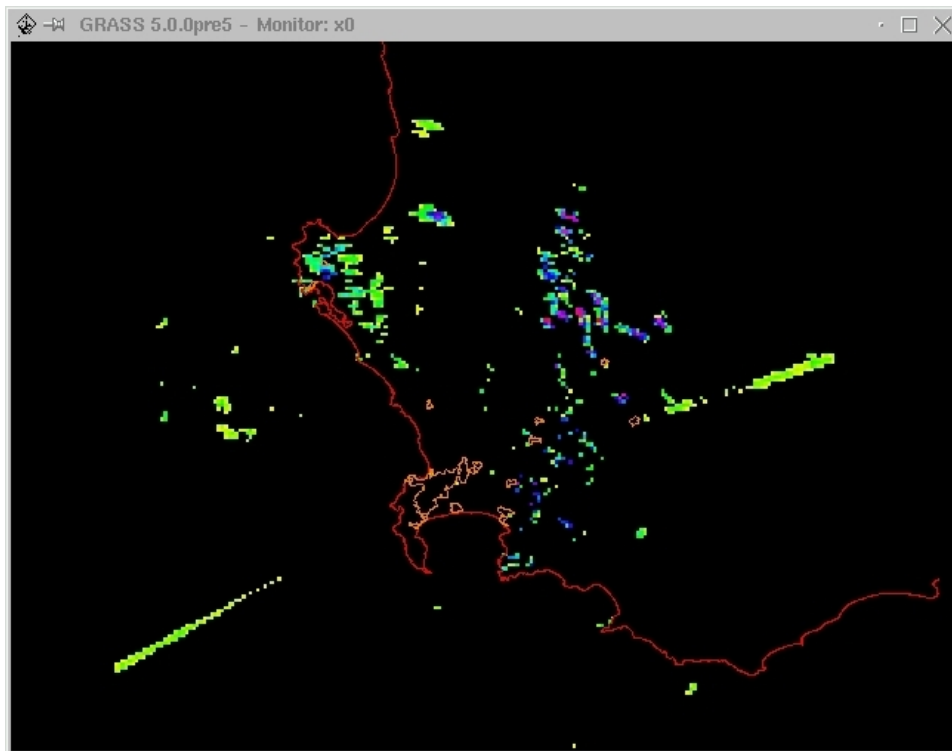


Abbildung 7.1: Beispiel für Sonnenstandseffekte des Kapstadt-Radar vom 30. Dezember 2001 (Tagessumme): Die am Morgen im Osten und am Abend im Westen vorkommenden Keile schlagen sich in den Reflektivitäts-CAPPI (Abbildung 7.2) nieder. Sie sind visuell in den CAPPI-Lagen und im CFAD-Diagramm (Contoured Frequency Altitude Display) klar erkennbar und räumlich wie zeitlich eng umrissen, jedoch variieren sie in der Position³.

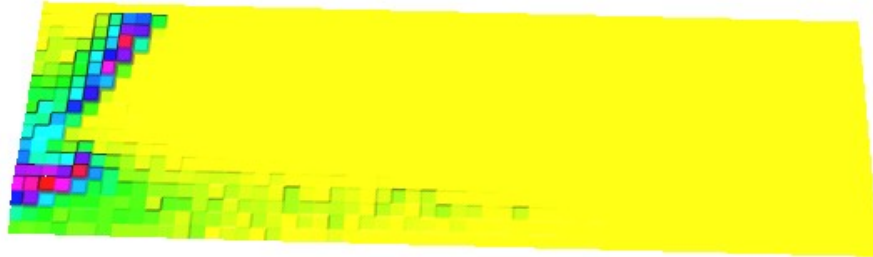


Abbildung 7.2: Beispiel für Sonnenstandseffekte in Contoured Frequency by Altitude Diagrammen (CFAD): Das sich in der pseudo-dreidimensionalen NVIZ-Darstellung in der oberen Diagrammhälfte schräg nach oben abzeichnende Band ist ein deutliches Zeichen für den morgendlichen Sonnenstandseffekt. Eine detaillierte Beschreibung von CFAD-Diagrammen wird im Anhang B.6 gegeben. Die Dimension des Diagramms betragen in y-Richtung 18 Stufen (CAPPI-Höhenstufen), und 65 Einheiten in x-Richtung (dBZ-Werte).

7.1.2 Probleme mit zusammengesetzten Datenkompositen

Bei der Nutzung der Reflektivitätsdaten für Regionen, die sich aus den Erfassungsgebieten mehrerer Radarstationen zusammensetzen und besonders jene der landesweiten Daten-Kompositen sollten die zuvor geschilderten Eigenheiten für die Weiterverwertung bekannt sein. Andernfalls kann es leicht zu Fehlinterpretationen kommen.

Entstehung informationsloser Gebiete Besonders wichtig sind dabei die schon erwähnten informationslosen unteren CAPPI-Lagen der äußeren Zonen der einzelnen Radars: Bei Sturmzellen, die sich aus dem Erfassungsgebiet eines Radars in das einer zweiten Radarstation bewegen, können die tatsächlich vorhandenen Reflektivitätswerte der unteren CAPPI-Lagen teilweise unsichtbar werden. Dieser Effekt wurde exemplarisch für den Erfassungsbereich des MRL5-Radars betrachtet, in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellt. Sie werden im übernächsten Abschnitt genauer betrachtet.

Radar-Verfügbarkeit Ein zusätzliches Problem entsteht aus den Verfügbarkeitsintervallen der Radarsysteme. Wartungsarbeiten oder Defekte resul-

tieren im Ausfall einzelner Radarstationen. Da weiterhin kontinuierlich landesweite Komposite erzeugt werden, fehlen die entsprechenden Inhalte der betroffenen Stationen. Diese zeitlich variierende räumliche Abdeckung mit Radarinformationen ist bisher nur auf der Internetpräsenz von METSYS (METSYS 2003) in den dortigen Kartenprodukten markiert: Die Einzugsgebiete aktiver Radarsysteme werden dabei grau unterlegt, was den jeweils erfassten Bereich klar ausweist. In den archivierten CAPPI-Kompositen ist diese Information dagegen nicht unmittelbar zugänglich.

7.1.3 Probleme bei der Erzeugung von Folgeprodukten aus den Daten

Wie im Kapitel 5 geschildert, erfassen meteorologische Radars per se keinen Regen. Allerdings können Niederschlagsmengen aus den aufgezeichneten Reflektivitätswerten *abgeleitet* werden.

Niederschlagsprodukte des SAWS Der südafrikanische Wetterdienst SAWS bietet für die aufgezeichneten Daten zwei Optionen für Niederschlagsinformationen an. Einmal kann man über die METSYS-Internetpräsenz (METSYS 2003) eine Tabelle einsehen, die eine grobe Interpretation der aktuellen Reflektivitätsfelder erlaubt. Die ebenfalls im WWW verfügbaren digitalen Karten mit stündlichen Werten oder Tagessummen der Niederschlagsmengen werden dagegen automatisiert aus den Reflektivitätsfeldern errechnet. Für diese Berechnung wird die Marshall-Palmer-Beziehung (Gleichung 5.7) eingesetzt. Diese empirisch abgeleitete Beziehung wurde für Niederschlag aus Stratusbewölkung ermittelt. Damit ist ihre Aussagekraft für die im südafrikanischen Binnenland oft auftretenden konvektiven Niederschlagsverhältnisse kritisch zu beurteilen. Als Grundlage des Berechnungsprozesses werden im Allgemeinen meist die Reflektivitäten von möglichst bodennahen CAPPI-Lagen eingesetzt, um den wirklich als Niederschlag fallenden Anteil der Hydrometeore zu betrachten. Da die verfügbaren Radarstationen in Südafrika jedoch für eine flächendeckende Erfassung auf Basis des untersten CAPPI-Niveaus zu weit verstreut liegen (siehe Abbildung 7.4), wurde auf das stärkste im CAPPI-Vektor verfügbare Signal (der regionalen CAPPI-Stapel) ausgewichen, was in den Grenzgebieten der Radarerfassungsgebiete notwendigerweise zur Nutzung der oberen CAPPI-Niveaus führt.

Komposit-Erstellung Erschwerend wirkt für Erosivitätsstudien die Tatsache, dass die CAPPI-Stapel aller aufzeichnenden Stationen auf 'above sea level'⁴ skaliert werden (Dixon 1997). Bei der Betrachtung der Datenkomposite ohne weitere Rauminformation wie Isohypsen wird damit eine ebene

⁴und damit nicht 'Above Ground Level' der jeweils aufzeichnenden Station.

homogene Oberfläche impliziert. Dies ist durch die Erfassung von Meeresoberflächen und die ausgeprägte südafrikanische Topographie jedoch in der Realität nicht der Fall. Die damit verbundenen Höhendifferenzen von über 1500m zwischen den einzelnen Radarstandorten wären bei der Betrachtung der Erosivität von Niederschlägen im Highveld von Interesse, können jedoch derzeit nur bei der isolierten Betrachtung der einzelnen Radars berücksichtigt werden (Tabelle F.1). Die Option, Skalierfaktoren für die in unterschiedlichen Höhenlagen befindlichen Radars einzuführen, ist nicht trivial: Wie in Abbildung 7.5 dargestellt, überlappen sich die Erfassungsbereiche gerade bei in unterschiedlichen Höhenlagen positionierten Radarstationen. Teilweise sind auch mehr als zwei Stationen betroffen. Durch die Verwendung der jeweils stärksten Reflektivität bei mehreren verfügbaren Werten pro Raumzelle kann das so entstandene Signal nur mit beträchtlichem Aufwand wieder demjenigen Radar zugeordnet werden, das es aufgezeichnet hat. Auf Möglichkeiten, die diese Situation verbessern wird im Folgenden eingegangen. Die genauen Effekte der Topographie für die einzelnen Radarstationen werden im Abschnitt G diskutiert.

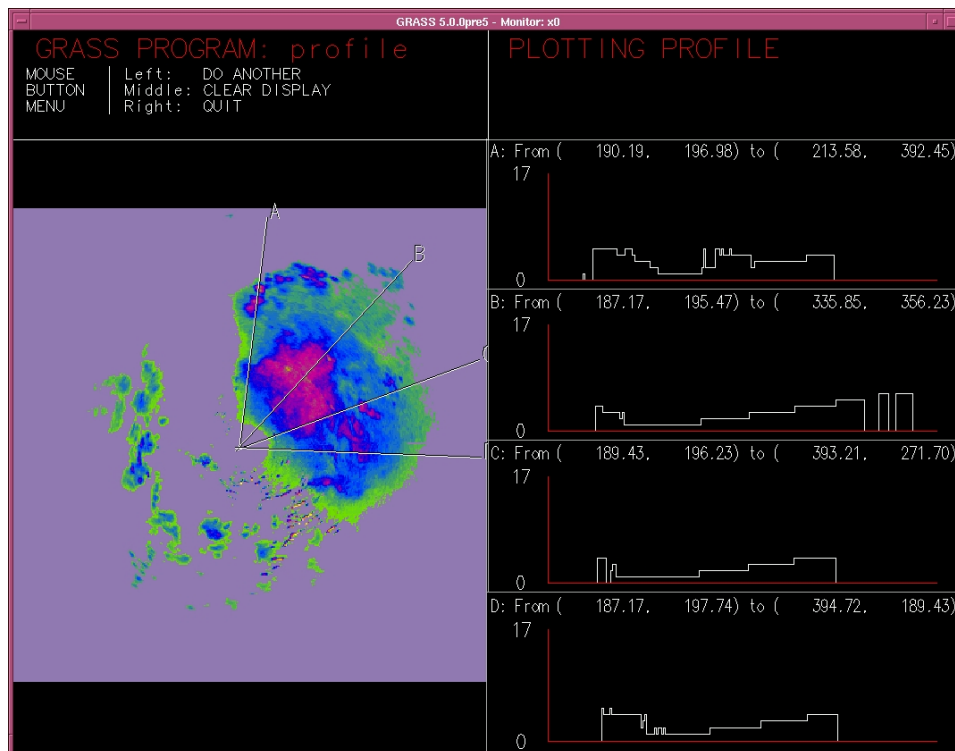


Abbildung 7.3: Beispiel für die Höhenabstufung der Informationsinhalte der MaxCAPPI-Daten: Im Hauptfenster der Darstellung ist die Maximum-Reflektivitätsinformation des MRL5-Radars vom 30. Dezember 2001, 18:58:05 Uhr, dargestellt. In den rechten Teilfenstern finden sich die zu den Schnittlinien im Hauptfenster gehörenden Querschnitte über die *Höhe* (über Grund) der aufgezeichneten untersten Maximum-Reflektivitäten. Dimension der Aufsichtsdarstellung: $400 \cdot 400 \text{ km}^2$ mit 1 km^2 Rasterauflösung.

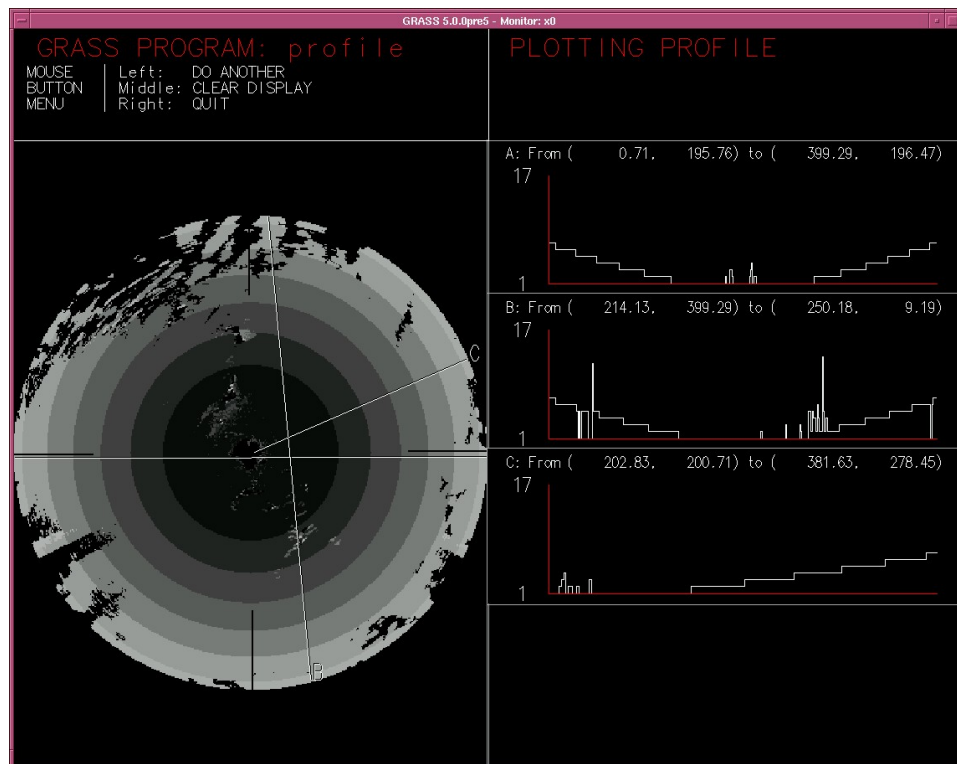


Abbildung 7.4: Darstellung der abnehmenden Anzahl von CAPPI-Lagen mit zunehmender Distanz zur Radarantenne: Für das MRL5-Radar wurden in dieser Darstellung die Höhen der niedrigsten Reflektivitäten für 24 Stunden (31.12.2001) akkumuliert. Der dadurch sichtbar werdende Effekt zeigt sich in der Aufsicht in Form von ringförmigen Zonen der untersten verfügbaren Höhe, die als CAPPIs abgebildet wird. In der direkten Umgebung des Radars sind noch alle CAPPIs vorhanden, mit steigender Distanz fallen immer mehr CAPPIs von unten nach oben weg. Der rechte Teil der Darstellung zeigt dazu noch die Profile A, B und C in Seitenansicht, um den treppenartigen Effekt zu verdeutlichen. Bei den Ausreißern in Schnitt B handelt es sich um Bodenechos von den Rooibergen, die als konstantes Störsignal in den erhobenen Daten auftreten.

Dimension der Aufsichtsdarstellung: $400 \cdot 400 \text{ km}$ mit 1 km^2 Rasterauflösung, die mittlere Streifenbreite liegt bei ca. 21 km.

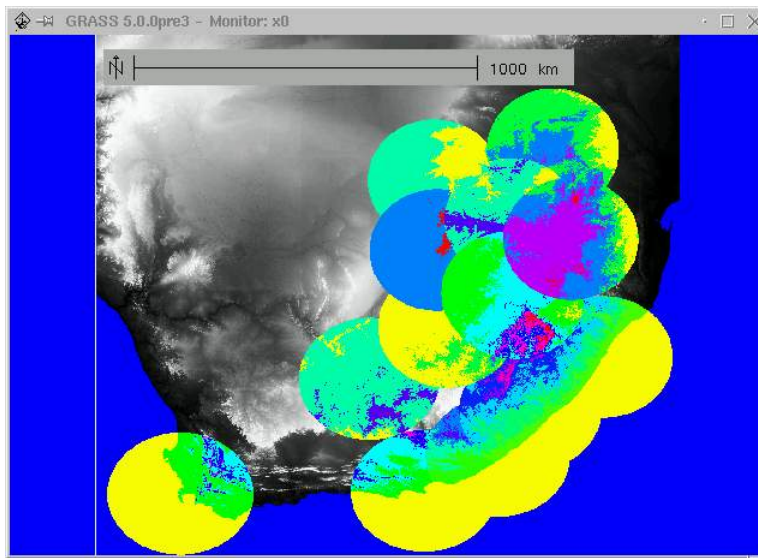


Abbildung 7.5: Suggestive Darstellungsform der in Südafrika durch Wetterradar erfassten Flächen auf Basis des GTOPO-30 Geländemodells anhand der angenommenen maximalen Signalerfassungsdistanz von 200km zu den Radarstationen. Dabei erfahren wir jedoch nichts über die variable Aussagekraft der Informationsquelle Wetterradar. Die in Falschfarben kodierte Geländestufen der von den Radarstationen *erfassten Gebiete* in 500m Höhenschritten geben jedoch einen Eindruck von den unterschiedlichen Höhenwerten.

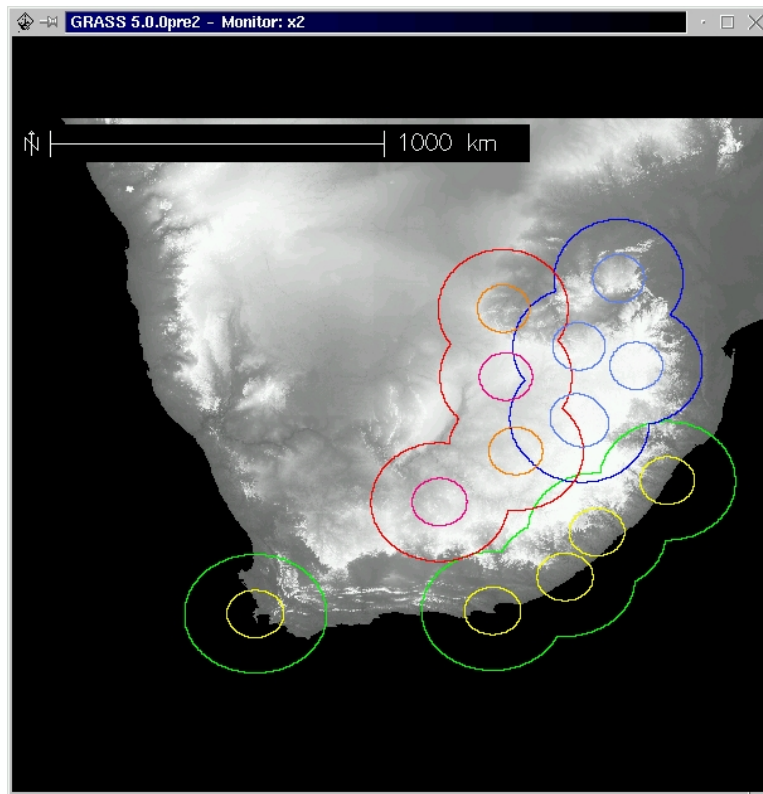


Abbildung 7.6: Darstellung der Erfassungsgebiete der südafrikanischen Wetterradarstationen auf Basis des GTOPO30-Geländemodells. Es sind die 200km- und 100km-Radien um die Stationen angetragen, um die maximalen (200km) und die akzeptablen (100km) Erfassungsbereich zu skizzieren. Die Farbwerte entsprechen den in Anhang G beschriebenen Einteilungen der Radarstationen nach den Geländehöhen der von ihnen erfassten Gebiete.

7.1.4 Datenvalidität für Endnutzer

Die vom Südafrikanischen Wetterdienst aufgezeichneten CAPPI-Daten werden bisher nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, weswegen die Fehlinterpretation durch Laien kein Risiko darstellt. Allerdings werden aus ihnen auch die thematischen Kartenprodukte erzeugt, die über die METSYS-Internetpräsenz frei verfügbar sind und sowohl privatwirtschaftlich wie in der Forschung als *Radarpluviogramme* (Seuffert 2002; Seuffert u. a. 1999) Anwendung finden.

Dabei wirken sich die die CAPPI-Daten beeinflussenden Phänomene auch auf die abgeleiteten Kartenprodukte aus, was zu Missverständnissen führen kann. Dies wird an einem Beispiel aus der Literatur belegt, um den Bedarf an *Interpretation* der abgeleiteten Produkte auch in der Forschung zu illustrieren (Seuffert u. a. 1999):

Fehlinterpretation durch Datensuggestivität Bei der Betrachtung der im Internet verfügbaren Niederschlagssummenkarte (Pluviogramm) des SAWS vom 19. November 1998 zeigten sich ungewöhnliche Wetterphänomene (Seuffert u. a. 1999; METSYS 2003). Das fragliche Radarpluviogramm des 19.11.1998 ist in Abbildung 7.7 dargestellt. An diesem Tag war das Wettergeschehen, zumindest regional, stratiform geprägt. Die dargestellte Verteilung der Niederschlagswerte scheint auf erstaunliche Symmetrien und extreme Ortsgebundenheit hinzuweisen.

Bei der Interpretation von Abbildung 7.7 kam es durch ein näher zu beschreibendes Kommunikationsproblem zu einer Fehlinterpretation der Karteninhalte.

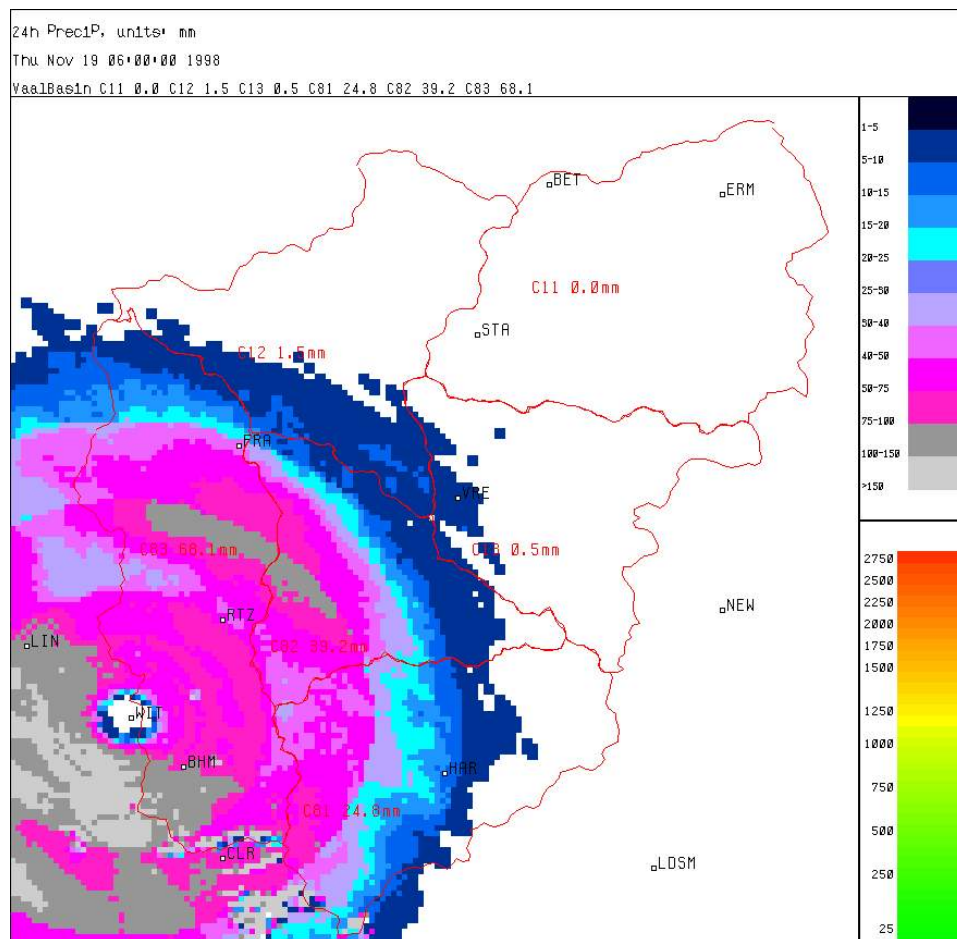


Abbildung 7.7: SAWS Datenprodukt: Abgeleitete Niederschlagssumme des 19. Novembers 1998 für das Einzugsgebiet des Vaal-Flusses. Ohne Hintergrundwissen um die Systemeigenschaften von Wetterradarsystemen scheint das 'Radarpluviogramm' ein regional stationäres, extrem symmetrisches Niederschlagsgeschehen darzustellen.

Bei dem vorgestellten Beispiel handelt es sich keineswegs um ein bisher unbekanntes hochkompaktes Niederschlagsmuster. Ein ebenfalls im Internet verfügbares, kleinmaßstäblicheres Radarpluviogramm wird in Abbildung 7.8 gezeigt und kann zur Klärung der durch den Datensatz erfassten Phänomene beitragen. Der Vergleich der Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigt, dass außerhalb des räumlich eng umrissenen Phänomens auffallend wenig Daten aufgezeichnet wurden. Die Kenntnis der Systemeigenschaften von Wetterradarsystemen (Kapitel 5) lässt den einfacheren Schluss zu, dass die kreisförmigen Niederschlagsregionen der Radarpluviogramme nicht atmosphärisch bedingt sind: In der vorliegenden Situation wurde offenbar nur mit einem einzigen Radar aufgezeichnet, das mit seiner begrenzten Reichweite nur einen annähernd kreisförmigen Ausschnitt eines weiter ausgedehnten Wettergeschehens erfasst hat.

Damit handelt es sich nicht um ein meteorologisches Phänomen, sondern um die ungeeignete Aufbereitung der verfügbaren Datenmenge zu einem suggestiven Kartenprodukt. Dabei wurde die Niederschlagsinformation mit weiteren Raumdaten⁵ überlagert, was beim Rezipienten den Trugschluss einer nicht vorhandenen Aussage der Karte auslöst: Es ist ein sehr großer Unterschied, ob über einer Raumzelle *keine Reflektivitäten gemessen* wurden, oder *die Messung nicht erfolgt ist*. Zur Vermeidung ähnlicher Fehlinterpretationen anderer Radardatenprodukte wird das Geschehen nun aus der Sicht der Datenerzeuger und Nutzer betrachtet, um den Fehler der aufgetretenen Informationsübermittlung besser herauszuarbeiten.

Datenerzeuger Die Hersteller und Vertreiber der Kartenprodukte können aufgrund ihres Fachwissens die erstellten Karten richtig interpretieren. Unter Einbezug radarmeteorologischen Fachwissens sind die konzentrischen Kreise ein Indikator, dass die Daten von einem einzelnen Radar aufgezeichnet wurden. Damit wird gleichfalls der Radarstandort im Südwesten der Kartendarstellung (Abbildung 7.7) bestimmt. Auf der Meta-Ebene wird nun vorausgesetzt, dass der Anwender über die Fehlerlastigkeit des Mediums Radar informiert ist, also den kreisbogenförmigen Rand des Erfassungsbereichs des Radars auch als Grenze für erfasste abgeleitete Niederschlagswerte versteht.

Anwenderseite Nutzer der Kartenprodukte gehen davon aus, dass der Informationsinhalt der Kartendarstellung im gesamten dargestellten Gebiet einheitlich ist. Im Beispiel würde dies bedeuten, dass drei Kategorien dargestellt werden müssten:

- Gebiete, in denen Niederschlag aufgezeichnet wurde
- Gebiete ohne Niederschlagsspenden
- Gebiete, über die keine Aussage gemacht werden kann.

⁵(hydrologische Einzugsgebiete)

Entstandenes Übersetzungsproblem Kartendarstellungen sind ein Transportmedium für Rauminformation und Umweltwissen. Die für die Umsetzung gewählten Kartensymbole müssen für den Adressaten verständlich gewählt sein. Dieser Übersetzungsschritt ist sehr wichtig. Offenbar ist eine Zwischenstufe der *wissensbasierten* Übersetzung der verfügbaren Radarinformation mit ihren Fehlerquellen und beschränkter räumlicher Ausdehnung notwendig. Damit kann die Abbildung der verfügbaren Daten in eine geeignete kartographische Darstellung für ein radarmeteorologisch unbedarftes Publikum geleistet werden⁶.

⁶Wie erwähnt, wird diese Übersetzung in Form graphischer Zusatzinformationen bei den Realzeit-Datenprodukten der METSYS-Webpräsenz durch die farbige Unterlegung der aktiven Radarsysteme mittlerweile geleistet (METSYS 2003).

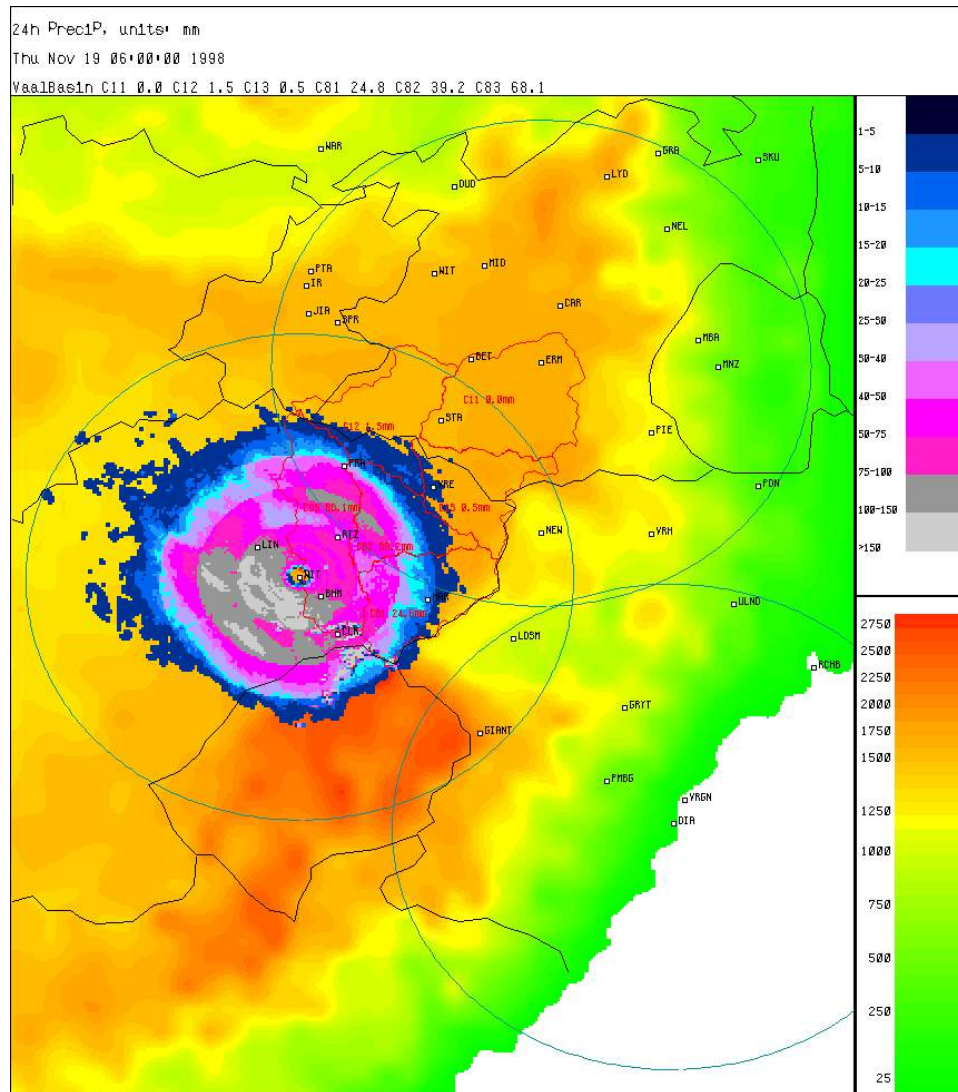


Abbildung 7.8: SAWS Datenprodukt: Abgeleitete Niederschlagssumme des 19. Novembers 1998: Zu diesem Zeitpunkt war nur das MRL5-Radar aktiv. In den von ihm erfassten unteren Höhenlagen wurden Reflektivitätswerte des Wettergeschehens aufgezeichnet. Mit zunehmender Distanz zum Radar steigt die Höhe des niedrigsten erfassbaren Niveaus, das für die Niederschlagsberechnung nutzbar ist. Dies zeigt sich in der Darstellung durch die graduelle Veränderung der dargestellten 'Kreisflächen'. Der kleinste Anstellwinkel der Radarantenne in Verbindung mit der Höhe der Wetterphänomene ergibt den Radius des kreisförmigen Gebietes, von dem Niederschlagsdaten aufgezeichnet werden. Es handelt sich nicht um ein regionales, hurricaneförmiges Wetterphänomen, sondern um einen regional eingeschränkten Ausschnitt, für den Daten verfügbar sind. Das datenfreie 'Auge des Sturms' entspricht dem Minimalabstand zur Radarstation in dessen Zentrum, unter dem keine Daten aufgezeichnet werden können.

7.1.5 Fazit

Wie demonstriert wurde, können Radarpluviogramme in ihrer Datenhaltigkeit Inhomogenitäten aufweisen, die sich bei der Verbreitung als Graphikdatei nicht aus den beigefügten Meta-Informationen erschließen. Auch beeinflussen zusätzliche Fehlerquellen die Karteninhalte, wie etwa Oberflächenechos, die auch in Abbildung 7.8 im Südwesten der datenhaltigen Gebiets auftreten und die ohne zusätzliches Wissen um die Topographie nicht von korrekten Daten zu unterscheiden sind.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Beschäftigung mit den dreidimensionalen CAPPI-Datensätzen mit Problemen verbunden ist. Im Fall des landesweiten Datenkomposits ist eine detaillierte Ableitung von hochauflösenden und verlässlichen Niederschlagswerten problematisch, solange keine zusätzlichen Faktoren zur Beurteilung des Niederschlagsgeschehens verfügbar sind. Das gilt in eingeschränktem Maß auch für die regionalen CAPPI-Daten. Aufgrund dieser Faktoren können die automatisch erzeugten Radarpluviogramme in der vorgestellten Qualität nicht als Basis weiterer Verarbeitungsschritte zur Erosivitätsbetrachtung dienen.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich schon bei den derzeit verfügbaren, inhaltlich einfach gehaltenen Kartenprodukten die speziellen Aufzeichnungscharakteristika der Radar-Infrastruktur im Endprodukt bemerkbar machen. Auch deswegen scheint es notwendig, bei der Datenerhebung Zusatzwissen über die thematischen Inhalte und die Güte des Produkts zu gewinnen und dieses, wenn nötig, auch weiterzugeben. Dies erfordert jedoch Kenntnis der vorhandenen Infrastruktur und der Dateninhalte. Es ist im Alltagsbetrieb kaum möglich, einen 'Radarmeteorologen vom Dienst' kontinuierlich an einer Hotline für Rückfragen der Anwender verfügbar zu haben. Daher muss dieses Wissen in Algorithmen abgebildet werden, um es automatisch in einem Computersystem auf den Datenstrom anwenden zu können:

7.2 Möglichkeiten der Kalibration

Wie geschildert, werden die Radarreflektivitäten über eine empirische Reflektivitäts-Niederschlag-Beziehung (Gleichung 5.7) in Niederschlagswerte umgesetzt. Für die Beurteilung der Güte eines solchen Ansatzes sind Referenzwerte notwendig: Die Kalibration erfolgt dabei meist anhand von bodengebundenen Niederschlagsmessnetzwerken (Mittermaier 1999). Für die in Südafrika bestehende Ausstattung scheinen auf den ersten Blick sehr gute Möglichkeiten zu bestehen (Dixon 1997):

Niederschlagsmessnetzwerke

Der Südafrikanische Wetterdienst unterhält seit längerer Zeit mehrere voneinander unabhängige Niederschlagsmessnetzwerke für hydrologische Studien, wie in Kapitel 4 näher beschrieben. Leider sind die archivierten Daten der einzelnen Stationen des landesweiten Netzwerks⁷ teilweise diskontinuierlich und mit Fehlern bis hin zum Verlust der strukturellen Integrität der Datenarchive belastet. Mittlerweile steht auch der SAWS selbst dieser Datenquelle skeptisch gegenüber⁸. Als Alternative zu den Daten des landesweiten Messnetzwerks können zur Kalibration der Radarreflektivitäten Messwerte der engmaschigen regionalen Messnetzwerke im Liebenbergvlei genutzt werden.

⁷Automatic Weather Station Network (AWS)

⁸Mitteilung von R. Burger, METSYS, 2002.

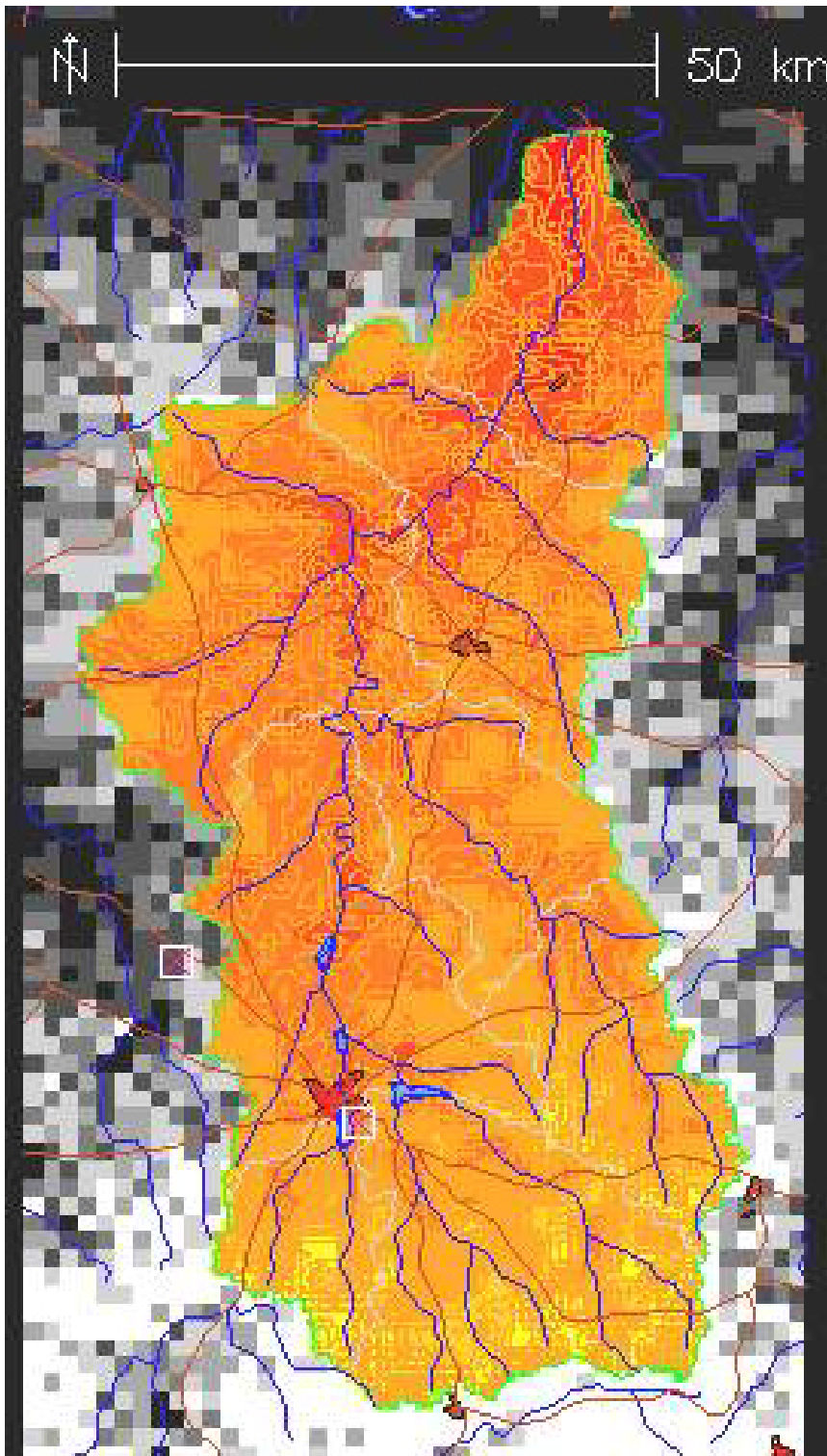


Abbildung 7.9: Ein möglicher Kartenhintergrund zur Überlagerung mit Niederschlagsdaten für die Region des Liebenbergvleis: Auf einem gering auflösenden Geländemodell (GTOPO30 in Grauwerten) sind Siedlungen (rot), Straßen und Wasserkörper, abgeleitete Isohypsen (orange), sowie die Standorte der beiden regionalen Radarstationen (Quadrat-Signatur) ange-tragen.

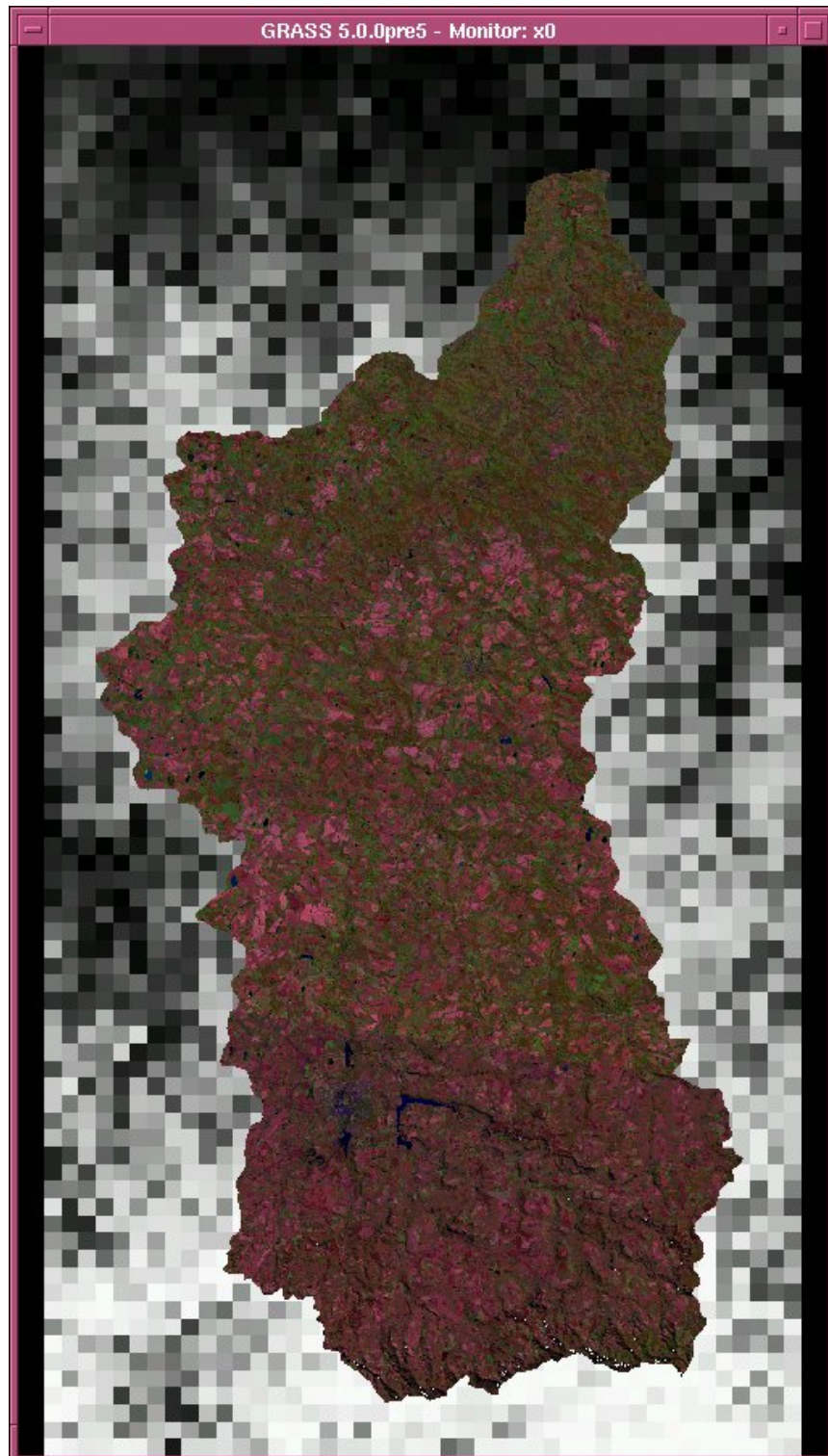


Abbildung 7.10: Alternative Grundlage für die Visualisierung von Radarinformation: Das Liebenbergsvlei in einer Bearbeitung von Landsat 5 TM Daten vor einem GTOPO30-Hintergrund (TM Kanäle: 5-4-2, Datensätze: p170r79, p170r80, Datum: 1991-04-07 (Swap und Annegarn 1999)).

Das Liebenbergvlei-Einzugsgebiet hat eine Flächenausdehnung von 4650 km^2 und ist von einer als 'rolling countryside' bezeichneten Landschaft mit mittleren Höhen von 1600 m ü.NN geprägt. Das Terrain fällt leicht nach Norden ab und wird im Süden von den Rooibergen begrenzt (Mather u. a. 1997). Zeitweise wurden zwei weitere, unabhängige, Messnetzwerke von METSYS bzw. den Vorgängerinstitutionen betrieben⁹. Seit Ende des 20. Jahrhunderts wird nur noch das Hauptnetzwerk unterhalten. Es besteht aus Regensammlern vom Wippen-Typ (Tipping Gauge), der den Niederschlag über einen Wippenmechanismus erfasst und in der Einheit digital aufzeichnet.

