

Erfassung von Sturmschäden mit Hilfe von modernen Radar-Fernerkundungssystemen



**Inaugural-Dissertation zur
Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Forst- und
Umweltwissenschaften der
Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Brsg.**

vorgelegt von

Gernot Ramming

**Freiburg im Breisgau
2004**

Dekan: Prof. Dr. E. Hildebrand

Betreuerin: Prof. Dr. Barbara Koch

Referent: Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter R. Pelz

Termin der Disputation: 22.11.2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme (FeLIS) der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Rahmen des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und vom Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg initiierten Projekt Sturmmoon.

Für die Möglichkeit, diese Arbeit an der Abteilung FeLIS anzufertigen und für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei der Leiterin der Abteilung FeLIS Frau Prof. Dr. Barbara Koch bedanken.

Ein Dankeschön auch Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter R. Pelz, Leiter der Abteilung Biometrie der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg, für die Übernahme des Koreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Matthias Dees, ehemals Mitarbeiter und Professurvertreter der Abteilung FeLIS, der mir mit Rat und Tat über mehrere Jahre hinweg zur Seite stand, selbst als sich die Wege aus beruflichen Gründen trennten.

Ohne die Unterstützung meiner (Ex-) Kollegen und Kolleginnen bzw. Freunden wäre diese Arbeit niemals zustande gekommen. Deswegen danke ich ganz herzlich meinem Freund und Partner in unserer gemeinsamen Firma, Oliver sowie den beiden Ex-Felisianern Hanjo und Kai.

Für die Unterstützung bedanke ich mich auch bei allen Mitarbeitern der Abteilung FeLIS, Claus-Peter, Holger, Eva, Abdel-Aziz, Iris, Markus J., Matthias, Silke, Filip, Markus Q., René, Jochen, Ursula, Ilham, Christian und Raymundo.

Ebenso den Ex-Kollegen und Freunden Roland, Petra, Naceur, Christoph, Bernal, Felipe und Hans. Nicht zu vergessen Henning, Benjamin, Scott und Felix.

Meiner Frau Claudia danke ich für die Geduld während der Anfertigung dieser Arbeit und meinen Eltern und meiner Schwester für die immerwährende Unterstützung in den vergangenen Jahren.

Ein herzliches Dankeschön an alle meine Freunde.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| <i>Vorwort</i> | <i>i</i> |
| <i>Inhaltsverzeichnis</i> | <i>ii</i> |
| <i>Abbildungen</i> | <i>vi</i> |
| <i>Tabellen</i> | <i>viii</i> |
| <i>Abkürzungen, Symbole, Akronyme</i> | <i>x</i> |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Einleitung | 1 |
| 1.2 Zielsetzung | 2 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit und Methodik | 3 |
| 2 Grundlagen | 4 |
| 2.1 Der Orkan „Lothar“ | 4 |
| 2.2 Entwicklung der Radarfernerkundung | 6 |
| 2.3 Radaraufnahmesysteme | 9 |
| 2.3.1 Einführung | 9 |
| 2.3.2 Einflussfaktoren auf den Prozess der Radarrückstreuung | 10 |
| 2.3.2.1 Radargleichungen | 11 |
| 2.3.2.2 Sensorspezifische Einflussfaktoren | 12 |
| 2.3.2.3 Objektspezifische Einflussfaktoren | 13 |
| 2.3.2.4 Oberflächenstreuung | 14 |
| 2.3.2.5 Volumenstreuung | 15 |
| 2.3.3 Prozess der SAR – Bilderstellung | 15 |
| 2.3.4 Grundlagen der SAR-Interferometrie | 16 |
| 2.3.5 Radar-Rückstreuprozesse im Wald | 17 |
| 2.4 Praxis der Sturmschadenserfassung | 17 |
| 2.4.1 Baden-Württemberg | 17 |
| 2.4.1.1 Bundeswehrbefliegung und Luftbildbefliegung der Forstverwaltung | 17 |
| 2.4.1.2 Erfassungskonzept der Forstverwaltung | 17 |
| 2.4.2 Frankreich | 17 |
| 2.4.3 Schweiz | 17 |
| 2.5 Erfassung von Sturmflächen mit Fernerkundungssystemen | 17 |
| 2.5.1 Sturmschadenserfassung mit dem Luftbild | 17 |
| 2.5.2 Sturmschadenserfassung mit optischen Satellitendaten | 17 |
| 2.5.3 Sturmschadenserfassung mit Radardaten | 17 |
| 3 Analyse der Nutzeranforderungen der Forstverwaltung Baden-Württemberg an eine Sturmschadenserfassung | 17 |
| 3.1 Übersicht | 17 |
| 3.2 Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg | 17 |
| 4 Untersuchungsgebiete | 17 |
| 4.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete | 17 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.2 | Gebiet 1 – Forstbezirke Ettenheim, Kenzingen Lahr | 17 |
| 4.3 | Gebiet 2 – Rheinebene bei Offenburg | 17 |
| 5 | Verwendete Daten, Hard- und Software | 17 |
| 5.1 | Radardaten | 17 |
| 5.1.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 5.1.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 5.1.3 | Radarsat 1 | 17 |
| 5.1.4 | TerraSAR | 17 |
| 5.2 | Digitale Höhenmodelle | 17 |
| 5.2.1 | Digitales Höhenmodell des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg | 17 |
| 5.2.2 | Digitales Oberflächenmodell aus Luftbildern des LVA Baden-Württemberg von 1995 | 17 |
| 5.2.3 | Digitales Oberflächenmodell aus der E-SAR Befliegung | 17 |
| 5.3 | Referenzdaten und Erstellung des Referenzdatensatzes | 17 |
| 5.3.1 | Luftbilder aus der Befliegung des Vermessungsamtes (1995, 2000) | 17 |
| 5.3.2 | Luftbilddaten aus eigener Befliegung | 17 |
| 5.3.3 | Feldaufnahmen | 17 |
| 5.3.4 | Visuelle Delinierung der Sturmflächen | 17 |
| 5.4 | Verfügbare Zusatzdaten | 17 |
| 5.4.1 | Abgrenzung von Waldflächen zu Nicht-Waldflächen (Waldecke) | 17 |
| 5.4.2 | Digitale Daten aus dem Forstlichen Geografischen Informationssystem des Landes Baden-Württemberg (FoGIS) | 17 |
| 5.4.3 | Daten aus Bundeswaldinventur (BWI) | 17 |
| 5.5 | Verwendete Hard- und Software | 17 |
| 5.6 | Beschreibung des Projekt-GIS | 17 |
| 5.6.1 | Verfügbare Datenebenen | 17 |
| 6 | Methoden | 17 |
| 6.1 | Allgemeine Übersicht | 17 |
| 6.1.1 | Übersicht über die Erfassungsoptionen | 17 |
| 6.1.2 | Auswertung der Anwendung der Erfassungsoptionen | 17 |
| 6.1.2.1 | Übersicht | 17 |
| 6.1.2.2 | Quantitatives Standardverfahren für die flächenhafte Kartierung der Sturmflächen | 17 |
| 6.2 | Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 6.2.1 | Vorverarbeitung | 17 |
| 6.2.1.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 6.2.1.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 6.2.1.3 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 6.2.1.4 | TerraSAR Daten | 17 |
| 6.2.2 | Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 6.2.2.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 6.2.2.2 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 6.2.2.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 6.2.3 | Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 6.2.3.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 6.2.3.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.2.3.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 6.2.4 | Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 6.2.5 | Zusätzliche Auswertung | 17 |
| 6.2.5.1 | Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995 | 17 |
| 6.2.5.2 | Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI) | 17 |
| 7 | Ergebnisse | 17 |
| 7.1 | Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 7.1.1 | Vorverarbeitung | 17 |
| 7.1.1.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 7.1.1.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 7.1.1.3 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 7.1.1.4 | TerraSAR Daten | 17 |
| 7.1.2 | Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 7.1.2.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 7.1.2.2 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 7.1.2.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 7.1.3 | Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 7.1.3.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 7.1.3.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 7.1.3.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 7.1.4 | Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 7.1.5 | Zusätzliche Auswertung | 17 |
| 7.1.5.1 | Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995 | 17 |
| 7.1.5.2 | Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI) | 17 |
| 8 | Diskussion | 17 |
| 8.1 | Verwendete Erfassungsoptionen und Auswertungsverfahren | 17 |
| 8.2 | Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 8.2.1 | Vorverarbeitung | 17 |
| 8.2.1.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 8.2.1.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 8.2.1.3 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 8.2.1.4 | TerraSAR Daten | 17 |
| 8.2.2 | Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 8.2.2.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 8.2.2.2 | Radarsat 1 Daten | 17 |
| 8.2.2.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 8.2.3 | Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten | 17 |
| 8.2.3.1 | E-SAR Daten | 17 |
| 8.2.3.2 | ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten | 17 |
| 8.2.3.3 | TerraSAR Daten | 17 |
| 8.2.4 | Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten | 17 |
| 8.2.5 | Zusätzliche Auswertung | 17 |

| | | |
|---------------|---|-----------|
| 8.2.5.1 | Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995 | 17 |
| 8.2.5.2 | Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI) | 17 |
| 9 | <i>Schlussfolgerungen und Anwendungsperspektiven in der Praxis</i> | 17 |
| 10 | <i>Zusammenfassung</i> | 17 |
| 11 | <i>Abstract</i> | 17 |
| 12 | <i>Literatur</i> | 17 |
| Anhang | | 17 |
| | Anhang A: Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit E-SAR Daten | 17 |
| | Anhang B: Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit TerraSAR Daten | 17 |
| | Anhang C: Automatische Erfassung der Sturmflächen mit E-SAR Daten | 17 |
| | Anhang D: Halbautomatische Erfassung der Sturmflächen mit ERS-1/ERS-2 | 17 |
| | Anhang E: Automatische Erfassung der Sturmflächen mit TerraSAR Daten | 17 |

Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Zugbahn des Orkans „Lothar“ am 26.12.1999 (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003A), | 5 |
| Abbildung 2: Aufnahmeprinzip des Synthetic Aperture Radar (SAR) | 9 |
| Abbildung 3: Einflussfaktoren auf die Abbildung eines Radarbildes nach HOLECZ (1993) verändert von KREMMERS (1997) | 11 |
| Abbildung 4: Schadensintensität in Frankreich (IFN, 2003, verändert) | 17 |
| Abbildung 5: Aufnahmen nach dem Sturm (links oben), mit Waldmaske (rechts oben). Klassifizierte Sturmflächen (rechts unten) und die von Hand nachbearbeiteten Flächen (links unten). Prozessiert von der Remote Sensing Solutions GmbH (RSS). | 17 |
| Abbildung 6: Lage der Untersuchungsgebiete im Starkschadengebiet Schwarzwald. Die ausgewählten Forstbezirke sind im Kartenausschnitt hell dargestellt, Ausnahme der Forstbezirk Bad Rippoldsau-Schapbach, der innerhalb des Projekts Sturmmon nicht aber in der vorliegenden Arbeit als Untersuchungsgebiet diente (Quelle: Landesforstverwaltung) | 17 |
| Abbildung 7: Flächenanteil verschiedener Baumarten im Untersuchungsgebiet 1 (links) und an den vom Sturm betroffenen Gebieten (rechts) | 17 |
| Abbildung 8: Flächenanteil der Sturmschäden (Klasse 1 und 2) sowie der intakten Waldbestände in Gebiet 1 bezüglich der Exposition (links) und der Hangneigung (rechts) | 17 |
| Abbildung 9: ArcView [®] 3.2a mit terrestrischen Informationen (Photo) und verschiedenen Fernerkundungsdatensätzen, sowie den Referenzsturmflächen | 17 |
| Abbildung 10: wie oben inkl. Sachdatentabelle | 17 |
| Abbildung 11: Maskierungen in ArcView [®] mit Hilfe von FOGIS Daten | 17 |
| Abbildung 12: Bewertung der Genauigkeit der Schadenskartierungen (Rot = Referenz, Grün = Interpretation) | 17 |
| Abbildung 13: Übersicht über den Ablauf der automatischen Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der E-SAR und TerraSAR Daten | 17 |
| Abbildung 14: 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen einer Diplomarbeit (Bahner, 2003) aus Luftbildern des LVA Baden-Württemberg aus dem Jahr 1995. Blau markiert, größere Abweichungen zwischen 1995 und 2000. | 17 |
| Abbildung 15: 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen der E-SAR X-Band Befliegung vom April 2000. Potentielle Veränderungen gegenüber 1995 (blaue Pfeile) | 17 |
| Abbildung 16: Artefakte und horizontale Verschiebungen in E-SAR L-HH, L-HV, L-VV (Links) und E-SAR X-HH (Rechts) | 17 |
| Abbildung 17: Ausschnitt der Maske der Lokalen Einfallswinkel ohne Filter (links) und mit Median Filter 7x7 Fenster (rechts) | 17 |
| Abbildung 18: Beleuchtungskorrektur mit Hilfe der Maske der Lokalen Einfallswinkel am Beispiel des L-Bandes mit HH-Polarisation | 17 |
| Abbildung 19: Beleuchtungskorrektur mit Hilfe der Maske der Lokalen Einfallswinkel am Beispiel des X-Bandes mit HH-Polarisation | 17 |
| Abbildung 20: Bereich mit Radarschatten in E-SAR L-Band (Links, blauer Pfeil) und Gebiet mit Überkorrektur nach Durchführung der Beleuchtungskorrektur (Rechts, blauer Pfeil) und nicht korrigiertem Bereich (Rechts, roter Pfeil). | 17 |
| Abbildung 21: Ergebnis der kalibrierten und beleuchtungskorrigierten E-SAR Bilddaten | 17 |
| Abbildung 22: ERS-1 und ERS-2 Kohärenz 31.10/01.11.1999 (links) | 17 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 23: Radarsat vom 08.12.2000 ohne Filter (links) und mit Gamma Map Filter, 3x3 Fenster, 1 Iteration (rechts); gelb umrandet Waldflächen aus Walddecker (G2) | 17 |
| Abbildung 24: Überblick über die kalibrierten und beleuchtungskorrigierten TerraSAR Daten | 17 |
| Abbildung 25: Sturmfläche (blau) und Bestand Altersstufe 1 (grün) in E-SAR Daten (Links) und zum Vergleich im Luftbild des Landesvermessungsamts, Maßstab 1:18.000 (Rechts) | 17 |
| Abbildung 26: Vergleich der visuellen Kartierung der Sturmflächen zwischen verschiedenen Interpreteten (Blau – Referenz, Hellrot, Rot und Dunkelrot – verschiedene Interpreteten) | 17 |
| Abbildung 27: Radarsat vor/nach Sturm mit Differenz-Bild (Links), Durchschnitts-Bild (Mitte) und Ratio-Bild (Rechts), blau umrandet die Referenzsturmflächen G2, gelb umrandet Ausschnitt G2 | 17 |
| Abbildung 28: Ergebnisse der Signaturanalyse für L-HH gegen L-HV und L-HH gegen X-HH | 17 |
| Abbildung 29: Ergebnisse der Signaturanalyse für L-HV gegen X-VV und X-HH gegen X-VV | 17 |
| Abbildung 30: Klassifizierungsschema Variante 1 E-SAR X-Band | 17 |
| Abbildung 31: Ergebnisse der Klassifizierung mit eCognition® für die Variante 1. Links – Vorklassifizierung (Trennung Wald von Nichtwald), Mitte – Auswahl der Samples, Rechts – Ergebnis der Klassifizierung (Grün=Wald, Magenta=Sturmflächen) | 17 |
| Abbildung 32: Klassifizierungsschema Variante 3 E-SAR X-Band | 17 |
| Abbildung 33: Ergebnisse der Segmentierung – Links Sturmflächen (roter Pfeil) und Trennung gegenüber Waldflächen (grüner Pfeil), Rechts Trennung von Wald und Nichtwald (roter Pfeil) mit Unterstützung der FoGIS Geometrien (grüner Pfeil) | 17 |
| Abbildung 34: Klassifizierungsschema Variante 5, E-SAR | 17 |
| Abbildung 35: Ergebnisse der Klassifizierung mit eCognition® für die Variante 7. Ergebnis der Klassifizierung (Grün=Wald, Hellgrün = Bestände jünger 30 Jahre, Gelb = Nichtholzboden, Braun = DB, Magenta=Sturmflächen) | 17 |
| Abbildung 36: Ergebnisse der Signaturanalyse für die mittlere Rückstreuung (rechts) aus ERS-1 und ERS-2 und die Kohärenz (links) | 17 |
| Abbildung 37: ERS-1/2 vor Sturm (Links, Waldfläche intakt), ERS-1/2 nach Sturm (Mitte, Waldflächen nicht durchgehend intakt), berechnetes Ratio-Bild (Rechts, Flächen in Pink zeigen Veränderungen der Kohärenzdaten innerhalb der Vegetation) | 17 |
| Abbildung 38: Divergenzen innerhalb des Waldes zwischen den Kohärenzdaten in gelb (Links), Bereiche mit mittleren bis hohen Kohärenzwerten in weiß (Mitte), Ergebnis des Schwellwertverfahrens in pink (Rechts), rot Referenzsturmflächen | 17 |
| Abbildung 39: Ergebnisse für verschiedene Größenklassen (links) und unterschiedliche Bestandesalter (rechts) | 17 |
| Abbildung 40: Ergebnisse für verschiedene Bestandeshöhen (links) und Expositionen (rechts) | 17 |
| Abbildung 41: Ergebnisse für verschiedene Neigungsklassen (links) und Lokalem Einfallswinkel (rechts) | 17 |
| Abbildung 42: Anteil der überschätzten Flächen am gesamten Untersuchungsgebiet im Hinblick auf Exposition (links) und Hangneigung (rechts) | 17 |
| Abbildung 43: : 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen der E-SAR X-Band Befliegung vom April 2000. Überlagerung mit Sturmflächen der Schadklasse 1 (weiße Flächen) | 17 |
| Abbildung 44: Ergebnis der Subtraktion mit Aufteilung in 6 Differenzklassen (Links). Zusätzlich mit Einblendung der Referenzdaten in gelb (Rechts) | 17 |
| Abbildung 45: Abweichungen zwischen den Oberflächenmodellen ohne Einfluss von Sturmflächen | 17 |

Tabellen

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Auszug aus der erweiterten Beaufort-Skala, verändert nach Petersen | 4 |
| Tabelle 2: Frequenzbandbezeichnung aus LILLESAND & KIEFER 2000 verändert | 10 |
| Tabelle 3: Die von den Orkanen „Lothar“ und „Martin“ stark betroffenen Regionen in Frankreich (Quelle: IFN, 2003) | 17 |
| Tabelle 4: Schadhholzanfall in der Schweiz in Folge der Orkane „Lothar“ und „Martin“ (BUWAL, 2001) | 17 |
| Tabelle 5: Nutzeranforderungen an eine „Erfassung des Schadensausmaßes“ | 17 |
| Tabelle 6: Nutzeranforderungen an eine „Kartierung der Schadflächen“ | 17 |
| Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Radardaten | 17 |
| Tabelle 8: Technische Daten E-SAR | 17 |
| Tabelle 9: Daten der E-SAR Befliegung vom 03.04.2000 | 17 |
| Tabelle 10: Parameter der ERS-1 und ERS-2 SAR-Systeme | 17 |
| Tabelle 11: Übersicht über die Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2 | 17 |
| Tabelle 12: Parameter des SAR-Systems Radarsat | 17 |
| Tabelle 13: Übersicht über die Radarsat Daten | 17 |
| Tabelle 14: Simulierte TerraSAR Daten | 17 |
| Tabelle 15: Technische Bedingungen der Hansa Befliegung | 17 |
| Tabelle 16: Terrestrisch erhobene Merkmale in den Sturmflächen | 17 |
| Tabelle 17: Statistische Angaben der Referenzdaten differenziert nach Räumungszustände und Schadklassen in G1 und G2 | 17 |
| Tabelle 18: Untersuchte Filter zur Minimierung des Speckle-Effekts in den E-SAR und TerraSAR Daten | 17 |
| Tabelle 19: Übersicht über die Varianten der visuellen Kartierung bei E-SAR | 17 |
| Tabelle 20: Übersicht über die Varianten der visuellen Kartierung | 17 |
| Tabelle 21: Übersicht über die automatischen Erfassungsvarianten mit eCognition [®] | 17 |
| Tabelle 22: Alterseinteilung der Klassen in eCognition [®] | 17 |
| Tabelle 23: Übersicht über die automatischen Erfassungsvarianten mit TerraSAR | 17 |
| Tabelle 24: Übersicht über die in die Analyse einbezogenen Varianten | 17 |
| Tabelle 25: Ergebnisse der Trennbarkeitsanalyse für die einzelnen Filter bei E-SAR X-HH | 17 |
| Tabelle 26: Übersicht über die RMS-Fehler bei der Entzerrung | 17 |
| Tabelle 27: Übersicht über die Orthorektifizierung der Radarsat Daten | 17 |
| Tabelle 28: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 1, E-SAR Daten | 17 |
| Tabelle 29: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 2, E-SAR Daten | 17 |
| Tabelle 30: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 3, E-SAR Daten | 17 |
| Tabelle 31: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 4, E-SAR Daten | 17 |
| Tabelle 32: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 5 E-SAR Daten | 17 |
| Tabelle 33: Ergebnisse Variante 7, Interpret 1 (in Klammern Variante 8, Interpret 2) | 17 |
| Tabelle 34: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 1 TerraSAR Daten | 17 |
| Tabelle 35: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 3 TerraSAR Daten | 17 |
| Tabelle 36: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 1) | 17 |
| Tabelle 37: Segmentierungsparameter in eCognition [®] der Variante 1 | 17 |
| Tabelle 38: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 1 E-SAR | 17 |
| Tabelle 39: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 3) | 17 |
| Tabelle 40: Segmentierungsparameter in eCognition [®] der Variante 3 | 17 |
| Tabelle 41: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 3 E-SAR | 17 |
| Tabelle 42: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 5) | 17 |
| Tabelle 43: Segmentierungsparameter in eCognition [®] Variante 5 und 6 | 17 |
| Tabelle 44: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 5 E-SAR | 17 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 45: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 7 E-SAR _____ | 17 |
| Tabelle 46: Automatische Klassifizierung, Variante 9 E-SAR _____ | 17 |
| Tabelle 47: Ergebnisse ERS-1/2 für die Variante 1 _____ | 17 |
| Tabelle 48: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 1 TerraSAR _____ | 17 |
| Tabelle 49: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 3 TerraSAR _____ | 17 |
| Tabelle 50: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 5 TerraSAR _____ | 17 |
| Tabelle 51: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 7 TerraSAR _____ | 17 |
| Tabelle 52: Einfluss des Räumungszustands auf die Unterschätzung der Sturmflächen _____ | 17 |
| Tabelle 53: Vergleich der Oberflächenmodelle _____ | 17 |

Abkürzungen, Symbole, Akronyme

| | |
|----------------|---|
| A | beleuchtete Fläche |
| AeS-1 | Aerosensing Radarsystem 1 |
| AIRSAR | Airborne Synthetic Aperture Radar |
| ALK | Allgemeines Liegenschaftskataster |
| ASAR | Advanced Synthetic Aperture Radar |
| ASI | Agenzia Spaziale Italiana |
| ATKIS | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem |
| BHD | Brusthöhendurchmesser |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BNSC | British National Space Center |
| BUWAL | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft |
| BWI | Bundeswaldinventur |
| C | Grad (Winkel) |
| CAD | Computer Aided Design |
| cm | Zentimeter |
| Cos | Cosinus |
| CSA | Canadian Space Agency |
| dB | Dezibel |
| DB | Dauerbestockung |
| DFD | Deutsches Datenfernerkundungszentrum |
| DGK | Deutsche Grundkarte |
| DHM | Digitales Höhenmodell |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DN | Grauwert eines Pixels |
| DOM | Digitales Oberflächenmodell |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EMISAR | Electromagnetics Institute Synthetic Aperture Radar |
| ENVISAT | Environmental Satellite |
| ERS | European Remote Sensing Satellite |
| ESA | European Space Agency |
| E-SAR | Experimental Airborne Synthetic Aperture Radar |
| ETH | Eidgenössische Technische Hochschule Zürich |
| EU | Europäische Union |
| FE-1 | Forsteinrichtungsbeleg Nr. 1 |
| FEW | Forsteinrichtungswerk |
| FFT | Fast Fourier Transformation |
| FGeo | Abteilung für Forstliche Geoinformation der Forstdirektion Freiburg |

| | |
|-----------------------|--|
| Fm | Festmeter |
| FoGIS | Forstliches Geografisches Informationssystem |
| F-SAR | Flugzeug-Synthetic Aperture Radar |
| FVA | Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg |
| G | Antennengewinn |
| g | geräumt |
| G1 | Gebiet 1 |
| G2 | Gebiet 2 |
| GCP | Ground Control Point |
| GEOSAR | Geographic Synthetic Aperture Radar |
| GHz | Giga Herz |
| GIS | Geografisches Informationssystem |
| GLCM | Grey-Level Cooccurrence Matrix |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| GPS | Global Positioning System |
| H | Horizontal |
| ha | Hektar |
| HG | Herstellergenauigkeit |
| HNN | Höhe über Normal Null |
| hPa | Hektopascal |
| i | lokaler Einfallswinkel |
| IFN | Inventare Forestier National |
| IFSARE | Interferometric Synthetic Aperture Radar - Elevation |
| JERS | Japanese Earth Resource Satellite |
| JPL | Jet Propulsion Laboratory |
| Km | Kilometer |
| km² | Quadratkilometer |
| km/h | Kilometer pro Stunde |
| KSL | Koordinationsstelle für Luftaufnahmen |
| Lb | Laubbaum |
| Log | Logarithmus |
| LVA | Landesvermessungsamt (hier Baden-Württemberg) |
| m | Meter |
| m³ | Kubikmeter |
| MAP | Meteorologisches Applikations- und Präsentationssystem |
| MaP | Maximum a posteriori |
| Mio | Million |
| MEZ | Mitteuropäische Zeit |
| MHz | Megahertz |

| | |
|----------------------|---|
| MLR | Ministerium Ländlicher Raum |
| mm | Millimeter |
| m/s | Meter pro Sekunde |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| Nb | Nadelbaum |
| ng | nicht geräumt |
| NG | Nutzergenauigkeit |
| NHB | Nichtholzboden-Fläche |
| NIMA | National Imagery and Mapping Agency |
| NRSC | National Remote Sensing Center |
| p | empfangene Polarisation |
| P_r | Empfangsenergie |
| P_t | Sendeenergie |
| q | ausgesendete Polarisation |
| R | Distanz zwischen Antenne und Auflösungszelle |
| RADAR | Radio Detection and Ranging |
| RAR | Real Aperture Radar |
| RGB | Rot – Grün - Blau |
| RMK | Reihenmesskamera |
| RMS | Root Mean Square |
| RSL | Remote Sensing Laboratory |
| RSS | Remote Sensing Solutions |
| S | Oberflächenstreuung |
| SAR | Synthetic Aperture Radar |
| sin | Sinus |
| SIR | Spaceborne Imaging Radar |
| SLAR | Side Looking Airborne Radar |
| SPOT | System Pour l'observation de la Terre |
| SRTM | Shuttle Radar Topographic Mission |
| tg | teils geräumt |
| TK | Topografische Karte |
| TM | Thematic Mapper |
| UG1 | Untersuchungsgebiet 1 |
| UG2 | Untersuchungsgebiet 2 |
| üNN | über Normal Null |
| V | Volumenstreuung |
| WSL | Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft |
| % | Prozent |
| Φ | Sichtwinkel (Look-Angle) |

| | |
|--------------|--------------------------------------|
| Δy | Auflösung quer zur Flugrichtung |
| Δx | Auflösung in Flugrichtung |
| y | Depressionswinkel (Depression Angle) |
| θ | Einfallswinkel (Incidence Angle) |
| σ^0 | Rückstreuquerschnitt |
| β^0 | Beta_0 (Radarhelligkeit) |
| λ | Wellenlänge |
| ϵ | Dielektrizitätskonstante |
| \emptyset | mittlerer Durchschnitt |
| ϵ_r | Realteil |
| ϵ_i | Imaginärteil |
| ϵ | Dielektrizitätskonstante |

1 Einführung

1.1 Einleitung

Baden-Württemberg zählt mit rund 39 % der Landesfläche zu den walddreichsten Bundesländern in Deutschland. In den Jahren 1990 und 1999 war Baden-Württemberg von den bisher schwersten Sturmschäden in den Wäldern, seit Einführung der modernen nachhaltigen Waldbewirtschaftung vor 200 Jahren betroffen. Durch den Orkan „Lothar“ am 26. Dezember 1999, fielen allein in Baden-Württemberg innerhalb von nur zwei Stunden ca. 30 Millionen Festmeter Sturmholz an, fast das dreifache des normalen jährlichen Holzeinschlags. Flächenhafte Schäden entstanden auf über vierzigtausend Hektar. Der den Waldbesitzern durch den Sturm entstandene finanzielle Gesamtschaden wird auf über 1,2 Milliarden Euro geschätzt.

Die markantesten Unterschiede zu den Orkanen „Vivian“ und „Wiebke“ im Jahr 1990 waren, dass diesmal auch Schäden auf stabilen Standorten auftraten und viel Laubholz betroffen war. Meteorologische Untersuchungen legen nahe, dass solche Ereignisse derzeit und in Zukunft mit höherer Wahrscheinlichkeit auftreten als vor ca. 1950 (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003A, 2003B).

Vordringlichste Aufgabe der Forstbehörden nach einer solchen großräumigen Sturmkatastrophe ist die Erfassung des Schadausmaßes und die Lokalisation der Schäden, damit die wichtigsten Maßnahmen der Sturmschadensbewältigung umgehend geplant und durchgeführt werden können.

Die Forstverwaltung Baden-Württemberg wählte für die schnelle Erfassung des Ausmaßes einen Ansatz, der von der Erfassung auf Forstamts- und Revierebene ausging. Die dort geschätzten Schäden wurden dann auf höherer Ebene aggregiert, um das Gesamtschadensausmaß zu erfassen. Die Schätzung auf lokaler Ebene schloss terrestrische Schätzungen und Schätzungen aus Helikopterflügen ein. Für die Kartierung der Schäden wurde eine Sommerluftbildbefliegung durchgeführt.

Parallel zur operationellen Schadenserfassung initiierte das Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg im Sommer 2000 das Forschungsvorhaben Sturmmon, in dessen Rahmen diese Arbeit angesiedelt ist.

Das Projekt hatte eine Laufzeit von 3 Jahren und wurde mit Forschungsmitteln des Landes Baden-Württemberg und Forschungsmitteln des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gefördert.¹

¹ Das dieser Arbeit zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50EE0034 und des Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg (Förderkennzeichen 0207 E) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1.2 Zielsetzung

Die Erfassung von Sturmschäden mit Hilfe optischer Fernerkundungsdaten wird in der Praxis seit längerem erfolgreich durchgeführt. Nachteile dieser Erfassungsoptionen sind die Wetterabhängigkeit optischer Daten und lange Aufnahmezyklen bei größeren Gebieten, vor allem bei Luftbildern. Demgegenüber können Radarsysteme unabhängig von den Wetterbedingungen Daten aufnehmen und somit schneller zur Verfügung stellen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten der Erfassung von Sturmschäden mit Hilfe moderner Radarfernerkundungssystemen aufzuzeigen. Dabei soll überprüft werden, ob eine zeitnahe und genaue Erfassung von Sturmflächen durchgeführt werden kann. Dafür werden verschiedene satellitenbasierte, flugzeugbasierte und in naher Zukunft zur Verfügung stehende Radar-Fernerkundungssysteme getestet.

Da bei der Erfassung der Sturmflächen von einem zweistufigen Verfahren ausgegangen wird, bei welchem in der ersten Stufe ein schneller Überblick über das Ausmaß der Schäden nach 1 bis 2 Monaten erforderlich ist und in der zweiten Stufe die genaue Kartierung der Schadflächen in einem Zeitrahmen von maximal 5 bis 6 Monaten nach dem Sturmereignis, vor allem für die mögliche Planung der Wiederbewaldung durchgeführt werden soll, werden verschiedene Verfahren zur Erfassung der Sturmflächen untersucht. Die Genauigkeiten der visuellen Interpretation der Radardaten und Delinierung der Sturmflächen am Bildschirm wird dabei den weitgehend automatischen segmentbasierten Klassifizierungsoptionen gegenübergestellt.

Die wichtigsten Fragestellungen lauten:

- Können Sturmflächen mit Hilfe von modernen Radarfernerkundungssystemen erkannt und kartiert werden
- Mit welchen Verfahren lassen sich die Sturmflächen kartieren
- Ab welcher Größe einer Schadfläche ist die Erfassung möglich
- Worin bestehen die Unterschiede zwischen den einzelnen Datensätzen
- Kann mit der Verwendung digitaler Zusatzdaten (z.B. FoGIS) eine höhere Erfassungsgenauigkeit erreicht werden
- Wo sind die Grenzen bei der Erfassung der Sturmflächen mit Radardaten momentan
- Ist der Einsatz von Radardaten zur Sturmflächenerfassung zu empfehlen.

1.3 Aufbau der Arbeit und Methodik

Die vorgestellte Arbeit ist in 12 Kapitel unterteilt. Eine Einführung in das Thema gibt das Kapitel 1. In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen für das Verständnis der Arbeit beschrieben. Gleichzeitig wird in Kapitel 2 auf die bisherige Methodik der Sturmflächenerfassung in der Praxis eingegangen. Da in diese Arbeit auch überprüft wird, ob die Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg an eine Erfassung der Sturmschäden, mit der Verwendung von Radardaten erfüllt werden können, werden diese in Kapitel 3 beschrieben. In den Kapiteln 4 und 5 werden die Untersuchungsgebiete beschrieben und die relevanten Eigenschaften der verwendeten Radardaten sowie der digitalen Zusatzdaten erläutert. Das dieser Arbeit zu Grunde liegende methodische Konzept wird in Kapitel 6 vorgestellt und detailliert erläutert. Die Ergebnisse der verwendeten methodischen Schritte können dem Kapitel 7 entnommen werden. Eine Diskussion der erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8. Schlussfolgerungen und Anwendungsperspektiven für die Praxis sind in Kapitel 9 enthalten. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung auf Deutsch in Kapitel 10 und in Englisch in Kapitel 11. Anschließend wird in Kapitel 12 die in dieser Arbeit verwendete Literatur aufgelistet. Im Anhang sind abschließend einzelne Daten und Ergebnisse dargestellt.

2 Grundlagen

2.1 Der Orkan „Lothar“

Bereits im Jahr 1806 entwickelte der englische Admiral Sir Francis Beaufort (1774 – 1857) die nach ihm benannte sog. Beaufort-Skala, um die Stärken der Luftbewegung auf See nach optischen Anzeichen zu bestimmen. Die Skala wurde 1927 von Petersen aufgegriffen und leicht modifiziert, indem er anstatt der Segelführung, das Erscheinungsbild der See für die Einteilung in verschiedene Stufen heranzog. Die so veränderte Beaufort-Skala wurde 1939 international eingeführt und um eine Beschreibung der Auswirkungen an Land sowie nachträglich genau ermittelten Windgeschwindigkeiten ergänzt. Tabelle 1 zeigt die heutige Form der Beaufort-Skala verändert, nach Petersen (nur Auswirkungen auf Land).

Tabelle 1: Auszug aus der erweiterten Beaufort-Skala, verändert nach Petersen

| Stärke | Bezeichnung | Auswirkung auf Land | Windgeschw. in m/s | Windgeschw. in km/h |
|--------|--------------------|--|-----------------------|------------------------|
| 0 | Windstille | Rauch steigt senkrecht auf | 0 – 0,2 | < 1 |
| 1 | Leiser Zug | Rauch bewegt sich | 0,3 – 1,5 | 1 – 5 |
| 2 | Leichte Brise | Flaggen leicht bewegt, Blätter bewegt | 1,6 – 3,3 | 6 – 11 |
| 3 | Schwache Brise | Blätter und dünne Zweige bewegt, Wimpel gestreckt | 3,4 – 5,4 | 12 – 19 |
| 4 | Mäßige Brise | Wind hebt Staub und loses Papier, bewegte Zweige | 5,5 – 7,9 | 20 – 28 |
| 5 | Frische Brise | Kleine Bäume beginnen zu schwanken, Flaggen wehen scharf aus | 8 – 10,7 | 29 – 38 |
| 6 | Starker Wind | Bäume stark bewegt, Pfeifen von Stromleitungen, Probleme mit Regenschirmen | 10,8 – 13,8 | 39 – 49 |
| 7 | Steifer Wind | Hemmung beim Gehen gegen den Wind | 13,9 – 17,1 | 50 – 61 |
| 8 | Stürmischer Wind | Zweige brechen, Gehen erschwert | 17,2 – 20,7 | 62 – 74 |
| 9 | Sturm | Erste Schäden an Häusern, abbrechende Äste | 20,8 – 24,4 | 75 – 88 |
| 10 | Schwerer Sturm | Entwurzelte Bäume | 24,5 – 28,4 | 89 – 102 |
| 11 | Orkanartiger Sturm | Schwere Sturmschäden | 28,5 – 32,6 | 103 – 117 |
| 12 | Orkan | Schwerste Verwüstungen | > 32,6 | > 117 |

Da bei dem sog. Orkan „Lothar“ örtlich Windgeschwindigkeiten von weit mehr als 117 km/h auftraten, kann man nach der erweiterten Beaufort-Skala von einem Orkan reden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird aber auch von der Erfassung von Sturmschäden geredet, da schon bei schweren Stürmen Bäume entwurzelt werden können.

Für die Entstehung des Orkans „Lothar“ war nach Auskunft des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (2003A) ein westlich der Bretagne über dem Atlantik gelegenes Tiefdruckgebiet mit einem Luftdruck von 980 Hektopascal (hPa) im Zentrum verantwortlich. Innerhalb dieses Tiefdruckgebietes fiel der Luftdruck innerhalb weniger Stunden um 20 hPa auf 960 hPa. Daraus entstand ein Orkanwirbel, der mit ca. 90 km/h in östliche Richtung über Frankreich hinwegzog. Durch die rasante Druckentwicklung verringerte sich auch der Warmsektor des Tiefdruckgebietes. Nach 12 Stunden erreichte das Tiefdruckgebiet die Mainmetropole Frankfurt gegen 13:00 Uhr MEZ. Im Zentrum des Tiefs nahm der Luftdruck dabei langsam wieder zu, was zu einer Abschwächung des Luftdruckgradienten im näheren Bereich um das Zentrum und dort zu einer Windabnahme führte (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003A). Allerdings herrschte an der Südwestflanke des Tiefs, hinter der Okklusionsfront (Zusammenlaufen von Warm- und Kaltfront), ein schwerer Orkan mit Windgeschwindigkeiten bis zu 160 km/h im Flachland und mehr als 180 km/h im Bergland. In der Abbildung 1 ist die Zugbahn des Orkans „Lothar“ (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003A), abgeschätzt aus synoptischen Messdaten des Meteorologischen Applikations- und Präsentationssystems (MAP) des Deutschen Wetterdienstes, dargestellt.

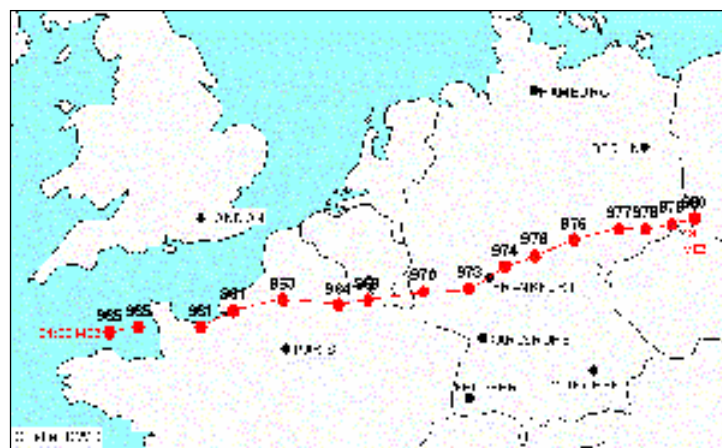


Abbildung 1: Zugbahn des Orkans „Lothar“ am 26.12.1999 (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003A),
Tiefkern (roter Punkt) und der dazugehörige Kerndruck

In Deutschland waren von dem Orkan vor allem die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern betroffen. Mit knapp 29 Mio. Fm angefallenes Sturmholz auf über 40.000 ha Fläche, also der knapp 3-fachen jährlich geplanten Einschlagsmenge, war Baden-Württemberg das Bundesland mit den höchsten Schäden. Der finanzielle Gesamtschaden wurde auf über 1,2 Milliarden Euro geschätzt. In Bayern fielen ca. 4,3 Mio. Fm Sturmholz an.

2.2 Entwicklung der Radarfernerkundung

Ursprünglich bedeutete das Wort Radar „Radio Aircraft Detection and Ranging“ (KLAUSING & HOLPP, 2000), was frei auch mit den Worten „Das Auffinden von Flugzeugen und die Messung ihrer Entfernung mit elektromagnetischen Wellen“ bedeutet. Da der Einsatz von Radar in der historischen Entwicklung nicht auf die Luftfahrt beschränkt blieb, entstand die Begriffskombination „Radio Detection and Ranging“, was soviel bedeutet wie „Geräte und Verfahren zur Detektion, Ortung und Identifizierung von Zielen“. Bereits im Jahr 1886 gelang es Heinrich Hertz, die Theorie von James Clerk Maxwell zu bestätigen, dass elektromagnetische Wellen mit festen Körpern interferieren und von diesen auch reflektiert werden (WIESBECK, 1988; KNIESTEDT, 1989; SCHREIER, 1995). Die erste praktische Anwendung von Radar wurde 1904 von dem Ingenieur Christian Hülsmeier entwickelt, der mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen, metallische Schiffe bis zu einer Entfernung von 3000 m orten konnte (HÜLSMEYER, 1904; VON WEIHER, 1979; TRENKLE, 1986). Nachdem in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts der militärische Nutzen der Radartechnologie erkannt wurde, wurde vor allem in Deutschland, England, Frankreich und den USA intensive Forschungsarbeit betrieben, um neue Radarverfahren zu entwickeln. Nach dem 2. Weltkrieg wurden die ersten räumlich hochauflösenden Radarsysteme entwickelt und vom Flugzeug aus als sogenannte Seitensichtradarsysteme (SLAR, side looking airborne radar) verwendet. In den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde das bisherige System mit der realen Apertur (RAR, real aperture radar) bis zum heute weit verbreiteten System mit synthetischer Apertur (SAR, synthetic aperture radar) weiterentwickelt, welches durch besondere Methoden in der Signalverarbeitung, die Erzeugung hochauflösender Bilder ermöglicht (ULABY ET AL., 1981, 1982 und 1986; HOVANESSIAN, 1988; CUTRONA 1990 IN SKOLNIK (HRSG.)).

Der erste auch für die zivile Erdbeobachtung eingesetzte Radarsensor war der im Juni 1978 gestartete Satellit Seasat. Vornehmlich eingesetzt zur Beobachtung von Meeresströmungen und der Messung von Wellenhöhen, wurde trotz seiner nur kurzen Funktionsdauer (etwas mehr als 3 Monate) auch das Potential für die Erfassung von Landaufnahmen erkannt. In den Jahren 1981 (SIR-A), 1984 (SIR-B) und 1994 (SIR-C/X-SAR) wurden von der NASA vier Shuttle-Missionen (Shuttle Imaging Radar, SIR) durchgeführt, bei denen jeweils Radaraufnahmesysteme an Bord installiert waren. Die Aufnahmen während der SIR-A und SIR-B Missionen wurden im Bereich des L-Bandes mit HH-Polarisation durchgeführt. Bei der SIR-C/X-SAR Mission wurden Daten im Bereich des X-, C- und L-Bandes erhoben. Im Jahr 2000 wurde die sehr erfolgreiche Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) von der NASA (National Aeronautics and Space Administration), der NIMA (National Imagery and Mapping Agency), dem DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und der ASI (Agenzia Spaziale Italiana) durchgeführt. Mit Hilfe der Technik der Radar-Interferometrie, bei der zwei Bilder aus leicht verschiedenen Positionen dasselbe Gebiet aufnehmen (bei SRTM mit Hilfe eines 60 m langen ausfahrbaren Mastes), wurde in nur 11 Tagen die gesamte

Erdkugel (ausschließlich der großen Wasserflächen) aufgenommen und mit Hilfe dieser Daten ein auf 30 m genaues globales Höhenmodell berechnet.

Der nächste Meilenstein, vor allem satellitenbasierter Radarforschung im europäischen Bereich, war der Start und der erfolgreiche Verlauf der ERS-1 Mission von 1991 bis zum Jahre 2000. Mit ERS-1 und dem baugleichen ERS-2 Satelliten (seit 1995) der ESA (European Space Agency) standen über einen längeren Zeitraum Fernerkundungsdaten, basierend auf moderner Radartechnik und mit einer geometrischen Auflösung bis zu 25 m zur Verfügung. Zusätzlich war es mit diesen beiden Satelliten möglich, interferometrische Daten zu gewinnen, da die Aufnahmen aus leicht verschiedenen Orbits mit unterschiedlichen Aufnahmewinkeln durchgeführt wurden. Fast zeitgleich zu ERS-1 wurde von japanischer Seite 1992 der Satellit JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite) erfolgreich gestartet. Mit ihm an Bord war ein optischer Sensor und ein Radarsensor. Im Jahre 1995 wurde von der Canadian Space Agency (CSA) der Radarsatellit mit dem Namen Radarsat 1 in die Erdumlaufbahn geschossen, der Daten bis zu einer Auflösung von 8 m liefert. In einer weiteren ESA-Mission wurde im Jahr 2002 der Satellit ENVISAT (Environmental Satellite) erfolgreich in den Weltraum geschossen. An Bord dieses Satelliten befinden sich 10 verschiedene Aufnahmesysteme. Darunter auch ein Radar-Aufnahmesystem mit dem Namen ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar). Damit können Aufnahmen im Bereich des C-Bandes und mit verschiedenen Polarisationsrichtungen (HH, VV, HV, VH) bis zu einer geometrischen Auflösung von 30 m und einer Aufnahmebreite von 100 km durchgeführt werden. Mit weiteren Radar-Satelliten der nächsten Generation wie z.B. Radarsat 2 (geplant für 2004) und TerraSAR (2006) sollen die Vorteile der Radarfernerkundung einer noch größeren Zahl von Nutzern zugänglich gemacht werden.

Gegenüber den an Bord von Space Shuttles oder auf Satelliten montierten Radarsystemen, existieren seit längerer Zeit auch die sogenannten flugzeuggetragenen Systeme, also Systeme die an Bord eines Flugzeugs montiert sind und von dort aus Geländestreifen aufnehmen. Seit 1987 existiert das von der NASA/JPL entwickelte AIRSAR-System an Bord eines Flugzeugs des Typs DC-8. Das System kann multipolarimetrisch im Bereich des P-, L- und C-Bandes Radardaten aufnehmen. Interferometrische Aufnahmen sind im Bereich des L- und C-Bandes möglich. Die Auflösung in Azimutrichtung entspricht 1 m, so dass sehr hochaufgelöste Radardaten gewonnen werden können. Das System ist heute immer noch im operationellen Einsatz und kann für die verschiedensten Missionen herangezogen werden. Ähnlich dem AIRSAR-System der NASA, wurde vom DLR seit 1989 das flugzeuggetragene E-SAR (Experimental Synthetic Aperture Radar) System entwickelt, das als experimentelle Plattform seither den neuesten Entwicklungen in der Radartechnologie angeglichen und ständig weiterentwickelt wurde (Daten dieses Systems sind Hauptinhalt dieser Arbeit). Im Moment können multipolarimetrische Aufnahmen in den Bereichen des P-, L-, C- und X-Bandes durchgeführt werden. Zusätzlich zu den beiden genannten Systemen existieren noch weitere flugzeuggetragene Systeme wie das AeS-1 (X-Band, Einpass-Interferometrie möglich), das

GEOSAR-System, entwickelt von der NASA/JPL, mit dem auch mittels Interferometrie die Erzeugung von digitalen Geländemodellen möglich ist, oder auch dem IFSARE-System des Environmental Research Institute of Michigan und dem EMISAR-System des Dänischen Zentrums für Fernerkundung. Für das Jahr 2006 ist die Inbetriebnahme eines neuen vom DLR entwickelten flugzeuggetragenen Radarsystems mit dem Namen F-SAR 2000 geplant, mit dem sehr hohe Auflösungen ($<0,5$ m) und eine genauere radiometrische Kalibrierung (besser als 1dB) erzielt werden soll. Das System soll auch eine polarimetrische SAR-Interferometrie mit Einpass-Konfiguration ermöglichen. Eine Auflistung und Beschreibung weiterer Systeme kann KLAUSING & HOLPP (2000) und HENDERSON & LEWIS (1998) entnommen werden.

2.3 Radaraufnahmesysteme

2.3.1 Einführung

Der Begriff RADAR (radio detection and ranging) entstammt dem englischen Wortschatz und bedeutet übersetzt soviel wie Zielerfassung und Entfernungsmessung mit Hilfe der Funkmesstechnik.

Während optische Satellitendaten und Luftbilder das reflektierte Sonnenlicht für Aufnahmen verwenden und somit zu den „passiven“ Systemen der Fernerkundung gehören, zählen die meisten in der Fernerkundung genutzten Radarsysteme zu den „aktiven Systemen“, da sie Mikrowellen seitwärts zur Flugrichtung ausstrahlen und wieder empfangen (Abbildung 2). Als Messgröße dienen dabei Frequenz, Amplitude und Phase, sowie die Laufzeit der Strahlung zwischen dem Senden und Empfangen des zurückgestreuten Anteils. Anschließend werden die Signale in ein digitales Bild umgesetzt. Radarsysteme können auf satelliten- und auf flugzeuggetragenen Systemen montiert sein.

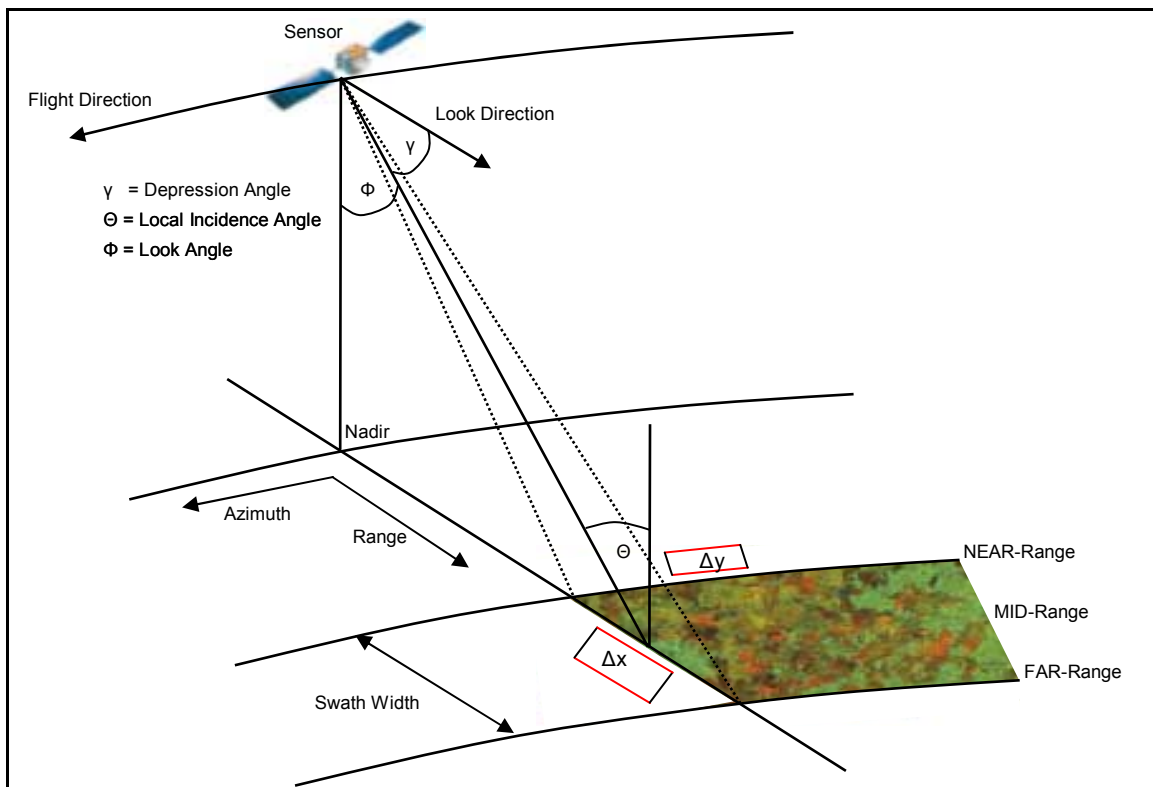


Abbildung 2: Aufnahmeprinzip des Synthetic Aperture Radar (SAR)

Radardaten haben gegenüber optischen Daten den entscheidenden Vorteil, dass sie tageszeiten- und größtenteils wetterunabhängig Daten liefern können. So können Aufnahmen auch bei Bewölkung und in der Nacht erfolgen. Lediglich durch starken Niederschlag kann es bei Wellenlängen < 5 mm zu Beeinträchtigungen kommen. Ferner können Mikrowellen in

verschiedene Oberflächen bzw. Materialien eindringen, wobei längere Wellen tiefer eindringen können als kürzere Wellen, die auch schon an der Oberfläche reflektiert werden können.

Der Spektralbereich der Mikrowellen, der auch in sog. Bänder eingeteilt ist, kann HILDEBRANDT (1996) und LILLESAND & KIEFER (2000) entnommen werden. Einen Überblick über die wichtigsten für die Fernerkundung verwendeten Mikrowellenbereiche gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Frequenzbandbezeichnung aus LILLESAND & KIEFER 2000 verändert

| Radar Bandbezeichnung | Wellenlänge [cm] | Frequenz [MHz] |
|-----------------------|------------------|----------------|
| X-Band | 2,4 – 3,8 | 12.500 – 8.000 |
| C-Band | 3,8 – 7,5 | 8.000 – 4.000 |
| S-Band | 7,5 – 15,0 | 4.000 – 2.000 |
| L-Band | 15,0 – 30,0 | 2.000 – 1.000 |
| P-Band | 30,0 – 100,0 | 1.000 – 300 |

Bei SAR-Systemen wird zwischen zwei Aufnahmegeometrien unterschieden. Einerseits bestimmt die Länge des Sendeimpulses (Impulslänge) die Auflösung quer zur Flugrichtung (range) und damit die Ausdehnung in Zeilenrichtung Δy (siehe Abbildung 2). Auf der anderen Seite bestimmt die Breite des Radarstrahles, unter dem die Antenne abstrahlt, die Auflösung in Flugrichtung (Azimut) und damit die Ausdehnung in Flugrichtung Δx (siehe Abbildung 2). Die Einteilung des Aufnahmestreifens erfolgt in Near-Range, Mid-Range und Far-Range (siehe Abbildung 2).

Der Sichtwinkel Φ (Look Angle) beschreibt den Winkel zwischen der Vertikalebene des Sensors und dem Radarstrahl. Der Depressionswinkel γ (Depression Angle) ist definiert als Winkel zwischen der Horizontalebene des Sensors und dem Radarstrahl. Der Depressionswinkel ändert sich dabei von der Near-Range zur Far-Range hin. Als Winkel zwischen der Geraden senkrecht zur Oberfläche und dem Radarstrahl wird der Einfallswinkel θ (Incidence Angle), bzw. der lokale Einfallswinkel mit Bezug auf die reale Erdoberfläche (Local Incidence Angle) definiert. Ausführliche Beschreibungen der Radaraufnahmegemetrie sind zu finden bei ULABY ET AL. (1982, 1986); KREMMERS (1997A, 1997B), HENDERSON & LEWIS, 1998 und HORLACHER 1998.

