

Institut für Pflanzenbau
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau
Direktor: Prof. Dr. W. Kühbauch

**Zustandserfassung
von Wintergetreide und Zuckerrüben
während des Wachstums mit Hilfe
des C-Band Radars der ERS-1
und ERS-2 Satelliten**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)
der
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt am 02.06.2000
von
Dipl.-Ing. agr. Maria Hamacher
aus Inden

Referent: Prof. Dr. W. Kühbauch

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. P. Schulze Lammers

Tag der mündlichen Prüfung: 20.10.2000

D 98

Zustandserfassung von Wintergetreide und Zuckerrüben während des Wachstums mit Hilfe des C-Band Radars der ERS-1 und ERS-2 Satelliten

Ein wesentliches Ziel der Fernerkundung in der Landwirtschaft ist die Inventur der Bodennutzung. Optische Sensoren lieferten bereits gute Ergebnisse der Klassifizierung und der Abschätzung der Pflanzenvitalität über den Vegetationsindex NDVI. Sie sind jedoch vom Tageslicht und dem Bewölkungsgrad abhängig. Demgegenüber sind Radarsensoren weitgehend witterungsunabhängig und auch in der Nacht einsetzbar.

In dieser Arbeit wurde die Eignung von Radarszenen der ERS-Satelliten in Kombination mit einem Geoinformationssystem zur Unterscheidung sowie zur Zustandserfassung von Fruchtarten untersucht. Die Aufnahmen entstanden in C-Band (5,3 GHz) mit VV-Polarisation. Der Einfallswinkel der Radarstrahlen betrug 23°, die räumliche Auflösung der Bilder 5m * 25m. Aufnahmen des Testgebietes standen im Abstand von 35 Tagen, in der Hauptvegetationszeit von 17,5 Tagen zur Verfügung. Zeitgleich zu den Überflügen wurden Getreide- und Zuckerrübenbestände beprobt.

Aufgrund der Stabilität und Genauigkeit des ERS-SAR-Instrumentes konnten temporale Signaturen verschiedener Fruchtarten ermittelt und verglichen werden. Jede Fruchtart wies ein eigenes temporales Rückstreuprofil auf. Dies ermöglicht die Auswahl der SAR-Aufnahmen zu den Zeiten im Jahr, an denen die Trennung der Fruchtarten am besten gelingt. Es zeigte sich, daß die beste Trennung von Wintergetreide von Ende Mai bis Anfang Juli möglich ist. Zuckerrüben lassen sich von Getreide im Mai und im August unterscheiden. Hierbei ist Voraussetzung, daß die Fruchtartenzusammensetzung in dem vorliegenden Testgebiet bekannt ist.

Das C-Band mit VV-Polarisation erwies sich für die Beobachtung von Getreidearten als sehr gut geeignet; sowohl bei ihrer Erkennung als auch zur Beschreibung ihres Zustandes. Für Zuckerrüben ist es jedoch nicht möglich, anhand der Radarrückstreuwerte einen Rückschluß auf den Zustand des Zuckerrübenbestands zu ziehen.

Die Radarrückstreuprofile von Wintergetreide ließen eine Beobachtung über den Verlauf des Wachstums zu. Es war erkennbar, daß die Radarrückstreuung während des Bestockens und Schossens abnahm, zum Zeitpunkt des Ährenschiebens bzw. der Blüte ein Minimum erreichte und danach wieder anstieg. Ein absolutes Reflexionsminimum konnte jedoch nur bei Wintergerste bestimmt werden.

Die Gegenüberstellung von Radarrückstreuwerten und Kenngrößen der Pflanzenbestände aller Meßjahre ergab, daß insbesondere die Pflanzenhöhe, die Frisch- und Trockenmasse sowie die Wassermenge einen engen Zusammenhang mit den Radarrückstreuwerten bis zum Ährenschieben aufwiesen. Nach dem Ährenschieben wird die Rückstreuung von mehreren Faktoren beeinflußt. Ein eindeutiger Zusammenhang mit einem einzelnen Pflanzenparameter läßt sich nicht mehr erkennen.

Monitoring growth and development of winter cereals and sugar beet with the satellites ERS-1 and ERS-2 using C-band radar

The primary aim of remote sensing in agriculture is to determine landuse inventories of arable regions. Optical sensors have been successful in classification and monitoring the vitality of plants using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). However they are sensitive to clouds, weather conditions and dependent on daylight. The main advantage of radar systems in comparison to optical sensors is the capability to acquire images of the earth's surface independent of daytime and cloud cover.

Multitemporal radar backscatter characteristics of crops were analyzed for an agricultural area located in the western part of Germany using ERS-1 and ERS-2 SAR imagery from 1996 until 1998. From the calibrated data, SAR temporal backscatter profiles were generated for winter wheat, winter barley, winter rye and sugar beet. The SAR imageries have been ordered every 35 days, during the main vegetation period every 17,5 days.

One of the main results is that each crop has its own distinctive backscatter profile. Therefore it is possible to identify different crops at optimum acquisition dates. The best time period to distinguish between winter barley, winter wheat and winter rye is from the end of may until the beginning of july. Sugar beet can be distinguished from winter cereal in may and august.

C- band radar with VV-polarisation is suitable to monitor the growth of winter cereals. However it is impossible for sugar beet.

The backscatter profiles of winter cereals showed a clear decline during tillering and shooting and reached a minimum at the stages ear emergence and flowering respectively. This minimum was followed by an increase at the time of grain filling and ripening.

Until ear emergence the crop parameters plant height, fresh biomass, dry matter and water content were highly correlated with radar backscatter. Thereafter no correlations between these parameters and the backscatter could be found.

A Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Physikalische Grundlagen der Radarfernerkundung.....	3
2.1.1	Fernerkundungssysteme.....	3
2.1.2	Einflußgrößen des Sensors auf die Radarrückstreuung.....	4
2.1.2.1	Frequenz.....	4
2.1.2.2	Polarisation	5
2.1.2.3	Einfallswinkel.....	5
2.2	Wechselwirkung zwischen Radarstrahlen und natürlichen Oberflächen.....	6
2.2.1	Radarrückstreuwert σ°	6
2.2.2	Oberflächenrauigkeit	7
2.2.3	Dielektrizitätskonstante	9
2.2.4	Volumenstreuung	9
2.3	Temporäre Störgrößen der multitemporalen Signaturanalyse	9
2.3.1	Witterung.....	10
2.3.2	Reihenrichtung.....	11
2.3.3	Bodenfeuchte	12
2.3.4	Bodenrauigkeit	13
2.4	Temporale Signaturanalyse	14
2.4.1	Fruchtartenerkennung	14
2.4.2	Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen anhand multitemporaler Satellitenaufnahmen	17
2.4.2.1	Zuckerrüben	18
2.4.2.2	Wintergetreide.....	19
2.5	Geographische Informationssysteme (GIS)	22
2.5.1	Datenformat	22
2.5.2	GIS und Fernerkundung.....	23
3	Problemstellung	25

4	Material und Methoden	26
4.1	ERS-1/ -2 (European Remote Sensing Satellite)	26
4.2	Standort und Witterung	28
4.3	Felderhebungen	30
4.3.1	Testgebiet und Testfelder	30
4.3.2	Probenahme (Ground Truth).....	31
4.3.2.1	Wintergetreide.....	32
4.3.2.2	Zuckerrüben	34
4.3.3	Besonderheiten der Ground Truth in den einzelnen Versuchsjahren.....	35
4.3.3.1	Ground Truth 1996.....	35
4.3.3.2	Ground Truth 1997	35
4.3.4.3	Ground Truth 1998.....	36
4.4	Datenverarbeitung.....	37
4.4.1	Satellitendaten	37
4.4.2	Kartenmaterial.....	39
4.5.3	Weitere Informationsquellen	41
5	Ergebnisse und Diskussion.....	42
5.1	Entwicklung der Pflanzenbeständen	42
5.1.1	Zuckerrüben	42
5.1.2	Winterweizen.....	43
5.1.3	Wintergerste.....	45
5.1.4	Winterroggen	47
5.1.5	Wachstumsstadien der Wintergetreidearten	49
5.2	Datenverknüpfung von GIS und Radardaten	50
5.3	Beschreibung von Pflanzenbeständen anhand multitemporaler Satellitenaufnahmen	54
5.3.1	Zustandsbeschreibung von Zuckerrüben	54
5.3.2	Wachstumsstadien von Wintergetreide	56
5.3.3	Anwendungsmöglichkeit der Klassifikation	64
5.3.4	Zustandsbeschreibung von Wintergetreide.....	66
5.3.4.1	Entwicklungsphase bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens	66
5.3.4.2	Entwicklungsphase nach dem Zeitpunkt des Ährenschiebens.....	71

5.4	Möglichkeiten der Ernteabschätzung	73
5.5	Abschätzung der Biomasse	76
6	Zusammenfassung.....	77
7	Literaturverzeichnis	79
8	Anhang.....	89

B Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Abhängigkeit der Graustufen eines Radarbildes von Hangneigung und Hangorientierung in bezug auf die Beleuchtung (KRONBERG, 1985).....	6
Abb. 2.2:	Modelldarstellung der Reflexions- bzw. Streuprozesse an Oberflächen unterschiedlicher Rauheit, für X-Band-Radar ($\lambda = 3$ cm) (SABINS, 1978).....	8
Abb. 2.3:	Radarrückstreuprofile (ERS-1) von 10 Winterweizenfeldern (a) und 10 Zuckerrübenfeldern (b) mit Standardabweichung in den Niederlanden 1993 (BORGEAUD et al., 1995).....	15
Abb. 4.1:	Aufbau des ERS-Satelliten (ESA BR-36, 1989).....	27
Abb. 4.2:	Lage und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes Weilerswist (Topographische Karte Euskirchen, 1: 50000).....	30
Abb. 4.3:	Flußdiagramm der Datenverarbeitung	38
Abb. 5.1:	Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmasse sowie der Wassermenge von Zuckerrübenblättern im Jahr 1996	42
Abb. 5.2:	Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Winterweizen in den Versuchsjahren 1996 - 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8)	44
Abb. 5.3:	Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Wintergerste in den Versuchsjahren 1996 - 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8)	46
Abb. 5.4:	Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Winterroggen in den Versuchsjahren 1996 - 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8) ...	48
Abb. 5.5:	Dreifarbenkomposit dreier ERS-2-Intensitätsbilder; blau: 8. Mai 1997, grün: 12. Juni 1997, rot: 17. Juli 1997. Überlagert mit GIS-Vektoren: ATKIS-Daten (grün: Verkehrswege; blau: Gewässer; rosa: Siedlung) sowie der Flächennutzung (gelb: Schlaggrenzen)	50
Abb. 5.6:	Dreifarbenkomposit dreier ERS-Intensitätsbilder; blau: 22.05.96, rot: 26.06.96, grün: 01.08.96 mit den Testfeldern (Umrandung: rot: Wintergerste; blau: Winterweizen; gelb: Winterroggen; grün: Zuckerrüben) sowie exemplarisch die Grauwerte der Intensitäten der einzelnen Fruchtarten zu den jeweiligen Terminen.....	52
Abb. 5.7:	Verlaufskurven der mittleren Radarrückstreuwerte der Zuckerrübenfelder im Jahr 1996 im Testgebiet Weilerswist.....	54
Abb. 5.8:	Verlauf der mittleren Radarrückstreuung der Getreidearten in den Jahren 1996-1998 mit Standardabweichung sowie von Zuckerrüben in 1996.....	60
Abb. 5.9:	Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste in den Versuchsjahren 1996 - 1998 (mit EC-Stadien)	61

Abb. 5.10: Idealierte Radarrückstreu­kurve von Wintergetreide innerhalb eines Jahres sowie Erklärungsansätze in der Literatur.....	63
Abb. 5.11: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trocken­masse von Winterweizen in den drei Meßjahren 1996 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens.....	68
Abb. 5.12: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Frischmasse von Winterweizen in den drei Meßjahren 1996 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens.....	69
Abb. 5.13: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trocken­masse von Winterroggen im Jahr 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens	70
Abb. 5.14: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trocken­masse von Wintergerste in den Jahren 1997 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens.....	70
Abb. 5.15: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Ährentrocken­masse von Winterweizen in den Jahren 1996 - 1998	72
Abb. 5.16: Trockenmasseentwicklung eines Winterweizenbestandes in der Vegetationsperiode 1997 im Testgebiet Weilerswist anhand verschiedener Ermittlungsverfahren	75
Abb. 5.17: Schätzung der Trockenmasse von Winterweizen bis zum Ähren­schieben in den drei Versuchsjahren im Testgebiet Weilerswist	76

C Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Mikrowellen-Bandbereiche (nach ULABY et al., 1981)	4
Tab. 2.2:	Literaturübersicht der Zeitfenster zur Trennung verschiedener Fruchtarten	17
Tab. 4.1:	Technische Daten des ERS-1 / ERS-2 (ESA BR-36, 1989).....	27
Tab. 4.2:	Standortbeschreibung des Testgebietes „Weilerswist“	28
Tab. 4.3:	Übersicht der Testfelder in allen drei Versuchsjahren.....	31
Tab. 4.4:	Übersicht der erhobenen Pflanzen- und Bodenparameter in den Versuchsjahren	32
Tab. 4.5:	Überflugtermine des ERS-1/ -2	39
Tab. 4.6:	Übersicht der optischen Szenen aller Versuchsjahre.....	41
Tab. 5.1:	Wachstumsstadien der Wintergetreidearten in den drei Versuchs- jahren	49
Tab. 5.2:	Bestimmtheitsmaße (r^2) zwischen den Rückstreuwerten und den einzelnen Bestandesparametern der Wintergetreidearten bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens in den Jahren 1996 - 1998	66

D Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

abg.	abgeerntet
Abb.	Abbildung
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BFI	Blattflächenindex
bzw.	beziehungsweise
cos	Cosinus
dB	Dezibel
DGK	Deutsche Grundkarte
d.h.	das heißt
DLM	Digitales Landschaftsmodell
dt	Dezitonne
EC	evaluation code, dezimaler Code für das Entwicklungsstadium von Getreide
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
et al.	und andere (et alii)
evtl.	eventuell
GHz	Gigahertz
GIS	Geoinformationssystem
h	horizontal polarisierter Sende- oder Empfangsmodus
ha	Hektar
Ka	Kartoffeln
k.A.	keine Angaben
Kap.	Kapitel
log	Logarithmus
MHz	Megahertz
n	Stichprobenumfang
n.b.	nicht bonitiert
NDVI	Normalized Vegetation Index
NN	Normal Null
r	Korrelationskoeffizient
r ²	Bestimmtheitsmaß von Regressionsgleichungen
SAR	Synthetic Aperture Radar
SB	Sonnenblumen
SLC	Single-Look-Complex
sog.	sogenannt
Tab.	Tabelle
V	vertikal polarisierter Sende- oder Empfangsmodus
vgl.	vergleiche
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
ZR	Zuckerrüben

1 Einleitung

Fernerkundung ist definiert als die Erfassung oder die Aufnahme von Objekten aus der Entfernung, ohne direkten Kontakt des Aufnahmesystems, des sog. Sensors, mit dem zu erkundenden Objekt. Die Übertragung der Information zum Sensor erfolgt durch elektromagnetische Strahlung, die entweder von der Sonne oder einer künstlichen Energiequelle ausgestrahlt und vom untersuchten Objekt zum Sensor reflektiert wird.

Informationen über die Landnutzung werden regional, national sowie global genutzt. Bisher wurden Daten der Landnutzung durch zeitaufwendige und teure Bodenerhebungen gewonnen, die in den letzten Jahren vermehrt durch Methoden der Fernerkundung abgelöst wurden. Die Fernerkundungsdaten werden beispielsweise für die Kontrolle der Flächenstilllegungen, Ertragsabschätzungen sowie für Agrarstatistiken verwendet.

Häufig werden hierfür hochauflösende, optische Sensorsysteme wie z.B. Landsat-TM oder SPOT eingesetzt, die jedoch bei Bewölkung und schlechten Lichtbedingungen keine zufriedenstellenden Aufnahmen liefern. In Ländern mit gemäßigttem oder humidem Klima stehen deshalb in manchen Jahren für weite Bereiche keine optische Fernerkundungsszenen zur Verfügung.

Eine kontinuierliche Beobachtung der Erdoberfläche erfordert die Aufnahme eines jeden Gebietes in kurzzeitigen Abständen. Das können nur abbildende Radarsysteme an Bord von Raumfähren oder Satelliten leisten, weil sie nicht auf das Tageslicht angewiesen sind und kaum von der Wettersituation abhängen. Bei Radar handelt es sich um aktive Systeme, bei denen der Radarstrahl als elektromagnetische Energiequelle dient, die in der Lage ist, Wolken zu durchdringen.

Wie in der Fernerkundung mit optischen Sensoren gilt auch für die Mikrowellenfernerkundung, daß eine Analyse der Radardaten Zusatzinformationen erfordert. Hierzu zählen z.B. topographische Daten, Bodenkennwerte, Fruchtartenkalender sowie Wetterdaten eines Gebietes, die in ein Geoinformationssystem (GIS) integriert und mit Radardaten verknüpft werden. Erst die gemeinsame Auswertung dieser Daten mit gleichem Ortsbezug ermöglicht die sinnvolle Radarfernerkundung hinsichtlich der Landnutzungsinventur.

Mit dem European Remote Sensing Satellite ERS steht ein System zur Verfügung, das langfristig SAR Radardaten von der Erdoberfläche liefert. Das System ist ausgestattet mit C-Band (5,3 GHz) und VV-Polarisation bei einem Einfallswinkel von 23°. Die Sensoren erreichen eine räumliche Auflösung von 5m * 25m.

Die sicheren regelmäßigen Wiederholraten des ERS ermöglichen die Beobachtung des Pflanzenwachstums zu bestimmten Entwicklungsstadien und die Ermittlung der Zeiträume innerhalb eines Jahres, in denen sich die einzelnen Fruchtarten unterscheiden lassen.

2 Literaturübersicht

Mikrowellen unterscheiden sich in ihrem Verhalten grundlegend von der elektromagnetischen Strahlung im optischen und thermalen Spektralbereich. Sie werden von der Atmosphäre kaum beeinflusst und können auch Wolken, Dunst, Rauch, Schnee und leichte Regen fast ungestört durchdringen. Der Vorteil von Mikrowellen-Fernerkundungssystemen besteht somit darin, daß sie weitgehend witterungsunabhängig sind (ALBERTZ, 1991).

2.1 Physikalische Grundlagen der Radarfernerkundung

Die Rückstreuung der ausgestrahlten Mikrowellen erfolgt in Abhängigkeit von

- Parametern des Sensorsystems:
 - der Wellenlänge bzw. der Frequenz
 - der Polarisierung der ausgesandten und empfangenen Strahlung
 - dem Einfallswinkel des Impulses, α
- Eigenschaften der Objekte:
 - Oberflächenneigung gegenüber den eintreffenden Strahlen
 - Oberflächenrauigkeit
 - dielektrischen Eigenschaften

(nach HILDEBRANDT, 1996). Im Folgenden wird auf diese verschiedenen Einflußgrößen eingegangen.

2.1.1 Fernerkundungssysteme

Bei der Analyse der Erdoberfläche haben Fernerkundungssysteme im optischen und im Mikrowellenbereich große Bedeutung gewonnen. Man unterscheidet hierbei folgende Verfahren:

- passive, bei denen der Sensor nur als Empfänger der reflektierten Strahlung einer natürlichen Quelle (meist der Sonne, z.T. Mikrowellen) dient, wie z.B. bei der i.d.R. panchromatischen oder infraroten Luftbildphotographie und der panchromatischen und/oder multispektralen Abtastung mit optischen Sensoren
- aktive, bei denen kohärente, elektromagnetische Energie beim Laser im optischen und infraroten Bereich und bei Radar im Mikrowellenbereich ausgesendet wird

und die Reflexionssignale wieder empfangen werden (SIEBER, 1986). Der Sensor dient somit als Sender und Empfänger.

2.1.2 Einflußgrößen des Sensors auf die Radarrückstreuung

Die Radarrückstreuung von Landoberflächen ist neben Geländeeigenschaften abhängig von den Systemparametern Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel.

2.1.2.1 Frequenz

Die Frequenz ist von Bedeutung für das Eindring- und Durchdringungsvermögen von Mikrowellen in Materie: je kürzer die Wellenlänge - und somit je höher die Frequenz - desto geringer die Eindringtiefe. Als Richtwert für die Eindringtiefe wird im allgemeinen die halbe Wellenlänge angegeben (KRONBERG, 1985).

Das Mikrowellenspektrum, das sich von 1 mm bis 1 m Wellenlänge (300 GHz bis 300 MHz) erstreckt, wird in Bandbereiche unterteilt, deren Grenzen in der Literatur zum Teil unterschiedlich angegeben werden. In Tab. 2.1 ist eine Aufstellung der üblicherweise verwendeten Bandbezeichnung zu finden (nach ULABY et al., 1981). In der landwirtschaftlichen Forschung wird in der Regel das L-, C- und X- Band eingesetzt; der Frequenzbereich des ERS-1/ -2 ist **fett** hervorgehoben.

Tab. 2.1: Mikrowellen-Bandbereiche (nach ULABY et al., 1981)

Bezeichnung	Frequenzbereich	Wellenlängenbereich
P	bis 390 MHz	ab 76,9 cm
L	390 MHz - 1,55 GHz	76,9 cm - 19,35 cm
S	1,55 GHz - 4,20 GHz	19,35 cm - 7,14 cm
C	4,20 GHz - 5,75 GHz	7,14 cm - 5,22 cm
X	5,75 GHz - 10,9 GHz	5,22 cm - 2,75 cm
K	10,9 GHz - 36,0 GHz	2,75 cm - 8,3 mm
Q	36,0 GHz - 46,0 GHz	8,3 mm - 6,5 mm
V	46,0 GHz - 56,0 GHz	6,5 mm - 5,4 mm
W	56,0 GHz - 100 GHz	5,4 mm - 3,0 mm

2.1.2.2 Polarisation

Die Schwingungsrichtung der von der Radarantenne ausgesandten bzw. empfangenen Impulse kann zirkular sein oder linear, d.h. horizontal (H) oder vertikal (V), orientiert. Dieser Modus wird durch die Sende- und Empfangsantenne bestimmt (KRONBERG, 1985).

Vertikal schwingende Strahlung reagiert vornehmlich auf vertikale Objektstrukturen: Sie tritt z.B. in einem Pflanzenbestand mit vertikal orientierten Pflanzenstengeln in Interaktion, wohingegen horizontal polarisierte Radarwellen die Bestände weitgehend ungehindert durchdringen oder mit den stärker horizontal ausgerichteten Komponenten (z.B. Blättern) reagieren (STEINGIESSER et al., 1998). Nach BUSCHMANN (1993) treten bei VV-Polarisation vorwiegend Vegetationseffekte auf, während bei horizontaler Einstrahlung und horizontaler Messung die Einflüsse des Bodens überwiegen.

Für senkrechte dielektrische Zylinder (z.B. Halme der Wintergetreide) ist bei einer vertikal ausgesandten Mikrowelle eine höhere Dämpfung (d.h. Schwächung der Signalstärke) als bei einer horizontalen Mikrowelle zu erwarten. Dies ist dadurch erklärbar, daß ein vertikal elektromagnetisch orientiertes Feld an den mehr oder weniger senkrecht orientierten dielektrischen Zylindern der Halme besser ankoppeln kann als ein horizontal orientiertes Feld. Das parallel zur Zylinderachse der Halme ausgerichtete elektrische Feld erfährt somit eine erhöhte Absorption bzw. Dämpfung (SCHMULLIUS, 1992).

2.1.2.3 Einfallswinkel

Der lokale Einfallswinkel θ - definiert als Winkel zwischen den einfallenden Radarwellen und der lokalen Vertikalen zur Erdoberfläche - hat entscheidenden Einfluß auf die Interaktion zwischen Geländeoberfläche und auftreffender Radarstrahlung. Je mehr die Geländeoberfläche in Richtung auf die Antenne geneigt ist, um so größer ist der Anteil der auftreffenden Energie, der reflektiert wird (KRONBERG, 1985).

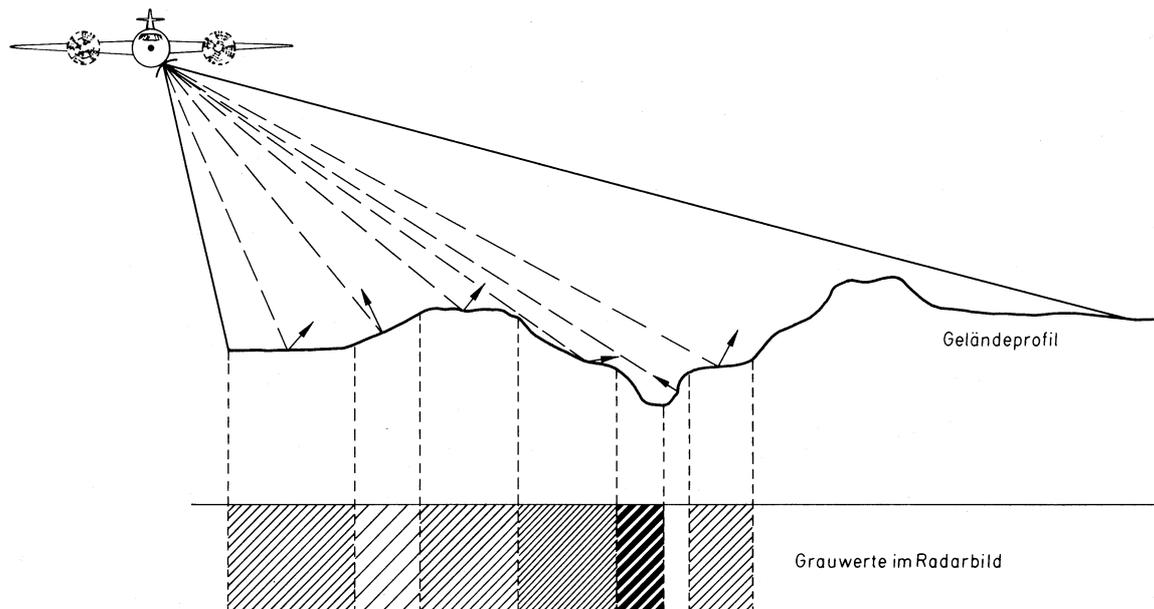


Abb. 2.1: Abhängigkeit der Graustufen eines Radarbildes von Hangneigung und Hangorientierung in bezug auf die Beleuchtung (KRONBERG, 1985)

Verschiedene Einfallswinkel führen bei der Durchdringung von Pflanzenbeständen zu unterschiedlichen Effekten: bei flachen Einfallswinkeln – es wird mehr seitlich durch den Bestand geschaut - wird die Rückstreuung maßgeblich vom Bestand geprägt, wohingegen bei steilen Einfallswinkeln auch der den Beständen unterliegende Boden getroffen werden kann. Dies hat zur Folge, daß das Rückstreusignal vom Boden stärker beeinflusst werden kann (STEINGIESSER und KÜHBAUCH, 1998).

2.2 Wechselwirkung zwischen Radarstrahlen und Objektoberflächen

Die Reflexions- und Streuprozesse sowie das Eindringvermögen der Radarwellen werden auf der Objektseite vor allem durch die Oberflächenrauigkeit und die dielektrischen Eigenschaften bestimmt (vgl. Kap. 2.1.1.3).

2.2.1 Radarrückstreuwert σ°

Bei Vorgabe der Meßparameter Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel mißt das Radargerät von den Geländeobjekten die rückgestreute Leistung P_r . Die Rückstreuungseigenschaften der beobachteten Objekte kann nun durch einen Vergleich mit der gesendeten Leistung P_t bestimmt werden. Diese Wechselwirkung wird im allgemeinen beschrieben durch den Streukoeffizienten σ . Der Zusammenhang zwischen der physikalischen Größe σ und dem Quotienten P_r/P_t ist durch die Radargleichung

gegeben. Diese beschreibt die Beziehung zwischen dem Radarsensor, den Streueigenschaften des Zielobjektes und dem empfangenen Signal (ULABY et al., 1982):

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4 \pi)^3 R^4} \sigma$$

Dabei ist:

P_r	=	gesendete Leistung der Antenne
P_t	=	empfangene Leistung der Antenne
G	=	Antennengewinn
λ	=	Wellenlänge
R	=	Abstand zwischen Antenne und Zielobjekt
σ	=	effektiver Streuquerschnitt des Zielobjektes

Das von einer beleuchteten Bodenzelle kommende Radarecho resultiert in der Regel aus der Rückstreuung mehrerer Streuzentren, die jeweils durch ihren Rückstreukoeffizienten σ_i charakterisiert sind. Durch Mittelung dieser einzelnen Rückstreukoeffizienten ergibt sich der Gesamtrückstreuquerschnitt σ_t dieser Bodenzelle. Wird dieser Radarstreuquerschnitt auf eine Flächeneinheit bezogen, ergibt sich der differentielle Rückstreukoeffizient σ° .

Die Größe σ° ist dimensionslos und wird meist mit dem logarithmischen Maß in Dezibel (dB) angegeben:

$$\sigma^\circ \text{ (dB)} = 10 \log (\sigma^\circ)$$

2.2.2 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit einer Materialoberfläche ist im wesentlichen durch deren Texturmerkmale bestimmt. In einem Pflanzenbestand prägen Größe, Form und Orientierung sowie die räumliche Verteilung von Blättern, Zweigen und Ästen die Oberflächenrauigkeit; bei Böden ist es die Größe, Verteilung und Orientierung der Bodenpartikel (KRONBERG, 1985).

Das Verhältnis der Wellenlänge der einfallenden Strahlung und der Oberflächenrauigkeit entscheidet, ob die auftreffende Strahlung diffus oder spiegelnd reflektiert

wird (KRONBERG, 1985). Die Reflexion erfolgt spiegelnd, wenn die Einstrahlung auf eine „glatte“ und diffus, wenn sie auf eine „rauh“ Oberfläche fällt. Die Begriffe „glatte“ und „rauh“ sind in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ der eingestrahlenen Mikrowellen und dem Einfallswinkel θ zu definieren. Eine Oberfläche gilt für die Radarstrahlung als „glatte“, wenn sich die mittlere Höhe h ihres Mikroreliefs wie folgt definiert (HILDEBRANDT, 1996):

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

In Abb. 2.2 ist dieser Zusammenhang modellhaft dargestellt.

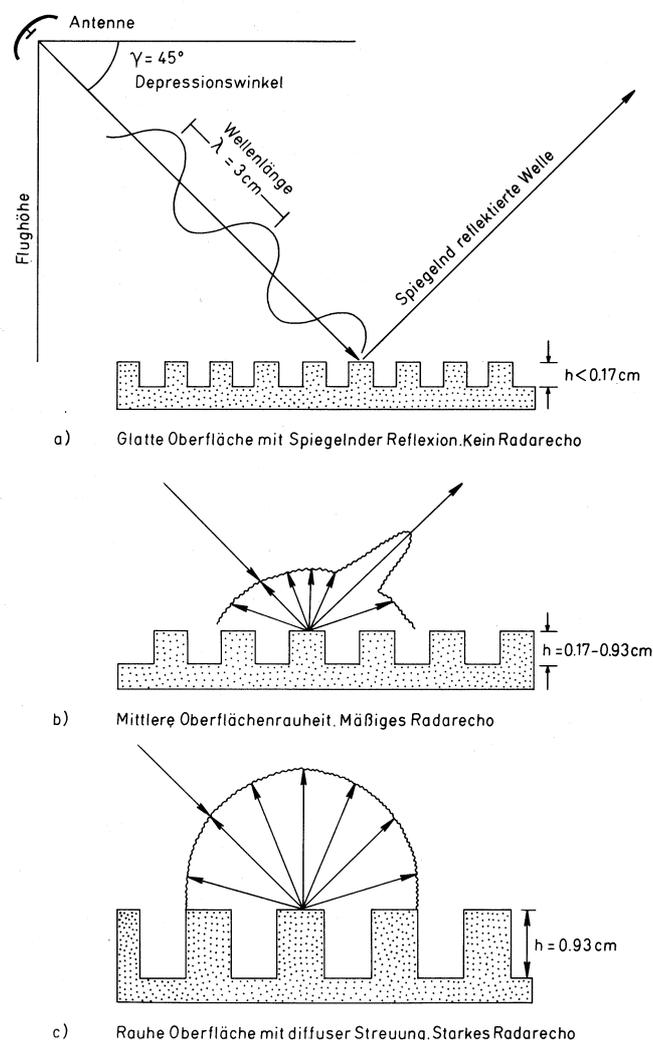


Abb. 2.2: Modelldarstellung der Reflexions- bzw. Streuprozesse an Oberflächen unterschiedlicher Rauheit, für X-Band-Radar ($\lambda = 3 \text{ cm}$) (SABINS, 1978)

2.2.3 Dielektrizitätskonstante

Der Wassergehalt von Materie ist für die Radarfernerkundung von großer Bedeutung, da Reflexion nur dort auftritt, wo sich zwei Medien unterschiedlicher Leit- und Absorptionsfähigkeit berühren (ENDLICHER und KEßLER, 1982). Die Dielektrizitätskonstante ist der mathematische Ausdruck für diese Leit- und Absorptionsfähigkeit. Die Dielektrizitätskonstante eines Materials beschreibt die Ausbreitungsart elektromagnetischer Wellen in einem bestimmten Medium und hat somit bedeutenden Einfluß auf die Rückstreuung. Materialien mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten, d.h. hoher Leitfähigkeit z.B. aufgrund hohen Wassergehaltes, reflektieren stärker als Materialien mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstanten.

2.2.4 Volumenstreuung

Vegetation reflektiert Mikrowellen in der Regel diffus. Die überwiegend diffuse Reflexion hat eine Oberflächen- und eine Volumenkomponente. Ein Teil der Einstrahlung wird von der äußeren Oberfläche der Vegetationsdecke reflektiert, ein anderer Teil dringt in den Bestand ein und wird nach Mehrfachstreuungen an Blättern, Zweigen und Halmen von dort zum Teil nach außen zurückgestreut (HILDEBRANDT, 1996).

2.3 Temporäre Störgrößen der multitemporalen Signaturanalyse

Die Analyse temporaler Radarsignaturen von verschiedenen Fruchtarten zeigt, daß die Radarrückstreuung von den Parametern Boden, phänologischen Stadien der Fruchtarten und meteorologischen Faktoren beeinflusst wird. Es zeigt sich hierbei, daß der Effekt der phänologischen Stadien auf das Rückstreusignal zu bestimmten Zeitpunkten der Vegetationszeit ausreichend ist, um charakteristische Profile der Radarrückstreuung für die verschiedenen Fruchtarten zu produzieren. Die für Weizen, Gerste und Zuckerrüben typischen Profile der Radarrückstreuung über die Vegetationszeit zeigen sich auch deutlich auf verschiedenen Böden und bei verschiedenen Witterungsbedingungen (WOODING et al., 1993). Dennoch können Witterung und Boden Störgrößen darstellen, welche die Analyse von Radarsignaturen zum Teil erheblich erschweren.

2.3.1 Witterung

Die Witterung kann in zweierlei Hinsicht die Radarrückstreuung beeinflussen: einerseits kann durch den Windeinfluß die Geometrie des Pflanzenbestandes verändert werden (BOUMAN und VAN KASTEREN, 1991) und andererseits wird durch Tau bzw. Regen die Wassermenge im Bestand bzw. Boden verändert.

Der Einfluß der Windstärke und der Windrichtung auf das Radarrückstreusignal ist nur schwer zu bestimmen, entsprechend liegen nur wenige und vor allem keine sicheren Aussagen in der Literatur vor. Durch Wind wird die Geometrie von Pflanzenbeständen verändert. Besonders bei kleineren Pflanzen mit dünnen Stengeln wie Getreide, deren Rückstreuung von der vertikalen Ausrichtung der Halme (vgl. Kap. 2.1.2.2) dominiert wird, vermuten WOODING et al. (1995) aufgrund dieses Effektes eine Änderung der Radarrückstreuung. Zu dem Ausmaß der Änderung in Abhängigkeit von Pflanzenart, Entwicklungsstadien der Pflanzenbestände, Windstärke und Windrichtung liegen jedoch keine Angaben vor.

SCHOTTEN et al. (1995) unterscheiden zwischen einem direkten und einem indirekten Einfluß des Regens auf die Rückstreuung. Der direkte Einfluß basiert auf einer erhöhten Feuchtigkeit im Bestand bzw. der Oberfläche des Bestandes (BROWN et al., 1993) und der veränderten Orientierung der Blätter, die sowohl durch Wind als auch Regen auftreten kann (BOUMAN, 1991). Der indirekte Einfluß besteht in der Veränderung der Bodenfeuchtigkeit. DIXON und BROWN (1997) bestätigen, daß Tau und Regenereignisse bei Einsatz des RADARSATs (C_{HH})¹ die Rückstreuwerte erhöhen, wobei die Trennbarkeit der einzelnen Fruchtarten dadurch nicht beeinträchtigt wurde.

Ebenso fanden GILLESPIE et al. (1990) bei Einsatz eines Scatterometers², daß Tau die Rückstreuung besonders bei C_{HH} , 20° Einfallswinkel und paralleler Reihenrichtung bei Winterweizen um 2 bis 3 dB erhöhte, während bei senkrechter Einstrahlung der Tau keinen wesentlichen Effekt auf die Rückstreuung hatte. Bei C_{VV} , 20° und paralleler Reihenrichtung zeigte sich nur eine erhöhte Rückstreuung um 1,9 dB. Dies wird durch die horizontale Verteilung des Taus auf den Blättern erklärt.

