



**GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM**  
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

---

# Scientific Technical Report

Monika Korte

**Kombination regionaler magnetischer Vermessungen  
Europas zwischen 1955 und 1995:  
Modellierung der geomagnetischen Säkularvariation  
durch Spherical Cap Harmonic Analysis zur  
Untersuchung möglicher Säkularvariationsanomalien**

---

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Geowissenschaften  
der Freien Universität Berlin  
1999

ERSTER GUTACHTER: Prof. Dr. V. Haak

ZWEITER GUTACHTER: Prof. Dr. H.-J. Götze

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Das Erdmagnetfeld	3
1.1 Komponentendarstellung	3
1.2 Anteile des Erdmagnetfelds	4
1.3 Dynamotheorie	4
1.4 Variationen des Erdmagnetfelds	5
1.4.1 Interne Variationen, speziell Säkularvariation	5
1.4.2 Externe Variationen	6
1.5 Registrierung des Erdmagnetfelds	7
2 Normalfelder und Säkularvariationsmodelle	9
2.1 Verschiedene Normalfeldmodelle	9
2.2 Anforderungen an Normalfeld- und Säkularvariationsmodell	10
2.3 Entsprechen IGRF oder GSFC den Anforderungen?	11
2.4 Ein Normalfeldmodell für Europa	13
2.5 Lokale Normalfelder	20
2.6 Ergebnisse dieses Kapitels	20
3 Regionale magnetische Vermessungen	21
3.1 Landesvermessungen und Säkularpunkte	21
3.2 Durchführung und Standardauswertung von regionalen Vermessungen	22
3.3 Fehlerabschätzung	23
3.3.1 Fehlerquellen	23
3.3.2 Reduktionsfehler	24
3.4 Höhenkorrektur	30
3.5 Kombination der Messungen verschiedener Länder	30
3.5.1 Regionale Vermessungen der einzelnen europäischen Länder	33
3.5.2 Reduktion der Daten verschiedener Länder auf gemeinsame Epochen	36
3.5.3 Berechnung der Säkularvariation	38
3.5.4 Erster Test der Datenkombination: Modellierung des Magnetfelds durch einfache Interpolation	39
3.6 Ergebnisse dieses Kapitels	42
4 Magnetische Anomalien aus Landesvermessungen und Säkularpunkten	43
4.1 Anomaliekarten der Kombination regionaler magnetischer Vermessungen	43
4.1.1 Beispiel einer Landesvermessung mit sehr dichtem Punktnetz: Dänemark	45
4.1.2 Beispiel einer Landesvermessung mit größerem Punktnetz: Deutschland	45
4.1.3 Beispiel Säkularpunkte: Frankreich und Polen	47
4.2 Vergleich mit Anomalien aus MAGSAT-Daten	48
4.3 Die magnetischen Anomalien im Meßpunktnetz zu verschiedenen Epochen	48
4.4 Säkularvariationsanomalien und Reduktionsfehler	51

4.5 Ergebnisse dieses Kapitels	57
<b>5 Spherical Cap Harmonic Analysis</b>	<b>58</b>
5.1 Grundlage: Kugelfunktionsanalyse	58
5.2 Anwendung der Methode auf eine Kugelkappe: Spherical Cap Harmonic Analysis	60
5.3 Anwendung der Spherical Cap Harmonic Analysis auf Säkularvariationen	62
5.4 Test der Spherical Cap Harmonic Analysis für die Säkularvariation aus der Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen Europas	63
5.4.1 Variation des Öffnungswinkels der Kugelkappe	63
5.4.2 Einfluß von (normalverteilten) Fehlern auf Spherical Cap Harmonic Analysis	64
5.4.3 Trennung in externen und internen Anteil	64
5.4.4 Variation der maximalen Ordnung der Spherical Cap Harmonic Analysis	68
5.4.5 Würden mit einem Potentialmodell reduzierte Werte bessere Ergebnisse liefern?	69
5.4.6 Spherical Cap Harmonic Analysis des Hauptfeldes	70
5.5 Ergebnisse dieses Kapitels	70
<b>6 Untersuchung der Säkularvariation</b>	<b>72</b>
6.1 Modellierung der Säkularvariation mit verschiedenen Methoden	72
6.2 Säkularvariation 1965 bis 1995 in Fünfjahresintervallen	74
6.3 Gibt es Säkularvariationsanomalien in Europa?	78
6.4 Ergebnisse dieses Kapitels	82
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>83</b>
<b>Summary</b>	<b>85</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Anhang I</b>	<b>90</b>
<b>Anhang II</b>	<b>91</b>
<b>Anhang III</b>	<b>97</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>98</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>Danksagung</b>	<b>102</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>103</b>

## Einleitung

Obwohl das Erdmagnetfeld weder sichtbar noch fühlbar ist, besitzt es auch für den Menschen wichtige Eigenschaften. Zum Beispiel bildet es einen Schutzschild vor kosmischer Strahlung und Sonnenwind und ermöglicht so erst das Leben auf der Erde. Auch dient es Tieren und Menschen zu Navigationszwecken. Neben diesen praktischen Auswirkungen können Eigenschaften des Erdmagnetfelds benutzt werden, um Aussagen über physikalische Eigenschaften des Erdinneren zu gewinnen. Lokale Anomalien des Magnetfelds weisen auf magnetisierte geologische Strukturen in der Erdkruste hin. In den Methoden der erdmagnetischen Tiefenforschung werden hochfrequente Variationen externer Quellen zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung von Erdkruste und oberem Erdmantel verwendet. Die langsame zeitliche Änderung des internen Erdmagnetfelds, die geomagnetische Säkularvariation, ermöglicht Abschätzungen der Leitfähigkeit des Erdmantels. Anomalien der Säkularvariation könnten Hinweise auf großräumige Leitfähigkeitsanomalien geben. Bisherige Untersuchungen zu Säkularvariationsanomalien sind jedoch rar.

Mundt [1973 und 1981] beschreibt großräumige Säkularvariationsanomalien in Europa anhand von Observatoriumsdaten gegenüber einem linearen Normalfeld. Mundt und Porstendorfer [1977 und 1978] vermuten als Ursache eine ausgedehnte Leitfähigkeitsanomalie im oberen Erdmantel. Porstendorfer et al. [1979] führten Modellversuche zu solchen Leitfähigkeitsanomalien durch und kommen dabei zu dem Schluß, daß die Untersuchung der Säkularvariation Ansatzpunkte zum Auffinden solcher Anomalien bieten können.

Außerdem berichtet Mundt von sehr lokalen Säkularvariationsanomalien im Gebiet der ehemaligen DDR [Mundt, 1978], die er mit Wärmeflußanomalien und rezenten Krustenbewegungen korreliert. Spitta [1991] untersucht die Umgebung von Göttingen im Hinblick auf lokale Säkularvariationsanomalien, kommt dabei aber noch zu keinem Ergebnis, ob solche Anomalien existieren oder nicht.

Allredge [1983] zerlegt die zeitliche Änderung der Magnetfeldkomponenten europäischer Observatorien in Anteile verschiedener Frequenzbänder. Aus dem für die verschiedenen Orte unterschiedlichen Verhalten im mittleren Frequenzband mit Perioden zwischen 13 und 30 Jahren schließt er auf zeitlich veränderliche magnetische Anomalien mit Dimensionen von wenigen tausend Kilometern im Bereich Europas, eine gute räumliche Darstellung dieser Anomalien kann er anhand der von ihm untersuchten 10 Observatorien nicht geben.

Die vorliegende Arbeit soll klären, ob sich anhand von Ergebnissen regionaler magnetischer Vermessungen mit besserer räumlicher Auflösung als der der Observatorien regionale Säkularvariationsanomalien in Europa nachweisen und besser lokalisieren lassen. Der betrachtete Zeitraum umfaßt die Jahre 1955 bis 1995.

Das ungestörte interne magnetische Hauptfeld kann nicht direkt gemessen werden. Zur Untersuchung von Anomalien ist daher ein Hauptfeldmodell bzw. ein Modell der normalen Säkularvariation als Referenz nötig. Außerdem wird ein Modell der normalen Säkularvariation benötigt, um die verschiedenen Daten regionaler magnetischer Vermessungen auf gemeinsame Epochen zu reduzieren. In Kapitel 2 werden einige Überlegungen zu magnetischen Normalfeld- und Säkularvariationsmodellen angestellt. Verschiedene Modelle werden verglichen und ein den Anforderungen dieser Arbeit angepaßtes Normalfeldmodell wird entwickelt.

Die Ergebnisse regionaler magnetischer Vermessungen können nicht die hohe Genauigkeit von Observatoriumsregistrierungen besitzen. Die Fehlerangaben verschiedener Autoren variieren jedoch stark, daher werden in Kapitel 3 neben der Beschreibung der verwendeten Daten Fehlerquellen diskutiert und eine allgemeine Fehlerabschätzung vorgenommen. Es gibt sehr unterschiedliche Vorstellungen darüber, mit welcher Dichte und in welchen Zeitabständen regionale magnetische Vermessungen durchgeführt werden sollten. Die gesammelten Daten der einzelnen europäischen Länder ergeben daher einen sowohl zeitlich als auch räumlich sehr inhomogenen Datensatz, der zunächst in geeigneter Weise vereinheitlicht und interpoliert werden muß.

In Kapitel 4 wird auf Möglichkeiten und Grenzen bei der Darstellung von magnetischen Anomalien und Säkularvariationsanomalien anhand von regionalen Vermessungen eingegangen. Ein möglicher Zusammenhang zwischen bekannten Magnetfeldanomalien und Säkularvariationsanomalien bzw. eine mögliche zeitliche Änderung von Magnetfeldanomalien wird untersucht.

Das Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis scheint zur Modellierung der Säkularvariation und ihrer Anomalien gut geeignet. In Kapitel 5 wird das Verfahren beschrieben und allgemein sowie speziell für die regionalen Vermessungsdaten getestet. Die Anwendung der Spherical Cap Harmonic Analysis auf die gesamten europäischen Daten zur Modellierung von Säkularvariation und deren Anomalien folgt in Kapitel 6. Die Säkularvariation von 1965 bis 1995 wird in Fünfjahresintervallen für Mitteleuropa kartenmäßig dargestellt.

## 1 Das Erdmagnetfeld

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der Arbeit wichtigen allgemeinen Eigenschaften des Erdmagnetfelds im Überblick dargestellt, wie sie sich mehr oder weniger ausführlich in gängigen Lehrbüchern finden [z. B. Kertz, 1969; Jacobs, 1987].

### 1.1 Komponentendarstellung

Das Erdmagnetfeld läßt sich als Vektorfeld in Komponenten zerlegen. Zur vollständigen Beschreibung des Feldes werden drei linear unabhängige Komponenten benötigt, dabei sind verschiedene Kombinationen aus sieben gängigen Komponenten als Meßgrößen in Gebrauch (Abb. 1.1).

Der Betrag des Tangentialvektors an die Feldlinien wird als Totalintensität  $F$  bezeichnet. Die rechtwinkligen Komponenten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  zeigen parallel zur Erdoberfläche in Richtung geographisch Nord und Ost und nach unten, zum Erdinneren. Die Horizontalintensität  $H$  zeigt nach magnetisch Nord. Die Deklination  $D$ , auch als Nadelabweichung des Magnetkompasses bekannt, ist der Winkel zwischen geographischer und magnetischer Nordrichtung. Die Inklination  $I$  ist der Winkel zwischen den Richtungen der Horizontalintensität und der Totalintensität, also der Winkel, mit dem die Feldlinien auf die Erdoberfläche treffen.

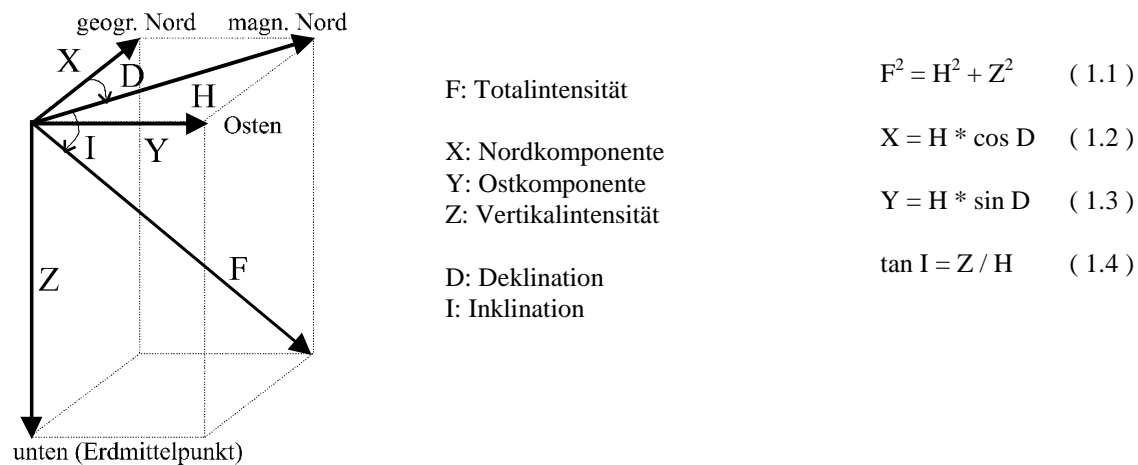


Abb. 1.1 Komponentendarstellung des Erdmagnetfelds und einige geometrische Beziehungen der Komponenten

In Europa ist die Deklination derzeit gering. Nordkomponente und Horizontalintensität zeigen daher ähnlich große Beträge. Desweiteren weisen jeweils Nordkomponente und Horizontalintensität sowie Ostkomponente und Deklination weitgehend analoge Änderungen mit der Zeit auf, wie anhand von Gleichung (1.2) bzw. (1.3) verständlich wird.



## 1.2 Anteile des Erdmagnetfelds

Das Erdmagnetfeld läßt sich nach der Lage seiner Quellen in drei deutlich verschiedene Feldanteile einteilen.

### *Hauptfeld*

Das erdmagnetische Hauptfeld liefert, wie der Name schon sagt, den größten Anteil des Erdmagnetfeldes. Seine Quellen liegen nach der Dynamothorie (Kap. 1.3) im flüssigen äußeren Erdkern. In guter Näherung läßt sich das Hauptfeld als geozentrischer, um etwa  $11,5^\circ$  gegenüber der Rotationsachse der Erde geneigter Dipol darstellen (Abb. 1.2). Das Dipolmoment beträgt derzeit etwa  $8 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ . Die Intensität des Hauptfeldes beträgt etwa 30 000 nT am Äquator und 60 000 nT an den Polen. Das Hauptfeld unterliegt langsamen zeitlichen Änderungen, in geologischen Zeiträumen treten daneben komplette Feldumkehrungen auf.

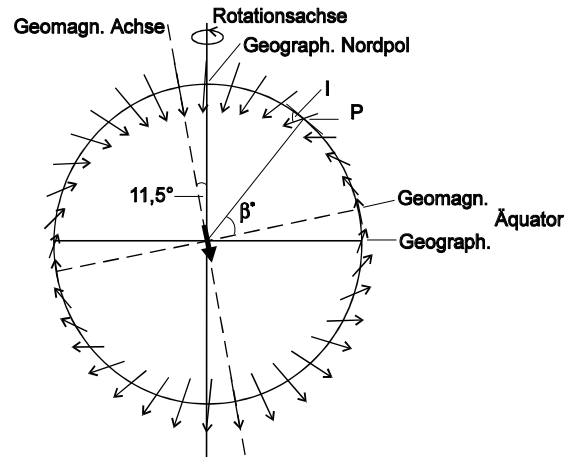


Abb. 1.2 Schematische Darstellung des geomagnetischen Hauptfelds [nach Kertz, 1969].

### *Krustenfeld*

Das Krustenfeld beruht auf der remanenten und induzierten Magnetisierung von Gesteinen der Erdkruste. Es überlagert sich dem Hauptfeld als kurzweilige regionale Anomalien mit Amplituden bis zu einigen 100 nT. Das Krustenfeld wird als zeitlich konstant angesehen.

### *Außenfeld*

Das erdmagnetische Außenfeld hat seine Ursachen in ionosphärischen und magnetosphärischen Stromsystemen die durch Einwirkung von Sonnenwind und kosmischer Strahlung entstehen und variieren.

Auch das erdmagnetische Außenfeld besitzt nur Amplituden von einigen 100 nT, es ist jedoch starken, kurzperiodischen Schwankungen unterworfen (Kap. 1.4.2). Über lange Zeiträume ist das Außenfeld im zeitlichen Mittel Null. Das variable Außenfeld führt zusätzlich zu einem intern induzierten Magnetfeldanteil, der regional von der Leitfähigkeit des Untergrundes abhängig ist.

## 1.3 Dynamotheorie

Das erdmagnetische Hauptfeld kann nicht durch einen Permanentmagneten erklärt werden. Die Curietemperatur, also die Temperatur, oberhalb derer magnetische Ordnungen zerstört werden, ist in der Erde schon bei etwa 20 km Tiefe erreicht und wird im tieferen Erdinnern sicher weit überschritten. Die Magnetisierung der oberhalb dieser Curietiefe liegenden Gesteine ist viel zu gering, um die Stärke des Hauptfelds hervorzurufen.

Das Hauptfeld muß daher auf elektrische Ströme im äußeren metallischen Erdkern zurückzuführen sein. Die Dynamotheorie der Magnetohydrodynamik besagt, daß im äußeren Erdkern Ströme fließen, die durch turbulente Konvektionsströmungen induziert werden. Motor der Konvektionsströmungen sind radioaktive Wärme oder Sedimentationsprozesse am inneren Erdkern. Plötzliche Verschiebungen der Konvektionszellen oder Schwankungen der Stärke der Konvektionsströmungen können Feldumkehrungen hervorrufen.

Eine einfache Modellvorstellung liefert der selbsterhaltende Scheibendynamo (Abb. 1.3a). Er besteht aus einer rotierenden, leitfähigen Scheibe und einer um die Achse gewickelten Stromschleife mit Schleifkontakten zu Scheibe und Achse. In einem äußeren Magnetfeld parallel zur Drehachse wirkt die Lorentzkraft auf die Elektronen in der rotierenden Scheibe, so daß in Scheibe und Leiterschleife ein Strom fließt. Der Strom in der Schleife induziert ein Magnetfeld parallel zum vorhandenen äußeren Magnetfeld. Dadurch wird das System selbsterhaltend [Parker, 1983].

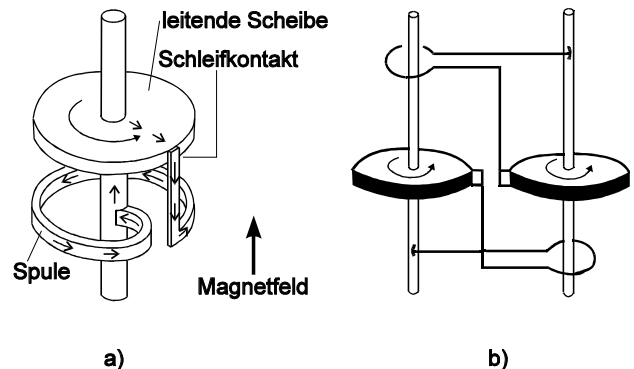


Abb. 1.3 a) Selbsterhaltender Scheibendynamo [Parker, 1983]  
 b) Kopplung zweier Dynamos [Merrill und McElhinny, 1983].

Eine Kopplung zweier solcher Dynamos (Abb. 1.3b) zeigt in gewissen Fällen nichtperiodische Schwankungen des Magnetfelds, wie man sie auf der Erde als Säkularvariation beobachtet, auch Feldumkehrungen treten auf [Merrill und McElhinny, 1983].

Als äußeres Magnetfeld zum Start des Dynamos nimmt man interplanetare Felder an, zum Beispiel durch elektrochemische Ströme oder Thermoströme [Kertz, 1969].

## 1.4 Variationen des Erdmagnetfelds

Das Erdmagnetfeld ist zeitlich nicht konstant. Die Variationen umfassen den gesamten Periodenbereich von Bruchteilen von Sekunden bis Millionen von Jahren. Nach Ursachen und Perioden lassen sich interne und externe Variationen unterscheiden.

### 1.4.1 Interne Variationen, speziell Säkularvariation

Im langperiodischen Bereich finden sich Variationen mit internen Ursachen. Paläomagnetische Untersuchungen geben Aufschluß über Feldumkehrungen mit Perioden zwischen etwa 1 Million und 10 000 Jahren. Die ständige, langsame Änderung des Hauptfeldes mit Perioden von mehreren Tausend bis etwa 4 Jahren wird als Säkularvariation bezeichnet. In den jahrelangen Registrierungen der geomagnetischen Observatorien ist diese Änderung deutlich zu sehen, Abb. 1.4 zeigt als Beispiel die Kurven der Deklination, Horizontal- und Vertikalkomponente der drei deutschen Observatorien von 1940 bis 1996.

Die Säkularvariation hat ihre Ursache sicher in räumlichen und zeitlichen Variationen der Konvektionszellen im flüssigen äußeren Erdkern. Dabei ist noch umstritten, ob an der Erdoberfläche nur Auswirkungen von Variationen nahe der Kern-Mantel-Grenze zu beobachten sind, oder auch Variationen tiefer aus dem Erdkern.

Im engeren Sinn ist die Säkularvariation als Geschwindigkeit der zeitlichen Änderung definiert, also als erste zeitliche Ableitung des Hauptfeldes. Sie besitzt daher die Einheit nT/Jahr. Linien gleicher Säkularvariation werden als Isoporen bezeichnet.

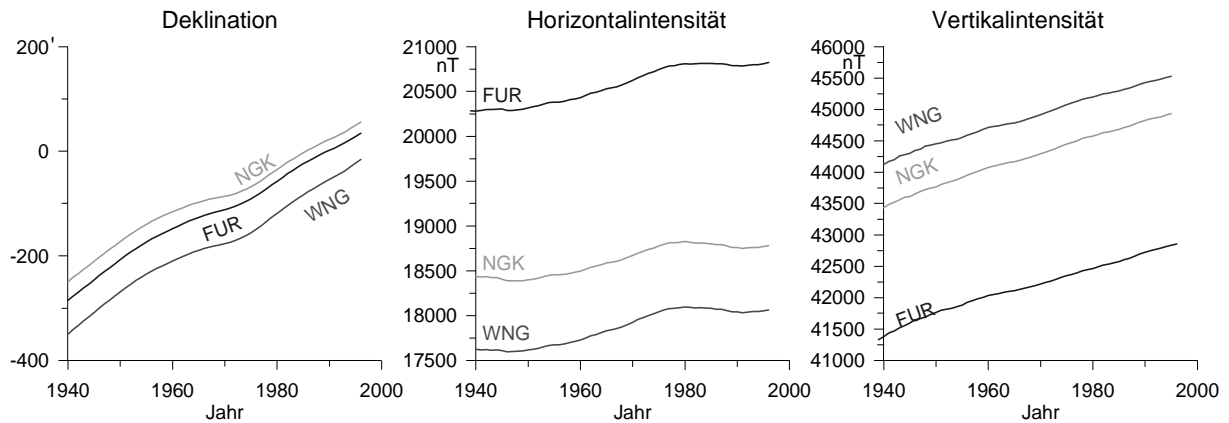


Abb. 1.4 Säkulare Änderung der Deklination, Horizontal- und Vertikalintensität des Erdmagnetfelds an den drei deutschen Observatorien Fürstenfeldbruck (FUR), Niemegek (NGK) und Wingst (WNG) von 1940 bis 1996.

### 1.4.2 Externe Variationen

Die externen Variationen umfassen den kurzperiodischen Bereich bis zu 11 Jahren. Tab. 1.1 gibt einen Überblick über wichtige externe Variationen des Erdmagnetfelds, Abb. 1.6 zeigt zwei Beispiele für den Einfluß externer Variationen in Magnetfeldregistrierungen.

Der  $S_q$ -Tagesgang spielt bei der Reduktion von regionalen Vermessungsdaten eine große Rolle (vgl. Kap. 3.3.2). Er wird durch ein Stromsystem in der Ionosphäre erzeugt (Abb. 1.5). Da die Sonneneinstrahlung die Leitfähigkeit der Ionosphäre beeinflusst ergibt sich die 24-stündige Periode dieser Variation. Der Verlauf des  $S_q$ -Ganges ist von der geographischen Breite abhängig, die Amplituden sind im Sommer größer als im Winter.

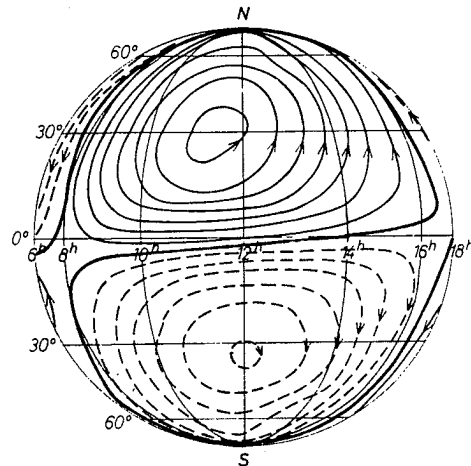


Abb. 1.5  $S_q$ -Stromsystem der Ionosphäre [aus Kertz, 1969]

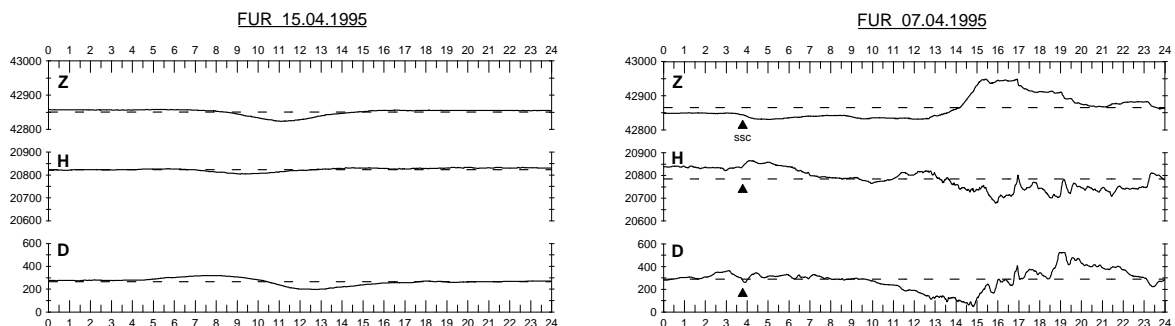


Abb. 1.6 Beispiele für externe Variationen in den einzelnen Magnetfeldkomponenten: Registrierung der Komponenten D, H und Z des geomagnetischen Observatoriums Fürstenfeldbruck an einem ruhigen Tag ( $S_q$ -Variation, 15.04.1995) und zu Beginn eines magnetischen Sturms (DS-Variation und schwacher ssc, 07.04.1995)

Art der Variation		Periode	Amplitude	Ursache
Variationen mit dem Sonnenfleckenzyklus		ca. 11 Jahre	20 nT	Variationen des äquatorialen Ringstroms (ERC) mit der Sonnenaktivität
Jährliche Variationen		1 Jahr	5 nT	Ionosphärische Quellen
Halbjährliche Variationen		6 Monate	5 nT	Variationen des äquatorialen Ringstroms (ERC) mit Rotation der Erde um die Sonne
Magnetische Stürme	$D_{ST}$ $DS$	2 - 27 Tage 12 - 24 Std.	100 nT 100 nT	Erhöhung des äquatorialen Ringstroms (ERC) durch Partikelstrahlung der Sonne
Ruhiger Tagesgang	$S_q$	1 Tag	30 - 120 nT	Ionosphärische Stromsysteme auf der Tagseite der Erde
Lunare Variationen	L	1 Tag	1 - 3 nT	Ionosphärische Stromsysteme
Polare magnetische Stürme und Teilstürme, Baystörungen	DP b	10 - 120 min	10 - 1000 nT 5 - 100 nT	Polarer Elektrojet (PEJ)
Sturmbeginn	ssc	2 - 5 min	10 - 100 nT	Eintreffen des verstärkten Teilchenstroms der Sonne auf der Magnetopause
Sonneneruptionseffekt	sfe	10 - 20 min	10 nT	Verstärkung ionosphärischer Stromsysteme
regelmäßige Pulsationen	$p_c$	0,2 - 600 s	0,1 - 100 nT	Magnetohydrodynamische Wellen in der Magnetosphäre
unregelmäßige Pulsationen	$p_i$	1 - 100 s	1 nT	

Tab. 1.1 Übersicht über externe Variationen [nach Schmucker, 1985].

## 1.5 Registrierung des Erdmagnetfelds

Das gesamte Erdmagnetfeld (also mindestens 3 Komponenten) wird an weltweit derzeit etwa 200 geomagnetischen Observatorien kontinuierlich registriert [McLean et al., 1994]. Allerdings ist die Verteilung der Observatorien über die Erde sehr inhomogen, wie Abb. 1.7 zeigt.

Traditionell werden die Komponenten Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität fotografisch analog aufgezeichnet. Moderne Registrierungen liefern digitale Werte, bevorzugt die Nord-, Ost- und Vertikalkomponente. Aus den kontinuierlichen Registrierungen werden standardmäßig Minutenmittelwerte, Stundenmittelwerte, Tagesmittelwerte, Monatsmittelwerte und Jahresmittelwerte berechnet und über Jahrbücher und die Welt Datenzentren veröffentlicht.

Räumlich detailliertere Vermessungen des Erdmagnetfelds zu einzelnen Zeitpunkten finden in vielen Ländern als regionale Landesvermessungen oder Säkularpunktvermessungen statt (3.1).

Noch hochauflösendere Resultate, speziell zur Untersuchung von Anomalien, werden durch lokale aeromagnetische Vermessungen erzielt. In der Regel wird dabei nur die Vertikal- oder Totalintensität gemessen. Zunehmend wird versucht, aeromagnetische Anomaliekarten für ganze Länder oder sogar Kontinente aus einzelnen solchen Vermessungen zu kompilieren [z. B. Wonik und Hahn, 1989].

Satellitenmissionen wie z. B. MAGSAT liefern weltweite magnetische Betrags- oder Vektormessungen über begrenzte Zeiträume.

Wegen der Säkularvariation ist bei allen Magnetfelddaten und Darstellungen des Magnetfelds die Angabe des Zeitpunkts nötig, an dem die Daten gemessen oder auf den sie reduziert wurden. Man spricht von „Epochen“, wobei man zwischen Epochen „,0“ zum Jahresanfang (1. Januar, 0 Uhr) und Epochen „,5“ (1. Juli, 0 Uhr) zur Jahresmitte unterscheidet. Zum Beispiel wurde ein Jahresmittelwert für 1998.5 aus den Werten vom 1. Januar bis 31. Dezember 1998 berechnet, ein Jahresmittelwert für 1998.0 aus den Werten vom 1. Juli 1997 bis 30. Juni 1998.

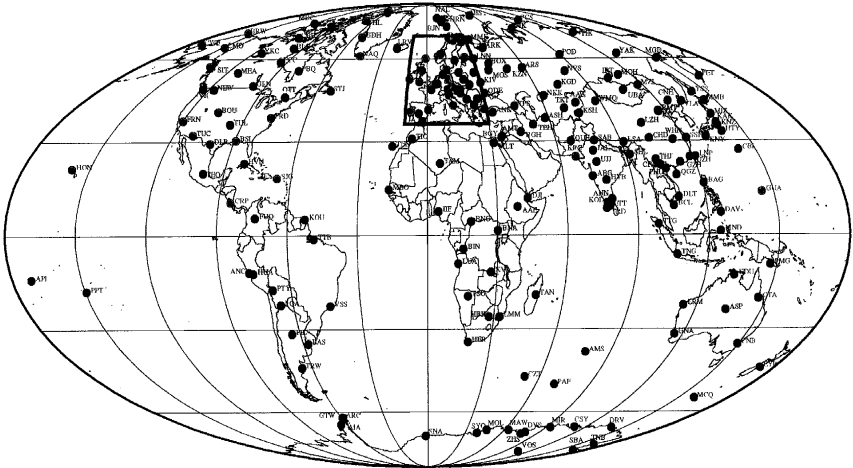


Abb. 1.7 Weltweite Verteilung erdmagnetischer Observatorien, Stand 1994 [aus McLean et al., 1994].

## 2 Normalfelder und Säkularvariationsmodelle

Zur Untersuchung von magnetischen Anomalien bzw. Säkularvariationsanomalien muß das normale, ungestörte erdmagnetische Hauptfeld und dessen normale Säkularvariation bekannt sein. Der Wert einer magnetischen Anomalie eines Ortes ergibt sich aus der Differenz zwischen tatsächlich gemessenem Wert und dem Wert des Hauptfelds am selben Ort. Außerdem wird die normale Säkularvariation im Rahmen dieser Arbeit dazu benötigt, Daten verschiedener regionaler magnetischer Vermessungen auf gemeinsame Epochen zu reduzieren (Kap. 3.5). In diesem Kapitel werden verschiedene Normalfeldmodelle verglichen und auf ihre Tauglichkeit bezüglich der in dieser Arbeit gestellten Anforderungen an solche Modelle getestet. Da die globalen Modelle sich nicht als optimal geeignet erweisen, wird versucht, ein besser angepaßtes Normalfeldmodell für Europa zu entwickeln, das als Grundlage für die folgenden Untersuchungen dienen kann.

### 2.1 Verschiedene Normalfeldmodelle

Ein Normalfeldmodell soll das ungestörte erdmagnetische Hauptfeld repräsentieren. Da sich das ungestörte Hauptfeld nicht direkt messen läßt, kann jedes Normalfeld nur ein Modell sein, das die wahren Verhältnisse mehr oder weniger gut wiedergibt. Es gibt verschiedene Methoden, Normalfelder zu berechnen, die sich unter anderem nach dem Anwendungsbereich des Modells unterscheiden lassen.

Sind Normalfelder für verschiedene Epochen bekannt, so läßt sich die normale Säkularvariation daraus berechnen.

#### *Polynome*

Für nicht zu ausgedehnte Regionen eignen sich Polynome in geographischer Länge  $\lambda$  und Breite  $\varphi$  für die einzelnen Komponenten K:

$$K(\lambda, \varphi) = A + B * (\lambda - \lambda_0) + C * (\varphi - \varphi_0) + D * (\lambda - \lambda_0)^2 + E * (\varphi - \varphi_0)^2 + F * (\lambda - \lambda_0) * (\varphi - \varphi_0) + \dots \quad (2.1)$$

$\lambda_0$  und  $\varphi_0$  sind die geographischen Koordinaten des Mittelpunktes des Gebiets. Die Koeffizienten A, B, C, ... werden aus den Meßdaten durch Regression z. B. nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Soll das Normalfeldmodell für einen längeren Zeitraum gültig sein, müssen die Koeffizienten zeitabhängig bestimmt werden:

$$K(\lambda, \varphi, t) = A(t) + B(t) * (\lambda - \lambda_0) + C(t) * (\varphi - \varphi_0) + D(t) * (\lambda - \lambda_0)^2 + E(t) * (\varphi - \varphi_0)^2 + F(t) * (\lambda - \lambda_0) * (\varphi - \varphi_0) + \dots \quad (2.2)$$

Der benötigte Grad der Polynome ist von der flächenmäßigen Ausdehnung abhängig, er darf nicht zu hoch gewählt werden, damit das Modell keine Anteile des kurzwelligen Krustenfeldes enthält.

#### *Kugelfunktionsanalyse*

Die auf Carl Friedrich Gauß zurückgehende Kugelfunktionsanalyse liefert Normalfelder für die ganze Erde. Das Erdmagnetfeld wird dabei als negativer Gradient eines Potentials betrachtet, und das Potential in eine Reihe nach Kugelfunktionen entwickelt. Die genauen Formeln dazu finden sich in Kapitel 5.1. Aus weltweiten Meßwerten z. B. der magnetischen Observatorien und von Satelliten werden die Koeffizienten der Kugelfunktionsanalyse und damit ein bestangepaßtes Modell bestimmt. Die zeitliche Änderung des Feldes wird wiederum durch eine Zeitabhängigkeit der Koeffizienten beschrieben.

Das Verfahren gestattet die Trennung von internen und externen Feldanteilen, so daß das Modell frei von externen Einflüssen bestimmt werden kann. Wenn die Kugelfunktionsentwicklung etwa bei Ordnung 10 bis 13 abgebrochen wird, sollte das Modell nur den tatsächlichen Anteil des Hauptfeldes ohne kurzweilige Krustenfeldeinflüsse enthalten [Jacobs, 1987].

Eine Kommission der IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) legt alle 5 Jahre ein Kugelfunktionsmodell bis Ordnung 10 als Internationales Geomagnetisches Referenzfeld (IGRF)<sup>1</sup> fest [z. B. Baldwin and Langel, 1993]. Normalfeldmodelle für beliebige Epochen können daraus durch Interpolation der Koeffizienten gewonnen werden.

Sabaka et al. [1997] entwickelten für den Zeitraum 1900 bis 1995 ein kontinuierliches Kugelfunktionsmodell bis Ordnung 13, worin das externe Feld bis Ordnung 1 enthalten ist. Die zeitliche Änderung des Feldes wird durch kubische B-splines mit äquidistanten Stützstellen repräsentiert. Aufgrund der höheren Ordnung erfaßt dieses GSFC genannte Modell das interne Hauptfeld vollständiger als das IGRF, außerdem wird die Säkularvariation durch die bessere zeitliche Kontinuität genauer wiedergegeben.

## 2.2 Anforderungen an Normalfeld- und Säkularvariationsmodell

Das im Rahmen dieser Arbeit benötigte Normalfeldmodell muß mehreren Anforderungen genügen, insbesondere müssen sich einheitliche Normalfelder für beliebige Epochen bestimmen lassen und die normale Säkularvariation muß repräsentiert werden.

### *Einheitliche Normalfelder*

Da magnetische Anomalien und Säkularvariationsanomalien zu verschiedenen Zeitpunkten untersucht werden sollen, müssen die zur Berechnung der Anomalien herangezogenen Normalfelder der verschiedenen Epochen vergleichbar, das heißt nach denselben Kriterien gebildet worden sein. Das bedeutet insbesondere auch, daß die Werte, aus denen die Normalfelder berechnet werden, immer an den gleichen Orten gemessen wurden, also die Stützstellen der Interpolation immer dieselben sind.

### *Normalfelder für beliebige Epochen*

Über den gesamten Modellzeitraum müssen ausreichend viele Normalfelder einzelner Epochen in ausreichend kurzen Zeitabständen bestimmt werden, um gute Modellfelder auch für beliebige dazwischenliegende Zeitpunkte interpolieren zu können.

### *Stetigkeit in der Zeit*

Die Normalfelder der einzelnen Epochen dürfen sich nur langsam und stetig ändern, dürfen also keine „Sprünge“ in der Zeit aufweisen, da diese zeitliche Änderung die Säkularvariation beschreibt.

Für die Reduktion der Daten der verschiedenen regionalen Vermessungen auf gemeinsame Epochen ist ein Modell der normalen Säkularvariation für beliebige Zeiträume nötig. Auch dieses muß über den gesamten interessierenden Zeitraum nach den gleichen Kriterien gebildet werden. Sind die genannten Bedingungen erfüllt, beinhaltet das Normalfeldmodell ein solches Säkularvariationsmodell. Die Säkularvariation ergibt sich dabei als Differenz der Normalfelder verschiedener Jahre (geteilt durch die Anzahl der Jahre).

---

<sup>1</sup> Nach 5 Jahren wird das vorhergehende IGRF noch einmal geprüft und evtl. etwas verbessert und dann als endgültiges DGRF (Definitives Geomagnetisches Referenzfeld) bezeichnet. Um sprachliche Verwirrung zu Vermeiden, wird in dieser Arbeit die Bezeichnung IGRF für alle Epochen verwendet, obwohl bis auf das letztbestimmte Modelljahr (1995) das DGRF gemeint ist.

### 2.3 Entsprechen IGRF oder GSFC den Anforderungen?

Auf den ersten Blick scheinen das IGRF oder GSFC die genannten Anforderungen zu erfüllen. Die Modelle der einzelnen Epochen werden alle 5 Jahre bestimmt, angesichts der langsamen Säkularvariation sollte das ausreichend sein, um durch lineare Interpolation (IGRF) oder besser stetige Interpolation durch Splines (GSFC) gute Normalfelder für beliebige Epochen und die normale Säkularvariation zu berechnen.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen ergeben jedoch, daß keines der beiden Modelle die Säkularvariation in Europa mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt. Es wurden die Jahresmittelwerte aller europäischen Observatorien mit den synthetischen Jahresmittelwerten der Modelle an ebendiesen Orten für drei linear unabhängige Komponenten verglichen. Alle Werte sind auf die Höhe Normal Null reduziert.

Abb. 2.1 zeigt beispielhaft die synthetischen und gemessenen Kurven der Deklination, der Horizontalintensität und der Vertikalintensität dreier Observatorien. Die allgemeine Übereinstimmung ist zunächst gut, es treten jedoch zum Teil deutliche Offsets von bis zu einigen 100 nT auf, wie z. B. in Lvov und San Pablo in der Horizontal- und Vertikalkomponente.

Die Offsets können zwei unterschiedliche Ursachen haben. Entweder befinden sich die Observatorien auf Krustenanomalien, deren Einfluß in den Modellen nicht enthalten ist. Es müßte sich dabei in der Regel um relativ großräumige Anomalien handeln, da die Standorte für die Errichtung der Observatorien möglichst ungestört und anomaliefrei gewählt wurden. Andererseits könnten diese Offsets auch auf ungenügend hohe Auflösung von IGRF bzw. GSFC zurückzuführen sein. Dieses sind ja globale Modelle, berechnet aus einer bei Ordnung 10 bzw. 13 abgebrochenen Kugelfunktionsentwicklung und einer Anpassung weltweit sehr unterschiedlich verteilter Daten.

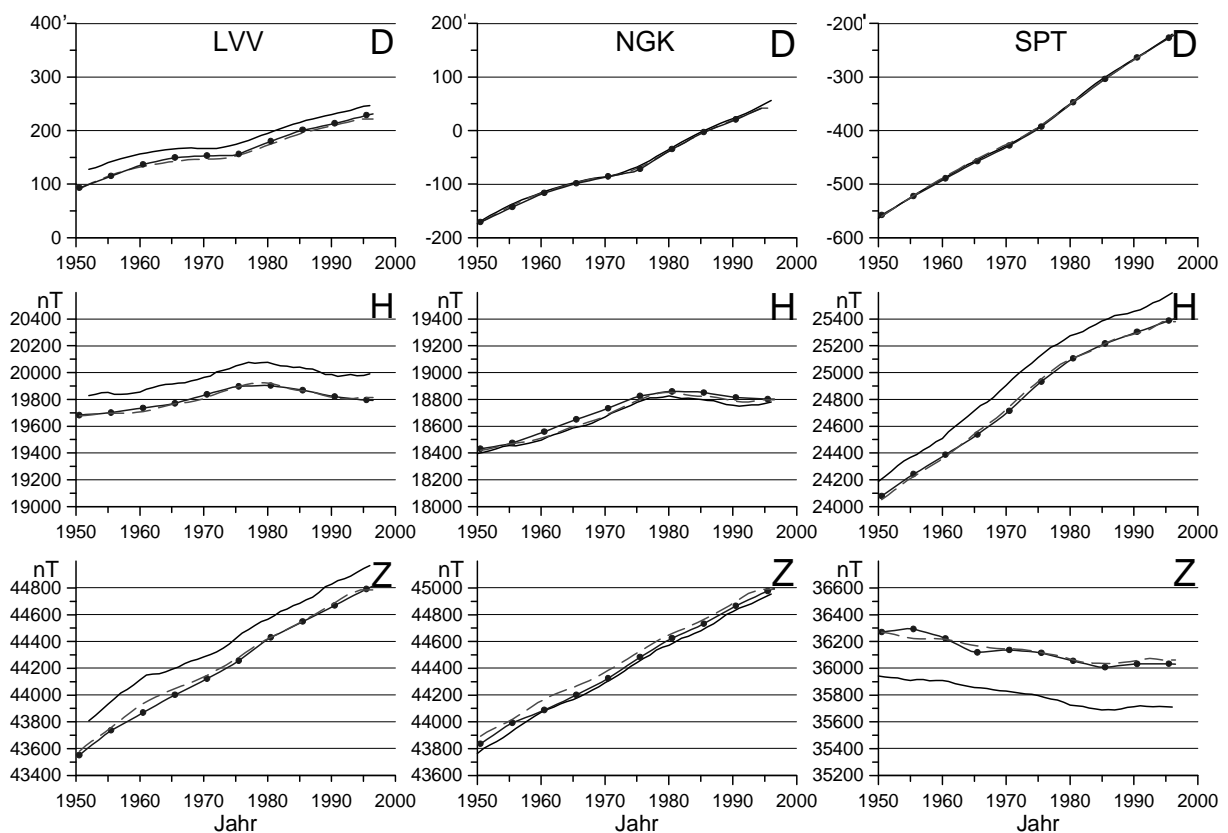


Abb. 2.1 Vergleich von gemessenen Werten und Modellwerten der Komponenten Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität am Beispiel der Observatorien Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT). Durchgezogene Kurve: Observatoriums-Jahresmittelwerte; gestrichelte Kurve: GSFC-Modellwerte; Kurve mit Punkten: IGRF-Modellwerte.



Nach Langel [in Jacobs, 1987] ist die erste der beiden Möglichkeiten die Ursache für die Offsets. Auch wenn man die Residuen der Observatoriumswerte gegenüber einem regional aus Landesvermessungswerten gebildeten Polynom-Normalfeld bestimmt, liegen diese jeweils in der gleichen Größenordnung, wie die Offsets gegenüber den globalen Modellen.

In den Differenzen zwischen gemessenen und synthetischen Werten (Bsp. Abb. 2.2, vgl. Anhang II) sind detailliertere Abweichungen zu erkennen. Besonders fällt auf, daß das IGRF deutlich variabelere Differenzen zu den Observatoriumswerten zeigt, als das GSFC-Modell, und das nicht nur in den interpolierten Zeiträumen zwischen den alle fünf Jahre bestimmten Modellfeldern. Für das GSFC-Modell macht es dabei nur einen geringen Unterschied, ob man die in dem Modell enthaltenen externen Anteile berücksichtigt oder nicht.

In allen Fällen treten in den Differenzen Variationen mit kurzen Perioden von einigen Jahren auf. Diese sind auf eine Kombination von zwei verschiedenen Ursachen zurückzuführen. Zum einen werden die beiden Modelle nur alle fünf Jahre bestimmt, die dazwischen interpolierten Werte können kürzerperiodische Schwankungen gar nicht enthalten. Zum anderen werden die Observatoriumswerte noch von Anteilen externer Variationen beeinflusst, die durch die Bildung von Jahresmittelwerten nicht herausgemittelt werden.

Teilweise sind diese kurzperiodischen Variationen Schwankungen um einen praktisch konstanten Offset, wie z. B. in der Deklination von Niemegek. In vielen Fällen ist der Offset jedoch nicht konstant, über den betrachteten Zeitraum ist eine deutliche Zu- oder Abnahme der Differenzen zu erkennen, wie z. B. in den Horizontalkomponenten von Lvov und San Pablo oder der Vertikalkomponente von Niemegek deutlich zu sehen ist (Abb. 2.2)

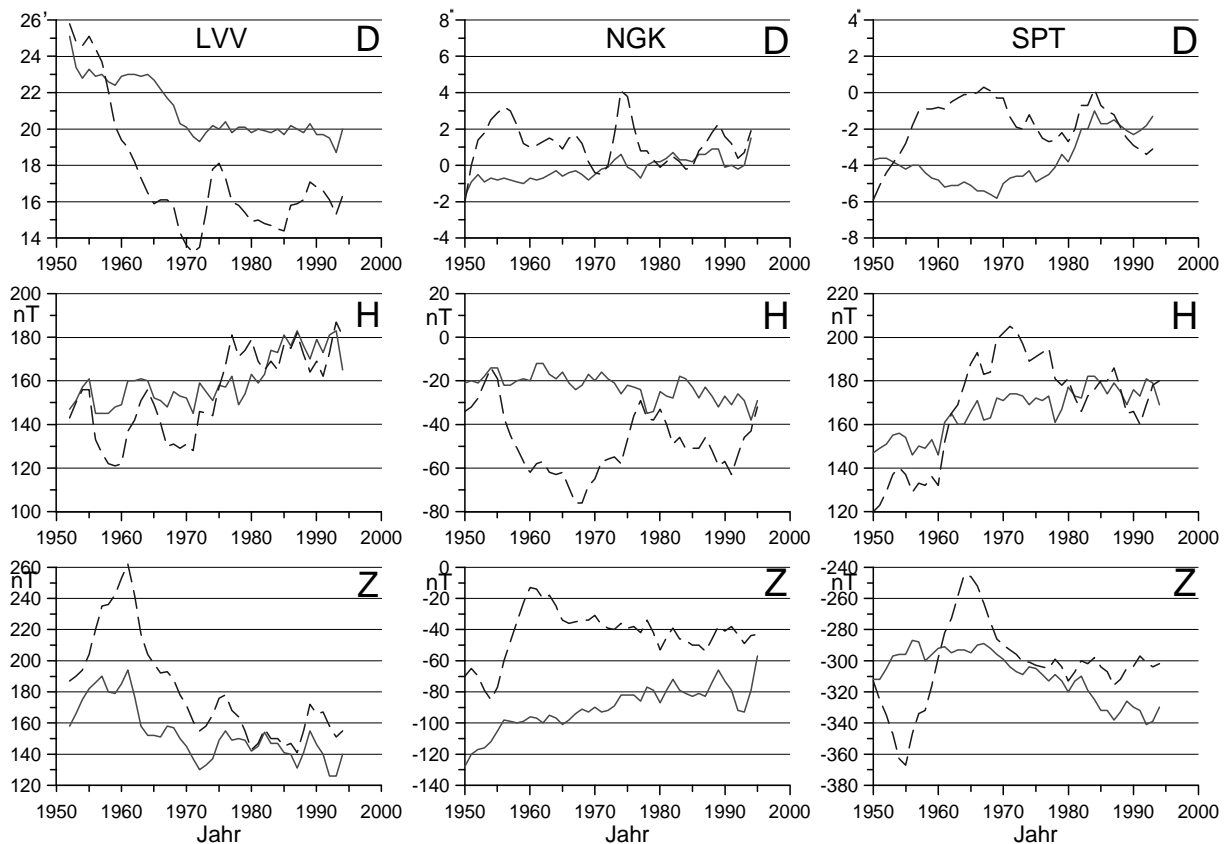


Abb. 2.2 Differenzen zwischen Observatoriumswerten und Modellwerten, Beispiele Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT). Gestrichelte Linie: Observatoriumswerte minus IGRF-Werte; durchgezogene Linie: Observatoriumswerte minus GSFC-Werte.