⁹Gesamt: 71 Tipping Bucket Raingauges (TBR), davon 26 TBR im Vaalbankspruit mit 4 km^2 Auflösung, 45 TBR im Liebenbergvlei mit 10 km^2 Auflösung (Dixon 1997).

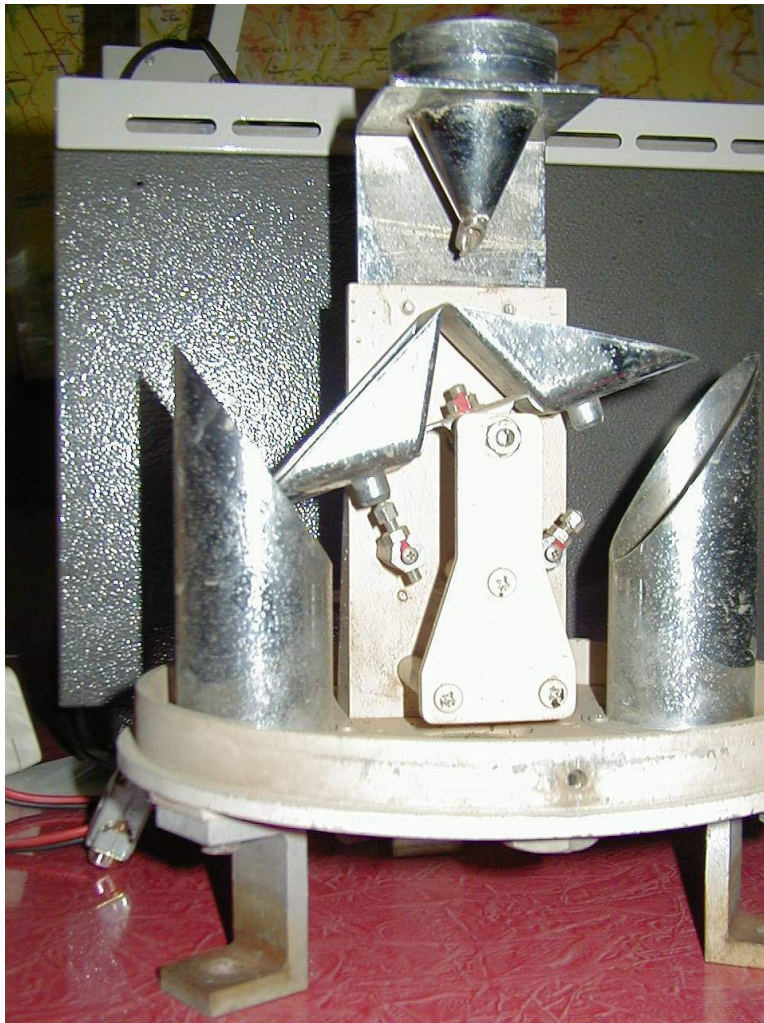


Abbildung 7.11: Tipping Gauge Niederschlagsmesser des Liebenberg-Messnetzwerks, zerlegt. Blick auf die Wippmechanik.

Problematik der Datennutzung und -erhebung Die Auswertung und Archivierung der in den Niederschlagsmessern gespeicherten Daten erfordert das regelmäßige Auslesen der Niederschlagssammler durch METSYS-Personal. Abgesehen von geräte-bedingten Datenverlusten ist der Prozess auch durch akuten Personalmangel problematisch: Die Aufgabe der Datenerhebung und -sicherung kann nur durchgeführt werden, wenn Personal entbehrt werden kann. Dadurch kommt es jedoch zu Dateneinbußen durch zwischenzeitlich erschöpfte Speicherbatterien der Geräte. Außerdem hat sich durch die reduzierte Personalstärke und das Ausscheiden von Spezialisten in den letzten Jahren ein systematischer Fehler eingeschlichen: Die Niederschlagsmesser müssen nach der erfolgten Datenerhebung

erst für weitere Messungen kalibriert werden. Dies wird durch das derzeit mit der Aufgabe betraute, wissenschaftlich nicht qualifizierte Personal nicht mehr durchgeführt¹⁰. Der genaue Zeitpunkt, ab dem nur noch unkalibriert gemessen wurde, war nicht in Erfahrung zu bringen, jedoch müssen die Daten seit dem Jahr 2000 als korrekturbedürftig angesehen werden. Die in den 1990er Jahren gemachten Messungen der Niederschlagsmessnetzwerke können bedingt zur nachträglichen Kalibration der seinerzeit aus Radarreflektivitäten abgeleiteten Niederschlagswerten herangezogen werden. Beschreibungen zur Methodik der Auswertung werden in der Literatur diskutiert (Dixon 1997; Seuffert 2002). Da die Kalibration von Radar-Niederschlagsschätzungen nur mit zum gleichen Zeitpunkt gemachten Niederschlagsmessungen am Boden erfolgen kann, können die historischen Messwerte aus den 1990ern nicht für aktuelle Niederschlagsereignisse verwendet werden. Aus diesem Grund - und den im Vorfeld mit den landesweiten Niederschlagsdaten gemachten ernüchternden Erfahrungen bei der Datenqualität und Repräsentativität - wurde von einer intensiveren Analyse der Niederschlagsammlerdaten in dieser Arbeit abgesehen.

Die Zukunft des Liebenbergvlei-Messnetzwerks Das Liebenbergvlei-Einzugsgebiet wird durch zwei Radarsysteme, das MRL5 und das C-Band Radar am Flughafen der Stadt Bethlehem abgedeckt. Es ist als wichtiges Verbindungsglied zum Lesotho Highlands Water Project¹¹ für die hydrologische Arbeit des SAWS relevant.

In den nächsten Jahren ist die Aufstellung eines neuen automatisierten Messnetzes im Liebenbergvlei geplant. Dies soll mit Datenloggern geschehen, die ihre Daten über das Mobiltelefonnetz an die Betreiber weitergeben¹². In Anbetracht der realen Situation vor Ort bleibt abzuwarten, wie lange die Geräte im Einsatz bleiben werden.

¹⁰Dieser Umstand ist sonst nicht dokumentiert und wurde durch persönliche Mitteilungen (R.Burger, F.Hiscutt) bekannt.

¹¹Im Rahmen dieses Projekts wird Wasser vom Ende des Trans-Caledon-Tunnels bei Clarens über den Liebenbergvlei-Fluß in die Gauteng-Region transportiert.

¹²Mündliche Mitteilung von Deon TerBlanche, 2002.

7.3 Möglichkeiten zur Ableitung von Niederschlagsinformationen aus südafrikanische Reflektivitätsdaten

Reflektivitätswerte [dBZ]	Niederschlagsmengen [mm/h]	Interpretation
10	0.2	Bewölkt, jedoch nur sehr geringer Niederschlag
20	1	leichter Nieselregen
30	3	Leichter Regen
40	10	Normaler Regen
50	50	Starkregen und Gewitter, eventuell etwas Hagel möglich
60	200	Sehr starker Regen, Starkgewitter, Hagel

Tabelle 7.1: Tabelle für die Schätzung von Niederschlagsmengen und den damit verbundenen Wetterphänomenen aus Radarreflektivitätswerten (nach (METSYS 2003), verändert).

Schätzung der Niederschlagswerte aus Reflektivitäten durch Tabellen

Die schon zuvor beschriebene, einfachste Ableitung von Niederschlagswerten erfolgt durch die auf der METSYS-Internetpräsenz verfügbare Schätztabelle (vgl. Tabelle 7.1). Sie vermittelt einen Eindruck, wie aus Reflektivitätswerten Regenmengen und Wetterphänomene abgeschätzt werden können (METSYS 2003). Dies setzt voraus, dass die verfügbaren Reflektivitätskarten korrekt sind und der Nutzer um eventuell vorhandene versteckte Fehlerquellen weiß. Bei den angeführten Werten handelt es sich offensichtlich nur um grobe Schätzwerte, die sich nicht zu einer hochauflösenden Niederschlagsmodellierung eignen.

Möglichkeiten, Niederschlagsdaten in einem GIS abzuleiten

Für die Ableitung von Niederschlagswerten aus den Reflektivitätsdaten bieten sich durch den Funktionsumfang von GRASS zwei Möglichkeiten zur Automatisierung des Prozesses an:

Karten-Algebra Wie bei der automatisierten Erzeugung von Niederschlagskarten im TITAN-System kann die Berechnung der mittleren Nieder-

schlagsintensität mittels einer Reflektivitäten-zu-Niederschlagsmengen Beziehung (Z-R) durch Kartenalgebra geleistet werden. Dabei wird durch das GRASS-GIS-Modul *r.mapcalc* ein Berechnungsschema für alle Raumzellen eines Rasterdatensatzes angewendet und in einen neuen Datensatz geschrieben.

ZR-Beziehungen haben die Form

$$R = a \cdot Z^b, \quad (7.1)$$

was leicht in *r.mapcalc* darzustellen ist¹³. Bei der Umsetzung wird analog zur Verarbeitung mit TITAN verfahren: Die Berechnung kann sowohl für regionale Reflektivitätsdatensätze als auch das landesweite Daten-Komposit angewendet werden. Dabei wird für jede Raumzelle der stärkste der vorhandenen Reflektivitätswerte (Max-CAPPI) benutzt. Es ist möglich, anstatt der numerischen Variablenwerte für *a* und *b* in Formel 7.1 ebenfalls Rasterfelder zu verwenden, womit für jede Raumzelle individuelle Variablenbelegungen benutzt werden können. Dies kann möglicherweise zur Korrektur von regional begrenzten Datenverfälschungen, etwa durch Topographie- oder Distanz-Effekte, eingesetzt werden. Es ist ebenfalls möglich, durch Konfiguration dieser Rasterfelder lokale Zonen von stratiformen oder konvektivem Niederschlag durch einen kombinierten Berechnungsvorgang zu bearbeiten. Dieser Ansatz wird in Kapitel 9 weiter betrachtet.

Regelbasierte Ableitung Die Schätztabelle (Tabelle 7.1) kann mit einem regelbasierten Ansatz durch die entsprechenden Module in GRASS umgesetzt werden. Dies wurde als Beispiel für die Möglichkeiten wissensbasierter Modellierung realisiert (siehe Anhang D).

7.4 Ansätze zur thematischen Klassifikation von Sturmzellen

'We do precision guesswork' (Hall 1993)

7.4.1 Hintergrund zur thematischen Interpretation

Sehr oft müssen in einem GIS nicht nur einfache Berechnungen, sondern auch Klassifikationsaufgaben vorgenommen werden. Das zur Lösung nötige Wissen wird als eine neue Klasseneinteilung (Abbildungsoperation) der in Rasterfeldern repräsentierten Rauminformation abgebildet. Dieser Schritt wird bei einmalig oder selten vorkommenden Anwendungen manuell durch den

¹³Das im Anhang aufgeführte Shellsript *mdv.rainrate* (Anhang B.2) führt diese Sequenz für die Marshall-Palmer-Beziehung (Gleichung 5.7) aus (mit $a = 200$, $b = 1.6$).

GIS-Nutzer vorgenommen. Bei sich wiederholenden Aufgaben kann die Problemlösung mittels Kartenalgebra, den fernerkundlichen Klassifizierungsmodulen oder den Inferenzmodulen in GRASS automatisiert werden. Die in Tabelle 7.1 gegebene Schätzanleitung ist ein Beispiel für die Umsetzung von Fachwissen in Regeln der *wenn-dann*-Kategorie:

$$[5, 10] \longrightarrow \textit{SchwachesEcho} \quad (7.2)$$

Wenn ein beobachteter Reflektivitätswert innerhalb eines Intervalls liegt, *dann* kann auf gewisse Konsequenzen geschlossen werden. In diesem Beispiel handelt es sich um Niederschlagsmengen und das damit verbundene Wettergeschehen. Prinzipiell kann dieser Ansatz auch auf die in den CAPPI-Daten enthaltenen dreidimensionalen Wolken- und Sturmstrukturen angewendet werden. Dabei können auf der Ebene der einzelnen Raumzellen die jeweils entsprechenden Vektoren der Reflektivitätswerte analysiert werden. In Verbindung mit der Isolierung einzelner Sturmwellen als Regionen durch andere GIS-Funktionen kann auch eine Analyse aller in einer solchen Region vorkommenden Reflektivitäts-Vertikalmuster vorgenommen werden.

7.4.2 Lokale Wetter-Klassifikation aus Radarreflektivitätsdaten in Südafrika

Von METSYS-Mitarbeitern wurden in den letzten Jahren Interpretationsalgorithmen entwickelt, die auf Basis der erhobenen Radardaten entstanden sind (Mittermaier 1999; Visser 2001). Diese Ansätze dienen sowohl der Beurteilung der Datenqualität als auch Behandlung von besonderen atmosphärischen Phänomenen und der Beschreibung und Interpretation der Dateninhalte.

CONSTRAT

Bei CONSTRAT (Mittermaier 1999) handelt es sich um einen Klassifikationsalgorithmus, der vertikale Reflektivitätsprofile anhand von horizontalen und vertikalen Verteilungsmustern in die drei Gruppen *konvektiv*, *stratiform* und die Übergangsstufe *intermediär* einteilt. Die Aussagefähigkeit dieses Ansatzes ist dabei aufgrund von topographischen Störechos auf eine Zone mit einer maximalen Ausdehnung von 70km vom verwendeten Radar (MRL5) eingeschränkt. Der detaillierte Ablauf der Klassifikation ist im Anhang F.2.1 aufgeführt.

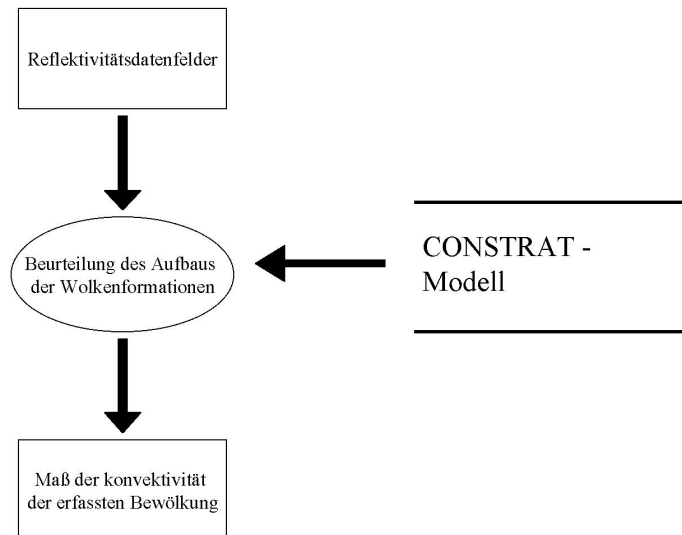


Abbildung 7.12: Übersicht über die durch den CONSTRAT-Algorithmus umgesetzte Klassifikation.

Storm Severity Structure

Der Storm Severity Structure (SSS)-Ansatz basiert auf der Ermittlung von Strukturinformationen über konvektive Sturmzellen (Visser 2001). Diese konvektiven Zellen durchlaufen einen Entwicklungszyklus von sich entwickelnden (developing), reifen (mature) und alternden (dissipating) Stadien innerhalb kurzer Zeit: Durch die SSS-Klassifikation können die Bestandteile eines größeren Sturmgebietes nach ihren jeweiligen Entwicklungsstadien beurteilt werden. Dabei wird aus den Radarreflektivitäten und abgeleiteten Parametern auf die Vertikalverteilung der Hydrometeore über den betrachteten Raumstellen geschlossen, was als Indikator für Aufwinde gilt. Die Sturmzellen werden in folgende Kategorien eingeteilt:

Top-Struktur Dies entspricht dem Jugendstadium einer konvektiven Zelle, deren Anteil von flüssigem Wasser durch starke Aufwinde in Höhen über 8000m über Grund gehalten wird.

Volume-Struktur Eine gereifte Zelle weist bei weiterhin anhaltenden Aufwindbewegungen, jedoch gleichzeitig niedergehenden Niederschlägen eine gleichmäßigere Wasserverteilung auf.

Base-Struktur Bei einer gealterten Zelle konzentriert sich der Wassergehalt auf Höhen unter 6500 Meter.

Weiter werden die diagnostizierten Zellstrukturen aufgrund der Stärke der Reflektivitäten in die drei Klassen *Schwach* (30-44 dBZ), *Mittel* (45-50 dBZ) und *Stark* (> 50 dBZ) eingeteilt. Die genaue Definition findet sich in der Literatur (Visser 2001). Die Umsetzung in Algorithmen und Wissensbasen ist im Anhang F.2.2 beschrieben.

SSS	Alter	Prozeß	Niederschlag
TOP	Jung	im Aufbau	–
VOLUME	Mittel	Niederschlag	++
BASE	Alt	in Auflösung	+

Tabelle 7.2: Übersicht über die unterschiedlichen Klassifikationsebenen der SSS-Methode nach (Visser 2001).

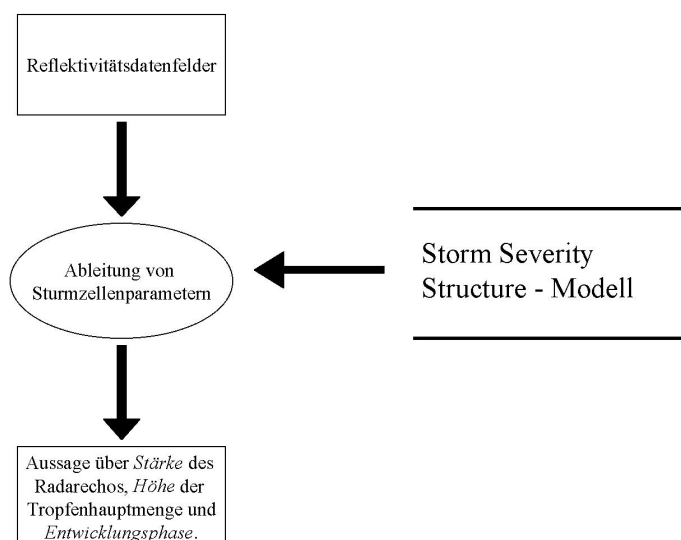


Abbildung 7.13: Übersicht über die durch den SSS-Algorithmus umgesetzte Klassifikation.

Einsatzmöglichkeiten der Klassifikationsansätze für die Erosivitätsfragestellung Die CONSTRAT-Klassifikation und die SSS-Methode wurden in voneinander unabhängigen Projekten entwickelt. Für die Ermittlung von Erosivitätswerten bietet es sich an, beide Ansätze zu kombinieren, um eine flexible Interpretation des Niederschlagsgeschehens zu ermöglichen:

In einer ersten Stufe werden mit CONSTRAT stratiforme Gebiete auf der

Ebene einzelner Raumzellen ausgewiesen¹⁴. In der zweiten Stufe werden alle durch CONSTRAT als konvektiv klassifizierten Raumeinheiten durch die SSS-Methode analysiert¹⁵. Dieses Zusatzwissen zu den CAPPI-Vektoren der Raumzellen kann zur Kalibration der Z-R-Beziehung der einzelnen Raumstellen (siehe Formel 5.4) für die Ableitung der Niederschlagswerte eingesetzt werden (siehe auch Abbildung 7.14).

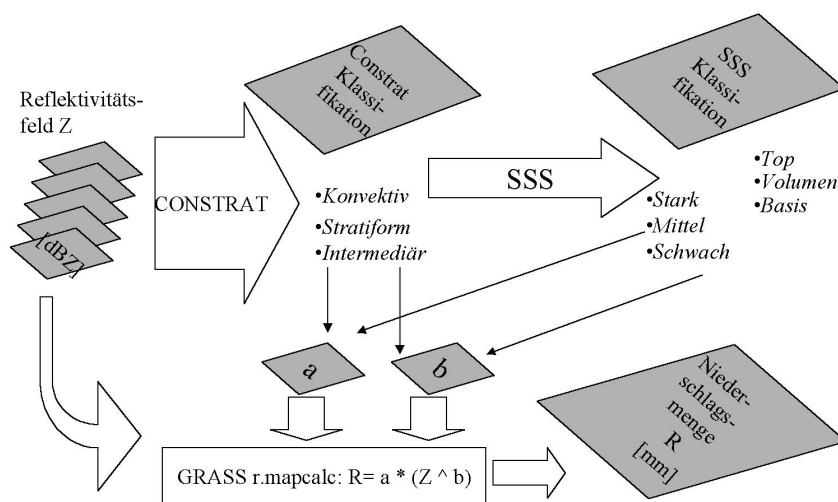


Abbildung 7.14: Umsetzung von auf Raumzellen-Ebene angepasste ZR-Beziehungen: Die für jede Raumzelle verfügbaren Reflektivitätsdaten werden mit dem CONSTRAT-Ansatz vorklassifiziert. Bei konvektiven Situationen wird eine weitere SSS-Klassifikation der Reflektivitätsdaten vorgenommen. Die durch diesen zweistufigen Prozess gewonnenen Aussagen können zur Kalibration der Parameter der lokal gültigen ZR-Beziehung verwendet werden. Die Errechnung von Niederschlagsmengen aus den Reflektivitätsdaten erfolgt durch Kartenalgebra mit zweiaus den lokalen Parameterwerten gebildeten Rasterfeldern.

¹⁴Für diese können bei der anschließenden Berechnungen der Niederschlagswerte die Variablenwerte nach Marshall-Palmer verwendet werden.

¹⁵Dabei ist eine Relativierung starker Echos in 'TOP'-Strukturen zu erwarten: Diese werden zwar in den oberen Lagen der Reflektivitätsdaten auch noch an den Grenzräumen der von den Radars erfassten Gebiete aufgezeichnet, die starken Echos in mehreren Kilometer Höhe sollten jedoch nicht mit gerade niedergehendem Regen gleichgesetzt werden.

7.5 Umsetzung thematischer Wetter-Klassifikationen in GIS

Die Umsetzung dieser Klassifikationsansätze für Radarreflektivitätswerte kann in einem GIS auf mehreren Ebenen erfolgen. Die einzelnen Möglichkeiten werden im Folgenden diskutiert und eine neue Software-Koppelung vorgestellt.

7.5.1 Karten-Algebra

Die in beiden Klassifikationsansätzen verwendeten Verfahrensregeln können als *kategorische Regeln* bezeichnet werden (Puppe 1993): Entsprechend können sie durch eine Reihe von WENN-DANN-Beziehungen ausgedrückt werden, die den Ergebnisraum aufteilen. Im GRASS-Kartenalgebra-Modul *r.mapcalc* existiert dafür eine 'IF'-Funktion. Die Umsetzung durch Kartenalgebra wurde exemplarisch für SSS durchgeführt (Anhang D), jedoch zeigte sich rasch, dass der entstehende Programmcode unübersichtlich und schwer zu pflegen ist. Zur Durchführung komplexerer Modellierung wurden deswegen die folgend beschriebenen wissensbasierte Ansätze eingesetzt.

7.5.2 Wissensbasierte Ansätze

Einführung

Bei wissens- bzw. regelbasierten Ansätzen wird das notwendige Wissen zur Lösung von Klassifikationsaufgaben in Form von Regeln abgelegt (*Wissensbasis*). Diese werden durch einen geeigneten Mechanismus in Form eines Inferenzprozesses auf die bekannten Fakten angewendet (Puppe 1993). Die Ergebnisse dieser Regelaufrufe können neue Fakten erzeugen, die zur Ausführung weiterer Regeln führen. Ergebnisse liegen vor, wenn das Auswerten der Regeln abgeschlossen ist. Die Programmierung regelbasierter Ansätze unterscheidet sich stark von den konventionellen Programmierstilen (Giarratano und Riley 1998). Wissensbasierte Ansätze haben in den letzten Jahren verstärkt Verwendung in Geowissenschaften und der Radarmeteorologie gefunden (Värvargard 2000; Openshaw und Openshaw 1996; Löwe 1997). Wissensbasierte Systeme sind eine Teildomäne der Künstlichen Intelligenzforschung (Puppe 1993). Für diese Arbeit werden speziell Experten- bzw. Produktionssysteme und agentenbasierte Ansätze aus der (Verteilten) Künstlichen Intelligenzforschung mit besonderer Berücksichtigung zellulärer Automaten betrachtet.

Von der Verwendung von Ansätzen wie neuronalen Netzen oder genetischen Algorithmen wurde bewusst abgesehen, da das Ziel die geeignete *Formulierung* und *Anwendung* des *verfügbaren Fachwissens* war. Die genannten alternativen Verfahren sind zwar gut geeignet, Problemlösungen zu erzielen, jedoch erfordert dies die Einbeziehung einer 'Blackbox'-Stufe.

Verfügbare inferenzbasierte Module in GRASS

In GRASS sind mit *r.infer* und *r.binfer* zwei Inferenzmodule verfügbar. Sie wurden unverändert aus der GRASS4-Entwicklung übernommen, weswegen nur ganzzahlige Rasterwerte verarbeitet werden können (GRASS-Developer Team, ITC-irst 2002). Ihre Arbeitsgeschwindigkeit ist hoch, jedoch sind die Inferenzmechanismen sehr einfach angelegt. Deswegen ist meist eine Vorbearbeitung durch Kartenalgebra notwendig, welche die Verarbeitungszeit erhöht. In dieser Arbeit wurde nur *r.infer*¹⁶ für die Entwicklung von Wissensbasen für die SSS-Methode (Visser 2001) und den CONSTRAT-Ansatz (Mittermaier 1999) zur Schätzung von Niederschlagsmengen aus Radarreflektivitäten (Tabelle 7.1) eingesetzt. Die Inhalte dieser Wissensbasen sind im Anhang aufgeführt (Anhang D).

Gründe für die Anbindung einer Expertensystem-Shell

Aus den Erfahrungen mit den regelbasierten Inferenzmodulen in GRASS entstand die Motivation, nach Alternativen zur Umsetzung wissensbasierter Ansätze für die Erosivitätsfragestellung innerhalb des GIS zu suchen. Eine geeignete Alternative wurde in Form der Expertensystem-Shell **CLIPS** und den auf ihr basierenden Freien Software-Projekten **CAPE** und **GRASS-CAPE** gefunden.

C Language Integrated Produktion System (CLIPS) Das mittlerweile frei verfügbare CLIPS-System wurde ursprünglich in den 1980er Jahren am Johnson Space Center der NASA entwickelt (Giarratano 2002). Es handelt sich um eine multiparadigmatische Programmiersprache für regelbasierte, objekt-orientierte und prozedurale Programmierung¹⁷ (Giarratano und Riley 1998).

CAPE: CLIPS and Perl (with Extensions) CAPE ist eine Programmierumgebung für die Kombination von regelbasierter Programmierung in CLIPS mit prozeduralem Code in der Programmiersprache Perl. Mit CAPE ist es möglich, innerhalb eines Programmtextes fließend zwischen den unterschiedlichen Programmierparadigmen und den verwendeten Sprachen zu wechseln¹⁸ (Inder 1999).

¹⁶Die GRASS-Entwicklergruppe hat darauf hingewiesen (E-mail), dass der heuristische Problemlöser *r.binfer* fehlerhaft implementiert wurde, weswegen von seinem Einsatz abgeraten wird.

¹⁷Mit den Open Source Projekten *ClipsTIX* und *Protege2000* stehen zwei moderne integrierte Entwicklungsumgebungen (Integrated Development Environment IDE) zur Verfügung

¹⁸Die im Namen geführten 'Erweiterungen' beziehen sich auf die mögliche Nutzung von Internetsockets und einen Dokumenten-Cache, der jedoch in dieser Arbeit nicht eingesetzt wird.

GRASS + CAPE = GRASSCAPE GRASS kann durch seine modulare Struktur sehr leicht in Form von Shell- und Perl-Programmen konfiguriert werden. So lag es nahe, die durch CAPE ebenfalls in Perl verfügbare Nutzung von CLIPS innerhalb von GRASS einzusetzen.

Die Freiheitsgrade bei der Nutzung von Versatzstücken aus vier unterschiedlichen Sprachen¹⁹ sind sehr groß. Bei der Anwendung traten oft unerwartete Nebeneffekte und Inkompatibilitäten auf, was zur Erstellung einer neuen Ebene von Interface-Modulen (GRASSCAPE) für GRASS und CAPE geführt hat, um den Umgang mit den Softwarepaketen zu erleichtern²⁰.

Die Anbindung von CAPE und GRASS bietet interessante Möglichkeiten: Zum einen kann CAPE innerhalb von GRASS mit einer Wissensbasis gestartet werden. Diese wird auf GRASS-Rasterdaten angewendet und die erzeugten Ergebnisse werden als Rasterkarten nach dem Ende des Klassifizierungsvorgangs verfügbar gemacht. Andererseits ist es möglich, aus einer CAPE-Umgebung auf ein im Hintergrund laufendes GRASS GIS einzuwirken. Die entwickelten Programme und Wissensbasen zur Anbindung der verschiedenen Umgebungen sind detailliert im Anhang C aufgeführt.

7.5.3 Probleme der Abbildung von Wissen

Bei der Umsetzung von Klassifikationsverfahren durch das GRASS-Modul *r.infer* müssen alle verarbeiteten Probleme auf ganzzahlige Intervall-Vergleiche reduziert werden. Dies ist bei den relativ einfachen Radardaten-Klassifikationen zwar noch möglich, eignet sich aber nur sehr bedingt für die Entwicklung komplexerer Ansätze, wie der Kombination der einzelnen Verfahren zu einem größeren Ganzen. CLIPS erlaubt eine direktere Umsetzung der Klassifikationsverfahren: Dabei passt sich die Modellierung der Wissensbasis an das Problem an und nicht umgekehrt, wie bei den GRASS-Modulen. Durch den Entwurf von GRASSCAPE ist die Entwicklung von komplexen Wissensbasen für GRASS-Anwendungen mit CLIPS möglich und übertrifft die Funktionalität von *r.infer*.

Ausblick Weiterhin hat sich gezeigt, dass auch bei der Umsetzung des Wissens innerhalb von CLIPS beträchtliche Unterschiede existieren. Bei der normalen Modellierung kommt es durch die großen Volumen von Rauminformationsdaten leicht zu Laufzeitproblemen. Eine Lösung für dieses Problem wurde durch Ausweichen auf objektorientierten Code geleistet. Auf die Motivation hierfür und die erzielten Erfolge wird im Kapitel 9 und im Anhang C.3 eingegangen.

¹⁹Dies sind Perl, Clips, objektorientierter Clips-Code (CLIPS Object Oriented Language, COOL) und GRASS-Befehle

²⁰Aus der Beschäftigung mit diesem Ansatz ist in der Zwischenzeit das Freie Software Projekt 'GRASSCAPE' entstanden (GRASSCAPE Project 2003).

Bei GRASSCAPE handelt es sich, ähnlich wie bei den frühen Phasen der Anbindung des R-Statistik-Pakets (Bivand und Neteler 2000), um eine 'high level'-Koppelung mit einem zeit- und speicherintensiven Datentransfermodell (Rodriguez-Bachiller 2000). Aus diesem Grund ist der Zugriff in GRASSCAPE um den Faktor fünf langsamer als bei einer vergleichbaren r.infer-Wissensbasis. Da r.infer jedoch über die GRASS-Leseroutinen auf die Raumdaten zugreift, ist dieser Vergleich nur bedingt gültig. Ähnlich wie in der aktuellen Version des R-Paketes für GRASS (Bivand und Neteler 2000) müsste eine 'low level' Anbindung über die mittlerweile verfügbare *grasslib*-Bibliothek (GRASSLIB 2003) in maschinennahen Formaten erfolgen, um die Laufzeiten von GRASSCAPE und r.infer wirklich vergleichen zu können.

7.5.4 Zusammenfassung

Thematische wissensbasierte Klassifikationen von dreidimensionalen Reflektivitätsdaten können in GRASS GIS durchgeführt werden. Damit ist es möglich, radarmeteorologisches Expertenwissen in Form von wissensbasierten Klassifikationsverfahren auf die Vektoren von Reflektivitätswerten einzelner Raumzellen anzuwenden. Darüber hinaus können durch die Segmentierung von Sturmzellen die Klassifikationsergebnisse für jede Sturmzelle gebündelt betrachtet werden ²¹. Die so gewonnenen Informationen über das Wettergeschehen können für die lokal-räumliche Kalibrierung der Variablen der Z-R-Gleichung bei der Berechnung von Niederschlagskarten dienen.

²¹Dieser Weg wird in der STORMS-Datenbanktabelle eingeschlagen: Nachdem alle Raumzellen einzeln klassifiziert worden sind, werden die Diagnosen aller jeweils in einer Sturmzelle zusammengefassten Zellen gebündelt. Die Summe dieser Diagnosen wird in Stringform für die XML-Weiterverarbeitung in der Datenbank abgelegt.

Kapitel 8

Nutzung der thematischen Radardatenprodukte durch Ansätze der Informationslogistik

8.1 Rechtzeitige Nutzung der gesammelten Informationen

Für Südafrika werden Radarreflektivitätsdaten für die Bevölkerungszentren flächendeckend und in Realzeit aufgezeichnet. Die Inhalte dieser Datenquellen können anschließend, wie demonstriert, automatisiert interpretiert werden. Damit kann die Ableitung thematischer Information unmittelbar nach der Erhebung der Messwerte erfolgen. Anders als mit den zuvor alleinig verfügbaren Niederschlagssammlerdaten können diese aktuellen thematischen Rauminformationen über Datennetze wie Internet, Telefon und Radio/TV unmittelbar verbreitet werden.

Daraus ergibt sich die Frage, *wie* die Daten für die Verteilung aufzubereiten sind und in welcher Form sie zu den Nutzern transportiert werden, damit diese sie einsetzen können:

Beispiel einer Umwelt- und Informationskatastrophe Das Grundproblem bestehender Informationssysteme kann an einem Beispiel skizziert werden: Im Fall des Orkantiefs 'Lothar', das am Jahresende 1999 über Teile der Schweiz, Frankreichs und Deutschlands zog, waren Unwetterwarnungen der nationalen Wetterdienste schon vor dem eigentlichen Ausbruch des Orkans im Internet verfügbar. Da sie die Betroffenen zu spät oder gar nicht erreichten, waren sie jedoch wertlos. Abgesehen von den aufgetretenen Zerstörungen in der Umwelt handelt es sich damit auch um eine 'Informati-

onskatastrophe' (Meissen und Pfennigschmidt 2001).

Relevanz für Bodenerosionsfragen Im Folgenden werden die Aufbereitungs- und Transportschritte betrachtet, die für die schnelle Nutzung der aus den Radardaten gewonnenen Informationen notwendig sind.

Netzabdeckung Das World Wide Web (WWW) ist seit 1994 zum wichtigsten Informationsmedium geworden (Arehart u. a. 2000). In Gebieten, wo das WWW oder verwandte Netze ubiquitär und flächendeckend verfügbar sind, kann die Auslieferung von aktuellen Informationen an die Nutzer als technisch gelöst gelten. Die nicht von den Netzen erfassten Regionen der Welt - wie große Gebiete in Afrika - machen alternative Ansätze der digitalen Datenübertragung nötig.

Die heute schon unüberschaubare Informationsmenge, die im WWW verfügbar ist, berechtigt zur Frage nach der effektiven und individuellen Informationsversorgung der erreichbaren Nutzer. Dabei treten folgende Problemkreise für die Übermittlung von Rauminformationen auf (Lienemann 2001):

Lokalisierung Ein Mensch mit Informationsbedürfnis muss darauf hingewiesen werden, dass für ihn an einem bestimmten Ort und Zeitpunkt wichtige Informationen verfügbar sind.

Filterung Die relevante Information ist in einer großen Menge von irrelevanten Informationen verborgen, die entsprechend gefiltert werden muss.

Auslieferung Die Information muss rechtzeitig und ortsunabhängig über möglichst beliebige Endgeräte zustell- oder abrufbar sein.

Handlungsentscheidung und Konsequenzen Es ist zusätzlich nötig, den Nutzern *für die anstehende Raumnutzungsfrage* relevante sekundäre Themen verfügbar zu machen, um über *Konsequenzen und Seiteneffekte* ihrer Handlungsoptionen zu informieren.

8.2 Informationslogistik als Lösungsansatz

Die informationslogistische Sichtweise geht von einem Grundbedürfnis einer Gruppe von Datennutzern nach Informationen aus. Dieses Bedürfnis nach *relevanten* Informationen über die Umwelt soll durch die Versorgung mit inhaltlich, zeitlich und örtlich angepassten Inhalten befriedigt werden.

8.3 Möglichkeiten der Informationsverteilung an die Nutzer

Die Versorgung der heterogenen Zielgruppen mit Informationen wird durch zwei qualitativ verschiedene Ansätze in unterschiedlichen Übertragungsmodi geleistet. Die beiden ersteren Ansätze, im Weiteren als *Push* und *Pull* bezeichnet, lassen sich wie folgt beschreiben (Meissen und Pfennigschmidt 2001): Bei *Push*-Versorgung werden Informationen an die Adressaten übertragen, die sie nicht aktiv nachgefragt haben. Dagegen ist dies im *Pull*-Szenario jedoch notwendig. Ein Beispiel für Push-Informationendienste wäre ein Abonnement einer Fachzeitschrift, die regelmäßig an den Abonnenten verschickt wird. Eine Pull-Versorgung ist dagegen beim aktiven Nachschlagen in einem Lexikon gegeben. Zusätzlich kann bei beiden Arten der Informationslieferung zwischen synchroner und asynchroner Informationsverteilung unterschieden werden: Bei asynchronen Prozessen erfolgt die Bereitstellung der Informationen und ihr Empfang zeitlich versetzt (Beispiel: E-mail), wogegen beim synchronen Modus Angebot und Nachfrage simultan vorhanden sein müssen (Beispiele: IRC, 'Talk' Unix-Befehl). Aufgrund dieser vier Kategorien lassen sich Informationsdienste leicht nach ihren Eigenschaften einteilen (Tabelle 8.1).

Übertragungsart	Synchron	Asynchron
Pull	WML-Seiten per WAP, FAX-Abruf, Hotline, Internet-Surfen	Datacasting
Push	akustischer Morse-Telegraph, Heliograph	Zeitungsabonnement, SMS, FAX-Zustellung, E-Mail

Tabelle 8.1: Übersicht über unterschiedlich konfigurierte Übertragungswege: Kanäle wie E-Mail, Fax, SMS, aber ebenso auch die Tageszeitung, die jeden Morgen geliefert wird, fallen in die Klasse der Push-Kanäle, die im Fall asynchroner Informationsversorgung zum Einsatz kommen.

In die Sparte synchroner Informationsverbreitung über Pull-Kanäle gehören FAX-Abruf, WML-Seiten-Abruf per WAP, eine Telefon-Hotline oder das Surfen auf WWW-Seiten. (Nach (Lienemann 2001), verändert.)

Umsetzung informationslogistischer Ansätze zur Nutzung von Wetterradardaten in Südafrika

Für die Verteilung der aus den Wetterradardaten abgeleiteten Daten und die Anbindung der Nutzerkreise bieten sich somit mehrere Optionen. Die von METSYS unterhaltene Internetpräsenz mit Graphiken sowie die vor-

zustellenden Entwicklungen dieser Arbeit basieren auf dem Internet/World Wide Web als Verbreitungsmedium. Die spezielle Situation des Flächenstaates Südafrika mit seiner eingeschränkten Netzabdeckung erfordert jedoch auch alternative Optionen: Dies kann einmal die Distribution von E-mail/SMS über klassische Mobiltelefonnetzwerke sein, oder die Nutzung spezieller Textformate wie die Wireless Markup Language (WML) für Wireless-Application-Protocol-Geräte (WAP) ¹. Durch die Transformation von Rauminformation zu (Markup-) Textbausteinen wird auch die Wandlung in unterschiedliche Sprachen und die Verbreitung als gesprochener synthetischer Text² möglich. Ein damit naheliegendes Verbeitungsmedium ist analoges Radio. Der beschränkte Senderadius erdgebundener Radiosender kann durch das Ausweichen auf satellitengestütztes Digital-Radio behoben werden: Bei diesem Medium bietet es sich mit geeigneten Endgeräten wiederum an, außer den gesprochenen Informationen auch den uni-direktionalen Datenstrom vom Satelliten für computerlesbare Datenübertragungen zu nutzen. Damit ist es auch möglich, Rauminformationen an verteilte GIS-Systeme zu übertragen. Ein Beispiel für ein operationelles Satellitensystem mit den genannten

Kapazitäten wird in Anhang H beschrieben.

Region	Internet	Mobiltelefon	Satellit
Urban	E-mail, WWW	SMS	WWW, synthetische Sprache
Transportkorridor	-	SMS	WWW, synthetische Sprache
Ländlich	-	(SMS)	WWW, synthetische Sprache

Tabelle 8.2: Überblick über die Medien zur Informationsbereitstellung: Mit zunehmender Distanz von den urbanen Zentren nimmt die Informationsinfrastruktur stetig ab.

8.4 Räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme

Entscheidungsunterstützungssysteme (Spatial Decision Support Systems, SDSS) werden dazu verwendet, Rauminformationen für den Bedarf der Rezipienten aufzubereiten, um diese in ihrem Handeln und Urteilen zu unterstützen (Rodriguez-Bachiller 2000). Prinzipiell gilt dies auch für jedes

¹Was in Deutschland beispielsweise im Rahmen des WIND-Projekts eingesetzt wurde (Meissen und Pfennig Schmidt 2001).

²Durch Kodierung in VoiceML

GIS³.

Dabei ist diese Aufgabe nicht trivial: es gilt, zu den vorhandenen Rauminformationen weiterführende relevante Inhalte verfügbar zu machen, durch deren Kenntnis der Entscheidungsprozess unterstützt werden kann (Openshaw und Openshaw 1996; Openshaw und Abrahart 2000; Leung 1997). Anders als der Ansatz der Informationlogistik sind SDSS unabhängig von Netzwerkstrukturen und blicken auf eine wesentlich längere Entwicklungsgeschichte seit 1971 zurück (Rodriguez-Bachiller 2000).

Räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme eignen sich gut zur Unterstützung von Entscheidungsträgern bei *teil-strukturierten* Problemen. Dabei wird das Urteil des menschlichen Experten nicht ersetzt, sondern die *Nachhaltigkeit* der Entscheidung gesteigert. Dies geschieht ähnlich wie bei Second Opinion Systemen (Puppe u. a. 1996; Puppe u. a. 2001; Rodriguez-Bachiller 2000).

In Verbindung mit Informationslogistik kann dieser Ansatz dazu dienen, den Zielgruppen nicht nur rechtzeitig die benötigten Informationen zukommen zu lassen, sondern zusätzlich auch die geeigneten Sekundärinformationen zu präsentieren.

8.4.1 Anwendungsbeispiele für Systeme auf Basis meteorologischer Daten

Meteorologische Daten werden in verschiedener Form in informationslogistische Systeme und Entscheidungsunterstützungssysteme eingesetzt. Einige Beispiele werden hier exemplarisch vorgestellt:

In Südafrika besteht mit dem Webportal von iFARM ein kommerzieller Dienst, der experimentell aus Wetterradardaten generierte Niederschlagskarten in sein Internetportal aufgenommen hat. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch in der Informationsdienstleistung für Landwirte, wie etwa Informationen über Saatmittel, Düngerpreise und Versicherungen, aber auch konventionelle Wetterinformationen (iFarm 2002).

In Deutschland existiert mit dem WIND-System (VKB Optus Weather) ein Prototyp der Fraunhofer Gesellschaft, der bei der Bayerischen Versicherungskammer eingesetzt wird. Ausgangsdatenmaterial sind die Bulletins und Datendienste des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Bei seiner Implementierung werden mächtige Push- und Pull-Komponenten für portable Endgeräte umgesetzt (Meissen und Pfennigschmidt 2001).

Das KONRAD-System ist als Warn- und Informationssystem eine Eigenentwicklung des DWD. Es basiert auf Base-Scan Daten für einzelne Radarstationen. In einem über das WWW verfügbaren Client-Server-System für geschlossene Nutzergruppen wird die Nutzung von Klienten wie Rettungsdiensten angestrebt. Dargestellt werden die anhand von Schwellwerten

³GRASS: Geographic Resources Analysis *Support System*

ausgegliederten Sturmzellen sowie ihre Bewegungsvektoren (Deutscher Wetterdienst 2003).

Ebenfalls ist an dieser Stelle das wissensbasierte PRO-PLANT-System zu nennen (Epke 1999), das ähnlich der in Folge betrachteten Studie in Bloemfontein Beratungsfunktionen für landwirtschaftliche Zielgruppen auf Basis meteorologischer Datensätze leistet.

Im Betrachtungsgebiet Südafrika existiert mit einer Studie der Universität Bloemfontein⁴ ein Vorläufer zu dieser Arbeit. Es handelt sich um ein GIS-basiertes System zur Nutzung von aus Radarreflektivitäten abgeleiteten Niederschlagswerten. Das Projekt informierte während seiner Laufzeit über den monatlichen Zustand der Weidegründe im zentralen Grassland-Biom Südafrikas. Damit wurde die Quantifizierung der zu erwartenden Produktionskapazität und Ertragsmenschätzungen in der Wachstumsperiode verfolgt. Für die Entscheidungsunterstützung in Form einer Frühwarnfunktion wurden Niederschlagswerte und deren Summen sowie die Dürresituation kartiert. Damit wurden Informationen über die Biomassenproduktion gegeben und im Sinn von Entscheidungshilfen zur Bewusstseinsbildung bei den Betroffenen in den landwirtschaftlichen Gebieten beigetragen (Howard und Fouche 1999).

8.4.2 Wissensbasierter räumlicher Decision Support

Im Folgenden wird besonders auf die Möglichkeit wissensbasierter Ansätze in Informationslogistik und Entscheidungsunterstützung eingegangen. In Kapitel 7 wurde demonstriert, dass Expertensysteme im vorliegenden geowissenschaftlichen Kontext produktiv eingesetzt werden können. Für die Nutzung in einem kombinierten Expertensystem-SDSS-Informationslogistik-Szenario wird die Nutzung um eine zusätzliche Dimension erweitert:

1. Klassifikation der Raumdaten (Kapitel 7)
2. Analyse der Anwenderbedürfnisse und entsprechende Aufbereitung der Datenprodukte.