¹ Kanadischer Satellit (seit 1995): C-Band, HH-polarisiert, verschiedene Aufnahmewinkel und Bodenauflösungen (10–100 m) für Meeres- und Eisstudien, Landapplikationen und Erstellung von Höhenmodellen

² nicht-abbildende Sensoren für exakte Messungen der Oberflächenreflektion und -streuung in Abhängigkeit von Wellenlänge, Polarisierung und Beleuchtungsgeometrie (ELACHI, 1988). Sie dienen der Quantifizierung der Rückstreuoeffizienten von Flächen- und Punktzielen.

MANGOLINI und ARINO (1996) vermerkten im Frühjahr eine verminderte Rückstreuung bei Frost und eine erhöhte Rückstreuung bei zunehmender Feuchtigkeit im Bestand. Sie stellten weiterhin fest, daß Regenereignisse bis zu 6 Tagen vor den ERS Aufnahmen - als Maß für die Bodenfeuchte - einen Einfluß auf das Radarrückstreusignal hatten, solange keine Bodenbedeckung vorlag. Mit zunehmender Vegetationsdecke nahm dieser Einfluß ab.

Im Gegensatz dazu wiesen SCHMULLIUS und NITHACK (1997) nach, daß Regen auch während der Vegetationsperiode einen Einfluß auf die Radarrückstreuung haben kann: nach Regen wurde der Kontrast zwischen den Feldern verschiedener Fruchtarten im ERS Satellitenbild reduziert. Es liegen jedoch keine Angaben darüber vor, wie hoch die Niederschlagsmenge mindestens sein muß, um einen solchen Effekt zu verursachen.

2.3.2 Reihenrichtung

Felder mit Reihenrichtung senkrecht zur einfallenden Radarstrahlung weisen ein stärkeres Rückstreusignal auf als Felder mit paralleler Reihenrichtung. Dies ist begründet durch eine größere - der SAR Antenne zugewandten - Streuoberfläche bei senkrechter Reihenrichtung (MICHELSON, 1994). AUQUIERE et al. (1997) stellten auf mindestens 2 ha großen, ebenen Zuckerrüben- und Maisflächen mit homogenen Bodenfeuchten einen Einfluß auf das ERS-1 Rückstreusignal in den frühen Wachstumsstadien fest. Die Rückstreuwerte variierten in Abhängigkeit von der Reihenrichtung um 2 bis 3 dB. Auch BOUMAN und UENK (1992) stellten bei Kartoffeln und Zuckerrüben eine Abhängigkeit von der Reihenrichtung fest: fiel die Radarstrahlung des ERS-1 senkrecht auf die Bearbeitungsreihen, so konnte ein höheres Rückstreusignal festgestellt werden als bei parallel einfallenden Radarstrahlen. Dieser Effekt verlor sich mit zunehmender Bodenbedeckung. Auch MÜLLER et al. (1993) stellten einen signifikanten Einfluß der Reihenrichtung bei Zuckerrüben bis zum Stadium des Reihenschlusses auf das Rückstreusignal fest. Nach diesem Zeitpunkt nahm der Einfluß der Reihenrichtung bis zum Bestandesschluß ab und war zu späteren Stadien der Bestände nicht mehr erkennbar.

2.3.3 Bodenfeuchte

Es ist bekannt, daß die Bodenfeuchte das Radarsignal beeinflusst. Der einfache Rückschluß von der Radarsignalstärke auf die Bodenfeuchte ist jedoch nicht möglich, da neben der Wasserkonzentration im Boden die Bodenrauigkeit und die jeweilige Vegetationsdecke des Feldes die Radarrückstreuung beeinflussen (DOBSON et al., 1995).

Umfangreiche Untersuchungen zur Beziehung zwischen der Bodenfeuchte und dem ERS-1 Radarsignal wurden auf unbewachsenen Böden von WEIMANN et al. (1998) während eines Jahres durchgeführt. Um den Rauigkeitseffekt zu minimieren, wurden die Böden gewalzt. Es ergab sich ein hoher signifikanter Zusammenhang, der allerdings bei Tau auf der Bodenoberfläche verschwand. Die Autoren führten dies weniger auf eine Erhöhung der Bodenfeuchte als auf den dünnen Wasserfilm auf der Oberfläche zurück. AUQUIERE et al. (1997) stellten einen Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Radarrückstreuung des ERS-1 Signals und der Niederschlagssumme der vorherigen 6 Tage unter Maisbeständen fest. Der Einfluß der Bodenfeuchte auf das Radarsignal konnte während der gesamten Vegetationszeit beobachtet werden. Zusätzlich beeinflusst die Reihenrichtung in den frühen Wachstumsstadien die Radarrückstreuung. Aufgrund der Bestandesstruktur sehen AUQUIERE et al. (1997) selbst voll entwickelte Maisbestände als für Mikrowellen transparent an. In der oben genannten Studie wurde angenommen, daß der Boden einen Anteil von 40% an der Rückstreuung aufweist.

Nach VAN LEEUWEN und BORGEAUD (1997) zeigen ERS-1 Rückstreuwerte von Kartoffel- und Zuckerrübenfeldern der niederländischen Polder während der gesamten Vegetationsperiode eine deutliche Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, wohingegen die Rückstreuung bei Winterweizen während der vegetativen als auch zu Beginn der generativen Wachstumsphase keine Beziehung zur Bodenfeuchte aufweist. Hier dominiert die Struktur des Pflanzenbestandes in Kombination mit der Bodenfeuchte das Rückstreuverhalten.

SCHMULLIUS et al. (1993) sowie SCHMULLIUS und NITHACK (1995) konnten mit dem VV-polarisierten ERS-1 SAR und dem DLR E-SAR³ keinen Zusammenhang zwi-

³ SAR-System mit X-, C- und L-Band, HH- und VV-polarisiert; in diesen Veröffentlichungen wurden 5 Termine des Cvv-Bandes berücksichtigt

schen der Bodenfeuchte und der Radarrückstreuung während der Vegetationszeit von Mitte Mai bis Ende Juli bei Sommergerste und Winterweizen - trotz hoher Unterschiede der gravimetrischen Bodenfeuchten an den verschiedenen Terminen - feststellen. In Übereinstimmung damit ergaben Scatterometermessungen mit C-Band, VV-Polarisation und 20° Einfallswinkel selbst bei offenem Boden keine Beziehung zwischen der Bodenfeuchte und der Rückstreuung (BENALLEGUE et al., 1995). Der offenbar gravierende Einfluß der Polarisation wird von BRUCKLER und BERTUZZI (1991) bestätigt: bei C_{HH} (23°) konnten sie sowohl mit als auch ohne Bodenbedeckung den Bodenwassergehalt bestimmen, während bei C_{VV} (23°) kein Zusammenhang mehr festzustellen war. Im Widerspruch dazu berichten WOODING et al. (1992), daß die Bodenfeuchte eines unbedeckten Bodens einen höheren Einfluß auf das Radarrückstreusignal des ERS-1 /-2 hat als die Bodenrauigkeit.

Festzuhalten ist, daß die Bodenfeuchte keinen bzw. nur einen geringen Einfluß auf die Radarrückstreuung von Getreidebeständen während der Hauptvegetationsperiode hat, wohingegen die Radarrückstreuung der Hackfrüchte stärker von der Bodenfeuchte beeinflusst wird. Eine Quantifizierung des Einflusses der Bodenfeuchte oder gar eine Eliminierung ist derzeit nicht möglich.

2.3.4 Bodenrauigkeit

Die Bodenrauigkeit übt ebenso wie die Bodenfeuchte einen Einfluß auf das Radarrückstreusignal aus (vgl. Kapitel 2.2.2). Bei der Anwendung von Fernerkundungsdaten im landwirtschaftlichen Bereich ist dabei von Interesse, ob es aufgrund verschiedener Bodenbearbeitungszustände möglich ist, Fruchtarten schon zu frühen Zeitpunkten zu unterscheiden. So gelang es NEZRY et al. (1995) anhand von ERS Szenen im November und Februar Fruchtarten aufgrund der jeweiligen Bodenbearbeitungsmaßnahme zu bestimmen. Im Gegensatz dazu war es MANGOLINI und ARINO (1996) im Frühjahr nicht möglich, eine solche Trennung durchzuführen, da die Variation der Radarrückstreuwerte von Feldern der gleichen Fruchtarten sehr groß war.

SOLBERG (1992) konnte mit ERS-1 SAR Aufnahmen mit einer hohen Genauigkeit gepflügte Felder von Stoppelfeldern unterscheiden; dies unter der Voraussetzung, daß die Bodenfeuchte hoch war. So zeigte sich vor allem bei gepflügten Feldern eine erhöhte Rückstreuung bei einem vorherigen Regenereignis. Nach drei Tagen, während derer der Boden abtrocknen konnte, war der Kontrast zwischen den Feldern

„gepflügt“ und „Stoppeln“ stark reduziert. Zusammenfassend bemerkt der Autor, daß eine gute Erkennungsrate von Bearbeitungszuständen nur bei hohen Bodenfeuchten zu erreichen ist. Diese Aussage wird von WEYDAHL und SOLBERG (1992) bestätigt. Die mittleren ERS-1 Rückstreuwerte gepflügter Felder stiegen bei erhöhten Bodenfeuchten im Vergleich zu den mittleren Rückstreuwerten auf Stoppelfeldern um 3-6 dB an, so daß bei feuchtem Boden eine Unterscheidung in beide Kategorien möglich war.

Im Gegensatz dazu wiesen in Untersuchungen von KOLAR und FERANEC (1993) gepflügte Felder eine geringere Rückstreuung als Stoppelfelder auf. Die Autoren machen jedoch keine Angabe zur Bodenfeuchte.

2.4 Temporale Signaturanalyse

Die genaue Identifikation von Fruchtarten hängt von der Verfügbarkeit der Radarszenen zu bestimmten Zeitpunkten während der Vegetationsperiode ab. Das Potential von ERS-1/ -2 für das Wachstumsmonitoring wird maßgeblich von der Anzahl der Radarszenen sowie vom Zeitpunkt der Beobachtung während der Wachstumsphase bestimmt (VAN LEEUWEN und BORGEAUD, 1997).

2.4.1 Fruchtartenerkennung

Fruchtarten können voneinander unterschieden werden aufgrund ihres unterschiedlichen Rückstreuverhaltens (Abb. 2.3) und/oder verschiedener Anbaubedingungen, wie z.B. dem Saatzeitpunkt für Winter- und Sommergetreide. Das Radarrückstreuverhalten einzelner Fruchtarten verändert sich in der Vegetationsperiode mit zunehmender Entwicklung. Besondere Charakteristika der Rückstreuung, die sich auf spezielle Entwicklungsstadien beziehen, können zur Unterscheidung der Fruchtarten zu bestimmten Zeitpunkten der Vegetationsperiode herangezogen werden (BOUMAN und UENK, 1992). Felder derselben Fruchtart zeichnen sich durch gleiche temporale Rückstreurollen - trotz verschiedener Bodentypen - aus, wenngleich das Niveau der Verlaufskurven unterschiedlich sein kann. Daher scheint eine Identifikation der einzelnen Fruchtarten über ihr Rückstreurollenprofil sinnvoll (KOHL et al., 1994).

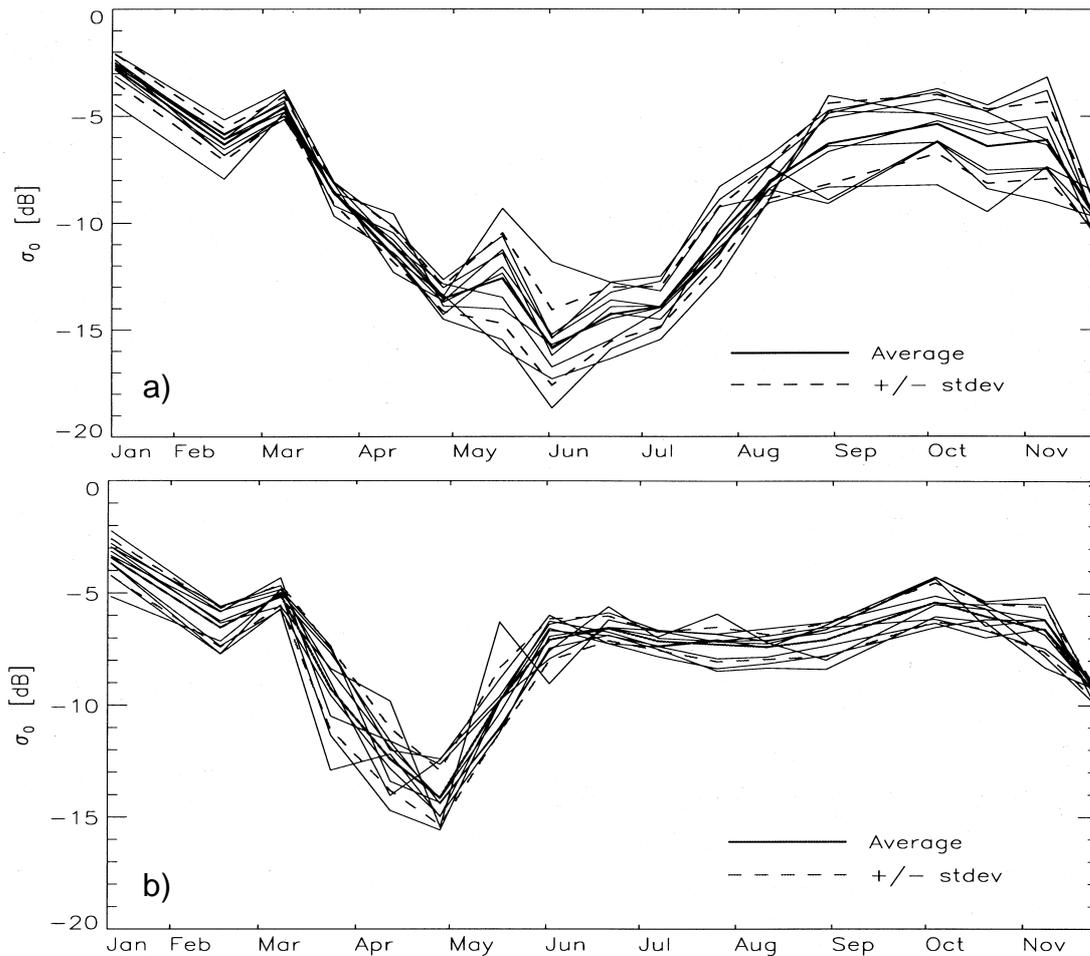


Abb. 2.3: Radarrückstreuprofile (ERS-1) von 10 Winterweizenfeldern (a) und 10 Zuckerrübenfeldern (b) mit Standardabweichung in den Niederlanden 1993 (BORGHAUD et al., 1995)

Am Anfang der Wachstumsperiode liegt aufgrund des offenen Bodens eine zu große Variation in der Rückstreuung verschiedener Ackerschläge mit gleicher Fruchtart vor, als daß eine Fruchtartenklassifikation mit frühen Daten sinnvoll wäre (BOUMAN und UENK, 1992). Auch KEITHLEY und ROBERTS (1996) konnten im Frühjahr eine hohe Streuung der Rückstreckoeffizienten für Felder gleicher Fruchtarten beobachten, da der Einfluß des Bodens in diesem Zeitraum dominiert. Weiterhin konnte festgestellt werden, daß die beste Trennung der Fruchtarten in den frühen bis mittleren Wachstumsstadien durchgeführt werden kann. So ließen sich Winterweizen und Sommergerste Anfang Juli von Zuckerrüben und Kartoffeln unterscheiden, da die Rückstreuung von Winterweizen und Sommergerste mit fortschreitendem Wachstum abnahm, während die Rückstreuung von Kartoffeln und Zuckerrüben zunahm. Die beiden Letztgenannten ließen sich im August trennen, als die Rückstreuwerte von Kartoffeln konstant blieben und die von Zuckerrüben absanken (BOUMAN und UENK,

1992). SCHOTTEN et al. (1995) fanden für Winterweizen ebenfalls eine Abnahme des Rückstreusignals am Anfang der Wachstumsphase, während die Rückstreuung für Kartoffeln und Zuckerrüben im gleichen Zeitraum annähernd gleichbleibend war. BORGEAUD et al. (1995) gelang es ebenso, Kartoffeln von Zuckerrüben im Zeitraum Juli bis August sowie Wintergerste von Winterweizen Anfang Juli zu unterscheiden.

LEMOINE et al. (1997) zeigten, daß es möglich ist, Winterweizen von Wintergerste zu trennen, da die Abreife von Getreide einen Einfluß auf das Rückstreusignal hat und Wintergerste 3-4 Wochen vor Winterweizen abreift. Weiterhin gelang es ihnen im Sommer, Sommerungen wie Zuckerrüben und Kartoffeln aufgrund der relativ hohen Rückstreuung von anderen Fruchtarten zu unterscheiden.

MANGOLINI und ARINO (1996) konnten in Italien eine verbesserte Klassifikation ab Mitte/Ende Mai durchführen, da die Radarsignaturen der einzelnen Fruchtarten (Winterraps im April, Wintergerste, Winterweizen und Luzerne im Mai) zu diesem Zeitpunkt artentypische Unterschiede aufwiesen. Im Vergleich zu NEZRY et al. (1995) gelang ihnen keine Trennung der Fruchtarten zu früheren Zeitpunkten (vgl. Kap. 2.3.4).

In der folgenden Tabelle sind die in der Literatur aufgeführten optimalen Zeitfenster zur Unterscheidung von Fruchtarten aufgrund ihrer Radarrückstreuung zusammengestellt.

Tab. 2.2: Literaturübersicht der Zeitfenster zur Trennung verschiedener Fruchtarten

Literaturquelle	Fruchtartenunterscheidung	Zeitfenster	Frequenz
BOUMAN & UENK, 1992	Winterweizen, Gras, Zuckerrüben, Kartoffeln	Juni - August	C- Band
SCHMULLIUS et al., 1993	Getreide, Zuckerrüben, Winterraps	Juni - Juli	C- Band
PAMPALONI, 1994	großblättrige (ZR, Ka, SB)* von kleinblättrigen (WW, WG)* Pflanzen		X-, C- und L-Band
WOODING, 1995	Reis, Winterweizen, Wintergerste, Winterraps, Gras	Mai - August	C- Band
SCHOTTEN et al., 1995	Winterweizen, Winterraps, Kartoffeln, Sommergerste, Luzerne	Mai - August	C- Band
BORGEAUD et al., 1995	Wintergerste, Winterweizen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Luzerne	Juli - August	C- Band
SKRIVER et al., 1996	Winter- und Sommergetreide sowie Raps	Mai, Juli	C- Band
MANGOLINI & ARINO, 1996	Kartoffeln, Luzerne, Gras, Winterweizen, Wintergerste, Winterraps	April - Mai	C- Band
LEMOINE et al., 1997	Wintergerste, Winterweizen, Winterraps	April - Juli	C- Band
PALOSCIA, 1998	Breitblättrige und schmalblättrige Pflanzen		C-, L- und P-Band
SAICH & BORGEAUD, 1999	Breitblättrige Pflanzen (Kartoffeln, Zuckerrüben) von Getreide	Sommermonate	C- Band

*ZR: Zuckerrüben; Ka: Kartoffeln, SB: Sonnenblumen, WW: Winterweizen, WG: Wintergerste

2.4.2 Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen anhand multitemporaler Satellitenaufnahmen

In Kapitel 2.4.1 wurde gezeigt, daß es möglich ist, Fruchtarten in bestimmten Zeitfenstern zu trennen. Weiterhin ist von Interesse, die phänologische Entwicklung der Vegetation zu betrachten, um die Signaturverläufe interpretieren zu können (KEITHLEY und ROBERTS, 1996).

2.4.2.1 Zuckerrüben

CLEVERS et al. (1996) zeigten bei der Betrachtung von 20 ERS Aufnahmen von Mitte Januar bis Ende Oktober im Jahr 1993, daß der Rückstreuverlauf von Zuckerrüben bis zum Bestandesschluß größere Schwankungen aufweist. Dies ist durch die Abhängigkeit der Radarrückstreuung von der Bodenfeuchte und der Biomasse zu erklären. Ab Bestandesschluß bleibt die Radarrückstreuung auf einem konstanten hohen Niveau. Dies deutet darauf hin, daß die Bodenfeuchte keinen Einfluß mehr hat.

Diese hohe Rückstreuung konnten GODDING et al. (1989) bei Befliegungen mit nicht abbildenden Scatterometern (X_{VV}) schon bei einem Bodenbedeckungsgrad von 50% nachweisen, wobei die Rückstreuung auch hier ihr Niveau trotz weiteren Wachstums behielt. Erklärt wird dieses Phänomen mit der Geometrie der Rübenpflanzen: die vom Sensor abgestrahlte Energie wird zum Großteil von den im günstigen Winkel liegenden Rübenblättern direkt reflektiert. BOUMAN und HOEKMAN (1993) führen diesen Effekt auf den hohen Pflanzenwassergehalt und großflächige Blätter zurück.

Im CLEOPATRA-Experiment wurden sieben flugzeuggetragene E-SAR Datensätze (C-Band, VV-Polarisation) von Mitte Mai bis Ende Juli zur Analyse von multitemporalen Radarrückstreusignaturen verwendet. SCHMULLIUS und NITHACK (1995) zeigten, daß mit zunehmender Bestandeshöhe die Rückstreuung ansteigt, wobei sie die Bestandeshöhe als Indikator für zunehmende Bestandesdichte und Vitalität der Blätter ansehen. Unter Hinzunahme einer weiteren E-SAR Szene und 3 ERS-1 Aufnahmen ließ sich eine Beziehung zwischen Bestandeshöhe und σ° mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,699$ errechnen (SCHMULLIUS und NITHACK, 1997).

Auch WOODING (1984) wies bei SAR-580-Radaraufnahmen mit C_{HH} und C_{HV} nach, daß die hohe Rückstreuung auf den Bodenbedeckungsgrad und die Bestandeshöhe zurückzuführen ist.

2.4.2.2 Wintergetreide

Die Radarrückstreuung von Getreidearten während einer Vegetationsperiode nimmt einen völlig anderen Verlauf als die der Zuckerrüben. Es ist daher anzunehmen, daß spezifische Eigenschaften einer Fruchtart verantwortlich für die Rückstreuung sind. Im Folgenden wird dieses Phänomen für Wintergetreide erläutert.

Bei der Signaturanalyse von neun ERS-1 SAR Aufnahmen eines landwirtschaftlich genutzten Gebietes in Kanada von Ende Mai bis Mitte Oktober konnten für verschiedene Getreidearten folgende Beobachtungen gemacht werden: Der Radarrückstreuungswert wird im Frühjahr hauptsächlich vom Boden beeinflusst, wenn der Boden noch offen ist oder ein geringer Bodenbedeckungsgrad vorliegt. Mit zunehmender Pflanzenentwicklung nimmt der Radarrückstreuungswert bis zum Stadium der Fruchtbildung aufgrund von Dämpfung und Absorption im Pflanzenbestand ab. Mit zunehmender Abreife steigt die Rückstreuung wieder an (BAN und HOWARTH, 1998).

Ähnliche Ergebnisse lieferten CLEVERS et al. (1996), denen 20 ERS-1 Szenen von Mitte Januar bis Ende Oktober 1993 zur Verfügung standen: bei Winterweizen und Wintergerste konnten sie einen klaren Rückgang der Rückstreuung während des Schoßstadiums und des Ährenwachstums feststellen, während bei der Kornfüllung die Rückstreuung wieder zunahm.

Die Abnahme der Radarrückstreuung von der Bestockungsphase bis zur Blüte (höchste Biomasseproduktion) und einen Anstieg der Rückstreuung während der Kornfüllungsphase bis zur Ernte konnten auch WOODING et al. (1993) bei Winterweizen feststellen.

MANGOLINI und ARINO (1996) zeigten, daß die Radarrückstreuung des ERS-1 bei Winterweizen während der Bestockungs- und der Schoßphase abnimmt. SKRIVER et al. (1996) beobachteten ebenso eine Abnahme der Radarrückstreuung von März bis Mai bei Wintergerste, Winterweizen und Sommergerste während der EMISAR-Mission. Diese Beobachtung machten sie sowohl bei der Verwendung des C- als auch des L-Bandes. Allerdings machen sie keine Angaben darüber, in welchem Stadium sich die Getreidearten befanden.

Erklärungsansätze für diesen charakteristischen Verlauf der Radarrückstreuung der Getreidearten finden sich in der Literatur an mehreren Stellen.

Einen zunehmenden Radarrückstreuoeffizienten σ° fanden ULABY und BUSH (1976) bei Messungen mit einem Scatterometer bei abnehmendem Wassergehalt in abreifenden Weizenbeständen. Sie führten dieses Phänomen darauf zurück, daß mit sinkendem Pflanzenwassergehalt die Mikrowellen den Bestand besser durchdringen können und der Einfluß des Bodens auf die Rückstreuung zunimmt. SCHMULLIUS et al. (1993) konnten diesen Anstieg der Rückstreuung bei Sommergetreide und Wintergerste im Verlauf der Vegetationsphase beobachten und geben als Ursache die geänderte Pflanzengeometrie aufgrund des Ährenschiebens an. Weiterhin erklären SCHMULLIUS und NITHACK (1995) dieses Phänomen mit der verminderten Absorption der Radarstrahlen infolge abnehmender Pflanzenwassergehalte während des Abreifeprozesses.

Auch GODDING et al. (1989) erwähnen eine Abnahme der Rückstreuung mit zunehmender Biomasse und eine zunehmende Rückstreuung mit abnehmendem Wassergehalt während der Meßkampagne AGRISAR 86⁴. Diese Aussagen betreffen jedoch die Sensorkonfiguration X-Band und VV-Polarisation.

Nach Scatterometermessungen mit L-, C- und X-Band in Weizenbeständen fanden SIQUEIRA und SARABANDI (1996) heraus, daß die hohe Rückstreuung in späteren Wachstumsphasen durch die Ähren ausgelöst wird. Die Mikrowellen werden von den Ähren reflektiert und die Dämpfung im Bestand selber (Halme und Blätter) findet nicht statt.

SCHMULLIUS et al. (1993) berichteten bei multitemporalen E-SAR C_{VV} und ERS-1 Aufnahmen, die im Zeitraum vom 11. Mai bis 31. Juli 1992 gemacht wurden, ebenfalls von der Abnahme der Rückstreuung bei Winterweizen und Sommergerste. Sie erklären dieses Phänomen durch die phänologischen Veränderungen: die hohe Rückstreuung im Frühjahr wird durch die breiten Primärblätter verursacht, während die Abnahme der Rückstreuung auf das Längenwachstum der Getreidepflanzen sowie eine Änderung der Oberflächenrauhigkeit zurückzuführen ist. Dieser Verlauf

⁴ SAR-Sensor: X-Band; Polarisation: HH / VV; Auflösung: 3m*3m; Flughöhe: 5800 m; Einfallswinkel: 25°-65°

der Rückstreuung findet sich nur bei VV-Polarisation und beruht auf dem in Kapitel 2.1.2.2 beschriebenen Effekt der Dämpfung.

Wenige Angaben finden sich in der Literatur über den direkten Zusammenhang von Radarrückstreuung und verschiedenen Pflanzenparametern:

MATTHEIS DE et al. (1995) untersuchten die Eignung des AIRSAR-Systems zur Abschätzung der Biomasse verschiedener Fruchtarten. Hierfür unterteilten sie die untersuchten Fruchtarten in zwei Gruppen mit unterschiedlicher Pflanzendichte: Mais und Sonnenblumen (< 10 Pflanzen/m²) sowie Raps, Luzerne und Weizen (80-500 Pflanzen/m²). Die erste Gruppe wird charakterisiert durch ihren großen Stengeldurchmesser (1-3 cm) und große Blätter (10-40 cm²), wohingegen sich die zweite Gruppe durch einen Stengeldurchmesser von 0,2 bis 1,2 cm und kleinere Blätter (< 1 cm²) auszeichnet. Weiterhin wurde die Biomasse über den Pflanzenwassergehalt geschätzt. Für die Auswertung standen ihnen 3 Aufnahmen zur Verfügung: 22. Juni, 29. Juni sowie 14. Juli. Bei C-VV ermittelten sie für den Zusammenhang zwischen der Biomasse der kleindimensionierten Kategorie und der Radarrückstreuung ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,70$.

AMODEO et al. (1996) werteten SIR-C/X-SAR Befliegungen mit der gleichen Methodik wie MATTHEIS DE et al. (1995) in Italien aus. Es ergab sich mit C-Band und HV-Polarisation ein Zusammenhang zwischen der Biomasse der Gruppe „Raps, Luzerne und Weizen“ und den Radarrückstreuwerten mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,75$, wobei diese gute Beziehung hauptsächlich auf den Raps zurückzuführen war.

Die Betrachtung einzelner Bestandesparameter von jeweils nur einer Fruchtart findet sich nur vereinzelt in der Literatur. HOCHHEIM und BARBER (1997) beprobten Sommerweizenfelder intensiv, um detaillierte Informationen zu den einzelnen Bestandesparametern wie Blattflächenindex, Frisch- und Trockenmasse zu erhalten. Aufgrund des Ausfalls des RADARSATs konnten jedoch diesen Daten keine Radar-daten gegenübergestellt werden.

In Japan konnten für Reis mit ERS SAR Aufnahmen von Juni bis Oktober im Jahr 1992 die besten Korrelationen zwischen σ° und der Bestandeshöhe ($r = 0,98$), Frischmasse ($r = 0,98$) sowie der Trockenmasse ($r = 0,95$) bestimmt werden (KUROSU et al., 1993).

2.5 Geographische Informationssysteme (GIS)

Karten und Pläne vermitteln ein Bild unserer Umwelt. In diesem Bild stellen topographische Merkmale, Gebäude und Verkehrswege ein Bezugssystem dar, das die Orientierung erleichtert. Darauf aufbauend werden eine Reihe von Themen behandelt wie z.B. in der vorliegenden Arbeit die Nutzungsarten, Flächennutzungsgrenzen und Bodeninformationen. Mit Hilfe eines GIS ist es möglich, diese Themen miteinander in Bezug zu setzen. Dabei dient der Raumbezug als gemeinsamer Nenner aller Themen und er ermöglicht, vielfältige Verflechtungen und Wechselwirkungen zu erkennen und diese Erkenntnisse zur Grundlage unserer Entscheidungen zu machen (BARTELME, 1989).

Ein Geoinformationssystem dient der Erfassung, Speicherung, Analyse und Darstellung aller Daten, die einen Teil der Erdoberfläche und die darauf befindlichen technischen und administrativen Einrichtungen sowie geowissenschaftliche, ökonomische und ökologische Gegebenheiten beschreiben (BARTELME, 1995).

2.5.1 Datenformat

Zur Verwendung in Geoinformationssystemen werden zwei Datenformate unterschieden: Raster- und Vektordaten. In der folgenden Arbeit wurden hauptsächlich Vektordaten verwendet, da sie gegenüber Rasterdaten folgende Vorteile aufweisen:

- Datenstruktur: komplexe Struktur, besonders bei topologischen Beziehungen; Abspeicherung von XY-Koordinaten
- Genauigkeit: präziser
- Beschreibende Daten: jedes Element hat eine Verbindung zu beschreibenden Daten
- Verschneidungen: komplexe Verarbeitungsalgorithmen
- Graphische Ausgabe: traditionelles Kartenbild

2.5.2 GIS und Fernerkundung

Bisher wurde gezeigt, welche Vielfalt an Daten in der landwirtschaftlichen Fernerkundung berücksichtigt und miteinander verknüpft werden müssen. Die Bearbeitung dieser mehrschichtigen Daten mit gleichem Ortsbezug erfordert den Einsatz eines Geoinformationssystems. In der vorliegenden Arbeit wurde GIS als ein Werkzeug zur besseren Interpretation von Satellitenbildern verwendet, jedoch keine eigentliche GIS-Forschung betrieben. Die im folgenden genannten Literaturstellen geben beispielhaft wieder, welche Bedeutung GIS für die Interpretation von Fernerkundungssignalen hat; weiterführende Literatur über GIS wird hier nicht behandelt, sondern auf EHLERS et al. (1989), HEUVELINK et al. (1989), MASON et al. (1988) und WILKINSON (1996) verwiesen.

Voraussetzung für eine objektorientierte Klassifikation ist die Kenntnis der Geometrie und der Lage des Objektes. Diese Informationen werden u.a. von Flächennutzungskarten und Segmentationsverfahren geliefert (LÖCHERBACH, 1994). Durch die Segmentierung können durch Speckle⁵ verursachte Klassifizierungsfehler reduziert werden, indem der mittlere Radarrückstreuwert eines Polygons ermittelt wird (HOOGEBOOM, 1983).

HERRMANN und KUHN (1995) führten eine pixel- und eine flächenbezogene Klassifikation mittels Landsat-5-TM Aufnahmen durch. Im letztgenannten Fall wurde die Informationsebene Parzellenstruktur in ein GIS integriert. Hierdurch konnte eine verbesserte Klassifikation erzielt werden, da es nun möglich war, zu untersuchen, ob innerhalb eines Schlates mehr als eine Kulturart klassifiziert wurde. War dies der Fall, so wurde diejenige Nutzung bestimmt, die innerhalb des Schlates den größten Flächenanteil erreichte. Bei Überschreitung eines Grenzwertes wurde diese dem Schlag als alleinige Nutzung zugewiesen (Parzellenauffüllung). Durch dieses Verfahren konnten Parzellen mit inhomogenem Pflanzenbestand in die Bewertung mit einbezogen werden.

⁵ In Radarbildern von Radarsystemen mit synthetischer Apertur zeigen sich häufig uneinheitliche, kleinflächige Grautonverteilungen. Dieses Phänomen (engl. Speckle) geht auf die Kohärenz des Radarsignals und auf die Interferenz unter den zahlreichen, innerhalb der Auflösungszelle unregelmäßig verteilten Streuzentren zurück.

Eine ähnliche Vorgehensweise beschreiben DERENYI und TÜRKER (1996): ist es möglich, einen hohen Prozentsatz der Pixel innerhalb eines Polygons einer bestimmten Klasse zuzuordnen, so wird dieses Areal dieser Klasse zugewiesen.

Ein weiterer wichtiger Vorteil eines GIS liegt darin, daß die Randpixel eines Polygons durch Anlegung einer Pufferzone nicht in die statistische Berechnung eingehen und aufgrund der Eliminierung dieser Mischpixel Fehlklassifizierungen vermieden werden (HINTON, 1996). Die Mischpixel befinden sich an den Grenzen von zwei oder mehreren Klassen: das Rückstreusignal ist die Mischung verschiedener charakteristischer Rückstreusignale (JANSSEN et al., 1990).

Zudem ist es möglich, neben geometrischen Informationen, Expertenwissen in ein GIS zu integrieren. Ist z.B. ein digitales Höhenmodell vorhanden, so kann man daraus ablesen, ob eine definierte Region zu hügelig ist, um bestimmte Fruchtarten anzubauen. Eine weitere Information kann sich aus Bodenkarten ergeben: Bodenart und Wasserkapazität fördern den Anbau einer speziellen Fruchtart (WILKINSON, 1996).

3 Problemstellung

Die Fernerkundung in der Landwirtschaft verfolgt als wesentliches Ziel die Inventur der Bodennutzung. Optische Sensoren lieferten bereits gute Ergebnisse - sowohl bei der Klassifizierung von Fruchtarten als auch bei der Beschreibung der Pflanzenvitalität. Diese Sensorsysteme sind jedoch abhängig vom Tageslicht und Bewölkungsgrad. Deshalb stehen in manchen Jahren für bestimmte Gebiete keine Aufnahmen zur Verfügung.

Demgegenüber sind Radarsensoren weitgehend witterungsunabhängig und auch nachts einsetzbar. SAR Daten können somit regelmäßig für jedes Areal bereitgestellt werden. Die richtige Interpretation dieser Radardaten ist ein wesentliches Kriterium zur Erkennung der angebauten Fruchtarten sowie ihres Zustandes. Der Zusammenhang zwischen Radarrückstreuung und den die Rückstreuung beeinflussenden Faktoren Boden und Pflanzen ist jedoch nicht hinreichend geklärt.

Die Interpretation von Radardaten mittels pixelbezogener Ansätze führte nicht zu befriedigenden Ergebnissen, da die Information eines Pixels zufällig ist. In der vorliegenden Arbeit wurde daher ein Geoinformationssystem genutzt, um flächenbezogene Auswertungen durchführen zu können. ERS SAR Daten des Testgebietes standen in einem Intervall von 35 Tagen, in der Hauptvegetationsperiode von 17,5 Tagen, zur Verfügung. Zeitgleich zu den Überfliegungen wurden Boden- und Pflanzenparameter erhoben, die den Radarrückstreuwerten gegenübergestellt wurden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es

- Zeitfenster zu ermitteln, in denen es möglich ist, in einem gegebenen Testgebiet die Hauptfruchtarten mittels ERS SAR Daten in jedem Jahr voneinander zu unterscheiden,
- die Veränderungen der Radarrückstreuung der Pflanzenbestände im Verlauf eines Jahres anhand von Pflanzen- bzw. Bodenparametern zu erklären,
- sowie die Eignung des Radarsystems hinsichtlich der Zustandsbeschreibung und Ertragsabschätzung von Pflanzenbeständen zu prüfen.

4 Material und Methoden

4.1 ERS-1/ -2 (European Remote Sensing Satellite)

Die in dieser Arbeit verwendeten Radarszenen wurden von den europäischen Erderkundungssatelliten ERS-1 und ERS-2 aufgenommen. ERS-1 wurde mit dem Ziel der Wetter- und Seegangsvorhersage, der Eisbeobachtung, der Erfassung von Ölverschmutzungen auf See sowie der Sammlung von Daten für die Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft (ESA, 1996) im Auftrag der europäischen Raumfahrtagentur ESA von der Dornier GmbH, einem Unternehmen der Deutschen Aerospace AG, gebaut und im Juli 1991 erfolgreich gestartet. ERS-2 wurde als Nachfolger des ERS-1, dessen Abschaltung im Juni 1996 erfolgte, im April 1995 gestartet. Beide Satelliten bewegen sich in einer polaren, sonnensynchronen Umlaufbahn in einer Flughöhe von 785 km und überfliegen jeden Aufnahmestreifen im zeitlichen Abstand von 35 Tagen. In mittleren Breiten kommt es nicht nur zur kompletten Aufnahme der Erdoberfläche, sondern benachbarte „descending orbits“ (absteigende Umlaufbahn, d.h. der Satellit fliegt von Nord nach Süd) weisen sogar Überlappungen der Aufnahmestreifen von ca. 50% auf. Die Sensoren des Mikrowellensystems ermöglichen eine räumliche Auflösung von 30 m. Messungen sind unabhängig von Wetter und Beleuchtungsverhältnissen durchführbar.