2.3.2 Einflussfaktoren auf den Prozess der Radarrückstreuung

Die Abbildung der Geländeoberfläche im Radarbild ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Einerseits sind diese Einflussfaktoren sensor- und aufnahmespezifisch, andererseits hat aber auch die Beschaffenheit und Eigenschaft der abgebildeten Objekte selbst großen Einfluss auf

die Wiedergabe im Radarbild. Eine Übersicht über die wichtigsten Einflussgrößen gibt HOLECZ (1993) und Abbildung 3.

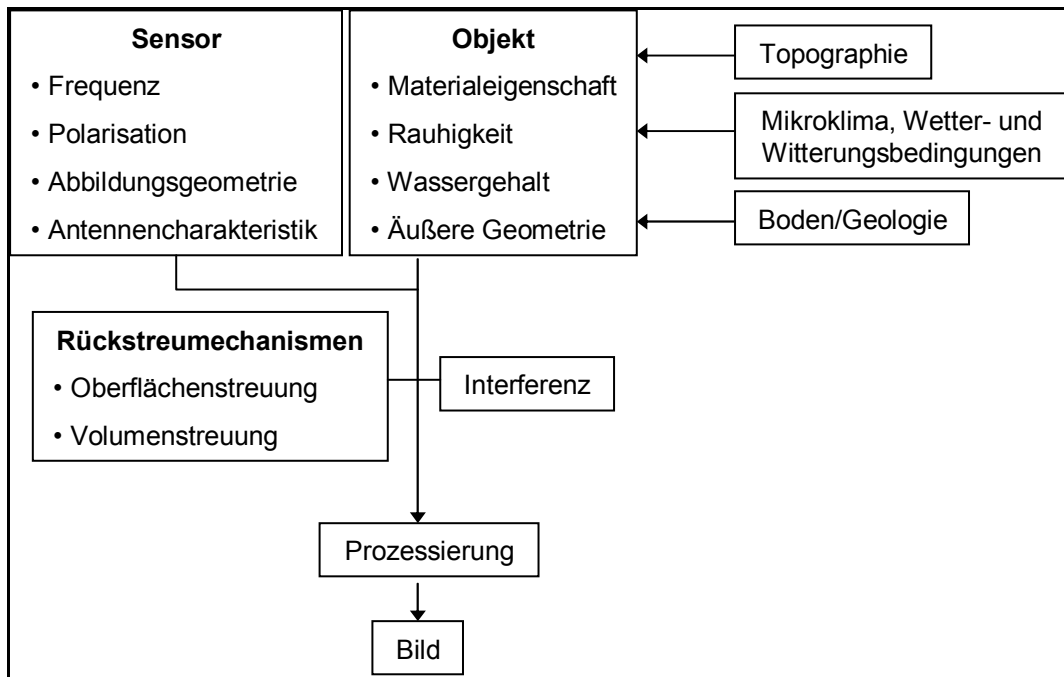


Abbildung 3: Einflussfaktoren auf die Abbildung eines Radarbildes nach HOLECZ (1993) verändert von KREMMERS (1997)

Da die in Abbildung 3 aufgezählten Faktoren in der Literatur bereits eingehend beschrieben wurden (siehe ULABY ET AL., 1982; ELACHI 1987; VAN ZYL ET AL. 1987A,1987B; ZEBKER ET AL. 1987; BAYER 1990; HOLECZ 1993; KREMMERS, 1997B; HORLACHER 1998 und JOHLIGE 1998), wird hier auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet und dafür im Folgenden eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Einflussfaktoren gegeben.

2.3.2.1 Radargleichungen

In der Radargleichung (Gleichung 2.1) werden die grundsätzlichen Beziehungen zwischen den Systemparametern, den objektspezifischen Parametern und dem von der Antenne empfangenen Radarsignal dargestellt. Die Herleitung kann ULABY ET AL. (1982) entnommen werden.

$$P_{rp} = \iint_A \frac{P_{tq} G^2(\theta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{pq}^0 dA$$

Gleichung 2.1

Der dimensionslose, normierte Rückstreuquerschnitt σ^0 ist dabei als Flächenmittelwert der Rückstreuquerschnitte aller beleuchteten Einzelobjekte definiert und dient als Maß für die Rückstreuintensität.

Dabei ergibt sich σ^0 nach HOLECZ ET AL. (1993) als Funktion aus:

$$\sigma^0 = f(\lambda, \theta, p, q, i, \varepsilon, S, V)$$

Gleichung 2.2

P_r = Empfangsenergie

P_t = Sendeenergie

θ = Einfallswinkel

G = Antennengewinn

R = Distanz zwischen Antenne und Auflösungszelle

σ^0 = Rückstreuquerschnitt

λ = Wellenlänge

p = empfangene Polarisierung

q = ausgesendete Polarisierung

A = beleuchtete Fläche

i = lokaler Einfallswinkel

ε = Dielektrizitätskonstante

S = Oberflächenstreuung

V = Volumenstreuung

2.3.2.2 Sensorspezifische Einflussfaktoren

Nach BAYER (1990) kann man den Einfluss der Wellenlänge bei der Wechselwirkung der Mikrowellen mit natürlichen Oberflächen in drei Punkte unterteilen:

- Die Wellenlänge beeinflusst den Anteil der Oberflächenstreuung in Abhängigkeit vom Verhältnis der Oberflächenrauigkeit zur Wellenlänge
- Die verschiedenen Wellenlängen können unterschiedlich tief in das beleuchtete Objekt eindringen, wobei eine zunehmenden Wellenlänge eine größere Eindringtiefe ermöglicht
- Der Anteil der Volumenstreuung ist abhängig von der Wellenlänge.

Die elektromagnetische Strahlung setzt sich aus einem elektrischen und magnetischen Feld zusammen. Dabei wird das elektrische Feld für die Bestimmung der Polarisierung verwendet. Eine Auslenkung des elektrischen Vektors wird als die Schwingung einer Welle bezeichnet.

Da die Mikrowellen im Gegensatz zu elektromagnetischen Lichtwellen festen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, spricht man auch von einer Polarisation. Die Schwingung liegt dabei nicht nur in einer Ebene (lineare Polarisation), sondern sie rotiert um die Achse der Ausbreitungsrichtung und ist damit kreis- oder ellipsenförmig polarisiert, man kann zwischen links- und rechtsdrehend unterscheiden. Die dreidimensionale Darstellung einer elektromagnetischen Welle kann TRAGL (1990) entnommen werden. Auch der Querschnitt der Polarisationsellipse ist in VAN ZYL ET AL. (1987A, 1987B) dargestellt und erläutert. Die heute bei Radarsystemen verwendeten Polarisationszustände zum Aussenden und Empfangen von Radarwellen sind entweder vertikal oder horizontal. Daraus können sich vier verschiedene Polarisationskombinationen ergeben (HH, VV, HV, VH).

2.3.2.3 Objektspezifische Einflussfaktoren

Maßgeblich für die Reflexion und Absorption von Mikrowellenstrahlung an Objekten ist deren dielektrische Eigenschaft. Die Dielektrizitätskonstante ϵ beschreibt die Fähigkeit eines Materials, elektrische Energie auf molekularer Ebene zu speichern und zu reflektieren. Mathematisch beschrieben wird sie durch einen Realteil ϵ_r und einem Imaginärteil ϵ_i . Der Realteil gilt als Maß für den Grad der Ladungstrennung und bestimmt so den Reflexionsanteil beim Übergang der Strahlung von einem Medium in ein anderes. Nach BAYER (1990) ist die Interaktion elektromagnetischer Wellen an der Grenzfläche zweier Medien und somit die Radarrückstreuung mit zunehmendem Kontrast zwischen den Dielektrizitätskonstanten beider Medien umso stärker. Vergleicht man die Dielektrizitätseigenschaften von Wasser ($\epsilon=80$), Luft ($\epsilon=1$), trockenem Boden ($\epsilon=3,5$) und trockener Vegetation ($\epsilon=2$) wird deutlich, dass die dielektrischen Eigenschaften der Objekte maßgeblich durch ihren Wassergehalt bestimmt werden

Ein weiterer objektspezifischer Einflussfaktor auf die Rückstreuung des Radarsignals ist die Rauigkeit von Objekten bzw. der Erdoberfläche. In Abhängigkeit der räumlichen Auflösung des Sensors lässt sich die mikroskalige, mesoskalige und makroskalige Rauigkeit unterscheiden. Die mikroskalige Rauigkeit von Erdoberflächen wird häufig auch als Oberflächenrauigkeit bezeichnet. Dabei gilt, dass mit zunehmender Rauigkeit der Anteil der diffusen Streuung ansteigt, was auch eine höhere Rückstreuung des Radarsignals bedingt (HENDERSON & LEWIS, 1998). Bei etwas größeren Oberflächen als die räumliche Auflösung des Radarsensors spricht man auch von der mesoskaligen Rauigkeit. Beispiel hierfür wäre das Kronendach von Waldbeständen oder die Rückstreuung von Siedlungen mit kleinräumigen Änderungen der Höhe oder auch der Hangneigung (HENDERSON & LEWIS, 1998). Durch die mesoskalige Rauigkeit werden vor allem die Texturen innerhalb des Radarbildes beeinflusst. Die makroskalige Rauigkeit wird durch die Topographie des Geländes beeinflusst. Dies spiegelt sich durch geometrische und radiometrische Verzerrungen im Radarbild wieder (HENDERSON & LEWIS, 1998).

In Abhängigkeit von z.B. dem Depressionswinkel (Depression Angle γ) und der Flughöhe kommt es zu verschiedenen Effekten:

- Foreshortening – Hangverkürzung von dem Sensor zugewandten Hängen
- Layover –Überlagerungseffekte, bei welchen der Radarimpuls eine Bergspitze schneller erreicht als den Bergfuß und durch die kürzere Laufzeit des Signals auch kürzer abgebildet wird
- Shadow – Radarschatten, der vor allem bei großen Einfallswinkeln an vom Sensor abgewandten Hängen auftritt. Der im Radarschatten liegende Bereich wird vom einfallenden Radarimpuls nicht erreicht und kann deswegen keine Signale zurückstreuen. Wird bei diesem Effekt nicht allein die Topographie des Geländes sondern auch Bestandesstrukturen wie z.B. Waldränder mit dahinter liegender Frei- oder Sturmfläche auf einem geneigten und vom Sensor abgewandten Hang berücksichtigt, kann dies durch eine entsprechende Bestandeshöhe zu noch größeren vom Radarschatten betroffene Flächen führen.

Ausführliche Beschreibungen der oben angeführten Effekte sind in ULABY ET AL. (1982); HILDEBRANDT (1996); HOLECZ (1993); HENDERSON & LEWIS (1998) und HEROLD ET AL. (2000A, 2000B) zu finden.

2.3.2.4 Oberflächenstreuung

Beim Aufeinandertreffen zweier homogener Medien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften findet die Streuung nur an der Grenzschicht dieser beiden Medien statt (ULABY ET AL., 1982). Damit muss nur die Streuung an der Oberfläche berücksichtigt werden. Wie schon erwähnt, ist die Oberflächenstreuung von der Rauigkeit der Oberfläche abhängig. Je rauer die Oberfläche, umso diffuser und stärker ist die Rückstreuung. Allerdings ist die Oberflächenstreuung nicht alleine eine Funktion der Rauigkeit sondern auch abhängig von der Frequenz (Wellenlänge) und dem Einfallswinkel (ULABY ET AL., 1982). Nach dem sog. Rayleigh-Kriterium (ULABY ET AL., 1982) und dem Fraunhofer-Kriterium (ULABY ET AL., 1982) kann die Rauigkeit von Objekten in Abhängigkeit von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel beurteilt werden. Bei unverändertem Einfallswinkel würde eine im L-Band aufgenommene Wiese durch den größeren gerichteten kohärenten Strahlungsanteil als sehr glatte Oberfläche dargestellt werden. Im Gegensatz dazu würde dieselbe Wiese im kurzwelligeren X-Band durch den wesentlich höheren inkohärenten Strahlungsanteil, als sehr rau dargestellt werden. Wird im Gegensatz dazu der Einfallswinkel variiert und man lässt die Parameter Gelände und Wellenlänge unverändert (keine Berücksichtigung des

Feuchtigkeitsgehalts), nimmt die Radarrückstreuung mit zunehmendem Einfallswinkel ab (ULABY ET AL., 1982).

2.3.2.5 Volumenstreuung

Die Volumenstreuung tritt vor allem dann auf, wenn die Elemente des bestrahlten Mediums inhomogen verteilt oder in ihren dielektrischen Eigenschaften unterschiedlich sind. In diesem Fall dringen die Radarimpulse in das Medium ein und werden darin gestreut. Als Beispiel für solch ein inhomogenes Medium kann Vegetation genannt werden. Beeinflusst wird die Volumenstreuung vom Einfallswinkel und vor allem von der Polarisation des Radarimpulses. Während der Einfallswinkel im Gegensatz zur Oberflächenstreuung bei der Volumenstreuung nur geringen Einfluss auf die Rückstreuung nimmt, verstärkt sich vor allem bei der Kreuzpolarisation durch vielfache Streuung im inhomogenen Medium die Radarrückstreuung. Eingehende Beschreibungen können auch HENDERSON & LEWIS (1998) entnommen werden.

2.3.3 Prozess der SAR – Bilderstellung

Da die Erzeugung eines Radarbildes einen hohen technischen Aufwand erfordert und mehrere Teilschritte bis zum endgültigen Bildprodukt notwendig sind, soll hier kurz auf die wichtigsten Aspekte eingegangen werden.

Die Prozessierung von SAR-Daten wird heute, im Gegensatz zu früher, vollkommen digital durchgeführt und ist in die Fachdisziplin der Signalverarbeitung einzuordnen. In einem ersten Schritt wird das am Sensor empfangene Signal in die zwei Aufnahmerichtungen quer zur Flugrichtung (range) und in Flugrichtung (azimut) zerlegt. Mit Hilfe eines angepassten Filterverfahrens (matched filter) wird das empfangene Signal mit Hilfe einer Referenzfunktion (angepasst an den Signalverlauf) gefaltet. Dies geschieht zuerst für das empfangene Signal quer zur Flugrichtung und anschließend in Flugrichtung. Dieser Prozess kann sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich durchgeführt werden, wobei die Verarbeitung im Frequenzbereich mit Hilfe einer schnellen Fast Fourier Transformation (FFT) aufgrund des reduzierten Rechenaufwandes häufiger zur Anwendung kommt. In diesem ersten Schritt der Signalverarbeitung sind noch weitere Teilprozesse und Effekte integriert, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Ausführliche Erläuterungen finden sich bei ULABY ET AL. (1982); ELACHI (1987); LEBERL (1990); CURLANDER & MCDONOUGH (1991) und SCHÄTTLER (1992).

Ein weiterer wichtiger Prozess zur Erstellung eines SAR-Bildes ist die Kalibrierung der Daten. Die Kalibrierung umfasst dabei die Überwachung und Korrektur aller registrierten Abweichungen, die bei der Messung entstehen können. Damit soll vor allem die radiometrische Messgenauigkeit des Radarsensors gewährleistet werden. Bei der

radiometrischen Kalibrierung wird der Zusammenhang zwischen den Radar-Bilddaten und dem Rückstreuquerschnitt oder auch Rückstreuoeffizienten σ^0 hergestellt.

Eine Besonderheit beim Prozess der SAR-Bilderstellung ist der durch Interferenzerscheinungen auftretende sog. Speckle-Effekt, der auch homogene Flächen im Bild körnig erscheinen lässt. Da sich die vom Radarstrahl beleuchtete Oberfläche aus verschiedenen zufällig verteilten Rückstreuern unterhalb der Auflösungsgrenze des SAR-Systems zusammensetzt, kann es zu Interferenzen dieser Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle des SAR-Systems kommen. Für die Reduzierung des Speckle-Effekts dient das sog. Multilooking-Verfahren oder auch spezielle Speckle-Filter. Das Multilooking-Verfahren besteht nach KLAUSING & HOLPP (2000) aus einer inkohärenten Addition statistisch unabhängiger Bilder (Looks). Durch die Anwendung des Multilooking-Verfahrens wird die radiometrische Auflösung verbessert, gleichzeitig allerdings die geometrische Auflösung verschlechtert. Nach KLAUSING & HOLPP (2000) ist für bestimmte Bereiche der Bildanalyse und Bildauswertung eine hohe radiometrische Auflösung zu Lasten der geometrischen Auflösung erforderlich. In Kapitel 6.2.1.1 werden die weiteren verwendeten Filter zur Minimierung des Speckles dargestellt. Ausführliche Angaben über den Speckle-Effekt und das Multilooking-Verfahren finden sich in ULABY ET AL. (1982); HENDERSON & LEWIS (1998) und KLAUSING & HOLPP (2000).

2.3.4 Grundlagen der SAR-Interferometrie

Da in der vorliegenden Arbeit auch Daten auf ihre Eignung zur Erfassung von Sturmflächen untersucht wurden, die mittels der Technik der SAR-Interferometrie aufgenommen und erzeugt wurden, wird in diesem Kapitel eine Einführung in den Bereich dieses Aufnahmeverfahrens gegeben.

Bei der seit Ende der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts angewendeten Methode der SAR-Interferometrie werden zwei Aufnahmen des gleichen Gebietes von zwei räumlich voneinander getrennten Sensoren (Antennen) erstellt. Die Distanz zwischen beiden Sensoren wird dabei als die sogenannte Basislinie bezeichnet. Durch einen Vergleich der Phaseninformationen dieser beiden Aufnahmen kann die Höhe des aufgenommenen Geländes berechnet werden. Bei einem flugzeuggetragenen interferometrischen SAR System, wie zum Beispiel dem E-SAR, werden 2 Antennen in einem Abstand von wenigen Metern zueinander am Flugzeug montiert. Diese Antennen nehmen das Gelände beim Überflug simultan auf. Vom Prinzip her ist dieses Verfahren vergleichbar mit den stereometrischen Auswertungen in der Photogrammetrie, wobei die Parallaxe allerdings durch die Messung der Phase bestimmt wird (BAMLER & HARTL, 1998).

Grundsätzlich unterscheidet man bei der SAR-Interferometrie zwischen zwei unterschiedlichen Aufnahmeverfahren:

- Across-Track -Interferometrie

Bei diesem Aufnahmeverfahren wird die räumliche Anordnung der Sensoren (Antennen) so gewählt, dass die Basislinie (Abstand zwischen den Sensoren) quer zur Flugrichtung gerichtet ist. Mit Hilfe dieser Anordnung der Sensoren kann die Geländehöhe bestimmt werden (ZEBKER & GOLDSTEIN, 1986; LI & GOLDSTEIN, 1990; RODRIGUES & MARTIN, 1992).

- Along-Track-Interferometrie

Bei dem Verfahren der Along-Track-Interferometrie sind die Antennen hintereinander in Flugrichtung angeordnet, so dass die Basislinie parallel zur Flugrichtung angeordnet ist. Mit dieser Methode können Geschwindigkeiten von sich bewegenden Objekten gemessen werden. Beispiele hierfür sind Gletscherschiebung, Fluss- und Meeresströmungen, Lavaströme oder Hangrutschungen (GOLDSTEIN & ZEBKER, 1987).

Sowohl die Across-Track-Interferometrie als auch die Along-Track-Interferometrie kann mit Hilfe eines Überflugs (Einpass) oder mit zwei Überflügen (Zweipass) des entsprechenden Gebietes durchgeführt werden. Die Einpass-Methode wird zum Beispiel beim E-SAR System bei den interferometrischen Messungen im X-Band durchgeführt. Bei den Satelliten ERS-1 und ERS-2 wurde die Zweipass-Methode verwendet, bei der die Daten aus zwei aufeinanderfolgenden (24 Stunden) Flügen mit leicht versetzter Flugbahn gewonnen wurden. Die Aufnahme wurde dabei jeweils von einer Antenne durchgeführt.

Ein wichtiger Faktor bei der Anwendung der Zweipass-Interferometrie spielt die Kohärenz zwischen den beiden Aufnahmen. Die Kohärenz ist ein Maß der Korrelation zwischen beiden Bildern (KLAUSING & HOLPP, 2000). Bei einem Kohärenzwert gleich null besteht keine Korrelation zwischen den Bildern. Im Gegensatz dazu bedeutet eine Kohärenz gleich eins eine sehr hohe Korrelation. Das Rückstreuverhalten hat dabei einen großen Einfluss auf den Kohärenzwert beider Aufnahmen. Bei keinen oder nur geringen Veränderungen hinsichtlich des Rückstreuverhaltens kann mit hohen Kohärenzwerten gerechnet werden. Treten allerdings größere Veränderungen wie zum Beispiel durch Veränderungen der Vegetation, Feuchtigkeit oder zum Beispiel Regen auf, sind meist niedrige Kohärenzwerte die Folge. Dies kann sogar dazu führen, dass die Phase nicht ausgewertet werden kann.

Nach KLAUSING & HOLPP (2000) lässt sich für die Kohärenz bei der Zweipass-Interferometrie folgendes feststellen:

- Eine höhere Kohärenz kann bei größerer Wellenlänge (L-Band) als bei kleinerer Wellenlänge (X-Band) erzielt werden
- Vegetation, bzw. Waldgebiete haben vor allem im Bereich des X-Band geringe Kohärenzwerte ($<0,3$).
- Trockene, steinige Böden weisen hohe Kohärenzwerte auf.

Weitere Ausführungen zu den Grundlagen der SAR-Interferometrie finden sich in MADSEN ET AL. (1993, 1995); MADSEN (1995); BAMLER & HARTL (1998) und KLAUSING & HOLPP (2000).

2.3.5 Radar-Rückstreuungsprozesse im Wald

Für die Erfassung der Sturmflächen innerhalb des Waldes ist auch das Radar-Rückstreuverhalten eine sehr wichtige Komponente. Waldbestände werden in der Regel als heterogene Medien betrachtet, wobei der Wald entweder als Folge von kontinuierlichen horizontalen Schichten (RICHARDS ET AL., 1987; DURDEN ET AL., 1989; SUN & SIMMONETT, 1988; ULABY ET AL., 1990 und CHAUHAN ET AL., 1991) oder auch als nicht kontinuierliche Schichten mit einzelnen Bäumen und getrennten Streuzentren (SUN ET AL., 1991; MCDONALD & ULABY, 1993) charakterisiert wird. Folgende Rückstreuungsprozesse können nach ULABY ET AL. (1982) in Waldbeständen unterschieden werden:

- Volumenstreuung an der obersten Baumschicht (Blätter, Zweige, Äste, Stammteile)
- Oberflächenstreuung an der Bodenoberfläche (z.B. Boden, Wasser, Steine, Krautschicht)
- Mehrfachstreuung – Kombination aus Oberflächen- und Volumenstreuung. Verursacht durch die Wechselbeziehungen zwischen Vegetation und Bodenoberfläche. Dazu zählt auch der sog. double bounce Effekt, d.h. doppelte Reflexion an Bodenoberfläche und Baumstamm in der Art eines Winkelreflektors

Wie schon in Kapitel 2.3.2 erläutert, sind die vom Radarsensor verwendete Frequenz, der Einfallswinkel und die Polarisierung aber auch die Vegetationsdichte, Höhe der Vegetationsschicht und der Feuchtgehalt (ULABY ET AL., 1982) maßgeblich für die Rückstreuung in Vegetationsflächen verantwortlich.

2.4 Praxis der Sturmschadenserfassung

2.4.1 Baden-Württemberg

2.4.1.1 Bundeswehrebefliegung und Luftbildbefliegung der Forstverwaltung

Die Situation nach „Lothar“ war vor allem für die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg sehr dramatisch. Die Frage nach dem Ausmaß der Schäden, der Planung der Aufarbeitung oder der Befahrbarkeit der Waldwege standen im Vordergrund. Wie sollte man sich einen Überblick über die derzeitige Situation verschaffen? Viele Waldwege waren wegen umgestürzter Bäume und in höheren Lagen durch Schnee unpassierbar.

Einen ersten Überblick über die Gesamtsituation bekamen die Forstamtsleiter, Revierleiter und Büroleiter mit Hilfe von Helikopterflügen, bei denen sie sich die Situation von oben betrachten konnten. Nach dieser Aktion wurde auch schnell der Ruf nach Luftbildern sehr groß.

Auf Initiative der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg wurde eine Anfrage nach einer Luftbild-Befliegung der Starkschadengebiete an die Bundeswehr gerichtet. Diese erklärte sich gleich bereit, der Landesforstverwaltung zu helfen. Am 10. Februar erfolgte die Befliegung unter günstigen Wetterbedingungen mit einer Boeing 707, die von den amerikanischen Streitkräften ausgeliehen wurde. Der Aufnahmezeitpunkt war Mittag bis Nachmittag. Als Film wurde ein Schwarz-Weiß-Film verwendet, der eine Bodenauflösung von ca. 1 m hatte.

Zusätzlich zu den Luftbildern der Bundeswehr-Befliegung wurde von der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg im Sommer 2000 eine eigene Befliegung in Auftrag gegeben. Nach Koordinierungsgesprächen mit dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (LVA), welches in einem 5-jährigen Turnus ganz Baden-Württemberg mit Luftbildern abdeckt und auch im Jahr 2000 den sogenannten Befliegungsblock B (vom Rhein bis in die Mitte des Schwarzwaldes und der Raum nördlich von Karlsruhe bis südlich von Freiburg) geplant hatte, wurden die noch zu befliegenden Gebiete für Baden-Württemberg von der Luftbildstelle der Landesforstverwaltung ermittelt, um mögliche Doppelbefliegungen zu vermeiden.

Die Ausschreibungskriterien ähnelten dabei jenen des Landesvermessungsamtes und werden nachfolgend dargestellt:

- Vergabedatum: 12. Mai 2000
- Filmmaterial: Schwarz-Weiß-Infrarotfilm
- Maßstab: 1:18.000 in Anlehnung an das Landesvermessungsamt
- Längsüberdeckung: 60%, Querüberdeckung: 30%
- Flugstreifenverlauf: Ost-West-Richtung
- Aufnahmezeit: zum frühesten möglichen Zeitpunkt nach Laubausbruch
- Herstellung von Orthofotos im Bildmaßstab 1:10.000 und dem TK50-Raster

Zusätzlich zu den genannten Kriterien wurden die zu befliegenden Gebiete in 7 Lose eingeteilt, die jeweils wiederum in Gebiete erster und zweiter Priorität unterteilt wurden.

Für die Gebiete erster Priorität wurde der 1. August 2000 als Abnahmetermin festgesetzt, für die Gebiete zweiter Priorität sollten fertige Orthofotos zum 1. Oktober 2000 vorliegen.

Die Luftbilder aus der Bundeswehrebefliegung standen ab Ende März 2000 der Landesforstverwaltung zur Verfügung und wurden umgehend an die betroffenen Forstämter ausgeliefert.

Bei der Auswertung des Bildmaterials zeigte sich aber, dass die Qualität der Bilder als nicht optimal bezeichnet werden konnte. So waren die Bilder nicht für das Objekt Wald entsprechend aufbereitet. Weiteren Einfluss auf die mindere Bildqualität war die tief stehende Sonne zum Aufnahmezeitpunkt. Es fanden sich viele Bereiche mit größeren Schlagschatten in den Bildern, die dort eine Auswertung nicht zuließen. Diese Effekte wurden durch Topologieeinflüsse entsprechend verstärkt. Vor allem die Unterscheidung zwischen dem Schatten stehender Bäume und den durch Sturm geworfenen Stämmen, war nicht möglich. Auch der in den höheren Lagen noch immer vorhandene Schnee erschwerte die Differenzierung der Sturmflächen sehr.

Ein weiteres Problem bestand darin, dass für eine Orthorektifizierung der Daten die entsprechenden Kalibrierungsprotokolle der Aufnahmekamera nicht zur Verfügung standen. Allerdings war eine Entzerrung der Bilddaten nicht geplant. Geliefert wurden unentzerrte Papierabzüge im Format 30 x 30 cm mit einem Maßstab von ca. 1:10.000.

Trotzdem waren die Forstdirektion Freiburg und natürlich auch die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg sehr erfreut über die ihnen so schnell zur Verfügung stehenden Daten, die zudem keinen finanziellen Aufwand seitens der Forstverwaltung bedeuteten. Auch für die Planung der Strategien zur Aufarbeitung des Sturmholzes waren die Luftbilder der Bundeswehr-Befliegung von hohem Nutzen.

Bezüglich der von der Landesforstverwaltung in Auftrag gegebenen Luftbild-Befliegung wurden folgende Erfahrungen gemacht:

Das Ausschreibungsdatum der Luftbildbefliegung war erst der 5. Mai 2000, mehr als 5 Monate nach dem Sturmereignis.

Nach einer ersten Auswertung des Bildmaterials wurden Mängel bezüglich der Bildqualität deutlich. Die Luftbilder waren sehr kontrastarm und deutlich diffuser als die Bilder des Landesvermessungsamtes. Eine nachträgliche Bildbearbeitung konnte zwar kontrastreichere und in der Gradation veränderte Ergebnisse liefern, aber letztendlich war das Ausgangsmaterial schon mit zu deutlichen Mängeln behaftet.

Die Liefertermine konnten von den Befliegungsfirmen in den meisten Fällen nicht eingehalten werden. Dadurch konnten die ersten Luftbilder im September 2000 und die

letzten Luftbilder erst im März 2001 an die Forstämter ausgeliefert werden. Auch die Qualität der Orthorektifizierung und Nachbearbeitung der Luftbilder war in einigen Fällen nicht gut genug. Seitens der Forstverwaltung mussten hier eigene Fehler eingeräumt werden. So hätte den Firmen, die für die Orthorektifizierung und Nachbearbeitung der Luftbilder zuständig waren, ALK-Daten als Grundlage zur Orthorektifizierung zur Verfügung gestellt werden können. Zum Teil wurde für die Orthorektifizierung auf digitale topografische Karten mit einem Maßstab von 1:25.000 zurückgegriffen.

Der gewählte Maßstab sowohl für die Befliegung als auch für die Orthofotos und die Verwendung eines Schwarz-Weiß-Infrarotfilms war nach Einschätzung von Fachleuten richtig gewählt. Eine Einteilung der Befliegungsgebiete in einzelne Lose wurde für sinnvoll erachtet. Auch die routinemäßige Befliegung eines Gebietes durch das Landesvermessungsamt wurde als sehr hilfreich erachtet.

Da die Bundeswehr zeitlich nur eingeschränkt zur Verfügung stand, war der Zeitpunkt der Befliegung eher ungünstig (Befliegung am Nachmittag – Schlagschatten). Trotzdem war eine Auswertung der Bilder möglich und sie dienten als erste Orientierung für die Forstämter, lange bevor erste Luftbildern aus der eigenen Befliegung der Landesforstverwaltung verfügbar waren. Von der Bundeswehr wurde die Befliegung als ein sinnvoller und nützlicher Beitrag zur Erfassung von jedweden Umweltschäden erkannt

Bei einer entsprechenden Katastrophe wird man durchaus wieder bei der Bundeswehr um Hilfe nachfragen.

Hinsichtlich der von der Forstverwaltung in Auftrag gegebenen Befliegung lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Das wichtigste Ziel für die Zukunft liegt darin, die verfügbaren Fernerkundungsdaten wesentlich schneller nach dem Sturmereignis auf die Forstämter zu bringen, als nach „Lothar“ geschehen. Da für die Ausschreibung von Bildflügen sowie weitere Folgearbeiten bisher keine große Erfahrung seitens der Luftbildstelle bestand, wurden mittlerweile neue Konzepte entwickelt, die bessere Ausschreibungskriterien festlegen und eine bessere Kontrolle des Luftbildmaterials gewährleisten. Diese Konzepte sollen aber nicht nur eine bessere Qualität des Luftbildmaterials, sondern auch einen beschleunigten Prozess von der Planung der Luftbildbefliegung bis zur Auslieferung der Luftbilder an die Forstämter gewährleisten.

Ferner soll eine Datenbank, in der potentielle Subunternehmen, wie z.B. Befliegungsfirmen und Firmen für die Nachbearbeitung, aufgelistet sind, erstellt werden.

2.4.1.2 Erfassungskonzept der Forstverwaltung

Für die Erfassung der Sturmflächen waren nur geringe Personalreserven aus der Forsteinrichtung verfügbar. Daraufhin wurden landesweit 17 Stellen mit Zeitverträgen begrenzt auf 2 Jahre geschaffen. Diese konnten ihre Arbeit zum 1. Juli 2000 aufnehmen. Für

die Erfassung wurden diese vom Fachbereich FGeo der Forstdirektion Freiburg mit Karten und wenn möglich mit analogen Luftbildern ausgestattet. Im Zuge einer möglichst schnellen Wiederbewaldungsplanung wurden die Sturmflächen von den Einrichtern vorab mit Hilfe von Luftbildern ausgewiesen, terrestrisch aufgenommen und in vorhandenes Kartenmaterial eingetragen. Zum Teil waren die Luftbilder in kein Koordinatensystem eingebunden. Wo keine Luftbilder vorhanden waren, mussten die Sturmflächen mit Handbussole und Schrittmaß kartiert werden. Die Mindestgröße für Sturmflächen betrug 0,3 ha. Nachdem Orthofotos zur Verfügung standen, konnte schon vorab im Büro die Grenzlinie einer Sturmfläche auf einer Kartenfolie eingezeichnet werden.

Eine Erfassung der Sturmflächen am Monitor war nicht geplant, da hierfür keine Arbeitsplätze zur Verfügung standen und der Aufwand von Software-Schulungen für das mit Zeitverträgen ausgestattete Personal als nicht gerechtfertigt erschien.

Da manche Forstämter im Zuge der Forsteinrichtung im Jahr 1999 bereits eingerichtet wurden, fand durch den Orkan „Lothar“ eine doppelte Erfassung statt, was einen erheblichen Mehraufwand seitens der Forsteinrichter und des Fachbereichs FGeo der Forstdirektion Freiburg erforderte. Die dem Personal auf Zeit zur Verfügung stehenden 24 Monate reichten gerade aus, um diesen zusätzlichen Aufwand abzudecken. Orthofotos waren nicht überall rechtzeitig verfügbar. Die Erfassung von Sturmflächen bis zu einer Mindestgröße von 0,3 ha vergrößerte den Aufwand der Außendienstmitarbeiter erheblich.

Für die Erfassung der Sturmflächen hätte man sich mehr Zeit nehmen sollen auch in Hinsicht auf eine Wiederbewaldungsplanung, bis zumindest die Orthofotos im Maßstab 1:10.000 zur Verfügung gestanden hätten. Dadurch hätte man sich doppelte Arbeitsschritte ersparen und schneller bessere Ergebnisse erzielen können.

Grundsätzlich sollten 4 bis 6 Wochen nach dem Schadereignis Luftbilder zur Verfügung stehen die Sturmflächen bis zu einer Mindestgröße von ca. 2 ha ausweisen, um die Planung der Aufarbeitungsstrategie, Holztransport, Absatzplanung, Unternehmereinsatz usw. schneller vorantreiben zu können.

Mit den bereits digitalisierten Bestandesflächen und einer Verschneidung mit den kartierten Sturmflächen sind gezielte Aussagen über anfallendes Holzvolumen (Schäden), betroffene Baumarten, betroffene Altersklassen, Aussagen über Laubholz-, Nadelholzanteil, Aussagen über verschiedene Sortierungen möglich. Dafür sollte auch in der Vorplanung schon ein entsprechendes Konzept entwickelt werden, um die GIS-Auswertung vorzubereiten. Das ganze System steht und fällt aber damit, dass das entsprechende Bildmaterial mit der genannten Genauigkeit und in dem entsprechenden Zeitraum zur Verfügung stehen muss.

2.4.2 Frankreich

In Frankreich waren die stärksten Sturmschäden innerhalb des Waldes durch die Orkane „Lothar“ und „Martin“ vom 26.-28.12.1999 zu beklagen, gefolgt von Deutschland und der Schweiz. Insgesamt mehr als 130 Mio. m³ Sturmholz wurde geschätzt.

Am stärksten davon war u.a. die Region Lorraine (Lothringen) im Osten Frankreichs betroffen, wo 21 % der gesamten Waldfläche geworfen wurde (Tabelle 3).

Tabelle 3: Die von den Orkanen „Lothar“ und „Martin“ stark betroffenen Regionen in Frankreich (Quelle: IFN, 2003)

| Region | Schaden in Mio. m ³ Holz | Flächenanteil [%] |
|-----------|-------------------------------------|-------------------|
| Lorraine | 29,5 | 21 |
| Aquitaine | 27,7 | 20 |
| Limousin | 16,3 | 12 |

Die Sturmschäden wurden durch Interpretation von Satellitendaten und Luftbildern komplett kartiert. Die Satellitendaten wurden zur Bestimmung der Schäden in den flachen Waldgebieten und in homogenen Wäldern wie „*le massif landais*“ an der atlantischen Küste und „*le massif aquitain*“ verwendet. Zwei LANDSAT TM 5 Szenen vom 08.10.1999 und LANDSAT ETM vom 20.01.2000 Szenen wurden dafür verglichen und die Veränderungen der Waldflächen vor und nach dem Sturm kartiert. Die Schadensintensität wurde im Bezug auf die Restüberschirmung in fünf Klassen eingeteilt:

0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80% und 80-100%

Ein automatisches Verfahren zur Erkennung der Waldveränderung erlaubte die Herstellung eines Ergebnisbildes, welches radiometrische Veränderungen in Zusammenhang mit den Sturmschäden aufzeigt. Dieses Bild wurde über die Geländedaten validiert. Erst dann konnte ein Zusammenhang zwischen den radiometrischen Veränderungen und der Schadenintensität hergestellt werden. Diese Erfassungstechnik war schnell aber wenig Erfolg versprechend in Reliefzonen oder in Mischwäldern.

Für die übrigen Waldgebiete wurden Luftbilder verwendet. Obwohl die Schäden hier mit einem größeren Zeitaufwand zu identifizieren waren als in den Satellitendaten, haben die Luftbilder genauere und mehr Informationen über die Schäden geliefert. Je nach Region wurden insgesamt zwei verschiedene Luftbildtypen aufgenommen: Luftbilder im Maßstab 1:30.000 mit Schwarz-Weiß-Infrarotfilm und Luftbilder im Maßstab 1:25.000 mit Farb-Infrarotfilm. Die Befliegung wurde landesweit von der nationalen Forstbehörde IFN (Inventaire Forestier National) durchgeführt. Bei der Kartierung der Bestände wurden vier verschiedenen Klassen ausgeschieden.

Diese sind:

- Intakte Bestände: 0 – 10% Schäden
- Bestände mit schwachen bis mittleren Schäden: 10 – 50% Schäden
- Bestände mit bedeutenden Schäden: 50 – 90% Schäden
- Bestände mit kompletten Schäden: 90 – 100% Schäden

Die Mindestkartierfläche betrug 1 Hektar.

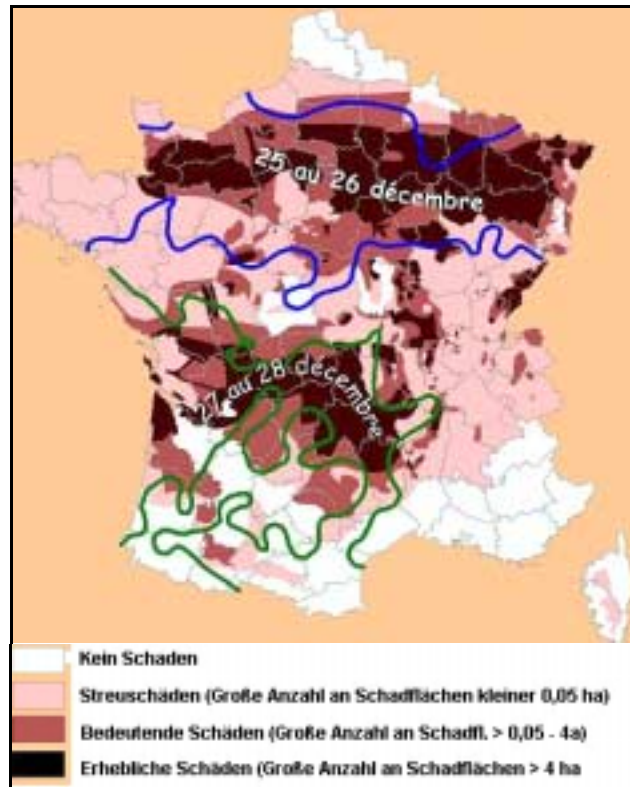


Abbildung 4: Schadensintensität in Frankreich (IFN, 2003, verändert)

2.4.3 Schweiz

Die Orkane „Lothar“ und „Martin“ (26.-27.12.1999) haben in der Schweiz zu großflächigen Schäden in Höhe von ca. 13 Mio. m³ Holz geführt. Am stärksten betroffen waren die Wälder des Schweizer Mittellands und der Voralpen (siehe Tabelle 4). Praktisch verschont blieb nur die Südschweiz (BUWAL, 2001). Im Vergleich dazu warfen die Stürme „Vivian“ und „Wiebke“ 1990 lediglich 4,9 Mio. m³ Holz.

Tabelle 4: Schadholtzanfall in der Schweiz in Folge der Orkane „Lothar“ und „Martin“ (BUWAL, 2001)

| Kanton | Schaden in Mio. m ³ Holz |
|----------|-------------------------------------|
| Bern | 4,5 |
| Aargau | 1,3 |
| Freiburg | 1,2 |
| Zürich | 1,1 |
| Luzern | 1,0 |

Für die landesweite Erfassung der Sturmschäden hat sich das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL) in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Forstdirektion für Luftbildbefliegungen mit einem durchschnittlichen Maßstab von 1:15.000 und für einen Normal-Farbfilm (AGFA Avipho Chrome 200 PE1) entschieden. Auf Veranlassung der eidgenössischen Forstdirektion gaben die betroffenen Kantone ihre Schadensmeldungen bzw. Flugwünsche an das Bundesamt für Landestopographie – Flugdienst Koordinationsstelle für Luftaufnahmen „Flugdienst/KSL“, weiter. Diese Meldungen bildeten die Grundlage der Flugplanung, welche von einem externen Ingenieurbüro in den Monaten Januar bis März 2000 durchgeführt wurde. Mit den zwei bundeseigenen Vermessungsflugzeugen konnten sämtliche 402 Fluglinien von März bis Ende Juli 2000 vom Flugdienst/KSL befliegen werden. Insgesamt wurden 10.338 Bilder auf 7.000 km Fluglinie aufgenommen. Bei einer Grobanalyse der Luftbilddaufnahmen zeigte sich aber auch, dass nicht alle Schadgebiete durch diese Aufnahmen abgedeckt wurden. Die Erfassung bzw. Kartierung der Schadflächen mit Hilfe der digitalen Luftbilder wurde anschließend von einem externen Dienstleister durchgeführt.

2.5 Erfassung von Sturmflächen mit Fernerkundungssystemen

Bereits vor dem aktuellen Sturmereignis 1999 führten Stürme der Jahre 1984 und 1990 in Süddeutschland und darüber hinaus zu großen Schäden in der Forstwirtschaft. Besonders aus Anlass des letzten Sturmes von Anfang 1990 wurden in mehreren Vorhaben Optionen einer fernerkundungsbasierten Schadenserfassung untersucht. Zielsetzung dieser Vorhaben war die Erfassung der Schadensflächen zur Erstellung von Schadenskarten.

Die Darstellung der bisherigen Erfahrungen folgt nach einer Aufteilung verwendeter Aufnahme-Sensoren für das Luftbild, optische Satellitendaten und Radardaten. In die Literaturanalyse sind ebenso Publikationen, welche die Erfassung der Schäden des Orkans „Lothar“ darstellen, eingeschlossen.

2.5.1 Sturmschadenserfassung mit dem Luftbild

Für Luftbilder liegen umfangreiche Erfahrungen bei der Interpretation und photogrammetrischen Auswertungen von Sturmschadflächen vor (HINRICHS ET AL., 1992; SCHERRER ET AL., 1994; KÖNIG, 1995; HILDEBRANDT, 1996; SCHMIDTKE ET AL., 1997; SCHERRER, 2000 und UN/ECE, 2000). Luftbildaufnahmen und Luftbilddauswertungen zur Erfassung der Sturmschäden wurden bisher als Alternative zur terrestrischen Erhebung bzw. in Kombination mit dieser eingesetzt. Die Wahl der Filmart und der Interpretationsmethode ist vom Schadausmaß und den weiteren Zielen im Rahmen der Schadenserhebung abhängig. Generell wurden Schwarz-Weiß-Filme verwendet, da sie genügend Informationen über Schäden abiotischer Ursachen, wie Sturm, liefern (UN/ECE, 2000). Der Bildmaßstab ist vom Schadtyp und der Schadensgröße abhängig. Für großflächige Erhebungen wurden Aufnahmen in den Maßstäben 1:15.000 - 1:30.000 befliegen. Bilder in den Maßstäben 1:5.000 - 1:15.000 wurden auch verwendet und waren für spezielle Fragestellungen gedacht. Nach den verheerenden Stürmen von 1990 („Vivian“ und „Wiebke“), fand in Baden-Württemberg eine flächendeckende Luftbildaufnahme im Maßstab 1:18.000 mit Schwarz-Weiß-Film statt. Auch in der Schweiz erfolgte eine Luftbildaufnahme im Maßstab 1:15.000 mit Farbfilmern (SCHERRER, 1993).

Bereits 1991 nach den Stürmen „Vivian“ und „Wiebke“ gab es für die Kartierung von Sturmschäden erste Empfehlungen zur Verwendung von Luftbildern aus Hochbefliegungsdaten (SIEDE, 1991). Dazu wurde in Luftbilder im Maßstab 1:26.500 mit Hilfe einer CAD-Software Sturmflächen kartiert. Anschließend war es möglich das damalige Forstliche Informationssystem zu aktualisieren.

Eine Aufnahme der Sturmschäden im Wald und deren Erfassung mit einem Schwarz-Weiß-Film in einem kleinen Maßstab von 1:36.000 wurde innerhalb des Projekts Sturmmmon, in dem diese Arbeit angesiedelt war, durchgeführt.

Die Kartierung der Sturmflächen wurde auf der Basis der Luftbilder analog vollzogen. Die Abgrenzung der Schadfläche erfolgte durch einfache Bildinterpretation mit Hilfe von Stereokartiergeräten, auf projektiv verzerrten Folien oder durch den Einsatz der analytischen Photogrammetrie. Dabei wurden GIS Daten als Hilfsmittel benutzt, um die Interpretationszeit zu verkürzen, Beziehungen zwischen geographischen Daten und existierenden Inventurdaten herzustellen und um Schadensbilanzen auf kleinster Ebene aufstellen zu können.

Eine manuelle Erfassung der Sturmflächen am Bildschirm sowie eine interaktive und automatisierte Erfassung mit digitalen Luftbildern wurde im Projekt Sturmmmon durchgeführt (RAMMINGER ET AL., 2004; SAIDANI, 2004). Dabei konnte gezeigt werden, dass eine visuelle Erfassung der Sturmflächen am Bildschirm mit Luftbildern im Maßstab 1:36.000 ab 0,5 ha möglich ist (SAIDANI, 2004). Bei der automatischen segmentbasierten Methode konnten Sturmflächen ebenfalls ermittelt werden, allerdings mit vergleichsweise geringeren Genauigkeiten.

2.5.2 Sturmschadenserfassung mit optischen Satellitendaten

Die Erfassung von Sturmschäden wurde bereits in mehreren wissenschaftlichen Untersuchungen erprobt.

Datenquellen in den Untersuchungen waren optische Satellitendaten von Landsat TM 5 (WIECZOREK, 1990; RÄHLMANN, 1991; FRITZ, 1991; KREMMERS, 1992; COENRADIE, 1992; KUNTZ & ZIMMERMANN, 1993 und DNR, 1999) mit Kartiermaßstäben von 1:50.000. Eine der angewandten Auswertemethoden der Landsat TM Daten war die visuelle Interpretation von Zeitserien (RÄHLMANN, 1991; KREMMERS, 1992; NELSON ET AL., 1994). RÄHLMANN (1991) verglich das multitemporale Verfahren mit der Verwendung nur einer Aufnahme. KREMMERS (1992) entwickelte ein Verfahren, in dem zusätzlich zu den Bilddaten eine aus der Komponente „Wetness“ der „Tasseled Cap Transformation“ abgeleitete schwellenwertbasierte Maske die Interpretation unterstützte. NELSON ET AL. (1994) führte eine Kartierung großer Schadflächen ab 30 ha Größe monotemporal durch.

Untersuchungen, die den Ansatz einer automatischen Klassifizierung verfolgten, konnten nur bei einem multitemporalen Ansatz erfolgreich durchgeführt werden (WIECZOREK, 1990; FRITZ, 1991; DNR, 1999). Es zeigte sich, dass Kahlschläge und deutliche Insektenschäden zu Fehlklassifizierungen führen können, die nur durch Zusatzinformationen ausgeschlossen werden können (SYLVANDER, 1983; COENRADIE, 1992).

Die erreichten Genauigkeiten der Schadenskarten betragen bei der visuellen Interpretation bis zu 97% ab einer Schadflächengröße von 0,1 ha (KREMMERS, 1992). Die Ansätze der automatischen Klassifizierung lagen deutlich unter diesem Wert, was auf die inhomogene Signatur der Schadensflächen und auf Probleme der Koregistrierung der Satellitendaten zurückgeführt wurde (WIECZOREK, 1990; RÄHLMANN, 1991; FRITZ, 1991; KREMMERS, 1992; COENRADIE, 1992).

Die Firma Remote Sensing Solutions (RSS) wurde von der Bayerischen Rückversicherungs-AG, München beauftragt, die Möglichkeiten moderner Fernerkundungsdaten für eine regionale Waldschadensanalyse zu untersuchen und daraus Modelle und Vorhersagen für zukünftige Sturmereignisse zu entwickeln (KUNTZ, 2000). Insgesamt wurde ein Gebiet von ca. 60.000 km² mit Satellitendaten von Landsat 5 und 7 nach dem Orkan „Lothar“ untersucht. Das Untersuchungsgebiet reichte dabei von Mannheim bis an den Alpenrand und von den Ostvogesen bis zur Schwäbischen Alb. Die Mindestgröße der zu kartierenden Sturmflächen lag bei 4 ha. Für die Erfassung der Sturmflächen wurde eine Waldmaske des Untersuchungsgebiets generiert. Daran schloss sich eine multitemporale (Daten vor und nach dem Sturm) Auswertung an. Das Ergebnis wurde anschließend klassifiziert und von Hand nachbearbeitet (Abbildung 5).

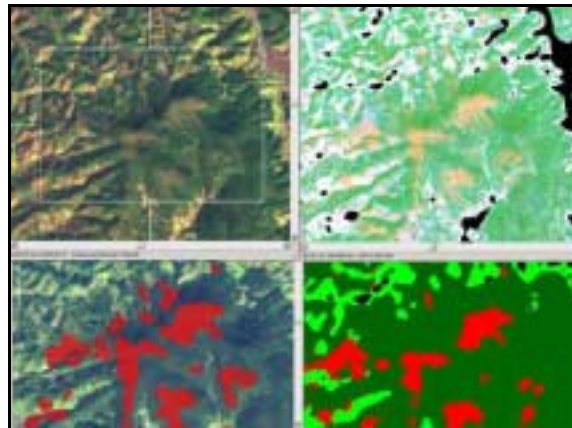


Abbildung 5: Aufnahmen nach dem Sturm (links oben), mit Waldmaske (rechts oben). Klassifizierte Sturmflächen (rechts unten) und die von Hand nachbearbeiteten Flächen (links unten). Prozessiert von der Remote Sensing Solutions GmbH (RSS).

Nach Auswertung der Daten wurden vor allem Schneeflächen und Wolken als Störquellen genannt, die zu einer Überschätzung der Sturmflächen führte. Schattenbereiche dagegen lieferten meist eine Unterschätzung der Fläche. Auch die vorhandenen Dunstschleier verschlechterten das Klassifizierungsergebnis. Eine Nachbearbeitung am Bildschirm schien daher als sehr sinnvoll.

Vor allem in Nadelwaldgebieten lieferte die angewandte Methodik gute Ergebnisse, die aber nicht auf Laubwaldgebiete übertragbar waren.

Von dem insgesamt 6.230.501 ha großen Untersuchungsgebiet waren 2.473.154 ha (39,7 %) bewaldet und eine Fläche von 11.271 ha (0,2 %) durch den Sturm „Lothar“ geschädigt.

An der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL wurde nach dem katastrophalen Orkan „Lothar“ ein Forschungsprojekt gestartet, welches von der eidgenössischen Forstdirektion initiiert wurde. Auch hier hatte das Projekt das Ziel, die Eignung moderner Fernerkundungsdaten und Bearbeitungsverfahren für die flächendeckende Erfassung von Sturmschäden abzuklären (STEINMEIER ET AL., 2002). Dabei ging es vor allem darum, mögliche Alternativen zur traditionellen Luftbildauswertung aufzuzeigen und diese hinsichtlich Kosten, Zeitaufwand und Genauigkeit zu überprüfen. Neben optischen Satellitendaten (IKONOS, LANDSAT7 und SPOT4) wurden auch Radarsysteme (ERS1/2, E-SAR) und zum Vergleich Luftbilder ausgewertet. Es zeigte sich dabei, dass die visuelle Erfassung von Sturmschäden mit hochauflösenden Satellitenbildern auf Basis des panchromatischen und nahen Infrarot-Kanals möglich ist (STEINMEIER ET AL., 2002). Bei der visuellen Delinierung war auch die Auswertung von Winterdaten möglich. Bei der automatischen Klassifizierung der optischen Satellitendaten zeigte sich, dass nur in Aufnahmen zum Zeitpunkt der Vegetationsperiode, Sturmschäden sicher erkannt wurden. Vor allem mit Hilfe von Daten des französischen Fernerkundungssatelliten Spot, konnten Sturmflächen gut erkannt werden.

Im Jahr 2002 wurden vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR IKONOS Daten für die örtliche Erfassung von Sturmschäden verwendet. Nach dem Föhnsturm „Uschi“ wurden die IKONOS Daten vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) bearbeitet und ausgewertet. Anschließend wurden Kartenprodukte an das Forstamt geliefert und diese für die Aufarbeitung eingesetzt. Mit Hilfe der Daten konnten besonders die kleineren Flächen lokalisiert werden (KEIL & STRUNZ, 2004). Die Verwendung dieser Fernerkundungsdaten für die weitere Planung der Aufarbeitung wurde als sehr sinnvoll und nützlich angesehen.

Innerhalb des Projekts Sturmmon konnte gezeigt werden, dass durch eine visuelle Interpretation optischer Satellitendaten sehr hohe Genauigkeiten bei der Erfassung der Sturmflächen ab einer Größe von 1 ha erzielt werden können (RAMMINGER ET AL., 2004). Vor allem die Verwendung sehr hochaufgelöster IKONOS Daten sowie simulierte Daten des französischen Fernerkundungssatelliten SPOT 5 konnte überzeugen. Auch automatische Segmentierungs- und Klassifizierungsansätze konnten für die Erfassung der Sturmflächen verwendet werden. Näheres kann dem Endbericht des Projekts Sturmmon (RAMMINGER ET AL., 2004) entnommen werden.