Auch hier gibt es zwei mögliche Ursachen, entweder die entsprechenden Observatorien befinden sich auf echten Säkularvariationsanomalien, oder das IGRF gibt aufgrund der oben genannten Einschränkungen des Modells die Säkularvariation für Europa nicht mit ausreichender Genauigkeit wieder. In diesem Fall scheint die zweite Möglichkeit die wahrscheinlichere Ursache zu sein. Schon die Häufigkeit, mit der solche Trends in den Differenzen zu den verschiedenen Observatorien auftreten deutet darauf hin (vgl. Anhang II).

Die globalen Modelle werden nicht nur insgesamt aus weltweit sehr unterschiedlich verteilten Daten bestimmt, Anzahl und Verteilung der Daten sind darüber hinaus für jede einzelne Epoche der Berechnung unterschiedlich, da z. B. Observatorien den Betrieb einstellen oder neu eröffnet werden und zusätzliche regionale Vermessungsdaten und Satellitendaten jeweils in unterschiedlicher Anzahl zur Verfügung stehen. Auch diese Inhomogenität der Modelle in der Zeit ist ein Argument für die Annahme, daß die Säkularvariation eines regional kleinen Ausschnitts des globalen Modells eventuell die hier geforderte Genauigkeit nicht erreichen kann.

Damit erfüllen weder das IGRF noch das GSFC die in Kapitel 2.2 für diese Arbeit genannten Anforderungen optimal. Insbesondere zur Reduktion verschiedener regionaler Daten auf gemeinsame Epochen scheinen sie ungeeignet, da sie die normale Säkularvariation nur mit hierfür unzureichender Genauigkeit repräsentieren.

## 2.4 Ein Normalfeldmodell für Europa

Es soll ein Normalfeldmodell für Europa entwickelt werden, das besser an die hier nötigen Anforderungen angepaßt ist. Ein regionales Modell direkt aus den Observatoriumswerten scheint hierfür geeignet zu sein. Die Dichte der magnetischen Observatorien ist in Europa recht hoch, und sie sind räumlich ausreichend gleichmäßig verteilt.

Zunächst wurde auch zur Bildung eines Normalfeldmodells die später benutzte Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis (SCHA, Kap. 5) in Erwägung gezogen. Diese Methode hätte den Vorteil, die Potentialbedingungen  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  und  $\text{rot } \mathbf{B} = 0$  einzuhalten, was bei einer unabhängigen Modellierung der einzelnen Komponenten nicht streng gegeben ist. Aufgrund von Problemen, wie z. B. starken Randeffekten bei der Hauptfeldmodellierung durch Spherical Cap Harmonic Analysis (vgl. Kap. 5.4.6), konnte mit dieser Methode jedoch kein überzeugendes Normalfeldmodell entwickelt werden.

Daher wurde ein Modell aus Polynomen in geographischer Länge und Breite für die einzelnen Komponenten gewählt.

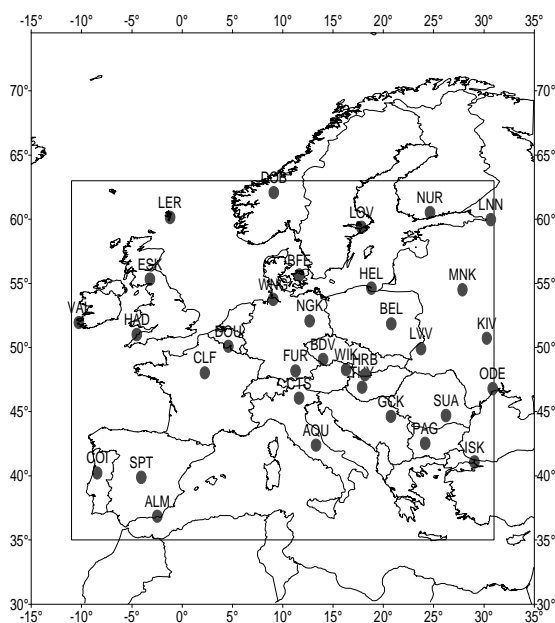


Abb. 2.3 Lage der zur Berechnung des Normalfeldmodells verwendeten Observatorien und Fläche des Modells.

Bei den verwendeten Observatoriumsdaten handelt es sich um die auf die Jahresmitte zentrierten Jahresmittelwerte. Das verwendete Polynommodell erstreckt sich jeweils von 35 bis 63 Grad nördlicher Breite und -11 bis 31 Grad östlicher Länge, der Mittelpunkt liegt bei 49°N, 10°E.

Es wurden alle europäischen Observatorien verwendet, deren Registrierungen den gewünschten Bereich von 1954 bis 1997 abdecken. Wo die Meßreihen nur um wenige Jahre zu kurz waren, wurden synthetische Werte ergänzt. Dazu wurde die Säkularvariation aus den Meßwerten des entsprechenden Observatoriums mit den Werten der benachbarten Observatorien verglichen, und so die fehlenden Werte im entsprechenden Verhältnis zu den Nachbarobservatorien berechnet. Der Gewinn durch die hieraus resultierende höhere Anzahl an Stützstellen für die Polynomregression ist größer als der durch die synthetischen Werte mögliche Fehler, der für die kurzen Zeiträume nur im Bereich einzelner nT liegen kann. In Anhang III sind die ergänzten Werte tabelliert.

Code	Name	geogr. Breite [°N]	geogr. Länge [°E]	Korrektur D in ‘	Korrektur H in nT	Korrektur Z in nT
ALM	Almeria	36,85	-2,47	1,8	-25	25
AQU	L’Aquila	42,38	13,32	6,7	-21	-15
BDV	Budkov	49,02	14,07	-1,6	-55	-15
BEL	Belsk	51,83	20,80	26,2	108	315
BFE	Brorfelde	55,62	11,67	-17,9	70	-175
COI	Coimbra	40,21	-8,42	-0,8	-9	45
CLF	Chambon-la-Forêt	48,02	2,27	-3,7	-83	116
CTS	Castello Tesino	46,05	11,65	0,2	-38	-32
DOB	Dombas	62,07	9,12	-19,9	-77	-222
DOU	Dourbes	50,10	4,60	-2,9	-1	93
ESK	Eskdalemuir	55,32	-3,2	-10,0	21	-19
FUR	Fürstenfeldbruck	48,17	11,28	-1,0	-37	-9
GCK	Grocka	44,63	20,77	-6,1	-58	-75
HAD	Hartland	50,98	-4,48	0,5	-51	85
HEL	Hel	54,60	18,82	-30,4	38	-83
HRB	Hurbanovo	47,87	18,18	-1,7	-5	-44
ISK	Istanbul - Kandilli	41,07	29,07	16,3	126	-86
KIV	Kiev - Dymer	50,72	30,30	16,5	-18	118
LER	Lerwick	60,13	-1,18	33,7	-144	42
LNN	Leningrad - Voiekovo	59,95	30,70	4,8	82	-249
LOV	Lovö	59,35	17,83	1,0	49	13
LVV	Lvov	49,90	23,75	21,8	136	160
MNK	Minsk - Pleshchenitzi	54,50	27,88	31,7	292	-122
NGK	Niemegk	52,07	12,68	0,5	-40	-71
NUR	Nurmijärvi	60,52	24,65	-26,2	281	117
ODE	Odessa - Stepanovka	46,78	30,88	-110,2	-158	79
PAG	Panagjuriste	42,52	24,18	-22,7	-202	-184
SPT	San Pablo	39,55	-4,35	-3,5	153	-293
SUA	Surlari	44,68	26,25	-3,8	4	-49
THY	Tihany	46,90	17,90	-0,4	-18	-19
WIK	Wien - Cobenzl	48,27	16,32	0,6	14	26
WNG	Wingst	53,75	9,07	9,8	45	-68
VAL	Valentia	51,93	-10,25	-4,6	136	35

Tab. 2.1 Übersicht über die 33 Observatorien, die für die Berechnung des Normalfelds verwendet wurden, sowie deren Anomaliekorrekturwerte (siehe Text).

Abb. 2.3 zeigt die Lage der 33 Observatorien, die für dieses Modell verwendet wurden, Tab. 2.1 enthält Namen und geographische Koordinaten. Alle Werte (außer den als Winkel angegebenen Komponenten D und I) wurden nach Formel (3.2) auf die Höhe Normal Null reduziert (vgl. Kap. 3.4).

Im Gegensatz zu IGRF- und GSFC-Modell enthalten die Observatoriums-Jahresmittelwerte und damit das ganze Polynom-Modell noch Einflüsse externer Variationen [z. B. Courtillot und Le Mouel, 1976]. Das ist in diesem Fall jedoch sogar wünschenswert. Die an verschiedenen Tagen gemessenen Werte einzelner regionaler magnetischer Vermessungen werden in der Regel wie in Kap. 3.2 beschrieben mit den Registrierungen des nächstgelegenen Observatoriums auf eine gemeinsame Epoche reduziert. Da dazu eben auch genau die von externen Variationen noch beeinflussten Jahresmittelwerte verwendet werden, bedeutet das, daß auch regionale Vermessungen zu verschiedenen Epochen Einflüsse dieser externen Variationen enthalten. Der dadurch entstehende Fehler kann klein gehalten werden, wenn alle zu kombinierenden Daten diese Einflüsse auf die gleiche Weise enthalten, was durch eine Verwendung des Normalfeld- und Säkularvariationsmodells aus Observatoriumswerten gegeben ist.

In Kapitel 2.3 war eine der Schlußfolgerungen, daß die konstanten Offsets zwischen IGRF bzw. GSFC und Observatoriumswerten nicht vom ungestörten Hauptfeld stammen, sondern auf Anomalien zurückzuführen sind. Zunächst versuchsweise wurden daher die Observatoriumswerte der einzelnen Komponenten mit dem mittleren Offsetwert als Betrag der Anomalie korrigiert und die sich mit bzw. ohne Korrektur ergebenden Polynome verglichen. In den Fällen, wo statt eines konstanten Offsets ein zu- oder abnehmender Trend in den Differenzen zu beobachten war, wurde die ganze am Observatorium gemessene Zeitreihe mit dem Mittelwert der Differenzen des betrachteten Zeitraums von 1955 bis 1990 korrigiert. Diese Wahl muß als etwas willkürlich angesehen werden. Sie wird gerechtfertigt durch die Annahme, daß die beobachteten Trends auf ungenaue Wiedergabe der Säkularvariation durch das IGRF zurückzuführen sind und der Betrag der Zu- oder Abnahme in dem Zeitraum in der Regel klein gegenüber dem Betrag des dabei immer noch vorhandenen Offsets ist, wie Abb. 2.1 gut demonstriert: in den Absolutwerten sieht man zwar den Offset, die vorhandenen Trends erkennt man erst in der Darstellung der Differenzen. Außerdem gibt es keine absolute Methode, den Betrag des ungestörten Hauptfelds zu bestimmen. Anomalien und insbesondere deren exakte Amplituden sind daher immer in Relation zu dem verwendeten Normalfeld zu sehen. Die so berechneten Korrekturwerte stimmen in den meisten Fällen größenordnungsmäßig gut mit den von Langel [in Jacobs, 1987] veröffentlichten Werten für Anomaliewerte einiger Observatorien überein.

Der Vergleich ergibt, daß die Polynome sich durch die Korrektur nicht wesentlich ändern, die maximalen Residuen aber deutlich kleiner werden. Zum Beispiel verkleinern sich in der Deklination die maximalen Residuen durch die Korrektur von bis zu  $\pm 80'$  auf  $\pm 3'$ , in der Horizontalintensität von mehr als  $\pm 100$  nT auf  $\pm 20$  nT und in der Vertikalintensität von ebenfalls mehr als  $\pm 100$  nT auf  $\pm 30$  nT. Die beschriebene Korrektur wurde damit als sinnvoll angesehen und in dem endgültigen Modell verwendet.

Die Zeitabhängigkeit des gesamten Modells wurde bewußt nicht durch Polynome modelliert. Es wären Polynome recht hoher Ordnung in der Zeit nötig, um die Variationen der Observatoriums-Jahresmittelwerte gut anzupassen, insbesondere da, wie oben geschildert, die vollständige Entfernung der externen Einflüsse aus diesen Daten gar nicht wünschenswert ist. Es erschien daher sinnvoller, die Jahresmittelwerte der Observatorien nur mit einem gewichteten, gleitenden Mittel über drei Jahre schwach zu glätten. Der geglättete Wert  $K_g(J)$  einer Komponente für das Jahr J wurde nach folgender Formel aus den fortlaufenden Komponentenwerten K gebildet:

$$K_g(J) = ( K(J-1) + 2*K(J) + K(J+1) ) / 4 \quad (2.3)$$

Die Modelle für beliebige, nicht auf die Jahresmitte zentrierte Epochen werden durch lineare Interpolation der so geglätteten Jahresmittelwerte bestimmt.

Ein wichtiger Punkt ist, welcher Ordnung die Polynome gewählt werden. Sie darf einerseits nicht zu niedrig sein, um die Strukturen des Hauptfeldes wiederzugeben, andererseits nicht zu hoch, damit Krustenanomalien nicht berücksichtigt werden. Zwei Kriterien wurden zur Festlegung der jeweils idealen Ordnung der Polynome herangezogen: die mittleren Residuen der Meßwerte gegenüber dem Modell und die zeitliche Stetigkeit der Koeffizienten der Polynome.

Allgemein gilt für die Residuen, daß sie mit zunehmender Ordnung aufgrund besserer Anpassung zunächst deutlich abnehmen, ab einer bestimmten Ordnung aber größenordnungsmäßig konstant bleiben. Das räumlich langperiodische Hauptfeld ist jetzt gut erfaßt, kurzperiodische Anomalien können aber noch nicht richtig wiedergegeben werden. Die Ordnung, ab der die mittleren Residuen konstant bleiben, ist die für das Modell minimal nötige Ordnung.

Der zeitliche Verlauf der einzelnen Koeffizienten der Polynome kann als Maß für die zeitliche Stetigkeit der Säkularvariation des Modells angesehen werden. Hier gilt allgemein, daß die Stetigkeit der Koeffizienten mit zunehmender Ordnung der Polynome abnimmt (Abb. 2.4). Je weniger Freiheitsgrade das gesamte Polynom hat, desto weniger können mögliche punktuell in den Zeitreihen der verschiedenen Observatorien auftretende unkorrelierte Fehler oder können externe Einflüsse unterschiedlicher Amplitude die Ausgleichsfläche beeinflussen. Je besser die Polynome kleinräumige Effekte berücksichtigen können, desto stärker können sie sich von einem Jahr zum nächsten unterscheiden.

Für das verwendete Modell wurden zunächst die Deklination, Horizontal- und Vertikalkomponente als Polynome modelliert. Dabei erwiesen sich für Horizontal- und Vertikalkomponente kubische Polynome (Ordnung 3 in Länge und Breite) als optimal. Die mittleren Residuen sanken in beiden Fällen beim Übergang von quadratischen zu kubischen Polynomen auf etwa ein Viertel der ersteren Werte, während sich bei Verwendung von Polynomen

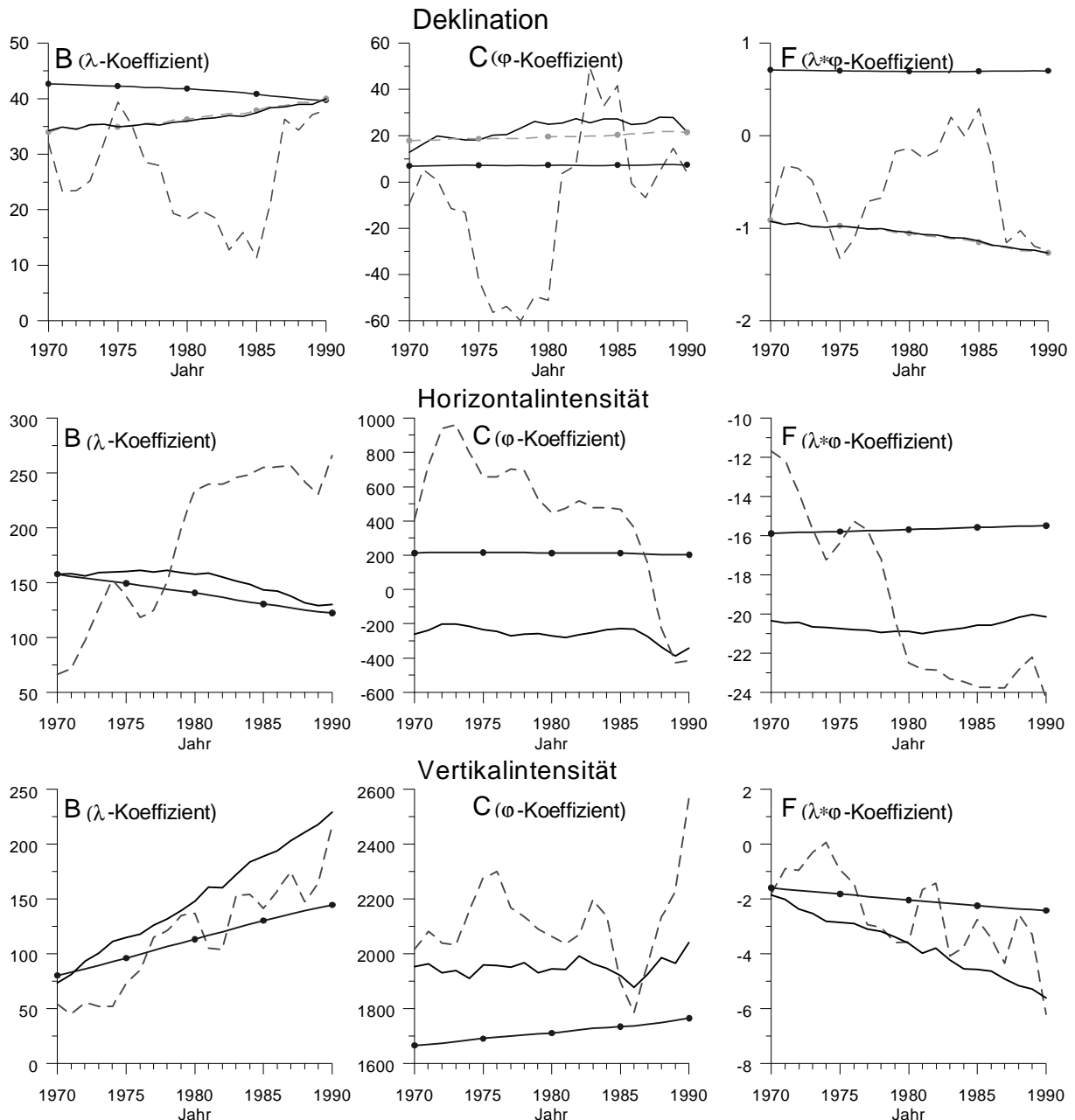


Abb. 2.4 Koeffizienten B, C und F (vgl. Formel (2.2)) der Normalfeldpolynome für Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität im Zeitraum 1970 bis 1990. Gestrichelte Kurve: für Polynome 4. Ordnung, durchgezogenen Kurve: für Polynome 3. Ordnung, Kurve mit Punkten: für Polynome 2. Ordnung. Bei der Deklination zusätzlich Kurve für Polynome 3. Ordnung in der Länge  $\lambda$  (gestrichelt mit Punkten). Die Einheiten der Ordinate sind teilweise relativ, einige Kurven wurden der vergleichenden Darstellung halber um einen konstanten Betrag verschoben.

vierter und höherer Ordnung keine entscheidende weitere Verbesserung ergab (Tab. 2.2). Die Verwendung unterschiedlicher Ordnungen in Länge und Breite brachte keine Verbesserung. Für die Deklination dagegen ergaben Polynome bis 3. Ordnung in der Länge, aber nur bis 2. Ordnung in der Breite das beste Ergebnis. Die mittleren Residuen sind dabei schon um eine Größenordnung kleiner ( $1'$  statt  $10'$ ) als bei quadratischen Polynomen, für kubische Ordnung sowohl in der Länge als auch in der Breite ergibt sich keine weitere Verbesserung. Die zeitliche Stetigkeit ist jedoch für einige Koeffizienten dieses Modells besser als schon für die des kubischen (siehe Koeffizient C in Abb. 2.4). Abb. 2.4 zeigt beispielhaft die Koeffizienten B, C und F aus Formel (2.2) für Polynome zweiter, dritter und vierter Ordnung, für die Deklination zusätzlich für die Polynome dritter Ordnung in der Länge und zweiter Ordnung in der Breite.

mittlere Residuen der Observatoriumswerte	mittlere Residuen D	mittlere Residuen H	mittlere Residuen Z
<b>Polynom 2. Ordnung</b>	9,7'	32,3 nT	60,6 nT
<b>Polynom 3. Ordnung</b>	1,0'	7,8 nT	13,0 nT
<b>Polynom 4. Ordnung</b>	0,6'	5,8 nT	8,8 nT
<b>Polynom 5. Ordnung</b>	0,5'	4,5 nT	7,1 nT

Tab. 2.2 Mittlere Residuen der Observatoriumswerte gegenüber Polynom-Normalfeldern mit verschiedenen hohen Ordnungen der Polynome für Deklination, Horizontal- und Vertikalintensität.

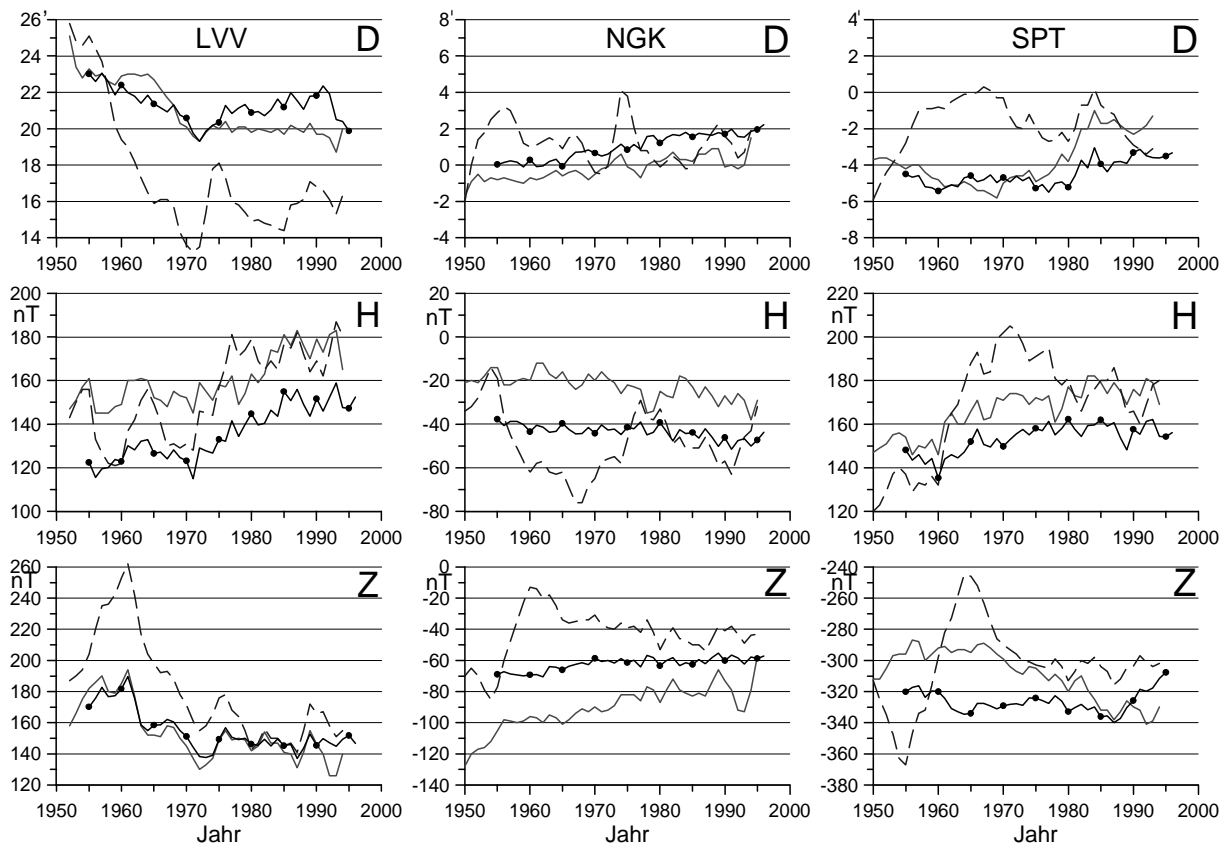


Abb. 2.5 Differenzen zwischen gemessenen Observatoriumswerten und Werten des Polynom-Normalfeldes (Kurve mit Punkten), Beispiele Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT). Zum Vergleich ebenfalls eingetragen: Differenzen Observatoriumswerte minus IGRF-Werte (gestrichelte Kurve) und Differenzen Observatoriumswerte minus GSFC-Werte (durchgezogene Kurve). Deklination D, Horizontalintensität H und Vertikalintensität Z.

Die Verbesserung des Vergleichs von den gemessenen Observatoriumswerten zu den Werten des optimalen Polynom-Normalfeldmodells gegenüber dem Vergleich mit dem GSFC-Modell fällt geringer als erhofft aus. Abb. 2.5 zeigt noch einmal dieselben Beispiele wie Abb. 2.2, mit der zusätzlichen Kurve der Differenzen zwischen gemessenen Observatoriumswerten und synthetischen Werten des Polynom-Normalfeldmodells. In einigen Fällen sind die Differenzen der Meßwerte zu beiden Modellen praktisch gleich (z. B. Vertikalintensität Z von Lvov), in wenigen Ausnahmefällen variieren die Differenzen zu dem Polynom-Normalfeldmodell sogar stärker (z. B. Deklination D von Lvov). Im Durchschnitt sind kurzperiodische Variationen und Trends in den Differenzen gegenüber dem Polynom-Normalfeldmodell jedoch zumindest etwas kleiner als gegenüber dem GSFC-Modell (z. B. Deklination D von San Pablo, Vertikalintensität Z von Niemegek). Die Kurven für alle verwendeten Observatorien sind in Anhang II dargestellt.

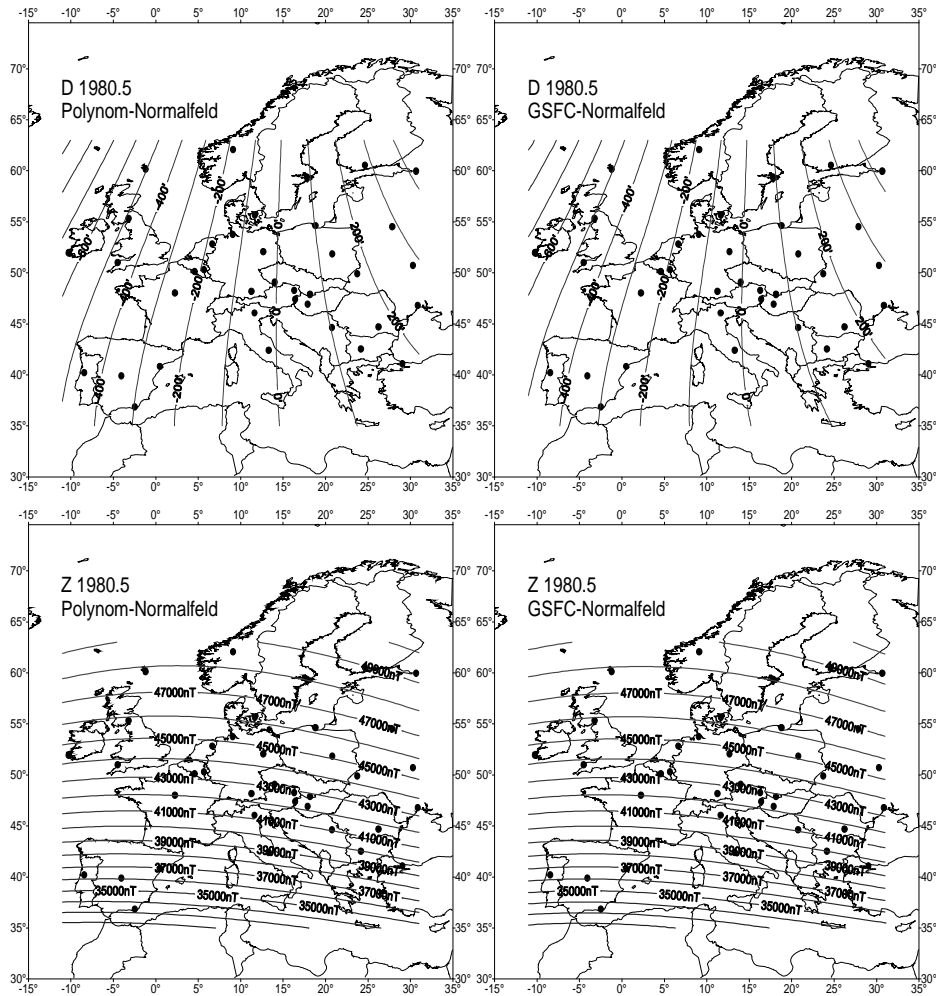


Abb. 2.6 Vergleich des Polynom-Normalfeldmodells und des GSFC-Modells am Beispiel der Deklination und Vertikalintensität 1980.5 für Europa.

Anschaulich ist kaum Unterschied zwischen den Polynom-Normalfeldern und denen des GSFC-Modells zu erkennen, wie Abb. 2.6 an einem Beispiel für die Deklination mit ihren relativ kleinen Beträgen und die Vertikalintensität mit großen Beträgen zeigt. Die tatsächlichen Differenzen zwischen den Modellen betragen in der Mitte der Fläche in der Deklination bis zu  $\pm 2'$ , in Horizontal- und Vertikalintensität bis zu  $\pm 10$  nT, an den äußersten Rändern bis zu  $\pm 10'$  in D und  $\pm 100$  nT in H und Z.

Es gibt zwei Möglichkeiten, ein Modell für alle sieben gängigen Komponenten des Erdmagnetfelds zu erstellen: entweder wird jede Komponente für sich durch Polynome modelliert, oder es werden drei linear unabhängige Komponenten modelliert und daraus über die in den Formeln (1.1) bis (1.4) gegebenen Beziehungen Modelle für die verbleibenden vier Komponenten berechnet. Die zweite Methode bewahrt zumindest die geometrischen Beziehungen der Komponenten untereinander. Ein Vergleich zeigt auch, daß sich beide Methoden in den durch viele Stützstellen gut bestimmten Bereichen des mitteleuropäischen Festlands nur geringfügig unterscheiden. Abb. 2.7 zeigt ein Beispiel dafür. In a) und b) sind die direkt als Polynom 3. Ordnung bzw. nach Formel (1.1) aus den Normalfeldern von H- und Z-Komponente berechneten Normalfelder der Totalintensität für 1980.5 dargestellt, c) zeigt die Differenz der beiden Felder. Abgesehen von Randeffekten und einem durch Observatorien nur schlecht abgedeckten Bereich über der Nordsee liegt die Differenz im wesentlichen unter 5 nT. Für die anderen Komponenten fallen die Vergleiche ähnlich gut aus, auch die zeitliche Änderung der Differenzen ist nur gering.

Die Modelle für die Komponenten X, Y, F und I wurden aus den drei beschriebenen Polynom-Modellen für D, H und Z nach den Formeln (1.2), (1.3), (1.1) und (1.4) berechnet.

Für jede Komponente lassen sich daraus Modelle der normalen Säkularvariation für beliebige Zeiträume als Differenzen der jeweiligen Normalfelder (geteilt durch Anzahl der Jahre) berechnen. Abb. 2.8 zeigt als Beispiel für solche normalen Säkularvariationsmodelle Isoporendarstellungen für die Säkularvariation von 1975.5 bis 1980.5 für die sechs Komponenten.

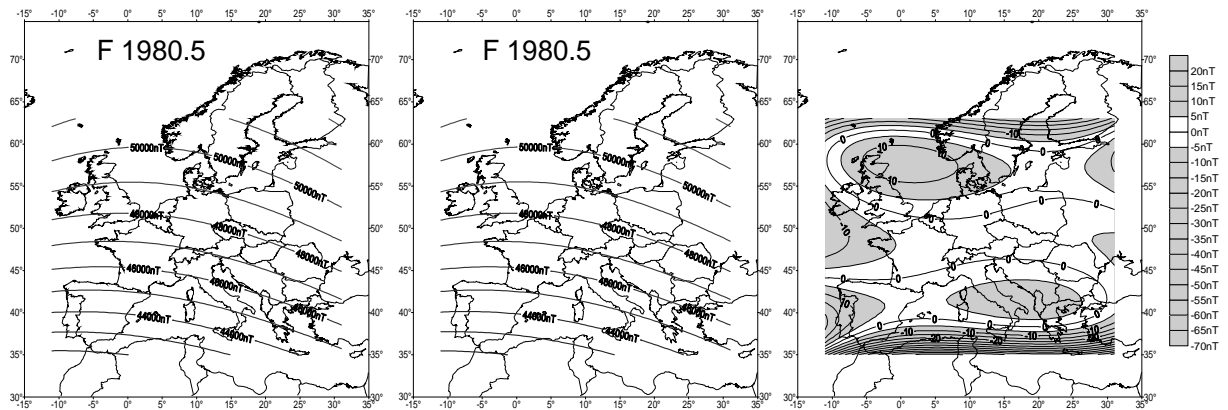


Abb. 2.7 a) Normalfeld als Polynom 3. Ordnung aus Totalintensitätswerten der Observatorien  
 b) Normalfeld der Totalintensität berechnet aus H- und Z-Polynom-Normalfeldern  
 c) Differenzen zwischen den Normalfeldern a) und b)

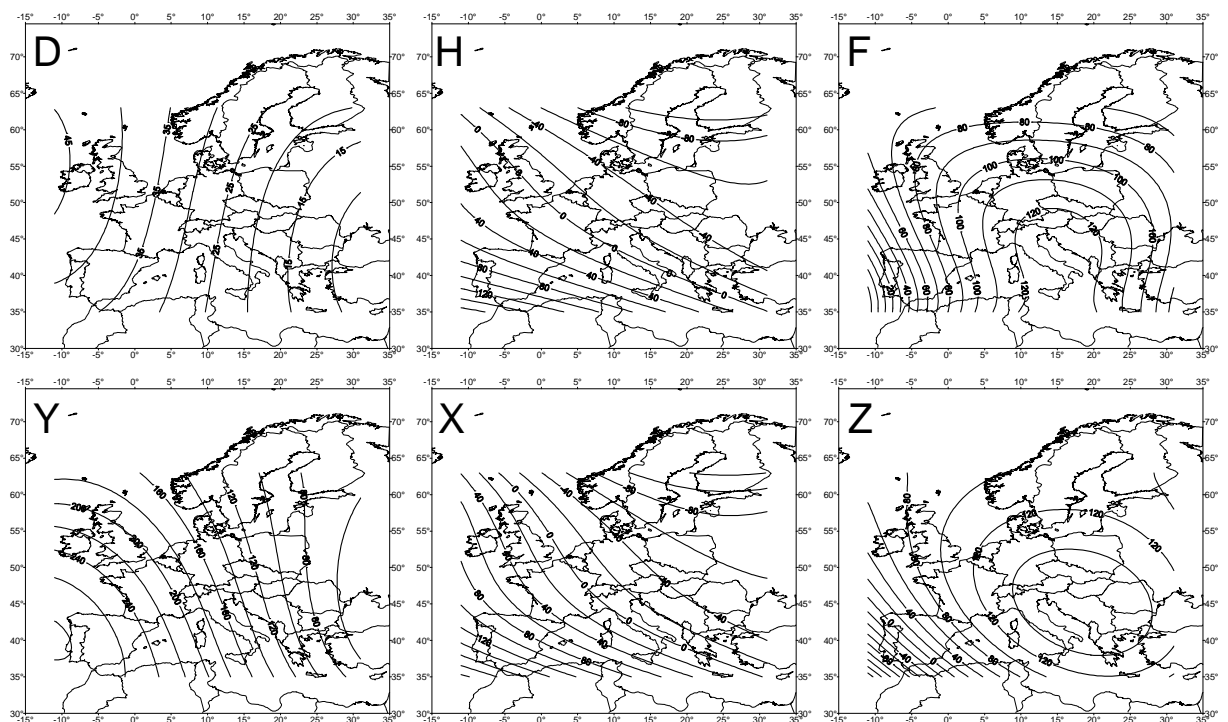


Abb. 2.8 Isoporendarstellung des normalen Säkularvariationsmodells für den Zeitraum 1985.5 bis 1990.5. Komponenten Deklination D, Horizontalintensität H, Totalintensität F, Ostkomponente Y, Nordkomponente X und Vertikalkomponente Z. Einheiten für D Bogenminuten pro fünf Jahre, sonst nT pro fünf Jahre.



## 2.5 Lokale Normalfelder

Als ein Ergebnis von Landesvermessungen werden oft Normalfelder aller Komponenten für das entsprechende Land berechnet, in der Regel als Polynome in geographischer Länge und Breite. Für Normalfelder einzelner europäische Länder können sich die Polynome nur im Bereich erster und zweiter Ordnung bewegen. Hier soll kurz gezeigt werden, wie gut oder schlecht solche einzelnen regionalen Normalfelder an den Grenzen der Länder zusammenpassen und daß sie wirklich nur als sehr lokale Normalfeldmodelle angesehen werden dürfen.

Für die Epoche 1992.5 gibt es von Frankreich, Deutschland und Polen regionale Vermessungen. Für jedes dieser Länder und jede Komponente wurde ein Polynom zweiter Ordnung in geographischer Länge und Breite aus den Meßwerten berechnet (Abb. 2.9). Die Dimensionen der Länder sind ähnlich und das Verhältnis von Länge zu Breite ist in keinem Fall so extrem, daß unterschiedliche Polynom-Ordnungen in Länge und Breite erforderlich sind.

Während die Isolinien von Frankreich und Deutschland in der Horizontalkomponente fast nahtlos ineinander übergehen, zeigt sich in der Vertikalintensität im Süden Deutschlands eine Verschiebung und in der Deklination ein Winkel zwischen den Isolinien der beiden Länder. Die für Polen berechneten Normalfelder der Deklination und der Horizontalintensität weisen sogar deutlich andere Krümmungen der Isolinien auf. In diesem Fall kann der Grund dafür sein, daß bei der Vermessung 1992.5 offensichtlich keine Säkularpunkte im Südwesten des Landes vermessen wurden und daher die Punktverteilung ungünstig ist. Generell können solche Effekte aber in Ländern mit ungünstigerem Längen- zu Breitenverhältnis leicht auftreten.

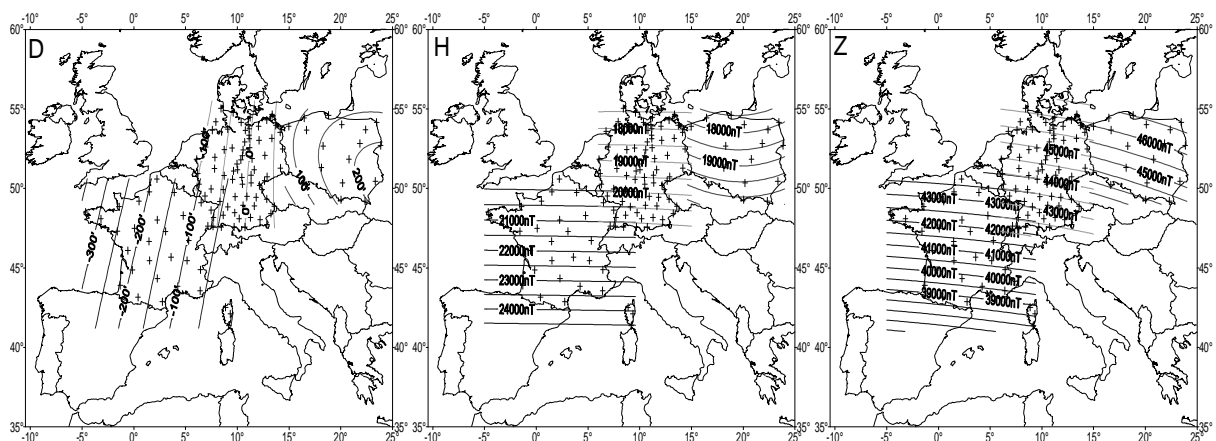


Abb. 2.9 Einzelne regionale Normalfelder der Länder Frankreich, Deutschland und Polen aus Vermessungsdaten zur Epoche 1992.5.

## 2.6 Ergebnisse dieses Kapitels

Kapitel 2 muß als Vorarbeit für die eigentlichen Untersuchungen dieser Arbeit gesehen werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Vergleiche der säkularen Änderung verschiedener Normalfeldmodelle mit Registrierungen der europäischen erdmagnetischen Observatorien ergaben, daß die globalen Modelle die Säkularvariation nicht mit der für die Ziele dieser Arbeit geforderten Genauigkeit repräsentieren.
- Aus den Observatoriumsregistrierungen wurde ein etwas besser an die weiteren Anforderungen angepaßtes Normalfeld- und Säkularvariationsmodell entwickelt. Dieses Modell wird im folgenden zur Reduktion von Ergebnissen einzelner Landesvermessungen auf gemeinsame Epochen verwendet, sowie als Referenz zur Berechnung von Anomaliewerten benutzt.

### 3 Regionale magnetische Vermessungen

In diesem Kapitel werden die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Untersuchung der Säkularvariation verwendeten Daten regionaler magnetischer Vermessungen Europas vorgestellt. Da Fehlerangaben bei solchen Daten oft fehlen bzw. stark variieren, wurden grundlegende Überlegungen zu auftretenden Reduktionsfehlern angestellt und allgemeine Fehlergrenzen abgeschätzt.

#### 3.1 Landesvermessungen und Säkularpunkte

Johann von Lamont führte 1850 in Bayern die erste Landesvermessung von drei magnetischen Komponenten durch. Seitdem wurden in den meisten europäischen Ländern mehrere solcher regionalen Vermessungen durchgeführt. Teilweise variieren jedoch sowohl die zeitlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Messungen als auch die Dichte des Meßpunktnetzes sehr stark.

Prinzipiell muß man zwischen Landesvermessungen und der Vermessung von Säkularpunkten unterscheiden. Die beiden Arten von regionalen Vermessungen dienen unterschiedlichen Zielen und müssen daher unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. Trotzdem wird in den meisten europäischen Ländern nur jeweils die eine oder andere Art von Messungen durchgeführt.

Die Unterschiede, und speziell die Schwierigkeit, die Reduktionsfehler von regionalen Vermessungen klein genug zu halten, um sie zur Untersuchung der Säkularvariation verwenden zu können (vgl. Kap. 3.3.2) scheinen noch nicht allgemein bekannt zu sein. Auch Newitt et al. [1996] bemerken in ihren Empfehlungen zur Durchführung von Säkularpunktvermessungen, daß häufig Verwirrungen in Bezug auf die beiden verschiedenen Arten von Vermessung auftreten.

- **Landesvermessungen** (engl. ground vector measurements) dienen der Darstellung der erdmagnetischen Komponenten, der Berechnung von Normalfeldern für ein Land und eventuell auch der Erfassung magnetischer Anomalien. Eine wichtige praktische Anwendung der Landesvermessung ist z. B. die detaillierte Bestimmung der Deklination, deren Kenntnis zur Navigation mittels des Magnetkompasses notwendig ist und die sich im Laufe der Zeit ändert. Landesvermessungen bieten in der Regel eine gute räumliche Auflösung, da sie auf relativ dichten Meßpunktnetzen durchgeführt werden. Dabei bleiben die Netze im Laufe der Zeit nicht immer konstant. Zunehmende technische Störungen machen eine Verlegung von Meßpunkten notwendig und in einigen Fällen führten personelle bzw. finanzielle Gründe gerade in den letzten Jahren zu einer deutlichen Ausdünnung der Netze. Für die genannten Ziele einer Landesvermessung ist die Konstanz der Punkte über mehrere Jahre allerdings auch nicht notwendig.

Die zeitliche Auflösung von Landesvermessungen ist schlecht, die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Messungen sind häufig unregelmäßig und variieren meist zwischen 10 und 20 Jahren, sind teilweise aber sogar noch deutlich größer.

- **Säkularpunkte** (engl. repeat stations) dienen, wie der Name schon sagt, der Verfolgung der Säkularvariation. Die Anforderungen an räumliche Auflösung sind geringer, die geforderte Genauigkeit ist jedoch höher. Absolute Fehler, die klein gegenüber den Beträgen des Hauptfeldes sind, können gegenüber den geringen Beträgen der Säkularvariation als sehr große relative Fehler erscheinen. Die Konstanz des Punktnetzes ist hier eine wichtige Anforderung.

Säkularpunkte werden also auf wenigen gleichmäßig verteilten Punkten innerhalb eines Landes gemessen. Zur Darstellung von magnetischen Anomalien sind Säkularpunktvermessungen nicht geeignet. Dafür bieten diese Messungen eine gute zeitliche Auflösung, sie werden in festen Abständen von 2 bis 5 Jahren durchgeführt.

### 3.2 Durchführung und Standardauswertung von regionalen Vermessungen

In der Regel wird ein Meßpunktnetz von früheren Landesvermessungen vorhanden sein, wobei die Punkte durch unmagnetische Markierungen im Gelände eindeutig wiederauffindbar sein sollten. Bei der Neuanlage solcher Meßpunkte wird versucht, eine Stelle zu finden, die das normale Magnetfeld der Umgebung gut repräsentiert, wo also nur kleine räumliche Gradienten vorhanden sind. Insbesondere muß der Punkt frei von künstlichen Störungen sein. Vor der erneuten magnetischen Vermessung eines bereits bestehenden Punktes muß sorgfältig überprüft werden, daß nicht durch technische Veränderungen in der Umgebung inzwischen künstliche Störungen auftreten.

Es sollten mehrere Absolutmessungen der magnetischen Komponenten stattfinden, der resultierende, auf einen Jahresmittelwert reduzierte Meßwert wird um so genauer sein, je mehr Messungen stattgefunden haben und je größer das gesamte Zeitintervall dieser Messungen war. Vom Ziel der Messungen her gesehen erfordern Säkularpunktvermessungen eine höhere Genauigkeit als Landesvermessungen, dementsprechend liegt bei Landesvermessungen das Zeitintervall im Bereich von wenigen Stunden, bei Säkularpunkten sollte es nach der IAGA-Empfehlung [Newitt et al., 1996] bei mindestens 24 Stunden liegen. Insbesondere bei Säkularpunkten ist es zur Verminderung der Reduktionsfehler (siehe Kap. 3.3.2) sinnvoll, während des gesamten Zeitintervalls, in dem mehrere Absolutmessungen stattfinden, ein Variometer am Meßpunkt registrieren zu lassen. Diese Geräte sind jedoch erst in den letzten Jahren zu entsprechender Geländetauglichkeit entwickelt worden.

Die Werte, die an verschiedenen Tagen eines Jahres (oder aufeinanderfolgender Jahre) an den einzelnen Punkten gemessen werden, werden mit Hilfe der Registrierungen des nächstgelegenen Observatoriums auf eine gemeinsame Epoche (Jahresmittelwerte) reduziert. Die Reduktion der einzelnen Meßwerte geschieht üblicherweise nach folgender Formel [z. B. Meloni et al., 1994]:

$$K(x, t_M) = K(x, t_0) + K(O, t_M) - K(O, t_0) \quad ( 3.1 )$$

- mit  $K(x, t_0)$ : am Ort  $x$  (Meßpunkt) zur Zeit  $t_0$  gemessener Wert der Komponente  $K$   
 $K(O, t_0)$ : am Observatorium zur Zeit  $t_0$  registrierter Wert der Komponente  $K$   
 $K(O, t_M)$ : Jahresmittelwert der Komponente  $K$  am Observatorium  
 $K(x, t_M)$ : Jahresmittelwert der Komponente  $K$  am Ort  $x$  (Meßpunkt)

Dabei wird angenommen, daß die Differenz zwischen Meßwert und Jahresmittelwert am Meßpunkt genau der Differenz zwischen dem Meßwert am Observatorium zur gleichen Zeit und dem dortigen Jahresmittelwert entspricht. Abb. 3.1 möge die Zusammenhänge veranschaulichen.

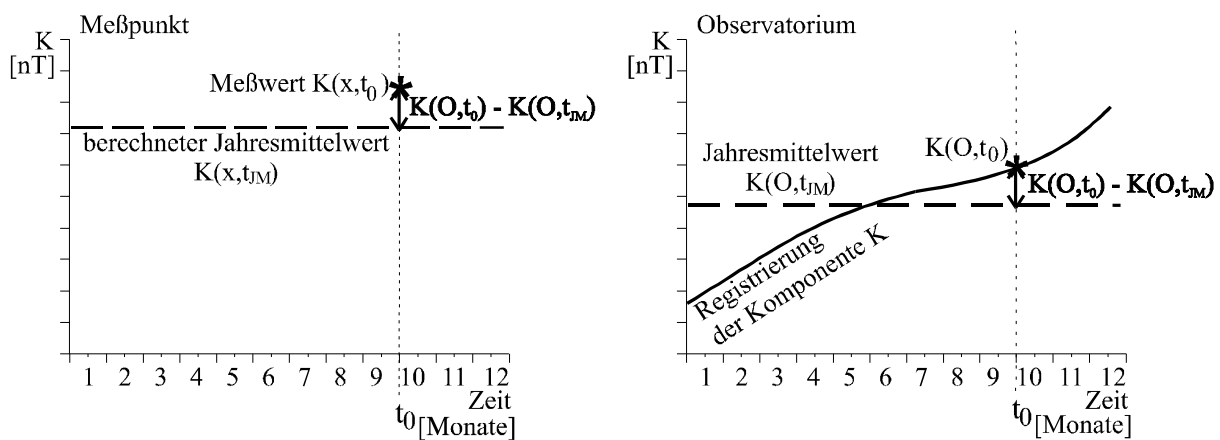


Abb. 3.1 Reduktion eines Meßwertes einer regionalen Vermessung auf einen Jahresmittelwert mit Hilfe einer Observatoriumsregistrierung (siehe Text).

Exakt gilt Formel (3.1) nur für den Fall, daß sowohl die Säkularvariation am Meßpunkt und am Observatorium gleich ist, als auch externe Variationen am Meßpunkt und Observatorium gleich sind.