Für Anwendungen in der Landwirtschaft wird vor allem das Instrument AMI (Active Microwave Instrument) mit seinen drei Modi eingesetzt:

- Synthetic Aperture Radar (SAR) zur Akquisition breiter Aufnahmestreifen von Ozeanen, polaren Eiskappen sowie Landoberflächen
- SAR Wellenmodus zur Beobachtung der Länge und Richtung der Wasserwellen des Meeres
- Wind-Scatterometer zur Messung von Windrichtung und -geschwindigkeit über Meeresoberflächen.

Das Satellitensystem mit seinen Meßgeräten, Energieversorgungs- und Steuerungseinrichtungen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

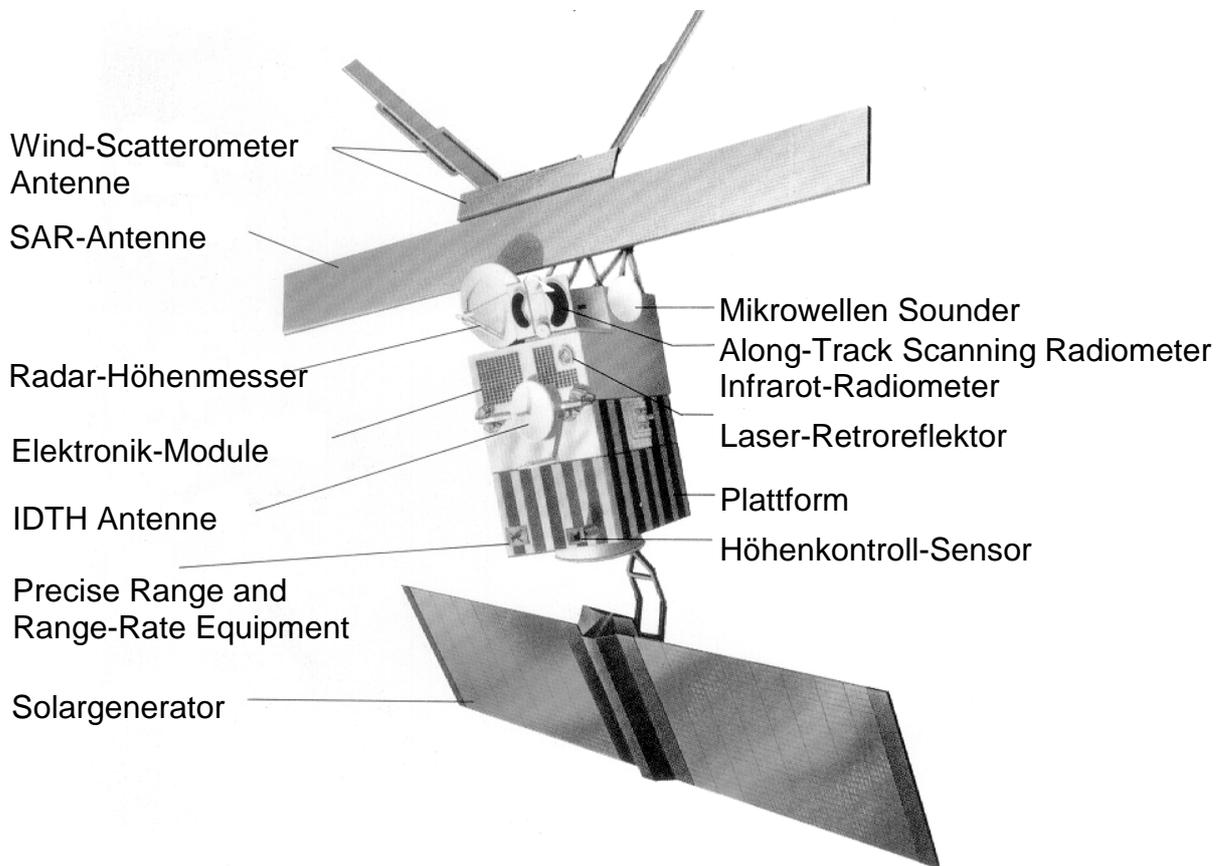


Abb. 4.1: Aufbau des ERS-Satelliten (ESA BR-36, 1989)

Die wichtigsten technischen Daten der Satelliten ERS-1 bzw. ERS-2 sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tab. 4.1: Technische Daten des ERS-1 / ERS-2 (ESA BR-36, 1989)

Frequenz	4,20 GHz - 5,75 GHz (C- Band)
Wellenlängenbereich	5,22 cm – 7,14 cm
Polarisation	VV
Einfallswinkel	23°
Räumliche Auflösung	30 m
Radiometrische Auflösung	2,5 dB bei -18 dB
Streifenbreite der Aufnahme	100 km

4.2 Standort und Witterung

Das Testgebiet „Weilerswist“ befindet sich nordwestlich von Bonn in einer vorwiegend ackerbaulich genutzten Region und umfaßte im 1. Versuchsjahr 28 km². Hinsichtlich der naturräumlichen Gliederung ist das Gebiet der Niederrheinischen Bucht zuzuordnen, die von Nordwesten nach Südosten keilförmig in das Rechtsrheinische Schiefergebirge eingreift. Das Erhebungsgebiet Weilerswist liegt im südlichen Teil der Zülpicher Börde, die vom Erfttal (100 m NN) in südlicher Richtung zur Voreifel (200 m NN) ausläuft.

Das Gebiet zeichnet sich durch weitgehende Homogenität bezüglich des Bodens und des Klimas aus. Die besten Böden haben eine Lößauflage mit einer Mächtigkeit von 1,5 m, während die weniger fruchtbaren nur mit einer dünnen Lößschicht überdeckt sind. Stellenweise besteht die Bodendecke überwiegend aus nährstoffarmen Kiesen und Sanden.

Die Böden haben sich aufgrund von Tonverlagerungsprozessen aus dem Ober- in den Unterboden zu Braunerden, Parabraunerden und Pseudogleyen und deren Übergängen entwickelt. Vereinzelt treten Auenböden und Kolluvien sowie Gleye auf.

Tab. 4.2: Standortbeschreibung des Testgebietes „Weilerswist“

Testgebietgröße	28 bzw. 39 km ²
Höhe über NN	130 - 160 m
Relief	eben
<u>Klima:</u>	
Jahresniederschlag	550 - 650 mm
mittlere Jahrestemperatur	9°C
<u>Boden:</u>	
Bodentyp	Braun-, Parabraunerde, Pseudogley
Bodenart	sandiger Lehm, Lehm
Schlaggröße	1 - 33 ha

Das Gelände ist eben und in für die Region relativ große Feldschläge unterteilt, auf denen hauptsächlich landwirtschaftliche Kulturpflanzen wie Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen und Zuckerrüben angebaut werden (vgl. Tab. 8.2 - Tab. 8.4 im

Anhang). Weitere Nutzungen sind Sommergetreide, Triticale, Kartoffeln, Busch- und Ackerbohnen, Stillungen sowie diverse Gemüsearten.

Das Erhebungsgebiet liegt mit seinen warmen Sommern (mittlere Temperatur im Juli: 18°C) und milden Wintern (mittlere Temperatur im Januar: 2°C) im ozeanisch bestimmten Klimabereich. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9°C.

Die Niederschlagsverteilung wird durch die Regenschattenwirkung der Eifel beeinflusst. So fallen im Jahresmittel in Weilerswist über 650 mm, in Euskirchen lediglich 550 mm Niederschlag. Die Wetterstation Euskirchen weist das Maximum der Niederschläge im langjährigen Mittel mit ca. 80 mm im Juli, das Minimum mit ca. 30 mm im Februar aus. Die hauptsächlich vorherrschende Windrichtung ist Südwest.

Aufgrund veränderter Anbaubedingungen war es nicht möglich in den folgenden Versuchsjahren auf die Testfelder des 1. Jahres zurückzugreifen. Daher mußte das Testgebiet auf 39 km² erweitert werden, um ausreichend große Felder zu erhalten. Die Ausdehnung erfolgte nach Westen, da dort eine größere Parzellierung vorliegt als in den anderen angrenzenden Gebieten und ein Großteil der Landwirte, die bisher ihre Felder für die Probenahmen zur Verfügung stellten, dort auch Parzellen bearbeiten.

4.3 Felderhebungen

4.3.1 Testgebiet und Testfelder

Als Grundlage späterer Landnutzungsklassifizierungen erfolgte in jedem Untersuchungsjahr einmalig die Kartierung des gesamten Testgebietes (Abb. 4.2), wobei sowohl die Flächenbegrenzungen als auch die Flächennutzungen in der Deutschen Grundkarte (Maßstab 1:5000) dokumentiert wurden. Eine Liste des verwendeten Kartenmaterials findet sich im Anhang (Tab. 8.1).

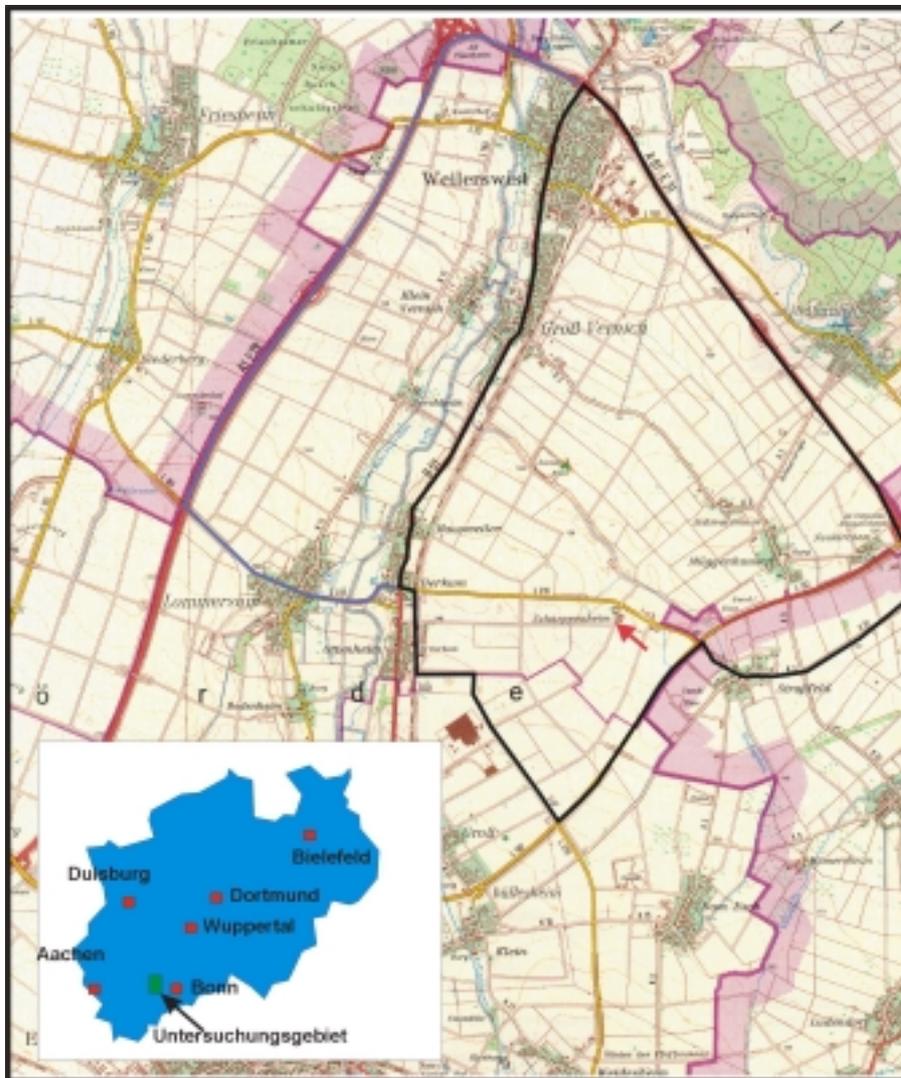


Abb. 4.2: Lage und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes Weilerswist (Topographische Karte Euskirchen, 1: 50000) (dunkelblaue Linie: Testgebiet 1996; mittelblau: erweiterte Fläche 1997/1998; → Position der Wetterstation)

In den Versuchsjahren 1996 bis 1998 wurden die wichtigsten Fruchtarten der Region Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen zeitgleich mit den Überflügen des ERS-1 bzw. ERS-2 beprobt. Zuckerrüben wurden lediglich im 1. Versuchsjahr berücksichtigt. Einen Überblick über die Anzahl und Größe der Testfelder gibt Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Übersicht der Testfelder in allen drei Versuchsjahren

	Fruchtart	Anzahl	Größe (ha)
1996	Winterweizen	6	3,8 - 32,0
	Wintergerste	6	3,8 - 20,1
	Winterroggen	6	1,1 - 26,9
	Zuckerrüben	6	5,1 - 27,5
1997	Winterweizen	8	5,1 - 27,5
	Wintergerste	8	2,5 - 12,0
	Winterroggen	8	3,5 - 32,0
1998	Winterweizen	9	2,4 - 26,9
	Wintergerste	8	4,8 - 16,5
	Winterroggen	7	2,3 - 9,0

4.3.2 Probenahme (Ground Truth)

Zur Beprobung der Pflanzenbestände und Böden wurden diejenigen Parameter (Tab. 4.4) ausgewählt, die zum einen den Zustand der Fruchtarten widerspiegeln (Vitalität, Erscheinungsbild), hierzu gehören z.B. Bestandeshöhe, Blattflächenindex, EC-Stadium, und zum anderen zugleich mögliche Ursachen des Reflexionsverhaltens darstellen können (Blattbenetzung, Ährenneigung). Hierbei wurden die Ursachen mit kurzfristiger, durch die Witterungsverhältnisse bedingte, und langfristiger Wirkung aufgrund der phänologischen Entwicklung der Pflanzenbestände unterschieden.

Tab. 4.4: Übersicht der erhobenen Pflanzen- und Bodenparameter in den Versuchsjahren

	Parameter	1996	1997	1998
Wintergetreide und Zuckerrüben*	Bestandeshöhe	x	x	x
	Wachstumsstadium	x	x	x
	Reihenabstand	x	x	x
	Blattflächenindex	x	x	-
	Blattbenetzung	x	x	x
Wintergetreide <u>Fraktion:</u> Halm/Blatt Ähren	Frischmasse	x	x	x
	Trockenmasse	x	x	x
	Wassergehalt	x	x	x
Zuckerrüben* <u>Fraktion:</u> Rübenkörper Blattapparat	Rübenkörperlänge	x	-	-
	Rübendurchmesser	x	-	-
	Frischmasse	x	-	-
	Trockenmasse	x	-	-
	Wassergehalt	x	-	-
Boden	Bodenfeuchte	x	x	x
	Bodenrauhigkeit	x	x	x

*Probenahme der Zuckerrüben nur im Jahr 1996

Auf jedem Testfeld wurden vier repräsentative Probenahmestellen festgelegt, die in einem Abstand von 50 m voneinander entfernt lagen und somit die Eckpunkte eines Quadrates mit Seitenlängen von 50 m bildeten. An diesen Eckpunkten wurden die nachfolgend aufgeführten Parameter erhoben.

4.3.2.1 Wintergetreide

Blattflächenindex

Die Blattflächenbestimmung erfolgte destruktiv. Hierzu wurde an jeweils 3 der repräsentativen Probenahmestellen die oberirdische Biomasse von einem Meter einer Pflanzenreihe abgeschnitten und in die Fraktionen Halme und Blätter zerlegt. Der Blattflächenindex wurde mit einem photometrischen Blattflächenmeßgerät

(Areameter LI-3100 der Fa. LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). Die Meßgenauigkeit des Gerätes wird mit +/- 1mm² angegeben.

Bestandeshöhe, Ähren- und Grannenlänge

Diese Parameter wurden mit dem Metermaß an 20 Pflanzen eines Feldes ermittelt.

Frisch- und Trockenmasse der Gesamtpflanzen sowie der Fraktionen Halm/Blatt und Ähren

Die oberirdische Biomasse eines Meters einer Saatreihe wurde an den vier Meßstellen abgeschnitten und die Frischmasse durch wiegen bestimmt. Danach erfolgte die Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz zur Ermittlung der Trockenmasse. Beide Parameter wurden auf die Flächeneinheit bezogen und danach die Pflanzenfeuchte berechnet. Nach dem Ährenschieben erfolgte die gleiche Maßnahme - jedoch wurden die Getreidepflanzen dann zusätzlich in die Komponenten Halm/Blatt und Ähren fraktioniert.

Entwicklungsstadium

An jedem Meßtermin wurde das Entwicklungsstadium der Getreidepflanzen mit dem BBCH-Dezimal-Code (TOTTMANN, 1987) (vgl. Anhang Tab. 8.8) bestimmt.

Bodenfeuchte

An allen 4 Meßstellen wurden Bodenproben zur Feuchtebestimmung bis 5 cm Tiefe mittels eines Stechzylinders genommen und unter denselben Bedingungen wie die Pflanzenproben getrocknet. Die Bodenfeuchte wurde danach gravimetrisch ermittelt.

Oberflächenrauigkeit

Die Bodenrauigkeit wurde aufgrund einer Einteilung in vier Klassen anhand der Bodenbearbeitungsmaßnahmen dokumentiert. Diese Einteilung erfolgte in „Saattbett“, „geeggt“, „gegrubbert“ und „gepflügt“.

Zusätzliche Parameter

Weiterhin wurden Halme/m² und Ähren/m² gezählt; die Ährenneigung sowie Besonderheiten wie Krankheitsbefall, Unkrautbesatz, Lager, Steinbesatz und Naßstellen wurden dokumentiert.

Um das Gesamterscheinungsbild der Pflanzenbestände zum Probezeitpunkt festzuhalten, wurden die Felder photographiert.

Kurzzeiteffekte

Zur Untersuchung von Kurzzeiteffekten auf das Rückstreusignal wurde zudem bei allen Fruchtarten zum Zeitpunkt der Probenahme und somit des Überfluges die Blattbenetzung festgehalten sowie die Windstärke und Windrichtung an einer im Testgebiet befindlichen Wetterstation gemessen.

Zeitinvariante Parameter

Zeitinvariante Parameter wie Saattermin, Saaddichte, Reihenabstand, Reihenrichtung, Abstand in der Reihe, Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Termin), Pflanzenschutzmaßnahmen (Termin), Düngung (Termin), Erntetermin, Erntemenge sowie Besonderheiten wurden im Rahmen einer Befragung der Landwirte ermittelt.

4.3.2.2 Zuckerrüben

Blattflächenindex

Auch hier erfolgte die Bestimmung der Blattfläche destruktiv. An drei Meßstellen wurden von jeweils 5 Zuckerrüben die Blätter entfernt und mit dem photometrischen Blattflächenmeßgerät (Areometer LI-3100 der Fa. LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) gemessen. Die angegebene Meßgenauigkeit beträgt +/- 1mm².

Bestandeshöhe

Die Bestandeshöhe wurde an 15 Pflanzen pro Parzelle mit Hilfe eines Metermaß bestimmt.

Frisch- und Trockenmasse

An drei Meßstellen pro Parzelle wurden jeweils 5 Zuckerrüben entnommen und die Blattmasse vom Rübenkörper getrennt. Von beiden Fraktionen wurde die Frischmasse gemessen. Die Rübenkörper wurden gehäckselt und beide Fraktionen wurden dann bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurde die Trockenmasse ermittelt.

Wachstumsverlauf

Der Wachstumsverlauf der Zuckerrüben wurde anhand der Entwicklungskurve nach WINNER (1974) (vgl. Anhang Abb. 8.1) zu jedem Meßtermin bestimmt.

Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit, Kurzzeiteffekte

Die Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit und Kurzzeiteffekte wurden - wie bereits unter Kap. 4.3.2.1 beschrieben - ermittelt.

Zeitinvariante Parameter

Die Landwirte wurden mittels eines Fragebogens dazu aufgefordert, alle zeitinvarianten Parameter der einzelnen Parzellen anzugeben. Es handelt sich um die gleichen Parameter wie unter Kap. 4.3.2.1 angegeben.

4.3.3 Besonderheiten der Ground Truth in den einzelnen Versuchsjahren

4.3.3.1 Ground Truth 1996

Die Ground Truth, d.h. die Erhebungen vor Ort, wurde 1996 im Zeitraum 22. Mai bis 14. November jeweils an den Terminen durchgeführt, an denen entweder ein Überflug des Landsats oder des ERS-1 bzw. ERS-2 stattfand. Dies bedeutet, daß alle 16 bis 17 Tage eine Datenerhebung im Feld vorgenommen wurde. Diese erfolgte nach folgendem Schema:

Es wurden pro Hauptfruchtart (Winterroggen, Winterweizen, Wintergerste sowie Zuckerrüben) 6 Felder ausgewählt, welche für die Landnutzung im Testgebiet Weilerswist repräsentativ sind und eine Mindestgröße von 2 ha aufweisen (Ausnahme: 2 Winterroggenfelder).

Die Bestandesparameter - wie unter Kap. 4.3.2 beschrieben - wurden für jede Parzelle erhoben.

4.3.3.2 Ground Truth 1997

Die Datenerhebung für die Ground Truth 1997 umfaßte den Zeitraum vom 03. April bis 30. Oktober und wurde im wesentlichen wie 1996 durchgeführt: die im Feld erhobenen Bestandesparameter wurden im vollen Umfang beibehalten. Die beprobte

Fläche der Stichproben wurde jedoch verdoppelt, um die Varianz der Stichproben zu verringern.

Ein weiterer Unterschied bestand darin, daß 1997, während der Hauptvegetationsperiode, alle 17,5 Tage statt wie bisher alle 35 Tage ERS-2 Szenen angefordert wurden. Die einzelnen Entwicklungsstadien können mit Hilfe des kürzeren Zeitintervalls der ERS-2 Aufnahmen genauer dokumentiert werden.

Bedingt durch die Rotation der Feldfrüchte auf den Ackerschlägen, wurden mit den Fruchtartenkollektiven Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen in den drei aufeinanderfolgenden Jahren nicht stets die selben Flächen beprobt.

Um einen größeren Datensatz für die Auswertungen zur Verfügung zu haben, wurden statt 6 Felder in diesem Jahr 8 Felder pro Fruchtart (Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste) beprobt.

Zusätzlich wurde im Herbst, an den Tagen des ERS-2-Überfluges, eine Kartierung der Felder im Testgebiet durchgeführt, die verschiedene Bodenbearbeitungsmaßnahmen aufwies. Hierdurch kann überprüft werden, ob die Bodenbearbeitungszustände „Saatbett“, „gegrubbert“ und „gepflügt“ im Radarbild zu unterscheiden sind.

4.3.3.3 Ground Truth 1998

Die Felderhebungen fanden 1998 vom 07. April bis 06. August statt. Beprobt wurden 8 Wintergersten-, 7 Winterroggen- und 9 Winterweizenfelder. Die verringerte Anzahl an Winterroggenfeldern ist bedingt durch den Rückgang des Anbaus dieser Fruchtart und durch die geringe Bereitschaft anderer Landwirte ihre Felder zur Verfügung zu stellen. Im dritten Versuchsjahr wurde auf die Bestimmung des Blattflächenindex verzichtet, da sich in den ersten beiden Jahren kein Zusammenhang mit der Radarrückstreuung ergab.

4.4 Datenverarbeitung

Die wesentlichen Schritte zur Verarbeitung der Satellitendaten wurden auf der SUN-Ultra-1 Workstation mit dem Programm EASY-PACE der Fa. PCI, Kanada durchgeführt.

Als Geoinformationssystem wurde die ARC/INFO Version 7.0.4 für UNIX-Plattformen mit den Modulen Arcedit, Tables und ARC GRID genutzt und für die kartographische Darstellung des digitalisierten Kartenmaterials wurde ArcView 2.1 verwendet. Installiert wurden die Geoinformationssysteme auf der UNIX-SPARC-10 Workstation, die wiederum mit der SUN-Ultra-1 Workstation verbunden war. Für die Digitalisierung des Kartenmaterials stand das Digitalisiertablett Microgrid III von der Summagraphics Corporation zur Verfügung.

4.4.1 Satellitendaten

Die Datensätze der einzelnen ERS Szenen wurden von der European Space Agency (ESA) im Single-Look-Complex (SLC)-Format auf Exabyte-Bändern kostenlos zur Verfügung gestellt. SLC-Daten haben den Vorteil hoher Informationsgehalte und hoher Auflösung der Bilder, da sie sowohl Informationen über die Intensität als auch der Phase beinhalten.

In den Datensätzen wurde ein Ausschnitt, der das Testgebiet umfaßte, definiert. Die Ausschnitte der verschiedenen Szenen wurden mittels Paßpunkten koreferenziert, d.h. pixelgenau übereinander gelegt. Da die ERS Szenen von zwei verschiedenen Überflugstreifen (Track 337 Frame 2583 und Track 108 Frame 2583) stammen, lag das Testgebiet einmal in *near range* und zum anderen in *mid range*. Aufgrund der verschiedenen Aufnahmewinkel und der daraus resultierenden unterschiedlichen Verzerrung war die Koreferenzierung für beide Überflugstreifen getrennt durchzuführen.

Um die Grauwertstatistik nicht zu verfälschen, wurde auf eine Geokodierung der ERS Aufnahmen verzichtet, da eine Entzerrung über ein Höhenmodell bewirkt wird und dabei Pixel aufgefüllt oder entfernt werden. Statt dessen wurden die in geogra-

phischen Koordinaten vorliegenden GIS-Daten durch die inverse Transformation auf die SLC-Bilder in Pixelkoordinaten projiziert. Diese inverse Geokodierung erfolgte mit dem VEC2SLC-Programm der Jena-Optronik GmbH (DJO). Die so erhaltenen Vektorlayer (z.B. Feldgrenzen) wurden mit dem Xpace-Programm Vecread in ein Bildfile eingelesen. Mit dem institutseigenen Programm extract_menuue war es nun möglich, die Mittelwerte der Intensität für jedes Feld zu jedem Aufnahmezeitpunkt zu bestimmen. Diese Mittelwerte wurden nach der Vorschrift von LAUR (1998) kalibriert.

In Abbildung 4.3 sind die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung als Flußdiagramm dargestellt.

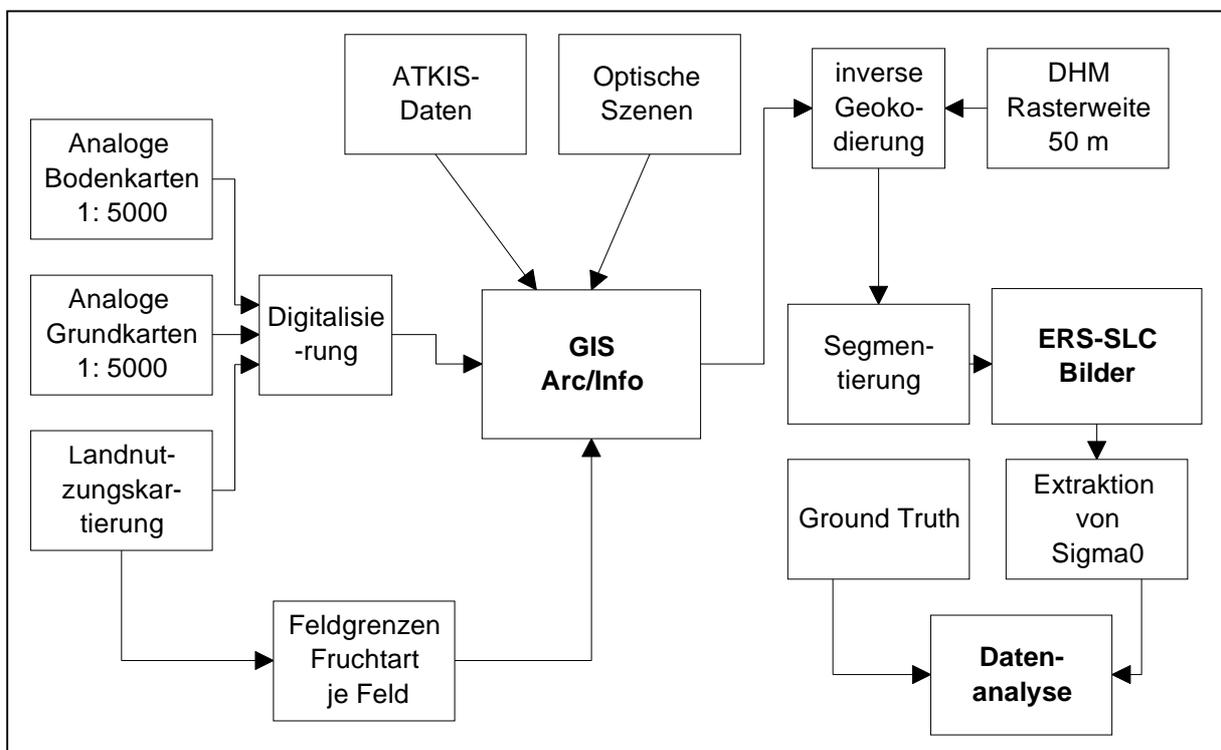


Abb. 4.3: Flußdiagramm der Datenverarbeitung

In Tabelle 4.5 befindet sich eine Übersicht der ERS SAR Szenen, die in den drei Versuchsjahren angefordert bzw. ausgewertet wurden.

Tab. 4.5: Überflugtermine des ERS-1/ -2

1996		1997		1998	
Datum	Satellit	Datum	Satellit	Datum	Satellit
14.03.	ERS-2	03.04.*	ERS-2	12.02.	ERS-2
17.04.	ERS-1	22.04.*	ERS-2/ 2.Orbit	19.03.	ERS-2
18.04.	ERS-2	08.05.	ERS-2	07.04.	ERS-2/ 2.Orbit
22.05.	ERS-1	27.05.	ERS-2/ 2.Orbit	23.04.	ERS-2
23.05.*	ERS-2	12.06.	ERS-2	12.05.	ERS-2/ 2.Orbit
11.06.	ERS-2/ 2.Orbit	01.07.	ERS-2/ 2.Orbit	28.05.	ERS-2
26.06.	ERS-1	17.07.	ERS-2	16.06.	ERS-2/ 2.Orbit
01.08.	ERS-2	05.08.	ERS-2/ 2.Orbit	02.07.	ERS-2
10.10.	ERS-2	21.08.	ERS-2	21.07.	ERS-2/ 2.Orbit
14.11.	ERS-2	25.09.	ERS-2	06.08.	ERS-2

*: angeforderte, aber nicht gelieferte ERS-Szenen

4.4.2 Kartenmaterial

ATKIS-Daten (DLM 25/1)

Die ATKIS-Daten (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) für das Testgebiet Weilerswist wurden in das Geographische Informationssystem ARC/INFO importiert. Es handelt sich hierbei um die erste Realisierungsstufe des Basislandschaftsmodells im Maßstab 1:25.000 mit den Vektordaten Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer und Gebiete (z.B. Gemeindegrenzen). Sämtliche Straßen, Wege, Eisenbahnen, Gewässer und Grenzen bilden die geometrisch exakte Linienstruktur der Landschaft in einer Lagegenauigkeit von +/- 3m. Die Konvertierung erfolgte über die Schnittstelle EDBS_extra, welche speziell zum ATKIS-Datenimport für ARC/INFO entwickelt wurde.

Die ATKIS-Daten wurden nach dem Import in ARC/INFO anhand von Landsat- oder SPOT-Szenen (vgl. Tab. 4.6) und der digitalisierten Grundkarten auf Richtigkeit überprüft und die aufgetretenen Fehler korrigiert. So wurden im Testgebiet in den letzten Jahren neue Bauflächen ausgewiesen, welche in den ATKIS-Daten noch

nicht aufgezeichnet waren. Um eine vollständige Siedlungsmaske zu erstellen, mußten diese Flächen im ATKIS-Datensatz verändert werden.

Mit Hilfe dieser Daten ist es möglich, Masken für Wald, Gewässer, Siedlungsflächen sowie Verkehrswege zu erstellen. Diese Masken werden dazu verwendet, diejenigen Flächen auszublenden, die keine landwirtschaftliche Nutzfläche darstellen.

Die Maskierung der nicht landwirtschaftlichen Flächen dient der Verbesserung der Klassifizierung, da sich diese nun ausschließlich auf das Ackerland konzentriert.

Deutsche Grundkarte (DGK 5)

Die DGK 5 vermittelt einen Überblick über die natürliche Gliederung der Erdoberfläche und über die Eigentumsstruktur. Sie liegt im Maßstab 1:5000 vor und ermöglicht eine erste Segmentierung der Ackerfläche anhand der Eigentumsgrenzlinien. Im Anhang befindet sich eine Auflistung des verwendeten Kartenmaterials (vgl. Tab. 8.1 im Anhang).

Bodenkarte (DGK 5 Bo)

Die DGK 5 Bo enthält auf der Grundlage der DGK 5 die Ergebnisse der Bodenschätzung sowie Angaben über die Bodenbeschaffenheit bis zu einer Tiefe von zwei Metern in Form von Bodenprofilen. Sie gibt in geologisch-bodenkundlicher Hinsicht einen Überblick über die Gliederung, den Aufbau und die Werteverhältnisse der Böden. Eine Liste der verwendeten Karten liegt ebenfalls im Anhang vor (Tab. 8.1).

Flächennutzungskarten

Auf Grundlage der Grundkarten im Maßstab 1:5000 wurden in den drei Versuchsjahren die Nutzungen aller Felder kartiert und anschließend in das GIS digitalisiert. In den Tabelle 8.2 bis Tabelle 8.4 im Anhang befindet sich eine Übersicht über die Verteilung der einzelnen Fruchtarten im Untersuchungsgebiet.

4.4.3 Weitere Informationsquellen

Optische Szenen

In jedem Jahr wurde zusätzlich zu den ERS Szenen eine optische Aufnahme des Untersuchungsgebietes hinzugezogen. Diese Bilder dienten zum einen dazu, die Segmentierung der Ackerflächen zu verbessern und zum anderen zur Überprüfung der ATKIS-Daten. Bei den optischen Szenen handelt es sich sowohl um Landsat- als auch SPOT-Aufnahmen, die in Tabelle 4.6 aufgelistet sind. Im Jahr 1998 war es nicht möglich, eine bewölkungsfreie optische Szene zu erhalten.

Tab. 4.6: Übersicht der optischen Szenen aller Versuchsjahre

	Satellitensystem	Aufnahmeterrmin
1996	Landsat TM	22.07.96
1997	SPOT, panchromatisch	07.08.97

Witterungsdaten

Daten über den aktuellen Witterungsverlauf im Untersuchungsgebiet wurde im ersten Versuchsjahr vom Deutschen Wetterdienst (Klimastation Euskirchen) bereitgestellt, da sich die Installation der eigenen Wetterstation verzögerte. In den folgenden Jahren standen die Witterungsdaten der im Testgebiet installierten Wetterstation (vgl. Abb. 4.2) der Firma Thies zur Verfügung.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Entwicklung der Pflanzenbestände

5.1.1 Zuckerrüben

Die Beobachtung der Zuckerrübenfelder konnte im Jahr 1996 erst Ende Mai aufgrund des verzögerten Projektbeginns begonnen werden. Zu diesem Zeitpunkt waren die Zuckerrübenpflanzen 4-5 cm groß und befanden sich im 4-6 Blatt-Stadium. Daher ist davon auszugehen, daß zu früheren Überfliegungen offener Boden vorlag und somit kein Informationsverlust über den Zusammenhang zwischen Radar-rückstreusignal und Zuckerrüben zu verzeichnen ist. In Abbildung 5.1 ist der Verlauf der Frisch-, Trockenmasse und der Wassermenge von Zuckerrübenblättern der Testfelder im Jahr 1996 dargestellt. Klar zu erkennen war die starke Zunahme der Frischmasse und der Wassermenge von Mitte Juni (Tag 163) bis Mitte Juli (Tag 197; nach Erreichen des Bestandesschlusses), gefolgt von einer Abnahme bis Anfang September (Tag 249), die auf Trockenstreß zurückzuführen war. Die Trockenmasse der Blätter stieg im Vergleich dazu langsam aber stetig bis zum Ende der Vegetation an.