Durch dieses Vorgehen wird Expertenwissen auf vier Ebenen in ein automatisiertes Datenverarbeitungssystem eingebracht, um die damit verbundenen Komplexitäten gleichzeitig vor den Anwendern zu verbergen:

- Radarmeteorologisches Expertenwissen zur Klassifikation der Radardaten*inhalte*.
- Radartechnisches Fachwissen zur Beurteilung der verfügbaren Datenquellen und ihrer Güte.

⁴A decision support system for managing the impact of climate on livestock enterprise, 1999

Funktion	XPS	XPS-DISS	SDSS
Auftrag	Imitieren von Menschen	Imitierung zur Unterstützung	Unterstützung von Menschen
Entscheidungs-träger	System	Anwender	Anwender
Zielsetzung	Wissenstransfer	Entscheidungs-erleichterung	Entscheidungs- findung
Frageweg	Maschine → Mensch	Maschine → Umweltdaten	Mensch → Ma- schine
Klient	Anwender	Mögliche Nut- zerguppe	Mögliche Nut- zerguppe
Problemfeld	eingegrenzt	eingegrenzt	komplex, weit

Tabelle 8.3: Übersicht über die klassischen Funktionalitäten von Expertensystemen (XPS) und Entscheidungsunterstützungssystem (SDSS) und dem in dieser Arbeit eingesetzten Expertensystem-Ansatz (XPS-DISS) (nach (Rodriguez-Bachiller 2000) ,verändert)

- Fachwissen über die Bedürfnisse unterschiedlicher Nutzergruppen.
- Programmierkenntnisse zur Manipulation der Inhalte und des Erscheinungsbilds der Datenprodukte.

Bei dem in den Expertensystemen kodierten Wissen handelt es sich jeweils um eng begrenzte Wissensdomänen. Dagegen soll die übergeordnete Entscheidungsunterstützungs-Funktionalität von den Informationsnutzern zur Bewältigung bestenfalls teil-strukturierter Realweltprobleme eingesetzt werden. In der Vergangenheit wurden Expertensysteme und Entscheidungsunterstützungssysteme in den Geowissenschaften oft als komplementär zueinander dargestellt (siehe Tabelle 8.3), von wenigen Ausnahmen abgesehen (Rodriguez-Bachiller 2000; Struss 1999). Durch die seither vorangeschrittene Integration im Bereich der *Wissensmanagementsysteme* wurde dieser Dualismus jedoch aufgehoben.

Im hier vorgestellten Szenario wird dieser integrative Ansatz zur Aufbereitung und Nutzung von (Radar-) Fernerkundungsprodukten umgesetzt.

8.5 Möglichkeiten zur Umsetzung eines Informationssystems für Sturmzellen und Niederschlagsinformationen

Hier werden nun, ausgehend von den real existierenden Daten, die bestehenden Möglichkeiten zum Aufbau eines wissensbasierten, informationslogistischen, Entscheidungssupport-Systems beschrieben:

8.5.1 Erzeugung der Informationsinhalte aus den Eingangsdaten

Problemstellung

Wie kann man, basierend auf den vorhandenen Daten, einzelne Sturmzellen aus den Radarreflektivitätsdaten heraus

1. erfassen,
2. interpretieren und
3. darüber informieren?

Diese Aufgabe wird durch folgende Schritte gelöst:

Auswahl der theoretischen Betrachtungsbasis Es werden die Regionen der einzelnen Sturmzellen mit ihrer jeweiligen Dynamik betrachtet: sie verändern ihre Ausmaße, Position und ihr vertikales Erscheinungsbild mit der Zeit und durchlaufen dabei den Lebenszyklus einer konvektiven Zelle, wie bei den lokalen südafrikanischen Klassifikationsansätzen in Kapitel 7 beschrieben wird.

Übersicht über die Umsetzung Die Umsetzung erfolgt durch einen zweistufigen Prozeß. Dieser wurde auf Basis der in GRASS GIS verfügbaren Funktionalitäten realisiert:

Betrachtung und Klassifikation im GIS Die Sturmregionen werden in der Raster-Darstellung des GIS als Mengen einzelner Raumzellen dargestellt. Dabei weist jede einzelne Raumzelle, sofern sie einem Reflektivitätsvektor entspricht, eine eigene Sturm-Diagnose auf. Aussagen über Sturmzellen, die sich aus Gruppen zusammenliegender Rasterzellen zusammensetzen, sind auf dieser Ebene kaum möglich.

Extraktion der Sturmzellen-Regionen Durch Segmentierungsoperationen können aus den dreidimensionalen Datenmengen Sturmzellen-Regionen als Gruppen von klassifizierten Raumstellen isoliert werden.

Im konkreten Beispiel erfolgt die Isolierung von Sturmzellen durch Abtrennung aller Raumzellen, deren Reflektivitätsmaxima unter einem empirischen Schwellwert⁵ liegen. In einem zweiten Schritt werden alle Gebiete verworfen, die eine Mindestausdehnung unterschreiten. Für die so ausgewiesenen Sturm-Regionen können nun Umrisspolygone erzeugt werden.

Möglichkeiten zur Beobachtung von Sturmzellen in ihrer zeitlichen Entwicklung Bis jetzt wurden die Positionen der Sturmzellen zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert. Für die Beschreibung ihrer zeitlichen Veränderung bieten sich mehrere Möglichkeiten:

Rückblick Da die Umrisspolygone auch für die zuvor bearbeiteten Zeitpunkte verfügbar sind, können die Sturmwegbahnen ohne weitere Analyse der Bewegungsrichtungen und Zellenzustände in Visualisierungen als Überlagerungen der Polygone mehrerer hintereinander folgender Zeitpunkte dargestellt werden.

Aktuelle Situation Dies ist der Trivialfall, da die Umrisspolygone aus der aktuellen Sturmzellen-Verteilung gewonnen werden. Diese werden für jeden neu verfügbar werdenden Datensatz aktualisiert.

Erzeugung von Kurzzeitprognosen: 'Nowcasting' Theoretisch können zusätzliche Sturmwegprognose-Datensätze aus TITAN importiert werden, oder diese Information durch die Nutzung einer Datenbank der Umrisspolygone erzeugt werden⁶.

Detaillierte Umsetzung in GRASS

Für die Durchführung des beschriebenen Prozesses in einem GIS sind mehrere Verarbeitungsschritte nötig⁷:

1. *Datenimport*: Die Reflektivitätsdaten werden aus den Quelldaten gelesen und georeferenziert.
2. *Segmentation der Sturmzellen*: Die Gebiete der Sturmzellen werden aus dem Rasterdatensätzen mittels Schwellenwerten abgeleitet.
3. *Individuelle Erfassung*: Isolation aller vorhandenen Sturmzellen.
4. *Ablage im Datenbanksystem*: Archivierung der Grunddaten in einem Datenbanksystem.

⁵ von 45 dBZ

⁶ Dieser Schritt wird nicht durch die GIS-Umgebung geleistet.

⁷ Der genaue Verarbeitungsprozess ist in der Beschreibung von *mdv.macro3* im Anhang B.4 beschrieben.

5. *Wissensbasierte Interpretation:* Automatisierte Auswertung der Reflektivitätswerte anhand von Expertenwissen zur Erstellung von abgeleiteten Produkten.
6. *Archivierung:* Erzeugung von thematischen Graphiken für die schnelle Übersicht über die archivierten Daten in der Datenbank.
7. *Erstellung von Endprodukten:* Bei diesen handelt es sich um kartenähnliche Graphiken, Animationen und HTML-Dokumente. Die Möglichkeiten zur Erstellung derartiger Produkte wird im Folgenden diskutiert.

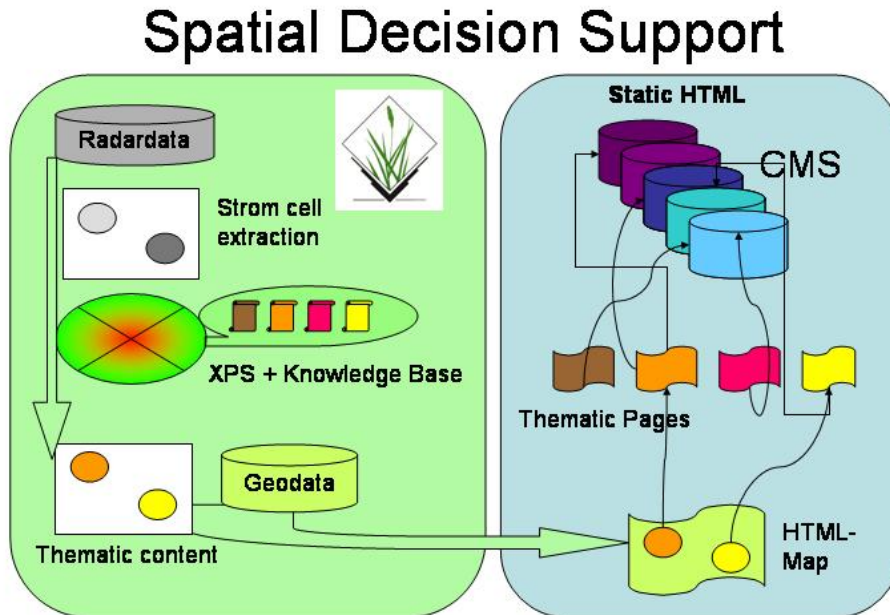


Abbildung 8.1: Übersichtsdiagramm der Ableitung thematischer Sturmzelleninformationen aus Wetterradardaten und ihrer Verbreitung über ein interaktives WWW-Portal, das auf weiterführende Inhalte in Form eines Content Management Systems (CMS) verweist (Löwe 2002)

Mögliche Formen von Endprodukten

Für die Weitergabe der gewonnenen Informationen an die Endnutzer bieten sich Grundformen der zwischenmenschlichen Kommunikation an:

Sprache Eine verbale Beschreibung der Rauminhalte muss den eigentlichen Informationsinhalt, dessen Raumbezug und die Ausdehnungen in Relation zu Referenzpunkten beschreiben.

Bild/Karte Eine Kartendarstellung erweitert die in der sprachlichen Beschreibung vorhandenen Aussagemöglichkeiten um zusätzliche Raumdaten, Maßstabsinformation und eine detaillierte Legende.

Text Äquivalent zur schon genannten sprachlichen Beschreibung kann die Rauminformation durch Texte erfasst werden. Wie bei der Kartendarstellung können mehr Informationen als bei einer verbalen Beschreibung übermittelt werden.

Umsetzung dieser Optionen in internet-basierte Produkte Für die Umsetzung in WWW-geeignete Medien muss die Information in Markup-Sprachen kodiert werden: Diese können als ein Spezialfall der schriftlichen Kommunikation aufgefasst werden, da die zu übermittelnden Information in menschenlesbaren, alphanumerischen Zeichenketten umgesetzt werden. Dabei wird zwischen den eigentlichen *Inhalten*, ihrer *Struktur* und dem gewünschten *Erscheinungsbild* unterschieden. Die Struktur der Information wird durch das Schachteln der eigentlichen Inhalte durch sogenannte *Tags* (Kartuschen) erreicht. Die Umsetzung der strukturierten Inhalte in ein dem Anwender verfügbares Endprodukt kann durch *Transformationssprachen* wie der Extensible Stylesheet Language (XSL) geleistet werden. Damit ist es möglich, abstrakte Rauminformationen durch Filterungsschritte in die genannten drei Darstellungsformen als synthetische Sprache, Computergrafiken und Hypertext-Darstellungen zu überführen.

Für die Verwendung in dieser Arbeit bietet sich XML bzw. eine spezialisierte Sprache wie die Geographic Markup Language (GML) an (Simon Cox und Martell 2002). Aus dieser wird durch geeignete Transformationen mittels XSL eine angepasste Botschaft erzeugt, die an die Ausgabegeräte, die betrachtete Region, interessierende Inhalte und die kulturelle Präferenz⁸ angepasst ist.

Von diesem universellen Ansatz wurde bei der Implementation der Prototypen aber abgesehen, da die XML-Fähigkeit von GRASS5.0 bisher nur eingeschränkt verfügbar ist. Für die Umsetzung eines Prototypen erwies sich die in GRASS5.0 verfügbare Kodierung in der nicht-standardisierten GRASS-Markup-Sprache ausreichend.

Exemplarisch wurden zwei Arten von Endprodukten erstellt, welche die Möglichkeit der Übermittlung wissensbasierter Produkte über Push- und Pull-Kanäle demonstrieren.

⁸Lokalsprache, Farbkodierung, Alphabet

8.5.2 Pull-Übertragung an den Endnutzer

Beschreibung eines Portals für ein Sturmzellen-Informationssystem

Bei diesem Lösungsansatz für eine graphische Umsetzung kann der Anwender für ein definiertes Thema (Sturminformation) eine interaktive digitale Kartendarstellung konsultieren, deren Inhalte aus thematisch-meteorologischen Inhalten und zusätzlichen Raumdaten des GIS bestehen. Der thematische Bezug wird gewährleistet, indem die gleichen Kategorien - anhand derer die Klassifikation der Reflektivitätsdaten durch die wissensbasierte Komponente im GIS erfolgt ist - nun als in der Kartendarstellung verortete Hyperlinks verfügbar gemacht werden. Durch das Aufrufen dieser Links führt der Nutzer selbstständig eine Aktualisierung der ebenfalls verfügbaren Frames mit Legendeninhalten zur betrachteten Region aus. In den Legendeninhalten befinden sich Verzeigerungen auf weiterführende Informationen, die kommentierend neben den thematischen Inhalten des Entscheidungsunterstützungssystems stehen.

Umsetzung Die Inhalte des beschriebenen Internetportals werden durch folgende Vorgehensweise aufgebaut:

Erzeugung der thematischen Information Es wird davon ausgegangen, dass ein GRASS GIS mit automatisiertem MDV-Import sowie eine Datenbank im Hintergrund vorhanden ist. Die Sturmzellen werden aus den aktuellen Radardaten extrahiert und von der wissensbasierten Komponente klassifiziert. Nachdem die Inferenzprozesse beendet sind und Ergebnisse vorliegen, wird in GRASS eine Markup-Kartendarstellung aufgebaut. In ihr werden Hintergrundinformationen in Form zusätzlicher Raumdaten wie Geländemodell, Straßenverbindungen, Siedlungen, Wasserkörper und Flüssen aufgetragen. Darauf werden die Klassifikationsereignisse als Vektorareale gelegt. Für die spätere Verzeigerung werden die Umrisslinien der klassifizierten Areale ebenfalls eingefügt. Danach wird aus dem so erzeugten Grass-Markup-Language Fragment ein HTML Dokument erstellt⁹.

⁹So ist es auch möglich, bei der Umsetzung der SSS-Methode (Visser 2001) die beiden Merkmale *Strukturtyp* und *Reflektivitätsstärke* für ein einzelnes Polygon durch Umriss- und Innenraum-Farbe darzustellen.

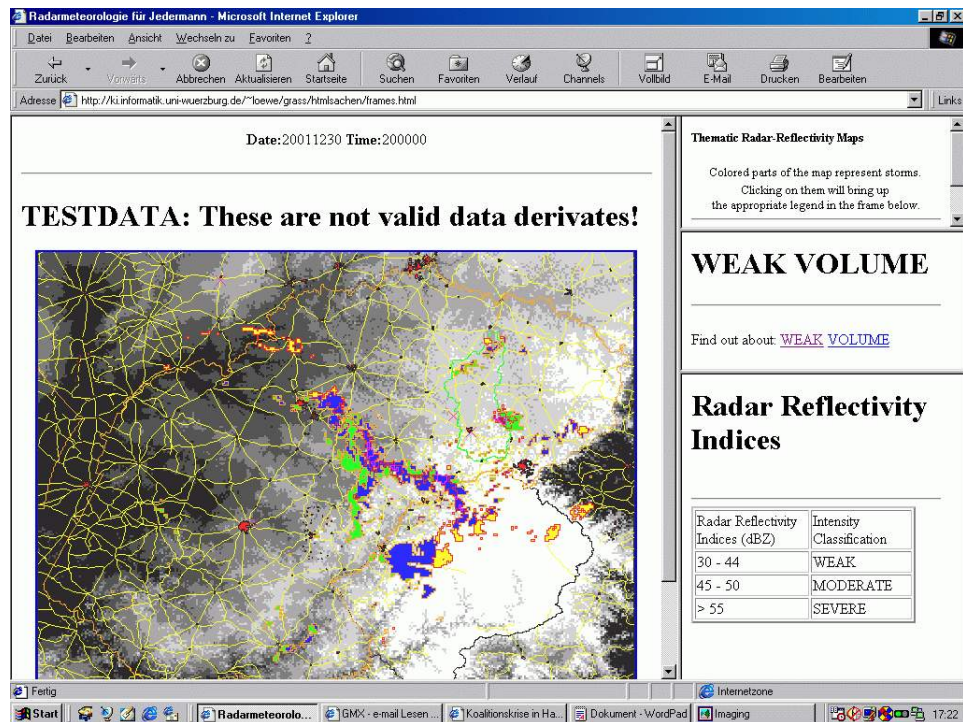


Abbildung 8.2: Frame-basierte GUI für das Sturmzellen Entscheidungsunterstützungssystem: Die Vektorareale klassifizierter Sturmzellen in der graphischen Darstellung sind mit Hyperlinks zu entsprechenden Legendeninformatio- nen versehen, die in den Frames am rechten Rand dargestellt werden.

Präsentation der thematischen Rauminformation Es existieren drei unterschiedliche Inhaltsebenen in der so aus den Raumdaten aufgebauten Internetpräsenz:

interaktive Kartendarstellung Die mit Hyperlinks versehenen Polygone der thematischen Karte im Hauptframe deuten statisch auf untergeordnete Teilframes. Unabhängig davon, wieviele Polygonflächen sich als Menge von gleich klassifizierter Regionen in der Kartendarstellung befinden, zeigen sie alle auf ein einziges Hypertextdokument als Le- gende in einem fest vorgegebenen Frame. Durch die periodische Ak- tualisierung des Karteninhalts entsteht damit der Eindruck des sich kontinuierlich verändernden Wettergeschehens aufgrund der Position der Sturmzellen .

Legendendokumente Die Inhalte, auf die aus der Kartendarstellung ver- wiesen wird, entsprechen den Diagnosen des Inferenzprozesses. Der Inhalt der Hypertextdokumente, die die Menge aller Legendeninhalte bilden, kann wiederum von anderer Stelle manipuliert werden und auf

weitere WWW-Inhalte verweisen. Damit besteht die Möglichkeit, auf weitergehende, thematisch verwandte Inhalte zu verweisen.

Hyperlinks Für die dritte Inhaltsebene außerhalb des bisher erzeugten Inhalts der Internetpräsenz bieten sich verschiedene Optionen zur Organisation der Informationsquellen an:

statische WWW Dokumente Referenz auf statische WWW-Dokumente anderer Content-Anbieter.

wissensbasierte Content Management Systeme Intelligente Content-Management-Systeme ähnlich des iZone-Projektes, bei dem Textinhalte mittels Expertensystemen verwaltet und referenziert werden (Wecklein u. a. 2001).

Suchmaschinen Vorkonfigurierte Suchmaschinen-Anfragen zum jeweiligen Thema, die für den Suchvektor die verfügbaren Informationen im WWW recherchieren.

8.5.3 Messaging Services

Alternativ zum beschriebenen Pull-Szenario bietet sich die Möglichkeit an, die aufbereiteten Informationen in Textbausteine oder synthetische Sprache zu wandeln, um sie über Push-Kanäle zu versenden. Für die weitere Beschreibung wird exemplarisch die Option der Übertragung von Textbotschaften betrachtet: Elektronische Textbotschaften identischen Inhalts können zeitgleich an eine beliebig große Zahl von Empfängern gesendet werden. Es ist zu beachten, dass dabei *nicht* davon ausgegangen werden kann, dass alle Empfänger über die gleiche Klasse von Empfangsgeräten verfügen. Auch ist eine Vorkonfiguration in Bezug auf *Betrachtungsgebiet* und *Inhalt* notwendig.

Quelldaten Als Quelldaten werden aus den Raumdaten des GIS abstrahierte Textbausteine eingesetzt, die in einer Datenbank ('STORMS') als XML-Fragmente verfügbar sind. Sie beinhalten Aussagen über verortete Wetterphänomene, im konkreten Fall Klassifikationsergebnisse für Sturmwellen in Südafrika.

E-mail und Short Message Services Text-Botschaften werden als Elektronische Post (E-mail)/ Text-Botschaft an die Empfänger versandt: Zielgeräte für E-mail sind klassische Computer, sowie persönliche digitale Assistenten und Mobiltelefone. Alternativ können die Inhalte auch als Short Message Services (SMS) auf geeignete Mobiltelefone übertragen werden.

Transformationen

Bei der Versorgung heterogener Zielgruppen ist ein Transformationsschritt notwendig, um aus den Ausgangsdaten mehrere unterschiedliche Nachrichten auf einer anderen Informationsebene zu erzeugen (Abbildung 8.3). Diese Problematik ist schon in Kapitel 7 angeklungen. Hier wird nun ein Lösungsansatz vorgestellt: Ausgehend von Quelltexten, die in der wissenschaftlichen Fachsprache verfasst und in XML kodiert sind, erzeugen geeignete XSL-Transformationen die eigentlichen Endprodukte. Dabei werden die XSL-Schablonen von den Endanwendern selbst mit Hilfe eines Expertensystems konfiguriert.

Umsetzung der Erstellung der individuellen Transformationsschablonen Für den Prozess wird ein Expertensystem mit weit entwickelten Möglichkeiten zur Führung des Dialogs mit dem Nutzer benötigt: Das Expertensystem Shell Toolkit D3 ist ein Projekt des Lehrstuhls für Künstliche Intelligenz und Angewandte Informatik an der Universität Würzburg. Es wurde speziell im Hinblick auf Anwendungen in der Medizin konzipiert. Seine 'Arztbrief-Option' (Puppe u. a. 2001; Puppe u. a. 1997) wird an dieser Stelle in einem neuen Kontext eingesetzt: Ursprünglich dafür entwickelt, um im Rahmen eines medizinischen Zweitmeinungssystems (Second Opinion System) eine druckbare Version des gesammelten Wissens über die vorliegende Diagnose auszugeben (Puppe u. a. 1997), wird es hier benutzt, um XSL-Schablonen anhand der ermittelten Anwenderbedürfnisse zu erstellen (Abbildung 8.4).

Zusätzlich wird die Dialogkomponente von D3 genutzt, um den meteorologischen Wissensstand, das Zielmedium und die Bedürfnisse einer Anwendergruppe in einem Bildschirmdialog mit dem Anwender zu ermitteln. Abhängig von den gegebenen Antworten wird eine XSL-Schablone als Textdokument erzeugt, die durch einen XML/XSL-Parser (Key 2003) zur Generierung von Zieldokumenten benutzt werden kann. Eine Übersicht über den gesamten Prozess bietet Abbildung 8.7.

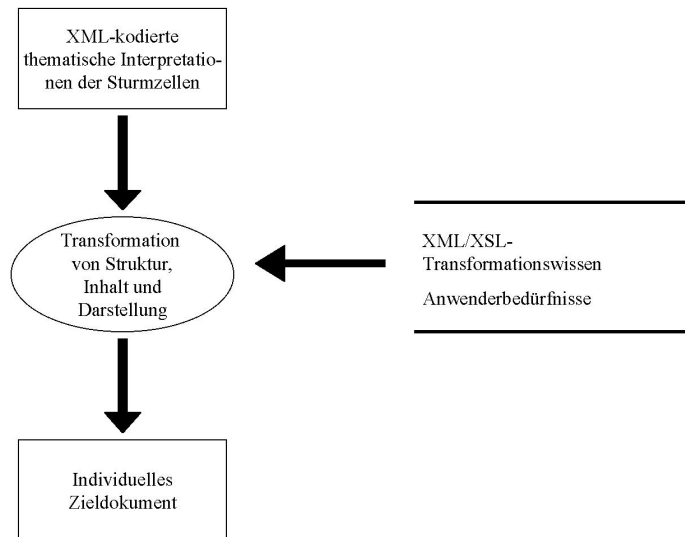


Abbildung 8.3: Übersicht über den Transformationsprozess aus der internen XML-Repräsentation in an die Anwenderbedürfnisse angepasste Dokumente.

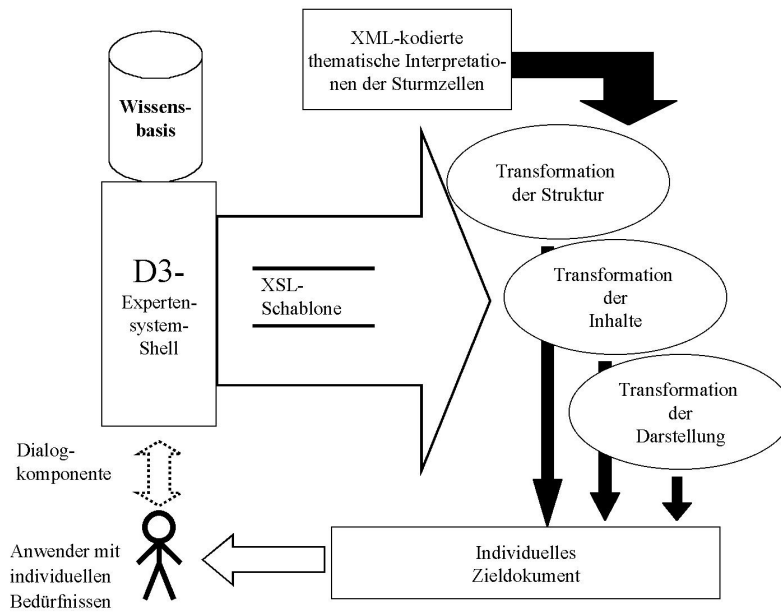


Abbildung 8.4: Die Rolle des Expertensystem-Shell Toolkits D3 im Transformationsprozess von internen XML-Repräsentationen in an Kundenbedürfnisse angepasste Dokumente: Die inhaltliche Transformation umfasst dabei die Anpassung an die gewünschte Sprache und auch die inhaltliche Umformulierung.

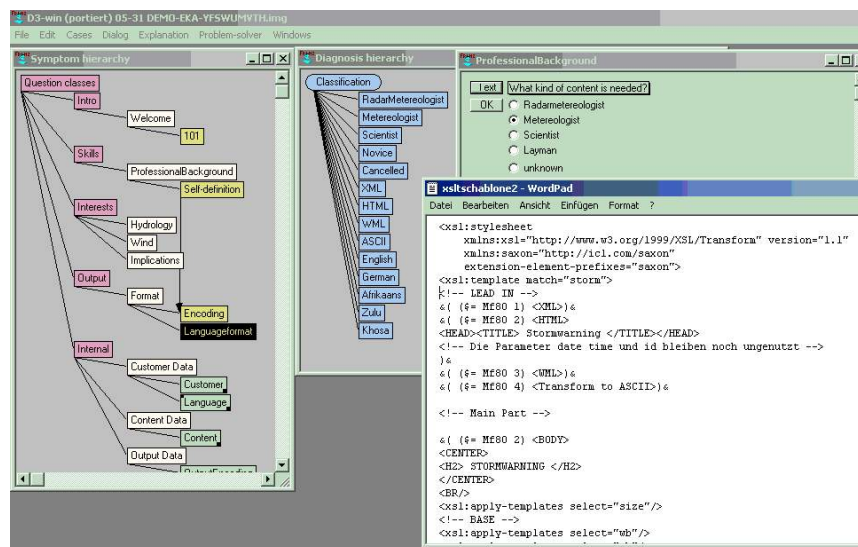


Abbildung 8.5: Englische Oberfläche eines in D3 erzeugten Expertensystems zur Generierung von XSL-Schablonen über die 'Arztbrief-Option'.

Beispiel Der Prozess wird an einem Beispiel veranschaulicht: Im konkreten Fall werden aus der GIS-Datenbank die gesammelten Klassifikationsergebnisse der achten im landesweiten Reflektivitätsdatensatz gefundenen Sturmzelle vom 30. Dezember 2001 um 19:00:00 Uhr verwendet:

Der vorliegende XML-Text (Tabelle 8.4) wird aus der Datenbank geliefert. Nach Anwendung einer XSL-Transformationsschablone entsteht daraus ein HTML-Dokument, das auszugsweise in Abbildung 8.6 dargestellt wird.

```
<?xml version=1.0
encoding=ISO-8859-1?>
  <storm
    date=20011230
    time=190000 id=8>
    <size> 82</size>
    <mb> 35</mb>
    <mv> 9</mv>
    <sv> 8</sv>
    <message/>
  </storm>
```

Tabelle 8.4: Aus der STORMS-Datenbank gelieferte Klassifikation einer Sturmzelle vom 30. Dezember 2001

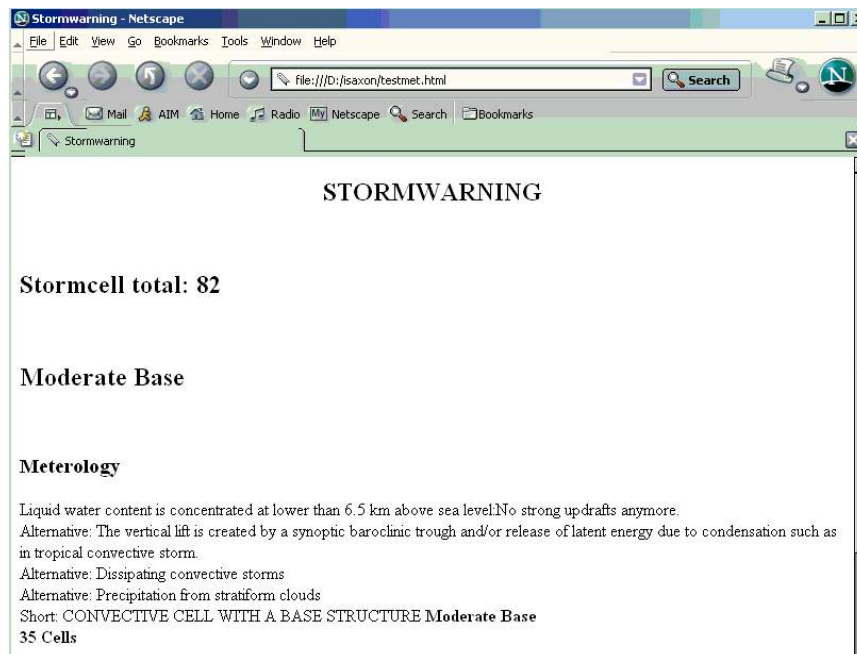


Abbildung 8.6: Die aus dem ursprünglichen XML-Dokument erzeugte HTML-Seite

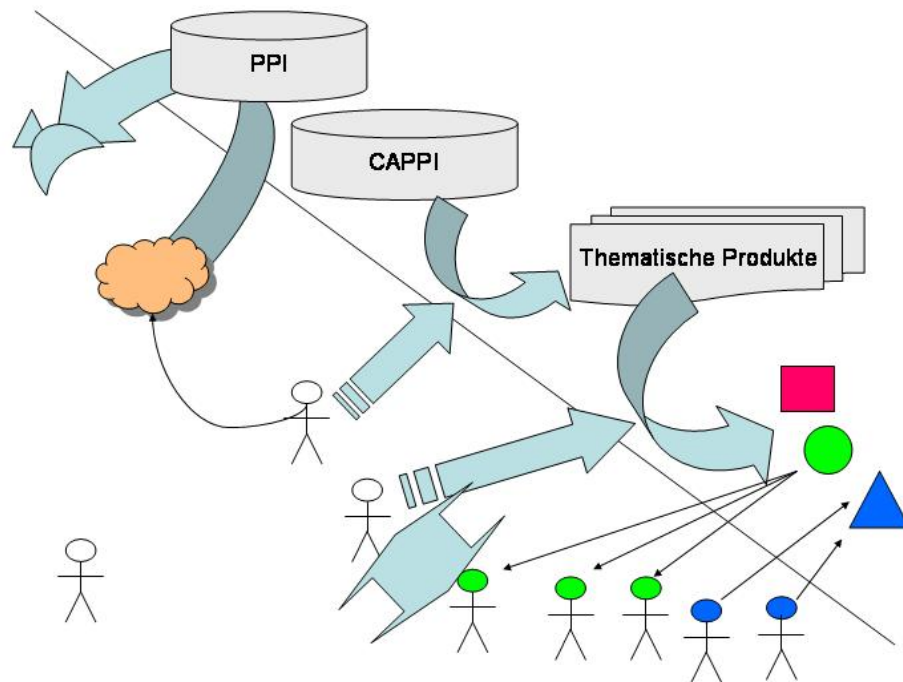


Abbildung 8.7: Skizzierter Prozess der Informationswandlung: Die in der Realität (links) beobachteten Phänomene (Wolke) werden durch Radarsysteme aufgezeichnet. Auf der Metaebene werden sie danach als PPI und CAPPI-Daten abstrahiert. Mit Hilfe von Experten (weißer Kopf) und deren Wissen über Wetterphänomene und Anwender werden aus den Daten thematische Produkte abgeleitet (geometrische Grundformen), die dann von Anwendern (bunte Köpfe) in der Realwelt nachgefragt werden.

Die spezielle südafrikanische Situation

Bei der Erzeugung von Textdokumenten aus den aufgezeichneten Reflektivitätsdaten sind zusätzliche Faktoren relevant: Ähnlich wie bei der eventuell notwendigen unterschiedlichen Gestaltung von kartographischen Darstellungen aufgrund kultureller Unterschiede¹⁰ sind hier die Besonderheiten der Region Südafrika zu beachten.

Übermittlung in welchen Sprachen? Bei der Umsetzung der verfügbaren meteorologischen Informationen in Textfassung sind sowohl Minimal- wie Maximalforderungen möglich. Die Maximalforderung wäre die gleichzeitige Bereitstellung in allen elf offiziellen Nationalsprachen, die Minimalforderung dagegen die Übermittlung in nur einer Sprache.

¹⁰In Zulu existiert kein Wort für die Farbe Orange, wogegen in Khosa ein Grün-Blau Ausdrucksproblem besteht (Kaschula und Anthonissen 1995).

Das als Geschäftssprache weltweit dominierende Englisch ist sowohl als Wissenschaftssprache als auch als Umgang- und Wirtschaftssprache in Südafrika etabliert und breitet sich weiter aus. Jedoch belegt es erst den sechsten Platz der in Südafrika vorkommenden Muttersprachen. Zwar übersteigt die Zahl der Menschen, die Englisch verstehen, deutlich die Anzahl der Muttersprachler, jedoch kann es noch nicht als lingua franca Südafrikas aufgefasst werden. Aus der historischen Entwicklung heraus ist Afrikaans wesentlich weiter verbreitet: Es erfreut sich einer weiten Verbreitung als Umgang- und Wissenschaftssprache (Terminology Bureau 1983), jedoch variiert dies lokal. Es kann also auch *nicht* als universale Kommunikationsplattform genutzt werden. Zudem gibt es gesellschaftspolitische Bedenken aufgrund der jüngsten Vergangenheit.

Die meisten der traditionell-afrikanischen Nationalsprachen wie Zulu, Xhosa sowie die Suthu-Sprachen fallen in die Familie der Bantusprachen und sind trotz starker regionaler Präsenz nicht flächendeckend im ganzen Land verbreitet.

Existiert eine südafrikanische lingua franca? Es bleibt zu klären, ob es trotz der unübersichtlichen linguistischen Situation Ansätze zur Bildung einer gemeinsamen Kommunikationsbasis gegeben hat.

Vorgeschichte Die wirtschaftliche Entwicklung Südafrikas mit dem starken Wachstum des Primärsektors im zwanzigsten Jahrhundert erzeugte kulturell stark heterogene Arbeitsbedingungen. Aus der Notwendigkeit, in diesem Umfeld kommunizieren zu können, wurde die Kunstsprache *Fanagalo* entwickelt. Sie lässt sich als eine stark vereinfachte Bantusprache beschreiben, die auf Zulu basiert und mit Lehnworten aus Xhosa, Suthu, Afrikaans und Englisch angereichert wurde. Zwar ist es möglich, Texte von Shakespeare (Bold 1996) in Fanagalo zu übersetzen, das Hauptfeld der Sprache ist jedoch alltägliche Kommunikation mit einem aus der Praxis abgeleiteten Vokabular. Mit dem Ende der Apartheid in Südafrika ist Fanagalo nicht mehr politisch korrekt: Da diese 'Umgangssprache' nicht durch das Schulsystem vermittelt wird, ist die weitere Entwicklung ungeklärt, jedoch bleibt sie durch ihre Verbreitung im südlichen Afrika durch Wanderarbeiter als Kommunikationsbasis wichtig.

Orale Kommunikation als Vorteilsmoment Da Fanagalo mit Fokus auf die orale Kommunikation entwickelt wurde, scheint es auf den ersten Blick kaum sinnvoll, diese Sprache zur Verbreitung von Wetterinformationen über prinzipiell netzbasierte digitale Medien heranzuziehen. Allerdings können XML-kodierte Textbausteine auch zu synthetischer Sprache gewandelt werden: Damit wäre ein automatisch erzeugter Radio-Themenkanal mit einfachen ausdrucksstarken Wetterinformationen in Fanagalo realisierbar.

8.5.4 Wissenschaftliches Potential

Es wurde gezeigt, dass informationslogistische Dienstleistungen basierend auf den verfügbaren Wetterradardaten erbracht werden können. Auch die kulturell heterogene südafrikanische Situation kann durch geeignete Transformationen der Inhalte berücksichtigt werden. Das wissenschaftliche Potential übersteigt jedoch die einfache Aufgabe der Übermittlung von 'Wetternachrichten' auch im Fall der Bodenerosionsproblematik: Die beschriebenen Push- und Pull-Übertragungswege können auch zur Bereitstellung aufbereiteter Datensätze in räumlich voneinander getrennten Forschungsprojekten in quasi-Realzeit genutzt werden.

Durch asynchrone Pull-Übertragungen besteht die Möglichkeit, im Internet mittels dem File Transfer Protocol (FTP) oder satellitengestützten Datacasting für regionale Betrachtungen konfigurierte Datensätze mit minimalem Zeitversatz anzubieten. Dabei werden die Daten in marktüblichen Dateiformaten übertragen und von den Nutzern in ihre Softwareumgebungen integriert.

Eine wesentlich weitergehende Möglichkeit eröffnet sich durch zwei parallel voranschreitende Entwicklungen: Schon heute werden GIS-Dienstleistungen mit Kleinstgeräten wie persönlichen digitalen Assistenten (PDA) erbracht, wobei sich die Tendenz zur Diversifikation des Feldes weiter beschleunigen wird. GIS-Endgeräte können mittels drahtloser Netzwerke (Wireless Local Area Networks: WLAN) oder Substituten wie Mobiltelefonen mit Modemoptionen auf vernetzte Datenbestände zurückgreifen (Stankovic u. a. 2002).

Mit dem schon genannten Standard der Geographic-Markup-Langage (GML) können Raumdaten in Markup-Formaten kodiert und übertragen werden, die ubiquitär und *ohne* die erwähnte Notwendigkeit des Datenimports durch den Nutzer unmittelbar verfügbar sind (Simon Cox und Martell 2002). Damit liegt die Visualisierung oder wissenschaftliche Verarbeitung zu Folgeprodukten beim Nutzer der Daten. Somit zeichnet sich für kommende Projekte die Möglichkeit ab, im Feld kontinuierlich auf aktuellste interpretierte Fernerkundungsdatenprodukte zugreifen zu können. Es steht zu erwarten, dass sich mit diesem Verfahren die Entwicklung und die Verifikation von gemachten Prognosen im Gelände wesentlich beschleunigen wird.

Kapitel 9

Erzeugung von Erosivitätsindizes aus Wetterraddardaten

Das Hauptthema, die Beschreibung der südafrikanischen Bodenerosionsproblematik durch Erosivitätsindizes, soll nun aus einem neuen Blickwinkel betrachtet werden: Für die Erzeugung von Erosivitätsindizes auf kleinräumlicher und zeitlich hochauflösender Ebene werden nun Wetterraddardaten (Kapitel 5) als Datenbasis eingesetzt. Diese werden in einer GRASS GIS-Umgebung aufbereitet (Kapitel 7) und können zur weiteren Nutzung durch Ansätze der Informationslogistik zur Verfügung gestellt werden (Kapitel 8). Für die Umsetzung von Erosivitätsindizes ist die Verwendung einer geeigneten Modellierungsumgebung notwendig: Dieses Kapitel beschreibt die dabei auftretende Problematik, den Prototyp einer solchen Umgebung und dessen Anwendung für den REI-Erosivitätsindex.

9.1 Anwendung auf den Regen-Erosivitäts-Index

9.1.1 Analyse der Umsetzung des REI aufgrund der verfügbaren Radardaten

Abstrakte Betrachtung der Datenbasis als Datenstrom Durch die Verfügbarkeit der flächendeckenden dreidimensionalen Radardaten entfällt die bisher notwendige Interpolation der nur für wenige Raumstellen verfügbaren Messwerte der Niederschlagsmesser: Die kontinuierlich verfügbaren Radardaten können als ein Datenstrom verstanden werden, dessen Inhalt sich für jede Rasterzelle der vom Radar gelieferten CAPPI-Datenmatrix mit der Zeit ändert¹.

¹Die Änderung des Wertes einer Zelle erfolgt in diskreter Form, wobei ihr Wert sich durch die Verfügbarkeit eines neuen Radardatensatzes aktualisiert.

Damit können die aus den Radarreflektivitätswerten abgeleiteten Niederschlagswerte für einen Ausschnitt der Erdoberfläche auch als ein zweiter, aus dem Radardatenstrom gewonnener thematischer Datenstrom für jede Raumzelle verstanden werden (Siehe Abbildung 9.1) (Abelson u. a. 1991).

Ausgliederung von 'virtuellen Niederschlagsmessern' aus dem Datenstrom Jede so mit Niederschlagsdaten versorgte Raumstelle kann als 'virtueller Niederschlagssammler' (VNS) verstanden werden, dessen Auswertung zur Erzeugung der Erosivitätsindizes notwendig ist. Anders als bei den in der Vergangenheit umgesetzten retrospektiven Lösungen zur Erzeugung von REI-Karten ergeben sich durch den in Echtzeit verfügbaren Strom von Radardaten neue Möglichkeiten zur Auswertung mit einem GIS: Wenn das Berechnungswissen zur Ableitung des REI in die VNS integriert wird, können diese individuell Indexwerte aus ihren Eingangsdatenströmen liefern. Damit würde die Bereitstellung von Erosivitätsinformationen in Realzeit für Informationslogistik-Ansätze möglich. Durch die Visualisierung dieser Informationen kann zusätzlich zur historischen Betrachtung die flächendeckende Information über die aktuell auftretende Erosivität geleistet werden.

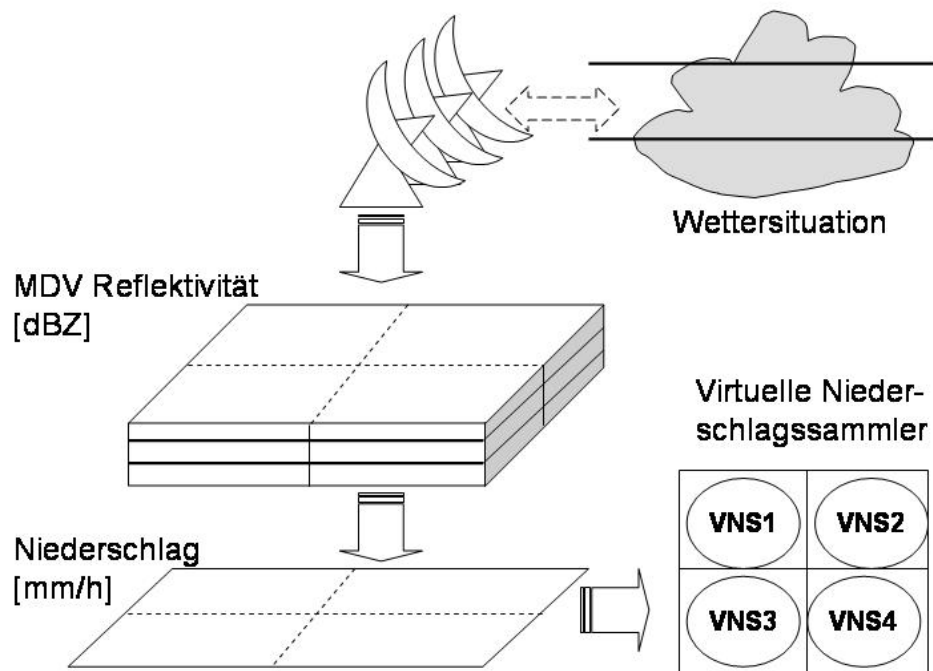


Abbildung 9.1: Gewinnung der Datenströme für die Verarbeitung durch zelluläre Automaten: Die Radarinfrastruktur erfasst kontinuierlich das Wettergeschehen in mehreren Höhenstufen (hier zu drei Stufen vereinfacht). Daraus wird ein Datenstrom von dreidimensionalen Reflektivitätsdatensätzen erzeugt. Diese Information wird daraufhin zu einem zweidimensionalen Strom gefiltert, der dann den virtuellen Niederschlagssammlern zugänglich gemacht wird.

Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen Umsetzung

Da der Niederschlagsdatenstrom im GIS durch eine Folge von Raster-Datensätzen repräsentiert wird, ist prinzipiell die Verarbeitung durch Kartenalgebra oder die GRASS-Inferenzmodule *r.(b)infer* möglich. Beide Ansätze stoßen jedoch schnell an Grenzen und werden unübersichtlich, da für die Berechnung eines Indexwerts eine Liste der schon gemessenen Werte vorgehalten und verarbeitet werden muss. Deswegen wird nun unter Einsatz der Expertensystem-Shell CLIPS (Kapitel 7) ein alternativer Ansatz mit Methoden der verteilten künstlichen Intelligenz umgesetzt und angewandt.