2.5.3 Sturmschadenserfassung mit Radardaten

Bei der Schweizer Firma Gamma Remote Sensing beschäftigt man sich schon länger mit der Prozessierung und Interpretation von Kohärenzdaten aus Radaraufnahmen. Dabei wurde auch eine Software entwickelt, die aus Daten von ERS-1 und ERS-2 die Kohärenzinformationen ableiten kann. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich wurden die ersten wirklich zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten nach dem Sturmereignis (Kohärenzdaten vom 09./10 Januar 2000) für die Erfassung von Sturmflächen ausgewertet. Für einen multitemporalen Ansatz, wurden zusätzlich ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten aus dem Jahr 1995 verwendet (WIESMANN ET AL., 2001).

Bereits in früheren Forschungsarbeiten (WEGMÜLLER & WERNER, 1995, 1997; STROZZI ET AL., 2000) konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2 Waldflächen von anderen Landnutzungstypen gut zu unterscheiden waren. Waldflächen werden dabei durch geringe Kohärenzwerte charakterisiert, während andere Landnutzungstypen höhere Werte aufweisen (WIESMANN ET AL., 2000). Es wurden zwei Testgebiete ausgewählt. Ein Testgebiet in der Schweiz zwischen dem Bieler See und Bern und das andere Testgebiet in Frankreich (Ussel Forest in Corrèze). Für beide Gebiete waren Luftbildinformationen und Terrestrische Zusatzinformationen vorhanden. In beiden Gebieten sind Nadelwälder dominierend. Sturmflächen wurden ab einer Mindestgröße von 4 ha erfasst.

Zusätzlich fand eine zweistufige Schadensunterteilung statt:

- Geringe Schäden im Bestand (0 – 50 % des Bestandes sind gefallen)
- Große Schäden (50 – 100 % des Bestandes sind gefallen)

Insgesamt konnten 89 % der stark betroffenen (> 50 %) Sturmflächen größer 4 ha mit Hilfe der Kohärenzdaten erfasst werden.

Ähnliche Ergebnisse mit ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten wurden auch in einem Forschungsprojekt an der „SERTIT“ in Frankreich erzielt (DWYER ET AL., 2000; HERRMANN ET AL., 2000; YESOU ET AL., 2000; WIESMANN ET AL., 2001).

Zusammen mit der Schweizer Firma SARMAP, dem Remote Sensing Laboratory (RSL) und der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL in Birmensdorf wurden ebenfalls ERS-1/2 Kohärenzdaten untersucht. Während kleinere Sturmflächen mit 2-3 ha nur schwer erkannt wurden, war die Erfassung bei größeren Sturmflächen möglich (DWYER ET AL., 2000).

In Zürich wurden verschiedene Radarsysteme auf ihre Tauglichkeit zur Erfassung von Sturmflächen untersucht.

Zusätzlich zu den Daten von ERS standen auch hochauflösende flugzeuggetragene Radardaten zur Verfügung, die von der Firma SARMAP prozessiert und an der WSL ausgewertet (X-Band, P-Band) oder am RSL in Zürich bearbeitet wurden (L-Band). Untersucht wurden hier auch die Kohärenzinformationen sowie die Rückstreuwerte. Während in den Rückstreuwerten kaum oder keine Unterschiede zwischen intakten Waldbeständen und Sturmflächen erkannt werden konnte, waren die Unterschiede in den Kohärenzdaten des X-Bandes deutlich zu erkennen (STEINMEIER ET AL., 2002). Mit den Kohärenzdaten im P-Band mit einer Auflösung von ca. 4 m konnten keine Sturmflächen erfasst werden. Hierbei hofft man allerdings auf eine Auswertung voll polarimetrischer Daten, die bessere Ergebnisse liefern sollen.

3 Analyse der Nutzeranforderungen der Forstverwaltung Baden-Württemberg an eine Sturmschadenserfassung

3.1 Übersicht

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die Erfassung der Sturmflächen mit den aufgestellten Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zu vergleichen. Aus diesem Grund werden die Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, die im Rahmen des Projekts Sturmmon aufgestellt wurden, im Folgenden erläutert.

3.2 Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg

Als Ansatz wurde eine zweistufige Anforderung definiert. Auf der einen Seite sollte ein Überblick über das Schadausmaß mit Hilfe der Fernerkundungsdaten (vor allem satellitenbasierte Radardaten) innerhalb von 3 Wochen nach dem Schadereignis zur Verfügung stehen. Daran sollte sich eine genaue Kartierung der Schäden (mit flugzeuggetragene Radardaten, aber auch optische Satellitendaten und Luftbilder) anschließen. Ferner ist diese Zweistufigkeit darin begründet, dass zwar davon ausgegangen wurde, dass eine echte Kartierung zwar bereits zu einem frühen Zeitpunkt wünschenswert wäre, aber eine technische Realisierbarkeit dagegen eher unsicher erschien.

Folgende Vorgaben wurden gemacht:

Ermittlung folgender Schadstufen:

- Klasse 1: flächige Schäden, Restüberschirmung 0-10 %
- Klasse 2: starke Schäden, Restüberschirmung 10-50 %
- Klasse 3: mittlere Schäden, Restüberschirmung 50-70 %
- Klasse 4 geringe Schäden und Einzelwürfe, Restüberschirmung größer 70 %
- keine Differenzierung nach Überschirmung vor dem Sturm bei der Interpretation

Zweistufige Definition der Nutzeranforderung:

- Stufe 1: Erfassung des Schadensausmaßes
- Stufe 2: Kartierung der Schadflächen

Für beide Stufen ist eine Kartierung erforderlich, die bloße Lieferung von Bildprodukten ist nicht ausreichend, zur Ergänzung aber wünschenswert.

Die Anforderungen an die Produkte wurden differenziert für beide Stufen definiert. Die Festlegungen werden in Tabelle 5 und Tabelle 6 erläutert.

Folgende Anforderungen sind hervorzuheben:

- Bei der Erfassung des Schadausmaßes liegt die Mindestfläche bei 1,0 ha, bei der Kartierung bei 0,5 ha.
- Bei der Kartierung sind lediglich die Klassen 1 und 2, somit Schäden von über 50 % von Bedeutung.
- Die Genauigkeitsanforderung wurde auf 90 %, bezogen auf die Anzahl der Flächen und auf 70 % Flächengenauigkeit (d.h. bezogen auf die kartierte Fläche) festgelegt.
- Die Schadklassen 3 und 4 spielen keine praktische Rolle mehr, da sie für die Erfassung des Schadausmaßes zwar nützlich, aber nicht essentiell sind und deren Erfassung mit den schnellen Varianten nicht möglich ist. Für die Kartierung sind sie nicht mehr von Bedeutung, da bei über 50 % Restüberschirmung Pflanzungen nicht zwingend erforderlich sind, und da bei der Forsteinrichtung hier nicht zwingend die Ausscheidung eines neuen Bestandes erfolgt.
- Ein weiteres wichtiges Merkmal ist der Zustand der Befahrung, der für die Wiederbewaldung eine große Rolle spielt.

Tabelle 5: Nutzeranforderungen an eine „Erfassung des Schadensausmaßes“

| Kurzcharakterisierung | Übersicht über Schadensausmaß und Schadverteilung |
|--|--|
| Produkte | <ul style="list-style-type: none"> • Karte über Verteilung der Sturmschäden (Flächen, Massen, Massen nach Baumarten und Sorten) nach Forstbezirken für übergeordnete Stellen (Ministerium, Forstdirektionen) • Karte über Verteilung der Sturmschäden für die Verwaltungsebene Forstamt, Forstrevier |
| Zweck | <ul style="list-style-type: none"> • Logistische Planung der Aufarbeitung auf Forstamts- und übergeordneter Ebene • Planung der Vermarktung und Planung von Notmaßnahmen auf Forstdirektions- und Ministeriumsebene • Informationsgrundlage für das Forstschaden-Ausgleichsgesetz |
| Zeitliche Anforderung | <ul style="list-style-type: none"> • Optimal nach 2 Wochen • Spätestens nach 2 Monaten |
| Genauigkeitsanforderungen an die Flächenerfassung | <ul style="list-style-type: none"> • mindestens 70 % der Fläche der jeweiligen Schadklasse • mindestens 90 % der Schadflächen der jeweiligen Schadklasse (nach der Anzahl) • Abgrenzung der Flächen in Entwurfsqualität ausreichend (Forsteinrichtungsqualität nicht erforderlich) |
| Mindestanforderung an die Kartierung | <ul style="list-style-type: none"> • Flächige Schäden ab 1 ha; Definition: Restüberschirmung $\leq 10\%$ (Schadklasse 1) |
| Merkmale mit hoher Priorität | <ul style="list-style-type: none"> • Flächige Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung $\leq 10\%$ (Schadklasse 1) • Starke Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung $> 10\%$ bis $\leq 50\%$ (Schadklasse 2) • Schadensart (Anteil Bruch, Wurf) • Wurfrichtung |
| Merkmale mit mittlerer Priorität | <ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung $> 50\%$ bis $\leq 70\%$ (Schadklasse 3) • Geringe Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung $> 70\%$ bis $< 100\%$ (Schadklasse 4) |
| Abgeleitete Merkmale mit hoher Priorität | <ul style="list-style-type: none"> • Massen nach Baumarten/ Sorten je Fläche und je Forstamt |
| Orthobild mit mittlerer Priorität | <p>Digital und als Karte. Die Notwendigkeit zur Lieferung als Karte ist abhängig von der EDV Ausstattung der Forstverwaltung. Ab 2005 ist nach der Einführung des Systems FoGIS in neuer Form eine digitale Bereitstellung ausreichend.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eröffnet zusätzliche Interpretationsmöglichkeiten. • Es ist von Vorteil das Orthobild vor eine Kartierung zu liefern, falls das Orthobild früher als die Kartierung ausgeliefert werden kann. • Diese Option ist nur sinnvoll, wenn die Interpretation durch forstliche Praktiker ohne vorherige Schulung erfolgen kann. |

Tabelle 6: Nutzeranforderungen an eine „Kartierung der Schadflächen“

| Kurzcharakterisierung | Kartierung der Schadflächen mit Forsteinrichtungsgenauigkeit |
|--|---|
| Zweck | <ul style="list-style-type: none"> • Für die Wiederbewaldungsplanung, • Forstgis-, Forstkarten- und Forstseinrichtungserneuerung • Erfassung von Flächen für Fördermaßnahmen (Zuschüsse für Wiederbewaldungsmaßnahmen) |
| Zeitliche Anforderung | <ul style="list-style-type: none"> • optimal so früh als möglich • spätestens Im Juni/Juli nach dem Sturmereignis (z.B. bei „Lothar“ nach 7 Monaten) |
| Genauigkeitsanforderungen an die Flächenerfassung | <ul style="list-style-type: none"> • Planungskarte mit Genauigkeit der Forsteinrichtung • 100 % der Anzahl • 80-90 % Übereinstimmung bei der Flächenausscheidung zwischen Kartierung und unabhängig kartierter Referenzkartierung (entsprechend nahezu 100% Genauigkeit) • Abgrenzung der Flächen in Entwurfsqualität ausreichend (Forsteinrichtungsqualität nicht erforderlich, aber von Vorteil) |
| Mindestanforderung | <ul style="list-style-type: none"> • Flächige Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung <= 10 % • Starke Schäden ab 0,5 ha; Definition: Restüberschirmung 10 % bis <= 50 % |
| Merkmale mit hoher Priorität | <ul style="list-style-type: none"> • Befahrung: Fahrspuren, Fahrtrassen auf der Fläche |
| Orthobild mit mittlerer Priorität | <p>Digital und als Karte. Die Notwendigkeit zur Lieferung als Karte ist abhängig von der EDV Ausstattung der Forstverwaltung. Ab 2005 ist nach der Einführung des Systems FoGIS in neuer Form eine digitale Bereitstellung ausreichend.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eröffnet zusätzliche Interpretationsmöglichkeiten. • Es ist von Vorteil das Orthobild vor eine Kartierung zu liefern, falls das Orthobild früher als die Kartierung ausgeliefert werden kann. • Diese Option ist nur sinnvoll, wenn die Interpretation durch forstlichen Praktiker ohne vorherige Schulung erfolgen kann. |

4 Untersuchungsgebiete

4.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Wichtigste Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsgebiete waren:

- starke Schäden innerhalb des Waldes durch den Orkan „Lothar“
- Region Schwarzwald, da er besonders stark betroffen war und als höchstes Mittelgebirge Baden-Württembergs für die Fernerkundung die schwierigsten Bedingungen aufweist.
- Vorliegen digitaler FoGIS Daten, um die darauf basierenden Methoden entwickeln zu können.

Es wurden daher zunächst 3 Forstbezirke im Starkschadagebiet Schwarzwald, ausgewählt (Abbildung 6, entnommen aus Endbericht Projekt Sturmmmon).

Für zwei Radaroptionen wurde zusätzlich ein Gebiet in der Rheinebene ausgewählt, da mit diesen Radardaten Teilaspekte der Untersuchung nur hier möglich waren. Die drei Forstbezirke im Schwarzwald bilden das Untersuchungsgebiet 1: Die Forstbezirke Kenzingen, Ettenheim, Lahr, Wuchsgebiet Schwarzwald. Teile der Forstbezirke Lahr, (Kehl) und Offenburg in der Rheinebene im Wuchsgebiet Oberrheinisches Tiefland gelegen bilden das zusätzliche Untersuchungsgebiet 2. Für dieses Gebiet lagen allerdings keine FoGIS Daten vor.

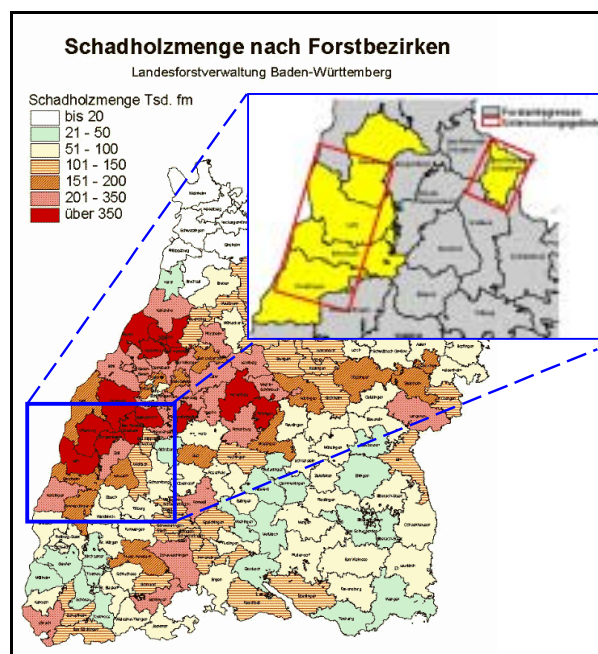


Abbildung 6: Lage der Untersuchungsgebiete im Starkschadagebiet Schwarzwald. Die ausgewählten Forstbezirke sind im Kartenausschnitt hell dargestellt, Ausnahme der Forstbezirk Bad Rippoldsau-Schapbach, der innerhalb des Projekts Sturmmmon nicht aber in der vorliegenden Arbeit als Untersuchungsgebiet diente (Quelle: Landesforstverwaltung)

4.2 Gebiet 1 – Forstbezirke Ettenheim, Kenzingen Lahr

Das Untersuchungsgebiet liegt am Westabfall des Schwarzwalds im Wuchsbezirk 3/03 und umfasst Teile der Forstbezirke Lahr, Ettenheim und Kenzingen. Es weist großflächige Laub- und Nadelwaldbestände auf und ist mäßig bis stark kupert. Das Gebiet reicht von ca. 200 bis 500 m HNN. Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt dabei ca. 8° - 10° C und im Mittel fallen 850 – 1000 mm Niederschlag pro Jahr. Es dominieren Buntsandstein, lehmige Sande und Mischlehme. Die Standorte sind vor allem als mäßig trocken, mäßig frisch bis frisch klassifiziert. Kolline (atlantisch kolliner Buchenwald) und Submontane (atlantisch submontaner Buchen-Eichen-Tannenwald) Wälder dominieren das Untersuchungsgebiet². Nachfolgend werden einige mit Hilfe der FoGIS Daten und des DHM des Landesvermessungsamtes erhobenen Gelände-, Bestandes- und Baumartenparameter bezogen auf das Untersuchungsgebiet sowie auf die vom Sturm betroffenen Flächen dargestellt (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

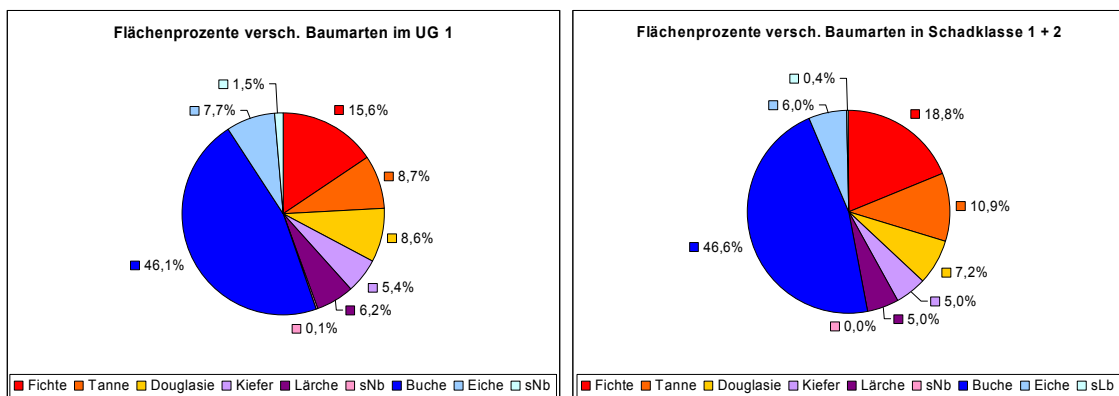


Abbildung 7: Flächenanteil verschiedener Baumarten im Untersuchungsgebiet 1 (links) und an den vom Sturm betroffenen Gebieten (rechts)

² Daten aus 3 Forsteinrichtungswerken (Staatwald Kenzingen, Ettenheim und Lahr) aus den Jahren 1998 bis 2002

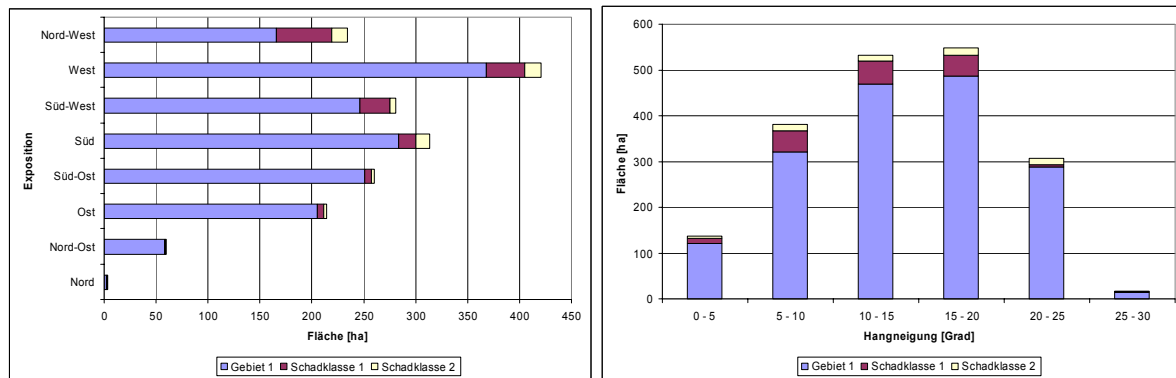


Abbildung 8: Flächenanteil der Sturmschäden (Klasse 1 und 2) sowie der intakten Waldbestände in Gebiet 1 bezüglich der Exposition (links) und der Hangneigung (rechts)

Am stärksten vom Sturm betroffen waren Buche und Fichte, die im Untersuchungsgebiet auch die größten Flächen einnehmen. Die Sturmschäden traten vor allem an Nord-West, West und Süd-West exponierten Lagen bei mittleren Hangneigungen von 5° - 20° auf.

4.3 Gebiet 2 – Rheinebene bei Offenburg

Das Untersuchungsgebiet westlich und südwestlich von Offenburg liegt im Wuchsgebiet 1 Oberrheinisches Tiefland und reicht bis hinunter nach Kappel und Grafenhausen. Das Gebiet zeichnet sich durch einfache Geländeverhältnisse aus. Laub- und Mischwaldgebiete dominieren dabei das Bild. Da für dieses Gebiet keine FoGIS Daten zur Verfügung standen, musste auf die GIS-Analysen hier verzichtet werden.

5 Verwendete Daten, Hard- und Software

5.1 Radardaten

Für eine Erfassung der von der Landesforstverwaltung geforderten Mindestschadflächengröße von 0,5 ha, war die Verwendung hochauflösender und sehr hochauflösender Radar-Systeme notwendig. Dies kann im Moment nur durch speziell geplante Befliegungen möglich gemacht werden. Da aber auch nach dem Schadereignis schnell verfügbare Optionen getestet werden sollten, wurde auch auf Daten satellitenbasierter Radarsysteme zurückgegriffen um deren Eignung für eine schnelle Erfassung der Sturmflächen zu testen. In naher Zukunft steht mit dem satellitengetragenen TerraSAR auch ein geometrisch sehr hochaufgelöstes weltraumbasiertes Radarferner-kundungssystem zur Verfügung.

Bei den satellitengetragenen Radardaten konnten multitemporale Daten von jeweils zwei verschiedenen Zeitpunkten herangezogen werden (Tabelle 7). Die flugzeuggetragenen Daten stammen aus einer Befliegung für das Untersuchungsgebiet Ettenheim im April 2000.

Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Radardaten

| Sensor | Aufnahmedatum | Szenengröße [km] | UG | Auflösung [m] | Band | Plattform |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------|---------------|------------|------------------|
| ERS 1, ERS 2 | 31.10. und 01.11.1999 | 100 x 100 | G2 | 25 x 25 | C-Band | Satellit |
| | 09./10.01.2000 | | | | | |
| Radarsat | 03.11.1999 | 45 x 90 | G1+G2 | 8 x 8 | C-Band | Satellit |
| | 08.12.2000 | | | | | |
| ESAR | 03.04.2000 | 3 x 9,5 | G1 | ca. 2 x 2 | X-, L-Band | Flugzeug |
| TerraSAR | 03.04.2000 | 3 x 9,5 | G1 | ca. 5 x 5 | X-, L-Band | Simulierte Daten |

5.1.1 E-SAR Daten

In die Untersuchung mit eingebunden wurden flugzeuggetragene E-SAR Daten oder auch Experimental Airborne SAR Daten. Das E-SAR System wurde im Rahmen einer längeren Forschungskampagne am Institut für Hochfrequenztechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Erprobung und Entwicklung neuer Technologien und Algorithmen für die Radarfernerkundung (HORN, 1996) an Bord eines Flugzeugs der Marke Do-228 entwickelt und ständig verbessert.

Das erste entwickelte E-SAR-System konnte 1989 Daten im C- und X-Band Bereich aufnehmen und kam in den 90er Jahren bei verschiedenen Missionen (SIR-C/X-SAR, ERS-1,

u.a.) zum Einsatz. 1994 kam das P-Band und 1995 das L-Band hinzu. Komplettiert wird das multifrequente und multipolarimetrische (HH-, VV-, HV- und VH-Polarisation) Radarsystem von einem Sensor für das S-Band. Die wichtigsten technischen Daten des E-SAR Systems können Tabelle 8 entnommen werden (INFOTERRA, 2002a).

Tabelle 8: Technische Daten E-SAR

| Band | X-Band | C-Band | L-Band | P-Band |
|-------------------------|--------|--------|----------------|----------------|
| Frequenz [GHz] | 9,6 | 5,3 | 1,3 | 450 |
| Polarisation | HH | HH, VV | HH, VV, HV, VH | HH, VV, HV, VH |
| Wellenlänge [cm] | 3 | 5,6 | 23 | 67 |

Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf die Daten einer Befliegung im Untersuchungsgebiet 1 im Forstbezirk Ettenheim, die für das Projekt Sturmmon aufgenommen wurden, zurückgegriffen werden. Im April 2000 wurden dafür im X-Band, (VV- und HH-Polarisation) sowie im L-Band (VV-, HH- und Kreuzpolarisation) Daten aufgenommen. Die Prozessierung der Daten sowie die geometrische Entzerrung wurde am Institut für Hochfrequenztechnik der DLR sowie der Technischen Universität Dresden, Institut für Kartographie, durchgeführt.

Einen Überblick über die in dieser Arbeit untersuchten Datensätze liefert die Tabelle 9.

Tabelle 9: Daten der E-SAR Befliegung vom 03.04.2000

| Band | X-Band | X-Band | L-Band |
|----------------------------|---------|---------|----------------|
| Polarisation | HH | VV | HH, VV, HV, VH |
| Flughöhe [m] | 3474,86 | 3480,48 | 3474,10 |
| Auflösung [m] Range | 1,99306 | 1,99306 | 1,99306 |
| Auflösung[m] Azimut | 1,5 | 1,5 | 3,0 |
| Pixelgröße [m] | 1 x 1 | | |
| Looks | 4 | 4 | 4 |

5.1.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Zu den hochauflösenden Satellitensystemen gehören die Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2. Der Radar-Satellit ERS-1 wurde von der Europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt und war seit Juli 1991 im Weltraum. Im März 2000 wurde ERS-1 aus technischen Gründen eingestellt. Im April 1995 kam mit dem ERS-2 Satellit ein weiterer hinzu, der die Erstellung und Auswertung von Kohärenzdaten zusammen mit ERS-1 erst ermöglichte. Um Kohärenzdaten zu erhalten, wurden die beiden Satelliten so programmiert, dass sie zeitversetzt (1 Tag) voneinander dasselbe Gebiet aufnehmen können (sog. Tandem-Mission). Dabei wird aus den Phaseninformationen (bei Radarsignalen wird jeweils mit der Amplitude und Phase auf deren Rückstreuung geschlossen) beider Bilder, deren Kohärenz ermittelt. Die

Kohärenz gilt dabei als Maß für die Ähnlichkeit beider Bilder. Für Landgebiete werden in den meisten Fällen hohe Kohärenzwerte ermittelt, da innerhalb eines Tages (zeitversetzte Aufnahme von ERS-1 und ERS-2) keine Veränderungen erfolgen (Ausnahme dazu wären z.B. Regenschauer). Im Gegensatz dazu gibt es für Waldbestände oder Wasserflächen meist niedrige Kohärenzwerte, da hier starke Veränderungen stattfinden können. Nach dem Sturmereignis ist folglich in den betroffenen Sturmgebieten innerhalb des Waldes mit höheren Kohärenzwerten zu rechnen. Dies konnte auch schon in anderen Forschungsarbeiten gezeigt werden (WIESMANN ET AL., 2000; YESOU ET AL., 2000)

Die wichtigsten Daten der beiden ERS Satelliten können Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: Parameter der ERS-1 und ERS-2 SAR-Systeme

| Parameter | ERS-1 und ERS-2 |
|---------------------------------|---|
| Datum | 17. Juli 1991 (ERS-1), 11. Februar 1995 (ERS-2) |
| Flughöhe | 782 – 785 km |
| Orbit | Polar, sonnensynchron |
| Inklination | 98,52° |
| Dauer Erdumkreisung | 100 Min. |
| Wiederholungsrate | 3, 35 oder 176 Tage |
| Frequenz | 5,3 GHz, C-Band |
| Polarisation | VV |
| Antennengröße | 10 m x 1m |
| Einfallswinkel | 20,1°(near range), 23°(mid range), 25,9°(far) |
| Räumliche Auflösung | along-track ca. 30 m, across-track ca. 26,3 m |
| Radiometrische Auflösung | 2,5 dB |

Für diese Arbeit wurden 2 Kohärenzprodukte für eine multitemporale Auswertung ausgewählt. Während die erste Aufnahme ca. 2 Monate vor dem Sturmereignis war, wurde die zweite Aufnahme 2 Wochen nach „Lothar“ aufgenommen und war somit auch der erste verfügbare und auswertbare Fernerkundungsdatensatz überhaupt. Die wichtigsten Daten der beiden Kohärenzprodukte können Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Übersicht über die Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2

| Sensor | Kohärenzprodukt 1 | | Kohärenzprodukt 2 | |
|--|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | ERS-1 | ERS-2 | ERS-1 | ERS-2 |
| Aufnahmezeitpunkt | 31.10.1999 | 01.11.1999 | 09.01.2000 | 10.01.2000 |
| Band | C-Band | | | |
| Polarisation | VV | | | |
| Szenengröße [km] | 100 x 100 | | | |
| Pixelgröße [m] | 20 x 20 | | | |
| Auflösung in Rangerichtung [m] | 25 | | | |
| Auflösung in Azimutrichtung [m] | 22 | | | |
| Einfallswinkel [°] | 23,2775 | 23,2759 | 23,2715 | 23,2698 |
| Radiometr. Auflösung | 8 Bit | | | |
| Looks | 1 | | | |

Die Kohärenzprodukte bestehen jeweils aus dreikanaligen Bilddatensätzen. Grundlage des Bilddatensatzes sind die um einen Tag voneinander differierenden Aufnahmen von ERS-1 und ERS-2:

- Kanal 1 – Kohärenzinformation
- Kanal 2 – Durchschnittliche Rückstreuintensität beider Aufnahmen
- Kanal 3 – Ratio Rückstreuintensität beider Aufnahmen

5.1.3 Radarsat 1

Seit November 1995 ist das von der Canadian Space Agency (CSA) in Kooperation mit den Provinzregierungen Kanadas und privaten Investoren entwickelte SAR-System Radarsat operational und sendet Aufnahmen aus dem All (CANADIAN SPACE AGENCY, 2002). Insgesamt wurde Radarsat für eine Periode von 6 Jahren geplant. Die wichtigsten Informationen können Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Parameter des SAR-Systems Radarsat

| Parameter | Radarsat |
|--------------------------|---|
| Datum | November 1995 |
| Flughöhe | 793 – 821 km |
| Orbit | Polar, sonnensynchron |
| Inklination | 98,6° |
| Dauer Erdumkreisung | 101 Min. |
| Wiederholungsrate | 4 Tage |
| Frequenz | 5,3 GHz, C-Band |
| Polarisation | HH |
| Antennengröße | 15 m x 1,5 m |
| Einfallswinkel | 10° - 59° (hier 37° - 47°) |
| Räumliche Auflösung | 8 m – 100 m (along-track ca. 8 – 9 m, across-track ca. 9 m) |
| Radiometrische Auflösung | 2,5 dB |

Im Rahmen dieser Arbeit konnten 2 Szenen für eine multitemporale Auswertung herangezogen werden. Die erste Szene war eine Archivaufnahme ca. 2 Monate vor dem Sturmereignis. Die Szene nach dem Sturm wurde direkt bestellt. Sie stammt allerdings vom Dezember 2000, also ca. 1 Jahr nach dem Orkan „Lothar“. Genauere Informationen zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Übersicht über die Radarsat Daten

| Aufnahmezeitpunkt | 03.11.1999 | 08.12.2000 |
|---------------------------------|---------------|------------|
| Band | C-Band | |
| Polarisation | HH | |
| Szenengröße [km] | 50 x 50 | |
| Pixelgröße [m] | 3,125 x 3,125 | |
| Auflösung in Rangerichtung [m] | 7,8 – 7,4 | 8,6 – 8,0 |
| Auflösung in Azimutrichtung [m] | 8,4 | |
| Einfallswinkel [°] | 41 – 44 | 37 - 40 |
| Radiometr. Auflösung | 16 Bit | |
| Looks | 1 Look | |

5.1.4 TerraSAR

In diese Arbeit konnten auch simulierte Daten des zukünftigen satellitenbasierten Radarsystems TerraSAR miteinbezogen werden. Diese Daten wurden am Institut für Hochfrequenztechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Hilfe der X- und L-Band Daten aus der in Kapitel 5.1.1 bereits genannten E-SAR Befliegung unter Verwendung der zukünftigen Parameter der Aufnahmegeometrie von TerraSAR simuliert und die geometrische Auflösung verändert.

Entwickelt wird das System mit dem Namen TerraSAR von Astrium und NRSC, kofinanziert durch die Industrie, dem British National Space Center (BNSC) und dem DLR. Der erste TerraSAR Satellit, der mit einem Sensor für das X-Band (Single-, Dual-, Twin-, Dual-Polarisation) ausgestattet werden soll, ist für das Jahr 2006 geplant. Diesem soll eventuell 2009 oder später ein voll multi-polarimetrischer Sensor für das L-Band folgen (ASTRIUM, 2002; INFOTERRA, 2002B). Der Satellit soll über 4 Abbildungsmodi verfügen:

- Stripmap Mode mit 30 km Bildbreite und 3 m Auflösung
- ScanSAR Mode mit 100 km Bildbreite und 16 m Auflösung
- Spotlight Mode mit 5 km x 10 km Bild und 1 m Auflösung
- Dual Receive Antenna Mode für Along-Track Interferometrie, Identifizierung bewegter Objekte

Am Institut für Hochfrequenztechnik der DLR wurde aus den E-SAR Daten die TerraSAR Daten im X-Band (Twin-Polarisation) und im L-Band (Quad-Polarisation) mit einer Auflösung von ca. 5 m simuliert. Genauere Informationen zu den Daten können der Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Simulierte TerraSAR Daten

| Band | X-Band | X-Band | L-Band | L-Band | L-Band | L-Band |
|-----------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Polarisation | HH | VV | HH | VV | HV | VH |
| Flughöhe [m] | 3474,86 | 3480,48 | 3474,10 | | | |
| Auflösung [m] Range | 1,99306 | | 4,5 | | | |
| Auflösung [m] Azimut | 7,5 | | 12,5 | | | |
| Pixelgröße [m] | 1 x 1 | | | | | |
| Looks | 4 | | | | | |

5.2 Digitale Höhenmodelle

5.2.1 Digitales Höhenmodell des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg

Verwendung fand das digitale Höhenmodell (DHM) des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg vor allem für die Orthorektifizierung der Radarsat 1 Bilddaten und für GIS-Analysen. Die Daten wurden ursprünglich mittels photogrammetrischen Auswertesystemen aus Luftbildern zwischen 1971 und 1981 mit einer Maschenweite von 80 x 40 m erhoben. Anschließend wurden die Punktdaten auf ein regelmäßiges Gitter von 50 x 50 m interpoliert. Der mittlere Höhenfehler liegt zwischen 2 m in ebenem und kaum bewegtem Gelände und 10 m in sehr bewegtem Gelände. Zu beachten ist, dass die Höhenwerte sich dabei nicht immer auf die Geländeoberfläche, sondern teilweise auch auf die Vegetationsoberfläche beziehen.

5.2.2 Digitales Oberflächenmodell aus Luftbildern des LVA Baden-Württemberg von 1995

Im Rahmen einer Diplomarbeit (BAHNER-WÜRTH, 2003) an der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg wurde aus insgesamt 12 Luftbildern des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg ein digitales Oberflächenmodell für das Untersuchungsgebiet 1 mit dem Modul Orthobase[®] der Bildbearbeitungssoftware ErdasImagine[®] in einem 10 x 10 Meter Raster berechnet. Das Oberflächenmodell diente als Zusatzoption für den Vergleich mit dem im folgenden Kapitel beschriebenen Oberflächenmodell aus der E-SAR Befliegung

5.2.3 Digitales Oberflächenmodell aus der E-SAR Befliegung

Mit einem SAR-System ist es grundsätzlich nur möglich, zweidimensionale Abbildungen der Erdoberfläche zu generieren (KLAUSING & HOLPP, 2000), da die Höhe eines Objektes nur mit Hilfe des Depressionswinkels und der Entfernung zum Objekt ermittelt werden kann. Mit der Technik der Across-Track-Interferometrie, bei der zwei Antennen quer zur Flugrichtung angeordnet sind, kann die Phasendifferenz zwischen den Signalen beider Antennen ausgewertet werden, die einem bestimmten Wegunterschied entspricht. Aus diesen Daten kann anschließend der Depressionswinkel berechnet und die Höhe eines Objektes ermittelt werden. Zusätzlich werden Bezugspunkte zur Erdoberfläche gesetzt, um die Geländehöhe zu bestimmen. Detaillierte Beschreibungen dieser Technik finden sich z.B. in ZEBKER & GOLDSTEIN, 1986 und KLAUSING & HOLPP, 2000. Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf flugzeuggetragenen Aufnahme der E-SAR Daten im X-Band mittels der Across-Track-Interferometrie im Single-Pass-Modus (einmalige Befliegung, Master- und Slave-Antenne) zurückgegriffen werden. Das digitale Oberflächenmodell wurde am Deutschen Zentrum für

Luft- und Raumfahrt aus den aufgenommenen Daten prozessiert. Die Höhen geben ein Abbild aller Objekte, die sich auf der Erdoberfläche befinden, wieder.

5.3 Referenzdaten und Erstellung des Referenzdatensatzes

Für eine Überprüfung der Genauigkeit sämtlicher in dieser Arbeit beschriebenen Erfassungsoptionen wurde für jedes Untersuchungsgebiet jeweils ein Referenzdatensatz erhoben. Für diese Erhebung wurden verschiedene in den nächsten Kapiteln beschriebene Verfahren, wie terrestrische Aufnahmen und visuelle Delinierung der Sturmflächen in Luftbildern am Bildschirm verwendet. Durch die Kombination dieser verschiedenen Verfahren sollte ein möglichst genauer und repräsentativer Referenzdatensatz zur Verfügung stehen.

5.3.1 Luftbilder aus der Befliegung des Vermessungsamtes (1995, 2000)

Das Landesvermessungsamt Baden Württemberg befliegt turnusmäßig die Landesfläche alle fünf Jahre. Im Sommer 2000 wurde der Block B in dem das Untersuchungsgebiet 1 liegt, befliegen. Die Befliegung wurde am 07 - 09.06.2000 durchgeführt. Die Daten wurden mit einer Reihenmesskamera von 300 mm Brennweite befliegen. Die Orthorektifizierung wurde beim Landesvermessungsamt realisiert. Die Standardauflösung der Daten beträgt 0,25 cm/Pixel. Die Lagegenauigkeit (abhängig von der Genauigkeit des DHM) ist i. d. R. genauer als +/- 3m. Die digitalen Bilder im Maßstab von 1:18.000 wurden von der Forstdirektion Freiburg zur Verfügung gestellt.

Um eine Zeitreihe zu ermöglichen und um mögliche Verwechslungsflächen, wie zum Beispiel alte Sturmflächen, Verjüngungsflächen usw. von den eigentlichen Sturmflächen des Jahres 1999 zu trennen, wurden digitale Schwarz-Weiß-Ortholuftbilder in Maßstab 1:18.000 vom Jahre 1995 beim Landesvermessungsamt Baden Württemberg bezogen.

5.3.2 Luftbilddaten aus eigener Befliegung

Zusätzlich zu den Bildern des Landesvermessungsamtes standen noch Luftbilder aus einer im Rahmen des Projekts Sturmmon durchgeführten eigenen Befliegung zur Verfügung. Diese Daten dienen dazu, die terrestrischen Referenzdatensätze und die aus den Bildern des Landesvermessungsamtes erhobenen Sturmflächen nochmals zu überprüfen. Die Befliegungen wurden von der Firma Hansa Luftbild Sensorik + Photogrammetrie GmbH am 25.08.00 zwischen 15 und 16 Uhr durchgeführt (Tabelle 15). Im folgende sind die technischen Bedingungen der Befliegungen:

Tabelle 15: Technische Bedingungen der Hansa Befliegung

| | 1.Befliegung | 2.Befliegung | 3.Befliegung |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Filmmaterial | Kodak Infrarot Aerographik 2424 | Agfa Pan 80 PE1 | Agfa Pan 80 PE1 |
| Luftbildkammer | Zeiss RMK TOP 15 | Zeiss RMK TOP 15 | Zeiss RMK TOP 15 |
| Kammerkonstante [mm] | 153,885 | 154,012 | 154,012 |
| Filter | D-36 | B-36 | B-36 |
| Bildmaßstab | 1:25.000 | 1:25.000 | 1:36.000 |
| Längsüberdeckung | 58 - 65% | 58 - 65% | 58 - 65% |
| Mittlere Flughöhe ü. G.[m] | 3800 | 3800 | 5480 m |
| Aufnahmedatum | 25.08.00 | 25.08.00 | 25.08.00 |

Der Agfa Pan 80 PE1- Film ist ein panchromatischer hochauflösender SchwarzWeiß-Film für Aufnahmen sowohl aus großer Höhe als auch aus geringer Höhen. Er verbindet die Vorteile des panchromatischen mit dem des Infrarotfilmes durch die spektrale Sensibilität bis $0,75 \mu\text{m}$ und eignet sich somit sehr gut für forstliche, landwirtschaftliche und ökologische Fragestellungen.

Der Kodak Infrarot Aerographik -2424 ist ein Schwarz-Weiß-Negativfilm. Er ist empfindlich sowohl für die ultraviolette Strahlung als auch für die sichtbare und infrarote Strahlung (bis $0,9 \mu\text{m}$). Im Vergleich zu dem Agfa Pan 80 PE1-panchromatischen Film verfügt er über ein niedriges Auflösungsvermögen aber er zeigt mehr Kontraste zwischen Wasser und Land und auch mehr Differenzierung innerhalb der Vegetation.

5.3.3 Feldaufnahmen

Beginnend im April 2000 wurden erste terrestrische Aufnahmen durchgeführt. Diese konzentrierten sich zunächst auf das Gebiet, welches von der ESAR-Befliegung abgedeckt wurde. Generell wurden Schadflächen im öffentlichen Wald aufgenommen. Im Rahmen der terrestrischen Aufnahme wurden die in Tabelle 16 dargestellten Parameter erhoben.

Tabelle 16: Terrestrisch erhobene Merkmale in den Sturmflächen

| | |
|-------------------------|---|
| Allgemein: | Aufnahmeteam, Forstamt-Nr, Foto-Nr. Flächen-Nr. |
| Standort: | Distrikt, Abteilung, Schadfläche (Hangrichtung(5°-Stufen), Hangneigung(5%-Stufen), Geländeform (6Klassen), Schlagflora (Höhe, Deckungsgrad, Flächenanteil), Teilfläche 1, Teilfläche 2, Teilfläche 3 |
| (ehem.) Bestand: | Baumart, Mischungsverhältnis, BHD (geschätzt, 10 cm-Stufen), Altersklasse (geschätzt; I=1-20; II=21-40...), Höhe (geschätzt, 5m-Stufen), Größe der Schadfläche, Wurfrichtung (erkennbar/ja/nein / wenn ja: Wurfrichtung von bis), Wurfart(1=flächig, 2=Einzelwurf, (wenn Einzelwurf: geworfene Baumarten), Anteil Bruch/Wurf, Verhältnis liegend/stehend, Aufarbeitung (ja/ nein/teilweise), Besonderheiten, Bemerkungen. |

Die Lage und die Ausdehnung jeder Sturmfläche wurde in Forstbetriebskarten (Maßstab 1:10.000) eingetragen und individuell nummeriert. Zusätzlich wurden auf entsprechenden Erfassungsbelegen Detailskizzen zu jeder Fläche angefertigt. Teilweise wurden auch Fotografien (analog und digital) im Gelände angefertigt, um die Situation zu dokumentieren. Die aufgenommenen Flächen wurden dann in eine Datenbank (Access) übertragen und dort verwaltet. Die im Gelände aufgenommenen Referenzflächen wurden mit Hilfe von digitalen Ortholuftbildern (Befliegung des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg, Juli 2000, Maßstab 1:18.000) möglichst flächen- und lagerichtig in ein GIS eingebracht. Dabei dienten die terrestrisch erhobenen Merkmale und Detailskizzen als wichtige Zusatzinformation. Über die vergebenen ID's ist eine Zuordnung zu den in der Datenbank abgelegten Sachdaten möglich. Diese so aufbereiteten terrestrischen Daten dienten als Zusatzinformation für die Erstellung des Referenzdatensatzes auf Basis von Luftbildern.

5.3.4 Visuelle Delinierung der Sturmflächen

Als weitere Variante der Referenzflächenerfassung wurde der eigentliche Referenzdatensatz flächendeckend für die Untersuchungsgebiete 1 und 2 mit Hilfe einer visuellen Kartierung der Sturmflächen am Bildschirm in digitalen Luftbildern, die im Rahmen einer Befliegung des Landesvermessungsamts vom Juli 2000 im Maßstab 1:18.000 aufgenommen wurden, auf Basis der terrestrischen Erfassungen erhoben.

Die Erfassung der Referenzflächen erfolgte nach dem Anforderungskatalog der Landesforstverwaltung. Erfasst wurden, wie bereits auch bei der terrestrischen Begehung, nur Schadflächen innerhalb des öffentlichen Waldes.

Die Delinierung wurde in ArcView[®] direkt am Bildschirm durchgeführt. Als weitere Interpretations- bzw. Digitalisierungsgrundlage zur Vermeidung von Fehlinterpretationen wurden für die Auswertung „historische“ Ortholuftbilder aus der Befliegung des Landesvermessungsamts vom Juli 1995 und GIS-Informationen der Forstlichen

Versuchsanstalt (FVA) über die Kalamitäten (Kalamitätslayer) sowie die Informationen der terrestrischen Aufnahmen verwendet. Diese Informationsebene konnte am Bildschirm je nach Bedarf zu oder abgeschaltet werden. Zudem konnten auch die analogen Forsteinrichtungsdaten für den Forsteinrichtungszeitraum 2000 - 2009 (Forstbezirk Lahr) und 1999 - 2008 (Forstbezirke Ettenheim, Kenzingen) genutzt werden. Die Erfassung wurde unabhängig von administrativen Grenzen (Distrikt-, Abteilungs-, Bestandesgrenzen, etc.) durchgeführt.

Das Ergebnis der visuellen Luftbildinterpretation wurde anschließend über die terrestrisch-luftbildbasiert aufgenommenen Flächen validiert und damit die Qualität überprüft und abgesichert. Einige Flächen, die auch dann dem Orkan „Lothar“ noch nicht endgültig zugeordnet werden konnten, wurden nochmals terrestrisch überprüft. Um Verwechslungen mit Nichtholzbodenflächen und Jungbestände der Alterstufe 0 bis 3 auszuschließen, in denen in der Regel keine Sturmschäden auftreten, wurde der Referenzdatensatz mit einer dafür erstellten FoGIS-Maske verschnitten.

Somit stand ein sehr großer und guter Informationspool zu Verfügung, der eine sichere Ansprache der Schadflächen im Wald ermöglichte.

Die Referenzdatensätze wurden für die zwei Untersuchungsgebiete G1 und G2 separat vorbereitet.

Tabelle 17: Statistische Angaben der Referenzdaten differenziert nach Räumungszustände und Schadklassen in G1 und G2

| | | | Referenzdatensatz nach Ausmaskierung von Verwechslungsflächen | | Referenzdatensatz für alle Waldbestände innerhalb der FoGIS Grenze | |
|----------------|-------------|----------------|---|---------------|--|---------------|
| | | | Fläche [ha] | Flächenanzahl | Fläche [ha] | Flächenanzahl |
| G 1 | Schadstufen | 1 | 171,5 | 39 | 173,5 | 40 |
| | | 2 | 63,1 | 52 | 64,3 | 53 |
| | | 1+2 | 234,6 | 91 | 237,8 | 93 |
| | Räumung | g ³ | 102,0 | 53 | 103,9 | 55 |
| | | ng | 26,4 | 17 | 26,4 | 17 |
| | | tg | 106,2 | 21 | 107,4 | 21 |
| G 2 | Schadstufen | 1 | 141,4 | 58 | 151,9 | 60 |
| | | 2 | 57,0 | 63 | 59,4 | 64 |
| | | 1+2 | 198,4 | 121 | 211,31 | 124 |
| | Räumung | g | 93,3 | 54 | 97,7 | 53 |
| | | ng | 94,8 | 60 | 103,3 | 64 |
| | | tg | 10,3 | 7 | 10,4 | 7 |

³ g = geräumt, ng = nicht geräumt, tg = teilgeräumt

5.4 Verfügbare Zusatzdaten

5.4.1 Abgrenzung von Waldflächen zu Nicht-Waldflächen (Waldecker)

Waldecker stellen die Außengrenzen der Waldflächen dar. Sie entsprechen den Waldebenebenen einer Topographischen Karte. Diese Daten sind in der Bundesrepublik in der Regel aus der Landesvermessung digital flächendeckend verfügbar. Für das Projekt war ein Waldecker für das Land Baden-Württemberg vorhanden, erhoben aus ATKIS Daten. Qualitätseinbußen gegenüber z.B. den Waldgrenzen der Forstverwaltungen müssen hier im Hinblick auf die Aktualität, die Walddefinition und die Differenzierung in Holzbodenfläche und Nichtholzbodenfläche berücksichtigt werden. In Zukunft sollen diese Daten im Abgleich mit den Forstverwaltungen harmonisiert werden, um eine qualitative Verbesserung zu erreichen.

5.4.2 Digitale Daten aus dem Forstlichen Geografischen Informationssystem des Landes Baden-Württemberg (FoGIS)

Mit der Weiterentwicklung der Informationstechnologien entstand bei der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg Ende der 80er Jahre der Bedarf nach verstärkter Nutzung geographischer Datenverarbeitungssysteme (VON TEUFFEL & KREBS, 1996). In diesem Rahmen wurde ein Forstliches Geografisches Informationssystem (FoGIS) eingeführt, das die digitale Erfassung und Verwaltung aller forstlicher Geometrien und Sachdaten zum Ziel hat (FRITZ, 1999). Aus diesem Datenpool wurden für die vorliegende Untersuchung die Daten der Forsteinrichtung verwendet. Da nur der öffentliche Wald der gesetzlich vorgeschriebenen Forsteinrichtung unterliegt, werden für den Privatwald diese Daten nicht erhoben.

Die Forsteinrichtungs-Sachdatenbank beruht auf dem FE-1 Beleg⁴ der Forsteinrichtung und umfasst bestandesbezogene Attribute, wie z.B. Bestandesbezeichnung, Bestandestyp, Baumartenzusammensetzung, Altersstufe, Bestandesvolumen und Naturverjüngung. Diese Informationen können mit den entsprechenden Bestandesgeometrien verknüpft werden, die in verschiedenen thematischen Ebenen möglichst redundanzfrei abgelegt sind (FRITZ, 1999).

Die Erfassung der Bestandesgeometrien erfolgt durch Delinierung der Grenzen in analogen Schwarz-Weiss-Ortholuftbildern (Befliegungs-Maßstab 1:18.000, Bildabzug vergrößert auf 1:10.000). Anschließend werden diese Vorlagen digitalisiert, was in einer Lagegenauigkeit der erfassten Geometrien von 5-10 m bei dem gebräuchlichen Darstellungsmaßstab von 1:10.000 resultiert. Weitere Daten, wie Waldaußengrenzen, Distrikte und Abteilungen, sowie Fahrwege innerhalb des Waldes werden auf Basis der Deutschen Grundkarte (DGK5) erfasst (FRITZ, 1999) oder mit GPS eingemessen.

⁴ Dieser Vordruck wird in der Forsteinrichtung in Baden-Württemberg verwendet und beschreibt jeden Bestand mit einer detaillierten Bestandesbeschreibung und einem Planungsteil.

Verwaltet werden die digitalen Informationen in verschiedenen thematischen Ebenen. In der vorliegenden Untersuchung wurden Daten der Thematik "Waldeinteilung" und "Kalamitäten" verwendet.

In der Thematik "Kalamitäten" sind die in einem Schnellverfahren durch die Landesforstverwaltung erhobenen Sturmschadflächen enthalten. Grundlage hierzu waren terrestrische Aufnahmen und zum Teil unentzerrte Luftbilder. Diese "skizzenhaften" Vorlagen wurden dann in FoGIS als eigene Thematik übernommen. Im Zuge der Wiederbewaldungsplanung und der damit verbundenen Neueinrichtung einiger Forstbetriebe wurden diese Daten dann genauer erfasst und teilweise auch überarbeitet und in die Thematik "Waldeinteilung" als Flächen mit Altersstufe 0 eingearbeitet. Diese Arbeiten wurden aber erst im Laufe des Jahres 2002 abgeschlossen.

Das System befindet sich momentan noch im Aufbau, so dass noch nicht alle Forstämter Baden-Württembergs digital erfasst sind. Bis Ende 2006 soll dann die Ersterfassung des öffentlichen Waldes in Baden-Württemberg abgeschlossen sein. Da, wie bereits erwähnt, diese digitalen Daten nur für den öffentlichen Wald erstellt werden, kann derzeit für den privaten Wald nur ein digitaler Walddecker (s.o. ATKIS, erstellt aus Daten im Maßstab 1:25.000) als Zusatzinformation verwendet werden.

5.4.3 Daten aus Bundeswaldinventur (BWI)

Die Bundeswaldinventur ist eine Großrauminventur auf Basis von Stichproben, die im gesamten Bundesgebiet durchgeführt wird. Sie ist gesetzlich geregelt und soll einen Überblick über die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten liefern.

Die Bundeswaldinventur ist eine terrestrische Stichprobeninventur mit permanent markierten Probepunkten mit einem Raster von 4x4 km. Das Land Baden-Württemberg besitzt die vierfache Stichprobendichte. Innerhalb der Stichproben werden Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser ab 7 cm erfasst und insgesamt ca. 150 Merkmale aufgenommen. Folgende Ergebnisse kann die Grundausswertung der Stichprobenpunkte liefern:

Angaben zur Waldfläche, Holzvorrat, Holzzuwachs, Holznutzung, Stammschäden, Totholzmenge, Waldrandlänge, Wegelänge, Grundfläche und Stammzahl je Hektar sowie diverse dendrometrische Größen (Baumhöhe, mittlerer Brusthöhendurchmesser).

Die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten aus der Bundeswaldinventur wurden für eine punktuelle Erfassung der Sturmschäden auf Basis von TerraSAR Daten zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (siehe Kapitel 6.2.5.2) verwendet.

5.5 Verwendete Hard- und Software

Innerhalb dieser Arbeit wurden verschiedene Softwareprodukte verwendet:

- ErdasImagine 8.1[®]
- ArcView 3.2a[®]
- eCognition 3.0[®]
- PCI OrthoEngine 8.2[®]
- PCI Works 8.2[®]
- Diverse Microsoft Office[®] Produkte

Die Bildverarbeitungsoperationen wurden auf einem Pentium 4 Computer mit 1,5 GHz durchgeführt.

5.6 Beschreibung des Projekt-GIS

5.6.1 *Verfügbare Datenebenen*

Von Beginn an wurde mit Hilfe des Desktop-GIS ArcView[®] 3.2a der Firma ESRI ein GI-System aufgebaut, welches die Visualisierung, Auswertung, Verschneidung und Analyse verschiedener digitaler Datenebenen wie Vektordaten, Bilddaten sowie digitale Fotos und Sachinformationen ermöglichte.