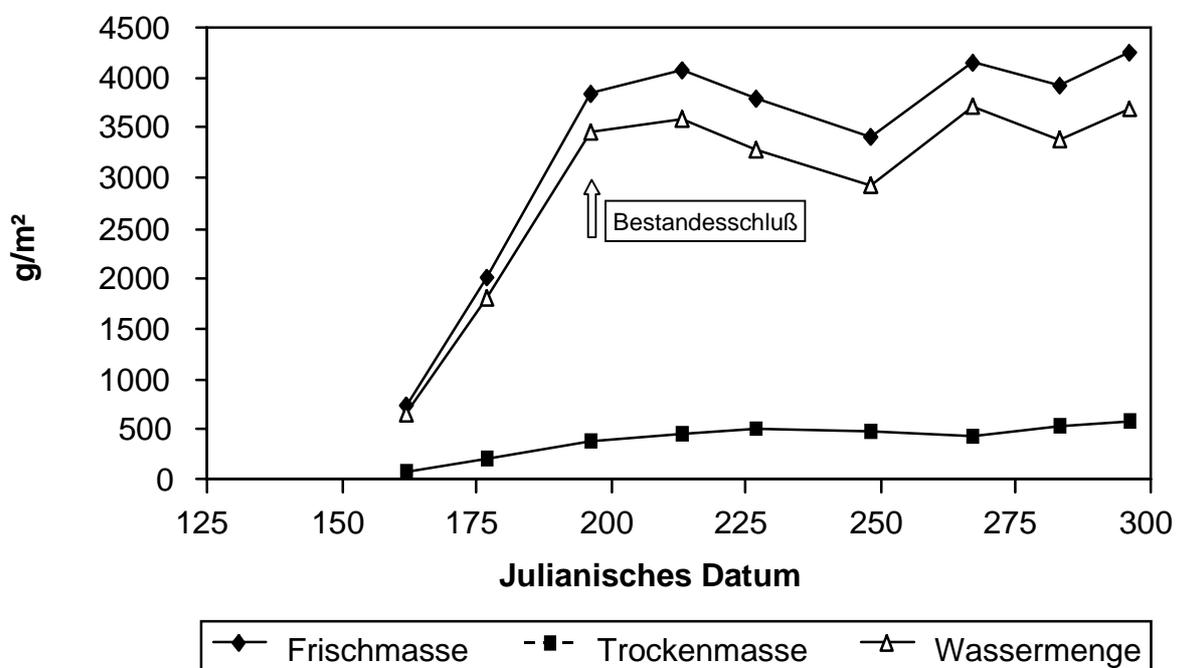


Abb. 5.1: Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmasse sowie der Wassermenge von Zuckerrübenblättern im Jahr 1996

5.1.2 Winterweizen

Die Entwicklung der Winterweizenbestände in den drei Versuchsjahren ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Ebenso wie bei den Zuckerrüben fand die Beprobung der Winterweizenfelder im Jahr 1996 erst Ende Mai statt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Winterweizen schon im Schoßstadium (EC 32) und wies eine Frischmasse von 1900 g/m² bis 5340 g/m² auf. Die Frischmasse und die Wassermenge stiegen bis Mitte Juni (Tag 163), bis zum Erreichen des Wachstumsstadiums „Mitte Milchreife“ (EC 75) (Tab. 5.1), an. Mit zunehmender Abreife nahmen die Frischmasse und die Wassermenge ab, während die Trockenmasse kontinuierlich bis kurz vor der Ernte zunahm. Am 01. August (Tag 214) zum Zeitpunkt der letzten Überfliegung vor der Ernte befand sich der Winterweizen im Stadium der Teig- bzw. Gelbreife (EC 85-87).

Im Jahr 1997 waren die Tendenzen ähnlich, jedoch wurden aufgrund der besseren Witterungsbedingungen höhere Biomassen über die gesamte Vegetationsperiode gemessen. Die höchste Frischmasse wurde am 12. Juni (Tag 163) zum Stadium „Ende Ährenschieben / Anfang Blüte“ gemessen. In diesem Jahr wurden wesentlich höhere Erntemengen als 1996 verzeichnet (Durchschnitt der Testfelder: 1997: 92 dt/ha; 1996: 77 dt/ha).

Im Jahr 1998 erreichten die Frischmasse und die Wassermenge am 16. Juni (Tag 167) zum Stadium „Frühe Milchreife“ (EC73) ihren höchsten Wert. In diesem Jahr waren die Pflanzen, bedingt durch ein warmes Frühjahr, weiter in ihrer Entwicklung als in den beiden vorangegangenen Jahren und das Ährenschieben setzte schon Ende Mai ein.

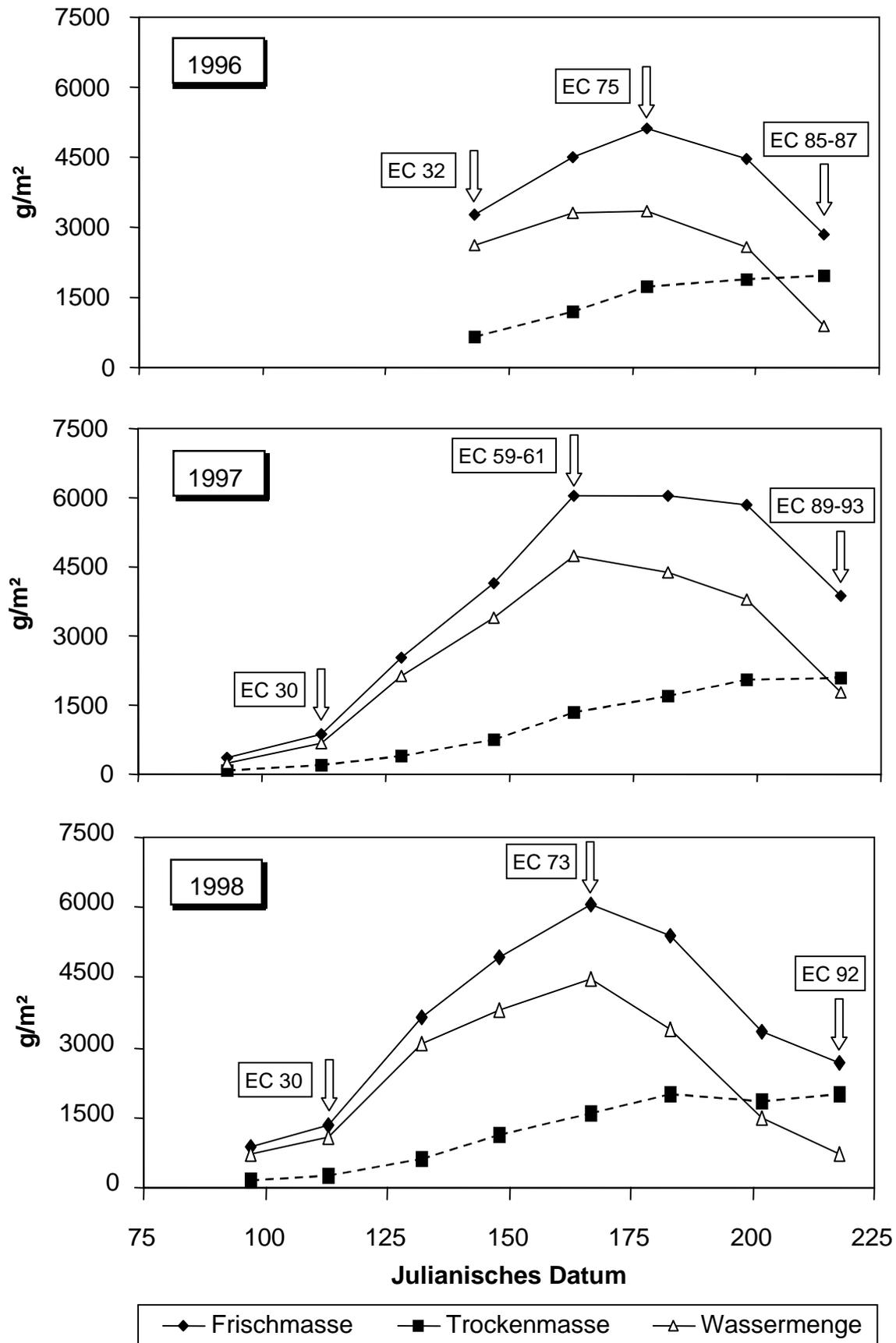


Abb. 5.2: Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Winterweizen in den Versuchsjahren 1996 – 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8)

5.1.3 Wintergerste

Bei der ersten Probenahme der Wintergerstenbestände im Jahr 1996 war bereits das Maximum der Frischmasse und Wassermenge erreicht (Abb. 5.3). Die Probenahme fand zum Wachstumsstadium „Anfang bis Mitte Ährenschieben“ (EC 51-55) statt. Im weiteren Verlauf nahmen die Frischmasse und die Wassermenge bis zum Erreichen des Wachstumsstadiums „Totreife“ (EC 92) kontinuierlich ab.

Im Jahr 1997 begann die Beobachtung des Pflanzenwachstums mit dem Stadium „Ende der Bestockung“ (EC 29), wobei Frischmassen von 1200 g/m² bis 2100 g/m² festgestellt wurden. Die höchste Frischmasse und Wassermenge wurde Anfang Mai zum Stadium „Anfang Ährenschwellen“ (EC 41) gemessen. Die nächste Messung fand Ende Mai zum Stadium „Mitte Blüte“ (EC 61-65) statt (Tab. 5.1). Hier war bereits eine verringerte Frischmasse sowie eine geringere Wassermenge als Anfang Mai zu verzeichnen.

In 1998 verliefen die Kurven der Frischmasse und der Wassermenge flacher. Es wurden jedoch zu keinem Zeitpunkt die Höchstwerte der Vorjahre gemessen; dies bedeutet allerdings nicht, daß diese Bestände schlechter entwickelt waren. Durch die relativ langen Zeitabstände von 17,5 Tagen war es allerdings nicht möglich, den Wachstumsverlauf detailliert zu beschreiben. Ähnlich wie bei Winterweizen wurden 1998 die einzelnen Entwicklungsstadien früher als in den Vorjahren erreicht.

Insgesamt liegt in allen drei Versuchsjahren eine geringere Anzahl von Meßdaten für Wintergerste vor, da diese Fruchtart eher abreift als die beiden anderen Wintergetreidearten und somit schon abgeerntet war, als Probenahmen von Winterweizen und Winterroggen noch möglich waren.

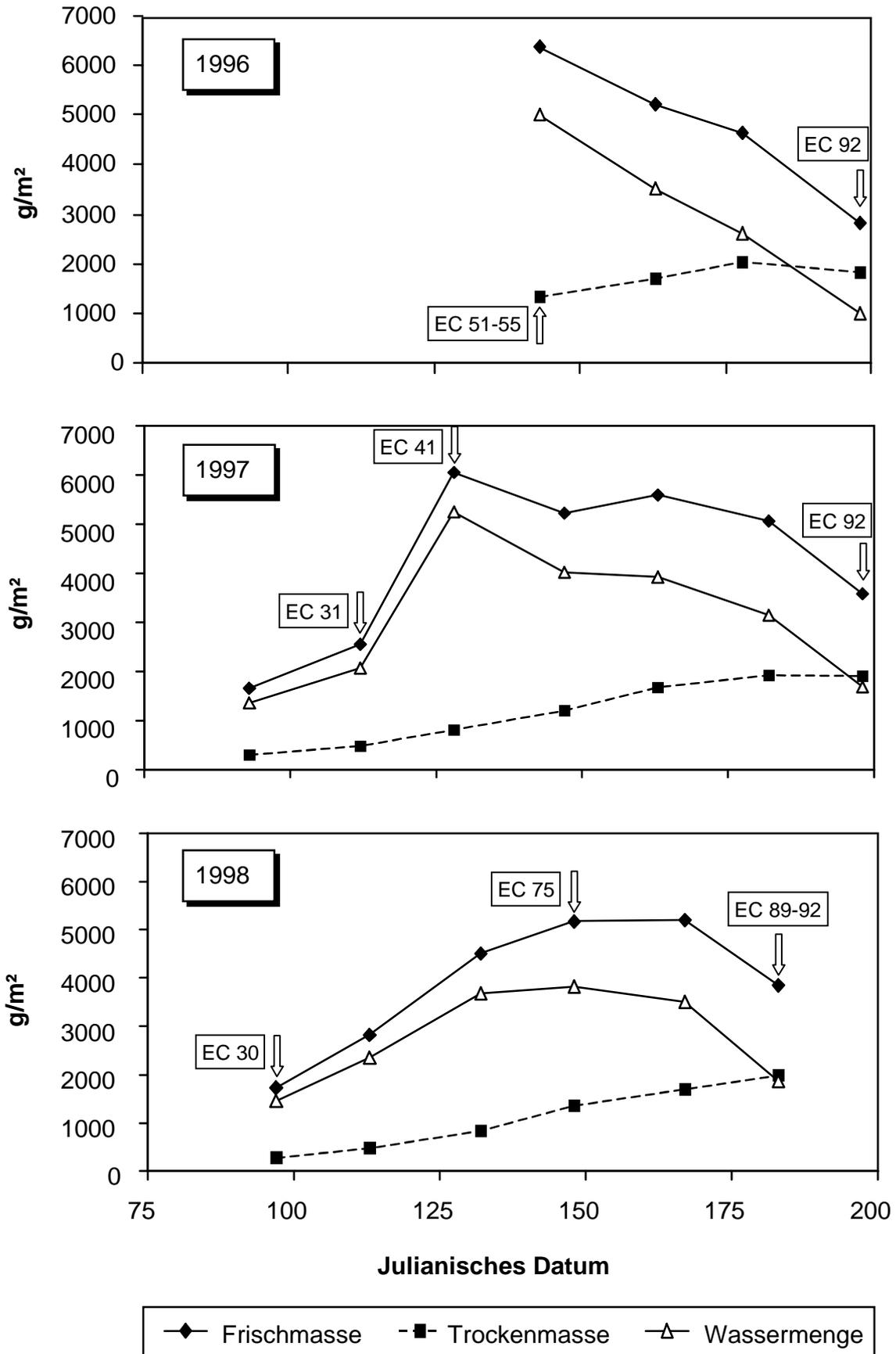


Abb. 5.3: Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Wintergerste in den Versuchsjahren 1996 – 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8)

5.1.4 Winterroggen

Die Entwicklung der Winterroggenfelder ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Ebenso wie bei der Wintergerste wurde im Jahr 1996 Ende Mai die höchste Frischmasse und Wassermenge zum Stadium „Ende Ährenschieben“ (EC 55-59) gemessen. Im Verlauf der Vegetationsperiode nahmen beide Werte kontinuierlich ab, während die Trockenmasse stetig anstieg. Der letzte Beprobungstermin war im Jahr 1996 der 21. Juli (Tag 203). Der Winterroggen hatte zu diesem Zeitpunkt das Wachstumsstadium „Totreife“ (EC 92) erreicht.

Im Jahr 1997 und 1998 zeigten sich ähnliche Tendenzen wie bei Wintergerste, wobei auch hier die Entwicklungsstadien im Jahr 1998 zu einem früheren Zeitpunkt erreicht wurden als in den beiden Jahren zuvor (Tab. 5.1). Im Jahr 1997 zeigte sich deutlich eine starke Zunahme der Frischmasse bis zum Wachstumsstadium „Beginn Ährenschieben“ (EC 51) und erreichte ihr Maximum Anfang Juli.

Die Beobachtungen im Jahr 1998 begannen mit dem Wachstumsstadium „1-Knoten-Stadium“ (EC 31), also kurz nach dem Schoßbeginn. Im Anschluß konnte eine starke Zunahme der Frischmasse bis zum Stadium „Mitte/Ende Ährenschieben“ (EC 55-59) verzeichnet werden. Ein weiterer leichter Anstieg der Frischmasse fand bis zum Erreichen der „Frühen Teigreife“ (EC 83) statt. Danach erfolgte die kontinuierliche Abnahme bis zur „Totreife“ (EC 82).

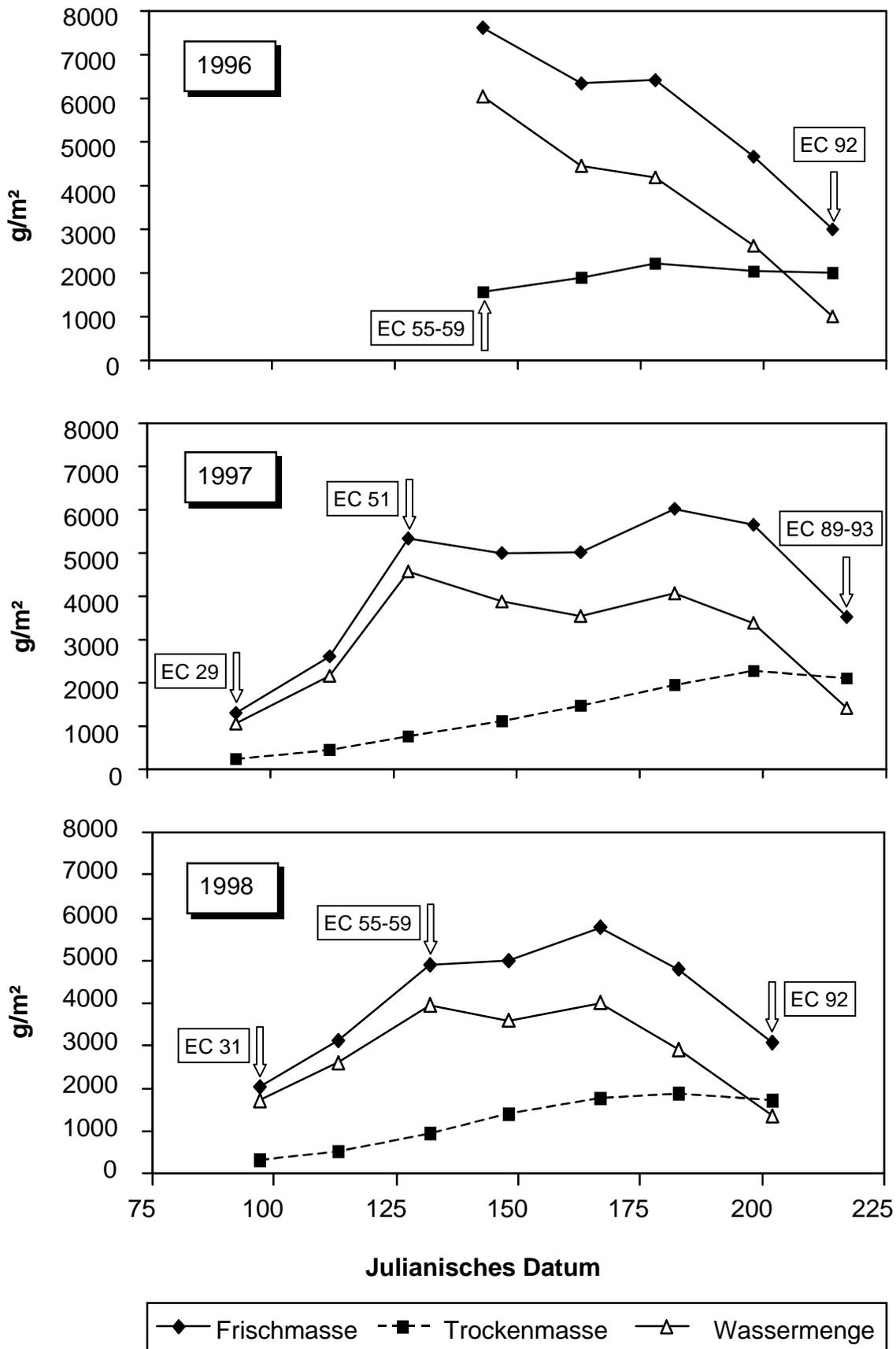


Abb. 5.4: Entwicklung der über die Testfelder gemittelten Frisch- und Trockenmassen sowie der Wassermengen von Winterroggen in den Versuchsjahren 1996 – 1998 (EC-Stadien vgl. Anhang Tab. 8.8)

5.1.5 Wachstumsstadien der Wintergetreidearten

In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht der Entwicklungsstadien der untersuchten Getreidearten in den drei Jahren aufgelistet. Ein direkter Vergleich der Entwicklungsphasen der verschiedenen Jahre ist nicht möglich, da die EC-Stadien nur zu den jeweiligen Überfliegungen aufgenommen wurden und somit nicht zu den gleichen Terminen in den einzelnen Jahren. Jedoch ist deutlich zu erkennen, daß die einzelnen Entwicklungsphasen im Jahr 1998 für alle drei Getreidearten früher eintraten als in den beiden Jahren zuvor. Dies läßt sich durch das warme Frühjahr im letzten Versuchsjahr erklären und ist für die spätere Interpretation der Radarrückstreuprofile von Bedeutung.

Tab. 5.1: EC-Wachstumsstadien der Wintergetreidearten in den drei Versuchsjahren; BBCH-Code nach TOTTMANN (1987) (vgl. Anhang Tab. 8.8)

	Winterweizen			Wintergerste			Winterroggen		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
14. Mär	n.b.			n.b.			n.b.		
03. Apr		23			29			29	
07. Apr			28			30			31
18. Apr	n.b.			n.b.			n.b.		
22. Apr		30			31			32	
23. Apr			30			32			33
05. Mai*	n.b.			n.b.			n.b.		
08. Mai		32			41			51	
12. Mai			32			55-59			55-59
22. Mai	32			51-55			55-59		
27. Mai		43			61-65			61-65	
28. Mai			55			75			69
11. Jun	59-65			77-83			69-71		
12. Jun		59-61			75			71	
16. Jun			73			85			83
26. Jun	75			87			83-85		
01. Jul		73-75			87			85	
02. Jul			77-83			89-92			85
16. Jul	77-83			92			87		
17. Jul		77-83			92			87	
21. Jul			89			abg.			92
01. Aug	85-87			abg.			92		
05. Aug		89-93			abg.			89-93	
06. Aug			92			abg.			abg.

n.b.: nicht bonitiert; abg.: abgeerntet; *ERS Aufnahme nicht angefordert

5.2 Datenverknüpfung von GIS und Radardaten

In der folgenden Abbildung ist die erfolgreiche Überlagerung eines Dreifarbenkomposits mit GIS-Daten dargestellt.



Abb. 5.5: Dreifarbenkomposit dreier ERS-2-Intensitätsbilder; blau: 8. Mai 1997, grün: 12. Juni 1997, rot: 17. Juli 1997. Überlagert mit GIS-Vektoren: ATKIS-Daten (grün: Verkehrswege; blau: Gewässer; rosa: Siedlung) sowie der Flächennutzung (gelb: Schlaggrenzen)

Die Abbildung zeigt zwei wesentliche Bestandteile der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise:

Es zeigt sich, daß die Verwendung multitemporaler Satellitenaufnahmen (in diesem Fall Daten vom 08.05.97, 12.06.97 sowie 17.07.97) geeignet ist, um Wachstumsveränderungen unterschiedlicher Kulturarten nachzuvollziehen. Felder mit hoher Radarrückstreuung im Mai sind in Abbildung 5.5 hellblau dargestellt. Dies gibt einen Hinweis darauf, daß nur eine geringe Bodenbedeckung vorliegt und es sich vornehmlich um Sommerungen handelt. Im Gegensatz dazu sind Felder mit einer hohen Radarrückstreuung im Juli rötlich gekennzeichnet. Hier handelt es sich vorwiegend um Winterungen, da diese entweder abgereift oder schon abgeerntet sind.

Satellitenaufnahmen früherer Termine sind jedoch nicht geeignet, um eine Trennung von Fruchtarten zu realisieren. Selbst eine Unterscheidung von Winterungen und Sommerungen gelang in unseren Untersuchungen im Frühjahr nicht: die Radarrückstreuung der einzelnen Fruchtarten ist zu dieser Zeit zu sehr von den Bodeneigenschaften geprägt.

Weiterhin zeigt die Abbildung 5.5, daß die Verknüpfung von Satellitendaten und GIS-Daten erfolgreich durchgeführt werden konnte. Bei den überlagernden Vektoren handelt es sich zum einen um ATKIS-Daten, mit denen gezielt Bereiche wie Gewässer, Siedlung und Verkehrswege ausmaskiert werden können (vgl. Kap. 4.4.2). Zum anderen sind in gelber Farbe die Grenzen der einzelnen Felder dargestellt. Innerhalb dieser Flächen ist es nun möglich, einen Einzug von 20 m vorzunehmen, um die für die Interpretation der Radarbilder schwierigen Mischpixel im Bereich der Feldgrenzen zu eliminieren. Im Folgenden können die aussagefähigen Mittelwerte der daraus resultierenden Restflächen extrahiert werden (vgl. Kap. 4.4), die wiederum für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet wurden.

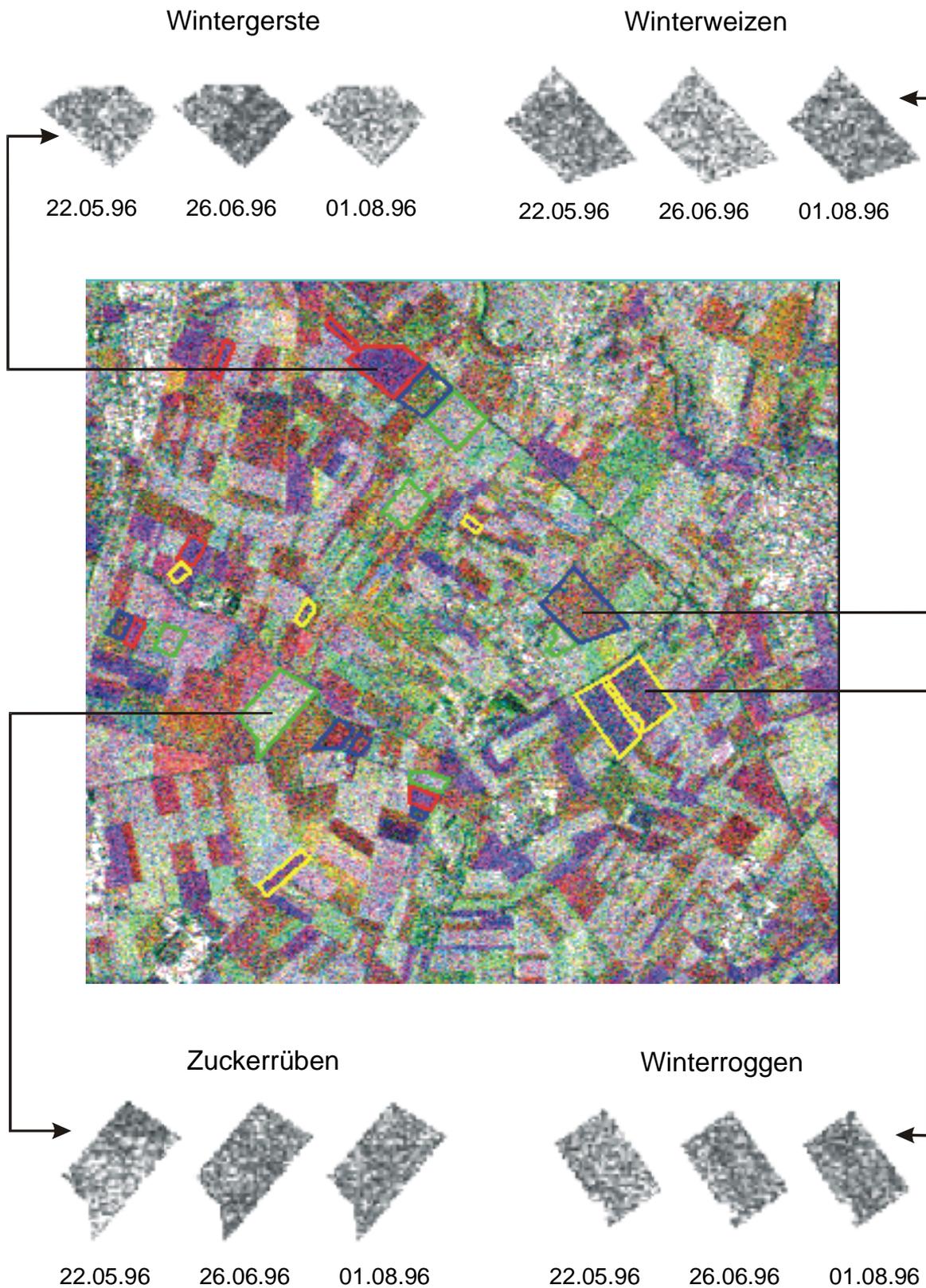


Abb. 5.6: Dreifarbenkomposit dreier ERS-Intensitätsbilder; blau: 22.05.96, rot: 26.06.96, grün: 01.08.96 mit den Testfeldern (Umrandung: rot: Wintergerste; blau: Winterweizen; gelb: Winterroggen; grün: Zuckerrüben) sowie exemplarisch die Grauwerte der Intensitäten der einzelnen Fruchtarten zu den jeweiligen Terminen

In Abbildung 5.6 ist ein Dreifarbenkomposit von 1996 dargestellt, in dem die Testfelder des Jahres 1996 farblich umrandet sind. Exemplarisch sind je Fruchtart die Grauwerte der Intensitäten der drei verschiedenen ERS Aufnahmen zu sehen. Diese Abbildung verdeutlicht zwei wesentliche Punkte der vorliegenden Untersuchung: Zum einen wird deutlich, wie notwendig die feldbezogene Auswertung der Satellitenaufnahmen ist (vgl. Kap. 2.5.2). Die Grauwerte der untersuchten Felder variieren zu jedem Termin beträchtlich und eine pixelbezogene Auswertung würde zu unzähligen Fehlklassifizierungen führen. Zum anderen lassen sich zwar Unterschiede zwischen den Grauwerten der einzelnen Fruchtarten zu einem bestimmten Termin erkennen; diese Unterschiede einer einzelnen ERS Aufnahme reichen jedoch keinesfalls für eine eindeutige Einteilung zu einer Kultur. Eine weitergehende operationelle Anwendung wie z.B. die Fruchtartenklassifikation mittels einer ERS Szene ist somit nicht sinnvoll

Bei Verwendung des Dreifarbenkomposits (in diesem Fall die Termine: 22.05., 26.06. und 01.08.1996) kann man hingegen anhand der unterschiedlichen Farbgebung die fruchtartentypische Radarrückstreuung erkennen und somit auch eine klarere Unterteilung in die Kulturen vornehmen: so zeichnen sich z.B. die Zuckerrüben durch eine hellblaue Färbung aus, da die Radarrückstreuung im Mai am höchsten war. Das Winterweizenfeld hat aufgrund der höheren Radarrückstreuung Anfang August eine mehr grünliche Farbgebung.

Die Abbildung 5.6 verdeutlicht ebenso wie Abbildung 5.5, daß die Verwendung multitemporaler Aufnahmen eine Unterscheidung der Fruchtarten wesentlich verbessern kann.

5.3 Beschreibung von Pflanzenbeständen anhand multitemporaler Satellaufnahmen

5.3.1 Zustandsbeschreibung von Zuckerrüben

Die Radarrückstreuwerte der einzelnen Felder einer Fruchtart zu einem bestimmten Zeitpunkt oder im Verlauf einer Wachstumsperiode sind eine wesentliche Grundlage für die Klassifikation sowie für die Zustandsbeschreibung der jeweiligen Fruchtart.

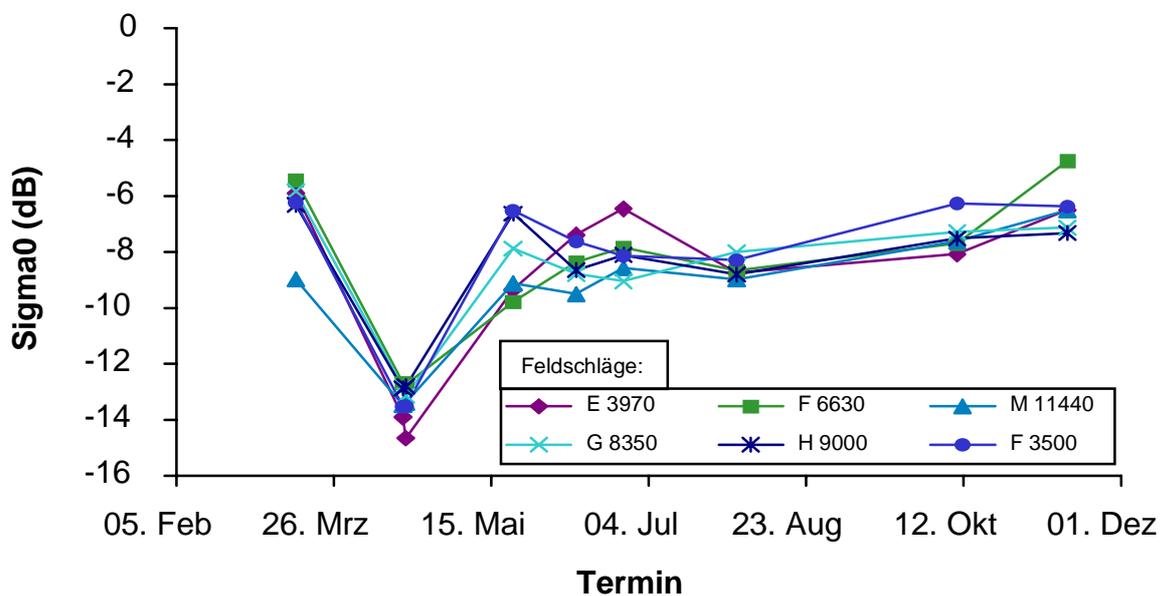


Abb. 5.7: Verlaufskurven der mittleren Radarrückstreuwerte der Zuckerrübenfelder im Jahr 1996 im Testgebiet Weilerswist

Wird der Verlauf der mittleren Radarrückstreuwerte der 6 Zuckerrübenfelder im Testgebiet Weilerswist betrachtet (Abb. 5.7), so zeigt sich innerhalb des Jahres 1996 ein charakteristisches Rückstreuprofil: eine hohe Radarrückstreuung im März, gefolgt von einer geringen Radarrückstreuung im April und eine weitgehend gleichbleibend hohe Radarrückstreuung im Zeitraum von Mai bis Oktober, d.h. in dem Zeitraum, in dem sich die Blattfläche stark entwickelt. Die Schwankungen der Rückstreuwerte zwischen den einzelnen Feldern zum gleichen Aufnahmeterrain waren relativ gering, obwohl die Blattmasse der Zuckerrüben stark variierte: so wies z.B. das Feld F6630 während der gesamten Vegetationsperiode nur 50-65% der Frischmasse von Feld F3500 auf.

Auch zum Ende der Vegetationsperiode waren trotz hoher Ertragsunterschiede nur geringe Unterschiede in der Radarrückstreuung zu verzeichnen: die Erntemengen der Zuckerrüben lagen zwischen 360 dt/ha (Feld E3970) und 621 dt/ha (Feld F3500). Dieser starke Unterschied spiegelte sich jedoch nicht in den Rückstreuwerten wider.

Auch weitere Bestandesparameter der Zuckerrüben wie die Trockenmasse, der Blattflächenindex oder die Pflanzenhöhe standen in keinem direkten Zusammenhang mit dem Radarsignal. Die Radarrückstreuung erfolgt weitgehend unabhängig von diesen Pflanzenparametern. Es ist deshalb zu vermuten, daß als Ursachen der Radarrückstreuung hauptsächlich die Geometrie und Orientierung der Blätter in Frage kommen.

In der Literatur finden sich ähnliche Ergebnisse: so konnten GODDING et al. (1989) bei Befliegungen mit nicht abbildenden Scatterometern (X_{VV}) ein gleichbleibend hohes Niveau der Radarrückstreuung trotz des fortschreitenden Wachstums der Rüben nachweisen. Erklärt wird dieses Phänomen mit der Geometrie der Rübenpflanzen: die vom Sensor abgestrahlte Energie wird zum Großteil von den im günstigen Winkel liegenden Rübenblättern direkt reflektiert. BOUMAN und VAN KASTEREN (1991) beobachteten unter Verwendung eines X-Band-Scatterometers denselben Effekt: nach Erreichen eines 80%igen Bodenbedeckungsgrades blieb die Radarrückstreuung auf einem gleichen Niveau. Auch hier wird die Pflanzengeometrie und die Reihenrichtung als Ursache für die Reflexion angesehen und die Beschreibung des Pflanzenwachstums bzw. eventuelle Erkennung von Krankheiten nach einer Bodenbedeckung von 80% als nicht möglich angenommen. Ähnliche Verläufe der ERS-Radarrückstreuung von Zuckerrübenfeldern konnten WOODING et al. (1995) beobachten. CLEVERS et al. (1996) sowie SCHMULLIUS und NITHACK (1997) führten das Radarrückstreusignal des ERS-1 bis zur vollständigen Bodenbedeckung auf ein Mischsignal von Bodenfeuchte und Biomasse zurück. Danach beobachteten sie ebenfalls ein gleichbleibendes Rückstreusignal bis zur Ernte. SPÖNEMANN und SCHIECHE (1997) bestätigen diese Ergebnisse, konnten jedoch eine Abnahme der Reflexion vor der Ernte durch Erschlaffung der Blätter erkennen. KEITHLEY et al. (1997) geben generell an, daß bei C-Band mit VV-Polarisation großblättrige Kulturarten eine höhere Rückstreuung als andere Fruchtarten aufweisen. Dieses Phänomen ist hauptsächlich auf die physikalische Struktur der Pflanzendecke

zurückzuführen und weniger auf die unterliegenden Bodeneigenschaften (HOLMES, 1990).

Auch in der vorliegenden Untersuchung ist festzuhalten, daß es nicht möglich ist, ausschließlich anhand von ERS SAR Daten eine Zustandsbeschreibung von Zuckerrüben durchzuführen. In vorausgehenden Untersuchungen (GNOSA, 1997) mit einem X- und C- Band Scatterometer konnten Veränderungen der Pflanzenparameter von Zuckerrüben ab zwei Wochen nach dem Bestandesschluß ebenfalls nicht mehr nachvollzogen werden.

5.3.2 Wachstumsstadien von Wintergetreidearten

Im Vergleich zu den Zuckerrüben veränderten sich die Rückstreuwerte der Wintergetreidearten im Verlauf einer Vegetationsperiode wesentlich stärker. In den drei Versuchsjahren zeigten sich bei den Getreidearten Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen charakteristische Profile der Radarrückstreuung im Verlauf der Hauptvegetationsperiode. Die höhere Sensibilität des C-Bandes gegenüber schmalen Halmen bzw. kleinen Blättern liefert einen Erklärungsansatz, warum die Rückstreuprofile der Getreidearten ausgeprägter als die der Zuckerrüben sind (BARONTI et al., 1995). Den gleichen Effekt beschreibt KÜHBAUCH (1991) auch für das X_{VV} -Band. Die von BOUMAN und VAN KASTEREN (1991) gemessene geringere Rückstreuintensität von Weizen und Gerste im Vergleich zu Kartoffeln und Zuckerrüben erklärt er durch die lockere Struktur der Getreidebestände: aufgrund der aufrechten Blatthaltung, senkrechten Orientierung der Stengel und vermutlich infolge der relativ klein dimensionierten Blatt- und Stengelorgane wird eine mehr diffuse Radarrückstreuung verursacht als an den planophil orientierten Blättern der Zuckerrüben und Kartoffeln.