9.1.2 Möglichkeiten zur wissensbasierten Umsetzung

Wie in Kapitel 7 gezeigt lassen sich Berechnungsaufgaben prinzipiell in regelbasierte Systeme umsetzen:

Umsetzung des REI Für die Errechnung der REI-Werte genügt nicht allein die Umsetzung des publizierten Formelausdrucks (Seuffert u. a. 1999; Seuffert u. a. 1999). Vor der eigentlichen Berechnung müssen für die verwendeten Variablen erst Werte aus der Liste der Niederschlagsdaten erzeugt werden, was durch mehrere Algorithmen erfolgt (Seuffert u. a. 2000).

Somit muss in aufeinander folgenden Verarbeitungsschritten zuerst die *Analyse* des eingehenden Datenstroms erfolgen, um daraus Niederschlagsereignisse zu isolieren. Daran schließt sich die *Erzeugung der Variablenbelegungen* und erst im letzten Schritt die *Berechnung des Indexwertes* an.

Isolierung von Niederschlagsereignissen aus dem Datenstrom durch Zustandsautomaten Für die Isolierung der Niederschlagsereignisse aus dem vorhandenen Strom von Niederschlagsdaten eignet sich die Modellierung der Verfahrensschritte in einem Zustandsautomaten: Gemäß des REI-Algorithmus wird ein Niederschlagsereignis durch eine Folge von Niederschlagswerten (über Null) definiert, wobei zwischen zwei solchen Werten maximal ein Takt mit einem Nullwert liegen darf.² Damit benötigt ein Automat, der dieses Verfahren darstellen soll, mindestens drei Zustände:

- INAKTIV
- REGEN
- PAUSE

Solange kein Niederschlag vom Virtuellen Niederschlagssammler wahrgenommen wird, verharrt er im Zustand 'INAKTIV'. Mit dem ersten eintreffenden Niederschlagswert wechselt er in den 'REGEN'-Zustand und archiviert die eingehenden Werte. Sobald der Datenstrom für einen Zeittakt aussetzt, wechselt der Automat in den 'PAUSE'-Zustand und archiviert den Nullwert. Falls im nächsten Zeittakt wieder ein Niederschlagswert eintrifft, geht der Automat wieder in den 'REGEN'-Zustand über. Wird nun aber erneut kein Niederschlag verzeichnet, wechselt er in den 'INAKTIV' Zustand. Dieser letzte Übergang entspricht dem Ende des Niederschlagsereignisses (durch mindestens zwei niederschlagsfreie Zeittakte), und die intern aufgezeichnete Messreihe wird zu einem Indexwert gemäß der REI-Formel (siehe Kapitel 3) umgesetzt. Dieser ist dann in geeigneter Form weiter zu verarbeiten.

Zelluläre Automaten als formale Klassifikation des Problems

Die Anforderungen an die VNS-Agenten können folgendermaßen beschrieben werden:

²Die theoretische Niederschlagssequenz '00001110100010010011001010101000' würde damit in fünf Einzelereignisse aufgelöst: '11101'-'1'-'1'-'11'-'10101'

- Sie sind fest verortet.
- Jeder VNS betrachtet nur seinen eigenen Eingangsdatenstrom.
- Jeder VNS erzeugt Ergebniswerte nur abhängig von seinen Eingangsdaten und seinem eigenen Wissen.
- Die VNS folgen einem fest vorgegebenen Algorithmus, den sie nicht variieren können.

Damit lassen sie sich als einfache Zellulären Automaten (ZA) beschreiben (Zuse 1969; Openshaw und Abrahart 2000; Wolfram 2001).

Umsetzung der REI Formel durch Zelluläre Automaten

Potentiale der existierenden agentenbasierten Simulationsumgebungen in GRASS Vor der Erstellung einer eigenen Simulations- und Modellierungsumgebung wurden die schon für GRASS verfügbaren Programmpakete für agentenbasierte Simulation auf ihre Einsetzbarkeit hin evaluiert:

Bei MAGICAL handelt es sich um ein Werkzeug zur Multiagentensimulation (Lake u. a. 2000). Es ist vollständig in GRASS integriert, jedoch ist es auf die Simulation von ökologischen Fragestellungen durch mobile Softwareagenten spezialisiert. Deswegen ist es für die Simulation von ZA nur sehr bedingt anwendbar (Lake u. a. 2000).

KENGE, eine Adaption des weit verbreiteten Simulationswerkzeugs SWARM für geographische Informationssysteme, wurde zwar zusammen mit GRASS eingesetzt; Informationen über das Projekt sind jedoch nur sehr begrenzt verfügbar, wobei der Projektstatus selbst unklar ist (Kohler 2000).

Weiterhin basieren die GRASS-Module *r.fire* und *r.spreadpath* auf zellulären Automaten³, jedoch ist keine freie Programmierung der Automaten möglich (GRASS-Developer Team, ITC-irst 2002).

Umsetzung eines eigenen Ansatzes auf Basis von CAPE Ausgehend von der in Kapitel 7 vorgestellten und unter GRASS nutzbaren Expertensystem-Shell CLIPS kann der REI-Ansatz regelbasiert und objektorientiert modelliert werden. Jede Raumzelle wird dabei als eigene Entität in Form eines Zellagenten betrachtet, der anhand des ihm verfügbaren Wissens seine Umwelt betrachtet, beurteilt und entsprechend agiert. Im konkreten Fall der Darstellung durch Zelluläre Automaten ist nur eine einfache Klasse von Zellagenten erforderlich. Das entsprechende Zustandsdiagramm ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

³Markus Neteler, Email-Mitteilung

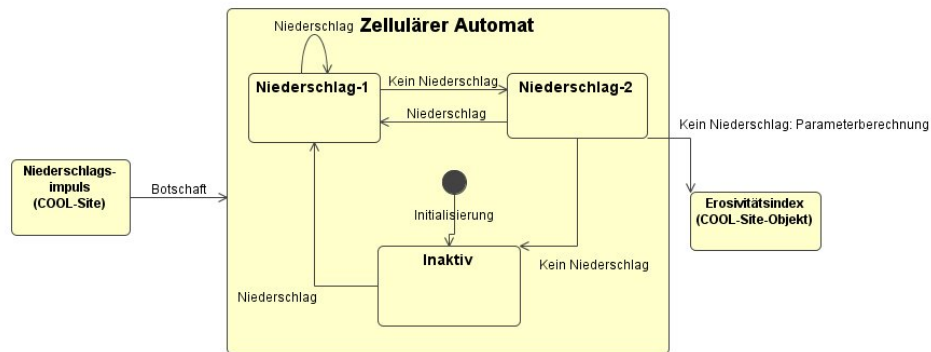


Abbildung 9.2: Diagramm des Zustandsautomaten des Zellulären Agenten für die REI-Berechnung. Die Zustände leisten die Reduzierung des eingehenden Datenstroms auf einzelne Niederschlagsereignisse. Die Berechnung des REI-Wertes erfolgt beim Übergang vom Zustand *Niederschlag2/Pause* auf *Inaktiv*.

9.1.3 Hauptschritte zur regelbasierten Agentensimulation

Die hier eingesetzte Agentensimulation wurde in mehreren Schritten aufgebaut.

1. In einer ersten Stufe wird **GRASSCAPE** für die Koppelung von GRASS und CAPE verwendet: Raumdaten werden in großer Zahl aus GRASS nach CLIPS exportiert und wieder erfolgreich importiert.
2. Den zweiten Schritt bildet die Erstellung einfacher **Softwareagenten in CLIPS**, welche die importierten Raumdaten nutzen. Für die Umsetzung werden die in CLIPS verfügbaren Mechanismen zur Erstellung von Regeln verwendet. Mit steigender Agenten-Anzahl erweist sich dieser Ansatz als zu langsam.
3. Die dritte Stufe bilden Experimente mit größeren Mengen **fest verteilter Zellagenten (ZA)**. Auch hier zeigen sich bei steigendem Berechnungsaufwand die Grenzen der rein regelbasierten Modellierung der Zellagenten⁴.
4. Der nächste Schritt ist die **objektorientierte Umsetzung der ZA** in der CLIPS Object-Oriented Language (COOL). Dies steigert die Flexibilität der Umsetzung, jedoch wird die Implementierung eines räumlichen Suchalgorithmus aus Laufzeitgründen nötig. Ein Überblick über diese Umsetzung wird im Anhang C.3 gegeben.

⁴Als Testumgebung wurde die Berechnung von Mandelbrot-Fraktalen verwendet. Als Nebeneffekt wurde eine weniger komplexe Kartenalgebra-Lösung zur Fraktalberechnung gefunden (Fukengrueven 2003)

5. Die letzte notwendige Stufe ist die Umsetzung des REI-Algorithmus durch die ZA und die **Automatisierung** des Datentransfers zwischen der Simulationsumgebung und GRASS. Radardaten werden automatisch durch GRASS verarbeitet und an die ZA in der Simulationsumgebung weitergereicht. Die von den ZA errechneten Indexwerte werden als Raster zurück an das GIS gegeben. In dieser Form können sie wie normale Rauminformationen weiterverarbeitet werden. Die Beschreibung der dafür notwendigen neuen GRASS und Clips-Module findet sich im Anhang C. Die Umsetzung der geschilderten Automatisierung ist in Abbildung 9.3 dargestellt.

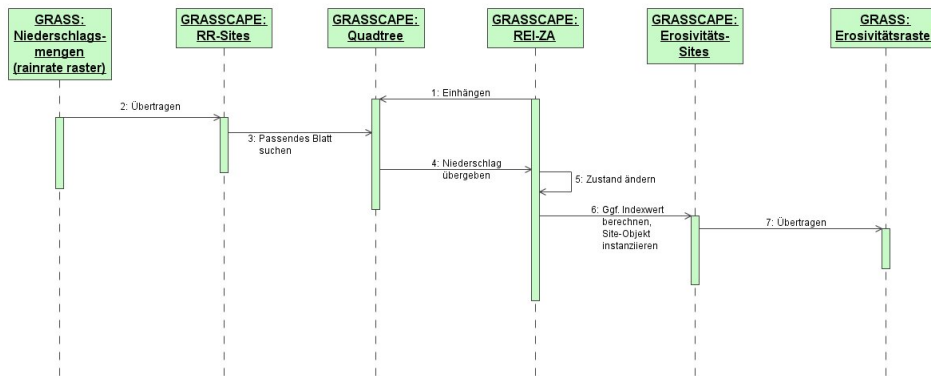


Abbildung 9.3: Überblick über den Verarbeitungsweg von Niederschlagsdaten in der Simulationsumgebung für zelluläre Agenten: Aus den in GRASS als Raster verfügbaren Niederschlagswerten werden über ein Zwischenformat ('Sites') Punktdaten-Objekte in der CLIPS-Umgebung erzeugt. Für jedes dieser Objekte, das durch seine Raumkoordinaten eindeutig bezeichnet ist, wird in einem über allen zellulären Automaten (ZA) zur REI-Berechnung errichteten Quadtree-Suchbaum nach dem entsprechenden ZA gesucht. Damit werden die in den 'Site'-Objekten abgelegten Niederschlagswerte an die ZA weitergegeben. Wenn ein ZA daraufhin einen Indexwert errechnet hat, wird dieser in einem neuen 'Site'-Objekt gekapselt. Alle zu diesem Zeitpunkt existierenden derartigen Site-Objekte werden daraufhin als Raster der Erosivitätsindizes in GRASS verfügbar gemacht.

9.1.4 Definiton der Zellagenten

Räumliche Ausdehnung und Anordnung Als Betrachtungsgrundlage dienen Raumstellen, die durch die Radardaten abgedeckt sind. Bei den vorliegenden regionalen CAPPI-Datensätzen entspricht dies quadratischen Rastern bzw. einem rechteckigen Raster für die nationalen Radardatensätze.

Verarbeitungsprozess Für jede betrachtete Raumzelle steht ein Datenstrom von Niederschlagsdaten aus den im Fünf-Minuten-Takt abgeleiteten Regenratenwerten bereit: Der jeweilige Teil-Datenstrom eines zellulären Automaten wird durch ihn in potentiell erosive Niederschlagsereignisse aufgeteilt, die er dann zu Indexwerten umsetzt. Alle ZA übermitteln ihre jeweiligen Ergebnisse an das GIS. Dort werden sie zu thematischen Rasterfeldern zusammengefasst, die Informationen über die räumlichen Erosivitätsindex-Werte enthalten. Diese können danach im normalen GIS-Betrieb weiterverarbeitet werden.

9.2 Erweiterungsmöglichkeiten

Die Umsetzung des REI-Ansatzes durch zelluläre Automaten ergibt zusätzliche Freiheitsgrade, die bei der Weiterentwicklung des Erosivitätsindex genutzt werden können:

Durch die Verteilung des notwendigen Wissens auf die einzelnen Automaten wird es möglich, die Automaten mit *unterschiedlichem Wissen* - abhängig von ihrer Position auf der Erdoberfläche oder den verfügbaren Eingangsdaten - auszustatten. Damit wird auch eine Vorverarbeitung der Eingangsdaten durch die Automaten möglich: Durch Mittelwertbildung oder aktives 'Impfen' der ZA mit den für ihre Positionen normalen Radarstörerechos lassen sich topographie-bedingte 'Ausreißer', die die Ergebnisse verfälschen, eliminieren⁵. Weiter kann zusätzliches regionales Raumwissen für die ZA aus der GIS-Umgebung verfügbar gemacht werden, beispielsweise Geländehöhe, Hangneigung oder Vegetationsinformationen. Mit diesen Zusatzinformationen wird es über die Berechnung eines Erosivitätsindex hinaus möglich, einen Schritt zur Berechnung von Teilaspekten von Bodenerosionsformeln zu tun, wie er in Kapitel 3 vorgestellt wurde.

Ausbau In einer weiteren Ausbaustufe kann die derzeit realisierte Anbindung zwischen GRASS und CAPE auf hoher Software-Ebene durch eine maschinennähere Verbindung ersetzt werden (Rodriguez-Bachiller 2000). Dies wird zu stark beschleunigtem Laufzeitverhalten und reduziertem Speicherverbrauch beim Datentransfer führen. Auf dieser Basis ist es auch möglich, dreidimensionale Radardaten durch die ZA zu verarbeiten: Für die Ableitung der Niederschlagsinformation aus den Radardaten kann jeder Zellagent individuell entscheiden, wie die verfügbaren Datenlagen ausgewertet werden. Äquivalent zu der größeren Datenmenge, die in die Simulationsumgebung gesendet wird, können auch gesteigerte Datenvolumina wieder zurück in das GIS übertragen werden. Die ZA können so auch zusätzliche

⁵Dies erfolgt äquivalent zur lokal angepassten Berechnung von Z-R Formeln durch Variablenmatrizen.

Metainformationen liefern, die ihre lokalen Aktionen für den GIS-Anwender nachvollziehbar machen und als Rasterdaten im GIS dokumentieren.

Kapitel 10

Ergebnisse

10.1 Eingesetzte Datenquellen und abgeleitete Resultate

Datenbasis In Kapitel 6 wurde auf die potentiell vorhandenen Mehrdeutigkeiten bei der Erzeugung der landesweiten Radardatenkomposite eingegangen. Solange die Daten diesbezüglich nicht gefiltert werden, schlagen sich diese auch in den abgeleiteten Produkten nieder. Dies gilt auch für die abgeleiteten Niederschlagswerte. Aus diesem Grund wurde die Erzeugung von REI-Werten auf regionale Radardatensätze beschränkt, bei denen die möglichen Datenfehler besser verstanden werden: In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse mehrerer Radardaten-’Tage’ des MRL-5 Radars im östlichen Freestate vorgestellt¹.

Die jeweils im Zeitraum von 00:00 Uhr bis 24:00 Uhr aufgezeichneten CAPPI-Datensätze werden entsprechend der Aufzeichnungsreihenfolge im GIS verarbeitet und in die ZA-Umgebung eingespielt².

Eigenschaften der erzeugten Resultate Aus technischen Gründen wird eine Umskalierung um den Faktor 100 im Vergleich zur Standardvariante des REI vorgenommen: Die REI-Formel (Formel 4.12) erfordert die Division des errechneten Wertes durch 10^6 . Damit fallen viele Werte in das In-

¹Das MRL-5 eignet sich zwar zur Erfassung von Daten in zwei Wellenlängenbereichen. Die beim SWAS verfügbaren Daten wurden jedoch ausschließlich in einem Wellenlängen-Band aufgezeichnet.

²Die verwendeten regionalen CAPPI Datensätze werden jeweils im Abstand von etwa fünf Minuten aufgezeichnet (die zeitliche Differenz entsteht durch den Scanzzyklus des Radars und die notwendige Verarbeitungszeit zu CAPPI-Daten im MDV-Format). Anders als bei den aus den einzelnen Stationsdaten zusammengesetzten landesweiten Daten existieren keine standardisierten Zeittakte zu denen Datensätze produziert werden. Deswegen kann die verfügbare Zahl der CAPPIs im Intervall zwischen zwei vollen Stunden zwischen 11 und 13 schwanken. Bei den umgesetzten Animationen der Ergebnisse wurden deswegen auch die Zeitmarken in die Darstellung eingefügt, so dass die jeweiligen Aufzeichnungszeiten bekannt sind.

tervall zwischen Null und Eins, was bei der Aufbereitung zu GIF-Graphiken Probleme mit sich bringt. Die Skalierung wird deswegen auf den Faktor 10^4 reduziert, um diese Werte zu erhalten. Die so entstandenen Ergebnisse der $288 = (12 \cdot 24)$ REI-Kartierungen pro Datentag stehen zusammen mit den Ausgangsdaten im GIS zur Verfügung. Für einen bestimmten Zeitpunkt können die aktuellen Radar-Reflektivitäten, das dazugehörige Niederschlagsfeld und die durch die Zellagenten gelieferten REI-Erosivitätsindizes der in diesem Moment *beendeten* Niederschlagsereignisse betrachtet werden. Aus diesen Informationen lassen sich digitale Kartenprodukte ableiten: Durch *Akkumulation* können Tagessummenkarten der Erosivität gebildet werden und durch *Animation* die zeitliche Dynamik des Niederschlags- und Erosivitätsgeschehens dargestellt werden (Abbildungen 10.2 und 10.1). Weiterhin können die REI-Ergebnisse in andere GIS-Projekte übertragen, als Eingangsdaten für andere Simulationspakete genutzt, oder mit anderen Raumdaten kombiniert werden.

10.2 Analyse der Ergebnisse

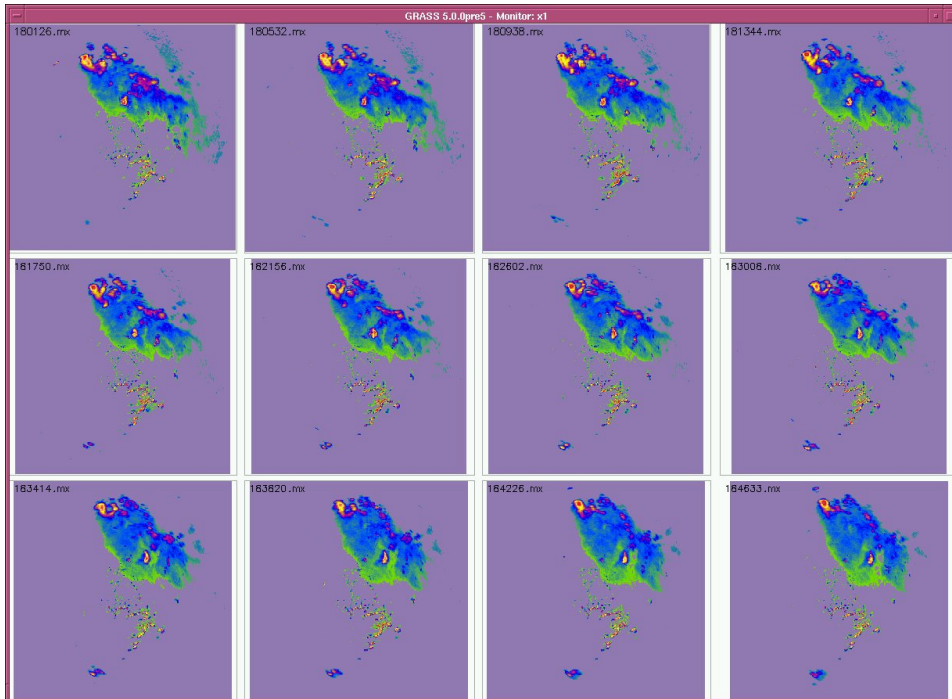


Abbildung 10.1: Darstellung der Entwicklung der maximalen Radarreflektivitäten (MaxCAPPI) des MRL-5 als Zeitreihe vom 15. Dezember, 18:01 Uhr bis 18:48 Uhr. Neben dem Wettergeschehen mit der Dynamik der einzelnen Sturmwzellen (rote Echos) fallen im unteren Teil der Darstellungen topographische Störechos (Rooiberge) auf.

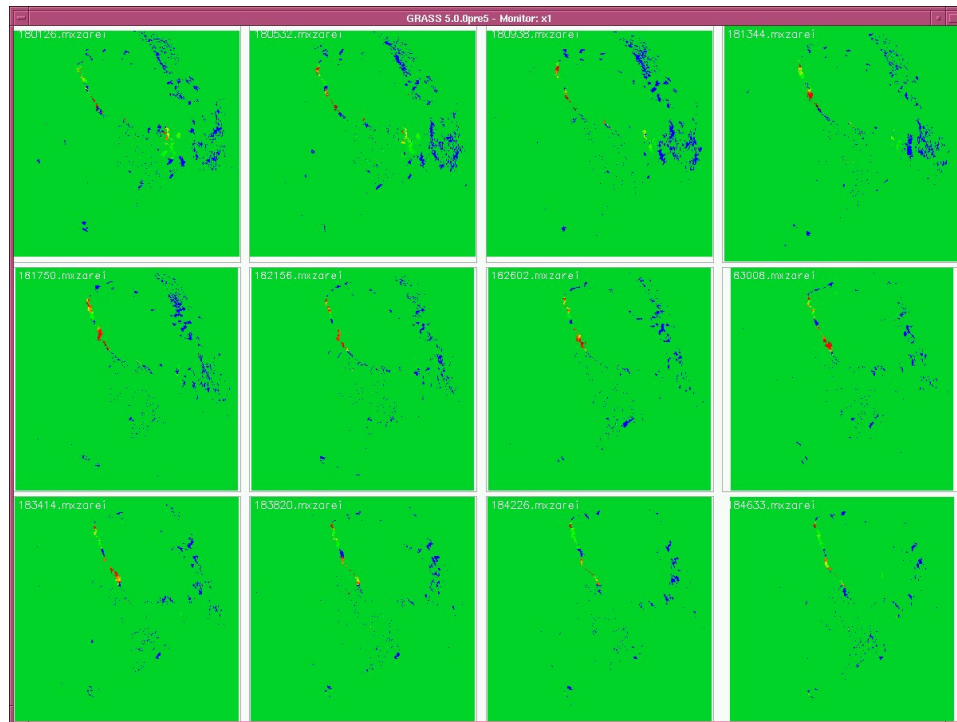


Abbildung 10.2: Darstellung der Höhe und Verteilung der REI-Werte der MRL-5-Daten als Zeitreihe vom 15. Dezember, 18:01 Uhr bis 18:48 Uhr. Die aus den in Abbildung 10.1 dargestellten Reflektivitätswerten abgeleiteten REI Werte zeigen bandartige Strukturen. Ihre räumliche Verteilung folgt den Niederschlagsfeldern. Die Areale der REI-Bandstrukturen mit hohen Indexwerten (rot/gelbe Farbwerte) folgen dabei mit zeitlichem Versatz den Bewegungsrichtungen der Sturmzellen, die in Abbildung 10.1 ebenfalls durch rote/gelbe Farbwerte dargestellt sind: Der REI-Ansatz dient so als ein Maß der über den betrachteten Raumstellen abgelaufenen Niederschlagsdynamik.

10.2.1 Räumliche Muster der Erosivitätswerte

Wenn das Radar-Reflektivitätsfeld für einen betrachteten Zeittakt die Ableitung von signifikanten Niederschlagsmengen zulässt, treten bei der räumlichen Verteilung der Erosivitätsindex-Werte meist *lineare Muster* auf (Abbildung 10.2). Die Verteilung dieser Muster zu einem einzelnen Zeittakt ist nur bedingt aussagefähig, da die Muster nicht statisch sind, sondern sich mit jedem Zeittakt verlagern: Ihre räumliche Verteilung folgt dabei der Rückseite der Niederschlagsfelder, die (in der Animation) vor ihnen herzuziehen scheinen. Dies folgt aus der Tatsache, dass die Muster denjenigen Regionen entsprechen, in denen zum aktuellen Zeittakt Niederschlagsereignisse *beendet* wurden.

10.2.2 Das auftretende Spektrum der REI-Indizes

Die Höhe der in den Datensätzen auftretenden Indexwerte dient als Maß für die Erosivität der Niederschlagsereignisse. Aus der Perspektive eines einzelnen Zellautomaten (in seiner Rolle als virtueller Niederschlagssammler) betrachtet, generiert der Durchgang *einer* Sturmwelle nach Ende der Niederschläge einen entsprechenden REI-Impuls. Niederschlagswerte, die aus niedrigeren Reflektivitäten über vergleichbare Zeitperioden abgeleitet wurden, erzeugen wesentlich geringere REI-Werte.

Damit kann demonstriert werden, dass der REI-Ansatz auch in der Praxis geeignet ist, um die Dynamik eines über einen Virtuellen Niederschlagssammler ziehenden Niederschlagsfelds zu erfassen. Durch die aufgrund der Radardaten mögliche flächendeckende Kartierung der REI-Werte in Verbindung mit den Ausgangsdaten kann nun erstmals die *flächendeckende Verbreitung* der Indexwerte in *kontinuierlicher Weise* erfolgen.

10.2.3 Weitergehende Summenbildungen der Erosivitätswerte

Bis zu diesem Punkt wurde gezeigt, dass die Umsetzung des REI-Ansatzes durch Zelluläre Automaten möglich ist und die für einen bestimmten Zeittakt erzeugten Erosivitätskarten die zu erwartenden flächendeckende Kartierungen darstellen. In Hinblick auf die flächendeckene Verfügbarkeit der Radardaten stellt sich die Frage, ob sich *weitere* Raummuster der *Summen der Erosivitätswerte* abzeichnen, die im Rahmen der bisher publizierten Interpolationskarten nicht erfasst werden konnten, die aber nun aus den Ergebnissen der Zellagenten abgeleitet werden können.

Da die Erosivitätskarten als GIS-Raster vorliegen, kann die Summenbildung mittels Kartenalgebra erfolgen. Dies ist analog für die verwendeten Reflektivitätswerte und die abgeleiteten Niederschlagsmengen möglich. Bei den beiden in Folge vorgestellten Beispielen werden Tagessummen der Radar-Reflektivitäten, Niederschlagswerte und REI-Werte in unterschiedlichen Darstellungsformen betrachtet.

In Anhang E werden zusätzlich die Ergebnisse vom 19. November 1998 (Beispiel des missverständlichen Radarpluviogramms aus Kapitel 7) dargestellt.

Darstellungsformen Aus der Gesamtmenge der in der GIS-Umgebung bereitgestellten Visualisierungsoptionen werden zwei Formen für die Darstellung der erzeugten Tagessummen eingesetzt:

Zweidimensionale Kartenprodukte Hierfür werden die pro Datentag erzeugten drei Summenkarten der Reflektivität, abgeleiteter Niederschlagswerte und REI-Werten nebeneinander dargestellt.

Bei den ausschließlich verwendeten regionalen Daten des MRL-5 Radars zeigen sich in allen Darstellungen Störeffekte der Bergregion im Süd-Südwesten, die im Gegensatz zu den anderen Informationen lagestabil sind: Damit können sie als Referenzpunkte beim Vergleich der einzelnen Kartendarstellungen dienen.

In einer ersten Verarbeitung wurden Grauwert-Keile über die in den Datensätzen auftretenden Wertespektren gestreckt. Zur besseren Darstellung der extremen Werte wurden daraufhin angepaßte Farbkeile für die einzelnen Kartenprodukt-Kategorien erstellt und eingesetzt.

Visualisierung als Oberflächen Die 2.5-dimensionale Darstellung der in den Kartenprodukten räumlich verteilten Variablen als Höheninformation bietet wesentliche Vorteile in Verbindung mit der geschilderten streng zweidimensionalen Verarbeitung: Kleinräumliche Areale mit extrem hohen Werten können sehr eingängig dargestellt werden. Dabei müssen allerdings die zur Visualisierung notwendigen Interpolationseffekte berücksichtigt werden.

In einem ersten Ansatz wurden für das erste Beispiel die drei Tagessummen vergleichend nebeneinander gestellt. Die Störeffekte durch die Oberflächenechos im Süd-Südosten führten jedoch zu Verzerrungen in der Darstellung, da die Störechos die relevanten Daten um Größenordnungen übersteigen. Dadurch wurde die eigentliche Aussage der Datensätze unkenntlich gemacht. Aus diesem Grund wurde, wie auch bei Vorgängerprojekten (Mittermaier 1999), nur die Nordhälfte der Datensätze in Abbildung 10.5 dargestellt.

Für detaillierte Betrachtungen der REI-Summenwerte wurden die extremen Störeffekte der Bergechos aus dem REI-Datensatz entfernt.

Erstes Beispiel: Hohe REI-Werte Die Ergebnisse vom 15. Dezember 1998 werden hier beispielhaft vorgestellt. Im oberen Bildteil von Abbildung 10.3 (Visualisierung der Tagessummen) lassen sich langgestreckte west-östliche Strukturen in den summierten Reflektivitätsdaten erahnen, die in der Niederschlagssumme deutlicher auftreten und in der REI-Summe (unten) gut abgegrenzt erscheinen. Ähnliche Strukturen sind auch im südwestlichen Bildteilen festzustellen. Die Oberflächenechos im südlichen Radarerfassungsbereich sind in den Reflektivitäts- und Niederschlagsdaten sehr einfach von den eigentlichen Bildinformationen zu trennen. Bei den REI-Werten sind sie dagegen in der Aufsicht visuell ohne Zusatzwissen kaum von den Daten abzugrenzen. Die über das jeweilige Datenspektrum der drei Summen gespreizten Grauwertdarstellungen grenzen die Zugbahnen der potentiell erosiven Sturmzellen von den unbetroffenen Arealen ab. Eventuell vorhandene Schwankungen *innerhalb* dieser Gebiete mit hohen Niederschlags- und Erosivitätswerten sind in dieser Darstellungsform durch die beschränkte Zahl der

Grauwerte jedoch schwer abzuschätzen, sind allerdings in der angepassten Falschfarbendarstellung in Abbildung 10.4 besser auszumachen.

Im Vergleich dazu zeigt die Darstellung 10.4 unter Einsatz angepasster Farbwerte und mit transparentem Hintergrund wesentlich mehr Details bei den extrem niedrigen und extrem hohen Werten. So werden erst hier die teilweise im Süd-Südwesten vorhandenen Sonnenstandsphänomene sichtbar.

Analyse In der dreidimensionalen Darstellung (Abbildung 10.5) zeigt sich, dass die Werte innerhalb der REI-Entsprechung der Sturmzellenzugbahn in den meisten Fällen auf einem niedrigwertigen Plateau liegen, während die wirklich signifikanten Erosivitätswerte nur in räumlich eng umgrenzten Gebieten auftreten. Da die Zellulären Automaten bei der Erstellung der Erosivitäts-Indexwerte nicht miteinander kommunizieren, stellen diese geschlossenen Areale ein Indiz für eine niederschlagsbedingte Dynamik dar.

In Abbildung 10.5 wird nur der Nordteil des vom Radar erfassten Gebietes dargestellt: Es handelt sich wieder um eine Grauwertdarstellung, wobei von links nach rechts die REI-Summe, die Niederschlagssumme und die Reflektivitätssumme dargestellt werden. Dabei treten die bandartigen Strukturen in der REI-Summe anschaulich zu Tage. Abbildung 10.6 zeigt ebenfalls in dreidimensionaler Darstellung aus nordöstlicher Richtung die REI-Summe für das gesamte Radarerfassungsgebiet. Dabei wurde ein großer Teil der Bergechos im Südtteil unterdrückt³, die verbleibenden niedrigeren Störsignale bezeichnen jedoch eindeutig die Position des Gebirges in Relation zum Radar. In dieser Darstellung ist die lineare Anordnung der Gebiete erhöhter Erosivität noch eindeutiger zu erkennen.

Die Abbildungen 10.7, 10.8 und 10.9 geben zusätzlich eine detaillierte Ansicht der Zonen erhöhter Erosivität: Die hochauflösende Betrachtung der Tagessummenwerte der niedergegangenen Niederschlagsmengen und der aufgetretenen Erosivitätswerte macht deutlich, welchen Einfluss die zeitliche Homogenität und Heterogenität der Niederschlagsspenden über einer Raumzelle für die potentielle Erosivität hat.

³Alle Werte über 700 Erosivitätseinheiten wurden herausgefiltert, da sich empirisch gezeigt hat, dass die Erosionsimpulse unter diesem Wert liegen. Entsprechend werden alle höheren Werte als Störimpulse betrachtet.

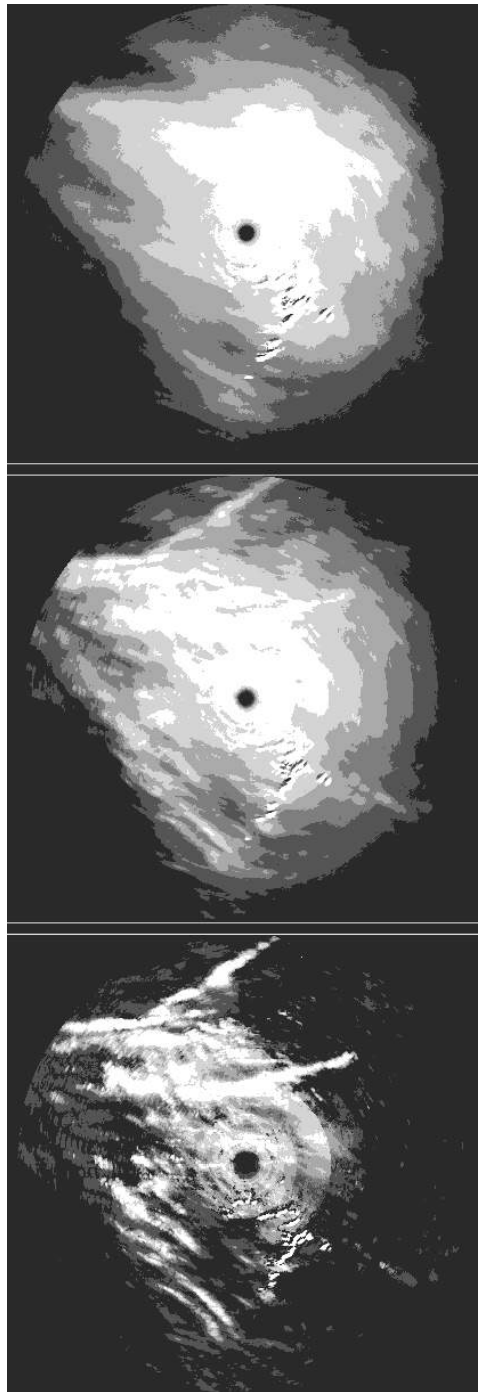


Abbildung 10.3: Grauwertdarstellung der Summen der Radarreflektivitäten, abgeleiteten Niederschläge und REI-Indexwerte vom 15. Dezember 1998

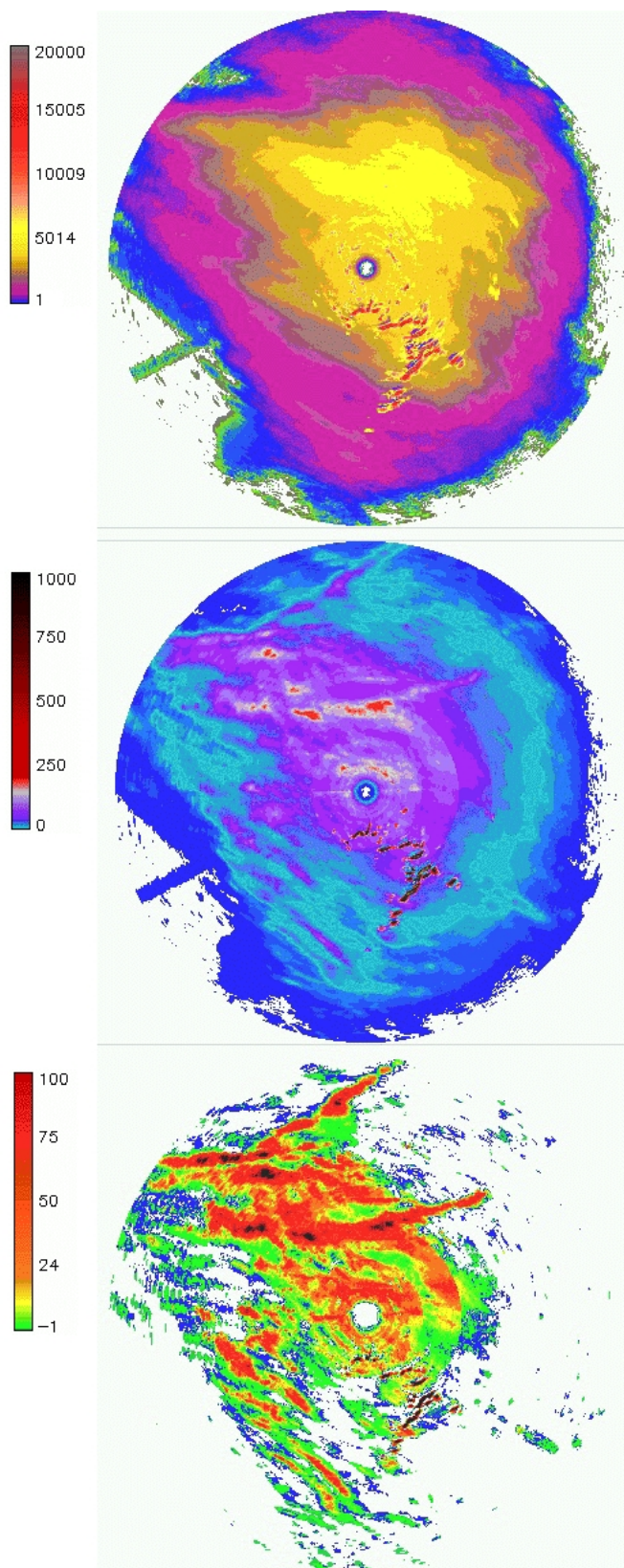


Abbildung 10.4: Darstellung der Summen der Radarreflektivitäten, abgeleiteten Niederschläge und REI-Indexwerte vom 15. Dezember 1998 mit angepassten Farbwerten

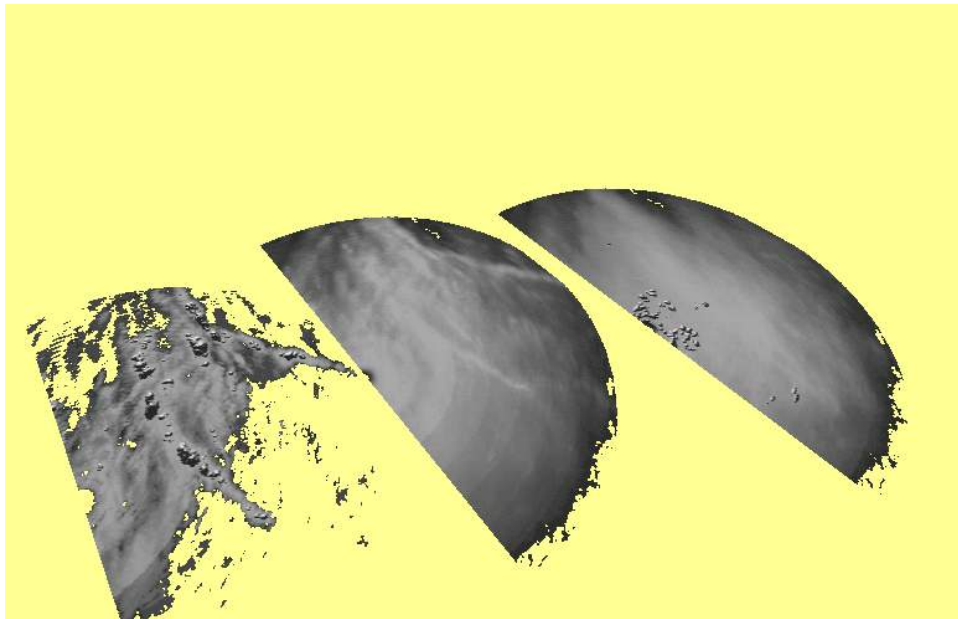


Abbildung 10.5: Dreidimensionale Darstellung vom 15. Dezember 1998: Es wird nur der Nordteil des durch das MRL-5 erfassten Gebietes dargestellt. Dabei befinden sich links die *REI-Werte*, mittig die *abgeleiteten Niederschlagswerte* und rechts die *Radarreflektivitäten*. Die linienhaften Strukturen der Niederschlagswerte korrelieren mit den in dieser Darstellung mauwrfügel-ähnlich dargestellten Signalspitzen der REI-Werte: Die Darstellung der Höhenwerte der drei Datensätze musste stark skaliert werden. Die wirklichen Ausmaße der Erosivitätsimpulse wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

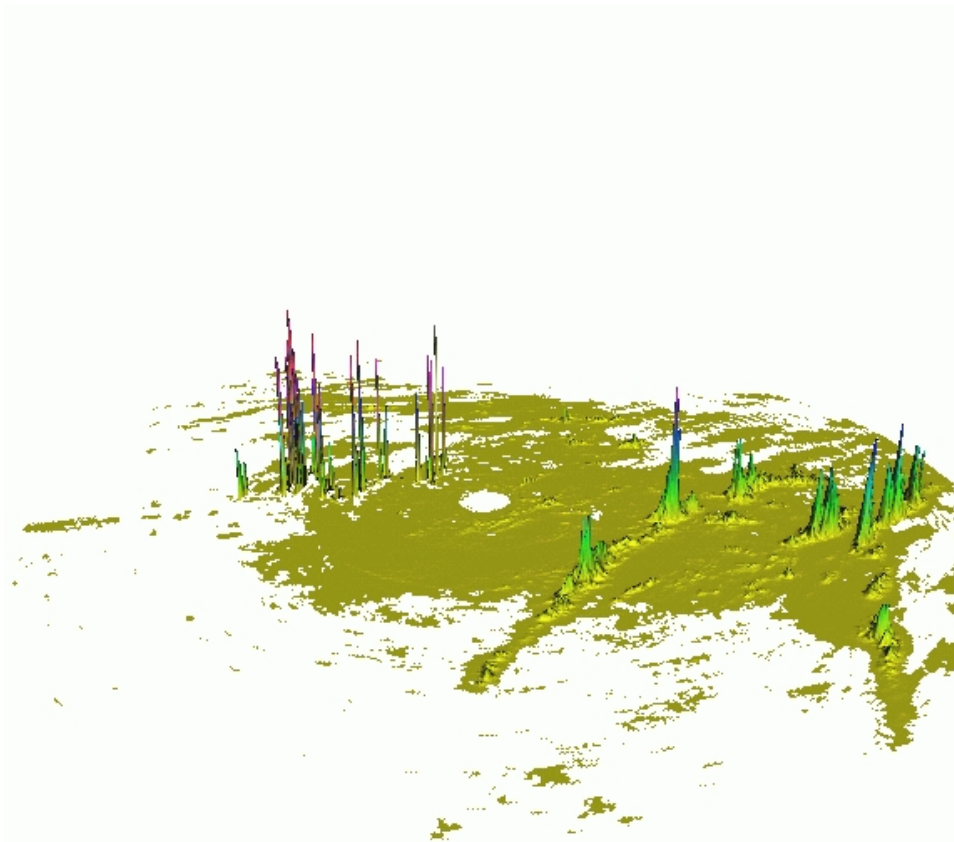


Abbildung 10.6: NVIZ Darstellung der REI-Tagessummen vom 15. Dezember 1998 mit Überhöhungsfaktor 0.1: Es werden die REI-Tagessummen aus nordöstlicher Richtung betrachtet. Links im Bildhintergrund sind die Restechos der durch Topographie beeinflussten Regionen erkennbar. Signale überhalb 70 REI-Einheiten wurden zuvor entfernt.

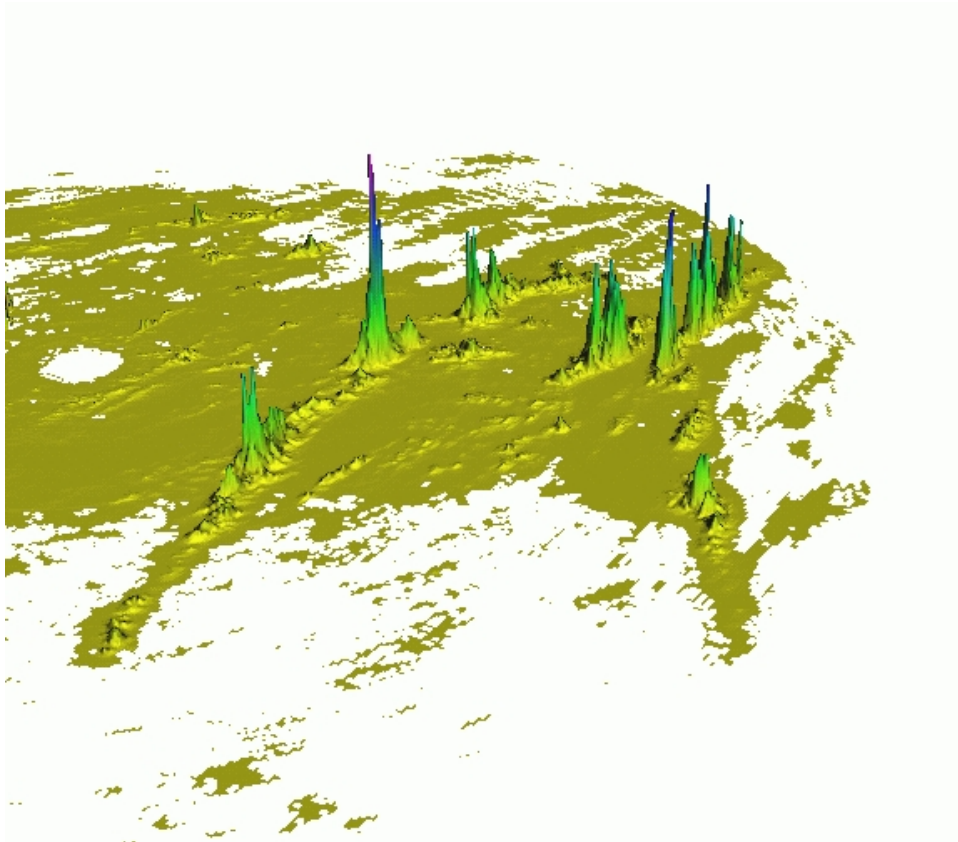


Abbildung 10.7: NVIZ Darstellung der REI-Tagessummen vom 15. Dezember 1998 mit Überhöhungsfaktor 0.1: Detaillierte Betrachtung der innerhalb der linienhaften Zonen mit erhöhten Niederschlägen auftretenden REI-Signalspitzen. Der in der Bildmitte dargestellte REI-Spitzenwert und die nähere Umgebung werden in den Abbildungen 10.8 und 10.9 weiter betrachtet.