Als Bezugssystem wurde das Gauß-Krüger-Koordinatensystem mit dem geodätischen Datum Potsdam und den folgenden Eigenschaften verwendet:

- Projektion: Transverse Mercator
- Sphäroid: Bessel
- Wahrer Ursprung 9d E,
- False Easting 3500000 E

Folgende Datenebenen wurden vorgehalten und konnten je nach Bedarf aufgerufen werden:

Vektordaten:

- FoGIS Daten der Untersuchungsgebiete 1 und 2
- Waldecker für das Land Baden-Württemberg
- Referenzdaten: Erstellt aus Luftbildern 1:18.000 und terrestrischen Aufnahmen mit zwei Schadklassen
- Referenzdaten: Erstellt aus terrestrischen Aufnahmen
- Referenzdaten: Kombination beider oben genannter Referenzen
- Schnellerfassung Sturmschäden: Thematik "Kalamitäten" aus FoGIS

- BWI-Stichprobenpunkte: Jahrgänge 1987, 1999 (Sonderaufnahme nur im Staatswald), 2001
- Räumungszustände der Sturmflächen für verschiedene Zeitpunkte
- Interpretationsergebnisse aus der visuellen wie auch der automatischen Auswertung für sämtliche Varianten

Rasterdaten:

- Digitale TK25, Landesvermessungsamt
- Höhenmodell Landesvermessungsamt
- Luftbildbefliegung Landesvermessungsamt, Sommer 2000
- Eigenen Luftbildbefliegung, Sommer 2000
- "Historische" Luftbilder, Landesvermessungsamt, Sommer 1995
- ERS Daten
- Radarsat Daten
- TerraSAR Daten
- E-SAR Daten
- Digitale Fotos der Sturmflächen, aufgenommen während den terrestrischen Feld-Aufnahmen
- Teilweise Daten optischer Satelliten aus dem Jahr 2000 und derselben Gebietsabdeckung

Datenbank:

- Access Datenbank: Sachinformationen zu den Referenzsturmflächen
- Das Desktop-GIS ArcView[®] wurde auch zur visuellen Interpretation der Sturmschäden verwendet.

Die Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen Ausschnitte aus dem ArcView[®] Projekt mit verschiedenen übereinandergelagerten Datenebenen sowie Sach- und Zusatzinformationen.

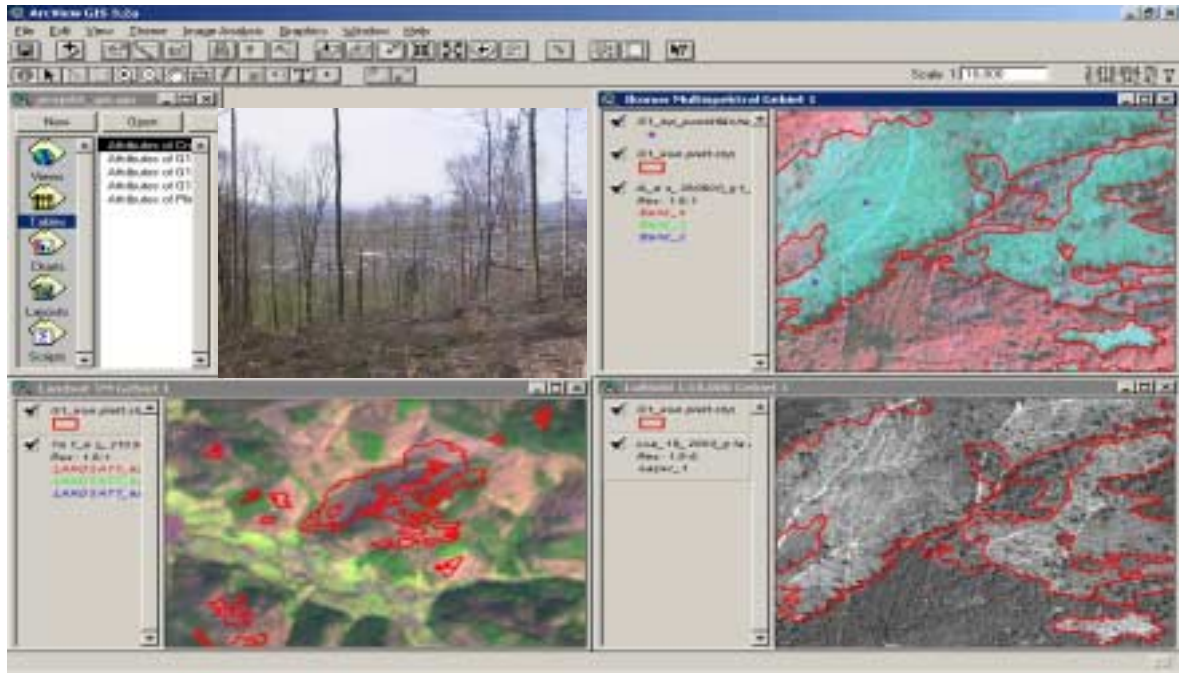


Abbildung 9: ArcView® 3.2a mit terrestrischen Informationen (Photo) und verschiedenen Fernerkundungsdatensätzen, sowie den Referenzsturmflächen

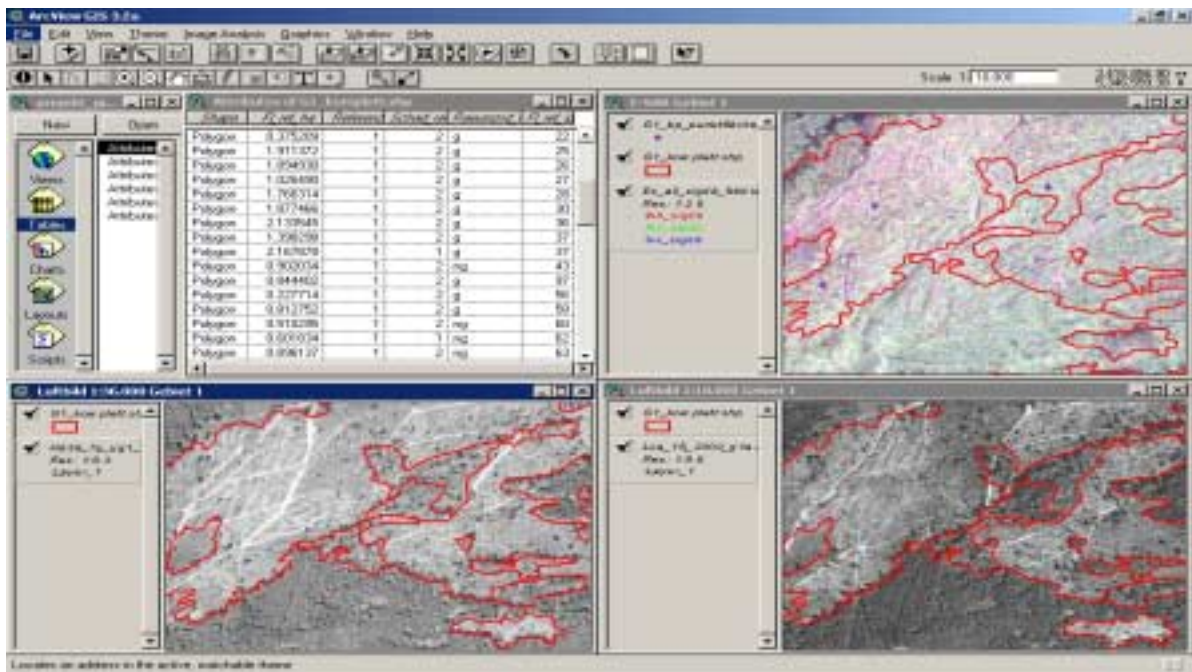


Abbildung 10: wie oben inkl. Sachdatentabelle

6 Methoden

6.1 Allgemeine Übersicht

6.1.1 Übersicht über die Erfassungsoptionen

Alle verwendeten Radardatensätze wurden zunächst geometrisch entzerrt und georeferenziert. Dies geschah unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie, der Geländehöhe und der Aufnahmeposition. Eine Ausnahme hiervon bildete lediglich die Option der ERS1/2 Datensätze, da hierfür keine geeignete Software zur Verfügung stand. Hier wurde der geografische Bezug ohne Berücksichtigung des Geländes hergestellt. Je nach Datensatz und Auswertungsmethode folgten daran weitere Vorverarbeitungsschritte, wie z.B. die Reduktion des Speckle, um eine bestmögliche Auswertung der Daten zu ermöglichen (Kapitel 6.2.1.1). Nach Abschluss der Vorverarbeitung erfolgte die Schadenserfassung mit unterschiedlichen im Folgenden skizzierten Auswertungsansätzen.

Unterschiede in der Flächenabdeckung

- flächendeckende Erfassung
- stichprobenbasierte Erfassung (unter Nutzung der BWI-Daten zu Auswertungszwecken)

Die flächendeckende Erfassung ist die Standardvariante, die innerhalb des öffentlichen Waldes in den Untersuchungsgebieten durchgeführt wurde.

Ziel der stichprobenbasierten Erfassung ist es, erstens die Bearbeitungszeit für einen schnellen Schadensüberblick zu reduzieren und zweitens durch Verbindung der Ansprache mit den Stichprobendaten und der Bundeswaldinventur den Schadensüberblick um Baumarten- und Sortenstatistiken zu ergänzen. Generell können die Stichprobendaten auch mit einer flächenhaften Erfassung verbunden werden, um diese Statistiken über Baumarten und Sorten abzuleiten.

Unterschiede im Automatisierungsgrad

- visuelle Interpretation (manuelle Delinierung der Schadflächen am Bildschirm)
- automatische Klassifizierung (die Fernerkundungsdaten werden rechnergestützt ausgewertet)
- kombiniert visuell-automatische Verfahren

Die visuelle Interpretation kann die Vielfältigkeit der Struktur-, Textur und Signaturinformation in der Regel besser nutzen als voll automatisierte Verfahren. Automatisierung ist jedoch im Hinblick auf die Kosten und vor allem im Hinblick auf die Bearbeitungszeit von herausragender Bedeutung. Die Kombination in der automatisierte Schritte mit visueller Interpretation verknüpft werden, versucht die Vorteile der beiden Ansätze zu verbinden.

Unterschiede in der Nutzung von Bild-Vorinformationen

- monotemporal (nur Verwendung von Fernerkundungsdaten, die nach dem Sturmereignis aufgenommen wurden)
- multitemporal (Verwendung von Fernerkundungsdaten, die vor und nach dem Sturmereignis aufgenommen wurden)

Vorteil des monotemporalen Ansatzes:

- Nur eine Aufnahme nach dem Sturm erforderlich
- Geringere Kosten/ Geringerer Zeitaufwand für Datenrecherche und –bearbeitung

Vorteil des multitemporalen Ansatzes:

- Gleichzeitige Betrachtung vorher/nachher (Bild- zu Bild-Vergleich bzw. Change Detection)
- Kombination von Kanälen vor und nach dem Sturm in RGB-Darstellung für die visuelle Interpretation
- Berechnung von neuen Kanälen durch einfache arithmetische Operationen (Differenzbildung , Ratiobildung)
- Berechnung von neuen Kanälen durch komplexe arithmetische Operationen (Gemeinsame Hauptkomponententransformation)

Für einige Sensoren und Systeme, bei denen eine monotemporale Betrachtung nicht für eine hohe Kartierqualität ausreicht, stellt der multitemporale Ansatz die einzige Methode dar, mit der Schäden kartiert werden können. Sind beide Optionen möglich, so kann mit dem multitemporalen Ansatz unter Umständen die Kartierqualität deutlich verbessert werden. Aus diesem Grund wurde für mehrere Sensoren der multitemporale Ansatz gewählt.

Für die Operationalität des multitemporalen Ansatzes ist die Verfügbarkeit von Bilddaten von entscheidender Bedeutung. Operationale Probleme sind besonders für Daten zu erwarten, deren Akquisition vollständig oder teilweise (z.B. Radarsat) auf Bestellung beruht, da man hier nur von einer teilweisen Verfügbarkeit ausgehen kann.

Unterschiede in der Nutzung von Vorinformationen aus dem GIS

Zur Unterstützung und Verminderung von Fehlern wurden digitale Zusatzinformationen in die flächendeckenden Auswertungen integriert. Dafür können generell folgende Daten genutzt werden:

- Flächendeckende Wald-Nichtwald Daten (Walddecker). Mit diesen Daten kann der Untersuchungsfokus auf den Wald beschränkt werden. Bei Sensoren bei denen Differenzierungsprobleme zwischen Sturmflächen und landwirtschaftlichen Flächen (Wiesen, Äcker) bestehen, kann dies von entscheidender Bedeutung sein. Solche Daten sind in der Bundesrepublik in der Regel aus der Landesvermessung digital flächendeckend verfügbar. Die digitale Verfügbarkeit und die Qualität werden nach Abschluss der flächendeckenden Einführung von ATKIS und ALK, die mit den Forstverwaltungen harmonisierte Daten enthalten, qualitativ verbessert. Teilweise halten die Forstverwaltungen derzeit eigene digitale Walddecker vor. Qualitätsunterschiede können im Hinblick auf die Aktualität, die Walddefinition und die Differenzierung in Holzbodenfläche und Nichtholzbodenfläche bestehen. Der FoGIS Datensatz weist hier eine hohe Aktualität auf und ermöglicht eine solche Differenzierung, während der Walddecker und die Waldebene in der Topographischen Karte hier weniger genaue und differenzierte Informationen bieten.
- Flächendeckende Informationen über die Waldbestände (Baumarten, Alter, Struktur). Solche Daten stehen aus der Forsteinrichtung in naher Zukunft mit dem System FoGIS flächendeckend für den öffentlichen Wald in Baden-Württemberg zur Verfügung.

Diese Daten können auf mehrere Art und Weise genutzt werden:

- Maskierung (Ausschluss) von Beständen in denen Sturmschäden nicht vorkommen können (z.B. Kulturen) oder von geminderter Bedeutung sind (z.B. Dauerbestockungen).
- Stratenbildung. Durch Bildung von Straten nach Baumartendominanz oder Alter (z.B. Nadel- Misch- Laubwald. jüngere Bestände, ältere Bestände). Da innerhalb dieser Straten ein größerer Unterschied zwischen Sturm- und Nichtsturmflächen bestehen könnte, kann eine solche Einteilung die Auswertungsmöglichkeiten verbessern.

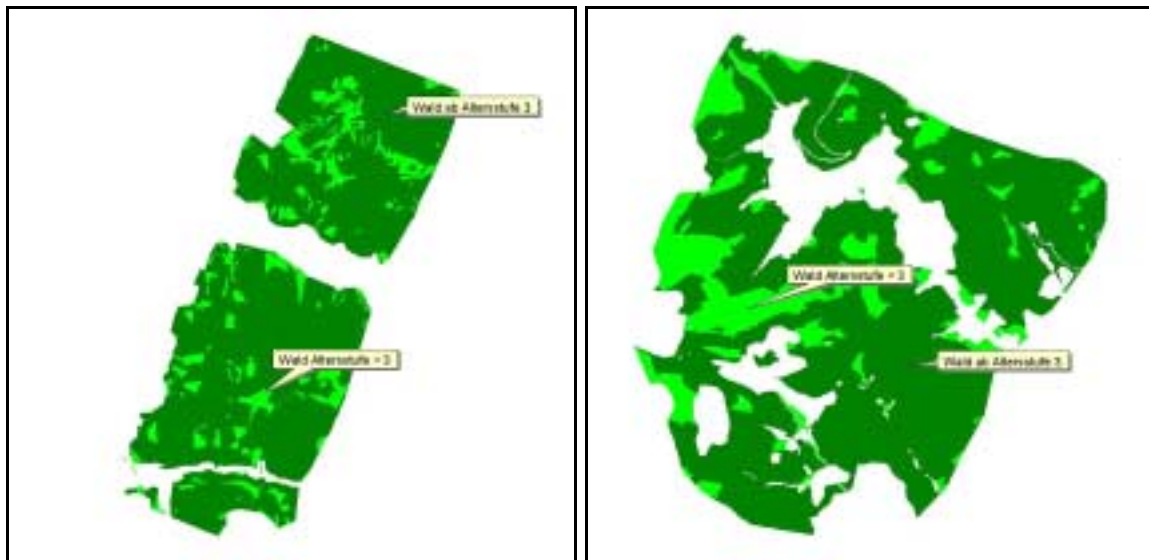


Abbildung 11: Maskierungen in ArcView® mit Hilfe von FOGIS Daten

- Flächendeckende Information über die Vegetationsoberhöhe vor dem Sturm. Stehen Daten dazu für den Zustand vor dem Sturm zur Verfügung, kann dies durch fernerkundungsbasierte Ableitung von aktuellen Bestandesoberflächen nach dem Sturm, für die Sturmflächenkartierung genutzt werden. Dies ist durch die Ableitung der Höhe aus Stereomodellen, wie zum Beispiel aus Luftbildern, aus radarbasierter Interferometrie oder aus Laserdaten, möglich.
Solche Höhendaten für den Zustand vor dem Sturm können auf zwei Weisen beschafft werden:
- In Zukunft: Durch Kombination von Bestandeshöhen aus FoGIS und dem derzeit in Prozessierung befindlichen neuen Digitalen Höhenmodell der Landesvermessungsverwaltung Baden-Württemberg.
- Derzeit:
 - Option 1: Daten des derzeitigen Höhenmodells auf einer 80m Urrasterdatenweite und der Nutzung der Vegetationsoberhöhen basieren.
 - Option 2: Ableitung von Bestandesoberhöhen aus Archivluftbildern der Vermessungsverwaltung. Diese können gegebenenfalls mit Hilfe von FoGIS Daten noch verbessert werden.

6.1.2 Auswertung der Anwendung der Erfassungsoptionen

6.1.2.1 Übersicht

Verfahren für die Kartierung von Objekten, die im Referenzdatensatz flächenhaft kartierbar waren (Schadklassen 1 und 2)

:

- Kartierung, unabhängig von der Referenz
- Vergleich mit der Referenz geometrisch - quantitativ
- Statistiken: Anteil fehlerfrei klassifizierter Flächen (Definitionen siehe im folgenden Absatz)
- Vergleich mit der Referenz qualitativ, Einzelflächenweise Bewertung (wurde im Einzelfall durchgeführt, da der streng geometrisch quantitative Ansatz nicht immer angemessen anwendbar war, z.B. bei Problemen mit der Georeferenzierung).

6.1.2.2 Quantitatives Standardverfahren für die flächenhafte Kartierung der Sturmflächen

Um die Genauigkeit der Schadenskartierung bewerten zu können, wurden die Kartiererergebnisse mit den Referenzdaten verglichen. Dafür wurden die Flächen streng geometrisch miteinander verglichen (verschnitten im Sinne der GIS Terminologie, siehe Abbildung 12).

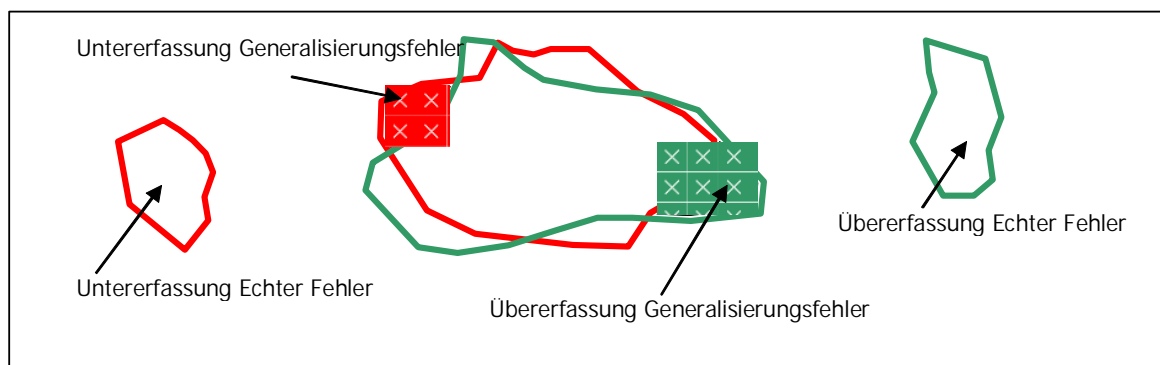


Abbildung 12: Bewertung der Genauigkeit der Schadenskartierungen (Rot = Referenz, Grün = Interpretation)

Basierend auf diesem Vergleich wurden zwei unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe angelegt:

- Bewertungsmaßstab nach der Anzahl der Sturmflächen:
Dabei wird eine kartierte Sturmfläche dann als zu recht kartiert bewertet, wenn diese an einer beliebigen Stelle eine Überlagerung mit einer Sturmfläche der Referenz aufweist.
- Bewertungsmaßstab nach der Fläche der Sturmflächen:
Dabei wird nur der Teil einer kartierten Sturmfläche als zu recht kartiert bewertet, der eine vollständige Überlagerung mit einer Sturmfläche der Referenz aufweist. Eine Sturmfläche kann bei diesem Ansatz daher teilweise richtig und teilweise falsch kartiert sein. Da bei der Kartierung der Sturmschäden die Klasse Sturm im Vordergrund steht, ist die Bewertung der Klasse 'Kein Sturm' von untergeordneter Bedeutung. Es werden daher lediglich klassenbezogene Nutzer- und Herstellergenauigkeiten angegeben.

Die Hersteller- und Nutzergenauigkeiten sind dabei folgendermaßen definiert:

- Nutzergenauigkeit (Bildlich: Hier ist der Bezug die Karte, die der Nutzer in Händen hält): Anteil der in der Ergebniskarte dargestellten Sturmflächen, die tatsächlich Sturmflächen sind.
- Herstellergenauigkeit (Bildlich: Hier ist der Bezug die Referenz, die der Hersteller darzustellen beabsichtigt.): Anteil der tatsächlich existierenden und in der Ergebniskarte dargestellten Sturmflächen, bezogen auf alle tatsächlich existierenden Sturmflächen.

Aus diesen Angaben sind Rückschlüsse auf die zwei Fehlerarten möglich:

- Fehler durch „Übererfassung“ (Bezug Nutzergenauigkeit, NG)
Alle Flächen die Kartiert wurden, aber keine Sturmflächen sind.
- Fehler durch „Untererfassung“ (Bezug Herstellergenauigkeit, HG)
Alle tatsächlich existierenden Flächen, die nicht kartiert wurden.

Zur Differenz zwischen Bewertungsmaßstab "Anzahl" und Bewertungsmaßstab „Fläche“:

Diese Differenz entsteht durch echte Kartierfehler und durch Unterschiede in der Flächenabgrenzung, die keine Erfassungsfehler sind, sondern im Toleranzbereich richtiger Abgrenzung liegen. Wegen der höheren Relation Umfang zu Fläche, ist dieser Effekt bei kleineren Flächen stärker.

Die tatsächliche flächenbezogene Genauigkeit liegt daher zwischen der Angabe des Bewertungsmaßstabs „Anzahl“ und der des Bewertungsmaßstabs „Fläche“.

Statistiken zur pauschalen Bewertung der Varianten

NG dargestellt gegenüber HG

Dieser Bewertungsmaßstab wurde für den Vergleich der Ergebnisse einzelner Varianten innerhalb der Schadklasse 1 oder der zusammengefassten Schadklassen 1 und 2 verwendet.

6.2 Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

6.2.1 Vorverarbeitung

6.2.1.1 E-SAR Daten

Georeferenzierung

Die Georeferenzierung der Datensätze wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (KELLERMANN, 2001) am Institut für Hochfrequenztechnik des DLR durchgeführt. Allerdings wurde diese Georeferenzierung nicht wie bisher üblich, mittels vor der Befliegung aufgestellten Corner-Reflektoren vorgenommen, sondern mit Hilfe von Kontrollpunkten aus digitalen topographischen Karten (gleiches gilt auch für die TerraSAR Daten).

Minimierung des Speckle-Effekts

Bevor mit der Erfassung der Sturmflächen begonnen werden konnte, mussten einige Vorverarbeitungsschritte durchgeführt werden. Zunächst wurden zur Minimierung des Speckle-Effekts (auch sog. Rauschen) verschiedene Filteralgorithmen erprobt. JOHLIGE (1998) und RIEDEL & SCHMULLIUS (2003) verwendeten zur Minimierung des Speckle-Effekts den Gamma Map (MAP = Maximum a Posteriori, LOPES ET AL., 1993) Filter und konnten dadurch ein deutlich homogeneres Bildprodukt und eine Reduzierung der Körnigkeit erzielen. Auch innerhalb des ProSmart 1 Projekts (KEIL & KNABE, 1999) im Teilvorhaben BIOMASS (Wiederaufforstung) wurden verschiedene adaptive Filter zur Minimierung des Speckle in E-SAR Daten wie zum Beispiel dem Gamma Map Filter und einem am DFD (Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum) entwickelten Filter nach WALESSA (1999), getestet. Mit dem Filter nach WALESSA (1999) konnten Kanten und Texturen dabei besser erhalten werden. Für diese Arbeit wurden mehrere in der Bildverarbeitungssoftware PCI Works enthaltene Filter mit unterschiedlichen Fenstergrößen getestet. In Tabelle 18 werden die untersuchten Filter mit den dazugehörigen Fenstergrößen und Iterationen aufgelistet.

Tabelle 18: Untersuchte Filter zur Minimierung des Speckle-Effekts in den E-SAR und TerraSAR Daten

| Filter | Fenstergröße (Anzahl der Iterationen) |
|------------------------------|--|
| Average Filter | 3 x 3 (1), 3 x 3 (2), 3 x 3 (3), 5 x 5 (1) |
| Enhanced Frost Filter | 3 x 3 (1), 3 x 3 (2), 3 x 3 (3), 5 x 5 (1), 7 x 7 (1), 9 x 9 (1) |
| Enhanced Lee Filter | 3 x 3 (1), 3 x 3 (2), 3 x 3 (3), 5 x 5 (1), 7 x 7 (1), 9 x 9 (1) |
| Gamma Map Filter | 3 x 3 (1), 3 x 3 (2), 3 x 3 (3), 5 x 5 (1), 7 x 7 (1), 9 x 9 (1) |
| Kuan Filter | 3 x 3 (1), 3 x 3 (2), 3 x 3 (3), 5 x 5 (1), 7 x 7 (1), 9 x 9 (1) |

Ausführliche Beschreibungen der getesteten Filter finden sich in LEE (1981A, 1981B, 1983A, 1983B, 1986); FROST ET AL. (1982); KUAN ET AL. (1985); LOPES ET AL. (1990A, 1990B); NEZRY ET AL. (1991); DESNOS & MATTEINI (1993); HOLECZ (1993) und HOLECZ ET AL. (1993). Für die Wahl des geeigneten Filters wurden innerhalb der Bilddaten die Klassen Wald, Sturm und Siedlung visuell unterschieden und in mehrere Trainingsgebiete unterteilt. Anschließend wurde nach Anwendung der verschiedenen Filter eine Trennbarkeitsanalyse der einzelnen Klassen nach den Standardmethoden Transformed Divergence- und Bhattacharyya Distance (oder Jeffries-Mastusuta) durchgeführt. Näheres zu den beiden Trennbarkeitsanalysen findet sich in KAILATH (1967); SWAIN & DAVIS (1978) und RICHARDS & JIA (1999).

Ermittlung des Radar-Rückstreukoeffizienten

In einem nächsten Schritt wurde der Rückstreuquerschnitt der E-SAR Daten und damit der sog. Rückstreukoeffizient (σ_0) mit Hilfe der Maske der Lokalen Einfallswinkel (wurde vom DLR mitgeliefert) ermittelt. Durch die Kalibrierung der Datensätze können diese direkt miteinander verglichen und ausgewertet werden (Kapitel 2.3.3).

Für die Kalibrierung der E-SAR Daten wurden folgende Formeln angewendet:

$$\sigma^\circ [\text{db}] = \beta^\circ * \text{Sin}(\theta)$$

Gleichung 6.1

Mit: $\sigma^\circ = \text{Sigma}_0$ (Rückstreuquerschnitt, -Koeffizient in dB)

$\beta^\circ = \text{Beta}_0$ (Radarhelligkeit, mittlere empfangene Energie pro Pixel)

$\text{Sin}(\theta) = \text{Theta}$ (Lokaler Einfallswinkel)

$$\beta^\circ = (10 * \text{Log}_{10}((\text{DN} + 32768)^2)) - 60$$

Gleichung 6.2

Mit: DN = Grauwert eines Pixels

$$\sigma^\circ [\text{db}] = \text{Log}10(\beta^\circ * \sin(\theta))$$

Gleichung 6.3

Da die Maske der Lokalen Einfallswinkel vor allem in Gebieten mit stärkerer Hangneigung große Abstufungen enthielt, wurden die Daten zusätzlich mit Hilfe eines Median-Filters geglättet.

Beleuchtungskorrektur

Für die automatischen Varianten zur Erfassung der Sturmflächen sowie für Texturanalysen wurde nach der Kalibrierung der Daten eine Beleuchtungskorrektur durchgeführt. Da die einzelnen Frequenzen und Polarisationen in Abhängigkeit von Geländeunterschieden und auch Bestandes- und Vegetationsstrukturen unterschiedlichen Rückstreuprozessen unterliegen, wurde von BEAUDOIN ET AL. (1996) ein entsprechender für Wald optimierter Ansatz entwickelt, bei dem der Rückstreuquerschnitt auf einen einheitlichen Referenz-Einfallswinkel θ_{ref} bezogen wird. Dies führte zu einem linearen Korrekturansatz, der die Steigung n als abzuschätzenden Wert enthält.

$$\sigma^\circ [\text{dB}] (\theta_{\text{ref}}) = \sigma^\circ [\text{dB}] (\theta_{\text{loc}}) + 10 n (\log (\cos (\theta_{\text{ref}})) - \log (\cos (\theta_{\text{loc}})))$$

Gleichung 6.4

Der Wert der Steigung n kann mit Hilfe einer Regressionsanalyse ermittelt werden, bei der die einzelnen Aufnahmekanäle von E-SAR (Frequenzen und Polarisationen) dem Kosinus der Lokalen Einfallswinkel gegenübergestellt werden. Dabei kann die Steigung n unterschiedliche Werte abhängig von gewählter Frequenz oder Polarisation einnehmen und so eine Korrektur für die einzelnen Kanäle durchgeführt werden. Allerdings werden bei diesem Ansatz nicht die unterschiedlichen Rückstreu-Strukturen des Waldes, zum Beispiel in Abhängigkeit von verschiedenen Baumarten oder Altersstufen, berücksichtigt. Dafür müssten einzelne Bestandesparameter und auch die Geländelage je Kanal (Polarisation, Frequenz) miteinbezogen werden.

6.2.1.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Geometrische Entzerrung

In einem ersten Schritt wurden die Datensätze auf die Kartenprojektion TM Deutsch 3 im Gauß-Krüger-Koordinatensystem entzerrt. Da die Daten bereits vorprozessiert waren und die entsprechenden Parameter für eine Orthorektifizierung nicht vorhanden waren, wurde für die geometrische Entzerrung ein polynomisches Verfahren 3. Ordnung (Nearest Neighbor) angewendet. Die Datensätze wurden dabei auf eine Pixelgröße von 20x20 m resampelt.

Für die Kohärenzdaten vor dem Sturm diente als Grundlage für die geometrische Anpassung eine TK 1:25.000. Die Kohärenzdaten nach dem Sturm wurden im „Bild zu Bild“-Verfahren auf die oben genannten Daten entzerrt.

6.2.1.3 Radarsat 1 Daten

Orthorektifizierung

Die beiden Szenen vor und nach dem Sturm lagen im sog. CEOS Format vor und wurden in einem ersten Schritt in die Software PCIWorks[®] importiert. Anschließend wurden beide Szenen in das Modul OrthoEngine^{®5} von PCI Geomatics[®] eingelesen um eine Orthorektifizierung durchzuführen.

Als Grundlage für die Orthorektifizierung diente ein auf 10 m resampeltes Höhenmodell des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg sowie für den Datensatz vor dem Sturm, digitale Topographische Karten im Maßstab 1:25.000. Der Datensatz nach dem Sturm wurde im sogenannten Bild zu Bild Verfahren auf den Datensatz vor dem Sturm entzerrt. Als Kartenprojektion wurde TM Deutsch 3 und das Gauß-Krüger Koordinatensystem ausgewählt.

Reduzierung des Speckle-Effekts

Da die Bilder mit einem Look prozessiert wurden, mussten sie nachträglich mit einem speziellen Radarfilter bearbeitet werden, der den Speckle-Effekt etwas abschwächt. Für die Wahl des geeigneten Filters wurde eine qualitative visuelle Bildanalyse durchgeführt. Anschließend wurde für die Daten der Radarrückstreuquerschnitt ermittelt und damit die weiteren Bildanalysen durchgeführt.

6.2.1.4 TerraSAR Daten

Die Vorbearbeitungsschritte der TerraSAR Daten entsprachen denen der E-SAR Daten und werden aus diesem Grunde hier nicht weiter erläutert. Nach entsprechender Filterung wurde der Rückstreuquerschnitt ermittelt. Daran schloss sich für die automatische Auswertung eine Beleuchtungskorrektur an.

6.2.2 Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

Innerhalb dieses Kapitels wird die Verfahrensweise der visuellen Erfassung der Sturmflächen für die unterschiedlichen Radardaten jeweils getrennt voneinander beschrieben. Da bei den ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten keine visuelle Erfassung durchgeführt wurde, entfällt in diesem Fall die Erläuterung.

⁵ OrthoEngine[®] von PCI Geomatics[®] enthält einen Algorithmus zur Orthorektifizierung von Radarsat Daten

Bei der visuellen Interpretation ist die Wahrnehmung optischer Reize von großer Bedeutung. Informationen werden von unseren Augen flächenhaft aufgenommen. Diese Information wird in verschiedene Muster und Strukturen umgesetzt. Der Mensch besitzt somit die Möglichkeit, verschiedene Objekte nach Kontur, Textur, Form, Farbunterschied, Helligkeits- und Größenunterschied zu differenzieren. Eine hohe Bedeutung innerhalb dieses Prozesses haben Texturen, unter denen man nach ALBERTZ (1999) lokale Bildstrukturen, die bei der Abbildung von Flächen häufig entstehen, versteht. Texturen sind in hohem Maße objektspezifisch. Durch die flexible Wahrnehmung des Menschen ist es dabei weitgehend irrelevant, wenn Parameter, wie die Beleuchtung des Objektes, die Qualität der Abbildung oder der Kontrast variieren. Allerdings sind gerade bei der visuellen Interpretation von Radardaten, sei es in Grauwertbildern oder in Farbkompositen, Schwierigkeiten und Probleme nicht zu vermeiden. So können ähnliche Texturen differenziert interpretiert werden. Bei der rechnergestützten Bildanalyse bleibt der Computer dagegen unbeeinflussbar. Nach der Erkennung der Objekte oder auch einzelner Texturen müssen nach ALBERTZ (1991) zusätzlich Rückschlüsse auf nicht direkt Erkennbares gezogen werden. Eine wichtige Rolle dabei spielt das Vorwissen des einzelnen Interpreten, das man sich auf unterschiedliche Art und Weise aneignen kann:

- Erkundung des Geländes im Vorfeld der Interpretation
- Zusammenarbeit mit Fachleuten verschiedener wissenschaftlicher Bereiche
- Sammlung von Informationen über ökologische, soziologische und landeskundliche Gegebenheiten
- Vorhandene Erfahrung des Interpreten in der visuellen Interpretation von Bilddaten (ev. auch Radardaten)

Die Vorgänge des Erkennens und des Interpretierens sind allerdings nicht als getrennt voneinander auftretende Prozesse aufzufassen. Vielmehr geschehen beide Vorgänge in den meisten Fällen gleichzeitig. Zweckmäßig ist es, mit Hilfe des Vorwissens mit leicht bzw. sicher erkennbaren Objekten zu beginnen, um danach auf die schwierigen Objekte überzugehen. Weitere Ausführungen zur visuellen Interpretation von Bilddaten finden sich in HILDEBRANDT (1996); ALBERTZ (1991) und GREGORY (1966).

6.2.2.1 E-SAR Daten

Für die visuelle Delinierung der Sturmflächen am Bildschirm mit Hilfe der E-SAR Daten wurden verschiedene Varianten durchgeführt. Diese unterscheiden sich in der Auswahl der Zusatzdaten, deren Vorbearbeitungszustand und dem Interpreten, der die visuelle Bearbeitung durchgeführt hat. Die FoGIS Daten dienen für die Ausmaskierung verschiedener Bereiche des Untersuchungsgebiets. Eine Übersicht über die untersuchten Varianten und kurze Erläuterungen gibt Tabelle 19.

Tabelle 19: Übersicht über die Varianten der visuellen Kartierung bei E-SAR

| Nr. | Art | Schadklasse | Daten | Sonstiges |
|-----|--|---------------------------------|--|-------------|
| 1 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 2 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB | Schadklasse 1/2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 3 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 4 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | Schadklasse 1/2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 5 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 6 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB | Schadklasse 1/2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 1 |
| 7 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Wald-, Nichtwald und Nichtholzbodenflächen (NHB) | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 2 |
| 8 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Wald-, Nichtwald und Nichtholzbodenflächen (NHB) | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | Interpret 3 |

Für die visuelle Kartierung wurde vor allem die Kanalkombination L-HH (Rot), L-HV (Grün), L-VV (Blau) verwendet. Da zwischen den Wald- und Sturmflächen in den X-Band Daten visuell kaum Unterschiede zu erkennen waren, wurde auf die Auswertung dieser Variante verzichtet.

Erläuterung der Varianten 5 und 6:

Für diese Varianten wurden verschiedene Waldklassen (auf Basis von FoGIS) gebildet. Mit Hilfe der Texturinformationen des Bilddatensatzes wurden die Sturmflächen am Bildschirm jeweils innerhalb einer Klasse deliniert. Nichtwald, NHB und Altersstufen jünger 20 waren von der Auswertung ausgeschlossen. Folgende Klassen wurden gebildet:

- Laubwald (mehr als 70% Lb-Anteil), Altersstufe 21-60
- Laubwald (mehr als 70% Lb-Anteil), Altersstufe 61-100
- Laubwald (mehr als 70% Lb-Anteil), Altersstufe größer 100
- Nadelwald (mehr als 70% Nb-Anteil), Altersstufe 21-60
- Nadelwald (mehr als 70% Nb-Anteil), Altersstufe 61-100
- Nadelwald (mehr als 70% Nb-Anteil), Altersstufe größer 100
- Mischwald (weniger als 70% Lb- oder Nb-Anteil), Altersstufe 21-60
- Mischwald (weniger als 70% Lb- oder Nb-Anteil), Altersstufe 61-100
- Mischwald (weniger als 70% Lb- oder Nb-Anteil), Altersstufe größer 100

Mit dieser Methode sollte eine Erleichterung bei der Delinierung und eine Verbesserung der Erfassungsgenauigkeit gegenüber den vorherigen Varianten erzielt werden.

Erläuterung der Varianten 7 und 8:

Bei diesen beiden Varianten wurden die E-SAR Daten von zwei unterschiedlichen Interpreten visuell ausgewertet. Ihnen standen zusätzlich die FoGIS Daten zur Ausmaskierung einzelner Bereiche (Nichtwald, Nichtholzboden, Bestände jünger 30 Jahre) zur Verfügung. Vorwissen über die Erfassung von Sturmflächen in optischen digitalen Fernerkundungsdaten (Satellitenbilder, Luftbilder) war vorhanden. Die Analyse von Radardaten wurde von beiden Interpreten bis dahin nicht durchgeführt. Es konnten sowohl die L-Band als auch die X-Band Daten (alle Polarisationen) in verschiedenen Farbkompositen oder als Graustufenbilder für die Interpretation verwendet werden. Es sollte lediglich die Schadklasse 1 interpretiert werden.

6.2.2.2 Radarsat 1 Daten

Für eine visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der Radarsat Daten wurde auf multitemporale Verfahren zurückgegriffen, bei denen die Veränderungen zwischen zwei oder mehreren Datensätzen, hier Radarsat vor Sturm und Radarsat nach Sturm, sichtbar gemacht werden können (Change Detection). Dazu wurden aus beiden Datensätzen ein Differenz-Bild, ein Durchschnitts-Bild und ein Ratio-Bild berechnet. Zusätzlich dazu wurden verschiedene Texturbilder auf Basis der Grey Level Cooccurrence Matrix (GLCM, Grauwertübergangsmatrix) berechnet, bei der die Häufigkeit des Auftretens einer Grauwertkombination bezüglich einer Relation (z.B. Grauwertkombination des Bildpunktes in der Position (x, y)

und des rechten Nachbars ($x, y+1$) berechnet wird (HABERÄCKER, 1995). Folgende Texturbilder wurden auf Basis der GLCM mit unterschiedlichen Fenstergrößen erstellt: Homogeneity, Contrast, Dissimilarity, Entropy, Angular Second Moment, Mean, Standard Deviation, Correlation.

6.2.2.3 TerraSAR Daten

Vor der eigentlichen Delinierung am Bildschirm wurde für die TerraSAR Daten eine Signaturanalyse durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Kanäle (unterschiedliche Frequenz und/oder Polarisation) einander gegenüber gestellt, um die Möglichkeit der Trennung von Wald- und Sturmflächen zu ermitteln. Insgesamt 100 Trainingsflächen (40 für Waldflächen, 60 für Sturmflächen), verifiziert mit Hilfe des Referenzdatensatzes der Sturmflächen, der zur Verfügung stehenden Luftbilder und der FoGIS Daten, wurden für die Signaturanalyse ausgewählt und analysiert.

Für die visuellen Kartierungsvarianten (Tabelle 20) wurden wie auch bei E-SAR vorwiegend die L-Band Daten genutzt.

Tabelle 20: Übersicht über die Varianten der visuellen Kartierung

| Nr. | Art | Schadklasse | Daten |
|-----|---|---------------------------------|--|
| 1 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 2 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB | Schadklasse 1/2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 3 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | Schadklasse 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 4 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | Schadklasse 1/2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |

Variante 1 und 2:

Mit Hilfe der FoGIS Daten wurden Nichtwaldflächen und Nichtholzbodenflächen ausmaskiert.

Variante 3 und 4:

Aus den FoGIS Daten wurden Bestände jünger 30 Jahre extrahiert und aus der visuellen Kartierung vollkommen ausgeschlossen. Ebenso wurden Nichtholzbodenflächen ausmaskiert.

6.2.3 Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

6.2.3.1 E-SAR Daten

Die automatische Auswertung der E-SAR Daten (respektive der TerraSAR Daten) erfolgte mit der Objekt orientierten Bildauswertungssoftware eCognition[®]. Hierbei wurde zunächst eine Segmentierung des Bilddatensatzes in aufeinander folgende hierarchische Ebenen unter Nutzung des „Fractal Net Evolution“ Ansatzes (BAATZ & SCHÄPE, 1999) vorgenommen. Der „Fractal Net Evolution“ Ansatz basiert auf eine Segmentierung im objektorientierten Raum. Der Prozess beginnt mit der Bildung eines Objekts aus einem Pixel. In jedem weiteren Schritt verschmelzen benachbarte Objekte, basierend auf homogenen Kriterien (spektrale und räumliche Eigenschaften), welche die Ähnlichkeit angrenzender Pixel beschreiben, zu größeren Objekten (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Nach der sog. Segmentierung des Bilddatensatzes kann eine Klassifizierung der Objekte in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie z.B. spektrale Information, Textur und Form, unter Nutzung der Fuzzy-Logik Theorie durchgeführt werden. Ausführliche Beschreibungen finden sich im eCognition[®] Handbuch und bei BAATZ & SCHÄPE (2000). Eine Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte für die automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der E-SAR (und TerraSAR Daten) gibt Abbildung 13.

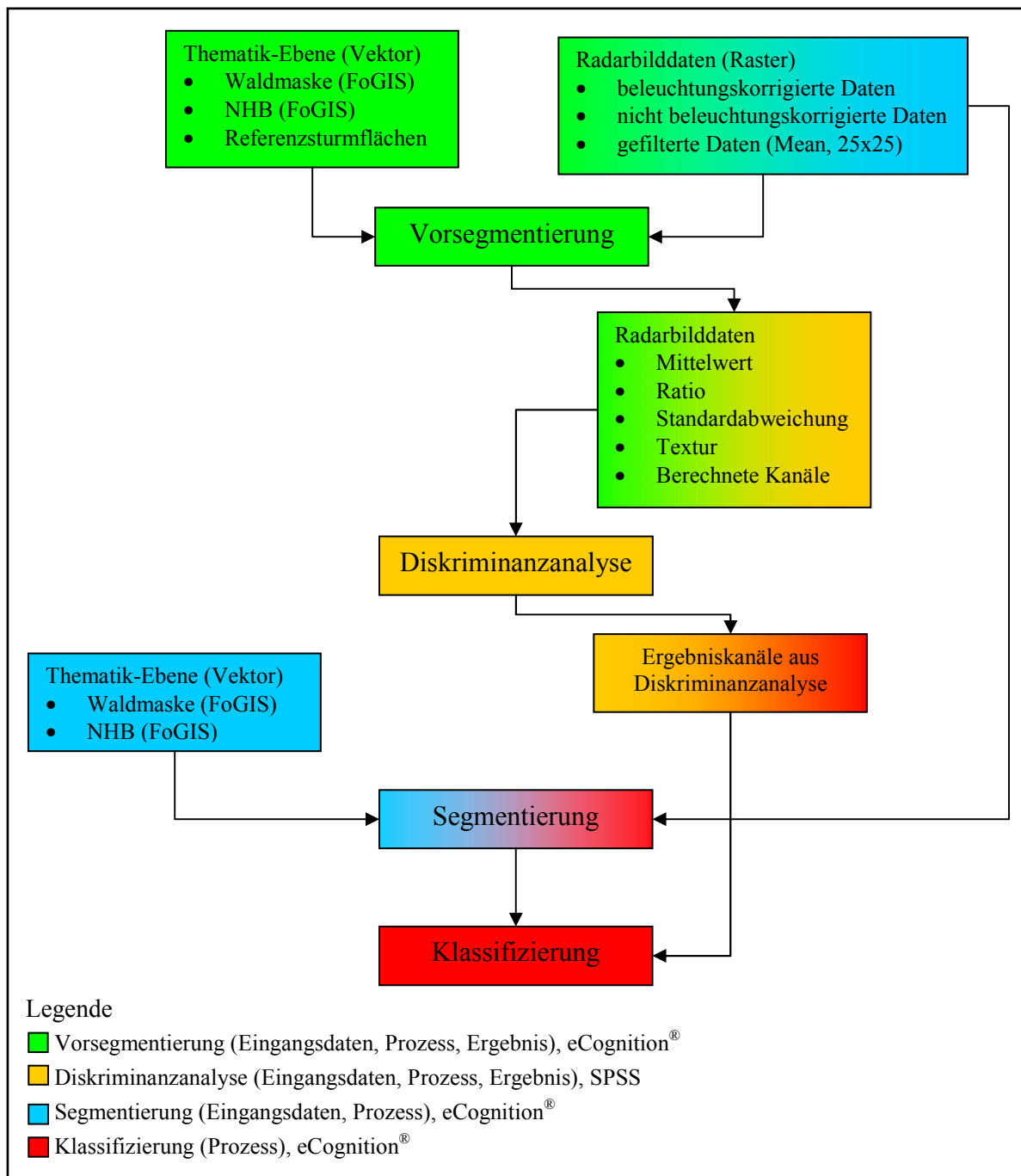


Abbildung 13: Übersicht über den Ablauf der automatischen Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der E-SAR und TerraSAR Daten

Vorsegmentierung der E-SAR Daten als Eingangsdaten für die schrittweise Diskriminanzanalyse

Vor der Diskriminanzanalyse wurde mit dem Programm eCognition® eine Vorsegmentierung durchgeführt (siehe Abbildung 13, grün). Dabei wurden die FoGIS Daten (Waldmaske und NHB) und die Referenz-Sturmflächen als Thematik-Layer in die Segmentierung eingebunden. Die Segmentierung wurde auf Grundlage der beleuchtungskorrigierten und nicht

beleuchtungskorrigierten E-SAR Daten sowie den daraus gefilterten Daten (Mean-Filter, 25x25 Fenster) durchgeführt. Da die Vorsegmentierung mit Hilfe der FoGIS Daten und der Referenz-Sturmflächen nicht zu stark von der späteren eigentlichen Segmentierung abweichen sollte, wurde dies bei der Wahl der Segmentierungs-Parameter berücksichtigt. Vor der Segmentierung können Parameter wie die Gewichtung einzelner Bildkanäle (oder Verwendung von Thematiken) oder der sog. Scale-Parameter, bei dem ein Schwellwert für die maximale Änderung der Heterogenität beim Verschmelzen zweier Objekte festgelegt wird, getrennt voneinander eingestellt werden. Mit dem Scale-Parameter kann also indirekt auf die Größe der Objekte eingewirkt werden. Ebenso können vor der Segmentierung Parameter, welche die Farb- (spektrale Eigenschaften, color) und Formeigenschaften (shape) beschreiben, eingestellt werden. Die oben genannten Segmentierungsoptionen wurden in verschiedenen Kombinationen durchgetestet, bis visuell ein ansprechendes Segmentierungsergebnis erzielt wurde. Nach der Vorsegmentierung wurden die Mittelwerte, Standardabweichungen und Ratios der jeweiligen Segmente für die Diskriminanzanalyse exportiert. Ebenso wurden in eCognition[®] Texturparameter für die einzelnen Kanäle und Segmente berechnet (Grey Level cooccurrence matrix nach HARALICK, 1973) und verschiedene Kanäle miteinander kombiniert, für jedes Segment berechnet und für die Diskriminanzanalyse exportiert. Mit Hilfe des verwendeten Thematik-Layers konnte für jedes Segment die Klassenzugehörigkeit (Waldfläche, NHB, Sturmfläche) exportiert werden.

Durchführung der schrittweisen Diskriminanzanalyse mit SPSS[®]

Im nächsten Schritt vor der eigentlichen Segmentierung und Klassifizierung wurde eine schrittweise Diskriminanzanalyse (Abbildung 13, orange) auf Basis der durch die Vorsegmentierung erhaltenen Segmente mit der Software SPSS[®] durchgeführt. Ziel der Diskriminanzanalyse ist es, die Werte einer abhängigen (zu erklärenden) Variablen (Zugehörigkeit zur Klasse Sturmfläche oder Waldfläche) durch die Werte einer oder mehrerer unabhängigen (erklärenden) Variablen (verschiedene Bildkanäle, Texturkanäle, usw.) zu prognostizieren (BROSIUS, 2002). Für die Auswahl der unabhängigen Variablen wurde die Schrittweise Selektionsmethode verwendet. Dabei wählt diese Methode „...aus den potentiellen erklärenden Variablen nacheinander jeweils die geeignetsten aus, bis von den noch nicht ins Modell aufgenommenen Variablen kein signifikanter Erklärungsbeitrag mehr erwartet werden kann...“ (BROSIUS, 2002). Zunächst wird aus allen Variablen eine Variable ausgewählt, für die sich der kleinste Wilk's Lambda Wert⁶ ergibt. Im nächsten Schritt wird aus den verbleibenden Variablen eine weitere Variable nach dem gleichen Kriterium

⁶ Wilk's Lambda ist ein Maß für die Güte des Modells, der Wert errechnet sich als Quotient aus der Quadratsumme innerhalb der Gruppen und der gesamten Quadratsumme:

$$\text{Wilk's Lambda} = \text{QSI}/(\text{QSZ}+\text{QSI})$$

QSI=Quadratsumme innerhalb der Gruppen, QSZ=Quadratsumme zwischen den Gruppen.

ausgewählt. Danach erfolgt die Prüfung der ersten Variablen, ob diese weiterhin in der Diskriminanzfunktion berücksichtigt werden kann. Dies wiederholt sich, bis alle Variablen im Modell aufgenommen sind, keine Variable mehr dem Aufnahmekriterium genügt (voreingestellter F-Wert mit Aufnahme- und Ausschlusskriterium) oder die Höchstzahl an Schritten erreicht wurde.

Die Zahl der Schritte wurde nicht begrenzt. Um einen entsprechenden Schritt auszuwählen, diente der Wert Wilk's Lambda, bei dem niedrige Werte eine bessere Trennbarkeit der Klassen (Sturm von Wald) und eine eindeutiger Zugehörigkeit der Variablen zu dieser Gruppe, aussagen⁷. War zwischen zwei Schritten keine signifikante Änderung mehr erkennbar, wurden die Variablen des vorangegangenen Schritts als Ergebnis in die Klassifizierung eingebracht.

Segmentierung und Klassifizierung der E-SAR Daten auf Basis der Ergebnisse der Diskriminanzanalyse.

Hierfür wurde eine neue Segmentierung (Abbildung 13, blau) mit gleichen Parametern durchgeführt, wie bei der Vorsegmentierung. Es wurde nur die Information des Thematik-Layers für die Segmentierung verwendet, die bei der jeweiligen Variante vorgesehen war. Die Referenz-Sturmflächen wurden komplett aus dem Thematik-Layer gelöscht.

Nach der Segmentierung wurde mit Hilfe der Kanäle aus der Diskriminanzanalyse eine Klassifizierung (Abbildung 13, rot) durchgeführt. Da die Klassifizierung mit möglichst einfachen, ev. auf andere Datensätze übertragbare Mittel durchgeführt werden sollte, wurde die Nearest Neighbor Methode in eCognition[®] verwendet, bei der automatisch eine mehrdimensionale Funktion der Gruppenzugehörigkeit auf Basis ausgewählter Trainingsgebiete (hier sog. Samples) erzeugt wird (mehr dazu siehe auch eCognition[®]-Handbuch).

Eine Übersicht über die Erfassungsvarianten der Sturmflächen mit den E-SAR Daten und dem Programm eCognition[®] gibt Tabelle 21. Für die Varianten 9 und 10 wurde auch eine Schrittweise Diskriminanzanalyse durchgeführt. Allerdings wurde hierfür ein anderer Thematik-Layer verwendet, so dass die oben beschriebene Prozedur davon abweicht. Die genaue Erläuterung ist unter Variante 9 und 10 zu finden.

⁷ Wilk's Lambda kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Tabelle 21: Übersicht über die automatischen Erfassungsvarianten mit eCognition®

| Nr. | Art | Schad- klasse | Daten | Sonstiges |
|-----|--|-------------------------|--|---------------------|
| 1 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 2 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 und 2 zusammengefasst | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 3 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 4 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 und 2 zusammengefasst | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 5 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 6 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 und 2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 7 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 8 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 und 2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 9 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB | 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 10 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB | 1 und 2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |

Variante 1 und 2:

Als Eingangsdatensätze für die Segmentierung und Klassifizierung dienten die E-SAR X-Band Daten. Zusätzlich wurde eine Waldmaske, basierend auf FoGIS Daten und die Nichtwaldflächen innerhalb des Waldes als thematische Ebene integriert.

Variante 3 und 4:

Zusätzlich zu den Grundeinstellungen der Varianten 1 und 2 wurden die sog. Nichtholzbodenflächen (NHB) und Waldbestände jünger 30 Jahre als thematische Ebene mit aufgenommen und in die Segmentierung und Klassifizierung eingeschlossen.

Variante 5 und 6:

In diesen beiden Varianten wurden nicht nur die X-Band Daten für die Vorsegmentierung, Diskriminanzanalyse, Segmentierung und Klassifizierung verwendet, sondern auch L-HH, L-HV und L-VV. Wie schon in den Varianten 1 und 2 wurden die Nichtwaldflächen im Gebiet 1 mit Hilfe der FoGIS Daten aus der Segmentierung und Klassifizierung herausgenommen.

Variante 7 und 8:

Wie schon in Variante 3 wurden hier nicht nur Nichtwaldflächen mit Hilfe einer Thematik-Ebene aus der Klassifikation in eCognition[®] ausgeschlossen, sondern die Informationen über Nichtholzbodenflächen und Bestände jünger 30 Jahre wurden in die Segmentierung und Klassifizierung mit integriert. Gegenüber Variante 3 und 4 wurden die L-Band Daten in die Analysen miteinbezogen.