Typisch für alle drei Getreidearten ist eine hohe Radarrückstreuung im Frühjahr, die mit zunehmendem Pflanzenwachstum abnimmt und im Mai bzw. Juni ein Reflexionsminimum bzw. Absorptionsmaximum erfährt (Abb. 5.8). Danach erfolgt im Verlauf der Abreife ein Anstieg der Radarrückstreuung. Die Absorptionsmaxima der verschiedenen Getreidearten sind zeitlich verschoben und zwar genau in der Reihenfolge, in der auch die Abreife der einzelnen Getreidearten erfolgt. REICH und GÜTH (1998) beobachteten dieses Verhalten ebenfalls für Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste.

Die hohe Radarrückstreuung zu Anfang des Jahres wird überwiegend durch Eigenschaften des Bodens verursacht und nur im kleineren Maße durch die geringe Bodenbedeckung aufgrund der Pflanzenbiomasse. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Radarrückstreuung und Bodenfeuchte bzw. Bodenrauhigkeit konnte jedoch in der vorliegenden Untersuchung zu keinem Zeitpunkt festgestellt werden.

In Übereinstimmung dazu steht die Aussage von BAN und HOWARTH (1998). Die Autoren führen ebenso die hohe Radarrückstreuung aller Fruchtarten im Frühjahr hauptsächlich auf den Einfluß des Bodens zurück, wenn gar keine oder nur wenig Bodenbedeckung vorliegt.

Ebenso stellten WOODING et al. (1993) den Einfluß des Bodens auf das Radarsignal im Frühjahr fest. Die Rückstreuprofile einer Getreideart haben unabhängig von den Bodenverhältnissen während der Vegetation einen ähnlichen Verlauf - die Streubreite der Radarrückstreuquerschnitte zwischen den Feldern in der frühen Vegetationsphase variiert jedoch stark. Die hohe Variation der Radarrückstreuwerte in frühen Wachstumsstadien führen sie auf die unterschiedliche Vegetationsdichte der Felder zurück: Felder mit hohem Bodenbedeckungsgrad weisen geringere Rückstreuwerte auf und umgekehrt.

In der vorliegenden Studie konnte keine eindeutige Ursache für die abnehmende Radarrückstreuung im weiteren Verlauf des Frühjahres gefunden werden. Es ist davon auszugehen, daß sowohl der abnehmende Bodeneinfluß - durch die überlagernde Pflanzendecke - als auch die verstärkte Ankopplung der Radarstrahlen an die Halme durch das Streckungswachstum die Hauptursachen für die verringerte Reflexion darstellen. BAN und HOWARTH (1998) erklären die abnehmende Radarrückstreuung mit der zunehmenden Dämpfung durch die Vegetation. Diese Dämpfung tritt vor allem bei VV-Polarisation auf, da hier die Radarstrahlen an die vertikal orientierten Getreidehalme ankoppeln können (BRISCO et al., 1990). Als weitere Ursache führen SCHMULLIUS et al. (1993) sowie SCHMULLIUS und NITHACK (1995) an, daß durch das Schossen eine Veränderung der Oberflächenrauhigkeit eintritt: von den breiten Primärblättern (hohe Radarrückstreuung) bis zur Streckung der Pflanzen. Betrachtet werden konnte dieses Phänomen der Abnahme der Radarrückstreuung nur bei VV-Polarisation.

Die ansteigende Radarrückstreuung während der Abreife läßt sich ebenfalls auf keinen einzelnen Effekt zurückführen. Hier wird die Rückstreuung von verschiedenen Faktoren beeinflusst: zum einen wird der Pflanzenbestand durchlässiger aufgrund des geringeren Wassergehaltes und die Radarstrahlen werden vermutlich vom Boden vermehrt reflektiert. SPÖNEMANN und SCHIECHE (1997) erklären die ansteigende Reflexion mit Beginn der Ährenreife durch die veränderte Oberflächenstruktur: der Bestand wird lichter, die Volumenstreuung vermindert sich und von der Bodenoberfläche findet eine stärkere Radarrückstreuung statt. Ein weiterer Grund für die höhere Radarrückstreuung ist in dem Erscheinen der Ähren zu sehen. Bei Messungen über einem Weizenfeld konnten SIQUEIRA und SARABANDI (1996) nachweisen, daß die Ähren einen erheblichen Anteil an der Rückstreuung haben. Die Beeinflussung der Radarrückstreuung durch den Boden und die Bestandesmerkmale der Pflanzendecke ist quantitativ allerdings nicht zu differenzieren.

BROWN et al. (1993) sowie WOODING et al. (1995) erklären die zunehmende Reflexion mit einer erhöhten Penetration der Mikrowellen durch den Bestand und somit zunehmendem Einfluß des Bodens. SCHMULLIUS et al. (1993) hingegen führen die erhöhte Radarrückstreuung auf das Ährenschieben - und somit Veränderung der Pflanzengeometrie und Oberflächenrauigkeit - zurück. Ähnlich interpretieren WOODING et al. (1993), die ein Reflexionsminimum zum Zeitpunkt der Blüte bei Winterweizen ermittelten und zu diesem Zeitpunkt bei dichter Pflanzendecke die Volumenstreuung als Hauptursache für das Rückstreuverhalten - unabhängig von den Bodeneigenschaften und Wetterbedingungen - ansehen.

Der Unterschied zwischen den Rückstreuprofilen der Getreidearten liegt in der Ausprägung der einzelnen Verläufe.

Das Absorptionsmaximum von Wintergerste liegt zeitlich vor den Absorptionsmaxima der beiden anderen Getreidearten Anfang bzw. Ende Mai (Abb. 5.8) und das Rückstreusignal ist zudem stärker gedämpft, d.h. es wird ein eindeutiges Reflexionsminimum erreicht. In allen drei Meßjahren wurde das Absorptionsmaximum von Wintergerste zum Zeitpunkt der Wachstumsstadien Ährenschieben bzw. Blüte beobachtet (Abb. 5.9). Weiterhin ist in allen drei Versuchsjahren auffällig, daß der nächste Aufnahmeterrain nach dem Erreichen des Reflexionsminimums von Wintergerstenbeständen eine recht hohe Radarrückstreuung im Vergleich zu den Rückstreuprofilen von Winterweizen und Winterroggen aufweist. Diese hohe Radarrückstreuung

wird von SPÖNEMANN und SCHIECHE (1997) auf die Ausbildung der stark begranneten, waagrecht stehenden Ähren, die eine besonders starke Reflexion verursachen, zurückgeführt.

Im Vergleich zur Wintergerste, deren Rückstreuprofil im Zeitraum März bis Mai einen V-förmigen Verlauf nimmt, ist der Verlauf der Rückstreukurve von Winterweizen weniger markant. Das Reflexionsminimum wird Ende Mai bzw. Anfang Juni (Abb. 5.8) erreicht und der nachfolgende Anstieg der Radarrückstreuung der Winterweizenfelder ist weniger stark ausgeprägt als bei Winterroggen und Wintergerste. Es war somit nicht möglich, den Signaturverlauf der Radarrückstreuung mit einem bestimmten Wachstumsstadium in Verbindung zu bringen. In allen drei Versuchsjahren fällt jedoch der Bereich der minimalen Radarrückstreuung des ERS-C-Band SARs in die Entwicklungsstadien zwischen Ährenschieben und Blüte (Abb. 5.9).

Die Rückstreuprofile von Winterroggen nehmen eine Zwischenstellung ein: das Erreichen des Reflexionsminimums findet meist Ende Mai statt. Hierbei ist auffällig, daß in dem Bereich die Absorption geringer ist als bei den beiden anderen Getreidearten (Abb. 5.8). Das Reflexionsminimum trat in den drei Versuchsjahren zum Zeitpunkt der Blüte ein (Abb. 5.9). In den nachfolgenden Satellitenaufnahmen steigt die Radarrückstreuung bis zu den Wachstumsstadien Teigreife/Gelbreife wieder an. Das Radarrückstreuprofil zeichnet sich im Zeitraum März bis Juli durch einen U-förmigen Verlauf aus.

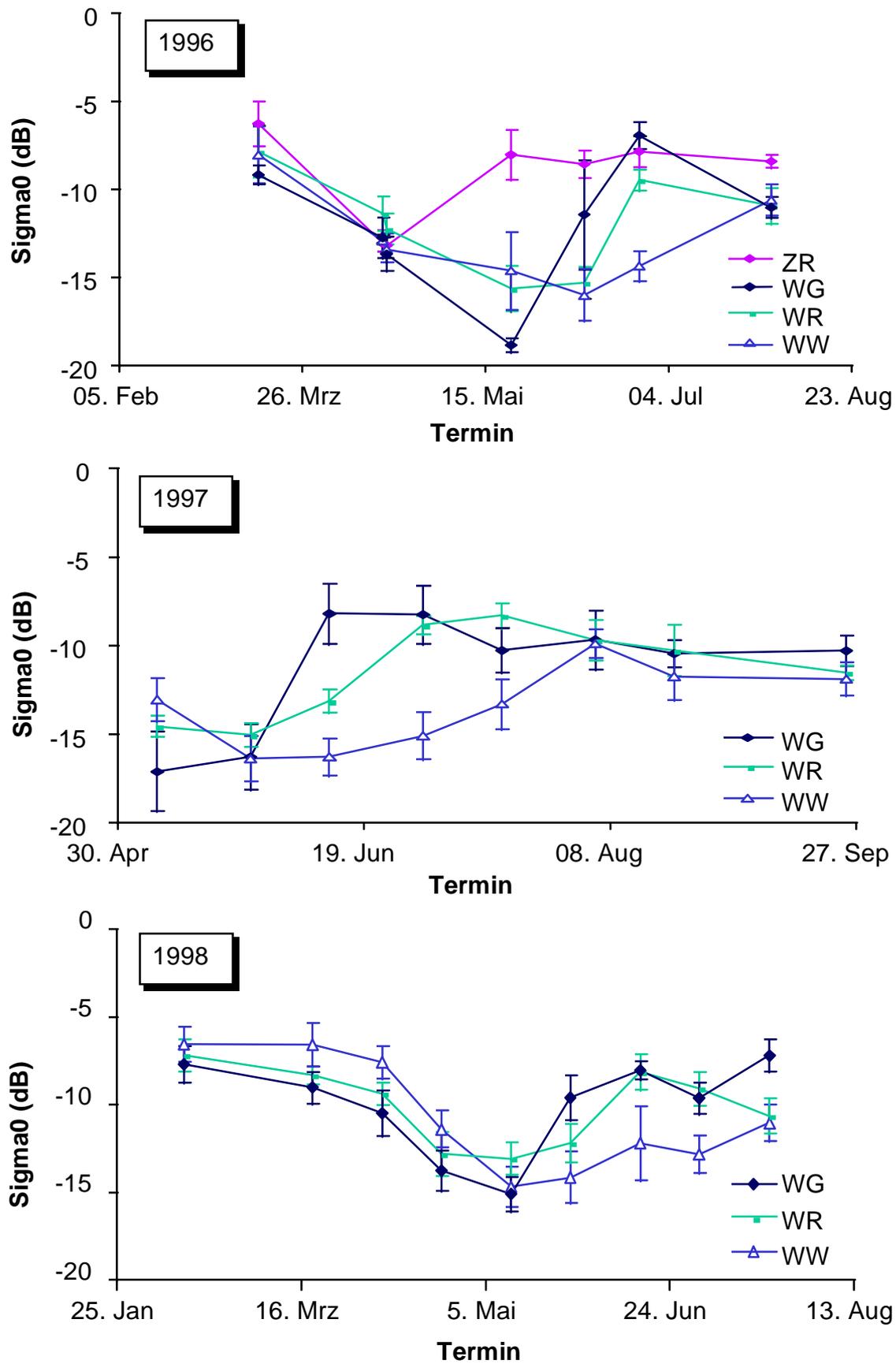


Abb. 5.8: Verlauf der mittleren Radarrückstreuung der Getreidearten in den Jahren 1996-1998 mit Standardabweichung sowie von Zuckerrüben in 1996

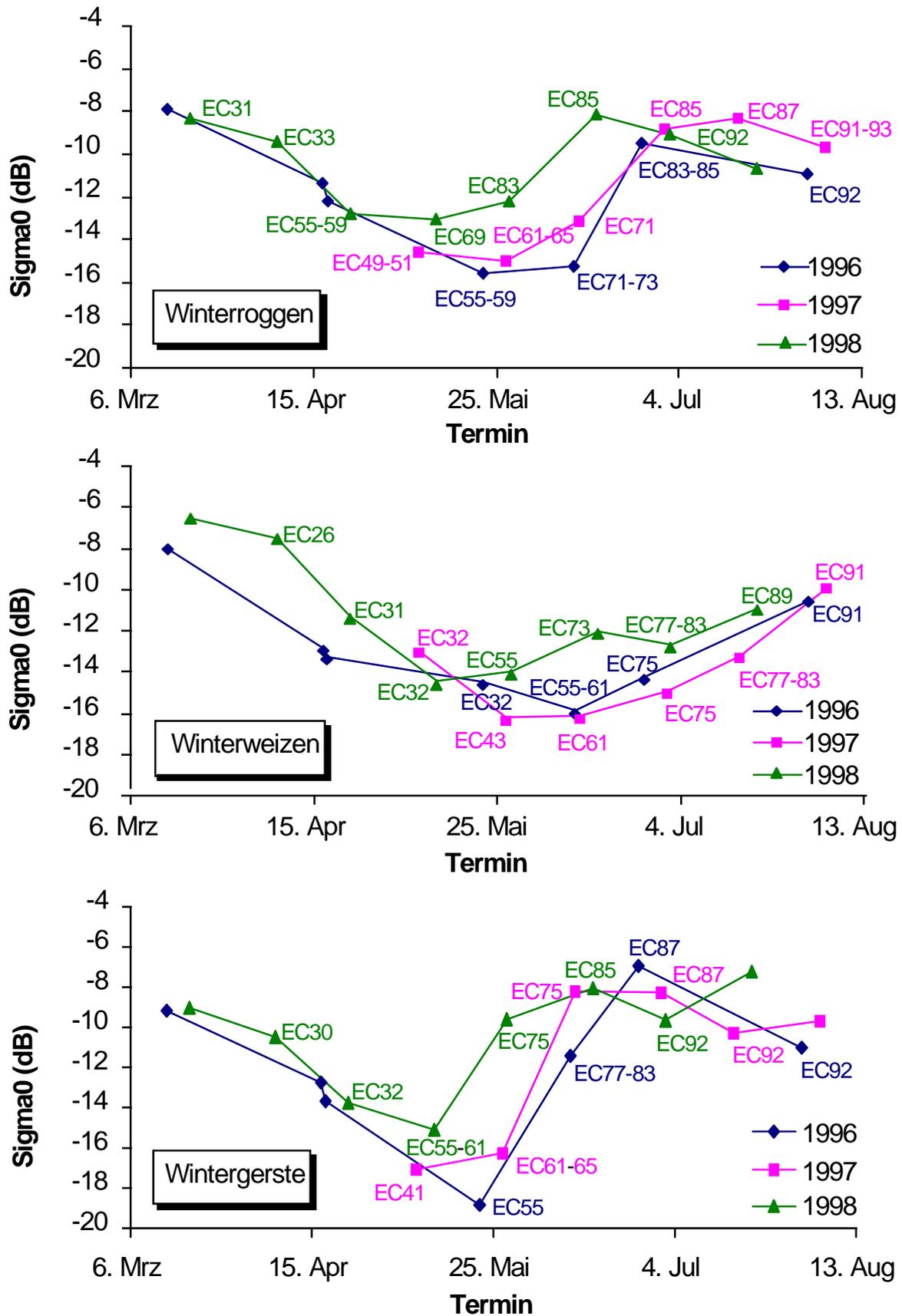


Abb. 5.9: Jahresabhängige Variation der mittleren Radarrückstreuung von Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste in den Versuchsjahren 1996 - 1998 (mit EC-Stadien)

Ausgehend von einem vorgegebenen Raster der Radaraufnahmen und einem nach Jahren und Standorten verschiedenen Vegetationsverlauf kommen in der Literatur unterschiedliche Äußerungen bezüglich der Entwicklungsstadien von Getreidearten mit maximalen Rückstreuintensitäten zustande.

Im Vergleich zu den eigenen Ergebnissen beobachteten BAN und HOWARTH (1998) ein Absorptionsmaximum bei Winterweizen und Gerste erst zum Wachstumsstadium der Fruchtbildung. Dies läßt sich durch die oben erwähnten festen, relativ weit auseinander liegenden Termine der Satellitenaufnahmen erklären: so ist es infolge der Wiederholrate von 17 bzw. 35 Tagen nicht möglich, genaue Aussagen darüber zu machen, zu welchem Wachstumsstadium z.B. das Absorptionsmaximum tatsächlich erreicht wird. CLEVERS et al. (1996) beschreiben eine abfallende Radarrückstreuung während des Schossens und schon eine ansteigende Radarrückstreuung nach dem Ährenschieben und während der Fruchtbildung. MANGOLINI und ARINO (1996) konnten einen Abfall der Radarrückstreuung zum Zeitpunkt der Bestockung und während des Ährenschiebens feststellen. WOODING et al. (1993) beobachteten ebenfalls bei Winterweizen ein Absinken der Rückstreuung von der Bestockung bis zum Erreichen der maximalen Frischmasse zum Zeitpunkt der Blüte, gefolgt von einem Anstieg während der Fruchtbildung bis zur Ernte.

Zukünftige Radarsatelliten mit hohen Wiederholraten werden das Potential der genaueren Beobachtung jedoch vorweisen. Die Kenntnis über den Zeitpunkt des Ährenschiebens bzw. der Blüte könnte einen wertvollen Hinweis über den Beginn der Kornfüllungsphase geben. Diese Information wiederum könnte in Verbindung mit einem Wachstumssimulationsmodell zur Ertragsschätzung genutzt werden (vgl. Kap. 5.4).

In Abbildung 5.10 sind die wesentlichen Merkmale der Radarrückstreu曲ven von Wintergetreide vereinfacht dargestellt sowie einige Erklärungsansätze hierzu aus der Literatur zusammengefaßt. Erstmals werden in dieser Arbeit die Abschnitte „Dämpfung bis Ährenschieben/Blüte“ und „Wiederanstieg nach Ährenschieben/Blüte“ im folgenden Kapitel getrennt untersucht, da sowohl aus der Literatur als auch aus eigenen Ergebnissen hervorgeht, daß in beiden Zeitabschnitten unterschiedliche Reflexionsmechanismen stattfinden und somit auch unterschiedliche Parameter zu betrachten sind.

<u>Dämpfung bis Ährenschieben / Blüte:</u>	<u>Wiederanstieg nach Ährenschieben / Blüte:</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Längenwachstum der Halme sowie sinkender Bodeneinfluß (Brisco et al., 1990; Schmullius & Nithack, 1994; Borgeaud et al., 1995; Clevers et al., 1996; Ban & Howarth, 1998; Ferrazzoli et al., 1999) - Anstieg der Wassermenge des obersten Stengelabschnitts und der Ähre sowie abnehmender Bodeneinfluß (Gnosa, 1997) - verstärkte Volumenstreuung durch Pflanzenwachstum und abnehmender Bodeneinfluß (Wooding et al., 1993) 	<ul style="list-style-type: none"> - Verringerung des Wassergehaltes der Pflanzen sowie zunehmender Bodeneinfluß (Wright et al., 1993; Brown et al., 1994; Schmullius & Nithack, 1994) - Abwinkeln der Ähre, Einrollen der Blätter, Verringerung des Wassergehaltes der Pflanzen sowie zunehmender Bodeneinfluß (Ulaby & Bush, 1976) - Veränderung der Oberflächenrauigkeit durch die Ährenentwicklung (Schmullius et al., 1993; Schmullius & Nithack, 1995) - Ausbildung stark begrannter, waagrecht stehender Ähren bei Wintergerste sowie verringerte Volumenstreuung und zunehmender Bodeneinfluß (Spönemann & Schieche, 1997)

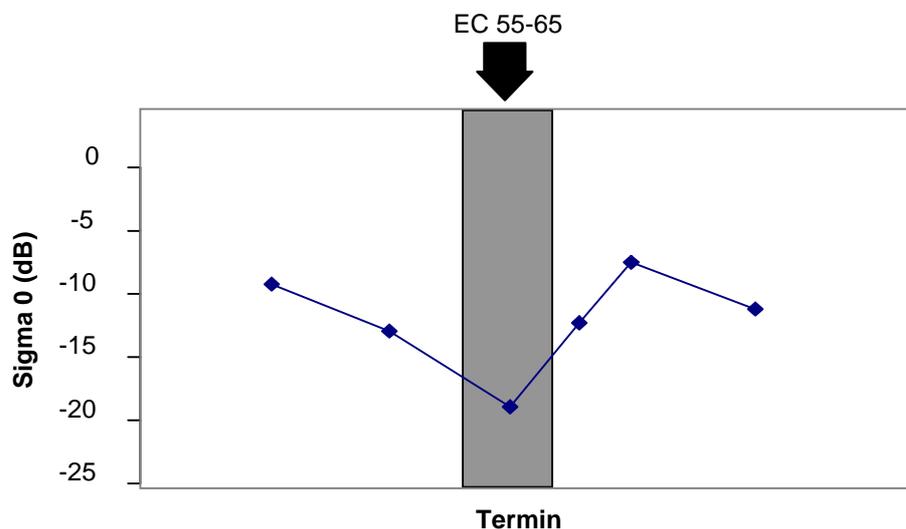


Abb. 5.10: Idealisierte Radarrückstreu曲ve von Wintergetreide innerhalb eines Jahres sowie Erklärungsansätze in der Literatur

Die unterschiedliche Ausprägung der Radarrückstreu曲profile aufgrund der fruchtart-spezifischen Entwicklungsverläufe kann als wichtiges Bestimmungsmerkmal für die Fruchtartenerkennung dienen (BOUMAN und UENK, 1992; KÜHBAUCH, 1991). BROWN

et al. (1993) stellten fest, daß sich im Juli mit Erreichen des Wachstumsstadiums Ährenschieben / Blüte die Fruchtartenklassifizierung verbessert. Auch KEITHLEY und ROBERTS (1996) geben an, daß mit multitemporalen Radaraufnahmen Unterschiede in der Pflanzenphänologie bestimmt werden können, da sie Veränderungen der Radarrückstreuung bewirken. Beste Unterscheidbarkeit für Fruchtarten ergibt sich hierbei in den frühen bis mittleren Wachstumsstadien. LEMOINE et al. (1997) bemerkten, daß Winterweizen und Wintergerste am besten im Juni und Juli zu unterscheiden sind, da die Abreife einen klaren Effekt auf die Radarrückstreuung hat. Ebenso ermittelten REICH und GÜTH (1998) ein Minimum bei Wintergerste und Winterweizen kurz vor der Abreife, wobei das Minimum bei Wintergerste durch die frühere Abreife auch zeitlich eher auftritt.

WOODING (1995) erklärt, wie wichtig die Radarsignaturen für eine gute Klassifizierung sind. Ein ausgeprägtes Rückstreuverhalten mit ERS Daten gibt er für Reis, Weizen, Gerste, Raps und Gras an. Es gibt Zeitfenster, in denen diese Fruchtarten aufgrund ihres Rückstreuverhaltens trennbar sind (vgl. Kap. 2.4.1).

KOHL et al. (1994) beobachteten gleich verlaufende Rückstreuprofile einer Fruchtart auf unterschiedlichen Bodenarten. Dies zeigt, daß eine Fruchtart durch ihr Rückstreuprofil gut gekennzeichnet und somit ein guter Ansatz zur Klassifikation geliefert wird.

5.3.3 Anwendungsmöglichkeit der Klassifikation

Die Europäische Agrarpolitik ist an präzisen und aktuellen Landnutzungsinformationen in zweierlei Hinsicht interessiert: zum einen für die Durchführung von Kontrollen der Anträge auf Flächenstilllegungsprämien und zum anderen zur Gewinnung einer Agrarstatistik aller EG-Länder, um gezielt die Nahrungsmittelproduktion steuern zu können. Die Fernerkundung gewinnt hier zunehmend an Bedeutung. Das MARS-Programm der Europäischen Kommission, welches mit optischen Satellitendaten operiert, unterstützt z.B. die Kontrolle der stillgelegten Flächen. Allerdings besteht mit optischen Szenen immer noch die Schwierigkeit wolkenfreie Szenen zu erhalten (STADLER, 1996). Daher liegt es nahe, allwettertaugliche Radardaten zur Klassifizierung zu verwenden.

Die oben beschriebenen Ergebnisse zeigen, daß es möglich ist, Fruchtarten zu bestimmten Zeiten des Jahres mit Hilfe des ERS SARs zu unterscheiden. Anders als mit optischen Satellitenaufnahmen sind jedoch einzelne Szenen für die Flächeninventur der Hauptfruchtarten untauglich (vgl. Kap. 5.2). Es sollten mindestens 3 Radarszenen für eine Landnutzungsinventur vorliegen. In EMAP (1999) wurde die Klassifikation mit multitemporalen ERS-1/-2 Aufnahmen unter Hinzunahme eines GIS schon erfolgreich durchgeführt.

Für eine Klassifikation der Landnutzung müssen folgende Mindestvoraussetzungen erfüllt werden EMAP (1999):

- Beschaffung von Geodaten, agronomischen und Satellitendaten
- Aufbereitung und Organisation der Satellitendaten, digitale Bildverarbeitung (Fernerkundungssoftware wie z.B. EASI/PACE oder Erdas Imagine), Geokodierung (z.B. mit OrthoEngine von PCI), evtl. Filterung und Klassifikation
- Agronomische – pflanzenbauliche Inventuren
- Aufbau eines GIS zur Geodatenverwaltung, Verknüpfung der Geodaten untereinander sowie von Geodaten mit Satellitendaten
- Evaluierung der Geodaten und der Klassifizierungsergebnisse

5.3.4 Zustandsbeschreibung von Wintergetreide

5.3.4.1 Entwicklungsphase bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens

Im Folgenden werden die Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und den Bestandesparametern von Wintergerste, Winterweizen und Winterroggen bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens in den Jahren 1996-1998 anhand der Berechnung von Bestimmtheitsmaßen untersucht (Tab. 5.2). Grundlage für die Berechnung sind die Probenahmen zum jeweiligen Überflug. Die Anzahl der Stichproben variiert, da Winterweizen später als Wintergerste und Winterroggen das Wachstumsstadium Ährenschieben erreicht und daher mehr Überflugstermine in die Berechnung einbezogen werden konnten. Bei Winterroggen ist anzumerken, daß ein Termin, der in die Berechnung mit aufgenommen wurde, schon zu Anfang des Ährenschiebens lag.

Es zeigt sich, daß die Parameter Pflanzenhöhe (cm), Frischmasse (g/m²), Trockenmasse (g/m²) und Wassermenge (g/m²) bei allen drei Getreidearten eine gute Beziehung zur Radarrückstreuung aufweisen (Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Bestimmtheitsmaße (r^2) zwischen den Rückstreuwerten und den einzelnen Bestandesparametern der Wintergetreidearten bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens in den Jahren 1996 - 1998

	Anzahl der Stichprobe n	Pflanzenhöhe (cm)	Frischmasse (g/m ²)	Trockenmasse (g/m ²)	Wassermenge (g/m ²)	Feuchtigkeit (%)
Winterweizen	39	0,79	0,78	0,76	0,77	0,10
Wintergerste	23	0,79	0,71	0,82	0,69	0,22
Winterroggen	22	0,87	0,73	0,75	0,71	0,02

Wodurch die Radarrückstreuung tatsächlich verursacht wird, läßt sich damit allerdings nicht klären. Das Ergebnis besagt jedoch, daß es anhand der Radarrückstreuung bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens möglich ist, diese vier Pflanzenparameter gut zu schätzen. Hierbei ist zu bemerken, daß diese vier Parameter in diesem Zeitabschnitt eng miteinander verbunden sind: so steigt natürlich mit zunehmender Pflanzenhöhe auch die Frischmasse, Trockenmasse sowie die Wassermenge an. Ähnliche Ergebnisse wurden in Scheyern/Bayern bei Wintergerste (Frischmasse

$r^2 = 0,78$; Trockenmasse $r^2 = 0,70$; Wassermenge $r^2 = 0,79$) und Winterweizen (Frischmasse $r^2 = 0,74$; Trockenmasse $r^2 = 0,67$; Wassermenge $r^2 = 0,72$) mit ERS Daten festgestellt (EMAP, 1999).

In der Literatur sind nur wenige Angaben über Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und den einzelnen Pflanzenparametern zu finden. KUROSU et al. (1993) konnten bei Reis einen engen Zusammenhang zwischen der Radarrückstreuung und der Frischmasse ($r = 0,98$), der Pflanzenhöhe ($r = 0,98$) sowie der Trockenmasse ($r = 0,95$) bestimmen. LE TOAN et al. (1997) konnten bei Reis einen Zusammenhang zwischen dem ERS Radarsignal und der Trockenmasse von $r^2 = 0,89$ ermitteln. SCHMULLIUS und NITHACK (1995, 1997) beobachteten die Beziehung zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenhöhe während der gesamten Vegetationsperiode bei Weizen; hier kam es zu einem Absinken der Radarrückstreuung mit zunehmender Halmlänge aufgrund von Dämpfung (vgl. Kapitel 2.1.2.2). In der genannten Untersuchung kam es nach Erreichen der maximalen Bestandeshöhe während der Abreife offenbar aufgrund der Verringerung der Bestandeshöhe durch das Abwinkeln der Ähren zu einer hohen Variation der Rückstreuwerte bei einer Bestandeshöhe von 70-80 cm. Diese Aussage deutet auf einen hohen Zusammenhang zwischen Radarrückstreuung und der Bestandeshöhe bis kurz vor der Abreife hin. SKRIVER et al. (1996) führen die verringerte Radarrückstreuung von März bis Mai auf den zunehmenden Blattflächenindex und somit die Biomasse zurück. Der Zusammenhang zwischen Blattflächenindex und Radarrückstreuung konnte in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht bestätigt werden.

GNOSA (1997) konnte bei Messungen mit einem Scatterometer bei Verwendung des X-Bandes (30° Einfallswinkel) gute Beziehungen zwischen den Radarrückstreuoeffizienten und verschiedenen Pflanzenparametern (Bestandeshöhe und -feuchte) vom Schossen bis zum Ende der Blüte feststellen. Unter Verwendung des C-Bandes zeigte sich bei einem Einfallswinkel von 50° und 60° , daß die Radarrückstreuoeffizienten in diesem Zeitraum abhängig sind von der Wassermenge in den obersten beiden Halmabschnitten und der Ähre (ohne Blätter).

In Abbildung 5.11 und 5.12 sind die Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse bzw. der Frischmasse von Winterweizen in den drei Meßjahren 1996 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens graphisch dargestellt. Die Daten aller drei Jahre sind sehr gut an die Funktion angepaßt. Im Gegensatz zur

Tabelle 5.2 ist auf die Daten des 07.04.98 verzichtet worden, da eine vollständige Bodenbedeckung zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorlag und ein nicht unwesentlich vom Boden beeinflusstes Signal zu erwarten ist. Die Annahme wird dadurch bestätigt, daß das Bestimmtheitsmaß zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von $r^2 = 0,76$ auf $r^2 = 0,84$ und im Fall der Frischmasse von $r^2 = 0,78$ auf $r^2 = 0,82$ anstieg, wenn der o.g. Aufnahmeterrmin nicht in die Korrelationsberechnung aufgenommen wurde. ULABY et al. (1978) unterstützen diese Annahme: sie geben an, daß die Bodenfeuchte bei Einfallswinkeln von $7-17^\circ$ am besten zu bestimmen sei, wohingegen mit größeren Einfallswinkeln der Einfluß der Bodenfeuchte auf das Radarsignal abnimmt. Mit höheren Einfallswinkeln wird die Durchdringung der Vegetationsschicht bis zum Boden zunehmend erschwert, so daß der Einfluß des Bodens auf das Radarsignal gegen Null gehen dürfte (BRÄKKE et al., 1981).

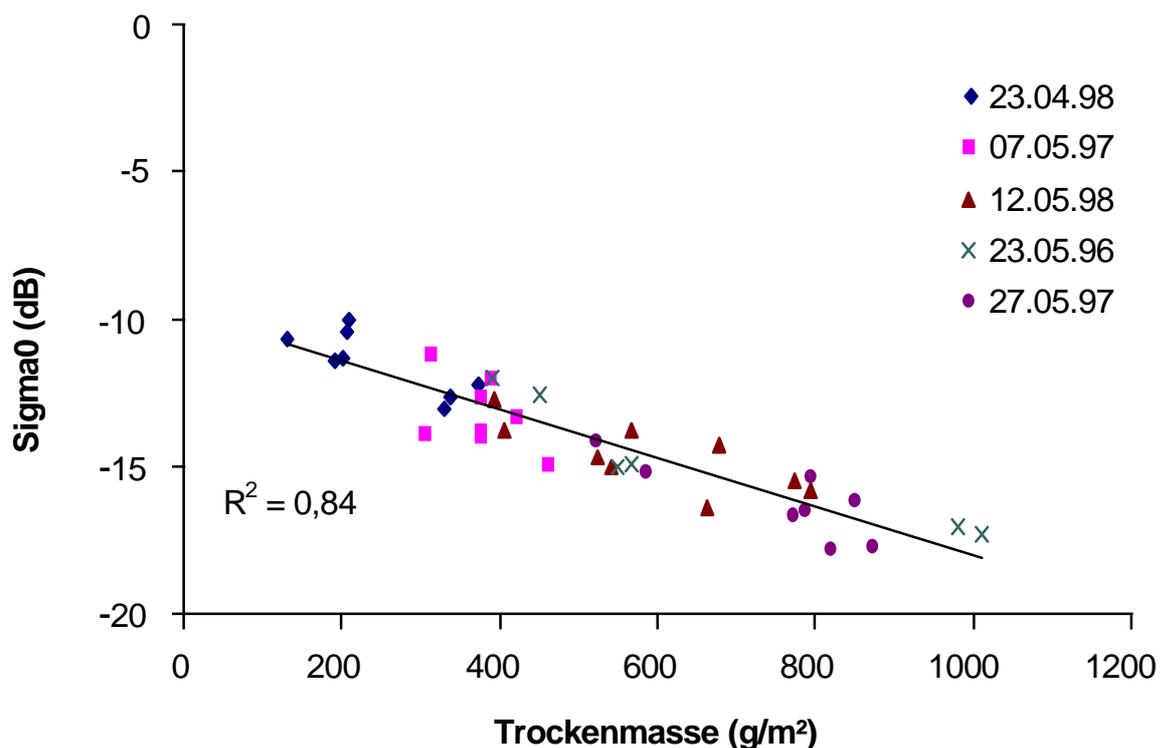


Abb. 5.11: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von Winterweizen in den drei Meßjahren 1996 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens

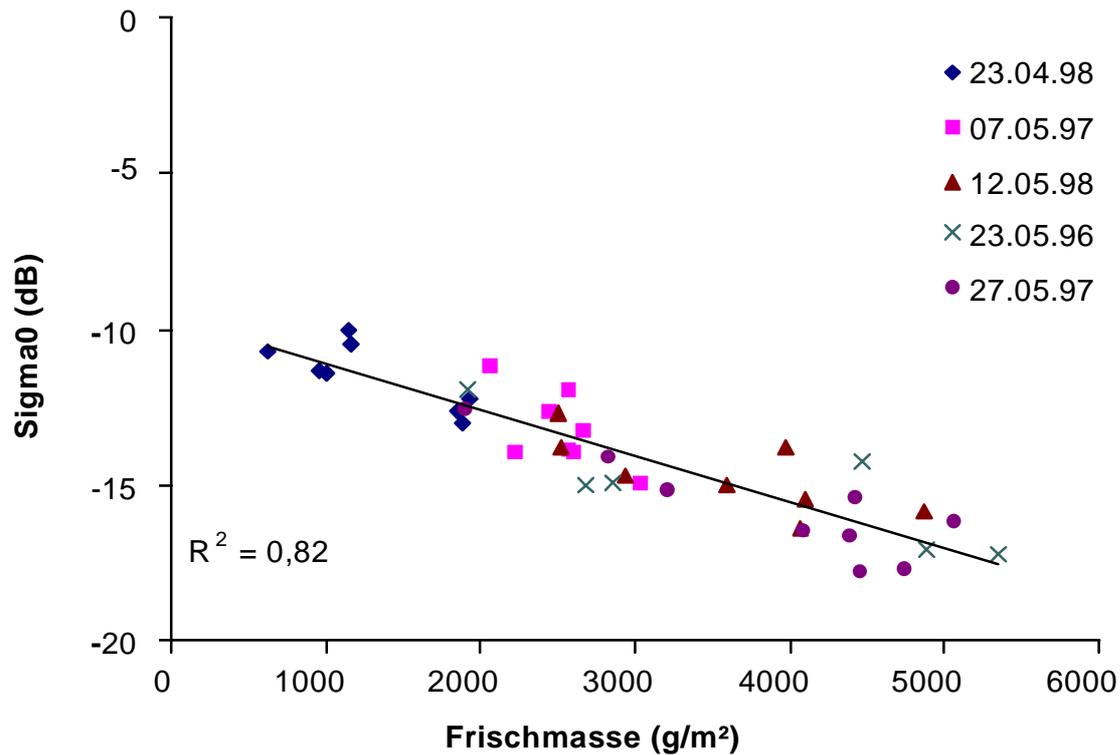


Abb. 5.12: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Frischmasse von Winterweizen in den drei Meßjahren 1996 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens

Bei Winterroggen zeigen sich ähnliche Tendenzen wie bei Winterweizen. Beispielfhaft ist in Abbildung 5.13 die Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von Winterroggen im Jahr 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens dargestellt. Es lagen für diese Untersuchung nur Ergebnisse zweier Termine im Jahr 1998 vor. Dies ist dadurch begründet, daß das Wachstumsstadium Ährenschieben schon Anfang Mai erreicht wird. Im Vergleich zur Tabelle 5.2 sind hier nur Daten einbezogen worden, die eindeutig vor dem Stadium des Ährenschiebens erhoben worden sind.