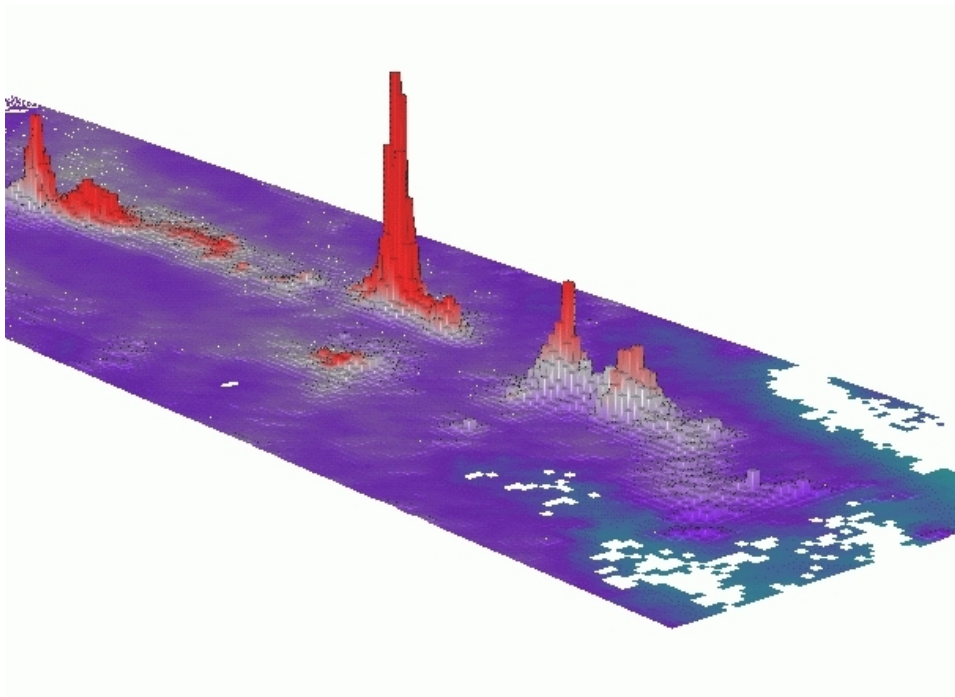


Abbildung 10.8: NVIZ Darstellung der REI-Summen vom 15. Dezember 1998 mit Überhöhungsfaktor 0.05: Blick aus westlicher Richtung auf den in Abbildung 10.7 dargestellten Erosivitätsmaximalwert. Bei höherer räumlicher Auflösung (Kantenlänge der aufgelösten Raumstellen: 1000m) wurde die Darstellung mit den Niederschlagssummenwerten gemäß Abbildung 10.4 eingefärbt. Schon bei dem REI-Impulscluster im Bildvordergrund fällt auf, daß die signifikante REI-Impulse nicht zwingend mit hohen Niederschlagssummen (rot) übereinstimmen müssen. Allerdings stimmen die sehr hohen REI-Impulse in der Bildmitte mit starken Niederschlagsmengenwerten überein. Das im linken Bildhintergrund befindliche Gebiet wird detailliert in Abbildung 10.9 betrachtet.

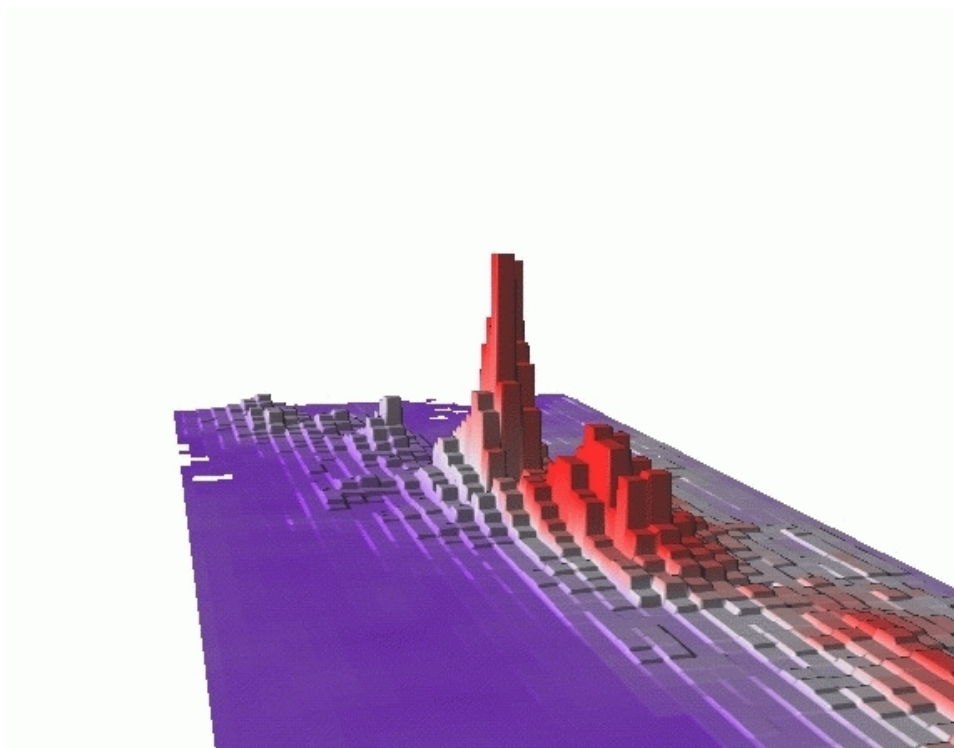


Abbildung 10.9: NVIZ Darstellung der REI-Summen vom 15. Dezember 1998 mit Überhöhungsfaktor 0.05: Blick aus Osten auf den westlich vom REI-Maximalwert gelegenen Cluster. Der Kontrast von niedrigen REI-Werten bei leichten Niederschlagsspenden (hellrot) im rechten Bildvordergrund, hohen REI-Werten bei mittleren und hohen Niederschlagswerten (rot) in der Bildmitte und signifikanten REI-Werten bei geringen Niederschlägen (grau/blau) im Bildhintergrund demonstriert anschaulich die Rolle der temporalen Niederschlagsdynamik für den Erosivitätsparameter.

Zweites Beispiel: Wissensbasierte Filterung von Störeffekten Nun wird gezeigt, wie sich systematische Datenfehler auf die Ergebnisse auswirken: Die Darstellung 10.10 zeigt für den 16. Dezember 1998 nur geringe Niederschlagswerte und daraus resultierend gering ausgeprägte REI-Werte, jedoch treten die Artefakte der Sonnenstandsphänomene, die schon in Kapitel 5 angesprochen wurden, klar als vom Zentrum ausgehende Streifen nach Südwesten und Nordosten zu Tage. Diese Balken sind das Datenecho der niedrig über dem Horizont stehenden Sonne in der Morgen- bzw. Abenddämmerung: Niederschlagskarten, die unmittelbar aus den Reflektivitäten abgeleitet werden, werden von diesem Störsignal beeinflusst (Abbildung 10.10). Da die Phänomene zeitlich und räumlich stark variieren, ist es nur mit hohem Aufwand möglich, diese Echos bei der automatischen

Datenverarbeitung herauszufiltern. Damit müsste dieser systematische Fehler der Erosivitätsinformation in Kauf genommen werden, sofern nur die vom SAWS erzeugten Pluviogramme zur Auswertung verfügbar sind. Obwohl die durch die ZA-Simulation erzeugten REI-Werte die schon bekannte Beeinflussung durch die Oberflächenechos im Südteil zeigen, beeinflussen die Sonnenstandseffekte die REI-Ergebnisse jedoch *nicht*. Dies kann durch eine implizite Filterfunktion des REI erklärt werden: Die Grundlage der REI-Formel bildet das sehr einfache Expertenwissen, dass die durch Radar erfassten Niederschlagsereignisse in der Atmosphäre eine Dynamik haben. Dieses Fachwissen wurde in der ZA-Modellierung als Filterung der Eingangsdaten umgesetzt (Siehe: Kapitel 9, Zustandsautomat). Die für einen menschlichen Beobachter 'augenscheinlichen' Sonnenstandseffekte fluktuieren während ihres Auftretens sehr stark: von den in den Summenwerten erscheinenden 'Balken' ist immer nur ein jeweils kleines Segment in den einzelnen CAPPI-Datensätzen vorhanden. Dieses 'Rauschen' tritt an jedem Raumpunkt immer nur sehr kurzfristig auf: Die betroffenen ZA können aus diesen 'widernatürlichen' Werten keine vollständigen Niederschlagsereignisse ableiten und sie entsprechend nicht als REI-Werte umsetzen. Damit eignet sich die zellbasierte Umsetzung der Ableitung von Niederschlagsdaten aus Radarreflektivitäten auch als paralleler Datenfilter für Störsignale. Da die REI-Werte für diesen Datentag nur gering sind und keine Signalspitzen auftreten, wurde auf eine zweieinhalbdimensionale Darstellung verzichtet.

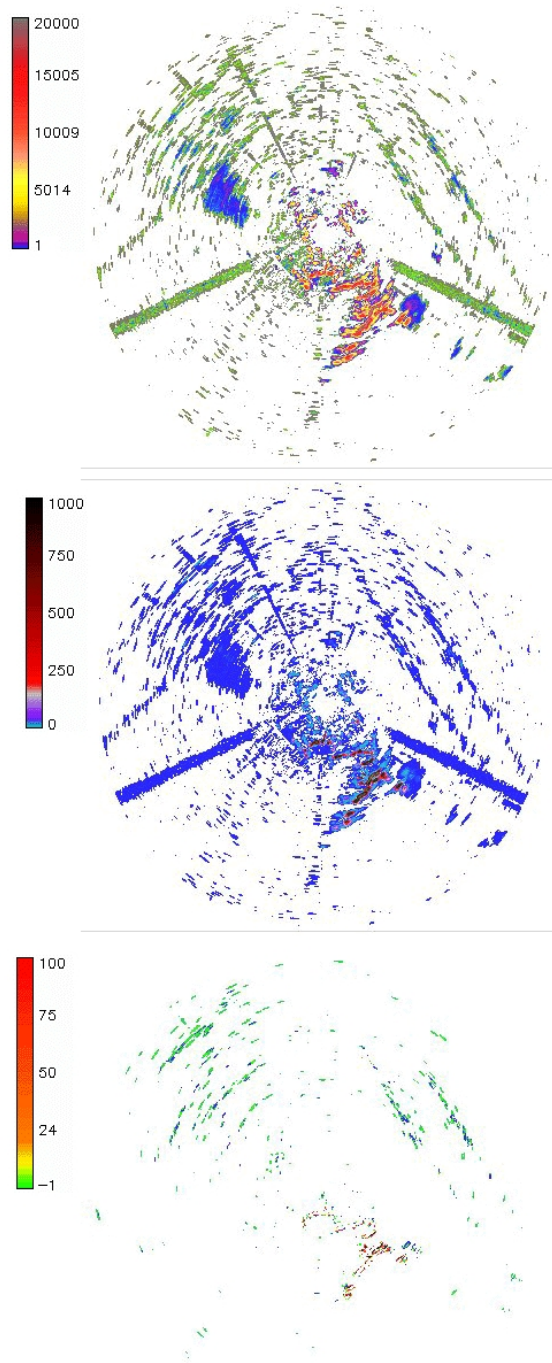


Abbildung 10.10: Sonnenstandeffekte in den Tagessummen vom 16. Dezember 1998: Stark auffällig hierbei die Störechos, einmal die symmetrisch auftretenden Sonnenauf- und Untergangseffekte, sowie andere, bisher nicht nachvollziehbare Störungen vom Radome nach NNW. Beachtenswert ist, daß die Störeffekte auf die Niederschlagsrate durchschlagen, bei der Erosivitätsberechnung jedoch herausfallen, wogegen die Bergechos stark auffallen. Die eigentlichen Niederschlagsbahnen laufen von 1 Uhr bis etwa 4 Uhr parallel zum Radar. In dieser Darstellung sind im oberen Teil die Reflektivitätssumme, in der Mitte die abgeleitete Niederschlagssumme und unten die erzeugten REI-Summen abgebildet.

10.2.4 Das Entwicklungspotential des Ansatzes

Beim bisher verfolgten Ansatz wird von den Standard-Datenprodukten und -verfahren ausgegangen, die vor dem Einsatz einer GIS-Komponente entwickelt wurden: Es erfolgt noch keine Korrektur der Radardaten für Artefakte wie Bodenechos oder 'bright band'-Phänomene, obwohl dies durch den entwickelten Ansatz möglich ist. Auch wird für die Ermittlung der REI-Werte von einer einzigen Z-R-Beziehung für die Umsetzung der Radarreflektivitäten in Niederschlagswerte ausgegangen, ohne zwischen stratiformen Regenereignissen und Konvektivniederschlägen zu differenzieren. Die Frage nach den dafür verwendeten Höhenniveaus der Reflektivitätswerte wird ebenfalls noch nicht gestellt. Für die möglichst realitätsnahe Erfassung und Beurteilung der Dynamik der auftretenden Niederschlagsereignisse sind jedoch exakt diese Schritte notwendig. Deswegen erscheint die Ermittlung von REI-Werten nur sinnvoll, wenn die Niederschlagswerte schon *vor* der Auswertung durch die Zellagenten entsprechend kalibriert werden. Die Alternative, diese Schritte ebenfalls durch die Zellagenten ausführen zu lassen, scheidet bisher noch an der zu bewältigenden Datenmenge. Mit der Verfügbarkeit einer engeren Koppelung zwischen GRASS und CLIPS ist dies allerdings eine vielversprechende Option.

Vorschlag für eine verbesserte Niederschlagsdatenkalibrierung

Auf Basis der in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze wird hier nun ein Verfahren skizziert, das zeigt, wie die Qualität der REI-Ergebnisse durch wissensbasierte Klassifikation der Datenquellen verbessert werden kann:

1. Nach Differenzierung der MDV-Lagen werden mittels des CONSTRAT-Ansatzes die reflektivitätshaltigen Raumzellen klassifiziert.
2. Ausgehend von den zuvor definierten skalaren Variablen für die drei implizierten ZR-Gleichungen werden nun die notwendigen Matrizen von Variablen mit diesen Werten gefüllt:
3. Nach dieser zellen-basierten Konfiguration kann die Kartenalgebra-Berechnung der gesuchten Niederschlagswerte-Matrix erfolgen. Die dadurch angepassten Werte der Niederschlagsmatrix können dann mit weniger Bedenken für die Ermittlung von Erosivitätsindizes verwendet werden.

Zwar ist dieses Verfahren in der geschilderten Form technisch umsetzbar, jedoch besteht ein Problem in der theoretischen Grundlage: Der CONSTRAT-Ansatz zur Klassifikation der Niederschlagsereignisse ist nur bis zu einer Maximalentfernung von 100km vom aufzeichnenden Radar gültig. Als Konsequenz wird der Erfassungsradius stark eingeschränkt. Die

Größenordnung des Datenverlustes kann aus Abbildung 10.11 abgeschätzt werden.

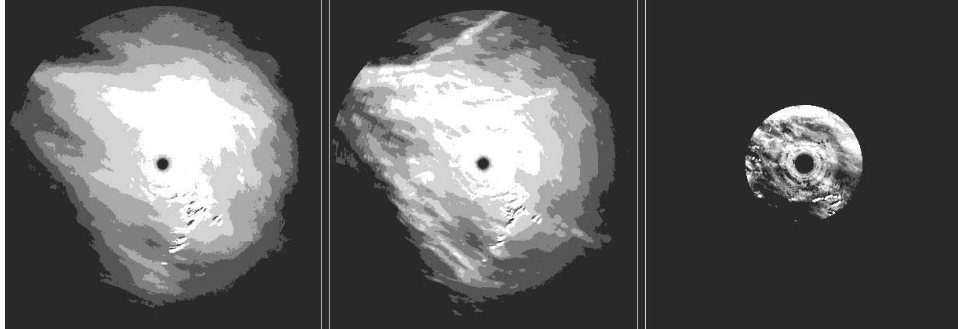


Abbildung 10.11: Beschränkung des nutzbaren Aufzeichnungsraums beim Einsatz des CONSTRAT-Algorithmus am Beispiel vom 15. Dezember 1998: Hier wurde die zweite CAPPI-Lage zur Niederschlagsmengenberechnung herangezogen. Die aus CAPPI abgeleiteten Erosivitätswerte sind deswegen auf die 2000m-CAPPI-Reichweite, etwa 100km, begrenzt.

10.2.5 Abgleichmöglichkeiten der Erosivitätskarten

Bisherige Ansätze In der Literatur wurde der REI-Ansatz und dessen Interpolationen in die Fläche stets durch den visuellen Vergleich mit einer Luftbildauswertung des Ist-Zustandes der Bodenerosion überprüft (Seuffert u. a. 1999; Seuffert u. a. 1999). Unabhängig von offenen Qualitätsfragen bezüglich der Luftbild-Auswertung⁴ scheint es problematisch, dass ein Index über das aktuelle Potential für Erosion anhand des Niederschlagsparameters mit dem Resultat von tatsächlich abgelaufenen Erosionsprozessen der Vergangenheit visuell 'abgeglichen' werden kann: Wie in Kapitel 3 dargestellt, setzt sich die vorhandene Erosionssituation in Südafrika aus diversen Teilfaktoren zusammen. Deswegen ist es notwendig, für die Erfassung der Erosivität sowohl real gemessene, und auch durch Fernerkundungsmethoden ermittelte Niederschlagsmengen miteinander zu kalibrierten, flächendeckenden Datensätzen zu kombinieren.

Vorschlag für einen neuen Verifikationsansatz Durch die Verwendung des entwickelten Systems für eventbasierte Erosionspotentialberechnung kann die Ableitung von Erosionsparametern aus den in Realzeit verfügbaren Radardaten mit geringem Zeitversatz erfolgen. Mit der Verfügbarkeit informationslogistischer Infrastruktur, eines frei verfügbaren

⁴Fehlendes 'Ground-truthing' sowie die Verwendung von multitemporalen Daten variierender Qualität.

GIS, das auch auf 'persönlichen digitalen Assistenten', also Kleinstcomputern (Stankovic u. a. 2002), funktioniert und der Ubiquität von GPS-Empfängern ist es möglich, diese Parameter im Gelände nachzuprüfen und den Ist-Zustand zu erfassen. Damit können die Modelle an der kleinräumlichen Realität abgeglichen werden.

Kapitel 11

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde diskutiert und demonstriert, wie radarmeteorologische Datenquellen für Bodenerosionsfragestellungen genutzt werden können:

Für die Behandlung dieser methodologischen Fragestellung wurde eine neue, frei programmierbare Verbindung zwischen dem Geoinformationssystem GRASS und der Expertensystem-Shell CLIPS entwickelt. Auf dieser Basis wird die thematische Klassifikation von Radardaten-Produkten und die Erzeugung von Erosivitätsindizes aus einer agentenbasierten Modellierungsumgebung erreicht.

Die erzeugten Resultate bestätigen die in der Literatur formulierten Annahmen bezüglich der Eignung von Wetterradardaten zur Generierung von ereignis-basierten Erosivitäts-Indices wie dem REI.

Zusätzlich wird, anders als bei den zuvor publizierten interpolierten Erosivitätskartendarstellungen, durch die erzeugten Kartenprodukte eine flächendeckende und zeitlich hochauflösende Darstellung der Erosivitätsindexwerte möglich.

Weiterhin wurden Hybridanwendungen im Bereich wissensbasierter Systeme zur Entscheidungsunterstützung und Methoden der Informationslogistik vorgestellt und umgesetzt. Damit können nun die in Kapitel 1 formulierten Fragen zusammenfassend beantwortet werden.

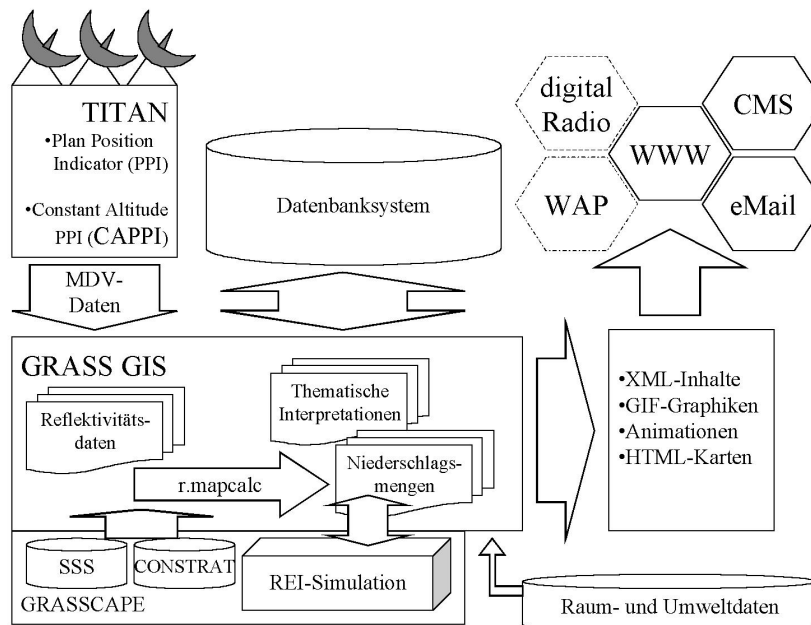


Abbildung 11.1: Übersicht über die im Rahmen der Arbeit entwickelten, bzw. verbundenen Komponenten. Wetterradarinformationen des SAWS werden mit der TITAN-Software zu CAPPI-Datensätzen im MDV-Format gewandelt. Diese werden im GRASS GIS importiert und mit zusätzlichen Raumdaten kombiniert. Unter Nutzung von Expertenwissen in Form von Wissensbasen in der GRASSCAPE-Umgebung werden die Reflektivitätsdaten zu thematischen Produkten und Niederschlagsmengen gewandelt. Diese werden in unterschiedlicher Form in einem Datenbanksystem abgelegt und extern über Push- und Pull-Produkte verfügbar gemacht. Gleichzeitig dienen die Niederschlagsdaten als Basis für eine in GRASSCAPE ablaufende Simulationsumgebung zur Erzeugung von REI-Erosivitätsindizes. Deren Ergebnisse werden ebenfalls über das GIS genutzt.

11.1 Fragen und Antworten

11.1.1 Infrastrukturfragen

Wie sind die Radardaten beschaffen? Für Südafrika sind meteorologische Radardaten im C-, S- und X-Band verfügbar, die während des Betriebs die unteren 18 km der Troposphäre in fünfminütigen Intervallen flächendeckend für weite Gebiete des Landes erfassen.

Auf welchen Medien und in welchen Formaten sind sie verfügbar?

Die von Wetterradar-Systemen generierten Reflektivitätsdaten sind als digitale Datensätze im MDV-Format verfügbar. Aus ihnen werden abgeleite-

te zweidimensionale Niederschlagsfelder in georeferenzierter Form erzeugt. Zusätzlich sind diverse zeitliche und räumliche Datenausschnitte und Akkumulationen als Computergraphiken verfügbar.

Sind spezielle Softwarewerkzeuge zur Verarbeitung nötig? Radarreflektivitäten unterscheiden sich nicht grundsätzlich von anderen Fernerkundungsdatenprodukten. Entsprechend sind Spezialwerkzeuge, wie das vom SAWS eingesetzte TITAN-Softwarepaket, lediglich zur Einbindung der für die Datenerhebung verwendeten speziellen Hardware-Infrastruktur nötig. Für die weitere Verarbeitung der in Standardformaten abgelegten Daten können jedoch generische Softwarewerkzeuge zum Einsatz kommen. Für geowissenschaftliche Fragestellungen sind hierfür Geoinformationssysteme besonders geeignet.

11.1.2 Aufgaben der Umsetzung

Kann ein GIS zur Nutzung der Radardaten eingesetzt werden?

Da die Radardaten in dokumentierten Standarddatenformaten vorliegen, können sie prinzipiell durch ein GIS verarbeitet werden. Der notwendige Datenimport-Schritt wurde für das GIS GRASS als neues Modul implementiert. Weiterhin bieten GIS-Systeme weitreichende Möglichkeiten zur Manipulation, Archivierung und Visualisierung der Daten.

Welche Umsetzung durch GIS bietet sich zur Erstellung von Endprodukten? Die Bereitstellung der Daten in einer GIS-Umgebung ermöglicht die Aufbereitung und Weiterverteilung durch diverse Medien.

In dieser Arbeit wurde die wissensbasierte Ableitung von thematischen Informationen durch Expertensysteme vorgestellt, die auch bei der Erstellung von Endprodukten zur informationslogistischen Verbreitung eingesetzt wurde. Dabei wurden thematische interaktive Karteninhalte für das WWW und die Transformation der Radar-Reflektivitätswerte zu Informationstexten - auf Basis von Markup-Sprachen - geleistet.

Sind weitere Raumdatenquellen einsetzbar ? Durch die Nutzung eines professionellen GIS ist der Import und die Kombination der Radardaten mit weiteren Raumdaten wie Satellitendaten, Geländemodellen und anderen digitalen Umweltdaten von der technischen Seite her trivial. Die aus diesen Verschneidungen entstehenden Produkte bilden die Basis zur Versorgung von Anwendern mit Informationen, die an spezielle räumliche und thematische Fragestellungen angepasst sind.

11.1.3 Analysemöglichkeiten

Enthalten die Wetterradardaten erosionsrelevante Informationen?

Aus den aufgezeichneten Reflektivitätsdatensätze können, begrenzt durch die auftretenden system- und umweltbedingten Einschränkungen, Niederschlagsmengeninformationen gewonnen werden. Anders als die bisher ausschließlich verfügbaren Daten von Niederschlagssammlern liegen diese Informationen flächendeckend vor. Durch periodische Datenerhebung können so für Bodenerosionsfragestellungen relevante Niederschlagsmengen- und Intensitätsinformationen für bestimmte Raumpositionen in der Auflösung der Radardaten erhoben werden.

Welche Resultate können erzeugt werden? Basierend auf einer kritischen Betrachtung des REI-Index wird gezeigt, dass die Grundidee eines event-basierten Erosivitätsindex bei Verwendung der Radardaten plausible Werte liefert, wobei das volle Potential der Methodik noch nicht ausgeschöpft ist. Dabei eröffnet der Einsatz 'Zellulärer Automaten' zur Modellierung der Erosivitätsformeln neue Optionen.

Ist die Qualität mit zu den schon verfügbaren Daten vergleichbar?

Im direkten Vergleich zu den mit Niederschlagsmessern aufgenommenen Daten besteht der Faktor der vollständigen Abdeckung des Beobachtungsgebietes. Allerdings ist dieser Gewinn relativ, da das erfasste Gebiet abhängig von der Radarkonfiguration in Raumeinheiten segmentiert wird, was dem Umgang mit in der Realität vorhandenen Niederschlagsfeldern Grenzen setzt. Anders als bei den bisher verfügbaren Niederschlagssammlerdaten ist durch die kontinuierliche Aufzeichnung und zentrale Verarbeitung der Reflektivitätsdaten die Nutzung der Daten beinahe in Realzeit möglich.

Existieren radarbedingte Fehlerquellen? Die gewonnenen Niederschlagsmengeninformationen müssen aus Radarreflektivitätsdaten *abgeleitet* werden. Bei diesem Prozess können Fehler durch suboptimale Approximationen der Systemparameter auftreten. Zusätzlich ist der Informationsgehalt über der maximal erfassten Fläche nicht homogen und die Messwerte können durch äußere Umwelteinflüsse beeinträchtigt werden.

Treten neue Möglichkeiten der Datennutzung auf? Die zur Bearbeitung der Erosionsfragestellung aufgebaute Softwareumgebung führte zur Erzeugung von thematischen Datenprodukten, die über informationslogistische Ansätze an heterogene Zielgruppen verteilt werden können. Dies schafft - in Verbindung mit Ansätzen der wissensbasierten Entscheidungsunterstützung - neue Möglichkeiten für die Nutzung von Radardaten in einem kulturell heterogenen Raum wie Südafrika.

Sind die bekannten Verfahren mit Radardaten nutzbar? Wetterradardaten können innerhalb eines Geographischen Informationssystems verarbeitet und mit anderen Raumdaten kombiniert werden. Etablierte Erosionsformeln können dabei entweder im GIS selbst eingesetzt oder durch angebundene Softwarewerkzeuge modelliert werden. Im Fall von ereignisbasierten Erosivitätsansätzen können, wie gezeigt wurde, qualitativ bessere Ergebnisse erzeugt werden als auf Basis der Niederschlagssammlerdaten.

Anhang A

Datenbankstrukturen

Bei der Umsetzung einer Datenbankstruktur für die Verwaltung der erzeugten Datenprodukte beeinflussten die folgende Faktoren das Design:

Geringe Redundanz In der Datenbank sollen nur die relevanten Informationen abgelegt werden - und dies möglichst nur einmal.

Als Kompromiss zwischen geringem Speicherverbrauch und nachfolgender Aufbereitungszeit der abgelegten Daten werden die gesamten landesweiten (oder lokalen) Informationen über Sturmzellen aufgezeichnet. Parallel dazu können - wenn notwendig - die Informationen auf der Ebene der individuellen Sturmregionen ebenfalls in einer Tabelle abgelegt werden.

Vollständigkeit Aus den archivierten Daten sollen möglichst alle denkbaren Fragestellungen bedient werden können, ohne erneut die Quelldaten bearbeiten zu müssen.

Effektivität Die verwendeten Datenformate sollen möglichst speichersparend und zugriffsfreundlich sein.

Ursprünglich sollten Rasterdaten aus GRASS im Binärformat als Binary Large Objects (BLOB) in den Tabellen abgelegt werden. Um Speicher zu sparen, wurden sie durch GZIP-Kompression weiterkomprimiert, was jedoch zu Problemen beim Re-Import in das GIS führte. Um dies zu vermeiden, werden nunmehr Textformate (ARC) verwendet, die im GIS-Sektor marktüblich sind. Durch die GZIP-Kompression können die Daten als BLOBs effektiv archiviert und re-importiert werden.

Bei MDV-Dateien werden die Refektivitätsdaten als Integerwerte mit Laufflängenkompression aufgezeichnet. Dies scheint bezüglich moderner Kompressionsverfahren als nicht sehr effektiv, zumal der SAWS selbst die MDV-Daten zur Archivierung jeweils mit GZIP weiterkomprimiert. Da in den Daten die Refektivitätsinformation im Vergleich

zu den Verwaltungsdaten den Hauptteil ausmachen, ist eine effektivere Kompression sinnvoll. Zumal die Daten dann unmittelbar genutzt werden können, wogegen bei der aktuellen Situation die MDV-Archive erst wieder in einem Zwischenschritt entpackt werden müssen.

Prinzipiell sind hierfür Wavelet-Kompressionsverfahren, die auch für GRASS beschrieben werden, von Interesse (Zatelli und Antonello 2002). Die Entwicklung eines weiteren meteorologischen Datenformats war jedoch nicht Bestreben dieser Arbeit. Allerdings ist dieser Punkt für die effektivere Archivierung in Datenbanksystemen von hohem Interesse.

GIS-Unabhängigkeit Es soll möglich sein, die aufbereiteten Daten sowohl mit, als auch ohne eines beliebigen GIS nutzen zu können. Dafür werden die Rauminformationen sowohl im ARC-Format, durch einen Beschreibungstext und eine Computergraphik im GIF-Format abgelegt.

Archivierbarkeit Die Erzeugung von Backups der Datenbank und deren Verwaltung soll nicht behindert werden. Dies erfordert die Verwendung eines stabilen, marktüblichen Datenbanksystems wie PostgreSQL.

Einfache Visualisierung der Dateninhalte Im Gegensatz zum MDV-TITAN-Ansatz soll die Visualisierung der Inhalte für den Anwender möglichst einfach sein.

Deswegen werden zusätzlich zu den Dateninhalten auch Übersichtsgraphiken als Quicklooks abgelegt. Um die Redundanz niedrig zu halten, werden dafür auch GIF-Bilder verwendet, die als Hintergrund der Internetportal-Option (Pull-Verteilung der Daten) erzeugt werden. Mit der zusätzlichen Speicherung der nötigen HTML-Fragmente lassen sich somit auch WWW-Inhalte im Sinn eines Content Management Systems (CMS) vorhalten.

Zusätzlich können die GIF-Dateien der einzelnen Zeitscheiben mittels der entwickelten Module auch zu Zeitreihen-Animationen zusammengefasst werden.

Formate der Datenbank-Tabellen Die Tabellen A.1, A.2 und A.3 geben eine Übersicht über die in den einzelnen 'tables' des Datenbanksystems abgelegten Informationen.

Name	Funktion
mdv	Pfadangabe zur MDV-Datei
rsaimage	Nationales Bildprodukt der Maximalreflektivitäten
vleiimage	Bildprodukt der Maximalreflektivitäten für das Liebergsvlei
cfadimage	CFAD Diagramm
timecode	Aufzeichnungszeit-String
datecode	Aufzeichnungsdatum-String
rsaimagesss	Nationales Bildprodukt der SSS-Klassifikation
vleiimagesss	Liebergsvlei-Bildprodukt der SSS-Klassifikation
rsahtmlsss	HTML-Datei für nationales WWW-SSS-Produkt
message	Textbotschaft
quality	Qualitätsmaß
rainrate	Regenraten-GIS-Raster
wb	Anzahl der WEAK BASE-Klassifikationen
mb	Anzahl der MODERATE BASE-Klassifikationen
sb	Anzahl der SEVERE BASE-Klassifikationen
wv	Anzahl der WEAK VOLUME-Klassifikationen
mv	Anzahl der MODERATE VOLUME-Klassifikationen
sv	Anzahl der SEVERE VOLUME-Klassifikationen
wt	Anzahl der WEAK TOP-Klassifikationen
mt	Anzahl der MODERATE TOP-Klassifikationen
st	Anzahl der SEVERE TOP-Klassifikationen

Tabelle A.1: KEEP-Datenbanktabelle

Name	Funktion
datecode	Aufzeichnungsdatum-String
timecode	Aufzeichnungszeit-String
mximage	Bildprodukt der Maximalreflektivitäten
sssimage	Bildprodukt der SSS-Klassifikation
message	Textbotschaft
quality	Qualitätsmaß
rainrate	Regenraten-GIS-Raster
wb	Anzahl der WEAK BASE-Klassifikationen
mb	Anzahl der MODERATE BASE-Klassifikationen
sb	Anzahl der SEVERE BASE-Klassifikationen
wv	Anzahl der WEAK VOLUME-Klassifikationen
mv	Anzahl der MODERATE VOLUME-Klassifikationen
sv	Anzahl der SEVERE VOLUME-Klassifikationen
wt	Anzahl der WEAK TOP-Klassifikationen
mt	Anzahl der MODERATE TOP-Klassifikationen
st	Anzahl der SEVERE TOP-Klassifikationen
size	Anzahl der CAPPI-Pixel der Sturmwelle
id	Referenz-ID

Tabelle A.2: STORM-Datenbanktabelle

Name	Funktion
datecode	Aufzeichnungsdatum-String
timecode	Aufzeichnungszeit-String
north	GIS-Raster Nordwert
south	GIS-Raster Südwert
west	GIS-Raster Westwert
east	GIS-Raster Ostwert
r	Anzahl der Rasterzeilen
c	Anzahl der Rasterspalten
compression	Stringbeschreibung der verwendeten Kompression
CAPPI1k	CAPPI GIS-Raster 1000m ü.G.
CAPPI2k	CAPPI GIS-Raster 2000m ü.G.
CAPPI3k	CAPPI GIS-Raster 3000m ü.G.
CAPPI4k	CAPPI GIS-Raster 4000m ü.G.
CAPPI5k	CAPPI GIS-Raster 5000m ü.G.
CAPPI6k	CAPPI GIS-Raster 6000m ü.G.
CAPPI7k	CAPPI GIS-Raster 7000m ü.G.
CAPPI8k	CAPPI GIS-Raster 8000m ü.G.
CAPPI9k	CAPPI GIS-Raster 9000m ü.G.
CAPPI10k	CAPPI GIS-Raster 10000m ü.G.
CAPPI11k	CAPPI GIS-Raster 11000m ü.G.
CAPPI12k	CAPPI GIS-Raster 12000m ü.G.
CAPPI13k	CAPPI GIS-Raster 13000m ü.G.
CAPPI14k	CAPPI GIS-Raster 14000m ü.G.
CAPPI15k	CAPPI GIS-Raster 15000m ü.G.
CAPPI16k	CAPPI GIS-Raster 16000m ü.G.
CAPPI17k	CAPPI GIS-Raster 17000m ü.G.
CAPPI18k	CAPPI GIS-Raster 18000m ü.G.

Tabelle A.3: CAPPI-Datenbanktabelle

Anhang B

GRASS GIS

B.1 Möglichkeiten zum Import von MDV-Daten

Der Import von in TITAN erzeugten MDV-Dateien kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen: Durch die lockere Anbindung unter Einsatz der *mdv2ascii*-Exportfunktion von TITAN oder durch eine enge Anbindung, durch ein geeignetes Import-Modul für GRASS.

Der erstgenannte Datenimport in das GIS kann am einfachsten unter Nutzung der *r.in.ascii*-Funktion von GRASS geschehen, wofür die Inhalte der MDV-Datei als ASCII-Texte mit Metainformation vorliegen müssen. Für diese Umformung kann die Export-Funktion von TITAN verwendet werden. Dies führt zu relativ großem Aufwand:

1. Registrierung als TITAN-Anwender
2. Download und Installation
3. Anwendung des Programms *mdv2ascii* für die Datenumwandlung.

Aus diesen Gründen wurde ein Import-Modul für GRASS entwickelt, das die MDV Daten unmittelbar verarbeiten kann. Dieser Weg wird nun im Detail vorgestellt.

MDV Import-Modul

Der Kern des Moduls besteht aus Java-Programmcode. Dieser Java-Kern der Anwendung ist in eine Schicht Perl-Code eingebettet und somit dem Anwender verborgen. Dies erfolgte aus zwei Gründen: Einmal ist davon auszugehen, dass die Mehrzahl der GRASS-Anwender zwar Perl-Code verstehen, jedoch nicht zwingend auch JAVA-Erfahrung mitbringen.

Zweitens bringt die Struktur der MDV-Daten das Problem mit sich, dass der Import nach GRASS flexibel gestaltet sein muss: Die Bias- und

Scale-Parameter sind auf die Rohdaten anzuwenden und die Georeferenzierung muss vorgenommen werden. Deswegen generiert der Java-Code sowohl die extrahierten Daten und zusätzlich den in der Perl-Umgebung auszuführenden Programmcode. Danach stehen in der GRASS-Umgebung die Fließkomma-Rasterfelder der einzelnen CAPPI-Lagen bereit. Die Rohdaten sind für den Fehlerabgleich ebenfalls vorhanden und können vom Anwender beim Sitzungsende entfernt werden.

Abbildung B.1 stellt dies dar.

MDV.2.RAST Der Aufruf der genannten Funktionalität durch das Modul ist denkbar kurz, da der gesamte Code inklusive der Ausführung des zur Laufzeit erzeugten Codes ('Lambda-Code') zum Import der erzeugten Raster-Dateien verdeckt aufgerufen wird:

```
java -cp mdv006.jar mdvhandler.Startup rsall $1
```

B.2 Entwickelte GRASS-Skripte

Hier wird eine Übersicht über die zur Durchführung der Arbeit notwendigen Grass-Skripten gegeben:

B.3 Liste der Module

mdv.areas.2.storms Wandelt die Sturmszelligegebiete in einzeln zu betrachtende Stürme: Die Sturmszellen werden anhand der dBZ-Isolinien isoliert und als Areale mit eindeutiger ID angelegt. Eine Statistik über diese Areale betrachtet nur die, die mehr als 100 Pixel (Schwellwert) belegen: Für diese werden die zu ihnen gehörenden hSUM-, sigma-, mx- und mxh-Raster unter ??????.storm.ID.[mx|mxh|sigma|hSUM]angelegt.

mdv.areas.2.storms.2.xps Baugleich mit mdv.areas.2.storms, jedoch mit Sturmgrößenschwellwert 10 Pixel und ruft danach mdv.infer.sss.sh für jeden Sturm auf.

r.2.dbtable Schreibt n Rasterdaten aus der aktuellen Region in eine angegebene Tabelle einer Datenbank.

r.2.dbfile Ähnlich wie *r.2.dbtable*, jedoch frühere experimentelle Version.

sql.2.dbf Wendet das als String übergebene SQL-Kommando auf die ebenfalls übergebene Datenbank an.

sql.keep.insert Fügt einen neuen Datensatz in eine KEEP-Tabelle ein; der MDV-Quellpfad, das Datum und die Zeitmarke werden dabei übergeben.

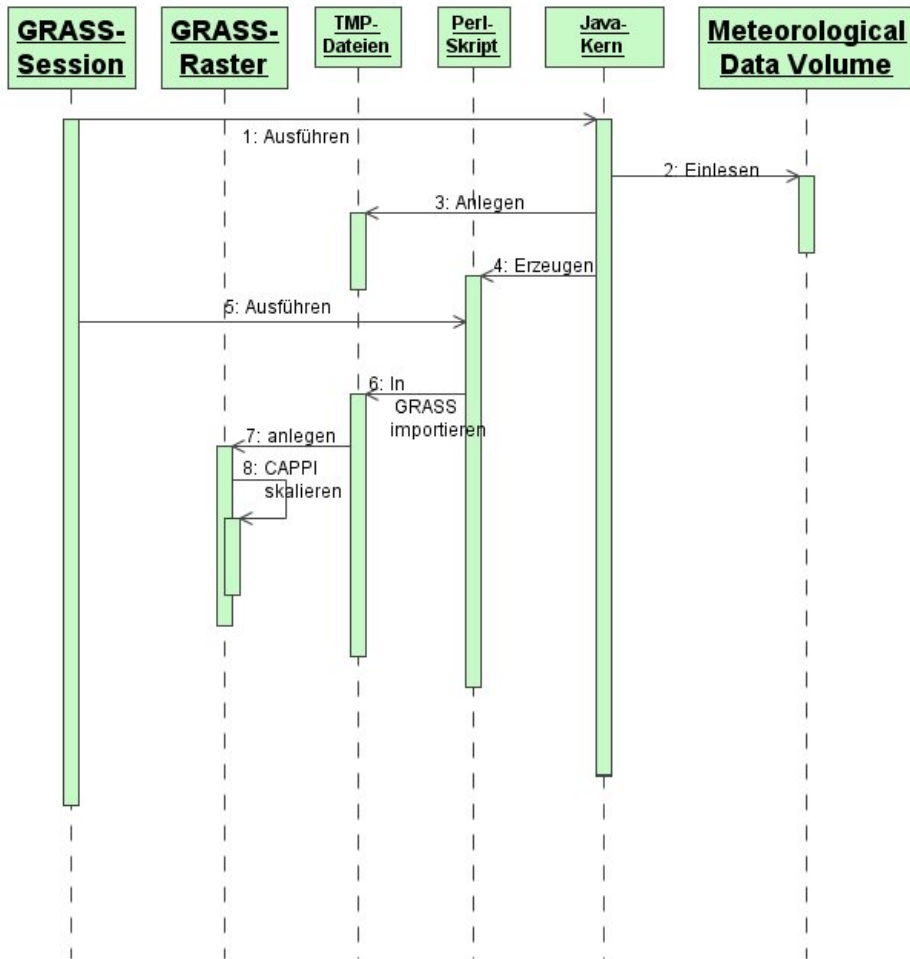


Abbildung B.1: Übersicht über den MDV-Import: Aus der GRASS-Umgebung wird durch den Aufruf des Moduls der Java-Kern gestartet. Dieser analysiert die MDV-Datei und dekodiert nacheinander die darin enthaltenen Datenlagen, die als temporäre Dateien zwischengespeichert werden. Dies erfolgt sequenziell, um Speicherplatz zu sparen. Parallel dazu wird eine Perl-Datei mit GRASS-Codefragmenten erzeugt, die innerhalb von GRASS ausgeführt wird: Sie führt das Anlegen entsprechender GRASS-Rasterlagen und deren Skalierung gemäß der MDV-Parameter aus.

- sql.keep.update.rsapic** Fügt ein neues BLOB unter RSAIMAGE für die RSA-Spalte in die KEEP Tabelle anhand von Datum und Zeitmarke ein.
- sql.keep.update.rsapicsss** Analog zu `sql.keep.update.rsapic` für die Spalte RSAIMAGESSS.
- sql.keep.update.rshtmlsss** Analog zu `sql.keep.update.rsapic` für die Spalte RSAIMAGEHTMLSSS.
- sql.keep.update.vleipic** Fügt ein neues BLOB für die VLEIIMAGE-Spalte in die KEEP Tabelle ein.
- sql.keep.update.vleipic** Analog zu `sql.keep.update.vleipic` für VLEIIMAGESSS.
- sql.storms.create** Erzeugt eine 'STORMS' Datenbanktabelle.
- sql.storms.drop** Verwirft eine STORMS-Tabelle.
- sql.storms.insert** Fügt Daten in eine STORMS-Tabelle ein.
- sql.storms.stormstring** Bearbeitet in der Tabelle STORMS die Stringversion der Sturmklassifikation.
- mdv.summator.sh** Summiert die als regulärer Ausdruck (regular expression, regex) übergebenen Raster in einem Ziel-Raster auf. Dieses kann mit `r.mapcalc` weiterverarbeitet werden. Wichtig: 0-Werte werden im Vergleich zu NULL-Werten ebenfalls addiert. Negative Werte sind problematisch.
- sql.storms.xml** Sammelt für die durch DATUM, ZEITMARKE und ID in der Storms-Tabelle abgelegten Informationen MESSAGE, QUALITY und die SSS-Anzahlen WB,WV,WT,MB,MV,MT,SB,SV,ST und erzeugt daraus ein XML-Dokument mit den Inhalten `< STORM >` und den Tags `< wb >`, usw. und `< quality >`, `< message >`.
- d.framer12** Stellt die übergebenen zwölf Raster in Frames in einem GRASS-Grafikmonitor dar.
- d.framer12.colors** Analog zu `d.framer12`, jedoch werden auch Farbtabellen übergeben und angewendet.
- d.framer18** Stellt die übergebenen 18 Raster in Frames in einem GRASS-Grafikmonitor dar.
- eukliddist.sh** Errechnet den Betrag eines siebendimensionalen Vektors.
- fractomat.sh** Berechnet eine Iteration zur Erzeugung der Mandelbrotmenge mittels `r.mapcalc`.

inferfile.2.html.new Mittels `mdv.inferfile.2.areas.[wb|wv|wt|mb|mv|mt|sb|sv|st]` werden aus einer SSS-klassifizierten (nationalen) Karte die jeweilig klassifizierten Regionen extrahiert, mit *r.poly* die Regionspolygone erzeugt und die Raster wieder gelöscht. Daraufhin werden die Vektoren wieder in Raster gewandelt. Danach werden die GRASS-Höhe/Breite-Parameter auf die doppelten Werte der aktuellen Region gesetzt. Dann wird die *GRASS-HTMLFILE*-Variable auf die *DATUM-ZEIT.gml* gesetzt. Der HTML-Driver wird gestartet, die `wb|mb|sb|usw.-.html` Vektortextdateien über *d.text* geschrieben und die zuvor erzeugten Areale geschrieben. Der HTML-Driver wird gestoppt und dafür der CELL-Treiber gestartet, das Geländemodell geschrieben und die SSS-Areale werden darüber gelegt. Der Inhalt des CELL-Treibers wird dann über eine PPM-Zwischenstufe in ein GIF-Format gewandelt. Nun werden noch HTML-Teile um den zuvor erzeugten HTML-Treiberinhalt gelegt und damit das GIF eingebunden.

inferfile.2.html.show Vorgängerversion von *inferfile.2.html.new* mit anderer Farbgebung der Areale und automatischem Aufruf des Netscape-Browsers zur Darstellung des HTML-content.

inferfile.2.regional.html Regionale Version von *inferfile.2.html.new* für die Region des Liebenbergveis, die mit weiterer Rauminformation (Siedlungen, Radarkreise, Radarstationen, Straßen und Grenzen) unterlegt ist.

constrat.colors Farbtabelle für CONSTRAT

rei.colors Farbtabelle für REI

rr.colors Farbtabelle für Niederschlagswerte

mx.colors Farbtabelle für akkumulierte mx-Werte

mdv.colors Farbtabelle für CAPPI-Daten

m.region.cols Liefert den COLUMNS/Zeilen-Wert der Region.

m.region.rows Liefert den ROWS/Reihen-Wert der Region.

mdv.2.rast.bias MDV-Importroutine mit der ersten experimentellen Skalierungsfunktion.

mdv.2.rast Import der MDV Daten in eine GRASS Location, entweder in Latitude Longitude oder XY. Erzeugt automatisch die skalierten CAPPI Lagen und das Maximum-Raster und die Maximum-Höhe.

- mdv.2.s.mx.mxh** Errechnet aus den CAPPI-Daten den Maximum-Rasterwert und dessen Höhe. Wurde durch die neue Version von *mdv.2.rast* obsolet.
- mdv.2.s.mx.mxh.scaled** Skalierter MDV-Import für nationale merged-Daten in eine Lat/Lon-GRASS-Location.
- mdv.2.s.mx.mxh.scaled.xy** Skalierter MDV-Import in eine xy-Location.
- mdv.2.xps.2.html.rsa** Analog zu inferfile... auf nationaler Ebene, wobei auch die r.infer SSS-Klassifikation gestartet wird.
- mdv.2.xps.2.html.vlei** Analog zur regionalen inferfile...-Version auf nationaler Ebene, wobei auch die r.infer SSS-Klassifikation gestartet wird.
- mdv.2.xy.mx.mxh** Skalierter MDV-Import in eine xy-Location.
- mdv.areas.2.storms.2.xps** Isoliert Sturmareale von mehr als 10 Pixeln, isoliert für jeden Sturm mx, mxh, sigma und hSUM und startet die SSS r.infer-Klassifikation für die einzelnen Sturmzellen.
- mdv.areas.2.storms** Wie *mdv.areas.2.storms.2.xps* ohne Aufruf von r.infer.
- mdv.areasxps.2.storms.db.WARP** Aus den übergebenen Parametern *Datei*, *INFER*, *ZEIT* und *DATUM* werden alle Sturmareale größer als 10 Pixel isoliert, mx, mxh, sigma, Hsum, xps (als Zahlen kodierte Klassifikationsergebnisse) und dazu noch SIZE errechnet und eine Binärmaske der jeweiligen Sturmzelle erzeugt. Daraufhin wird die VLEIWARNING errechnet, die Schnittmenge der Sturm-Maske mit der Vlei-Maske erzeugt. Bei der zweiten Version wird die Vleimaske (mit einer 1 gekennzeichneten Untermenge des Vleiareals) an den überlappenden Pixeln der Kategoriewerte des Sturms eingetragen. Dann wird die aus dem Binärareal des Sturms eine MASK erzeugt. Die STORMS-Datenbank wird um einen neuen Eintrag für den Sturm erweitert. Ein nationales TIFF für den Sturm wird erzeugt und als BLOB nach STORMS geschoben. Weiterhin werden alle Klassifikationen des Sturms in die Tabelle geschrieben. [benutzt *mdv.storm.thevalue.sh*]
- mdv.calc.30+40dbz.lines** Erzeugt die Polygone für die 35 dBZ und 45 dBZ Abgrenzungen von Sturmzellen.
- mdv.calc.areas.30dbz** Erzeugt die Gebiete für die durch die 30 dBZ-Isolinie definierten Sturmzellen.
- mdv.calc.areas.45dbz** Erzeugt die Gebiete für die durch die 45 dBZ-Isolinie definierten Sturmzellen.

- mdv.calc.mx.mxh.vli.sss** Erzeugt Maximum- und Maximum-Höhe-Raster, sowie VIL und die SSS-Werte.
- mdv.calc.rr** Errechnet die Regenmenge aus den Reflektivitätswerten. Die ursprüngliche Version verwendete die maximale Reflektivität, wurde jedoch auf das 2000m-CAPPI umgestellt.
- mdv.calc.sss.result** Errechnet die SSS-Klassifikation mittels MAPCALC.
- mdv.calc.vli.sss** Erzeugt mit MAPCALC die zur SSS-Klassifikation benötigten Variablen: VIL, LWC, LWCsum, H, Hsum, sigma.
- mdv.cappidata.archive** Wandelt die aktuellen CAPPIs in gepackte ARC-Dateien, legt in der Tabelle CAPPIDATA eine neue Zeile an und überträgt die notwendigen Region-Informationen und die ARC-Archive als BLObs.
- mdv.cappidata.clone.archive** Analog zu mdv.cappidata.archive, jedoch muss der Name einer beliebigen Tabelle übergeben werden.
- mdv.cfad.2.gif** Erstellt für die aktuellen CAPPIs ein CFAD-Diagramm und schreibt dieses in ein GIF: Dabei werden ausgehend von der nationalen Region die CFAD-Daten gesammelt und als Textdatei ausgeschrieben. Danach wird in die pseudo-XY-Region gewechselt, das CFAD erzeugt und als Bild gespeichert.
- mdv.cfad.raw** Erzeugt ein CFAD für die CAPPIs und erstellt daraus eine in eine XY-Location importierbare ASCII-Rasterdatei: Dabei handelt es sich für jede Höhe um absolute Werte, die nicht in Bezug zur relativen Menge der belegten Pixel stehen.
- mdv.constrat** Führt die CONSTRAT-Klassifikation mittels r.infer und der Wissensbasis infer.kb.constrat aus.
- mdv.html.2.frames** Verändert den Inhalt der automatisch generierten HTML-Seiten für die Benutzung von Frames. Die Links zu den Beschreibungstexten werden umgesetzt und der spezielle Name des GIF wird in den Standardnamen umbenannt.
- mdv.infer.apply** Wendet die übergebene Wissensbasis in r.infer an und schreibt die Ergebnisse in das Raster ebenfalls angegebenen Namens.
- mdv.infer.inferfile** Eine Kombination der Funktionalität von mdv.infer.startup-apply-shutdown mit der Wissensbasis infer.kb.sss.complete.
- mdv.infer.shutdown** Löscht die für die Klassifikation erzeugten ganzzahligen Raster MX, MXH, S, H, CAPPI[1-7], CAPPICOUNT, CAPPIAVE und CAPPI2min11Average.

- mdv.infer.sss** Analog zu *mdv.infer.inferfile*.
- mdv.infer.startup** Erzeugt für die *r.infer*-Klassifikation von Radardaten die ganzzahligen Raster MX, MXH, S, H, CAPPI[1-7], CAPPI-COUNT, CAPPIAVE und CAPPI2min11Average.
- mdv.inferfile.2.areas.{mb|mt|mv|sb|st|sv|wb|wv|wt}** Erzeugt zum jeweiligen SSS-Ergebnis die dazugehörigen Rasterareale. Dies erfolgt über direkten Export der Rasterareale, Wandlung zu Vektoren und Re-Import, um Label-Information zu erhalten.
- mdv.macro3fastkat.all.gif.cfad** Version 3 der großen nationalen Verarbeitungsversion, mit Erzeugung aller GIF-Bilder und CFAD.
- mdv.macro3fastkat.all.gif** Version 3 der großen nationalen Verarbeitungsversion, mit Erzeugung aller GIF-Bilder.
- mdv.macro3fastkat.all** Version 3 der großen nationalen Verarbeitungsversion.
- mdv.macro3fastkat** Gekürzte Variante von Version 3.
- mdv.macro4.only-cappis** Version 4 der großen Verarbeitungsroutine, alle Schritte jenseits der CAPPI-Erstellung sind jedoch auskommentiert.
- mdv.rsa.2.gif** Erzeugt ein GIF der nationalen Wettersituation mit den in *rsa.sh* definierten Raumdaten.
- mdv.rsa.2.tiff** Wie *mdv.rsa.2.gif*, liefert jedoch ein run-length-compressed TIFF.
- mdv.storm.statcats** Gibt die Anzahl aller mit Kategoriestrings bestückten und in Pixeln vorhandenen Klassen aus (*print*).
- mdv.storm.thecat** Für die Ermittlung der Klassifikationsergebnisse mit *r.infer*: Liefert für das übergebene Raster und einen numerischen Kategoriewert über Filterung von *r.stats* den zur Kategorie gehörigen Stringausdruck zurück.
- mdv.storm.thevalue** Ähnlich zu *mdv.storm.thecats*, liefert jedoch die zur Kategorie gehörige Zellenanzahl zurück.
- mdv.summator** Erhält ein nichtquotiertes Suchmuster wie *?????.mx*, ermittelt alle dazu passenden Raster, bildet deren Summe und hinterlegt diese im Raster 'summator'.
- mdv.vlei.2.gif** Erzeugt ein GIF der regionalen Wettersituation im Liebenbergvlei mit den in *vlei.sh* definierten Raumdaten.

- mdv.vlei.2.tiff** Wie `mdv.vlei.2.gif`, liefert jedoch ein run-length-compressed TIFF und erzeugt ein regionales TIFF für die Liebenbergsvlei-Region, inklusive eines interpolierten Gelände-modells.
- mdv.vleistorms.mailman** Erste Version des Postdämons für Email-Push-Dienste. Am Beispiel des Liebenbergvleis werden Emails mit Informationen über die aktuellen, über dem Vlei verorteten Sturmzellen an festgelegte Anwender verschickt.
- mdv.vleistorms.mailman2** Optimierte Version des GIS-Postdämons.
- mdv.vliss** Alte Version zur VLI/LWC/Sigma/usw.-Erzeugung, beinhaltet den Beispielcode zur Erzeugung von pseudo-3d-Darstellungen ohne Benutzung von NVIZ.
- mdv.xps.2.areas.**{mb|mv|mt|sb|sv|st|wb|wv|wt} Erzeugt zu den jeweiligen Klassifikationen im übergebenen Raster ein eigenes Raster mit entsprechendem Label.
- mdv.xy.2.summentriplet.gif** Erzeugt ein GIF aus den drei Rastern `mx-summe.int`, `rrsumme.int` und `reisumme.int`.
- mdv.xy.2.triplot** Erzeugt ein GIF für den übergebenen Namen für die dazugehörigen Raster `.mx`, `.rr` und `.rei` und wendet dabei die Farbtabellen `mdv.colors`, `rr.colors` und `rei.colors` an.
- normalize** Normalisiert einen Wert in Relation zur Gesamtanzahl, gibt den Wert in Prozent aus.
- plotter** Sehr einfaches Perlscript zum Ausdruck eines Histogramms.
- r.2.dbtable** Experimentelles Skript, um n Raster in eine übergebene Tabelle zu schreiben. Ist durch die ab GRASS5.0.0 vorhandenen Module obsolet.
- showplot** Wendet 'plotter' auf die normalisierten 7-d Geländeabdeckungsvektoren der südafrikanischen Radarstationen an.
- sql.cappidata.clone.get.cappi** Liefert das zu übergebende CAPPIDATA-BLOB der CAPPIDATA-Tabelle zurück.
- sql.cappidata.clone.insert** Fügt einen neuen Datensatz in diese CAPPIDATA-Tabelle ein.
- sql.cappidata.clone.update.**{cappi|columns|compression|east|north|rows|south|west} Fügt den übergebenen String an der entsprechenden Stelle des Datensatzes in der CAPPIDATA-Tabelle ein.

sql.cappidata.get.cappi{1|2|3|4|5|6|7|8|9|10|11|12|13|14|15|16|17|18}k
Fügt den übergebenen CAPPI-BLOB an der entsprechenden Stelle des Datensatzes in der CAPPIDATA-Tabelle ein.

sql.cappidata.insert Fügt einen neuen Datensatz in die CAPPIDATA-Tabelle ein.

sql.cappidata.update.cappi{1|2|3|4|5|6|7|8|9|10|11|12|13|14|15|16|17|18}
Fügt den übergebenen CAPPI-BLOB an der entsprechenden Stelle des Datensatzes in der CAPPIDATA-Tabelle ein.

sql.cappidata.update.{cappi|columns|compression|east|north|rows|south|west}
Fügt den übergebenen String an der entsprechenden Stelle des Datensatzes in der CAPPIDATA-Tabelle ein.

sql.create.bhm Erzeugt in der Tabelle STORMS einen neuen Eintrag.

sql.create.cappidata.clone Erzeugt eine neue Tabelle mit der Struktur der CAPPI-Tabelle.

sql.create.cappidata Erzeugt eine neue CAPPI-Tabelle.

sql.create.keep.clone Erzeugt eine neue Tabelle übergebenen Namens mit dem Format von KEEP.

sql.create.keep Erzeugt eine neue KEEP-Tabelle.

sql.create.storms Erzeugt eine neue STORMS-Tabelle.

sql.create.vlei Erzeugt eine neue VLEI-Tabelle.

sql.get.gifsequence Fragt in der KEEP-Tabelle die zu einem bestimmten Namen in einem Zeitrahmen abgelegten GIFs ab und erzeugt daraus eine GIF-Animation.

sql.keep.clone.get.gifsequence Fragt aus der angegebenen Tabelle die zu einem bestimmten Namen in einem Zeitrahmen abgelegten GIFs ab und erzeugt daraus eine GIF-Animation.

sql.keep.clone.insert Fügt einen neuen Datensatz in eine Tabelle mit der Struktur einer KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.clone.update.blob Fügt ein BLOB in eine Tabelle mit der Struktur einer KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.clone.update.pic Fügt eine Graphikdatei in eine Tabelle mit der Struktur einer KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.get.rsapic Liefert die landesweite Graphik aus der KEEP-Tabelle.

sql.keep.get.vleipic Liefert die regionale Liebensberglvei-Graphik aus der KEEP-Tabelle.

sql.keep.insert.mdv Fügt die Informationen über einen MDV-Datensatz in die KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.insert Fügt näher zu spezifizierende Daten in die KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.show.rsapic Zeigt die landesweite Graphik eines Datensatzes der KEEP Tabelle.

sql.keep.update.cfadpic Fügt eine CFAD-Graphik in die KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.update.{message|quality} Fügt den entsprechenden String in einen Datensatz in der KEEP-Tabelle ein.

sql.keep.update.{rainrate|rsahtmlsss|rsapic|rsapicsss|vleipic|vleipicsss}
Fügt die entsprechende Graphikdatei als BLOB in einen Datensatz in der KEEP-Tabelle ein.

sql.retrieve.dbf Führt in der übergebenen Tabelle das ebenfalls übergebene SQL-Kommando aus und druckt die Resultate.

sql.storms.get.{wb|mb|sb|wv|mv|sv|wt|mt|st} Liefert den entsprechenden Stringwert aus dem Datensatz der STORMS-Tabelle.

sql.storms.get.{message|quality|size|sss} Liefert den entsprechenden Stringwert aus dem Datensatz der STORMS-Tabelle.

sql.storms.insert Fügt einen Datensatz in die STORMS-Tabelle ein.

sql.storms.update Aktualisiert einen Datensatz in der STORMS-Tabelle um die entsprechende Sequenz.

sql.storms.update.stormstring Aktualisiert einen Datensatz in der STORMS-Tabelle um den Stringwert.

sql.storms.xml Liefert die XML-kodierten Inhalte eines Datensatzes aus der STORMS-Tabelle.

B.4 Erläuterung von mdv.macro3

Nun folgt die detaillierte Beschreibung der durch das Modul mdv.macro3 ausgeführten Kommandos bei der Verarbeitung eines MDV-Datensatzes.

1. `#!/usr/bin/perl`
`$filepath=@ARGV[0];`
 Deklaration der Datei als Perl-Programm und Einlesen der übergebenen Variablen `$filepath`, die die absolute Pfadangabe zur zu verarbeitenden MDV-Datei angibt.
2. `system("g.region region=rsa");`
 Die Region der GRASS-Location wird auf den vordefinierten Wert 'RSA' gesetzt. Dies entspricht der Gesamtfläche Südafrikas in der Auflösung der Datenkomposite aller verfügbaren Radarstationen.
3. `system("./mdv.2.s.mx.mxh.sh ".$filepath);`
 Import der MDV-Datei und Erzeugung der GRASS-Raster für die skalierten CAPPI-Lagen, MaxCAPPI (.mx) und MaxCAPPI-Höhe.
4. `\$file=@theline[$#theline]; $date=@theline[(\ $#theline - 1)];`
 Die Perl-Variablen `$file` und `$date` werden aus der übergebenen absoluten Pfadangabe extrahiert.
5. `@laenge = split //,$file; $filename = substr($file ,0 ,($#laenge - 3));`
 Extrahiert den Dateinamen ohne seinen Bezeichner.
6. `system("./mdv.cappidata.archive.sh \$date \$filename");`
 Archiviert die CAPPI-Daten in der Tabelle CAPPIDATA des Datenbanksystems.
7. `system("./mdv.calc.rr.sh ".$filename);`
 Erzeugt das GIS-Raster für Niederschlagsmengen (nach Marshall-Palmer).
8. `system("./mdv.calc.vli.sss.sh`
`".$filename);`
 Erzeugt die für die SSS-Methode benötigten Variablen als Raster.
9. `system("./mdv.rsa.2.gif.sh`
`".$filename.".mx");`
 Erzeugt ein GIF der MaxCAPPI-Daten vor zusätzlichen Raumdaten auf nationaler Ebene.
10. `system("./mdv.vlei.2.gif.sh ".$filename.".mx");`
 Erzeugt ein GIF der MaxCAPPI-Daten vor zusätzlichen Raumdaten auf regionaler Ebene für die Beispielregion Liebenbergvlei.

11. `system("./mdv.cfad.2.gif.sh ".$filename);`
Erzeugt ein GIS des CFAD der aktuellen (nationalen) CAPPI-Daten.
12. `system("./sql.keep.insert.sh " ".\date." ".$filename." ".$filepath);`
Schreibt die Grunddaten des MDV als neuen Record in die KEEP-Tabelle der Datenbank.
13. `system("./sql.keep.update.rsapic.sh " ".\date." ".$filename." 'pwd'\/".$filename.".mx.rsa.gif");`

Sichert das zuvor erzeugte nationale GIF in die KEEP-Tabelle.
14. `system("./sql.keep.update.vleipic.sh " ".\date." ".$filename." 'pwd'\/".$filename.".mx.vlei.gif");`
Sichert das zuvor erzeugte regionale GIF in die KEEP-Tabelle.
15. `system("./sql.keep.update.cfadpic.sh " ".\date." ".$filename." 'pwd'\/".$filename.".cfad.gif");`
Das GIF des CFAD wird ebenfalls in der KEEP-Tabelle abgelegt.
16. `system("g.region region=rsa");`
Die GIS-Region wird erneut auf die nationale Dimension gesetzt. Dies ist im Normalbetrieb redundant, dient hier jedoch als Absicherung, falls zuvor Verarbeitungsfehler aufgetreten sein sollten.
17. `\$xpsa="./mdv.infer.startup.sh ".$filename; @q='\$xpsa';`
Für die Nutzung des R.INFER-Inferenzmoduls werden Integer-Raster wichtiger abgeleiteter radarmetereologischer Größen erzeugt.
18. `\$xpsrr="./mdv.infer.apply.sh infer.kb.constrat".$filename.".marion"; @q='\$xpsrr';`
Die CONSTRAT-Wissensbasis für R.INFER wird angewendet.
19. `\$xpsrr="./mdv.infer.apply.sh infer.kb.rr ".$filename.".irr"; @q='\$xpsrr';`
Die grobe Niederschlagsmengen-Abschätzung nach METSYS wird als Wissensbasis angewendet.
20. `\$xpssss="./mdv.infer.apply.sh infer.kb.sss.complete".$filename.".iss"; @q='\$xpssss';`
Die SSS-Wissensbasis wird eingesetzt.

21. `\$xpsz="./mdv.infer.shutdown.sh "; @q=\$xpsz;`

Die Integer-Raster werden gelöscht.

22. `\$xpsquery="mdv.storm.statcats.sh ".$filename.".iss";
\$xps='\$xpsquery';`

Nun wird für das Raster der Diagnose-Resultate aus der SSS-Wissensbasis eine Legende ermittelt: Es wird erfasst, welche Diagnosen etabliert wurden und wie oft dies jeweils der Fall war.

23. `\$sqlmess="./sql.keep.update.message.sh ".$date." ".$filename." ".$xps;
@q='\$sqlmess';`

Das Ergebnis der Legenden-Erzeugung wird als String in die Datenbank eingefügt.

24. `\$wb='./mdv.storm.thecat.sh infer weak_base';
\$wbs="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep wb "
\$wb;@q='\$wbs';`

25. `\$mb='./mdv.storm.thecat.sh infer moderate_base';
\$mbs="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep mb" ".$mb;
@q='\$mbs';`

26. `\$sb='./mdv.storm.thecat.sh infer severe_base';
\$sbs="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep sb "
\$sb;@q='\$sbs';`

27. `\$wv='./mdv.storm.thecat.sh infer weak_volume';
\$wvs="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep wv " ".$wv;
@q='\$wvs';`

28. `\$mv='./mdv.storm.thecat.sh infer moderate_volume';
\$mvs="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep mv " ".$mv;
@q='\$mvs';`

29. `\$sv='./mdv.storm.thecat.sh infer severe_volume';
\$svs="/sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep sv " ".$sv;
@q='\$svs';`

30. `\$wt='./mdv.storm.thecat.sh infer weak_top';
\$wts="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep wt " ".$wt;
@q='\$wts';`

31. `\$mt='./mdv.storm.thecat.sh infer moderate_top';
\$mts="./sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep mt " ".$mt;
@q='\$mts';`


```
32. \$st = './mdv.storm.thecat.sh infer severe_top';
    \$sts = './sql.update.int.sh ".$date." ".$filename." keep st ".$st;
    @q= '\$sts';
```

Diese Kommandos evaluieren, welche Diagnosen durch die SSS-Klassifikationen erzeugt wurden. Für die im konkreten Fall vorkommenden Diagnosen wird die Anzahl der belegten Pixel ermittelt und diese in die entsprechende Spalte der KEEP-Datenbank-Tabelle geschrieben.

```
33. system("./inferfile.2.html.new.sh ".$filename." ".$date." 500 700");
```

Erzeugt eine klickbare HTML-Darstellung der SSS-Klassifikation auf nationaler Ebene.

```
34. #Local: system("./inferfile.2.regional.html.sh ".$filename." ".$date." 500 700 of
    ".$date."_".".$filename."_ofs" );
```

Erzeugt die HTML-Darstellung der SSS-Klassifikation auf regionaler Ebene für das Liebenbergvlei.

```
35. system("./mdv.html.2.frames.sh "
    ".$date."_".".$filename." current legend");
system("./mdv.html.2.frames.sh " ".$date."_".".$filename."_ofs"."
ofscurrent legend");
```

Bereitet die HTML-Seite für eine frame-basierte Darstellung auf.

```
36. system("./sql.keep.update.rsapicsss.sh ".$date." ".$filename."
'pwd\'/".".$date."_".".$filename.".gif");
```

Sendet das der HTML-Seite unterliegende GIF in die KEEP-Tabelle.

```
37. system("./sql.keep.update.rshtmlsss.sh ".$date." ".$filename."
'pwd\'/".".$date."_".".$filename.".html");
```

Schickt den erzeugten HTML-Text in die KEEP-Tabelle.

```
38. system("./mdv.calc.areas.45dbz.sh ".$filename);
```

Isoliert die Gebiete der aktuellen Sturmzellen anhand der 45 dBZ-Umrisslinie im MaxCAPPI.

```
39. \$storms='./mdv.areasxps.2.storms.db.WARP5.sh "
    ".$filename.".a45".$filename.".iss ".$date." ".$filename;
@storms='\$storms';
```

Es werden alle Sturmzellen isoliert, deren Ausdehnung über einem bestimmten Schwellwert (10 Pixel) liegen. Für jede Zelle werden die dazugehörigen *h*, *mx*, und *sss*-Werte aus den nationalen Rastern isoliert.

Auch wird ein *.siz*-Raster angelegt, was einer '1'-Binärmaske der Zelle entspricht und für räumliche Abfragen für Perimeter (Benachrichtigungen, wenn Sturmzellen ausgewiesene Gebiete erfassen) genutzt wird. Für jede Sturmzelle wird eine neuer Record in der STORMS-Datenbanktabelle angelegt. Der Schlüssel ist dabei Datumcode + Zeitcode + Sturm-ID. Eine Graphik der Sturmzelle wird als MaxCAP-PI in der Tabelle gespeichert. Aus den Diagnose-Rastern werden die dezimalen Entsprechungen der Diagnosen (10,11,12,100,101,102,1000,1001,1002) extrahiert und ebenfalls in der Tabelle abgelegt.

```
40. system("./mdv.vleistorms.mailman2.sh ".$date." ".$filename."
    ".$filename.".vlei.mail");
```

Aus den aktuellen Datenbankinhalten werden die Textinformationen über Überdeckungsflächen und Klassifikationen aller Stürme für das Liebenbergsvlei-Testgebiet gesammelt, zu einem Email-Text gebündelt und über den Mailer-Daemon verschickt.

B.5 Umsetzung der Erzeugung von HTML-Kartendarstellungen mit Hyperlinks

Es wird der im Modul **inferfile.2.regional.html.sh** erstellte Prozess zur Umsetzung von Rauminformationen im GIS zu einer Markup-Kartendarstellung mit thematischen Links beschrieben:

```
1. #!/usr/bin/perl use Shell qw(command);
2. $file=@ARGV[0];
   $date=@ARGV[1]; $theheight=@ARGV[2]; $thewidth=@ARGV[3];
   $theregion=@ARGV[4];
   $thename=@ARGV[5];
```

theregion gibt an, welche vordefinierte Region angeschaltet werden soll. **thename** gibt an, unter welchem Namen die Dateien gespeichert werden. Das Datum, sowie die *x* und *y* Dimension des zu erzeugenden Fensters werden ebenfalls übergeben.

```
3. system("g.region region=".$theregion);
   Neue Regionswerte aktivieren.
```

```
4. system("./mdv.inferfile.2.areas.sb.sh");
```

Ableitung der einzelnen Regionen (areas) aus dem INFER-Ergebnis.

```
5. system("./mdv.inferfile.2.areas.mb.sh")
```

```

6. system("./mdv.inferfile.2.areas.wv.sh");
7. system("./mdv.inferfile.2.areas.mv.sh");
8. system("./mdv.inferfile.2.areas.sv.sh");
9. system("./mdv.inferfile.2.areas.wt.sh");
10. system("./mdv.inferfile.2.areas.mt.sh");
11. system("./mdv.inferfile.2.areas.st.sh");
12. @width = './m.region.cols.sh';
    $width = @width[0];
    @depth='./m.region.rows.sh';
    $depth = @depth[0];
13. $newdepth = $depth * 2; $newwidth = $width * 2;
14. $ENV{GRASS_HTMLFILE}=$thename.".gml";
15. system("echo GW=
    $GRASS_HTMLFILE");

```

Damit können die GML-Dateien der einzelnen MDVs erhalten und gespeichert werden.

```

16. system("d.mon select=HTMLMAP");
17. system("echo \"wb.html\" | d.text");
    system("d.area map=infer.aWB");
    Schreiben der einzelnen Regionen-Umfangspolygone:
18. system("echo \"mb.html\" | d.text");
    system("d.area map=infer.aMB");
19. system("echo \"sb.html\" | d.text");
    system("d.area map=infer.aSB");
20. system("echo \"wv.html\" | d.text");
    system("d.area map=infer.aWV");
21. system("echo \"mv.html\" | d.text"); system("d.area map=infer.aMV");
22. system("echo \"sv.html\" | d.text"); system("d.area map=infer.aSV");
23. system("echo \"wt.html\" | d.text"); system("d.area map=infer.aWT");
24. system("echo \"mt.html\" | d.text"); system("d.area map=infer.aMT");
25. system("echo \"st.html\" | d.text"); system("d.area map=infer.aST");

```

26. `system("d.mon stop=HTMLMAP");`
27. `system("d.mon select=CELL");`
Der CELL-Monitor wird gestartet.
28. `system("r.colors -q map=dem color=grey.eq");`
29. `system("d.rast map=dem");`
30. `system("d.vect map=rdline col=yellow");`
`system("d.vect map=range0 col=orange");`
`system("d.sites site=radarx color=magenta");`
`system("d.vect map=int col=black");`
`system("d.area map=twncall fill=brown line=black");`
`system("d.area map=twnmaj fill=red line=black");`
`system("d.vect map=liebergvlei col=green");`
`system("d.vect map=OFS col=orange");`
31. `system("d.area map=infer.aWB fill=green line=orange");`
`system("d.area map=infer.aMB fill=green line=red");` `system("d.area`
`map=infer.aSB fill=brown line=magenta");`
32. `system("d.area map=infer.aWV fill=blue line=orange");`
`system("d.area map=infer.aMV fill=blue line=red");`
`system("d.area map=infer.aSV fill=blue line=magenta");`
33. `system("d.area map=infer.aWT fill=yellow line=orange");`
`system("d.area map=infer.aMT fill=yellow line=red");`
`system("d.area map=infer.aST fill=yellow line=magenta");`
34. `system("d.mon stop=CELL");`
35. `system("g.region save=saved.reg");`
`system("g.region raster=D_cell");`
`system("r.out.ppm -q input=D_cell output=".$thename.".ppm");`
`system("ppmquant 128 < ".$thename.".ppm | ppmtogif > ".$thename.".gif");`
Erzeuge ein GIF aus dem PPM.
36. `system("ppmquant 128 < ".$thename.".ppm | ppmtogif >`
 `".$thename.".gif");`
37. `$htmlfile=$thename.".html";`
Ausgabedatei definieren
38. `system("echo \<!DOCTYPE HTML PUBLIC \"-//W3C//DTD HTML 4.01`
`Transitional//EN\" \"http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd\"> \>`
 `".$htmlfile);`

- ```

39. system("echo \<html>\'>> ".$htmlfile); system("echo \<body> \'
 >> ".$htmlfile);

40. system("echo \<blockquote><center>Date:". $date. "
 Time:". $file. "</center></blockquote><p> \' >> ".$htmlfile);
 system("echo \<div align=center><p> <hr WIDTH=\"100%\"> </div>\' >> ".$htmlfile);

41. system("echo \<h1>TESTDATA: These are not valid data
 derivates!</h1><p>\' >> ".$htmlfile);
 system("echo \<div align=center><p> \' >> ".$htmlfile);
 system("echo \ \' >> ".$htmlfile);

42. system("cat ".$thename. ".gml >> ".$htmlfile);

43. system("echo \</div> \' >> ".$htmlfile);
 system("echo \<div align=right><p> <hr WIDTH=\"100%\"> \' >> ".$htmlfile);
 system("echo \<h6>Copyright by Peter Löwe </h6></div>\' >>
 ".$htmlfile); system("echo \</body></html>\' >> ".$htmlfile);

```

Erzeugen von Anfang und Ende der zu generierenden HTML-Datei.  
Das GML-Fragment wird im Mittelteil eingefügt.

- ```

44. system("g.region region=saved.reg");

```

Rückkehr zur vormaligen GIS-Region.

- ```

45. system("g.rename rast=infer, ".$file. ".xps");

```

Umbenennung des aktuellen Klassifikationsergebnisses mit generischem Namen.

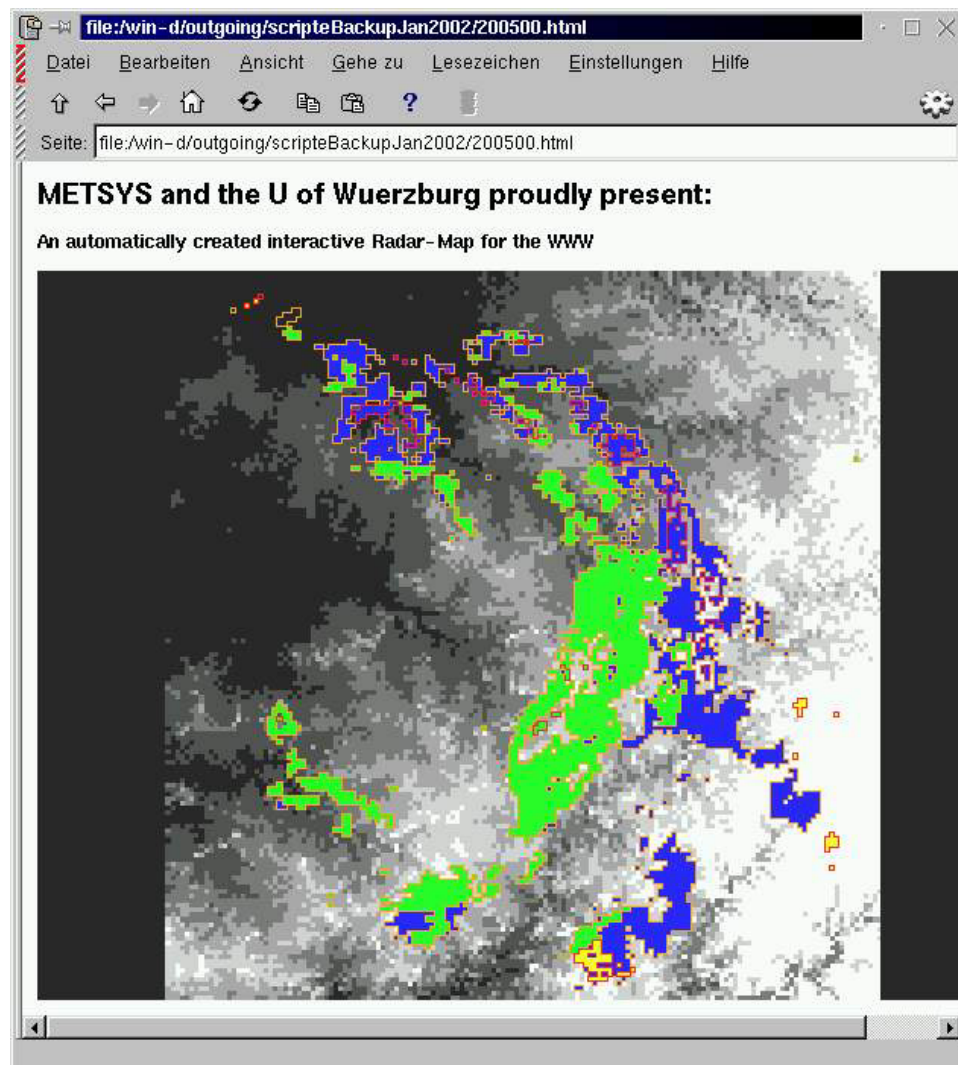


Abbildung B.2: SSS-Klassifikationsergebnis für das Liebenbergvlei als interaktives HTML-Kartenprodukt. Bei dieser Version erzeugt das Klicken auf Flächen mit Hyperlinks weitere Browser-Fenster.

## B.6 Contoured-Frequency-by-Altitude-Diagramm

Bei Contoured-Frequency-by-Altitude Diagrammen (CFAD) handelt es um zweidimensionale Übersichtsdarstellungen der dreidimensionalen Inhalte einer MDV-Datei mit Reflektivitätsdaten (Mittermaier 1999).

Diese bestehen aus übereinander angeordneten Histogramm-Informationen aller im Datensatz vorhandenen CAPPI-Lagen: Für jedes CAPPI wird ein Histogramm der auftretenden Reflektivitätswerte

erzeugt. Die Häufigkeiten der einzelnen Histogrammwerte werden normalisiert (als Prozentwert der gesamten Füllung des CAPPIs skaliert). Dies wird für alle verfügbaren CAPPI-Lagen ausgeführt. Danach wird ein zweidimensionales Raster erzeugt, dessen Zeilen aus den jeweiligen CAPPI-Histogrammen bestehen. Für die Nutzung innerhalb einer GRASS-Location mit geographischen Koordinaten wurde eine Umsetzung durch Erzeugung einer GRASS-Region mit pseudo-kartesischen Koordinaten geschaffen. So können CFAD als normale Rasterkarten in GRASS verarbeitet und mit NVIZ visualisiert werden (Modul *mdv.cfad.ll*). Im Fall der südafrikanischen Daten eignen sich CFAD-Darstellungen nur sehr bedingt für die landesweite Betrachtung. Für die regionalen Radarprodukte bieten sie jedoch eine einfache und effektive Möglichkeit, einen Eindruck über den Zustand der Atmosphäre im Betrachtungsraum zu gewinnen. Dies wird an Beispielen in den Abbildungen B.3, B.4 und B.5 demonstriert. Die CFAD-Darstellungen werden dabei in Schrägaufsicht in NVIZ dargestellt, um einen plastischen Eindruck der einzelnen Histogrammverteilungen zu vermitteln. Dabei wurde auf eine Glättung der Daten sowie die Erstellung von Isolinien verzichtet.

### Beispiele für CFAD-Darstellungen

Die ausgewählten CFAD-Darstellungen wurden aus MDV-Datensätzen des MRL5-Radars vom 30.12.2001 gewonnen und vermitteln einen Eindruck über die Dynamik der Atmosphäre im Tagesgang.

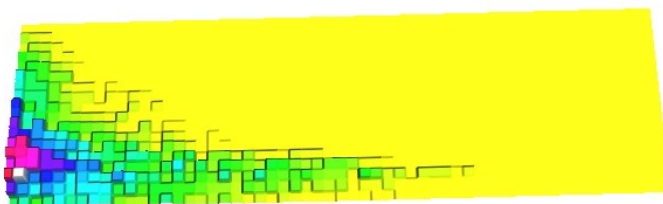


Abbildung B.3: 30. Dezember 2001, 5:03:39 Uhr: Morgenwerte: Die Atmosphäre ist noch kühl und es zeigen sich noch kaum starke Reflektivitäten.

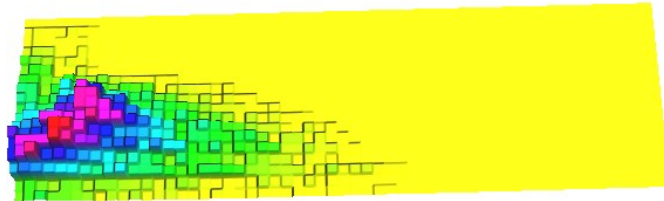


Abbildung B.4: 30. Dezember 2001, 11:52:07 Uhr, Mittagszeit: Die Erwärmung ist vorangeschritten und die Hydrometeore haben sich in höhere Luftschichten verteilt. Es treten vermehrt stärkere Echos in Höhen zwischen 6000 und 12000m über Grund auf, wobei die relativ starken Echos der obersten gefüllten CAPPI-Lagen auf junge Konvektionszellen schließen lassen.



Abbildung B.5: 30. Dezember 2001, 23:32:12 Uhr: Nachtsituation: Entsprechend des SSS (Visser 2001) scheinen alternde Konvektivzellen vorzuherrschen. Starke Reflektivitäten sind nur in den unteren CAPPI-Lagen erkennbar.



## Anhang C

# GRASSCAPE

Es wird eine Übersicht über den Hybrid-Code aus imperativen Grass-Code, funktionalem Perl-Code und regelbasierten CAPE-Code gegeben. Dieser wird für die Koppelung zwischen GRASS und CAPE benötigt. Dabei wird CAPE in GRASS gestartet, jedoch können GRASS-Kommandos weiterhin explizit durch die CAPE-Shell bzw. implizit innerhalb von Clips oder Perl-Programmen ausgeführt werden.

Die erstellten Programme lassen sich anhand ihrer Funktionalität in mehrere Gruppen unterteilen:

**Ex- und Import** Routinen, um Raumdaten aus GRASS in Clips-Strukturen zu überführen und umgekehrt.

**Wissensbasen** Es wurden Wissensbasen für die SSS-Methode, CONSTRAINT und die regelbasierte grobe Niederschlagsableitung aufgebaut.

**Verteilte Künstliche Intelligenz** Programme zur Realisierung von Softwareagenten und Zellulären Automaten, die mit den Raumdaten interagieren.

**Hilfs-Code** Die Syntax von Clips ähnelt sehr stark der Programmiersprache Lisp, einige Standardbefehle wie **apply**, **car**, **cdr**, **mapcar** und **lambda** mussten jedoch zusätzlich, teilweise in vereinfachter Form, nachgebildet werden.

### C.1 GRASSCAPE Kommandos

**\*grass\*** *Globale Variable* zur Erfassung der internen Parameter der aktuellen GRASS-Region.

**\*grassname\*** *Globale Variable* für den Namen der zu erzeugenden Rasterfelder in GRASS.

- ingrass** *Funktion*: Test ob GRASS läuft. Falls nicht wird CAPE beendet.
- grass** *Funktion*: Führt das übergebene GRASS-Kommando aus. Funktioniert auch für alle anderen legalen Shell-Kommandos.
- grassreturn** *Funktion*: Führt das übergebene GRASS-Kommando aus und liefert das Resultat zurück. Funktioniert auch für alle anderen legalen Shell-Kommandos.
- gisenv** *Klasse* zur Spiegelung von GIS-Statusfunktionen (g.region, g.gisenv). Es wird ein Singleton angelegt, der den aktuellen Zustand des GIS repräsentiert. Zusätzlich sind über einen Stack vorherige Zustände archivierbar.
- stringcut** *Funktion* zum Abschneiden von Strings
- gisenv-update** *Funktion*, die den GISENV-Singleton aktualisiert. Sollte angestoßen werden, sobald in GRASS durch den Anwender Änderungen der Gesamtsituation vorgenommen werden.
- gisenv** *Funktion*: Bootstrap-Funktionalität die die Existenz und Aktualität des GISENV-Singletons garantiert.
- gisenv-ensure** *Funktion* die die Existenz des Singletons zusichert. Der Aufruf kann jederzeit erfolgen.
- nsres** Die *Funktion* liefert die Nord-Süd-Auflösung der aktuellen Region.
- ewres** Die *Funktion* liefert die Ost-West-Auflösung der aktuellen Region.
- north** *Funktion*: Liefert den Nordwert der Region.
- south** *Funktion*: Liefert den Südwert der Region.
- east** *Funktion*: Liefert den Ostwert der Region.
- west** *Funktion*: Liefert den Westwert der Region.
- locationpath** Die *Funktion* liefert den absoluten Pfad zur aktuellen GRASS-Location.
- exportpath** Die *Funktion* liefert den absoluten Pfad zum asc-dig-Verzeichnis der aktuellen GRASS-Location (Wird zur Erzeugung von Vektor- und Sites-Lagen benötigt)
- setname** Die *Funktion* setzt den Namen für ein in GRASS zu erzeugendes Raster.
- s.to.grass** Die *Funktion* liefert die übergebenen Werte als Sites nach GRASS zurück.

- r.to.grass** Die *Funktion* liefert die übergebenen Werte als Raster nach GRASS zurück.
- v.to.grass** Die *Funktion* liefert die übergebenen Werte als Vektor nach GRASS zurück.
- site** *Klasse*: Wird intern in CAPE genutzt, um spatiale Entitäten zu verwalten ('CAPE-Punktformat').
- createsite** *Funktion* zur Erzeugung einer CAPE-Site.
- r.to.fact** *Funktion* zur Umwandlung eines GRASS-Rasters in CAPE-Facts.
- g.to.cool** *Funktion* zur Umwandlung eines GRASS-Rasters in COOL-Objekte (SITES).
- raster** *Clips-Template* zur Rastererstellung.
- g.to.fact** *Funktion*: Überträgt Rasterinformationen aus GRASS in facts in CLIPS.
- mem** *Funktion*, die den Speicherverbrauch von CAPE ausgibt.
- car\$** *Funktion*: Äquivalent zu **car** in Lisp: Liefert das erste Element einer Liste: (car\$ (a b c)) = (a)
- cdr\$** *Funktion*: Äquivalent zu **cdr** in Lisp: Liefert den Rest einer Liste: (cdr\$ (a b c)) = (b c)
- apply\$** *Funktion*: Äquivalent zu **apply** in Lisp: Wendet den übergebenen Operator auf die Liste an: (apply\$ „+“ (1 2 3)) = 6
- mapcar** *Funktion*: Äquivalent zu **mapcar** in Lisp.
- apply** *Funktion*: Äquivalent zu **apply** in Lisp.
- rei-ke** *Funktion*: Errechnet die kinetische Energie.
- rei-mi** *Funktion*: Liefert die Niederschlagsmenge, die im hocherosiven Teil des Regenereignisses anfiel.
- rei-i-mi** *Funktion*: Ergibt die mittlere Intensität der hocherosiven Niederschlagsphase.
- rei-me** *Funktion*: Die Regenmenge, die nach dem ersten fünfminütigen Intervall fällt.
- rei-ndabs** *Funktion*: Anzahl aller Impulse der übergebenen Liste.
- rei-ndeff** *Funktion*: Anzahl aller Impulse der Niederschlagsliste, die größer als Null sind.

**rei-n-phi** *Funktion*: Erzeugt den  $\phi$ -Faktor.

**rei-h** *Funktion* Liefert den Heterogenitätsparameter.

**rei** *Funktion* für den vollständigen REI-Prozess: Mit dem Aufruf von (rei (foo bar baz)) wird der gesamte Berechnungsprozess des REI-Erosivitätsindices gestartet.

**getseconds** *Funktion*: Liefert die Berechnungszeit in Sekunden.

**rain2** Routine zur Auswertung von Niederschlagsdaten durch die REI-Funktionen.

**count-instances** *Funktion*: Liefert die Anzahl aller Instanzen der übergebenen Klasse (String) zurück.

**print-instances** *Funktion*: Sendet die Print-Botschaft an alle Instanzen der übergebenen Klasse.

**gauge-za** *Klasse* für Regensammlersimulation durch Zelluläre Automaten

**push-stack** *Methode*: Schiebt einen Zahlenwert in den Stapel.

**push-event-stack** *Methode*: Schiebt einen Zahlenwert in den Stapel.

**pop-event-stack** *Methode*: Verwirft den obersten Zahlenwert des Stapels.

**purge-event-stack** *Methode*: Verwirft den gesamten Stapel.

**beregne** *Methode*: Startet den Auswertungsalgorithmus auf Basis der Stapeldaten.

**pause** *Methode*: Setzt den Automatenzustand auf 'Pause'.

**alter-state** *Methode*: Verändert den internen Zustand des Automaten.

**getquadrant** *Funktion*, um festzustellen, in welchem Quadranten des unter dem aktuellen Knoten liegenden Subbaums eines Quadtree weitergesucht werden soll.

**qtveri** *Funktion*: Testet den Aufbau eines Quadtree und das Erzeugen von Einträgen. Die Funktion dient zum Fehlertest aufgrund von Speicherlöchern oder Fehlern der Clips-Distribution.

**poweroftwo** *Funktion*, die die nächsthöhere Zweierpotenz zum übergebenen Wert liefert. Beispiel: poweroftwo(3) = 4

**qtnode** *Klasse* für alle Baumknoten und Blätter.

**haspassengers** *Methode*: Gibt an, ob der aktuelle Knoten Dateninhalte trägt, also ein Blatt ist. Es ist zu beachten, daß ein Blatt mehrere Inhalte haben kann, wobei die Referenzen auf deren Objekte in Listenform abgelegt sind.

**hasNW** *Methode*: Liefert die Information, ob der aktuelle Knoten einen NW-Subbaum hat.

**hasNE** *Methode*: Liefert die Information, ob der aktuelle Knoten einen NE-Subbaum hat.

**hasSW** *Methode*: Liefert die Information, ob der aktuelle Knoten einen SW-Subbaum hat.

**hasSE** *Methode*: Liefert die Information, ob der aktuelle Knoten einen SE-Subbaum hat.

**append** *Methode*: Fügt einen Inhalt in den Knoten ein.

**exists** *Methode*: Testet, ob der Knoten existiert.

**downwardsNE** *Methode*: Liefert den NE-Teilbaum.

**downwardsNW** *Methode*: Liefert den NW-Teilbaum.

**downwardsSE** *Methode*: Liefert den SE-Teilbaum.

**downwardsSW** *Methode*: Liefert den SW-Teilbaum.

**quadtree** *Klasse* zur Verwaltung von Quadrees, die aus QTNODES aufgebaut sind.

**push** *Methode*: Fügt den übergebenen Wert in den Quadtree ein.

**locate** *Methode*: Stellt fest, ob der übergebene Wert schon im Quadtree enthalten ist.

**purge** *Methode*: Verwirft einen Wert aus dem Quadtree.

**makeqt** *Methode*: Initialisiert den Quadtree.

**nuke-tree** *Methode*: Löscht den Quadtree.

## C.2 GRASSCAPE Wissensbasis

Die CAPE-Wissensbasis zur Berechnung des SSS-Faktors liegt in der Datei 'automated.cap' vor.

### Übersicht über den Inferenz- und Verarbeitungsprozess

Vor dem eigentlichen regelbasierten Teil wird etwas Vorarbeit geleistet: Die globalen Variablen GRASS und GRASSNAME werden angelegt. In GRASSNAME wird im Verlauf des Algorithmus der Name der zu erzeugenden

GRASS Site-Layer abgelegt, während 'GRASS' als Container für instantiierte Fakten benötigt wird. Weiterhin wird ein Objekt der Klasse GIS-ENV angelegt, in dem die Variablen der GRASS-Umgebung, wie etwa Pfad-Angaben, in der CAPE-Welt gespeichert werden. Es wird eine Funktion *s.to.grass* definiert, welche die Übergabe der in 'GRASS' enthaltenen SITE-Facts an GRASS ausführt. Auch wird ein Clips-Template 'mdvtest' abgelegt, um nach dieser Schablone Fakten mit den internen 'Variablen' der Visser'schen SSS-Klassifikation aufzunehmen. Die Übertragung der in GRASS vorliegenden Rasterwerte erfolgt durch ein PERL-Fragment ('sub...') das die notwendigen Fakten ('mdv') im Clips-Raum erzeugt.

Nun kann der regelbasierte Teil beginnen. Die Reihenfolge der Anwendung der Regelgruppen ist durch Vergabe von Saliencen-Werten (Prioritäten) geregelt. Dadurch wird sichergestellt, dass eine weitere Inferenzphase erst beginnt, wenn alle Regeln der vorherigen Phase gefeuert haben.

Zuerst wird die Regel CALCULATOR (Saliencen 1000) auf die vorhandenen 'mdv'-Fakten angewendet. Sie ermittelt die notwendigen SSS-Variablen, etabliert ein 'mdvtest'-Faktum und zieht das ursprüngliche 'mdv'-Fakt zurück<sup>1</sup>. Damit ist der Import und die Aufbereitung der Daten abgeschlossen.

Die wirkliche Beurteilung kann nun beginnen: Es feuern die Regeln für die Begriffe 'WEAK', 'MODERATE', 'SEVERE', 'BASE', 'VOLUME' und 'TOP' - alle haben eine Saliencen von 500. Zu den Begriffen BASE, VOLUME und TOP existieren jeweils mehrere Regeln, bei denen es jedoch unerheblich ist, in welcher Reihenfolge sie feuern. Jede gefeuerte Regel erzeugt ein Fakt mit ihrem Namen, die zusätzlich die X-Y-Koordinaten für die betroffene Raumstelle als Variablen besitzt.

Mit einer Saliencen von 300 kommen nun die Verkettungsregeln an die Reihe: 'WB', 'MB', 'SB', 'WV', etc., die nur feuern, wenn es zu einer X-Y-Koordinate beispielsweise ein 'WEAK'- **und** ein BASE-Fakt gibt (WB-Regel). Ist dies der Fall, wird an den globalen Puffer 'GRASS' eine Stringzeile des Formats '*XWert YWert Code*' geschrieben<sup>2</sup>. Der Übersetzungsschritt in einen Integerwert ist notwendig, da der Import in das generische GRASS-Sitesformat einen Zahlenwert erfordert.

Zuletzt feuern noch zwei Regeln, die den Inferenzabschluss sicherstellen. Die letzte Regel (docleanup, Saliencen 100) ruft die GRASSCAPE Funktion (*s.to.grass*) auf, um die notwendige ASCII-Datei im GRASS-Verzeichnisbaum zu erzeugen und zu importieren. Daraufhin wird mit (*grass s.to.rast*) die GRASS-interne Konvertierung der Punktdaten in ein Rasterfeld ausgeführt.

<sup>1</sup>Dabei ermöglicht die Lisp-ähnliche Syntax ein elegantes Vorgehen beim Ermitteln der Maximalwerte des Reflektivitäts-Vektors.

<sup>2</sup>Dabei entspricht der 'Code' einem der Wert 11,12,13,101,102,103,1001,1002,1003 - entsprechend den Variablen WB,MB,SV,WV,MB,SV,WT,MT,ST.

### Übersicht über die speziellen Funktionalitäten

**setname** Definiert den Namen des Ausgaberrasters

**mdvtest** *Template*

**datastack** *Klasse*

**push-stack** *Methode*: Schiebt einen Eintrag in den Stack.

**pop-stack** *Methode*: Entfernt den obersten Eintrag des Stacks.

**item[stacklength]** *Methode*: Liefert die Tiefe des Stack

**cool.to.sites** *Funktion*: Erzeugt aus den COOL-Objekten GRASS-sites in einem site-layer.

**cool.2.sites** *Funktion*: Erzeugt aus den COOL-Objekten GRASS-sites in einem site-layer.

**cool.to.rast** *Funktion*: Erzeugt aus den COOL-Objekten ein Raster in GRASS.

| Regel-Wertigkeit | Regelname                                                                                                 | Funktion                                             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1000             | calculator                                                                                                | Start der Inferenz                                   |
| 500              | base1, base2, base3,<br>volume1, volume2, vo-<br>lume3, volume4, top1,<br>top2, weak, moderate,<br>severe | Erzeugen der Attribu-<br>te                          |
| 200              | wb, mb, sb, wv, mv,<br>sv, wt, mt, st, rr02,<br>rr10, rr30, rr100,<br>rr500, rr2000                       | Beurteilung der Re-<br>fektivitäten                  |
| 150              | startcleanup                                                                                              | Aufräumarbeiten                                      |
| 100              | cleanup                                                                                                   | Ende der Inferenz,<br>Weitergabe der Ergeb-<br>nisse |

Tabelle C.1: Übersicht über die Regeln der SSS-Wissensbasis in GRASSCAPE.

## C.3 Ein räumlicher Suchalgorithmus für GRASS-CAPE

### Motivation und Entwicklung

In einem ersten Ansatz wurde eine rein regelbasierte Agentensimulation für Evaluierungszwecke realisiert.

Bei diesen Experimenten<sup>3</sup> zeigte sich jedoch, dass die Suchzeiten des Rete-Algorithmus mit steigender Anzahl der Agenten/Zellulären Automaten rapide anstieg und schnell unrealistisch wurde.

Aus diesem Grund wurde eine wirklich objektorientierte Neuimplementierung in COOL vorgenommen. Dies brachte zwar verbesserte Laufzeiten, doch die standardmäßig in Clips implementierten Suchalgorithmen für Objekte erwiesen sich als zu langsam.

### Komplexitäts- und Laufzeitbetrachtung

**Kurze Betrachtung des Problems** Bei der notwendigen Zuordnung von Zellulären Automaten (ZA) und Niederschlagswerten handelt es sich um eine Abbildung zwischen beiden Mengen: Die Umsetzung mit den in Clips implementierten Suchalgorithmen führte zu extrem langen Laufzeiten. Die Abbildungsvorschrift stellt sich bei der Umsetzung in COOL-Klassen für ZA und Niederschlagswerte als Suchproblem im COOL-Objektraum dar, was nichts mit dem Rete-basierten Inferenzmechanismus zu tun hat.

**Erster Lösungsansatz** Ein erster Lösungsansatz war die Reduzierung der Suchvorgänge auf die unbedingt notwendige Menge. Im Gegensatz zur konstanten Anzahl der Zellulären Automaten (ZA) variiert die Zahl der Zellen mit Niederschlagswerten bei jedem Zeittakt. Nur im *worst case* ist sie gleich der Anzahl der ZA. Deswegen ist es sinnvoll, eine Abbildung der Niederschlagswerte in den ZA-Raum zu betrachten, womit die Suchzugriffe von ZA entfallen, die keinen Niederschlag verzeichnen. Beide Abbildungswege (in und aus der Menge der ZA) wurden implementiert, die Laufzeitverbesserungen der optimierten Version waren jedoch zu gering, um die Verarbeitung regionaler CAPPI in vertretbarer Zeit durchzuführen.

**Verwendung von Raumwissen** Der zweite Lösungsansatz basiert auf dem Umstand, dass sowohl die Instanzen der Niederschlagswert- als auch der ZA-Klassen-Abstraktionen räumlicher Muster sind. Diese räumliche Anordnung kann zur Optimierung eingesetzt werden:

Es wurde bereits gezeigt, dass eine Abbildung der Niederschlagswerte in den ZA-Raum sinnvoll ist. Da für einen bestimmten Zeittakt alle vorhandenen Niederschlagsobjekte nacheinander betrachtet werden müssen, bietet sich eine Optimierung des Suchzugriffs auf die ZA an.

Hierfür wird auf der Menge der ZA ein Quadrantenbaum (quadtrees) aufgebaut, dessen Blätter den ZA-Instanzen entsprechen. Die Anordnung der Objekte als Blätter erfolgt dabei aufgrund ihrer Raumkoordinaten (X,Y). Damit reduziert sich die Suche nach dem zu einem Niederschlagsobjekt

---

<sup>3</sup>Conways 'Spiel des Lebens', Berechnung der Mandelbrotmenge mit Zellagenten, Random Walk Agenten.



gehörenden ZA-Objekt auf die Lokalisierung des den Raumkoordinaten des Niederschlagsobjekts entsprechenden Baumblatts. Die Baumstruktur und die ZA-Instanzen bleiben während der gesamten Verarbeitung über eine Folge von Zeittakten bestehen. Der Aufwand der Baumerstellung muss also nur einmal nach Instanziierung der ZA-Objekte bei Laufzeitbeginn erfolgen. Die dadurch entstehenden Effekte werden im nächsten Abschnitt erläutert.

**Komplexitätsbetrachtung** Annahme: Die Seitenlänge der verwendeten quadratischen CAPPI-Daten sei  $r$ . Damit beträgt die Anzahl der Raumstellen im Raster und damit die Zahl der ZA-Instanzen und die maximale Zahl der Niederschlagswerte pro Zeiteinheit  $r^2 = R$ .

#### Laufzeitbetrachtung ohne Nutzung der Lagebeziehungen

**Quellobjekte:** Es werden  $R$  Objekte hintereinander betrachtet (*worst case*).

**Zielobjekte:** Es wird angenommen, dass die Suche linear über die (ungeordneten) Instanzen läuft. Für  $R$  dieser Objekte müssen insgesamt  $1 + 2 + 3 + \dots + R$  Suchzugriffe erfolgen (endliche Reihe).

Damit gilt (Bronstein u. a. 1997):

$$\sum_{i=1}^R i = \frac{R(R+1)}{2} = \frac{R^2 + R}{2} \quad (\text{C.1})$$

Die Komplexität kann damit wie folgt abgeschätzt werden (Loudon 2000):

$$T(R) = R + \frac{R^2 + R}{2} \quad (\text{C.2})$$

$$O(T(R)) = O\left(R + \frac{R^2 + R}{2}\right) = O(R^2) \quad (\text{C.3})$$

#### Laufzeitbetrachtung bei Nutzung der Lagebeziehung

**Quellobjekte:** Es werden  $R$  Objekte hintereinander betrachtet (*worst case*).

**Zielobjekte:** Die Suche nach Blättern im Baum ist eine Funktion der Baumtiefe  $t$ . Für diese gilt  $t \ll R$ .

Komplexität (Loudon 2000):

$$T(R) = R + t \cdot R \quad (\text{C.4})$$

$$O(T(R)) = O(R + t \cdot R) = O(R) \quad (\text{C.5})$$

**Veranschaulichung** Bei einem regionalen CAPPI-Reflektivitätsdatensatz mit einer Kantenlänge von 400 Pixeln beträgt die Anzahl der Schritte für die Suchzugriffe im *worst case*

$$\frac{400^{2^2} + 400^2}{2} = 1.280.008.000 \quad (\text{C.6})$$

Für die Quadtree-basierte Verarbeitung ist die Erstellung eines Quadrantenbaumes der nächsthöheren Zweierpotenz ( $512 = 2^9$ ) nötig (Löwe 1997). Ein Baum dieser Ausdehnung hat eine Tiefe von neun Ebenen. Damit sind pro Suchzugriff neun Verzweigungen im Suchbaum nötig. Somit entspricht die Zahl der Suchzugriffe für einen Reflektivitätsdatensatz

$$400^2 \cdot 9 = 1.440.000 \quad (\text{C.7})$$

Daraus folgt, dass die Verwendung des Quadtree-Ansatzes im Beispielfall lediglich 0.12 Prozent ( $1.440.000/1.280.008.000$ ) der beim konventionellen Ansatz notwendigen Prozessschritte erfordert. Durch diese Beschleunigung wird die Verarbeitung großer Datensätze wieder möglich. Bei der Verarbeitung von nationalen Komposit-CAPPI-Daten wird die Diskrepanz noch augenfälliger: Dabei wird hier von einem quadratischen Raster ausgegangen<sup>4</sup>. Bei 1200 Pixeln ist die nächsthöhere Zweierpotenz 2048 und es bei einem 12-Ebenen-Quadrantenbaum ist folgende Anzahl von Zugriffen nötig:

$$1200^2 \cdot 12 = 17.280.000 \quad (\text{C.8})$$

Die Anzahl der Suchzugriffe ist ohne die Nutzung der Lagebeziehung wesentlich höher:

$$\frac{1200^{2^2} + 1200^2}{2} = 1.036.800.720.000 \quad (\text{C.9})$$

Der Vergleich der beiden Werte ergibt ein Verhältnis von 1 zu 60.000. Eine Übersicht über die genauen Werte und Verhältnisse wird in Tabelle C.2 gegeben.

| Kantenlänge:                           | 400           | 1200              |
|----------------------------------------|---------------|-------------------|
| Suchaufwand, alt                       | 1.280.008.000 | 1.036.800.720.000 |
| Suchaufwand, neu                       | 1.440.000     | 17.280.000        |
| Verhältnis des Suchaufwands (gerundet) | 1 : 888       | 1 : 60.000        |

Tabelle C.2: Das Verhältnis von  $O(n)$  zu  $O(n^2)$  für unterschiedlich große Rasterfelder.

<sup>4</sup>In der Realität handelt es sich nur um die größere der beiden Kantenlängen.

## Anhang D

# Wissensbasen für das GRASS-Modul r.infer

Die regelbasierte Verarbeitung von Raumdaten mit den in GRASS vorhandenen Modulen erfordert die Aufbereitung der Ursprungsdaten und gegebenenfalls die Umskalierung der Ergebniswerte.

Da die Verbindung von r.mapcalc-Vorprozessierung und einem Aufräumschritt zur garbage collection der nicht mehr benötigten Ganzzahl-Raster beim Einsatz von r.infer nötig sind, wurden drei Skripte geschaffen: Das erste Skript leistet die Bereitstellung der bisher bekannten meteorologischen Variablen als Ganzzahlwerte. Das zweite Skript wendet eine übergebene Wissensbasis an und das letzte Skript räumt die Integerumgebung auf.

Damit wird die Nutzung des Inferenzmechanismus durch 'relative Laien', also GIS-Nutzer ohne weitergehende Shell-Programmierkenntnisse, erleichtert, da Standardraster wie Liquid Water Content (LWC) in geeigneter Form vorliegen. Damit reduziert sich die Programmierung auf die Erstellung einer Wissensbasis für r.infer, die dann vom Ausführungsskript (mdv.infer.apply) auf die Raster angewendet wird.

## D.1 Storm Severity Structure

| Storm Severity Structure                                          |
|-------------------------------------------------------------------|
| IFMAP MX 30-44 THEN weak !                                        |
| IFMAP MX 45-54 THEN moderate                                      |
| IFMAP MX 55-1000 THEN severe                                      |
| IFMAP H 0-65 ANDIFMAP S 0-20 THEN base                            |
| IFMAP H 60-80 ANDIFMAP S 20-10000 ANDIFMAP MXH 2-5 THEN base      |
| IFMAP H 0-65 ANDIFMAP S 20-10000 ANDIFMAP MXH 6-17 THEN base      |
| IFMAP H 65-80 ANDIFMAP S 0-20 THEN volume                         |
| IFMAP H 0-65 ANDIFMAP S 20-10000 ANDIFMAP MXH 6-17 THEN volume    |
| IFMAP H 65-80 ANDIFMAP S 20-10000 ANDIFMAP MXH 6 THEN volume      |
| IFMAP H 80-10000 ANDIFMAP S 20-10000 ANDIFMAP MXH 2-6 THEN volume |
| IFMAP H 8-010000 ANDIFMAP S 0-20 THEN top                         |
| IFMAP H 80-10000 ANDIFMAP S 0-20 ANDIFMAP MXH 7-17 THEN top       |
| IF weak ANDIF base THENMAPHYP 11 weak-base                        |
| IF moderate AND base THENMAPHYP 101 moderate-base                 |
| IF severe ANDIF base THENMAPHYP 1001 severe-base                  |
| IF weak ANDIF volume THENMAPHYP 12 weak-volume                    |
| IF moderate ANDIF volume THENMAPHYP 102 moderate-volume           |
| IF severe ANDIF volume THENMAPHYP 1002 severe-volume              |
| IF weak ANDIF top THENMAPHYP 13 weak-top                          |
| IF moderate ANDIF top THENMAPHYP 103 moderate-top                 |
| IF severe ANDIF top THENMAPHYP 1003 severe-top                    |

Tabelle D.1: Code der r.mapcalc-Wissensbasis für den Storm Severity Structure Index (SSS).

## D.2 CONSTRAT

| Constrat                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| IFMAP CAPPI4 41-1000 THEN convective                                             |
| IFMAP CAPPI4 1-40 THEN intermed-or-strati                                        |
| IF intermed-or-strati ANDIFMAP CAPPI2min11AVERAGE 4-1000 THEN intermediate       |
| IF intermed-or-strati ANDIFMAP CAPPI2min11AVERAGE 1-3 THEN stratiform            |
| IF intermed-or-strati ANDIFMAP CAPPI2minVERTAVERAGE 4-1000 THENMAPHYP stratiform |
| IF intermed-or-strati ANDIFMAP CAPPI2minVERTAVERAGE 1-3 THENMAPHYP intermediate  |
| IF convective THENMAPHYP 1 CONVECTIVE                                            |
| IF intermediate THENMAPHYP 2 INTERMEDIATE                                        |
| IF stratiform THENMAPHYP 4 STRATIFORM                                            |

Tabelle D.2: Code der r.infer-Wissensbasis für den CONSTRAT Algorithmus.

## D.3 Niederschlagsmengen

| Rainrate                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| IFMAP MX 20-29 THEN rr1.0                                                        |
| IFMAP MX30-39 THEN rr3.0                                                         |
| IFMAP MX 40-49 THEN rr10.0                                                       |
| IFMAP MX 50-59 THEN rr50.0                                                       |
| IFMAP MX 60-100 THEN rr200.0                                                     |
| IF rr0.2 THENMAPHYP 2 significant-but-mostly-nonprecipitation-clouds             |
| IF rr1.0 THENMAPHYP 10 drizzle-very-light-rain                                   |
| IF rr3.0 THENMAPHYP 30 light-rain                                                |
| IF rr10.0 THENMAPHYP 100 moderate-rain-showers                                   |
| IF rr50.0 THENMAPHYP 500 heavy-rain-thundershowers-some-hail-possible            |
| IF rr200.0 THENMAPHYP 2000 extremely-heavy-rain-severe-thunderstorms-hail-likely |

Tabelle D.3: Code für die r.infer-Wissensbasis zur Niederschlagsmengenabschätzung



## Anhang E

# Weitere REI-Darstellungen

Es zeigt sich, dass die Zellagenten auf die bei der Erzeugung der CAPPI-Daten stattfindende Höhenskalierung reagieren: Im REI-Datensatz sind die inneren CAPPI-Ringe klar erkennbar. Die ebenfalls vorhandenen Sonnensandeffekte werden von den Zellagenten ignoriert. Entsprechend sollten die Zellulären Automaten um 'Distanzwissen' entsprechend modifiziert werden, um die Geometrie-Effekte kompensieren zu können.

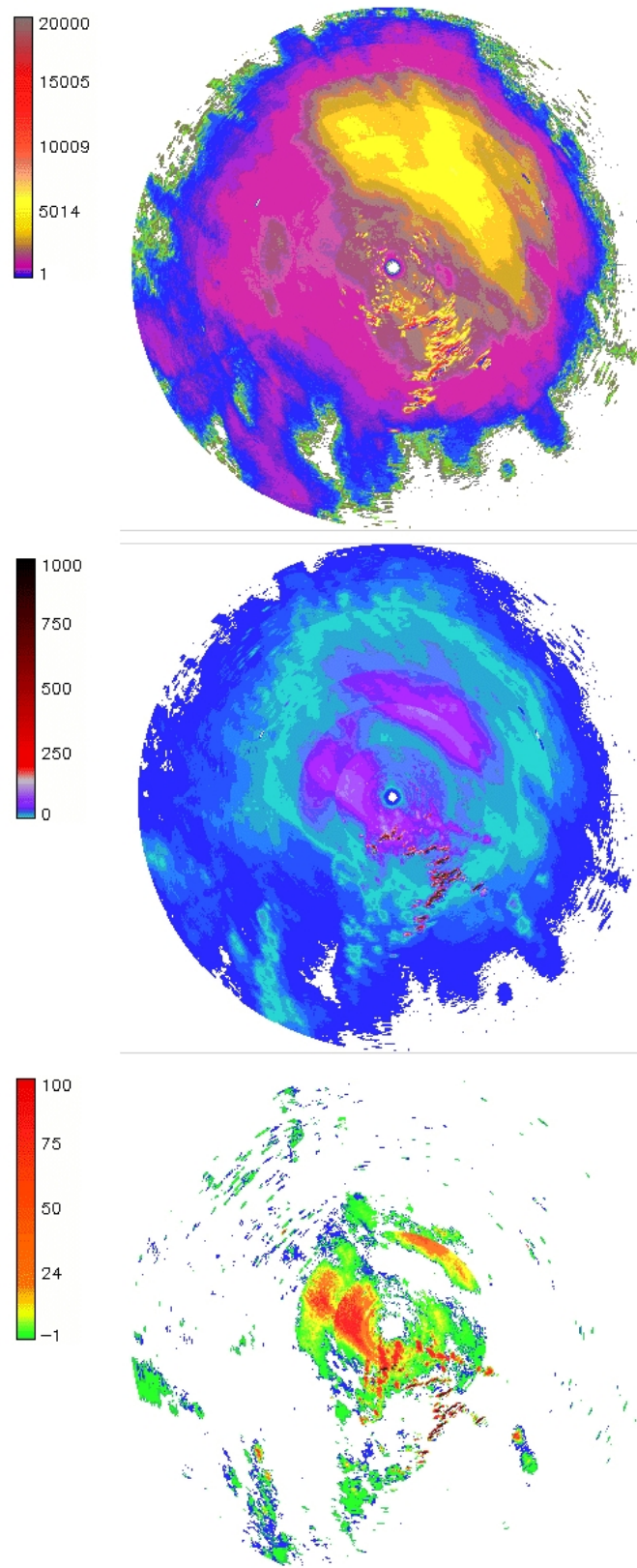


Abbildung E.1: Darstellung der Reflektivitäts-, Niederschlags- und REI-Tagessummen vom 19. November 1998: Diese Verarbeitung entspricht dem in Kapitel 7 erörterten problematischen Radarpluviogramm





## Anhang F

# Radarnetzwerk Südafrika

| Standort       | Position              | Höhe  | Typ                | Wellenlänge                           | Strahlbreite           | Betreiber |
|----------------|-----------------------|-------|--------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------|
| Irene          | 25.9200S,<br>28.2200E | 1533m | EEC<br>WSR 93<br>D | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Bloemfontein   | 29.1000S,<br>26.3000E | 1422m | EEC<br>WSR 88<br>D | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Durban         | 30.0117S,<br>30.9300E | 0114m | EEC<br>WSR 88<br>D | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Port Elizabeth | 33.9840S,<br>25.6070E | 0085m | EEC<br>WSR 88<br>D | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| East London    | 32.9367S,<br>27.8083E | 0285m | EEC<br>WSR 88<br>D | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Cape Town      | 34.0537S,<br>18.3856E | 0927m | EEC<br>WSR 81      | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Ermelo         | 26.5000S,<br>29.9833E | 1768m | EEC<br>WSR 81      | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| De Aar         | 30.6650S,<br>23.9930E | 1295m | EEC<br>WSR 76      | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Bethlehem      | 28.2500S,<br>28.3333E | 1687m | EEC<br>WSR 81      | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |
| Bethlehem      | 28.0975S,<br>28.1628E | 1719m | MRL-5              | 10 cm -<br>S-band<br>3 cm -<br>X band | 1.5o<br>1.5o /<br>0.5o | WRC       |
| Polo-kwane     | 23.8530S,<br>29.4620E | 1257m | EEC<br>WSR 81      | 5 cm -<br>C-band                      | 1o                     | SAWS      |

Tabelle F.1: Übersicht über die operationalen Wetterradarstationen in Südafrika.

## F.1 Steckbrief des MRL5-Radar der Water Research Commission

| Eigenschaften                               | X-Band                    | S-Band              |
|---------------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Strahlbreite                                | 1.5 Grad                  | 1.5 Grad            |
| Seitloben                                   | > 22 dB                   | > 23 dB             |
| Empfängerempfindlichkeit                    | - 108 dBm                 | - 106 dBm           |
| Empfängerlinearität                         | < 2 dB                    | < 2 dB              |
| Transmitter frequency                       | 9.603 GHz                 | 2.954 GHz           |
| Transmitterleistung (1 $\mu$ s pulse width) | 210 kW                    | 600 kW              |
| Transmitterleistung (2 $\mu$ s pulse width) | 230 kW                    | 600 kW              |
| Pulswiederholungsfrequenz (1 $\mu$ s)       | 500 Hz                    | 500 Hz              |
| Pulswiederholungsfrequenz (2 $\mu$ s)       | 250 Hz                    | 250 Hz              |
| Pulse coincidence (1 $\mu$ s)               | unter 0.2 $\mu$ s         | unter 0.2 $\mu$     |
| Pulse coincidence (2 $\mu$ s)               | unter 0.2 $\mu$           | unter 0.2 $\mu$     |
| Pulsbreite                                  | 1 $\mu$ s/2 $\mu$ s       | 1 $\mu$ s/2 $\mu$ s |
| Energieaufnahme                             | 28 kVA (total - gemessen) | dto                 |

Tabelle F.2: Technische Beschreibung des MRL-5-Radarsystems.



Abbildung F.1: Das MRL5-Radar der südafrikanischen Water Research Commission.

## F.2 Radarmeteorologische Klassifikationsansätze

### F.2.1 CONSTRAT

Beschreibung des CONSTRAT-Entscheidungsbaums (Mittermaier 1999):

1. Falls das Profil eine Reflektivität größer als 40dBZ im 4000m-CAPPI aufweist, wird es sofort als konvektiv klassifiziert. Ist dies nicht der Fall, wird das 2000m-CAPPI kritisch betrachtet, aus dem Grund, das 'helle Bänder' beim MRL-5 meist in dieser Höhe auftreten. Für diese Test-Zwischenstufe wird nach eingebetteten lokalen Maxima gesucht: Über einem 11 \* 11 Matrixfilter (shifting window, ohne das Zentralpixel) werden Mittelwerte für die Pixel berechnet, die in Zone I oder II um das Radar liegen und mit einem empirisch ermittelten Schwellwert von 3 dBZ verglichen. Falls der Mittelwert den Wert des Zentralpixels um 3 dBZ übersteigt, wird das Zentralpixel als Intermediär klassifiziert. Ist dies nicht der Fall, wird es als stratiform klassifiziert.
2. Der zweite Schritt ist eine erneute Klassifikation der Pixel, die im ersten Schritt nicht schon als Konvektiv diagnostiziert wurden. Zuerst wird das Mittel der über Null liegenden Werte in einer vertikalen Säule berechnet, mit einem Maximum von sieben Dimensionen (nur die untersten sieben CAPPIS werden durch CONSTRAT betrachtet) und der Wert des 2000m-CAPPI wird mit diesem Mittelwert verglichen. Sofern der 2000m-CAPPI Wert um den empirischen Differenzwert von 3 dBZ größer ist als das gebildete Mittel, wird die Raumstelle als stratiform klassifiziert. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Bright Band im 2000m-CAPPI zentriert ist. Sofern diese zweite Klassifikation von der ersten Diagnose abweicht, hebt sie die Erstdiagnose auf, wodurch die Information aus dem vertikalen Echo als relevanter gewichtet wird als die der horizontalen Inhomogenitäten.

### F.2.2 Storm Severity Structure

Es folgt eine Übersicht über die Klassen, in die der SSS-Algorithmus (Visser 2001) die durch die Reflektivitätsdate konvektive Wettersituation einteilt.

**TOP-Struktur** Ein starker Aufwind kann das flüssige Wasser einer Zelle in großen Höhen halten. In einer Konvektivzelle, deren flüssiges Wasser hauptsächlich in einer Höhe über 8km AGL befindet, müssen starke Aufwinde und Luftmasseninstabilität herrschen, um diese Struktur aufrecht zu erhalten. Dies ist symptomatisch für eine Sturmzelle, die noch in ihrer Entwicklung befindlich ist, was hier mit TOP klassifiziert wird.

**VOLUME-Struktur** Eine konvektive Zelle ist in ihrer Reifephase angelangt, wenn der Wasseranteil sich eher gleichmäßig in der Vertikalen verteilt. In einem solchen Fall besteht eine tiefe Konvektion, und obwohl starke Aufwinde noch vorherrschen, gibt es schon einen Abwind mit den abregnenden Wassermassen. Dies wird als VOLUME klassifiziert.

**BASE-Struktur** Sofern der Wasseranteil sich tiefer als 6.5km AGL konzentriert, kann abgeleitet werden, dass keine starken Aufwinde mehr existieren. Alternativ kann die Vertikalbewegung durch einen synoptischen barometerischen Trog und/oder die Freisetzung von latenter Energie durch Kondensation in einem tropischen, konvektiven Sturm erfolgen. Auch wird eine solche Struktur bei sich auflösenden, konvektiven Stürmen oder bei Niederschlag aus Stratusbewölkung in dieser Nomenklatur als BASE diagnostiziert.

**Geometrieeffekte** Für das MRL-5 wird als unterstes das 3000m-CAPPI genutzt, das 5000m-CAPPI fällt in einer Entfernung von 120km von der Radarstation weg.

**Distanzeffekte** Die Severität (Sturmstärke) wird meist richtig klassifiziert, die Strukturdaten sind jedoch problematisch: BASE wird nur innerhalb von 135km gut erkannt<sup>1</sup>. VOLUME-Strukturen werden noch in größerer Distanz erkannt, allerdings stellt sich ein Trend zur Fehlklassifikation als BASE ein. Da die obersten CAPPI-Lagen noch in maximaler Distanz zum Radar verfügbar sind, werden TOP-Strukturen noch in größter Entfernung erkannt.

In der Arbeit von Visser (Visser 2001) finden sich Ansätze für Regeln, die die wandelnden SSS-Klassifikationen bei abnehmender CAPPI-Verfügbarkeit beschreiben. Dies kann als eine Wissenstransformation aufgefasst werden, wobei diese Arbitr-Regeln - die Distanzfunktionen entsprechen - die ersten Diagnosen, die ohne Distanzwissen gemacht wurden, relativieren und transformieren könnten.

---

<sup>1</sup>Wenn die untersten fünf CAPPIs wegfallen, kann es nicht erkannt werden.



## Anhang G

# Betrachtung der durch die Radarstationen des SAWS erfassten Geländehöhen

Die vom SAWS erzeugten landesweiten Datenkomposite skalieren alle in ihnen enthaltenen regionalen Radardatensätze auf Meereshöhe. Damit geht die originale Höheninformation (AGL: above groundlevel aufgezeichnet) verloren. Diese ist jedoch für die realitätsnahe Berechnung der kinetischen Energie von Niederschlägen wichtig.

Vor diesem Hintergrund wird nun erörtert, ob sich bei den durch Radarstationen erfassten Gebieten Verteilungsmuster nachweisen lassen. Falls solche Muster existieren, können sie zumindest als grobe Skalierungsfaktoren in die Betrachtung der landesweiten Datensätze einfließen.

Ausgehend von den verfügbaren Raumdaten wird der folgende Ansatz verwendet:

1. Beobachtung: Die Radarstationen befinden sich auf sehr unterschiedlichen Höhen und erfassen abhängig von der Topographie sehr unterschiedlich ausgeprägte Areale (siehe auch 3).
2. Um dies zu quantifizieren, wurde das 1km-DEM in 200m Höhenstufen gegliedert.
3. Für alle Radarstationen wurden die erfassten Gebiete als kreisförmige Flächen mit 200km-Radius ausgegliedert.
4. Für diese Radar-Erfassungsflächen werden die Anteile der vorkommenden Höhenstufen erfasst. Aus dem Histogramm jeder Erfassungsfläche wird ein sie charakterisierender, mehrdimensionaler Topographie-Vektor abgeleitet.

5. Beim Vergleich der Beträge dieser Topographie-Vektoren lassen sich Gruppen ausweisen (Tabelle G.1).
6. Die Kartierung der gebildeten Gruppen deckt sich mit der Unterteilung von Radarstandorten in Binnenland-Hochebene und den Küstensaum (Abbildung G.2).
7. Zusätzlich zeigen sich für den Binnenbereich drei Untergruppen: Einmal lässt sich eine Radarregion klar für das östliche Highveld abgrenzen. Dagegen besteht die Radarregion der Landesmitte aus zwei Untergruppen, die sich räumlich durchdringen.

Damit ist demonstriert worden, dass sich die Erfassungsgebiete der Radarstationen mit vertretbarem Aufwand nachvollziehbar in Gruppen unterteilen lassen. Unabhängig von den jeweils lokal auftretenden Topographie-Eigenschaften können damit auf landesweiter Ebene Skalierungsfaktoren für die Erzeugung von Folgeprodukten für die einzelnen Radarregionen eingesetzt werden.



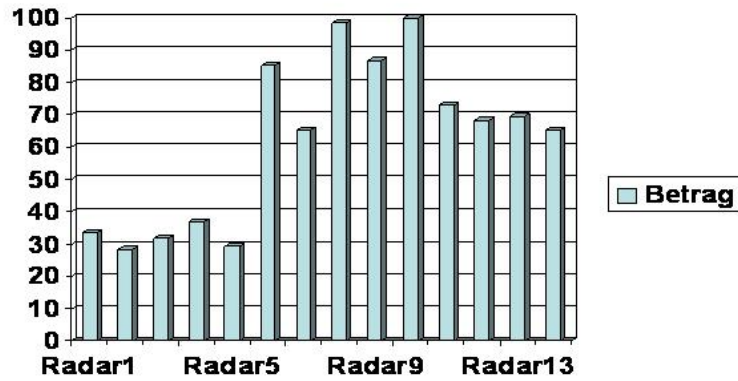


Abbildung G.1: Unterteilung der (anonymisierten) Radarstationen in Gruppen anhand ihrer Höhenstufenabdeckung durch Betragsbildung: Das Geländemodell der durch Radarstationen erfassten Gebiete wurde in wenige Höhenstufen aufgeteilt. Für die jeweils von einem Radar erfassten Gebiete wurden die abgedeckten Anteile der einzelnen Höhenstufen zu einem Histogramm-Vektor abstrahiert (siehe Abschnitt G). Die Beträge dieser Vektoren (euklidischen Distanz zum Ursprung) werden im Diagramm angetragen. Dabei lassen sich drei Gruppen mit niedrigen (unter 40; [1, 2, 3, 4, 5]), mittleren (unter 75; [6 + 9, 8 + 10]) und hohen (über 75; [7, 11, 12, 13, 14]) Beträgen erkennen. Diese werden in Abbildung G.2 dargestellt.

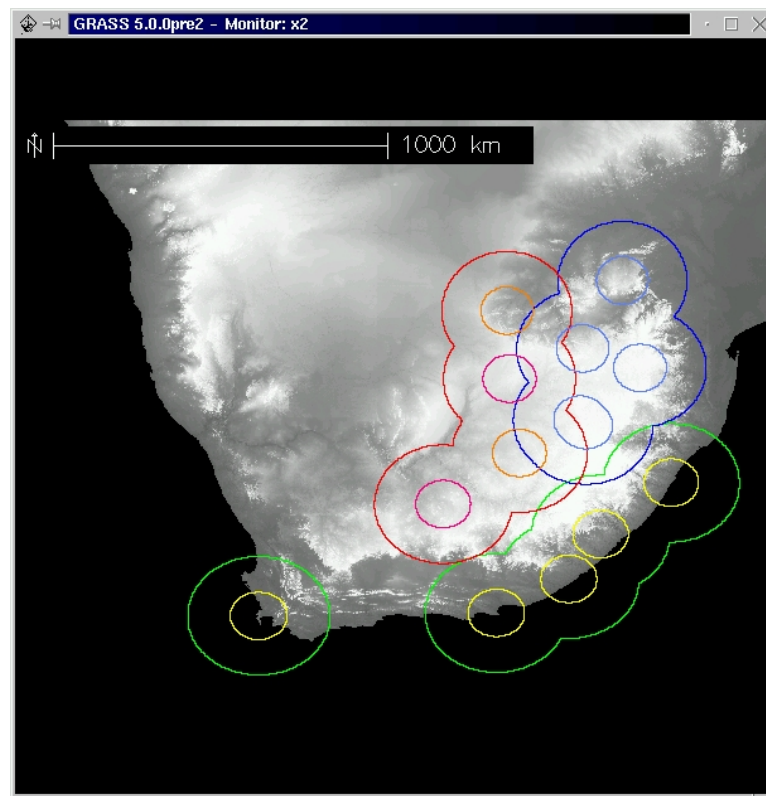


Abbildung G.2: Darstellung der Erfassungsgebiete der südafrikanischen Wetterradarstationen. Es sind die 200km- und die 100km-Radien um die Stationen angetragen, um die maximalen (200km) und die akzeptablen (100km) Erfassungsbereich zu skizzieren. Die Farbwerte entsprechen der Gruppierung der Radarstationen nach den Geländehöhen der von ihnen erfassten Gebiete.

### Histogramme der Radarerfassungsgebiete

Die Diagramme stellen den Erfassungsbereich der einzelnen Radarstationen dar. Dabei werden die Erfassungsgebiete durch kreisförmige Gebiete mit 200km-Radius um die Radarstationen abgeschätzt. Die Einteilung in Kategorien erfolgt entsprechend dem auf 200m-Isophypsen reskalierten  $1km^2$ -Geländemodell.

Die Stationen wurden für die Verarbeitung anonymisiert und nummeriert.

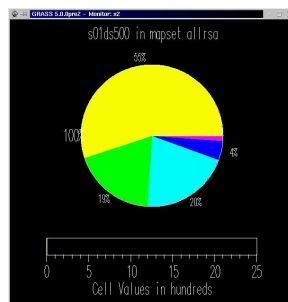


Abbildung G.3: Station 1, Topographie-Histogramm.

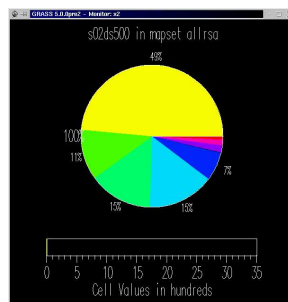


Abbildung G.4: Station 2, Topographie-Histogramm.

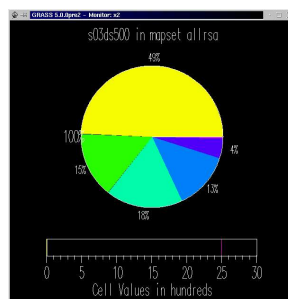


Abbildung G.5: Station 3, Topographie-Histogramm.

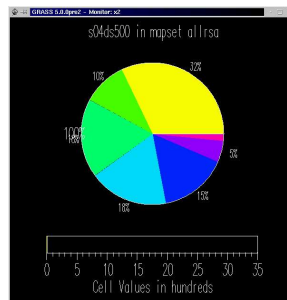


Abbildung G.6: Station 4, Topographie-Histogramm.

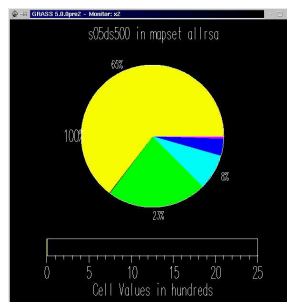


Abbildung G.7: Station 5, Topographie-Histogramm.

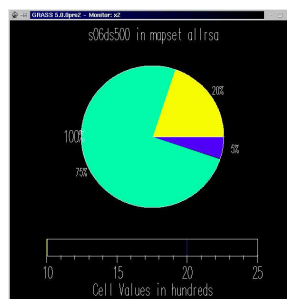


Abbildung G.8: Station 6, Topographie-Histogramm.

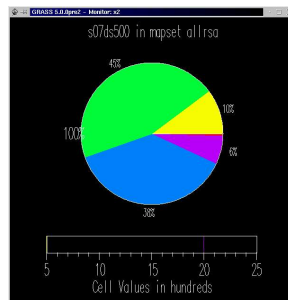


Abbildung G.9: Station 7, Topographie-Histogramm.

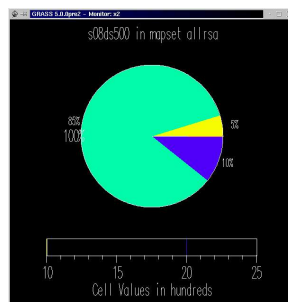


Abbildung G.10: Station 8, Topographie-Histogramm.

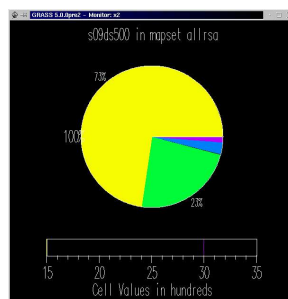


Abbildung G.11: Station 9, Topographie-Histogramm.

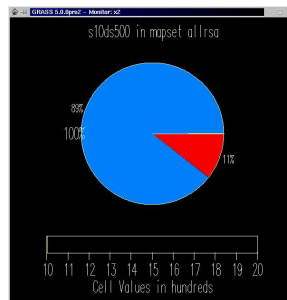


Abbildung G.12: Station 10, Topographie-Histogramm.

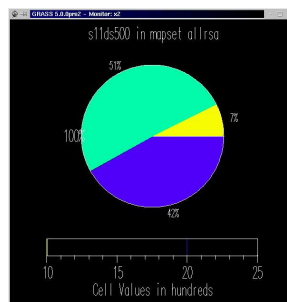


Abbildung G.13: Station 11, Topographie-Histogramm.

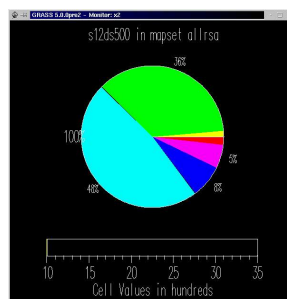


Abbildung G.14: Station 12, Topographie-Histogramm.

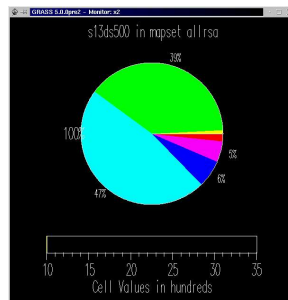


Abbildung G.15: Station 13, Topographie-Histogramm.

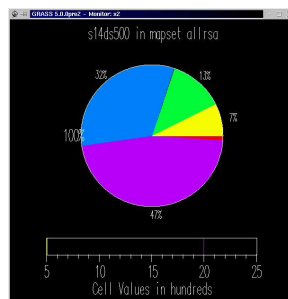


Abbildung G.16: Station 14, Topographie-Histogramm.





## Anhang H

# Digitales Satellitenradio

Beim sogenannten 'Digitalen Radio' handelt es sich um die drahtlose Übermittlung digitaler Datenströme über geostationäre Satelliten. Dabei werden die Datenströme von terrestrischen Sendestationen an den Satelliten übertragen, der wiederum die Signale als Radiowellen über großflächigen Regionen abstrahlt.

Diese Datensignale können von Anwendern über geeignete Dekoderschaltungen ausgelesen und gewandelt werden.

### Das WORLDSpace-System

Im konkreten Fall wird die mögliche Integration des Worldspace-Systems betrachtet. Die Firma Worldspace betreibt derzeit zwei geostationäre Satelliten, von denen der über Afrika positionierte „Afristar“ mit drei Sendelobenden den gesamten afrikanischen Kontinent und zusätzlich Europa und den Nahen Osten abdeckt.

Eine Motivation für die Entstehung des Worldspace-Satellitensystem war es, Radio-Bildungsprogramme in ganz Afrika zugänglich zu machen.

### Hardware

Alle verfügbaren Radioempfänger für das Worldspace-System enthalten unabhängig von ihrem äusseren Erscheinungsbild und Funktionalität den 'Starman'-Chipsatz. Dieser ermöglicht den Empfang der digitalen Datenströme vom Satelliten. Alternativ sind PC-Steckkarten mit dem Chipsatz zur direkten Nutzung in einem Computer verfügbar.

Die Downlink-Verbindung im L-Band (1452-1492 MHz) kann für einzelne Sender zwischen 16 Kbit für mono Audio-Übertragung bis zu 128 Kbit für Stereo-Audio in CD-Qualität variieren. Dabei wird eine MPEG-Kompression (MPEG 2.5 Layer 3) zur Reduktion des Datenstroms eingesetzt.

Für die Nutzung zur Verbreitung von Computerdaten kann mit dieser Technik eine Download-Geschwindigkeit von 128 Kbit/s erreicht werden.

**Übertragungsmodi** Alle Übertragungsmodi sind verschlüsselbar. Damit ist es möglich, den Besitzern der individuellen Empfänger einzelne Dienste nur nach Registrierung zugänglich zu machen. Dies gilt auch für den seit Juni 2002 umgesetzten Wetter-Kanal mit automatisierter Ansage für Europa und den Mittelmeerraum, der nach einer Einführungsphase nur noch kostenpflichtig nach Registrierung empfangbar ist.

**Data casting** Die Bereitstellung von Computerprogrammen und WWW-Inhalten über die Worldspace-Satelliteninfrastruktur wird als *data casting* bezeichnet (Abbildung H.1).

Dafür sind die Worldspace-Radioempfänger über ein proprietäres USB-Interfaces mit einem Computer mit Microsoft-Betriebssystem zu verbinden. Nach Installation einer auf CDROM verfügbaren Klienten-Software können über einen speziellen Daten-Kanal Daten auf den Rechner übertragen werden.

Dabei werden zu festgelegten Zeitscheiben (siehe Abbildung H.3) bestimmte Inhalte ausgestrahlt. Da die pro Zeiteinheit übertragbare Datenmenge konstant ist, können grosse Datenvolumen mehrere Übertragungstakte benötigen.

Durch die wiederholte Ausstrahlung der Inhalte können korrupte Datenpakete erneut empfangen werden um aus ihnen ähnlich wie beim Internet-Protocoll die ursprüngliche Information zusammensetzen.

Die durch die Klienten-Software entpackten Inhalte sind, abhängig von ihrem Format, durch Worldspace-Applikationen und auch durch normale Webbrowser nutzbar.

### DataCast Service - Operational Architecture

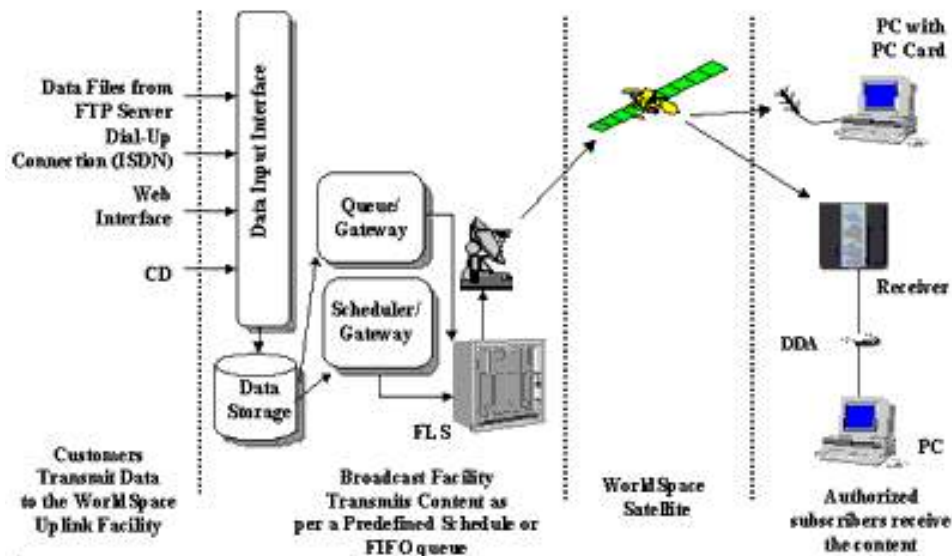


Abbildung H.1: Infrastruktur für das Data Casting im Worldspace-System (Worldspace 2003).

The screenshot shows the Africa Learning Channel (ALC) HTML page from the WorldSpace Foundation website. The page features a navigation menu with links for About, The Technology, Activities, Related Articles, and Home. The main content area includes:

- A section titled "Listen to excerpts of the Africa Learning Channel:" with links for "Listen in MP3 format" (Download an MP3 Player FREE) and "Listen in Real Audio" (Netsoape users must first download file, then open Real Player to listen; Download RealPlayer7 Basic FREE).
- Links for "Get the ALC multimedia program schedule" and "Get the ALC audio program schedule".
- A list of links: Africa Learning Channel, Africa Learning Channel Programming Partners, Locations of current ALC Partners in Africa, Canal EF, and Briefings on Communication Technology in Africa.
- A section titled "ALC Multimedia Service" with the text: "Available on your WorldSpace Receiver as 'ALC-Data'".
- A paragraph describing the service: "The Africa Learning Channel offers a unique multimedia service that allows partner groups to download text and dynamic images from the AfriStar™ satellite to Pentium-class PCs. A digital data adapter (DDA) or dataport is connected from a WorldSpace receiver to a PC and transmits text and images to the PC through a Smart Personal Computer Adapter (SPCA) at a rate of about 64 kilobits per second. This setup allows the user to download multimedia material without having to depend on phone lines in areas where..."

Abbildung H.2: Africa Learning Channel HTML-Seite: Der hier gezeigte WWW-ähnliche Testbetrieb (Stand: April 2002) wurde ab dem vierten Quartal 2002 von Worldspace vorerst wieder eingestellt (Worldspace 2003).

The screenshot shows a web browser window titled "WorldSpace Foundation: ALC Multimedia Program Schedule - Microsoft Internet Explorer". The address bar shows the URL "F:\worldspace\content\wsf\schedule.html". The main content area displays a table for "Friday" with the following data:

| Time  | Kbps | Container                     | Channel Name                |
|-------|------|-------------------------------|-----------------------------|
| 00:00 | 64   | Filler                        | Not Applicable              |
| 00:15 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 01:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 01:59 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 03:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 04:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 04:59 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 06:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 06:59 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 08:03 | 64   | Health Knowledge Network 35MB | Public Health Channel       |
| 10:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 11:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 12:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 13:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 13:59 | 64   | Health Knowledge Network 35MB | Public Health Channel       |
| 16:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 16:59 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 18:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 19:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 20:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 21:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 22:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |
| 23:00 | 64   | RANET 3MB                     | Climate Information Channel |

Abbildung H.3: Übersicht über den täglich Zeitplan des Africa Learning Channel (ALC) für die Übertragung der thematischen Datenblöcke. Erkennbar sind die angetragenen Größen in Megabyte sowie die Wiederholungsrate (Worldspace 2003).

5Anwendung, weit den eingebauten GRASS-Funktionen überlegen, sehr

# Anhang I

## Beilage: GISIX-CDROM

Der gedruckten Version dieser Arbeit liegt eine CDROM bei.

Diese stellt auf Computersystemen mit Intel- oder AMD-Prozessoren<sup>1</sup> ein bootfähiges GIS-Arbeitsplatzsystem (*GISIX*) basierend auf der KNOPPIX-Variante einer Live-CD der Debian-Linuxdistribution bereit. Andere Rechnerarchitekturen (Macintosh, usw.) können lediglich auf die unkomprimierten HTML- und PDF-Inhalte der CDROM zugreifen.

Zum Start der GISIX-Funktionalität ist der PC ('Wirtsrechner') von der CDROM zu booten. Es muss betont werden, dass dieses Vorgehen zu keinen Installationen von Daten auf dem Wirtsrechner führt.

**Vor etwaige Schäden wie Datenverluste bei Aufhebung des Schreibschutzes der Festplatten durch den Anwender übernimmt der Autor keinerlei Haftung!**

Falls das BIOS des Wirtsrechners keine Bootoption von CDROM anbietet, kann alternativ eine Bootdiskette erstellt werden. Hierfür sind die unkomprimierten HTML-Inhalte der CDROM zu konsultieren.

Wenn mit der GISIX-CDROM gestartet wird, erscheint zuerst die Eingabezeile des Bootmanagers. Hier kann in den allermeisten Fällen auf eine Eingabe verzichtet werden, nach Überschreiten des Zeitlimits oder Drücken der Eingabetaste ('Enter') bootet das Linuxsystem.

Nach dem Beginn des Bootvorgangs wird der Wirtsrechner einer Hardwareüberprüfung unterzogen. Falls es dabei zu Unregelmäßigkeiten, Fehlermeldungen oder Systemabstürzen kommt, kann gefahrlos ein Reset durchgeführt werden. Beim nächsten Versuch sollte das Hilfsmenü des Bootmanagers ('F2') zur manuellen Anpassung konsultiert werden<sup>2</sup>. Danach erscheint eine Kommandozeile. Hier ist `gisix< Eingabetaste >` einzugeben.

Daraufhin wird der KDE-Windowmanager gestartet<sup>3</sup>. Die die Dissertati-

---

<sup>1</sup>Intel386 oder besser

<sup>2</sup>Bei Laptops und manchen Graphikkarten ist die Verwendung eines Framebuffer-Devices eine gute Wahl.

<sup>3</sup>Auf Systemen mit beschränktem Hauptspeicher wird ggf. ein alternativer Windowmanager angeboten.

on betreffende Funktionalität kann nun über das 'K'-Menü am linken unteren Bildschirmrand gestartet werden: Der Menüpunkt 'Dissertation' enthält alle verfügbaren Dokumente. Das Geoinformationssystem kann über das Untermenü 'Applications' gestartet werden.

Die GRASSCAPE-Funktionalität kann vom GRASS-Prompt durch den Befehl `grasscape` gestartet, und mit `(exit)` beendet werden.

Um die GISIX-Umgebung zu verlassen, wird über das K-Menü die 'Herunterfahren'-Option gewählt. Rückfragen des Windowmanagers sind irrelevant und können ignoriert werden. Daraufhin erscheint erneut der Kommandozeilenmodus. Hier ist nun `halt` < *Eingabetaste* > einzugeben. Damit wird das System heruntergefahren. Nach Entnahme der CDROM verhält sich der Rechner wie vor der Verwendung der GISIX-CDROM.

# Anhang J

## Glossar

**Agent** (Softwareagent) Eine abstrahierte Entität, die auf Reize/Eingaben mit Änderungen ihrer internen Zustände reagiert und ggf. mittels Ausgaben bzw. Reaktionen agiert.

**AGL** Above Ground Level

**AI** Artificial Intelligence

**AL** Artificial Life

**ALC** Africa Learning Channel

**ASCII** American Standard Code of Information Interchange

**Aster** Passiver Fernerkundungssensor des NASA TERRA-Satellitensystems

**BASH** Bourne Again Shell, Nachfolger der Bourne Shell (bsh)

**BIOS** BASIC INPUT OUTPUT SYSTEM

**BLOB** Binary arge object

**BPRP** Bethlehem Precipitation Research Project

**BVK** Bayerische Versicherungskammer

**C-Band** Wellenlängenbereich (5cm Band)

**CA** Cellular Automata, Zelluläre Automaten

**CAPE** CLIPS AND PERL EXTENSIONS - Ein Sourceforge-Projekt, das CLIPS und PERL vereint.

**CAPPI** Constant Altitude Plan Position Indicator

**CFAD** Contoured Frequency Altitude Diagram

- COOL** CLIPS Object Oriented Package
- CONSTRAT** radarmeteorologischer Klassifikationsalgorithmus
- CLIPS** C-Language Integrated Production System: Ein frei verfügbares Expertensystem-Shell-Toolkit, ursprünglich von der NASA entwickelt.
- CLIPS/2** Die kommerzielle Version von CLIPS
- Cluster** Netzwerk mehrerer Rechner für parallele Verarbeitung
- CMS** Content Management System
- CSIR** Council for Scientific and Industrial Research
- D3lisp** Veraltete, aber stabile Implementierung von D3 in Lisp.
- Dämon** Automatisch im Hintergrund operierende Softwareentität.
- DEBIAN** Freie Software Linux-Distribution
- DEM** Digital Elevation Model
- Donga** Gully-Erosionsform (Südafrikanischer Lokalname)
- DOM** Baumorientierter XML-Parser
- DGM** Digitales Geländemodell
- Fact** In Clips die nuklearen Wissenseinheiten auf denen die Regeln aufsetzen.
- Fanagalo** südafrikanische Kunstsprache
- fraktal** Fläche mit gebrochener Dimension (Bsp:  $\dim=2.8$ )
- FS** Free Software, Free State (ehemals: Oranje Free State, OFS)
- GCP** Ground Control Point
- GIF** Graphic Interchange Format
- GIFSICLE** FS Programm zur Erstellung von GIF-Animationen
- GIS** Geographic Information System
- GISIX** Live-CD System zum Einsatz von GRASS und GRASSCAPE (uvm.), basierend auf KNOPPIX.
- Goldstandard** Referenzstandard
- globale Variable** Variable, deren Wert in jeder Umgebung an den gleichen Wert gebunden ist.



- GML** Geographic Markup Language
- GNU** GNU's NOT UNIX
- GPL** GNU Public Licence
- GPS** Global Positioning System
- GRASS** Geographic Ressources Analysis Support System
- GRASSCAPE** Opensource Combo-Projekt als Brücke zwischen GRASS und CAPE
- GUI** Graphical User Interface
- HDF** NASA Datenformat
- HTML** Hypertext Markup Language
- Hutton** Südafrikanische Bodenform
- IDE** Integrated Development Environment
- JAVA** Objektorientierte Programmiersprache
- JESS** lizenzpflichtige Clips Neuimplementierung in C++ von der Sandia Corp.
- JPG** Grafikformat
- KE** Kinetische Energie
- Kenge** GIS-Variante von SWARM
- KNOPPIX** GNU Linux auf Live-CD
- KI** Künstliche Intelligenz
- KIS** Katastrophen Informationssystem
- Kriging** Interpolationsverfahren
- lambda** In LISP verfügbarer Ansatz zur Erstellung unbenannter Funktionen.
- LAN** Local Area Network
- LATEX** Auf TEX aufgesetztes Satzsystem
- Landsat** NASA-Satellitensystem
- LINUX** Von Linus Torvald initiiertes GNU OS

- LISP** Listenbasierte, elegante Programmiersprache
- Magical** Agentensimulationspaket für GRASS
- MDV** Meteorologic Data Volume
- METSYS** Meteorological Systems
- Milie Meal** Weißer Mais
- MPEG** Datenkompressionsverfahren
- MRL-5** Russisches Dual Band Radarsystem
- MySQL** freies relationales Datenbanksystem
- NASA** National Aeronautics and Space Administration
- NCAR** National Center for Atmospheric Research
- NDMC** National Disaster Management Centre
- NVIZ** 3d-Paket für GRASS
- OO** objektorientiert
- OOP** Objektorientierte Programmierung
- Open Source** Freie Software
- OS** Open Source, Operation System
- Pattern** Software-Muster
- Perl** Programmiersprache
- PDA** Persönlicher Digitaler Assistent
- PDF** Portables Dokumenten Format
- PostgresQL** freies objektrelationales Datenbanksystem
- PostGIS** WWW Frontend für spatiale RDMS
- PPI** Plan Position Indicator
- PS** Postscript
- Quadtrees** Quadrantenbaum
- Qwaqwa** Ehemaliges Homeland
- Radar** Radio Detection and Ranging

- Radome** Radarkuppel
- RAR** Real Aperture Radar
- RASTER** Grass-Datenformat für diskrete Flächendaten
- RDBMS** Relational Database Management System
- Rete** Pattern-matching Algorithmus, auf dem CLIPS basiert.
- REI** Rainfall Erosivity Index, [www.rei.com](http://www.rei.com)
- RSA** Republic of South Africa
- RUSLE** Revised Universal Soil Loss Equation
- S-Band** Wellenlängenbereich (8-cm Band)
- SAFARI2000** Internationales Forschungsvorhaben für das südliche Afrika
- SAR** Synthetic Aperture Radar
- SAWB** South African Weather Bureau, mittlerweile: SAWS
- SAWS** South African Weather Service
- SAX** Event-basierter XML-Parser
- SDK** Software Development Kit
- SDSS** Spatial Decision Support System, Entscheidungsunterstützungssystem
- SLEMSA** Soil Loss Estimation Model for Southern Africa
- SMS** Short Message Service
- Singleton** Muster, bei dem nur eine Instanz der Klasse existiert.
- SITE** Punktförmige Daten in GRASS
- Solvatio** Kommerzielle Version des D3 Expertensystem-Shell-Baukastens
- Soweto** South Western Township, Stadtteil von Johannesburg
- Spot** Französisches Satellitensystem
- Squall Line** Sturmfront
- SQL** Simple Query Language, Datenbanksprache
- SSS** Storm Severity Structure

- SRTM** Shuttle radar topography mission
- Supercell Storm** Superzellensturm
- SUSE** Kommerzielle Linux-Distribution
- Swarm** C++ FS OO Agentensimulation
- Swasiland** Binnenstaat im Osten der Republik Südafrika
- TBG** Tipping Bucket Gauges, Niederschlagssammler vom Wippen-Typ
- TEX** Satzsystem
- TITAN** Thunderstorm Identification and Nowcasting System
- TM** Thematic Mapper, Passiver Fernerkundungssensor des Landsat-Satellitensystems der NASA.
- UML** Unified Modelling Language
- Voxel** Kleinste definierte Raumeinheit in einem dreidimensionalen Datensatz.
- USLE** Universal Soil Loss Equation
- VKI** Verteilte Künstliche Intelligenz
- WAP** Wireless Application Protocol
- webD3** Java-Implementierung von D3 mit WWW-Komponente
- javaD3** Java-Implementierung von D3
- Windows** Microsoft Betriebssystem
- WML** Wireless Markup Language
- X-Band** Wellenlängenbereich (3-cm Band)
- XML** Extended Markup Language
- XPS** Expertensystem
- XSL** Extensible Scripting Language
- ZA** Zellulärer Automat
- ZR** Z-R Beziehung, Marshall Palmer Formel

# Literaturverzeichnis

- Abelson u. a. 1991** ABELSON, H. ; SUSSMAN, G. J. ; SUSSMAN, J.: *Struktur und Interpretation von Computerprogrammen*. Berlin : Springer Verlag, 1991. – ISBN 3-540-52043-0
- Arehart u. a. 2000** AREHART, Charles ; CHIDAMBARAM, Nirmal ; GURUPRASAD, Shashirikan ; HOMER, Alex ; HOWELL, Ric ; KASIPPILLAI, Stephan ; MACHIN, Rob ; MYERS, Tom ; NAKHIMOVSKY, Alexander ; PASSANI, Luca ; PEDLEY, Chris ; TAYLOR, Richard ; TOSCHI, Marco: *Professional WAP*. Acocks Green, Birmingham, UK : WROX Press Ltd., 2000. – ISBN 1-861004-0-44
- Beckedahl 1998** BECKEDAHL: Subsurface Soil Erosion Phenomena in South Africa. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 290 (1998)
- Bivand und Neteler 2000** BIVAND ; NETELER: Open Source geocomputation: using the R data analysis language integrated with GRASS GIS and PostgreSQL data base systems, 2000, S. 1043–1052
- Bold 1996** BOLD: *Phrase-Book, Grammar and Distionary of Fanagalo*. P.O. Box 617, Umhlanga Rocks 4320, South Africa : Ernest Stanton Publishers, 1996
- Bronstein u. a. 1997** BRONSTEIN ; MÜHLING ; MUSIOL ; SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 1997
- Cock 1991** COCK, Koch (Hrsg.): *Going Green, People, politics and the environment in South Africa*. Cape Town : Oxford University Press, 1991
- Deiters und Lienemann 2001** DEITERS (Hrsg.) ; LIENEMANN (Hrsg.): *Report Informationslogistik: Information just-in-time*. Düsseldorf : Symposium, 2001. – ISBN 3-933814-56-1
- Deutscher Wetterdienst 2003** DEUTSCHER WETTERDIENST. *Deutscher Wetterdienst KONRAD Internetportal*. [www.dwd.de/de/SundL/](http://www.dwd.de/de/SundL/)

Oeffentlich/Katastrophenschutz/Leistungen/KONRAD/KO%NRAD.  
htm. Februar 2003

- Dixon 1997** DIXON, Mike: TITAN Version5 OVERVIEW / RAP National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA. 1997. – Forschungsbericht
- Dotzek und Beheng 2001** DOTZEK ; BEHENG: The influence of deep convective motions on the variability of Z-R relations. In: *Atmospheric Research* 59-60 (2001), S. 15–29
- Dotzek und Fehr 2002** DOTZEK ; FEHR: Relationship between precipitation rates at the ground and aloft - a modeling study. In: *Journal of Applied Meterology* in print (2002), S. Manuscript No. GRR-526
- Dotzek u. a. 2002** DOTZEK ; GOURLEY ; FEHR: Vertical profiles of radar reflectivity and rain rate: observational and modeling results. In: *Proceedings of ERAD*. DLR-Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Germany, 2002, S. 243– 249
- Elwell 1988** ELWELL, Stocking; Q.: An improved methodology for erosion hazard mapping Part I: The technique. In: *Geografiska Annaler* 70A (1988), Nr. 3, S. 169–180
- Elwell 1988** ELWELL, Stocking; Q.: An improved methodology for erosion hazard mapping Part II: Application to Lesotho. In: *Geografiska Annaler* 70A (1988), Nr. 3, S. 181–189
- Epke 1999** EPKE, Karoline: PRO PLANT - Experiences with a Knowledge-Based System for Plant Protection. In: *XPS-99: Knowledge-Based Systems: Survey and Future Directions*. Springer, 1999, S. 167 – 175
- Flörchinger 1998** FLÖRCHINGER: *Effects of Soil Erosion on Crop Productivity in the South-West Colombian Andes*. Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie, Universität Hohenheim, Diss., 7 1998
- Fox 2000** Kap. 9 In: FOX, Roddy: *Agriculture and rural development*. siehe (Rowntree 2000)
- FSF Europe 2003** FSF EUROPE. *Free Software Foundation Europe*. fsfeurope.org. Februar 2003
- Fukengrueven 2003** FUKENGRUEVEN. *Fukengrueven GRASS Internet-portal*. www.grass.fukengrueven.com. Februar 2003
- Giarratano 2002** GIARRATANO: *CLIPS User's Guide, Version 6.20*. WWW document, 2002

- Giarratano und Riley 1998** GIARRATANO ; RILEY: *Expert Systems Principles and Programming, 3rd Ed.* PWS Publishing Company, 1998
- GisLab 1996** GISLAB: ENPAT Environmental potential atlas, Users reference / Jet Propulsion Laboratory, USA. Private Bag x447, Pretoria 0001, RSA : Department of environmental affairs and tourism, Juni 1996. – Forschungsbericht
- GRASS Developer Team, Baylor University 2003** GRASS DEVELOPER TEAM, BAYLOR UNIVERSITY. *GRASS Baylor University, Waco, Texas, USA Internetportal.* grass.baylor.edu. Februar 2003
- GRASS-Developer Team, ITC-irst 2002** GRASS-DEVELOPER TEAM, ITC-IRST. *GRASS 5.0 Users Manual.* grass.itc.it/gdp/html-grass5. 2002
- GRASS Entwicklergruppe Hannover 2003** GRASS ENTWICKLERGRUPPE HANNOVER. *GRASS Universität Hannover Internetportal.* www.geog.uni-hannover.de/grass. Februar 2003
- GRASS ITC-Developer Team 2003** GRASS ITC-DEVELOPER TEAM. *GRASS Internetportal.* grass.itc.it. Februar 2003
- GRASSCAPE Project 2003** GRASSCAPE PROJECT. *GRASSCAPE Sourceforge Project.* grasscape.sourceforge.net. Februar 2003
- GRASSLIB 2003** GRASSLIB. *GRASS-Library Internetportal.* refractions.com. Februar 2003
- Green und Bossomaier 2002** GREEN, David ; BOSSOMAIER, Terry: *Online GIS and Spatial Metadata.* London : Taylor & Francis, 2002
- Hall 1993** HALL: *Mapping The Next Millenium.* New York, USA : Vintage Books, 1993
- Hannes und van der Merwe 2000** Kap. 7 In: HANNES ; MERWE, Izak van d.: *Population: structure and dynamics in a crowded world.* siehe (Rowntree 2000)
- Hess 2002** HESS, Sigrid: *Methodologische Untersuchungen zur Veränderung sahelischer Überschwemmungsgebiete mittels Fernerkundung - Fallbeispiel Nigerbinnendelta (Mali) -.* Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Geographische Fakultät, Diss., 2002
- Houze 1993** HOUZE, Robert: *Cloud Dynamics.* San Diego : Academic Press, Inc., 1993

- Howard und Fouche 1999** HOWARD, M ; FOUCHE, H. *A decision support system for managing the impact of climate on livestock enterprise - An interim report*. November 1999
- Hudson 1995** HUDSON: *Soil Conservation*. third edition. London : B T Batsford, 1995
- Huntley u. a. 1989** HUNTLEY ; SIEGFRIED ; SUNTER: *South African Environments into the 21st Century* . Rose Street, Capetown, South Africa : Human & Rousseau, 1989
- iFarm 2002** IFARM. *iFarm Internetportal*. [www.ifarm.co.za](http://www.ifarm.co.za). Februar 2002
- Inder 1999** INDER, Robert: *Clips and Perl with Extensions (CAPE) v0.6, System Description and User's Manual*. WWW document, 1999
- Kaschula und Anthonissen 1995** KASCHULA ; ANTHONISSEN: *Communicating across Cultures in South Africa: Toward a critical language awareness*. Hodder Headline PLC, Randburg, 2125, South Africa : Hodder and Stoughton, Witwatersrand University Press, 1995
- Key 2003** KEY, Michael. *SAXON XSLT Processor Sourceforge Project*. [saxon.sourceforge.net](http://saxon.sourceforge.net). 2003
- Klugmann 1991** Kap. 5 In: KLUGMANN: *Victims or Villains?* **siehe (Cock 1991)**
- Knopper 2003** KNOPPER, Klaus. *KNOPPIX Internetportal*. [www.knoppix.org](http://www.knoppix.org). Februar 2003
- Kohler 2000** KOHLER: *Be there then: A Modelling Approach to Settlement Determinants and Spatial Efficiency Among Late Ancestral Pueblo Populations of the Mesa Verde Region, U.S. Southwest*. **siehe (Kohler und Gumerman 2000)**
- Kohler und Gumerman 2000** KOHLER (Hrsg.) ; GUMERMAN (Hrsg.): *Dynamics in Human and Primate Societies*. Oxford University Press, 2000
- Lake u. a. 2000** LAKE ; WINTER ; MARTIN: *MAGICAL Computer Simulation of Mesolithic Foraging*. **siehe (Kohler und Gumerman 2000)**
- Laker 2000** Kap. 14 In: LAKER, Michiel C.: *Soil resources: distribution, utilization, and degradation*. **siehe (Rowntree 2000)**
- Leser 1980** LESER, H.: *Natürliches Potential und Raumnutzungsprobleme im südlichen Afrika*. In: *Geoökodynamik* 1 (1980), S. 37–64



- Leung 1997** LEUNG, Yee: *Intelligent Spatial Decision Support Systems*. Berlin : Springer, 1997
- Lienemann 2001** Kap. 42 In: LIENEMANN, Carsten: *Informationslogistik - Qualität im Fokus*. siehe (Deiters und Lienemann 2001). – ISBN 3-933814-56-1
- Loudon 2000** LOUDON, Kylie: *Algorithmen in C*. Köln : O'Reilly, 2000. – ISBN 3-89721-165-3
- Löwe 1997** LÖWE, Peter: *Wissensbasierte Klassifikation von geographischen Raumelementen in Satellitendaten am Beispiel eines Zielgebietes in Südnamibia*. Geographische Fakultät, Am Hubland, 97082 Würzburg, Universität Würzburg, Diplomarbeit, Mai 1997
- Löwe 1999** LÖWE, Peter: Knowledge based classification of geographic spatial elements applied to a test site in southern Namibia. In: *5th German Conference on Knowledge-Based Systems, Internal Report of Würzburg University, Institute for Informatics*. Lehrstuhl für Angewandte Informatik und Künstliche Intelligenz, Informatik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, 1999, S. 175 – 184
- Löwe 2000** LÖWE, Peter: Hochauflösende Niederschlagsdaten aus Südafrika: neue Formen der Visualisierung mit GIS. In: *Afrika 2000: Perspektiven für die Geowissenschaften in Forschung und Praxis* Afrikagruppe deutscher Geowissenschaftler, 2000, S. 55
- Löwe 2002** LÖWE, Peter: A Spatial Decision Support System for Radar Meteorologic Data in South Africa. In: *Proceedings of the 'Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002'*. Via Mesiano 77, Trento, Italy, 2002
- Maner und Joyce 1997** MANER, Walter ; JOYCE, Sean: WXSYS Weather Lore + Fuzzy Logic = Weather Forecasts. In: *CLIPS Virtual Conference*(Giarratano und Riley 1998),
- Mather u. a. 1997** MATHER ; TERBLANCHE ; STEFFENS: National Precipitation Research Programme / Water Research Commission. 1997. – Forschungsbericht
- Meiklejohn 2000** Kap. 13 In: MEIKLEJOHN, Paul Sumner; I.: *Landscape Evolution in a changing environment*. siehe (Rowntree 2000)
- Meissen und Pfennig Schmidt 2001** Kap. 42 In: MEISSEN, Ulrich ; PFENNIGSCHMIDT, Stefan: *Von Geodaten zu Geodiensten*. siehe (Deiters und Lienemann 2001). – ISBN 3-933814-56-1

- Merrill und Skolnik 1991** MERRILL ; SKOLNIK: *Radar Handbook, 2nd Ed.* New York, USA : McGraw-Hill Publishing Company, 1991
- METSYS 2003** METSYS. *METSYS Internetportal.* [metsys.weathersa.co.za](http://metsys.weathersa.co.za). Februar 2003
- Mitasova 1999** MITASOVA, Helena. *NVIZ.* [grass.itc.it/gdp/html-grass5](http://grass.itc.it/gdp/html-grass5). 1999
- Mittermaier 1999** MITTERMAIER, Marion: *Investigating the characteristics of the RADAR vertical reflectivity profile.* University of Natal, South Africa, Department of Science in Engineering, Diss., 1999
- Momjian 2000** MOMJIAN: *PostgreSQL: Introduction and concepts.* Addison-Wesley, 2000
- Morgan 1995** MORGAN: *Soil Erosion and Conservation, 2nd Ed.* Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, Great Britain : Addison Wesley Longman, 1995
- Motzer 1988** MOTZER: Niederschlagsdifferenzierung und Bodenerosion: Untersuchung auf Messparzellen in Südsardinien und ihre regionale und grundsätzliche Aussagekraft. In: *Darmstädter Geographische Studien* 8 (1988)
- Neteler und Mitasova 2002** NETELER ; MITASOVA: *OPEN SOURCE GIS: A GRASS GIS Approach.* Kluwer Academic Publishers, 2002
- O'Donnell 2002** O'DONNELL, Scott: Weather Radar Enhanced Flash Flood Forecasting. In: *Proceedings of the 'Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002', Ciolli ,Zatelli.* Via Mesiano 77, Trento, Italy, 2002
- Openshaw und Abrahart 2000** OPENSHAW (Hrsg.) ; ABRAHART (Hrsg.): *GeoComputation.* 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE, Great Britain : Taylor & Francis, 2000
- Openshaw und Openshaw 1996** OPENSHAW ; OPENSHAW: *Artificial Intelligence in Geography.* John Wiley & Sons, 1996
- Ott und Swiaczny 2001** OTT, Thomas ; SWIACZNY, Frank: *Time-Integrative Geographic Information Systems.* Berlin : Springer, 2001
- Pegram und Seed 1998** PEGRAM ; SEED: The Feasibility of Stochastically Modelling the Spatial and Temporal Distribution of Rainfields / Water Research Commission. 1998. – Forschungsbericht
- PostGIS Project 2003** POSTGIS PROJECT. *PostGIS Internetportal.* [postgis.refractive.net](http://postgis.refractive.net). Februar 2003

- PostgresQL 2003** POSTGRESQL. *PostgresQL Internetportal*. [www.postgresql.org](http://www.postgresql.org). Februar 2003
- Puppe 1993** PUPPE, Frank: *Systematic Introduction to Expert Systems*. Berlin : Springer, 1993
- Puppe u. a. 1997** PUPPE, Frank ; BAMBERGER, Stefan ; IGLEZAKIS, Ioannis ; KLÜGL, Franziska ; KOHLERT, Siegfried ; REINHARDT, Bettina ; UNGLERT, Thomas ; WOLBER, Michael. *Wissensbasierte Diagnose- und Informationssysteme mit dem Shell-Baukasten D3, Handbuch*. Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz und angewandte Informatik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany. 1997
- Puppe u. a. 1996** PUPPE, Frank ; GAPP, Ute ; POECK, Karsten ; BAMBERGER, Stephan: *Wissensbasierte Diagnose- und Informationssysteme*. Springer, 1996
- Puppe u. a. 2001** PUPPE, Frank ; ZIEGLER ; MARTIN ; HUPP: *Wissensbasierte Diagnosesysteme im Service-Support*. Springer, 2001
- Raper 2000** RAPER, Jonathan: *Multidimensional Geographic Information Science*. London : Taylor & Francis, 2000
- Reining 1992** REINING: *Erosion in Andean Hillside Farming*. Weikersheim : Hohenheim Tropical Agricultural Series, Markgraf Verlag, 1992. – ISBN 3-8236-1211-5
- Reiter 2002** REITER, Bernhard: How GRASS' development reflects free software history and what to expect next. In: *Proceedings of the 'Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002'*. Via Mesiano 77, Trento, Italy, 2002
- Rhinehart 1997** RHINEHART: *Radar for Metereologists or You, too, can be a Radar Metereologist, Part III*. P.O. Box 6124 Grand Forks, ND 58206-6124, USA : Rhinehart Publications, 1997
- Rodriguez-Bachiller 2000** RODRIGUEZ-BACHILLER: Geographical Information Systems and Expert Systems for Impact Assessment. Part II: Expert Systems and Decision Support Systems. In: *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 2 (2000), Nr. 3, S. 415–448
- Rodriguez-Bachiller 2000** RODRIGUEZ-BACHILLER: Geographical Information Systems and Expert Systems for Impact Assessment. Part I: GIS. In: *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 2 (2000), Nr. 3, S. 369–414

- Rowntree 2000** ROWNTREE, Fox; (Hrsg.): *The Geography of South Africa in a Changing World*. Oxford University Press, 2000
- Ruppenthal 1995** RUPPENTHAL: *Soil Conservation in Andean Cropping Systems*. Weikersheim : Hohenheim Tropical Agricultural Series, Markgraf Verlag, 1995. – ISBN 3–8236–1248–4
- Scheffer und Schachtschabel 1992** SCHEFFER ; SCHACHTSCHABEL: *Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Ed.* Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1992
- Serafin 1991** Kap. 23 In: SERAFIN, Robert: *Meteorological Radar*. **siehe (Merrill und Skolnik 1991)**
- Seuffert 2002** SEUFFERT: Der Reifall mit dem Rainfall: Das Ende einer wissenschaftlichen Weltanschauung? In: *Geoökodynamik* 23 (2002), S. 3–59
- Seuffert u. a. 1999** SEUFFERT, Ottmar ; BUSCHE, Detlef ; LÖWE, Peter: Rainfall Structure - Rainfall Erosivity: New concepts to solve old problems. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 144 (1999), Nr. 5
- Seuffert u. a. 1999** SEUFFERT, Ottmar ; HERRIG, Klaus ; OLLESCH, Gregor ; BUSCHE, Detlef: REI: An integrated Rainfall Erosivity Index for assessing and correlating rainfall structure, runoff an erosion. In: *Geoökodynamik* 20 (1999), S. 1–54
- Seuffert u. a. 2000** SEUFFERT, Ottmar ; OLLESCH, Gregor ; RUSSOW, Frank ; GARLAND, Gerald: Die räumliche und zeitliche Differenzierung von Sedimentquellen und Sedimentationsraten: Untersuchungen am Beispiel des Mdloti-Einzugsgebietes. In: *Geoökodynamik* 21 (2000), S. 85–102
- Simon Cox und Martell 2002** SIMON COX, Ron L. ; MARTELL, Richard: OpenGIS Geography Markup Language (GML) Implementation Specification, Version 2.1.1 / Open GIS Consortium, Inc. 2002. – Forschungsbericht
- Stankovic u. a. 2002** STANKOVIC, Jan ; NETELER, Markus ; FLOR, Roberto: Experimental Mobile Wireless GRASS Based GIS For Handheld Computers Running GNU/Linux. In: *Proceedings of the 'Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002'*. Via Mesiano 77, Trento, Italy, 2002
- Struss 1999** STRUSS, Peter: Artificial Intelligence for Nature - Why Knowledge Representation and Problem Solving Should Play a Key Role in

- Environmental Decision Support. In: *KI-98: Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, 1999, S. 17–30
- Swap und Annegarn 1999** SWAP ; ANNEGARN: Southern African Regional Science Initiative: SAFARI2000: Science Plan. In: *Department of Environmental Science, University of Virginia* (1999)
- Tainton 1999** TAINTON (Hrsg.): *Veld Management in South Africa*. Pietermaritzburg, South Africa : University of Natal Press, 1999
- Terblanche 1996** TERBLANCHE, Deon: A Simple Digital Processing Method to Simulate Linear and Quadratic Responses from a Radar's Logarithmic Receiver. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13 (1996), Nr. 2, S. 533–538
- Terblanche 1997** TERBLANCHE, Marion Mittermaier; D.: Converting weather radar data to Cartesian space: A new approach using DISPLACE averaging. In: *Weather SA* 23 (1997), Nr. 1, S. 45–50
- Terminology Bureau 1983** TERMINOLOGY BUREAU (Hrsg.): *Weerkund-en Hidrologie-Woordeboek*. Private Bag X85, Pretoria, South Africa : Government Printer, 1983
- Truelson 2001** TRUELSON: Today's forecast mostly sunny for GIS Users. In: *ArcNews* 23 (2001), Nr. 3, S. 10–11
- US Army CERL 2003** US ARMY CERL. *United States Army, Corps of Engineers Research Laboratory, Internetportal. www.cecer.army.mil*. Februar 2003
- Visser 2001** VISSER, Pieter: The Storm-Structure-Severity method for the identification of convective storm characteristics with conventional weather radar. In: *Meteorol. Appl.* (2001), Nr. 8, S. 1–10
- Vogel 2000** Kap. 12 In: VOGEL, Coleen: *Climate and climatic change: causes and consequences*. siehe (Rowntree 2000)
- Vävargard 2000** VÄVARGARD, Tomas: Autotext. In: *Second Conference on Artificial Intelligence*. 45 Beacon Street, Boston, MA, USA, 2000, S. 69–71
- Walton 1994** WALTON (Hrsg.): *The Illustrated Atlas of Southern Africa*. 130 Strand Street, Cape Town, 8001, South Africa : Reader's Digest Association South Africa Ltd., 1994
- Wecklein u. a. 2001** WECKLEIN, David ; SCHMUCKER, Frank ; MINNEMEIER, Markus ; PAPE, Christian ; LÖWE, Peter ; BETZ, Christian. *iZone Datenbank-gestütztes Content-Management-System*. 2001

- Wiener 1993** WIENER, Dixon; TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting - a radar based methodology. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 10 (1993), Nr. 6, S. 785–797
- Wolfram 2001** WOLFRAM: *A new kind of Science*. Champaign, Illinois, USA : Wolfram Media, Inc., 2001. – ISBN 1–57955–008–8
- Worldspace 2003** WORLDSPACE. *Worldspace Internetportal*. [www.worldspace.com](http://www.worldspace.com). Februar 2003
- Zatelli und Antonello 2002** ZATELLI, Paolo ; ANTONELLO, Andrea: New GRASS Modules for multiresolution analysis with wavelets. In: *Proceedings of the 'Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002'*. Via Mesiano 77, Trento, Italy, 2002
- Zuse 1969** ZUSE, Konrad: *Rechnender Raum*. Braunschweig : Friedrich Vieweg + Sohn GmbH, 1969

# Lebenslauf

**Name** Peter Heinz Löwe

**Geboren** am 24. Juni 1969 in Erbach im Odenwald.

**Eltern** Robert Willy Günter Löwe, Eva Maria Löwe, geb. Gruhlich

## Schulausbildung

**Grundschule** 1976 - 1980 Grundschule Michelstadt

**Förderstufe** 1980 - 1982 Theodor Litt-Schule, Michelstadt

**Gymnasium** 1982 - 1988 Gymnasium Michelstadt, Abschluß mit dem Abitur

**Wehrdienst** 1988 - 1989 Grundwehrdienst in Schwalmstadt

## Studium und Forschung

**1990 - 1992** Informatikstudium mit Nebenfach Geographie

**1992 - 1998** Geographiestudium, Nebenfächer: Informatik und Physik

**1994 - 1995** Austauschstudium an der University of Texas at Austin, USA

**1997** Diplomarbeit: 'Wissensbasierte Klassifikation von geographischen Raumelementen in Satellitendaten am Beispiel eines Zielgebietes in Südnamibia'

**1998** Diplomprüfung: Diplomgeograph Univ., Note: 'gut' (1.83)

**1999** Beginn der Promotion bei Professor Dr. Busche, Universität Würzburg und Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im DFG-Projekt 'Die meridionale und planetarische Differenzierung der Bodenerosion im südlichen Afrika' (bis 2000).

**2000 - 2002** Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Angewandte Informatik und Künstliche Intelligenz (Professor Dr. Frank Puppe) der Universität Würzburg.

**2002** Erster Preis der Stiftung Umwelt- und Schadenvorsorge für den Beitrag 'Geographische Informationssysteme in der Radarmeteorologie: Wissensbasierte Generierung von angepassten Informationsinhalten für heterogene Zielgruppen'.

**2003** Einzelunternehmer