Variante 9 und 10:

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Varianten der automatisierten Kartierung der Sturmflächen mit E-SAR wurde ein weiteres Verfahren erprobt, bei dem die FoGIS Daten noch stärker in die Klassifizierung miteinbezogen wurden. Das Verfahren ist vergleichbar mit den Varianten 5 und 6 der visuellen Kartierung der Sturmflächen mit E-SAR. Hierbei wurde nicht nur eine Einteilung nach Wald, Nichtwald und Beständen jünger 30 vorgenommen, sondern innerhalb der Klasse Wald weiter differenziert. So wurde zunächst mit Hilfe der Sachdaten aus FoGIS eine Unterteilung in die Klassen Nadelwald, Laubwald und Mischwald vorgenommen⁸. Zusätzlich wurde innerhalb dieser Klassen eine differenzierte Alterseinteilung unternommen. Tabelle 22 gibt einen Überblick über die erstellten Klassen.

⁸ Eine Einteilung in Laub-, Nadelwald bzw. Mischwald wurde ab einem Bestandesanteil von 70% der jew. Baumarten durchgeführt.

Tabelle 22: Alterseinteilung der Klassen in eCognition®

| Klasse | In eCognition® verwendet |
|---------------------------|--------------------------|
| Laubwald, 0 – 20 Jahre | Nein |
| Laubwald, 21 – 60 Jahre | Ja |
| Laubwald, 61 – 100 Jahre | Ja |
| Laubwald, 101 - | Ja |
| Nadelwald, 0 – 20 Jahre | Nein |
| Nadelwald, 21 – 60 Jahre | Ja |
| Nadelwald, 61 – 100 Jahre | Ja |
| Nadelwald, 101 - | Ja |
| Mischwald, 0 – 20 Jahre | Nein |
| Mischwald, 21 – 60 Jahre | Ja |
| Mischwald, 61 – 100 Jahre | Ja |
| Mischwald, 101 - | Ja |

Der weitere Ablauf entsprach den vorherigen Varianten. Jede Klasse wurde nach einer Vorsegmentierung einer Diskriminanzanalyse unterzogen und anschließend wieder in eCognition® mit den jeweiligen Ergebniskanälen mit Hilfe des Nearest Neighbor Verfahren klassifiziert.

6.2.3.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Um das Potential der Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2 für die Erfassung von Sturmflächen aufzuzeigen, wurde eine Signaturanalyse durchgeführt. Für die Erfassung der Sturmflächen wurde ein halbautomatisches Verfahren mit Hilfe von manuell gesetzten Schwellenwerten gewählt. Die Auswertung konzentrierte sich auf das sehr ebene Gebiet 2, da eine Orthorektifizierung der Daten wie schon in Kapitel 6.2.1.2 erwähnt, nicht möglich war.

Signaturanalyse

Vor der eigentlichen Erfassung der Sturmflächen wurde eine Signaturanalyse für die Datensätze vor und nach dem Sturm durchgeführt. Ausgewertet wurden dafür der jeweilige Kohärenzgrad von ERS-1 und ERS-2 sowie deren mittlere Rückstreuung. Mit Hilfe der Referenzdaten konnten aus 33 Testflächen insgesamt 15 Sturm- und 18 intakte Waldflächen ermittelt und für die Signaturanalyse genutzt werden.

Multitemporale Auswertung - Change Detection

Da Datensätze vor und nach dem Sturm zur Verfügung standen, konnte für die Erfassung der Sturmflächen die sogenannte Change Detection Methode angewendet werden, die bei Auswertung multitemporaler Datensätze in vielen Fällen Verwendung findet und hier Veränderungen zwischen den Kohärenzdaten vor und nach dem Sturm sichtbar machen soll. Das Change Detection Verfahren wurde für dieselben Datensätze auch in einer französischen Forschungsgruppe, die sich auch mit der Erfassung von Sturmflächen mit Hilfe moderner Fernerkundungsmethoden in Frankreich befasste, angewendet (YESOU ET AL., 2000).

Aus beiden Kohärenzdaten wurde dafür ein Ratio-Bild berechnet und dieses anschließend wieder auf 8 Bit skaliert.

Halbautomatische Ermittlung der Sturmflächen mittels Schwellwertmethode

Da die Erfassung der Sturmflächen auf einer rein visuellen Ansprache nicht möglich war, wurde auf die visuelle Informationsextraktion verzichtet und dafür ein halbautomatisches Verfahren mittels Schwellwertbildung ausgewählt, das im Folgenden kurz beschrieben wird. Zunächst wurde für den berechneten Ratio-Kanal der Grauwertbereich ermittelt, bei dem eine größere Divergenz zwischen den beiden Kohärenzdaten innerhalb der Waldflächen bestand. Anschließend wurden im Kohärenzkanal nach dem Sturm, Grauwertbereiche mit mittlerem bis hohem Kohärenzwert ermittelt. Beide Ergebnisse wurden miteinander verschnitten und die gemeinsamen Bereiche extrahiert. Zusätzlich wurde das Ergebnis noch gefiltert, um homogene Flächen zu erhalten.

Es wurden zwei Varianten mit den folgenden Voraussetzungen ausgewertet:

Variante 1:

- Waldmaske vorhanden, die Wald- und Nichtwaldflächen voneinander trennt
- Auswertung nur in Gebiet 2
- Flächen ab 0,5 ha
- Schadklasse 1

Variante 2:

- Waldmaske vorhanden, die Wald- und Nichtwaldflächen voneinander trennt
- Auswertung nur in Gebiet 2
- Flächen ab 0,5 ha
- Schadklassen 1+2 zusammengefasst

6.2.3.3 TerraSAR Daten

Auch die automatisierte Kartierung der Sturmflächen mit TerraSAR wurde mit Hilfe der Diskriminanzanalyse und der segmentbasierten Software eCognition[®] durchgeführt. Das verwendete Verfahren entspricht dabei dem bereits in Kapitel 6.2.3.1 beschriebenen Ablauf zur automatisierten Kartierung von Sturmflächen mit Hilfe der E-SAR Daten. Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Varianten (Tabelle 23) gegeben und ausgewählte Ergebnisse präsentiert. Die verwendeten Methoden sind dem Kapitel 6.2.3.1 zu entnehmen.

Tabelle 23: Übersicht über die automatischen Erfassungsvarianten mit TerraSAR

| Nr. | Art | Schadklasse | Daten | Sonstiges |
|-----|---|-------------------------|--|---------------------|
| 1 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 2 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 und 2 zusammengefasst | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 3 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 4 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 und 2 zusammengefasst | X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 5 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 6 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald | 1 und 2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 7 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |
| 8 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Wald < 30 Jahre, Nichtwald, NHB | 1 und 2 zusammengefasst | L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen | Diskriminanzanalyse |

Während in den Varianten 1 und 2 mit Hilfe der X-Band Daten Sturmflächen innerhalb von Waldflächen erfasst werden, werden in den Varianten 3 und 4 Nichtholzbodenflächen und Bestände jünger 30 Jahre aus der Auswertung ausgeschlossen. Für die Auswertung der Varianten 5 und 6 wurden die L-Band Daten herangezogen. Die automatische Erfassung wurde für sämtliche Bereiche innerhalb des Waldes durchgeführt, während für die Varianten 7 und 8 wieder Nichtholzbodenflächen und Bestände jünger 30 Jahre mit Hilfe der FoGIS Daten ausgeschlossen wurden.

6.2.4 Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

Da die Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Radardaten in einigen Fällen zu Fehlerfassungen bzw. Fehlklassifikationen führte und teilweise verschiedene Sturmflächen mit den unterschiedlichen Methoden nicht kartiert werden konnten, wurden verschiedene Faktoren untersucht, welche Einfluss auf die Kartierung haben könnten.

Die Ergebnisse der Analyse wurde unterteilt in Sturmflächen, die nicht erfasst werden konnten (unterschätzte Flächen) und Flächen, die innerhalb der Erfassungsvarianten als Sturmflächen klassifiziert oder kartiert wurden, aber in der Realität keine Sturmflächen waren (überschätzte Flächen).

Innerhalb 8 unterschiedlicher Varianten (siehe Tabelle 24) wurden folgende Parameter auf ihren Einfluss für die Erfassung der Sturmflächen untersucht:

- Größe der unterschätzten Sturmfläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1
- Hangneigung (abgeleitet aus DHM des LVA) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1 und Hangneigung der überschätzten Fläche gegenüber der Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets (ohne Schadklasse 1)
- Exposition (abgeleitet aus DHM des LVA) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1 und Exposition der überschätzten Fläche gegenüber der Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets (ohne Schadklasse 1)
- Bestandeshöhe (berechnet mit Hilfe der FoGIS Daten und Ertragstafeln) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1 und Bestandeshöhe der überschätzten Fläche gegenüber der Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets
- Bestandesalter (abgeleitet aus FoGIS Daten und Forsteinrichtungswerk) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1 und Bestandesalter der überschätzten Fläche gegenüber der Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets
- Lokale Einfallswinkel (abgeleitet aus Radarbefliegung) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1 und Lokale Einfallswinkel der überschätzten Fläche gegenüber des gesamten Untersuchungsgebiets
- Räumungszustand (aus Terrestrik und Luftbild) der unterschätzten Fläche gegenüber der Gesamtfläche der Schadklasse 1.

Die gesamte Analyse wurde mit Ausnahme des Parameters Räumungszustand pixelbasiert durchgeführt. Dafür wurden die Referenzsturmflächen des Untersuchungsgebiets 1, die je Variante erfassten Sturmflächen und das Untersuchungsgebiet 1 (auf Basis von FoGIS), in Grid Daten mit einer Rastergröße von 1x1 m umgewandelt und in ArcView 3.2 ausgewertet. Für die Darstellung der Ergebnisse wurde jeweils das arithmetische Mittel aus allen untersuchten Varianten gebildet und zur Bewertung herangezogen. Für den Räumungszustand

wurde eine flächenhafte Analyse erstellt. Die verwendeten Varianten der untersuchten Parameter sind in der folgenden Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Übersicht über die in die Analyse einbezogenen Varianten

| Nr. | Art | Daten |
|-----|---|--|
| 1 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB, visuelle Auswertung | TerraSAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 2 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald, automatische Auswertung | TerraSAR, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen |
| 3 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald, automatische Auswertung | TerraSAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen |
| 4 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald und NHB, visuelle Auswertung | E-SAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 5 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB, visuelle Auswertung | E-SAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert |
| 6 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald, automatische Auswertung | E-SAR, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen |
| 7 | Waldmaske (FoGIS) – Ausmaskierung von Nichtwald, automatische Auswertung | E-SAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen |
| 8 | Waldmaske (FoGIS) – Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, sowie in jeweils 4 verschiedene Altersklassen, Ausmaskierung von Nichtwald, NHB, automatische Auswertung | E-SAR, L-HH, L-HV, L-VV, X-HH, X-VV, beleuchtungskorrigiert, nicht beleuchtungskorrigiert, Texturen |

6.2.5 Zusätzliche Auswertung

6.2.5.1 Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995

Die in Kapitel 5.2 beschriebenen Oberflächenmodelle von 1995 und 2000 dienten für eine weitere automatische Erfassungsvariante. Da beide Oberflächenmodelle jeweils das Abbild der Objekte auf der Erdoberfläche darstellen, konnten die Höhen-Zustände der Objekte vor und nach dem Sturm, in diesem Fall die jeweiligen Bestandeshöhen, miteinander verglichen werden. Dafür wurde das digitale Oberflächenmodell aus der Radarbefliegung, nach einem Resampling auf 1x1 m, von dem aus den Luftbildern erstellten digitalen Oberflächenmodell subtrahiert. Die Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen beide Oberflächenmodelle in einer drei-dimensionalen Darstellung. Mit blauen Pfeilen sind die Stellen im Untersuchungsgebiet 1 markiert, die visuell betrachtet, deutliche Unterschiede zwischen den beiden Oberflächenmodellen in beiden Abbildungen aufweisen.

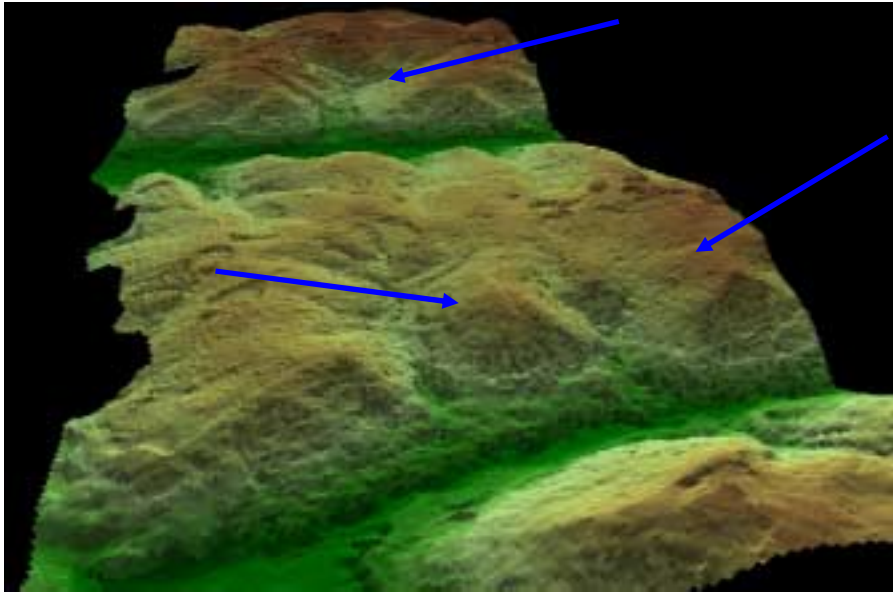


Abbildung 14: 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen einer Diplomarbeit (Bahner, 2003) aus Luftbildern des LVA Baden-Württemberg aus dem Jahr 1995.

Blau markiert, größere Abweichungen zwischen 1995 und 2000.

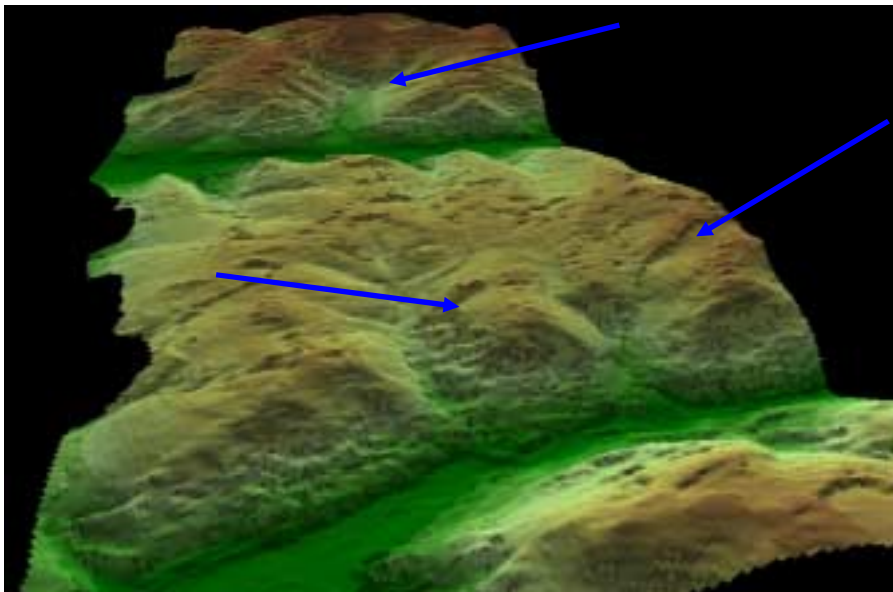


Abbildung 15: 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen der E-SAR X-Band Befliegung vom April 2000. Potentielle Veränderungen gegenüber 1995 (blaue Pfeile)

Beide Oberflächenmodelle wurden mit der Software ArcView[®] und der Erweiterung Spatial Analyst in ein Grid umgewandelt. Danach wurde das Oberflächenmodell E-SAR von dem aus Luftbildern erstellten Oberflächenmodell von 1995 subtrahiert.

6.2.5.2 Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI)

Für eine punktuelle Erfassung der Sturmschäden wurden Stichprobenpunkte der Bundeswaldinventur (BWI) verwendet. Da diese Erfassungsoption vornehmlich für eine schnelle und zeitnahe Statistik über das Ausmaß der Schäden (betroffene Baumarten, Bestandesalter) Verwendung finden könnte, wurden die TerraSAR Daten für diese Option verwendet. Als Testgebiet diente hierfür das Untersuchungsgebiet 1, da für Gebiet 2 keine TerraSAR Daten vorhanden waren.

Insgesamt lagen 22 BWI-Punkte im Untersuchungsgebiet 1. Jeder dieser 22 Punkte mit einem Radius von 15 m je Stichprobenkreis, wurde einzeln angesprochen und mit Hilfe der Referenzsturmflächen ermittelt, ob innerhalb des jeweiligen Stichprobenkreises Sturmschäden der Schadklasse 1 oder Schadklasse 2 vorhanden waren. Diese Daten wurden anschließend mit den Sturmflächen verglichen, die mit Hilfe der TerraSAR Daten ermittelt werden konnten.

7 Ergebnisse

7.1 Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

7.1.1 Vorverarbeitung

7.1.1.1 E-SAR Daten

Georeferenzierung

Da die Georeferenzierung nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, sondern vom DLR im Rahmen einer Diplomarbeit, soll hier kurz auf das Ergebnis eingegangen werden. Die Verwendung von Passpunkten aus topographischen Karten brachte das Ergebnis, *“...dass eine korrekte oder vielmehr eine ausreichende Überlagerung von ... SAR-Szenen mit einer topographischen Karte mit diesen Daten nicht möglich ist...”* (KELLERMANN, 2001). Es wurden in X- und L-Band Daten mittlere Abweichungen von 10 – 20 m erreicht, die sich auf die Erfassungsgenauigkeit der Sturmflächen auswirken kann.

In einigen Bereichen der E-SAR und der TerraSAR Bilddaten sind Artefakte und horizontale Verschiebungen festzustellen (Abbildung 16, E-SAR). Dies ist eventuell auf das zur Geokodierung verwendete DHM sowie auf die Ermittlung der Passpunkte mit Hilfe der TK25 zurückzuführen.

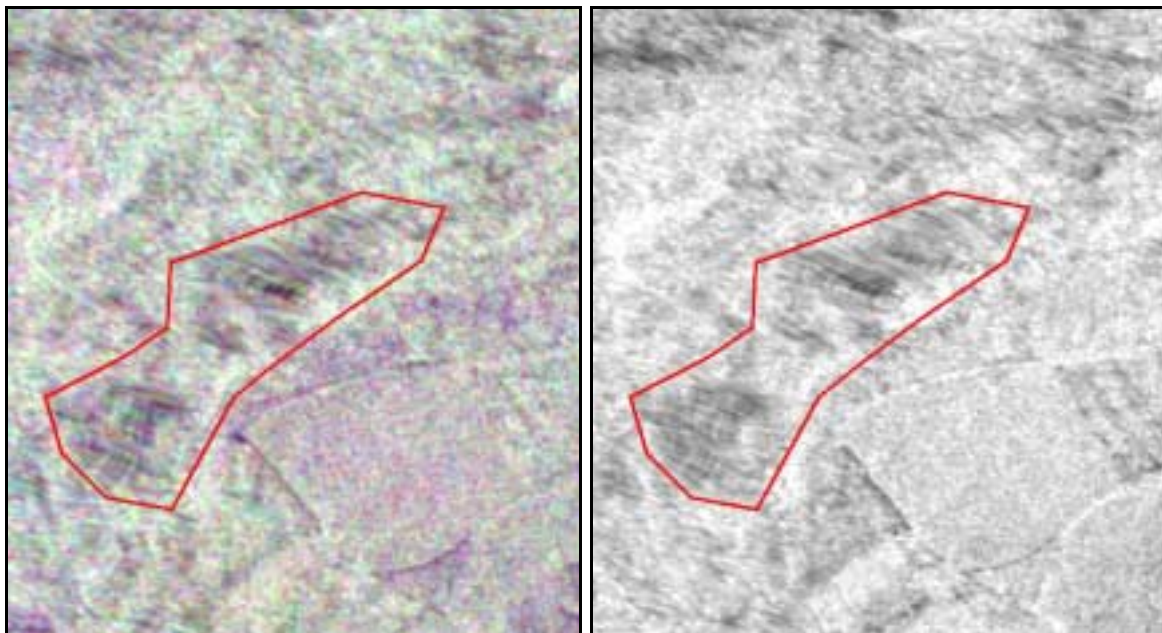


Abbildung 16: Artefakte und horizontale Verschiebungen in E-SAR L-HH, L-HV, L-VV (Links) und E-SAR X-HH (Rechts)

Minimierung des Speckle-Effekts

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Trennbarkeitsanalysen für die Ermittlung des zu verwendenden Speckle-Filters, am Beispiel von E-SAR X-Band mit HH-Polarisation, aufgelistet. Die ermittelten Werte lassen sich in drei Klassen einteilen:

- Werte von 0,0 bis 0,9 entsprechen einer sehr geringen Trennbarkeit,
- Werte von 1,0 bis 1,9 entsprechen einer geringen Trennbarkeit,
- Werte von 1,9 bis 2,0 entsprechen einer guten Trennbarkeit

Tabelle 25: Ergebnisse der Trennbarkeitsanalyse für die einzelnen Filter bei E-SAR X-HH

| E-SAR X-HH | Ohne Filter [Ø] | 33_1 [Ø] | 33_2 [Ø] | 33_3 [Ø] | 55_1 [Ø] | 77_1 [Ø] | 99_1 [Ø] |
|------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Average Filter | 0,36263 | 0,58365 | 0,63755 | 0,66515 | 0,66693 | -- | -- |
| Enhanced Frost Filter | 0,36263 | 0,58251 | 0,64392 | 0,67249 | 0,67350 | 0,71510 | 0,74239 |
| Enhanced Lee Filter | 0,36263 | 0,55888 | 0,63648 | 0,67148 | 0,63487 | 0,66800 | 0,68911 |
| Gamma Map Filter | 0,36263 | 0,50689 | 0,58578 | 0,62993 | 0,54626 | 0,55541 | 0,55754 |
| Kuan Filter | 0,36263 | 0,58701 | 0,63668 | 0,66362 | 0,67824 | 0,7265 | 0,75923 |

Bei allen Filtern konnte eine Verbesserung der Trennbarkeit der Klassen erzielt werden, was der Vergleich der Ergebnisse der Spalte ohne Verwendung von Filtern gegenüber allen anderen Spalten zu entnehmen ist. Da bis auf den Gamma MAP Filter alle anderen Filter in etwa die gleichen Werte aufwiesen, wurde zusätzlich eine qualitative Begutachtung mittels einer visuellen Überprüfung aller gefilterten Bilder durchgeführt. Dies führte dazu, dass der Kuan-Filter mit einem 3x3 Fenster und 2 Iterationen mit einem Trennbarkeitwert von 0,63668 für die weitere Bearbeitung und Auswertung der Daten genutzt wurde.

Ermittlung des Radar-Rückstreukoeffizienten

In der Abbildung 17 ist das Ergebnis der Filterung der Maske der Lokalen Einfallswinkel dargestellt.

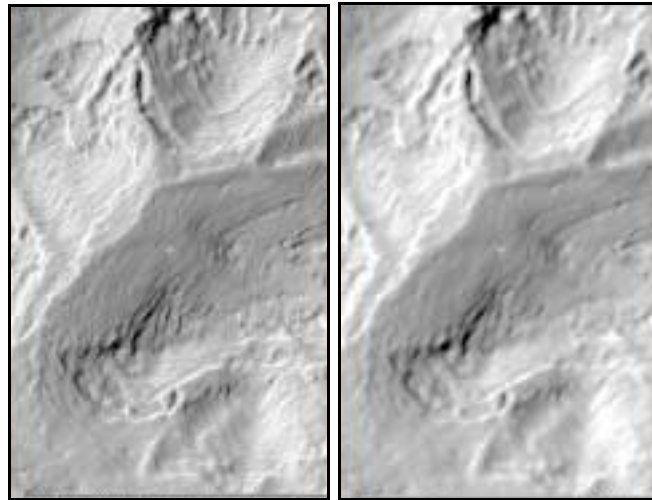


Abbildung 17: Ausschnitt der Maske der Lokalen Einfallswinkel ohne Filter (links) und mit Median Filter 7x7 Fenster (rechts)

Mit Hilfe des Median-Filters konnte eine Minimierung des Treppeneffekts in steileren Hanglagen erreicht werden (siehe Abbildung 17). Dies hatte auch einen direkten Effekt auf das Ergebnis der kalibrierten Radarbilder. Auch hier wurde der Treppeneffekt minimiert. Die kalibrierten E-SAR Daten sind in der Abbildung 21 aufgeführt. Auf eine Verwendung der VH-Polarisation im L-Band wurde aufgrund der Ähnlichkeit zu L-HV verzichtet.

Beleuchtungskorrektur

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Beleuchtungskorrektur können der Abbildung 18 für das L-Band mit HH-Polarisation und der Abbildung 19 für das X-Band ebenfalls mit HH-Polarisation entnommen werden.

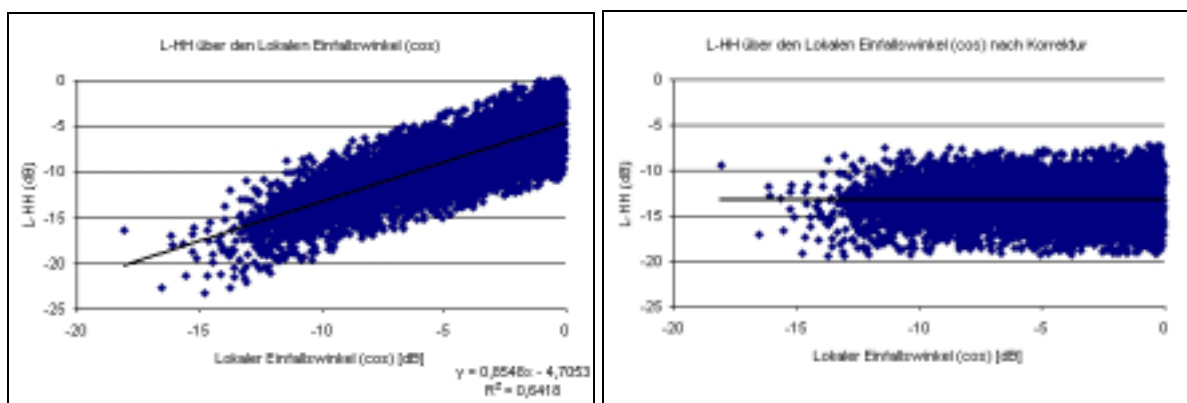


Abbildung 18: Beleuchtungskorrektur mit Hilfe der Maske der Lokalen Einfallswinkel am Beispiel des L-Bandes mit HH-Polarisation

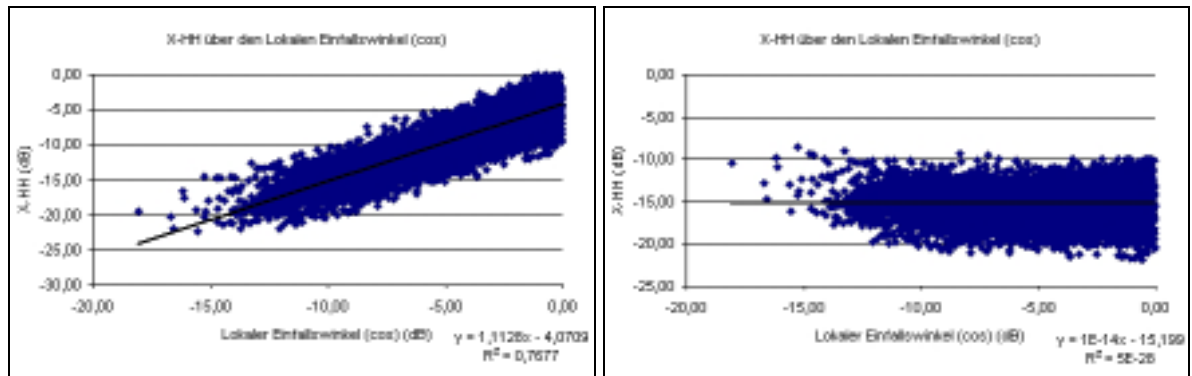


Abbildung 19: Beleuchtungskorrektur mit Hilfe der Maske der Lokalen Einfallswinkel am Beispiel des X-Bandes mit HH-Polarisation

Das Ergebnis der Beleuchtungskorrektur war über alle Frequenzbereiche und Polarisationen für das gesamte Untersuchungsgebiet gut, wie Abbildung 18 und Abbildung 19 entnommen werden kann. Teilweise kam es punktuell in Bereichen mit steilerem Gelände zu Überkorrekturen bzw. der Radarschatten konnte nicht korrigiert werden. (Abbildung 20).

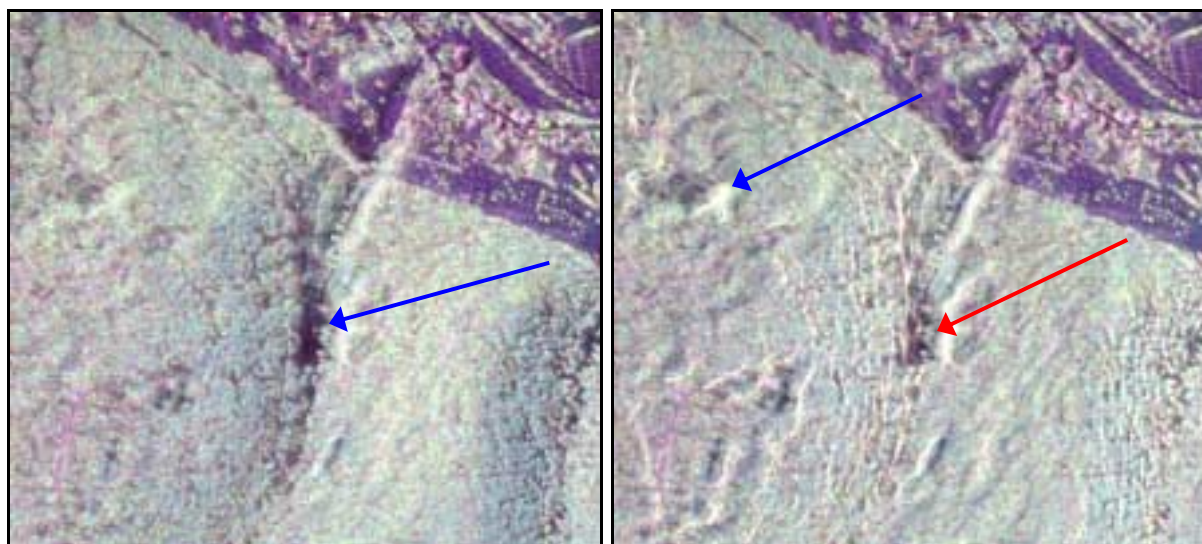


Abbildung 20: Bereich mit Radarschatten in E-SAR L-Band (Links, blauer Pfeil) und Gebiet mit Überkorrektur nach Durchführung der Beleuchtungskorrektur (Rechts, blauer Pfeil) und nicht korrigiertem Bereich (Rechts, roter Pfeil).

Das Ergebnis der Beleuchtungskorrektur für das L- und X-Band der E-SAR Daten kann der folgenden Abbildung 21 entnommen werden.

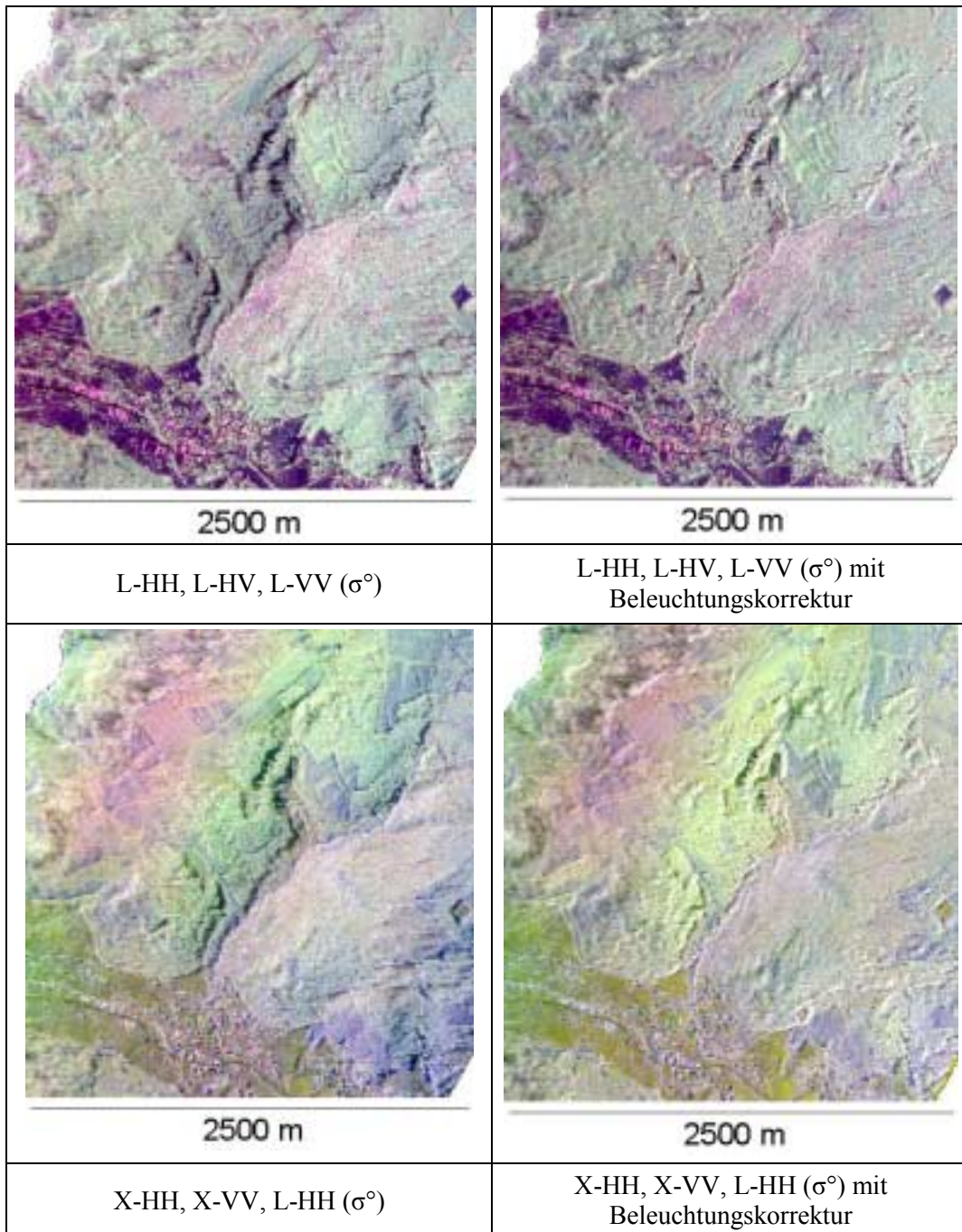


Abbildung 21: Ergebnis der kalibrierten und beleuchtungskorrigierten E-SAR Bilddaten

Deutlich sind in der Abbildung 21 in einzelnen Gebieten Überkorrekturen erkennbar. Für den größten Teil des Untersuchungsgebiets war die Beleuchtungskorrektur allerdings erfolgreich.

7.1.1.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Geometrische Entzerrung

Das Ergebnis der geometrischen Entzerrung mit einem polynomialen Verfahren ist in der Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Übersicht über die RMS-Fehler bei der Entzerrung

| Datensatz | Pixelgröße | Resampling | Referenzpunkte | RMS-Fehler | XRMS-Fehler | YRMS-Fehler |
|-------------------------|------------|------------------|----------------|------------|-------------|-------------|
| Kohärenz vor dem Sturm | 20x20m | Nearest Neighbor | 63 | 0,70 Pixel | 0,51 Pixel | 0,48 Pixel |
| Kohärenz nach dem Sturm | 20x20m | Nearest Neighbor | 134 | 0,81 Pixel | 0,55 Pixel | 0,59 Pixel |

Für alle Datensätze entstanden mittlere RMS-Fehler im Subpixel-Bereich zwischen 0,70 und 0,81 Pixel. Trotz des relativ niedrigen RMS Fehlers wurde visuell zwischen den beiden Datensätzen vor allem in kupertem Gelände Abweichungen von 1 bis 2 Pixel (20-40 m) und im Bezug auf die FoGIS Daten 3 bis 4 Pixel festgestellt. Dies hatte direkten Einfluss auf die weitere Auswertung der Daten. Das Gebiet 1 mit den Forstbezirken Ettenheim, Kenzingen und Lahr konnte nur innerhalb einer Signaturanalyse ausgewertet werden, da die Referenzdaten nicht direkt mit den Bilddaten verglichen werden konnten. Zusätzlich wurde für einen direkten Vergleich der Bilddaten mit Referenzsturmflächen im Rheintal in ebenem Gelände südlich bis südwestlich der Stadt Offenburg ein Untersuchungsgebiet (G2) ausgewählt.

Die Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt der entzerrten Bilddaten. Für die Darstellung wurde folgende Kanalkombination gewählt:

- Rot: Kohärenz aus ERS-1 und ERS-2 Tandemdaten
- Grün: Durchschnittliche Rückstreuung aus ERS-1 und ERS-2
- Blau: Ratio-Kanal aus ERS-1 und ERS-2 Rückstreuung

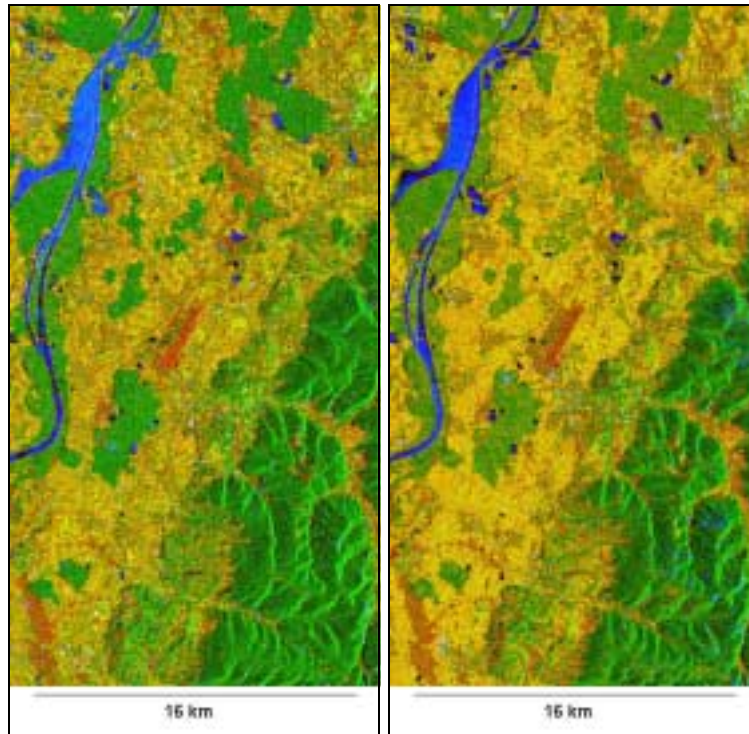


Abbildung 22: ERS-1 und ERS-2 Kohärenz 31.10/01.11.1999 (links)
und 09.01/10-01.2000 (rechts), Rheintal, FBZ Ettenheim

7.1.1.3 Radarsat 1 Daten

Orthorektifizierung

Die Ergebnisse der Orthorektifizierung sind in Tabelle 27 abgebildet. Für eine Reduktion des Datenvolumens wurden beide Datensätze auf 8 x 8 m resampelt, was auch der ursprünglichen Auflösung bei der Aufnahme entspricht.

Tabelle 27: Übersicht über die Orthorektifizierung der Radarsat Daten

| Datensatz | Pixelgröße | Resampling | Referenz-Punkte | RMS-Fehler | XRMS-Fehler | YRMS-Fehler |
|------------------------|------------|------------------|-----------------|------------|-------------|-------------|
| Radarsat 03.11.1999 | 8x8m | Nearest Neighbor | 117 | 2,36 Pixel | 1,96 Pixel | 1,32 Pixel |
| Radarsat 08.12.2000 | 8x8m | Nearest Neighbor | 63 | 1,19 Pixel | 0,94 Pixel | 0,73 Pixel |

Leider bestanden nach der Orthorektifizierung immer noch örtlich Abweichungen von 1½ bis 2 Pixel zwischen den beiden Bildern. Mit 2,36 Pixeln Abweichung konnte kein RMS-Fehler im Sub-Pixel Bereich erzielt werden.

Reduzierung des Speckle-Effekts

Nach einer visuellen Beurteilung wurde der Gamma Map Filter zur Reduzierung des Speckle-Effekts in den Bilddaten verwendet. Als Parameter wurde eine Filter-Fenstergröße von 3x3 Pixel mit einer Iteration gewählt. Das Ergebnis der Filterung der Daten vor und nach dem Sturm kann der Abbildung 23 entnommen werden, die einen kleinen Ausschnitt eines Waldgebietes westlich von Offenburg (Untersuchungsgebiet 2) zeigt.

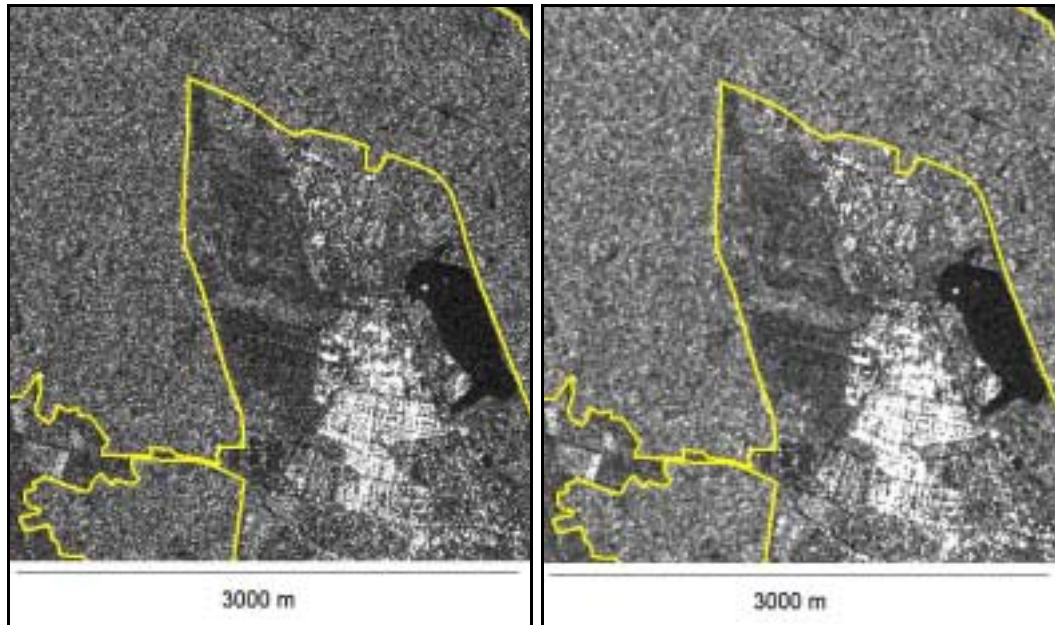


Abbildung 23: Radarsat vom 08.12.2000 ohne Filter (links) und mit Gamma Map Filter, 3x3 Fenster, 1 Iteration (rechts); gelb umrandet Waldflächen aus Walddecker (G2)

Für die Daten wurde anschließend wie auch bei den E-SAR Daten der Radarrückstreuquerschnitt ermittelt und damit die weiteren Bildanalysen durchgeführt.

7.1.1.4 TerraSAR Daten

Die Ergebnisse der Beleuchtungskorrektur für die TerraSAR Daten kann der Abbildung 24 entnommen werden.

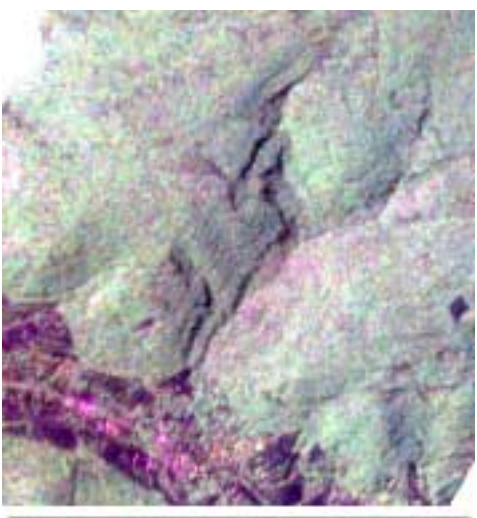
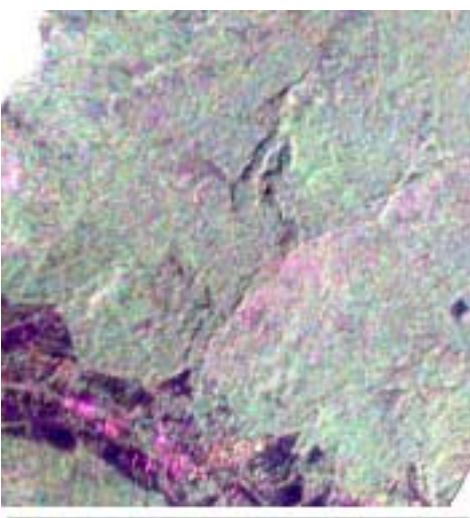
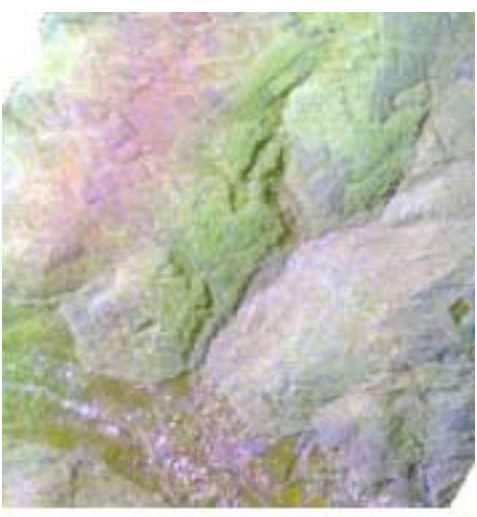
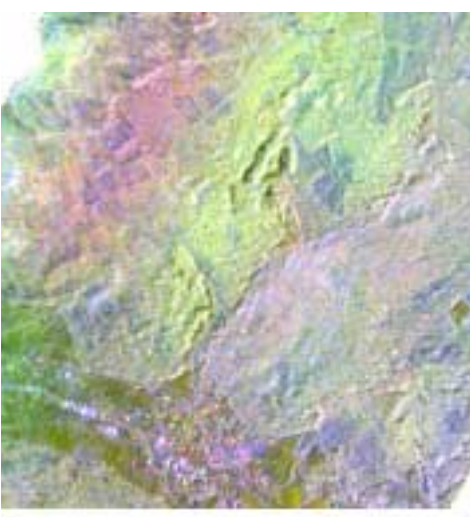
| | |
|---|--|
|  |  |
| L-HH, L-HV, L-VV (σ^0) | L-HH, L-HV, L-VV (σ^0) mit Beleuchtungskorrektur |
|  |  |
| X-HH, X-VV, L-HH (σ^0) | X-HH, X-VV, L-HH (σ^0) mit Beleuchtungskorrektur |

Abbildung 24: Überblick über die kalibrierten und beleuchtungskorrigierten TerraSAR Daten

Auch hier kam es wie schon bei den E-SAR Daten in steilen, vom Sensor abgeneigten Gebieten, zu unter- oder überkorrigierten Bildbereichen. Der überwiegende Bereich des Untersuchungsgebiets wurde allerdings gut korrigiert.

7.1.2 Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

7.1.2.1 E-SAR Daten

Auf den nächsten Seiten folgen die Beschreibungen und Ergebnisse der einzelnen untersuchten Varianten für die visuelle Kartierung der Sturmflächen mit den E-SAR Daten. Es soll an dieser Stelle allgemein für alle im Folgenden präsentierten Ergebnisse erläutert werden, warum bei der Auswertung der Schadklassen 1 und 2 zusammen gegenüber der Auswertung der Sturmflächen der Schadklasse 1 eine bessere Nutzergenauigkeit erzielt wird, demgegenüber in den meisten Fällen die Herstellergenauigkeit um einige Prozentpunkte absinkt.

Bei der Nutzergenauigkeit wird der Anteil der in der jeweiligen Variante erfassten Sturmflächen den tatsächlichen Sturmflächen aus den Referenzdatensätzen (Schadklasse 1 bzw. Schadklasse 1 und 2 zusammen) gegenübergestellt. Aus dem Grund, dass mehr Sturmflächen im Referenzdatensatz mit den zusammengefassten Flächen der Schadklassen 1 und 2 enthalten sind als im Referenzdatensatz der Schadklasse 1, können sich höhere Nutzergenauigkeiten ergeben, da sich die Anzahl der erfassten Sturmflächen innerhalb der jeweiligen Variante nicht verändert hat. Im Gegensatz dazu können aus dem genannten Grund die Werte bezüglich der Herstellergenauigkeit sinken, da hierbei der Anteil der tatsächlich richtig erfassten Sturmflächen allen Sturmflächen aus dem Referenzdatensatz gegenübergestellt wird (vgl. auch Kapitel 6.1.2.2).

Variante 1 und 2:

Mit Hilfe der FoGIS Daten wurden Nichtwaldflächen und Nichtholzbodenflächen vor der visuellen Interpretation zur Vermeidung von Fehlkartierungen ausmaskiert. Die Ergebnisse der Variante 1 sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 1, E-SAR Daten

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche >= 4ha | 77,1 | 100,0 | 76,1 | 71,4 |
| Fläche >= 2 ha | 77,0 | 100,0 | 73,0 | 68,8 |
| Fläche >= 1 ha | 74,7 | 83,3 | 71,8 | 68,0 |
| Fläche >= 0,5 ha | 74,2 | 78,3 | 69,6 | 54,3 |

Die Erfassung größerer Schadflächen ab zwei Hektar war mit einer Nutzergenauigkeit von 77,0 % und einer Herstellergenauigkeit von 73,0 % möglich. Alle Flächen größer zwei Hektar konnten identifiziert werden (100 % Nutzergenauigkeit). Die Kartiergenauigkeit nahm bei

kleineren Fläche ab, was an der Nutzergenauigkeit von 74,2 % und einer Herstellergenauigkeit von 68,0 % für Flächen größer 1 ha deutlich zu erkennen ist.

Bei der Variante 2 mit Hinzunahme der Sturmflächen der Schadklasse 2 konnte auf Seiten der Nutzergenauigkeit eine Verbesserung der Erfassungsgenauigkeit festgestellt werden, die aber von einer deutlich schlechteren Herstellergenauigkeit relativiert wird (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 2, E-SAR Daten

| Variante 2 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 86,6 | 100,0 | 68,7 | 77,8 |
| Fläche \geq 2 ha | 86,1 | 100,0 | 64,3 | 61,1 |
| Fläche \geq 1 ha | 83,2 | 83,3 | 59,6 | 47,2 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 82,5 | 78,3 | 56,1 | 33,3 |

Während Flächen größer 4 ha mit einer Herstellergenauigkeit von 86,6 % und einer Nutzergenauigkeit von 68,7 % hinsichtlich der Fläche erfasst werden konnten, war die Genauigkeit der Erfassung von Flächen größer 1 ha vor allem bezogen auf die Herstellergenauigkeit mit 59,6 % sehr niedrig.

Variante 3 und 4:

Aus den FoGIS Daten wurden Bestände jünger 30 Jahre extrahiert und aus der visuellen Interpretation vollkommen ausgeschlossen. Dies erleichterte die visuelle Delinierung, da es zwischen Jungbeständen und potentiellen Sturmflächen zu Verwechslungen kommen kann (siehe Abbildung 25).

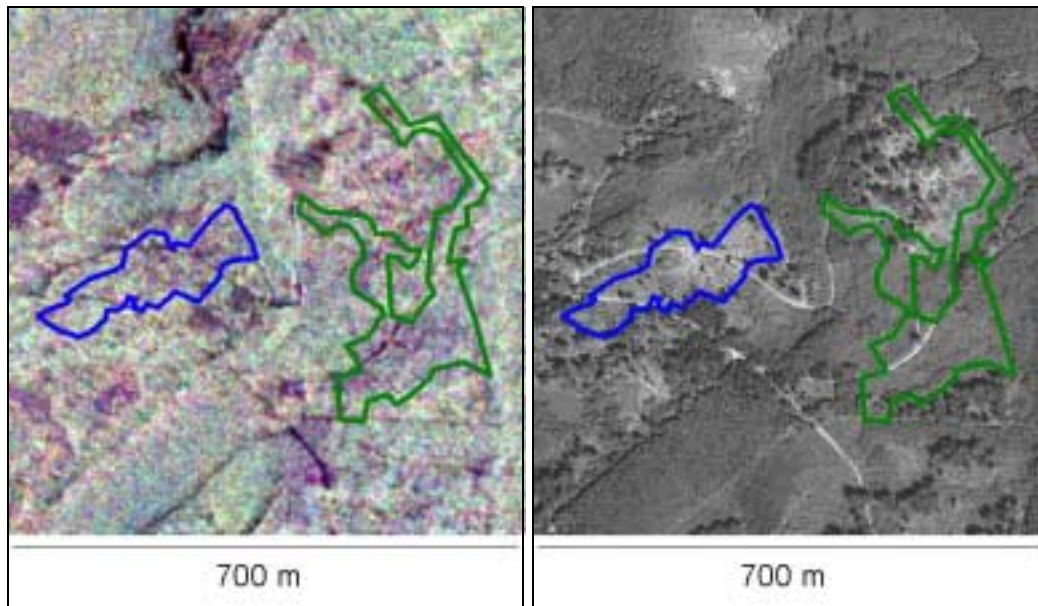


Abbildung 25: Sturmfläche (blau) und Bestand Altersstufe 1 (grün) in E-SAR Daten (Links) und zum Vergleich im Luftbild des Landesvermessungsamts, Maßstab 1:18.000 (Rechts)

Ebenso wurden Nichtholzbodenflächen ausgeschlossen. Die Ergebnisse können der Tabelle 30 für Variante 3 (Variante 4, Tabelle 31) entnommen werden.

Tabelle 30: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 3, E-SAR Daten

| Variante 3 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 81,2 | 100,0 | 78,1 | 71,4 |
| Fläche \geq 2 ha | 80,5 | 100,0 | 74,0 | 70,6 |
| Fläche \geq 1 ha | 78,9 | 88,9 | 72,0 | 66,7 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 78,7 | 86,4 | 69,7 | 54,1 |

Durch die Ausmaskierung der Jungbestände (einzige Veränderung gegenüber der Variante 1) konnte die Kartiergenauigkeit um einige Prozentpunkte verbessert werden, was sich sowohl in einer höheren Nutzer- als auch Herstellergenauigkeit widerspiegelt. Dies kann vor allem an Flächen größer 4 ha mit einer Nutzergenauigkeit von 81,2 % und einer Herstellergenauigkeit von 78,1 % bezüglich der Erfassungsgenauigkeit erkannt werden.

Die Ergebnisse für die Variante 4, bei der zusätzlich die Flächen der Schadklasse 2 ausgewertet wurden, werden in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Ergebnisse Visuelle Interpretation Variante 4, E-SAR Daten

| Variante 4 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 91,5 | 100,0 | 68,8 | 75,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 89,7 | 100,0 | 64,8 | 61,1 |
| Fläche \geq 1 ha | 87,4 | 88,9 | 59,5 | 45,9 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 87,1 | 86,4 | 56,1 | 32,8 |

Wiederum zeigte sich wie schon bei der Variante 2 eine höhere Nutzergenauigkeit und eine wesentlich schlechtere Herstellergenauigkeit. Die Erfassung war für Flächen größer 4 ha mit einer Nutzergenauigkeit von 91,5 % sehr gut. Allerdings ist die Herstellergenauigkeit mit 68,8 % sehr niedrig. Von der Anzahl der Flächen her konnten 100 % der Flächen größer 2 ha und größer 4 ha hinsichtlich der Nutzergenauigkeit erfasst werden.

Variante 5:

Die Ergebnisse für die Variante 5 sind Tabelle 32 zu entnehmen.

Tabelle 32: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 5 E-SAR Daten

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 62,2 | 66,7 | 80,4 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 62,8 | 71,4 | 73,2 | 88,2 |
| Fläche \geq 1 ha | 62,6 | 72,2 | 70,3 | 77,8 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 61,8 | 61,8 | 67,6 | 59,5 |

Im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen (Variante 1 und 3) konnten die Ergebnisse nur hinsichtlich der Herstellergenauigkeit gesteigert werden. Betrachtet man die Nutzergenauigkeit für Flächen größer 4 ha mit 62,2 % und Flächen größer 1 ha mit 62,6 %, so ist sogar eine deutliche Verschlechterung, verursacht durch Fehlerfassungen, eingetreten. Die angewandte Methode konnte die erhofften Ergebnisverbesserungen nicht bestätigen.

Die Ergebnisse der Variante 6 können der Tabelle A.1 im Anhang A entnommen werden.

Variante 7 und 8:

Beide Interpreten nutzten die FoGIS Daten zur Ausmaskierung der Bestände < 30 Jahre und der NHB-Flächen. Erfasst wurde die Schadklasse 1 (Tabelle 33).

Tabelle 33: Ergebnisse Variante 7, Interpret 1 (in Klammern Variante 8, Interpret 2)

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|-------------|-----------------------|--------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 42,8 (53,4) | 69,6 (63,6) | 74,6 (74,2) | 100,0 (85,7) |
| Fläche \geq 2 ha | 38,5 (49,9) | 59,0 (61,9) | 74,1 (67,6) | 88,2 (64,7) |
| Fläche \geq 1 ha | 38,1 (49,0) | 59,1 (57,7) | 69,9 (64,4) | 70,4 (51,9) |
| Fläche \geq 0,5 ha | 37,6 (47,8) | 52,0 (48,6) | 68,7 (62,7) | 62,2 (45,9) |

Den Ergebnissen (Tabelle 33) ist deutlich zu entnehmen, dass es zwischen verschiedenen Interpreten bei einer visuellen Erfassung der Sturmflächen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann. So wurde von einem Interpreten nur 42,8 % der Nutzergenauigkeit bei Flächen größer 4 ha erreicht, während der andere Interpret hier eine Nutzergenauigkeit von 53,4 % erzielen konnte. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn Interpreten keine Erfahrung mit Radardaten haben. Gegenüber den Visuellen Erfassungen in den vorherigen beschriebenen Varianten konnten die Sturmflächen ab 1 ha Größe mit einer Nutzergenauigkeit von 38,1 % bzw. 49,0 % kartiert werden. Abbildung 26 soll noch einmal an einem Beispiel die unterschiedlichen Interpretationsmöglichkeiten bei der visuellen Kartierung der Sturmflächen verdeutlichen. Die roten und blauen Linien weichen dabei deutlich voneinander ab.

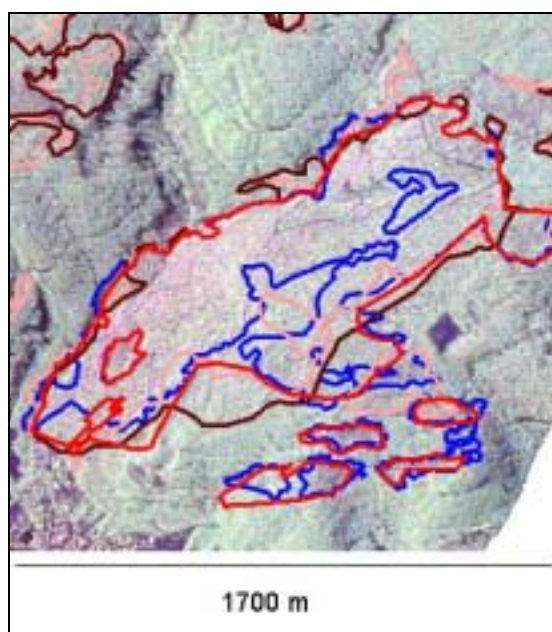


Abbildung 26: Vergleich der visuellen Kartierung der Sturmflächen zwischen verschiedenen Interpreten (Blau – Referenz, Hellrot, Rot und Dunkelrot – verschiedene Interpreten)

7.1.2.2 Radarsat 1 Daten

Die Ergebnisse der berechneten Bilddaten sind der Abbildung 27 zu entnehmen. Dargestellt ist das Untersuchungsgebiet 2 mit den gekennzeichneten Gebieten und den aus Luftbildern erhobenen Referenzsturmflächen.

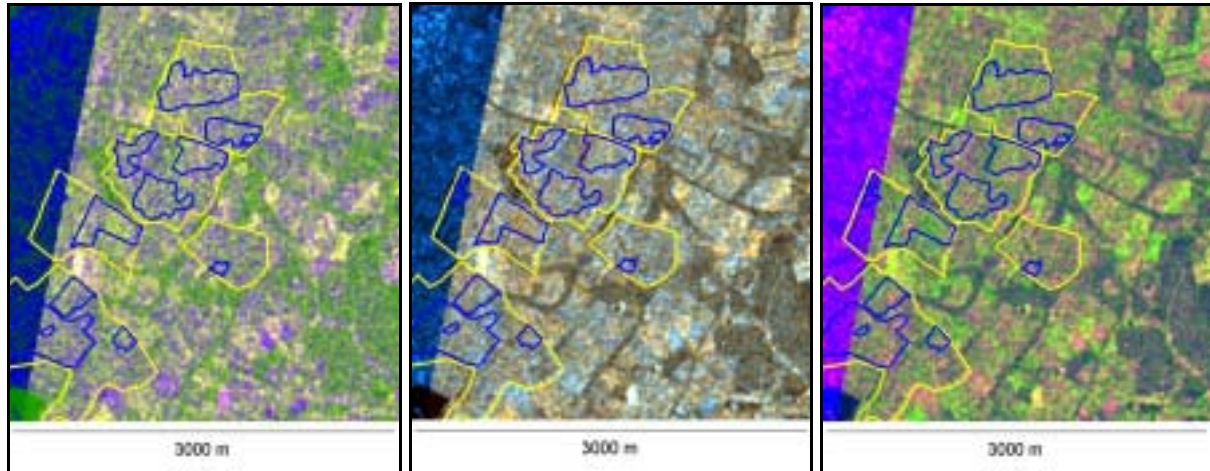


Abbildung 27: Radarsat vor/nach Sturm mit Differenz-Bild (Links), Durchschnitts-Bild (Mitte) und Ratio-Bild (Rechts), blau umrandet die Referenzsturmflächen G2, gelb umrandet Ausschnitt G2

Wie man der Abbildung 27 entnehmen kann, war die Trennung von Wald- und Nichtwald möglich. Eine Differenzierung innerhalb des Waldes in Sturmflächen und intakte Waldbestände mit Hilfe der berechneten Bilddaten und der Change Detection Methode war allerdings nicht möglich. Auch die Hinzunahme der berechneten Texturkanäle auf Basis der GLCM brachte keine Verbesserung der Ergebnisse.

7.1.2.3 TerraSAR Daten

In den folgenden Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die Ergebnisse der Signaturanalyse dargestellt.

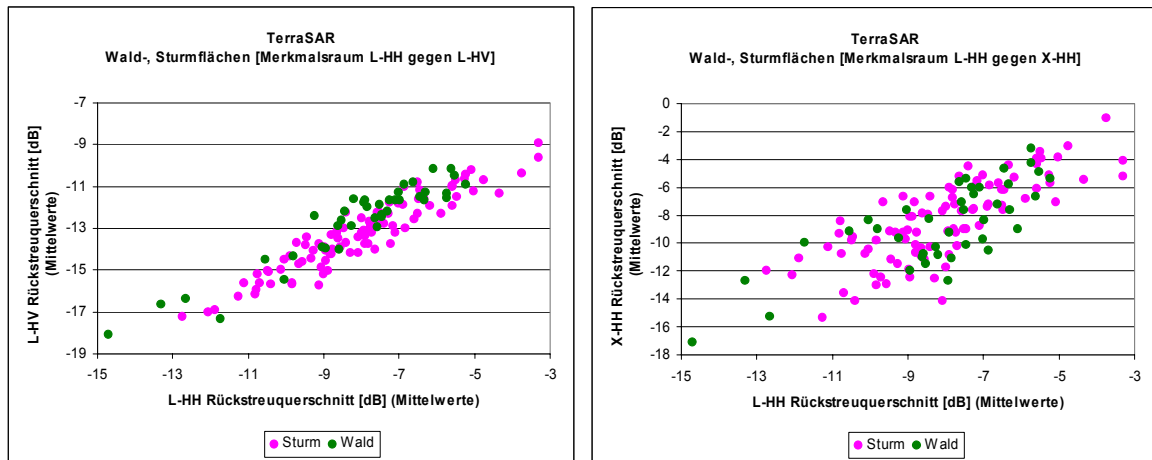


Abbildung 28: Ergebnisse der Signaturanalyse für L-HH gegen L-HV und L-HH gegen X-HH

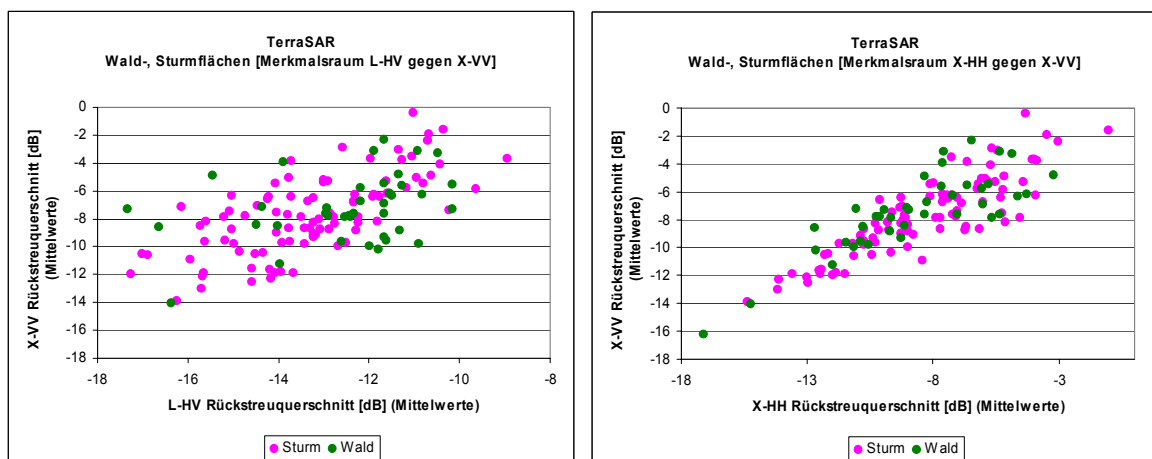


Abbildung 29: Ergebnisse der Signaturanalyse für L-HV gegen X-VV
und X-HH gegen X-VV

Den Ergebnissen ist deutlich zu entnehmen, dass die Trennbarkeit zwischen Wald- und Sturmflächen auf Basis des Rückstreueffizienzwerts nur schwer möglich war. Insgesamt konnte zumindest eine bessere Trennbarkeit im L-Band gegenüber dem X-Band festgestellt werden. Hier vor allem im Kanal L-HH gegenüber L-HV.

Variante 1:

Die Ergebnisse der Variante 1 sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 1 TerraSAR Daten

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 69,9 | 100,0 | 53,5 | 28,6 |
| Fläche \geq 2 ha | 68,9 | 100,0 | 50,8 | 37,5 |
| Fläche \geq 1 ha | 66,6 | 80,0 | 51,0 | 48,0 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 66,1 | 75,0 | 50,3 | 45,7 |

Im Vergleich zur visuellen Kartierung der Sturmflächen mit den E-SAR Daten (Variante 1) ist die Nutzergenauigkeit bzgl. der Fläche deutlich niedriger. Für Flächen ab 4 ha Größe konnten Genauigkeiten von 69,9 % erzielt werden, bei Flächen größer 1 ha 66,6 %. Zusätzlich ist die Herstellergenauigkeit mit 53,5 % (Flächen größer 4 ha) und 51,0 % (Flächen größer 1 ha) sehr gering. Insgesamt konnten größere Sturmflächen besser ausgeschieden werden als kleinere Flächen. Die Ergebnisse für die Variante 2 sind der Tabelle B.1 im Anhang B zu entnehmen.

Variante 3:

Wie den Ergebnisse der Tabelle 35 entnommen werden kann, verbessert die Ausmaskierung der Jungbestände die Ergebnisse der visuellen Delinierung der Sturmflächen.

Tabelle 35: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 3 TerraSAR Daten

| Variante 3 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 72,4 | 100,0 | 55,3 | 28,6 |
| Fläche \geq 2 ha | 72,0 | 100,0 | 50,9 | 35,3 |
| Fläche \geq 1 ha | 71,8 | 100,0 | 51,2 | 48,1 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 71,6 | 93,3 | 50,2 | 43,2 |

Die Ergebnisse konnten gegenüber der Variante 1 vor allem bei der Nutzergenauigkeit mit 71,8 % bei Flächen größer 1 ha verbessert werden. Die Herstellergenauigkeit ist mit 55,3 % bei Flächen größer 4 ha und 51,2 % bei Flächen größer 1 ha sehr gering. Die Ergebnisse für die Variante 4 können der Tabelle B.2 im Anhang B entnommen werden.

7.1.3 Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

7.1.3.1 E-SAR Daten

Im Folgenden wird für die Varianten 1 und 3 und 5 eine ausführliche Beschreibung aller Schritte, Parameter und erzielten Ergebnisse gegeben, die für die automatisierte Erfassung der Sturmflächen mit dem Programm eCognition[®] eingestellt und durchgeführt wurden. Bei den weiteren Varianten (mit Ausnahme der Variante 9) werden nur die Ergebnisse präsentiert. Auf eine detaillierte Erläuterung wird verzichtet.

Variante 1:

Vorsegmentierung und Diskriminanzanalyse

Bei den ersten zwei Varianten wurden die X-Band Daten von E-SAR verwendet. Mit Hilfe der FoGIS Daten wurden die Nichtwaldflächen als Thematik-Layer in die Vorsegmentierung mit eingebunden. Bei der anschließenden Klassifizierung wurden diese Flächen nicht berücksichtigt. Das Ergebnis der Diskriminanzanalyse ist in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 1)

| Kanalbezeichnung | F-Wert für Ausschluss | Wilk's Lambda |
|---|-----------------------|---------------|
| Varianz (aus GLCM) für E-SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 31,06 | 0,971 |
| Angular 2 nd Moment (aus GLCM) für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 4,459 | 0,962 |
| Standardabweichung für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert | 23,63 | 0,969 |
| Mean (aus GLCM) für E-SAR X-HH, nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 50,92 | 0,978 |
| Summe der Mittelwerte aus X-HH + X-VV für E-SAR, nicht beleuchtungskorrigiert, ungefiltert | 28,96 | 0,971 |
| Varianz (aus GLCM) für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 6,18 | 0,963 |

Die erzielten Wilk's Lambda Werte von über 0,9 weisen auf eine niedrige Trennbarkeit der Klassen Sturm und Wald hin.

Segmentierung

Für die anschließende Segmentierung in eCognition® wurden folgende Parameter (Tabelle 37) verwendet:

Tabelle 37: Segmentierungsparameter in eCognition® der Variante 1

| Bilddaten, Thematik-Layer für die Segmentierung | Gewichtung bei der Segmentierung |
|---|----------------------------------|
| E- SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| GIS-Datensatz mit Trennung von Wald- und Nichtwaldflächen | Verwendet |
| Parameter für die Segmentierung | Wert |
| Scale Parameter | 120 |
| Criterion | Color: 0,8 |
| | Shape: 0,2 |
| Shape | Smoothness: 0,5 |
| | Compactness: 0,5 |
| Anzahl der Objekte | 3970 |

Klassifizierung

An die Segmentierung schloss sich die Klassifizierung der Daten in eCognition® an. Die Klassifizierung wurde innerhalb eines Segmentierungs-Levels und einer Hierarchieebene durchgeführt (Abbildung 30).

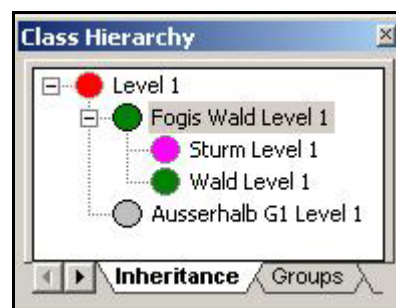


Abbildung 30: Klassifizierungsschema Variante 1 E-SAR X-Band

Zunächst wurden mit Hilfe des Thematik-Layers die Bereiche außerhalb des Untersuchungsgebiets und des Waldes extrahiert („Außerhalb G1 Level 1“). Der Rest wurde in der Klasse „FoGIS Wald Level 1“ zusammengefasst. Innerhalb dieser Klasse wurden die

Klassen „Sturm Level 1“ (13 Samples) und „Wald Level 1“ (49 Samples) erstellt. Für beide Klassen wurden Trainingsgebiete (Samples) im Bilddatensatz ausgewählt und eine Klassifizierung mit der Nearest Neighbor Methode (mit den in Tabelle 36 aufgelisteten Kanälen) durchgeführt. Die Ergebnisse für die Variante 1 können der Abbildung 31 und der Tabelle 38 (Variante 2, siehe Tabelle C.1, Anhang C) entnommen werden.

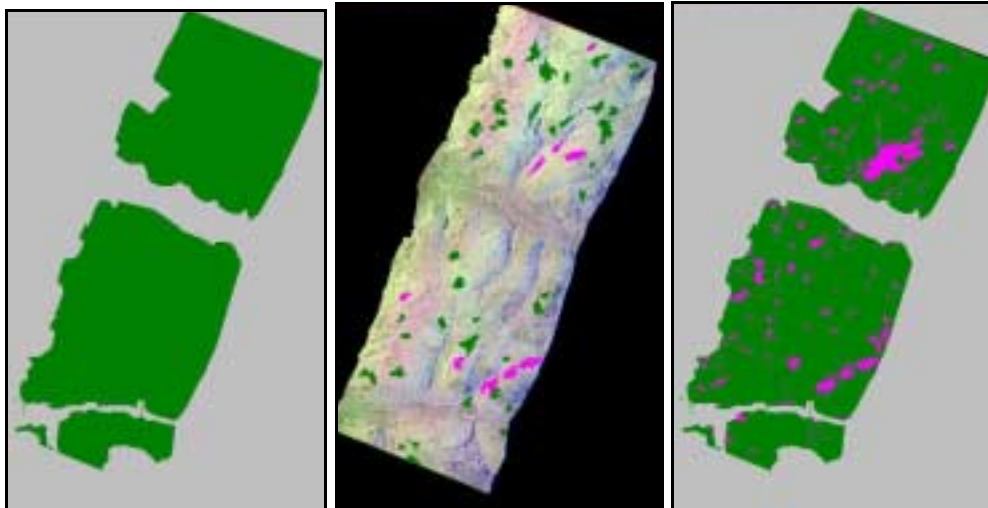


Abbildung 31: Ergebnisse der Klassifizierung mit eCognition® für die Variante 1. Links – Vorklassifizierung (Trennung Wald von Nichtwald), Mitte – Auswahl der Samples, Rechts – Ergebnis der Klassifizierung (Grün=Wald, Magenta=Sturmflächen)

Tabelle 38: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 1 E-SAR

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 80,3 | 100,0 | 39,6 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 77,4 | 100,0 | 36,0 | 62,5 |
| Fläche \geq 1 ha | 61,6 | 46,2 | 33,6 | 44,0 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 48,7 | 30,2 | 32,3 | 34,3 |

Sturmflächen ab einer Größe von 2 ha konnten mit 77,4 % gut erfasst werden. Allerdings ist die Herstellergenauigkeit mit gerade mal 36,0 % bezüglich der Fläche sehr gering.

Variante 3:**Vorsegmentierung und Diskriminanzanalyse**

Bei den Varianten 3 und 4 wurden ebenfalls die X-Band Daten von E-SAR verwendet. Mit Hilfe der FoGIS Daten wurden Nichtwaldflächen und Bestände jünger 30 sowie Nichtholzbodenflächen als Thematik-Layer in die Vorsegmentierung und in die eigentliche Segmentierung eingebunden. Bei der anschließenden Klassifizierung wurden diese Flächen nicht berücksichtigt.

In Tabelle 39 sind die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse auf Basis der Vorsegmentierung aufgelistet.

Tabelle 39: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 3)

| Kanalbezeichnung | F-Wert für Ausschluss | Wilk's Lambda |
|---|-----------------------|---------------|
| Varianz (aus GLCM) für E-SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 38,86 | 0,947 |
| Angular 2 nd Moment (aus GLCM) für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 47,64 | 0,950 |
| Ratio aus E-SAR X-HH, nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 23,55 | 0,941 |
| Ratio aus E-SAR X-VV, nicht beleuchtungskorrigiert | 14,57 | 0,938 |
| Entropy (aus GLCM) für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert | 43,21 | 0,949 |
| Correlation (aus GLCM) für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert | 31,09 | 0,944 |
| Homogeneity (aus GLCM) für E-SAR X-HH, nicht beleuchtungskorrigiert | 15,89 | 0,938 |
| Standardabweichung für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert | 44,43 | 0,949 |
| Ratio aus E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 5,90 | 0,934 |

Gegenüber den Varianten 1 und 2 konnte durch die Ausmaskierung der Waldbestände jünger 30 eine bessere Trennbarkeit erreicht werden, was sich bei der Diskriminanzanalyse auch in niedrigeren Wilk's Lambda Werten widerspiegelt.

Segmentierung und Klassifizierung

Für die anschließende Segmentierung in eCognition[®] wurden folgende Parameter (Tabelle 40) verwendet:

Tabelle 40: Segmentierungsparameter in eCognition[®] der Variante 3

| Bilddaten, Thematik-Layer für die Segmentierung | Gewichtung bei der Segmentierung |
|---|---|
| E- SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| GIS-Datensatz mit Trennung von Wald- und Nichtwaldflächen, Ausmaskierung der Bestände jünger 30 | Verwendet |
| Parameter für die Segmentierung | Wert |
| Scale Parameter | 120 |
| Criterion | Color: 0,8 |
| | Shape: 0,2 |
| Shape | Smoothness: 0,5 |
| | Compactness: 0,5 |
| Anzahl der Objekte | 4122 |

An die Segmentierung schloss sich die Klassifizierung der Daten in eCognition[®] an. Die Klassifizierung wurde hierbei innerhalb eines Segmentierungs-Levels und zwei Hierarchieebenen (2 Level) durchgeführt (Abbildung 32).

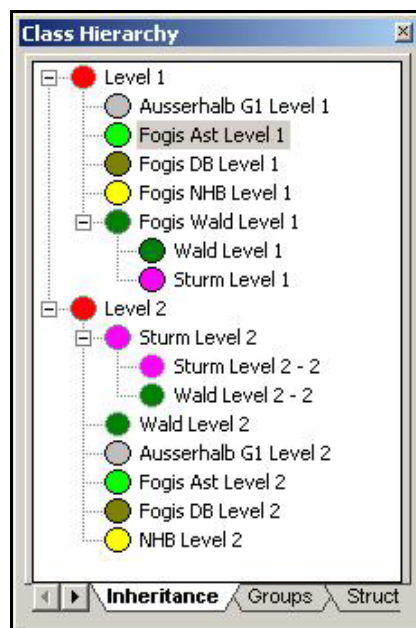


Abbildung 32: Klassifizierungsschema Variante 3 E-SAR X-Band

Für den Wald auf Level 1 wurden 16 Trainingsamples ausgewählt, für den Sturm 8 Samples. Auf Level 2 wurden 7 Trainingsamples für den Wald und 5 für Sturm ausgewählt. Folgende Ergebnisse konnten für die Variante 3 (Variante 4, siehe Tabelle C.2, Anhang C) erzielt werden (Tabelle 41).

Tabelle 41: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 3 E-SAR

| Variante 3 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 60,4 | 80,0 | 50,4 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 55,2 | 70,6 | 47,7 | 70,6 |
| Fläche \geq 1 ha | 46,4 | 41,0 | 44,3 | 48,1 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 42,8 | 33,9 | 42,8 | 40,5 |

Gegenüber den Ergebnissen der Variante 1 (siehe Tabelle 38) ist die Nutzergenauigkeit hier mit 60,4 % bei Flächen größer 4 ha deutlich geringer. Auch bei Flächen größer 1 ha ist die Nutzergenauigkeit mit 46,4 % geringer. Lediglich bei der Herstellergenauigkeit konnten z.B. mit 50,4 % bei Flächen größer 4 ha bessere Ergebnisse erzielt werden.

Variante 5:**Vorsegmentierung und Diskriminanzanalyse**

Innerhalb der Varianten 5 und 6 wurden auch die L-Band Daten von E-SAR sowohl für die Vorsegmentierung, Diskriminanzanalyse, Segmentierung und anschließende Klassifizierung verwendet.

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse der für die Klassifizierung ausgewählten Kanäle, wird in der folgenden Tabelle 42 aufgezeigt

Tabelle 42: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 5)

| Kanalbezeichnung | F-Wert für Ausschluss | Wilk's Lambda |
|---|-----------------------|---------------|
| Ratio aus E-SAR $((L-HH+L-VV)/(L-HV))*100$, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 59,97 | 0,818 |
| Angular 2 nd Moment (aus GLCM) für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 82,84 | 0,828 |
| Angular 2 nd Moment (aus GLCM) für E-SAR L-HV, nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 23,42 | 0,801 |
| Standardabweichung für E-SAR $(X-HH*X-VV)$, nicht beleuchtungskorrigiert, nicht gefiltert | 52,53 | 0,814 |
| Ratio aus E-SAR $(L-HV)/(L-HH))*100$, nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 41,93 | 0,809 |
| Correlation (aus GLCM) für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 18,48 | 0,799 |
| Mittelwert (aus GLCM) für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 12,73 | 0,796 |
| Ratio aus E-SAR $(L-HV)/(L-HH))*100$, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 8,55 | 0,794 |

Gegenüber den vorherigen Varianten, bei denen lediglich die X-Band Daten ausgewertet wurden, war mit Hinzunahme der L-Band Daten für die hier ausgewählten Kanäle (Tabelle 42) unter Berücksichtigung der Wilk's Lambda Werte eine bessere Trennung der Klassen Wald und Sturm möglich.

Segmentierung

Tabelle 43 zeigt die Kriterien für die Segmentierung der Variante 5.

Tabelle 43: Segmentierungsparameter in eCognition® Variante 5 und 6

| Bilddaten, Thematik-Layer für die Segmentierung | Gewichtung bei der Segmentierung |
|---|----------------------------------|
| E- SAR L-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-HV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR L-HV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR L-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| GIS-Datensatz mit Trennung von Wald- und Nichtwaldflächen | Verwendet |
| Parameter für die Segmentierung | Wert |
| Scale Parameter | 120 |
| Criterion | Color: 0,8 |
| | Shape: 0,2 |
| Shape | Smoothness: 0,5 |
| | Compactness: 0,5 |
| Anzahl der Objekte | 3196 |

Das Ergebnis dieser Segmentierung ist der folgenden Abbildung 33 zu entnehmen.

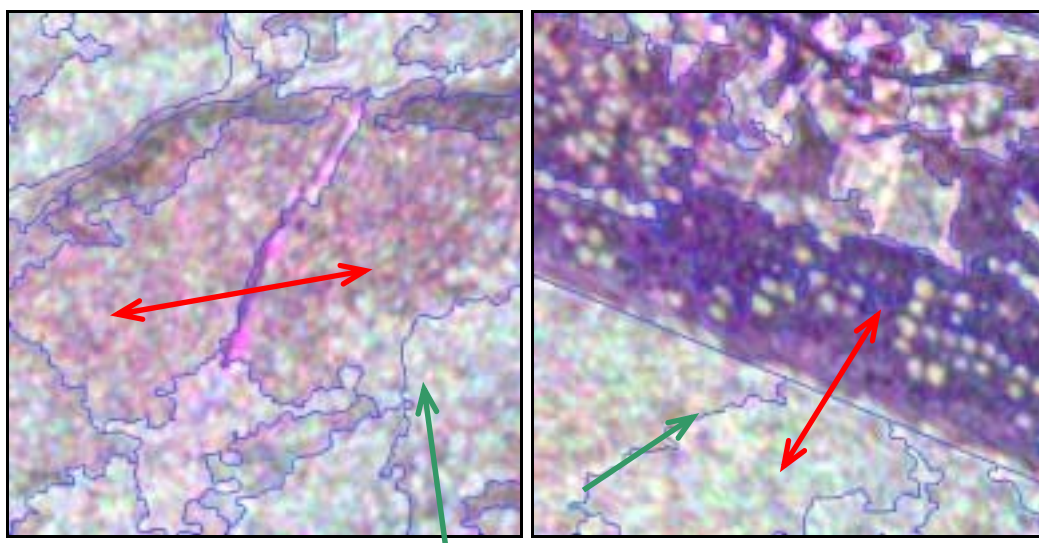


Abbildung 33: Ergebnisse der Segmentierung – Links Sturmflächen (roter Pfeil) und Trennung gegenüber Waldflächen (grüner Pfeil), Rechts Trennung von Wald und Nichtwald (roter Pfeil) mit Unterstützung der FoGIS Geometrien (grüner Pfeil)

In einigen Fällen, wie in der linken Abbildung 33 zu erkennen, konnten Sturmflächen nach visuellen Gesichtspunkten sehr gut in eCognition® segmentiert werden. Allerdings gab es auch einige Sturmflächen, die nicht gut segmentiert wurden. Betrachtet man die rechte Abbildung 33 ist deutlich zu erkennen, welchen Einfluss die Hinzunahme der FoGIS Daten auf die Segmentierung hatte. Die Segmentgrenze zwischen Wald und Nichtwald ist linearisiert direkt aus FoGIS. Wäre die Segmentierung ohne die FoGIS Daten durchgeführt worden, hätte sich die Linie an die gegebene Information der Bilddaten angepasst.

Klassifizierung

Die Abbildung 34 gibt die verwendete Hierarchie zur Klassifizierung der Daten wieder.

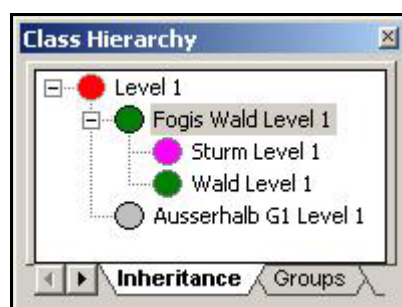


Abbildung 34: Klassifizierungsschema Variante 5, E-SAR

Die Ergebnisse der Klassifizierung mit eCognition® für die Variante 5 ist in der folgenden Tabelle 44 dargestellt (Ergebnisse für Variante 6 in Tabelle C.3, Anhang C).

Tabelle 44: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 5 E-SAR

| Variante 5 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche >= 4ha | 69,2 | 100 | 53,8 | 85,7 |
| Fläche >= 2 ha | 62,3 | 69,2 | 48,0 | 56,3 |
| Fläche >= 1 ha | 56,2 | 63,3 | 45,6 | 44,0 |
| Fläche >= 0,5 ha | 53,4 | 48,8 | 44,1 | 37,1 |

Gegenüber der automatischen Klassifizierung der E-SAR X-Band Daten konnten die Ergebnisse mit einer Nutzergenauigkeit von 69,2 % (Flächen größer 4 ha) leicht verbessert werden. Die gestellten Anforderungen der Landesforstverwaltung an eine Erfassung der Sturmflächen kann mit diesen Varianten nicht erreicht werden, da die Nutzergenauigkeit von Sturmflächen größer 1 ha nur 56,2 % bzw. 63,3 % beträgt.

Variante 7:

Die Ergebniskanäle aus der Diskriminanzanalyse (Tabelle C.4), die Segementierungsparameter (Tabelle C.5) und das Klassifizierungsschema (Abbildung C1) für die Variante 7 kann dem Anhang C entnommen werden. Die Klassifizierungsergebnisse für die Variante 7 sind in Tabelle 45 und Abbildung 35 dargestellt (Variante 8, Tabelle C.6, Anhang C).

Tabelle 45: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 7 E-SAR

| Variante 7 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 75,8 | 100,0 | 64,7 | 85,7 |
| Fläche \geq 2 ha | 65,6 | 68,4 | 60,7 | 76,5 |
| Fläche \geq 1 ha | 62,5 | 66,7 | 57,4 | 66,7 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 60,9 | 62,5 | 56,1 | 56,8 |

Da Bestände jünger 30 Jahre von der Klassifizierung ausgeschlossen wurden, gab es deutlich weniger Fehlklassifikationen als noch bei der Variante 5. Vor allem die Verwendung der L-Band Daten verbesserte die Nutzergenauigkeit z.B. bei Flächen größer 4 ha mit 75,8 % und Flächen größer 2 ha mit 65,6 %, wie dem Vergleich der Varianten 3 und 7 zu entnehmen ist. Zusätzlich konnten deutlich mehr Sturmflächen klassifiziert werden als in vorherigen Varianten, was in einer Herstellergenauigkeit von 64,7 % für Flächen größer 4 ha zum Ausdruck kommt. Im Vergleich zu der visuellen Interpretation der E-SAR Daten (siehe Kapitel 7.1.2.1), kann die automatische Klassifizierung mit Hilfe von eCognition[®] diese Genauigkeiten nicht erzielen.

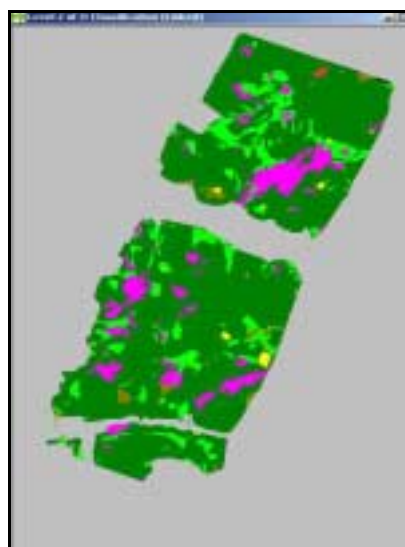


Abbildung 35: Ergebnisse der Klassifizierung mit eCognition[®] für die Variante 7. Ergebnis der Klassifizierung (Grün=Wald, Hellgrün = Bestände jünger 30 Jahre, Gelb = Nichtholzboden, Braun = DB, Magenta=Sturmflächen)

Variante 9:

Auf die Darstellung der Ergebnisse der Diskriminanzanalyse und der Segmentierung wurde für diese Variante verzichtet. Die Ergebnisse der Klassifizierung ist der folgenden Tabelle 46 zu entnehmen (Variante 10, Tabelle C.7, Anhang C).

Tabelle 46: Automatische Klassifizierung, Variante 9 E-SAR

| Variante 9 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 78,6 | 100,0 | 60,2 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 77,0 | 100,0 | 56,8 | 82,4 |
| Fläche \geq 1 ha | 73,1 | 85,0 | 53,2 | 66,7 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 66,8 | 55,8 | 52,0 | 56,8 |

Hinsichtlich der Nutzergenauigkeit konnten die Ergebnisse gegenüber den bisher dargestellten Varianten noch mal verbessert werden. So waren 73,1% der erfassten Flächen der Schadklasse 1 über 1 ha tatsächlich Sturmflächen. Dem gegenüber stehen allerdings lediglich 53,2% bezüglich der Nutzergenauigkeit. Dies ist deutlich weniger als bei der visuellen Kartierung der Sturmflächen.

7.1.3.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten**Signaturanalyse**

Das Ergebnis der Signaturanalyse kann der Abbildung 36 entnommen werden.

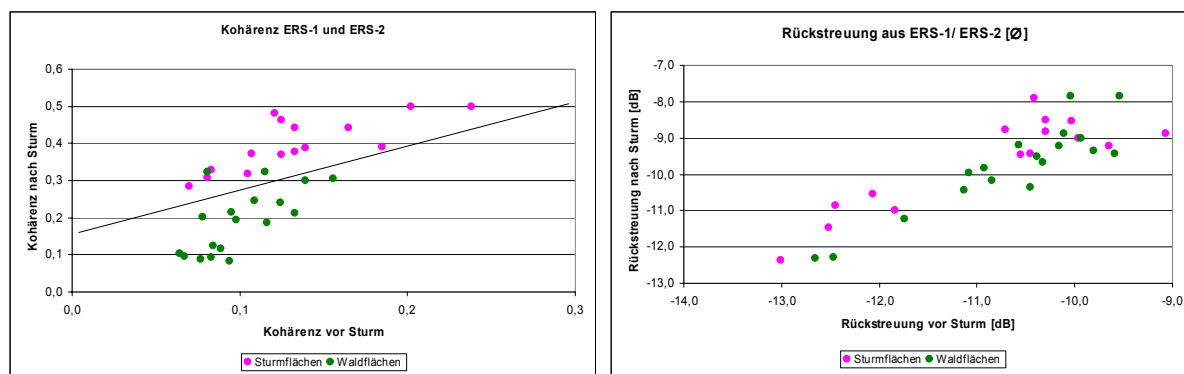


Abbildung 36: Ergebnisse der Signaturanalyse für die mittlere Rückstreuung (rechts) aus ERS-1 und ERS-2 und die Kohärenz (links)

Die Ergebnisse der Signaturanalyse zeigen deutlich, dass Sturmflächen einen deutlich höheren Kohärenzgrad aufweisen als Waldflächen. Werden die Rückstreuwerte betrachtet, sind die Unterschiede zwischen diesen beiden Klassen allerdings sehr gering (Abbildung 36).

Multitemporale Auswertung - Change Detection

In der Abbildung 37 sind die für die Berechnung des Ratio-Bildes verwendeten Kanäle sowie das Ratio-Bild selbst dargestellt. Deutlich sichtbar (in Pink dargestellt) sind die Änderungen, die sich zwischen den beiden Datensätzen innerhalb der Kohärenz vor und nach dem Sturm ergeben haben.

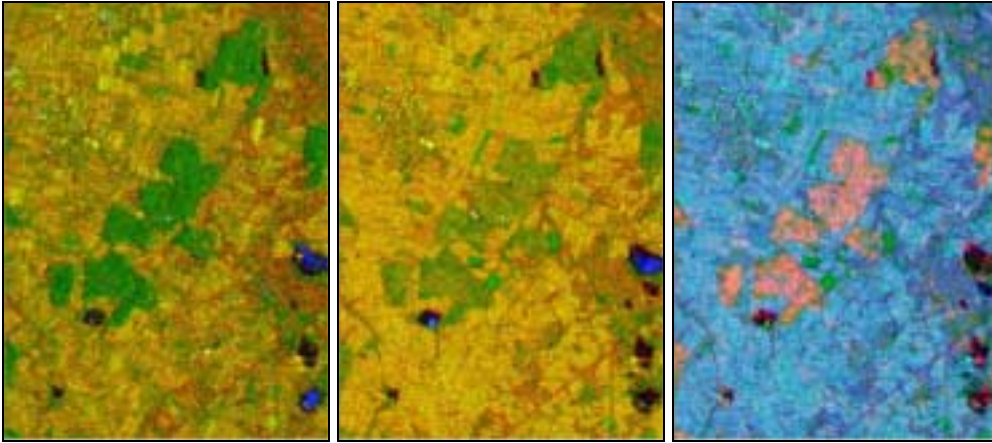


Abbildung 37: ERS-1/2 vor Sturm (Links, Waldfläche intakt), ERS-1/2 nach Sturm (Mitte, Waldflächen nicht durchgehend intakt), berechnetes Ratio-Bild (Rechts, Flächen in Pink zeigen Veränderungen der Kohärenzdaten innerhalb der Vegetation)

Halbautomatische Ermittlung der Sturmflächen mittels Schwellwertmethode

Die Ergebnisse der Schwellwertmethode werden mit Hilfe der Abbildung 38 (rechts) dargestellt.

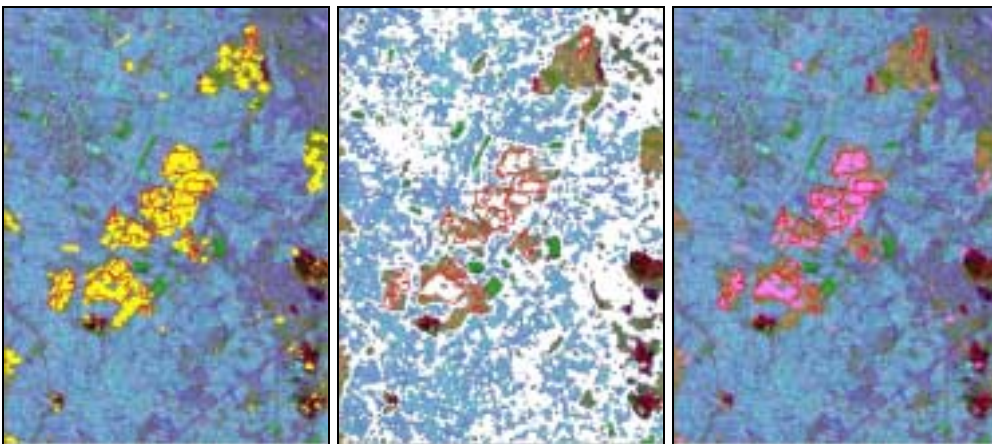


Abbildung 38: Divergenzen innerhalb des Waldes zwischen den Kohärenzdaten in gelb (Links), Bereiche mit mittleren bis hohen Kohärenzwerten in weiß (Mitte), Ergebnis des Schwellwertverfahrens in pink (Rechts), rot Referenzsturmflächen

Mit Hilfe der Schwellwertmethode konnten Bereiche herausgefiltert werden, die Veränderungen in der Kohärenz zwischen den beiden Daten aufweisen (siehe Flächen in pink im rechten Bild der Abbildung 38).

Die Ergebnisse für die Variante 1 können Tabelle 47 entnommen werden (Ergebnisse Variante 2 siehe Tabelle D.1, Anhang D).

Tabelle 47: Ergebnisse ERS-1/2 für die Variante 1

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 58,9 | 100,0 | 35,6 | 86,7 |
| Fläche \geq 2 ha | 53,3 | 90,9 | 34,7 | 83,3 |
| Fläche \geq 1 ha | 51,1 | 75,9 | 30,8 | 55,3 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 47,4 | 56,3 | 29,4 | 44,6 |

Die multitemporale Erfassung der Sturmflächen mit den Kohärenzdaten von ERS-1 und ERS-2 war mit zunehmender Größe der Schadfläche besser. Von der Anzahl der Flächen war es möglich, ab einer Größe von 4 ha mit 100,0 % Nutzergenauigkeit die Sturmflächen zu erfassen. Eine gute flächenhafte Erfassung war aber auch bei größeren Sturmflächen mit einer Nutzergenauigkeit von 58,9 % bzw. einer Herstellergenauigkeit von 35,6 % bei Flächen größer 4 ha nicht möglich.

7.1.3.3 TerraSAR Daten

Auf eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse sämtlicher Zwischenschritte von der Vorsegmentierung bis zur Klassifizierung der Daten wird verzichtet. Generell ergaben sich gegenüber der automatischen Erfassung der Sturmflächen mit den E-SAR Daten nur kleinere Änderungen zum Beispiel bezüglich der Zusammenstellung der mit Hilfe der Diskriminanzanalyse ermittelten Kanäle für die Klassifizierung (Nearest Neighbor) oder die Anzahl der zu klassifizierenden Segmente. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Varianten jeweils ausgewertet für die Schadklasse 1 (Schadklasse 1+2 siehe Anhang E) dargestellt.

Variante 1

Bei dieser Variante wurden die X-Band Daten verwendet und Nichtwaldflächen aus der Klassifizierung ausgeschlossen. Die Ergebnisse sind Tabelle 48 zu entnehmen (Variante 2, Tabelle E.1, Anhang E).

Tabelle 48: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 1 TerraSAR

| Variante 1 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche >= 4ha | 76,5 | 100,0 | 35,2 | 85,7 |
| Fläche >= 2 ha | 54,7 | 73,3 | 32,8 | 75,0 |
| Fläche >= 1 ha | 40,2 | 41,9 | 31,9 | 68,0 |
| Fläche >= 0,5 ha | 33,0 | 30,3 | 30,7 | 51,4 |

Vergleicht man die erzielten Ergebnisse mit der Variante 1 (siehe Tabelle 38) der automatisierten Erfassung mit den E-SAR Daten, können die Werte vor allem hinsichtlich der Herstellergenauigkeit nicht erreicht werden. Bei größer als 4 ha der Schadklasse 1 wurden nur 35,2 % richtig klassifiziert.

Variante 3

Für diese Variante wurden die X-Band Daten verwendet und zusätzlich alle Nichtwaldflächen, Nichtholzbodenflächen und Bestände jünger 30 Jahre aus der Klassifizierung mit Hilfe eines Thematik-Layers auf Basis der FoGIS Daten ausgeschlossen. In Tabelle 49 werden die Ergebnisse dargestellt (Variante 4, Tabelle E.2, Anhang E).

Tabelle 49: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 3 TerraSAR

| Variante 3 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche >= 4ha | 80,7 | 100,0 | 41,8 | 71,4 |
| Fläche >= 2 ha | 70,6 | 83,3 | 38,3 | 52,9 |
| Fläche >= 1 ha | 62,1 | 56,5 | 35,7 | 44,4 |
| Fläche >= 0,5 ha | 56,6 | 44,7 | 34,5 | 37,8 |

Gegenüber der Variante 1 konnten die Ergebnisse im Bezug auf Nutzer- und Herstellergenauigkeit, verbessert werden. Allerdings konnten gerade mal 41,8% der Sturmflächen größer 4 ha hinsichtlich der Herstellergenauigkeit klassifiziert werden, aber immerhin 80,7 % im Bezug auf die Nutzergenauigkeit.

Variante 5

Zusätzlich zu den X-Band Daten wurden hier auch die L-Band Daten verwendet. Mit Hilfe eines Thematik-Layers wurden Nichtwaldflächen von der Klassifizierung ausgeschlossen. Eine Übersicht über die Ergebnisse dieser Variante liefert Tabelle 50 (Variante 6, Tabelle E.3, Anhang E).

Tabelle 50: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 5 TerraSAR

| Variante 5 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 75,6 | 100,0 | 42,5 | 57,1 |
| Fläche \geq 2 ha | 74,4 | 100,0 | 35,8 | 25,0 |
| Fläche \geq 1 ha | 63,4 | 62,5 | 34,5 | 28,0 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 58,4 | 55,2 | 33,3 | 31,4 |

Die erzielten Ergebnisse sind vergleichbar mit denen der Variante 3 (s.o.). Die Hinzunahme der L-Band Daten brachte bei Flächen größer 4 ha mit 75,6 % Nutzergenauigkeit keine Verbesserung.

Variante 7

Gegenüber der Variante 5 wurden mit Hilfe des Thematik-Layers nicht nur die Nichtwaldflächen sondern auch Nichtholzboden und Bestände jünger 30 in eCognition[®] extrahiert und nicht in die Klassifizierung eingebunden. Tabelle 51 liefert einen Ergebnisüberblick über die Variante 7 (Variante 8, Tabelle E.4, Anhang E).

Tabelle 51: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 7 TerraSAR

| Variante 7 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 70,8 | 100,0 | 60,2 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 66,6 | 92,9 | 57,2 | 88,2 |
| Fläche \geq 1 ha | 62,2 | 78,3 | 53,7 | 74,1 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 56,7 | 48,9 | 52,2 | 62,2 |

Gegenüber den Ergebnissen der Varianten 3 und 5 wurde mit 70,8 % für Flächen größer 4 ha und 62,2 % für Flächen größer 1 ha eine niedrigere Nutzergenauigkeit erzielt. Im Bezug auf die Herstellergenauigkeit, konnten allerdings mehr Sturmflächen erfasst werden, da hier Werte von 60,2 % (Flächen größer 4 ha) und 53,7 % (Flächen größer 1 ha) erreicht wurden.

7.1.4 Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

Unterschätzung der Sturmflächen

Zunächst wurden die unterschätzten Flächen daraufhin untersucht, welcher Größenklasse sie zuzuordnen waren. Die Ergebnisse für unterschätzte Sturmflächen der Schadklasse 1 sind der Abbildung 39 (Links) zu entnehmen. Die Werte entsprechen dabei Durchschnittswerten aus den in Tabelle 24 aufgeführten Varianten. Der X-Achse ist die Flächengröße innerhalb der einzelnen Klassen zu entnehmen. Dabei wird zwischen der unterschätzten Fläche und der korrekt erfassten Fläche bezogen auf die Schadklasse 1 unterschieden. Die Y-Achse unterteilt die analysierten Größenklassen. Die Prozentangaben beziehen sich auf den Anteil der unterschätzten Fläche und der korrekt erfassten Fläche innerhalb der Größenklasse. Als weiterer Parameter wurde das Bestandesalter der unterschätzten Sturmflächen analysiert (Abbildung 39, Rechts).

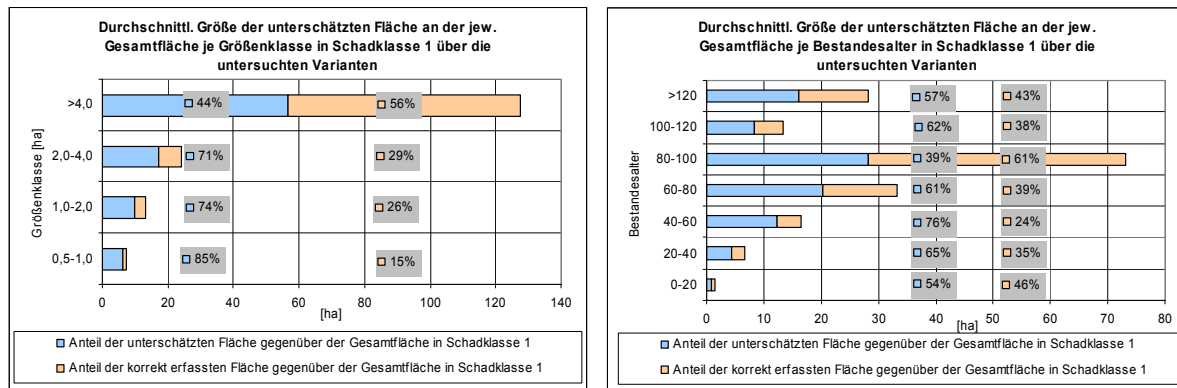


Abbildung 39: Ergebnisse für verschiedene Größenklassen (links) und unterschiedliche Bestandesalter (rechts)

Deutlich festzustellen ist eine Zunahme der unterschätzten Fläche mit abnehmender Größe der Sturmfläche. Dies spiegelt auch die erzielten Ergebnisse wieder. Bezüglich des Bestandesalters ist kein aussagefähiger Trend erkennbar. Wichtig allerdings ist, dass in der Klasse von 80 – 100 Jahren mit dem größten Anteil nur knapp 40% der Fläche innerhalb der Schadklasse 1 unterschätzt wurde.

In den beiden folgenden Diagrammen werden die Ergebnisse für den Einfluss der Bestandeshöhe und der Exposition der Sturmfläche auf die Unterschätzung dargestellt (Abbildung 40).

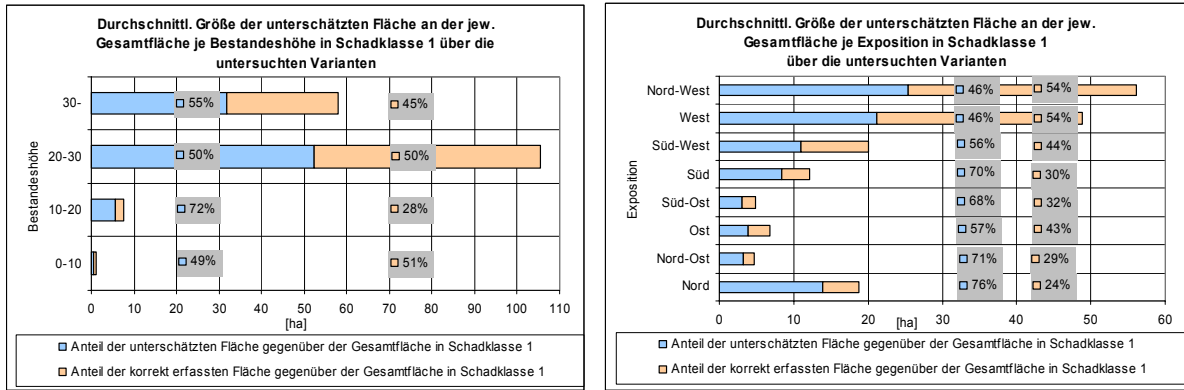


Abbildung 40: Ergebnisse für verschiedene Bestandeshöhen (links) und Expositionen (rechts)

Vor allem die Bestände mit Baumhöhen ab 20 m wurden seltener unterschätzt als Bestände mit geringeren Baumhöhen. Bezüglich der Exposition kann man deutlich erkennen, dass die Hauptschäden vor allem in westlich exponierten Lagen auftraten. Hier war die Unterschätzung deutlich geringer als in östlich und südlich exponierten Lagen.

In der nächsten Abbildung werden die Ergebnisse der Parameter Hangneigung und Lokaler Einfallswinkel auf die Unterschätzung von Sturmflächen dargestellt (Abbildung 41).

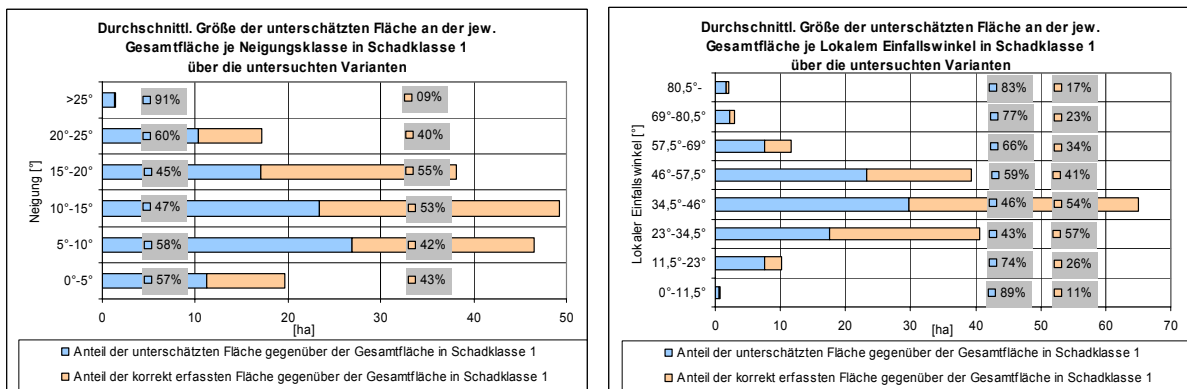


Abbildung 41: Ergebnisse für verschiedene Neigungsklassen (links) und Lokalem Einfallswinkel (rechts)

Sowohl in flachen wie auch in steilen Lagen kam es prozentual gesehen zu einer ähnlich gleich großen Unterschätzung der Sturmflächen. Sturmflächen mit höheren lokalen Einfallswinkeln wurden mehr unterschätzt, als Bereiche mit mittleren Werten. Gerade dort wo die meisten Sturmflächen zu finden waren, wurden wenige Sturmflächen unterschätzt.

Als weiterer Parameter wurde der Einfluss des Räumungszustands zum Zeitpunkt der Aufnahme auf die Unterschätzung der Sturmflächen untersucht (Tabelle 52).

Tabelle 52: Einfluss des Räumungszustands auf die Unterschätzung der Sturmflächen

| Räumungszustand | unterschätzte Fläche [%] | richtig erfasste Fläche [%] |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------|
| nicht geräumt | 57,11 | 42,89 |
| teil geräumt | 35,27 | 64,73 |
| geräumt | 55,36 | 44,64 |
| keine Angaben | 78,49 | 21,51 |

Den oben aufgeführten Ergebnissen ist zu entnehmen, dass kein großer Unterschied bzgl. der Unterschätzung einer geräumten oder einer ungeräumten Fläche bestand. Für die Flächen ohne Information des Räumungszustands zum Zeitpunkt der Aufnahme können keine Aussagen getroffen werden.

Überschätzung der Sturmflächen

Untersucht wurden bis auf die Flächengröße und den Räumungszustand dieselben Parameter wie im vorherigen Kapitel. Die überschätzte Fläche wurde dabei mit der gesamten Fläche des Untersuchungsgebiets (abzüglich der Sturmflächen in Schadklasse 1) in Relation gebracht und nicht wie bei der Unterschätzung mit der Sturmfläche der Schadklasse 1. Die Ergebnisse bezüglich der Exposition und Hangneigung können den folgenden Diagrammen entnommen werden (Abbildung 42).

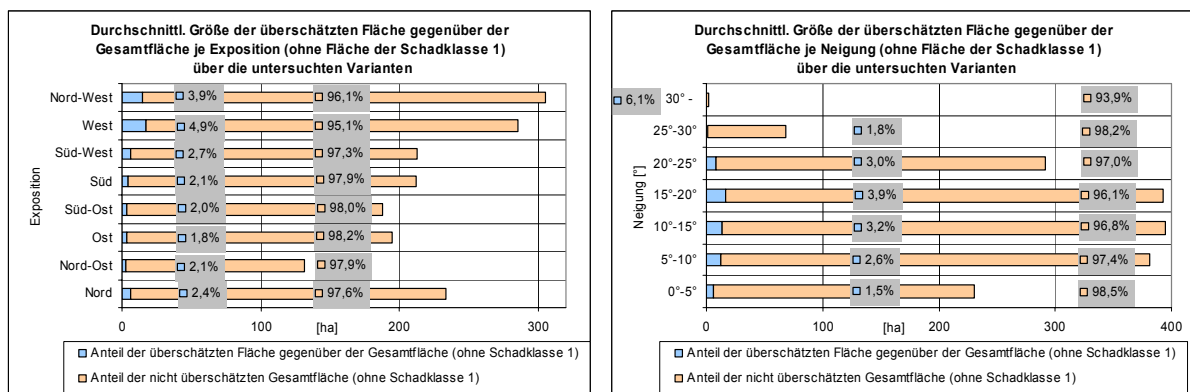


Abbildung 42: Anteil der überschätzten Flächen am gesamten Untersuchungsgebiet im Hinblick auf Exposition (links) und Hangneigung (rechts)

Auf Nord-West bis West zum Sensor hin exponierten Flächen war der Anteil der überschätzten Flächen höher. Dies steht im Gegensatz zu den unterschätzten Flächen, die vor allem auf vom Sensor abgeneigten Hängen auftraten. Tendenziell ist auch bei größerer Hangneigung eine Zunahme der überschätzten Fläche zu erkennen. Hangneigungen ab ca. 25°

wurden nicht mehr berücksichtigt, da der Flächenanteil gegenüber den restlichen Hangneigungsklassen zu gering war.

7.1.5 Zusätzliche Auswertung

7.1.5.1 Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995

In der Abbildung 43 wird das Oberflächenmodell aus der E-SAR Befliegung im Jahr 2000 von den Referenzsturmflächen der Schadklasse 1 überlagert. Zum Teil sind die Unterschiede zwischen dem Oberflächenmodell von 1995 und dem aus dem Jahr 2000 deutlich zu erkennen. Somit scheint eine Erfassung der Sturmflächen durch ein einfaches Subtraktionsverfahren möglich.

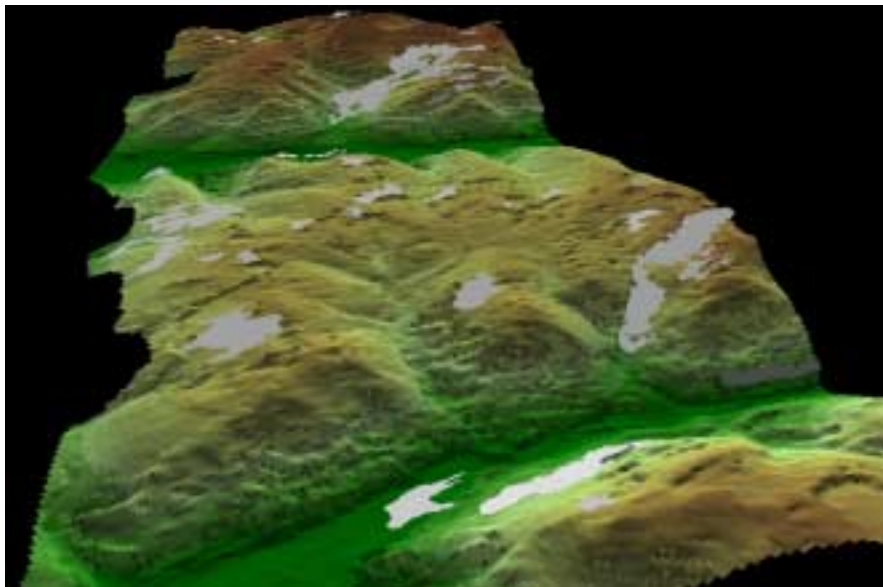


Abbildung 43: : 3D-Darstellung des Untersuchungsgebiets G1. Oberflächenmodell erstellt im Rahmen der E-SAR X-Band Befliegung vom April 2000. Überlagerung mit Sturmflächen der Schadklasse 1 (weiße Flächen)

Das Ergebnis dieser Subtraktion ist in Abbildung 44 dargestellt.

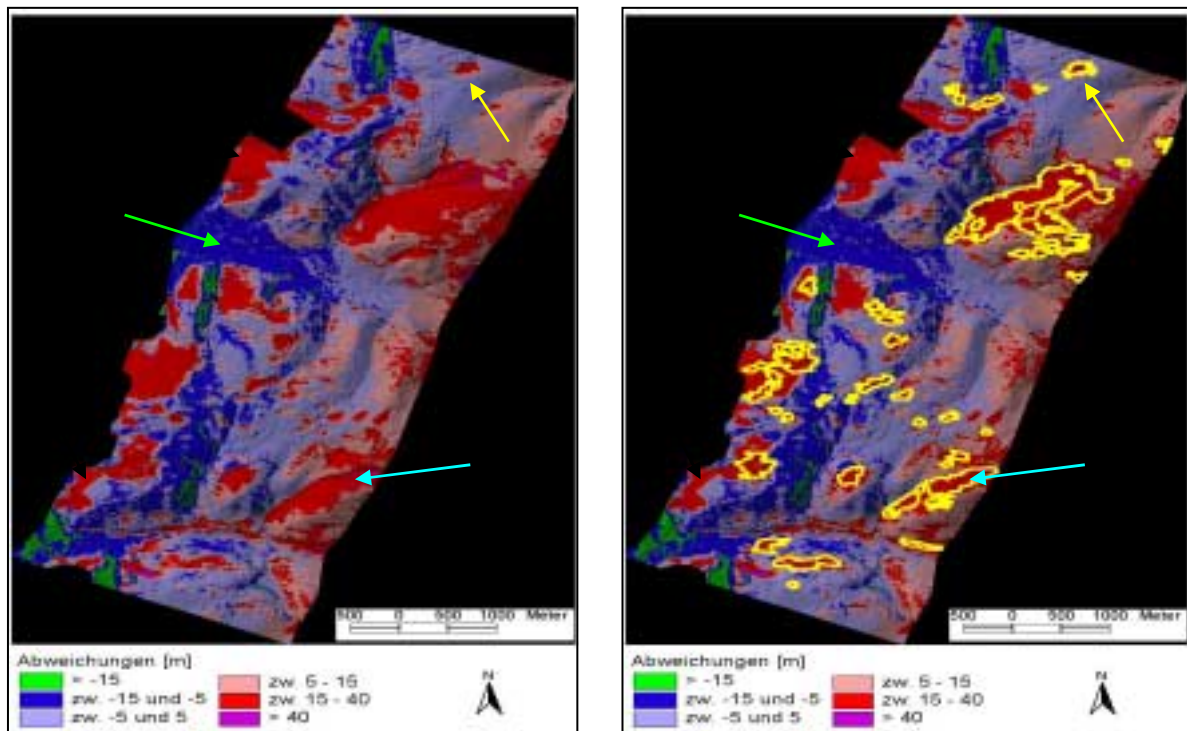


Abbildung 44: Ergebnis der Subtraktion mit Aufteilung in 6 Differenzklassen (Links). Zusätzlich mit Einblendung der Referenzdaten in gelb (Rechts)

Nach der Subtraktion der beiden Oberflächenmodelle wurde das Ergebnis in 6 Klassen eingeteilt. Die Klassen 1 und 2 (grün und dunkelblau in Abbildung 44) sind im negativen Bereich bis -5 m Abweichung. Auffallend hierbei sind die Abweichungen im Bereich außerhalb des Waldes (grüner Pfeil). Die nächsten Klassen von -5 – 5 m (hellblau) und 5 – 15 m (hellrot) zeigen geringe Abweichungen zwischen beiden Datensätzen. Die nächste Klasse umfasst Abweichungen von 15 – 40 m. Da auch auf Grund der Ergebnisse der GIS-Analysen (siehe Abbildung 45) vor allem Bäume mit Höhe von ca. 15 m bis 40 m dem Sturm zum Opfer fielen, wurde diese Klasse (in rot dargestellt) mit den Referenzdaten visuell und rechnerisch verglichen. Auffallend ist, dass einige Sturmflächen sehr gut erfasst wurden (blaue Pfeile), manche Bereiche innerhalb des Waldes hohe Unterschiede aufweisen (gelbe Pfeile), aber keine Sturmflächen sind. Die letzte Klasse umfasst Abweichungen mit mehr als 40 m und wurde in der Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

Die Auswertung wurde auf die Schadklasse 1 beschränkt, da die Abweichungen auf den größeren zusammenhängenden Sturmflächen besser ausgeschieden werden konnte. Ebenso wurden alle Bestände jünger 30 ausgeschlossen, da dort kaum Sturmflächen auftraten und Baumhöhen von mehr als 15 – 20 m nicht zu erwarten sind.

In Tabelle 53 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Oberflächenmodelle dargestellt.

Tabelle 53: Vergleich der Oberflächenmodelle

| DOM Luftbilder (1995) – DOM E-SAR (2000) | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|---|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 34,2 | 68,4 | 91,4 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 34,0 | 63,0 | 90,8 | 100,0 |
| Fläche \geq 1 ha | 33,6 | 57,1 | 90,6 | 100,0 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 32,9 | 39,6 | 88,9 | 89,2 |

Die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Sturmflächen konnten fast komplett erfasst werden, was der hohen Herstellergenauigkeit von über 90 % bei Flächen größer 1 ha entnommen werden kann. Allerdings werden noch eindeutig zu viele Bereiche als Sturmflächen ausgeschieden, die in der Realität intakte Waldbestände waren (siehe Nutzergenauigkeit in Tabelle 53).

Eine anschließende Überprüfung des E-SAR Oberflächenmodells mit den Nicht-Sturmflächen unter Einbeziehung der Parameter Hangneigung, Exposition und den Lokalen Einfallswinkeln im Bereich von 15-40 m Abweichung, ergab folgende Ergebnisse (Abbildung 45):

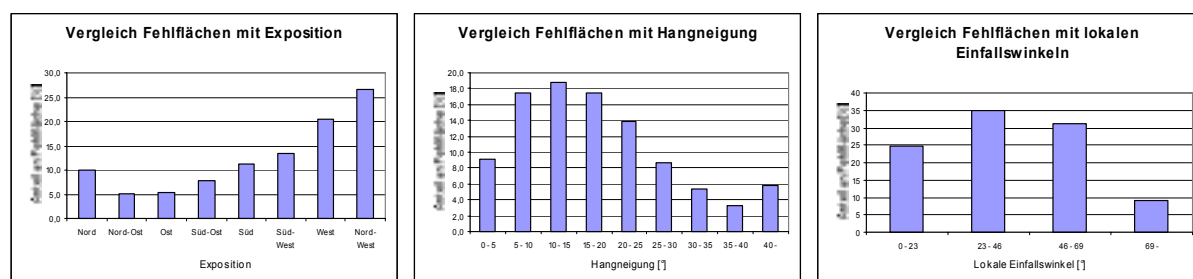


Abbildung 45: Abweichungen zwischen den Oberflächenmodellen ohne Einfluss von Sturmflächen

Vor allem bei höheren lokalen Einfallswinkeln und bei größerer Hangneigung kam es im Bereich von 15–40 m Abweichung der beiden Oberflächenmodelle zueinander zu Differenzwerten, die nicht mit Sturmflächen in Verbindung zu bringen sind. Zusätzlich kann unter Einbeziehung der FoGIS Daten (von 98/99) nachgewiesen werden, dass in diesen Bereichen zwischen 1995 und dem Sturmereignis Ende Dezember 1999 keine Nutzung stattgefunden hat.

7.1.5.2 Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI)

Insgesamt konnten 6 von 22 BWI Punkten auf Basis des Referenzdatensatzes Sturmschaden jeweils der Schadklasse 2 zugeordnet werden.

Die folgende Überprüfung dieser 6 BWI-Punkte auf Basis der TerraSAR Daten brachte keine verwertbaren Ergebnisse, da an keinem dieser 6 Punkte in den TerraSAR Daten Sturmschaden innerhalb der untersuchten Varianten nachgewiesen bzw. erkannt werden konnte.

8 Diskussion

8.1 Verwendete Erfassungsoptionen und Auswertungsverfahren

Unterschiede in der Flächenabdeckung

Die flächendeckende Erfassung von Objekten gehört mit zu den Standardverfahren für die Auswertung von Fernerkundungsdatensätzen. Beispiele dafür sind flächendeckende Erfassungen von Grünflächen und Bäumen innerhalb von Städten und Gemeinden mit Hilfe von analogen oder digitalen Luftbildern, die Verwendung von Luftbildern innerhalb des 10-jährigen Zyklus der Forsteinrichtung in Baden-Württemberg zur Vorabgrenzung von Waldbeständen oder kleinräumige Kartierungen mit einem hohen Informationsbedarf. Ein weiteres Beispiel für die flächendeckende Erfassung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten ist die von der EU finanzierte flächendeckende Kartierung von Olivenbäumen in Italien mit Hilfe von Luftbildern (MARS, 2004). Eine flächendeckende Erfassung von Sturmflächen wurde mit Hilfe von Luftbildern und terrestrischen Erhebungen von der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg nach dem Orkan „Lothar“ 1999 in der Praxis durchgeführt. Durch diese Methode war die Planung der Wiederbewaldung möglich. Innerhalb des Projekts Sturmmon (RAMMINGER ET AL., 2004) sowie der Arbeit von SAIDANI (2004) zur Erfassung von Sturmschäden mit Luftbildern und eines Projekts zur Sturmschadenserkenntnis im Wald mit modernen Fernerkundungsmethoden an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL (STEINMEIER ET AL., 2002), wurden ebenfalls flächendeckende Erfassungsoptionen durchgeführt.

Aus den genannten Gründen wurde die flächendeckende Erfassung innerhalb der vorliegenden Arbeit für alle untersuchten Radardaten als am Besten geeignet erachtet.

Zusätzlich zur flächendeckenden Erfassungsmethode wurde ein stichprobenbasiertes Erfassungsverfahren auf Basis von BWI-Punkten durchgeführt, da eine Aufstellung einer nach dem Orkan zeitlich schnell verfügbare Schadensstatistik nur auf diesem Wege möglich erscheint.

Unterschiede im Automatisierungsgrad

Sowohl visuelle, (BOSSARD, 1986; NIEHAUS, 1986; OESTER, 1987; SCHERRER ET AL., 1990; GROSS, 1993; ADLER 1995) als auch automatische Erfassungsvarianten von Objekten werden in der Fernerkundung seit Jahren verwendet und besitzen bezüglich des Zeitaufwands, der Auswertungsmöglichkeit, Interpretationsfähigkeit und der Genauigkeit große Unterschiede.

Automatische Auswertemethoden bieten in der Regel vielfache Vorteile gegenüber der visuellen Interpretation von Bilddaten. Der Prozess kann meist automatisiert oder zumindest teilautomatisiert durchgeführt werden, was den Arbeitsablauf augenscheinlich erheblich vereinfachen und beschleunigen kann. Tatsächlich müssen aber in vielen Fällen diese

automatisierten Produktionsprozesse überwacht, gegebenenfalls angepasst und am Ende die Ergebnisse in manchen Bereichen korrigiert werden, wodurch ein Teil der Zeitersparnis wieder relativiert wird. Ein großer Vorteil einer computerisierten und automatisierten Erfassungsoption ist, dass sich der aufgestellte Erfassungsalgorithmus strikt an die ihm gegebenen Anweisungen hält. Er unterliegt nicht den bei einer visuellen Interpretation auftretenden subjektiven Einschätzungen und Schwankungen des jeweiligen Interpreten von den vorher aufgestellten Erfassungsregeln. Trotzdem hat auch die visuelle Interpretation bzw. Erfassung von Sturmflächen große Vorteile. So ist es einem aufgestellten automatischen Erfassungs- oder Interpretationsalgorithmus nur teilweise möglich, verschiedene Bildbereiche in einem größeren Kontext zu betrachten. Beispiele hierfür sind überschattete Bereiche (zum Beispiel auch Radarschatten) oder Texturen, die von einem menschlichen Interpreten wahrgenommen werden können und von diesem in Beziehung zu den umliegenden Texturen und Grauwerten gesetzt werden können. Mit Hilfe des objektorientierten Ansatzes, bei dem jedem einzelnen Segment nicht nur die spektrale Eigenschaft sondern auch die Standardabweichung, Form, Textur und die Relationen zu anderen Segmenten zugeordnet ist und somit für eine anschließende Klassifikation zur Verfügung steht, sind mittlerweile erste Ansätze entwickelt worden, um diese bisherigen Schwächen der automatischen Interpretationsverfahren zu beheben.

Da die Erfassung von Sturmflächen in der vorliegenden Arbeit auf einem zweistufigen Ansatz basiert, bei dem in einer ersten Stufe möglichst schnell Informationen nach dem Schadereignis zur Verfügung stehen sollen und in einer zweiten Stufe eine möglichst genaue Kartierung der Sturmflächen durchgeführt werden soll, war die Verwendung visueller als auch automatischer Erfassungsoptionen notwendig. Die rein visuelle Erfassung und Delinierung der Sturmflächen am Bildschirm kann wahrscheinlich für einen schnellen Überblick über das Schadausmaß nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen. Demgegenüber können automatische Optionen schnell Ergebnisse liefern, allerdings für eine Kartierung der Sturmflächen zur Planung der Wiederbewaldung zu ungenau sein. Beide Erfassungsvarianten wurden im Projekt Sturmmon (RAMMINGER ET AL., 2004), in SAIDANI (2004) und bei STEINMEIER ET AL. (2002) erfolgreich durchgeführt. Demgegenüber verwendeten frühere Arbeiten in der Regel einen visuellen Ansatz zur Kartierung der Sturmflächen (SIEDE, 1991; RÄHLMANN, 1991; KREMMERS, 1992; KUNTZ & ZIMMERMANN, 1993).

Unterschiede in der Nutzung von Bild-Vorinformationen

Da die Verwendung von Bilddaten vor dem Sturm in einigen Fällen (ERS-1 und ERS-2, Radarsat) möglich war, wurde in diesen Fällen eine multitemporale Analyse durchgeführt. Dies macht gerade bei weniger hoch aufgelösten Daten Sinn, da dort eine größere Möglichkeit besteht, flächendeckend Daten des betroffenen Gebietes sowohl zu erhalten. Wie schon in Hildebrandt (1996) beschrieben, zeigt jede Bildaufnahme jeweils den status quo im Augenblick der Aufnahme. Aussagen über den Zustand zu einem früheren Zeitpunkt kann

dem aktuellen Bild nicht direkt entnommen werden. Dafür werden Bilddaten zweier unterschiedlicher Zeitpunkte vor und nach dem Schadereignis benötigt. Trotzdem ist es auch möglich aus erkannten Situationen, wie zum Beispiel Sturmschaden, Waldbrand, Bergrutsch usw., Rückschlüsse auf die Zustände vor dem jeweiligen Ereignis zu ziehen (Hildebrandt, 1996) und die Veränderungen mit Hilfe nur eines Bilddatensatzes nach dem Schadereignis zu kartieren. Aus diesen Gründen wurden sowohl multitemporale (wo verfügbar) als auch monotemporale Auswerteverfahren untersucht.

Unterschiede in der Nutzung von GIS-Vorinformationen

Sowohl für die visuelle als auch die automatische Erfassung war die Nutzung von Zusatzinformationen aus dem GIS möglich und hilfreich. Durch die Verwendung dieser Zusatzinformationen war es möglich, Gebiete mit ähnlichen Charakteristiken (Textur, spektrale Information) gegenüber Sturmflächen, wie zum Beispiel Jungbestände, von der Interpretation auszuschließen. Die Verwendung von Vorinformationen wird seit langem bei der überwachten Klassifizierung von Bilddatensätzen verwendet, um Trainingsgebiete zu identifizieren und damit die Genauigkeit des Klassifikationsverfahrens zu steigern (COENRADIE, 1992; RICHARDS & JIA, 1999). Die direkte Einbindung von FoGIS Daten für die Erfassung von Sturmflächen konnte die Ergebnisse in den Arbeiten von RAMMINGER (2000) und innerhalb des Projekts Sturmmom, deutlich verbessern. Die Sturmflächenerfassung mit optischen Satellitendaten konnte erheblich verbessert werden. Lediglich bei der Verwendung hochauflösender Luftbilddaten führte dies nicht bei jeder Variante zu einer Steigerung der Ergebnisse (SAIDANI, 2004). Da für Baden-Württemberg bis 2007 ein landesweiter FoGIS Datensatz zur Verfügung stehen wird, kann auf diese Art von Zusatzinformation in der nahen Zukunft jederzeit zurückgegriffen werden.

Da mit Hilfe der in die Erfassungsvarianten eingebundenen FoGIS Daten bestimmte Bereiche von der Auswertung ausgeschlossen wurden (NHB-Flächen, Bestände der Altersstufe 2 und jünger, Bannwald, Dauerbestockung), da in diesen Bereichen in der Regel keine Sturmschäden auftreten oder eine Erhebung von Seiten der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg nicht erforderlich ist, konnten mögliche Verwechslungsflächen ausgeschlossen werden. Dies muss aber nicht im Sinne aller potentiellen Nutzer sein. So kann die Erhebung von Sturmflächen in Bann- oder Dauerwäldern zum Beispiel für biologische Fragestellungen oder für die Bekämpfung des Borkenkäfers sehr wichtig sein. Auch innerhalb des Privatwaldes liegen oft keine so detaillierten digitalen Datengrundlagen vor. Aus diesem Grund muss die Ausmaskierung von Teilbereichen vor der Erfassung der Sturmflächen zwar positiv gesehen werden, da damit eine Verbesserung der Erfassungsgenauigkeit erzielt werden kann, vor allem in Bezug auf Bann- und Dauerwäldern sowie den Privatwald ist diese Methode eher kritisch zu bewerten.

8.2 Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

8.2.1 Vorverarbeitung

8.2.1.1 E-SAR Daten

Georeferenzierung

Die E-SAR und TerraSAR Bilddaten weisen in einigen Bereichen Artefakte und horizontale Verschiebungen auf (Abbildung 16, E-SAR). Dies ist eventuell auf das zur Geokodierung verwendete DHM sowie auf die Ermittlung der Passpunkte mit Hilfe der TK25 zurückzuführen. Eine Auswertung der Datensätze in diesen fehlerhaften Bildbereichen konnte nicht durchgeführt werden. Ähnliche Probleme traten auch bei STEINMEIER ET AL. (2002) auf. Bei einem operationalen Einsatz dieser Daten wie zum Beispiel einer großräumigen Kartierung von Sturmschäden müssen diese Fehler bereits während der Datenprozessierung erkannt und verbessert, oder sogar vermieden werden, da dadurch sowohl eine visuelle als auch eine automatische Auswertung erheblich erschwert wird oder nicht durchführbar ist.

Minimierung des Speckle-Effekts

Die Minimierung des Speckle-Effekts in Radardaten mit speziellen Filtern gehört seit längerem zum Standardverfahren für die Aufbereitung von Radarbilddaten. In den Arbeiten von KREMMERS (1997), JOHLIGE (1998) und RIEDEL & SCHMULLIUS (2003) führte die Verwendung eines speziellen Speckle-Filters zur Verbesserung der zur Verfügung stehenden Bildinformation. Die Verwendung des Kuan-Filters war vor allem bei der visuellen Auswertung sowohl der E-SAR als auch der TerraSAR Daten sehr hilfreich.

Ermittlung des Radar-Rückstreukoeffizienten

Da die Ermittlung des Radarrückstreukoeffizienten nach vorgegebenen Regeln durchgeführt wird, kann kein direkter Einfluss auf das Ergebnis dieser Prozedur genommen werden. Trotzdem ist es möglich, indirekt über die Einbindung und Filterung der Maske der lokalen Einfallswinkel Einfluss zu nehmen. Die Filterung wurde in der vorliegenden Arbeit durchgeführt, was optisch betrachtet einen verbesserten Bilddatensatz zum Ergebnis hatte.

Beleuchtungskorrektur

Die Verwendung des Ansatzes nach BEAUDOIN ET AL. (1996) zur Korrektur der Beleuchtungsunterschiede in den Bilddatensätzen von E-SAR und TerraSAR, war für eine automatische Auswertung auf Basis einer Segmentierung notwendig. Damit wurde vermieden, dass die Geländetopografie einen zu großen Einfluss auf die Segmentierung und die anschließende Klassifizierung der Daten hatte. Dies konnte auch in den Arbeiten von KEIL ET AL. (1997) und FRIEAUFF & PONCÉT (1999) bestätigt werden. Da aber nach Durchführung der Beleuchtungskorrektur vor allem in steilen, vom Aufnahmesensor abgeneigten Lagen, der

Radarschatten nicht korrigiert werden konnte und im Gegensatz dazu die Beleuchtungskorrektur auch zu Überkorrekturen führte (vgl. Abbildung 20 in Kapitel 7.1.1.1) sollten diese Bereiche erfasst und von den automatischen Erfassungsvarianten ausgeschlossen werden. Vor allem das Ergebnis der Bildsegmentierung kann dadurch erheblich beeinflusst werden.

Da auch die unterschiedlichen Rückstreu-Strukturen innerhalb des Waldes bei diesem Modell nicht berücksichtigt werden, ist eine weitere Fehlerquelle vorhanden. Als sehr wichtig erwies es sich, die Regressionsparameter für die Beleuchtungskorrektur für jeden einzelnen Kanal getrennt zu ermitteln und auf dieser Basis die Korrekturen durchzuführen.

8.2.1.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Geometrische Entzerrung

Da wegen der fehlenden Aufnahmeparameter keine Orthorektifizierung der Daten durchgeführt werden konnte, traten vor allem in sehr kuppertem Gelände große Abweichungen zwischen den FoGIS Daten und den geometrisch entzerrten ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten auf. Eine quantitative Auswertung war in diesen Bereichen unmöglich, weswegen hier eine qualitative Analyse mit Hilfe einer Signaturanalyse durchgeführt wurde. Da nach der geometrischen Entzerrung kaum Abweichungen der Bilddaten von den FoGIS Geometrien im flachen Gelände, hier vor allem im Rheintal, vorlagen, konnten die Sturmflächen innerhalb dieser Gebiete entsprechend quantitativ ausgewertet werden. Insgesamt gesehen hätte die Verwendung eines orthorektifizierten Datensatzes und damit auch die Möglichkeit der Korrektur der Bilddaten hinsichtlich von Layover- und Schattenbereichen, wie in den Arbeiten von YESOU ET AL. (2000); WIESMANN ET AL. (2001) und STEINMEIER ET AL. (2002) geschehen, eine quantitative Analyse für alle Untersuchungsgebiete ermöglicht.

8.2.1.3 Radarsat 1 Daten

Orthorektifizierung

Für die Radarsat Daten steht in der Bildverarbeitungssoftware PCI Works 8.2 ein entsprechendes Modul zur Verfügung, was die Orthorektifizierung ermöglicht. Im Gegensatz zu der Entzerrung der ERS-1 und ERS-2 Daten konnten für die Bilddaten vor und nach dem Sturm gute Ergebnisse mit einem RMS-Fehler von ein bis zwei Pixeln erzielt werden, was die quantitative Auswertung der Bilddaten ermöglichte.

Reduzierung des Speckle-Effekts

Wie schon in den Arbeiten von PAUDYAL & ASCHENBACHER (1993); SHI & FUNG (1994) und KREMMERS (1997) gezeigt werden konnte, war die Verwendung des Gamma MAP Filters zur

Reduktion des Speckle-Effekts sehr nützlich. Allerdings kommt es bei der Verwendung von Speckle-Filtern auch zu Veränderungen in den Grauwerten der Bilddaten, die nicht durch den Speckle verursacht wurden (HORLACHER, 1995). Da Sturmflächen bei einer Auflösung von 8 m je Pixel in den meisten Fällen nicht nur von einzelnen Punktstreuern bzw. Einzelpixel repräsentiert werden, sondern eine größere Fläche einnehmen, ist dieser Punkt hier zu vernachlässigen. Insgesamt sind in diesem Fall die Vorteile der Speckle-Filterung und damit der Verbesserung des Bildes und der Interpretationsmöglichkeiten höher einzuschätzen, als der Verlust einzelner Bildinformationen in Form einzelner Pixel.

8.2.1.4 TerraSAR Daten

Bevor die Ergebnisse der Vorverarbeitung der TerraSAR Daten diskutiert werden, sei darauf hingewiesen, dass diese Daten den Ergebnissen einer Simulation entsprechen, die nicht im Rahmen dieser Doktorarbeit durchgeführt wurde. Im Rahmen dieser Doktorarbeit konnte auf diese simulierten Daten zurückgegriffen werden. Dabei musste angenommen werden, dass die Simulation mit den entsprechenden Parametern und der entsprechenden Software im Vorfeld am Institut für Hochfrequenztechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) fehlerfrei durchgeführt wurde, da auch keine entsprechenden Erkenntnisse über Fehler oder Schwierigkeiten beim Simulationsprozess im Vorfeld dieser Arbeit vorlagen.

Sämtliche Vorverarbeitungsschritte der TerraSAR Daten erfolgten entsprechend der Aufbereitung der E-SAR Daten. Da die TerraSAR Daten auf Basis der E-SAR Daten simuliert wurden, treten dieselben Probleme auf, die auch schon bei den E-SAR Daten auftraten. So existieren in den Bilddaten ebenfalls Artefakte und horizontale Verschiebungen (vgl. Kapitel 7.1.1.1). Auch das Ergebnis der Beleuchtungskorrektur erbrachte vor allem in steilerem Gelände Überkorrekturen in den Bilddaten, die in diesen Bildbereichen maßgeblichen Einfluss auf die Segmentierung ausübten (vgl. Abbildung 20 in Kapitel 7.1.1.1) sowie Bereiche, die nicht korrigiert werden konnten. Werden die betroffenen Bildbereiche vor dem Prozess der Bildsegmentierung ausmaskiert, geht dadurch auf der einen Seite Information verloren, auf der anderen Seite scheint eine homogenere Segmentierung möglich. Da diese Über- und Unterkorrekturen nicht flächenhaft sondern punktuell auftraten, wurde innerhalb dieser Arbeit auf eine Ausmaskierung verzichtet. Treten diese Störungen allerdings flächenhaft auf, sollte eine Vorverarbeitung in Form einer Ausmaskierung durchgeführt werden. Dieselben Rückschlüsse sind auch auf die beleuchtungskorrigierten E-SAR Datensätze übertragbar.

8.2.2 Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

8.2.2.1 E-SAR Daten

Für die visuelle Erfassung der Sturmflächen wurden verschiedene Varianten erprobt, die sich vor allem in der Wahl der Zusatzinformationen, aber auch in der Art von Vorkenntnissen des Interpreten über die Interpretation von Radardaten und die Erfassung von Sturmflächen, voneinander unterscheiden.

Gerade bei der Einbindung von Zusatzdaten als Hilfe für die visuelle Interpretation ist es von entscheidender Bedeutung, in welchem Maßstab diese Zusatzdaten erhoben wurden, um überhaupt eine Verbesserung der Interpretation zu erzielen. Beispiele aus der Literatur belegen, dass es vor allem bei automatischen Verfahren zu Fehlklassifizierungen kommen kann, wenn digitale Zusatzdaten z.B. in Form von Vektordaten in das Verfahren eingebunden werden. In STEINMEIER ET AL. (2002) wurde der Grünflächenauszug, der aus der Schweizer Landeskarte im Maßstab 1:25.000 abgeleitet wurde, in das automatische Klassifizierungsverfahren eingebunden. Fehlerquellen waren dabei die zeitliche Veränderung des Grünflächenauszuges, der alle 6 Jahre überarbeitet wird, geometrische Ungenauigkeiten und unterschiedliche Walddefinitionen (STEINMEIER ET AL., 2002). Im Gegensatz dazu werden FoGIS Daten auf Basis von Ortholuftbildern und Karten im Maßstab 1:10.000 erhoben. Die verwendeten Radardaten von E-SAR und TerraSAR weisen keine höheren geometrischen Genauigkeiten auf, als die FoGIS Daten. Geometrische Ungenauigkeiten zwischen diesen Datensätzen sind deshalb in der Regel auf die untersuchten Radardaten zurückzuführen. Die Ausnahme davon bilden Veränderungen, die sich zwischen der Erfassung der FoGIS Daten und dem Zeitpunkt der Radaraufnahmen ereigneten. Darunter zählen zum Beispiel Holzeinschläge, die Anlage von temporären oder dauerhaften Holzpolterplätzen oder Veränderungen aufgrund von Insektenschäden und Sturmflächen. Wie schon in RAMMINGER (2000) und innerhalb des Projekts Sturmmon (RAMMINGER ET AL., 2004) gezeigt wurde, konnten mit Hilfe der FoGIS Daten bei der visuellen Erfassung der Sturmflächen, Gebiete mit hohem Verwechslungspotential, wie zum Beispiel Jungbestände, von der Interpretation ausgeschlossen werden, was auch eine bessere Erfassungsgenauigkeit zur Folge hatte. Dies konnte, in den innerhalb dieser Arbeit erzielten Ergebnissen (siehe Kapitel 7.1.2.1), bestätigt werden. Durch die zusätzliche Ausmaskierung von Waldbeständen jünger 30 Jahre (siehe Variante 3 bzw. 4 in Kapitel 7.1.2.1) konnten die Ergebnisse bezüglich der Nutzer- und der Herstellergenauigkeit um einige Prozentpunkte verbessert werden (vgl. Ergebnisse der Varianten 1 und 3 in den Tabelle 28 und Tabelle 30).

In einer weiteren Variante wurde versucht, mit Hilfe einer Klasseneinteilung der FoGIS Daten nach Altersklassen, Laub-, Nadel- und Mischwald, Sturmflächen innerhalb den jeweiligen Klassen zu erfassen (Variante 5 und 6). Ziel dieser Variante war es, innerhalb der Bilddaten visuell kleinste Veränderungen in den gebildeten Klassen zu erkennen, um damit auf potentielle Sturmflächen zu schließen.

Wie den Ergebnissen zu entnehmen war (siehe Tabelle 32), konnte diese Annahme nicht bestätigt werden. Es kann deshalb darauf geschlossen werden, dass die Erfassung einfacher durchzuführen ist, wenn die Radardaten bezogen auf den kompletten Bildinhalt interpretiert werden.

Die Erfahrung des Interpretieren bezüglich der visuellen Interpretation von Fernerkundungsdaten bzw. von Radardaten, das bereits vorhandene Wissen über die Textur und Form von Sturmflächen in den Bilddaten und Kenntnisse über das entsprechende Untersuchungsgebiet unterstützen die visuelle Erfassung von Sturmflächen in den Radardaten. Aus diesen Gründen wurden weitere Interpretieren hinzugezogen, die mehr oder weniger Vorkenntnisse bezüglich der oben angeführten Punkte aufwiesen. Die Ergebnisse konnten bestätigen (vgl. Kapitel 7.1.2.1, Tabelle 33 und Abbildung 26), dass es abhängig von den Vorkenntnissen zu großen Abweichungen zwischen den einzelnen Radarbild-Interpretieren kommen kann. Allerdings muss auch festgestellt werden, dass die Zahl von 3 Interpretieren viel zu klein ist, um dies statistisch zu untermauern.

Vergleicht man die hier erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen der visuellen Delinierung der Sturmflächen mit Radarsat und TerraSAR, so wurden mit den E-SAR Daten die höchsten Genauigkeiten erzielt. Dies gilt auch für den Vergleich mit den halbautomatischen und automatischen Erfassungsoptionen mit Hilfe von Radardaten. Die im Rahmen des Forschungsprojekts Sturmmoon mit optischen Satellitendaten oder Luftbildern erzielten Genauigkeiten (RAMMINGER ET AL., 2004; SAIDANI, 2004) bei der visuellen Erfassung von Sturmflächen, können allerdings mit den Radardaten nicht erlangt werden. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen STEINMEIER ET AL. (2002), die sowohl mit den X-Band, L-Band und P-Band Amplitudenbildern keine eindeutigen Differenzierungen zwischen Sturmflächen und intakten Waldflächen erkennen konnten. So war es zum Beispiel mit den Daten des optischen Satelliten IKONOS möglich, Genauigkeiten von mehr als 90 % bei Flächen größer 4 ha und mehr als 80 % bei Flächen größer 1 ha zu erzielen. Ähnliche Resultate erbrachte die Auswertung simulierter Spot 5 Daten innerhalb des Projekts Sturmmoon (RAMMINGER ET AL., 2004). Im Vergleich zu den Ergebnissen der visuellen Erfassungsoptionen von Sturmflächen in Luftbildern im Maßstab 1:25.000 und 1:36.000, wo Sturmflächen ab 0,5 ha mit mehr als 86 % Genauigkeit deliniert wurden, wird ebenfalls deutlich, dass eine genaue Kartierung der Sturmflächen mit den E-SAR Daten in der Praxis nicht sinnvoll ist. Die Fernerkundungsdaten im optischen Bereich bieten hier bessere Erfassungsmöglichkeiten und können in den meisten Fällen 4 – 6 Monate nach dem Sturmereignis zur Verfügung stehen. Da das Rückstreuungssignal des Radarstrahls innerhalb des Waldes vorwiegend von der Volumenstreuung bestimmt wird (STEINMEIER ET AL., 2002) und vor allem ungeräumte Sturmflächen sehr raue Oberflächenstrukturen und eine sehr heterogene Zusammensetzung aufweisen, bestehen ähnliche Streuprozesse wie in Waldflächen (STEINMEIER ET AL., 2002), was die Möglichkeiten der Erfassung erheblich beeinträchtigt.

Auch die gestellten Nutzeranforderungen für die Kartierung der Schadflächen konnten hinsichtlich der Genauigkeit mit Hilfe der visuellen Interpretation der E-SAR Daten nicht erreicht werden. Die Wurfriechung, nützlich für die schnelle Erfassung des Schadausmaßes, konnte nicht ermittelt werden.

8.2.2.2 Radarsat 1 Daten

Sowohl bei der monotemporalen als auch bei der multitemporalen Auswertung konnten keine Sturmflächen mit Hilfe der Radarsat Daten erkannt werden. Dies war auch vollkommen unabhängig von den Geländegegebenheiten, da weder im Untersuchungsgebiet Ettenheim noch in der ebenen Region des Rheintals, Sturmflächen erfasst werden konnten. Beispiele aus der Literatur belegen allerdings, dass mit Hilfe von Radarsat Daten größere Kahlschläge erkannt werden konnten (MURTHA, 1998 und 2000). Auch war es im Rahmen dieser Arbeiten möglich, in den Wäldern von British Columbia (Kanada) sogenannte „riparian leave strips“ oder auch fluss- bzw. bachbegleitende Vegetationsstreifen, mit einer Breite von 15 – 75 m, einer Länge von 60 – 900 m und einer durchschnittlichen Baumhöhe von 40 – 50 m (MURTHA, 1998), die bei Kahlschlägen in der Regel nicht abgeholzt werden, zu erfassen. Hierbei muss aber beachtet werden, dass die Größe und Zusammensetzung der Waldbestände in Kanada nicht mit den Verhältnissen in Mitteleuropa zu vergleichen sind. Während die Wälder British Columbias von großräumigen Nadelwaldbeständen dominiert werden, beherrschen kleinräumige Laub-, Nadel- und Mischwälder das Bild in Mitteleuropa und vor allem in Deutschland. Dies trifft auch auf die beiden Untersuchungsgebiete zu (vgl. Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3) und kann als ein Faktor gesehen werden, warum die Erfassung in den, im Vergleich zu den großen Kahlschläge, eher kleinräumigen Sturmflächen, nicht möglich war. Ähnliche Beobachtungen vor allem im Bezug auf die Erfassung von kleinräumigen Kahlschlägen mit Hilfe von Radardaten, die im Bereich des C-Bandes aufnehmen, machten HORNE AND ROTHNIE (1984), die größere Kahlschläge in flugzeuggetragenen C-Band Radardaten erkennen konnten, allgemeine Durchforstungen oder kleinere Kahlschläge allerdings nicht. Dies konnte in den Arbeiten von JANO (1990) und LECKIE UND YATABE (1994) sowohl für flugzeuggetragene als auch für satellitengetragene C-Band Daten bestätigt werden.

Eine Option, um den Informationsgehalt der Radarsat Bilddaten bzw. die Interpretationsmöglichkeiten dieser Daten zu erhöhen, ist die Fusion mit optischen Bilddaten, wie zum Beispiel von Landsat (GUERRA, 2003). Entsprechende Bildfusionen (z.B. IHS-Fusion) wurden im Rahmen des Projekts Sturmmon durchgeführt, erbrachten aber keine neuen Erkenntnisse.

8.2.2.3 TerraSAR Daten

Anhand der für die TerraSAR Daten durchgeführten Signaturanalyse konnte gezeigt werden, dass allein mit Hilfe der Rückstreuungswerte eine Erfassung der Sturmflächen nur teilweise möglich ist (Kapitel 7.1.2.3, Abbildung 28 und Abbildung 29), was wiederum die Vermutungen von STEINMEIER ET AL. (2002) (Kapitel 8.2.2.1) untermauert, dass bei Sturmflächen ähnliche Rückstreuungsprozesse wirken, wie bei Waldflächen. Die erzielten Genauigkeiten (siehe Kapitel 7.1.2.3, Tabelle 34 ff) sind in allen Varianten etwas schlechter gegenüber der Auswertung der E-SAR Daten, was vor allem mit der etwas schlechteren geometrischen Auflösung der TerraSAR Daten verbunden ist. Die Einbindung von Zusatzinformationen erhöhte auch in diesem Fall (vgl. visuelle Interpretation in E-SAR) die Genauigkeit der Erfassung. Allerdings werden bei dieser Variante potentielle Sturmflächen in Jungbeständen nicht erfasst (v.a. möglich in Douglasien-Beständen im Alter von 20 – 30 Jahren). In diesen Beständen könnte eine zusätzliche Erhebung sinnvoll sein.

Die Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg konnten weder im Bezug auf eine schnelle Erfassung des Schadausmaßes, noch auf eine Kartierung der Schadflächen erreicht werden, was Zweifel an der Praxistauglichkeit dieser Daten für die Erfassung von Sturmflächen hervorruft. Dies kann aber erst endgültig geklärt werden, wenn das TerraSAR System ab Frühjahr 2006 zur Verfügung steht und Daten zur Erde sendet. Da mit TerraSAR Aufnahmen von 1 m (Spotlight Mode) geometrischer Auflösung über 3 m (Stripmap Mode) bis zu 16 m (ScanSAR Mode) möglich sein sollen, besteht hier auf jeden Fall weiter Forschungsbedarf.

8.2.3 Automatische Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten

8.2.3.1 E-SAR Daten

Bei automatischen Auswerteverfahren kann im Moment im Bereich der Fernerkundung zwischen 2 bestehenden Methoden unterschieden werden. Auf der einen Seite die herkömmliche pixelbasierte Klassifizierung, auf der anderen Seite die segmentbasierte Klassifizierung. Nicht nur wegen den bereits genannten Eigenschaften (siehe auch Kapitel 8.1) segmentbasierter Klassifizierungsverfahren, sondern auch die Möglichkeit der Integration thematischer GIS-Daten in den Prozess der Segmentierung und Klassifizierung, wurde dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit als automatische Erfassungsvariante für die Sturmflächen ausgewählt. Im Rahmen des Projekts Sturmmon und auch in der Arbeit von STEINMEIER ET AL. (2002) wurden sowohl pixelbasierte als auch objektbasierte Klassifizierungen durchgeführt. Da dieser Arbeit die Hypothese zu Grunde liegt, dass durch die Integration von FoGIS Daten in den Prozess der Erfassung von Sturmflächen eine höhere Genauigkeit und damit bessere Ergebnisse erzielt werden können, wurde dieser Ansatz ausgewählt. In der Arbeit von NEUBERT & MEINEL (2002), die zur Unterstützung der Segmentierung und

Klassifizierung hochauflösender IKONOS Daten, bereits bestehende GIS-Daten (hier ATKIS) in den Segmentierungsprozess mit einbezogen und auf dieser Grundlage ein Update dieser Daten durchführten, konnte diese Methode erfolgreich angewendet werden.

Die Verwendung der schrittweisen Diskriminanzanalyse für die Ermittlung der zur Klassifizierung eingesetzten Bilddaten wurde bereits in früheren Arbeiten (IVITS & KOCH; 2002; KOCH & IVITS, 2003) erfolgreich durchgeführt.

Die Ergebnisse der automatischen Auswerteverfahren mit den E-SAR Daten waren im Gegensatz zu den weiteren untersuchten automatischen Verfahren mit ERS und TerraSAR besser, was auch auf die höhere geometrische Auflösung der E-SAR Daten zurückzuführen ist. Im Vergleich mit der visuellen Interpretation der E-SAR Daten waren die Ergebnisse schlechter (vgl. Kapitel 7.1.2.1 und 7.1.3.1).

Überraschend war vor allem die Tatsache, dass im X-Band bei der Einbeziehung der FoGIS Daten zur Ausscheidung von Beständen jünger als 30 Jahre, schlechtere Ergebnisse erzielt wurden, da auch in den Ergebnissen der Diskriminanzanalyse (vgl. die Tabelle 36 und Tabelle 39 in Kapitel 7.1.3.1) eine bessere Trennbarkeit der Sturmflächen von Nicht-Sturmflächen ermittelt wurde. Da die Parameter für die Segmentierung gegenüber der Variante 1 nicht verändert wurden (bis auf die Einbeziehung eines Thematik-Layers mit den Beständen jünger 30), liegt die Vermutung nahe, dass die Auswahl der Samples für die Klassifizierung bei dieser Variante nicht gut war. Die Auswertung des X-Bandes in Kombination mit den L-Band Daten erbrachte eine etwas höhere Genauigkeit (vgl. Tabelle 45), was zu erwarten war, da der Informationsgehalt der Bilddaten mit Hinzunahme der L-Band Daten deutlich anstieg. Eine Zersplitterung der FoGIS Daten in kleinere Klassen, wie in den Varianten 9 und 10 in Kapitel 7.1.3.1 durchgeführt, konnte die Ergebnisse gegenüber der einfachen Extraktion von Flächen, in denen in der Regel keine Sturmschäden vorkommen oder bei denen oft keine Aufarbeitung der Schäden von Seiten der Landesforstverwaltung durchgeführt wird, nicht weiter relevant verbessern.

Vergleicht man die hier erzielten Ergebnisse mit den im Projekt Sturmmoon durchgeführten automatischen Erfassungsoptionen mit Hilfe optischer Satellitendaten, wie zum Beispiel IKONOS, SPOT 5 oder auch digitale Luftbilder (STEINMEIER ET AL., 2002; RAMMINGER ET AL., 2004; DIEDERSHAGEN, 2001), bieten die hier verwendeten E-SAR Daten mit den erreichten Ergebnissen keine direkte Alternative für die automatische Erfassung der Sturmflächen zu den genannten Beispielen. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten (STEINMEIER ET AL., 2002) konnte aber auch gezeigt werden, dass eine Erfassung der Sturmflächen nicht nur mit Hilfe der Kohärenz-Daten von E-SAR möglich war, sondern dafür auch auf die Rückstreuwerte zurückgegriffen werden kann.

Hinsichtlich der Nutzeranforderungen von Seiten der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg muss eindeutig gesagt werden, dass die hier verwendeten E-SAR Daten mit den untersuchten automatischen Erfassungsoptionen weder den Ansprüchen für die genaue Kartierung der Schadfläche, noch für einen schnellen Überblick über das Schadausmaß

genügen. Auch wird hiermit in Frage gestellt, dass bei einem Orkan mit den Schadensausmaßen von „Lothar“, innerhalb von 3 – 4 Wochen das Land Baden-Württemberg komplett befliegen werden kann und die Daten prozessiert und auch ausgewertet werden können. Eine Alternative, um die wetterunabhängigen Daten trotzdem zu nutzen, wäre eine Auswahl von sog. Hot-Spots vorzunehmen, also kleine Gebiete mit sehr hohen Schäden. Diese Flächen könnten zeitnah nach dem Sturm befliegen und die Daten ausgewertet werden. Bessere Ergebnisse könnten zusätzlich erzielt werden, wenn bei der Befliegung gleichzeitig Kohärenzdaten aufgenommen werden, wie die Ergebnisse in STEINMEIER ET AL. (2002) gezeigt haben.

8.2.3.2 ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten

Wie bereits in anderen Arbeiten gezeigt werden konnte (WIESMANN ET AL., 2000; YESOU ET AL., 2000; STEINMEIER ET AL., 2002), ist die Erfassung von Sturmflächen mit Hilfe von Kohärenzdaten möglich. Dies konnten die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit bestätigen. Vor allem die Signaturanalyse der ERS-1 und ERS-2 Kohärenzdaten konnte dies belegen. Die Durchführung einer quantitativen Auswertung für das Untersuchungsgebiet 1 wäre wünschenswert gewesen, war aber aus den in Kapitel 6.2.1.2 genannten Gründen nicht möglich. Mit der Verwendung der Change Detection Methode, also der Erfassung der Veränderungen zwischen 2 Bilddaten aus unterschiedlichen Zeitpunkten, konnten größere Sturmflächen ermittelt werden, da die Kohärenzwerte in Sturmflächen höher lagen, als über intakten Waldflächen. Da eine Delinierung der Veränderungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse gebracht hätte, die ermittelten Sturmflächen entsprachen nicht direkt homogenen Einheiten, wurde mit Hilfe eines schwellenwertbasierten Verfahrens die Sturmflächen ermittelt. Eine höhere Genauigkeit der Erfassungsergebnisse wurde vor allem durch die beschränkte geometrische Auflösung der Daten verhindert. Als schnelle Erfassungsoption für den nächsten Sturm sind diese Daten aus diesem Grund nicht geeignet und stehen in dieser Konstellation seit dem Jahr 2000 auch nicht mehr zur Verfügung. Wie allerdings auch bei STEINMEIER ET AL. (2002) gezeigt werden konnte, eignen sich auch hochauflösende Kohärenzdaten (hier flugzeuggetragene E-SAR Daten), zur Erfassung der Sturmflächen. Sollte in naher Zukunft solch ein satellitenbasiertes System (ev. TerraSAR) mit einer höheren geometrischen Auflösung als ERS zur Verfügung stehen, wäre eine schnelle Erfassung des Schadausmaßes damit geeignet.

8.2.3.3 TerraSAR Daten

Die automatischen Erfassungsvarianten mit Hilfe der TerraSAR X- und L-Band Daten führt, im Vergleich zu den E-SAR Daten, zu geringeren Genauigkeiten. Dies ist direkt auf die schlechtere geometrische Auflösung der TerraSAR Daten gegenüber den E-SAR Daten

zurückzuführen. Die Verwendung der FoGIS Daten für den Prozess der Segmentierung konnte die Ergebnisse verbessern. Die Unterschiede in der Genauigkeit bei der Verwendung von X-Band und der Kombination von X- und L-Band waren nur sehr gering. Im Vergleich zu den visuellen Interpretationen mit E-SAR und TerraSAR, sind die hier gewonnenen Genauigkeiten deutlich schlechter. Die Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung konnten weder für einen schnellen Überblick über das Schadausmaß, noch für eine Kartierung der Sturmschäden erreicht werden.

8.2.4 Analyse der Restriktionen für die Erfassung von Sturmschäden mit Radardaten

In diese Analyse wurden die TerraSAR und E-SAR Varianten eingebunden. Da mit Radarsat 1 keine Sturmflächen erfasst werden konnten und mit den ERS-Daten im Untersuchungsgebiet 1 keine quantitative Auswertung erfolgen konnte, standen hierfür nur die Daten von E-SAR und TerraSAR zur Verfügung. Die in die Analyse eingebundenen Zusatzdaten waren nur für das Untersuchungsgebiet 1 in diesem breiten Spektrum verfügbar. Analysiert wurden sowohl die unterschätzten Sturmflächen, also alle Flächen, die nicht erfasst werden konnten, als auch die überschätzten Flächen, die irrtümlich als Sturmflächen erfasst wurden.

Betrachtet man die unterschätzten Sturmflächen, war das Ergebnis, dass sich mit kleiner werdender Sturmfläche auch die Erfassungsgenauigkeit verringert, wenig überraschend (vgl. Abbildung 39). Dies konnte in sämtlichen Arbeiten mit dem Thema der Erfassung von Sturmflächen (RAMMINGER, 2000; DIEDERSHAGEN, 2001; RAMMINGER ET AL., 2004; SAIDANI, 2004 und STEINMEIER ET AL. 2002) festgestellt werden. Kleinere Sturmflächen sind weder visuell noch mit automatischen Verfahren besser zu erkennen als größere zusammenhängende Flächen. Dies kann mit der beschränkten geometrischen Auflösung der Fernerkundungsmedien erklärt werden. Vor allem bei Radaraufnahmen kommt es bei kleineren Sturmflächen zu sich überlagernden Rückstreuintensitäten. Die Unterscheidung der Rückstreuung von einer intakten Waldfläche oder einem kleinen Sturmloch wird mit abnehmender Schadflächengröße geringer.

Vergleicht man die Erfassungsgenauigkeit hinsichtlich der unterschätzten Flächen innerhalb verschiedener Bestandesalter, konnte festgestellt werden, dass die besten Ergebnisse innerhalb der im Untersuchungsgebiet am flächenmäßig stärksten betroffenen Altersbestände gewonnen wurden (vgl. Abbildung 39). Da die Ergebnisse für die anderen untersuchten Bestandesalter sehr unterschiedlich ausfielen, können hier keine weiteren Aussagen über einen Zusammenhang der Erfassungsgenauigkeit von Sturmflächen in verschiedenen Bestandesaltern getroffen werden.

Hinsichtlich der Bestandeshöhe und der Hangneigung der unterschätzten Sturmflächen, lassen sich keine Rückschlüsse auf Zusammenhänge mit der Erfassungsgenauigkeit ziehen (vgl.

Abbildung 40 und Abbildung 41). Betrachtet man allerdings die unterschätzten Sturmflächen im Bezug auf ihre jeweilige Exposition, sind eindeutig Zusammenhänge festzustellen. Sturmflächen, die in vom Sensor abgewandten Bereichen lagen, wurden deutlich öfter unterschätzt (vgl. Abbildung 40) als Sturmflächen, die zum Sensor hin exponiert waren. Flugzeuggetragene Radaraufnahmen besitzen in der Regel größere Einfallswinkel, als satellitengetragene Radarsensoren, die aus dem Weltraum mit größeren Depressionswinkeln, dafür aber geringeren Einfallswinkel, Daten aufnehmen. Bei flugzeuggetragenen Radar-Aufnahmen treten aus den genannten Gründen vor allem in sehr kuperem Gelände vermehrt Bereiche mit Radarschatten auf. Dieser Effekt kann dadurch verstärkt werden, dass Teile von vom Sensor abgeneigten Sturmflächen von intakten Waldbeständen zusätzlich abgeschattet werden. Die im Radarbild sichtbare Größe der Sturmfläche wird durch diesen Effekt minimiert und ist eventuell nicht mehr zu erkennen.

Bezüglich des Lokalen Einfallswinkels (vgl. Abbildung 41) konnten keine direkten Zusammenhänge zwischen der Erfassungsgenauigkeit und den unterschätzten Sturmflächen ermittelt werden. Obwohl für viele Flächen der Räumungszustand zum Zeitpunkt der E-SAR Befliegung bekannt war (vgl. Tabelle 52), wurden keine Zusammenhänge mit der Erfassbarkeit der Sturmflächen gefunden.

Die Analyse der überschätzten Flächen erbrachte keine aussagekräftigen Ergebnisse.

8.2.5 Zusätzliche Auswertung

8.2.5.1 Vergleich – Digitales Oberflächenmodell aus E-SAR Daten mit digitalem Oberflächenmodell aus Luftbildbefliegung 1995

Die erzielten Ergebnisse bestätigen die vorher getroffene Annahme, dass die mit Hilfe der Across-Track Interferometrie gewonnenen Höheninformationen das Potential für eine Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe eines Vergleichs zweier Datensätze vor und nach dem Sturm (hier Luftbilder und Radardaten) besitzen. Auch bei Sturmflächen kleiner 1 ha konnte fast 90% der Fläche erfasst werden. In keiner der bisher dargestellten Radar-Varianten konnte eine so hohe Herstellergenauigkeit erzielt werden. Ähnliche Beobachtungen machten auch MAIRE (2002); YESOU ET AL., (2002) und MAIRE & YÉSOU (2003), die mit Hilfe von VeryHighResolution (VHR) InSAR Daten, nach dem Sturm ermittelten Oberflächendaten auf Basis des flugzeuggetragenen AeS-1 Systems der Firma Aerosensing und dem Vergleich eines Oberflächenmodells vor dem Sturm, Erfassungsgenauigkeiten von bis zu 84 % erreichen konnten.

Allerdings sind zu viele überschätzte Flächen als mögliche Sturmflächen im Ergebnisdatensatz enthalten. Dies kann mehrere Gründe haben. So konnten natürliche Veränderungen (Orkan „Lothar“ hiervon ausgenommen), die zwischen dem Jahr 1995 (Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder, aus denen das Oberflächenmodell vor dem Sturm erstellt

wurde) und dem Jahr 2000 innerhalb des Untersuchungsgebiets stattgefunden haben (z.B. regulärer Holzeinschlag) nicht in die Untersuchung miteinbezogen werden. Eine weitere Fehlerquelle ist das aus den Luftbildern des Landesvermessungsamtes berechnete digitale Oberflächenmodell. Hier können punktuell und flächenhaft Fehler enthalten sein. Für die Zukunft sollte dieser Aspekt weiter untersucht werden. Das in naher Zukunft zur Verfügung stehende aus Laserdaten ermittelte Oberflächen- und Geländemodell des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg kann dabei zumindest in den nächsten Jahren als Grundlage für eine Sturmflächenerfassung mit aus Radardaten berechneten Oberflächenmodellen dienen.

8.2.5.2 Punktuelle Erfassung der Sturmschäden zur Verknüpfung mit Stichprobendaten (BWI)

Für eine genauere Untersuchung dieses Aspektes muss ein größeres Gebiet betrachtet werden, damit auch genügend Punkte ausgewertet werden können. Die hier überprüften 22 Punkte sind auf jeden Fall von der Anzahl her zu wenig, waren aber im Rahmen dieser Arbeit durch die räumliche Verfügbarkeit der TerraSAR Daten begrenzt. Allerdings sei noch darauf hingewiesen, dass diese untersuchte Option nur für Fernerkundungsdaten Sinn macht, die zeitnah nach einem Schadereignis zur Verfügung stehen können. Als Alternative neben den Radardaten könnten hier nur Landsat Daten genannt werden, da mit diesen Daten ein großes Gebiet innerhalb kurzer Zeit allerdings mit einer eingeschränkten geometrischen Auflösung aufgenommen werden kann. Dies setzt allerdings auch eine entsprechende Aufnahmemöglichkeit voraus, was bei schlechtem Wetter mit diesen optischen Daten nicht gewährleistet werden kann.

9 Schlussfolgerungen und Anwendungsperspektiven in der Praxis

In den nächsten Jahren wird allgemein von einer Häufung der schweren Sturm- und Orkanereignissen in Mitteleuropa ausgegangen. Daher muss mit hohen materiellen Schäden in der Forstwirtschaft gerechnet werden. Weitere Folgen solcher Schadereignisse können zum Beispiel Borkenkäferplagen sein, die den gesamten Schadenseffekt in der Forstwirtschaft erhöhen. Um zumindest teilweise den entstandenen Schaden auszugleichen und etwaige Folgeschäden zu minimieren, ist eine gute Planung für die schnelle Aufarbeitung des angefallenen Sturmholzes notwendig. Dazu müssen die Sturmflächen allerdings zuerst lokalisiert und abgegrenzt werden. Für eine mögliche Wiederbewaldungsplanung müssen die Sturmflächen in einem zweiten Schritt genau kartiert werden. Ein Mittel dazu kann die Nutzung von Fernerkundungsdaten sein. Da Radarsensoren wetterunabhängig Daten aufnehmen können, besitzen sie damit einen entscheidenden Vorteil gegenüber optischen Fernerkundungsoptionen. Die schnelle Verfügbarkeit von weltraumbasierten Radardaten nach Sturmereignissen wurde schon nach dem Orkan „Lothar“ mit den Daten von ERS-1 und ERS-2 unter Beweis gestellt. Wie die Ergebnisse hier allgemein gezeigt haben, war in den meisten Fällen eine Erfassung großflächiger Sturmschäden ab 4 ha möglich. Die Ausnahme bildeten dabei die Daten des kanadischen Satelliten Radarsat 1, mit denen keine Erfassung möglich war. Bieten die im Moment zur Verfügung stehenden satelliten- und flugzeugbasierten Radardaten wirklich eine Alternative zu den optischen Fernerkundungssensoren? Verwendet man für diese Diskussion das zweistufige Verfahren, welches die Landesforstverwaltung präferiert, so kann folgender Ausblick gegeben werden:

Für einen schnellen Überblick über das Schadausmaß, vor allem nach Stürmen im Herbst und Winter, sind im Moment keine Radarsensoren verfügbar, mit denen flächendeckend Schäden ab 1 ha Größe innerhalb von maximal 1 bis 2 Monaten erfasst werden könnten. Eine Option in der nahen Zukunft könnten Daten des Satelliten TerraSAR sein. Die Erfassungsqualität ist allerdings stark verknüpft mit der geometrischen Auflösung. TerraSAR soll 3 Aufnahmemodi anbieten, die sich vor allem in der geometrischen Auflösung und in der Flächengröße des aufzunehmenden Gebietes unterscheiden. Mit Hilfe des geplanten Spotlight Mode (1m Auflösung) oder des Stripmap Mode (3m) ist, im Vergleich mit den hier erzielten Ergebnissen der simulierten TerraSAR Daten, eine Erfassung der Sturmflächen mit Abstrichen in der Genauigkeit möglich. Allerdings muss bezweifelt werden, dass mit diesen beiden Modi zum Beispiel das Land Baden-Württemberg innerhalb von 1 bis 2 Monaten flächendeckend aufgenommen werden kann. Eine Alternative wäre die Begrenzung der Aufnahmen auf Starkschadgebiete. Die Daten des bei TerraSAR zur Verfügung stehenden ScanSAR Modes mit einer Auflösung von 16 m und die Daten des in kürze verfügbaren Satelliten Radarsat 2,

sollten in einem zukünftigen Forschungsvorhaben auf ihre Eignung zur Erfassung von Sturmschäden hin überprüft werden. Auch bei den flugzeuggetragenen hochauflösenden E-SAR Daten ist es eher sinnvoll, die Befliegung und Aufnahme auf kleinere Starkschadgebiete zu beschränken, um wenigstens dort schnell Daten zur Verfügung zu haben. Dabei ist die Aufnahme von Kohärenzdaten zu präferieren. Leider musste auch im Projekt Sturmmon festgestellt werden, dass die im Moment zur Verfügung stehenden optischen Fernerkundungsmedien für einen schnellen Überblick über das Schadausmaß vor allem nach einem Sturm im Winter, nur eingeschränkt nutzbar sind. Sehr interessant ist in diesem Zusammenhang das geplante RapidEye System, das ab dem Jahr 2007 mit 5 baugleichen optischen Satelliten in den Weltraum startet. Dieses System soll damit die Möglichkeit besitzen, täglich von jedem Punkt der Erde eine Aufnahme zu machen. Falls Bewölkung eine Aufnahme unmöglich macht, beträgt die Wiederholrate nur 24 Stunden.

Hinsichtlich einer genauen Kartierung der Sturmflächen haben die Ergebnisse dieser Arbeit gezeigt, dass die im Moment und in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Radardaten noch keine Alternative gegenüber der Verwendung von optischen Satellitendaten oder Luftbilder sind. Die Erfassung der Sturmflächen kann flächendeckend und wesentlich genauer mit den optischen Daten (z.B. Spot 5, ev. RapidEye) durchgeführt werden.

Mit Hilfe der Verwendung von Fernerkundungsdaten im Allgemeinen, kann mit einer wesentlich schnelleren Kartierung gerechnet werden, als im Vergleich zu terrestrischen Aufnahmemethoden.

10 Zusammenfassung

Der Orkan „Lothar“ verursachte an Weihnachten 1999 sehr große Schäden innerhalb des Waldes in Baden-Württemberg, Frankreich und der Schweiz. Meteorologische Untersuchungen legen nahe, dass solche Ereignisse in Zukunft mit höherer Wahrscheinlichkeit auftreten als vor ca. 1950. Wichtigste Aufgabe der Forstbehörden nach einer großräumigen Sturmkatastrophe ist die Erfassung des Schadausmaßes und die Lokalisation der Schäden, damit die wichtigsten Maßnahmen der Sturmschadensbewältigung umgehend geplant und durchgeführt werden können.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Anwendungspotential zurzeit verfügbarer und in naher Zukunft zur Verfügung stehender Radarsysteme für die Kartierung der Sturmflächen innerhalb des Waldes.

Für die Erfassung der Sturmflächen werden zwei Untersuchungsgebiete ausgewählt, für die teilweise bereits im Jahr 2000 digitale FoGIS Daten der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Verfügung standen und die gleichzeitig hohe Sturmschäden, verursacht durch den Orkan „Lothar“, zu vermelden hatten. Während das Untersuchungsgebiet 1 mit den Forstbezirken Ettenheim, Kenzingen und Lahr ein eher bewegtes Relief aufweist, ist das Untersuchungsgebiet 2 im Rheintal in der Nähe der Stadt Offenburg sehr flach.

Untersucht werden die satellitengetragenen Systeme ERS-1 und ERS-2 und Daten des kanadischen Satelliten Radarsat 1. Für die Auswertung der ERS-1 und ERS-2 Daten stehen Kohärenzdaten von vor und kurz nach dem Sturm zur Verfügung. Bei Radarsat 1 stehen ebenfalls Datensätze von vor und nach dem Sturm zur Verfügung. Zusätzlich zu den satellitenbasierten Systemen, sind für das Untersuchungsgebiet 1 auch flugzeugbasierte X- und L-Band Daten des experimentellen E-SAR Systems des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt verfügbar. Auf Basis der E-SAR Daten wurden Daten des ab 2005 zur Verfügung stehenden Radarsatelliten TerraSAR simuliert und in die Auswertung miteinbezogen.

Ferner stehen zu den genannten Radar-Fernerkundungsdaten digitale FoGIS Daten, digitale Topographische Karten im Maßstab 1:25.000, BWI-Daten, das digitale Höhenmodell des Landesvermessungsamtes und sämtliche innerhalb des Projekts Sturmmon verwendeten Fernerkundungsdaten zur Verfügung. Die Auswertungen sämtlicher Erfassungsvarianten wird mit Hilfe eines im Gelände erstellten und unter Verwendung digitaler Luftbilder im Maßstab 1:18.000 in eine GIS-Umgebung übertragenen Referenzdatensatzes durchgeführt.

Für die Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der verfügbaren Radardaten werden visuelle, halbautomatische und automatische Interpretationsverfahren angewendet. Die automatischen Varianten werden dabei mit einem segmentbasierten Ansatz und einer anschließenden Klassifizierung durchgeführt. Für die Auswahl der für die Klassifizierung mit dem Nearest-Neighbor-Verfahren am Besten geeigneten Kanäle, wird jeweils eine schrittweise Diskriminanzanalyse durchgeführt.

Als wichtige Zusatzinformation werden die digitalen FoGIS Daten direkt in die untersuchten Erfassungsoptionen eingebunden. Dadurch können im Vorfeld Gebiete, in denen in der Regel keine Sturmschäden im Wald auftreten, wie z.B. Nicht-Waldflächen, Nichtholzbodenflächen und Bestände jünger 30 Jahre, von der Interpretation ausgeschlossen werden.

Für eine Bewertung der Ergebnisse werden diese anschließend mit den Nutzeranforderungen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg verglichen und diskutiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe von Radardaten ab einer Schadflächen von ca. 2,0 – 4,0 ha möglich ist. Kleinere Flächen von 0,5 bis 1,0 ha können teilweise mit Abstrichen an die Genauigkeit erkannt werden. Die Ausnahme hiervon bilden die Daten von Radarsat 1, mit denen keine Sturmflächen zu erfassen sind. Die Trennung von Wald und Nichtwald ist dafür in allen Fällen möglich. Generell kann festgestellt werden, dass die Erfassungsgenauigkeit mit geringer werdender geometrischer Auflösung sinkt. So sind die Genauigkeiten, die mit den E-SAR Daten erzielt werden, höher, gegenüber denen von TerraSAR. Weiter kann den Ergebnissen entnommen werden, dass die visuelle Interpretation in den meisten Fällen bessere Genauigkeiten erzielt, als die automatischen Auswerteverfahren. Die Verwendung von Kohärenzdaten bei der Auswertung kann die Interpretation der Bilddaten erheblich verbessern.

Insgesamt sind die erzielten Erfassungsgenauigkeiten im Vergleich mit der Verwendung hochauflösender optischer Satellitendaten oder Luftbilder schlechter. Keine der hier untersuchten Optionen genügt den Anforderungen der Landesforstverwaltung an einen schnellen Überblick über das Schadausmaß. Zukünftig zur Verfügung stehende satellitenbasierte Radarsysteme wie TerraSAR und Radarsat 2 sollten nochmals auf ihre Eignung zur Erfassung von Sturmflächen überprüft werden.

11 Abstract

Hurricane “Lothar” caused significant damage in forests throughout the German state of Baden-Württemberg, France and Switzerland during Christmas 1999. Meteorological investigations suggest that such events will occur more frequently in the future than in the period proceeding 1950. The most important duties for forestry authorities after a large-scale storm catastrophe is to assess the scale and location of damage, so that salvage operations can be planned and effectively applied.

This dissertation investigates the potential application of current and future radar systems for the mapping of storm damage within forests.

Storm damage was surveyed in two separate study areas, for which partly complete digital FoGIS data collected by the Baden-Württemberg Forest Administration and reports of the damage caused by hurricane “Lothar” were available. Study area 1 included the hilly region encompassing the forest districts of Ettenheim, Kenzingen and Lahr, while study area 2 in the Rhine Valley covered the flat area outside the town of Offenburg. The ERS-1 and ERS-2 satellite-borne systems were assessed during the study, together with data from the Canadian satellite Radarsat 1. Coherence data collected before and shortly after the storm were used to analyse the ERS-1 and ERS-2 data. Datasets collected by Radarsat 1 before and after the storm were also assessed. In addition to satellite data, X and L-band data from the German Aerospace Centre’s experimental air-borne E-SAR system was also available for study area 1. This data was used to simulate and assess the potential of data that will be available from the TerraSAR satellite from 2005.

In addition to the satellite and FoGIS data mentioned above, topographic maps in the scale of 1:250,000, BWI data, digital elevation models from the local land surveying authority and remote sensing data from the Sturmmon project were also made available. Evaluations of each assessment variant were transferred to a GIS environment with the help of digital aerial photographs taken over the study areas in the scale of 1:18,000.

In addition to visual interpretation, semi-automatic and automatic interpretation methods were applied in order to assess storm-damaged areas from the available radar data. The automatic variants were processed using a segment-based approach that was followed by classification. A stepwise discriminant analysis was conducted in order to select the channel most suitable for classification using the Nearest Neighbour method.

Digital FoGIS data included very important additional information that was combined directly with each of the surveying options. Thus, areas not normally damaged by storms, such as non-forest surfaces, stands with few large trees or stands younger than 30-years-old, could be immediately excluded from further interpretation.

The results were then assessed and compared with the requirements of the Baden-Württemberg Forest Administration.

The results indicate that radar data can be used successfully to survey storm damage in destroyed forest stands between 2.0 and 4.0 hectares in size. Smaller areas of between 0.5 and 1.0 hectare could also be recognised, however with reduced accuracy. Radarsat 1 data was an exception to these results, however, as this system failed to recognise any storm damage from the study areas. Each of the surveying options managed to separate forest areas from non-forest areas. It can be generally stated that data collection accuracy diminished with reduced geometric resolution. Accuracy was therefore higher with the E-SAR data than with the TerraSAR data. Furthermore, the results indicate that higher accuracy was obtained in most cases by visual interpretation than by the automatic methods. The use of coherence data during the analysis clearly improved the interpretation of the image data.

The accuracy of the assessed methods generally proved to be lower than results obtained by high-resolution optical satellites or by aerial photographs. None of the options assessed met the Forest Administration's requirements for a more rapid means of surveying the scale of storm damage. Satellite-borne radar systems, such as TerraSAT and Radarsat 2, should be examined again in the future to assess their suitability for surveying storm damaged in forests.

12 Literatur

- ADLER, P. (1995): Die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Delinierung von Waldbeständen. Diplomarbeit, Universität Freiburg.
- ALBERTZ, J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ALBERTZ, J. (1999): Methoden der Mustererkennung . In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 17, Fernerkundung und Ökosystemanalyse. Bayerische Akademie der Wissenschaften, S. 37-52.
- ASTRIUM GMBH (2002): TerraSAR – Satellite Data for Commercial Applications. Astrium-Homepage, <http://www.astrium-space.com> vom 14.01.2002.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (1999): Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, ITC. August 16-20, 1999.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): Multiresolution segmentation – an optimisation approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, XII. Beiträge zum AGIT Symposium (Strobel et al. Hrsg.). Salzburg, pp. 12-23.
- BAHNER-WÜRTH, W. (2000): Vergleich zweier digitaler Höhenmodelle vor und nach dem Sturm Lothar als Grundlage zur Erfassung von Sturmflächen im Wald. Diplomarbeit an der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg, Juli 2003, unveröffentlicht.
- BAMLER, R. & HARTL, P. (1998): Synthetic Aperture Radar Interferometry. - Inverse Problems, Vol. 14, pp. 1-54.
- BAYER T. (1990). Korrektur reliefbedingter radiometrischer Verzerrungen in geokodierten SEASAT-A SAR-Bildern am Beispiel des Szenenausschnittes Bonn und Umgebung. DLR-FB 90-54, DLR Oberpfaffenhofen.
- BEAUDOIN, A, CASTEL, T., DESHAYES, M., STACHS, N., STUSSI, N. & LE TOAN, T. (1996): Forest Biomass Retrieval over Hilly Terrain from Spaceborne SAR Data , Proceedings Symposium Toulouse, France, 10-13 October 1995, pp.131-140.
- BOSSARD, W. (Hrsg.) (1986): Flächenhafte Waldschadenserfassung mit Infrarot-Luftbildern 1:9.000. Methoden und erste Erfahrungen. In: Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Bericht Nr. 285, 76 S., Birmensdorf.
- BROSIUS, F. (2002): SPSS 11 - Handbuch. Hrsg.: mitp Verlag, Bonn, 2002. S. 679 ff, S. 709 ff

- BUWAL (2001): Sturmschadensinventur 1999. Bericht über die Ergebnisse der Sturmschadenserfahrung vom Orkan Lothar anhand von normalfarbigen Luftbildern. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft, Eidgenössische Forstdirektion. CH-2003, Bern.
- CANADIAN SPACE AGENCY (2002): Introduction to Radarsat. CSA-Homepage, http://www.space.gc.ca/csa_sectors/earth_environment/radarsat/radarsat_info/default.asp vom 14.01.2002
- CHAUHAN, N.R.; LANG, R.H. & RANSON K.J. (1991): Radar modeling of boreal forest. IEEE Trans. Geoscience of Remote Sensing, Vol. 29, pp. 627-638.
- COENRADIE, B. (1992): Waldklassifizierung und Totholzkartierung im Nationalpark Bayerischer Wald unter Verwendung von Landsat-TM- und digitalen Zusatzdaten, DLR-FB 92-10, Oberpfaffenhofen.
- CURLANDER, J.C. & MCDONOUGH, R.N. (1991): Synthetic Aperture Radar, Systems & Signal Processing. John Wiley & Sons.
- CUTRONA, L.J. (1990): Synthetic Aperture Radar. In: Skolnik, M.I. (ed.): Radar Handbook. 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- DESNOS, Y.L. & MATTEINI, V. (1993): Review on Structure Detection and Speckle Filtering on ERS-1 Images. EARSeL Advances in Remote Sensing, Vol. 2, No. 2, pp. 52-65.
- DNR (1999): Satellite-based detection of forest damage. Minnesota Department of Natural Resources, <http://www.ra.dnr.state.mn.us>.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003A): Bewertung der Orkanwetterlage am 26.12.1999 aus klimatologischer Sicht. Mitteilung des deutschen Wetterdienstes. <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/sturm/orkan_lothar.pdf>, vom: 31.03.03.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003B): http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/nkdz/fachdatenbank/daten_kollektive/klidaba/beschreibung_datenkollektive.htm
- DIEDERSHAGEN, O. (2001): Automatische Erfassung von Sturmflächen in panchromatischen Luftbildern und hochauflösenden multispektralen Satellitendaten. Diplomarbeit, Universität Freiburg. Unveröffentlicht.
- DURDEN, S.L.; VAN ZYL, J.J. & ENGMAN, T. (1989): Modelling and Observation of the Radar polarization Signature of Forested Areas. IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, Vol. 27, pp. 290-301.
- DWYER, E.; PASQUALI, P.; HOLECZ, F. & ARINO, O. (2000): Mapping Forest Damage Caused by the 1999 Lothar Storm in Jura (France), Using SAR Interferometry. Earth Observation Quarterly, Vol. 65, pp 28-29.
- ELACHI, C. (1987): Spaceborn Radar Remote Sensing: Applications and Techniques. New York, USA.

- FRITZ, R. (1991): Digitale Waldkarte und Kartierung der Sturmschäden 1990 mit Landsat-TM Daten für das Forstamt Bebenhausen. Diplomarbeit, Universität Freiburg, unveröffentlicht.
- FRITZ, R. (1999): Digitale Forstkartenerstellung und Feldgrenzenedelinierung mit Hilfe hochauflösender Satellitensysteme - zwei Anwendungsbeispiele aus der Forst- und Landwirtschaft. Dissertation, Universität Freiburg, 145 S.
- FRIEAUFF, D. & PONCÉT, F.V. (1999): ProSmart Endbericht – Teilvorhaben WALDINV (Großräumige Waldinitialinventur – Waldtypen). ProSmart Endbericht, Kapitel 6. S. 27.
- FROST, V.S.; STILES, J.A.; SHANMUGAM, K.S. & HOLTZMAN, J.C. (1982): A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-4, No. 2, pp. 157-166.
- GOLDSTEIN, R.M. & ZEBKER, H.A. (1987): Interferometric radar measurement of ocean surface currents. In: Nature, Vol. 328, pp. 707-709.
- GREGORY, R.L. (1967): Auge und Gehirn. Zur Psychologie des Sehens. Kindlers Universalbibliothek, München.
- GROSS, C.P. (1993): Regionale Waldinventur zur Erfassung des Waldzustandes mit kleinmaßstäbigen Color-Infrarot Luftbildern. Dissertation, Universität Freiburg.
- GUERRA, P.A. (2003): Application of Fusion Techniques between Radarsat and Landsat Images for Landuse Distribution at Cartagena (Colombia) using Supervised Classification. Proc. Workshop Remote Sensing of the Coastal Zone. From 5th-7th June, Ghent, Belgium.
- HABERÄCKER, P. (1995): Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Carl Hanser Verlag, München Wien.
- HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (1998): Principles and Applications of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing. Third Edition, Volume 2. John Wiley & Sons, pp.866.
- HEROLD, M.; MÜSCHEN, B.; STEINOCHER, K.; MÜLLER, A. & KLENKE, M. (2000A): Zur radiometrischen Relieffkorrektur in Fernerkundungsdaten. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, pp. 347-354.
- HEROLD, M.; HOCHSCHILD, V. & SCHMULLIUS, C. (2000B): Multifrequente und multipolarimetrische Radarfernerkundung hydrologischer Parameter der Landoberfläche. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, pp. 355-360.
- HARALICK, R.M. SHANMUGAM, K. & DINSTEN, I. (1973): Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 3 (6):610-621, November.
- HERRMANN A.; FELLAH K.; DE FRAIPONT P. & YÉSOU H. (2000): Forest damage mapping using SAR coherenceproduct in North Eastern part of France, Earth Observation Quaterly 65, 30-31.

- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- HINRICHS, A.; SCHWUNN, E. & ZINTEL, M. (1992): Geographische Informationssysteme in der Forstwirtschaft. Albert Ludwigs- Universität Freiburg. Institut für Forsteinrichtung und Forstliche Betriebswirtschaft
- HOLECZ, F. (1993): Postprocessing von SAR-Satellitenbilddaten. Remote Sensing Series, Vol. 23, Department of Geography, University of Zurich, 149 S.
- HOLECZ, F.; MEIER, E. & NUESCH, D. (1993): Postprocessing of Relief Induced Radiometric Distorted Spaceborne SAR Imagery. In: Schreier, G. (Hrsg.): SAR Geocoding: Data and Systems, Karlsruhe, pp. 299-352.
- HORLACHER, F. (1994): Das Potential von ERS-1 SAR Daten zur Identifizierung und Unterscheidung von Wald und anderen Landnutzungskategorien. Diplomarbeit an der Universität Freiburg, unveröffentlicht.
- HORLACHER, F. (1998): Biotopkartierung auf der Basis von ERS-1 und ERS-2 SAR Daten kombiniert mit optischen Fernerkundungsdaten. Dissertation, Universität Freiburg.
- HORNE, A.I.D. & ROTHNIE, B. (1984): The use of Optical SAR-580 Data for Forest and Non-woodland Tree Survey. Proc. SAR-580 Investigators Workshop. Investigators Final Report, Section 8.6(A), pp. 508-524.
- HORN, R. (1997): The DLR Airborne SAR Project E-SAR. DLR-Homepage, http://www.dlr.de/NE-HF/projects/ESAR/igars96_schreiber.html vom 27.03.2000.
- HOVANESSIAN, S.A. (1988): Introduction to Sensor Systems. Norwood, MA: Artech.
- HÜLSMEIER, CHR. (1904): Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden. DRP 165546 und DRP 169154, 1904.
- IFN (2003): Homepage Inventaire Forestier National, <http://www.ifn.fr> vom 23.12.2003
- INFOTERRA (2002A): E-SAR – Das flugzeuggetragene SAR-System des DLR. InfoTerra-Homepage, <http://www.infoterra-global.com/Prosmart1/sensoren/e-sar/e-sar.htm> vom 14.01.2002.
- INFOTERRA (2002B): InfoTerra/TerraSAR Initiative. InfoTerra-Homepage, <http://www.infoterra-global.com/terrasar.html> vom 14.01.2002.
- IVITS, E. & KOCH, B. (2002): Optimierung der Erfassung der Landschaftsdiversität auf der Basis von Satelliten- und Luftbildern: ein Europäisches Landschaftskonzept. In: IÖR Schriften, Band 40, Dresden, 2003.
- JANO, A.P. (1990): Forest Depletion Monitoring with C-Band Synthetic Aperture Radar. Proc. 3rd Forest Service Remote Sensing Applications Conference, pp. 299-306.

- JOHLIGE, A. (1998): Untersuchung zum Informationsgehalt experimenteller SIR-C/X-SAR Daten für forstliche Anwendungen am Beispiel der Testgebiete Oberpfaffenhofen und Bayerischer Wald. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- KAILATH, T. (1967): The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. GE-14.
- KEIL, M.; SCALES, D.; SCHWÄBISCH, M.; EIGEMEIER, E.; SIEGMUND, R.; KANELLOPOULOS, I. & WINTER, R. (1997): Investigation of SIR-C / X-SAR Data for Vegetation Mapping in the Harz Mountains and in the Region of Oberpfaffenhofen, Germany. Final Report.
- KEIL, M. & KNABE, S. (1999): ProSmart Endbericht – Teilvorhaben BIOMASS (Wiederaufforstung). ProSmart Endbericht Kapitel 8. S. 8-16.
- KEIL, M. & STRUNZ, G. (2004): Satelliten im Dienst der Sturmschadensbekämpfung. Im Druck.
- KELLERMANN, M. (2001): Georeferenzierung von SAR-Bildern mittels Kontrollpunkten aus digitalen Topographischen Karten. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden und DLR, unveröffentlicht.
- KLAUSING, H. & HOLPP, W. (2000): Radar mit realer und synthetischer Apertur – Konzeption und Realisierung. Oldenbourg Verlag München. 399 Seiten.
- KNIESTEDT, J. (1989): Heinrich Hertz – Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen vor 100 Jahren. Sonderdruck aus: Archiv für das Post- und Fernmeldewesen, 41. Jg., Nr.1, 1989.
- KOCH, B. & IVITS, E. (2003): Landschaftsanalyse auf neuen Wegen? Österreichische Forstzeitschrift.
- KÖNIG, A. (1995): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main.
- KREMMERS, T. (1992): Nutzung multitemporaler Landsat-TM Daten zur Erfassung von Sturmwurfeschäden. Eine GIS-basierte Auswertung am Beispiel der Kyllburger Waldeifel. Diplomarbeit, Universität Trier, unveröffentlicht.
- KREMMERS, T. (1997A): Untersuchung von multitemporalen ERS-1 und anderen Radardaten für die Inventur und Beobachtung von Waldflächen. Abschlußbericht zum DFG Projekt OE 113/3-2, an der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg, Juni 1997.
- KREMMERS, T. (1997B): Untersuchung zum Anwendungspotential multitemporaler IRS-1 und JERS-1-SAR-Daten für die Kartierung und Beobachtung von Waldflächen in Mitteleuropa. Dissertation, Universität Freiburg.

- KUAN, D.T.; SAWCHUK, A.A.; STRAND, T.C. & CHAVEL, P. (1985): Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-7, No. 2, pp. 165-177.
- KUNTZ, S. & ZIMMERMANN, C. (1993): Erfassung von Sturmschaden im nördlichen Schwarzwald mit Satellitendaten. *Allgemeine-Forst-und-Jagdzeitung*. 164: 8, 150-155 S.
- KUNTZ, S. (2000): Großräumige Erfassung von Sturmschäden in Mitteleuropa mit Satellitenfernerkundung. RSS – Remote Sensing Solutions GmbH. Workshop bei der Firma INTEND.
- LEBERL, F.W. (1990): *Radargrammetric Image Processing*. Artech House, Norwood, 595 p.
- LECKIE, D.G. & YATABE, S.M. (1994): Discriminating Forest Cuts with ERS-1 Radar Imagery. *Proc. European Symposium on Satellite Remote Sensing*. Vol. 2314, pp. 415-428.
- LEE, J.S. (1981A): Refined Filtering for Image Noise using Local Statistics. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, No. 15, pp. 380-389.
- LEE, J.S. (1981B): Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, No. 17, pp. 24-32.
- LEE, J.S. (1983A): A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-13(1), pp. 85-89.
- LEE, J.S. (1983B): Digital Image Smoothing and the SIGMA Filter. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, No. 24, pp. 255-269.
- LEE, J.S. (1986): Speckle Supression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images. *Optical Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 636-643.
- LI, F.K. & GOLDSTEIN, R.M. (1990): Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 88-96.
- LILLESAND, T. & KIEFER, R. (2000): *Remote Sensing and Image Interpretation* (4. Edition). John Wiley, New York.
- LOPES, A.; TOUZI, R. & NEZRY, E. (1990A): Adaptive Speckel Filters and Scene Heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 6, pp. 992-1000.
- LOPES, A.; NEZRY, E.; TOUZI, R. & LAUR, H. (1990B): Maximum a Posteriori Speckel Filtering and First Order Texture Models in SAR Images. *Proceedings of IGARSS'1990*, New York, 20.-24. May, Vol. 3, pp. 2409-2412.
- LOPES, A.; NEZRY, E.; TOUZI, R. & LAUR, H. (1993): Structure Detection and Statistical Adaptive Filtering in SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 9, pp. 1735-1758.

- MADSEN, S.N.; ZEBKER, H.A. & MARTIN, J.M. (1993): Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 1, pp 246-256.
- MADSEN, S.N.; MARTIN, J.M & ZEBKER, H.A. (1995): Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TOPSAR Across-track interferometric SAR System. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No. 2, pp 383-391.
- MADSEN, S.N. (1995): On Absolute Phase Determination Techniques. In SARinterferometry, SPIE Conference on Radar Sensor Technology, SPIE-2487, pp. 393-401, April 1995.
- MAIRE C. (2002): Evaluation de l'apport de données optique et radar de Très Haute Résolution (THR) pour la cartographie de dégâts de tempête en milieu forestier, Bull XYZ n° 93, 28-35.
- MAIRE, C. & YÉSOU, H. (2003): Storm Forest Damage Mapping Based on VHR InSAR Data. Proceedings of Fringe, 2003. ESA, ESRIN, Italy, 01.-05. December.
- MARS (2004): Aus Internet: http://mars.jrc.it/marspac/olivine/olive_gis_in_italy.htm.
- MCDONALD, K.C. & ULABY, F.T. (1993): Radar modelling of discontinuous tree canopies. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 28, pp. 477-491.
- MURTHA, P.A. (1998): Monitoring riparian leave strips in forest clearcuts with multi-temporal RADARSAT Fine 2 mode image data. Proc. Final ADRO Symp. Canadian Space Agency, St. Hubert, PQ, 10 p.
- MURTHA, P.A. (2000): Monitoring cutblocks, riparian strips and windthrow on northern Vancouver Island with RADARSAT F2 data. BC RADARSAT Workshop, Victoria, B.C.
- NELSON, B.W.; KAPOS, V. & ADAMS, J. B. (1994): Forest disturbances by large blowdowns in the Brazilian Amazon. Ecology, Vol. 75, No. 3, pp. 853-858.
- NEUBERT, M. & MEINEL, G. (2002): Fortführung von Geobasisdaten durch die segmentbasierte Auswertung von IKONOS-Daten – erste Ergebnisse. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.) (2002): Angewandte Geographische Information-verarbeitung XIV – Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- NEZRY, E.; LOPES, A. & TOUZI, R. (1991): Detection of Structural and Textural Features for SAR Images Filtering. Proceedings of IGARSS 1991, Espoo, Finland, June 3-6, Vol. 4, pp. 2169-2172.
- NIEHAUS, G. (1986): Zur Verbreitung der Kiefern-Chlorosen im niedersächsischen Tiefland. Vorläufige Mitteilungen von Luftbildauswertungsergebnissen. Der Forst- und Holzwirt 41, Seite 435-438.
- OESTER, B. (1987): Waldschadenskartierung anhand von Infrarot-Luftbildern 1:9.000. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 138, Seite 787-798.

- PAUDYAL, D.R. & ASCHENBACHER, J. (1993): Evaluation and Performance Tests of Selected SAR Speckle Filters. Proc. Int. Symp. "Operationalization of Remote Sensing". 19th-23rd April 1993, ITC Enschede, Netherland.
- RÄHLMANN, H. (1991): Visuelle Interpretation von Landsat-TM Daten am Beispiel des Schönbuchs der Forstdirektion Tübingen, Diplomarbeit, Universität Freiburg, unveröffentlicht.
- RAMMINGER, G. (2000): Visuelle Erfassung von Sturmflächen mit den hochauflösenden Satelliten IRS-1C und IKONOS unter Einbeziehung eines Forstlichen Geographischen Informationssystems. Diplomarbeit, Universität Freiburg.
- RAMMINGER, G.; DEES, M.; SAIDANI, N.; FRIEDLAENDER, H.; HERRERA, B.; KAHABKA, H. & KOCH, B. (2004): Konzepte für die Erfassung von Sturmschäden mit Fernerkundung und für die GIS basierte Risikoanalyse. Schlussbericht zum Projekt Sturmmon – Erfassung von Sturmschäden mit Fernerkundung, unveröffentlicht.
- RICHARDS, J.A.; SUN, G. & SIMONETT, D.S. (1987): L-band radar backscatter modeling of forest stands. IEEE Trans. Geoscience of Remote Sensing, Vol. 25, pp. 487-498.
- RICHARDS, J.A. & JIA, X. (1999): Remote Sensing Digital Image Analysis – An Introduction. 3rd Edition, Springer Verlag, 363 S.
- RIEDEL, T. & SCHMULLIUS, C.C. (2003): Potential of future TerraSAR data for crop recognition in agricultural areas. In Dech et al. (Hrsg.): Tagungsband 20. DFD-Nutzerseminar, 6.-8. Oktober.
- RODRIGUES, E. & MARTIN, J.M. (1992): Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars. IEEE Proceedings-F, Vol. 139, pp. 147-159.
- SAIDANI, N. (2004): Erkennung von Sturmschäden im Wald auf der Basis kleinmaßstäbiger Luftbilder und Entwicklung eines Modells zur Abschätzung der Sturmgefährdung der Wälder auf Basis von räumlichen Daten. Dissertation an der universität Freiburg.
- SCHÄTTLER, B. (1992): Die Verarbeitung von synthetischen Aperturradardaten zu hochaufgelösten Bildern der Erdoberfläche am Beispiel des ERS-1. In: DLR, DFD Februar 1992, 1-73.
- SCHERRER, H.U.; GAUTSCHI, H. & HAUENSTEIN, P. (1990): Flächendeckende Waldzustandserfassung mit Infrarot-Luftbildern. Bericht der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Nr. 318, Birmensdorf, 101 Seiten.
- SCHERRER, H.U. (1993): Projekt zur flächenhaften Erfassung und Auswertung von Sturmschaden. AFZ-Allgemeine-Forst-Zeitschrift. Vol. 48: 14, 712-714.

- SCHERRER, H.U.; SCHMIDTKE, H. & OESTER, B. (1994): Folgeaufnahmen Erfassung von Veränderungen des Waldzustandes mit Luftbildern. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) Nr.338.
- SCHERRER, H.U. (2000): Anleitung zur Erfassung von Sturmschäden im Wald anhand von Farbluftbildern im Maßstab 1:15.000. Interpretationskurs, Scherrer Ingenieurbüro AG.
- SCHMIDTKE, H. & SCHERRER, H.U. (1997): Sturmschäden im Wald: Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP 31. Zürich: vdf, Hochschulverlag an der ETH, 1997. 38 S., graph. Darstellung, Kt.; (dt.)(Schlussbericht NFP 31).
- SCHREIER, W. (1995): Die Entstehung der Funktechnik. München: Deutsches Museum, 1995.
- SHI, Z. & FUNG, K.B. (1994): A Comparison of Digital Speckle Filters. Proc. IGARSS '94, Aug. 8-12.
- SIEDE, W. (1991): Einsatz eines Forstlichen Informationssystems – Kartierung und Auswertung von Sturmschäden. AFZ Nr. 3, 1991. S. 126 – 129.
- STEINMEIER, C.; SCHWARZ, M.; HOLECZ, F.; STEBLER, O. & WAGNER, S. (2002): Evaluation moderner Fernerkundungsmethoden zur Sturmschadenerkennung im Wald. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 194 S.
- STROZZI, T.; DAMMERT, P.B.G.; WEGMÜLLER, U.; MARTINEZ, J.M.; ASKNE, J.I.H.; BEAUDOIN, A. & HALLIKAINEN, M. (2000): Landuse Mapping with ERS SAR Interferometry. IEEE Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 2, pp. 766-775.
- SUN, G. & SIMONETT, D.S. (1988): A composite L-Band HH radar backscatter model for coniferous forest stands. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 54, pp. 1195-1201.
- SUN, G.; SIMONETT, D.S. & STRAHLER, A.H. (1991): Radar modelling of discontinuous forest canopies. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 29, pp. 639-650.
- SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. (Eds) (1978): Remote Sensing – The Quantitative Approach. New York, McGraw-Hill.
- SYLVANDER, R. (1983): Lokalisering av stormfälld skog med satellitbild. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift. 81:2, pp 43-57.
- TRAGL, K. (1990): Polarimetrische Radarbeobachtung von zeitveränderlichen Zufallszielen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, DLR-FB 90 – 52.
- TRENKLE, F. (1986): DIE deutschen Funkmessverfahren bis 1945. Heidelberg, Hüthig-Verlag.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K. & FUNG, A.K. (1981, 1982, 1986): Microwave Remote Sensing – Active and Passive. Band I – III. Norwood, Ma: Artech House.

- ULABY, F.T.; SARABANDI, K.; MCDONALD, K.C.; WHITT, M. & DOBSON, M.C. (1990): Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS). *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, pp. 1223-1253.
- UN/ECE (2000): Timber Committee Storm Damage Overview Geneva 18 April.
- VAN ZYL, J.J.; PAPAS, C.H. & ELACHI, C. (1987A): On the optimum polarizations of incoherently reflected waves, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. AP-35, no. 7, pp. 818-825.
- VAN ZYL, J.J.; ZEBKER, H.A. & ELACHI, C. (1987B): Imaging radar polarization signatures: Theory and observation, *Radio Science*, vol. 22, no. 4, pp. 529-543.
- VON TEUFFEL, K. & KREBS, M. (1996): Geoinformationssysteme als Instrumente der forstlichen Betriebsführung. *AFZ/Der Wald*, 51. Jahrgang, Heft 10, S. 532 – 535.
- VON WEIHER, S. (1979): Vorläufer der Radar-Ortung, *Christian Hülsmeyers Telemobiloskop*. Band 32, Heft 4, S. 242-244.
- WALESSA, M. (1999): Texture Preserving Despeckling of SAR Images Using GMRFs. *Proceedings IGARSS'1999*, Hamburg, 28 June – 2 July, pp. 1552-1554.
- WEGMÜLLER, U. & WERNER, CHL. (1995): SAR interferometric signatures of forest. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, No. 5, pp. 1153-1161.
- WEGMÜLLER, U. & WERNER, CHL. (1997): Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry, *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1, pp. 18-24.
- WIECZOREK, J. (1990): Erfassung von Sturmwurfschäden im östlichen Hunsrück mit Hilfe von Landsat-TM-Daten. Eine Landschaftsökologische Analyse für die forstliche Praxis, DLR-FB 90-31, Oberpfaffenhofen.
- WIESBECK, W.(HRSGB.) (1988): Heinrich-Hertz-Symposium „100 Jahre elektromagnetische Wellen“. Berlin: vde-Verlag.
- WIESMANN, A.; RIBBES, F.; HONIKEL, M.; YESOU, H.; DEMARGNE, L. & WEGMÜLLER, U. (2000): Forest storm damage assessment with ERS tandem data. *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium*. Gothenburg, Sweden, 16th-20th Oct.
- WIESMANN, A.; WEGMÜLLER, U.; HONIKEL, M.; STROZZI, T. & WERNER, CH. L. (2001): Potential and methodology of satellite based SAR for hazard mapping. *Proceedings of IGARSS 2001*, Sydney, Australia, 9.-13. July.
- YESOU, H.; WEBER, S.; HERRMANN, A.; FELLAH, K.; BALLY, PH.; BEQUIGNON, J. & DEFRAPOINT, P. (2000): Mapping storm forest damage using SAR coherence data. The case of the Haguenau Forest - France. *ERS-ENVISAT Symposium*. Gothenburg.
- YESOU, H.; CLANDILLON, S.; MEYER, C.; ALLENBACH, B.; MAIRE, C. & DE FRAIPONT, P. (2002): Operational Mapping of Storm Forest Damage and Assessment of Future VHR SAR

and Optical Sensors. 22nd EARSeL Symposium and general Assembly. “Geoinformation for European – wide integration”. 4th to 6th June, Prague, Czech Republic.

ZEBKER, H.A. & GOLDSTEIN, R.M. (1986): Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 9, pp. 4993-4999.

ZEBKER, H.A.; VAN ZYL, J.J. & HELD, D.N. (1987): Imaging radar polarimetry from wave synthesis, *J. Geophys. Res.*, vol. 92, pp. 683- 701.

Anhang

Anhang A: Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit E-SAR Daten

Tabelle A.1: Ergebnisse, Visuelle Interpretation Variante 6, E-SAR Daten

| Variante 6 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 74,0 | 77,8 | 74,7 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 74,9 | 85,7 | 68,4 | 77,8 |
| Fläche \geq 1 ha | 75,0 | 88,9 | 62,5 | 62,2 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 73,8 | 73,5 | 58,7 | 44,8 |

Anhang B: Visuelle Erfassung der Sturmflächen mit TerraSAR Daten

Tabelle B.1: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 2 TerraSAR Daten

| Variante 2 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 80,9 | 100,0 | 50,6 | 44,4 |
| Fläche \geq 2 ha | 79,1 | 100,0 | 46,0 | 33,3 |
| Fläche \geq 1 ha | 76,0 | 80,0 | 43,3 | 33,3 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 75,2 | 75,0 | 41,5 | 29,8 |

Tabelle B.2: Ergebnisse Visuelle Interpretation, Variante 4 TerraSAR Daten

| Variante 4 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 83,3 | 100,0 | 50,3 | 37,5 |
| Fläche \geq 2 ha | 82,3 | 100,0 | 46,5 | 33,3 |
| Fläche \geq 1 ha | 81,5 | 100,0 | 43,4 | 32,4 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 81,0 | 93,3 | 41,4 | 25,9 |

Anhang C: Automatische Erfassung der Sturmflächen mit E-SAR Daten

Tabelle C.1: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 2 E-SAR

| Variante 2 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 89,1 | 100,0 | 35,1 | 77,8 |
| Fläche \geq 2 ha | 86,0 | 100,0 | 31,5 | 50,0 |
| Fläche \geq 1 ha | 68,1 | 46,2 | 28,1 | 30,6 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 54,6 | 33,3 | 26,3 | 21,1 |

Tabelle C.2: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 4 E-SAR

| Variante 4 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 70,4 | 100,0 | 47,9 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 65,2 | 94,1 | 43,9 | 61,1 |
| Fläche \geq 1 ha | 55,2 | 59,0 | 38,9 | 37,8 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 51,2 | 50,0 | 37,2 | 37,9 |

Tabelle C.3: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 6 E-SAR

| Variante 6 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 78,8 | 100,0 | 47,9 | 66,7 |
| Fläche \geq 2 ha | 70,7 | 69,2 | 42,9 | 50,0 |
| Fläche \geq 1 ha | 63,8 | 63,3 | 38,5 | 30,6 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 60,7 | 51,2 | 36,4 | 24,6 |

Ergebniskanäle der Diskriminanzanalyse (Tabelle C.4) bei der Variante 7 und 8 der automatischen Erfassung der Sturmflächen mit Hilfe der E-SAR Daten.

Tabelle C.4: Ergebnisse der Schrittweisen Diskriminanzanalyse (Variante 7 und 8)

| Kanalbezeichnung | F-Wert für Ausschluss | Wilk's Lambda |
|---|-----------------------|---------------|
| Ratio aus E-SAR $((L-HH+L-VV)/(L-HV))*100$, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 51,95 | 0,877 |
| Angular 2 nd Moment (aus GLCM) für E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 64,85 | 0,882 |
| Standardabweichung für E-SAR (X-HH*X-VV), nicht beleuchtungskorrigiert, nicht gefiltert | 53,63 | 0,878 |
| Ratio aus E-SAR $(L-HV)/(L-HH))*100$, nicht beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 29,52 | 0,868 |
| Correlation (aus GLCM) für E-SAR X-HH, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 22,98 | 0,865 |
| Contrast (aus GLCM) für E-SAR L-HH, nicht beleuchtungskorrigiert | 18,41 | 0,863 |
| Mittelwert aus E-SAR X-VV, beleuchtungskorrigiert, gefiltert | 10,97 | 0,86 |

Tabelle C.5: Segmentierungsparameter in eCognition[®] Variante 5 und 6

| Bilddaten, Thematik-Layer für die Segmentierung | Gewichtung bei der Segmentierung |
|---|----------------------------------|
| E- SAR L-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-HV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-HH nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR X-VV nicht beleuchtungskorrigiert | 0.5 |
| E- SAR L-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR L-HV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR L-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-HH beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| E- SAR X-VV beleuchtungskorrigiert | 1.0 |
| GIS-Datensatz mit Trennung von Wald- und Nichtwaldflächen, Ausmaskierung der Bestände jünger 30 | Verwendet |
| Parameter für die Segmentierung | Wert |
| Scale Parameter | 120 |
| Criterion | Color: 0,8 |
| | Shape: 0,2 |
| Shape | Smoothness: 0,5 |
| | Compactness: 0,5 |
| Anzahl der Objekte | 3338 |

In Abbildung C.1 ist das Klassifizierungsschema für die Variante 7 dargestellt.

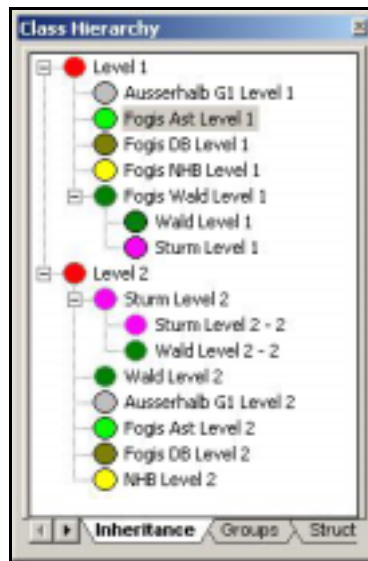


Abbildung C.1: Klassifizierungsschema für die Varianten 7 und 8, E-SAR

Tabelle C.6: Ergebnisse Automatische Klassifikation, Variante 8 E-SAR

| Variante 8 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 85,5 | 100,0 | 58,0 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 74,9 | 78,9 | 53,6 | 72,2 |
| Fläche \geq 1 ha | 71,0 | 73,3 | 48,6 | 51,4 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 69,3 | 70,0 | 46,5 | 41,4 |

Tabelle C.7: Ergebnisse Automatische Klassifizierung, Variante 10 E-SAR

| Variante 10 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 86,9 | 100,0 | 54,0 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 84,6 | 100,0 | 49,0 | 66,7 |
| Fläche \geq 1 ha | 80,2 | 90,0 | 43,9 | 45,9 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 74,2 | 65,1 | 42,0 | 41,4 |

Anhang D: Halbautomatische Erfassung der Sturmflächen mit ERS-1/ERS-2

Tabelle D.1: Ergebnisse ERS-1/2 Kohärenzdaten für die Variante 2

| Variante 2 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 58,9 | 100,0 | 34,2 | 88,2 |
| Fläche \geq 2 ha | 57,2 | 100,0 | 33,1 | 81,0 |
| Fläche \geq 1 ha | 55,4 | 86,2 | 29,6 | 55,6 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 52,3 | 66,7 | 28,3 | 44,6 |

Anhang E: Automatische Erfassung der Sturmflächen mit TerraSAR Daten

Tabelle E.1: Ergebnisse Automatische Klassifikation, Variante 2 TerraSAR

| Variante 2 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 83,7 | 100,0 | 31,5 | 88,9 |
| Fläche \geq 2 ha | 60,3 | 80,0 | 29,0 | 83,3 |
| Fläche \geq 1 ha | 44,6 | 55,8 | 27,0 | 72,2 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 37,7 | 47,2 | 25,4 | 52,6 |

Tabelle E.2: Ergebnisse Automatische Klassifikation, Variante 4 TerraSAR

| Variante 4 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 89,3 | 100,0 | 35,7 | 87,5 |
| Fläche \geq 2 ha | 78,7 | 83,3 | 33,7 | 55,6 |
| Fläche \geq 1 ha | 69,2 | 65,2 | 29,9 | 35,1 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 63,6 | 52,6 | 28,1 | 27,6 |

Tabelle E.3: Ergebnisse Automatische Klassifikation, Variante 6 TerraSAR

| Variante 6 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|--|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 84,8 | 100,0 | 35,9 | 44,4 |
| Fläche \geq 2 ha | 83,3 | 100,0 | 32,0 | 27,8 |
| Fläche \geq 1 ha | 71,5 | 68,8 | 29,3 | 25,0 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 66,8 | 65,5 | 27,6 | 28,1 |

Tabelle E.4: Ergebnisse Automatische Klassifikation, Variante 8 TerraSAR

| Variante 8 | Nutzergenauigkeit | | Herstellergenauigkeit | |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | Fläche [%] | Anzahl [%] | Fläche [%] | Anzahl [%] |
| Fläche \geq 4ha | 79,8 | 100,0 | 54,6 | 100,0 |
| Fläche \geq 2 ha | 74,6 | 92,9 | 51,0 | 72,2 |
| Fläche \geq 1 ha | 70,3 | 78,3 | 45,6 | 54,1 |
| Fläche \geq 0,5 ha | 64,6 | 62,2 | 43,4 | 44,8 |