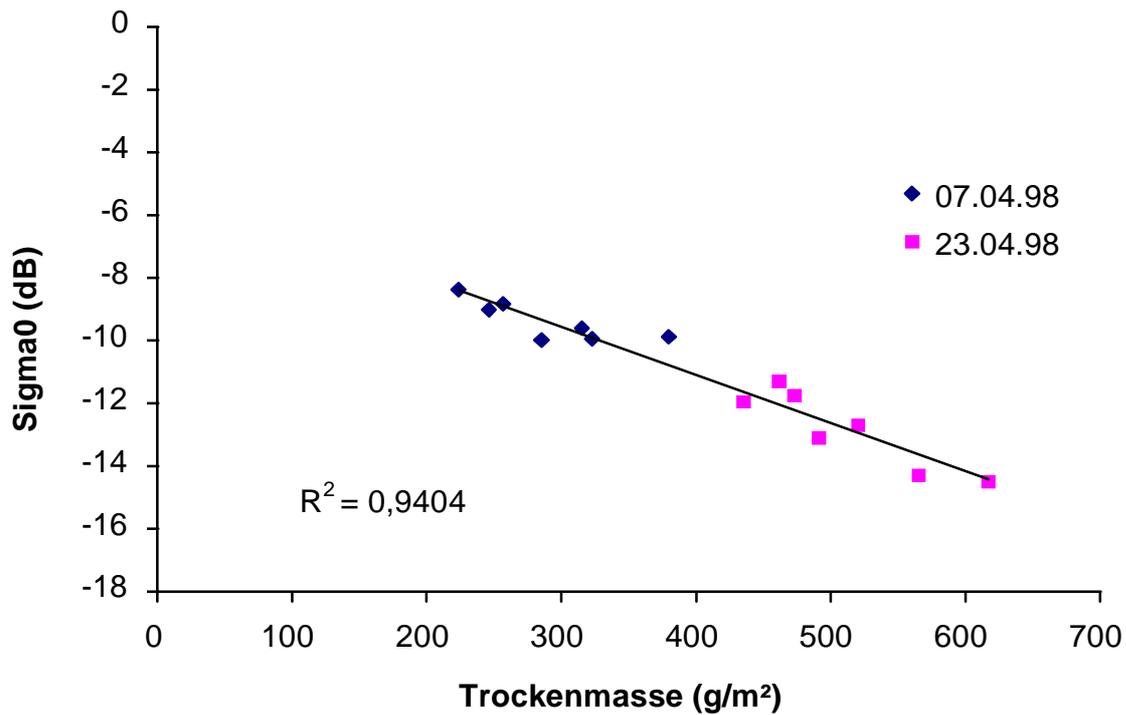


Abb. 5.13: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von Winterroggen im Jahr 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens

In Abbildung 5.14 ist die Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von Wintergerste in den Jahren 1997 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens dargestellt.

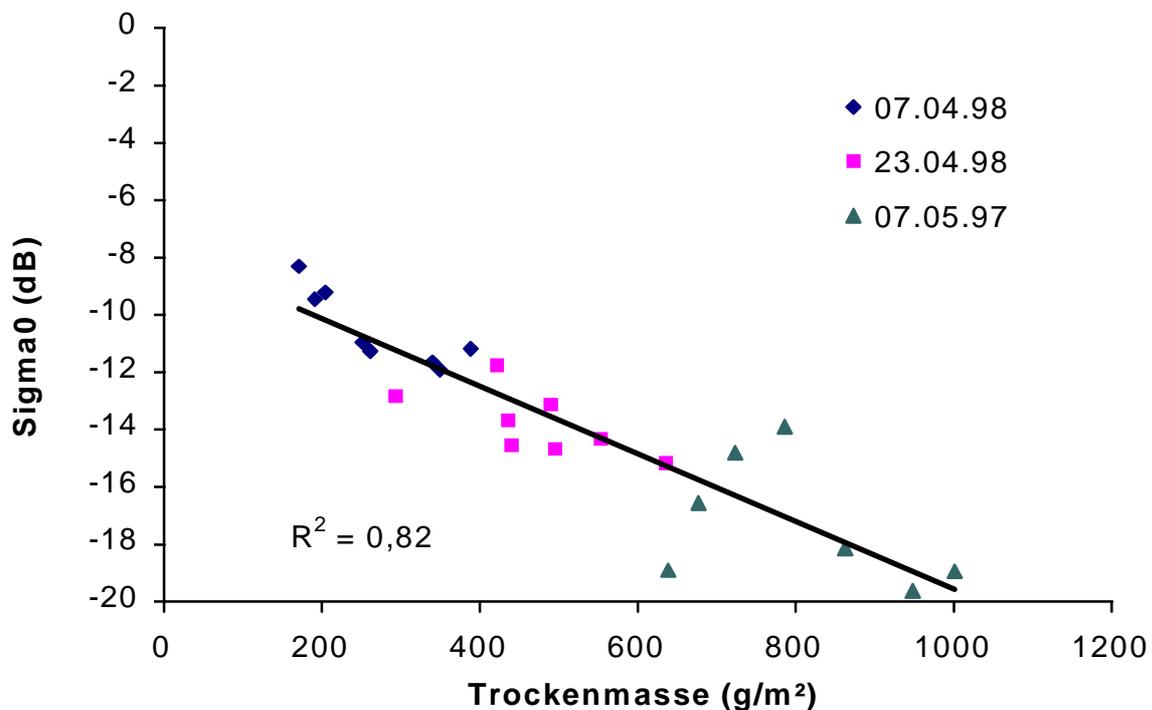


Abb. 5.14: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Trockenmasse von Wintergerste in den Jahren 1997 - 1998 bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens

Auch hier lagen keine Daten für das Jahr 1996 vor, da der erste Überflug des ERS zum Zeitpunkt des Ährenschiebens stattgefunden hat. Im April 1998 ist die Streuung der Datenpunkte um die Funktionsgerade sehr gering, d.h. in diesem Zeitraum läßt sich die Trockenmasse sehr gut bestimmen, wohingegen die Streuung im Mai verstärkt ist. Zu diesem Termin war die Bodenfeuchte sehr hoch. Es ist deshalb zu vermuten, daß die Radarrückstreuung der Gerstenfelder an diesem Termin vom Boden beeinflusst war; unterstützt wird diese Annahme insofern als nur die Felder mit geringerer Biomasse eine höhere Streuung um die Funktionsgeraden aufweisen. Im Gegensatz dazu konnten STEINGIESSER und KÜHBAUCH (1998) keinen Zusammenhang zwischen der Radarrückstreuung des C_{VV} -Bandes und verschiedenen Parametern (Pflanzenwassergehalt, frische und trockene Biomasse, Pflanzenhöhe sowie Blattfläche) von Wintergerstenbeständen ermitteln. Die beste Beziehung fanden sie zwischen dem Radarrückstreuquerschnitt und der Blattfläche mit $r^2 = 0,41$. In diesen Untersuchungen könnte jedoch die hohe Bodenfeuchtigkeit während der Meßkampagne eine Erklärung liefern, warum ein Zusammenhang zwischen Radarsignalarstärke und Pflanzenbiomasse nicht erkennbar war (STEINGIESSER, 1997). Es ist zu vermuten, daß auch zu diesem Zeitpunkt der Boden aufgrund der hohen Feuchte - die Annahme wird verstärkt durch die relativ weiten Reihenabstände von 13-16 cm (und somit geringere Bodenbedeckung) - einen Anteil zur Reflexion beigetragen hat und somit ein alleiniger Rückschluß auf den Pflanzenbestand nicht mehr möglich war.

5.3.4.2 Entwicklungsphase nach dem Zeitpunkt des Ährenschiebens

Die Korrelationen zwischen den Bestandesparametern und den Radarrückstreuungskoeffizienten im Zeitraum nach dem Ährenschieben verschlechtern sich immens. Die beste Beziehung ergab sich zwischen der Ährentrockenmasse von Winterweizen und den Radarrückstreuwerten mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,56$. Die Streuung um die Funktionsgerade (Abb. 5.15) ist relativ hoch.

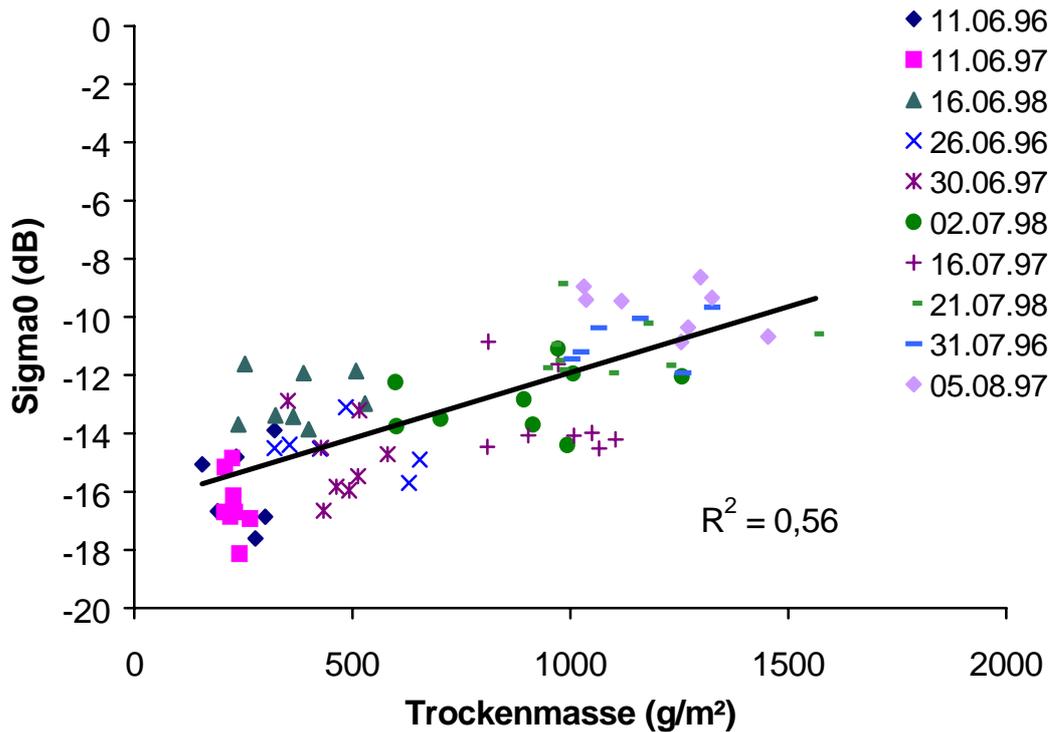


Abb. 5.15: Beziehung zwischen der Radarrückstreuung und der Ährentrockenmasse von Winterweizen in den Jahren 1996 - 1998

Erklärt werden kann dies dadurch, daß mit abnehmendem Wassergehalt des abreifenden Weizens die Mikrowellen durch den Bestand dringen und der Boden einen höheren Anteil an der Radarrückstreuung erhält (ULABY und BUSH, 1976). Diese Annahme wird von FERRAZZOLI et al. (1999) bestätigt. Zudem führen sie und BROWN et al. (1992) an, daß die Ähren einen wesentlichen Beitrag zur Radarrückstreuung liefern.

Anhand der Radarrückstreuung lassen sich also keine eindeutigen Parameter bestimmen. Hier erscheint es sinnvoll, mehrere Parameter gleichzeitig bei der Analyse der Radarrückstreuung zu betrachten. Für diese Betrachtungsweise bietet sich die multiple Regression an, bei der man verschiedene Parameter gleichzeitig in Bezug zur Radarrückstreuung setzt, um dann die optimale Kombination von Parameter zur Beschreibung der Radarrückstreuung zu erhalten.

Die Berechnungen wurden durchgeführt mit Hilfe des Programms SAS anhand der multiplen Regression unter Verwendung der „backward selection“. Hierbei werden alle Parameter, die nach dem Ährenschieben erhoben wurden, in die Rechenoperation eingegeben. Im Folgenden werden so lange Parameter aus der Berechnung

heraus selektiert bis die optimale Kombination von Parametern zur Beschreibung der Radarrückstreuung gefunden wird.

Bei Winterweizen wurden die Parameter Pflanzenhöhe und Ährenfeuchte mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,71$ ermittelt.

Dies bedeutet, daß anhand der Parameter Pflanzenhöhe und Ährenfeuchte die Radarrückstreuung auch nach dem Ährenschieben sehr gut beschrieben werden kann.

Bei Wintergerste ergaben sich mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,81$ die Pflanzenhöhe, die Frischmasse und die Ährentrockenmasse als die Parameter, mit denen das Radarsignal am besten interpretiert werden konnte.

Anhand einer multiplen Regressionsrechnung gelang es in der Ostalb/Baden-Württemberg eine Beziehung für Wintergerste von $r^2 = 0,73$ zwischen dem Schossen und der Ernte mit den Parametern Ährenneigung, Pflanzenhöhe, EC-Stadium sowie Blattstellung (geringste Bedeutung) zu erhalten (EMAP, 1999).

Für Winterroggen konnte eine Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,80$ ermittelt werden, die die Parameter Ährenfrischmasse, Ährentrockenmasse, Pflanzenwassergehalt und Ährenneigung beinhaltet.

Es ist festzuhalten, daß mit einer multiplen Regression die optimale Kombination von Einflußfaktoren auf das Radarsignal ermittelt werden kann. In der vorliegenden Untersuchung sind es allein Pflanzenparameter, die nach dem Ährenschieben das Radarsignal beschreiben. Inwiefern der Boden in diesem Zeitraum einen Einfluß auf das Radarsignal hat, bleibt jedoch offen.

5.4 Möglichkeiten der Ernteabschätzung

In Kapitel 5.3.3.2 wurde aufgezeigt, daß bei den Getreidearten nach dem Ährenschieben die Radarrückstreuung von mehreren Faktoren beeinflusst wird. Ein eindeutiger Rückschluß von dem Radarrückstreuquerschnitt auf einen Bestandesparameter ist nicht möglich. Daher ist eine Ertragsabschätzung ausschließlich mit ERS SAR Daten auszuschließen.

Ein Ansatz zur Ertragsabschätzung besteht allerdings darin, daß Radardaten mit Wachstumssimulationsmodellen verknüpft werden. Wachstumssimulationsmodelle

beschreiben die Beziehung zwischen physiologischen Prozessen in Pflanzen und Umweltfaktoren wie z.B. Sonneneinstrahlung, Temperatur, Wasser- und Nährstoffversorgung. Tägliche Wachstumsraten und Entwicklungsstadien von Pflanzen werden vom Stadium der Keimung bis zur Reife simuliert (CLEVERS et al., 1994). Bisher liefern diese Modelle jedoch keine zufriedenstellenden Ertragsprognosen (LANDAU et al., 1998). Als mögliche Ursache hierfür werden ungenaue Eingangsdaten (z.B. sind Klimadaten der Klimastationen nicht identisch mit dem auf den Feldern tatsächlich auftretenden Mikroklima), fehlerhaftes Management (alle Modelle setzen optimales Management voraus) sowie Fehler des Modells genannt. Fehlkalkulationen des Modells könnten durch die Einbindung von Fernerkundungsdaten zum Teil behoben und eine genauere Ertragsprognose durchgeführt werden (MOULIN et al., 1998). CLEVERS et al. (1994) konnten z.B. unter Einbeziehung von optischen Fernerkundungsdaten in das SUCROS Modell die Ertragsschätzung von Zuckerrüben verbessern, indem sie den Blattflächenindex über den NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) neu berechneten. RIBBES und LE TOAN (1999) gelang die Ertragsschätzung von Reis, indem sie die Trockenmasse anhand von ERS-Daten schätzten und mit einem agroklimatischen Wachstumsmodell verknüpften. Der Fehler der Ertragsprognose lag unter 9%.

Im Folgenden wird das AFRC- Wheat Simulationsmodell (PORTER, 1984; WEIR et al., 1984) vorgestellt, welches das Wachstum von Winterweizen auf Tagesbasis simuliert. Eingangsdaten sind hierfür:

- Klimadaten wie z.B. minimale und maximale Tagestemperatur, Tagesniederschlag, Sonnenscheindauer eines Tages etc.
- Breitengrad (zur Berechnung der Tageslänge)
- Saattermin
- Saatedichte
- Temperatursummen für einzelne phänologische Stadien
- BFI (optional)

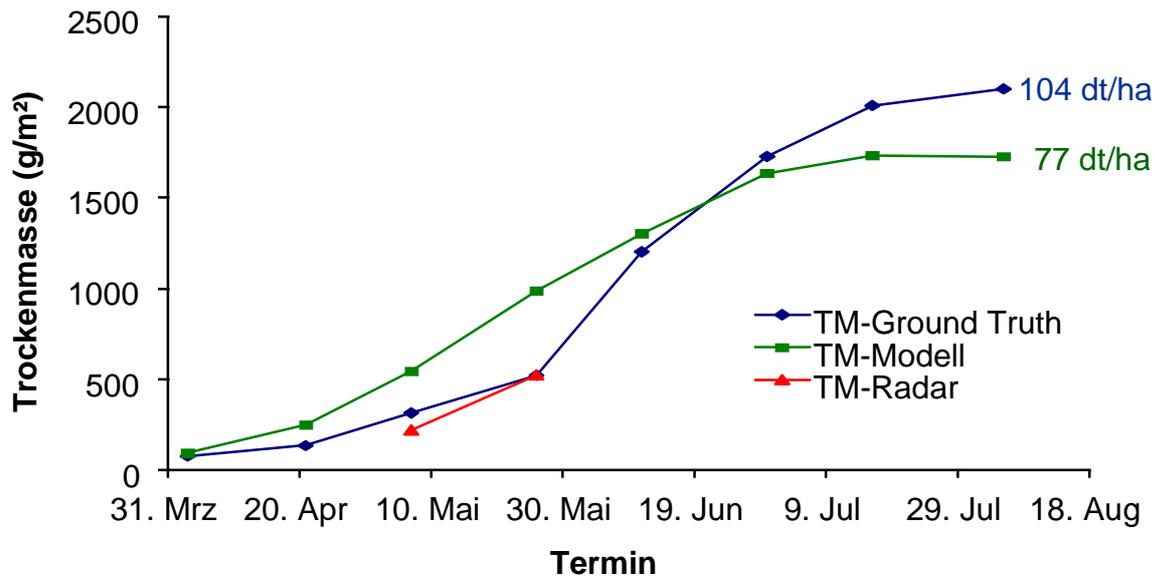


Abb. 5.16: Trockenmasseentwicklung eines Winterweizenbestandes in der Vegetationsperiode 1997 im Testgebiet Weilerswist anhand verschiedener Ermittlungsverfahren

In Abbildung 5.16 sind drei verschiedene Trockenmasseverläufe zu erkennen: die Kurve „TM-Ground Truth“ gibt die Trockenmasse an, die im Feld gemessen wurde; die Kurve „TM-Modell“ zeigt die mit AFRC- Wheat simulierte Trockenmasse und der Verlauf „TM-Radar“ bezeichnet die Trockenmasse, die anhand der Radarrückstreuung berechnet wurde. Das Simulationsmodell überschätzt in den Anfangsstadien und unterschätzt in späteren Stadien die Trockenmasse. In die ersten Berechnungen gehen Nährstoff-Ressourcen ein, auf die das Modell zu späteren Wachstumsphasen nicht mehr zurückgreifen kann. Obgleich mit den Radardaten die Trockenmasse des Winterweizens nur an zwei Terminen geschätzt werden konnte, sind diese Termine von besonderer Bedeutung, da schon Fehlkalkulation in den frühen Wachstumsstadien ausgeglichen werden können. Sinnvoll wäre es, die simulierten Daten anhand der Radardaten zu korrigieren und die Modellrechnung mit den korrigierten Daten zu Ende zu führen. Dadurch könnte die Ertragsschätzung gebietsweise verbessert werden. Der Vorteil der Radardaten besteht darin, daß die Biomasse direkt geschätzt werden kann und diese Daten wetterunabhängig jederzeit zur Verfügung stehen. Auch die Fernerkundung mit optischen Sensoren konnte bereits zur Verbesserung der Ertragsprognosen von Simulationsmodellen eingesetzt werden: es wurde der Blattflächenindex mittels optischer Fernerkundungsdaten geschätzt und unter Hinzunahme von Wetterdaten die Trockenmasse mit verschiedenen

Wachstumsmodellen berechnet (CLEVERS und VAN LEEUWEN, 1996; VIGNOLLES et al., 1999). Hier besteht jedoch das Problem der Verfügbarkeit optischer Aufnahmen.

5.5 Abschätzung der Biomasse

In Kapitel 5.3.3.1 wurde die Möglichkeit vorgestellt, die Frischmasse als auch die Trockenmasse bis zum Ährenschieben bei Wintergetreidearten anhand von Radarrückstreuwerten zu bestimmen. In Abbildung 5.17 ist die Trockenmasse, die anhand der Radardaten berechnet wurde, der im Feld gemessenen Trockenmasse gegenübergestellt worden.

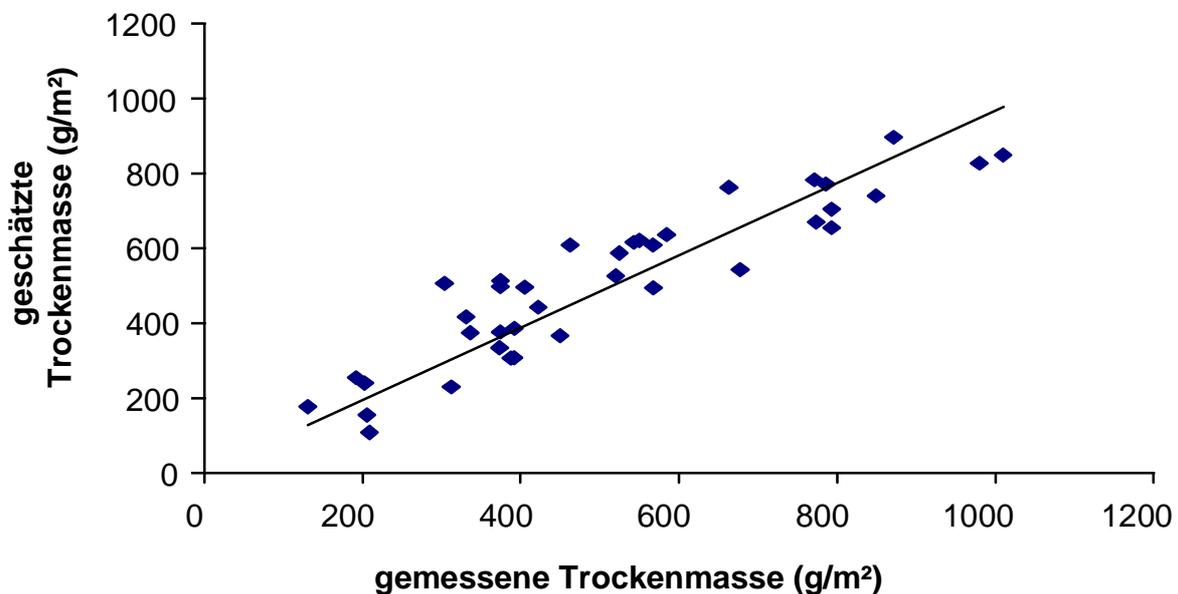


Abb. 5.17: Schätzung der Trockenmasse von Winterweizen bis zum Ährenschieben in den drei Versuchsjahren im Testgebiet Weilerswist

Abbildung 5.17 verdeutlicht, daß über eine Spannweite von 200 g/m² bis 1000 g/m² die Trockenmasse von Winterweizen anhand von Radarrückstreuwerten gut zu schätzen ist. Es wäre so möglich, aktuelle Biomassekarten zu erstellen. In Verknüpfung mit Boden- und Reliefkarten sowie unter Einbeziehung der langjährigen Erfahrung des Landwirtes können Ursachen für die unterschiedliche Entwicklung innerhalb eines Schlages ermittelt (GRENZDÖRFFER, 1998) und gezielt Bearbeitungsmaßnahmen durchgeführt werden, beispielsweise eine gezielte Ausbringung von Dünger. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch eine höhere Wiederholrate der Radaraufnahmen, eine höhere räumliche Auflösung sowie eine schnellere Vorprozessierung der Satellitendaten (GRENZDÖRFFER, 1998).

6 Zusammenfassung

Ein wesentliches Ziel der Fernerkundung in der Landwirtschaft ist die Inventur der Bodennutzung. Optische Sensoren lieferten bereits gute Ergebnisse: sowohl in der Klassifizierung als auch in der Abschätzung der Vitalität der Pflanzen über den NDVI. Sie sind jedoch vom Tageslicht und dem Bewölkungsgrad abhängig. Demgegenüber sind Radarsensoren weitgehend witterungsunabhängig und auch in der Nacht einsetzbar.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung von Radarszenen der ERS-Satelliten in Kombination mit einem Geoinformationssystem zur Unterscheidung von Fruchtarten sowie zur Beschreibung des Zustandes der Pflanzenbestände untersucht. Die Aufnahmen entstanden in C-Band (5,3 GHz) mit VV-Polarisation. Der Einfallswinkel der Radarstrahlen betrug 23°, die räumliche Auflösung der Bilder 5m * 25m. Aufnahmen des Testgebietes standen im Abstand von 35 Tagen, in der Hauptvegetationsperiode von 17,5 Tagen zur Verfügung. Zeitgleich zu den Überfliegungen wurden Erhebungen an Getreide- und Zuckerrübenbeständen durchgeführt.

Aufgrund der Stabilität und Genauigkeit des ERS SAR Instrumentes konnten temporale Signaturen von verschiedenen Fruchtarten ermittelt und verglichen werden. Folgende Ergebnisse konnten festgehalten werden:

1. Jede Fruchtart wies ein eigenes temporales Rückstreuprofil auf. Dies ermöglicht die Auswahl der SAR Aufnahmen zu den Zeiten im Jahr, an denen die Trennung der Fruchtarten am besten gelingt. Es zeigte sich, daß die beste Trennung von Wintergetreide von Ende Mai bis Anfang Juli möglich ist. Zuckerrüben lassen sich von Getreide im Mai und im August unterscheiden. Hierbei ist Voraussetzung, daß die Fruchtartenzusammensetzung in dem vorliegenden Testgebiet bekannt ist.
2. Zuckerrüben haben ein typisches Radarrückstreuprofil im Verlauf eines Jahres. Es ist jedoch nicht möglich, anhand der Radarrückstreuwerte einen Rückschluß auf die Entwicklung und Vitalität des Zuckerrübenbestands zu ziehen.
3. Die Radarrückstreuprofile von Wintergetreide ließen eine Beobachtung über den Verlauf des Wachstums zu. Es war erkennbar, daß die Radarrückstreuung während

des Bestockens und Schossens abnahm und nach Erreichen des EC-Stadiums Ährenschieben bzw. Blüte wieder anstieg.

4. Ein absolutes Reflexionsminimum konnte in allen drei Jahren bei Wintergerste bestimmt werden. Dies wurde zum Zeitpunkt des Ährenschiebens bzw. der Blüte erreicht.

5. Für Winterweizen konnte ein absolutes Reflexionsminimum und somit der Zeitpunkt des Ährenschiebens bzw. der Blüte nicht bestimmt werden. Allerdings zeigt sich auch bei dieser Kulturart, daß die geringste Reflexion während dieser Stadien stattfindet.

6. Die Gegenüberstellung von Radarrückstreuwerten und Kenngrößen der Pflanzenbestände der drei Versuchsjahre ergab, daß insbesondere die Pflanzenhöhe, die Frisch- und Trockenmasse sowie die Wassermenge einen engen Zusammenhang mit den Radarrückstreuwerten bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens aufwiesen.

7. Nach dem Ährenschieben wird die Rückstreuung von mehreren Faktoren beeinflusst. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Radarrückstreuung und einzelnen Pflanzenparameter läßt sich nicht mehr erkennen.

8. Während der Bestockung und des Schossens ist es möglich, die Biomasse eines Getreidefeldes zu schätzen. Bei einer höheren räumlichen Auflösung und geringeren zeitlichen Abständen der Überflüge könnten Biomassekarten erstellt werden. In Verbindung mit Bodenkarten sowie landwirtschaftlichem Wissen könnte somit eine Möglichkeit geschaffen werden, z.B. teilschlagspezifisch Düngung auszubringen.

9. Die Verknüpfung von Radardaten mit Simulationsmodellen erscheint für die Ertragsschätzung vielversprechend.

10. Das C-Band mit VV-Polarisation zeigt sich für die Beobachtung von Getreidebeständen als sehr gut geeignet: sowohl bei der Erkennung dieser Fruchtarten als auch zur Beschreibung ihrer Entwicklung. Zukünftig sollten jedoch Radarsysteme mit einer höheren räumlichen Auflösung und einer höheren Wiederholrate eingesetzt werden. Um auch andere Fruchtarten beschreiben zu können sollten diese Radarsysteme zusätzlich mit dem X- Band sowie dem L- Band ausgestattet sein.

7 Literaturverzeichnis

Albertz J., 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt, ISBN 3-534-07838-1.

Amodeo G., P. De Matthaeis, P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Schiavon, S. Sigismondi and D. Solimini, 1996: Monitoring vegetation features with multi-temporal SAR data. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.: 736-738.

Auquiere E., P. Defourny, V. Baltazart, A. Guissard, 1997: ERS SAR time series analysis for maize monitoring using experimental and modeling approaches. ESA, 3rd ERS Symp. Florence.

Ban Y., P.J. Howarth, 1998: Orbital effects on ERS-1 SAR temporal backscatter profiles of agricultural crops. Int. J. Rem. Sens. 19 (17): 3465-3470.

Baronti S., F. del Frate, P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni and G. Schiavon, 1995: SAR polarimetric features of agricultural areas. Int. J. Rem. Sens., Vol. 14: 2639-2656.

Bartelme N. 1989: GIS-Technologie. Geoinformationssysteme, Landinformationssysteme und ihre Grundlagen. Springer-Verlag.

Bartelme N. 1995: Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer-Verlag.

Benallegue M., O. Taconet, D. Vidal-Madjar, M. Normand, 1995: The use of radar backscattering signals for measuring soil moisture and surface roughness. Rem. Sens. Env. 53: 61-68.

Borgeaud M., J. Noll, A. Bellini, 1995: On the Use of ERS-1 Multi-Temporal SAR Data for Agricultural Applications. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.: 904-907.

Bouman B.A.M., 1991: Linking X-band radar backscattering and optical reflectance with crop growth models. PhD thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 169 pp.

Bouman B.A.M. and H.W.J. van Kasteren, 1991: Ground-Based X-Band (3cm Wave) Radar Backscattering of Agricultural Crops. I. Sugar Beet and Potato; Backscattering and Crop Growth. *Rem. Sens. Env.* 34: 93-105.

Bouman B.A.M. and D. Uenk, 1992: Crop Classification Possibilities with Radar in ERS-1 And JERS-1 Configuration. *Rem. Sens. Env.* 40: 1-13.

Bouman B.A.M. and D.H. Hoekman, 1993: Multi-temporal, multi-frequency radar measurements of agricultural crops during the Agriscatt-88 campaign in The Netherlands. *Int. J. Rem. Sens.* 14 (8): 1595-1614.

Brakke T.W., E.T. Kanemasu, J.L. Steiner, T.F. Ulaby, and E. Wilson, 1981: Microwave Radar Response to Canopy Moisture, Leaf-Area Index, and Dry Weight of Wheat, Corn, and Sorghum. *Rem. Sens. Env.* 11: 207-220.

Brisco B., R.J. Brown, J.A. Koehler, G.J. Sofko, and M.J. McKibben, 1990: The Diurnal Pattern of Microwave Backscattering by Wheat. *Rem. Sens. Env.* 34: 37-47.

Brown R.J., M.J. Manore, and S. Poirier, 1992: Correlations between X-, C-, and L-band imagery within an agricultural environment. *Int. J. Rem. Sens.* 13 (9): 1645-1661.

Brown R.J., D. Bedard, B. Brisco, and J. Naunheimer, 1993: Multi-temporal ERS-1 for crop discrimination. *Proc. 2nd ERS-1 Symp.*, Hamburg, Germany: 57-62.

Bruckler L. and P. Bertuzzi, 1991: Estimating leaf area index and soil surface water content from active microwave measurements. 5th Int. Colloquium, Physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel: 69.

Buschmann C., 1993: Fernerkundung von Pflanzen. *Naturwissenschaften* 80: 439-453.

Clevers J.G.P.W., C. Büker, H.J.C. van Leeuwen, and B.A.M. Bouman, 1994: A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information. *Remote Sens. Environ.* 50: 161-170.

Clevers J.G.W., H. Kramer, H.J.C. van Leeuwen, and D.H. Hoekman, 1996: The merit of JERS-1 Data in addition to ERS-1 Data for land cover monitoring.

Int. Archivs of Photogram. and Rem. Sens. Vol XXXI, Part B7, Vienna.

Clevers J.G.P.W. and H.J.C. van Leeuwen, 1996: Combined Use of Optical and Microwave Remote Sensing Data for Crop Growth Monitoring.

Rem. Sens. Env. 56: 42-51.

Derenyi E., and M. Türker, 1996: Polygon based analysis of remotely sensed images in an integrated geographic information system. Int. Archivs of Photogram. and Rem. Sens., Vol. XXXI, Part B4, Vienna: 212-215.

Dixon R.J. and R.J. Brown, 1997: Meteorological Events Related to the Use of RADARSAT Data for Crop Discrimination. GER 1997.

Dobson M.C., F.T. Ulaby, and L.E. Pierce, 1995: Land-Cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar. Rem. Sens. Env. 51: 199-214.

Ehlers, M., G. Edwards, Y. Bedard, 1989: Integration of Remote Sensing with Geographic Information Systems: A Necessary Evolution. Photogr. Eng. And Rem. Sens., 55 (11): 1619-1627.

EMAP, 1999: Endbericht zum Verbundvorhaben „EMAP – Landnutzungsinventuren mit Hilfe der ERS-1 /-2 Radarfernerkundung“.

Elachi, C., 1988: Spaceborne Radar Remote Sensing. Applications and Techniques. IEEE Press, New York. USA.

Endlicher W., R. Keßler, 1982: Geowissenschaftliche Radarbildinterpretation.

Ber. Naturf. Ges. Freiburg i.Br. 71/72: 17-34.

European Space Agency (ESA), 1989: ERS-1, A new tool for global environmental monitoring in the 1990's. esa BR-36. ISBN 92-9092-019-X.

European Space Agency (ESA), 1996: Applications Achievements of ERS-1. New Views of the Earth. Esa SP-1176/II. ISBN 92-9092-141-2.

Ferrazzoli P., L. Guerriero, A. Quesney, O. Taconet, J.-P. Wigneron, 1999: Investigating the capability of C-band radar to monitor wheat characteristics. IGARSS '99 Hamburg.

Gillespie T.J., B. Brisco, R.J. Brown, G.J. Sofko, 1990: Radar detection of a Dew Event in Wheat. *Rem. Sens. Env.* 33: 151-156.

Gnosa T., 1997: Radarfernerkundung landwirtschaftlich genutzter Flächen - Scatterometermessungen an Winterweizen und Zuckerrüben, Diss. Univ. Bonn.

Godding R., K. Dockter, G. Kupfer, W. Kühbauch, 1989: Eignung von SAR-Daten zur Gewinnung von Agrarinformationen. *GIS Jahrgang 2, Heft 2/1989*: 23-28.

Grenzdörffer G., 1998: Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. *KTBL/ATB-Workshop*, 15. bis 16. Januar 1998 in Potsdam: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität; *KTBL-Schriften-Vertrieb*, Münster-Hiltrup: 93-105, ISBN 3-7843-1993-9.

Herrmann S. und W. Kuhn, 1995: Flächenscharfe Erfassung von Fruchtfolgen aus Satellitenbildern. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 36 (2): 69-74.

Heuvelink G.B.M., P.A. Burrough and A. Stein: Propagation of errors in spatial modelling with GIS. *Int. J. Geogr. Information Systems* 3 (4): 303-322.

Hildebrandt G. 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Heidelberg: Wichmann.

Hinton J.C., 1996: GIS and remote sensing integration for environmental applications. *Int. J. Geogr. Information Systems* 10 (7): 877-890.

Hochheim K.P and D.G. Barber, 1997: The physical properties of wheat and its relationship to canopy backscatter. *GER '97*: 140-147.

Holmes M.G., 1990: Applications of Radar in Agriculture. Ch. 19 in *Applications of Remote Sens. in Agriculture*, M.D. Stevens and J.A. Clark, Eds. Butterworth Press.

Hoogeboom P., 1983: Classification of Agricultural Crops in Radar Images. *IEEE Trans. on Geosc. And Rem. Sens.* 21 (3): 329-336.

Janssen L.L.F., Marijke N. Jaarsma, and E.T.M. van der Linden, 1990: Integrating Topographic Data with Remote Sensing for Land-Cover Classification. *Photogrammetric Engineering and Rem. Sens.* 56 (11): 1503-1506.

Keithley C. and M. Roberts, 1996: Examination of multi-temporal ERS-1 radar over the Rainwater Basin. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.: 227-229.

Keithley C., M. Roberts and F. Renton, 1997: Examining agricultural and wetland vegetation using ERS-1 imagery. ESA, 3rd ERS Symp. Florence.