Es wird davon ausgegangen, daß diese Bedingungen näherungsweise erfüllt sind. Wie gut das wirklich der Fall ist, wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

Bei mehreren Absolutmessungen wird zunächst jeder Wert einzeln reduziert, die Ergebnisse werden gemittelt.

### 3.3 Fehlerabschätzung

In vielen Fällen findet man zu veröffentlichten Werten regionaler Vermessungen überhaupt keine Fehlerabschätzungen. In den IAGA-Empfehlungen zur Vermessung von Säkularpunkten [Newitt et al., 1996] werden Fehlerquellen aufgezeigt und Maßnahmen beschrieben, wie diese Fehler klein zu halten sind. Diese Empfehlungen erschienen jedoch erst 1996, also nachdem die in dieser Arbeit verwendeten Vermessungen durchgeführt worden waren. Wie groß speziell die Reduktionsfehler sein können, wird in den Empfehlungen nicht beschrieben. Daher folgt hier eine ausführliche Diskussion der Fehler und ihrer Ursachen.

Zunächst noch einige Beispiele, wie auch vorhandene Angaben verschiedener Autoren zu der Genauigkeit von regionalen magnetischen Messungen variieren:

McWilliams und Byrne [1966] schätzen die mittleren Fehler der irischen Landesvermessung von 1965.5 auf  $\pm 0,8'$  für D, 3,4 nT für H und 3,2 nT für Z.

In der gleichen Größenordnung liegen die für die französischen Säkularpunkte am Beispiel 1982.5 angegebenen Werte:  $1'$  in D, 4 nT in H und F und 3,5 nT in Z [Barton und Newitt, 1995].

Für die italienische Landesvermessung 1990.0 werden mit etwa  $1'$  für D und I, 6 nT für F und 8 - 9 nT für H und Z deutlich höhere Fehlergrenzen für die Intensitäten angegeben [Meloni et al., 1994].

Für die deutschen Landesvermessungen gibt Schulz [1997] die maximalen Fehler für 1965.0 mit  $3,0'$  in D,  $\pm 23$  nT in H und 14 nT in Z an, für 1982.5 und 1992.5 mit  $2,9'$  für D, 17 nT für H und 9 nT für Z.

#### 3.3.1 Fehlerquellen

Für die Ergebnisse regionaler Vermessungen spielen verschiedene Fehlerquellen eine Rolle:

- a) die Genauigkeit der Meßinstrumente
- b) Meßfehler
- c) Fehler durch ungenaue Ortsbestimmung
- d) durch die nötigen Reduktionen bedingte Fehler.

Die Instrumentenfehler sind bei modernen Geräten kleiner als 1 nT. Auch bei den im Zeitraum seit 1950 verwendeten älteren Geräten sollten die Fehler nicht größer als bis zu 3 nT sein [vgl. z. B. Toperczer, 1960]. Angesichts der Beträge der im nächsten Abschnitt diskutierten Reduktionsfehler sind die Instrumentenfehler damit für den gesamten Zeitraum vernachlässigbar.

Meßfehler sind bei Geländemessungen zwar größer als unter Observatoriumsbedingungen, sollten jedoch, da es sich um statistische Fehler handelt, durch Mehrfachmessungen hinreichend klein gehalten werden.

Schwerwiegender sind die unter c) und d) genannten Fehler, da es sich dabei um systematische Fehler handeln kann, die nur sehr schwer allgemein zu bestimmen sind.

Die unter c) genannten Fehler durch ungenaue Ortsbestimmung spielen für einzelne Landesvermessungen, etwa zur Erstellung magnetischer Karten, keine Rolle. Sie können jedoch bei Ermittlung der Säkularvariation erheblich ins Gewicht fallen. Säkularpunkte sollten mit ausreichender Genauigkeit markiert und beschrieben sein, um diese Fehler vernachlässigbar klein zu halten. Außerdem wird man bei der Anlage der Meßpunkte darauf achten, diese in magnetisch ungestörten Lagen zu errichten, dementsprechend sollte der räumliche Gradient des Magnetfeldes gering und damit die Fehlerquelle selbst klein sein.

In der Regel sind die Landesvermessungspunkte ebenso gut markiert wie Säkularpunkte. Zum Beispiel in der Schweiz sind die Meßpunkte im Gelände jedoch nicht markiert [Fischer et al., 1979], dementsprechend müssen hier größere Fehler einkalkuliert werden.

### 3.3.2 Reduktionsfehler

Wie in Kapitel 3.2 schon beschrieben, gilt die zur Reduktion der Meßwerte auf eine gemeinsame Epoche verwendete Formel (3.1) nur näherungsweise. Säkularvariation, Tagesgang und weitere externe Variationen werden sich zwischen Meßpunkt und Observatorium um so stärker unterscheiden, je größer die räumliche Entfernung zwischen den beiden Punkten ist.

#### Säkularvariation

Im wesentlichen verläuft die Säkularvariation zumindest über die für die Reduktion verwendeten Zeiträume von wenigen Jahren in ganz Europa recht gleichförmig, lediglich die Beträge sind unterschiedlich, wie vergleichende Darstellungen der Monatsmittelwerte [z. B. Korte 1996] zeigen.

Die Säkularvariation ist betragsmäßig gering, sie liegt in Europa in folgender Größenordnung:

Nordkomponente	X	-20 bis +40 nT/Jahr	Deklination	D	-2 bis +10 ' /Jahr
Ostkomponente	Y	-10 bis +70 nT/Jahr	Horizontalintensität	H	-20 bis +40 nT/Jahr
Vertikalintensität	Z	-10 bis +40 nT/Jahr	Totalintensität	F	0 bis +40 nT/Jahr

Der räumliche Unterschied der jährlichen Säkularvariation innerhalb eines Landes beträgt maximal:

Nordkomponente	X	10 nT	Deklination	D	2'
Ostkomponente	Y	12 nT	Horizontalintensität	H	10 nT
Vertikalintensität	Z	10 nT	Totalintensität	F	10 nT

Regionale Vermessungen werden in der Regel in den Sommermonaten, also zeitlich nahe am Jahresmittelwert durchgeführt. Allerdings ist es insbesondere bei detaillierten Landesvermessungen oft nicht möglich, alle Punkte in einem Jahr zu vermessen, so daß Werte, die in einem Zeitraum von mehreren Jahren gemessen werden über Observatoriumsregistrierungen auf gemeinsame Jahresmittelwerte reduziert werden müssen.

Als realistisches Beispiel zur Fehlerabschätzung soll ein Zeitraum von drei Jahren mit Reduktion auf das mittlere Jahr dienen: wenn jeweils um die Jahresmitte herum gemessen wird, beträgt der maximal zu reduzierende Zeitraum kaum mehr als ein Jahr, damit ist der Fehler durch unterschiedliche Beträge der Säkularvariation genauso groß, wie dieser Unterschied pro Jahr ist.

Abb. 3.2 verdeutlicht dies an einem Beispiel: dargestellt ist der Gang einer beliebigen Magnetfeldkomponente der Einfachheit halber als lineare Funktion der Zeit für den Zeitraum Juli 1979 bis Juli 1981 an einem Observatorium und einem entfernten Meßpunkt. Die Säkularvariation über den gesamten Zeitraum betrage am Observatorium 80 nT und sei am Meßpunkt um den räumlichen Unterschied von 10 nT pro Jahr kleiner, also 60 nT für den gesamten Zweijahreszeitraum. Ein im Juli 1981 an dem Meßpunkt gemessener Wert weist also, wenn er nach Formel (3.1) über den Observatoriumswert auf einen Jahresmittelwert für 1980 reduziert wird, einen Fehler von -10 nT auf.

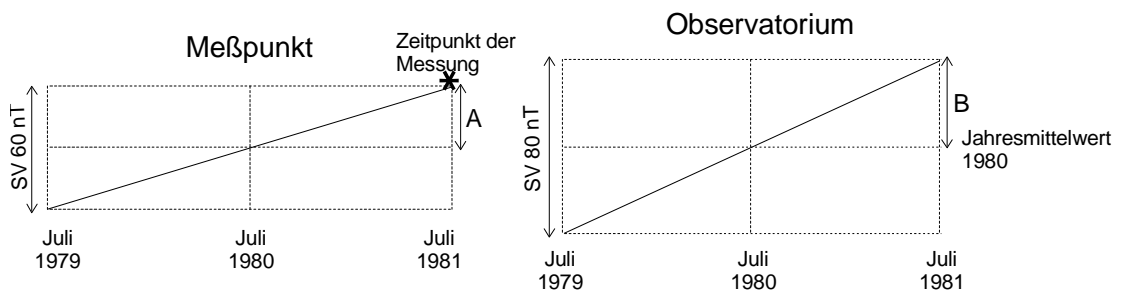


Abb. 3.2 Beispiel zum Fehler von einzelnen Landesvermessungswerten durch Reduktion auf eine gemeinsame Epoche. Die wahre Differenz zwischen Meßwert und Jahresmittelwert 1980.5 betrage zum Zeitpunkt der Messung am Meßpunkt nur 30 nT (A), am Observatorium aber 40 nT (B). Durch die Reduktion mit der

Differenz B am Observatorium ergibt sich daher am Meßpunkt ein Fehler von  
 $A - B = -10 \text{ nT}$ .

Die Observatorien liegen bis auf wenige Ausnahmen nicht ganz am Rand der Länder und es werden auch nahegelegene Observatorien der Nachbarländer zur Reduktion herangezogen. Daher sollte sich die Säkularvariation an den Lokationen von Meßpunkt und Observatorium auch im ungünstigsten Fall maximal um die Hälfte der oben genannten räumlichen Differenzen unterscheiden. Zum Teil wird auch zwischen den Ergebnissen der Reduktionen mit den zwei nächstgelegenen Observatorien gemittelt.

Damit ergeben sich für die Meßwerte der einzelnen Komponenten durch diesen Effekt folgende maximale Fehler:

Nordkomponente	X	$\pm 5 \text{ nT}$	Deklination	D	$\pm 1'$
Ostkomponente	Y	$\pm 6 \text{ nT}$	Horizontalintensität	H	$\pm 5 \text{ nT}$
Vertikalintensität	Z	$\pm 5 \text{ nT}$	Totalintensität	F	$\pm 5 \text{ nT}$

Realistische Werte für die mittleren Fehler sind daher  $\pm 0,3'$  in der Deklination D und  $\pm 2 \text{ nT}$  in den anderen fünf Komponenten.

Eine genauere Reduktionsmethode wäre, die gesuchte Säkularvariation von Meßzeitpunkt zu Jahresmittelwert am Meßpunkt aus einem flächenhaft und zeitlich interpolierten Modell der normalen Säkularvariation zu bestimmen. Angesichts der kleinen jährlichen Säkularvariationswerte und deren Unterschieden wird dieses wesentlich aufwendigere Verfahren kaum verwendet.

In jedem Fall stellt die unumgängliche Reduktion auf eine Epoche für die Untersuchung der Säkularvariation ein Problem dar, da für die Reduktion Annahmen über die zu untersuchende Größe gemacht werden müssen [Newitt et al., 1996]. Falls Säkularvariationsanomalien existieren, kann der Wert eines interpolierten Säkularvariationsmodells dabei gegenüber der wahren Säkularvariation am Meßpunkt fast genauso falsch sein wie der entsprechende Säkularvariationswert eines nahegelegenen Observatoriums.

Da es sich hier um einen systematischen Fehler handelt, ist auch bei der Berechnung der Säkularvariation am Meßpunkt aus aufeinanderfolgenden Messungen eine genauere Betrachtung notwendig.

Wenn die räumliche Verteilung der Säkularvariation zeitlich konstant bliebe, würden sich die eben diskutierten Fehler bei der Berechnung von Säkularvariationswerten als Differenzen von Meßwerten an den einzelnen Punkten wegheben. Die Säkularvariation zeigt jedoch auch eine räumliche Änderung mit der Zeit, für Europa ist diese in Korte [1996] ausführlich dargestellt. Die Änderung erfolgt natürlich nur langsam und stetig. Die Werte für die Änderung des Unterschieds der Säkularvariation innerhalb eines Landes können maximal, bei einer Vorzeichenänderung des Unterschieds, zu einem doppelt so großen Fehler des Säkularvariationswerts wie der Einzelwerte führen. Wenn sich der Unterschied in der Säkularvariation nur geringfügig ändert, wird der Fehler des Säkularvariationswerts jedoch sogar kleiner als die Fehler der Einzelwerte. Die mittleren bis maximalen Fehler der berechneten Säkularvariationswerte für die Intervalle zwischen den Messungen an jeweils einem Punkt werden also schätzungsweise in folgenden Bereichen liegen:

Deklination D	$\pm 0,2'$ bis $\pm 2'$
andere Komponenten	$\pm 1 \text{ nT}$ bis $\pm 10 \text{ nT}$

Dabei ist die Größe der Fehler nicht unbedingt von der Länge des Zeitintervalls, für das die Säkularvariation berechnet wurde, abhängig. Unterschiede in der Säkularvariation nehmen über lange Zeiträume hinweg nicht nur zu oder nur ab, sondern können variieren. Für kurze Zeiträume bis zu etwa 5 Jahren, wie sie bei den Säkularpunktvermessungen auftreten, kann man davon ausgehen, daß die Fehler im unteren Bereich des angegebenen Intervalls liegen. Trotzdem können angesichts der geringen Beträge der Säkularvariation (siehe oben) große relative Fehler auftreten.

### ***Externe Variationen***

Der Tagesgang der Magnetfeldkomponenten und kurzperiodischere Variationen haben ihre Ursache in ionosphärischen und magnetosphärischen Stromsystemen und Einflüssen des Sonnenwinds. Daher sind diese Variationen zwar von geographischer Länge und Breite abhängig, für ein Gebiet wie Europa aber an allen Orten ähnlich.

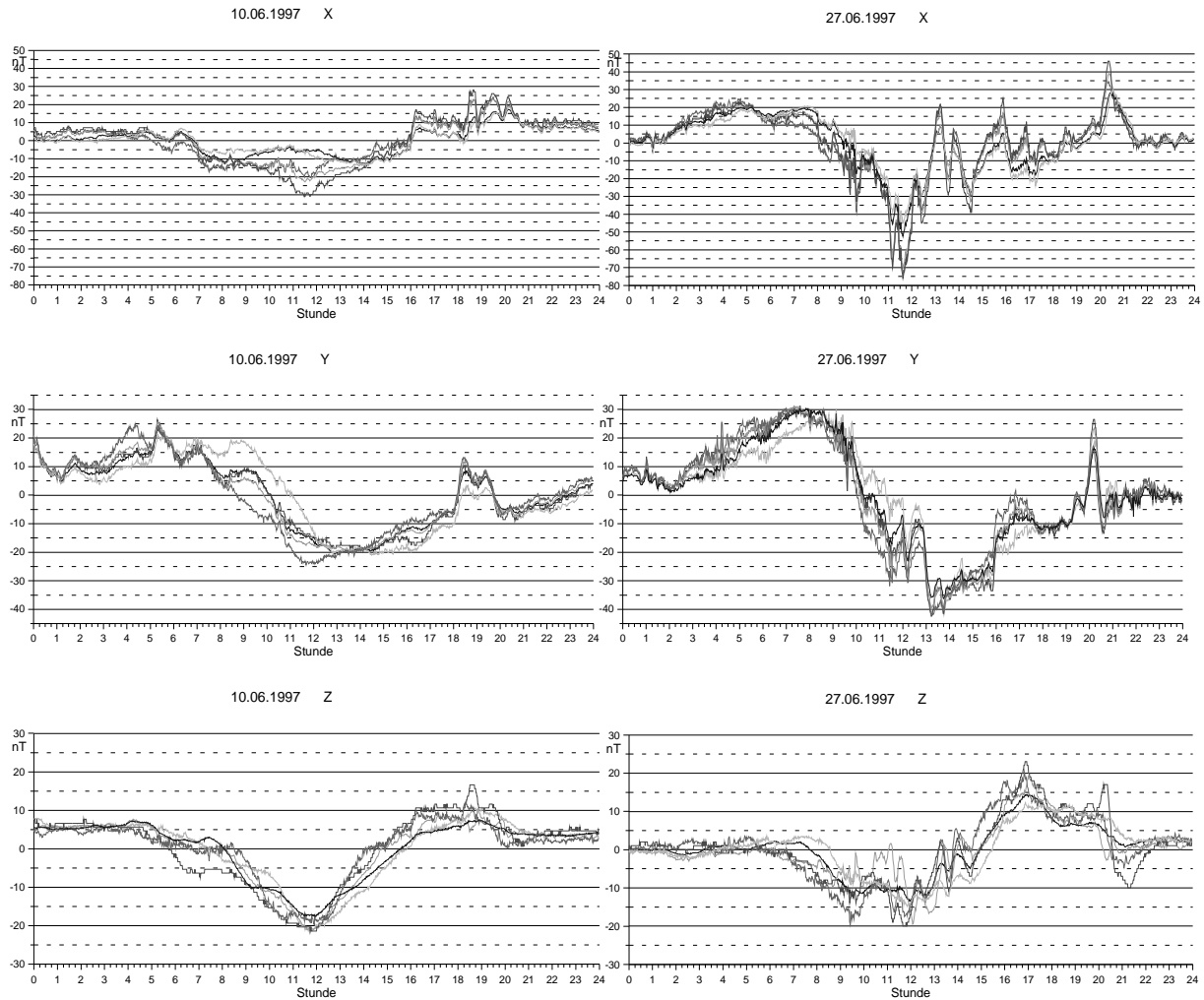


Abb. 3.3 Tagesgänge der Nord-, Ost- und Vertikalkomponente der Observatorien Belsk (BEL), Chambon-la-Forêt (CLF), Fürstenfeldbruck (FUR), Wingst (WNG) und Niemegek (NGK). Zum direkten Vergleich wurden die jeweiligen Tagesmittelwerte subtrahiert. Ruhiger Tagesgang am 10.06.1997, gestörter Tagesgang am 27.06.1997

Abb. 3.3 zeigt dies beispielhaft. Dargestellt sind Minutenmittelwerte der Komponenten X, Y und Z von sechs mitteleuropäischen Observatorien für einen ruhigen Tag (10.06.1997) und einen gestörten Tag (27.06.1997). Um den direkten Vergleich zu ermöglichen wurde der jeweilige Tagesmittelwert von den absoluten Minutenmittelwerten subtrahiert.

Die Registrierungen der verschiedenen Orte sind zwar ähnlich, aber nicht gleich, d. h. sie unterscheiden sich im Laufe eines Tages nicht nur um einen konstanten<sup>2</sup> Betrag, sondern um eine zusätzliche, variable Differenz. Diese Differenz, die ja ebenso zwischen einem Punkt einer regionalen Vermessung und dem nächsten Observatorium besteht, wirkt sich als Fehler bei der Reduktion aus. Um die Größenordnungen abzuschätzen, werden einige Differenzen zwischen verschiedenen Observatorien in Abb. 3.4 dargestellt, wieder für einen ruhigen und einen gestörten Tag in den drei Komponenten X, Y und Z. Der konstante Anteil der Differenz, der für die Fehler keine Rolle spielt, sondern im Gegenteil bei der Reduktion von Landesvermessungen den gesuchten Wert darstellt, wurde wiederum subtrahiert. Damit wäre die Reduktion (im Beispiel zwischen zwei Observatorien) von diesem Fehler frei, wenn die Differenz Null ist.

<sup>2</sup> mit „konstant“ ist hier der Anteil gemeint, der sich nur sehr langsam mit der Säkularvariation ändert, und der für demgegenüber kurze Zeiträume wie einen Tag konstant erscheint.

### KAPITEL 3: REGIONALE MAGNETISCHE VERMESSUNGEN

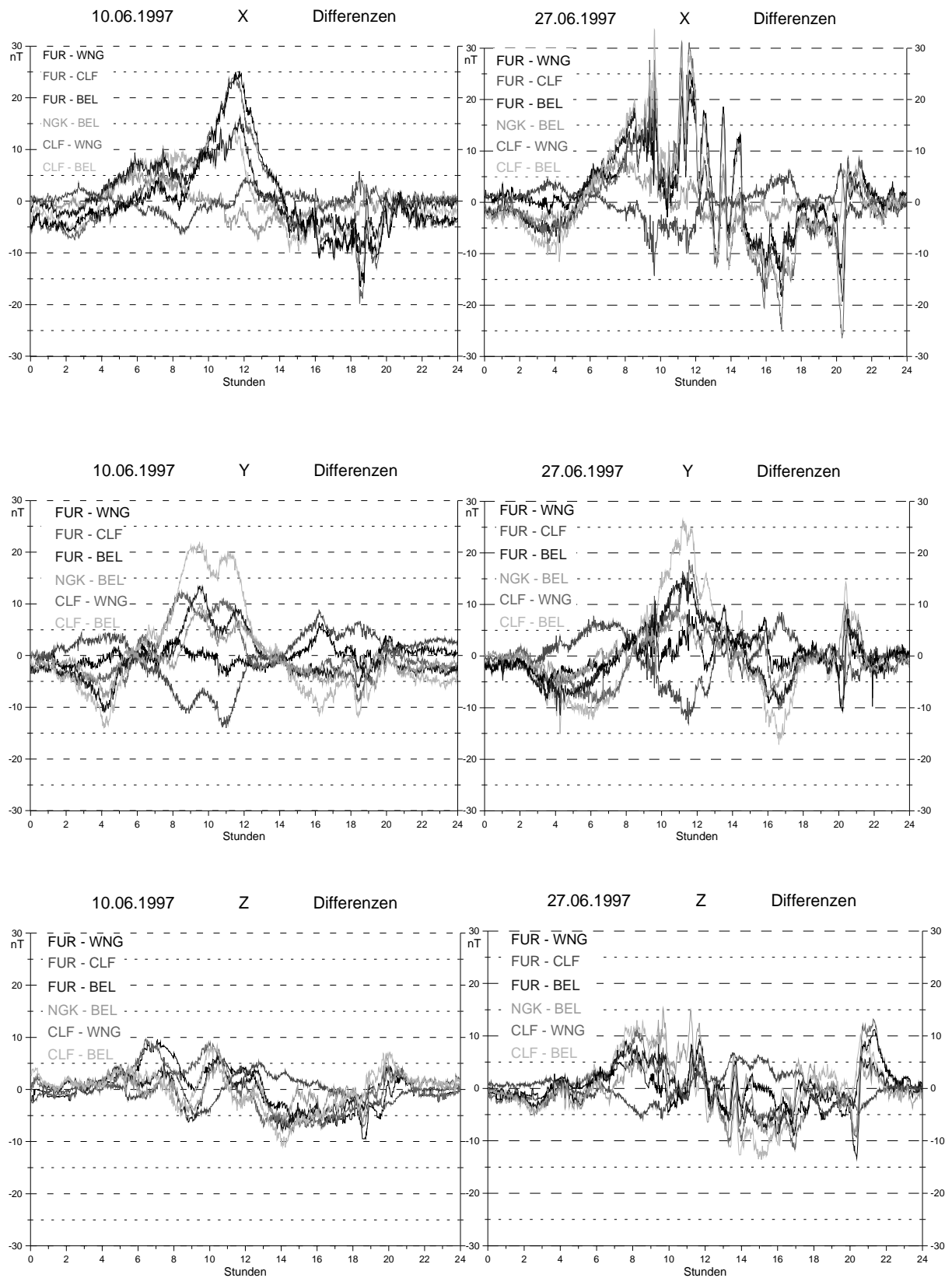


Abb. 3.4 Differenzen der Tagesgänge verschiedener europäischer Observatorien nach Abzug der jeweiligen Tagesmittelwerte für einen ruhigen (10.06.1997) und einen gestörten (27.06.1997) Tag, Nord-, Ost- und Vertikalkomponente.



Zunächst fällt auf, daß die Differenzen in den Nachtstunden deutlich kleiner sind als tagsüber. Der beste Weg, die Fehler klein zu halten liegt daher in der in den IAGA-Empfehlungen für Säkularpunktvermessungen [Newitt et al., 1996] beschriebenen Methode, ein Variometer länger als einen Tag am Meßort registrieren zu lassen. Bei den Landesvermessungen und den älteren Säkularpunktvermessungen wurde dieses Verfahren, das nicht nur sehr zeitaufwendig ist, sondern auch hohe Anforderungen an das transportable Variometer stellt, sicher nicht verwendet.

Betrachtet man die räumliche Verteilung der verwendeten Observatorien, kann man in den einzelnen Komponenten unterschiedliche Längen- oder Breitenabhängigkeiten erkennen.

Der Tagesgang ist in der Nordkomponente X vor allem breitenabhängig. Die Differenzen zwischen den Observatorien mit größter Nord-Süd-Entfernung, nämlich Fürstenfeldbruck - Wingst und Fürstenfeldbruck - Chambon-la-Forêt, sind am größten, die zwischen denen mit etwa halb so großer Nord-Süd-Entfernung, Fürstenfeldbruck - Belsk und Chambon-la-Forêt - Belsk sind etwa halb so groß und die Differenzen zwischen etwa auf gleicher Breite gelegenen Observatorien wie Niemeck - Belsk und Fürstenfeldbruck - Chambon-la-Forêt sind recht gering.

In der Ostkomponente Y dagegen ist der Tagesgang vor allem längenabhängig. Hier sind die Differenzen zwischen den Observatorien größter West-Ost-Entfernung, Chambon-la-Forêt - Belsk, am größten. Auch die Tatsache, daß die Differenzen zwischen Chambon-la-Forêt - Wingst und Fürstenfeldbruck - Chambon-la-Forêt etwa gleich groß, aber von entgegengesetztem Vorzeichen sind, verdeutlicht die Längenabhängigkeit sehr gut. Die West-Ost-Entfernungen zwischen den jeweiligen beiden Observatorien sind etwa gleich groß, die Differenzen wurden im ersten Fall aber in Richtung westlichere minus östlichere Werte, im zweiten dagegen östlichere minus westlichere Werte gebildet.

In der Vertikalintensität Z, wo die Tagesgänge selbst auch nur kleinere Amplituden als in den anderen Komponenten aufweisen, sind auch die Differenzen geringer. Ein deutliches Überwiegen von Längen- oder Breitenabhängigkeit ist hier nicht zu erkennen.

Die Differenzen bestehen nicht nur aufgrund der Geometrie der Quellen der Variationen. Eine Rolle können auch von den externen Variationen im Erdinnern induzierte Ströme spielen, die wiederum Magnetfelder erzeugen, die als induzierter Anteil in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit des Untergrunds zu den registrierten Magnetfeldern beitragen.

Das Beispiel Chambon-la-Forêt - Belsk diente nur der Verdeutlichung der auftretenden Längen- oder Breitenabhängigkeiten, Abstände dieser Größenordnung treten bei der Reduktion europäischer regionaler Vermessungen nicht auf. Für benachbarte Observatorien beobachtet man folgende maximalen Werte der Differenzen:

Nordkomponente	X	$\pm 30$ nT	Deklination	D	$\pm 2'$
Ostkomponente	Y	$\pm 15$ nT	Horizontalintensität	H	$\pm 30$ nT
Vertikalintensität	Z	$\pm 15$ nT	Totalintensität	F	$\pm 15$ nT

Wie schon beschrieben, wird die maximale Entfernung zwischen einem Punkt einer regionalen Vermessung und dem zur Reduktion verwendeten Observatorium in der Regel nicht größer sein als der halbe Abstand zwischen benachbarten Observatorien, also sollte auch der maximale Fehler nur etwa die Hälfte der angegebenen Werte erreichen. Desweiteren werden an jedem Punkt einer regionalen Vermessung mindestens zwei Absolutmessungen durchgeführt, so daß sich der endgültige reduzierte Wert als ein arithmetisches Mittel berechnet. Häufig finden die Messungen in den Nachmittagsstunden statt, wo die Differenzen in der Regel kleiner als um die Mittagszeit sind.

Ob man an einem magnetisch ruhigen oder gestörten Tag gemessen hat, kann man meist erst im Nachhinein anhand einer Variometer-Registrierung feststellen. Nur selten wird im Falle eines gestörten Tages eine Wiederholungsmessung an einem anderen Tag im Rahmen der zeitlichen und personellen Möglichkeiten liegen.

Externe Variationen mit längeren Perioden sind vernachlässigbar. Die Differenzen zwischen den Tagesmittelwerten zweier Observatorien unterscheiden sich an ruhigen und gestörten Tagen nur um wenige nT, d. h. die längerperiodischen Anteile magnetischer Stürme wirken sich kaum auf die gesuchte „konstante“ Differenz zwischen zwei Meßpunkten aus. Ebenso haben auch die halbjährlichen und jährlichen Variationen nur kleine Amplituden von wenigen nT (vgl. Tab. 1.1).

Werden als realistische maximale Werte für die Fehler durch Unterschiede in den externen Variationen etwa die Hälfte der in Abb. 3.4 beobachteten Differenzen angenommen, ergeben sich in den verschiedenen Komponenten folgende mittlere bis maximale Fehler:

Nordkomponente	X	$\pm 5 \text{ nT bis } 15 \text{ nT}$	Deklination	D	$\pm 0,3' \text{ bis } 1'$
Ostkomponente	Y	$\pm 3 \text{ nT bis } 7 \text{ nT}$	Horizontalintensität	H	$\pm 5 \text{ nT bis } 15 \text{ nT}$
Vertikalintensität	Z	$\pm 3 \text{ nT bis } 7 \text{ nT}$	Totalintensität	F	$\pm 3 \text{ nT bis } 7 \text{ nT}$

Diese Fehler besitzen bei der Berechnung der Säkularvariation aus aufeinanderfolgenden Meßdaten für die verschiedenen Epochen einen unabhängigen und einen abhängigen Anteil. Unabhängig insofern, als kurzperiodische externe Variationen während der entsprechenden zwei Messungen unabhängig voneinander und unterschiedlich sind. Abhängig, weil die ruhigen Tagesgänge doch tendenziell gleich und zumindest die daraus resultierenden Differenzen in Abhängigkeit von der geographischen Lage von Meßpunkt und Observatorium immer gleichgerichtet sind, wenn jeweils zur gleichen Tageszeit gemessen wird. Allerdings zeigt Abb. 3.4 auch sehr gut, daß sich das Vorzeichen des Fehlers bei aufeinanderfolgenden Messungen umkehren kann, wenn zu verschiedenen Tageszeiten gemessen wird, die Beträge der Fehler sich also addieren. Andererseits würde sich ein gleich großer, gleichsinniger Fehler in den Meßwerten der beiden Epochen bei der Berechnung der Säkularvariation wieder wegheben. Die mittleren Fehler können also nur abgeschätzt werden, sie liegen vermutlich in der gleichen Größenordnung wie die Fehler der einzelnen Meßwerte. Die maximalen Fehler entsprechen der Summe der maximalen Einzelfehler.

Damit ergeben sich folgende mittlere bis maximale Fehler der Säkularvariationen aufgrund der externen Variationen:

Nordkomponente	X	$\pm 7 \text{ nT bis } \pm 30 \text{ nT}$	Deklination	D	$\pm 0,4' \text{ bis } \pm 2'$
Ostkomponente	Y	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 14 \text{ nT}$	Horizontalintensität	H	$\pm 7 \text{ nT bis } \pm 30 \text{ nT}$
Vertikalintensität	Z	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 14 \text{ nT}$	Totalintensität	F	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 14 \text{ nT}$

Diese Fehler sind völlig unabhängig von der Länge des Intervalls, für das die Säkularvariation als Differenz der Einzelmessungen berechnet wird.

### ***Gesamter Reduktionsfehler***

Der gesamte Fehler der auf eine Epoche reduzierten Werte regionaler Vermessungen setzt sich aus den voneinander unabhängigen Fehlern aufgrund der Säkularvariation und externer Variationen zusammen. Im günstigsten Fall können sich auftretende Fehler kompensieren, im ungünstigsten Fall können sich Fehler beider Quellen addieren.

Berechnet man den maximalen Fehler als Summe der einzelnen Fehler und einen mittleren Fehler nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergeben sich folgende Fehlergrenzen für die einzelnen Werte regionaler Vermessungen:

Nordkomponente	X	$\pm 5 \text{ nT bis } \pm 20 \text{ nT}$	Deklination	D	$\pm 0,4' \text{ bis } \pm 2'$
Ostkomponente	Y	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 13 \text{ nT}$	Horizontalintensität	H	$\pm 5 \text{ nT bis } \pm 20 \text{ nT}$
Vertikalintensität	Z	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 12 \text{ nT}$	Totalintensität	F	$\pm 4 \text{ nT bis } \pm 12 \text{ nT}$

Ebenso für die als Differenz zweier Messungen an einem Meßpunkt berechnete Säkularvariation für beliebige Intervalle:

Nordkomponente	X	$\pm 7 \text{ nT bis } \pm 40 \text{ nT}$	Deklination	D	$\pm 0,4' \text{ bis } \pm 4'$
Ostkomponente	Y	$\pm 3 \text{ nT bis } \pm 26 \text{ nT}$	Horizontalintensität	H	$\pm 7 \text{ nT bis } \pm 40 \text{ nT}$
Vertikalintensität	Z	$\pm 3 \text{ nT bis } \pm 24 \text{ nT}$	Totalintensität	F	$\pm 3 \text{ nT bis } \pm 24 \text{ nT}$

Die unerwartet großen Reduktionsfehler lassen befürchten, daß die geplanten Untersuchungen der Säkularvariation eventuell nur unsichere Ergebnisse liefern können. Aufgrund dieser Erkenntnisse werden in Deutschland in Zukunft echte Säkularpunktvermessungen mit mindestens vierundzwanzigstündiger Registrierung eines Variometers durchgeführt werden.

### 3.4 Höhenkorrektur

Die magnetische Feldstärke des Hauptfeldes nimmt mit zunehmender Entfernung vom Erdinneren ab. Daher sollten die Meßwerte zur Modellierung alle auf eine gemeinsame Höhe reduziert werden. Für Daten, die auf dem Land gemessen wurden, ist Normalnull die geeignete Bezugshöhe. Die Daten der europäischen Regionalvermessungen liegen maximal 2000 m über NN, zur Reduktion darf daher die Formel verwendet werden, die genau genommen nur für den Dipolanteil des Feldes und eine ideale Kugel mit Radius  $R = 6371.2$  km gilt:

$$K(0) = K(h) + \Delta K \quad \text{mit} \quad \Delta K = 3 * K(h) * h / R \quad (3.2)$$

$K(0)$ : Wert der Komponente  $K$  auf Höhe NN

$K(h)$ : Meßwert der Komponente  $K$  auf Höhe  $h$

Die als Winkel angegebenen Komponenten Deklination und Inklinasion werden nicht korrigiert [z. B. Meloni, 1994].

Größenordnungsmäßig betragen die Korrekturen bei den in Europa auftretenden Intensitäten:

- für H und X: 1 nT pro 100 m, d. h. maximal 20 nT
- für Z und F: 2 nT pro 100 m, d. h. maximal 40 nT
- für Y: 0.15 nT pro 100 m, d. h. maximal 3 nT

Bei der Betrachtung der Säkularvariation spielt die Höhenkorrektur keine Rolle, die Unterschiede in der Höhenkorrektur eines Wertes zweier unterschiedlicher Epochen sind, wie man sich angesichts der Größenordnungen von Absolutwerten und Säkularvariation schnell verdeutlichen kann, vernachlässigbar gering, die Höhenkorrektur hebt sich also bei der Differenzbildung heraus.

Obwohl der Höheneffekt nur klein und für die hier hauptsächlich interessierende Säkularvariation sogar bedeutungslos ist, wurde der Einheitlichkeit halber an allen im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ergebnissen regionaler Vermessungen die Höhenkorrektur nach obiger Formel angebracht.

### 3.5 Kombination der Messungen verschiedener Länder

Die Kombination von regionalen Vermessungen der einzelnen Länder ist mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden. Die größte davon ist, daß es für Datenkombinationen für ganz Europa notwendig ist, Landesvermessungs- und Säkularpunkt-Daten zu verbinden. Denn obwohl die beiden Arten von Messungen ganz verschiedenen Zielen dienen, wird in vielen Ländern nur eine davon durchgeführt. Aber auch generell herrscht in jedem Land eine andere Vorstellung darüber, mit welchen zeitlichen und räumlichen Abständen regionale Vermessungen am sinnvollsten durchzuführen sind. Die Probleme, die sich daraus ergeben, sind im einzelnen:

#### 1. Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung ist von Land zu Land unterschiedlich, daher hat man in der Datenkombination ein sehr ungleichmäßig verteiltes Punktnetz, was bei der Interpolation zur Modellierung der Daten ein Problem darstellt. Während man aus dicht verteilten Landesvermessungsdaten durchaus direkt magnetische Anomalien modellieren könnte (vgl. Kap. 4), ist das mit Säkularpunktwerten nicht möglich. Wie verschieden die räumliche Auflösung der Daten ist, wird anhand der Abb. 3.5 deutlich, in der die Landesvermessungs- und Säkularpunktnetze der einzelnen europäischen Länder dargestellt sind.

2. Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung unterscheidet sich nicht nur von Land zu Land, sie variiert teilweise auch innerhalb eines Landes. So wurden z. B. in Deutschland 1965, 1982 (beides ehemalige Bundesrepublik), 1992 und 1996, also mit kürzer werdenden Zeitabständen, vier Landesvermessungen durchgeführt. Die Untersuchung der Säkularvariation ist ganz entscheidend von der zeitlichen Auflösung abhängig.

3. Unterschiedliche Zeitpunkte

Da regionale Vermessungen bis jetzt auch ausschließlich regional ausgewertet wurden, gab es keine Veranlassung, diese in Absprache der einzelnen Länder zu gemeinsamen Zeitpunkten durchzuführen. Zusammen mit der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung führt das dazu, daß es kaum Messungen verschiedener Länder zum gleichen Zeitpunkt gibt. Für die Kombination ist daher immer eine Interpolation oder Reduktion der Daten auf eine gemeinsame Epoche notwendig. Tab. 3.1 gibt zusammenfassend einen Überblick über die verschiedenen Zeitpunkte und die unterschiedliche zeitliche Auflösung der regionalen Vermessungen der einzelnen europäischen Länder.

Es folgt zunächst eine Beschreibung der verwendeten regionalen magnetischen Vermessungsdaten der einzelnen Länder.

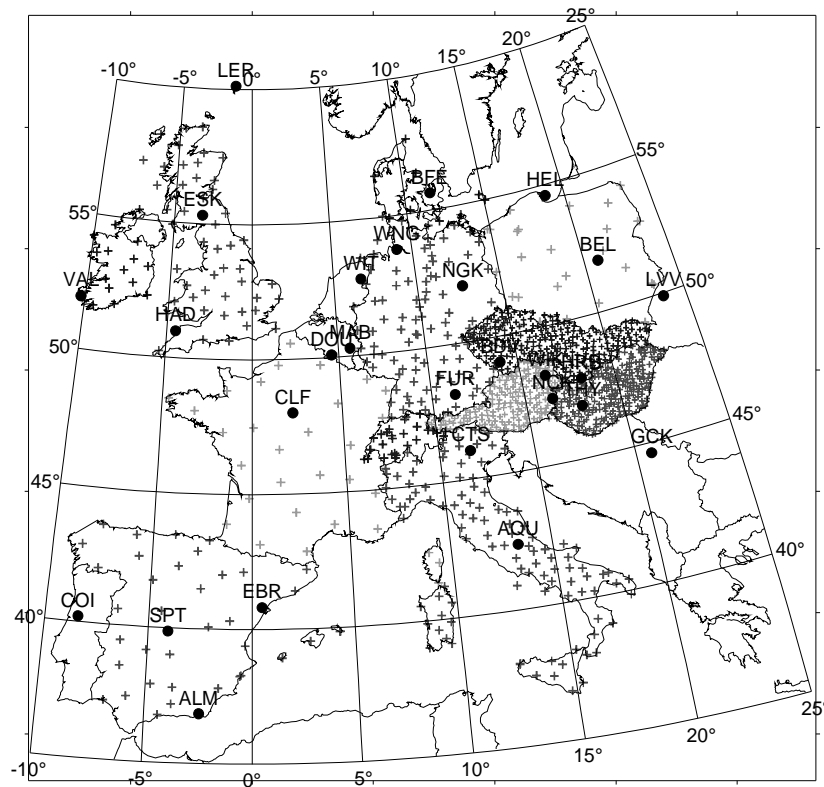


Abb. 3.5 Netze der im Zeitraum 1955 bis 1996 mindestens zweimal vermessenen Säkular- und Landesvermessungspunkte (Kreuze). Die geomagnetischen Observatorien sind durch Punkte und ihre Stationscodes gekennzeichnet.

Land -----	AU	CH	D BRD DDR		DK	E	F	GB	HU	I	IR	PL	SK	CZ
1955					###									###
1956								###						
1957				###										
1958							###						###	
1959											###			
1960	###													
1961					###									
1962						###								
1963						###	###					###		
1964														
1965			###		###	###	###		###	###	###			
1966												###		
1967					###	###	###						###	
1968														###
1969														###
1970	###				###						###	###		###
1971														
1972							###					###		###
1973						###								###
1974						###								###
1975					###	###					###			###
1976						###								###
1977						###	###							###
1978		###				###								###
1979						###				###				###
1980					###	###			###		###	###	###	###
1981						###						###		###
1982			###			###	###					###		###
1983						###						###		###
1984						###						###		
1985				###		###				###	###	###		###
1986				###		###		###				###		###
1987				###		###	###					###		
1988				###		###						###		###
1989						###						###		
1990				###		###				###		###		
1991		###				###		###				###		###
1992			###			###	###					###		
1993						###						###		###
1994						###		###				###		
1995						###		###	###	###	###	###		###
1996			###									###	###	###

Tab. 3.1 Übersicht über regionale magnetische Vermessungen der europäischen Länder. Die Kreuze markieren die Jahre, zu denen jeweils Landes- oder Säkularpunktvermessungen durchgeführt wurden. Grau unterlegt die Epochen, auf welche die zeitlich nächstliegenden Vermessungen aller Länder zur weiteren Untersuchung reduziert wurden.

AU = Österreich      E = Spanien      I = Italien      PL = Polen  
 CH = Schweiz      F = Frankreich      IR = Irland  
 D = Deutschland      GB = Großbritannien      SK = Slowakische Republik  
 DK = Dänemark      HU = Ungarn      CZ = Tschechische Republik

### 3.5.1 Regionale Vermessungen der einzelnen europäischen Länder

In dieser Arbeit konnten dank der freundlichen Überlassung der Daten der verschiedenen Institute Vermessungen von 13 europäischen Ländern verwendet werden. Die gesammelten Daten für den Zeitraum 1955 bis 1996 sind hier in alphabetischer Reihenfolge der Länder im einzelnen aufgeführt. Einige Daten sind den zitierten Veröffentlichungen entnommen, während andere direkt bereits in digitaler Form von den jeweiligen, im Anhang I aufgeführten Instituten zur Verfügung gestellt wurden.

#### *Dänemark*

Eine detaillierte, auf 1975.5 reduzierte Landesvermessung setzt sich aus etwa 600 Meßpunkten zusammen, von denen ein Teil in dem Zeitraum 1939 - 1957 in nördlichen Landesteilen, der andere Teil 1967 - 1977 im restlichen Land vermessen wurde.

Bis 1980 wurde ein bereits 1928 angelegtes Netz von 10 Säkularpunkten in etwa fünfjährigem Abstand vermessen, die Werte sind auf die Jahresmitten reduziert. Aufgrund der sehr häufigen Verlegung der Punkte seit 1955 wurden die beiden Stationen Svaneke und Ronne nicht berücksichtigt.

Sowohl die Landesvermessung als auch die Säkularpunkte sind in Hansen [1983] beschrieben.

#### *Deutschland*

Vor 1990 fanden regionale Vermessungen in den beiden deutschen Staaten völlig unabhängig und unterschiedlich statt.

In der Bundesrepublik wurden in den Jahren 1964 und 1965 131 Punkte vermessen und die Ergebnisse auf die Epoche 1965.0 reduziert. Die folgende Vermessung, auf 1982.5 reduziert, umfaßte 135 teilweise deutlich andere Punkte.

Eine sehr dichte Landesvermessung wurde zwischen 1953 und 1962 in der DDR durchgeführt, die annähernd 2000 Meßpunkte wurden auf die Epoche 1957.5 reduziert. 207 dieser Meßpunkte wurden 1990 noch einmal vermessen und auf 1990.5 reduziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur eine Auswahl von je 82 der Punkte der beiden Vermessungen betrachtet.

Seit der Wiedervereinigung wurden bereits zwei Landesvermessungen in ganz Deutschland durchgeführt, eine reduziert auf 1992.5 und eine auf 1996.5. Diese besitzen aber mit nur 55 bzw. 21 Meßpunkten ein deutlich gröberes Stationsnetz als alle vorhergehenden Vermessungen.

Darüber hinaus gab es in der DDR ein Netz von 12 Säkularpunkten, die von 1985 bis 1988 jährlich und auch in den späteren deutschen Landesvermessungen vermessen wurden.

#### *Frankreich*

In Frankreich existiert ein Netz von 32 Säkularstationen, die regelmäßig in fünfjährigem Abstand vermessen werden. Bis 1965 wurden die Ergebnisse auf die Epochen .0 reduziert, danach fand bereits 1967 die nächste Vermessung statt, ab der die Ergebnisse auf die Epochen .5 reduziert wurden.

#### *Großbritannien*

Etwa 50 Säkularstationen wurden zwischen 1985 und 1996 zwei- bis dreimal vermessen. Die Ergebnisse wurden dabei nicht auf Jahresmittelwerte, sondern auf ruhige Nachtwerte für Zeitpunkte nahe dem Meßdatum reduziert [Macmillan, pers. Mitt.].

Um einheitliche Datensätze zur Kombination mit den anderen europäischen Vermessungen zur Verfügung zu haben, wurden die zwischen 1985 und 1988 gemessenen Werte mit dem normalen Säkularvariationsmodell auf die Epoche 1986.5 reduziert, die Werte zwischen 1989 bis 1992 auf 1991.5 und diejenigen von 1993 bis 1996 auf 1994.5. Die Reduktion auf ruhige Nachtwerte sollte dazu führen, daß die Reduktionsfehler der einzelnen Werte klein gehalten werden. Die nötige Reduktion auf Jahresmittelwerte mit dem nur auf Jahresmittelwerten basierenden Modell führt aber doch wieder zu größeren Fehlern in den reduzierten Daten, da das Modell die kurzperiodischen externen Variationen mit Perioden von einem und einem halben Jahr nicht erfaßt, die hier berücksichtigt werden müßten.

Desweiteren gibt es eine auf 1956.0 reduzierte Vermessung von 27 Punkten in Großbritannien, es handelt sich dabei allerdings um ein völlig anderes Punktnetz, auch sind dabei in vielen Fällen keine Deklinationswerte vorhanden. Die Werte dieser Vermessung wurden daher nicht verwendet.

### *Irland*

In dem fraglichen Zeitraum gab es in Irland eine Landesvermessung an etwa 60 Punkten, reduziert auf die Epoche 1965.5 [McWilliams and Byrne, 1966].

Ein Netz von 15 Säkularpunkten wurde bis 1985 in unterschiedlichen Zeitabständen von ein bis fünf Jahren vermessen, wobei die Messungen auf die nächstgelegene Epoche .5 reduziert wurden. Für elf der Stationen liegen auch Meßwerte für 1995.0 vor.

### *Italien*

In Italien fanden im interessierenden Zeitraum fünf Landesvermessungen statt, die Ergebnisse sind auf die Jahre 1965.0, 1979.0, 1985.0, 1990.0 und 1995.0 reduziert. 1965 wurden nur 30 Punkte vermessen, die folgenden drei Vermessungen beinhalten jeweils etwa 120 Punkte und 1995 wurden knapp 50 Punkte vermessen.

### *Österreich*

Von Österreich gab es seit 1955 nur zwei magnetische Landesvermessungen. Zwischen 1960 und 1962 wurden 187 Punkte vermessen und die Ergebnisse auf 1960.0 reduziert [Toperczer, 1968].

Die zweite Landesvermessung umfaßt etwa 200 auf 1970.0 reduzierte Werte [Pühringer et al., 1975].

Seit 1996 ist eine neue Landesvermessung in Bearbeitung, die Ergebnisse waren leider für diese Arbeit noch nicht verfügbar [Berger, pers. Mitt.].

### *Polen*

Polen verfügt über ein Netz von 22 Säkularpunkten, die seit 1963 in sehr unterschiedlichen, ein- bis sechsjährigen Zeitabständen vermessen wurden. Zwischen 1954 und 1963 wurden an mehreren der Punkte ausschließlich Deklinationsmessungen durchgeführt. Sämtliche Ergebnisse sind auf die Epochen .5 reduziert. [Uhrynowski, 1992]

### *Schweiz*

Von der Schweiz liegen nur zwei Landesvermessungen mit sehr unterschiedlicher Auflösung vor. Eine auf 1978.0 reduzierte Vermessung wurde im Zeitraum 1974 - 1977 an etwa 450 Punkten durchgeführt [Fischer et al. 1979].

Zwischen 1983 und 1992 wurden Vermessungen an etwa 40 Stationen durchgeführt, die jeweils auf die nächstliegende Epoche .0, also um maximal 6 Monate reduziert wurden [Fischer und Schnegg, 1994].

Um die Daten dieser zweiten Vermessung zur Kombination mit den anderen europäischen Daten besser handhaben zu können wurden sie mit dem normalen Säkularvariationsmodell zunächst auf die gemeinsame Epoche 1991.0 reduziert.

### *Slowakische Republik*

In der Slowakei wurden vier Landesvermessungen auf jeweils etwa 120 Punkten durchgeführt. Die in den Jahren 1951 bis 1953 gemessenen Werte wurden in ihrer auf 1958.0 reduzierten Form gemeinsam mit tschechischen Werten veröffentlicht [Bouška et al., 1959]. Eine 1967 bis 1968 durchgeführte Vermessung wurde auf 1967.5 reduziert. Die nächste Vermessung fand 1979 bis 1982 statt, die Werte sind auf 1980.5 reduziert [Podsklan, 1987]. Ebendiese Werte werden auch, auf 1985.5 reduziert, in der Veröffentlichung für die ganze ehemalige Tschechoslowakei [Bucha et al., 1993 - 1996] verwendet. Die letzte Landesvermessung ist auf die Epoche 1996.5 reduziert. Leider waren auch hier die endgültigen Ergebnisse noch nicht rechtzeitig für diese Arbeit zu bekommen.

Darüber hinaus besteht das Problem, daß die Meßpunkte der einzelnen Vermessungen nicht wirklich identisch sind, meist liegen sie um einige 10 bis einige 100 Meter verschoben. Daher ist es hier nicht möglich, direkt die Säkularvariation für die einzelnen Punkte zu berechnen.

### *Spanien*

Seit 1962 existiert in Spanien ein Netz von 31 Säkularpunkten. Neben Punktverlegungen kamen in den 80er und 90er Jahren auch noch ein paar neue Stationen hinzu. Während zwischen 1963 und 1973 die Punkte nur alle drei bis fünf Jahre vermessen wurden, gibt es seitdem fast jährliche, auf die Epoche .5 reduzierte Ergebnisse.

### *Tschechische Republik*

Von der Tschechischen Republik liegen vier Landesvermessungen vor. Die erste ist auf 1955.0 reduziert [Bucha, 1956]. Das Netz dieser 156 Meßpunkte unterscheidet sich in der Lage der Punkte deutlich von dem der späteren Vermessungen, wenn auch die Stationsabstände in der gleichen Größenordnung liegen.

Die Ergebnisse der folgenden zwei Landesvermessungen sind für das gesamte Gebiet der ehemaligen Tschechoslowakei veröffentlicht worden und auf die Epochen 1958.0 [Bouska et al., 1959] und 1985.5 [Bucha et al., 1993 - 1996] reduziert. Die tschechischen Werte wurden dabei in den Jahren 1957 und 1958 bzw. 1976 bis 1978 gemessen. Die aktuellste Landesvermessung der Tschechischen Republik ist auf 1996.5 reduziert. Das Meßpunktnetz entspricht in etwa dem der beiden vorherigen Vermessungen und umfaßt knapp 200 Punkte.

Ähnlich wie in der Slowakischen Republik sind die Meßpunkte der einzelnen Vermessungen nur in wenigen Fällen wirklich identisch, so daß aus diesen Daten kaum direkte Berechnungen der Säkularvariation einzelner Punkte möglich sind.

Daneben gibt es in der Tschechischen Republik ein Netz von sechs Säkularpunkten. Diese wurden seit 1968.5 in etwa zweijährigen Zeitabständen vermessen.

### *Ungarn*

In sehr regelmäßigen Zeitabständen von 15 Jahren wurden in Ungarn vier Landesvermessungen durchgeführt, die auf die Epochen 1950.0, 1965.0, 1980.0 und 1995.0 reduziert sind. Leider änderte sich das dichte Meßpunktnetz von über 200 Punkten jeweils relativ stark. Insbesondere die Stationen der Vermessung 1950.0 liegen an völlig anderen Punkten als die der späteren Vermessungen, so daß diese nicht verwendet werden konnten.

### *Weitere Länder*

Für Portugal, Belgien, die Niederlande und das ehemalige Jugoslawien gab es, soweit in Erfahrung gebracht werden konnte, im hier untersuchten Zeitraum jeweils höchstens eine Landesvermessung. Damit können diese Werte keine Aussagen zur Säkularvariation liefern, sie wurden daher in dieser Arbeit nicht verwendet. Bis auf die Observatoriumswerte wurden keine Daten der Skandinavischen Länder verwendet, da in hohen Breiten externe Störungen besonders groß sind. Von vielen der weiter östlich gelegenen Staaten ist es aufgrund der politischen Situation immer noch kaum möglich, Daten zu erhalten.

Abb. 3.5 und Tab. 3.1 verdeutlichen die räumliche und zeitliche Inhomogenität der Meßdaten. Für die Länder mit stark variierenden Meßpunktnetzen ist als Beispiel eine mittlere Verteilung dargestellt. Bei der Tabelle muß man sich noch vor Augen halten, daß manche Vermessungen auf die Epochen .0, manche auf .5 reduziert sind. An den Säkularpunkten in Spanien, Polen und der Tschechischen Republik wurden ab den 70er bzw. 80er Jahren zwar jährlich Messungen durchgeführt, dabei wurde aber meist jeweils nur ein Teil der Stationen vermessen, so daß sich für das ganze Punktnetz im Mittel eher ein zeitlicher Abstand von 2 Jahren zwischen den Vermessungen ergibt.



### 3.5.2 Reduktion der Daten verschiedener Länder auf gemeinsame Epochen

Um die in verschiedenen Jahren durchgeführten regionalen Vermessungen der einzelnen Länder für eine Kombination auf gemeinsame Epochen umzurechnen, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: die zeitliche Interpolation zwischen aufeinanderfolgenden Messungen, oder die Reduktion von der zeitlich nächstgelegenen Messung her.

Eine zeitliche Interpolation jeweils aller einzelnen Vermessungen über die gesamte untersuchte Zeitspanne von 1955 bis 1995 wäre wohl eigentlich die bessere Methode. Zur sinnvollen Interpolation der zeitlichen Änderung der einzelnen Komponenten sind wegen der Zeitabhängigkeit der Säkularvariation für den Zeitraum dieser Länge jedoch Polynome mindestens dritten Grades erforderlich. Außerdem fallen in den Zeitraum mindestens zwei sogenannte Jerks, sehr schnelle Änderungen der Säkularvariation [z. B. Alexandrescu et al., 1995], die eine gute Anpassung der Zeitreihen durch Polynome niedrigen Grades erschweren. Angesichts der vielen Länder mit nur wenigen regionalen Vermessungen und der großen Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Messungen schien daher eine generelle zeitliche Interpolation der Vermessungen durch Polynome nicht ratsam. Der Einheitlichkeit halber wurde das Verfahren daher auch bei den häufig vermessenen Ländern wie Frankreich oder Polen nicht angewendet.

Statt dessen wurden die Daten, die in unterschiedlichen Jahren gemessen wurden, mit Hilfe eines Säkularvariationsmodells auf gemeinsame Epochen reduziert. Dabei wurde versucht, die Zeiträume, über die reduziert wurde, so gering wie möglich zu halten, um die Reduktionsfehler zu minimieren.

Zur Reduktion wird zu jedem Meßwert jeder Komponente der Modellwert der normalen Säkularvariation für den entsprechenden Zeitraum am gleichen Ort hinzuaddiert, die Formel lautet:

$$K(x,t_2) = K(x,t_1) + SV(x,t_2-t_1) \quad (3.3)$$

mit  $K(x,t_2)$  : Wert der Komponente K am Ort x zur (für alle Länder gemeinsamen) Zeit  $t_2$   
 $K(x,t_1)$  : Wert der Komponente K am Ort x zum Zeitpunkt  $t_1$  (der Messung)  
 $SV(x,t_2-t_1)$  : Säkularvariation der Komponente K für den Zeitraum von  $t_1$  bis  $t_2$  am Ort x aus dem Modell der normalen Säkularvariation

Als Modell der normalen Säkularvariation wurde das in Kapitel 2.4 ausführlich beschriebene Polynom-Modell verwendet, dort finden sich auch die Gründe der Entscheidung für dieses Modell.

Auf diese Weise wurden Werte regionaler Vermessungen der europäischen Länder zu den Epochen 1957.5, 1965.5, 1970.5, 1975.5, 1980.5, 1985.5, 1990.5 und 1995.5 kombiniert, diese Jahre sind in Tab. 3.1 grau unterlegt. Einerseits wurde versucht, einen gleichmäßigen Zeitabstand (von fünf Jahren) zwischen den Kombinationen zu erreichen, andererseits sollten die Zeiträume der Reduktionen möglichst gering gehalten werden. Das ist der Grund für den größeren Zeitabstand bei der ersten Kombination 1957.5, da am Anfang des gesamten Zeitintervalls weniger Vermessungen stattgefunden haben.

Tab. 3.2 gibt einen Überblick, welche regionalen Vermessungen der einzelnen Länder tatsächlich für die Reduktion auf die gemeinsamen Jahre verwendet wurden. Da aus den slowakischen Werten wegen der verschobenen Punktnetze die Säkularvariation nicht direkt berechnet werden kann, sind diese hier nicht mit aufgeführt.

Die so für ganz Europa für acht Epochen erhaltenen acht Datensätze enthalten jeweils etwa 1000 Meßpunkte von magnetischen Vektormessungen. Die genaue Anzahl der Meßpunkte variiert wegen der nicht konstanten einzelnen Meßpunktnetze.

<b>Land red. auf Epoche</b>	Däne- mark	Deutschland		Frank- reich	Groß- britannien	Irland	Italien	Öster- reich	Polen	Schweiz	Spanien	Tschech- ische Republik	Ungarn
		(BRD)	(DDR)										
<b>1957.5</b>	1955.5	1965.0	original	1958.0	1986.5	1959.5	1965.0	1960.0	original	1978.0	1962.5	1970.5	1965.0
<b>1965.5</b>	original	1965.0	1957.5	1965.0	1986.5	1964.5	1965.0	1960.0	1966.5	1978.0	original	1970.5	1965.0
<b>1970.5</b>	original	1965.0	1957.5	1967.5	1986.5	original	1965.0	1970.0	original	1978.0	1965.5	original	1965.0
<b>1975.5</b>	original	1965.0	1985.5	1972.5	1986.5	original	1979.0	1970.0	1970.5	1978.0	original	1974.5	1980.0
<b>1980.5</b>	original	1982.5	1985.5	1977.5	1986.5	original	1979.0	1970.0	original	1978.0	original	original	1980.0
<b>1985.5</b>	1980.5	1982.5	original	1982.5	1986.5	1985.0	1985.0	1970.0	original	1991.0	original	original	1980.0
<b>1990.5</b>	1980.5	1992.5	original	1987.5	1991.5	1985.0	1990.0	1970.0	1989.5	1991.0	original	1991.5	1995.0
<b>1995.5</b>	1980.5	1996.5		1992.5	1994.5	1995.0	1995.0	1970.0	original	1991.0	original	original	1995.0

Tab. 3.2 Übersicht, welche Säkularpunkt- und Landesvermessungsdaten der europäischen Länder zur Reduktion auf die gemeinsamen Epochen verwendet wurden.

<b>Land SV- Intervall</b>	Däne- mark	Deutschland		Frank- reich	Groß- britannien	Irland	Italien	Öster- reich	Polen	Spanien	Tschech- ische Republik	Ungarn
		(BRD)	(DDR)									
<b>57.5-65.5</b>	berechnet	NSV	NSV	berechnet	NSV	berechnet	NSV	NSV	berechnet	berechnet	NSV	NSV
<b>65.5-70.5</b>	berechnet	NSV	NSV	berechnet	NSV	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	NSV	NSV	NSV
<b>70.5-75.5</b>	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	NSV	NSV	berechnet	berechnet	berechnet
<b>75.5-80.5</b>	berechnet	berechnet	NSV	berechnet	NSV	berechnet	NSV	NSV	NSV	berechnet	berechnet	NSV
<b>80.5-85.5</b>	NSV	NSV	NSV	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	berechnet	NSV
<b>85.5-90.5</b>	NSV	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet
<b>90.5-95.5</b>	NSV	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	berechnet	NSV	berechnet	berechnet	berechnet	NSV

Tab. 3.3 Übersicht über die Daten der berechneten Fünfjahresintervalle der Säkularvariation. Wenn Anfangs- und Endjahr eines Intervalls von der gleichen ursprünglichen Messung her reduziert werden mußten, entspricht die dort berechnete Säkularvariation genau der normalen Säkularvariation des Modells. Diese Intervalle sind in der Tabelle mit „NSV“ (Normale Säkularvariation) gekennzeichnet.

### 3.5.3 Berechnung der Säkularvariation

Aus den so reduzierten Werten läßt sich die Säkularvariation für die sieben Intervalle zwischen den Epochen als Differenz der Meßwerte nach folgender Formel berechnen:

$$\text{SVK}(J_1\text{-}J_2) = K(J_2) - K(J_1) \quad (3.4)$$

mit  $\text{SVK}(J_1\text{-}J_2)$  : Säkularvariation der Komponente K von  $J_1$  bis  $J_2$  in nT  
 $K(J_i)$  : Wert der Komponente K im Anfangs- bzw. Endjahr ( $J_1$  bzw.  $J_2$ ) des Intervalls in nT

Die hier und im folgenden verwendete Nomenklatur der Säkularvariationsintervalle soll kurz an einem Beispiel erläutert werden: Säkularvariation oder SV 1985.5 - 1990.5 muß als „1985.5 bis 1990.5“ gelesen werden. Die Säkularvariationswerte wurden aber im Sinne der Werte von 1990.5 minus der Werte von 1985.5 berechnet, um eine Zu- oder Abnahme des Magnetfelds vorzeichengerecht wiederzugeben.

Strenggenommen müßte man die so erhaltenen Beträge noch durch die Anzahl der Jahre teilen, um die eigentliche Säkularvariation als Geschwindigkeit der Änderung in der Einheit nT/Jahr zu erhalten:

$$\text{SVK}(J_1\text{-}J_2) = (K(J_2) - K(J_1)) / (J_2 - J_1) \quad (3.5)$$

mit  $\text{SVK}(J_1\text{-}J_2)$  : Säkularvariation wie oben aber in nT/Jahr

Damit erhält man aber auch nur einen Mittelwert der echten Säkularvariation in diesem Intervall, die wahre Säkularvariation ändert sich von Jahr zu Jahr. Es ist also in gewisser Weise sogar exakter, die Säkularvariation doch nur als Änderung bezogen auf das jeweilige Intervall in der Einheit nT anzugeben. An dem Erscheinungsbild der Isoporen ändert sich dadurch nichts, die Amplituden sind lediglich um den konstanten Faktor 'Anzahl der Jahre' höher.

Da die Säkularvariation für jeden Meßpunkt einzeln als Differenz aufeinanderfolgender Meßwerte berechnet wurde, konnten hierfür nur die jeweils am exakt gleichen Ort gemessenen Werte verwendet werden. Von den slowakischen Landesvermessungswerten wurde diese Anforderung in keinem Fall erfüllt, so daß diese Werte nicht berücksichtigt werden konnten. Das gilt auch für die Schweiz, wo die Meßpunkte im Gelände nicht markiert sind. Für dieses Land gibt es sowieso nur zwei Vermessungen, also nur ein Intervall, für das die Säkularvariation tatsächlich berechnet werden kann. Obwohl diese Tatsache auch für Österreich gilt, wurden die Werte dieses Landes trotzdem verwendet, um keine zu große Lücke in dem gesamten Meßpunktnetz entstehen zu lassen. Für die Tschechische Republik wurden nur die Ergebnisse der Säkularpunktvermessungen verwendet, ebenso wurden für die ehemalige DDR auch von den detaillierteren Landesvermessungen nur die Werte auf den zeitweise als Säkularpunkte genutzten Punkten verwendet.

Für Österreich und Ungarn wurden die Punktnetze ausgedünnt, um nicht durch die im Vergleich zu den anderen Ländern extrem hohe Punktdichte eine zu starke Gewichtung dieser selten vermessenen Länder zu erhalten. Dazu wurden zunächst alle Punkte entfernt, die auf starken Krustenanomalien liegen. Die Anzahl der verbliebenen Punkte wurde durch einen Mindestpunktabstand von etwa 50 km weiter verkleinert. Die Anzahl der Meßpunkte der sieben Säkularvariationsdatensätze liegt damit nur noch bei etwa 300.

In jedem Datensatz sind die Säkularvariationswerte aus den gemessenen Jahresmittelwerten der Observatorien enthalten. Das ausgedünnte Punktnetz ist z. B. in Abb. 5.2 zu sehen. Die gesamte betrachtete Fläche beträgt etwa 7,6 Millionen km<sup>2</sup>, damit ergibt sich ein mittlerer Punktabstand von etwa 160 km.

Bei den folgenden Untersuchungen der so berechneten Säkularvariationsintervalle darf man nicht vergessen, daß die Zeitabstände zwischen aufeinanderfolgenden Messungen einzelner Länder zum Teil soviel größer als 5 Jahre waren, daß die Werte für Anfangs- und Endjahr des Intervalls von der gleichen Vermessung ausgehend reduziert werden mußten (Tab. 3.3). Das bedeutet aber, daß für diese jeweiligen Länder die berechneten Säkularvariationswerte für das Intervall genau der normalen Säkularvariation des zur Reduktion benutzten Modells entsprechen, mögliche Anomalien hier also gar nicht in Erscheinung treten können.

Gleichzeitig können in anderen Fällen Amplituden möglicher Säkularvariationsanomalien durch die Reduktion verfälscht werden.

Besonders deutlich wird dies im Falle Österreichs. Da im gesamten Zeitraum seit 1950 nur zwei Landesvermessungen stattgefunden haben, ergeben sich nur für das Intervall 1965 - 1970 tatsächlich berechnete Säkularvariationswerte. Für alle anderen Intervalle entsprechen die berechneten Säkularvariationswerte an den Meßpunkten dieses Landes genau den normalen Säkularvariationswerten des Modells. Gleichzeitig sind eventuelle Säkularvariationsanomaliewerte von einem Zehnjahreszeitraum (zwischen 1960 und 1970, den Zeitpunkten der tatsächlichen Messungen) auf einen Fünfjahreszeitraum (zwischen 1965 und 1970, das berechnete Fünfjahresintervall) projiziert worden, da zur Reduktion ja nur die normale Säkularvariation des Modells zur Verfügung steht. Die damit berechneten Amplituden möglicher Anomalien wären für das Fünfjahresintervall also doppelt so groß wie die wahren Amplituden.

### **3.5.4 Erster Test der Datenkombination: Modellierung des Magnetfeldes durch einfache Interpolation**

Um zunächst einmal qualitativ zu sehen, wie gut die reduzierten Datensätze der einzelnen Länder zueinander passen, wurden die Daten der verschiedenen Komponenten mit einem kaum glättenden Kriging-Verfahren interpoliert. Abb. 3.6 zeigt die Ergebnisse für die Nord-, Ost- und Vertikalkomponente des geomagnetischen Feldes am Beispiel der drei Epochen 1965.0, 1980.0 und 1995.0.

Für die Bereiche, wo Meßpunkte liegen, ergibt sich eine gute Darstellung des Hauptfeldes mit dem Einfluß einzelner Anomalien. Naturgemäß werden in Gebieten mit höherer Punktdichte mehrere der vorhandenen Krustenanomalien erfaßt und Anomalien kurzer Wellenlänge entsprechend richtiger wiedergegeben. Daß die Anomalien sich bei genauer Betrachtung zum Teil deutlich zu verändern scheinen, kann allein eine Folge der Isoliniendarstellung oder einer Änderung des Punktnetzes durch fehlende oder zusätzliche Meßpunkte sein und soll hier noch nicht weiter beachtet werden. Genauere Untersuchungen zu den Anomalien folgen in Kapitel 4.

An den Grenzen des betrachteten Gebiets sowie an allen Flächen ohne Meßpunkte (Meere, Portugal, ehem. Jugoslawien etc.) sind die Isolinien sehr kritisch zu betrachten. Insbesondere das in allen Komponenten zu beobachtende mehr oder weniger starke Abbiegen oder Abknicken der Isolinien in diesen Bereichen beruht auf Randeffekten des Interpolationsverfahrens, da hier über die Datengrenzen hinaus extrapoliert wird.

Die mittleren Residuen der so interpolierten Daten liegen in der Größenordnung 30 nT in X, 40 nT in Y und 30 nT in Z, wobei sich die einzelnen Werte der drei Epochen kaum unterscheiden. Eine genauere Prüfung der einzelnen Residuen zeigt auch, daß die Werte der einzelnen Punkte jeweils für alle drei Epochen in der gleichen Größenordnung liegen (Abb. 3.7). Dabei liegen die Residuen mit den größten Beträgen überwiegend in den Ländern mit sehr dichtem Meßpunktnetz. Es handelt sich also nicht um Meßfehler, sondern um kurzwellige Anomalien, die durch das gewählte Interpolationsverfahren nicht im richtigen Ausmaß angepaßt werden.

An den Grenzen der einzelnen Länder zueinander gibt es keine Versätze oder Knicke. Damit ist die Kombination der Daten in sinnvoller Weise gelungen, die einzelnen Datensätze passen grundsätzlich und auch nach den durchgeführten Reduktionen zueinander. Die Untersuchung der Residuen der Daten bestätigt dies, die Residuen sind nahe den Landesgrenzen nicht höher als im Inneren der einzelnen Länder (Abb. 3.7).

In der Ostkomponente ist deutlich die Westdrift des Hauptfeldes zu erkennen. Während z. B. die Null-nT-Isolinie 1965.0 durch Polen, die tschechische Republik und Ungarn verläuft, befindet sie sich 30 Jahre später in der Mitte Deutschlands, schon westlich des größten Teils von Italien.

Die Nord- und Vertikalkomponente des Magnetfeldes zeigen keine so starken Änderungen. In der Nordkomponente beobachtet man eine leichte Zunahme von 1965.0 bis 1980.0, 1995.0 hat die Nordkomponente beinahe die gleiche Stärke wie 1980.0. In der Vertikalkomponente ist zwischen allen drei Epochen eine schwache Zunahme zu erkennen.

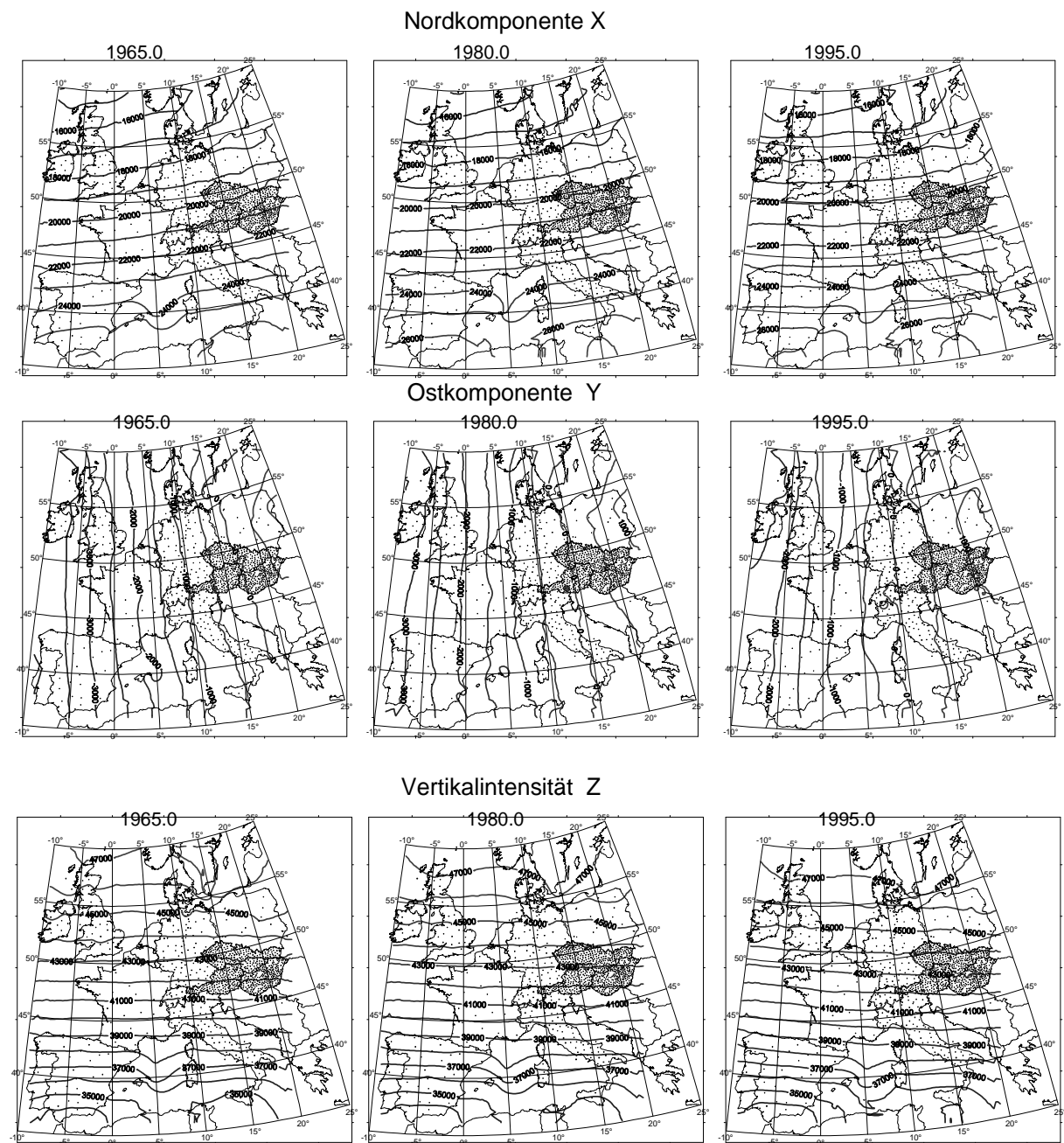


Abb. 3.6 Einfache Interpolation der regionalen Vermessungsdaten: Nord-, Ost- und Vertikalkomponente des Erdmagnetfelds für drei Epochen.

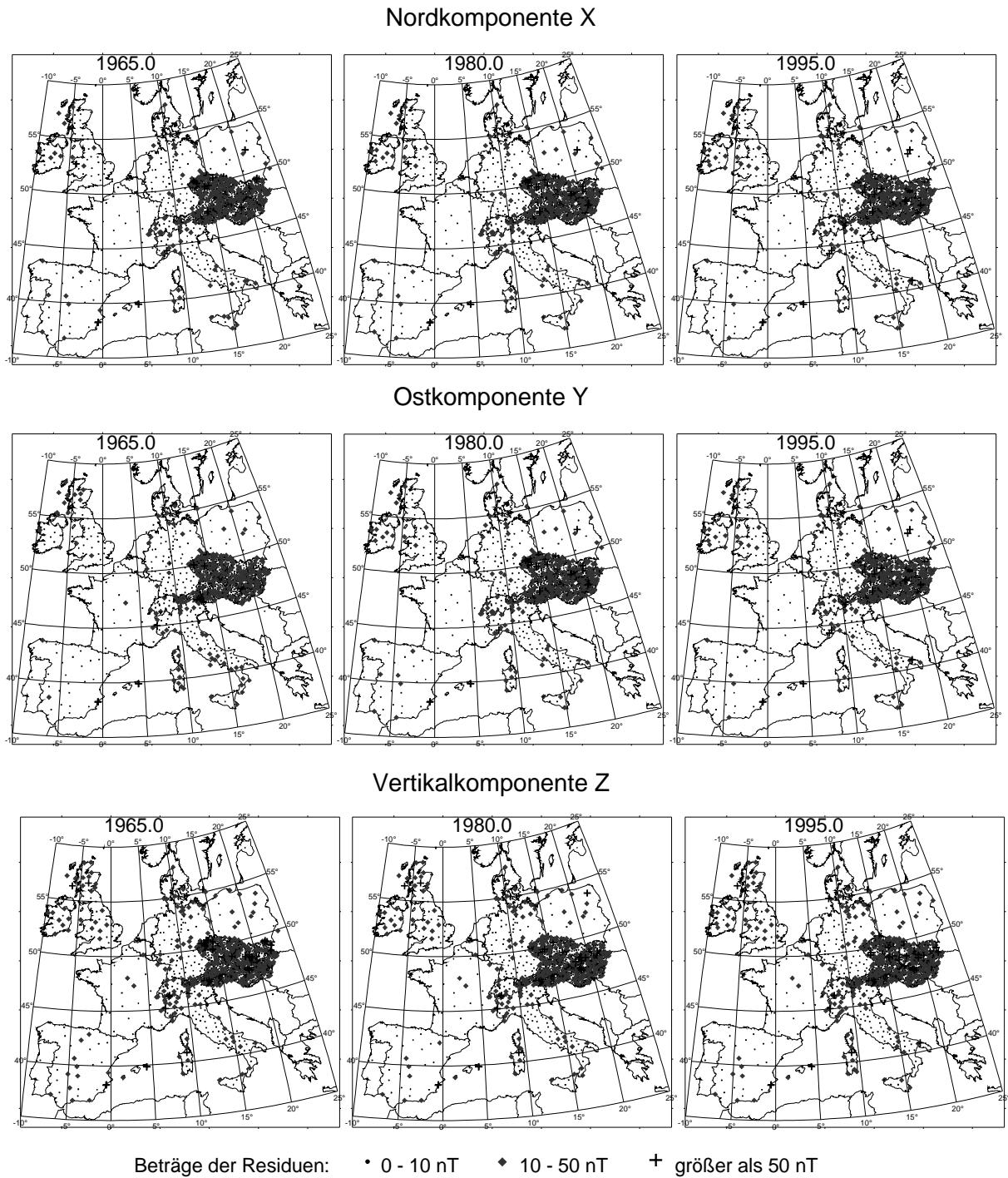


Abb. 3.7 Residuen der Meßwerte zu den interpolierten Feldern der Abb. 3.6. Zum Vergleich im Überblick sind nur die Beträge der Residuen in drei Klassen von Größenordnungen dargestellt.

### 3.6 Ergebnisse dieses Kapitels

In diesem Kapitel wurden die verwendeten Daten vorgestellt und einige Fehlerbetrachtungen angestellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Magnetische Landesvermessungen und Säkularpunkte der europäischen Länder seit 1950 bilden eine sowohl zeitlich als auch räumlich sehr inhomogene Basis für Untersuchungen des Erdmagnetfelds und seiner Säkularvariation.
- Prinzipiell passen die Ergebnisse der einzelnen Länder gut zueinander, es ergeben sich glatte Darstellungen über die Ländergrenzen hinweg.
- Wegen großer zeitlicher Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Landesvermessungen ist eine einheitliche zeitliche Interpolation der Werte aller Länder, z. B. durch Polynome, nicht möglich. Zur Kombination müssen die Ergebnisse der einzelnen Vermessungen daher über ein Modell der normalen Säkularvariation auf gemeinsame Epochen reduziert werden. Die Säkularvariation aus den regionalen Meßwerten für die Intervalle zwischen solchen Epochen wird im folgenden untersucht werden.
- Der magnetische Tagesgang scheint eine bei der Standardauswertung von regionalen Vermessungen oft unterschätzte Fehlerquelle zu sein. Eine Abschätzung des gesamten Reduktionsfehlers ergibt Werte von bis zu  $\pm 20$  nT für einzelne Werte regionaler magnetischer Vermessungen und von bis zu  $\pm 40$  nT für die daraus als Differenz berechnete Säkularvariation. Die für die Säkularvariation sehr großen relativen Fehler müssen bei den folgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

## 4 Magnetische Anomalien aus Landesvermessungen und Säkularpunkten

Bevor die Säkularvariation selbst modelliert wird, werden in diesem Kapitel anhand von einfachen Darstellungsmethoden noch verschiedene Eigenschaften der Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen diskutiert. Dabei sollen insbesondere noch einmal die Bedeutung der Reduktionsfehler und die daraus entstehenden Probleme hervorgehoben werden.

Zunächst wird getestet, wie detailliert magnetische (Krusten-)Anomalien von regionalen Vermessungen erfaßt werden. Durch Darstellungen zu verschiedenen Epochen könnten sich zeitlich ändernde Magnetfeldanomalien aufgezeigt werden. Außerdem soll geprüft werden, ob es einen offensichtlichen Zusammenhang zwischen bekannten (statischen) Magnetfeldanomalien und starken Abweichungen von der normalen Säkularvariation gibt. Dazu wird zunächst versucht, mögliche Säkularvariationsanomalien als Abweichung der berechneten gegenüber der normalen Säkularvariation mit einfachen Interpolationsmethoden nachzuweisen. Die Reduktionsfehler stellen hier ein großes Hindernis dar.

### 4.1 Anomaliekarten der Kombination regionaler magnetischer Vermessungen

Wie in Kap. 3.5 bereits festgestellt wurde, eignen sich Landesvermessungsdaten und insbesondere Säkularpunktsdaten nur sehr bedingt zur direkten Darstellung magnetischer Anomalien. Die grobmaschigen Netze dieser Vermessungsarten können kleinräumige Krustenanomalien nicht auflösen. Im günstigsten Fall liegen die Meßpunkte in ungestörtem Gelände, so daß dazwischenliegende Anomalien einfach gar nicht erfaßt werden. Tatsächlich liegt aber zumindest ein Teil der Meßpunkte doch mehr oder weniger auf Anomalien, was zu räumlichen Aliasing-Effekten führt. Diese verzerren die Darstellung um so stärker, je größer der Meßpunktabstand ist. Ein Beispiel möge dies verdeutlichen: Wenn zwei benachbarte Meßpunkte auf zwei getrennten positiven Anomalien liegen, werden diese bei der Interpolation der Daten zu einer Anomalie verbunden, wenn kein Meßpunkt dazwischen liegt, der für den Bereich einen anomaliefreien Wert liefert.

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob es zeitlich sich ändernde magnetische Anomalien gibt oder inwieweit Säkularvariationsanomalien mit magnetischen Anomalien an sich in Zusammenhang stehen.

Obwohl eine richtige kartenmäßige Darstellung der Anomalien für die verschiedenen Zeitpunkte dabei wünschenswert wäre, kommt es darauf zunächst weniger an, als auf die zeitlich konsistente Darstellung. Detaillierte Untersuchungen können folgen, wenn interessierende Gebiete erst einmal grob bestimmt sind.

Für die Epoche 1980.5 wurden zunächst Anomaliekarten der einzelnen Komponenten mit maximal dichtem Punktnetz berechnet. Das abgezogene Normalfeld ist das in Kap. 2.4 beschriebene Polynom-Normalfeld. Die Ausgangsdaten der einzelnen Länder, die mit dem normalen Säkularvariationsmodell (Kap. 2.4) auf die Epoche 1980.5 reduziert wurden, sind:

- Dänemark: Landesvermessung 1975.5 und Säkularpunkte 1980.5
- Deutschland: Landesvermessung der DDR 1957.5 und Säkularpunkte 1985.5,  
Landesvermessungen der Bundesrepublik 1965.0 und 1982.5
- Frankreich: Säkularpunkte 1977.5
- Großbritannien: Säkularpunkte 1986.5
- Irland: Landesvermessung 1980.5
- Italien: Landesvermessung 1979.0
- Österreich: Landesvermessung 1970.0
- Polen: Säkularpunkte 1980.5
- Schweiz: Landesvermessung 1978.0
- Slowakei: Landesvermessung 1985.5
- Spanien: Säkularpunkte 1980.5
- Tschechische Republik: Landesvermessung 1985.5
- Ungarn: Landesvermessung 1980.0



KAPITEL 4: MAGNETISCHE ANOMALIEN AUS LANDESVERMESSUNGEN UND SÄKULARPUNKTEN

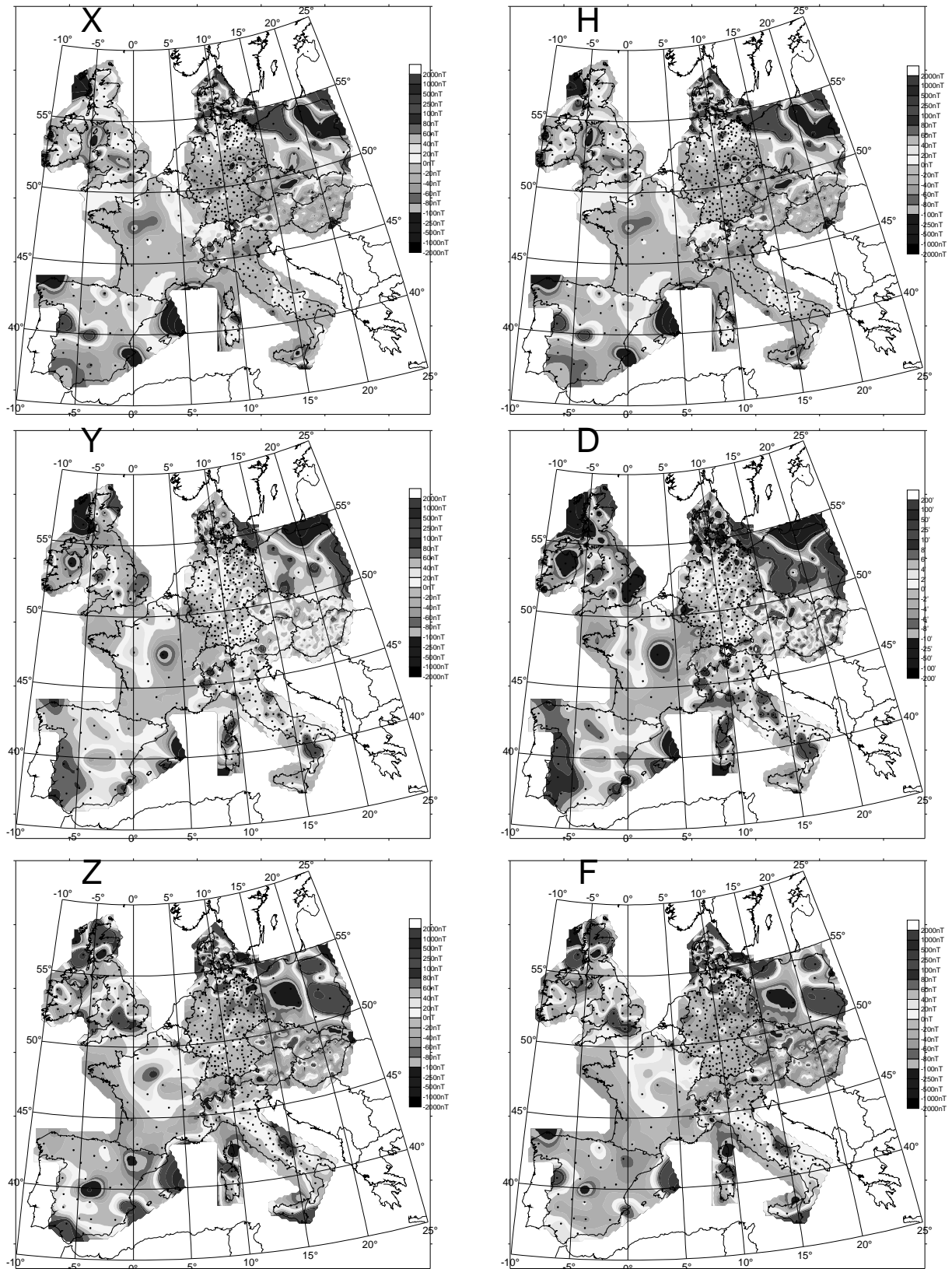


Abb. 4.1 Magnetische Anomalien aus regionalen magnetischen Vermessungen (Säkularpunkte und Landesvermessungen), zum Teil durch zu große Punktabstände stark verzerrt.

Abb. 4.1 zeigt die so erhaltenen Karten für die verschiedenen Komponenten. Schwache bis mittlere Anomalien bis zu einer Amplitude von  $\pm 100$  nT sind in Schritten von 20 nT farblich abgestuft dargestellt, für stärkere Anomalien wurde eine gröbere Abstufung gewählt. Bei Säkularpunkten und grobmaschigen Landesvermessungen sind die Meßpunkte in den Karten verzeichnet, bei den dichten Landesvermessungen mußten sie der Übersichtlichkeit halber weggelassen werden. Erwartungsgemäß erscheinen Anomalien in den Komponenten X und H, Y und D sowie Z und F jeweils sehr ähnlich (vgl. Kap. 1.1).

Zunächst soll anhand einiger Beispiele geprüft werden, inwieweit magnetische Anomalien durch die relativ groben Meßpunktnetze der Landesvermessungen richtig wiedergegeben bzw. überhaupt erfaßt werden können. Im lokalen Maßstab werden magnetische Anomalien detailliert durch aeromagnetische Messungen erfaßt, oder im einzelnen durch genaue Bodenmessungen z. B. mit dem Protonenmagnetometer untersucht. In beiden Fällen wird in der Regel nur die Vertikal- oder die Totalintensität gemessen, so daß magnetische Anomaliekarten nur für eine dieser beiden Komponenten existieren. Ein Vergleich der Karten aus den regionalen Vermessungen mit solchen detaillierten Anomaliekarten zeigt, wie gut die Anomalien in ersteren aufgelöst sind. Die Amplituden der Anomalien dürfen dabei nur größenordnungsmäßig verglichen werden, da sie zum einen etwas von dem abgezogenen Normalfeld abhängen, zum anderen aeromagnetische Karten meist für Höhen von wenigen 1000m über NN kompiliert werden, so daß die Amplituden der Anomalien aufgrund dieser Höhe kleiner als in der auf NN reduzierten Karte der regionalen Vermessungen sein müssen.

#### 4.1.1 Beispiel einer Landesvermessung mit sehr dichtem Punktnetz: Dänemark

Im Rahmen der Europäischen Geotraverse (EGT) wurde eine Anomaliekarte der magnetischen Totalintensität für einen Streifen von Sardinien bis Skandinavien aus aeromagnetischen Messungen im Maßstab 1 : 2 500 000 kompiliert [Wonik et al., 1992]. Die Anomalien sind zur Epoche 1980.0 für 3000 m über NN dargestellt, als Normalfeld diente das DGRF. Abb. 4.2 zeigt eine aus den Originaldaten erzeugte Darstellung dieser magnetischen Anomaliekarte.

Auf dieser Karte ist ganz Dänemark enthalten. Ein Vergleich zeigt, daß die dortigen kurzwelligen Anomalien durch das dichte Meßpunktnetz auf dem dänischen Festland mit guter Genauigkeit durch die Landesvermessung wiedergegeben werden.

Auch die größtenteils langwelligeren Anomalien der Schweiz werden durch das dortige, ähnlich dichte Punktnetz gut dargestellt.

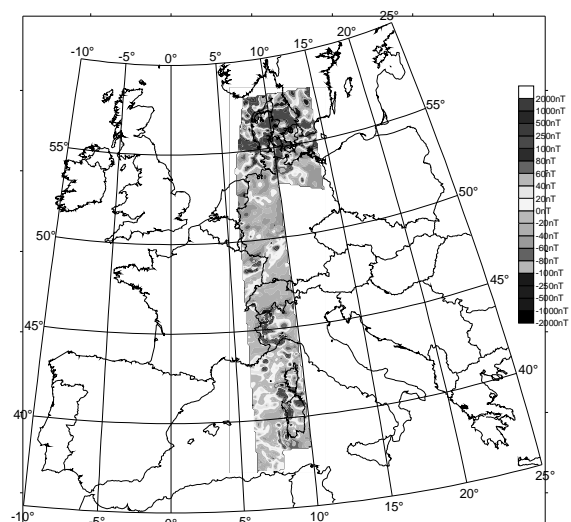


Abb. 4.2 Anomalien der magnetischen Totalintensität F aus Daten der EGT [Wonik et al., 1992].

Österreich, Ungarn sowie die Tschechische und Slowakische Republik weisen ebenfalls ähnlich dichte Meßpunktnetze auf. Die magnetischen Anomalien in diesen Ländern sollten daher ebenfalls durch die Ergebnisse der Landesvermessungen gut dargestellt sein.

#### 4.1.2 Beispiel einer Landesvermessung mit größerem Punktnetz: Deutschland

Wonik und Hahn [1989] kompilierten aus verschiedenen aeromagnetischen Vermessungen eine detaillierte Karte von Anomalien der magnetischen Totalintensität für die damalige Bundesrepublik Deutschland, Luxemburg, die Schweiz und den westlichen Teil Österreichs. Die Karte im Maßstab 1 : 1 000 000 stellt die magnetischen Anomalien in der Höhe 3000 m für die Epoche 1980.0 dar, als Normalfeld wurde das DGRF verwendet.

Schwache Anomalien mit oberflächennaher Ursache finden in dieser Höhe keine Berücksichtigung mehr. Abb. 4.3 zeigt eine vereinfachte Übersicht der Anomaliekarte für die Bundesrepublik mit großtektonischen Linien und Einheiten.

Die langwelligen Anomalien des Nordwestdeutschen Sedimentbeckens von der dänischen Grenze bis etwa 52° Nord sind durch die Landesvermessungen im wesentlichen gut wiedergegeben. Eine in der Originalkarte zu erkennende positive Anomalie etwa parallel zur dänischen Grenze sowie die schwächere, ebenfalls positive Anomalie entlang der Ems sind allerdings nicht erfaßt, auch die schwache positive Anomalie um Oldenburg fehlt, daher sind die negativen Anomalien darum herum zu einer einzigen, größeren deformiert.

Südlich des norddeutschen Sedimentbeckens, im Rhenoherynikum (RH, Abb. 4.3) herrschen schwach negative Anomalien vor, die auch durch die Landesvermessungen gut dargestellt werden. Die zum Teil sehr kleinräumigen positiven Anomalien in diesem Gebiet können kaum aufgelöst werden, lediglich die des Plutons von Erkelenz<sup>3</sup> (51°03' N, 6°13' E) und die der Vulkanite bzw. einer oberflächennahen Basaltdecke in der Eifel (50°24' N, 7°15' E) sind erkennbar.

Die kleinräumigen südwest-nordost-streichenden Anomalien des Saxothuringikums (ST, Abb. 4.3) können von den Landesvermessungen nicht im Einzelnen aufgelöst werden. So stellen sich die positiven Anomalien der Kristallinschwelle (KS, Abb. 4.3) in der Landesvermessung als eine Anomalie dar, wobei die nördlichste der einzelnen Anomalien (ca. 50,1°N, 9,8°E) fehlt. Nur die Anomalie nördlich von Nürnberg (ca. 49,9° N, 11,1°E) wird als einzelnes Maximum aufgelöst (ist aber nur in größerer Darstellung der Abb. 4.1 zu sehen). Der Streifen negativer Anomalien nördlich dieses Bereichs wird durch die Landesvermessungen im wesentlichen richtig dargestellt, abgesehen von der zu großen Ausdehnung im Nordosten, wo eben die eine positive Anomalie fehlt. Auch die ebenfalls positive Anomalie des Vogelsbergbasalts ist nicht durch Landesvermessungswerte erfaßt.

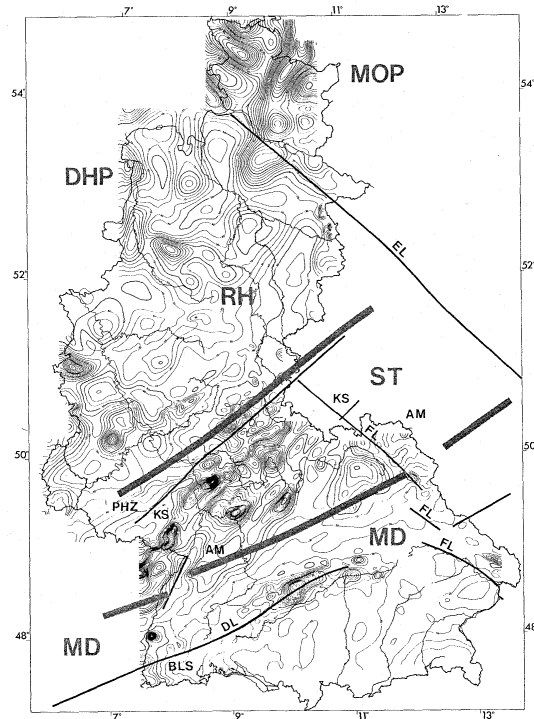


Abb. 4.3 Karte der Anomalien der magnetischen Totalintensität F im Gebiet der früheren Bundesrepublik Deutschland mit großtektonischen Einheiten. [aus Wonik und Hahn, 1989]

Das insgesamt schwach negative Anomaliebild des Moldanubikums (MD, Abb. 4.3) zeigt sich in den Landesvermessungen recht gut, die kleinräumigen positiven Anomalien entlang der Donau werden allerdings überhaupt nicht erfaßt. Die positiven Anomalien der Kaiserstuhl-Vulkanite<sup>3</sup> und des Störkörpers von Kirchzarten im Schwarzwald verbinden sich mit einem Gebiet positiver Anomalien in Frankreich. Die positive Anomalie des Berchtesgaden-Körpers (47°35'N, 13°00' E) ist durch die Landesvermessungswerte gut erfaßt.

Eine ähnliche räumliche Auflösung wird von der Landesvermessung Italiens und den hier verwendeten Werten der Landesvermessung der ehemaligen DDR erreicht<sup>4</sup>.

Insgesamt gilt, daß langwellige Anomalien im wesentlichen gut wiedergegeben werden, während kurzwellige Anomalien häufig deutlich verzerrt sind bzw. ganz fehlen.

<sup>3</sup> Diese und folgende Bezeichnungen nach Wonik und Hahn [1989]. Dort finden sich kurze Interpretationen und weitere Literaturhinweise zu den Ursachen der Anomalien.

<sup>4</sup> Die gesamte Anzahl vermessener Punkte lag in der DDR für 1957.5 insgesamt wesentlich höher

### 4.1.3 Beispiel Säkularpunkte: Frankreich und Polen

Von Frankreich existiert eine Anomaliekarte der magnetischen Totalintensität von 1964/1965 im Maßstab 1 : 1 000 000 [Le Mouél, 1964/1965]. Die Ergebnisse der aeromagnetischen Messungen sind für die Höhe 3000 m dargestellt, als Normalfeld wurde ein regionales quadratisches Polynom verwendet (aufgrund ihrer Größe kann die Karte hier nicht sinnvoll reproduziert werden).

Obwohl die einzelnen Anomaliewerte der Säkularpunkte (Abb. 4.1) in Vorzeichen und größenordnungsmäßig auch in der Amplitude mit den Anomaliewerten der aeromagnetischen Karte übereinstimmen, können die weitverteilten Punkte die allgemein recht kurzwelligen Anomalien in Frankreich nicht richtig wiedergeben. So wird die nordwest-südost streichende schmale Anomalie des Pariser Beckens in der interpolierten Darstellung der Säkularpunkte völlig verzerrt und mit einzelnen positiven Anomalien an der belgischen und deutschen Grenze sowie bei etwa 48,4° N, 3,8° E zusammengezogen. Der Streifen negativer Anomalien dazwischen fehlt, ebenso ein ähnlicher Streifen westlich der Pariser-Becken-Anomalie.

Die negativen Anomalien bei etwa 50°N, 2°E und bei Luxemburg werden auch durch die Säkularpunkte relativ richtig dargestellt. Die negative Anomalie in der Bretagne ist jedoch viel zu groß, tatsächlich liegen hier noch zwei positive Anomalien mit ähnlichen Wellenlängen wie denen der eigentlich vorhandenen zwei negativen Anomalien.

Die langwellige, schwach negative Anomalie im Südwesten ist prinzipiell richtig dargestellt, mehrere überlagerte, kleine, positive Anomalien fehlen ganz. Eine schmale positive Anomalie am Mittelmeer über die spanische Grenze hinweg und eine schwache positive Anomalie bei Andorra werden nicht wiedergegeben, da an den entsprechenden Stellen keine Säkularpunkte liegen.

An der Mittelmeerküste werden praktisch keine Anomalien beobachtet, was auch die Karte der Säkularvariationenwerte in zufriedenstellendem Maße ergibt. Unverständlich ist allerdings die relativ stark negative Anomalie, die durch den Säkularpunkt bei etwa 45° N, 6° E erzeugt wird. In der aeromagnetischen Karte ist an dieser Stelle keine negative Anomalie vorhanden. Daß es sich hier nicht um eine Anomalie, sondern einen Datenfehler handelt, erscheint trotzdem unwahrscheinlich, da sie sich aus den Meßwerten aller anderen Epochen ebenfalls ergibt.

Korsika ist auf der Karte der europäischen Geotraverse [Wonik et al., 1992], Abb. 4.2, enthalten. Die drei Säkularpunkte auf der Insel reichen bei weitem nicht aus, die zum Teil sehr kurzwelligen Anomalien in der Interpolation wiederzugeben. Jeder Punkt einzeln betrachtet weist jedoch einen mit der Detailkarte übereinstimmenden Anomaliewert auf.

Für Polen existiert eine Karte der magnetischen Anomalien der Vertikalintensität im Maßstab 1 : 500 000 für die Epoche 1957.5 [Karaczun et al., 1978]. Das verwendete Normalfeld ist ein regionales Polynom quadratischer Ordnung. Auch diese Karte eignet sich nicht für eine kleinformatige Reproduktion.

Das sehr grobmaschige Netz von Säkularpunkten in Polen kann natürlich ebenfalls keine kurzwelligen Anomalien auflösen (Abb. 4.1). Das gesamte Erscheinungsbild, mit langwelligen positiven Anomalien im Norden und Osten und ebenfalls langwelligen negativen Anomalien in den restlichen Landesteilen steht jedoch in guter Übereinstimmung mit der Detailkarte. Lediglich im Süden ergibt sich auf dieser noch eine langwellige positive Anomalie, die durch die Säkularpunkte nicht wiedergegeben wird. Dieser Unterschied kann aber auch eine Folge der verschiedenen verwendeten Normalfelder sein, insbesondere da dieses Gebiet am Rande des polnischen regionalen Polynoms liegt. Die dieser langwelligen Anomalie überlagerten stärkeren, kurzwelligen Anomalien werden von den Säkularpunkten nicht direkt erfaßt. Die recht großen Amplituden der polnischen Anomalien stimmen mit denen der Detailkarte größenordnungsmäßig überein.

Wie sinnvoll eine Darstellung von Anomalien ist kommt bei grobmaschigen Punktnetzen also sehr auf die Wellenlängen der vorhandenen Anomalien an. Langwellige Anomalien, die nur von wenigen kurzwelligen überlagert werden, können zum Teil erstaunlich richtig dargestellt werden

## 4.2 Vergleich mit Anomalien aus MAGSAT-Daten

Der Satellit MAGSAT lieferte von Oktober 1979 bis Juni 1980 Vektormessungen des Erdmagnetfelds. Von verschiedenen Autoren wurden magnetische Anomaliekarten der Totalintensität für Europa aus den MAGSAT-Daten erstellt [z. B. Nolte und Hahn, 1992, Taylor und Ravat, 1995].

Messungen des Erdmagnetfelds von Satelliten aus können nur großräumige Anomalien erfassen, da die Amplitudenabnahme mit der Höhe wellenlängenabhängig ist. Kurzwellige Anomalien sind in Satellitenhöhe abgeklungen und daher nicht mehr meßbar [z. B. Langel und Hinze, 1998].

Die verschiedenen Karten zeigen ähnliche Strukturen mit einer positiven Anomalie im Nordosten und einer negativen Anomalie im Südwesten, die Grenze zwischen diesen Anomalien variiert jedoch zum Teil erheblich. Abb. 4.4 zeigt die von Taylor und Ravat [1995] für 400 km Höhe produzierte Karte. Die im Vergleich zu dieser Karte detailliertere Anomaliekarte der europäischen regionalen Vermessungen (Abb. 4.1) stimmt gut damit überein, langwellige, starke Anomalien finden sich nur im Nordosten Polens, für weite Teile Mitteleuropas bilden schwach negative Anomalien den Hintergrund für nur kurzwellige, stärkere Anomalien.

Der Westrand der positiven polnischen Anomalien in Abb. 4.1 bzw. die Grenze zwischen der in Satellitenhöhe gemessenen positiven und negativen Anomalie fällt in etwa mit der Tornquist-Teisseyre-Zone zusammen. Diese lineare tektonische Grenze wird als Suture zwischen der paläozoischen Plattform Mitteleuropas und der osteuropäischen präkambrischen Plattform angesehen [Guterch et al., 1986]. Die meisten Interpretationsmodelle gehen von remanenter oder induzierter Magnetisierung geologischer Körper als Ursache der Anomalien aus [z. B. Taylor und Ravat, 1995, Pucher und Wonik, 1996 oder Nolte und Hahn, 1992]. Lindner et al. [1988] stellen dagegen als weitere Möglichkeit auch Modelle vor, die auf elektromagnetischer Induktion in einem elektrisch leitfähigen Körper basieren. Als anregende Ursache wird dabei die Säkularvariation der Ostkomponente mit einer Amplitude von 9000 nT und einer Periode von 450 Jahren angenommen. In diesem Fall wäre eine Zeitabhängigkeit der Anomalien zu erwarten, die sich auch als Säkularvariationsanomalie bemerkbar machen sollte.

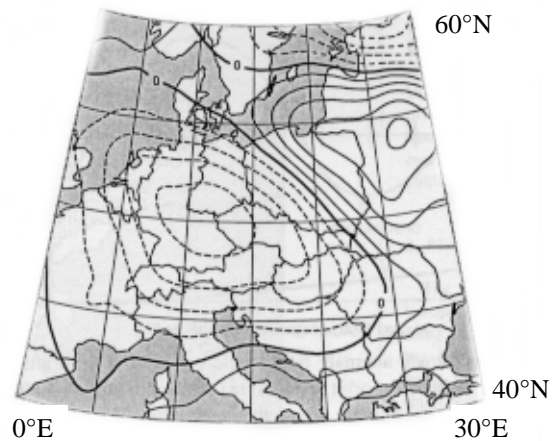


Abb. 4.4 Anomalien der magnetischen Totalintensität in 400 km Höhe aus MAGSAT-Daten, negative Amplituden gestrichelt, positive durchgezogen, Isolinienabstand 2 nT [aus Taylor und Ravat, 1995].

## 4.3 Die magnetischen Anomalien im Meßpunktnetz zu verschiedenen Epochen

Für die Untersuchung der zeitlichen Variationen muß das im vorigen Abschnitt dargestellte Meßpunktnetz der Landesvermessungen und Säkularpunkte wie in Kap. 3.5.3 beschrieben weiter ausgedünnt werden.

Die Abb. 4.5 b zeigt im Vergleich zu den detaillierten Anomaliekarten der Landesvermessung der Abb. 4.1 Anomaliekarten der Komponenten X, Y und Z, wie sie sich aus dem für die folgenden zeitlichen Untersuchungen tatsächlich verwendeten Meßnetz für die gleiche Epoche 1980.5 ergeben. Ein wesentlich gröberes Punktnetz bieten nun die Säkularpunkte Dänemarks und der Tschechischen Republik, deutlich ausgedünnt sind auch die Punkte ganz Deutschlands, Österreichs, Ungarns und der Schweiz. Die slowakischen Punkte wurden bereits weggelassen (vgl. Kap. 3.5.3).

In der Schweiz fallen durch die schlechtere Auflösung nur die kurzwelligen Anomalien weg, der generelle Trend bleibt erhalten. In den anderen genannten Ländern ergeben sich stärkere Verzerrungen.

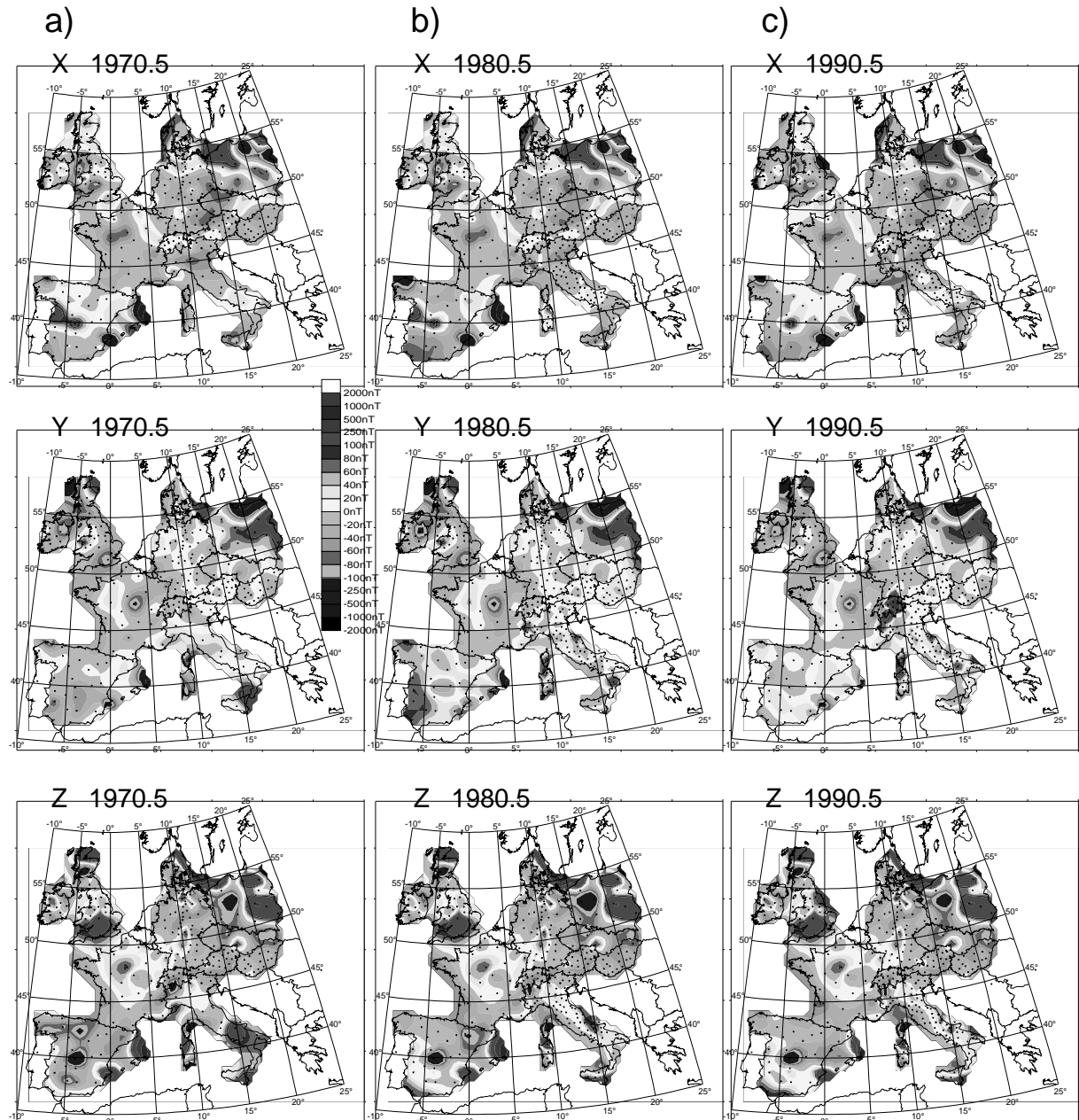


Abb. 4.5 Magnetische Anomalien (zum Teil stark verzerrt) aus Punktnetz der Kombination der regionalen Vermessungen Europas für drei Epochen.

Die Anomalien bleiben trotz der großen Reduktionsfehler in dieser farblich abgestuften Darstellung über die verschiedenen Epochen hinweg weitgehend konstant (Abb. 4.5 a und c; siehe Tab. 3.2 zu den Ausgangsdaten der dargestellten Epochen). Deutliche Änderungen sind meist auf wegfallende oder neu hinzugekommene Meßpunkte zurückzuführen, wie am Beispiel Italien von 1970.5 im Vergleich zu den späteren Jahren gut zu erkennen ist.

Lediglich in Spanien treten signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Epochen auf. In Kap. 4.4 wird deutlich, daß dies kaum auf natürliche Ursachen zurückgeführt werden kann, sondern vermutlich eine Folge sehr großer Reduktionsfehler der Daten ist.



#### 4.4 Säkularvariationsanomalien und Reduktionsfehler

Berechnet man die Säkularvariation als Differenz der Ergebnisse aufeinanderfolgender magnetischer Vermessungen jedes Meßpunktes und subtrahiert von diesen Werten die normale Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den entsprechenden Orten für dieses Intervall, so enthalten die dann an den Punkten noch vorhandenen Residuen einerseits mögliche Säkularvariationsanomaliewerte, andererseits aber auch noch die unverminderten absoluten Reduktionsfehler. Um für die folgende Diskussion einen aussagekräftigen Begriff für diese Residuen verwenden zu können, werden sie im folgenden als Säkularvariationsabweichungen bezeichnet. Es muß betont werden, daß es sich dabei zumindest teilweise nur um Reduktionsfehler und nicht um echte Anomalien handelt. Es wird auch noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es sich bei diesen Werten im Gegensatz zu den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Magnetfeldanomalien um anomale Werte in der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes handelt, die in keinem Zusammenhang mit ersteren zu stehen brauchen.

Die Säkularvariation besitzt sehr lange Perioden und recht kleine Beträge pro Jahr, ihre Ursache liegt tief im Innern der Erde. Zeitlich variable Anomalien, die wirklich auf die Säkularvariation oder dadurch bedingte Induktionseffekte an möglichen Leitfähigkeitsanomalien im Erdmantel zurückzuführen sein könnten, würden daher sicher nur kleine Amplituden von wenigen nT und Ausdehnungen von mindestens einigen hundert Kilometern haben. Jede direkte Darstellung der Säkularvariationsabweichungen wird daher sicher von den Reduktionsfehlern dominiert, die wie in Kap. 3.3.2 gezeigt bis zu 40 nT erreichen können.

In den Kapiteln 5 und 6 wird versucht, mit dem Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis nur die tatsächlichen Säkularvariationseffekte ohne die Reduktionsfehler zu modellieren. Ein Blick auf die gesamten Residuen ist trotzdem instruktiv und kann zur Erklärung einiger der bei der Spherical Cap Harmonic Analysis auftretenden Schwierigkeiten beitragen.

Abb. 4.6, Abb. 4.7 und Abb. 4.8 zeigen eine Kriging-Interpolation der Säkularvariationsabweichungen der europäischen Datenkombination für die sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 der Nord-, Ost- und Vertikalkomponente. Die verwendete Farbskala ist nicht linear. Bereiche mit Abweichungen von -1 bis +1 nT sind grau dargestellt. Wenn dies auf ganze Länder (evtl. mit Ausnahme der Observatorien) zutrifft, weisen diese Länder meist wegen der nötigen Reduktion die normale Säkularvariation des europäischen Modells auf (siehe Kap. 3.5.3 und Tab. 3.3), die Säkularvariationsabweichungen sind also zwangsläufig Null. Dies trifft z. B. für das erste Intervall von 1965.5-1970.5 unter anderem für Spanien, Italien und Deutschland zu. Bis zu Beträgen von

$\pm 10$  nT ist die Farbskala in Schritten von 2 nT abgestuft, darüber in gröberen Schritten.

In einzelnen Ländern treten deutlich größere Säkularvariationsabweichungen auf als in anderen. Obwohl z. B. in Spanien ebenso Säkularpunkte vermessen werden, wie in Frankreich, sind die spanischen Abweichungswerte zum Großteil höher als die französischen. Diese deutlichen Unterschiede zwischen einzelnen Ländern erkennt man noch besser in einer Darstellung wie Abb. 4.9, Abb. 4.10 und Abb. 4.11. Die Säkularvariationsabweichungen wurden hier als Balkendiagramm für jeden Punkt mit sechs Balken der sechs Säkularvariationsintervalle aufgetragen. Die ersten 33 Punkte sind die Observatorien, dann folgen die regionalen Vermessungspunkte der einzelnen Länder. Es zeigt sich, daß die Fehler der Daten von Land zu Land je nach Meß- und Reduktionsmethode sehr unterschiedlich sind. Die Observatorien zeigen erwartungsgemäß die geringsten Säkularvariationsabweichungen bzw. Fehler, es werden in allen drei Komponenten kaum mehr als  $\pm 10$  nT erreicht. Die französischen, polnischen, dänischen und tschechischen Säkularpunkte zeigen bis auf wenige Ausnahmen Werte bis maximal  $\pm 20$  nT in X und  $\pm 30$  nT in Y und Z und liegen damit in der Größenordnung der geschätzten Reduktionsfehler. Von ähnlicher Größenordnung sind die Werte der wenigen allen Landesvermessungen der ehemaligen Bundesrepublik Deutschland gemeinsamen Punkte. Die irischen und britischen<sup>5</sup> Säkularpunkte sowie die der ehemaligen DDR erreichen teilweise höhere Werte bis zu  $\pm 50$  nT. Die wenigen allen Landesvermessungen gemeinsamen Punkte Italiens sowie die ausgewählten Punkte der ungarischen Landesvermessungen zeigen sehr unterschiedliche Werte. Unverständlich groß sind die Werte der spanischen Säkularpunkte in allen Komponenten für viele der Intervalle.

<sup>5</sup> vgl. dazu Kap. 3.5.1, die britischen Werte waren als einzige nicht von vornherein auf Jahresmittel reduziert



## Nordkomponente X

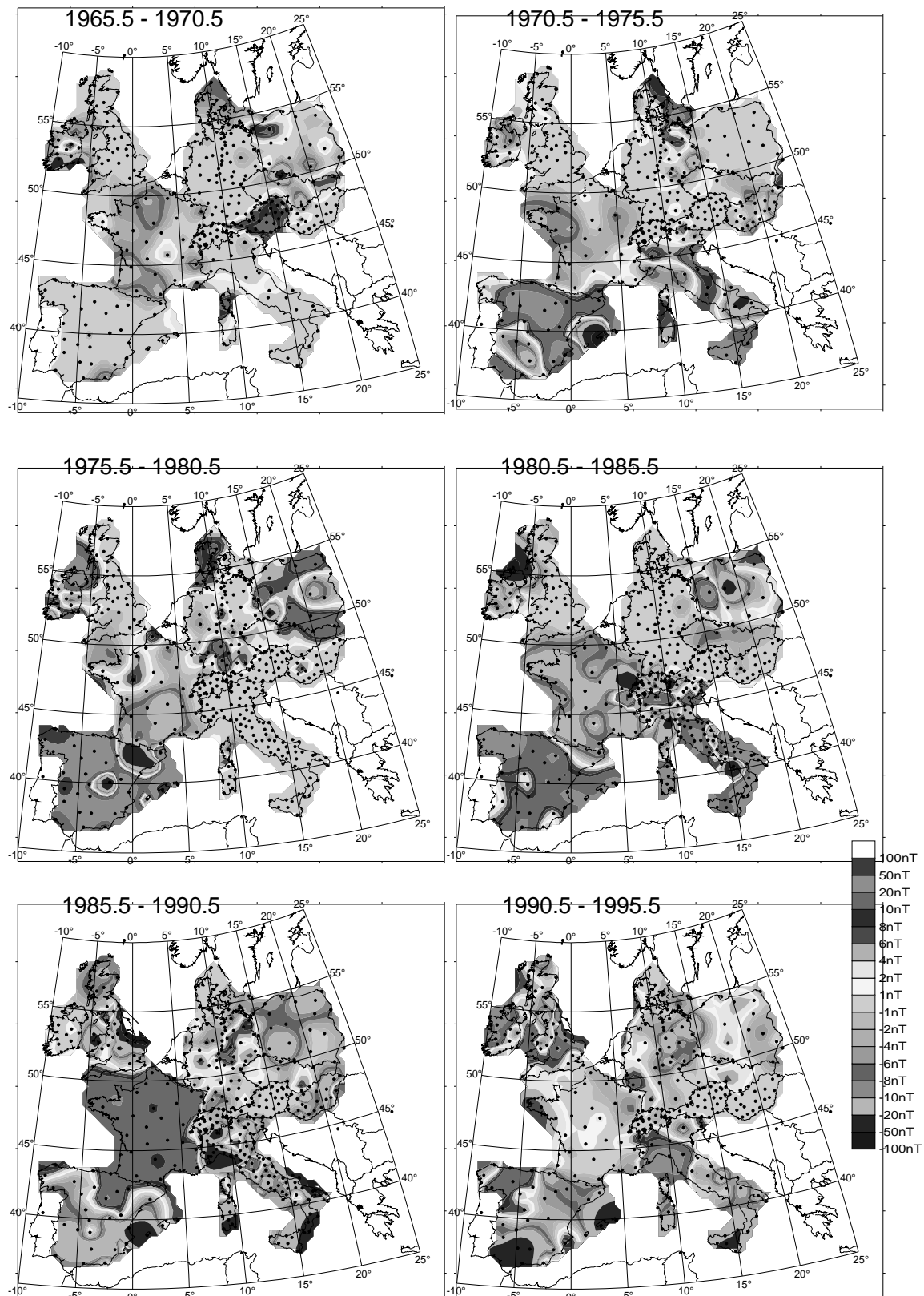


Abb. 4.6 Residuen zwischen Säkularvariationswerten als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Nordkomponente.

## Ostkomponente Y

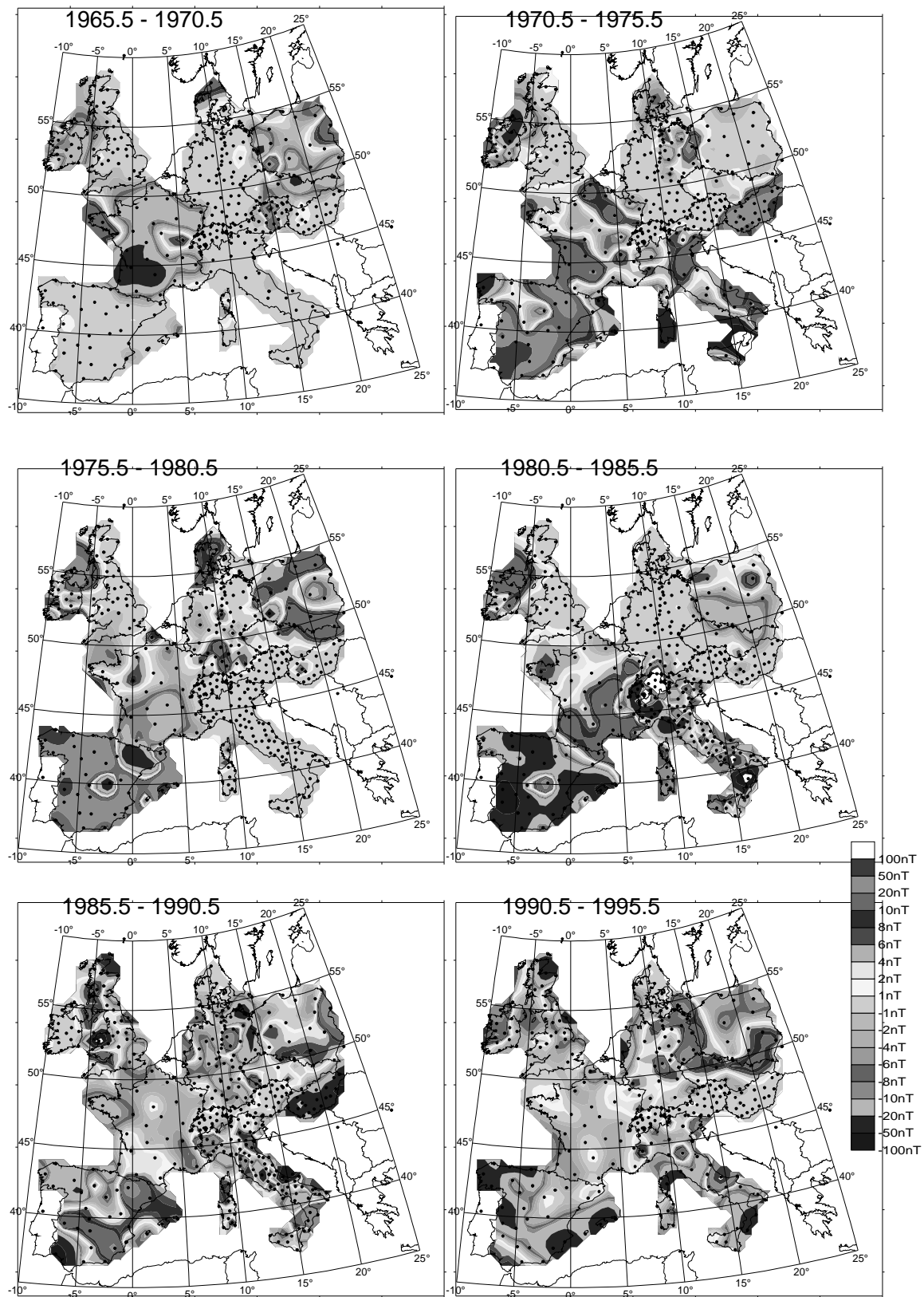


Abb. 4.7 Residuen zwischen Säkularvariationswerten als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Ostkomponente.

## Vertikalkomponente Z

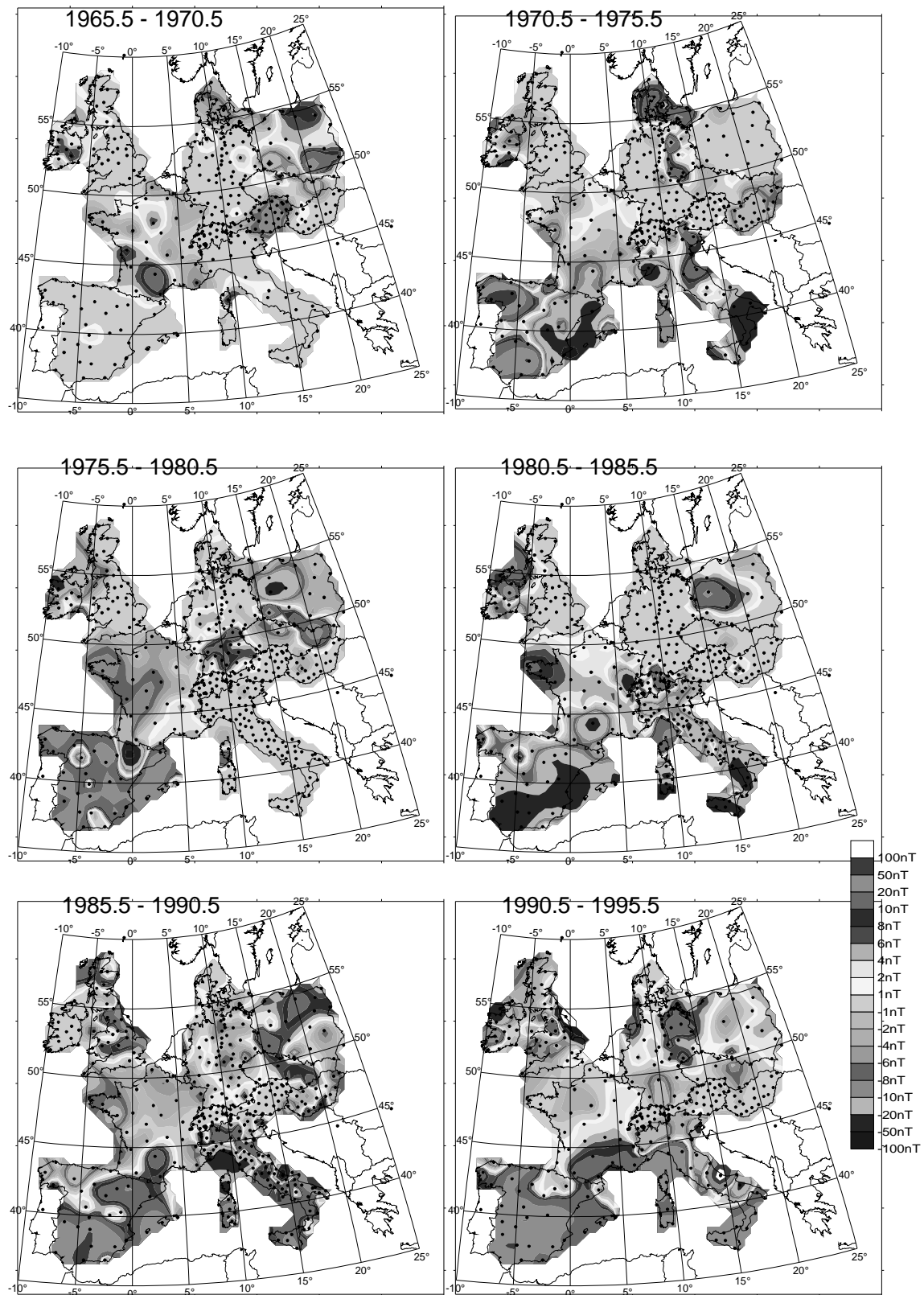


Abb. 4.8 Residuen zwischen Säkularvariationswerten als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Vertikalkomponente.

Zu Abb. 4.9 bis Abb. 4.11: Die Balken stellen die Werte der Säkularvariationsabweichungen im jeweiligen Zeitintervall dar.

- SV 1965.5 - 1970.5
- SV 1970.5 - 1975.5
- SV 1975.5 - 1980.5
- SV 1980.5 - 1985.5
- SV 1985.5 - 1990.5
- SV 1990.5 - 1995.5

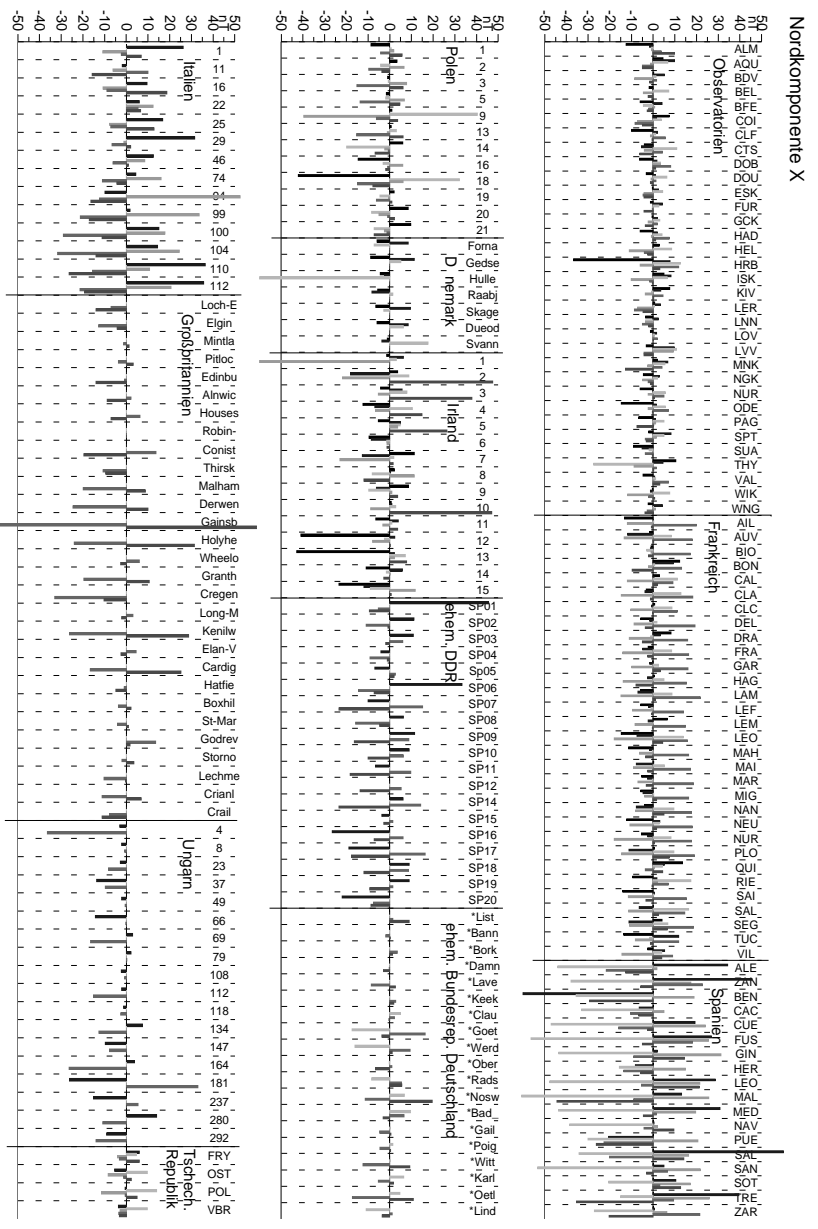


Abb. 4.9 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Nordkomponente.

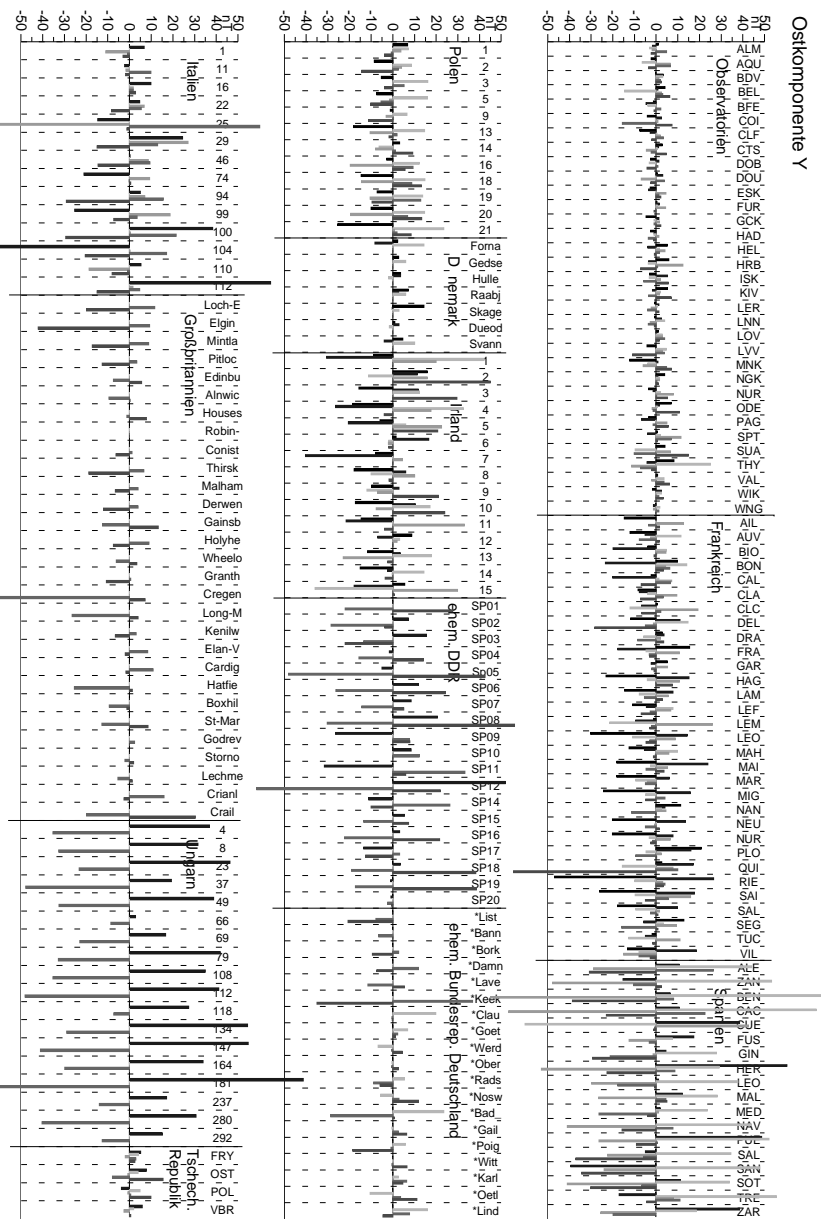


Abb. 4.10 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Ostkomponente.

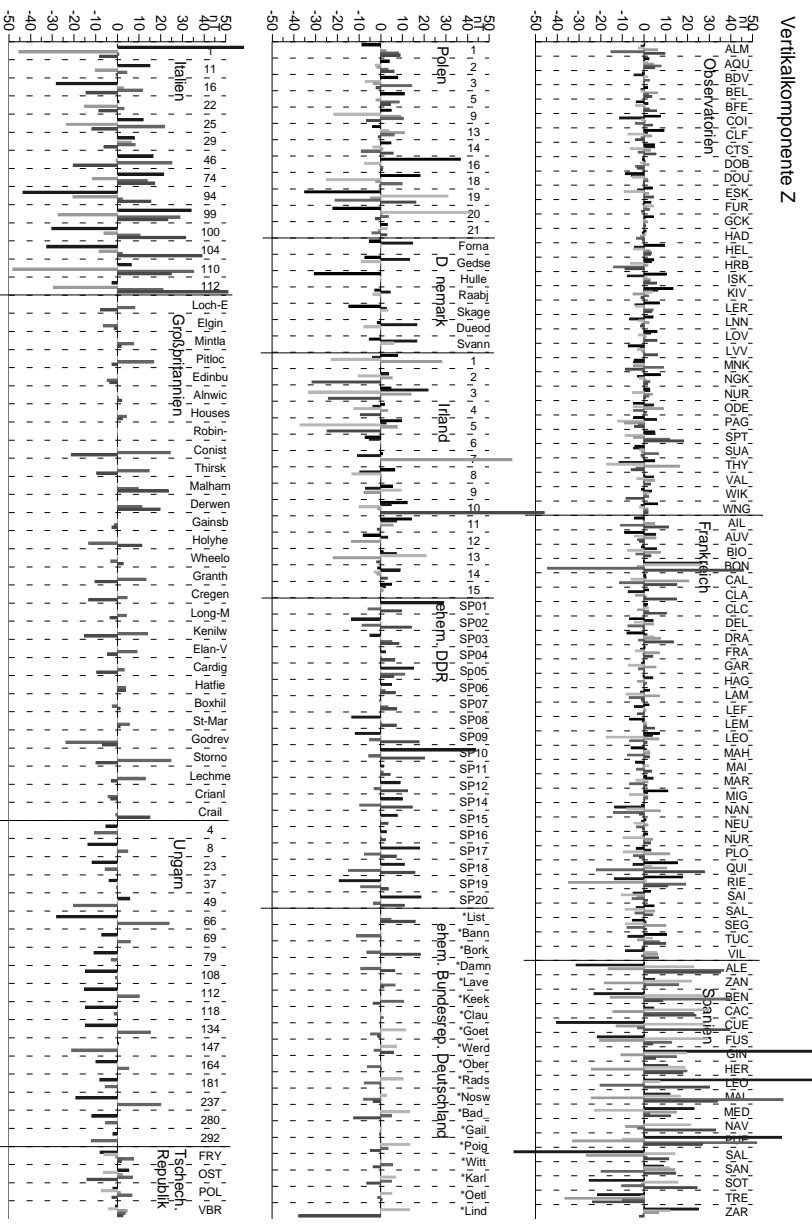


Abb. 4.11 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Vertikalkomponente.

Es gibt einige Beispiele, daß die Säkularvariationsabweichungen in zwei aufeinanderfolgenden Intervallen etwa gleiche Amplituden mit entgegengesetztem Vorzeichen aufweisen. Besonders deutlich ist dies z. B. in weiten Teilen Spaniens in den Intervallen 1975.5 - 1980.5 und 1980.5 - 1985.5 in der Ost- und Vertikalkomponente (Abb. 4.7 und Abb. 4.8 bzw. Abb. 4.10 und Abb. 4.11), oder in Frankreich in der Nordkomponente in den Intervallen 1980.5 - 1985.5 und 1985.5 - 1990.5 (Abb. 4.6 bzw. Abb. 4.9). Wenn alle Werte eines Landes von so einem Effekt betroffen sind, ist die wahrscheinlichste Ursache, daß der zur Reduktion der einzelnen Daten verwendete Observatoriums-Jahresmittelwert der mittleren Epoche zu groß bzw. zu klein war. Dementsprechend sind dann die berechneten „Jahresmittelwerte“ aller Säkularpunkte zu groß bzw. zu klein und daher ist die berechnete Säkularvariation als Änderung gegenüber den korrekten Jahresmittelwerten der vorhergehenden und nachfolgenden Epoche einmal zu groß und einmal zu klein. Die Jahresmittelwerte der Observatorien sollten in der Regel zuverlässiger sein, aber angesichts der absoluten Beträge von mehreren 1000 nT der Komponenten kann ein Fehler von 10 bis 20 nT schon einmal auftreten.

In keiner Komponente sind irgendwelche Säkularvariationsabweichungen zu erkennen, die über mehrere Intervalle bestehen bleiben oder die sich nur langsam und systematisch mit der Zeit ändern, wie es von echten Säkularvariationsanomalien zu erwarten wäre. Die Darstellungen werden so stark von den größtenteils kleinräumigen Effekten der Reduktionsfehler dominiert, daß ein Nachweis von Anomalien so nicht möglich ist. Keinesfalls darf dieses Ergebnis als Nachweis gewertet werden, daß es in diesem Gebiet keine echten Säkularvariationsanomalien gibt. In Kap. 6.3 wird versucht, durch die Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis mögliche echte Anomalien von den Reduktionsfehlern zu trennen.

Im Vergleich mit den Magnetfeldanomalien der Abb. 4.5 ist in keiner der Komponenten ein Zusammenhang von Säkularvariationsabweichungen großer Amplituden bzw. großen Reduktionsfehlern mit Anomalien des Magnetfelds an sich zu erkennen.

### 4.5 Ergebnisse dieses Kapitels

In diesem Kapitel wurden einfache Interpolationsmethoden zur Darstellung von magnetischen Anomalien und zum Nachweis möglicher Säkularvariationsanomalien getestet. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Darstellbarkeit von Magnetfeldanomalien hängt sehr von der räumlichen Auflösung der regionalen Vermessungen ab. Landesvermessungen mit dichtem bis mittlerem Meßpunktnetz können langwellige Anomalien recht gut wiedergegeben. Kurzwellige Anomalien sind häufig verzerrt oder fehlen ganz. Die Darstellung von (statischen) Anomalien durch Säkularpunktvermessungen ist wegen dem großen Punktabstand wenig sinnvoll.
- Zeitlich variable Anomalien und echte Säkularvariationsanomalien lassen sich wegen der großen Reduktionsfehler mit einfachen Verfahren nicht nachweisen. Im folgenden wird daher das Verfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis zur Unterdrückung der Fehler bei der Modellierung der Säkularvariation und ihrer möglichen Anomalien getestet.
- Ein Zusammenhang von großen Abweichungen von der normalen Säkularvariation, die im wesentlichen wohl als große Reduktionsfehler zu interpretieren sind, und (statischen) Anomalien des Erdmagnetfelds ist nicht erkennbar.

## 5 Spherical Cap Harmonic Analysis

Das Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis sollte gut zur Modellierung der Säkularvariation und möglicher Anomalien aus der Kombination der regionalen Vermessungsdaten geeignet sein. In diesem Kapitel wird die Methode beschrieben und es werden die Möglichkeiten und Grenzen speziell für die Datenkombination getestet.

### 5.1 Grundlage: Kugelfunktionsanalyse

Bereits 1838 entwickelte Carl Friedrich Gauß ein mathematisches Verfahren, mit dem sich nicht nur das Erdmagnetfeld unter Berücksichtigung der Potentialbedingungen modellieren läßt, sondern auch eine Trennung des Feldes in interne und externe Anteile ermöglicht wird, die Kugelfunktionsanalyse. Sie gehört heute zu den Standardverfahren in der Hauptfeldmodellierung und findet sich in allen gängigen Lehrbüchern der Geophysik und speziell des Erdmagnetismus [z. B. Kertz, 1969; Jacobs, 1987].

In SI-Einheiten und unter der Annahme, daß kein magnetisches Material vorhanden ist, lauten zwei der Maxwellgleichungen:

$$\text{rot } \mathbf{B} = \lambda_0 \mathbf{J} \quad (5.1)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (5.2)$$

Da die Stromdichte  $\mathbf{J}$  zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre sicher vernachlässigbar ist, ist das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  in diesem Bereich quellen- und wirbelfrei und damit als negativer Gradient eines Potentials  $\Phi$ , für das die Laplace-Gleichung (5.4) gilt, darstellbar:

$$\mathbf{B} = -\text{grad}\Phi \quad (5.3)$$

$$\Delta\Phi = 0 \quad (5.4)$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung läßt sich als Reihenentwicklung folgendermaßen schreiben:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta, \lambda) = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \{ [g_n^{m,i} \cos(m\lambda) + h_n^{m,i} \sin(m\lambda)] \left(\frac{R_E}{r}\right)^{n+1} \\ + [g_n^{m,e} \cos(m\lambda) + h_n^{m,e} \sin(m\lambda)] \left(\frac{r}{R_E}\right)^n \} P_n^m(\cos\theta) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Die  $P_n^m$  sind die Legendreschen Kugelfunktionen. Auf die Erde bezogen sind  $r$ ,  $\theta$  und  $\lambda$  die geozentrischen Koordinaten Radius, Cobreite ( $90^\circ$  - Breite) und geographische Länge,  $R_E$  ist der mittlere Erdradius. Die  $g_n^m$  und  $h_n^m$  sind die Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklung. Für  $n = 1$  sind die  $g$  und  $h$  die Koeffizienten des Dipolfelds.

Für Punkte zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre läßt sich das Potential in einen internen Anteil ( $\Phi_i$ ) mit Quellen im Innern der Erde und einen externen Anteil ( $\Phi_e$ ) mit Quellen in Ionosphäre und Magnetosphäre trennen:

$$\Phi_i = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n+1} [g_n^{m,i} \cos(m\lambda) + h_n^{m,i} \sin(m\lambda)] P_n^m(\cos\theta) \quad (5.6)$$

$$\Phi_e = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{r}{R_E} \right)^n [g_n^{m,e} \cos(m\lambda) + h_n^{m,e} \sin(m\lambda)] P_n^m(\cos\theta) \quad (5.7)$$

$$\text{mit} \quad \Phi = \Phi_i + \Phi_e$$

Durch Differentiation des Potentials erhält man die Komponenten des Erdmagnetfelds in geozentrischen Koordinaten an der Erdoberfläche  $r=R_E$ :

$$B_\theta = - \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right]_{r=R_E} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n - [(g_n^{m,i} + g_n^{m,e}) \cos(m\lambda) + (h_n^{m,i} + h_n^{m,e}) \sin(m\lambda)] \frac{dP_n^m \cos \theta}{d\theta} \quad (5.8)$$

$$B_\lambda = - \left[ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right]_{r=R_E} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(g_n^{m,i} + g_n^{m,e}) \sin(m\lambda) - (h_n^{m,i} + h_n^{m,e}) \cos(m\lambda)] \frac{m P_n^m \cos \theta}{\sin \theta} \quad (5.9)$$

$$B_r = - \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right]_{r=R_E} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) [(g_n^{m,i} - \frac{n}{n+1} g_n^{m,e}) \cos(m\lambda) + (h_n^{m,i} - \frac{n}{n+1} h_n^{m,e}) \sin(m\lambda)] P_n^m \cos \theta \quad (5.10)$$

Geozentrische und geodätische Länge sind gleich, die Breiten jedoch nicht. Daher berechnen sich die gewohnten Magnetfeldkomponenten X, Y und Z im geodätischen Koordinatensystem mit Hilfe des Winkels  $\Psi$  (siehe z. B. Baldwin und Langel [1993]) zwischen geozentrischer und geodätischer Breite zu

$$X = - B_\theta \cos \Psi - B_r \sin \Psi \quad (5.11)$$

$$Y = B_\lambda \quad (5.12)$$

$$Z = B_\theta \sin \Psi - B_r \cos \Psi \quad (5.13)$$

Umgekehrt lassen sich aus den in Abhängigkeit von  $\theta$  und  $\varphi$  auf der ganzen Erdoberfläche gemessenen Komponenten X, Y und Z die Koeffizienten  $g^i, h^i, g^e$  und  $h^e$  über Regressionsverfahren einzeln bestimmen. So ist eine Zerlegung des gemessenen Feldes in innere und äußere Anteile möglich. Diese eindeutige Trennbarkeit in interne und externe Feldanteile nur aufgrund von Messungen an der Erdoberfläche beruht darauf, daß die Symmetrie des Feldes, also das Verhältnis von Tangential- (X und Y) zu Radialkomponente (Z), sich für interne und externe Quellen gleicher Ordnung n unterscheidet.

Die Kugelfunktionsanalyse dient zur Untersuchung des Magnetfeldes der gesamten Erde, z. B. wird das IGRF (Kap. 2.1) nach dieser Methode bestimmt. Für regionale Studien ist das Verfahren ungeeignet, da die Verteilung der Feldkomponenten auf der ganzen Erdkugel bekannt sein muß.



## 5.2 Anwendung der Methode auf eine Kugelkappe: Spherical Cap Harmonic Analysis

Gerry Haines entwickelte Mitte der 80er Jahre eine Möglichkeit, das Verfahren der Kugelfunktionsanalyse durch Verwendung etwas anderer Basisfunktionen auf eine beliebige Kugelkappe mit halbem Öffnungswinkel  $\theta_0$  anzuwenden. In Analogie zur Kugelfunktionsanalyse, auf englisch Spherical Harmonic Analysis (SHA), wird dieses Verfahren als Spherical Cap Harmonic Analysis (SCHA) bezeichnet. Der folgende Überblick über die Spherical Cap Harmonic Analysis stützt sich auf Haines [1985a und 1988].

Die Randbedingungen in  $\lambda$  zur Bestimmung der Basisfunktionen sind für eine Kugelkappe, bei der sämtliche Werte für  $\lambda$  vorkommen, die gleichen wie für die ganze Kugel, es muß gelten:

$$\Phi_n^m(r, \theta, \lambda) = \Phi_n^m(r, \theta, \lambda + 2\pi) \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial \Phi_n^m(r, \theta, \lambda)}{\partial \lambda} = \frac{\partial \Phi_n^m(r, \theta, \lambda + 2\pi)}{\partial \lambda} \quad (5.15)$$

Durch diese Bedingungen wird  $m$  auf reelle, ganzzahlige Werte eingeschränkt und es muß  $h_n^0 = 0$  sein.

Die Randbedingungen in  $\theta$  zur Bestimmung der Basisfunktionen für die ganze Kugel sind für  $\theta = 0$  und  $\theta = \pi$

$$\frac{\partial \Phi_n^m(r, 0, \lambda)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial \Phi_n^m(r, \pi, \lambda)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{für } m = 0 \quad (5.16)$$

$$\Phi_n^m(r, 0, \lambda) = 0 \quad \text{und} \quad \Phi_n^m(r, \pi, \lambda) = 0 \quad \text{für } m \neq 0 \quad (5.17)$$

Damit ist das Potential an der Stelle  $\theta = 0$  und  $\theta = \pi$  unabhängig von der Breite  $\lambda$ . Wegen der jeweils zweiten Bedingung werden die Legendrefunktionen bei der gewöhnlichen Kugelfunktionsanalyse auf diejenigen mit ganzzahligem  $n$  eingeschränkt.

Für eine Kugelkappe gelten obige Randbedingungen für  $\theta = 0$  ebenso, für den Rand der Kugelkappe mit  $\theta = \theta_0$  kann das Potential jedoch eine beliebige, von  $r$  und  $\lambda$  abhängige Funktion sein:

$$\Phi_n^m(r, \theta_0, \lambda) = f(r, \lambda) \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \Phi_n^m(r, \theta_0, \lambda)}{\partial \theta} = g(r, \lambda) \quad (5.19)$$

Haines [1985] zeigt, daß diese Bedingungen erfüllt sind, wenn die Werte für  $n$  so gewählt werden, daß für alle  $m$  gilt:

$$\frac{\partial \Phi_n^m(r, \theta_0, \lambda)}{\partial \theta} = 0 \quad (5.20)$$

$$\Phi_n^m(r, \theta_0, \lambda) = 0 \quad (5.21)$$

Da die  $\Phi_n^m$  und  $\partial \Phi_n^m / \partial \theta$  nicht gleichzeitig Null sein können, ermöglicht (5.20) die Bedingung (5.18) und (5.21) die Bedingung (5.19). Die Bedingungen (5.20) und (5.21) werden von Legendrefunktionen  $P_n^m(\cos \theta)$  mit reellem, aber nicht unbedingt ganzzahligem  $n$  erfüllt. Die möglichen Werte für  $n$  hängen jeweils von den Werten von  $m$  ab. Um sie zu ordnen, werden die in der Regel nicht ganzzahligen  $n$  mit einem ganzzahligen Index  $k$  versehen und als  $n_k(m)$  bezeichnet, wobei der Index  $k$  analog zur Kugelfunktionsanalyse mit ganzzahligem  $n$  bei  $m$  anfängt. Mit dieser Definition sind für die  $n_k(m)$ , für die die Differenz  $(k-m)$  ein geradzahliges Ergebnis liefert, die Bedingungen (5.20) erfüllt, und für die mit ungeradzahligem Differenz  $(k-m)$  die von (5.21). Es werden also zwei Sätze von Basisfunktionen, die  $P_{n_k}^m(\cos \theta)$  mit geradzahligem Differenz  $(k-m)$  und die  $P_{n_k}^m(\cos \theta)$  mit ungeradzahligem Differenz  $(k-m)$ , benötigt. Abb. 5.1 zeigt beispielhaft einen Vergleich einiger Basisfunktionen für die normale Kugelfunktionsanalyse und die Spherical Cap Harmonic Analysis.

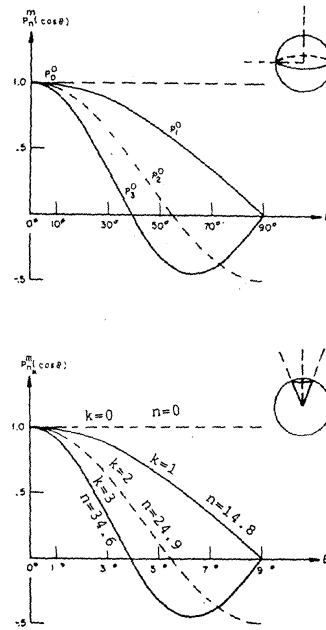


Abb. 5.1 Legendrefunktionen für die Kugel (oben) und eine Kugelkappe (Bsp.  $\theta_0 = 9^\circ$ , unten). Gestrichelt: Funktionen mit  $(n-m)$  bzw.  $(k-m)$  geradzahlig; Durchgezogen: Funktionen mit  $(n-m)$  bzw.  $(k-m)$  ungeradzahlig. [aus De Santis, 1991]

In Analogie zu Formel (5.5) für die gewöhnlichen Kugelfunktionsanalyse ergibt sich die allgemeine Lösung der Laplace-Gleichung als bei  $k_{\max}$  abgebrochene Reihenentwicklung damit zu:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta, \lambda) = R_E \sum_{k=0}^{k_{\max}^i} \sum_{m=0}^k \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n_k(m)+1} [g_k^{m,i} \cos(m\lambda) + h_k^{m,i} \sin(m\lambda)] P_{n_k(m)}^m(\cos \theta) + \\ + R_E \sum_{k=1}^{k_{\max}^e} \sum_{m=0}^k \left( \frac{r}{R_E} \right)^{n_k(m)} [g_k^{m,e} \cos(m\lambda) + h_k^{m,e} \sin(m\lambda)] P_{n_k(m)}^m(\cos \theta) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Ebenso ergeben sich hier durch Differentiation des Potentials die geozentrische Nord-, Ost- und Vertikalkomponente als:

$$\begin{aligned} B_N = \sum_{k=1}^{k_{\max}^i} \sum_{m=0}^k \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n_k(m)+2} [g_k^{m,i} \cos(m\lambda) + h_k^{m,i} \sin(m\lambda)] \frac{dP_{n_k(m)}^m(\cos \theta)}{d\theta} \\ + \sum_{k=1}^{k_{\max}^e} \sum_{m=0}^k \left( \frac{r}{R_E} \right)^{n_k(m)-1} [g_k^{m,e} \cos(m\lambda) + h_k^{m,e} \sin(m\lambda)] \frac{dP_{n_k(m)}^m(\cos \theta)}{d\theta} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$B_Y = \sum_{k=1}^{k_{\max}^i} \sum_{m=1}^k \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n_k(m)+2} [g_k^{m,i} \sin(m\lambda) - h_k^{m,i} \cos(m\lambda)] \frac{m P_{n_k(m)}^m(\cos \theta)}{\sin \theta}$$

$$+ \sum_{k=1}^{k_{\max}^e} \sum_{m=1}^k \left( \frac{r}{R_E} \right)^{n_k(m)-1} [g_k^{m,e} \sin(m\lambda) - h_k^{m,e} \cos(m\lambda)] \frac{m P_{n_k(m)}^m(\cos\theta)}{\sin\theta} \quad (5.24)$$

$$B_Z = \sum_{k=0}^{k_{\max}^i} \sum_{m=0}^k -(n_k(m)+1) \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n_k(m)+2} [g_k^{m,i} \cos(m\lambda) + h_k^{m,i} \sin(m\lambda)] P_{n_k(m)}^m(\cos\theta) \\ + \sum_{k=1}^{k_{\max}^e} \sum_{m=0}^k n_k(m) \left( \frac{r}{R_E} \right)^{n_k(m)-1} [g_k^{m,e} \cos(m\lambda) + h_k^{m,e} \sin(m\lambda)] P_{n_k(m)}^m(\cos\theta) \quad (5.25)$$

Die Spherical Cap Harmonic Analysis läßt sich durch Drehung des Koordinatensystems auf jedes beliebige Gebiet (in Form einer Kugelkappe) auf der Erdoberfläche anwenden. Der Mittelpunkt dieser Kugelkappe entspricht dann  $\theta = 0$ , der Rand wird durch den halben Öffnungswinkel  $\theta_0$  bestimmt.

In der Praxis müssen zunächst die entsprechenden  $n_k(m)$  für die Basisfunktionen zu dem gewünschten halben Öffnungswinkel gefunden werden. Nach der entsprechenden Koordinatentransformation können für die über die Kugelkappe verteilten tatsächliche Meßwerte von X, Y und Z die Koeffizienten der Reihenentwicklung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden. Daraus können nun wieder die Komponenten des so berechneten Modellpotentials abgeleitet werden, wobei auch hier eine Trennung von externen und internen Anteilen möglich ist. Zur Durchführung dieser Aufgaben wurden im folgenden die von Haines [1988] veröffentlichten Computerprogramme verwendet.

Bei der Bestimmung der Koeffizienten durch Regression ist es sinnvoll, einen Test der Koeffizienten auf statistische Signifikanz durchzuführen und nichtsignifikante Koeffizienten aus dem Modell herauszunehmen um insbesondere bei ungleichmäßiger Datenverteilung die Stabilität der Modelle zu gewährleisten und Randeffekte klein zu halten [De Santis, 1991]. Haines verwendet dazu die Methode, nur Koeffizienten zu berücksichtigen, deren absoluter Wert größer als  $\sqrt{F}$  mal der Standardabweichung ist. Als sinnvolle Werte werden  $F=3$  bis  $F=4$  vorgeschlagen. [Haines, 1988, Haines und Torta, 1994]. Für alle folgenden Datenanalysen durch Spherical Cap Harmonic Analysis wurde  $F = 3.5$  gesetzt.

Die Wahl der maximalen Ordnung  $k_{\max}$  bestimmt in Zusammenhang mit dem Öffnungswinkel der Kugelkappe die minimal in dem Modell vorkommenden Wellenlängen  $\omega_{\min}$ , je kleiner  $k_{\max}$  desto länger die Wellenlänge  $\omega_{\min}$  bei gleicher Kugelkappe. Zur Abschätzung dient folgende Formel mit  $\omega_{\min}$  in Grad [Haines, 1988]:

$$k_{\max} \approx \frac{\theta_0}{90^\circ} \left( \frac{360^\circ}{\omega_{\min}} + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \quad (5.26)$$

### 5.3 Anwendung der Spherical Cap Harmonic Analysis auf Säkularvariationswerte

Die Potentialeigenschaften des Magnetfeldes gelten auch für die Säkularvariation als Differenz der Felder zweier Epochen, daher läßt sich die Spherical Cap Harmonic Analysis auch direkt auf Säkularvariationswerte anwenden. Wenn die Meßwerte der einzelnen Epochen noch Einflüsse von externen Variationen enthalten, besitzt auch das Potential der Änderung neben dem eigentlichen Säkularvariationspotential einen externen Anteil.

Ohne Verwendung der Absolutwerte des Magnetfeldes lassen sich über die Spherical Cap Harmonic Analysis nur die direkt ableitbaren Komponenten X, Y und Z modellieren. Die Kenntnis der Säkularvariation dieser Komponenten allein, ohne Verwendung von Absolutwerten, genügt nicht, um die Säkularvariation der restlichen zur Darstellung des Magnetfeldes häufig verwendeten Komponenten zu berechnen. Der Grund ist, daß X, Y und Z Komponenten mit fester Richtung in bezug auf die Erde sind, während H und F über die Winkel D und I ihre Richtungen in Bezug auf die Erde mit der Änderung des Magnetfeldes ändern.

Im folgenden wird daher nur die Säkularvariation der Komponenten X, Y und Z dargestellt<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Es handelt sich um linear unabhängige Komponenten. Das Vektorfeld der Säkularvariation läßt sich damit vollständig beschreiben.

## 5.4 Test der Spherical Cap Harmonic Analysis für die Säkularvariation aus der Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen Europas

### 5.4.1 Variation des Öffnungswinkels der Kugelkappe

Torta et al. [1992] weisen auf die Schwierigkeit hin, Felder langer Wellenlängen durch eine Reihe harmonischer Funktionen kürzerer Wellenlänge zu approximieren. Mit einer unendlichen Reihe höherer Harmonischer können längerperiodische Anteile beliebig genau angepaßt werden, mit einer endlichen Reihe nicht. Für die Modellierung kleiner Regionen kommen Torta et al. [1992] zu dem Schluß, daß durch eine Vergrößerung des Öffnungswinkels der Kugelkappe deutlich über die Datengrenzen hinaus bessere Resultate erzielt werden können, obwohl dadurch die Basisfunktionen der Spherical Cap Harmonic Analysis für den kleineren Ausschnitt, der die Daten enthält, nicht mehr orthogonal sind. Die Kurve der mittleren Residuen der Anpassung (rms-Werte) gegen den halben Öffnungswinkel aufgetragen ergibt bei einem bestimmten Öffnungswinkel einen deutlichen Knick zu einer Verkleinerung der rms-Werte. Dies kann als Kriterium für einen minimal besten Öffnungswinkel der Kugelkappe angesehen werden.

Die Punkte der Kombination der regionalen magnetischen Vermessungen Europas verteilen sich gut auf einer Kugelkappe von halbem Öffnungswinkel  $14^\circ$  mit Mittelpunkt  $47^\circ\text{N}$ ,  $5^\circ\text{E}$  (Abb. 5.2). Es zeigt sich, daß für diese Daten durch Vergrößerung des Öffnungswinkels der Kugelkappe keine Verbesserung der Anpassung erzielt wird, wie Abb. 5.3 an zwei Beispielen mit unterschiedlich großen Anpassungsresiduen demonstriert. Es wurden jeweils die Koeffizienten bis zu maximaler (externer und interner) Ordnung  $k_{\text{max}} = 5$  für halbe Öffnungswinkel  $\theta_0$  von  $14^\circ$  bis  $65^\circ$  bestimmt. Die rms-Werte behalten bei Änderung des Öffnungswinkels ihre Größenordnung bei. Dies gilt auch für höhere oder niedrigere maximale Ordnungen der Reihenentwicklung.

Bei der Modellierung ergeben sich geringfügige Unterschiede. Der Grund für die Unterschiede liegt sicher darin, daß unterschiedliche Öffnungswinkel der Kugelkappe bei fester maximaler Ordnung unterschiedliche Wellenlängen der Basisfunktionen bedeuten. Insbesondere treten unterschiedliche Randeffekte auf, ohne daß jedoch ein Öffnungswinkel mit den kleinsten Randeffekten für verschiedene maximale Ordnungen der Reihenentwicklung und für die verschiedenen Intervalle bestimmt werden könnte.

Die folgenden Untersuchungen wurden daher mit dem für die Datenverteilung kleinstmöglichen halben Öffnungswinkel von  $14^\circ$  durchgeführt.

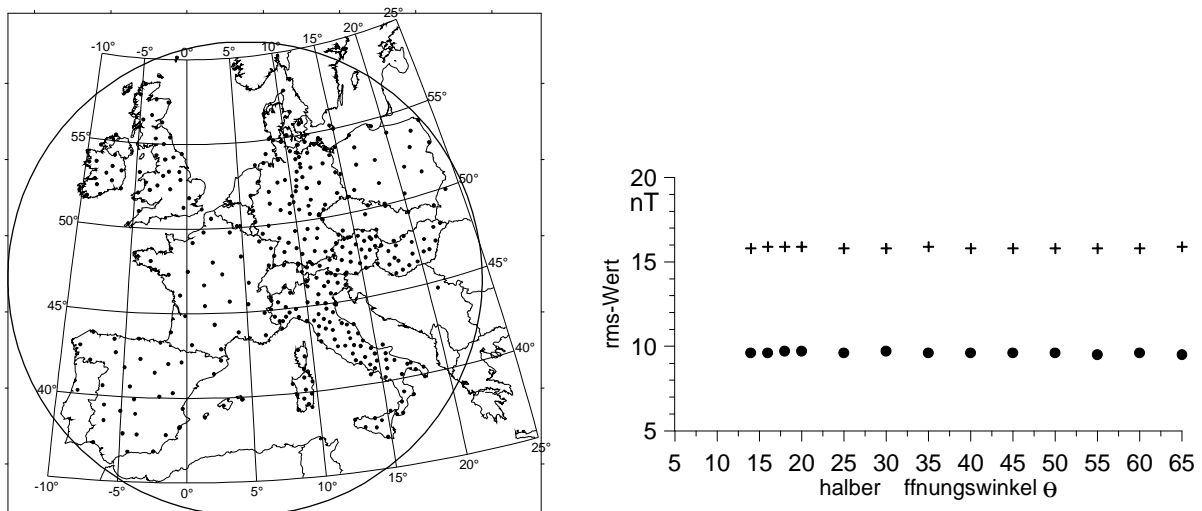


Abb. 5.2 Rand der Kugelkappe mit halbem Öffnungswinkel  $14^\circ$ , Mittelpunkt  $47^\circ\text{N}$ ,  $5^\circ\text{E}$  und Punktnetz der Kombination regionaler magnetischer Vermessungen Europas.

Abb. 5.3 Mittlere Anpassungsfehler (rms-Werte) für verschiedene halbe Öffnungswinkel der SCHA. Punkte SV 1980.5 - 1985.5, Kreuze SV 1985.5 - 1990.5

## 5.4.2 Einfluß von (normalverteilten) Fehlern auf Spherical Cap Harmonic Analysis

Die großen Reduktionsfehler der Daten (Kap. 3.3.2) machen Überlegungen nötig, inwieweit sich diese auf die Ergebnisse einer Spherical Cap Harmonic Analysis auswirken um abschätzen zu können, wie groß die Gefahr ist, scheinbare Anomalien zu modellieren, die tatsächlich nur Artefakte der Methode aufgrund der Datenfehler sind.

Abb. 5.4 zeigt an einem Beispiel, daß die Spherical Cap Harmonic Analysis stabil gegenüber normalverteilten Fehlern ist. Als Ausgangsdaten dienten die fehlerfreien Potentialdaten, die sich an den europäischen Meßpunkten aus dem SCHA-Modell der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 mit halbem Öffnungswinkel  $14^\circ$  und maximaler Ordnung 5 ergaben. Diese Daten wurden in den einzelnen Komponenten mit normalverteilten Fehlern behaftet, wobei die Standardabweichung der Fehler für X mit  $\pm 13$  nT, für Y und Z mit  $\pm 10$  nT angenommen wurde und damit der Größenordnung der auftretenden Reduktionsfehler entspricht. In Abb. 5.4 b) sind die Auswirkungen dieser Fehler bei einfacher Interpolation im Vergleich zu den ebenso interpolierten fehlerfreien Ausgangswerten der Abb. 5.4 a) deutlich zu erkennen. Abb. 5.4 c) und d) zeigen die Ergebnisse der Spherical Cap Harmonic Analysis der fehlerfreien bzw. der fehlerbehafteten Werte. Die Abbildungen sehen sich nicht nur sehr ähnlich, bei genauerer Untersuchung erhält man als Differenz zwischen den Modellen Werte von höchstens  $\pm 2$  nT, abgesehen von Randeffekten an den äußeren, von Meßpunkten nicht abgedeckten Grenzen der betrachteten Fläche, die Differenzen von  $\pm 10$  nT erreichen können. Auch wenn man die fehlerbehafteten Daten mit Spherical Cap Harmonics bis zu höherer Ordnung analysiert, treten nur sehr vereinzelt Koeffizienten der in den Ausgangsdaten nicht vorhandenen höheren Ordnungen auf. Die Differenzen zwischen solchen Modellen und dem Ausgangsmodell zeigen kleinräumigere Strukturen, deren Amplituden aber ebenfalls  $\pm 2$  nT nicht übersteigen und daher im anschaulichen Vergleich der Modelle kaum erkennbar sind.

Der mittlere Anpassungsfehler (rms-Wert) der Spherical Cap Harmonic Analysis liegt für die fehlerfreien Daten bei  $0,03$  nT, für die fehlerbehafteten Daten bei  $9,8$  nT, also wie erwünscht in der Größenordnung der Standardabweichung der Fehler.

Es ist allerdings zweifelhaft, ob die in Kapitel 3.3 beschriebenen Fehler der Daten normalverteilt sind, da es sich zum Teil um systematische Fehler handelt. Die Einflüsse der externen Variationen bilden z. B. kein einheitliches externes Potential für die reduzierten Jahresmittelwerte, folgen aber für jeden einzelnen Punkt aus einem externen Potential und sind damit nicht unabhängig für die einzelnen Komponenten. Je nach verwendeter Reduktionsmethode der einzelnen Länder und den Zeitpunkten der einzelnen Messungen können die Fehler auch einen systematischen Anteil nach geographischer Lage besitzen und in benachbarten Ländern sehr unterschiedlich groß sein (vgl. Kap. 4.4).

Trotzdem läßt die Stabilität der Spherical Cap Harmonic Analysis auch gegenüber relativ großen Datenfehlern hoffen, daß keine Artefakte zu erwarten sind.

## 5.4.3 Trennung in externen und internen Anteil

Im Idealfall sollten Werte regionaler magnetischer Vermessungen durch die Reduktion mit Observatoriumsregistrierungen auf Jahresmittelwerte frei von externen Einflüssen sein und nur das interne magnetische Feld repräsentieren. Die Frage nach einer Trennung in externe und interne Anteile wäre damit überflüssig.

Es ist allerdings bekannt, daß auch die Jahresmittelwerte der Observatorien nicht völlig frei von Einflüssen externer Variationen sind [z. B. Courtillot und Le Mouel, 1976], insbesondere der etwa elfjährige Sonnenfleckenzyklus macht sich bemerkbar. Hinzu kommen die bei den Reduktionsfehlern (Kap. 3.3.2) diskutierten externen Einflüsse, die jedoch, da jeder Punkt an einem anderen Tag vermessen wird, bei den auf Jahresmittelwerte reduzierten Ergebnissen sicher kein großräumig einheitliches externes Potential bilden. Diese Anteile sollten idealerweise weder die externen noch die internen Koeffizienten der Spherical Cap Harmonic

Analysis beeinflussen, sondern als Datenfehler wie in 5.4.2 beschrieben als Residuen der Anpassung übrigbleiben.

Wenn eine Darstellung des reinen internen Anteils richtig sein soll, muß auch der zugehörige externe Anteil physikalisch sinnvoll sein. Das ist bei der Spherical Cap Harmonic Analysis für die Säkularvariationenwerte jedoch nicht der Fall.



Abb. 5.4 Einfluß von normalverteilten Fehlern bei SCHA (siehe Text).  
a) Reines Potentialfeld, Kriging-Interpolation der Meßpunkte;

- b) Werte des Potentialfelds mit Fehlern behaftet, Kriging-Interpolation der Meßpunkte;
  - c) SCHA-Modell der fehlerfreien Werte;
  - d) SCHA-Modell der fehlerbehafteten Werte;
- Dargestellt sind jeweils die Komponenten X, Y und Z in der Einheit nT.

Bei dem Versuch einer Trennung erreichen die Amplituden des externen Anteils vor allem in der Ost- und Vertikalkomponente bis zu 20 nT pro Jahr. Die Variationen mit dem Sonnenfleckenzyklus haben insgesamt nur mittlere Amplituden von 20 nT in den ca. 11 Jahren, also nur etwa 2 nT pro Jahr, daher erscheinen die auftretenden Amplituden unrealistisch groß.

Die räumliche Verteilung des aus der Spherical Cap Harmonic Analysis ermittelten externen Anteils weist in der Nord- und Vertikalkomponente eine Nulllinie etwa in der Mitte des betrachteten Gebietes auf, mit zunehmenden Beträgen zu den Seiten (Abb. 5.5). Dieses Erscheinungsbild ist kaum mit der Vorstellung der anregenden Stromsysteme der externen Variationen zu vereinbaren.

Das stärkste Argument gegen die Trennung in externen und internen Anteil ergibt sich, wenn man die zeitliche Änderung der externen Anteile für die einzelnen Fünfjahresintervalle betrachtet. In der Vertikalintensität bleibt die grundlegende räumliche Verteilung mit negativen Amplituden im Osten und positiven im Westen wie in dem Beispiel der Abb. 5.5 über den gesamten Zeitraum von 1957 bis 1995 erhalten. In der Ostkomponente ergeben sich für den gesamten Bereich für alle Zeitintervalle nur positive Werte. Das würde einer ständigen Ab- bzw. Zunahme eines externen Anteils über den gesamten Zeitraum entsprechen, was den Erkenntnissen über externe Variationen mit zeitlichem Mittel Null und dem Sonnenfleckenzyklus als wahrscheinlich längster Periode völlig widerspricht.

Wenn die externen Koeffizienten bei der Trennung zu große Anteile liefern, sind zwangsläufig die gleichzeitig bestimmten internen Anteile zu klein. Eine sinnvolle Modellierung ergibt sich daher nur über das gesamte Potential.

Die Gründe für das Versagen der Trennung sollen hier nicht weiter untersucht werden. Die Ursache kann einerseits ein Problem der Methode selbst und ihrer Basisfunktionen sein. Für die Spherical Cap Harmonic Analysis werden zwei Sätze von orthogonalen Basisfunktionen benötigt (vgl. 5.2), die Funktionen des einen Satzes sind aber nicht orthogonal zu denen des anderen. Dies kann zu Problemen bei der Matrix-Inversion der Methode der kleinsten Fehlerquadrate führen [Torta, 1992, De Santis, 1991].

Man könnte vermuten, daß auch die Tatsache, daß die nötigen Reduktionen der hier verwendeten Daten komponentenweise, also ohne Beachtung der Potentialbedingungen vorgenommen wurden, ein Problem darstellen. Daß das nicht der Fall zu sein scheint, wird in Kap. 5.4.5 gezeigt.

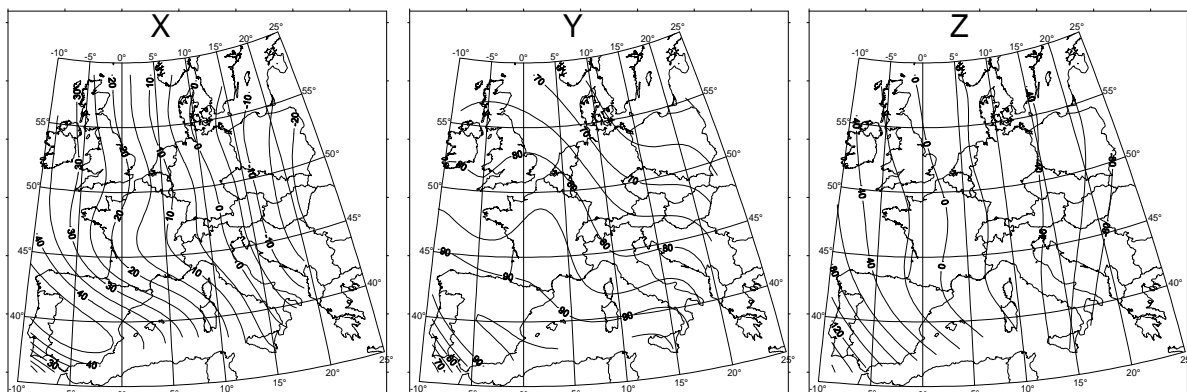


Abb. 5.5 Ergebnisse der Modellierung der externen Koeffizienten beim Versuch der Trennung von externen und internen Anteilen der als Differenz von regionalen Vermessungen bestimmten Säkularvariation am Beispiel des Zeitintervalls 1980.5 - 1985.5 (SCHA mit  $k_{\max}(\text{int}) = k_{\max}(\text{ext}) = 5$ ,  $\theta_0 = 14^\circ$ ). Die Einheiten sind nT pro fünf Jahre.





### 5.4.4 Variation der maximalen Ordnung der Spherical Cap Harmonic Analysis

Bei der Suche nach Anomalien der Säkularvariation erscheint es sinnvoll, bei der Spherical Cap Harmonic Analysis Koeffizienten bis zu relativ hohen Ordnungen zu berücksichtigen, um eventuelle Anomalien kurzer Wellenlänge modellieren zu können. Mit „kurzen Wellenlängen“ sind in dem Fall Ausdehnungen von wenigen 100 km gemeint. Tab. 5.1 gibt einen Überblick, welche minimalen Wellenlängen sich nach Formel (5.26) für eine Kugelkappe mit halbem Öffnungswinkel  $14^\circ$  für verschiedene maximale Ordnungen ergeben.

Bei der Modellierung der Säkularvariationsdatensätze stellt sich heraus, daß die Modelle für hohe Ordnungen sehr instabil sind, wie Abb. 5.7 an einem Beispiel zeigt. Auch abgesehen von den sehr starken Randeffekten treten bei hohen Ordnungen durchaus kleinräumige Schlenker der Isoporen auf, die als Anomalien angesehen werden könnten. Diese variieren jedoch je nach gewählter maximaler Ordnung des Modells so stark, daß eine genaue Lage oder Amplitude nicht bestimmt werden kann. Die Anpassung der Modelle ist für maximale Ordnungen  $k_{max}$  von 10 bis 3 durchgehend gleich gut (Abb. 5.6), sie kann daher nicht als Kriterium zur Festlegung eines besten Modells verwendet werden.

Ein weiteres Kriterium könnte die Anzahl der auftretenden signifikanten Koeffizienten sein. Die Anzahl  $N$  der möglichen Koeffizienten der Spherical Cap Harmonic Analysis ergibt sich bei Verwendung interner und externer Koeffizienten der maximalen Ordnung  $k_{max}$  für Datensätze einzelner Zeitpunkte nach folgender Formel [Haines, 1985b]:

$$N = 2 \cdot (k_{max} + 1)^2 - 1 \tag{5.27}$$

Obwohl die Anzahl der möglichen Koeffizienten also mit steigender Ordnung stark zunimmt, ändert sich die Anzahl der als signifikant bestimmten Koeffizienten (Kap. 5.2) nur geringfügig. In Tab. 5.1 sind die Anzahl der möglichen Koeffizienten  $N$  und die Anzahl der signifikanten Koeffizienten  $NC$  für das Beispiel der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 gegenübergestellt. Da keine deutliche, sprunghafte Änderung in der Anzahl der signifikanten Koeffizienten zu erkennen ist, kann diese ebenfalls nicht als Kriterium dienen.

Die auftretenden Variationen der Isoporen sind sicher auf numerische Instabilitäten der Modellierung zurückzuführen. Die fehlenden Kriterien für ein bestes Modell deuten darauf hin, daß die scheinbaren Anomalien sich nur durch die numerischen Probleme ergeben, und keine Realitäten darstellen. Lediglich die Modelle niedriger Ordnung mit  $k_{max} = 4$  und  $k_{max} = 3$  unterscheiden sich kaum noch voneinander. Abgesehen von Randeffekten sind in diesen Modellen aber auch „Anomalien“ weitgehend verschwunden, aufgrund der langen minimalen Wellenlängen der Modelle wird praktisch die normale Säkularvariation dargestellt. In Kapitel 6.2 werden Modelle für alle Zeitintervalle präsentiert.

$k_{max}$	$\lambda_{min}$ für $\theta_0=14^\circ$	$N$	$NC$ bei $F=3,5$ , Bsp. SV85-90
10	597 km	241	37
9	661 km	199	33
8	739 km	161	32
7	839 km	127	31
6	970 km	97	28
5	1149 km	71	28
4	1408 km	49	26
3	1819 km	31	22

Tab. 5.1 Minimale Wellenlänge  $\lambda_{min}$ , Anzahl der möglichen Koeffizienten  $N$  und Anzahl der bestimmten Koeffizienten  $NC$  bei Signifikanzlevel  $F=3,5$  für verschiedene maximale Ordnungen  $k_{max}$  der SCHA

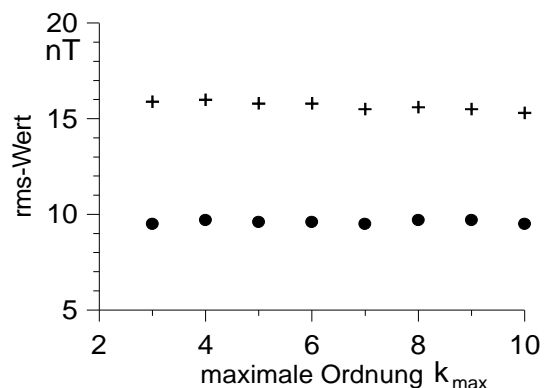


Abb. 5.6 rms-Wert für unterschiedliche maximale Ordnungen  $k_{max}$  der SCHA für die Beispiele Säkularvariation 1980.5 - 1985.5 (Punkte) und 1985.5 - 1990.5 (Kreuze).

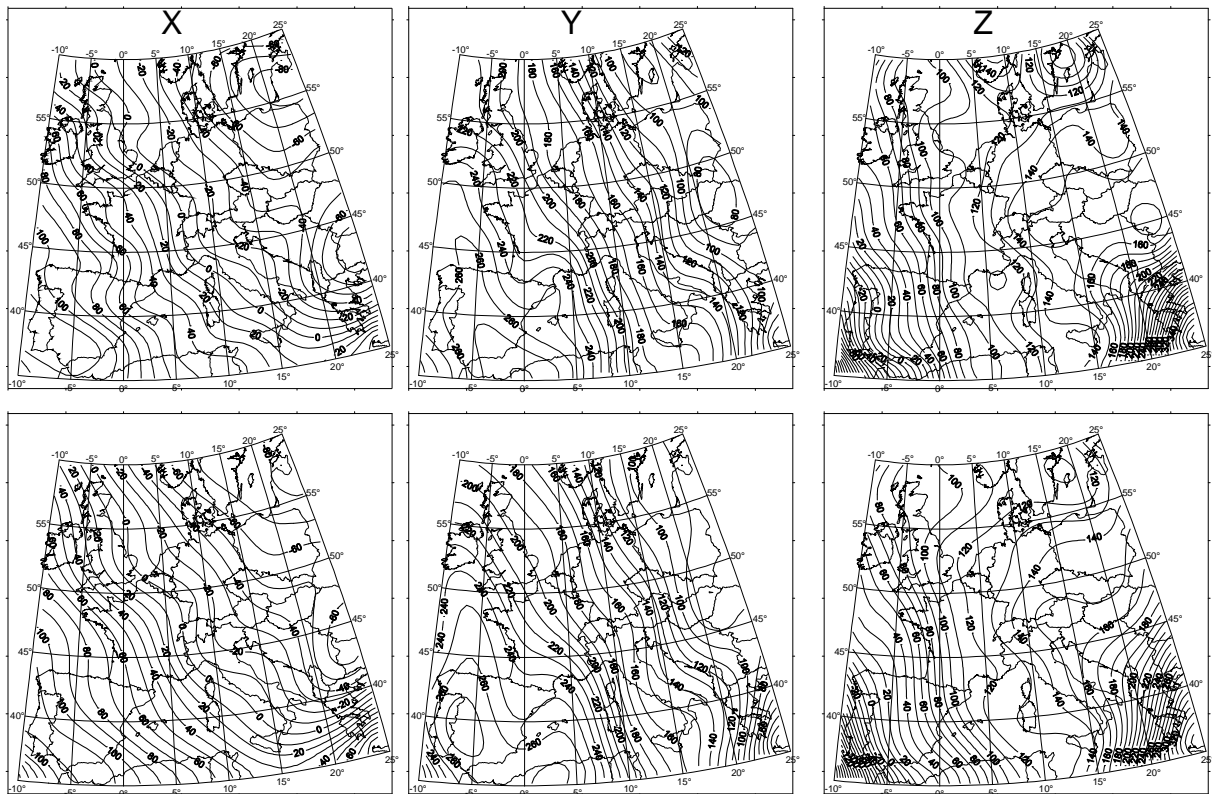


Abb. 5.7 SCHA-Modell der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 mit maximaler Ordnung  $k_{\max} = 10$  (oben) und  $k_{\max} = 8$  (unten) für die Komponenten X, Y und Z, Einheit nT pro fünf Jahre.

### 5.4.5 Würden mit einem Potentialmodell reduzierte Werte bessere Ergebnisse liefern?

Zur Reduktion der Daten der einzelnen Länder auf die gemeinsamen Epochen wurde ein Normalfeldmodell verwendet, das aus einer Polynomregression der einzelnen Komponenten unabhängig voneinander hervorgeht. Dieses Modell vernachlässigt daher die Potentialbedingungen. Es stellt sich die Frage, ob man aus so reduzierten Daten mit dem Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis überhaupt sinnvolle Ergebnisse erhalten kann, oder ob die Daten nicht über ein den Potentialbedingungen genügendes Modell wie das GSFC reduziert werden müßten. (Warum das Polynom-Modell dem IGRF vorgezogen wurde ist in Kapitel 2.3 erläutert.)

Daß die Modellierung der kombinierten Daten durch Spherical Cap Harmonic Analysis nicht grundlegend falsch sein kann, zeigen die Vergleiche mit anderen Interpolationsverfahren und auch dem GSFC in Kapitel 6.1.

Trotzdem wurden alle Datensätze noch einmal mit dem GSFC-Modell in gleicher Weise auf die entsprechenden Epochen reduziert und die Säkularvariation berechnet. Die Spherical Cap Harmonic Analysis dieser Datensätze ergab anschaulich sehr ähnliche Ergebnisse wie die Analyse und Modellierung der ursprünglichen kombinierten Daten. Die Trennung in externe und interne Anteile gelang hier ebensowenig wie für die ursprünglich mit dem Polynom-Normalfeldmodell reduzierten Daten. Dies bestätigt die Vermutung, daß die Ursache in der Spherical Cap Harmonic Analysis selbst und eventuell in den Reduktionsfehlern, nicht aber in der Reduktionsmethode begründet liegt.

Die mittleren Residuen der Anpassung (rms-Werte) änderten sich mit unterschiedlichen maximalen Ordnungen der Spherical Cap Harmonic Analysis wiederum kaum. Diese mittleren Residuen sind jedoch bis auf eine Ausnahme für jedes der Intervalle etwas größer, als die entsprechenden Werte der Analyse der mit den Polynomen reduzierten Werte (Tab. 5.2). Der Grund für dieses zunächst überraschende Ergebnis ist jedoch leicht einzusehen: Wie in Kapitel 2.3 diskutiert, gibt das GSFC die Säkularvariation in Europa nur mit unzureichender Genauigkeit wieder. Das bedeutet aber für die Länder, für die jeweils über einen etwas längeren Zeitraum reduziert werden muß, daß die Beträge der Reduktion um eben diese Ungenauigkeit zu groß oder zu klein sind. Die Daten passen daher schlechter zu den Daten der Länder, die nicht oder nur über kurze Zeiträume reduziert

werden mußten und daher die richtige Säkularvariation wiedergeben. Die großräumige Anpassung der Daten durch Spherical Cap Harmonic Analysis muß daher größere Fehler liefern.

Die Wahl des Polynom-Modells zur Reduktion auf gemeinsame Epochen war also sinnvoll und stellt auch für die Untersuchung durch Spherical Cap Harmonic Analysis keinen Nachteil dar.

SV-Intervall	rms-Werte 1	rms-Werte 2
1965.5-1970.5	5,8	12,9
1970.5-1975.5	17,1	14,8
1975.5-1980.5	9,8	13,5
1980.5-1985.5	9,7	12,7
1985.5-1990.5	16,1	21,8
1990.5-1995.5	20,5	21,7

Tab. 5.2 Vergleich der rms-Werte für mit Polynom-Modell reduzierte Daten (rms-Werte 1) und mit GSFC reduzierte Daten (rms-Werte 2) für SCHA mit  $\theta_0=14^\circ$ ,  $k_{\max} = 4$ .

### 5.4.6 Spherical Cap Harmonic Analysis des Hauptfeldes

Eine alternative Möglichkeit die Säkularvariation flächenhaft zu modellieren besteht darin, das Hauptfeld zu verschiedenen Epochen zu modellieren und die Differenz der Modelle (geteilt durch Anzahl der Jahre) zu berechnen. Hier soll kurz gezeigt werden, daß die Spherical Cap Harmonic Analysis dafür nicht gut geeignet ist, womit auch eine Begründung gegeben wird, warum das zur Reduktion der Daten verwendete Normalfeldmodell nicht mit dieser Potentialmethode modelliert wurde.

Beispielhaft wurde die Datenkombination für das Jahr 1985.5 durch Spherical Cap Harmonic Analysis mit unterschiedlichen halben Öffnungswinkeln  $\theta_0$  und maximalen Ordnungen  $k_{\max}$  modelliert. Wie Abb. 5.8 a) zeigt, treten dabei besonders in Y und Z starke Randeffekte auf, insbesondere in Y sind die Modelle auch in Abhängigkeit von den Parametern  $\theta_0$  und  $k_{\max}$  auch für kleine maximale Ordnungen recht instabil.

Die Ursache für die starken Randeffekte können zum Teil in der inhomogenen Datenverteilung mit großen Lücken an den Rändern liegen.

Eine weitere Ursache für die Probleme liegt in der schon beschriebenen Schwierigkeit, lange Wellenlängen durch eine endliche Reihe harmonischer Funktionen höherer Ordnung anzupassen (vgl. Kap. 5.4.1). Das Hauptfeld weist Wellenlängen auf, die wesentlich länger sind als die längsten Wellenlängen der Basisfunktionen der Spherical Cap Harmonic Analysis. Ein Dipolfeld wird durch die Legendreschen Polynome mit  $n=1$  beschrieben, für die Kugelkappe von halbem Öffnungswinkel  $14^\circ$  hat die niedrigste Harmonische der Legendrefunktionen den Wert  $n= 7,0831$ . Wie in Abb. 5.8 b) gezeigt bringt in diesem Fall eine Vergrößerung der Kugelkappe keine Verbesserung wie sie Torta et al. [1992] erzielten, sondern in einigen Fällen sogar eine deutliche Verschlechterung des Modells. Die Randeffekte werden zwar kleiner, dafür treten insgesamt unrealistische kleinräumige Effekte auf, wie der Ostkomponente Y in Abb. 5.8.

## 5.5 Ergebnisse dieses Kapitels

In diesem Kapitel wurden die Möglichkeiten des Potentialverfahrens der Spherical Cap Harmonic Analysis speziell für die Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen der europäischen Länder getestet. Die wichtigsten Ergebnisse hiervon sind:

- Das Verfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis ist recht stabil gegenüber normalverteilten Fehlern.

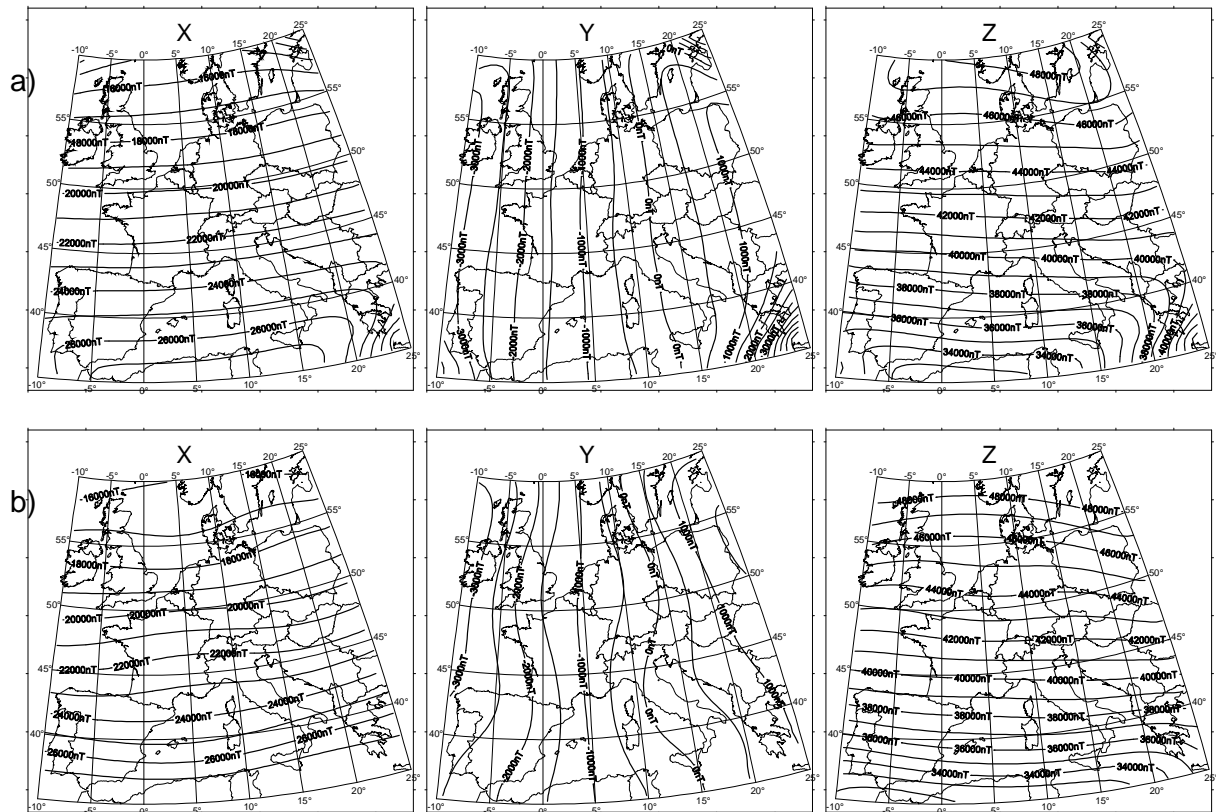


Abb. 5.8 Hauptfeldmodellierung durch SCHA aus der Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen, Beispiel 1985.5, a)  $\theta_0=14^\circ$ ,  $k_{\max} = 5$ , b)  $\theta_0=30^\circ$ ,  $k_{\max} = 5$ .

- Die Ergebnisse der Modellierung sind weitgehend unabhängig von der Größe der gewählten Kugelkappe. Im folgenden wurde daher immer die für die Datenkombination kleinstmögliche Kugelkappe von  $14^\circ$  mit Mittelpunkt bei  $47^\circ\text{N}$ ,  $5^\circ\text{E}$  verwendet.
- Die Trennung des Potentials in externe und interne Anteile durch Spherical Cap Harmonic Analysis liefert keine sinnvollen Ergebnisse. Es scheint sich dabei um ein Problem der Methode an sich, nicht nur der Datenkombination zu handeln.
- Bei hohen maximalen Ordnungen der Spherical Cap Harmonic Analysis, also kleinen darstellbaren minimalen Wellenlängen, sind die modellierten Lösungen instabil. Die Hauptursache werden die großen Reduktionsfehler der Daten sein, die vermutlich nicht normalverteilt sind. Mit dem Verfahren und der Datenkombination läßt sich daher nur die normale Säkularvariation mit langen Wellenlängen (maximale Ordnung zwischen 3 und 5) modellieren. Im folgenden Kapitel werden solche Modelle für den Zeitraum 1965 bis 1995 für die Fünfjahresintervalle der Datenkombination vorgestellt.
- Eine Reduktion der Ergebnisse der einzelnen regionalen Vermessungen über ein Potentialfeld wie das GSFC statt über die komponentenweisen Polynom-Normalfelder auf gemeinsame Epochen bringt keine Verbesserungen für die Spherical Cap Harmonic Analysis der Datenkombination.
- Spherical Cap Harmonic Analysis des erdmagnetischen Hauptfelds ergibt wegen dessen sehr langer Wellenlängen keine überzeugenden Resultate.

## 6 Untersuchung der Säkularvariation

In diesem Kapitel wird als ein Ergebnis, das die Kombination der regionalen magnetischen Vermessungen Europas liefern kann, die Säkularvariation von 1965 bis 1995 in Fünfjahresintervallen dargestellt, modelliert durch Spherical Harmonic Analysis. Zuvor werden die Ergebnisse dieser Methode mit drei weiteren Darstellungsmethoden verglichen. Zum Schluß wird der Frage nachgegangen, ob sich aus der Datenkombination mit dieser Methode Säkularvariationsanomalien modellieren lassen. Als Fazit werden Vorschläge gemacht, wie künftige magnetische Vermessungen in Europa verbessert werden könnten, um für die Untersuchung der Säkularvariation und möglicher Anomalien effektiver nutzbar zu sein.

### 6.1 Modellierung der Säkularvariation mit verschiedenen Methoden

Vor der Präsentation der Spherical Cap Harmonic Analysis Modelle der Datenkombination für den gesamten Zeitraum von 1965 bis 1995 sollen anhand eines Beispiels kurz verschiedene Interpolationsmethoden zur Darstellung der Säkularvariation verglichen werden. Abb. 6.1 a) bis d) zeigt jeweils die Säkularvariation für das Intervall 1985.5-1990.5, a) bis c) sind verschiedene Modellierungen der Kombination der regionalen Vermessungen, d) zeigt zum Vergleich die Säkularvariation des GSFC für das gleiche Gebiet.

#### a) Einfache Interpolation

Wie das Hauptfeld für die einzelnen Epochen (vgl. Kap. 3.5.4) läßt sich auch die Säkularvariation für die einzelnen Intervalle durch eine einfache Interpolation mit dem Kriging-Verfahren modellieren. In den Darstellungen ist zwar der großräumige Trend der Säkularvariation grob zu erkennen, doch ist das Erscheinungsbild der Isoporen extrem unruhig. Im wesentlichen werden die Reduktionsfehler die Ursache für diese scheinbaren Anomalien sein, die häufig nur durch einzelne Meßpunkte hervorgerufen werden. Die gegenüber der Stärke des Hauptfeldes kleinen Fehler können gegenüber den weit geringeren Beträgen der Säkularvariation große relative Werte erreichen. Die mittleren Residuen der Anpassung liegen in der Größenordnung von 5 nT.

Anhand dieser Darstellungen ist nicht zu erkennen, ob es echte regionale Anomalien der Säkularvariation gibt.

#### b) Polynome in geographischer Länge und Breite

Polynome in geographischer Länge und Breite führen bei hohen Ordnungen (ab etwa Ordnung 5) zu sehr ausgeprägten Randeffekten. Daher läßt sich im wesentlichen nur die normale Säkularvariation mit dieser Methode gut modellieren, mögliche kurzweilige Anomalien nicht. Hier sind Polynom-Modelle 3. Ordnung in Länge und Breite für X, Y und Z dargestellt. Die mittleren Residuen der Meßwerte liegen dabei in etwa der gleichen Größenordnung von 10 bis 20 nT wie die der Modelle der Spherical Cap Harmonic Analysis (vgl. Tab. 6.1).

#### c) Spherical Cap Harmonic Modell

Die hier abgebildeten SCHA-Modelle der Säkularvariation wurden mit den Parametern halber Öffnungswinkel der Kugelkappe  $\theta=14^\circ$  und maximaler Ordnung  $k_{\max}(\text{int})=k_{\max}(\text{ext})=4$  berechnet. Wie in Kapitel 5.4.4 beschrieben sind Modelle höherer Ordnung instabil, es läßt sich wie bei den Polynomen im wesentlichen nur die normale Säkularvariation modellieren. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß die Komponenten nicht unabhängig voneinander modelliert werden, sondern daß die Potentialbedingungen berücksichtigt werden. In Kapitel 6.2 werden SCHA-Modelle der Säkularvariation in Fünfjahresintervallen für den gesamten Zeitraum von 1965 bis 1995 vorgestellt.

#### d) Zum Vergleich: GSFC

Die Säkularvariation des GSFC-Modells stimmt in der räumlichen Verteilung gut mit den Modellen aus der Datenkombination überein. Die Amplitude der Säkularvariation unterscheidet sich jedoch besonders in der Vertikalkomponente, aber auch in der Nord- und Ostkomponente zum Teil stark von den untereinander deutlich ähnlicheren Amplituden der Polynom- und SCHA-Modelle. Hier zeigt sich wieder die in Kapitel 2.3 beschriebene ungenaue Wiedergabe der Säkularvariation durch das GSFC-Modell.

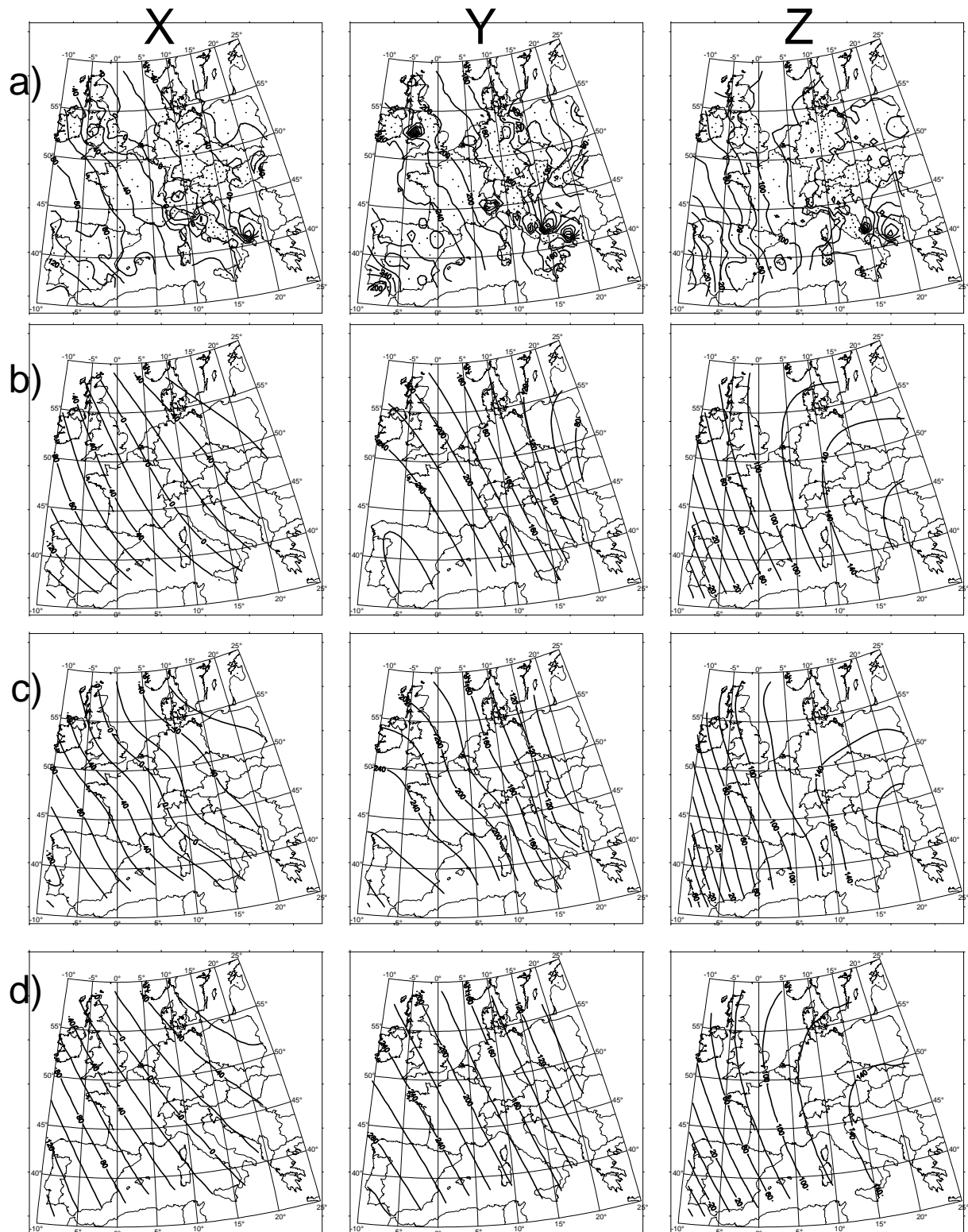


Abb. 6.1 Darstellung der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 mit verschiedenen Interpolationsmethoden, siehe Text. Einheit jeweils nT pro fünf Jahre.

- a) einfache Kriging-Interpolation der Datenkombination
- b) Polynomregression der Datenkombination

- c) Spherical Cap Harmonic Analysis der Datenkombination
- d) zum Vergleich: Ausschnitt des globalen GSFC-Modells

Die einfache Interpolation (a) zeigt naturgemäß viel kleinräumigere Effekte als die anderen Darstellungen. Denkt man sich diese weg ist aber doch ein langwelliger Trend dahinter zu erkennen, dessen Amplituden denen der anderen Darstellungen entsprechen. Insgesamt zeigt der Vergleich, daß die Amplituden der großräumigen Säkularvariation in allen Darstellungen der Datenkombination gut übereinstimmen. Obwohl die einfache Interpolation (a) und Polynome (b) die Potentialbedingungen vernachlässigen, weichen die Ergebnisse dieser Methoden in ihrer großräumigen Erscheinung nicht signifikant von den Ergebnissen der Potentialmethoden ab.

## 6.2 Säkularvariation 1965 bis 1995 in Fünfjahresintervallen

In Abb. 6.2 bis Abb. 6.4 werden SCHA-Modelle der Fünfjahresintervalle der Datenkombination Europas für den gesamten Zeitraum von 1965 bis 1995 vorgestellt. Die Parameter der Spherical Cap Harmonic Analysis waren jeweils halber Öffnungswinkel der Kugelkappe  $\theta_0=14^\circ$  und maximale externe und interne Ordnung der Koeffizienten  $k_{\max} = 4$ . Tab. 6.1 gibt einen Überblick, wie viele Meßwerte für jedes Intervall zu Verfügung standen.

Die Isoporen in den Abbildungen wurden auf den tatsächlich von Meßpunkten abgedeckten Bereich beschnitten. Der Bereich, für den das Modell als zuverlässig angesehen werden kann, ist jedoch wegen des Problems der Randeffekte noch etwas kleiner. Insbesondere die teilweise auftretenden scharfen Knicke in den Isoporen im Südwesten Spaniens und im Süden Italiens sind sicher mit auf diese Ursache zurückzuführen und dürfen nicht als reale Anomalien angesehen werden. Zumindest in Spanien tragen sicher die sehr großen Reduktionsfehler (vgl. Kap. 4.4) in diesem Land zu diesen Effekten bei.

Auch in Mitteleuropa treten in den Modellen noch teilweise kurzweilige Schlenker in den Isoporen auf. Diese sind auch für alle Intervalle bei Variation der maximalen Ordnung der Spherical Cap Harmonic Analysis von  $k_{\max} = 3$  bis  $k_{\max} = 5$  in Ort und Amplitude weitgehend stabil. Die Effekte sind daher wohl keine numerischen Instabilitäten der Methode, sondern tatsächlich durch die Meßwerte an diesen Orten hervorgerufen. Vermutlich handelt es sich trotzdem nicht um Säkularvariationsanomalien, sondern die Ursache liegt in den Reduktionsfehlern der Daten. Zum Beispiel fallen die scharfen Knicke über Frankreich in der Ostkomponente Y 1980.5 - 1985.5 mit den großen Reduktionsfehlern im Süden und der Mitte Frankreichs in Abb. 4.7 zusammen. Kapitel 4.4 befaßte sich ausführlicher mit solchen scheinbaren Anomalien. Das Hauptargument gegen echte Säkularvariationsanomalien ist, daß die Effekte nur jeweils in einem Zeitintervall auftreten. Echte Säkularvariationsanomalien, die ihre Ursache zwischen Kern-Mantel-Grenze und Erdoberfläche haben sollten, dürften nur mit deutlich längeren Perioden variieren.

Die gezeigten Modelle dürfen daher keinesfalls als optimale Säkularvariationsmodelle für Mitteleuropa aufgefaßt werden. Die generelle Änderung der Säkularvariation im Laufe der Zeit ist jedoch gut zu erkennen. Das anhand der SCHA-Modelle im folgenden beschriebene großräumige Verhalten der Säkularvariation im Zeitraum 1965 bis 1995 aus der Kombination von Daten regionaler europäischer Vermessungen steht dabei in Übereinstimmung mit anderen Modellen, wie dem globalen GSFC, dem Polynom-Normalfeldmodell (Kap. 2.4) oder einer einfachen Kriging-Interpolation der Säkularvariationen der europäischen Observatorien [Korte, 1996].

In der Nordkomponente X ändert sich im Laufe der Jahre vor allem die Stärke der Säkularvariation. Während sie Anfang der siebziger Jahre in Europa zwischen etwa +16 und +48 nT/Jahr (80 und 240 nT pro fünf Jahre) liegt, ist sie in den achtziger Jahren deutlich schwächer, in Teilen Europas treten sogar negative Werte von bis zu -12 nT/Jahr auf. Anfang der neunziger Jahre ist die Säkularvariation in der Nordkomponente im betrachteten Gebiet wieder überwiegend positiv mit maximalen Beträgen von bis zu etwa 14 nT/Jahr. Die räumliche Verteilung bleibt weitgehend konstant, mit stärkerer (positiver) Säkularvariation im Westen und schwächerer (bis negativer) im Osten.

In der Ostkomponente Y ändert sich neben der Stärke auch die räumliche Verteilung der Säkularvariation. Während Anfang der siebziger Jahre in etwa ein Süd-Nord-Gefälle der Säkularvariationen zu beobachten ist, ändert sich dies Ende der siebziger, Anfang der achtziger Jahre in ein West-Ost-Gefälle. Die Beträge der Säkularvariation ändern sich von etwa 5 bis 48 nT/Jahr um 1970 über 24 bis 60 nT/Jahr um 1980 zu etwa 20 bis 52 nT/Jahr um 1990. Negative Werte treten in der Säkularvariation der Ostkomponente nicht auf.

## Nordkomponente X

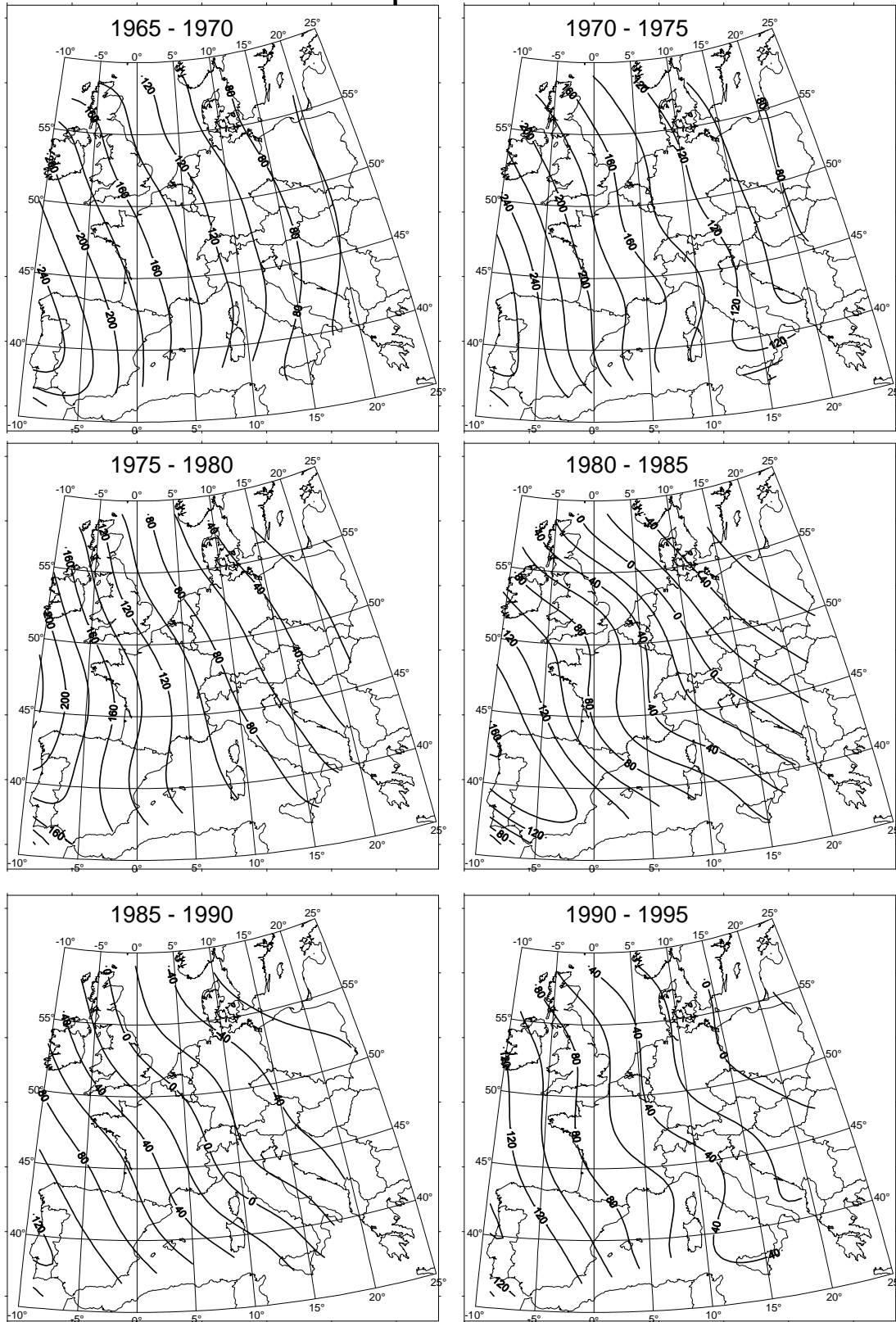


Abb. 6.2 SCHA-Modell der Säkularvariation der Nordkomponente in Fünfjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5,  $k_{\max}=4$ ,  $\theta_0=14^\circ$ . Einheit nT pro fünf Jahre.



## Ostkomponente Y

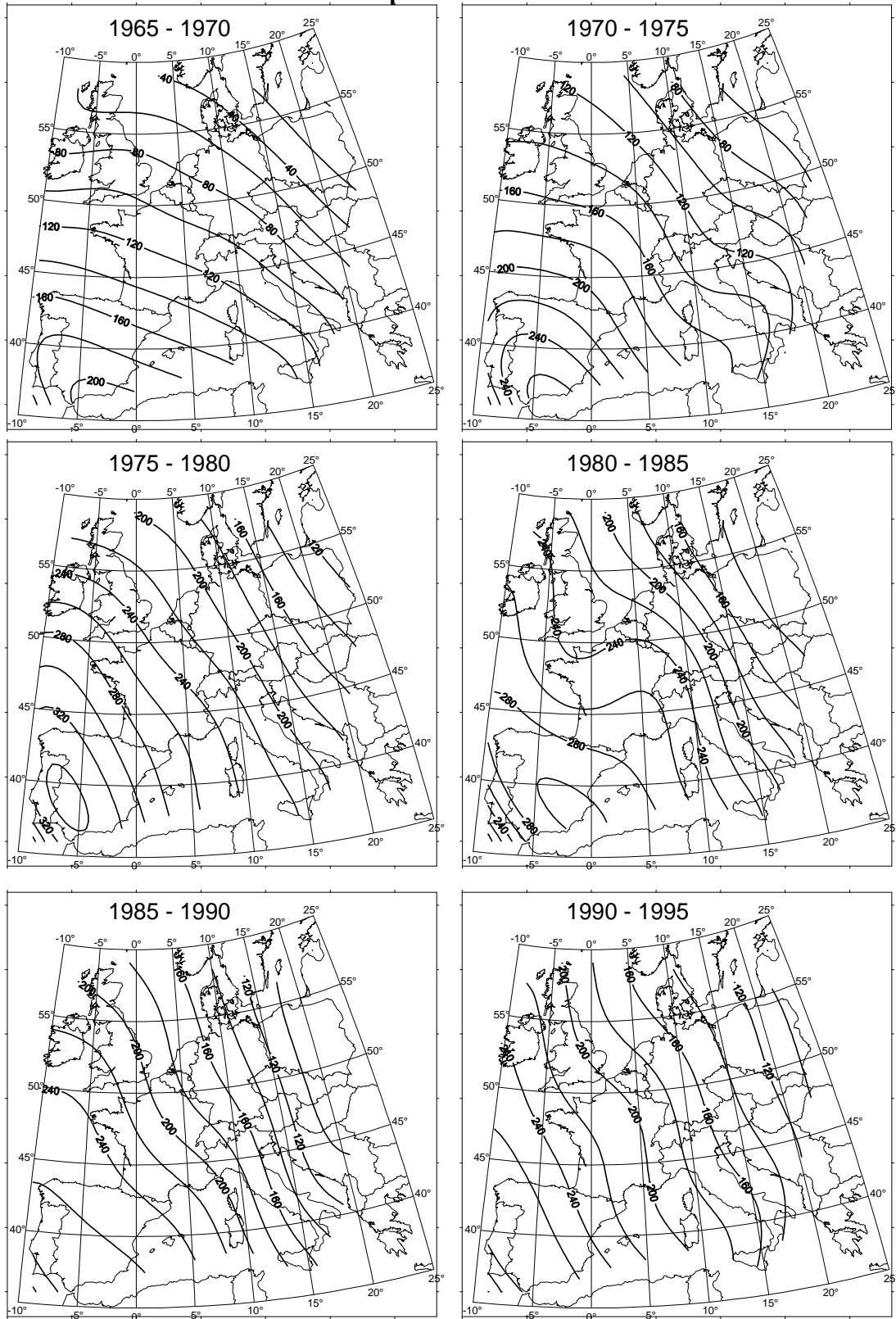


Abb. 6.3 SCHA-Modell der Säkularvariation der Ostkomponente in Fünffjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5,  $k_{\max} = 4$ ,  $\theta_0 = 14^\circ$ . Einheit nT pro fünf Jahre.

## Vertikalkomponente Z

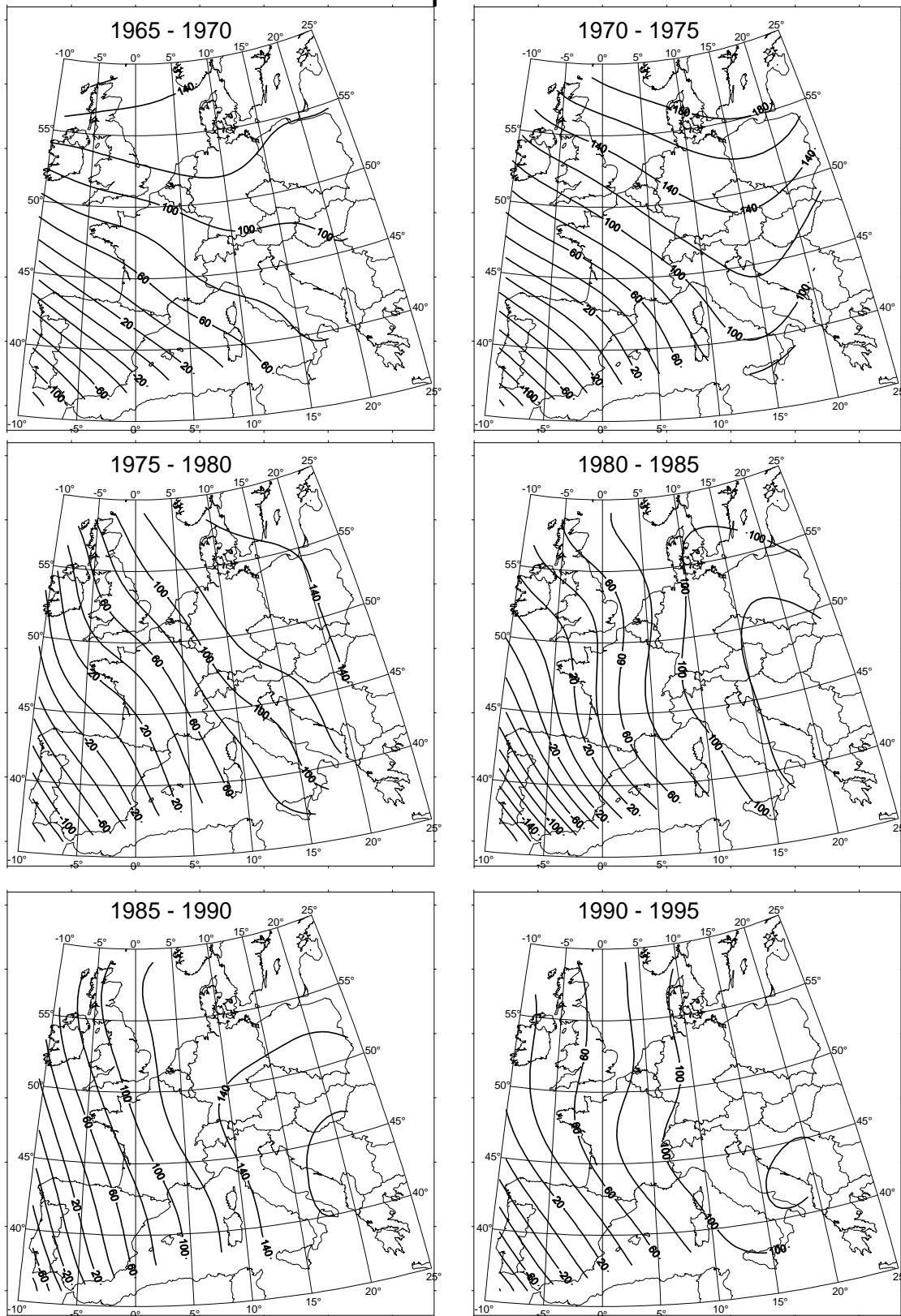


Abb. 6.4 SCHA-Modell der Säkularvariation der Vertikalkomponente in Fünfjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5,  $k_{\max}=4$ ,  $\theta_0=14^\circ$ . Einheit nT pro fünf Jahre.

In der Vertikalkomponente Z ändert sich die Stärke der Säkularvariation nur wenig, die räumliche Verteilung dagegen deutlich. Während bis Mitte der siebziger Jahre ein Anstieg der Säkularvariation von Südwesten nach Nordosten zu beobachten ist, ändert sich dieser Trend im Lauf der Zeit in einen Anstieg überwiegend von Westen nach Osten. Die langwellige Krümmung der östlichen Isoporen ist in ihrer generellen Erscheinung hier durchaus real. In den anderen Modellen ist zu erkennen, daß sich am südöstlichen Rand der hier betrachteten Fläche in den achtziger Jahren ein Maximum der Säkularvariation herausbildet, das in diesen SCHA-Modellen aufgrund der fehlenden bzw. nicht verwendeten Werte des ehemaligen Jugoslawiens und der Länder östlich des 24. Längengrades sowie auch der skandinavischen Länder nicht besser dargestellt werden kann.

SV-Intervall	Meßwerte je Komponente	rms-Wert bei $k_{\max}=4$	signifik. Koeffizienten
1965.5-1970.5	308	5,8	32
1970.5-1975.5	303	17,1	30
1975.5-1980.5	383	9,8	37
1980.5-1985.5	380	9,7	25
1985.5-1990.5	375	16,1	26
1990.5-1995.5	281	20,5	24

Tab. 6.1 Anzahl der Meßwerte, rms-Werte und Anzahl signifikanter Koeffizienten bei SCHA der Datenkombination mit  $\theta_0 = 14^\circ$ ,  $k_{\max} = 4$  für die Fünfjahresintervalle der Säkularvariation zwischen 1965 und 1995.

### 6.3 Gibt es Säkularvariationsanomalien in Europa?

Wie in Kapitel 5.4.4 beschrieben ergaben sich für die Darstellung der Säkularvariation bei höheren Ordnungen der Spherical Cap Harmonic Analysis keine stabilen Lösungen. Die hier auftretenden kurzwelligen Anomalien verändern ihr Erscheinungsbild je nach gewählter maximaler Ordnung der Spherical Cap Harmonic Analysis so stark, daß keine Aussagen darüber möglich sind, welche Form sie wirklich besitzen, falls sie überhaupt existieren. Die hohe Instabilität dieser Anomalien läßt vermuten, daß die meisten davon Artefakte der Darstellungsmethode sind, die aufgrund der inhomogenen, mit großen relativen Fehlern behafteten Daten auftreten.

Trotzdem wurde ein weiterer Versuch unternommen, mögliche Anomalien mit Spherical Cap Harmonic Analysis zu modellieren. Dazu wurden die Residuen zu dem Normalfeld für jeden Meßpunkt einzeln berechnet, und diese Säkularvariationsabweichungen (vgl. Kap. 4.4) direkt mit Spherical Cap Harmonic Analysis modelliert. Das Wort wird hier nur in Anführungszeichen verwendet, da in diesen Abweichungswerten selbstverständlich noch die Reduktionsfehler enthalten sind. Die Werte dürfen keinesfalls direkt als echte Anomaliewerte angesehen werden, die Hoffnung ist lediglich, aus diesen Werten über das Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis mögliche echte Anomalien von den Fehlern trennen und so modellieren zu können.

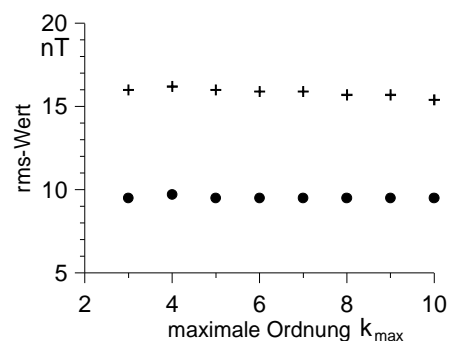


Abb. 6.5 rms-Wert für unterschiedliche maximale Ordnungen  $k_{\max}$  der SCHA für die Säkularvariationsabweichungen 1980.5 - 1985.5 (Punkte) und 1985.5 - 1990.5 (Kreuze).

Die Ergebnisse sind ebenfalls sehr instabil in Bezug auf die maximale Ordnung  $k_{\max}$  der Spherical Cap Harmonic Analysis, wie die Beispiele in Abb. 6.6 zeigen. Der mittlere Anpassungsfehler (rms-Wert) bleibt wiederum für die verschiedenen Ordnungen  $k_{\max}$  jeweils in der gleichen Größenordnung (Abb. 6.5) und bietet daher auch hier kein Kriterium zur Auswahl des besten Modells.

Die rms-Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei der Modellierung der Säkularvariationen selbst (vgl. Abb. 5.3). Auf den ersten Blick mag das überraschen, die Beträge der Säkularvariation liegen für die Fünfjahresintervalle größenordnungsmäßig bei mehreren 100 nT, die Beträge der hier modellierten Abweichungen im Mittel bei wenigen nT bis maximal 50 bis 100 nT (vgl. Kap. 4.4). Doch ist dieses Ergebnis im Grunde eine Bestätigung der Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis und des verwendeten Normalfeldmodells. Die Spherical Cap Harmonic Analysis soll aus den drei gemessenen Komponenten ein Potential bestimmen und Datenfehler, die in den verschiedenen Komponenten unabhängig sind, dabei ignorieren. Die Größe des rms-Wertes sollte daher (zumindest für die maximalen Ordnungen, für die er etwa gleich groß ist) durch die Größe der Datenfehler bestimmt sein. Beim Übergang von den Säkularvariationen zu den Säkularvariationsabweichungen wurde von den Daten lediglich ein (Potential-) Normalfeld subtrahiert. Bei der Analyse der Säkularvariationen wird durch die Spherical Cap Harmonic Analysis das Säkularvariationspotential mit eventuell überlagertem Anomaliepotential bestimmt, die Datenfehler bleiben als Residuen übrig. Bei der Analyse der Säkularvariationsabweichungen wird ebendieses Anomaliepotential bestimmt, die noch in unveränderter Höhe enthaltenen Datenfehler bleiben auch hier als Residuen übrig. Nach der Theorie sollten die rms-Werte also tatsächlich gleich sein.

Daß sie es wirklich sind, spricht daher auch für das Normalfeldmodell, das ja tatsächlich ohne Beachtung der Potentialbedingungen erstellt wurde, diese aber doch offensichtlich in zufriedenstellender Weise erfüllt. Erstaunlich ist angesichts der übereinstimmenden rms-Werte eher, daß die Modelle für die verschiedenen Ordnungen so instabil sind. Die Potentiale werden durch die Spherical Cap Harmonic Analysis offensichtlich doch nicht so sicher bestimmt, wie obige Überlegungen implizieren.

Die Modelle sind nicht nur in Abhängigkeit von der maximalen Ordnung sehr instabil, sie zeigen auch für die verschiedenen Zeitintervalle keinerlei Ähnlichkeit. Natürlich kann dabei eine Rolle spielen, daß es in jedem der Fünfjahresintervalle einzelne Länder gibt, die aufgrund der nötigen Reduktionen nur die normale Säkularvariation des Modells, also Säkularvariationsabweichungen von Null aufweisen (vgl. Tab. 3.3 und Kap. 3.5.3). Weglassen dieser Werte bei der Spherical Cap Harmonic Analysis führt jedoch auch nicht zu stabileren Modellen und in den meisten Intervallen, insbesondere auch in den dargestellten Beispielen der Abb. 6.6, sind die zusammenhängenden Gebiete ohne solche berechneten Werte doch recht groß.

Echte Säkularvariationsanomalien müßten angesichts der langen Perioden der Säkularvariation auf jeden Fall über deutlich längere Zeiträume als 5 oder 10 Jahre hinweg existieren.

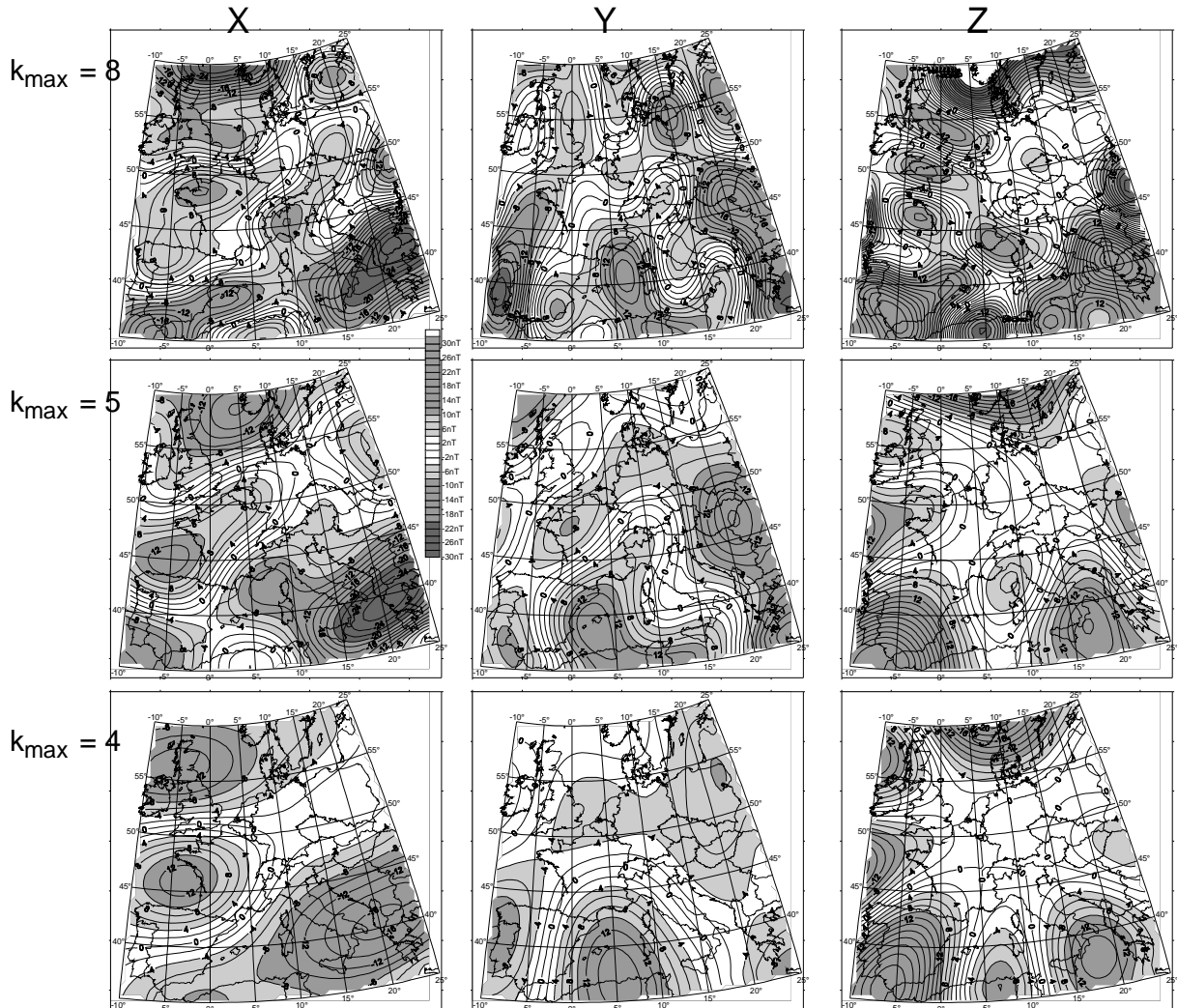
Es können auf diese Weise keine Säkularvariationsanomalien nachgewiesen werden. Das sollte aber nicht als Nachweis angesehen werden, daß es in Europa keine Säkularvariationsanomalien gibt. Mögliche Anomalieeffekte können angesichts der Größenordnungen von Amplitude und Periode der Säkularvariation nur sehr kleine Amplituden besitzen. Die hier verwendeten, an sich schon sehr inhomogenen Daten sind mit sehr großen relativen Fehlern gegenüber der berechneten Säkularvariation behaftet. Diese Tatsache an sich stellt schon für alle Verfahren, mögliche Anomalien herauszuarbeiten und zu modellieren, ein Problem dar. Spherical Cap Harmonic Analysis erschien dabei als erfolgversprechendstes Verfahren, aber auch diese Methode selbst birgt einige Schwierigkeiten.

Daß speziell die in der Einleitung erwähnten, von Mundt [z. B. 1981] beschriebenen Säkularvariationsanomalien sich hier nicht ergeben ist verständlich: Mundt berechnete diese Anomalien aus Residuen der Säkularvariation an den Observatorien zu einem linearen Modell der normalen Säkularvariation. Angesichts der europa- und weltweiten Variabilität der Säkularvariation erscheint ein lineares Modell jedoch nicht ausreichend, die ursächlich dem Erdkern entstammende, „normale“ Säkularvariation für ein Gebiet der Größe Europas wiederzugeben. Die gegenüber einem linearen Modell anomalen Anteile sind damit Teil der in dieser Arbeit verwendeten normalen Säkularvariation. Die von Mundt beschriebenen Anomalien sind vermutlich keine Säkularvariationsanomalien im Sinne dieser Arbeit aufgrund von Leitfähigkeitsanomalien.

Zu den ebenfalls von Mundt [1978] beschriebenen lokalen Säkularvariationsanomalien, sowie zu der Vermutung, daß es sich bei der europäischen MAGSAT-Anomalie (vgl. Kap. 4.2) um eine transiente Anomalie aufgrund einer Leitfähigkeitsanomalie handeln könnte [Lindner et al., 1988], können über die in dieser Arbeit verwendete Datenkombination wegen der beschriebenen Probleme der Inhomogenität und der Reduktionsfehler keine Aussagen gemacht werden. Trotzdem erscheint es gerade auch im Hinblick auf die MAGSAT-Anomalie sinnvoll, neben neuen Satellitenmessungen auch großräumig einheitlichere Säkularpunktvermessungen durchzuführen, da diese längere Zeitreihen liefern können, als die auf maximal einige Jahre beschränkten Satellitenmissionen.



Bsp. 1985.5 - 1990.5



Bsp. 1980.5 - 1985.5

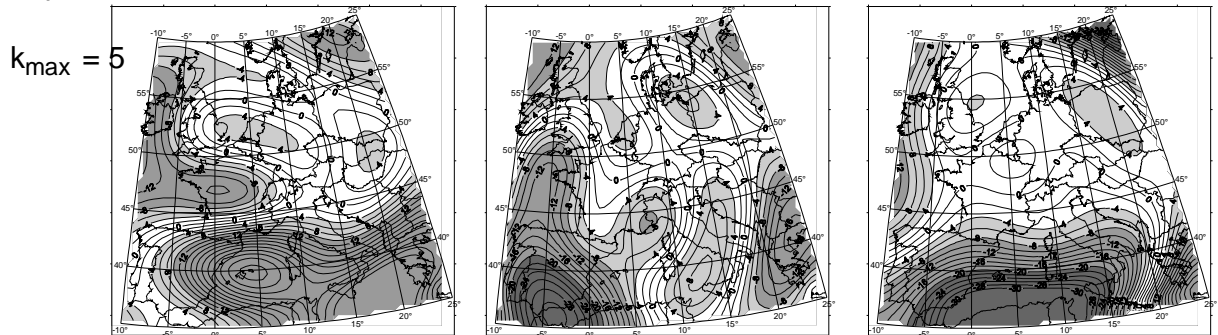


Abb. 6.6 Säkularvariationsabweichungen aus Spherical Cap Harmonic Analysis für unterschiedliche maximale Ordnung  $k_{\max}$  der Werte des Intervalls 1985.5-1990.5 (oben) und für das Intervall 1980.5-1985.5 (unten). Einheit nT pro fünf Jahre.

## 6.4 Ergebnisse dieses Kapitels

In diesem Kapitel wurde die Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis auf die verschiedenen Fünfjahresintervalle der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen angewandt. Sowohl die Säkularvariation als auch deren Abweichungen gegenüber dem normalen Säkularvariationsmodell wurden modelliert. Die Ergebnisse dabei sind:

- Die Ergebnisse der Modellierung durch Spherical Cap Harmonic Analysis stimmen prinzipiell mit Modellierungen durch einfache Interpolation oder Polynome überein.
- Damit läßt sich aus der Kombination von Ergebnissen regionaler magnetischer Vermessungen die Säkularvariation für den Zeitraum 1965 bis 1995 in Fünfjahresintervallen durch Spherical Cap Harmonic Analysis recht gut modellieren. Teilweise scheinen die Modelle aber doch von den großen Reduktionsfehlern der Daten beeinflußt zu werden.
- Ob Säkularvariationsanomalien existieren oder nicht, läßt sich auch mit dieser Methode aus der Datenkombination nicht nachweisen. Die Reduktionsfehler sind zu groß, um bei der Spherical Cap Harmonic Analysis der Werte der Abweichung von der normalen Säkularvariation stabile Lösungen zu liefern.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der geomagnetischen Säkularvariation in Europa anhand von Ergebnissen regionaler magnetischer Vermessungen. Dazu war eine Kombination dieser Daten, die bisher nur für die verschiedenen Länder einzeln ausgewertet wurden, notwendig. Insbesondere war die Frage von Interesse, ob in Europa Anomalien der Säkularvariation existieren. Speziell die Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis sollte zur Modellierung der Säkularvariation und Detektion möglicher Anomalien aus so einer Datenkombination getestet und verwendet werden.

Die wichtigsten Ergebnisse werden im folgenden zusammengefaßt:

- Globale Normalfeldmodelle scheinen die Säkularvariation des relativ kleinen Ausschnitts von Europa nicht optimal zu repräsentieren. Daher wurde ein besser an die Anforderungen dieser Arbeit angepaßtes Modell entwickelt.

Zur Untersuchung von Anomalien muß der Normalfall als Referenz bekannt sein. Außerdem wird die normale Säkularvariation in dieser Arbeit zur Reduktion verschiedener Ergebnisse regionaler magnetischer Vermessungen auf gemeinsame Epochen benötigt. Da sich weder das ungestörte, interne magnetische Hauptfeld noch dessen normale Säkularvariation direkt messen läßt, ist ein Modell nötig. Als Vorarbeit der eigentlichen Untersuchungen dieser Arbeit wurden verschiedene Normalfeldmodelle verglichen und auf ihre Übereinstimmung mit den Registrierungen der europäischen erdmagnetischen Observatorien getestet. Dabei ergab sich, daß globale Normalfeldmodelle wie das IGRF und das GSFC die Säkularvariation in Europa dabei nicht optimal zu repräsentieren scheinen. Daher wurde für den begrenzten Bereich von Europa ein speziell für die Reduktion der Daten besser angepaßtes Normalfeldmodell durch Polynomregression aus den Observatoriumsregistrierungen entwickelt.

- Die erstellte Datenkombination umfaßt Ergebnisse regionaler magnetischer Vermessungen von 13 europäischen Ländern für den Zeitraum von 1950 bis 1996. Diese bilden jedoch eine sowohl zeitlich als auch räumlich sehr inhomogene Basis für Untersuchungen der Säkularvariation. Die Daten weisen zum Teil große Reduktionsfehler auf.

Von verschiedenen Instituten von 13 europäischen Ländern wurden geeignete Daten regionaler magnetischer Vermessungen aus dem Zeitraum 1950 bis 1997 zur Verfügung gestellt. Da solche Vermessungen von den einzelnen Ländern völlig unabhängig voneinander durchgeführt werden, bildeten die Daten eine sowohl räumlich als auch zeitlich sehr inhomogene Basis für die angestrebten Untersuchungen.

Die räumliche Inhomogenität existiert aufgrund des Unterschiedes zwischen magnetischen Landesvermessungen und Säkularpunktvermessungen. Landesvermessungen sollen die detaillierte Darstellung der magnetischen Komponenten für einzelne Epochen ermöglichen, Säkularpunkte dienen der Verfolgung der Säkularvariation. Obwohl die beiden Arten von magnetischen Vermessungen unterschiedlichen Zielen dienen, wird in vielen Ländern nur eine der beiden durchgeführt. Die räumliche Inhomogenität läßt sich nur durch eine systematische Ausdünnung der Ergebnisse der detaillierten Landesvermessungen beheben.

Auch die zeitliche Inhomogenität der Daten hat ihre Ursache mit in dem Unterschied zwischen den beiden Arten von magnetischen Vermessungen. Landesvermessungen werden nur in großen zeitlichen Abständen von meist mehr als 10 Jahren durchgeführt, Säkularpunkte werden alle 2 bis 5 Jahre vermessen. Da von einigen Ländern für den gesamten Zeitraum seit 1950 nur wenige Landesvermessungen zur Verfügung standen, war eine einheitliche zeitliche Interpolation der Daten der verschiedenen Länder nicht möglich. Statt dessen wurden die einzelnen Daten einheitlich über ein Modell der normalen Säkularvariation auf gemeinsame Epochen reduziert. So konnte die Säkularvariation für sechs Fünfjahresintervalle von 1965 bis 1995 als Differenz zwischen den Werten dieser Epochen berechnet werden.



Da kaum Informationen über Fehlergrenzen der Daten vorlagen wurden Überlegungen zu verschiedenen Fehlerquellen angestellt. Besonders Fehler durch die standardmäßige Reduktion einzelner regionaler Vermessungsdaten auf einen Jahresmittelwert scheinen häufig unterschätzt zu werden. Diese Fehler können Beträge bis zu 20 nT in den Ergebnissen einer Vermessung und, da die Fehler zum Teil systematisch sind, dadurch bis zu 40 nT in daraus berechneten Säkularvariationen erreichen. Die Hauptursache der Reduktionsfehler liegt in den aufgrund der geographischen Lage unterschiedlichen Amplituden der magnetischen Tagesgänge zwischen den Meßpunkten und den Observatorien, deren Registrierungen zur Reduktion verwendet werden.

- Die (normale) Säkularvariation kann aus der Datenkombination durch Spherical Cap Harmonic Analysis für den Zeitraum von 1965 bis 1995 recht gut in Fünfjahresintervallen modelliert werden.

Zur Untersuchung und Modellierung der Daten wurde das Potentialverfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis getestet und benutzt. Es handelt sich dabei um eine Kugelfunktionsanalyse, die durch die Verwendung etwas anderer Basisfunktionen auf eine beliebige Kugelkappe angewandt werden kann, ohne daß die Feldverteilung auf der restlichen Kugel bekannt ist. Wie bei der normalen Kugelfunktionsanalyse lassen sich um so kurzwelligere Strukturen modellieren, je höher die maximale Ordnung der Basisfunktionen ist.

Das Verfahren erwies sich prinzipiell als stabil gegenüber normalverteilten, auch relativ großen Fehlern in den zu untersuchenden Daten. Trotzdem traten bei der Anwendung auf die tatsächlichen Meßwerte bei höheren maximalen Ordnungen numerische Instabilitäten auf. Die Ursache wird vermutlich darin liegen, daß die auftretenden Fehler nicht normalverteilt sind, sondern mindestens einen systematischen Anteil besitzen. So konnte schließlich nur die normale Säkularvariation mit niedrigen maximalen Ordnungen der Spherical Cap Harmonic Analysis für alle Zeitintervalle aus der Datenkombination sinnvoll modelliert werden. Doch scheinen auch hier die Reduktionsfehler noch leichten Einfluß zu nehmen. Eine Modellierung der normalen Säkularvariation aus diesen Daten durch Polynome erscheint für das Gebiet Europas trotz Vernachlässigung der Potentialbedingungen ebensogut geeignet.

- Die Existenz von Säkularvariationsanomalien in Europa kann aus der Datenkombination weder nachgewiesen noch widerlegt werden.

Die Frage, ob in Europa regionale Säkularvariationsanomalien existieren kann anhand der Datenkombination regionaler Vermessungen weder direkt, noch mit dem Verfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis geklärt werden. Die Ursachen für dieses negative Ergebnis liegen wahrscheinlich in den großen Reduktionsfehlern und der zeitlichen und räumlichen Inhomogenität der Daten.

- Ausblick: Verbesserungsvorschläge für regionale magnetische Vermessungen.

Als Ausblick für die Zukunft können aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit Verbesserungsvorschläge für zukünftige regionale Vermessungen gemacht werden:

Zunächst wäre eine zeitliche Abstimmung regionaler magnetischer Vermessungen der einzelnen Länder wünschenswert, um solche Daten effektiver für die Untersuchung der Säkularvariation im kontinentalen Maßstab nutzen zu können. Eine gute zeitliche Auflösung erscheint dabei zunächst wichtiger als eine hohe räumliche Auflösung. Der Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Vermessungen sollte fünf Jahre nicht übersteigen, damit eine sinnvolle Interpolation der Zeitreihen der Vermessungen möglich ist.

Das wichtigste ist jedoch eine sorgfältige Reduktion der Daten über ruhige Nachtwerte um die großen Fehler wegen des magnetischen Tagesganges zu vermeiden. In den IAGA-Empfehlungen für Säkularpunktvermessungen [Newitt et al., 1996] werden geeignete Maßnahmen beschrieben.

In Deutschland werden in Zukunft statt unregelmäßiger Landesvermessungen echte Säkularpunktvermessungen durchgeführt werden. Dabei sollen die Reduktionsfehler durch mindesten vierundzwanzigstündige Registrierung eines Variometers an den Meßpunkten verkleinert werden.

Es erscheint durchaus vorstellbar, daß doch Säkularvariationsanomalien existieren, die sich mit dem Verfahren der Spherical Cap Harmonic Analysis feststellen lassen würden, wenn einheitlichere Daten mit kleineren Reduktionsfehlern zur Verfügung stünden.

## Summary

The aim of this thesis was to investigate geomagnetic secular variation in Europe using data from regional magnetic surveys, in particular to determine whether or not secular variation anomalies exist in Europe. The method of spherical cap harmonic analysis was to be tested and used for modelling secular variation and detecting possible anomalies.

The main results are as follows:

- Global normal field models provide a poor representation of secular variation for the relatively small region of Europe. Therefore a model was developed which is better suited to the demands of this work.

To investigate anomalies, a reference normal field must first be known. Further, normal secular variation is needed in this work for reducing the results of different regional magnetic surveys to common epochs. Neither the undisturbed internal main field nor its secular variation can be measured directly, so a model is necessary. Different normal field models were compared and tested for their consistency with the recordings of the European geomagnetic observatories. This showed that global normal field models like IGRF and GSFC do not represent secular variation in Europe sufficiently accurately. Therefore a regional model was specially developed for reducing the data, using polynomial regression of the recordings of the European observatories.

- The combined dataset consists of results from regional magnetic surveys of 13 European countries between 1950 and 1996. The available data is highly nonuniform in both space and time. Some of the data have large errors due to reduction procedures.

Results of regional magnetic surveys for the time span from 1950 to 1996 could be obtained for 13 European countries. Such surveys are carried out independently by every country; consequently for the purposes of this study the data are highly nonuniform in space and time.

The spatial inhomogeneity arises from the difference between magnetic ground vector surveys and magnetic repeat station surveys. Ground vector surveys are carried out on a dense measurement grid to determine a detailed description of the magnetic field at single epochs, repeat station surveys are used to study secular variation on a broader spatial scale. Though the two kinds of regional surveys serve different aims, in many countries only one of them is carried out. The spatial inhomogeneity can be overcome by systematically thinning out the results of the more detailed ground vector surveys.

The temporal inhomogeneity also arises from the difference between the two kinds of regional magnetic surveys. Successive ground vector surveys are generally separated by more than ten years, repeat stations are occupied every two to five years. For some countries, few ground vector surveys have been conducted since 1950, so a uniform interpolation in time of all the data from the different countries was not possible. Instead, all data were reduced uniformly to common epochs by a model of normal secular variation. Secular variation was then calculated as the difference between the values of successive epochs for six time intervals of five years between 1965 and 1995.

Little information was available concerning data uncertainties, so an appraisal of different sources of error was carried out. In particular, errors due to the standard reduction of individual measurements from regional magnetic surveys to annual mean values often seem to be underestimated. These errors can be up to 20 nT in the results of a regional survey and, because they are partly systematic, could be up to 40 nT in secular variation values calculated as differences. The main cause of the reduction errors is the difference in amplitude of the solar quiet daily variation of the magnetic field between the point of measurement and the observatory that is used for the reduction. The differences in amplitude vary with the geographic distance between the locations.

- Using the method of spherical cap harmonic analysis, secular variation can be modelled fairly well from the combination of regional survey data in five year intervals for the time span from 1965 to 1995.

The method of spherical cap harmonic analysis was tested and used to investigate and model the combined regional survey data. This method is related to spherical harmonic analysis, but by using different basis functions it can be applied to an arbitrary spherical cap without requiring knowledge of the field distribution over the rest of the sphere. As with conventional spherical harmonics, the higher the degree of the harmonics, the shorter the wavelength structure that can be represented.

Numerical tests showed that the method is generally stable with respect to normally distributed errors in the data. However, when applying the method to the real data, numerical instabilities appeared at higher harmonic truncation levels, possibly because the errors are not normally distributed but at least partly systematic. Thus, only the normal secular variation at low degrees of the harmonics could be modelled for all the five year intervals of the combination of regional magnetic survey data. The reduction errors still seem to have a slight influence on the models. Modelling normal secular variation from the combined dataset by polynomials seems to be just as suitable for Europe, even if this method does not make use of the assumption that the field is a potential field.

- The existence of secular variation anomalies can be neither proven nor refuted from the combination of regional magnetic surveys.

The question whether or not secular variation anomalies exist in Europe can not be answered, either directly or by applying spherical cap harmonic analysis. The reasons for this negative result lie in the large reduction errors and the spatial and temporal inhomogeneity of the dataset.

- Future prospects: Suggestions for improvements of regional magnetic surveys.

This work suggests possible improvements to the procedures for future regional magnetic surveys.

It would be desirable to coordinate the regional surveys of neighbouring countries to make the results more useful for investigating secular variation over a continental scale, for which good temporal resolution is of greater importance than high spatial resolution. The time interval between successive surveys should be no longer than five years to allow a reasonable interpolation of the time series.

Of greater importance is the careful reduction of the data using quiet night-time values, to avoid the high reduction errors associated with the solar daily variation of the magnetic field. Proper procedures for this reduction are described in the IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys [Newitt et al., 1996].

Future German surveys will concentrate on real repeat station measurements instead of irregular ground vector surveys. Reduction errors will be reduced by in situ variometer recordings for at least 24 hours at each repeat station.

It seems possible that secular variation anomalies could exist, and that, with more homogenous data with smaller reduction errors, they could be detected using the method of spherical cap harmonic analysis.

## Literaturverzeichnis

- Alexandrescu, M., Gibert, D., Hulot, G., Le Mouel, J.-L., Saracco, G. (1995): Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis; *J. Geoph. Res.*, 100, 12557-12572
- Allredge, L. R. (1983), Varying Geomagnetic Anomalies and Secular Variation, *J. Geophys. Res.*, 88, B11, 9443-9451
- Baldwin, R. T. & Langel, R. (1993), Tables and Maps of the DGRF 1985 and IGRF 1990, IAGA Bulletin N° 54, Saint Maur des Fosses, Frankreich
- Barton, C. E. and Newitt, L. R. (1995), IAGA Regional Magnetic Survey, Chart, and Model Descriptions, 1995 revision, Australian Geological Survey Organisation
- Bouška, J., Bucha, V., Kocí, A. (1959), Geomagnetische Karten der Tschechoslowakischen Republik für die Epoche 1958,0, *Travaux de L'Institut Géophysique de l'Académie Tchèque des Sciences*, No 112, *Geofysikální Sborník*, 245 - 270
- Bucha, V. (1956), The Results of Magnetic Measurements on Points of 2<sup>nd</sup> Order in the Czech Lands for the Epoch 1955.0 (in tschechisch mit englischer Zusammenfassung und tabellierten Werten), *Travaux de L'Institut Géophysique de l'Académie Tchèque des Sciences*, No 50, *Geofysikální Sborník*, 559 - 582
- Bucha, V., Cupal, I. Horáček, J. Undus, A., Podsklan, J. (1993-96), Distribution of the Geomagnetic Field on the Territory of Czechoslovakia for the Epoch 1985.5, *Travaux Géophysiques*, XXXVII, 22 - 49
- Courtillot, V. und Le Mouel, J.-L. (1976) On the Long-Period Variations of the Earth's Magnetic Field From 2 Months to 20 Years; *J. Geoph. Res.*, 81, 2941 - 2950
- DeSantis, A. (1991), Translated origin spherical cap harmonic analysis, *Geophys. J. Int.* 106, 253 - 263
- Fischer, G., Schnegg, P. A., Sesiano, J. (1979), A New Geomagnetic Survey of Switzerland, *Matériaux pour la Géologie de la Suisse*, *Geophysique* No 19, Neuchâtel
- Fischer, G. & Schnegg, P.-A. (1994), Up-dating the Geomagnetic Survey of Switzerland, *Matériaux pour la Géologie de la Suisse*, *Geophysique* No 27, Neuchâtel
- Guterch, A., Grad, M., Materzok, R., Perchuc, E. (1986), Deep structure of the Earth's crust in the contact zone of the Palaeozoic and Precambrian platforms in Poland (Tornquist-Teisseyre Zone), *Tectonophysics*, 128, 251-279.
- Haines, G. V. (1985a), Spherical cap harmonic analysis, *J. Geophys. Res.*, 90, 2583 - 2591
- Haines, G. V. (1985b), Spherical Cap Harmonic Analysis of Geomagnetic Secular Variation Over Canada 1960 - 1983, *J. Geophys. Res.*, 90, B14, 12,563-12,574
- Haines, G. V. (1988), Computer Programs for Spherical Cap Harmonic Analysis of Potential and General Fields, *Computers & Geosciences*, Vol. 14, No. 4, 413 - 447
- Haines, G. V. & Torta, J. M. (1994), Determination of equivalent current sources from spherical cap harmonic models of geomagnetic field variations, *Geophys. J. Int.*, 118, 499 - 514
- Hansen, H. A. (1983), The Geomagnetic Elements in Denmark 1928 - 1980, Veröffentlichung des Dänischen Meteorologischen Instituts, Kopenhagen, 1983

- Jacobs, J. A. (ed., 1987): Geomagnetism, Volume 1 - 4, Academic Press
- Karaczun, K., Karczun, M., Bilinska, M., Uhrynowski, A. (1978), Mapa Magnetyczna Polski, Anomalie składowej pionowej „Z“ pola magnetycznego Ziemi, 1 : 500 000, Instytut Geologiczny, Warszawa
- Kertz, W. (1969), Einführung in die Geophysik I, B.I.- Hochschultaschenbücher Band 275
- Korte, M. (1996), Langperiodische geomagnetische Variationen in Mitteleuropa, Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München
- Langel, R. A., Hinze, W. J. (1998), The magnetic field of the Earth's lithosphere: the satellite perspective, Cambridge University Press
- Le Mouél, J. (1964/1965), Carte Magnetique de France - Anomalies du Champ Total, Centre National de la Recherche Scientifique, Institute de Physique du Globe de Paris
- McLean, S. J., Davis, W. M., Morris, L. D., Meyers, H. (1994): A report on geomagnetic observatories and observations, 1994, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, National Geophysical Data Center, Report SE-52
- McWilliams, J. and Byrne, J. (1966), A Magnetic Survey of Ireland for Epoch 1965.5, Department of Transport and Power, Meteorological Service, Dublin
- Meloni, A., Battelli, O., De Santis, A., Dminici, G. (1994), The 1990.0 magnetic repeat station survey and normal reference fields for Italy, Annali di Geofisica, Vol. XXXVII, N. 5, 949 - 967
- Merrill, R. T. & McElhinny, M. W. (1983): The Earth's Magnetic Field; Academic Press
- Mundt, W. (1973), Der Charakter der geomagnetischen Säkularvariation in Europa im Zeitraum von 1950 bis 1970, Veröff. d. Zentralinst. f. Physik d. Erde, 23
- Mundt, W. (1978), Geomagnetic Secular Variation Anomalies in the GDR, J. Geomag. Geoelectr., 30,523-531
- Mundt, W. (1981), Regionale und lokale Anomalien der geomagnetischen Säkularvariation in Mitteleuropa, Veröff. d. Zentralinst. f. Physik d. Erde, 70 (1), 33-43
- Mundt, W. und Porstendorfer, G. (1977), Zusammenhänge zwischen Analysen der Magnetotellurik und der magnetischen Säkularvariation im Hinblick auf eine Leitfähigkeitsanomalie im oberen Erdmantel Mitteleuropas, Gerlands Beitr. Geophys., 86, 4, 337
- Mundt, W. und Porstendorfer, G. (1978), Mögliche Zusammenhänge zwischen einer elektrischen Leitfähigkeitsanomalie im Erdmantel und anomalen magnetischen Säkularvariationen in Mitteleuropa, Geodät. u. Geo-phys. Veröff. d. NKG, Reihe III, 39, 153-162
- Newitt, L. R., Barton, C. E., Bitterly, J. (1996), Guide for Magnetic Repeat Station Surveys, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder
- Nolte, H. J., Hahn, A. (1992), A model of the distribution of crustal magnetization in central Europe compatible with the field of magnetic anomalies deduced from Magsat results, Geophys. J. Int., 111, 483-496
- Parker, N. E. (1983): Kosmische Magnetfelder, Spektrum der Wissenschaft, 10/1983
- Podsklan, J. (1987), Distribution of the Earth magnetic field on the territory of Slovakia for the epoch 1980.5, Contr. Geophys. Inst. Slov. Acad. Sci., 17, 111 - 140
- Porstendorfer, G., Hassaneen, A.-R., Otto, J. (1979), Modellierungsversuche zur Beeinflussung der magnetischen Säkularvariation durch Inhomogenitäten der elektrischen Leitfähigkeit im Erdmantel, Gerlands Beitr. Geophys., 88, 6, 467-473

- Pucher, R., Wonik, T. (1996), Comment on „An interpretation of the MAGSAT anomalies of Central Europe“ by Taylor and Ravat, *J. Appl. Geophys.*, 36, 213-216.
- Pühringer, A., Seiberl, W., Trapp, E., Pausweg, F. (1975), Die Verteilung der erdmagnetischen Elemente in Österreich zur Epoche 1970.0, *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, Heft 14, Publikation Nr. 205, Wien
- Sabaka, T. J., Langel, R. A. Baldwin, R. T., Conrad, J. A. (1997), The Geomagnetic Field 1900 - 1995, Including the Large-Scale Field from Magnetospheric Sources, and the NASA Candidate Models for the 1995 Revision of the IGRF, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 157 - 206
- Schmucker, U. (1985): Das Magnetfeld der Erde, in *Landolt-Börnstein, Gruppe 5: Geophysik und Weltraumforschung*, Bd. 2: Geophysik der festen Erde, des Mondes und der Planeten, Springer-Verlag
- Schulz, G., Beblo, M., Best, A., Auster, V., Gropius, M. (1997), Definitive Results of the 1992.5 Geomagnetic Repeat Station Survey of Germany: Normal Field Model and Anomalies, *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 49 (1), 21 - 33
- Spitta, P. (1991), Regional Survey in the Surroundings of Göttingen in Search of Anomalies of Secular Variations, *Münchener Geophysikalische Mitteilungen*, Heft 5, 159-174
- Taylor, P. T., Ravat, D. (1995), An interpretation of the Magsat anomalies of central Europe, *J. Appl. Geophys.*, 34, 83-91
- Toperczer, M. (1968), Die Verteilung der erdmagnetischen Elemente in Österreich zur Epoche 1960.0, *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, Heft 3, Publikation Nr. 187, Wien
- Torta, J. M., García, A., Curto, J. J., De Santis, A. (1992), New representation of geomagnetic secular variation over restricted regions by means of spherical cap harmonic analysis: application to the case of Spain, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 74, 209 - 217
- Uhrynowski, A. (1992), Secular Variations of the Earth Magnetic Field in Poland between 1970 and 1990 (in polnisch, mit englischer Zusammenfassung und tabellierten Werten), *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, Tom XXXIX, zeszyt 1 (87)
- Wonik, T. & Hahn, A. (1989), Karte der Magnetfeldanomalien  $\Delta F$  Bundesrepublik Deutschland, Luxemburg, Schweiz und Österreich (westlicher Teil) 1 : 1 000 000, *Geol. Jb.*, E 43, 3 - 21
- Wonik, T., Galdéano, A., Hahn, A., Mouge, P. (1992), Magnetic Anomalies, Atlas Map 10 and 11, in „A continent revealed, The European Geotraverse“, edited by Derek Blundell, Roy Freeman and Stephen Mueller, Cambridge University Press

## Anhang I

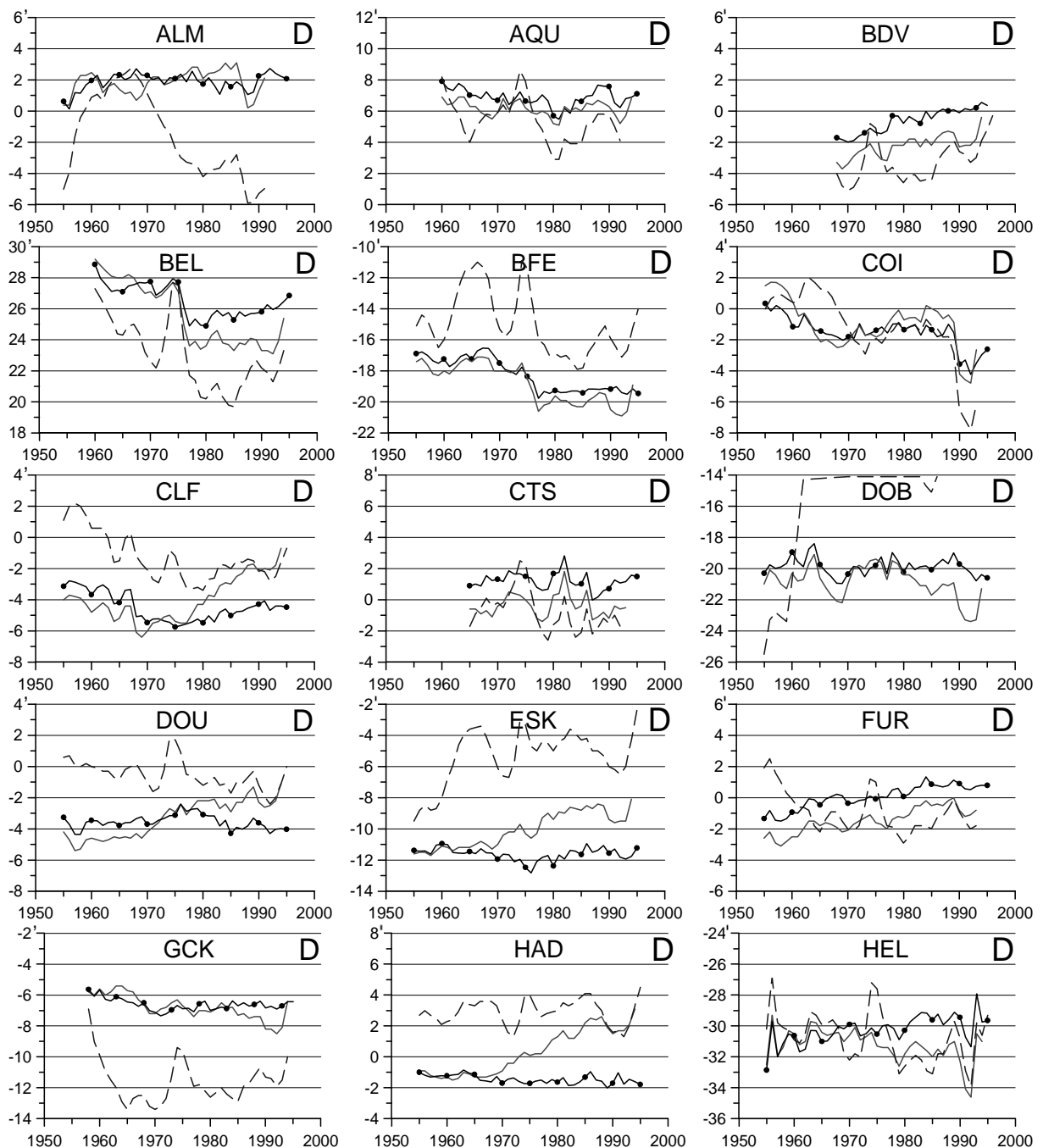
Die in dieser Arbeit verwendeten Daten regionaler magnetischer Vermessungen wurden freundlicherweise von folgenden Instituten zur Verfügung gestellt:

- Dänemark: Danish Meteorological Institute, Kopenhagen
- Deutschland: Adolf-Schmidt-Observatorium für Geomagnetismus Niemeck, GeoForschungsZentrum Potsdam;  
Geophysikalisches Observatorium Fürstfeldbruck, Ludwig-Maximilians-Universität München;  
Erdmagnetisches Observatorium Wingst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
- Frankreich: Observatoire de Chambon-la-Forêt, Institut de Physique du Globe de Paris
- Großbritannien: British Geological Survey, Edinburgh
- Irland: Meteorological Service, Valentia Observatory
- Italien: Istituto Nazionale di Geofisica, Rome
- Österreich: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien
- Polen: IGIK Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw
- Schweiz: Institut de Géologie, Gr. de Géomagnétisme de l'Université, Observatoire Cantonal, Neuchâtel
- Slowakische Republik: Geomagnetic Observatory Hurbanovo, Slovak Academy of Science
- Spanien: Instituto Geográfico Nacional, Madrid
- Tschechische Republik: Geophysical Institute, Academy of Science, Prague
- Ungarn: Eotvos Lorand Geophysical Institute Budapest

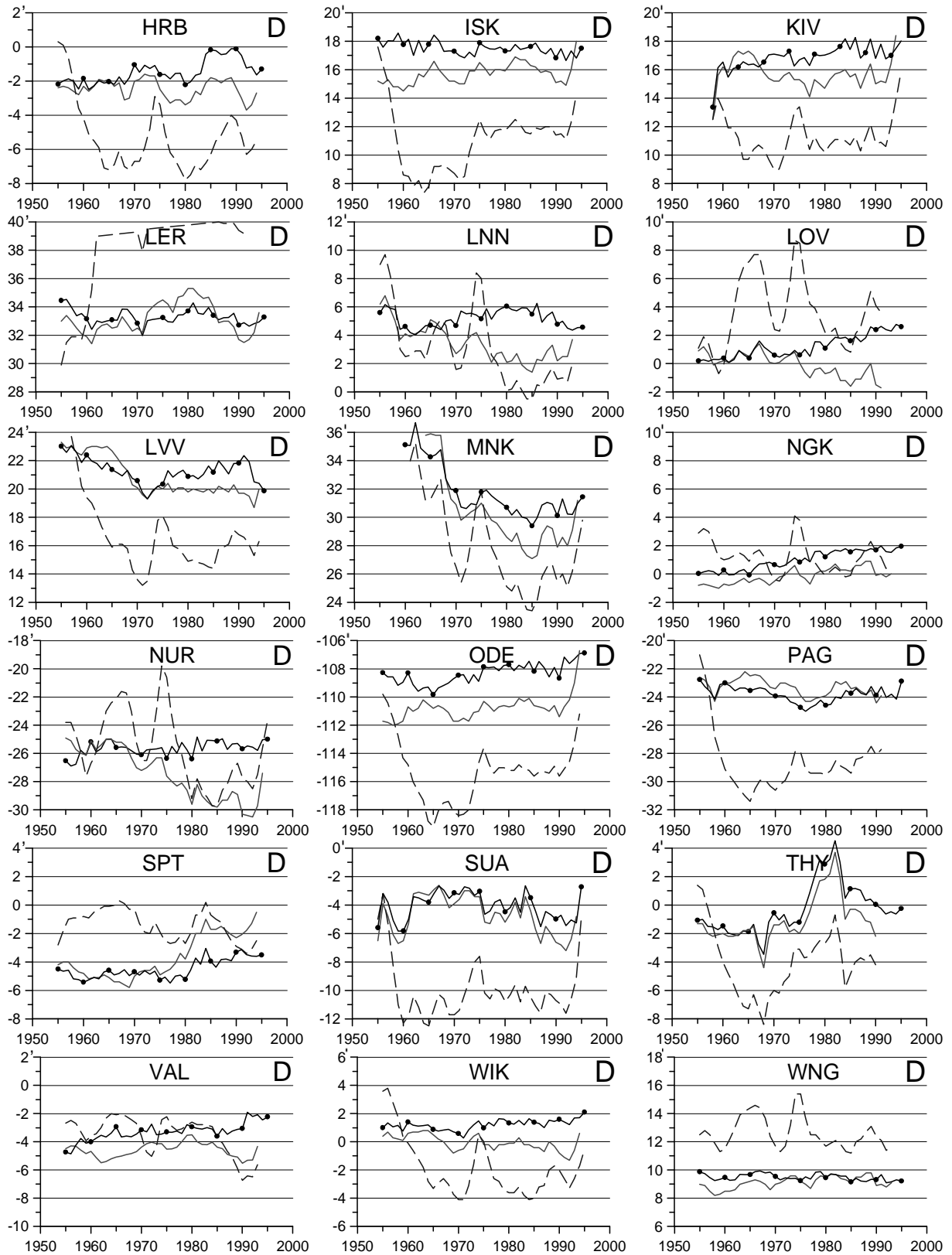
## Anhang II

Hier sind die vergleichenden Differenzen zwischen Observatoriumsregistrierungen und Werten verschiedener Normalfeldmodelle an den gleichen Orten für alle 33 verwendeten europäischen Observatorien in den Komponenten Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität dargestellt (vgl. Kap. 2.3 und 2.4 bzw. Abb. 2.2 und Abb. 2.5). Gestrichelte Kurven: Observatoriumswerte minus IGRF-Werte; durchgezogene Kurven: Observatoriumswerte minus GSF-C-Werte; Kurven mit Punkten: Observatoriumswerte minus Werte des Polynom-Normalfelds.

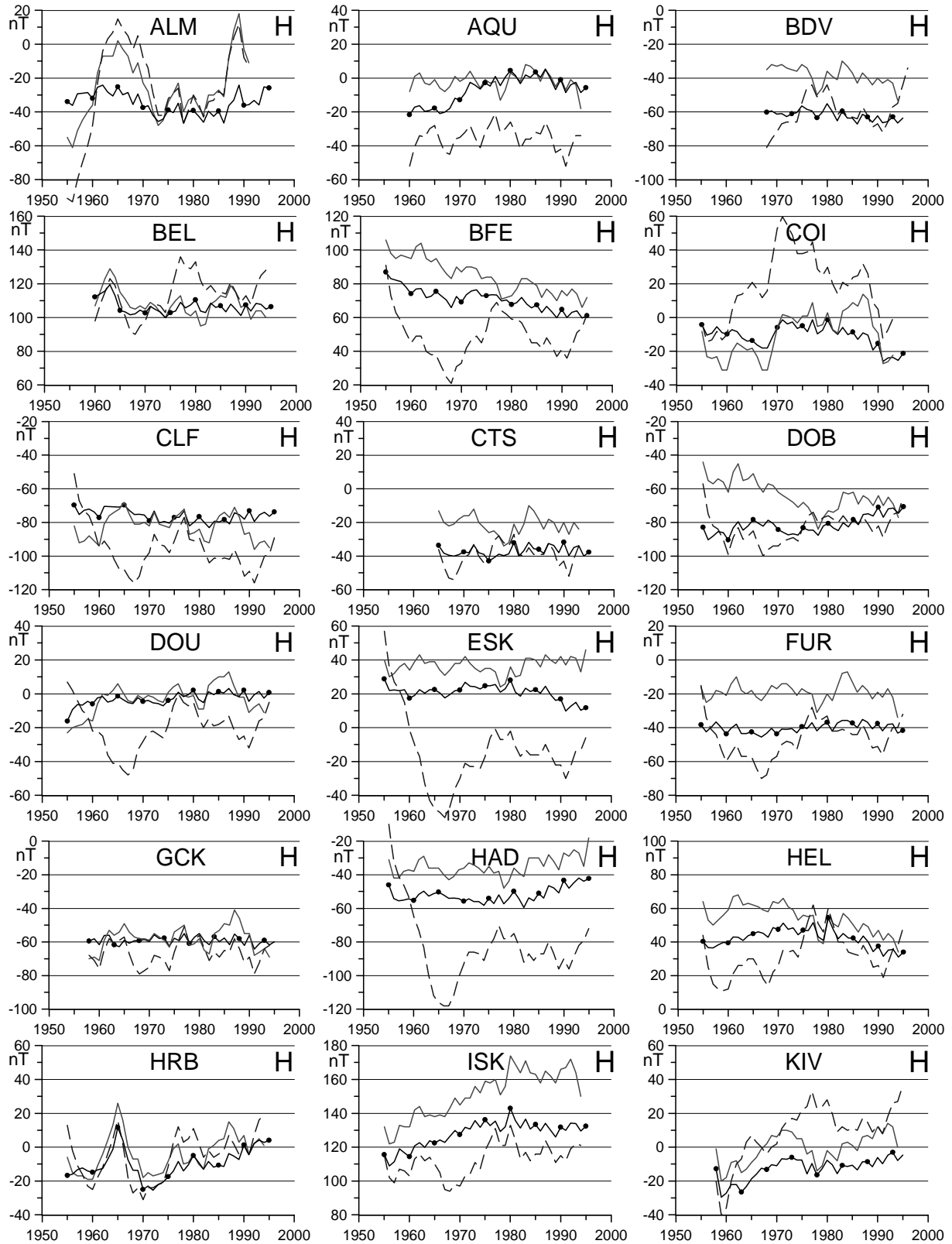
### Deklination:

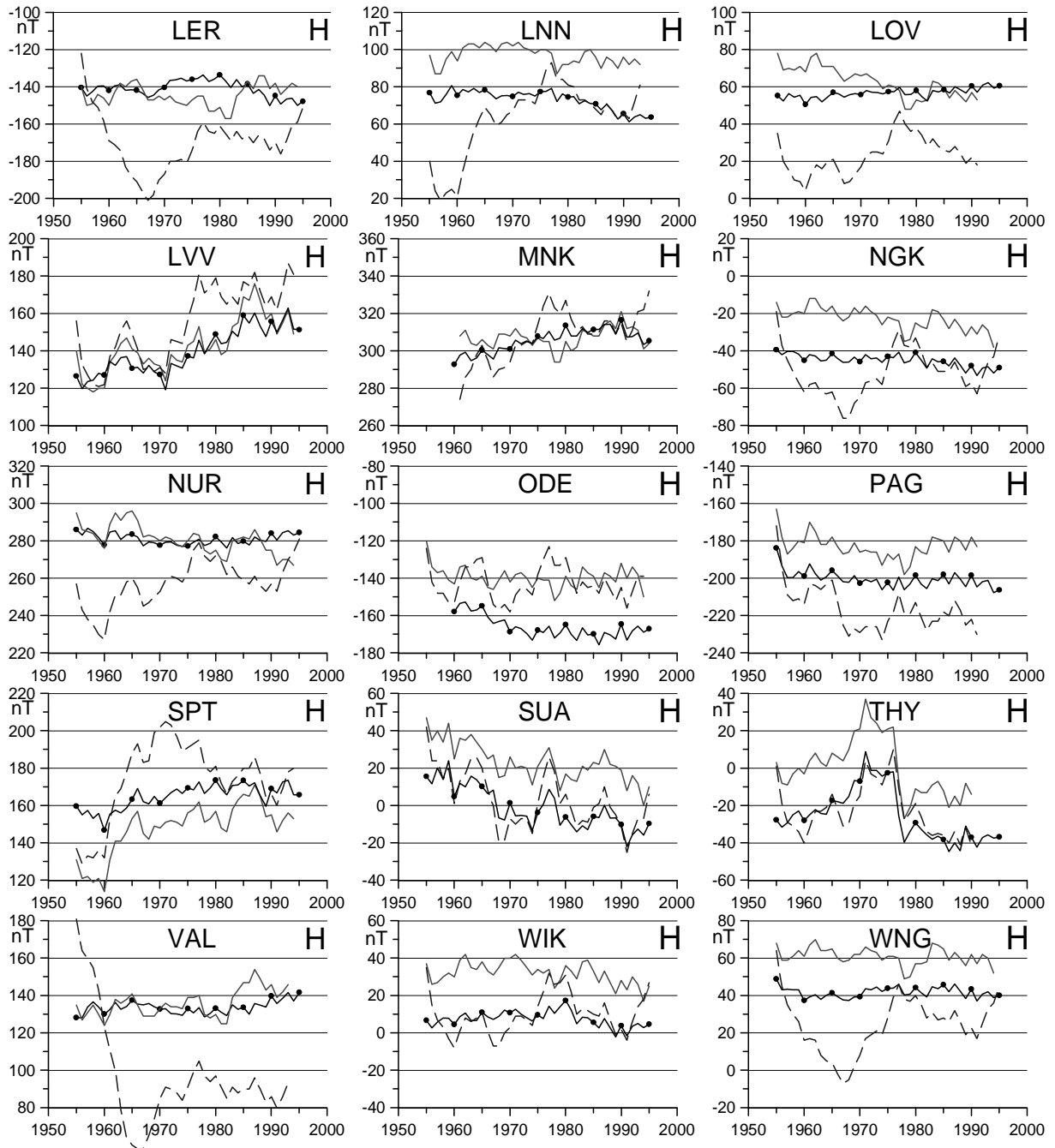




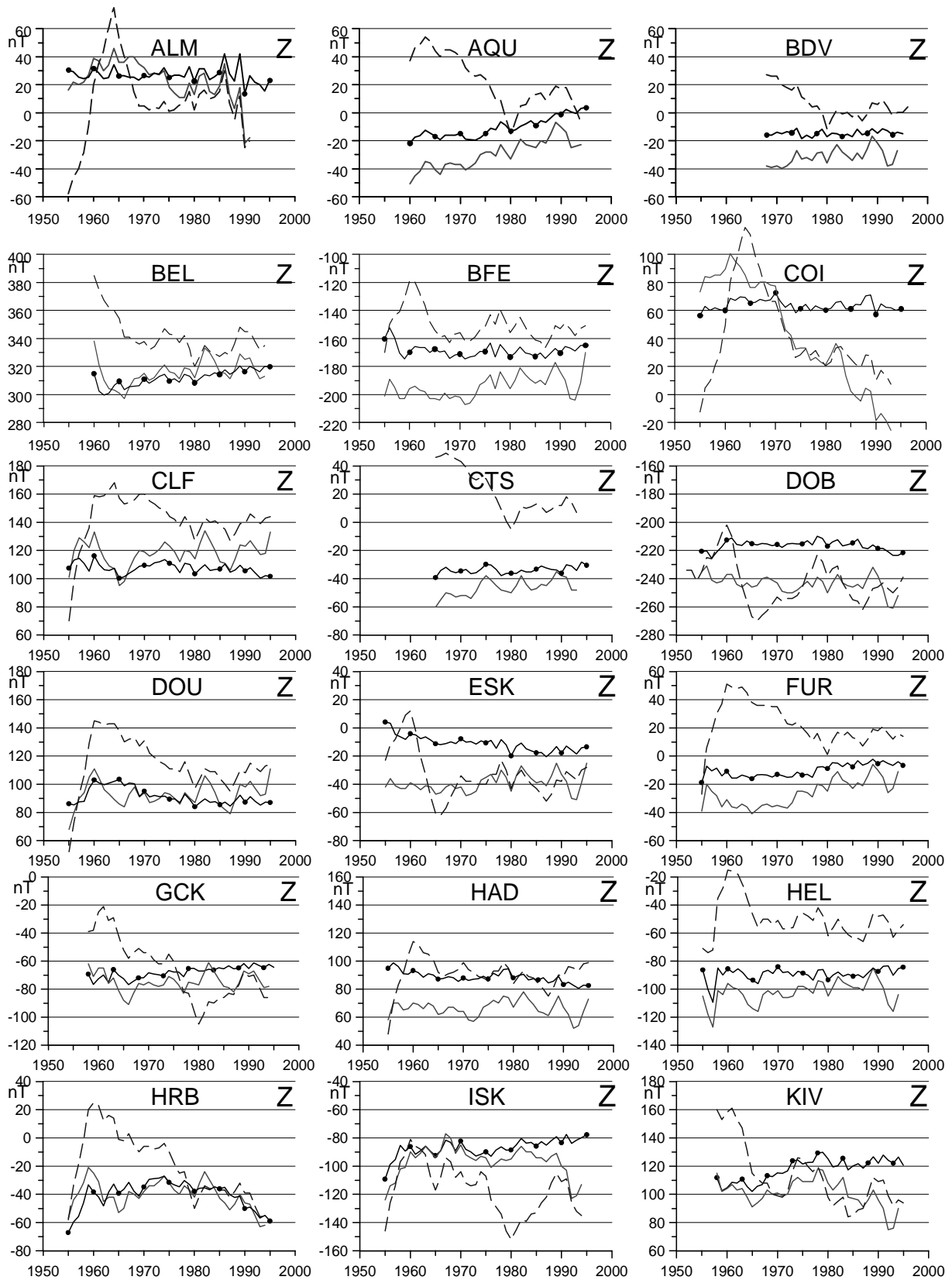


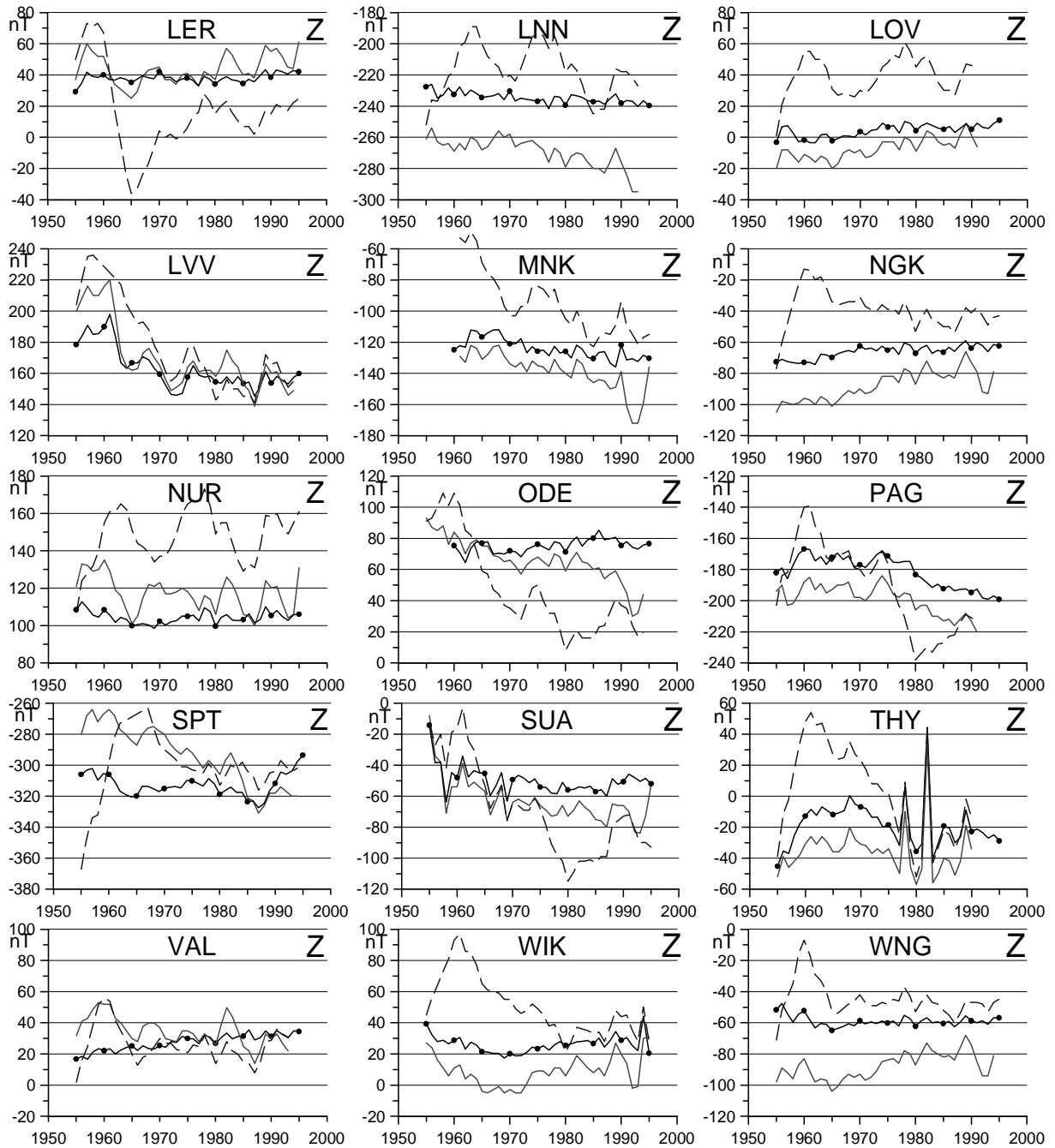
**Horizontalintensität:**





**Vertikalintensität:**





### Anhang III

Tabellen der synthetischen Jahresmittelwerte, die zur Erstellung des Normalfeldmodells für fehlende Observatoriumswerte ergänzt wurden (Kap. 2.4)

Observatorium	Jahr	D in °	H in nT	Z in nT
ALM	1992	-203,7	26950	33310
	1993	-196,6	26977	33296
	1994	-189,5	27033	33281
	1995	-182,5	27055	33277
AQU	1955	-119,8	23483	38287
	1956	-113,5	23483	38334
	1957	-108,7	23494	38360
	1958	-103,7	23510	38387
	1959	-98,7	23520	38408
BDV	1955	-109,7	19930	42538
	1956	-103,8	19927	42576
	1957	-99,2	19936	42603
	1958	-94,5	19949	42631
	1959	-89,0	19975	42655
	1960	-84,5	19986	42687
	1961	-80,5	20009	42708
	1962	-76,4	20031	42723
	1963	-72,4	20043	42744
	1964	-68,9	20059	42759
	1965	-66,3	20077	42770
	1966	-63,2	20087	42789
BEL	1955	93,1	18829	44740
	1956	99,0	18816	44771
	1957	101,9	18817	44805
	1958	105,6	18822	44848
	1959	109,1	18830	44879
CTS	1955	-160,8	21486	40603
	1956	-154,5	21486	40650
	1957	-149,7	21497	40676
	1958	-144,7	21513	40703
	1959	-139,7	21523	40724
	1960	-134,9	21535	40754
	1961	-130,8	21560	40776
	1962	-126,4	21583	40795
	1963	-121,9	21597	40817
	1964	-118,0	21616	40832

Observatorium	Jahr	D in °	H in nT	Z in nT
GCK	1955	20,0	22422	40423
	1956	24,8	22414	40469
	1957	28,9	22417	40502
KIV	1955	267,9	19354	44978
	1956	271,3	19339	44017
	1957	273,9	19337	45057
MNK	1955	288,7	17753	46139
	1956	292,1	17738	46178
	1957	294,7	17736	46228
	1958	297,2	17737	46263
	1959	299,4	17740	46293
	1960	301,9	17745	46333
PAG	1992	148,3	23651	40099
	1993	151,3	23655	40116
	1994	155,0	23651	40141
	1995	160,3	23658	40161
THY	1991	112,2	21412	42504
	1992	115,2	21420	42522
	1993	119,4	21426	42540
	1994	124,0	21427	42567
	1995	128,9	21434	42588

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Komponentendarstellung des Erdmagnetfelds und einige geometrische Beziehungen der Komponenten	3
Abb. 1.2 Schematische Darstellung des geomagnetischen Hauptfelds [nach Kertz, 1969].	4
Abb. 1.3 a) Selbsterhaltender Scheibendynamo [Parker, 1983] b) Kopplung zweier Dynamos [Merrill und McElhinny, 1983].	5
Abb. 1.4 Säkulare Änderung der Deklination, Horizontal- und Vertikalintensität des Erdmagnetfelds an den drei deutschen Observatorien Fürstenfeldbruck (FUR), Niemegek (NGK) und Wingst (WNG) von 1940 bis 1996.	6
Abb. 1.5 $S_q$ -Stromsystem der Ionosphäre [aus Kertz, 1969]	6
Abb. 1.6 Beispiele für externe Variationen in den einzelnen Magnetfeldkomponenten: Registrierung der Komponenten D, H und Z des geomagnetischen Observatoriums Fürstenfeldbruck an einem ruhigen Tag und zu Beginn eines magnetischen Sturms	6
Abb. 1.7 Weltweite Verteilung erdmagnetischer Observatorien, Stand 1994 [aus McLean et al., 1994].	8
Abb. 2.1 Vergleich von gemessenen Werten und Modellwerten der Komponenten Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität am Beispiel der Observatorien Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT).	11
Abb. 2.2 Differenzen zwischen Observatoriumswerten und Modellwerten, Beispiele Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT).	12
Abb. 2.3 Lage der zur Berechnung des Normalfeldmodells verwendeten Observatorien und Fläche des Modells.	13
Abb. 2.4 Koeffizienten B, C und F (vgl. Formel (2.2)) der Normalfeldpolynome für Deklination, Horizontalintensität und Vertikalintensität im Zeitraum 1970 bis 1990.	16
Abb. 2.5 Differenzen zwischen gemessenen Observatoriumswerten und Werten des Polynom-Normalfeldes, Beispiele Lvov (LVV), Niemegek (NGK) und San Pablo (SPT). Deklination D, Horizontalintensität H und Vertikalintensität Z.	17
Abb. 2.6 Vergleich des Polynom-Normalfeldmodells und des GSFC-Modells am Beispiel der Deklination und Vertikalintensität 1980.5 für Europa.	18
Abb. 2.7 a) Normalfeld als Polynom 3. Ordnung aus Totalintensitätswerten der Observatorien b) Normalfeld der Totalintensität berechnet aus H- und Z-Polynom-Normalfeldern c) Differenzen zwischen den Normalfeldern a) und b)	19
Abb. 2.8 Isoporendarstellung des normalen Säkularvariationsmodells für den Zeitraum 1985.5 bis 1990.5. Komponenten Deklination D, Horizontalintensität H, Totalintensität F, Ostkomponente Y, Nordkomponente X und Vertikalkomponente Z.	19
Abb. 2.9 Einzelne regionale Normalfelder der Länder Frankreich, Deutschland und Polen aus Vermessungsdaten zur Epoche 1992.5.	20
Abb. 3.1 Reduktion eines Meßwertes einer regionalen Vermessung auf einen Jahresmittelwert mit Hilfe einer Observatoriumsregistrierung.	22
Abb. 3.2 Beispiel zum Fehler von einzelnen Landesvermessungswerten durch Reduktion auf eine gemeinsame Epoche.	24
Abb. 3.3 Tagesgänge der Nord-, Ost- und Vertikalkomponente der Observatorien Belsk (BEL), Chambon-la-Forêt (CLF), Fürstenfeldbruck (FUR), Wingst (WNG) und Niemegek (NGK).	26

Abb. 3.4 Differenzen der Tagesgänge verschiedener europäischer Observatorien nach Abzug der jeweiligen Tagesmittelwerte für einen ruhigen (10.06.1997) und einen gestörten (27.06.1997) Tag, Nord-, Ost- und Vertikalkomponente.	27
Abb. 3.5 Netze der im Zeitraum 1955 bis 1996 mindestens zweimal vermessenen Säkular- und Landesvermessungspunkte. Die geomagnetischen Observatorien sind durch Punkte und ihre Stationscodes gekennzeichnet.	31
Abb. 3.6 Einfache Interpolation der regionalen Vermessungsdaten: Nord-, Ost- und Vertikalkomponente	40
Abb. 3.7 Residuen der Meßwerte zu den interpolierten Feldern der Abb. 3.6.	41
Abb. 4.1 Magnetische Anomalien aus regionalen magnetischen Vermessungen (Säkularpunkte und Landesvermessungen), zum Teil durch zu große Punktabstände stark verzerrt.	44
Abb. 4.2 Anomalien der magnetischen Totalintensität $F$ aus Daten der EGT [Wonik et al., 1992].	45
Abb. 4.3 Karte der Anomalien der magnetischen Totalintensität $F$ im Gebiet der früheren Bundesrepublik Deutschland mit großtektonischen Einheiten. [aus Wonik und Hahn, 1989]	46
Abb. 4.4 Anomalien der magnetischen Totalintensität in 400 km Höhe aus MAGSAT-Daten [aus Taylor und Ravat, 1995].	48
Abb. 4.5 Magnetische Anomalien (zum Teil stark verzerrt) aus Punktnetz der Kombination der regionalen Vermessungen Europas für drei Epochen.	49
Abb. 4.6 Residuen zwischen Säkularvariationen als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Nordkomponente.	52
Abb. 4.7 Residuen zwischen Säkularvariationen als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Ostkomponente.	53
Abb. 4.8 Residuen zwischen Säkularvariationen als Differenz der Meßwerte und Werten der Säkularvariation des europäischen Normalfeldmodells an den Punkten der Datenkombination der europäischen regionalen Vermessungen für die Fünfjahresintervalle, Kriging-Interpolation, Vertikalkomponente.	54
Abb. 4.9 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Nordkomponente.	55
Abb. 4.10 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Ostkomponente.	56
Abb. 4.11 Säkularvariationsabweichungen der sechs Fünfjahresintervalle zwischen 1965.5 und 1995.5 für die Punkte der Datenkombination regionaler magnetischer Vermessungen, Vertikalkomponente.	56
Abb. 5.1 Legendrefunktionen für die Kugel (oben) und eine Kugelkappe (Bsp. $\theta_0 = 9^\circ$ , unten). [aus De Santis, 1991]	61
Abb. 5.2 Rand der Kugelkappe mit halbem Öffnungswinkel $14^\circ$ , Mittelpunkt $47^\circ\text{N}$ , $5^\circ\text{E}$ und Punktnetz der Kombination regionaler magnetischer Vermessungen Europas.	64
Abb. 5.3 Mittlere Anpassungsfehler (rms-Werte) für verschiedene halbe Öffnungswinkel der SCHA.	64
Abb. 5.4 Einfluß von normalverteilten Fehlern bei SCHA.	65
Abb. 5.5 Ergebnisse der Modellierung der externen Koeffizienten beim Versuch der Trennung von externen und internen Anteilen der als Differenz von regionalen Vermessungen bestimmten Säkularvariation am Beispiel des Zeitintervalls 1980.5 - 1985.5.	66
Abb. 5.6 rms-Wert für unterschiedliche maximale Ordnungen $k_{\max}$ der SCHA.	68
Abb. 5.7 SCHA-Modell der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 mit maximaler Ordnung $k_{\max} = 10$ (oben) und $k_{\max} = 8$ (unten) für die Komponenten X, Y und Z.	69
Abb. 5.8 Hauptfeldmodellierung durch SCHA aus der Datenkombination der regionalen magnetischen Vermessungen.	71
Abb. 6.1 Darstellung der Säkularvariation 1985.5 - 1990.5 mit verschiedenen Interpolationsmethoden.	73



Abb. 6.2 SCHA-Modell der Säkularvariation der Nordkomponente in Fünfjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5, $k_{\max}=4$ , $\theta_0=14^\circ$ .	75
Abb. 6.3 SCHA-Modell der Säkularvariation der Ostkomponente in Fünfjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5, $k_{\max}=4$ , $\theta_0=14^\circ$ .	76
Abb. 6.4 SCHA-Modell der Säkularvariation der Vertikalkomponente in Fünfjahresintervallen von 1965.5 bis 1995.5, $k_{\max}=4$ , $\theta_0=14^\circ$ .	77
Abb. 6.5 rms-Wert für unterschiedliche maximale Ordnungen $k_{\max}$ der SCHA für die Säkularvariationsabweichungen 1980.5 - 1985.5 und 1985.5 - 1990.5.	78
Abb. 6.6 Säkularvariationsabweichungen aus Spherical Cap Harmonic Analysis für unterschiedliche maximale Ordnung $k_{\max}$ der Werte des Intervalls 1985.5-1990.5 (oben) und für das Intervall 1980.5-1985.5 (unten).	81

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1 Übersicht über externe Variationen [nach Schmucker, 1985].	7
Tab. 2.1 Übersicht über die 33 Observatorien, die für die Berechnung des Normalfelds verwendet wurden, sowie deren Anomaliekorrekturwerte.	14
Tab. 2.2 Mittlere Residuen der Observatoriumswerte gegenüber Polynom-Normalfeldern mit verschiedenen hohen Ordnungen der Polynome für Deklination, Horizontal- und Vertikalintensität.	17
Tab. 3.1 Übersicht über regionale magnetische Vermessungen der europäischen Länder.	32
Tab. 3.2 Übersicht, welche Säkularpunkt- und Landesvermessungsdaten der europäischen Länder zur Reduktion auf die gemeinsamen Epochen verwendet wurden.	37
Tab. 3.3 Übersicht über die Daten der berechneten Fünfjahresintervalle der Säkularvariation.	37
Tab. 5.1 Minimale Wellenlänge $\lambda_{\min}$ , Anzahl der möglichen Koeffizienten N und Anzahl der bestimmten Koeffizienten NC bei Signifikanzlevel $F=3,5$ für verschiedene maximale Ordnungen $k_{\max}$ der SCHA.	68
Tab. 5.2 Vergleich der rms-Werte für mit Polynom-Modell reduzierte Daten (rms-Werte 1) und mit GSFC reduzierte Daten (rms-Werte 2) für SCHA mit $\theta_0=14^\circ$ , $k_{\max} = 4$ .	70
Tab. 6.1 Anzahl der Meßwerte, rms-Werte und Anzahl signifikanter Koeffizienten bei SCHA der Datenkombination mit $\theta_0 = 14^\circ$ , $k_{\max} = 4$ für die Fünfjahresintervalle der Säkularvariation zwischen 1965 und 1995.	78

## **Danksagung**

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. Haak, der nicht nur die Anregung zu dieser Arbeit gab, sondern sie auch durch fruchtbare Diskussionen unterstützte.

Herrn Prof. Dr. Götze danke ich dafür, daß er als zweiter Gutachter für diese Arbeit zur Verfügung stand.

Bei Herrn Dr. Best möchte ich mich besonders für die Unterstützung bei der Datenakquisition zu Beginn der Arbeit bedanken. Herrn Fredow, der für die Auswertung der deutschen Landesvermessungen zuständig ist, danke ich für die geduldige Beantwortung aller diesbezüglichen Fragen.

Für die Bereitstellung der Ergebnisse regionaler magnetischer Vermessungen der einzelnen Länder danke ich den jeweiligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der im Anhang I genannten Institute.

Herrn Prof. Dr. Glaßmeier und Olaf Amm danke ich für einige hilfreiche Tips zur Anwendung der Methode der Spherical Cap Harmonic Analysis.

Für die Überlassung eines an der FU Berlin entwickelten Computerprogramms zur Interpolation und Filterung von Daten danke ich Frau Dr. Schmidt. Das Programm wurde zwar im Endeffekt nicht für die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse verwendet, trug aber doch zum besseren Verständnis einiger Aspekte der Problematik der Inhomogenität der Daten bei.

An letzter Stelle, doch nicht zuletzt, gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Observatoriums Niemeck für die freundliche Hilfsbereitschaft während meiner Arbeit dort. Ebenso möchte ich mich bei meinen Potsdamer Kolleginnen und Kollegen für das gute Arbeitsklima bedanken.