Kohl H-G., E. Nezry and H. de Groof, 1994: Crop acreage estimation with ERS-1 PRI images. Earth Observation Quarterly, Nr.40: 6-8.

Kolar J. and J. Feranec, 1993: Agricultural potentials of ERS-1 data. Proc. 2nd ERS-1 Symp., Hamburg, Germany: 93-96.

Kronberg P., 1985: Fernerkundung der Erde, Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart, ISBN 3-432-94601-5.

Kühbauch W. 1991: Anwendung der Radarfernerkundung in der Landwirtschaft. Die Geowissenschaften, 9. Jahrg. Nr.4-5.

Kurosu T., T. Sultz, M. Fujita, K. Chiba, T. Moriya, 1993: Rice crop monitoring with ERS-1 SAR: a first year result. Proc. 2nd ERS-1 Symp., Hamburg, Germany: 97-101.

Landau S., R.A.C. Mitchell, V. Barnett, J.J. Colls, J. Craigon, K.L. Moore, R.W. Payne, 1998: Testing winter wheat simulation models' predictions against observed UK grain yields. Agricultural and Forest Meteorology 89: 85-99.

Laur 1998: Calibration of the ERS SAR PRI data product. earthnet online

Lemoine G., R. Kidd, H. van Leeuwen, 1997: Methodological advancements in using ERS SAR data for crop area estimation. ESA, 3rd ERS Symp. Florence.

Le Toan T., F. Ribbes, N. Floury, L. Wang, J.A. Kong, T. Kurosu, M. Fujita, 1997: Rice crop monitoring using ERS-1 data: experiment and modelling. IEEE Trans. on GRS., Vol. 35, No. 1: 41-56.

Löcherbach T. 1994: Fusion of multi-sensor images and digital map data for the reconstruction and interpretation of agricultural land-use units. In ISPRS Comm. III Symposiums, Munich, Sept. 1994: 505-511.

Mangolini M. and O. Arino, 1996: ERS-SAR and Landsat-TM multitemporal fusion for crop statistics. *Earth Observation Quaterly*, 51: 11-15.

Mason, D.C., D.G. Corr, A. Cross, D.C. Hoggs, D.H. Lawrence, M. Petrou and A.M. Taylor, 1988: The use of digital map data in the segmentation and classification of remotely-sensed images. *Int. J. Geogr. Information Systems* 2 (3): 195-215.

Matthaeis De P., P. Ferrazolli, G. Schiavon, D. Solimini, 1995: Crop type identification and biomass estimation by SAR. *IEEE* 95: 957-961.

Michelson D.B., 1994: ERS-1 SAR backscattering coefficients from bare fields with different tillage row directions. *Int. J. Rem. Sens.* 15 (13): 2679-2685.

Moulin S., A. Bondeau and R. Delecolle, 1998: Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *Int. J. Rem. Sens.* 19 (6): 1021–1036.

Müller U., Th. Löcherbach, W. Förstner, W. Kühbauch, 1993: Suitability of ERS-1 SAR PRI-data for multitemporal agricultural land-use mapping. *Proc. 2nd ERS-1 Symp., Hamburg, Germany*: 69-74.

Nezry E., S. Remondiere, G. Aa. Solaas, G. Genovese, 1995: Mapping of next season's crops during the winter using ERS SAR. *Earth Observation Quaterly*, No. 50 - December.

Paloscia S., 1998: An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. *Int. J. Rem. Sens.* 19 (2): 359-364.

Pampaloni P., 1994: Sensitivity of active and passive microwave sensors to land parameters. *Proc. of ESA-NASA Workshop*: 95-115.

Porter J.R., 1984: A model of canopy development in winter wheat. *J. Agric. Sci.* 103: 383-392.

Reich M., S. Güth, 1998: Improvement of agricultural land use information from multitemporal ERS-SAR data for test site „Ostalb“/ Germany. *Esa SP 441 Proc. Sec. Int. Workshop on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Landapplications*. 21-23.10.98 Estec, Norwijk, Netherlands: 141-149.

Ribbes F. and T. Le Toan, 1999: Coupling Radar Data and Rice Growth Model for Yield Estimation. IGARSS 1999, Hamburg.

Sabins, F.F., 1978: Remote sensing – principles and interpretation. – San Francisco, Freeman, W.H. and Company: 426.

Saich P. and M. Borgeaud, 1999: The Inter-Year Stability of ERS Agricultural Crop Signatures (Flevoland 1993-1996). Proc. of IGARSS, Hamburg, Germany.

Schmullius C., 1992: Radarfernerkundung landwirtschaftlicher Flächen mit einem flugzeuggetragenen Scatterometer. Berliner Geowiss. Abhandl., Reihe D, Band 3.

Schmullius C., J. Nithack and M. Kern, 1993: Comparison of multi-temporal ERS-1 and airborne DLR E-SAR image data for crop monitoring.

Proc. 2nd ERS-1 Symp. Hamburg, Germany: 79-83.

Schmullius C., J. Nithack, 1994: Crop monitoring with multi-temporal DLR E-SAR and ERS-1 image data. Proc. of PIERS, Netherlands.

Schmullius C., J. Nithack, 1995: Crop monitoring with multi-temporal airborne DLR E-SAR images. Proc. of IGARSS 1995:

Schmullius C., J. Nithack, 1997: Temporal multiparameter airborne DLR E-SAR images for crop monitoring- summary of the CLEOPATRA campagne 1992.

Proc. Rem. Sens. of Vegetation and Sea, Vol. 2959.

Schotten C.G.J., W.W.L. van Rooy and L.L.F. Janssen, 1995: Assessment of the capabilities of multi-temporal ERS-1 SAR data to discriminate between agricultural crops. Int. J. Rem. Sens., Vol. 16, No.14: 2619-2637.

Sieber A., 1986: Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. DFVLR Forschungsbericht.

Siqueira P. and K. Sarabandi, 1996: A Numerically Derived Electromagnetic Scattering for Grass Grain Heads. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.: 1337-1339.

Skriver H., F. Nielsen, and A. Thomsen, 1996: C- and L-Band Multi-Temporal Polarimetric Signatures of Crops. Proc. of IGARSS: 1766-1768.

Solberg R., 1992: Monitoring soil erosion in agricultural fields by ERS-1 SAR. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.: 1356-1359.

Spönemann J. und B. Schieche, 1997: Fernerkundung mittels Satelliten als Datenquelle der Agrarstatistik am Beispiel des Landkreises Göttingen. Sonderdruck aus: Geographie in der Grundlagenforschung und als Angewandte Wissenschaft, Göttinger Akzente, Göttinger Geographische Abhandlungen 100.

Stadler, R., 1996: Fernerkundung – ein neuer Weg zur Datengewinnung für die amtliche Statistik. Jahrbuch Baden-Württemberg.

Steingieser R., 1997: Erfassung der frischen und trockenen Biomasse von Wintergerste und Mais anhand multitemporaler, multifrequenter und polarimetrischer Radardaten. Diss., Univ. Bonn, Shaker-Verlag, ISBN 3-8265-2758-5.

Steingieser R. und W. Kühbauch, 1998: Erfassung der frischen und trockenen Biomasse und Schätzung der frischen Biomasse von Wintergerste in verschiedenen Regionen Europas mit einem raumgleitergetragenen Radarsensor. J. Agronomy & Crop Science 181: 145-152.

Steingießer R., M. Davidson und W. Kühbauch, 1998: Lesbarkeit von Radarsignaturen in der landwirtschaftlichen Fernerkundung. KTBL: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, Arbeitspapier 264, KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup: 118-122, ISBN 3-7843-1993-9.

Tottmann D.R., 1987: The decimal code for the growth stages of cereals. Ann. Appl. Biol. 110: 441-454.

Ulaby F.T., 1975: Radar response to vegetation. IEEE Trans. Antennas Propag. AP-23 (1): 36-45.

Ulaby F.T. and T.F. Bush, 1976: Monitoring wheat growth with radar. Photogram. Eng. Rem. Sens. 42 (4): 557-568.

Ulaby F.T., G.A. Bradley, and M.C. Dobson, 1978: Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I- Bare soil. IEEE Trans. Geosci. Electron. GE-16 (4): 286-295.

Ulaby F.T., R.K. Moore and A.K. Fung, 1981: Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. I, Artech House Inc., Norwood, MA.

Ulaby F.T., R.K. Moore, A.K. Fung, 1982: Microwave Remote Sensing, Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Artech House Inc., Norwood, MA, ISBN 0-89006-191-2.

Van Leeuwen H. and M. Borgeaud, 1997: Regional application of ERS-1/2 in the Flevoland agricultural area in the Netherlands. ESA, 3rd ERS Symp. Florence.

Vignolles C.,G. Genovese, T. Negre, 1999: Yield Indicators Extracted from the Combined Use of CORINE Land Cover and NOAA-AVHRR/NDVI. IGARSS 1999, Hamburg.

Weimann A., M. von Schönermark, A. Schumann, P. Jörn, and R. Günther, 1998: Soil moisture estimation with ERS-1 SAR data in the East-German loess soil area. Int. J. Rem. Sens. 19 (2): 237-243.

Weir A.H., P.L. Bragg, J.R. Porter, J.H. Rayner, 1984: A winter wheat crop simulation model without water and nutrient limitations. J. Agric. Sci., Camb. 102: 371-382.

Weydahl D.J. and R. Solberg, 1992: Registration of the use of agricultural fields and soil erosion using satellite remote sensing. Proc. of Central Symp. of the „Int. Space Year“ Conf., Munich, Germany, 30 March – 4 April 1992 (ESA SP-341, July 1992).

Wilkinson G.G., 1996: A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. Int. J. Geographical Information Systems 10 (1): 85-101.

Winner C., 1974: Die Jugendentwicklung der Zuckerrübe in ihrer Bedeutung für das spätere Wachstum und den Ertrag. Zucker 27: 517-527.

Wooding M.G., 1984: SAR-580 radar for the discrimination of crop types and crop conditions. The European SAR-580 Experiment-Investigations Final Report Vol. 2, Ispra: 445-458.

Wooding M.G., G.H. Griffiths, R. Evans, P. Bird, D. Kenward, G.E. Keyte, 1992: Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR DATA. Proc. First ERS-1 Symp., Cannes, France, 4-6 November 1992.

Wooding M.G., A.D. Zmuda, G.H. Griffiths, 1993: Crop discrimination using multi-temporal ERS-1 SAR data. Proc. 2nd ERS-1 Symp., Hamburg, Germany: 51-56.

Wooding M.G., 1995: Satellite Radar in Agriculture Experience with ERS-1. Earth Observation Quarterly, No. 49 - September 1995: 22-24.

Wooding M.G., E. Attema, J. Aschbacher, M. Borgeaud, R.A. Cordey, H. de Groof, J. Harms, J. Lichtenegger, G. Nieuwenhuis, C. Schmullius, A.D. Zmuda, 1995: Satellite Radar in Agriculture. Experience with ERS-1. ESA SP-1185, ISBN 90-9092-339-3.

Wright P., P. Saich, R. Cordey, 1993: Crop monitoring with ERS-1 SAR in East Anglia. Proc. 2nd ERS-1 Symp., Hamburg, Germany: 103-108.

8 Anhang

Tab. 8.1: Übersicht des verwendeten Kartenmaterials

Art und Maßstab	Bezeichnung	Bezugsquelle
ATKIS (DLM25/1) 1:25.000	5206/15 Neuheim 5206/20 Horchheim 5206/25 Hausweiler 5206/30 Lommersum 5207/13 Weilerswist 5207/19 Vernich 5207/20 Metternich West 5207/25 Hausweiler Ost 5207/26 Müggenhausen West 5207/27 Müggenhausen Ost 5207/31 Schneppenheimer Feld 5207/32 Straßfeld 5207/33 Straßfeld Ost 5307/1 Großbüllesheim Ost	Landesvermessungsamt NRW
Deutsche Grundkarte (DGK 5) 1:5.000 sowie Bodenkarte (DGK 5 Bo) 1:5.000	5206/15 Neuheim 5206/20 Horchheim 5206/25 Hausweiler 5206/30 Lommersum 5207/13 Weilerswist 5207/19 Vernich 5207/20 Metternich West 5207/25 Hausweiler Ost 5207/26 Müggenhausen West 5207/27 Müggenhausen Ost 5207/31 Schneppenheimer Feld 5207/32 Straßfeld 5207/33 Straßfeld Ost 5307/1 Großbüllesheim Ost	Katasteramt Euskirchen

Tab. 8.2: Arealstatistik der Landnutzung Weilerswist 1996

Code	Beschreibung	Häufigkeit	Flächensumme (ha)	Mittl. Flächen- größe (ha)	Min. Fläche	Max. Fläche
95	Zuckerrüben	250	593,91	2,38	0,02	28,53
70	Winterweizen	218	508,05	2,33	0,09	19,96
54	keine Angaben	416	432,49	1,04	0,00	30,98
68	Bebauung	114	355,64	3,12	0,02	54,43
75	Wintergerste	100	191,85	1,92	0,05	20,41
69	Grannenweizen	82	147,83	1,80	0,13	9,89
74	Winterroggen	36	119,39	3,32	0,25	26,42
102	Feldgemüse	53	107,62	2,03	0,10	15,75
66	Stilllegung	34	71,78	2,11	0,10	8,01
64	Buschbohnen	8	52,46	6,56	2,23	17,62
86	Ackerbohnen	28	48,97	1,75	0,17	7,90
92	Kartoffeln	24	45,48	1,90	0,04	6,88
130	Silomais	23	26,94	1,17	0,12	3,92
71	Sommerweizen	12	26,65	2,22	0,24	6,41
251	Kreuzblütler	11	24,51	2,23	0,03	5,65
129	Feldgras	9	15,39	1,71	0,40	4,14
142	Dauergrünland	31	18,88	0,61	0,09	2,67
110	Winterraps	11	11,60	1,05	0,28	2,63
76	Sommergerste	10	7,13	0,71	0,08	2,72
259	Zwischenfrucht	2	6,16	3,08	2,05	4,11
111	Sommerraps	3	4,66	1,55	0,68	2,41
156	Gehölz	12	3,94	0,33	0,09	0,86
77	Hafer	2	2,52	1,26	1,01	1,52
157	Gewässer	8	1,66	0,21	0,07	0,40
114	Sonnenblumen	1	0,66	0,66	0,66	0,66
	Gesamtfläche		2826,19			

Tab. 8.3: Arealstatistik der Landnutzung Weilerswist 1997

Code	Beschreibung	Häufigkeit	Flächen- summe (ha)	Mitt. Fläche (ha)	Min. Fläche	Max. Fläche
95	Zuckerrüben	329	913,26	2,78	0,04	26,42
70	Winterweizen	390	854,83	2,19	0,00	30,63
68	Bau	183	536,28	2,93	0,02	61,20
75	Wintergerste	150	290,74	1,94	0,08	13,31
69	Grannenweizen	155	282,28	1,82	0,08	8,90
54	keine Angaben	176	170,85	0,97	0,01	30,98
74	Winterroggen	52	127,69	2,46	0,04	19,96
86	Ackerbohnen	49	124,58	2,54	0,09	13,67
102	Feldgemüse	63	124,04	2,01	0,02	12,47
64	Buschbohnen	41	109,07	2,66	0,06	9,83
142	Dauergrünland	154	112,93	1,07	0,03	4,64
76	Sommergerste	32	51,49	1,61	0,10	7,48
92	Kartoffeln	23	47,13	2,05	0,04	12,75
66	Stillegung	27	28,69	1,06	0,11	3,11
130	Silomais	28	26,17	0,93	0,14	3,89
129	Feldgras	23	22,34	0,97	0,16	2,84
110	Winterraps	9	15,68	1,74	0,24	5,95
71	Sommerweizen	6	14,21	2,37	0,90	5,88
251	Kreuzblütler	9	12,14	1,35	0,46	3,31
157	Gewässer	23	9,54	0,41	0,01	2,69
73	Triticale	5	6,79	1,36	0,16	3,70
77	Hafer	6	6,61	1,10	0,12	2,85
156	Gehölz	18	6,30	0,65	0,13	3,20
154	Ödland	2	5,82	2,91	0,45	5,37
62	Versuchsfläche	2	3,33	1,67	0,84	2,49
259	Zwischenfrucht	2	2,67	1,34	0,88	1,79
139	Obstanlage	2	1,08	0,54	0,14	0,94
53	Brache	1	0,68	0,68	0,68	0,68
111	Sommerraps	1	0,36	0,36	0,36	0,36
52	Silage	7	0,31	0,09	0,04	0,16
	Gesamtfläche		3908,69			

Tab. 8.4: Arealstatistik der Landnutzung Weilerswist 1998

Code	Beschreibung	Häufigkeit	Flächensumme (ha)	Mittl. Flächen- größe (ha)	Min. Fläche	Max. Fläche
70	Winterweizen	408	901,54	2,21	0,01	26,79
95	Zuckerrüben	347	887,14	2,56	0,05	32,10
68	Bau	213	548,89	2,58	0,01	61,21
75	Wintergerste	161	338,42	2,10	0,00	21,41
69	Grannenweizen	133	274,09	2,06	0,10	13,53
54	keine Angaben	168	206,02	1,23	0,02	30,98
142	Dauergrünland	154	112,91	1,07	0,03	4,67
64	Buschbohnen	34	104,23	3,07	0,24	13,32
102	Feldgemüse	56	94,28	1,70	0,14	6,42
74	Winterroggen	39	73,25	1,88	0,02	8,91
76	Sommergerste	40	52,70	1,32	0,00	6,42
92	Kartoffeln	26	50,30	1,93	0,01	16,98
86	Ackerbohnen	23	62,32	2,72	0,16	5,63
66	Stillegung	49	43,96	0,90	0,01	3,38
130	Silomais	31	37,33	1,20	0,23	4,43
251	Kreuzblütler	27	34,95	1,29	0,05	4,74
73	Triticale	14	21,17	1,51	0,18	8,01
129	Feldgras	17	17,65	1,04	0,03	2,45
110	Winterraps	6	12,21	2,03	0,78	3,89
156	Gehölz	26	9,65	0,37	0,07	2,37
157	Gewässer	18	7,91	0,44	0,01	2,33
77	Hafer	5	7,08	1,42	0,12	2,41
62	Versuchsfläche	1	3,98	3,98	3,98	3,98
259	Zwischenfrucht	3	3,35	1,12	0,57	1,55
239	Kleegras	2	3,00	1,50	0,31	2,69
	Gesamtfläche		3908,34			

Tab. 8.5: Gebietsstatistik der ATKIS-Daten des Testgebietes Weilerswist

Code	Beschreibung	Flächensumme (ha)
2101	Ortslage	978,58
2111	Wohnbaufläche	418,13
2112	Industrie- und Gewerbefläche	243,95
2113	Fläche gemischter Nutzung	171,36
2114	Fläche bes. funktionaler Prägung	31,32
2121	Bergbaubetriebe	41,45
2129	Kläranlage, Klärwerk	2,03
2201	Sportanlage	20,98
2213	Friedhof	6,56
2227	Grünanlage	7,31
4101	Ackerland	7497,32
4102	Grünland	528,79
4103	Gartenland	7,98
4107	Wald, Forst	397,70
4108	Gehölz	121,81
4109	Sonderkultur	90,61
4199	unbestimmbare Fläche	3,21
5112	Binnensee, Teich, Stausee	3,82
Gesamtfläche		10572,91

Tab. 8.6: Übersicht der einmalig in der Vegetationsperiode erhobenen Parameter

Parameter	Definition	Durchführung	Anzahl der Messungen
Feldgröße	ha	Aus Karte ermitteln	1
Saattermin	Datum	Landwirt fragen	1
Saadichte	Körner oder Pflanzen pro m ²	Landwirt fragen	1
Sorte	Sortenname	Landwirt fragen	1
Reihenrichtung	Richtung der Saatreihe in Grad (Nord=0°; Süd=180°)	Richtung ermitteln und direkt in Karte eintragen	1
Abstand zwischen den Reihen	cm	Mit Metermaß messen	1
Abstand in den Reihen (ZR)	cm	Mit Metermaß messen	1
Vorfrucht	Pflanzenart	Landwirt fragen	1
Zwischenfrucht / Gründüngung	Pflanzenart	Landwirt fragen	1
Bodenbearbeitung		Landwirt fragen	1
Düngung (Termin, Menge)	Organisch / anorganisch	Landwirt fragen	1
Pflanzenschutz (Termin, Menge)	Chemisch / mechanisch	Landwirt fragen	1
Ertrag	dt/ha	Landwirt fragen	1
Bodenart	Bodenart und -charakteristika	Aus Bodenkarte ermitteln	1
Bodentyp	Verteilung in % von Sand, Schluff, Ton	Aus Bodenkarte ermitteln	1
Hangneigung	Neigungswinkel in Grad zur Horizontalen	Digitales Höhenmodell	1
Besonderheiten*		Visuelle Bonitur, evtl. Landwirt fragen	1

* Krankheiten, Unkrautbesatz, Wuchshöhe in Sonderfällen, Lückigkeit, Steine, Lager, Hagelschaden, Naßstellen, Windbruch

Tab. 8.7: Übersicht der zu jedem Überflug erhobenen Parameter

Parameter	Definition	Durchführung	Anzahl der Messungen
Wachstumsstadium	Stadium entsprechend Skala der jeweiligen Fruchtart	Visuelle Bonitur mit Hilfe der Skalen	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Bestandeshöhe	Höhe der Pflanzendecke in cm	Höhe von min. 5 Pflanzen mit Zollstock	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Pflanzen/m ² sowie Ähren/m ²	In 1m einer Saatreihe und mit Reihenzahl/m multiplizieren	Abzählen in 1m Saatreihe und mit Reihenzahl/m ² multiplizieren	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Frischmasse	Masse des frischen Pflanzenmaterials in einem definierten Areal in g/m ²	Pflanzen entlang 1m in Bodenhöhe abschneiden; gesamte Probe wiegen	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Trockenmasse	Masse des getrockneten Pflanzenmaterials in einem definierten Areal in g/m ²	Probe FM in Trockenschrank bei 105°C, 24 h	
Wassergehalt der Pflanzen	Menge des Wassers in der Pflanze pro Gewichtseinheit	Differenz zwischen FM und TM	
Ährenneigung	Winkel der Ähre zur Senkrechten (stehend, schräg nach oben, waagrecht, schräg nach unten, senkrecht nach unten)	Visuelle Bonitur	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Länge der Ähren / Grannen	In cm	Messung mit Zollstock	10 Messungen an 4 Stellen
Blattbenetzung	Durchschnittliche Wasserbenetzung der Blätter (trocken, mittel, stark)	Visuelle Bonitur zum Zeitpunkt des Überflugs	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Blattflächenindex	Gesamtfläche der grünen Blätter/m ² Bodenfläche	Blätter von 1m einer Saatreihe abtrennen und mit Blattflächenmeßgerät messen	3 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Bodenbedeckungsgrad	Fläche der senkrecht auf den Boden projizierte Frischmasse (in %) der Gesamtfläche	Visuelle Bonitur	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Bearbeitungszustand	Einteilung der Bodenunebenheiten in gepflügt, gegrubbert, geeegt, Saatbett bereitet	Visuelle Bonitur	1
Bodenfeuchte	Wassergehalt des Bodens in %	Stechzylinder: Differenz von feuchtem und trockenem Boden	4 Messungen an repräsentativen Stellen im Feld
Besonderheiten	Siehe Tab. 8.6	Visuelle Bonitur	
Windgeschwindigkeit	In m/s	Wetterstation	
Windrichtung		Wetterstation	
Windeinfluß	Getreide: wenig, konstant, wogend	Visuelle Bonitur	
Niederschlag	In mm/m ²	Wetterstation	
Photo			2 Photos

Tab. 8.8: BBCH-Dezimal-Code nach Tottmann (1987)

BBCH-Code	Definition
0	Keimung
00	Trockener Samen
07	Keimscheide (Koleoptile) aus dem Samen ausgetreten
09	Auflaufen: Keimscheide durchbricht Bodenoberfläche
1	Blattentwicklung
10	Erstes Blatt aus der Koleoptile ausgetreten
11	1-Blatt-Stadium: 1. Laubblatt entfaltet, Spitze des 2. Blattes sichtbar
12	2-Blatt-Stadium: 2. Laubblatt entfaltet... Stadien fortlaufend bis...
19	9 und mehr Laubblätter entfaltet
2	Bestockung
21	1. Bestockungstrieb sichtbar: Beginn der Bestockung
22	2. Bestockungstrieb sichtbar... Stadien fortlaufend bis....
29	9 und mehr Bestockungstriebe sichtbar
3	Schossen (Haupttrieb)
30	Beginn des Schossens
31	1-Knoten-Stadium
32	2-Knoten-Stadium
37	Erscheinen des letzten Blattes (Fahnenblatt)
39	Liqua (Blatthütchen)-Stadium
4	Ährenscheiden
41	Blattscheide des Fahnenblattes verlängert sich
43	Ähre im Halm aufwärts geschoben. Blattscheide Fahnenblatt beginnt anzuschwellen
45	Blattscheide des Fahnenblattes geschwollen
47	Blattscheide des Fahnenblattes öffnet sich
49	Grannenspitzen: Grannen über Liqua des Fahnenblattes sichtbar
5	Ähren- und Rispenschieben
51	Beginn des Ährenschiebens
55	Mitte des Ährenschiebens
59	Ende des Ährenschiebens
6	Blüte
61	Beginn der Blüte
65	Mitte der Blüte
69	Ende der Blüte
7	Fruchtbildung
71	Erste Körner erreichen Hälfte ihrer endgültigen Größe: Korninhalt wässrig
73	Frühe Milchreife
75	Mitte Milchreife
77	Späte Milchreife
8	Samenreife
83	Frühe Teigreife
85	Teigreife
87	Gelbreife
89	Vollreife
9	Absterben
92	Totreife
93	Körner lockern sich tagsüber

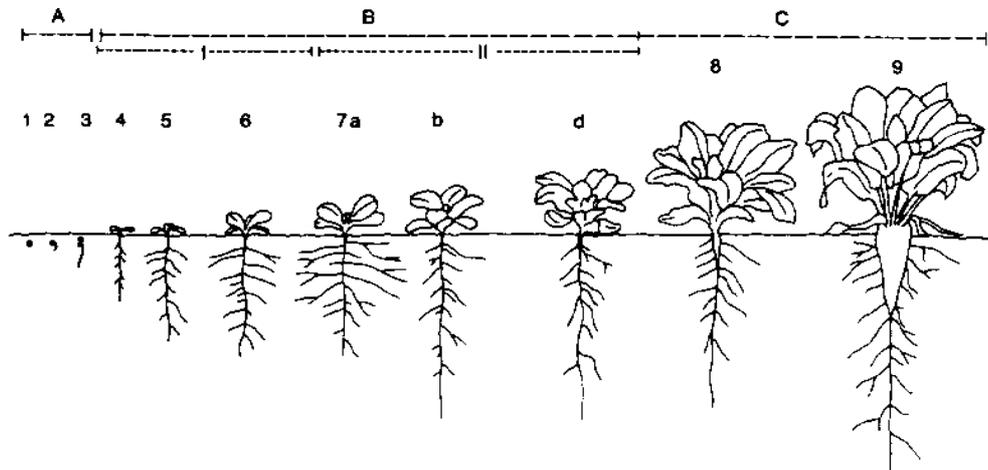


Abb. 8.1: Schematische Darstellung der Entwicklungsphasen der Zuckerrüben (nach WINNER 1987).

Phase A: Keimung und Jugendentwicklung bis zum 12-Blatt-Stadium, die Biomasseentwicklung wird hauptsächlich durch das Blattwachstum bestimmt.

Phase B: Bestandesschluss, weiteres Blattwachstum, Dickenwachstum des Rübenkörpers, Beginn der Zuckereinlagerung.

Phase C: Abnahme der Blattbiomasse durch steigende Absterberate, weiterer Anstieg der Rübenmasse bis zur Ernte

Tab. 8.9: Informationen über die Winterweizentestfelder 1996

	E 3940	H9440	F 6600	M 11430	E 4010	E3521
Feldgröße (ha)	3,86	32,01	4,25	12,01	4,48	7,56
Saadichte	200 kg/ha	185 kg/ha	260 kg/ha	187 kg/ha	160 kg/ha	152 kg/ha
Saattermin	19.10.95	30.10.95	28.11.95	01.12.95	06.10.96	06.10.95
Sorte	Ritmo	Zentos	Greif	Zentos, Rialto	Ritmo	Athlet (B4)
Reihenabstand	0,12 m	0,10 m	0,12 m	0,125 m	0,10 m	0,10 m
Vorfrucht	ZR	WR	k.A.	ZR	ZR	ZR
Erntetermin	k.A.	08.08.96:	30.07.96:	19.08.96:	05.08.96:	05.08.96:
Ertrag: dt/ha	80,2 dt/ha	68 dt/ha	72 dt/ha	66.89 dt/ha	88 dt/ha	90 dt/ha

Tab. 8.10: Informationen über die Wintergerstentestfelder 1996

	E 3980	F6610	M 11380	M11420	K 10970	F 6980
Feldgröße (ha)	4,47	3,25	3,86	20,11	4,75	4,5
Saadichte	130 kg/ha	150 kg/ha	330 Körner	330 Körner	118 kg/ha	118 kg/ha
Saattermin	28.09.95	23.09.95	02.10.95	25./26.09.95	22.09.95	22.09.95
Sorte	Loreley	Milva	Loreley	Loreley, Krimhild	Loreley	Loreley
Reihenabstand	0,12 m	0,13 m	0,125 m	0,125 m	0,10 m	0,10 m
Vorfrucht	WW	k.A.	WW	WW	WW	WW
Erntetermin	17.07.96:	11.07.96:	19.-22.07.96:	19.-22.07.96:	16.07.96:	16.07.96:
Ertrag: dt/ha	78 dt/ha	72 dt/ha	80 dt/ha	80 dt/ha	80,5 dt/ha	80 dt/ha

Tab. 8.11: Informationen über die Winterroggentestfelder 1996

	I 5870	I 5880	D3120	G 4920	H 8681	F 6790
Feldgröße (ha)	20,33	26,9	7,5	1,78	1,1	4,5
Saadichte	65 kg/ha	70 kg/ha	96 kg/ha	110 kg/ha	110 kg/ha	85 kg/ha
Saattermin	06.10.95	04.10.95	08.10.95	4. / 5.10.95	4. - 5.10.95	10.10.95
Sorte	Rapid	Locarno	Rapid	Rapid, Marder	Rapid, Marder	Rapid
Reihenabstand	0,10 m	0,10 m	0,12 m	0,15 m	0,15 m	0,10 m
Vorfrucht	WW	WW	k.A.	WW	WW	WR
Erntetermin	03.08.96:	06.08.96:	30.07.96:	27./28.07.96:	27./28.07.96:	k.A.
Ertrag: dt/ha	90,3 dt/ha	85,5 dt/ha	80 dt/ha	72 dt/ha	72 dt/ha	68 dt/ha

Tab. 8.12: Informationen über die Zuckerrübenestfelder 1996

	E 3970	H9000	G 8350	F 6630	M 11440	F 3500
Feldgröße (ha)	5,11	8,98	11,51	5,2	16,5	27,5
Saattermin	08.04.96	10.04.96	09.04.96	10.04.96	08.04.96	22.03.96
Sorte	Sofie	Steffi	Sofie	Victoria	Sofie, Sonia	Sofie
Reihenabstand	0,45 m	0,45 m	0,45 m	0,45 m	0,45 m	0,45 m
Abstand in der Reihen	0,22 m	0,21 m	0,21 m	0,21 m	0,22 m	0,21 m
Vorfrucht	WG	WR	WR	WR	Stilllegung Klee gras	WR/BB/Still/ WW
Erntetermin	8.-24.10.96:	30.09.96:	18.10.96:	22./23.10; 29./30.10.96:	k.A.	06.11.96:
Ertrag: dt/ha	360 dt/ha	420 dt/ha	531 dt/ha	500 dt/ha	513 dt/ha	621 dt/ha

Tab. 8.13: Informationen über die Winterweizentestfelder 1997

	D3290	D3370	F3500	F6630	E3970	M11440	G8350	H9000
Feldgröße (ha)	8,5	12,75	27,5	5,1	5,3	16,5	11,51	5,25
Saadichte	220 kg/ha	224 kg/ha	180 kg/ha	180 kg/ha	190 kg/ha	185 kg/ha	190 kg/ha	161,15 kg/ha
Saattermin	23.10.96	28.10.96	05.11.96	25.10.96	25.10.96	25./ 26.11.96	08.11.96	23.10.96
Sorte	Soisson, Rialto	Ritmo, Rialto, Greif	Bandit	Rialto	Ritmo	Zentos	Bandit	Ritmo
Reihenabstand	0,107 m	0,107 m	0,10 m	0,13 m	0,12 m	0,125 m	0,10 m	0,10 m
Vorfrucht	k.A.	k.A.	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR
Erntetermin Ertrag: dt/ha	k.A 84 dt/ha	k.A. 82 dt/ha	10.08.97 104,05 dt/ha	k.A. 91 dt/ha	09.08.97 98 dt/ha	11.08.97 86 dt/ha	18.08.97 98,59 dt/ha	18.08.97 91,31 dt/ha

Tab. 8.14: Informationen über die Wintergerstentestfelder 1997

	M11430	E3940	P41	B1120	S-Robens	P11	G73
Feldgröße (ha)	12,01	5,0	8,5	8,5	11,0	10,0	2,5
Saadichte	166 kg/ha	88 kg/ha	170 kg/ha	140 kg/ha	150 kg/ha	125 kg/ha	125 kg/ha
Saattermin	07.10.96	25.09.96	22.09.96	26.09.96	20.09.96	25.09.96	01.10.96
Sorte	Milva	Milva	Angora	Milva	Loreley, Milva	Loreley	Loreley
Reihenabstand	0,125	0,12 m	0,12 m	0,107 m	0,107 m	0,10 m	0,10 m
Vorfrucht	WW	WW	WW	k.A.	k.A.	WW	WW
Erntetermin Ertrag: dt/ha	28./ 29.07.97 75 dt/ha	24.07.97 87,6 dt/ha	23.07.97 72 dt/ha	k.A. 84 dt/ha	k.A. 80 dt/ha	23.07.97 74,45 dt/ha	23.07.97 76 dt/ha

Tab.: 8.15 Informationen über die Winterroggentestfelder 1997

	OEDE1	Öde2	OEDKO3	F6600	P37	H9440	H9500	G85
Feldgröße (ha)	5,0	9,0	7,35	7,5	5,5	32,01	10,23	3,5
Saadichte	99,92 kg/ha	99,92 kg/ha	95,5 kg/ha	100 kg/ha	88 kg/ha	67,68 kg/ha	62,40 kg/ha	k.A:
Saattermin	15.10.96	14./ 15.10.96	13.10.96	12.10.96	08.10.96	10.10.96	08.10.96	k.A.
Sorte	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Locarno	k.A.
Reihenabstand	0,125 m	0,125 m	0,125 m	0,107 m	0,12 m	0,10 m	0,10 m	k.A.
Vorfrucht	WW	WW	WW	k.A.	WW	WW	WW	k.A.
Erntetermin Ertrag: dt/ha	09.08.97 81 dt/ha	10.08.97 80 dt/ha	10.08.97 82 dt/ha	k.A. 80 dt/ha	08.08.97 80,4 dt/ha	08.08.97 97,48 dt/ha	10.08.97 91,53 dt/ha	k.A. k.A.

Tab. 8.16: Informationen über die Winterweizentestfelder 1998

	M11380	M11420	K7270	F6980	F5980	F6620	I5880	I5870	E3980
Feldgröße (ha)	3,86	20,01	4,0	4,75	2,4	4,83	26,9	20,33	4,47
Saadichte	215 kg/ha	180 kg/ha	141 kg/ha	170 kg/ha	185 kg/ha	110 kg/ha	205 kg/ha	176 kg/ha	200 kg/ha
Saattermin	17.11.1997	26.11.1997	17.10.1997	20.10.1997	16.10.1997	03.11.1997	17.11.1997	31.10.1997	17.10.1997
Sorte	Tremie, Ritmo	Zentos	Bandit	Rialto	Ritmo	Ritmo, Domino	Bandit	Bandit	Ritmo
Reihenabstand	0,125 m	0,125 m	0,10 m	0,10 m	0,135 m	0,135 m	0,10 m	0,10 m	0,12 m
Vorfrucht	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	WG
Erntetermin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	24.7.98	22.7.98	k.A.
Ertrag: dt/ha	91/61 dt/ha	70 dt/ha	84 dt/ha	81 dt/ha	86,9 dt/ha	86,9 dt/ha	97,2 dt/ha	90,3 dt/ha	84 dt/ha

Tab. 8.17: Informationen über die Wintergerstentestfelder 1998

	M11440	K10610	F6970	F6400	F6630	D3280	E3970	Schnitz
Feldgröße (ha)	16,5	7,0	4,75	2,7	5,1	8,5	5,11	5,25
Saadichte	124 kg/ha	115 kg/ha	120 kg/ha	146 kg/ha	166 kg/ha	146 kg/ha	128 kg/ha	128 kg/ha
Saattermin	3./4.10.97	03.10.97	03.10.97	26.09.97	01.10.97	27.09.97	29.09.97	28.09.97
Sorte	Milva	Theresa	Majestic	Milva	Majestic	Loreley	Milva	Milva
Reihenabstand	0,125 m	0,10 m	0,10 m	0,107 m	0,135 m	0,107	0,12 m	0,12 m
Vorfrucht	WW	WW	WW	WW	WW	WW	WW	WW
Erntetermin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ertrag: dt/ha	68 dt/ha	80 dt/ha	81 dt/ha	80 dt/ha	83,6 dt/ha	88 dt/ha	69 dt/ha	67 dt/ha

Tab. 8.18: Informationen über die Winterroggentestfelder 1998

	P80	P73	R Klein	E4260	I6110	D3000	Poetis
Feldgröße (ha)	2,29	2,65	2,75	8,75	8,98	7,5	3,5
Saadichte	94 kg/ha	95 kg/ha	100 kg/ha	k.A.	k.A.	100 kg/ha	270 kg/ha
Saattermin	04.10.97	04.10.97	30.09.97	08.10.97	07.10.97	29./30.09.97	29.09.97
Sorte	Rapid, Halo	Rapid, Halo	Farino	Esprit	Esprit	Rapid, Farino	Rapid
Reihenabstand	0,12 m	0,12 m	0,12 m	0,10 m	0,10 m	0,107 m	0,13 m
Vorfrucht	WW	WW	WW	WW	WW	k.A.	k.A.
Erntetermin	k.A.	k.A.	k.A.	13.07.98	13.07.98	k.A.	k.A.
Ertrag: dt/ha	79 dt/ha	81,5 dt/ha	69 dt/ha	76,64 dt/ha	74 dt/ha	80/56 dt/ha	76 dt/ha

Tab. 8.19: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterweizen 1996

	14. März	17. April	18. April	22. Mai	11. Juni	26. Juni	01. August	10. Okt	14. Nov
E3940	-7,46	-12,32	-12,87	-14,92	-14,81	-14,53	-11,91	-7,95	-7,81
F6600	-5,48	-13,00	-13,36	-15,04	-16,68	-14,51	-11,44	-10,37	-6,50
E3521	-9,63	-13,41	-13,79	-17,27	-17,61	-15,70	-10,04	-8,37	-5,42
E4010	-9,91	-14,05	-14,83	-17,05	-16,87	-14,90	-9,67	-7,47	-5,39
M11430	-8,35	-12,74	-12,92	-11,97	-15,06	-14,40	-11,20	-13,29	-6,76
H9440	-8,50	-13,19	-13,75	-12,55	-13,89	-13,10	-10,38	-12,52	-7,85
Mittelwert	-8,22	-13,12	-13,59	-14,80	-15,82	-14,52	-10,77	-10,00	-6,62
Dyn. Bereich	4,43	1,72	1,96	5,29	3,73	2,61	2,25	5,82	2,46

Tab. 8.20: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Wintergerste 1996

	14. März	17. April	18. April	22. Mai	11. Juni	26. Juni	01. August	10. Okt	14. Nov
F6610	-8,62	-12,63	-13,92	-19,34	-10,53	-7,18	-10,24	-8,79	-6,23
F6980	-9,99	-13,47	-13,71	-18,89	-11,96	-6,20	-11,37	-8,99	-6,36
E3980	-9,90	-14,60	-15,24	-18,75	-8,64	-6,74	-10,87	-10,06	-6,96
M11380	-9,13	-12,24	-13,87	-19,46	-15,22	-7,00	-11,92	-8,36	-8,32
M11420	-9,45	-13,31	-14,10	-19,26	-12,25	-8,49	-11,59	-8,52	-9,40
K10970	-8,97	-11,27	-12,27	-18,43	-11,66	-7,14	-11,18	-9,22	-5,93
Mittelwert	-9,34	-12,92	-13,85	-19,02	-11,71	-7,13	-11,20	-8,99	-7,20
Dyn. Bereich	1,36	2,20	2,98	1,03	6,58	2,29	1,68	1,70	3,47

Tab. 8.21: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterroggen 1996

	14. März	17. April	18. April	22. Mai	11. Juni	26. Juni	01. August	10. Okt	14. Nov
G4290	-6,39	-11,70	-12,58	-14,08	-13,55	-9,99	-9,73	-7,11	-6,89
D3120	-8,54	-11,85	-13,22	-16,37	-15,60	-8,84	-10,79	-10,40	-6,12
F6790	-10,67	-12,87	-13,24	-17,59	-15,88	-9,62	-11,77	-7,81	-5,85
I5870	-7,75	-10,18	-11,22	-15,14	-15,25	-9,59	-12,25	-7,19	-7,05
I5880	-7,17	-10,70	-11,48	-14,99	-15,26	-10,54	-11,86	-8,11	-5,43
H8681	-7,66	-11,92	-12,78	-16,63	-	-9,27	-10,25	-8,95	-5,85
Mittelwert	-8,03	-11,54	-12,42	-15,80	-15,11	-9,64	-11,11	-8,26	-6,20
Dyn. Bereich	4,28	2,69	2,02	3,51	2,33	1,70	2,52	3,29	1,62

Tab. 8.22: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Zuckerrüben 1996

	14. März	17. April	18. April	22. Mai	11. Juni	26. Juni	01. August	10. Okt	14. Nov
E3970	-5,92	-13,91	-14,65	-9,35	-7,40	-6,46	-8,75	-8,09	-6,51
F6630	-5,44	-12,68	-12,73	-9,79	-8,37	-7,85	-8,69	-7,70	-4,74
M11440	-8,99	-13,47	-13,39	-9,13	-9,51	-8,58	-8,99	-7,62	-6,52
G8350	-5,83	-12,85	-13,15	-7,88	-8,79	-9,05	-8,02	-7,29	-7,14
H9000	-6,33	-12,89	-12,80	-6,63	-8,65	-8,11	-8,80	-7,51	-7,33
F3500	-6,25	-13,53	-13,51	-6,54	-7,63	-8,15	-8,30	-6,28	-6,38
Mittelwert	-6,46	-13,22	-13,37	-8,22	-8,39	-8,03	-8,59	-7,41	-6,44
Dyn. Bereich	3,55	1,06	1,92	3,25	2,12	2,59	0,98	1,81	2,59

Tab. 8.23: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterweizen 1997

	08. Mai	27. Mai	12. Juni	01. Juli	17. Juli	05. Aug	21. Aug	25. Sept
D3290	-13,97	-16,62	-16,70	-16,66	-14,46	-10,36	-10,91	-12,75
D3370	-11,97	-15,37	-16,71	-14,50	-10,85	-9,41	-10,63	-10,84
F3500	-12,64	-16,50	-16,15	-14,71	-13,98	-9,34	-11,35	-11,77
F6630	-13,29	-17,73	-18,13	-15,96	-14,06	-8,96	-11,72	-13,15
E3970	-13,83	-16,20	-16,92	-15,83	-14,21	-10,85	-11,11	-13,10
M11440	-13,91	-15,17	-15,15	-12,88	-11,63	-9,45	-13,94	-12,52
G8350	-11,21	-14,11	-14,84	-13,20	-14,08	-8,63	-13,99	-11,27
H9000	-14,91	-17,77	-16,85	-15,47	-14,52	-10,67	-11,76	-11,06
Mittelwert	-13,22	-16,18	-16,43	-14,90	-13,47	-9,71	-11,92	-12,06
Dyn. Bereich	3,71	3,66	3,29	3,78	3,62	2,23	3,36	2,31

Tab. 8.24: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Wintergerste 1997

	08. Mai	27. Mai	12. Juni	01. Juli	17. Juli	05. Aug	21. Aug	25. Sept
M11430	-18,12	-18,57	-8,79	-7,92	-10,74	-6,69	-10,66	-11,48
E3940	-18,91	-15,54	-7,88	-9,60	-11,76	-10,94	-11,51	-11,74
P41	-16,57	-13,44	-7,65	-8,14	-9,43	-8,54	-11,29	-10,23
B1120	-19,63	-18,24	-6,23	-5,62	-10,48	-9,97	-10,23	-10,20
S-Robens	-13,91	-14,94	-8,71	-9,01	-8,70	-8,50	-9,16	-9,35
P11	-18,94	-16,71	-7,68	-6,26	-12,26	-11,04	-10,73	-10,51
G73	-14,80	-15,16	-11,72	-9,99	-9,81	-10,81	-10,84	-9,81
Mittelwert	-17,27	-16,08	-8,38	-8,08	-10,46	-9,50	-10,63	-10,47
Dyn. Bereich	5,72	5,13	5,49	3,73	3,56	4,34	2,36	2,39

Tab. 8.25: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterroggen 1997

	08. Mai	27. Mai	12. Juni	01. Juli	17. Juli	05. Aug	21. Aug	25. Sept
OEDE1	-14,87	-14,58	-12,49	-8,83	-8,82	-8,81	-11,50	12,18
Öde2	-14,11	-15,05	-13,95	-9,04	-8,96	-9,79	-11,69	-11,44
OEDKO3	-15,06	-14,62	-13,78	-8,57	-8,09	-10,87	-12,29	-11,57
F6600	-15,44	-16,28	-13,50	-8,99	-8,25	-8,90	-9,32	-10,93
P37	-15,02	-14,39	-12,10	-7,44	-7,91	-7,48	-10,18	-11,95
H9440	-14,81	-15,00	-13,27	-8,88	-9,31	-10,89	-10,32	-12,05
H9500	-13,56	-14,03	-13,75	-8,92	-9,19	-10,05	-10,55	-11,45
G85	-14,94	-14,76	-13,56	-8,63	-7,30	-9,31	-7,81	-12,00
Mittelwert	-14,73	-14,84	-13,30	-8,66	-8,48	-9,51	-10,46	-11,70
Dyn. Bereich	1,88	2,25	1,85	1,59	2,01	3,42	4,49	1,24

Tab. 8.26: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterweizen 1998

	12. Feb.	19. März	07. April	23. April	12. Mai	28. Mai	16. Juni	02. Juli	21. Juli
M11380	-7,03	-6,20	-6,25	-11,45	-13,82	-11,00	-7,07	-11,10	-8,86
M11420	-7,10	-6,66	-6,71	-10,69	-12,73	-13,11	-11,62	-12,24	-10,94
K7270	-6,88	-8,10	-8,68	-12,63	-16,42	-13,37	-11,85	-11,95	-10,20
F6980	-7,60	-7,95	-8,16	-13,04	-15,84	-15,71	-12,98	-12,05	-10,59
F5980	-4,66	-4,91	-7,80	-10,65	-14,27	-14,90	-13,38	-13,51	-11,48
F6620	-5,42	-4,83	-6,84	-10,02	-14,99	-14,82	-13,69	-13,76	-11,74
I5880	-6,30	-6,37	-7,56	-10,48	-13,80	-14,82	-13,43	-13,70	-11,81
I5870	-6,38	-6,17	-7,29	-11,32	-14,71	-13,97	-11,93	-12,84	-11,91
E3980	-7,74	-7,94	-8,98	-12,24	-15,51	-15,48	-13,86	-14,41	-11,66
Mittelwert	-6,57	-6,57	-7,58	-11,39	-14,68	-14,13	-12,20	-12,84	-11,02
Dyn. Bereich	3,08	3,27	2,73	2,61	3,69	4,71	6,78	3,31	3,06

Tab. 8.27: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Wintergerste 1998

	12. Feb.	19. März	07. April	23. April	12. Mai	28. Mai	16. Juni	02. Juli	21. Juli
M11440	-6,43	-7,58	-8,31	-12,82	-15,33	-9,57	-8,38	-9,16	-6,73
K10610	-7,93	-9,14	-9,44	-14,55	-14,56	-10,85	-8,04	-8,48	-7,88
F6970	-7,75	-8,48	-9,21	-13,13	-13,67	-11,86	-7,13	-9,71	-7,42
F6400	-9,20	-10,52	-11,64	-14,68	-16,13	-9,65	-8,68	-9,99	-8,37
F6630	-6,00	-8,31	-11,27	-13,67	-15,01	-7,61	-8,10	-8,92	-7,01
D3280	-7,82	-9,28	-11,19	-14,31	16,07	-9,05	-8,47	-10,50	-8,12
E3970	-8,59	-9,51	-11,90	-15,17	-16,13	-9,17	-7,54	-11,14	-5,69
Schnitz	-8,00	-9,45	-10,96	-11,76	-13,89	-8,98	-8,04	-9,16	-6,43
Mittelwert	-7,72	-9,03	-10,49	-13,76	-15,10	-9,59	-8,05	-9,63	-7,21
Dyn. Bereich	3,19	2,95	3,58	3,42	2,45	4,25	1,55	2,65	2,68

Tab. 8.28: Übersicht der Radarrückstreuwerte (in dB) von Winterroggen 1998

	12. Feb.	19. März	07. April	23. April	12. Mai	28. Mai	16. Juni	02. Juli	21. Juli
P80	-7,41	-8,45	-9,03	-11,95	-12,59	-10,95	-8,09	-7,87	-10,30
P73	-5,84	-8,25	-9,96	-12,70	-13,02	-13,83	-9,58	-9,38	-10,81
R Klein	-6,62	-8,20	-9,61	-13,10	-12,40	-11,88	-7,00	-9,86	-8,96
E4260	-7,63	-7,71	-8,38	-11,75	-13,74	-12,67	-8,09	-9,70	-11,62
I6110	-6,81	-8,08	-8,84	-11,29	-11,65	-10,79	-7,28	-9,37	-9,96
D3000	-7,36	-8,15	-9,99	-14,30	-14,22	-13,07	-7,55	-9,89	-11,74
Poetis	-8,72	-9,41	-9,88	-14,49	-13,90	-12,16	-9,43	-7,62	-11,16
Mittelwert	-7,20	-8,32	-9,39	-12,80	-13,07	-12,19	-8,15	-9,10	-10,65
Dyn. Bereich	2,88	1,70	1,50	3,20	2,57	2,88	2,58	2,28	2,77

Tab. 8.29: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterweizenfelder in 1996

	E 3940	F 6600	E 3521	E 4010	M 11420	H 9440
Pflanzenhöhe (cm)						
23.05.96	49,5	42,5	65,6	53,4	42,3	44,8
13.06.96	86,0	71,6	94,6	84,2	72,4	84,8
26.06.96	84,5	73,8	90,6	84,8	81,0	91,8
16.07.96	82,8	68,3	92,2	83,2	75,5	89,7
31.07.96	81,4	66,7	88,0	81,6	75,1	81,7
Frischmasse (g/m ²)						
23.05.96	2850	2675	5340	4890	1912	1900
13.06.96	5054	3108	4395	4585	4540	5325
26.06.96	5321	3675	5705	5945	4396	5565
16.07.96	5875	4046	3685	4015	3752	5320
31.07.96	3163	2654	3065	3095	2804	2350
Trockenmasse (g/m ²)						
23.05.96	567	550	1010	980	392	450
13.06.96	1184	853	1362	1435	948	1394
26.06.96	1683	1238	2205	2175	1404	1790
16.07.96	2333	1671	1745	1875	1448	2225
31.07.96	2200	1650	2225	2245	1748	1805
Ährenfrischmasse (g/m ²)						
13.06.96	783	567	620	725	496	850
26.06.96	1313	954	1735	1875	980	1385
16.07.96	2583	1742	1625	2005	1456	2315
31.07.96	1775	1450	1490	1715	1528	1335
Ährentrockenmasse (g/m ²)						
13.06.96	234	191	278	301	156	322
26.06.96	425	321	630	655	356	485
16.07.96	1133	813	840	1005	604	1050
31.07.96	1258	1004	1160	1325	1024	1065

Tab. 8.30: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Wintergerstefelder in 1996

	F6610	F6980	E3980	M11380	M11420	K10970
Pflanzenhöhe (cm)						
22.05.	91,3	95,2	102,4	83,4	91,3	100,6
12.06.	112,5	109,2	120,8	122,6	118,2	107,3
26.06.	107,9	104,6	112,6	111,8	111,3	102,0
15.07.	104,2	96,1	108,8	104,9	104,9	94,3
Frischmasse (g/m ²)						
22.05.	5637	7140	8725	6304	4776	5600
12.06.	5478	4440	5767	6356	5248	4063
26.06.	4919	3875	5667	4768	5220	3350
15.07.	3493	2315	2371	3496	3148	2010
Trockenmasse (g/m ²)						
22.05.	1007	1650	1683	1232	1024	1400
12.06.	1527	1660	1836	1889	1548	1788
26.06.	1826	1960	2521	1952	2140	1770
15.07.	1704	1730	1758	2204	1888	1610
Ährenfrischmasse (g/m ²)						
22.05.	-	-	-	-	-	-
12.06.	1381	1630	1688	1736	1488	1683
26.06.	1670	1755	2408	1904	2020	1485
15.07.	1048	1100	1158	1440	1240	925
Ährentrockenmasse (g/m ²)						
22.05.	-	-	-	-	-	-
12.06.	579	707	739	718	620	755
26.06.	900	1010	1317	1028	1116	900
15.07.	870	950	1000	1252	1056	790

Tab. 8.31: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterroggenfelder in 1996

	G4290	D3120	F6790	I5870	I5880	H8618
Pflanzenhöhe (cm)						
23.05.96	101,3	99,05	98,15	102,65	106,9	109,95
13.06.96	129,25	136,05	132,1	146,35	133,55	142,3
26.06.96	124,2	128,8	126,6	143	133,35	135,6
16.07.96	118,5	122	108,75	131,05	128,4	126,1
31.07.96	113,5	113,15	105,8	125,6	117,95	125,9
Frischmasse (g/m ²)						
23.05.96	4720	7450	10430	8300	8190	6607
13.06.96	3073	5167	6185	8333	9283	6028
26.06.96	3497	5817	6760	10890	6715	4820
16.07.96	2270	4329	4590	6585	7060	3157
31.07.96	1720	4504	3835	3355	3020	1587
Trockenmasse (g/m ²)						
23.05.96	1133	1492	2300	1600	1650	1247
13.06.96	1173	1584	1823	2365	2523	1872
26.06.96	1493	1917	2520	3415	-	1777
16.07.96	1223	1758	2300	2630	2850	1480
31.07.96	1340	2450	2875	2180	1945	1223
Ährenfrischmasse (g/m ²)						
23.05.96	520	642	1280	990	830	813
13.06.96	590	775	1090	1192	1375	911
26.06.96	1187	1417	2125	2805	2240	1467
16.07.96	947	1675	2105	2470	2855	1333
31.07.96	817	1850	2020	1465	1265	727
Ährentrockenmasse (g/m ²)						
23.05.96	213	267	460	290	305	213
13.06.96	263	326	418	467	522	373
26.06.96	537	571	875	1120	-	613
16.07.96	617	863	1180	1275	1460	737
31.07.96	690	1321	1625	1165	1040	610

Tab. 8.32: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Blattfrischmasse sowie Blatttrockenmasse der Zuckerrübenfelder in 1996

	E 3970	F6630	M11440	G 8350	H9000	F 3500
Pflanzenhöhe (cm)						
23.05.96	5,3	4,3	4,3	4,3	4,4	7,5
13.06.96	23,0	18,6	22,1	19,2	19,5	24,6
26.06.96	38,2	34,8	36,9	32,5	36,0	39,4
16.07.96	49,3	41,7	50,4	46,5	52,9	45,6
31.07.96	47,8	40,4	45,2	45,2	47,4	49,9
15.08.96	47,4	45,1	46,4	46,9	49,3	51,3
05.09.96	34,8	37,0	46,8	47,5	48,9	48,1
24.09.96	44,3	39,9	45,9	45,9	50,2	52,5
10.10.96		44,5	47,7	46,8	46,4	50,5
Frischmasse (g/m²)						
26.06.96	2781	1956	2345	2182	2659	3687
16.07.96	5301	4762	5019	5406	5978	6897
31.07.96	6240	5543	6703	4945	8439	9281
15.08.96	4883	5064	9067	7802	6540	11506
05.09.96	6209	5173	7322	8152	10125	8977
24.09.96	7853	8330	8999	9980	9084	11599
10.10.96		6798	9227	10958	10139	10995
Trockenmasse (g/m²)						
26.06.96	327	245	264	277	285	473
16.07.96	573	857	633	647	690	684
31.07.96	988	897	1066	692	1176	1282
15.08.96	847	1046	1502	1260	1125	1741
05.09.96	1456	1096	1714	1748	2729	2099
24.09.96	1123	1205	1334	1442	1248	1716
10.10.96		1030	1543	1816	1554	1606
Blattfrischmasse (g/m²)						
13.06.96	887	475	722	615	697	1023
26.06.96	2277	1486	1880	1646	2111	2645
16.07.96	3944	3273	3702	3662	4108	4383
31.07.96	4003	3249	4106	2774	4902	5323
15.08.96	2671	2289	4926	3850	3021	5517
05.09.96	2683	2573	3492	3757	4140	3749
24.09.96	3668	3853	3978	4397	4275	4737
10.10.96		3169	4123	4151	4117	3961
Blatttrockenmasse (g/m²)						
13.06.96	79	50	72	57	64	110
26.06.96	226	167	187	185	196	300
16.07.96	351	465	398	350	386	398
31.07.96	470	425	504	305	541	556
15.08.96	393	431	616	449	472	662
05.09.96	402	410	480	490	568	513
24.09.96	413	425	458	416	417	491
10.10.96		420	590	562	552	527

Tab. 8.33: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterweizenfelder in 1997

	D 3290	D 3370	F 3500	F 6630	E 3970	M 11440	G 8350	H 9000
Pflanzenhöhe (cm)								
03.04.97	11,4	10,7	16,1	16,2	13,5	8,8	13,0	15,3
21.04.97	21,3	23,3	25,6	24,4	25,0	18,0	22,5	25,5
07.05.97	42,0	39,0	36,6	42,1	36,5	42,4	36,1	39,6
26.05.97	71,4	63,8	63,2	73,0	69,0	75,0	60,7	67,1
11.06.97	92,9	85,5	86,5	91,5	87,8	97,3	82,4	85,6
30.06.97	91,4	87,8	85,0	88,9	89,2	105,9	86,6	89,6
16.07.97	90,3	87,7	86,2	89,8	90,4	106,9	86,5	89,2
05.08.97	89,1	87,6	84,2	87,6	87,9	99,4	86,1	88,4
Frischmasse (g/m ²)								
03.04.97	229	330	383	519	350	257	197	444
21.04.97	640	913	1054	1046	889	812	490	1212
07.05.97	2594	2565	2434	2662	2577	2210	2065	3030
26.05.97	4386	4422	4085	4741	5055	3213	2826	4457
11.06.97	6336	6171	5193	5396	7234	6861	5375	5846
30.06.97	6405	6100	6328	5511	6096	5461	6332	6231
16.07.97	5764	5576	5793	4944	6442	6659	5722	5930
05.08.97	4541	3607	4112	3049	3827	3512	3827	4527
Trockenmasse (g/m ²)								
03.04.97	75	94	101	119	98	81	75	118
21.04.97	154	208	217	221	188	175	135	256
07.05.97	375	388	375	422	374	304	313	462
26.05.97	771	793	786	872	850	584	521	820
11.06.97	1221	1203	1215	1376	1519	1502	1203	1371
30.06.97	1714	1698	1792	1672	1568	1580	1726	1762
16.07.97	1936	1848	2062	1894	2205	2297	2006	2248
05.08.97	2275	1846	2192	1841	2114	1946	2100	2494
Ährenfrischmasse (g/m ²)								
11.06.97	206	230	226	241	265	207	224	220
30.06.97	434	428	581	493	464	352	517	513
16.07.97	810	812	1050	904	1104	972	1008	1067
05.08.97	1270	1036	1325	1031	1254	1118	1299	1454
Ährentrockenmasse (g/m ²)								
11.06.97	869	929	750	798	1036	836	848	855
30.06.97	1422	1364	1739	1493	1517	1056	1625	1613
16.07.97	1918	1897	2205	1919	2493	2135	2241	2285
05.08.97	1836	1446	1623	1220	1589	1583	1771	2001

Tab. 8.34: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Wintergerstefelder in 1997

	M11430	E3940	P 41	B 1120	S-Robens	Wißkirch	P 11	G 73
Pflanzenhöhe (cm)								
03.04.97	21,55	24,7	26,85	27,85	31,45	28,7	32,9	-
21.04.97	32,8	34,6	36,7	40,35	42,25	43,9	43,65	-
07.05.97	65,8	71,2	67,2	76,75	75,8	85,05	85,2	73,75
26.05.97	120,05	124,1	101,25	121,15	127,55	134,55	131,2	125,5
11.06.97	118,3	108,9	82,1	109,8	126,7	-	124,45	129,7
30.06.97	107,8	104,3	83,7	99,85	111,5	-	116,05	120,2
16.07.97	104,2	99,65	78,45	96,75	105,7	-	111,05	109,8
Frischmasse (g/m ²)								
03.04.97	1492	1421	1239	1789	1726	1799	2123	-
21.04.97	2358	2564	1612	3247	2378	2990	2678	-
07.05.97	6642	4368	3841	7267	6461	5904	7873	6070
26.05.97	5832	5688	2929	5292	5287	5966	5636	5122
11.06.97	4698	6421	3479	6604	6289	-	6073	5577
30.06.97	5749	5223	2330	6040	4518	-	6418	5175
16.07.97	3744	3492	1738	3726	2940	-	5900	3539
Trockenmasse (g/m ²)								
03.04.97	264	273	255	319	304	310	364	-
21.04.97	457	509	388	532	446	544	485	-
07.05.97	862	639	677	948	786	800	1002	724
26.05.97	1211	1283	867	1171	1129	1390	1325	1249
11.06.97	1319	1814	1187	2014	1712	-	1868	1791
30.06.97	1993	1883	1123	2338	1824	-	2306	1990
16.07.97	1749	1924	1204	1997	1790	-	2931	1718
Ährenfrischmasse (g/m ²)								
26.05.97	562	782	484	607	546	-	509	463
11.06.97	1130	1843	1285	2021	1743	-	1301	1272
30.06.97	1772	1838	944	2300	1726	-	1804	1632
16.07.97	1107	1395	749	1423	1233	-	1599	1012
Ährentrockenmasse (g/m ²)								
26.05.97	202	269	191	215	197	-	201	193
11.06.97	428	760	526	845	662	-	537	519
30.06.97	949	1022	630	1302	1024	-	1023	936
16.07.97	908	1144	633	1200	1039	-	1343	849

Tab. 8.35: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterroggenfelder in 1997

	OEDE 1	ÖDE 2	OEDKO 3	F 6600	P 37	H 9440	H 9500	G 85
Pflanzenhöhe (cm)								
03.04.97	21,15	18,75	23,85	25,5	21,35	23,2	27,2	-
21.04.97	38,35	37,3	38,65	42,85	41,85	42,4	43,35	-
07.05.97	76,25	75,55	81,05	81,45	82,9	80,75	87,75	78,15
26.05.97	135,05	125,75	133,65	146,15	148,7	129,8	127,65	130,6
11.06.97	138,05	131,55	137,9	156,15	155,7	138,9	140,3	147,65
30.06.97	127,85	124,6	130,6	149,6	144,8	128,8	133	141,35
16.07.97	119,05	115,95	122	139,4	135,5	125	123,15	131,9
05.08.97	117,1	115,85	112,8	130,45	127,3	121,95	119,4	128,75
Frischmasse (g/m ²)								
03.04.97	829	868	1769	1527	1378	1162	1565	-
21.04.97	1975	2188	3544	2875	2093	2192	3393	-
07.05.97	3715	5823	6421	5270	4869	5940	5837	4807
26.05.97	3647	5094	6484	5148	5318	4724	5524	4038
11.06.97	4070	5116	6430	5077	5006	4265	6096	4042
30.06.97	5248	5857	6652	5828	4885	6236	5815	7642
16.07.97	6977	5181	6885	5051	5587	5791	5614	4142
05.08.97	3961	3291	4137	2645	3499	3634	3267	3723
Trockenmasse (g/m ²)								
03.04.97	174	173	301	261	263	220	256	-
21.04.97	356	367	563	471	421	416	568	-
07.05.97	600	835	1059	736	693	823	811	558
26.05.97	832	1171	1377	1110	1228	1149	1273	784
11.06.97	1248	1516	1787	1460	1514	1315	1832	1094
30.06.97	1847	1972	2175	1861	1636	2049	1853	2206
16.07.97	2891	2188	2767	2065	2273	2302	2189	1527
05.08.97	2333	1911	2385	1874	2256	2165	1960	1929
Ährenfrischmasse (g/m ²)								
26.05.97	410	563	624	453	543	447	531	363
11.06.97	751	844	924	732	815	624	854	560
30.06.97	1748	1876	1944	1662	1455	1689	1493	1977
16.07.97	2994	2210	2790	1969	2130	2270	2034	1479
05.08.97	1568	1312	1682	1278	1541	1625	1441	1385
Ährentrockenmasse (g/m ²)								
26.05.97	143	190	200	160	193	172	184	122
11.06.97	281	315	339	278	302	249	327	211
30.06.97	779	796	831	735	647	764	664	829
16.07.97	1614	1213	1474	1066	1167	1228	1090	784
05.08.97	1330	1108	1390	1096	1253	1250	1097	1043

Tab. 8.36: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterweizenfelder in 1998

	K 7270	F 6980	F 6620	E 3980	M 11380	M 11420	I 5870	I5880	F5980
Pflanzenhöhe (cm)									
07.4.98	28,1	28,2	21,6	28,1	19,5	10,6	24,8	21,9	-
23.4.98	43,9	45,9	35,8	39,7	34,4	26,2	34,2	35,2	-
12.5.98	64,2	71,9	58,3	62,1	59,1	51,1	54,0	51,8	64,1
28.5.98	80,7	91,8	72,4	79,8	81,1	80,7	71,6	68,0	76,5
16.6.98	92,1	97,9	89,6	90,0	94,9	104,6	82,0	85,1	88,9
02.7.98	90,8	97,0	88,5	90,05	91,9	102,7	84,5	84,0	86,1
21.7.98	87,6	97,3	88,2	88,55	90,6	100,5	83,2	82,7	85,3
06.8.98	82,1	88,4	83,1	-	85,7	92,0	-	78,4	79,6
Frischmasse (g/m ²)									
07.4.98	1203	1210	649	1321	429	-	804	603	-
23.4.98	1848	1877	1147	1925	1010	624	952	1168	-
12.5.98	4065	4871	3588	4108	2529	2504	2932	3970	4476
28.5.98	5519	7012	4094	4930	4949	3901	4368	4929	4576
16.6.98	6895	7728	4224	6539	6239	5071	5920	6605	5371
02.7.98	5032	7825	4050	6016	5582	4579	5346	6189	4090
21.7.98	2814	5247	2909	4000	2650	3269	3054	2964	2974
06.8.98	2832	3440	2814	-	1989	2256	-	2822	2697
Trockenmasse (g/m ²)									
07.4.98	205	204	119	219	90	-	158	136	-
23.4.98	337	331	209	373	192	131	202	206	-
12.5.98	663	793	543	774	405	392	525	567	678
28.5.98	1278	1675	873	1198	1095	843	1002	958	1121
16.6.98	1781	2221	1085	1640	1673	1414	1524	1549	1420
02.7.98	2030	3073	1456	2219	1990	1635	1938	2037	1653
21.7.98	1918	2813	1594	2087	1573	1705	1758	1594	1662
06.8.98	2201	2361	2084	-	1484	1718	-	2112	1942
Ährenfrischmasse (g/m ²)									
28.5.98	778	793	-	594	374	-	-	-	469
16.6.98	1658	1747	763	1361	1556	750	1331	1308	1059
02.7.98	2146	2866	1434	2213	2163	1440	2047	2277	1576
21.7.98	1407	2190	1431	1707	1304	1516	1608	1501	1365
06.8.98	1557	1566	1457	-	1050	1180	-	1596	1318
Ährentrockenmasse (g/m ²)									
28.5.98	214	210	-	164	107	-	-	-	130
16.6.98	509	529	238	399	477	254	389	364	324
02.7.98	1007	1256	601	993	972	599	894	914	702
21.7.98	1170	1563	941	1223	975	960	1092	977	969
06.8.98	1350	1359	1265	-	905	1012	-	1343	1144

Tab. 8.37: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Wintergerstefelder in 1998

	M11440	P Schnitz	F 6400	F 6630	F 6970	K 10610	E 3980	D 3280
Pflanzenhöhe (cm)								
07.4.98	22,1	27,4	32,8	29,8	27,6	30,1	28,4	32,7
23.4.98	40,1	40,7	49,8	43,5	48,7	51,6	45,8	48,0
12.5.98	90,9	92,2	104,0	98,9	90,1	89,1	93,1	92,9
28.5.98	121,9	109,4	122,9	103,0	98,8	104,5	105,4	101,8
16.6.98	103,6	92,8	105,4	91,1	92,0	94,1	90,3	88,7
02.7.98	101,6	93,1	107,2	92,1	90,9	93,2	92,6	92,2
Frischmasse (g/m ²)								
07.4.98	908	1549	2317	1784	1280	1286	2057	2595
23.4.98	1809	2418	2762	2508	3211	3019	3602	3193
12.5.98	4461	4636	3835	4291	4589	4808	4408	5020
28.5.98	5239	4360	4348	4919	5620	6561	4456	5870
16.6.98	4154	3898	4722	4425	5364	6412	6356	6222
02.7.98	3738	3125	4027	3334	3786	4786	3748	4206
Trockenmasse (g/m ²)								
7.4.98	171	252	340	261	204	191	349	388
23.4.98	293	421	495	436	490	440	635	553
12.5.98	666	851	730	816	814	754	952	1067
28.5.98	1205	1237	1183	1257	1470	1595	1295	1595
16.6.98	1283	1371	1607	1534	1761	2001	2078	1902
2.7.98	1588	1823	2108	1813	1970	2330	2005	2199
Ährenfrischmasse (g/m ²)								
07.05.98	-	-	-	480	-	-	434	487
28.5.98	876	1034	884	1313	1254	1126	1097	1368
16.6.98	1396	1484	1762	1729	1957	2027	2232	2067
02.7.98	1430	1380	1641	1416	1572	1974	1489	1573
Ährentrockenmasse (g/m ²)								
07.05.98	-	-	-	162	-	-	153	162
28.5.98	295	373	322	446	438	400	401	477
16.6.98	661	750	863	896	939	988	1139	1007
02.7.98	958	1138	1233	1134	1219	1384	1223	1298

Tab. 8.38: Pflanzenhöhe, Frischmasse, Trockenmasse, Ährenfrischmasse sowie Ährentrockenmasse der Winterroggenfelder in 1998

	E 4260	D 3000	R Nachbar	P 73	P 80	E 3570a	I6110
Pflanzenhöhe (cm)							
07.04.98	32,2	37,85	35,85	40,05	36,5	37,6	34,3
23.04.98	60,25	67,15	62,95	70	63,25	60,5	63,9
12.05.98	103,95	113,05	110,1	119,2	109,65	103,75	111,05
28.05.98	124,45	135,45	140	153,85	143,1	145,75	133,9
16.06.98	128,5	131,2	126,2	151,85	134,8	141,1	136,2
02.07.98	117,65	125	119,4	136,95	131,35	129,75	128,6
21.07.98	118,15	125,6	115,6	132,65	125	124,45	117,2
06.08.98	-	-	-	133,4	122,1	-	-
Frischmasse (g/m ²)							
07.04.98	1542	1829	2043	2436	1689	2777	1838
23.04.98	2719	3342	2687	3530	2871	3928	2789
12.05.98	4727	3754	3981	5937	5120	5465	5094
28.05.98	5007	3654	4515	4912	5843	5304	5645
16.06.98	5870	5183	4953	4612	6173	6899	6641
02.07.98	4305	4316	4552	4903	4064	5589	5749
21.07.98	2162	3388	2484	4020	3084	3235	3106
06.08.98	-	-	-	2783	2298	-	-
Trockenmasse (g/m ²)							
07.04.98	224	285	316	323	246	380	257
23.04.98	473	565	491	520	435	617	462
12.05.98	944	841	877	1074	908	1021	936
28.05.98	1473	1146	1407	1386	1396	1418	1508
16.06.98	1955	1584	1662	1389	1738	2002	2000
02.07.98	1777	1736	2023	1845	1530	2197	2140
21.07.98	1356	1712	1484	2042	1600	1775	1882
06.08.98	-	-	-	1894	1815	-	-
Ährenfrischmasse (g/m ²)							
12.05.98	530	385	474	522	475	648	511
28.05.98	577	396	576	477	519	616	568
16.06.98	1506	1005	1250	1128	1423	1668	1529
02.07.98	1782	1292	1868	1680	1395	2087	2085
21.07.98	950	929	928	1383	1094	1273	1351
06.08.98	-	-	-	1211	1200	-	-
Ährentrockenmasse (g/m ²)							
12.05.98	153	128	147	150	128	183	144
28.05.98	229	173	231	195	191	236	218
16.06.98	584	375	501	434	530	621	571
02.07.98	910	681	1007	880	731	1073	1038
21.07.98	768	730	775	1068	856	1012	1051
06.08.98	-	-	-	1050	1041	-	-

Danksagung

Herrn Prof. Dr. W. Kühbauch danke ich für die Überlassung des Themas und die Betreuung bei der Abfassung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Ing. P. Schulze Lammers danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau danke ich - insbesondere Herrn Dipl.-Phys. Stefan Hawlitschka - für die angenehme Zusammenarbeit und ständige Hilfsbereitschaft. Herrn Dr. R. Steingießer und Frau Dr. Born danke ich zudem für die Ratschläge beim Verfassen der Arbeit.

Weiterhin möchte ich für die Ermöglichung und Unterstützung der Bodenerhebungen in Weilerswist all den Landwirten danken, die ihre Felder und ihre Zeit zur Verfügung gestellt haben. In diesem Zusammenhang gebührt auch allen studentischen Hilfskräften Dank, die bei Wind und Wetter diese Erhebungen durchgeführt haben.

Frau M. Maassen und Frau A. Abu Salah danke ich für ihren Einsatz sowie für ihre moralische Unterstützung beim Aufbau des Geo-Informationssystems. Besonders danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Geogr. Frank Becker für seine große Hilfsbereitschaft und ständige Bereitschaft, meine Fragen zu ARC/Info zu beantworten.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich vor allen Dingen für die seelische und moralische Unterstützung danken.

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten (BML) sowie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR vormals DARA) finanziert. Die verwendeten ERS-Szenen wurden von der European Space Agency (ESA) zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützung sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt.