

# FRANKFURTER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Serie D · Physische Geographie

Band 21

**Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung  
bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten**

von  
Klaus Friedrich

Herausgegeben vom Fachbereich Geowissenschaften  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt  
Frankfurt am Main 1996

Frankfurter geowiss. Arb.	Serie D	Bd. 21	258 S.	49 Abb.	13 Tab.	20 Kt.	Frankfurt a. M. 1996
---------------------------	---------	--------	--------	---------	---------	--------	----------------------

ISSN 0173-1807  
ISBN 3-922540-55-4

## Schriftleitung

Dr. Werner-F. Bär  
Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität,  
Postfach 11 19 32, D-60054 Frankfurt am Main

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Geowissenschaften der  
Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Die Deutsche Bibliothek - CIP Einheitsaufnahme

### **Friedrich; Klaus:**

Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung  
bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten / von Klaus  
Friedrich. Hrsg. vom Fachbereich Geowissenschaften der  
Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt. - Frankfurt  
am Main : Inst. für Physische Geographie, 1996

(Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten : Ser. D,  
Physische Geographie ; Bd. 21)  
Zugl.: Frankfurt (Main), Univ., Diss., 1995  
ISBN 3-922540-55-4

NE: Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten / D

A l l e R e c h t e v o r b e h a l t e n

ISSN 0173-1807

ISBN 3-922540-55-4

## **Anschrift des Verfassers**

Dipl. Geogr. Dr. Klaus Friedrich, Hessisches Landesamt für Bodenforschung,  
Leberberg 9, D-65193 Wiesbaden  
E-mail:k.friedrich@mail.hlfb.de

## **Bestellungen**

Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität,  
Postfach 11 19 32, D-60054 Frankfurt am Main  
Telefax (069) 798 - 2 83 82

## **Druck**

F. M.-Druck, D-61184 Karben

## **Kurzfassung**

Mit der großflächigen Verfügbarkeit Digitaler Höhenmodelle (DHM) gewinnt die digitale geomorphographische Reliefgliederung zunehmend interdisziplinäres Interesse, insbesondere in der Bodengeographie und der Geologie. Mit der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Verfahren zur Reliefgliederung im Hinblick auf die räumliche Differenzierung von bodenkundlich und geologisch relevanten Reliefeinheiten für die Mittelgebirgslandschaft vorgestellt.

Es wird zunächst die Eignung des hessischen DHM im Hinblick auf die geomorphographische Abbildung des Reliefs kritisch untersucht. Die Bedeutung einzelner geomorphographischer Basisattribute, wie z. B. Neigung, Exposition Horizontal- und Vertikalwölbung, werden dargelegt. Diese dienen als Eingangsdaten für die digitale Reliefgliederung. Mit den vorgelegten Verfahren zur Reliefanalyse ist es möglich, homogene Reliefeinheiten abzuleiten, die eine deutliche Übereinstimmung mit der flächenhaften Ausprägung von Boden und Geologie aufweisen.

## **Abstract**

Geomorphological relief classification is increasingly used as an interdisciplinary tool in soil science and geology, as digital elevation models (DEM) become available for large areas world-wide. This study compares different methods of geomorphological relief classification. They are tested for their ability to localise homogeneous areas, significant for soil-units or geological formations.

The quality of the DEM of Hesse (one of the federal states of Germany) is analysed according to its representation of geomorphological features. The classification of the relief is based on parameters derived from the DEM such as slope, aspect, plan and profile curvature. The complexity of relief analysis models, shown in this study, varies from simple classification methods to methods using multivariate statistics. The result shows a high correlation between geomorphological entities, derived from the DEM, and soil units.



## Vorwort

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand auf Anregung meines Lehrers Prof. Dr. Dr. h. c. A. Semmel, dem ich für die fachliche Förderung und die Betreuung danke. Herrn Dr. Thews danke ich als Projektleiter am Hessischen Landesamt für Bodenforschung, insbesondere für die organisatorische Unterstützung zur Durchführung der Arbeit.

Für die Überlassung von Höhendaten danke ich dem Hessischen Landesvermessungsamt. Die Verwendung der Höhendaten wurde unter dem Genehmigungsvermerk 5616B-LA12-7/92 zur Verfügung gestellt.

Für die freundliche Aufnahme und stetige Unterstützung danke ich insbesondere Dr. Vorderbrügge sowie allen Mitarbeitern des Dezernates Bodenkunde am Hessischen Landesamt für Bodenforschung. Für fachliche Diskussionen bin ich Prof. Dr. Dikau (Univ. Bonn) sowie Herrn Köthe und Dr. Lehmeier (Univ. Göttingen) zu Dank verpflichtet.

Meine Fragen zu mathematischen, insbesondere zu statistischen Problemen, wurden von Prof. Dr. Wakolbinger und Dr. Ferebee vom Mathematischen Institut der Universität Frankfurt stets beantwortet. Vor allem für die Umsetzung von methodischen Ansätzen danke ich ganz besonders Herrn D. Metzler.

Die Herren M. Kohleis und C. Tilli haben während der Geländearbeiten und der Datenerfassung einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet. Auch Ihnen sei herzlich gedankt.

Die vorliegende Arbeit wurde für zwei Jahre von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Titel "Automatisierte Kartierung periglazialer Deckschichten" gefördert. Ihr sei an dieser Stelle gedankt.

Weiterhin danke ich dem Fachbereich Geowissenschaften für die Aufnahme dieser Arbeit in die Frankfurter geowissenschaftlichen Arbeiten und hier insbesondere der Schriftleitung Herrn Dr. W. - F. Bär.

Für die viele Geduld und Rücksicht, vor allem in der Endphase der Arbeit, danke ich meiner Frau und meinen Kindern.



## Inhaltsverzeichnis

Seite

<b>1 Einleitung</b>	15
1.1 Problemstellung	16
<b>2 Ausprägung und räumliche Variabilität des oberflächennahen Untergrundes</b>	20
2.1 Definition und Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes	20
2.2 Reliefabhängige Variabilität periglazialer Deckschichten	23
<b>3 Auswahl der Untersuchungsgebiete</b>	27
3.1 Geographischer und geologischer Überblick zu den Untersuchungsgebieten	32
<b>4 Das Digitale Höhenmodell als Datengrundlage der Relieffanalyse</b>	35
4.1 Datenmodell und Aufbereitung von Höhendaten	36
4.2 Das hessische Digitale Höhenmodell (DHM)	44
4.2.1 Zur Qualität des hessischen Digitalen Höhenmodells	44
4.2.2 Bewertung des Digitalen Höhenmodells im Hinblick auf die Relieffanalyse	50
4.3 Ableitung geomorphometrischer Reliefparameter	53
4.3.1 Ermittlung nachbarschaftsbezogener geomorphometrischer Reliefattribute	55
4.3.2 Ermittlung komplex-analytischer Reliefattribute	60
4.3.3 Ableitung von Faktoren aus Reliefattributen	63
4.3.4 Ableitungen aus Fenstertechniken	64
4.4 Methodische Ansätze zur Relieffgliederung	65
<b>5 Gesetzmäßigkeiten zur reliefabhängigen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes</b>	69
5.1 Boden- und Deckschichtenverbreitung im Arbeitsgebiet Oberreifenberg	69
5.2 Aufbau einer Flächendatenbank Boden/Deckschichten	72
5.3 Analyse von deckschichtenbeschreibenden Flächeneinheiten	74
5.4 Auswertung von Boden- und Deckschichtenkarten mit Hilfe digitaler Reliefdaten	76
5.4.1 Diskussion der Auswertungsergebnisse	85

<b>6 Methoden zur Reliefgliederung im Hinblick auf die räumliche Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes</b>	90
6.1 Reliefanalyse zur Ausgrenzung von Senkenbereichen	95
6.1.1 Methodische Beschreibung	95
6.1.2 Abgrenzung von Senken- und Hangbereichen	99
6.2 Reliefgliederung durch Klassifizierung von Reliefformelementen	103
6.2.1 Methodische Beschreibung	104
6.2.2 Anwendung des Klassifikationsverfahrens	108
6.3 Anwendung multivariater Distanzverfahren zur Gliederung homogener Reliefeinheiten	113
6.3.1 Anwendung eines iterativen Clusterverfahrens zur Bildung reliefbezogener Raumtypen	114
6.3.2 Gliederung von homogenen Reliefeinheiten mit Hilfe eines raumbezogenen iterativen multivariaten Distanzverfahrens	121
6.3.2.1 Methodische Beschreibung	121
6.3.2.2 Datenvorbehandlung und Einstellungsparameter	125
6.3.2.3 Anwendung des Verfahrens mit multivariaten Daten	131
6.4 Relative Massenbilanz der solifluidalen Hangüberformung	136
6.4.1. Methodische Beschreibung	140
6.4.2 Die Reliefanalyse mit Hilfe der relativen Massenbilanz	142
6.5 Diskussion der Verfahren zur geomorphographischen Reliefgliederung	146
6.5.1 Die Reliefanalyse im Hinblick auf die Ausgliederung deckschichten- und bodenrelevanter Flächeneinheiten	151
6.5.2 Anmerkungen zur historischen Bodenerosion	157
<b>7 Zusammenfassung</b>	160
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	167
<b>9 Anhang</b>	179



## Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1	Gliederung quartärer Deckschichten in der Bodenkarte 1 : 25 000	29
Abb. 2	Lage der Arbeitsgebiete	30
Abb. 3	Abgeleitete Höhenlinien aus DHM bei Verwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren	38
Abb. 4	Einfluß der Auflösung des DHM auf die Reliefabbildung	39
Abb. 5	Schnittprofile durch ein Tal, erstellt aus DHM mit unterschiedlicher Auflösung	40
Abb. 6	Vergleich von Tiefenliniennetzwerken bei unterschiedlicher Auflösung eines DHM (Ausschnitt Blatt 5615 Villmar)	42
Abb. 7	Verteilung von abflußlosen Hohlformen im DHM (Ausschnitt Blatt 5615 Villmar)	43
Abb. 8	Datenquellen des DHM in Hessen	45
Abb. 9	Vergleich Topographische Karte und DHM aus Profildaten mit Schleppfehler (Detailausschnitt TK 25, Blatt 5224 Eiterfeld)	49
Abb. 10	Verteilung und Datendichte unterschiedlicher Datengrundlagen des hessischen Digitalen Höhenmodells	51
Abb. 11	Lagetreue eines DHM zur analogen Karte TK 25 (Detailausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)	53
Abb. 12	Vertikal-, Horizontal- und Querkrümmung, dargestellt an einer Halbkugel als Oberflächenform	57
Abb. 13	Gegenüberstellung der berechneten Horizontalkrümmung (DRM) und eigener Berechnung (PENK), (Ausschnitt Blatt Grävenwiesbach)	59
Abb. 14	Auswertung von rasterbasierenden Flächenobjekten einer Deckschichtenkarte unter Verwendung digitaler Reliefdaten	75
Abb. 15	Verteilung der Krümmung bei Rasterflächenobjekten unterschiedlicher Deckschichtenausprägung	83
Abb. 16	Verfahrensschritte zur Erstellung komplexer geomorphographischer Karten	91
Abb. 17	Hanggliederung nach Diskontinuitäten und Reliefform	93
Abb. 18	Ermittlung von Senkenbereichen durch Talquerprofile	98
Abb. 19	Ausgrenzung von Senkenbereichen und Vergleich mit senkenbereichsrelevanten Bodeneinheiten der Bodenkarte	101
Abb. 20	Größenordnungstypen von Reliefeinheiten	104
Abb. 21	Schematische Darstellung von Formelementen	106

	Seite
Abb. 22 Vergleich einer Klassifizierung der Querkrümmung mit KR-Kriterien von Teilgebieten und des Gesamtgebietes	110
Abb. 23 Verteilung der Cluster-Zentroide mit den standardisierten Variablen Querkrümmung, Vertikalkrümmung und Neigung (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)	117
Abb. 24 Verteilung der Cluster-Zentroide mit den standardisierten Variablen Querkrümmung, Vertikalkrümmung und Neigung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach)	119
Abb. 25 Ableitung homogener räumlicher Einheiten mit Hilfe der Euklidischen Distanz und der complete-linkage-Methode	123
Abb. 26 Transferfunktion für Krümmungsdaten mit unterschiedlichen Konstanten für den Skalenwert 0.5	127
Abb. 27 Funktion zur Transformation der Neigung	134
Abb. 28 Relative Massenbilanz der solifluidalen Hangüberformung im Vertikal- und Horizontalschnitt	139
Abb. 29 Transferfunktion zur Gewichtung von Krümmungsbereichen	141

**Tabellenverzeichnis**

Seite

Tab. 1	Deskriptive Statistik der Horizontal-, Quer- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 76669)	111
Tab. 2	Deskriptive Statistik der Horizontal-, Quer- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)	111
Tab. 3	Deskriptive Statistik zu Krümmungsdaten kleiner Teilgebiete (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach - Teilgebiet 1 u. 2, n = 10000)	111
Tab. 4	Ergebnisse der Clusteranalyse mit den standardisierten Variablen Querkrümmung (QK), Vertikalkrümmung (VK) und Neigung (NEIG) bei 10 Klassen, n = 76720 (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)	116
Tab. 5	Ergebnisse der Clusteranalyse mit den standardisierten Variablen Querkrümmung (QK), Vertikalkrümmung (VK) und Neigung (NEIG) bei 10 Klassen, n = 91204 (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach)	118

## Verzeichnis des Anhangs

### Abbildungen

- Abb. A1 Mittelwerte und Standardabweichung verschiedener Reliefparameter, getrennt nach Deckschichteneinheiten (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)
- Abb. A2 Relative Häufigkeit der Exposition (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A3 Relative Häufigkeit der Neigung in Grad (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A4 Relative Häufigkeit der Vertikalkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A5 Relative Häufigkeit der Querkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A6 Relative Häufigkeit der Horizontalkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A7 Relative Häufigkeit der Flußkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A8 Relative Häufigkeit der Größe des Einzugsgebietes (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A9 Relative Summenhäufigkeit der Exposition, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A10 Relative Summenhäufigkeit der Neigung, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A11 Relative Summenhäufigkeitsverteilung der Größe des Oberflächeneinzugsgebietes, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A12 Relative Summenhäufigkeit der Horizontalkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A13 Relative Summenhäufigkeit der Querkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A14 Relative Summenhäufigkeit der Vertikalkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten
- Abb. A15 Quotient der relativen Häufigkeit aus DS-Einheit und Grundgesamtheit der Exposition, Neigung und Größe des Einzugsgebietes, getrennt nach Deckschichteneinheiten (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A16 Quotient der relativen Häufigkeit aus DS-Einheit und Grundgesamtheit für die Krümmungsradien (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)
- Abb. A17 Relative Häufigkeit von Vertikal- und Querkrümmungsradien innerhalb Krümmungsklassen des anderen Krümmungsschnittes (Wölbungsradius in m, Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

- Abb. A18 Zusammenhang der Exposition und der Neigung im Arbeitsgebiet Oberreifenberg
- Abb. A19 Einfluß der Transferkonstante auf das Klassifizierungsergebnis (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, Kartiergebiet 2)
- Abb. A20 Einfluß des Generalisierungsgrades auf das Klassifizierungsergebnis (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, Kartiergebiet 2)

### Tabellen

- Tab. A1 Auszug aus der Kopfdatentabelle BK 5716 Oberreifenberg NO
- Tab. A2 Auszug von Datenfeldern aus der Horizontdatentabelle BK 5716 Oberreifenberg NO
- Tab. A3 Korrelationsanalyse geomorphometrischer Reliefattribute Arbeitsgebiet Oberreifenberg (konvergent/konkave Formen)
- Tab. A4 Korrelationsanalyse geomorphometrischer Reliefattribute Arbeitsgebiet Oberreifenberg (divergent/konvexe Formen)
- Tab. A5 Deskriptive Statistik ausgewählter Variablen für das gesamte Arbeitsgebiet Oberreifenberg und für einzelne Deckschichteneinheiten
- Tab. A6 Ergebnisse einer Clusteranalyse der Mittelwerte von abgeleiteten Reliefeinheiten mit den Variablen Querkrümmung (QK) und Vertikalkrümmung (VK)
- Tab. A7 Kreuztabelle der Quer- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)
- Tab. A8 Kreuztabelle der Horizontal- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)

### Übersichten

- Üb. A1 Verwendete Programmmodule des DRM (BAUER 1985)
- Üb. A2 Entwickelte Programmmodule
- Üb. A3 Schlüssel zur Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes

**Karten**

- Karte 1 Boden- und Deckschichtenkarte, Arbeitsgebiet Oberreifenberg
- Karte 2 Klassifizierung der Exposition, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 3 Klassifizierung der Hangneigung, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 4 Klassifizierung der Vertikalkrümmung, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 5 Klassifizierung der Querkrümmung, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 6 Klassifizierung der Flußkrümmung, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 7 Klassifizierung der Horizontalkrümmung, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 8 Klassifizierung der Einzugsgebietsgröße, Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg
- Karte 9 Klassifizierung der Horizontalkrümmung nach KR-Kriterien, Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgebiet)
- Karte 10 Klassifizierung der Querkrümmung nach KR-Kriterien, Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgebiet)
- Karte 11 Klassifizierung der Querkrümmung mit gleitendem KR-Kriterium  
Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgebiet)
- Karte 12 Klassifizierung der Krümmung in Formelemente, Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgebiet)
- Karte 13 Klassifizierung von Reliefeinheiten - iteratives Clusterverfahren -  
(Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)
- Karte 14 Klassifizierung homogener Reliefformen; raumorientiertes multivariates  
Distanzverfahren, Variablen: Querkrümmung - Einzelauswertung  
(Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)
- Karte 15 Klassifizierung homogener Reliefformen; raumorientiertes multivariates  
Distanzverfahren, Variablen: Querkrümmung, Vertikalkrümmung  
(Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)
- Karte 16 Klassifizierung homogener Reliefformen; raumorientiertes multivariates  
Distanzverfahren, Variablen: Querkrümmung, Vertikalkrümmung, Neigung  
(Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)
- Karte 17 Bodenkarte Kartiergebiet 1, Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)
- Karte 18 Bodenkarte Kartiergebiet 2, Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)
- Karte 19 Klassifizierung der rel. Massenbilanz der solifluidalen Hangüberformung  
(Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)
- Karte 20 Klassifizierung der rel. Massenbilanz der solifluidalen Hangüberprägung  
(Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)

## 1 Einleitung

Mit den zunehmenden Belangen des Bodenschutzes nehmen auch die Anforderungen an bodenkundliche Basisdaten sprunghaft zu. Dies spiegelt sich schon im Maßnahmenkatalog zum Bodenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1987) wider. Für Fragen des Bodenschutzes im Hinblick auf konkrete Maßnahmen ist die Verfügbarkeit flächenhafter Daten eine Grundvoraussetzung. Die bodenkundlichen Kartenwerke sind dabei ein wesentlicher Bestandteil, da sie die Grundlage für flächenhafte Aussagen zur Bodenbeschaffenheit und -funktion innerhalb des Landschaftshaushaltes darstellen. Die Verfügbarkeit vor allem großmaßstäbiger Bodenkarten ist jedoch bundesweit noch unbefriedigend. Für Hessen liegen derzeit 28 Blattschnitte im Maßstab 1 : 25 000 vor, was etwa 16 % der Landesfläche entspricht. Auch die z. Zt. in der Fertigstellung befindliche BÜK 200 schafft hier nur in sehr eingeschränkter Weise Abhilfe.

Aufgrund der unbefriedigenden Situation hinsichtlich der Verfügbarkeit großmaßstäbiger Bodenkarten forderte KNEIB schon 1979 eine kartierungsunterstützende, systematische Auswertung aller verfügbaren Datengrundlagen zur Beschleunigung der bodenkundlichen Landesaufnahme. Dieser Forderung wurde vor allem im Rahmen des Aufbaus des Niedersächsischen Bodeninformationssystems Rechnung getragen (HEINEKE et al. 1988; HENNINGS & SPONAGEL 1991; KLEEFISCH 1993; OELKERS 1993). Als wichtige Datengrundlagen sind hierzu z. B. Bodenschätzungsdaten und forstliche Standortkartierung zu nennen. Eine Verarbeitung dieser Datengrundlagen erfordert jedoch im Hinblick auf die Einbindung in ein Bodeninformationssystem eine Verfügbarkeit als digitale Datenbestände. In Hessen sind z. Zt. die Bodenschätzung sowie die forstliche Standortkartierung nicht oder nur sehr eingeschränkt als digitaler Datenbestand verfügbar. Für einen systematischen sowie großräumigen Einsatz ist der Aufwand einer Digitalisierung sehr hoch, was die Nutzung dieser Informationsgrundlagen auf kleinere Projekte beschränkt.

Neben diesen fachlichen Erhebungsdaten kommt der geomorphographischen Reliefgliederung für die bodenkundliche und geologische Kartierung eine entscheidende Bedeutung zu. Die Anwendung geomorphologischer Arbeitsmethoden hat in Hessen mit seinem hohen Anteil an Mittelgebirgslandschaften schon seit Beginn der Bodenkartierung einen großen Stellenwert und wird in jüngerer Zeit verstärkt als Arbeitsmethode angesehen (SEMMELE 1985b). Zudem bietet die digitale Reliefanalyse ein weitgehend objektives Instrument, das auf Basis einer neutralen Datengrundlage aufgebaut werden kann.

Hierzu liegen für Hessen flächendeckend Daten in Form eines Digitalen Höhenmodells (DHM) vor. Die Arbeiten von BAUER et al. 1985, DIKAU 1988, KÖTHER 1988 und KÖTHER & LEHMEIER 1993 zeigen Verfahren auf, mit denen eine geomorphographische Reliefanalyse und -gliederung vorgenommen werden kann. Auf Grundlage dieser Datenbestände sowie der methodischen Ansätze stellt die digitale geomorphographische Reliefgliederung für die Kartierung in Hessen derzeit den wichtigsten Ansatz zur Bereitstellung flächenhafter Basisinformationen für die bodenkundliche und geologische Landesaufnahme dar.

Als wesentliches gliederndes Merkmal für den Aufbau und die räumliche Verbreitung von Böden ist der oberflächennahe Untergrund von besonderer Bedeutung. In den Mittelgebirgen Hessens betrifft dies vor allem die periglazialen Deckschichten. Deren Verbreitung und vertikale Abfolge ist in entscheidender Weise von der Reliefsituation abhängig. Damit stellt die systematische Erfassung der pleistozänen Deckschichten ein Grundgerüst für die bodenkundliche Landesaufnahme dar. Im Hinblick auf den Einsatz von geologischen Karten für angewandte Fragestellungen gewinnen die quartären Deckschichten darüber hinaus zunehmendes Interesse auch innerhalb der geologischen Landesaufnahme (vgl. SEMMEL 1994).

Mit der vorliegenden Untersuchung werden Verfahren aufgezeigt und diskutiert, die dem bodenkundlichen und quartärgeologischen Kartierer für die Geländearbeit eine Unterstützung bieten. Hierzu werden Verfahren zur Gliederung bodenkundlich/deckschichtenrelevanter Flächeneinheiten im Rahmen einer Reliefanalyse auf Basis von Digitalen Höhenmodellen vorgelegt.

## 1.1 Problemstellung

Der Zusammenhang von Bodentypen und periglazialen Deckschichten sowie deren Verbreitung innerhalb gesetzmäßiger Toposequenzen waren wesentliche Forschungsergebnisse, die schon mit dem Beginn der Erstellung von Bodenkarten im Maßstab 1 : 25 000 in Hessen erzielt wurden. Hierzu sei vor allem auf die Arbeiten von SEMMEL (1964 u. 1966), SEMMEL & PLASS (1965) verwiesen. Diese Grundlagen zum Thema "Relief, Boden, Gestein" stellen noch heute das Grundgerüst der Bodenkartierung in Hessen dar.

Mit dem Verständnis bezüglich der reliefabhängigen Ausprägung von periglazialen Deckschichten kann vor allem in den Mittelgebirgslandschaften die Kartierung qualitativ und quantitativ verbessert werden. Heute finden die geomorphologischen Ar-



beitsweisen vorrangig bei der Erstellung von Übersichtskarten (BÜK 200) Anwendung. Hierbei werden vor allem Catenen genutzt (MILNE 1936, zit. in SEMMEL 1977:18), um wesentliche Zusammenhänge der Bodenverbreitung in einer Landschaft zu erfassen. Die Ergebnisse werden dann, unter Berücksichtigung des Reliefs und dem geologischen Untergrund, zu einer Bodenübersichtskarte zusammengetragen.

Für den mittel- bis großmaßstäbigen Bereich von 1 : 50 000 bis 1 : 10 000 und darüber hinaus ist jedoch eine differenzierte geomorphologische Reliefbetrachtung nötig, was eine detaillierte flächenhafte Geländearbeit erfordert. Mit der Bereitstellung eines landesweiten Digitalen Höhenmodells (DHM) kann hier die digitale geomorphographische Reliefgliederung einen wichtigen Beitrag zur bodenkundlichen und auch zur geologischen Kartierung leisten. Der Einsatz digitaler geomorphographischer Reliefgliederungsverfahren kann dabei gezielt eingesetzt werden, um relevante Reliefbereiche abzugrenzen.

Aus der Geomorphologie liegen zu diesem Themenbereich bereits methodische Ansätze vor. Diese stellen z. T. erheblich komplexere Verfahren dar als die Klassifizierung von Reliefparametern (z. B. Hangneigungskarte) auf Basis Digitaler Höhenmodelle, wie dies von BAUER (1985) und KAMMERER (1987) vorgestellt wurde. Im Hinblick auf die geomorphographische Reliefgliederung sind hier insbesondere die Arbeiten von DIKAU (1992), KÖTHE (1988) und KÖTHE & LEHMEIER (1993) zu nennen.

Mit der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten der digitalen Reliefgliederung insbesondere im Hinblick auf die bodenkundliche und quartärgeologische Landesaufnahme untersucht. Das Ziel ist die Erstellung von Manuskriptkarten zur räumlichen Reliefgliederung auf Basis geomorphographischer Verfahren. Die Reliefauswertungskarten sollen dem Kartierer vor allem für die Arbeit im Gelände als Informationsgrundlage zur Verfügung stehen. Bei der Entwicklung der Verfahren wird auf die digitale Verfügbarkeit der Ergebnisse für weiterführende methodische Auswertungen geachtet. Der Schwerpunkt liegt jedoch in der Erstellung von Manuskriptkarten, die für eine analoge Interpretation eingesetzt werden sollen.

Damit soll ein Beitrag zur Beschleunigung der Kartierung geleistet werden. Mit der Verfügbarkeit einer objektiven geomorphographischen Raumgliederung liegt darüber hinaus eine Informationsgrundlage vor, mit der eine Qualitätsverbesserung der Kartierung erreicht werden soll. Mit der Nutzung von Digitalen Höhenmodellen und automatisierten Methoden zur Reliefgliederung ist prinzipiell eine schnelle und kostengünstige Bereitstellung dieser Informationsgrundlage möglich.

Die digitale Reliefgliederung dient dabei nicht der Erstellung von Prognosekarten oder -modellen im Hinblick auf die räumliche Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes. Das Relief spiegelt nur einen Faktor hinsichtlich der polygenetischen Entwicklung der Böden wider. Daher darf eine geomorphographische Reliefgliederung nur als eine Interpretationsebene im Hinblick auf diesen Faktor verwendet werden.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt somit auf der Entwicklung und Anwendung von geomorphographischen Methoden. Um den Nutzen dieser Verfahren im gesamten bewerten zu können, ist es jedoch notwendig, eine möglichst umfassende Betrachtung des Themas Reliefanalyse vorzunehmen. Für die Bearbeitung der Gesamtthematik müssen daher folgende Aspekte betrachtet werden:

1. Erfassung wesentlicher geomorphologischer Gesetzmäßigkeiten der räumlichen Differenzierung des oberflächennahen Untergrundes.
2. Überprüfung der Datengrundlage des Digitalen Höhenmodells. Dies muß insbesondere im Hinblick auf die geomorphographische Reliefanalyse und -gliederung erfolgen. Daher ist hier ein Schwerpunkt der Betrachtung auf die Abbildung eines Standortes in seiner lokalen Nachbarschaft zu legen. Die absolute Genauigkeit des DHM ist von geringerer Relevanz.
3. Ableitung von geomorphometrischen Reliefdaten. Für die geomorphographische Reliefanalyse werden geomorphometrische Daten wie Neigung, Wölbung (Krümmung) u. a. benötigt.
4. Erarbeitung von statistischen Zusammenhängen zwischen Deckschichten, Bodenverbreitung und Relief. Im Hinblick auf den Einsatz mathematischer Verfahren zur digitalen geomorphographischen Reliefgliederung müssen die Zusammenhänge von Relief und der Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes auf Basis der zur Verfügung stehenden geomorphometrischen Daten erfaßt werden. Die Ergebnisse sind dabei im Hinblick auf die verwendeten Datengrundlagen DHM und digitale Boden/Deckschichtenkarte zu diskutieren. Erkenntnisse aus einer analogen und statistischen Analyse stellen dabei die Grundlage für die Erstellung von Methoden zur Reliefgliederung.
5. Erarbeitung und Anwendung von geomorphographischen Reliefgliederungsverfahren. Hierzu sind verschiedene Verfahrensansätze im Hinblick auf eine allgemeine geomorphographische Plausibilität zu prüfen. Darüber hinaus ist die Eignung der Verfahren im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung zu erfassen.

Mit dieser umfassenden Betrachtung des Themas wird es möglich, die Anwendung der geomorphographischen Reliefanalyse und -gliederung auch hinsichtlich der praktischen Einsatzmöglichkeiten zu diskutieren. Da neben den Arbeitsergebnissen auch die Anwendbarkeit der Verfahren von großem Interesse ist, muß der Betrachtung der Datengrundlage für die digitale Reliefanalyse ein besonderes Gewicht gegeben werden. Nur mit einer ausreichenden Kenntnis bezüglich der Datenqualität können Ergebnisse der digitalen Reliefanalyse sinnvoll ausgewertet und genutzt werden.

## **2 Ausprägung und räumliche Variabilität des oberflächennahen Untergrundes**

Die Bedeutung des oberflächennahen Untergrundes für den Landschaftshaushalt gewinnt in den letzten Jahren in der wissenschaftlichen Diskussion an Gewicht. Der Schwerpunkt der Bestrebungen liegt in einer systematischen Gliederung der periglazialen Deckschichten, mit der versucht wird, die z. T. unterschiedlichen Ansätze von SCHILLING & WIEFEL (1962), SEMMEL (1964) und ALTERMANN et al. (1977) zu einer Systematik im Hinblick auf die Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., zu vereinheitlichen (vgl. WITTMANN 1991; LORZ 1992:13ff.; ALTERMANN 1993; SEMMEL 1994). Darüber hinaus liegen aber auch eine Vielzahl von regionalen Arbeiten vor (vgl. FRÜHAUF 1985; SPIES 1991).

Damit wird der Bedeutung der periglazialen Deckschichten für das bodengeographische Verständnis (SEMMEL 1968 u. 1977) sowie für die Bodenentwicklung und -funktion (SCHÖNHALS 1974) Rechnung getragen. Die Böden sind in Mittelgebirgslagen fast immer in periglazialen Deckschichten entwickelt (SEMMEL 1977:52). Nach FRIED (1984:35) kann daher "die flächenhafte Verteilung der Böden in einem Raum nur über die Entstehung des Ausgangsmaterials der Bodenbildung verstanden werden, also der Genese der quartären Deckschichten (Schutt- bzw. Löß- und Lößlehmdecken)". Die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes, der reliefbezogene Bodenwasserhaushalt sowie das Mikroklima bestimmen im wesentlichen die boden genetische Differenzierung benachbarter Standorte. Damit wird deutlich, daß die lokalen Bodenformen vor allem von der reliefabhängigen Ausprägung der quartären Deckschichten abhängig sind.

Aufgrund dieses ursächlichen Zusammenhangs Relief - Deckschichtenausprägung liegt es nahe, eine Reliefanalyse im Hinblick auf die räumliche Verbreitung von quartären, insbesondere periglazialen Lockersedimenten vorzunehmen.

### **2.1 Definition und Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes**

Die Gliederung des oberflächennahen Untergrundes in periglaziale, pleistozäne und holozäne Deckschichten ist mit den laufenden Arbeiten zur Neuauflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung schon seit einigen Jahren erneut in das Interesse der bodenkundlichen Diskussion gerückt. Die sich im Laufe der vorliegenden Arbeit stetig wandelnden Begriffe und deren Definition zur Beschreibung periglazialer Deckschichten trugen in den letzten Jahren im allgemeinen eher zu einer Verwirrung als zu einer Klärung des Sachverhaltes bei.

Zunächst wurde versucht, die Definitionen der periglazialen Deckschichten des Entwurfs der Kartieranleitung, 4. Aufl., in die Arbeit einzubinden. Aufgrund der sich stetig wandelnden begrifflichen wie auch inhaltlichen Vorschläge mußte eine Definitionsgrundlage für den Fortgang der Arbeit festgeschrieben werden, die in Anlehnung an SEMMEL (1964, 1966, 1968) und FRIED (1984) vorgenommen wurde. Trotz der Bekanntheit dieser Deckschichtenbeschreibungen erscheint eine erneute Definition an dieser Stelle angebracht, um das Verständnis und die Bedeutung der derzeit unterschiedlich gehandhabten Begriffe für die vorliegende Arbeit zu verdeutlichen. Neben den periglazial bedingten Deckschichten wurde zur Gliederung des oberflächennahen Untergrundes die holozäne Lage sowie die sedimentäre Lage eingeführt, vor allem um den Betrachtungsraum der periglazial geprägten Flächenbereiche abzugrenzen. Für die DV-gerechte Erfassung und Auswertung der Deckschichten wurde ein Symbolschlüssel in Anlehnung an AG Bodenkunde 1982, OELKERS et al. (1984) und PREUSS et al. (1991) erstellt, der die Deckschichtenausprägungen hessischer Mittelgebirge berücksichtigt (s. Tab. A1 im Anhang).

## **Zusammenstellung und Definitionen berücksichtigter Deckschichten**

### **Holozäne Lage (HL)**

Unter dem Begriff der Holozänen Lage sind biogene, fluviatile, äolische sowie anthropogene Ablagerungen des Holozäns zusammengefaßt. Die hier nicht näher untersuchten holozänen Ablagerungen müssen erfaßt werden, um eine räumliche Abgrenzung zu den periglazial geprägten Flächenbereichen vorzunehmen.

### **Decklage (DL)**

Die Decklage ist, mit Ausnahme von Extremstandorten (Felsausbissen u. ä.) und holozän überprägten Flächenbereichen (Aue, Bodenerosion), eine quasi flächendeckende Lage von meist 40 - 70 cm Mächtigkeit. Sie bildet, mit Einschränkungen, die an der Oberfläche anstehende periglaziale Deckschicht. Die Verbreitung betrifft die Periglazialgebiete der letzten Kaltzeit sowie die im ausklingenden Pleistozän periglazial überprägten Glazialgebiete. Ausnahmen bilden Ausgangsgesteine, die nicht zur Schuttbildung neigen. Auf Kalksteinstandorten sind bspw. oft Mullrendzinen direkt auf Kalkstein entwickelt. In solchen Fällen sind häufig keine Hinweise auf Solifluk-tionsprozesse zu finden.

Die DL ist durch solifluidale und/oder solimixtive Prozesse entstanden. Sie ist ein Substratgemisch aus Material der im Prozeßbereich der Solifluktion anstehenden Gesteine und einer äolischen Substratkomponente (Löß, Lößlehm, Sandlöß u. a.). Das

Bodenskelett ist überwiegend hangparallel eingeregelt. Darüber hinaus wird die Basis der DL häufig durch eine Skelett-Sohle gekennzeichnet. Sie kann örtlich zweigeteilt sein (vgl. SEMMEL 1968:83, 88).

Vielfach konnte in der DL das Schwermineralspektrum der Laacher-See-Tephra nachgewiesen werden (SEMMEL 1975:322). Örtlich überlagert die DL auch geringmächtige Lagen der Laacher-See-Tephra. Durch diesen Befund läßt sich die Entstehung in die jüngere Tundrenzeit datieren.

Die DL faßt die Definitionen von SEMMEL (1964, 1966 und 1968) für Deckschutt als skeletthaltige Lage sowie Decksediment als Lage aus feinkörnigem Substrat zusammen.

### **Mittellage (ML)**

Die ML ist eine im Liegenden der Decklage, i. d. R. in konvergierenden Hangbereichen und am Unterhang vorkommende periglaziale, solifluidal und/oder solimixtiv entstandene Lage. Sie steht nur nach Erosion der DL an der Geländeoberfläche an. Die Mächtigkeit variiert sehr stark. Es können häufiger mehrere ML übereinander vorkommen, die sich in der Substratzusammensetzung unterscheiden. Neben den im Prozeßbereich der Solifluktion anstehenden Gesteinen, besteht die ML vorwiegend aus einer äolischen Substratkomponente (Lößlehm). Die Skelettanteile treten i. d. R. gegenüber der hangenden DL und der meist liegenden Basislage zurück. Das Bodenskelett ist überwiegend hangparallel eingeregelt. Die Lage ist frei von Laacher-See-Tephra. Die Mittellage entspricht dem Mittelschutt i. S. v. SEMMEL (1966, 1968).

### **Sedimentäre Lage (SL)**

Die hier aufgenommene SL faßt die meist monogenetischen In-situ-Ablagerungen des Pleistozäns zusammen, die nur bedingt Gegenstand dieser Arbeit sind. Hierzu zählen äolische Sedimente wie Löß, Lößlehm, Sandlöß und Flugsand, aber auch fluviatile Sedimente wie Terrassen- und Hochflutablagerungen.

### **Basislage (BL)**

Die BL ist eine dem anstehenden Gestein aufliegende, weitverbreitete Schuttdecke, die im Liegenden der DL bzw. der ML vorkommt. Nur in stark divergierenden Hangbereichen keilt die BL aus, und die DL ist direkt über dem anstehenden Gestein entwickelt. Die Mächtigkeiten variieren sehr stark und sind vom Ausgangsgestein abhängig. Häufig können vor allem in konvergierenden Hangbereichen mehrere BL übereinander - bis zu mehreren Metern Mächtigkeit - beobachtet werden.

Die BL ist wie die DL und ML durch solifluidale und/oder solimixtive Prozesse entstanden. Das Bodenskelett ist überwiegend hangparallel eingeregelt. Zeitweilig sind aber auch rutschungsartige, ohne eingeregelt Skelett vorkommende BL vorzufinden.

Die BL ist ein Substratgemisch aus Material der im Prozeßbereich der Solifluktion anstehenden Gesteine, ohne Beimischung äolischer Komponenten. Aufgrund der fehlenden äolischen Substratkomponente läßt sich die BL meist gut von DL und ML unterscheiden. Die Basislage entspricht dem Basisschutt i. S. v. SEMMEL (1966, 1968).

## 2.2 Reliefabhängige Variabilität periglazialer Deckschichten

Die Zusammenhänge der reliefabhängigen Ausprägung periglazialer Deckschichten ist schon seit den 60er Jahren bekannt. Hierzu wurden eine Vielzahl von Arbeiten veröffentlicht, die im wesentlichen - für die hessischen Mittelgebirge - auf die Ergebnisse der Arbeiten von SEMMEL (1964, 1966 und 1968), SEMMEL & PLASS (1965) und FRIED (1984) zurückgreifen. Die bodengeographischen Arbeiten wurden hier durch geomorphologische Methoden unterstützt. Vor allem mit Hilfe von Toposequenzen konnten typische Deckschichtenabfolgen in unterschiedlichen Landschaftstypen aufgezeigt werden. Hierbei handelt es sich jedoch i. d. R. um Vertikalschnitte mit meist typischem Profilverlauf, wie sie auch im "nine unit landsurface model" (DALRYMPLE & BLONG & CONACHER 1968) verwendet werden. Diese Betrachtungsweise beinhaltet nur bedingt einen Ansatz für eine flächendeckende Abgrenzung von Reliefeinheiten im 3D-Raum. Die Bedeutung der horizontalen Veränderung der Oberfläche (isohypsenparallel) für die Ausbildung von periglazialen Deckschichten wird zwar mit Begriffen wie Hangmulde, Hangdelle, Rücken u. a. allgemein verdeutlicht, eine systematische Beschreibung der Zusammenhänge, auf die ein Rechenmodell aufbauen könnte, liegt jedoch derzeit nicht vor. Die Auswertung von Bodenkarten bezüglich periglazialer Deckschichten stellt somit die beste Arbeitsgrundlage dar. Jedoch sind auch hier bezüglich der Interpretation Grenzen gesetzt (vgl. Abschn. 3.1).

Für die Anwendung geomorphographischer Reliefanalysen im Hinblick auf die Verbreitung periglazialer Deckschichten lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen. Sie resultieren aus der Auswertung von Literatur, Bodenkarten und Geländebegehungen. Dabei werden hier keine allgemeinen Erkenntnisse resümiert, sondern es soll auf Ergebnisse, insbesondere in Hinsicht auf eine digitale Reliefanalyse, hingewiesen werden. Bezüglich des allgemeinen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur räumlichen Verbreitung von periglazialen Deckschichten sei auf die oben genannten einschlägigen Werke verwiesen.

1. Die Ausprägungen periglazialer Deckschichten an einem Standort werden durch das anstehende Gestein sowie hangaufwärts vorkommender Gesteine bestimmt. Darüber hinaus ist der Aufbau des oberflächennahen Untergrundes durch die lokale Reliefsituation, die Reliefsituation im Prozeßbereich der Solifluktion sowie durch die Hangposition beeinflusst.
  - Neben den reliefbeschreibenden Attributen des betrachteten Standortes, wie bspw. Hangneigung und Exposition, sind daher ggf. auch Größen, die Informationen über den Prozeßbereich der Solifluktion liefern, als wesentlich zu betrachten. Den flächenrelevanten Einflußbereich der Solifluktion für einen beliebigen Standort zu definieren, ist nicht oder nur mit großen Unsicherheiten möglich.
2. Die Ausprägung der Deckschichten ist in starkem Maße neben der Hangposition an Oberflächenformen gebunden. Mit dem Wechsel von Hangformen, z. B. von konvexen zu gestreckten Formen (Oberhang - Mittelhang), liegt häufig eine Veränderung des Deckschichtenaufbaus vor. Dies gilt im Hinblick auf die vertikale Toposequenz aber auch für die horizontale Gliederung. Somit gilt der Beschreibung und Ausgrenzung von 3D-Reliefformen, wie Rücken und Hangdelle, besondere Beachtung. Die Grenzen benachbarter Deckschichteneinheiten sind dabei sehr oft an Reliefdiskontinuitäten gebunden.
3. Die Position des betrachteten Standortes zwischen Scheitellinie (Kulminationslinie) und einem Tiefenbereich sowie die horizontale Reliefsituation (divergierender/konvergierender Bereich) spielen eine entscheidende Rolle für die Deckschichtenausprägung. Die in einer Catena dargestellten idealisierten Profilabfolgen sind durch die horizontale Hanggliederung zusätzlich unterteilt. Zunächst sind die sehr unpräzisen Begriffe Oberhang, Mittelhang und Unterhang DV-technisch schwer zu verwenden. Vielmehr ist die Reliefform entscheidend. So ist mit Oberhang eine vertikal konvexe Hangsituation gemeint, die sich an den Scheitelbereich anschließt. Diese konvexe Vollform kann jedoch im Hangverlauf mehrmals auftreten. So beinhaltet eine Hangstufe, wenn sie erneut in einen gestreckten Hang übergeht, einen ähnlichen Standort wie beim Übergang Scheitelbereich - Hang.

Für die horizontale Hanggliederung zeigt sich z. B., daß stark divergente Formen (Rücken, Sporne) relativ unabhängig von der Hangposition sind und somit auch tiefenliniennah eine geringmächtige skelettreiche Decklage über anstehendem Gestein tragen.

Der Hangposition kommt damit in der kausalen Betrachtung von Toposequenzen zwar eine wesentliche Bedeutung zu, hinsichtlich der lokalen Ausprägung von



Deckschichten sind jedoch die örtlichen Reliefverhältnisse insbesondere extremer Hangformen häufig ausschlaggebend.

4. Der Einfluß von Lößlehm bzw. Löß kann nur bedingt mit der standortnahen Reliefumgebung erfaßt werden, spielt aber für die Ausprägung der periglazialen Deckschichten eine bedeutende Rolle. In vergleichbaren Landschaften kann die räumliche Lößlehm- bzw. Lößverbreitung sehr unterschiedlich vorliegen. Die Höhenlage und die Entfernung zu Liefergebieten ist hier meist entscheidend.

Für die lokale Differenzierung spielt die Exposition eine wichtige Rolle. In vielen Landschaftsräumen ist eine deutliche Asymmetrie der Hangausprägungen oder zumindest der lößlehmbeeinflussten Deckschichtenausprägungen zu finden.

Im mittleren Hangbereich, vor allen in Hangdellen, setzen häufig lößlehmreiche Mittellagen ein. Bei Hangdellen betrifft dies i. d. R. den Übergang vom gestreckten zum konvergenten Hang. Im gestreckten Hang liegt die Grenze im Übergang zum konkaven Unterhang. Zum Teil setzt die Mittellage aber auch im gestreckten Hang ohne geomorphographische Grenze ein.

5. Die Höhenlage zeigt einen deutlichen Einfluß auf die Lößlehmgehalte der periglazialen Deckschichten. Grundsätzlich nimmt der Löß/Lößlehmgehalt mit Abnahme der Höhe und damit Annäherung an die Beckenlandschaften zu. Es konnten aber auch im Taunus nach Kartenauswertung und Geländebefund deutlich lößlehmreichere Gebiete in Höhenlagen von ca. 600 m bis 740 m über NN als in tieferen Regionen von 450 m bis 550 m NN festgestellt werden. Ähnliches gilt für den Vogelsberg. Die Höhenlagen von etwa 600 m bis 740 m befinden sich in den zentralen Bereichen der Mittelgebirge mit relativ geringer Zerschneidung. Lange Hänge mit geringer bis mittlerer Neigung sind hier häufig stark durch Lößlehm beeinflusst. Die oberen, meist steileren Hangbereiche sowie kurze und stärker divergierende Hänge sind dagegen nur gering lößlehmbeeinflusst. Die Hanglänge, unter Berücksichtigung der Höhenlage, der divergierenden und konvergierenden Formen und der Hangneigung, scheint hier für den pleistozänen Lößeintrag und den periglazialen Massentransport eine entscheidende Rolle zu spielen.
6. Die räumliche Varianz von Deckschichtenausprägungen ist sehr hoch. Extreme Wechsel von skelettreichen DL- zu DL/ML/BL-Profilen innerhalb weniger Meter sind keine Seltenheit. Es können für Reliefeinheiten daher nur Leitformen eine Berücksichtigung finden. Dies entspricht jedoch auch der allgemeinen Generalisierung für die Erstellung von Bodenkarten.

Die Solifluktion wie auch die Verspülung führen zu einem lokalen Ausgleich von

Reliefunebenheiten. Die Deckschichtenausprägung ist daher häufig kleinflächig an Paläoreliefssituationen gebunden, die an der heutigen Oberfläche nicht oder unzureichend erkannt werden können.

7. Die Übergänge einzelner Deckschichtenkonstellationen sind, mit Ausnahme extremer Veränderungen, im vertikalen/horizontalen Profilverlauf (bspw. starker Hangknick) fließend.
8. Die Ausprägung der periglazialen Deckschichten ist in wesentlichen Teilen der Mittelgebirge durch eine anthropogene Überprägung beeinflusst. Die historische Bodenerosion muß für große Flächenanteile als ein wesentlicher Faktor für die heutigen Bodengesellschaften angesehen werden.

Diese wesentlichen Gesichtspunkte zur Verbreitung periglazialer Deckschichten zeigen auf, daß eine eindeutige Zuordnung von bestimmten Deckschichtenausprägungen zu entsprechenden Hangformen und -positionen nicht möglich ist. Mit den unterschiedlichen Vorgängen während des Periglazialklimas, wie

Frostverwitterung,  
 Kryoturbation,  
 Solifluktion,  
 Abspülung und  
 äolische Verlagerung durch Deflation und Akkumulation,

liegen unterschiedliche Prozesse z. T. zeitgleich und in verschiedenen Phasen vor. Eine dynamische Modellierung der Hangentwicklung erscheint insgesamt nur für einfache Hangformen realistisch. Für eine Bearbeitung großer Flächenareale ist dieser Ansatz jedoch schon aufgrund der Bereitstellung von Grundlagendaten nicht anwendbar.

Der Beitrag "Reliefanalyse" zur Erfassung der Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes sollte daher möglichst neutral im Sinne einer geomorphographischen Reliefgliederung gehalten werden. Damit kann das Relief im Kontext der landschaftstypischen Besonderheiten der Deckschichtenausprägung eingebunden werden. Dies erfordert jedoch eine Kenntnis zu den regional typischen Deckschichten/Bodenverbreitungen in einem Arbeitsgebiet.

### 3 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Für die Auswahl des Untersuchungsgebietes stellte die Verfügbarkeit großmaßstäbiger Bodenkarten ein wichtiges Kriterium dar. Im Gegensatz zur Interpretation von Hangprofilen können mit der Bodenkarte flächenhafte Auswertungen zur Bodengeographie vorgenommen werden. Durch die 2D-Darstellung der Bodenverbreitung im Zusammenhang mit der Höhendarstellung und dem Schichtbeschrieb steht zur Interpretation eine 3D-Information des oberflächennahen Untergrundes zur Verfügung. Für diesen Zweck eignet sich insbesondere das bodenkundliche Kartenwerk 1 : 25 000, da hierin ein guter Kompromiß zwischen der Darstellung detaillierter lokaler- und regionaler Verbreitung von Böden vorliegt.

Im Gegensatz zu anderen Bundesländern wird in Hessen die geologische Gliederung des oberflächennahen Untergrundes im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme schon seit den 60er Jahren vorgenommen (SEMMELE 1966; PLASS 1968). Die Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes durch die Gliederung der Deckschichten stellt in Hessen bis heute ein wesentliches Kriterium zur Systematik der Bodeneinheiten neben der bodengenetischen Ansprache dar. Gewinnbringend werden dabei geomorphologische Arbeitsweisen im Hinblick auf die Reliefentwicklung eingesetzt (vgl. SEMMELE 1964, 1985b). Das Verständnis der Reliefgenese und damit der Verbreitung periglazialer Deckschichten gibt dem Kartierer ein Arbeitsmittel für die Erfassung der Bodenverbreitung an die Hand, das es ermöglicht, effizient Substrat- und Bodengrenzen zu ermitteln.

Mit der Erfassung von periglazialen Deckschichten kann gegenüber einer vordergründigen bodengenetischen Betrachtungsweise eine umfassendere Systematisierung der Bodenverhältnisse erfolgen. Aber auch für angewandte Fragestellungen, wie bspw. die Kartierung und Bewertung erodierter Standorte, ist die Erfassung und Gliederung des oberflächennahen Untergrundes von herausragender Bedeutung. Die Ausprägung eines "Rankers" bzw. "Regosols" kann in den Mittelgebirgen häufig nur durch Kenntnis der lokalen Deckschichtenverbreitung ggf. als erodierte Bodenform erkannt und somit auch beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Bodenkarte Hessen 1 : 25 000 neben den Geländebefunden genutzt, um die räumliche Verbreitung verschiedener Deckschichten und Deckschichtenkonstellationen in unterschiedlichen Landschaftseinheiten zu erfassen. Insgesamt sind derzeit 28 Blattschnitte im Maßstab 1 : 25 000 veröffentlicht. Darüber hinaus stehen noch weitere 7 Blattschnitte als unveröffentlichte Bodenmanuskriptkarten im gleichen Maßstab zur Verfügung.

Aufgrund der historischen Entwicklung der bodenkundlichen Landesaufnahme sind die Bodenkarten für die Ableitung periglazialer Deckschichten unterschiedlich geeignet. In den Erläuterungen zu den Bodenkarten der 60er Jahre werden die Bodeneinheiten allgemein beschrieben. Durch die subjektive Beschreibung mit unterschiedlichen Schwerpunkten wird eine Ableitung von Deckschichtenausprägungen ohne zusätzlichen Geländeaufwand erschwert oder in nicht nachvollziehbarer Weise dargestellt. Mit den Kartenblättern der 70er und vor allem der 80er Jahre wurden die Erläuterungen der BK 25 für die Beschreibung der Bodeneinheiten zunehmend ergänzt und größtenteils systematisiert. Vor allem der Einsatz der 3. Auflage der bodenkundlichen Kartieranleitung (Arbeitsgruppe Bodenkunde 1982) brachte erhebliche Verbesserungen für die Systematik der Horizontbeschreibung und der geologischen Schichtung von Böden.

Bei der Durchsicht des hessischen bodenkundlichen Kartenwerkes 1 : 25 000 mußte daher festgestellt werden, daß die einzelnen Karten bezüglich der Deckschichteninterpretation schon aus der geschilderten Historie heraus unterschiedlich zu bewerten sind. Die Verwendbarkeit bezüglich einer Auswertung periglazialer Deckschichten ist vor allem bei den älteren Blattschnitten sehr unterschiedlich. Hier kann eine Interpretation i. d. R. nur durch die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung der unterschiedlichen Kriterien zur bodenkundlichen Landesaufnahme erfolgen.

Auf Grundlage des Standes der bodenkundlichen Systematik und der unterschiedlichen Schwerpunkte einzelner BK 25 bezüglich der Gliederung periglazialer Deckschichten wurden die vorliegenden Blattschnitte bewertet. Eine Bewertung der Interpretationsfähigkeit der Bodenkarten bezüglich Deckschichten wurde unter folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

1. Bewertung der allgemeinen Systematik zur Beschreibung der Bodeneinheiten
2. Gliederung der Profilbeschreibungen in geologische Schichten (Deckschichtengliederung)
3. Plausibilität der Boden- und Deckschichtenverbreitung im Hinblick auf das Relief
4. Detailgenauigkeit der Bodenkarte (Maß der Generalisierung zur Darstellung im Maßstab 1 : 25 000)

Dabei ergab sich eine Einordnung bezüglich der Interpretationsmöglichkeiten des Deckschichtenaufbaus in drei Kategorien. Diese sind in nicht bis gut interpretationsfähig gegliedert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 zusammengetragen.

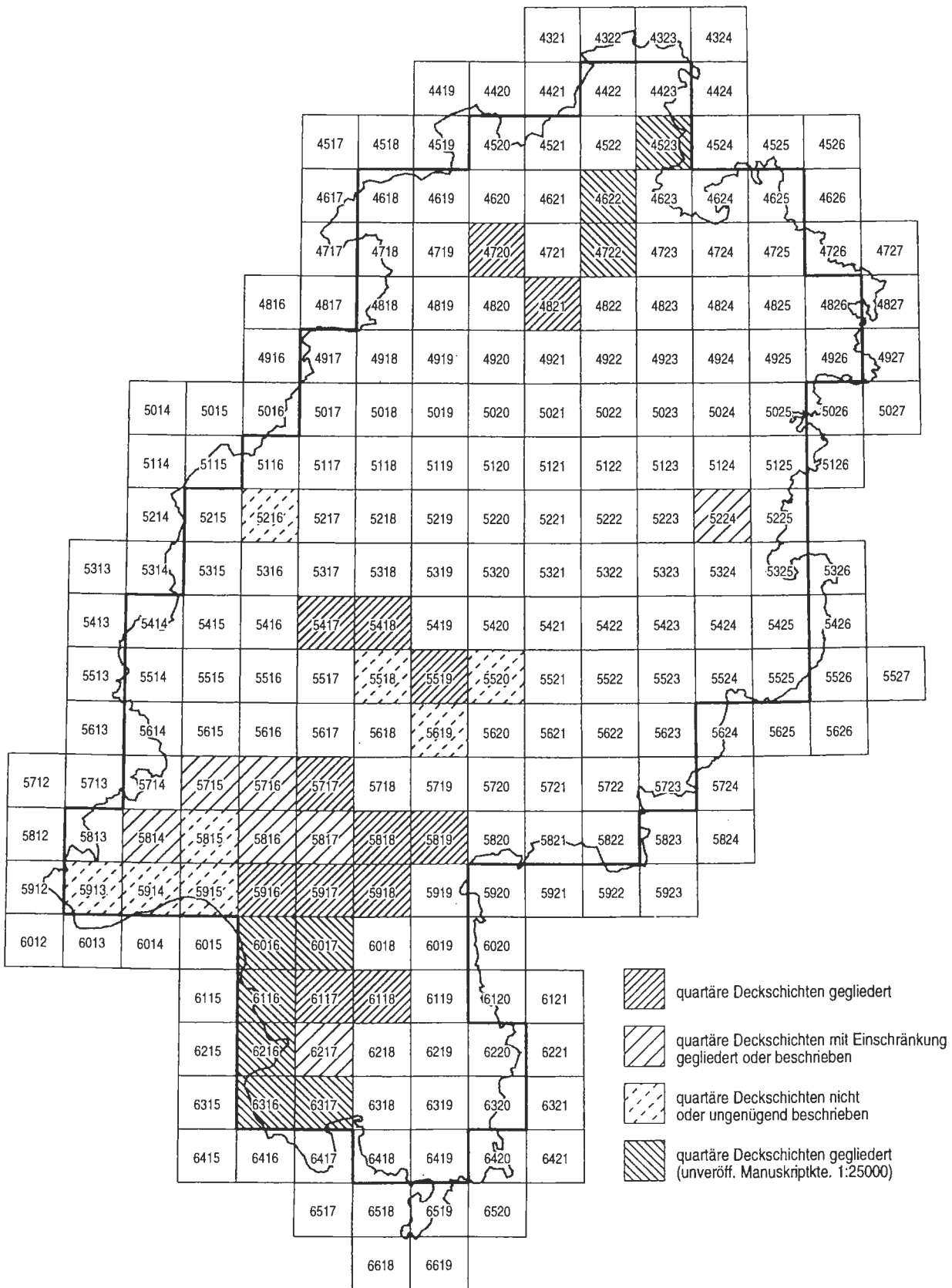


Abb. 1 Gliederung quartärer Deckschichten in der Bodenkarte von Hessen 1:25 000

Mit der Einschränkung des Untersuchungsraumes auf die hessischen Mittelgebirge ist die Anzahl sinnvoll auswertbarer Kartenblätter stark eingeschränkt. Leider sind die weitreichend systematisierten jüngeren bodenkundlichen Karten vor allem in den Beckenlandschaften Hessens zu finden und können so für die vorliegende Untersuchung nur bedingt verwendet werden. Für die Auswertung der Beziehung zwischen Relief und oberflächennahem Untergrund wurden zunächst drei Arbeitsgebiete unter den oben genannten Gesichtspunkten ausgewählt. Grundbedingung war dabei die Verfügbarkeit der Bodenkarte und der Geologischen Karte. Als wichtigstes Kriterium stand weiterhin die Auswertbarkeit der Bodeneinheiten der Bodenkarte bezüglich periglazialer Deckschichten im Vordergrund. Zudem orientierte sich die Auswahl an typischen Reliefbedingungen für die hessischen Mittelgebirge, und es sollten unterschiedliche Regionen untersucht werden.

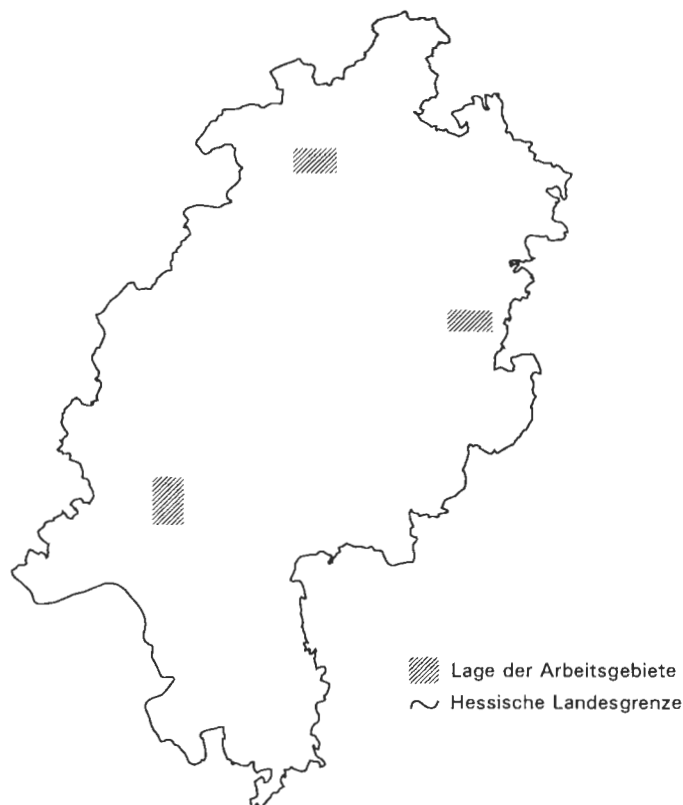


Abb. 2 Lage der Arbeitsgebiete

Die Auswahl und Bearbeitung der Arbeitsgebiete erfolgte zunächst unter den fachlichen Gesichtspunkten der Deckschichtenverbreitung. Die angestrebte Auswertung der Gebiete mit Hilfe digitaler Höhenmodelle stellte sich im nachhinein jedoch als problematisch heraus.

Für die Arbeitsgebiete Waldeck und Eiterfeld mußte nach ersten Auswertungen der vorliegenden DHM festgestellt werden, daß die Datengrundlagen für eine intensive

DV-gestützte Reliefauswertung nicht oder nur sehr eingeschränkt verwendet werden konnten. Für den mittel- und nordhessischen Raum liegen DHM auf Basis von Profildaten vor. Insbesondere für die - im Hinblick auf das Relief und die Bodenverbreitung ausgewählten - Arbeitsgebiete liegen beim Hessischen Landesvermessungsamt derzeit Höhenmodelle in ungenügender Qualität vor. Über die generelle Problematik zur Datengrundlage "DHM" wird in Kapitel 4 berichtet.

Aufgrund der nur eingeschränkt nutzbaren Datengrundlage DHM werden die Arbeitsergebnisse schwerpunktmäßig am Beispiel des Arbeitsgebietes Oberreifenberg aufgezeigt. Für vergleichende Betrachtungen wird zusätzlich auf die Arbeitsgebiete Waldeck und Eiterfeld zurückgegriffen.

Das vom HLVA bereitgestellte DHM für Blatt Oberreifenberg ist qualitativ deutlich besser einzustufen als jene für die oben beschriebenen Arbeitsgebiete. Für eine DV-gestützte Reliefauswertung konnten jedoch auch diese Daten nur bedingt Verwendung finden. Um eine Auswertung der Bodenkarte, die auf Basis der TK 25-Topologie erstellt wird, zu gewährleisten, wurden zusätzlich Höhenlinien der TK 25 digitalisiert und hieraus ein Höhenmodell abgeleitet. Hiermit wurde ein DHM erstellt, das eine deutliche Generalisierung des Reliefs beinhaltet. Hinsichtlich der DV-gestützten Reliefanalyse bodenkundlicher Flächenobjekte bietet es jedoch Vorteile. Bei der Darstellung der Flächenabgrenzungen einzelner Bodeneinheiten wird die Bodenkarte i. d. R. auf Grundlage des dargestellten Reliefs (Höhenlinien) generalisiert. Vor allem aber die räumliche Lageverschiebung zwischen DHM und TK 25 kann bei Verwendung der TK 25-Höhenlinien ausgeschaltet werden.

Da z. Zt. die Verfügbarkeit hochwertiger DHM in Hessen eingeschränkt ist und für kein geeignetes bodenkundlich bearbeitetes Mittelgebirgsblatt vorliegt, wurde ein weiteres Arbeitsgebiet hinzugenommen, für das ein DHM auf Basis der TK 5-Höhenlinien zur Verfügung steht. Dies sollte möglichst eine vergleichbare Geomorphologie und Geologie zum Arbeitsgebiet Oberreifenberg aufweisen. Aufgrund dieser Kriterien wurde das nördlich an Oberreifenberg anschließende Blatt 5616 Grävenwiesbach ausgewählt. Die Arbeitsgebiete bilden einen zusammenhängenden Block. Sie setzen sich aus dem NO-Quadranten von Blatt Oberreifenberg und dem SO-Quadranten von Grävenwiesbach zusammen.

Im folgenden werden die Arbeitsgebiete mit einem kurzen Überblick zur Geologie und Reliefgestalt beschrieben. Eine weiterführende Kennzeichnung der Deckschichten wird insbesondere für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg in Abschnitt 5.1 vorgenommen.

### 3.1 Geographischer und geologischer Überblick zu den Untersuchungsgebieten

Für das Arbeitsgebiet Waldeck liegen die Geologische Karte (HORN & KULICK 1969) sowie die Bodenkarte (PLASS 1968) mit Erläuterungen vor.

Das Blattgebiet, das größtenteils zum Waldecker-Wolfhagener Berg- und Hügelland zählt, geht im SW-Teil ins Wildunger Hügelland sowie in den nördlichen Kellerwald über. Damit liegt es im Übergangsbereich zwischen dem Rheinischen Schiefergebirge im Westen und der Hessischen Senke, die sich nach Osten fortsetzt.

Im Südwesten des Arbeitsgebietes stehen karbonische Tonschiefer und Grauwacken an, die von Randdolomiten des Zechsteins z. T. diskordant überlagert sind. Die nördlich anschließenden Hochflächen mit ca. 370 m bis 390 m NN werden vorwiegend durch den Korbach Sandstein und den geomorphologisch harten Korbacher Porensandstein des Unteren Buntsandstein aufgebaut.

Die Flächenbereiche mit anstehenden karbonischen Tonschiefern sind deutlich stärker gegliedert als die nördlich anstehenden Flächen des Zechsteins und des Unteren Buntsandsteins. Vor allem im Korbacher Porensandstein nördlich des Reiher Baches sind relativ flache weitgespannte Rücken ausgebildet, die in gestreckte Hänge übergehen.

Der zentrale Teil des Arbeitsgebietes wird durch ein relativ flaches Gebiet repräsentiert, das durch sternförmig verästelte Seitenbäche der Netze nach Süden entwässert. Im diesem Becken von Netze (HORN & KULICK 1969) sind die Sedimentgesteine der Trias von Quartär bedeckt. Dabei handelt es sich vorwiegend um lößlehmreiche Deckschichten mit z. T. deutlichem Skelettanteil. Südlich Netze tritt örtlich auch kalkhaltiger Löß auf, der jedoch häufig umgelagert und mit Untergrundmaterial angereichert ist (PLASS 1969). Nach Osten hin wird das Gebiet durch den Sengenberg-Graben begrenzt, wo vorwiegend Waldeck-Porensandsteine anstehen, die z. T. von *Avicular*-Schichten der Volpriehausen-Folge überlagert werden.

Im Untergrund des Naumburger Stadtwaldes, im Ostteil des Arbeitsgebietes, steht vorwiegend Volpriehausen-Wechselfolge des Mittleren Buntsandstein an. Dieser zum Waldecker Landrücken gehörende Teil (HORN & KULICK 1969) weist Höhenlagen von 430 m bis 450 m NN auf (Sandkopf) und liegt deutlich höher als die westlichen Hochflächen. In die nach Nordosten abdachende Stufe haben sich kleinere Kerbtäler eingeschnitten, wodurch diese sehr kleinräumig gegliedert wird. Trotz geologisch einheitlichem Untergrund ist hier aufgrund der starken Reliefgliederung der oberflächen-



nahe Untergrund mit skelettreichen, geringmächtigen Deckschichten in divergenten Rückenpositionen bis hin zu skelettarmen lößlehmreichen Deckschichten in konvergenten Formen gegliedert (vgl. PLASS 1968).

Das Blatt 5224 Eiterfeld liegt naturräumlich in der Vorderrhön zwischen dem Fulda-bergland im Süden und Westen sowie der Kuppenrhön im Osten. Das Blatt wird mit Ausnahme der jungtertiären Vulkanite und des Quartärs von triassischen Gesteinen eingenommen. Die von der Haune zerschnittenen Hochflächen des Mittleren Buntsandstein werden im Osten von einer Muschelkalk-Schichtstufe begrenzt. Als Kuppen sind eine Reihe von Basaltkegeln über diesen Niveaus geomorphologisch herauspräpariert.

Die östliche Hälfte des Arbeitsgebietes wird vorwiegend durch Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins repräsentiert (MOTZKA & LÄMMLER 1966). Die überwiegend aus der Solling-Folge aufgebaute Hochfläche zwischen 350 m und ca. 420 m NN wird von der Haune zerschnitten. An den Talflanken tritt vorwiegend die Spessart- und Rhön-Folge oberflächennah zutage. An einigen Stellen sind darüber hinaus Terrassenreste erhalten, die von HÖLTING et al. (1967) in drei Terrassenniveaus gegliedert werden. Die Sedimente bestehen vorwiegend aus Basalten und Buntsandsteinmaterial.

Der zentrale flachwellige Teil der Hochfläche östlich der Haune ist flächenhaft mit Lößlehm bedeckt, der meist eine Mächtigkeit von über 1 m aufweist. In östlicher Richtung schließt sich der Untere Muschelkalk als stellenweise deutlich ausgeprägte Stufe an, dem Mittlerer- und Oberer Muschelkalk folgen. Am Ostrand des Arbeitsgebietes grenzt der Keuper mit Ton- und Mergelschichten an den Muschelkalk an.

Vorwiegend entlang der Störungszonen sind vor allem im Osten des Arbeitsgebietes Basaltkegel geomorphologisch herauspräpariert. Diese stellen die höchsten Erhebungen des Arbeitsgebietes mit über 500 m NN dar.

Blatt 5716 Oberreifenberg sowie 5616 Grävenwiesbach liegen im östlichen Taunus und gehören somit zum Rheinischen Schiefergebirge. Das Arbeitsgebiet Oberreifenberg liegt nördlich der beiden parallel verlaufenden Haupthöhenzüge des Taunuskammes. Im Norden schließt sich das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach an. Im Osten des Blattes Grävenwiesbach verläuft die Hauptwasserscheide zwischen dem Usbach, der in den Main entwässert, und der Weil, die zur Lahn hin entwässert. Die Wasserscheide verläuft z. T. über Hochflächen, an die nach Osten das Usinger Becken anschließt.

Der Bereich im nördlichen Anschluß an den Taunuskamm, mit Höhen von etwa

650 m NN, fällt nach Norden hin bis etwa 400 m NN ab. Das Gebiet dazwischen ist stark zerschnitten, wodurch vor allem im Oberlauf der Weil und deren Nebenbächen Kerbtäler ausgebildet sind. Die meist steilen, kurzen Hänge sind mit Hangdellen und Muldentälern, die in Quellmulden übergehen, engräumig gegliedert. Vom südlichen Teil des Blattes Grävenwiesbach, der durch die Eintiefung der Weil stark zerschnitten ist, geht das Relief vor allem im Bereich der Wasserscheide zwischen Weil und Usbach in ein flachwelliges Relief mit noch gut erhaltenen tertiären Flächenresten über.

Der Untergrund des Gebietes wird vorwiegend aus Ton- und Grauwackenschiefern des Unterdevons, hier untergliedert in die Singhofener Schichten der unteren Ems-Stufe, aufgebaut (SCHLOSSMACHER 1983; FUCHS 1978). Eingelagert in die marinen Sedimente sind geschieferte Keratophyrtuffe. Daneben treten an präquartäre Störungen gebundene tertiäre Quarzgänge auf. Diese Quarze sind sehr häufig in den periglazialen Schuttdecken aufgearbeitet.

Insgesamt kann der Untergrund des Arbeitsgebietes Oberreifenberg und Grävenwiesbach als relativ einheitlich gelten. Die periglazialen Lagen setzen sich jedoch nicht immer aus den kryoklastisch aufgearbeiteten Ton- und Grauwackenschiefern zusammen, sondern enthalten vor allem in der Basislage häufig schluffig, toniges Zersatzmaterial. Dieses saprolitische Material steht nur örtlich in situ an, ist aber häufig in sehr unterschiedlichen Anteilen in den periglazialen Lagen enthalten. Die Entstehung wird von Semmel (1991:51) in das Jungmesozoikum und Alttertiär datiert (vgl. BIBUS 1971). Die Verbreitung der zersatzgeprägten Deckschichten ist vorwiegend auf die weniger stark zerschnittenen Gebiete im östlichen Teil des Arbeitsgebietes Grävenwiesbach und im östlichen Anschluß an Blatt Oberreifenberg beschränkt. Im Bereich der stark zerschnittenen Gebiete sind die Verwitterungsreste oft vollständig ausgeräumt. Dies entspricht auch den Annahmen von SEMMEL (1991:52).

Mit der Betrachtung von relativ einheitlichen Gebieten, was den geologischen Untergrund betrifft, kann die Analyse der Deckschichtenverteilung erleichtert werden, da nicht eine große Anzahl von gesteinsbedingten Varietäten auftreten. Mit der Hinzunahme des Arbeitsgebietes Grävenwiesbach kann zudem auf ein hochwertiges DHM als Basisdatenbestand zurückgegriffen werden, womit eine detaillierte Reliefgliederung ermöglicht wird. Gleichzeitig liegen hier für den südlichen Teil ähnliche Verhältnisse bezüglich des Reliefs und der Geologie wie im Arbeitsgebiet Oberreifenberg vor, die es ermöglichen die Auswertungsergebnisse der Bodenkarte auf dieses Gebiet zu übertragen. Mit dem Übergang zu Hochflächenresten stehen darüber hinaus hinsichtlich des Reliefs sehr unterschiedliche Hangformen zur Bewertung und Diskussion der Beziehung Boden-Relief zur Verfügung.

## 4 Das Digitale Höhenmodell als Datengrundlage der Reliefanalyse

Die Begriffe Digitales Höhenmodell (DHM) und Digitales Geländemodell (DGM) werden in der Literatur für sehr unterschiedliche Datenmodelle verwendet. Im allgemeinen wird ein DHM als eine digitale Vorhaltung von Höhenwerten über NN in einem Landschaftsausschnitt beschrieben (vgl. hierzu EBENER 1992:27; REINHARDT 1991: 9f.; WAIBEL 1990:145). Die Höhendaten können als mehr oder weniger unregelmäßig verteilte Punktdaten in einem Koordinatensystem vorliegen oder als rasterorientierte Daten aufbereitet sein. Finden neben den punkt- oder rasterbezogenen Höhendaten linienhafte Elemente zur Beschreibung von Geländekanten, Felsausbissen, Dämmen, Gräben etc. Berücksichtigung, spricht die Vermessungsverwaltung von einem Digitalen Geländemodell - DGM (HLVA o. J.).

Als Definition für dieses qualitativ und quantitativ häufig heterogene Datenspektrum wird in der vorliegenden Arbeit auf den Vorschlag des Arbeitskreises "Numerische Photogrammetrie" der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (1975, zit. in REINHARDT 1991:9) zurückgegriffen: "Als Digitales Höhenmodell (DHM) bezeichnet man die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren. Dabei ist von untergeordneter Bedeutung, ob die Höhendaten roh, geordnet, ungeordnet oder bereits in irgendeiner Form bearbeitet (z. B. geglättet oder verbessert) worden sind. Die Ordnung der Höhendatenmenge kann z. B. nach Gittern, Höhenlinien oder Profilen erfolgen."

Das DHM als dreidimensionales System mit XYZ-Daten ist demzufolge ein Oberflächenmodell mit einer einzigen Z-Koordinate an einem Punkt. Es wird daher häufig als "2.5D-Datenmodell" bezeichnet, da eine echte 3. Dimension als Tiefenfunktion nicht vorhanden ist (vergl. WAIBEL 1990 :145f.). Um die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe digitale Höhendaten, DHM, DGM und Digitales Reliefmodell (DRM) in ihrem inhaltlichen Gebrauch zu verdeutlichen, werden sie noch einmal kurz charakterisiert.

Unter digitalen Höhendaten werden unregelmäßig im 2D-Raum verteilte, die Höhe über NN beschreibende XYZ-Daten verstanden. Dies sind i. d. R. Erhebungsdaten aus der Photogrammetrie oder Stützpunkte digitalisierter Höhenlinien.

Unter DHM wird im Rahmen dieser Arbeit ein Datenmodell verstanden, das durch Interpolationsverfahren aus den zuvor beschriebenen digitalen Höhendaten berechnet wurde. Es besteht aus einem Gitterraster (GRID) mit definierter Rasterzellengröße. Für jede Rasterzelle wird in einer zeilen/spalten-orientierten Datenmatrix ein Höhenwert

angegeben. Fehlwerte werden als missing value gekennzeichnet. Die Koordinaten werden in der Datendatei nicht mitgeführt.

Der Begriff DGM soll vermieden werden, da die Vorstellungen hierzu sehr stark variieren. Strukturelemente, wie Bruchkanten und Gerippelinien, sind in den DHM-Daten des HLVA nicht vorhanden. Daher steht aus Sicht der Landesvermessungsverwaltung ohnedies kein DGM für Hessen zur Verfügung.

Aus dem DHM abgeleitete geomorphometrische Daten, wie bspw. Hangneigung, Exposition oder Daten zweiter Ableitung wie die Wölbung, werden als geomorphometrische Reliefparameter bzw. Reliefattribute beschrieben. Die Ableitung geomorphometrischer Reliefparameter wird z. T. auf Basis des Digitalen Reliefmodells (DRM) von BAUER (1985) vorgenommen (vgl. Abschn. 4.3). Daher wird unter dem Begriff DRM nicht ein Datenmodell, sondern ein Rechenmodell verstanden, mit dem geomorphometrische Reliefparameter bestimmt werden.

#### **4.1 Datenmodell und Aufbereitung von Höhendaten**

Der zunehmende Einsatz von Rechenmodellen in den Geowissenschaften fordert für unterschiedlichste räumliche Fragestellungen digitale Höhendaten als Eingangsparameter. Für den Bereich der Reliefanalyse müssen deshalb grundlegende Anforderungen an die Eingangsdaten für die Rechenmodelle gestellt werden. Dies betrifft zunächst die Qualität der Daten, die vorwiegend aus den Aufnahmeverfahren und der Datendichte bestimmt wird. Da für die hier vorliegende räumliche Fragestellung eine flächendeckende Information notwendig ist, müssen Datengrundlagen mit unregelmäßig verteilten Höhenpunkten in eine räumlich geschlossene Informationsform überführt werden.

Die Verwendung von DHM als flächenhafte Bereitstellung von Höhendaten erfolgt dabei im wesentlichen durch die Verfahren der Triangulation und Rasterinterpolation. Beide Verfahren bieten, je nach Anwendung, Vor- und Nachteile.

TIN-Modelle (triangulated irregular network) bauen auf der ursprünglich erhobenen Datenstruktur auf. Durch Dreiecksvermaschung wird dabei eine flächenhafte Abbildung der Höheninformation erstellt. Hier wird, in Abhängigkeit der Reliefkomplexität, eine Variation der Datendichte ermöglicht. Je nach Erfordernis der Reliefkomplexität kann so der Datenaufwand möglichst gering gehalten werden. Darüber hinaus ist eine direkte Integration von Strukturelementen möglich (WAIBEL 1990: 146f.).

Die Verwendung von Rasterdaten beinhaltet einen vorgeschalteten Arbeitsschritt, der unregelmäßig verteilte Höhendaten auf ein definiertes gleichförmiges Raster interpoliert. Das Rasterinterpolationsverfahren kann hierbei auf der Triangulation aufbauen. Bei den Landesvermessungsämtern kommen jedoch derzeit andere mathematische Verfahren zum Einsatz. Hierzu werden Algorithmen aus dem Bereich finite Elemente oder Invers Distance verwendet. Die Eigenschaften der Ausgangsdaten, die Komplexität des Interpolationsverfahrens und die berechnete Rasterweite bestimmen die Qualität des DHM oder DGM.

Die Rasterinterpolation ist grundlegend von der Ableitung von Höhenlinien als Höhenlinieninterpolation aus DHM oder digitalen Höhendaten zu unterscheiden. Durch eine Interpolation erzeugte "Gitterraster" beinhalten, bedingt durch ihre Matrizenstruktur, eine konstante Datendichte. Für hochauflösende DHM führt dies zu einem hohen Speicherplatzbedarf, da für engräumig komplexe wie auch für großflächig einfache Reliefbereiche die gleiche Datendichte eingehalten wird. Wegen der regelmäßigen Anordnung der Höhenwerte kann jedoch auf die Lagebeschreibung der einzelnen Rasterzellen verzichtet werden. Durch die Eckkoordinaten und die verwendete Rasterweite in X- und Y-Richtung können die Koordinaten jeder beliebigen Rasterzelle in einem DHM bei Bedarf ermittelt werden.

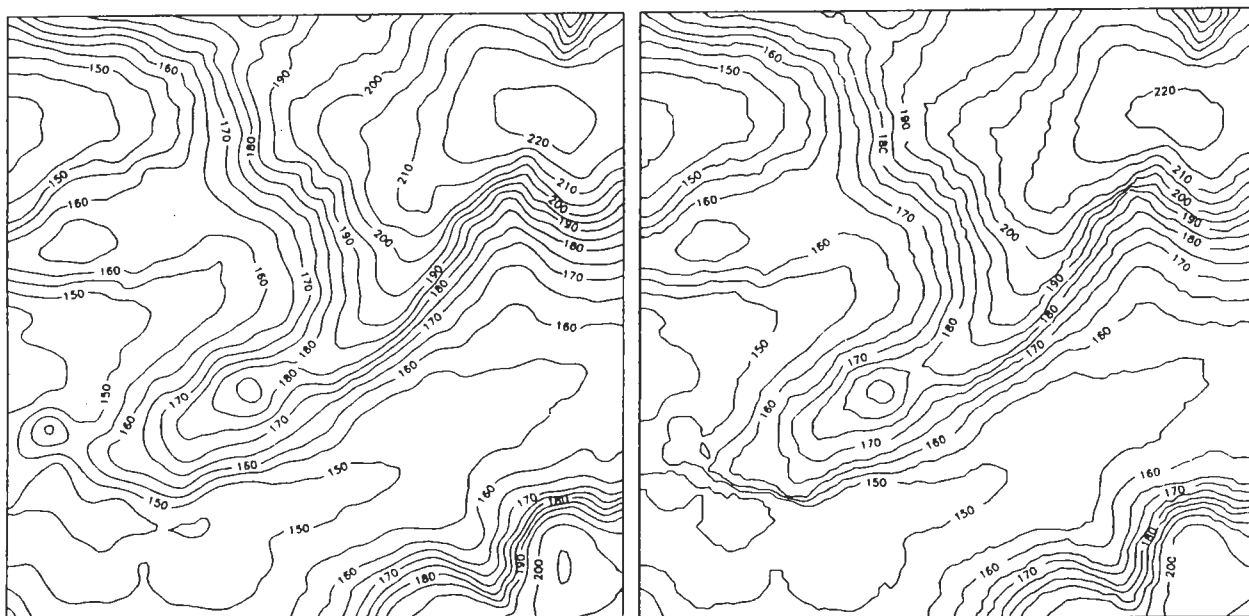
Die Matrix der zeilen/spalten-orientierten Daten bietet eine dem Rechner angepaßte Struktur, die zwar nicht geometrische, dafür aber vielfach programmtechnische Berechnungen, wie z. B. die Analyse von Nachbarschaftsbeziehungen erleichtert. Das heißt, es können auf einfachste Weise Ableitungen, die eine direkte Nachbarschaft betreffen, vorgenommen werden. Hierzu zählt bspw. die Berechnung der Neigung oder der Exposition für jede Rasterzelle eines Grids (vgl. Abschn. 4.3).

Aufgrund der z. T. sehr komplexen geomorphometrisch bzw. -morphographischen Reliefanalyse ist die Verwendung von Rasterdaten und rasterbasierenden Modellen vorteilhaft. Durch die einfache Datenstruktur wird die Modellentwicklung gegenüber TIN-Modellen erleichtert. Darüber hinaus bieten rasterorientierte Geographische Informationssysteme für Rasterdaten umfangreiche Analysewerkzeuge zur Modellierung und Visualisierung von Ergebnissen.

Mit der Interpolation von unregelmäßigen Höhendaten in ein gleichförmiges Gitterraster muß jedoch ein Verfahren zwischengeschaltet werden, das die Genauigkeit der Ausgangsdaten vor allem bei der Verwendung von Glättungsalgorithmen beeinflussen kann. Grundsätzlich kommt jedoch der Qualität und Dichte der Ausgangsdaten gegenüber den verwendeten Interpolationsverfahren die größere Bedeutung zu (vgl.

HÖPFNER 1990:319f.; FRIEDRICH 1993a:155f.). Ein Vergleich der interpolierten DHM ergab z. T. deutliche Abweichungen vom Original (TK 5-Höhenlinien). Unterschiede bei der Interpolation ergeben sich zunächst bei der Wahl der Methoden, wie z. B. distanzabhängige Interpolation, finite Elemente u. a. Darüber hinaus wird das Interpolationsergebnis in erheblichem Maße durch die Feineinstellungen bei der Interpolation beeinflusst.

Die Ergebnisse einer Rasterinterpolation unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Interpolationsverfahren sind in Abbildung 3 durch abgeleitete Höhenlinien dargestellt. Die Berechnung eines DHM mit dem vom HLVA eingesetzten Programmpaket HIFI<sup>88</sup> (finite Elemente-Modell) erbringt nach geeigneter Eichung der Einstellungsparameter gute Ergebnisse. Die Komplexität des Reliefs wird in Bezug zur TK 5 (TK 5-Höhenlinien stellen die Datengrundlage) mit Ausnahme kleinräumig komplexer Reliefbereiche ausreichend abgebildet. Die entfernungs-gewichtete Interpolation (Inverse Distance) erzeugt ein sehr unruhiges Höhenlinienbild. Eine anschließende Glättung der Höhendaten bringt zwar eine Verbesserung, führt aber zu einer Generalisierung kleinräumiger geomorphologischer Einheiten.



HIFI P  
finite Elemente

Interpol (Estman 1990)  
einfache entfernungs-gewichtete Interpolation

Abb. 3 Abgeleitete Höhenlinien aus DHM bei Verwendung unterschiedlicher Interpolationsverfahren

(Datengrundlage TK 5 F2-9690, Stützpunkte der Höhenlinien und Höhenkoten, Auflösung des DHM 20 m x 20 m)

Neben der Datengrundlage und dem gewählten Interpolationsverfahren ist für die Qualität eines DHM die Auflösung der einzelnen Rasterelemente entscheidend. In der Bundesrepublik können z. Zt. unterschiedliche Höhenmodelle mit Auflösungen von 100 x 100 m bis zu 10 x 10 m bezogen werden. Eine Zusammenstellung der bundesweit verfügbaren Höhen- bzw. Geländemodelle ist in AK TOP der ADV (1991) und LEHMEIER (1991) veröffentlicht. Die Landesvermessungsämter der Bundesländer verwenden unterschiedliche Gitterabstände, Ausgangsdatenquellen bzw. Erhebungsmethoden und Interpolationsmethoden.

Die zu verwendende Rasterweite eines Höhenmodells hängt im wesentlichen von der Fragestellung, dem Arbeitsmaßstab und der zugrundeliegenden Datenbasis ab. Die Wahl der Rasterzellengröße muß sich neben der Qualität der Datengrundlage auch an der erzeugten Datenquantität orientieren, da die Rasteranzahl im Verhältnis zur Auflösung im Quadrat wächst. Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit neuer Rechnergenerationen kann aber das Problem der Massendaten zugunsten der Qualitätsanforderungen an ein DHM/DGM zurückgestellt werden.

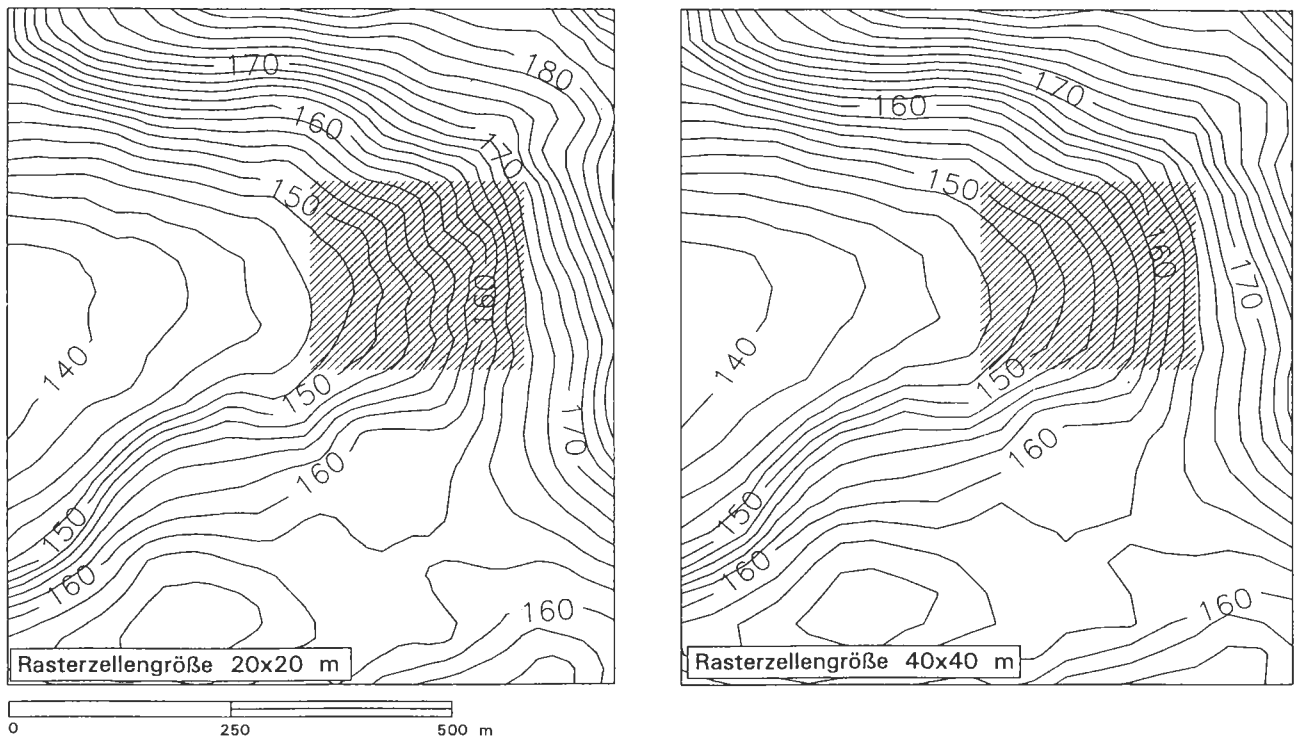


Abb. 4 Einfluß der Auflösung des DHM auf die Reliefabbildung  
 Detailausschnitt TK 5 F2-9690, Interpolation HIFI P

Für die geomorphologische Reliefanalyse sollte daher die Auflösung so gewählt werden, daß maßstabsadäquate Reliefeinheiten abgebildet werden. Grundsätzlich kann mit einer hohen Auflösung von bspw. 10 m eine sehr großmaßstäbige detaillierte Abbildung erreicht werden. Mit geringerer Auflösung erfolgt automatisch eine Generalisierung des Reliefs. Reliefformen, die kleiner als drei Rasterzellenweiten sind, werden folglich nicht oder ungenügend abgebildet. Hierunter sind Formen, wie Rücken, Hangdellen sowie vertikale Hangdiskontinuitäten zu verstehen. Dies verdeutlicht das Beispiel in Abbildung 4. Die grundlegenden Reliefformen werden hier im Gesamtausschnitt bei beiden gewählten Auflösungen erfaßt. Im grau unterlegten Bereich ist jedoch in der hohen Auflösung (20 x 20 m) die Untergliederung einer größeren Hangdelle zu erkennen, die bei größerer Auflösung geglättet vorliegt.

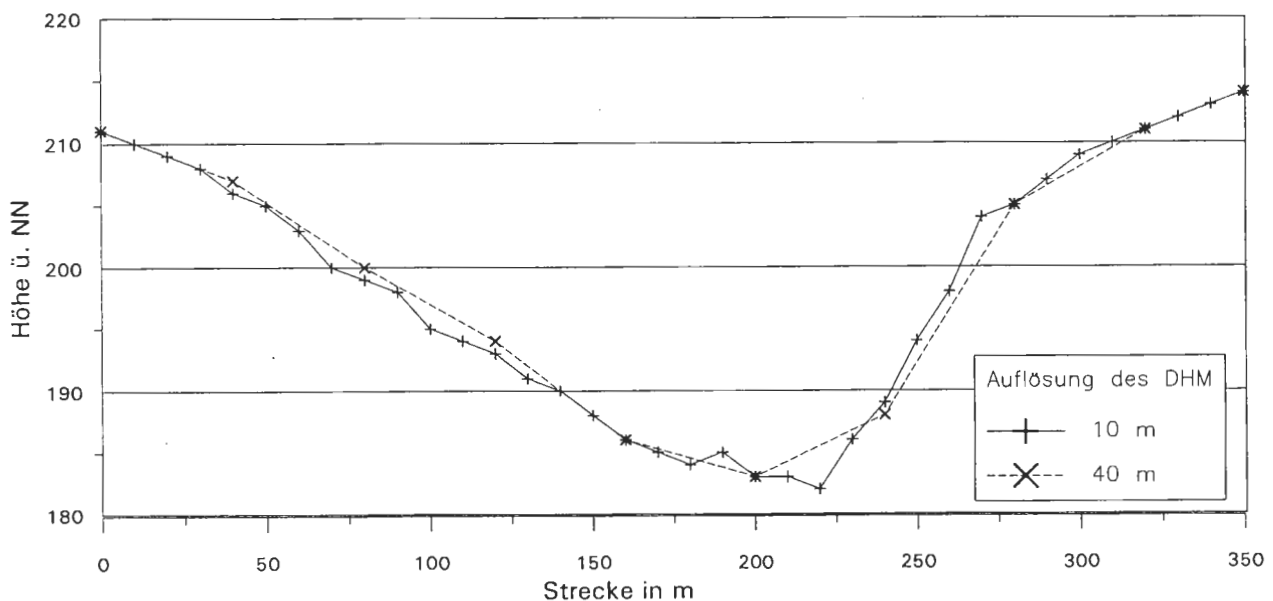


Abb. 5 Schuttprofile durch ein Tal, erstellt aus DHM mit unterschiedlicher Auflösung

Im vertikalen Profil werden durch eine Anhebung der Rasterzellengröße einzelne, in ihrer Neigung variierende Hangabschnitte geglättet. Die Abbildung 5 zeigt hierbei einen Vergleich unter Nutzung eines 10 m- und 40 m-Rasters bei identischer Datengrundlage für die Rasterinterpolation. Neben einer Generalisierung der vertikalen Hangdiskontinuitäten kommen auch bei geringerer Auflösung Lageverschiebungen von markanten Reliefelementen vor. Abbildung 5 belegt dies anhand einer Tiefenlinienverschiebung.



Beim Vergleich der Tiefenlinien aus DHM unterschiedlicher Auflösung kann beobachtet werden, daß mit einer Verbesserung der Auflösung eine differenziertere Gliederung des Tiefenliniennetzwerkes bei sonst gleichen Rahmenbedingungen der Modellierung erreicht werden kann. Beim Lagebezug der Tiefenlinien bestehen häufig die gleichen Lageverschiebungen, wie sie bereits für die vertikale Aufsicht beschrieben wurden. Betrachtet man den Gebietsabfluß bzw. die Auswirkung der Rasterzellengröße auf die Abgrenzung von oberflächhaften Wassereinzugsgebieten, so tritt bei der Modellierung einer Gebietsentwässerung (Oberflächenmodell), allein aufgrund der geringeren Auflösung, örtlich eine stark veränderte Abflußmodellierung auf. Dies ist in Abbildung 6 vor allem für den unteren linken Bereich der Ausschnitte deutlich zu erkennen.

Ein grundsätzlicher Problembereich betrifft die Abbildung von Talniederungen mit flacher Sohle in DHM. Das oft anthropogen überprägte, relativ flache Gelände wird häufig durch sehr unregelmäßig verlaufende Höhenlinien vor allem in der TK 5 dargestellt. Oft setzen die Höhenlinien aus, da Trassenaufschüttungen oder Bebauungen einsetzen. Die z. T. undifferenzierten und fehlenden Höhenwerte bedingen zudem Problembereiche für die Rasterinterpolation. Vom Hang zur Talsohle ist häufig eine auffällige Profilunstetigkeit als konkave Hangdiskontinuität oder Hangknick (i. S. v. ROESCHMANN & LEHMEIER 1993:38f.) vorhanden. Durch die geringe Datendichte in der Talsohle wird aber der Verlauf der Hangneigung im Hangbereich zur Talsohle tendenziell weiterverfolgt, wie es bei einer Spline-Funktion geschieht. Dies führt zu einer undeutlichen oder fehlenden Abgrenzung vom Hang zur Talsohle sowie zur Simulation einer Großzahl abflußloser Mulden in den Tälern. Im Extremfall werden hier staudammartige Schwellen modelliert, die große abflußlose Talbereiche vortäuschen. Eine geomorphologisch orientierte Plausibilitätsprüfung wird z. Zt. von den eingesetzten Interpolationsverfahren der Landesvermessungsämter nicht vorgenommen. Dies liegt u. a. daran, daß hier kommerzielle Produkte zum Einsatz kommen, die nicht nur für Höheninterpolationen genutzt werden, sondern im wesentlichen allgemeine Interpolationswerkzeuge für völlig unterschiedliche Fragestellungen darstellen. In Abbildung 7 sind durch das DHM vorgegebene, abflußlose Mulden aufgezeigt. Diese kommen gelegentlich in Hanglage vor, sind aber i. d. R. immer in konkaven Formen zu finden. Der Großteil entfällt jedoch auf tiefenliniennahe Talbereiche.

Die fehlerhafte Interpolation und die dadurch bedingte Ableitung von abflußlosen Mulden bergen später große Schwierigkeiten, bspw. bei der Modellierung des Gebietsabflusses.

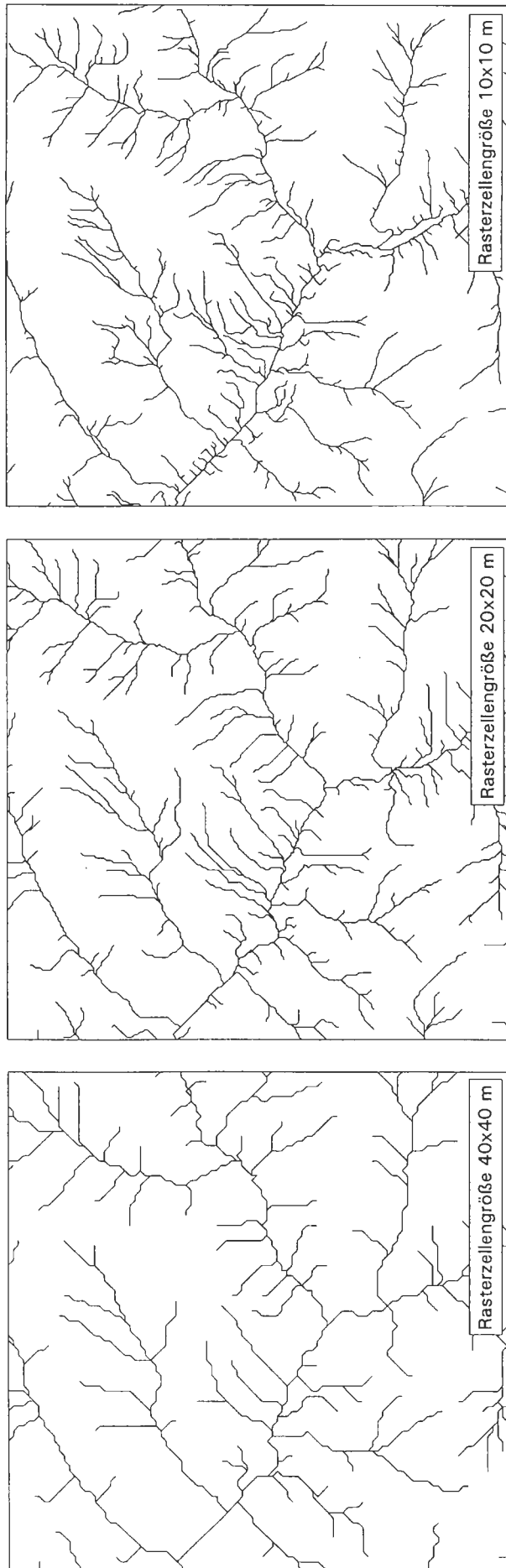


Abb. 6 Vergleich von Tiefenliniennetzwerken bei unterschiedlicher Auflösung eines DHM  
(Ausschnitt Blatt 5615 Villmar)  
(Grundlage digitalisierte Höhenlinien TK 5)

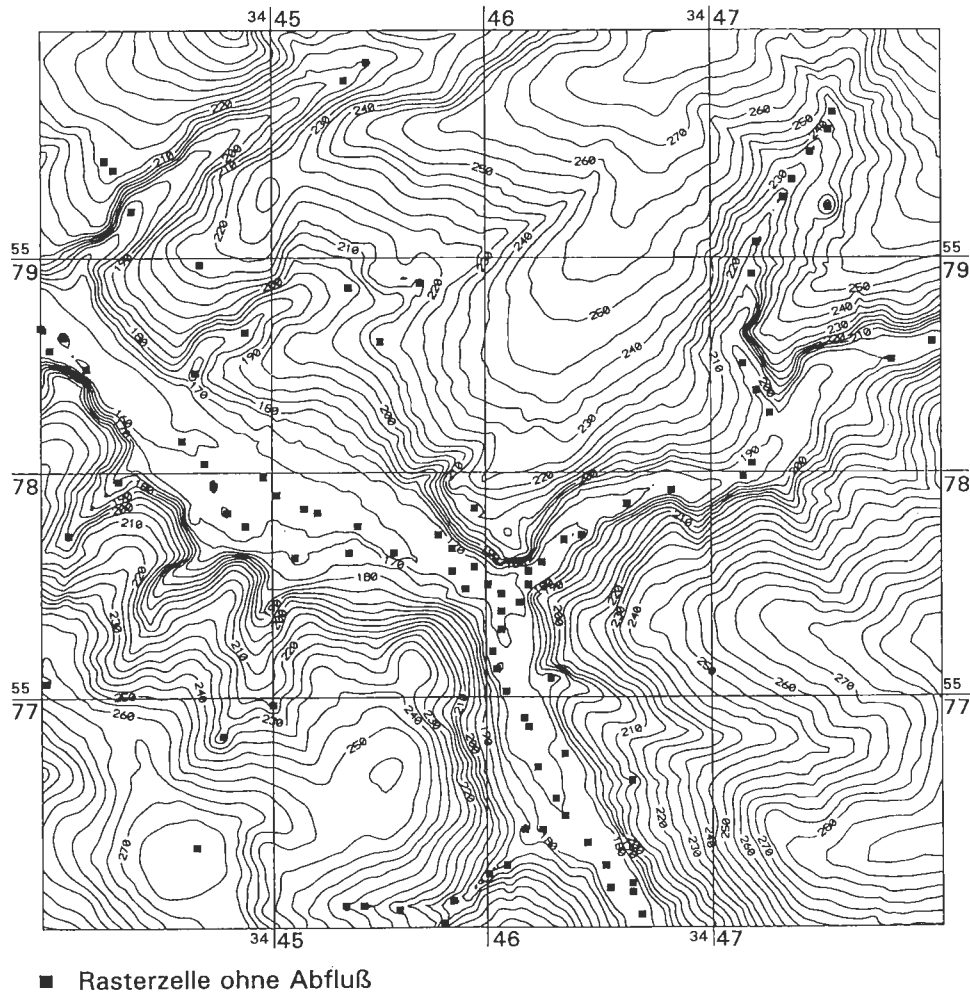


Abb. 7 Verteilung von abflußlosen Hohlformen im DHM  
(Ausschnitt Blatt 5615 Villmar)

Eine weitere wichtige Ableitung, die hiervon betroffen ist, beinhaltet die Modellierung von Tiefenlinien, die für eine ganze Reihe abflußorientierter Größen genutzt werden kann. Die Erfassung von Tiefenlinien werden z. B. benötigt, um Senkenbereiche ausgliedern zu können (vgl. Abschn. 6.1).

Jedoch kann dem oben beschriebenen "Muldenproblem" durch eine Datenverdichtung in dem hauptsächlich betroffenen Flächenbereich entgegengewirkt werden. Da hier insbesondere der tiefenliniennahe Bereich betroffen ist, eignet sich die zusätzliche Erfassung von Gerippelinien im Verlauf der Tiefenlinien. Dies sollte aber nicht nur in Kerb- und Muldentälern, sondern auch für Sohlentäler erfolgen. Bei Sohlentälern kann der Bachverlauf mit seinem Gefälle erfaßt werden. Zusätzlich ist die Erfassung der Geländekante zur Talflanke sinnvoll, um die Abgrenzung Senkenbereich - Hangbereich zu verbessern (vgl. FRIEDRICH & SEMMEL 1993).

## 4.2 Das hessische Digitale Höhenmodell (DHM)

In Hessen werden derzeit landesweit Höhendaten vom Hessischen Landesvermessungsamt (HLVA) vertrieben. Sie können in  $4 \text{ km}^2$  Gauß-Krüger-Quadranten mit einer Rasterweite von  $40 \times 40 \text{ m}$  bezogen werden. Dabei orientieren sich die  $4 \text{ km}^2$  Ausschnitte am TK 5 Blattschnittsystem. Die Rohdaten zur Erzeugung des DHM werden grundsätzlich nicht angeboten, können aber bei Bedarf vom HLVA bezogen werden.

Das in der Datenorganisation landesweit einheitliche DHM setzt sich jedoch aus unterschiedlichen Ursprungsdaten für die Interpolation der Höhenraster zusammen. Der überwiegende Teil stammt aus der digitalen Umsetzung von Gravurplatten für die Orthophotoherstellung. Diese Daten werden sukzessive mit dem Fortschreiten der Digitalisierung der Höhenlinien aus der stereoskopischen Auswertung von Luftbildern (1 : 13 000) für die TK 5 ersetzt. Die beiden genannten Datengrundlagen decken den weitaus größten Teil der Landesfläche ab. Gebietsweise wurden zudem Daten von Städten, Kreisen und Planungsverbänden übernommen. An der Landesgrenze sind darüber hinaus von den benachbarten Bundesländern Daten aufbereitet worden, die allerdings durch unterschiedliche Erhebungsmethoden gewonnen wurden. In der Regel wird vom HLVA sogar das bereits interpolierte DHM als Eingangsdatenbestand für die hessische Ableitung des  $40 \text{ m}$ -Modells genutzt. Eine Übersicht der Datenherkunft für das hessische DHM zeigt Abbildung 8.

Die Ausgangsdaten für die Interpolation des hessischen DHM weisen Unterschiede bezüglich Erhebungsaufwand, Datendichte und -qualität auf. Somit sind diese Daten in den Einsatzmöglichkeiten unterschiedlich zu bewerten. Da schon zu Beginn der Arbeit erhebliche Mängel bei den vom HLVA bereitgestellten Daten festgestellt wurden, mußten die Fehler, ihre Ursachen und Möglichkeiten der Fehlerbehebung untersucht werden. Die zu Beginn des Projektes auf Basis repräsentativer Deckschichtenverbreitungen ausgewiesenen Arbeitsgebiete werden dabei durch drei sehr unterschiedliche Datengrundlagen der Höhenmodelle abgedeckt. Die Ergebnisse der Überprüfung und Überarbeitung der Daten sind im folgenden Kapitel dargestellt.

### 4.2.1 Zur Qualität des hessischen Digitalen Höhenmodells

Die oben beschriebenen unterschiedlichen Datengrundlagen des hessischen DHM wurden im Hinblick auf ihre Eignung als Datenquelle für eine geomorphographische Reliefklassifizierung untersucht. Hierzu werden die zwei wichtigsten Datenquellen des HLVA, d. h. Profillinien bzw. TK 5-Höhendaten und die daraus resultierenden Raster-

interpolationen, zur Darstellung herangezogen. Daneben wurden Daten eines regionalen Planungsverbandes (Umlandverband Frankfurt) untersucht, die als Basisdaten in das hessische DHM eingegangen sind.

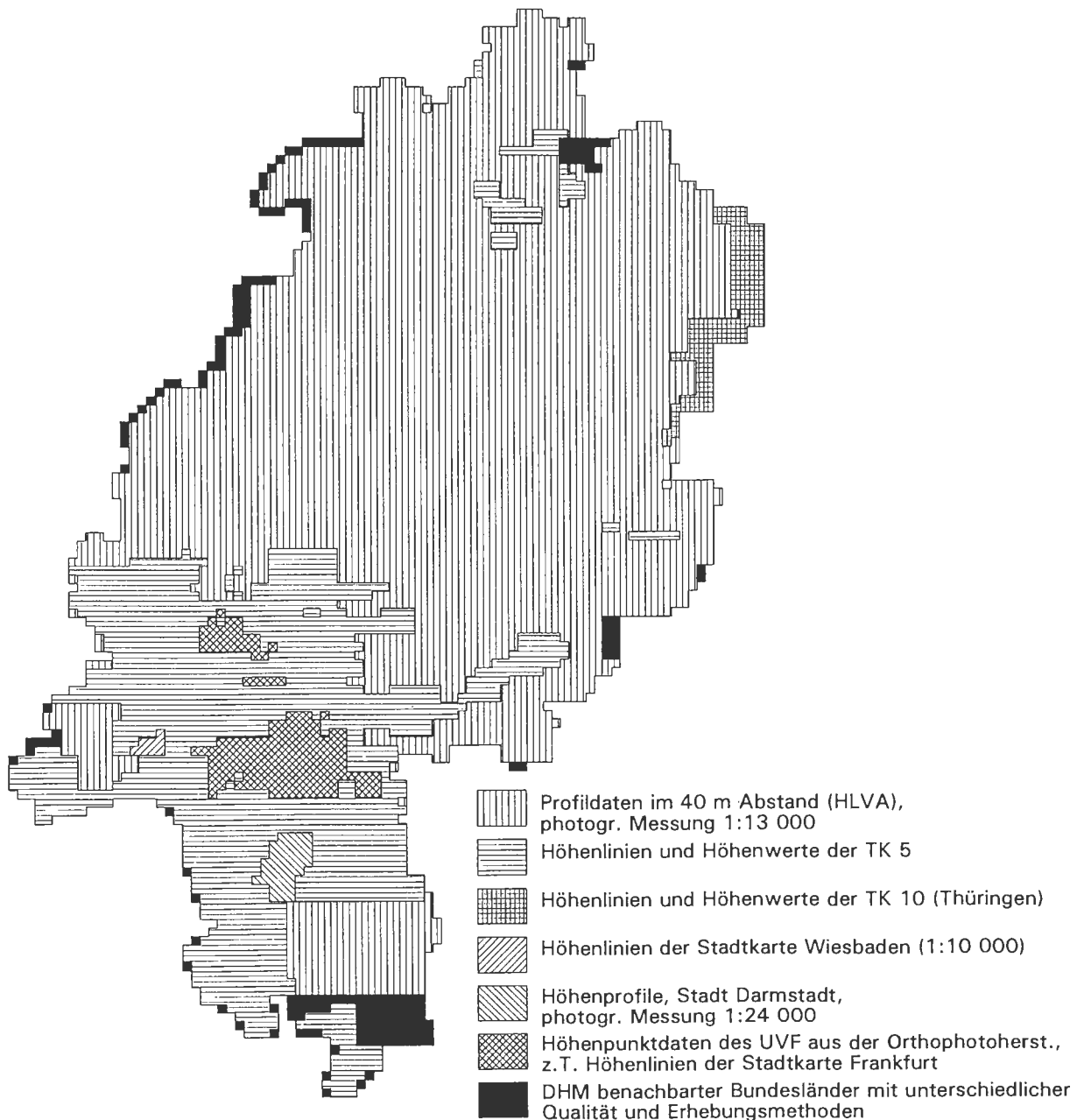


Abb. 8 Datenquellen des DHM in Hessen

(Quelle: Hess. Landesvermessungsamt, Stand Juli 1993)

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der geomorphometrisch/geomorphographischen Reliefauswertung. Die tatsächliche Genauigkeit der Daten in Bezug zur realen Höhe hat dabei gegenüber der Abbildung der Landschaft aus geomorphologischer Sicht eine geringere Bedeutung. Die Genauigkeit der Daten bezüglich der Hö-

hentreue wurde daher nicht untersucht. Die Erfahrungen zeigen jedoch, daß die vom HLVA angegebene Fehlertoleranz häufig weit überschritten wird.

### **Übersicht 1 Anforderungen an ein DHM für die geomorphographische Reliefanalyse**

1. hochauflösendes DHM mit einer Auflösung von min. 20 x 20 m Rasterzellengröße
2. gleichbleibende Qualität der Daten
3. Verwendung von geomorphologisch erfaßten Rohdaten hoher Dichte
4. Überprüfung geomorphologischer Plausibilitäten
5. hohe absolute Genauigkeit der Höhendaten (vor allem in ebenem und schwach reliefiertem Gelände)
6. lagetreue Höhenabbildung zu analogen Kartenwerken (TK 5)
7. Einbindung bzw. Bereitstellung von Strukturelementen (Gräben, Dämme, Geländekanten, Felsausbisse etc.)

Entscheidend für viele landschaftsbezogene Fragestellungen, die sich mit dem Relief der Erdoberfläche sowie mit Wasser- und Stofftransporten beschäftigen, ist vornehmlich die möglichst exakte Abbildung des Standortes in seiner umgrenzenden sowie prozeßverbundenen Nachbarschaft. Dies erfordert zwar auch eine gewisse Detailtreue der absoluten Höhe, stellt aber vor allem Anforderungen an die exakte Abbildung des Reliefs in seiner räumlichen Komplexität. Für solche Fragestellungen muß ein DHM inhaltsrelevante Reliefeinheiten abbilden können. Daher ist grundlegend festzustellen, daß durch eine Auflösung von 40 x 40 m nur Flächenelemente mit einer räumlichen Ausdehnung von mehr als 120 m abgebildet werden. Bedingt durch die große Rasterweite ist die Abbildung kleinerer Reliefelemente, wie Dellen, Rücken, Hangdiskontinuitäten etc. stark eingeschränkt. Für viele bodenkundliche und geomorphologische Fragestellungen sind aber gerade diese Reliefstrukturen bzw. Reliefelemente von herausragender Bedeutung.

Aus Sicht der geomorphometrischen Reliefanalyse lassen sich unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1 dargelegten Grundlagen Anforderungen an ein DHM aufzeigen, die eine Nutzung der Daten ermöglichen. Die in Übersicht 1 aufgelisteten Anforderungen beschreiben eine, im Rahmen der derzeit möglichen qualitativen Bereitstellung von DHM relativ optimale Grundlage. Die Datengrundlagen des HLVA müssen an diesen Anforderungen gemessen werden.

## TK 5 Datengrundlage

Die Höhenlinien der TK 5 werden aus Luftbildern (Maßstab 1 : 13 000) stereoskopisch ausgewertet. Bei aufnahmetechnisch abgeschlossenen TK 5-Blattschnitten werden die Höhenlinien z. Zt. noch handdigitalisiert. In Bearbeitung befindliche Blattschnitte werden analog und z. T. direkt digital aufgezeichnet. Als Datengrundlage werden die Stützpunkte der Höhenlinien sowie zusätzlich digitalisierte Höhenpunkte verwendet. Die Datendichte liegt in Abhängigkeit zur Reliefkomplexität bei etwa 1500 bis 3000 Höhenpunkten je km<sup>2</sup>.

Die bereits angesprochene Abhängigkeit der Abbildungsqualität des Reliefs vom Grad der Auflösung wird bei dieser relativ guten Datengrundlage am deutlichsten. Die vorgehaltenen Interpolationen mit einer Rasterzellengröße von 40 x 40 m konnten durch eine auflösungsbedingte Generalisierung die Detailtreue der TK 5 nicht wiedergeben. Die Berechnung einer 20 x 20 m-Interpolation brachte hingegen eine deutlich bessere Reliefdarstellung. Dies wurde bereits beispielhaft in Abbildung 4 für kleinere Hangdellen aufgezeigt (siehe gerasterte Flächen). Bei einem Vergleich der beiden Auflösungen ist festzuhalten, daß Reliefelemente im 40 x 40 m-Raster verloren gehen, die im Bearbeitungsmaßstab 1 : 25 000 noch eine Rolle spielen können.

Bei der Auswertung der 20 x 20 m-Interpolation konnte hingegen, bis auf kleinere, eindeutig auf die Digitalisierung zurückzuführende Fehler, eine gute Übereinstimmung interpolierter Höhenlinien mit dem Original (TK 5) festgestellt werden. Auch die abgeleiteten geomorphometrischen Parameter konnten auf Basis einer Überprüfung durch eine Geländebegehung als brauchbar angesehen werden. Dies muß jedoch für Waldgebiete mit hoher Reliefenergie, mit der i. d. R. ein sehr stark gegliedertes Relief in den Hangbereichen einhergeht, eingeschränkt werden. Bei Detailkartierungen auf Blatt 5616 Grävenwiesbach wurde festgestellt, daß die stark gegliederten Hangbereiche, vor allem unter Nadelwald, als deutlich generalisierte Höhenlinien auf der TK 5 wiedergegeben werden. Kleinere Rücken, die im Bereich von landwirtschaftlichen Nutzflächen detailliert erfaßt sind, werden unter Nadelwald z. T. unzureichend dargestellt. Vor allem aber sind Extrembereiche mit stark geneigten Hängen ( $> 15^\circ$  Hangneigung) und in kurzer Distanz wechselnden Verhältnissen häufig weit über den Maßstab 1 : 5 000 generalisiert dargestellt. Die stereoskopische Auswertung scheint daher unter Wald, insbesondere unter Nadelwald, nicht die geforderte Detailgenauigkeit einer bodenkundlichen Kartierung im Maßstab 1 : 5 000 in einzelnen räumlichen Ausschnitten zu gewährleisten. Grundsätzlich sollten bei der stereoskopischen Auswertung Flächen ausgelassen werden, bei denen die Geländeoberfläche nicht einsehbar ist. Für die oben genannten Beispielräume konnte dies beim HLVA überprüft werden.

Dabei zeigte sich, daß trotz einer geschlossenen Vegetationsbedeckung eine stereoskopische Auswertung vorgenommen wurde, um die kostenintensive Geländevermessung einzusparen.

### **Profildaten aus der Orthophotoherstellung als Datengrundlage des DHM**

Als zweite Datengrundlage des hessischen DHM wurden DHM-Ausschnitte auf Basis von Profildaten untersucht. Diese stellen ein Folgeprodukt aus der Orthophotoherstellung dar. Als Grundlage dienen Gravurplatten zur differentiellen Entzerrung von Luftbildern. Diese bilden Profillinien im 40 m Abstand ab. Sie wurden digital erfaßt, entlang der Profillinie auf 10 m-Abstand ausgedünnt und auf ein gleichmäßiges 40 x 40 m-Raster interpoliert.

Eine Interpolation auf ein 20 x 20 m-Raster oder enger kann zu keiner wesentlichen Verbesserung der Geländeabbildung führen, da die Abstände der gemessenen Profile 40 m betragen. Die Ableitung eines hochauflösenden DHM ist schon aufgrund dieser Tatsache bedenklich.

Die interpolierten Rasterdaten, basierend auf abgeleiteten Höhendaten aus Profillinien, weisen darüber hinaus eine ganze Reihe von Mängeln auf, die eine Nutzung stark einschränken. Hierzu zählt das Vorkommen von meist 40 bis 80 m breiten, Nord-Süd ausgerichteten Gräben oder Graten, die vermutlich ein Randeffekt der Bearbeitungsausschnitte darstellen und durch Datenfehler hervorgerufen werden. Darüber hinaus treten dellen- und rückenartige Strukturen in Hanglagen, besonders bei stärkeren Hangneigungen auf, die nach Köhler (HLVA, freundl. mündl. Mitt.) durch einen verzögernden "Schleppfehler" beim dynamischen Auswerten der Profillinien hervorgerufen werden (vgl. Abb. 9).

Dieser Fehler wird zwar von Seiten des HLVA als systematisch bezeichnet, bei der Überprüfung mehrerer Ausschnitte konnte jedoch keine eindeutige Systematik festgestellt werden, die es erlauben würde, eine DV-technische Bereinigung der Daten vorzunehmen. Reliefverzerrende Fehler werden auch von MÜLLER & RASCHKE (1991) festgestellt. Sie beschreiben "abwechselnd positive und negative Höhendifferenzen im Meterbereich", die zu einer "Streifigkeit" der Höhenlinien führen.

Als weiterer Problembereich der Profildaten kann eine deutliche Lageuntreue gegenüber der TK 5- sowie der TK 25-Topographie festgestellt werden, die bis zu 100 m Abweichung aufweist.



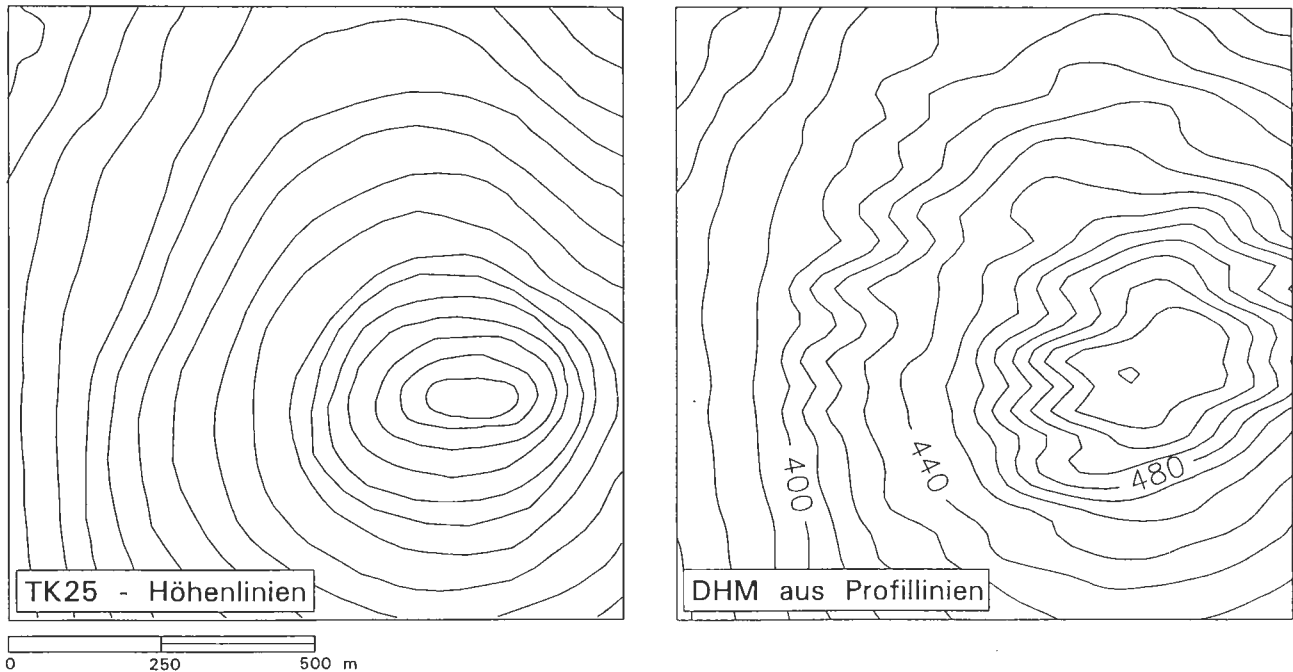


Abb. 9 Vergleich Topographische Karte und DHM aus Profildaten mit Schleppfehler (Detailausschnitt TK 25, Blatt 5224 Eiterfeld)

### Höhenkoten des Umlandverbandes Frankfurt als Datengrundlage des DHM

Für den Gebietsbereich des Verbandes wurden mittels stereoskopischer Luftbildauswertung für die Entzerrung zu Orthophotos - im Gegensatz zu den Profildaten des HLVA - punktuell Höhenkoten erfaßt, die in ihrer Datendichte auf die Entzerrung von Luftbildern abgestimmt sind. Hierbei handelt es sich um mehr oder weniger rasterartig angeordnete Punktdaten mit Abständen von meist 40 - 80 m, wobei eine deutliche Verdichtung der Meßpunkte an Böschungen, Dämmen, Wegen etc. zu erkennen ist. Natürliche Reliefformen wurden weniger berücksichtigt, so daß Hangdellen und kleinere Rücken häufig gar nicht in Erscheinung treten. Eine Interpolation dieser Daten auf ein 40 m-Raster stellt ebenfalls die am höchsten anzustrebende Auflösung dar. Die Datendichte wird hierbei gegenüber den Ausgangsdaten erheblich überschritten. Systematische Fehler konnten für die untersuchten Flächen nicht nachgewiesen werden. Das Relief erscheint sehr weich, ohne größere Unregelmäßigkeiten. Kleinere Strukturen sind generalisiert. Diese Rasterdaten eignen sich daher gut für die Bearbeitungen im Maßstab 1 : 50 000 bis 1 : 200 000. Allerdings treten auch hier z. T. Lageverschiebungen geomorphologischer Einheiten gegenüber den analogen Kartenwerken TK 25 und TK 5 auf.

Die Höhenraster der drei untersuchten Datengrundlagen weisen somit sehr unterschiedliche Qualitäten auf. In Abbildung 10 ist die Datendichte und räumliche Verteilung der Höhenkoten für die oben beschriebenen Datengrundlagen dargestellt.

#### 4.2.2 Bewertung des Digitalen Höhenmodells im Hinblick auf die Reliefanalyse

Für den Einsatz einer geomorphographischen Reliefanalyse werden hohe qualitative Anforderungen an ein DHM gestellt. Diese wurden bereits in Bezug zur Datenqualität und Auflösung aus der Sicht der geomorphographischen Reliefanalyse definiert.

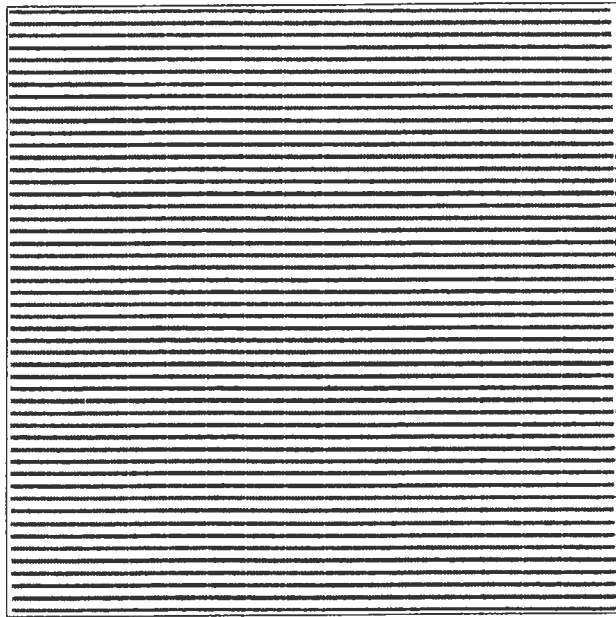
Wie in den Abschnitten 4.1 und 4.2 ausführlich dargestellt, ist die standardmäßig vorgehaltene Auflösung des hessischen DHM für die Anwendungen in der Reliefanalyse als nicht ausreichend anzusehen. Zur großmaßstäbigen Abbildung des Reliefs, wie auch als Eingangsparameter in Rechenmodellierungen, wird für Bearbeitungsmaßstäbe von 1 : 25 000 und größer eine Auflösung von mindestens 20 x 20 m benötigt. Höhenmodelle dieser Auflösung müssen in Hessen z. Zt. mit zusätzlichem Aufwand vom HLVA erst nach Auftrag eines Anwenders erstellt werden. Für den routinemäßigen Einsatz von DHM zur Reliefanalyse im Vorfeld einer bodenkundlichen oder geologischen Kartierung sowie zur Ableitung von Reliefattributen für andere Modellierungen bedeutet dies einen umfangreichen zusätzlichen Zeit- bzw. Kostenaufwand. Hierdurch werden die Einsatzmöglichkeiten des DHM und der Reliefanalyse aus Gründen der Kosten-/Nutzungsrelation stark eingeschränkt.

Die vorgehaltenen Daten sind darüber hinaus nicht auf Fehler kontrolliert. Die im Rahmen des Projektes bezogenen DHM-Blattschnitte waren zu ca. 80 % mangelhaft. Auch nach einer Dokumentation von fehlerhaften Daten kann derzeit kein kurzzeitig verbesserter Datenbestand als Ersatz geliefert werden. Für den Einsatz des hessischen DHM in der vorliegenden Untersuchung bedeutete dies jedoch eine zeitintensive Kontrolle der Datengrundlage. Bei den verwendeten DHM/TK 5-Blattschnitten war z. T. eine erneute Digitalisierung ganzer TK 5-Blattschnitte erforderlich. Hauptfehler waren falsche Eintragungen bei den Höhenangaben einzelner Höhenpunkte sowie ganzer Höhenlinien. Bei den in Stützpunkte zerlegten Höhenlinien mußten dabei alle Einzelwerte bereinigt werden.

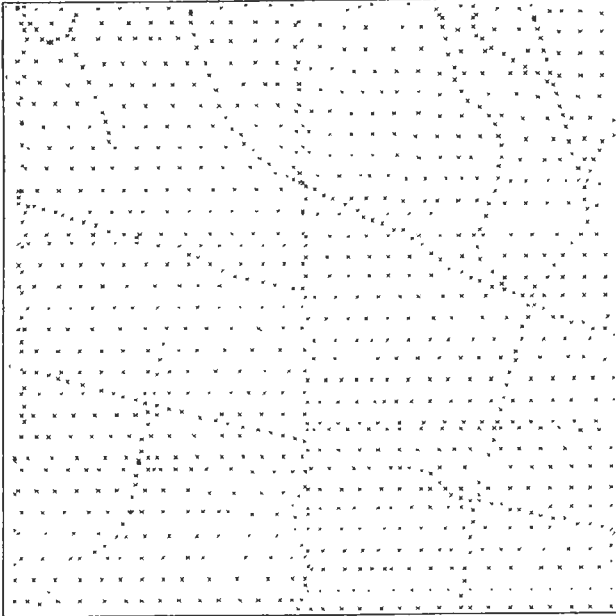
Ein weiteres Problem der genutzten Daten bestand in dem schon angesprochenen örtlichen Auftreten von Lageverschiebungen vom Höhenmodell im Vergleich zur TK 25. Dies wurde besonders bei der digitalen, reliefbezogenen Auswertung von Bodenkarten deutlich. Bei der Auswertung von punkt- und flächenbeschreibenden Raumdaten, die auf Basis der TK 25 erhoben wurden, konnte stellenweise eine deutliche räumliche Abweichung zum DHM festgestellt werden. Die Unterschiede sind nicht nur in einer Generalisierung des Reliefs auf Basis verschiedener Maßstäbe begründet, sondern sind auch in der räumlichen Verschiebung bzw. Lageungenauigkeit von Reliefeinheiten zu sehen. Am deutlichsten läßt sich dies an kleinen Tälern aufzei-



Stützpunkte digitalisierter Höhenlinien  
und Höhenpunkte der TK5



Ausgedünnte Profildaten aus der  
Orthophotoherstellung (HLVA)



Höhenpunkte,  
erhoben für die Orthophotoherstellung  
des Umlandverbandes Frankfurt

Abb. 10 Verteilung und Datendichte unterschiedlicher Datengrundlagen des hessischen Digitalen Höhenmodells

gen, wo häufig bodenkundliche Flächeneinheiten, die an Talformen gebunden sind, eine deutliche Lageverschiebung vom analogen topographischen Kartenwerk zum DHM aufweisen (s. Abb. 11). Dadurch wird eine digitale Auswertung flächenhafter Fachdaten mit dem DHM stark eingeschränkt.

Der Einsatz von rechnergestützten Auswertungen zeigt hier deutliche Nachteile gegenüber einer analogen Umsetzung von Karteninhalten auf unterschiedlichen Kartengrundlagen gleichen oder kleineren Maßstabs. Bei der derzeit üblichen analogen Bearbeitung kann eine Lagediskrepanz durch geomorphologisch interpretierte Anpassung weitestgehend bereinigt werden.

Mit der Forderung nach einer möglichst lagetreuen Darstellung von geowissenschaftlichen Fachdaten sollte mittelfristig eine großmaßstäbige Kartengrundlage in einheitlicher Qualität in digitaler und analoger Form verwendet werden. Hierzu eignet sich grundsätzlich die TK 5, die allerdings mittelfristig nicht flächendeckend vorliegen wird. Da die TK 5 und das daraus abgeleitet DHM weitgehend übereinstimmen, überrascht es nicht, daß in Teilräumen auch die analogen Kartenwerke 1 : 5 000 und 1 : 25 000 Lageverschiebungen zueinander aufweisen (vgl. FRIEDRICH & SEMMEL 1993). Eine Vereinheitlichung der geometrischen Genauigkeit für diesen Maßstabsbereich ist jedoch mit der Einführung des Digitalen Landschaftsmodelles 1 : 25 000 (ATKIS DLM 25/1) ab 1996 zu erwarten.

Die Sekundärprodukte aus der Orthophotoherstellung genügen den fragestellungsorientierten Ansprüchen einer geomorphographischen Reliefanalyse nicht. Auch die Standardauflösung des hessischen DHM mit 40 x 40 m ist für diese Aufgabenstellung nicht ausreichend. Aufgrund der unzureichenden Datenqualität der primären digitalisierten Profildaten wurde die Bearbeitung von den betroffenen Testgebieten stark eingeschränkt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wurde für die Erarbeitung und Anwendung von Methoden zur Reliefauswertung das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach ausgewählt. Das Gebiet weist auf einheitlichem Ausgangsgestein (Tonschiefer, Devon) repräsentative Deckschichtenverhältnisse auf. Entscheidend für die Gebietsauswahl war jedoch, daß für einen vollständigen TK 25 Blattschnitt Daten auf Basis digitalisierter Höhenlinien und Höhenpunkte der TK 5 zur Verfügung stehen. Hierzu wurden die Rohdaten weitgehend überarbeitet und teilweise durch zusätzlich erfaßte Gerippelinien ergänzt. Die überarbeiteten Rohdaten wurden am HLVA mit HIFI<sup>88</sup> zu einem DHM mit 20 x 20 m sowie kleinräumig mit 12.5 x 12.5 m Auflösung interpoliert. Mit Einschränkung im Bereich von Senken konnte ein DHM erstellt werden, das den Anforderungen an eine

großmaßstäbige Reliefanalyse entspricht. Die Diskussion der erarbeiteten Methoden zur Reliefanalyse werden daher vorwiegend auf Basis dieses Datenbestandes durchgeführt.

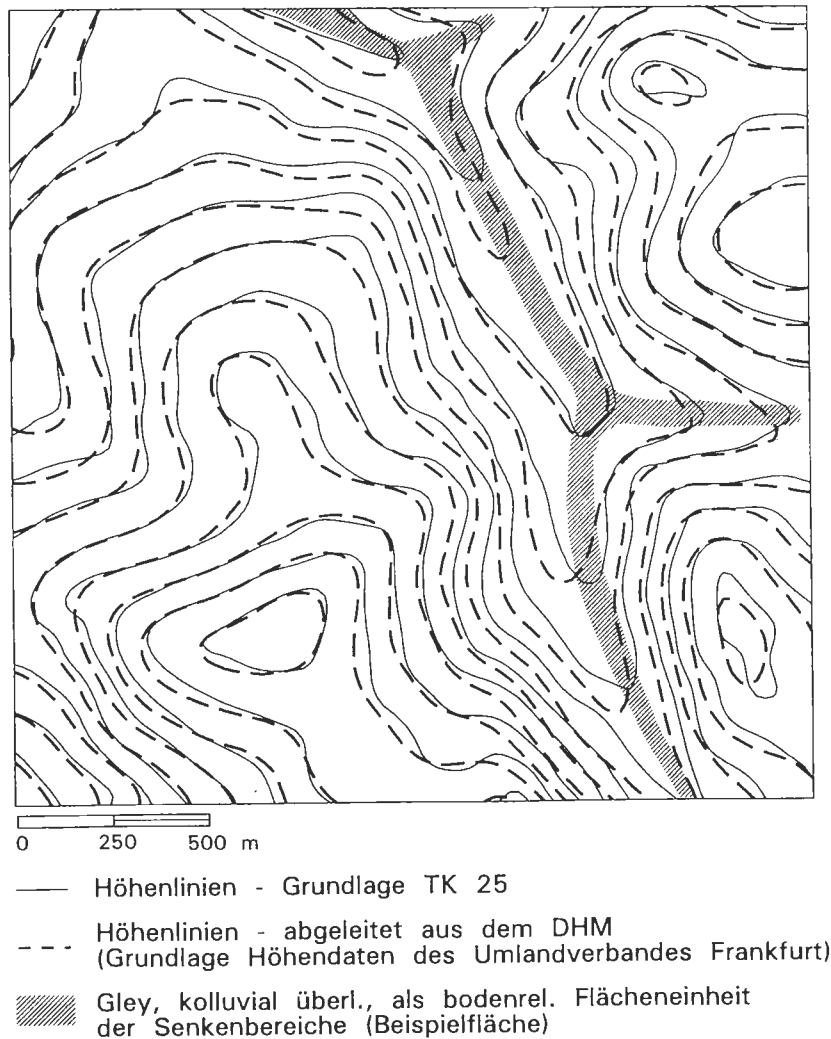


Abb. 11 Lagetreue eines DHM zur analogen Karte TK 25 (Detailausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)

### 4.3 Ableitung geomorphometrischer Reliefparameter

Für die reliefgestützte Ermittlung von deckschichtenrelevanten Flächeneinheiten werden für die digitale Bearbeitung eine Vielzahl von Reliefparametern benötigt, die aus dem DHM abzuleiten sind. Allgemein werden unter diesen Ableitungen reliefbeschreibende Parameter verstanden. Diese müssen hinsichtlich der Art ihrer Bestimmung und ihres beschreibenden Charakters in unterschiedliche Gruppen zusammengefaßt werden. Umfassende Definitionen sind in Abschnitt 4.3.1 zusammengestellt. Im folgenden sollen die Reliefattribute aus Sicht der Datengewinnung abgegrenzt werden.

Nachbarschaftsbezogene geomorphometrische Reliefattribute werden mit Hilfe der unmittelbaren Rasterumgebung (Nachbarschaftsrasterzellen) abgeleitet. Hierzu zählt die Exposition, Neigung und Krümmung an einem betrachteten Punkt (Rasterzelle). Diese können durch Klassifikationsverfahren zu geomorphographischen Reliefeinheiten im Sinne von KUGLER (1974) oder anderen Verfahren in flächenhafte Einheiten überführt werden (vgl. Kap. 6). Beschreibt das Reliefattribut eine Größe im Zusammenhang eines Prozeßbereiches ohne Berücksichtigung geomorphographischer Grenzen im Sinne der Formgestalt, wird dieses allgemein als analytisches Reliefattribut verstanden (vgl. Abschn. 4.3.2). Hierzu zählen bspw. Angaben über die Größe eines oberirdischen Einzugsgebietes. Statistische Auswertungen für die unmittelbare oder definierte Nachbarschaft einer Rasterzelle werden als statistische Reliefattribute bezeichnet. Als einfaches Beispiel kann hier die Reliefenergie innerhalb einer definierten Umgebung (Windowtechnik, Filterfunktionen) herangezogen werden.

Für die Berechnung von Reliefattributen und die Durchführung geomorphographischer Reliefanalysen wurden bereits in den 60er Jahren Algorithmen und Klassifizierungsschemata entwickelt (vgl. HORMANN 1968). Eine sehr weitgehende computergestützte geomorphographische Reliefbeschreibung liegt insbesondere durch die Arbeiten von EVANS (1972, 1980) vor. Eine konsequente computergestützte geomorphographische Reliefanalyse durch ein hierarchisches Klassifizierungsschema wurde von DIKAU (1989) vorgelegt. Ein umfassender Überblick zur historischen Entwicklung der geomorphographischen Reliefanalyse ist bei DIKAU (1992) zu finden.

Für die Berechnung reliefbeschreibender Parameter zeigte sich die Einbindung des Braunschweiger Digitalen Reliefmodells (DRM) als vorteilhaft (BAUER et al. 1985). Die Einbindung dieses Modells wurde schon zuvor in unterschiedlichen Forschungsprojekten vorgenommen. Hierzu sind als Beispiele BORK et al. (1985, 1987) und HENSEL & BORK (1987) zu nennen. Insbesondere aber für den Einsatz im Bereich der Reliefanalyse konnte KÖTHE (1988), DIKAU (1989, 1992) sowie KÖTHE & LEHMEIER (1991) die Verwendbarkeit demonstrieren.

Das DRM ist eine Programmsammlung einzelner Fortranroutinen. Als Basisdaten werden rasterorientierte DHM-Daten verarbeitet. Die abgeleiteten Attribute werden ebenfalls als Rasterdaten in Dateien abgelegt und können so als Eingangsdaten für weitere Auswertungen Verwendung finden. Die Fortran-Programme wurden für die vorliegende Arbeit auf einer VAX-Station unter VMS implementiert. Veränderungen wurden im wesentlichen nur an den Daten Eingabe-/Ausgaberroutinen vorgenommen.

Zum Teil wurden die Programmodule durch eigene Entwicklungen ersetzt oder er-

gänzt. Die verwendeten Programme des DRM und ergänzende eigene Entwicklungen sind in Übersicht A1 und A2 im Anhang zusammengestellt.

#### 4.3.1 Ermittlung nachbarschaftsbezogener geomorphometrischer Reliefattribute

Für die geomorphometrische Beschreibung des Reliefs an einem beliebigen Punkt ist zunächst die Ableitung von Parametern notwendig, die den betrachteten Höhenpunkt  $z(f_{x,y})$  in Bezug zu den umgebenden Höhenpunkten beschreibt. Eine maßstaborientierte geomorphometrische Beschreibung des Reliefs ist dabei wesentlich von der Entfernung zu den benachbarten Punkten abhängig. Bei der Verarbeitung rasterorientierter DHM ist daher die Bestimmung von Reliefattributen aus einer Nachbarschaftsanalyse grundlegend von der Auflösung des DHM beeinflusst. Die hier auf Basis des DHM abgeleiteten Attribute werden als nachbarschaftsbezogene geomorphometrischen Reliefattribute verstanden. Hierzu zählen im wesentlichen:

##### Neigung

(Länge des Gradienten) Neigung in Richtung der größten Höhenänderung des betrachteten Punktes zu den Nachbarpunkten. (Angabe des Winkels von der Horizontalen zum Bezugspunkt in Grad, Promille oder Steigung).

##### Exposition

(Gradient) Richtung der größten Neigung (in Altgrad  $0^\circ - 360^\circ$ ).

##### Krümmung

Die Krümmung der Erdoberfläche wird in der Geomorphologie im allgemeinen durch die Beschreibung von Wölbungsradien erfaßt. Die Krümmung ist dabei mit  $1/\text{Krümmungsradius}$  (in m) festgelegt.

Entgegen der Vorstellung von RICHTER (1962), KUGLER (1974), DIKAU (1988) und KLEEFISCH & KÖTHE (1993) wird die Krümmung eines Punktes in einer Fläche nicht durch zwei, sondern im wesentlichen durch 3 Parameter bestimmt. Hierzu zählt zunächst die Vertikalkrümmung. Sie beschreibt die Veränderung der Neigungsstärke in Richtung des Abflusses. Sie kann veranschaulicht werden durch ein Schnittprofil lotrecht zur verlaufenden Abflußrichtung. Betrachtet man diese nicht als Vertikalschnitt, sondern projiziert man sie auf eine horizontale Schnittebene, so erhält man als zweite Krümmung die Abflußkrümmung.

Die dritte Krümmungsvariante beschreibt die Änderung der Neigungsrichtung (Exposition). Zur Kennzeichnung dieser Krümmungstendenz wird in der Geomorphologie i. d. R. eine senkrechte Wölbungsachse verwendet und hieraus die Horizontalkrümmung bestimmt. Sie entspricht der Krümmung einer Isohypse.

Die Horizontalkrümmung ist jedoch monoton von der Neigung abhängig, so daß bei gleicher Formgestalt in Abhängigkeit vom Gefälle sehr unterschiedliche Krümmungsradien bestimmt werden. Betrachtet man bspw. als idealisierte Form eine Halbkugel, so zeigt sich, daß trotz gleichbleibender Formgestalt die Horizontalkrümmung vom Äquatorialbereich zum Top entgegen der statischen Vertikalkrümmung abnimmt (vgl. Abb. 12). Bei Verwendung einer rechtwinkligen Wölbungsachse zur Neigung eines betrachteten Punktes kann dieses Problem ausgeschaltet werden. Diese Krümmungstendenz wird von HORMANN (1971) als Querwölbung beschrieben und soll im Rahmen dieser Arbeit mit Querkrümmung bezeichnet werden. Diese stellt einen vierten Krümmungsschnitt dar, der jedoch mit Hilfe der Steigung direkt aus der Horizontalkrümmung ableitbar ist.

Mit Hilfe der Vertikal-, Quer- und Flußkrümmung sind Krümmungen an beliebigen Schnitten ableitbar. Die Berechnung eines Krümmungsradius an einem Punkt kann mit Hilfe eines DHM aufgrund seiner gitterförmigen Datenmatrix sehr einfach bestimmt werden. Mit Hilfe einer 3 x 3 Umgebung von Höhenwerten wird eine quadratische Fläche (Näherungspolynom zweiten Grades) approximiert. Unter Zuhilfenahme dieser Näherungsfläche kann dann der Gradient (Exposition), die Länge des Gradienten (Neigung) sowie Krümmungen abgeleitet werden. Die mathematische Herleitung ist in BAUER (1985) und BAUER & ROHDENBURG & BORK 1985 beschrieben. Daher sollen im folgenden nur weiterführende Ableitungen im Detail besprochen werden.

Die Ermittlung der Exposition und der Steigung (bzw. Neigung) erfolgt aus der ersten partiellen Ableitung. Zur Berechnung wird um die Nachbarrasterzellen (3 x 3 Umgebung) ein Näherungspolynom zweiten Grades gelegt. Unter Verwendung der finiten Differenzen kann so mit Hilfe der Nachbarrasterzellen die erste Ableitung erfolgen. Beide Attribute werden in Alt-Grad sowie die Neigung wahlweise in Gefälleprozent abgespeichert.

Die Krümmung eines einheitlichen Reliefausschnittes wird zunächst durch eine vertikale (dem potentiellen Wasserfluß folgenden) und durch eine horizontale (dem Verlauf der Höhenlinien folgenden) Veränderung der Neigung bzw. der Neigungsrichtung beschrieben. Sie beinhalten somit eine zweite Ableitung aus den Reliefparametern Exposition (Gradient) und Neigung (Länge des Gradienten).



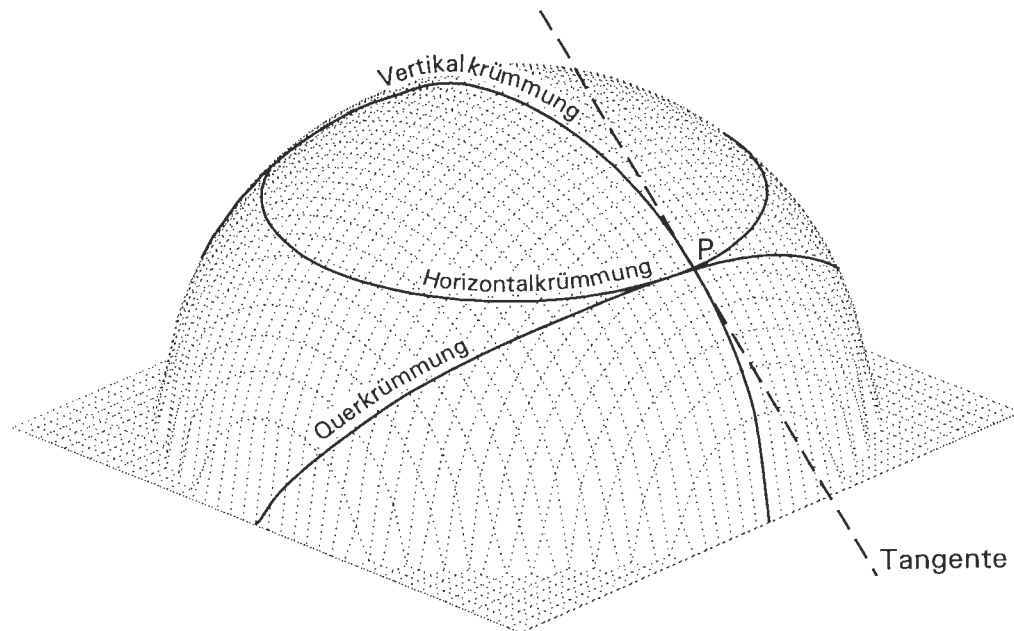


Abb. 12 Vertikal-, Horizontal- und Querkrümmung, dargestellt an einer Halbkugel als Oberflächenform

Die Vertikalkrümmung wird dabei im Verlauf der Exposition (Abflußrichtung) durch ein quadratisches Polynom bestimmt. Der positive Wertebereich kennzeichnet konkave Krümmungen, negative Werte stellen konvexe Formen dar.

Die Horizontalkrümmung verläuft entlang der Isohypsen und damit in ebener Lage. Dies vereinfacht das Verfahren gegenüber der Ermittlung der Vertikalkrümmung, da in Anlehnung an die erste Ableitung vorgegangen werden kann. Werte mit positivem Vorzeichen stellen divergente, negative Werte konvergente Verhältnisse dar.

Die Flußkrümmung stellt die Krümmung der Abflußlinie in einem betrachteten Punkt - im Gegensatz zum vertikalen Schnitt - als Aufsicht dar. Im Bezug zur idealisierten Form einer Halbkugel in Abbildung 12 entspricht dies der horizontalen Aufsicht auf die Abflußlinie, die in diesem Fall gestreckt, die Krümmung also 0 ist.

Die Flußkrümmung kann als links- (-) oder rechtsdrehend (+) sowie als Absolutwert verwendet werden. Auf Grundlage der von Bauer (1985) verwendeten Koeffizienten ( $a_j := f_x, f_y, f_{xx}, f_{yy}, f_{xy}$ ) kann die Flußkrümmung ( $K_F$ ) wie folgt bestimmt werden:

$$K_F := \frac{f_{xy}(f_x^2 - f_y^2) - (f_{xx} - f_{yy}) f_x f_y}{(f_x^2 + f_y^2)^{3/2}}$$

Mit den vorgestellten Krümmungsvarianten ist die Oberflächenkrümmung als mathematische Funktion beschrieben. Hieraus lassen sich weitere Schnitte mit entsprechender Krümmung am betrachteten Punkt ableiten, die für spezielle Fragestellungen sinnvoll sein können. Für die Reliefanalyse mit Distanzverfahren ist dies z. B. die schon oben beschriebene Querkrümmung.

Diese stellt die Krümmung an einem Punkt, in einem im Lot zur Neigung um  $90^\circ$  vom Gradienten (Exposition) verdrehten Schnitt dar. Vollformen werden als divergent (+), Hohlformen als konvergent (-) ausgewiesen. Die Ableitung der Querkrümmung ( $K_Q$ ) kann neben einer direkten Ableitung aus der approximierten quadratischen Fläche auch aus den Parametern Horizontalkrümmung ( $K_H$ ) und Steigung ( $i$ ) erfolgen. Dies geschieht durch die Formel:

$$K_Q =: \frac{K_H}{\sqrt{1 + \frac{1}{(f_x^2 + f_y^2)}}}$$

Entgegen der Verwendung der Begriffe Wölbung und Wölbungsradius wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Begriffe Krümmung und Krümmungsradius zurückgegriffen. Die Bereitstellung von Krümmungsdaten ist für die Modellierung, Simulation und Statistik entscheidend. Vor allem für multivariate Distanzverfahren liegt bei Wölbungsradien - als klassisches Maß in der Geomorphographie - eine ungeeignete Werteverteilung vor. Konkave Bereiche werden mit einem negativen Vorzeichen gekennzeichnet, während konvexe Bereiche als Vollform im positiven Wertebereich liegen. Die Extreme - stark konvex und konkav - mit kleinen Wölbungsradien liegen dabei in der Werteskala nahe beieinander. Dieses Problem, vor allem bei der statistischen Differenzierung der genannten Datenbereiche, läßt sich durch eine Überführung der Wölbungs- bzw. Krümmungsradien in die Krümmung ( $1/m$  Radius) lösen. Während die gestreckten Hangbereiche mit leichter Konkavität bzw. Konvexität nun gegen 0 tendieren, sind die Wölbungsextreme gegen 1 bzw. -1 verteilt. Für die Beschreibung geomorphographischer Reliefelemente wird jedoch die Krümmung als Krümmungsradius vorgehalten.

Die geomorphometrischen Reliefattribute Exposition, Neigung und die Vertikal- bzw. Horizontalkrümmung wurden zunächst mit Hilfe des Programms DRMGEF des Braunschweiger DRM berechnet. Im Vergleich zur Approximation auf Basis einer quadratischen Fläche, wie sie nach BAUER (1985) beschrieben wird, ergaben sich jedoch erhebliche Abweichungen der berechneten Werte bei der Überprüfung der Vertikal- und Horizontalkrümmung. Dabei kommt es in einer nicht nachvollziehbaren Weise bei den

berechneten Krümmungen zunächst zu deutlichen Abweichungen der Ergebnisse. Bei den Horizontalkrümmungen kommt es darüber hinaus bei einem Teilbestand der Daten zu einer Umkehr der Vorzeichen. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Berechnung nach DRM und der neu erstellten Programmroutine gegeneinander abgetragen. Die Punkte mit Vorzeichenumkehr wurden überprüft, wobei ein eindeutiger Fehler der DRM-Daten festgestellt werden mußte. Die betroffenen Rasterzellen sind für ein Beispielgebiet in Abbildung 13 dargestellt. Hier kann schon meist durch Betrachtung der Höhenlinien der Fehler der DRM-Daten ersehen werden.

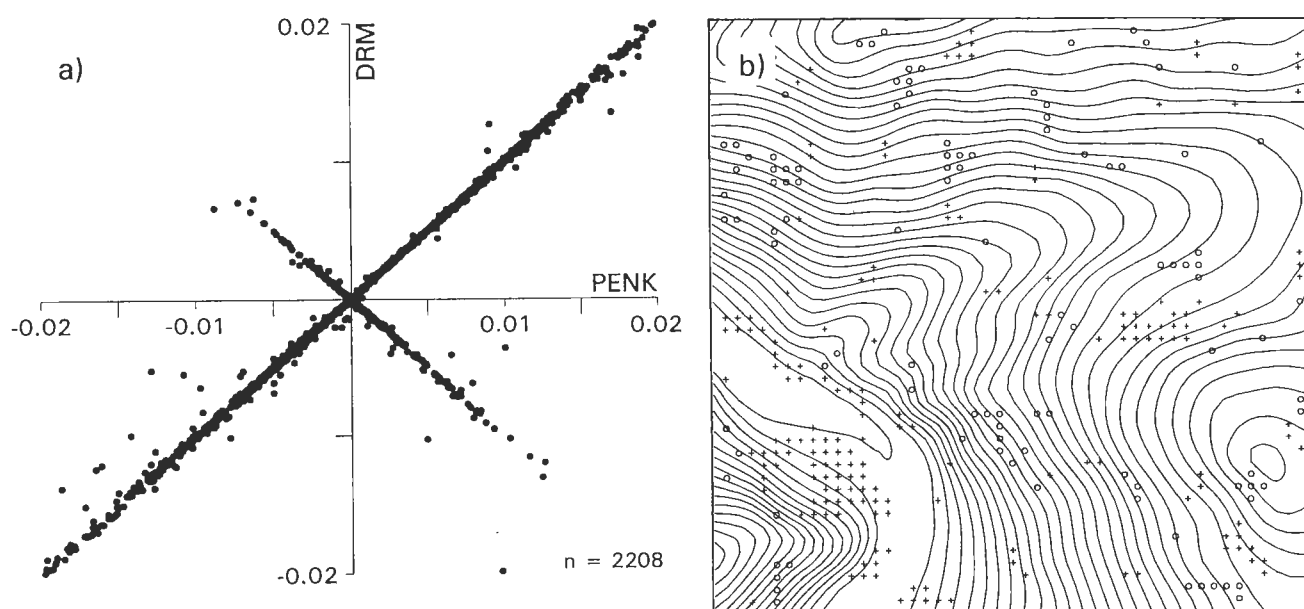


Abb. 13 Gegenüberstellung der berechneten Horizontalkrümung (DRM) und eigener Berechnung (PENK), (Ausschnitt Blatt Grävenwiesbach)

- a) Abweichung und Vorzeichenumkehr aus eigener Berechnung und DRM
- b) Verteilung der Vorzeichenumkehr
  - + PENK konvex / DRM konkav
  - o PENK konkav / DRM konvex

Dieses Ergebnis konnte durch Berechnungen mit dem an der Universität Heidelberg implementierten DRM bestätigt werden, so daß ein Fehler in der vorliegenden Programmversion ausgeschlossen werden kann. Da die Abweichungen durch eine Überarbeitung der Programmroutine nicht eliminiert werden konnten, wurde hierzu ein neues Programmmodul entwickelt, das neben der Horizontal- und Vertikalkrümung die Fluß- und Querkrümmung berechnet (siehe Übersicht A2). Die Krümmung kann dabei auch wahlweise als Krümmungsradius ausgegeben werden.

#### 4.3.2 Ermittlung komplex-analytischer Reliefattribute

Für die Verbreitung von periglazialen Deckschichten im Hangbereich sind die Faktoren Klima, Untergrundmaterial, Relief und Zeit sowie der in Abhängigkeit hierzu stehende Faktor Vegetation von Bedeutung. Die Sedimententwicklung hängt dabei wesentlich von Faktoren ab, die in Zusammenhang mit dem Prozeßbereich stehen. Hierunter ist die Strecke zwischen Materialliefergebiet und dem Standort selbst zu verstehen. Hierzu kann die Strecke vom betrachteten Standort zur Hangobergrenze sowie die Analyse des Streckenverlaufs wichtige Erkenntnisse zur Charakterisierung des Prozeßbereiches liefern. Als Hangobergrenze darf nicht allein eine Wasserscheide verstanden werden. Ein Sporn stellt z. B. ebenfalls eine Hangobergrenze dar. Hier gibt es jedoch häufig keinen Prozeßbezug zur Wasserscheide des eigentlichen Bergrückens oder zum Kulminationspunkt der höchsten Erhebung eines Berges. Als räumliche Obergrenze eines Hangbereiches sind somit Kulminationslinien oder allgemein Divergenzlinien und -punkte im Sinne von ROESCHMANN & LEHMEIER (1993) zu sehen.

Die hierzu ableitbaren Reliefattribute stellen also, im Gegensatz zu den geomorphometrischen Reliefattributen aus der Nachbarschaftsanalyse, Ergebnisse eines simulierten Abflusses dar. Aus diesem Grunde werden die im folgenden beschriebenen Attribute als komplex-analytische Reliefattribute bezeichnet. Die Grundlagen zur Ableitung dieser Reliefattribute stellen ebenfalls die Programmodule des Braunschweiger DRM.

Ein wichtiges Attribut stellt die Größe des Einzugsgebietes für jede einzelne Rasterzelle dar. Die Definition einer Einzugsgebietsgröße darf dabei nicht im hydrologischen Sinne verstanden werden. Bei den hier bestimmten Einzugsgebietsgrößen wird von einem hypothetischen Oberflächenabfluß ausgegangen. Dabei werden die Flächenanteile bestimmt, deren modellierter Abfluß unter Annahme einer undurchlässigen Oberfläche in eine Rasterzelle münden. Der Modellansatz sieht dabei vor, daß für divergierende Bereiche der Abfluß einer Rasterzelle in maximal drei Rasterzellen münden kann. Für konvergierende Hangbereiche kann der Abfluß von maximal drei Rasterzellen in eine Rasterzelle münden. Die Hauptrichtung des Abflusses wird dabei durch die Exposition (Gradient) vorgegeben. Durch die Simulation von Fließbahnen wird ermittelt, ob der Abfluß in eine oder bis zu drei Rasterzellen erfolgt und in welchem Verhältnis die Abflußanteile liegen. Die kategorisierte Exposition und die Abflußanteile werden in einer Datei als "Abflußstreuung" abgelegt, da sie auch für die Ermittlung der Entfernung zur Tiefenlinie bzw. Wasserscheide benötigt werden. Diese Vorgehensweise stellt sicher, daß selbst höhergelegene Hangbereiche mit konvergierenden Formen weit größere Einzugsgebietsgrößen aufweisen können als tiefenliniennahe divergierende Bereiche.

Die Abarbeitung erfolgt vom höchsten zum niedrigsten Geländepunkt eines Arbeitsausschnittes. Wird ein Abfluß vom Rand zum Inneren des Arbeitsgebietes simuliert, kann i. d. R. davon ausgegangen werden, daß das betreffende Einzugsgebiet über den Ausschnitttrand hinausreicht. Dieses erkennt das Modell. Die im Anschluß simulierten Einzugsgebietsgrößen werden als Werte mit negativem Vorzeichen markiert. In der Kartendarstellung werden diese Flächenanteile mit sogenannten Missing Values belegt und bleiben deshalb unklassifiziert (Kt. 8). Eine flächendeckende Bereitstellung der Einzugsgebietsgrößen erfordert daher eine Bearbeitung entsprechend großer Gebiete über den eigentlichen Arbeitsausschnitt hinaus.

Zusätzlich wird mit dem Programm DRMEGN neben den Einzugsgebietsgrößen die mittlere Neigung des Einzugsgebietes bestimmt. Hierbei werden die Neigungen aller Rasterzellen gemittelt, die in eine Zielrasterzelle (betrachtete Rasterzelle bzw. Standort) einmünden. Die gemittelte Neigung stellt hierbei eine Behelfsgröße bezüglich des Transportfaktors Gravitation dar.

Um die Entfernung zur Tiefenlinie sowie die Entfernung zur Divergenzlinie bestimmen zu können, müssen zunächst die Strukturelemente Tiefenlinien und Wasserscheiden abgeleitet werden.

Als Eingangsparameter zur Bestimmung der Tiefenlinien muß der Eingangswert  $E_{\min}$  angegeben werden. Diese Größe bestimmt den Anfangspunkt einer Tiefenlinie. Dies bedeutet, daß erst nach Erreichen einer vom Bearbeiter vorgegebenen Oberflächeneinzugsgebietsgröße eine Tiefenlinie einsetzen kann. Nur wenn der Zufluß konvergent ist, wird bei Überschreiten von  $E_{\min}$  der Startpunkt einer Tiefenlinie gesetzt. Von diesem Ansatzpunkt ausgehend wird die Tiefenlinie bis zum Rand des Ausschnittes simuliert. Wird eine abflußlose Mulde erreicht, endet die Tiefenlinie dort.

Sind alle Tiefenlinienrasterzellen ermittelt, wird das gesamte Gitterraster bezüglich der Entfernung zur Tiefenlinie abgearbeitet. Dabei wird für jede Rasterzelle innerhalb des DHM entlang einer Abflußlinie bis zu einer Tiefenlinienrasterzelle ein Profil simuliert. Die Länge dieses Profils und die Koordinaten der zur betrachteten Rasterzelle gehörenden Tiefenlinienrasterzelle werden als Parameter in einer Datei abgelegt. Endet der simulierte Abfluß nicht in einer Tiefenlinienrasterzelle, sondern am Rand des Arbeitsausschnittes oder in einer nicht als Tiefenlinie deklarierten Mulde, wird die Ausgangsrasterzelle mit einem Missing Value versehen. Um einen flächendeckenden Datenbestand zu erreichen, muß der Landschaftsausschnitt für die Berechnung entsprechend größer als der Arbeitsausschnitt gewählt werden.

Für Gebiete ohne abflußlose Formen treten durch Daten- und vor allem Interpolationsfehler in den DHM immer wieder abflußlose Mulden auf (vgl. Abschn. 4.1). Diese können durch den Einsatz des Programms DRMSEE eliminiert werden. Hierbei werden die Höhenwerte für die Bereiche der abflußlosen Hohlformen so lange angehoben, bis ein hypothetischer Überlauf an einer Stelle erzeugt werden kann. Bei einer erneuten Bestimmung von Tiefenlinien kann nun das Modell eine Tiefenlinie über die abflußlose Form hinaus weiterverfolgen. Bei der Elimination von Mulden werden jedoch die Höhendaten in diesen Bereichen verändert. Hier entstehen „Flächen gleicher Höhen“, wie bei einer Seeoberfläche, die nicht das natürliche Relief repräsentieren.

Die Simulation eines Abflusses durch große abflußlose Hohlformen ist jedoch problematisch. Diese treten häufig bei Interpolationsfehlern mit staudammförmigen Schwellen auf, wo ganze Talabschnitte vom Abfluß abgetrennt werden. Hier ist eine Bereinigung des DHM notwendig, um eine sinnvolle Reliefanalyse durchführen zu können.

Die hier ermittelten Größen sind direkt vom Eingangsparameter  $E_{\min}$  abhängig. Mit dem Einsetzen eines größeren  $E_{\min}$ -Wertes werden auch die Strecken bis zum Erreichen einer Tiefenlinienrasterzelle entsprechend verändert.

Die Bestimmung der Strecke zur Tiefenlinie ist eindeutig. Sie wird als Abflußstrecke vom betrachteten Standort (Rasterzelle) bis zum Einmünden in eine Tiefenlinie bestimmt. Diese Größe kann als Hilfsmittel für die Reliefanalyse dienen, sie spielt jedoch für die Hangentwicklungsprozesse keine direkte Rolle.

Für die Ermittlung der Wasserscheiden im Sinne von Divergenzlinien und die Entfernung zu diesen, wird ähnlich wie bei der Ermittlung der Entfernung zur Tiefenlinie verfahren. Die Bestimmung erfolgt in Abhängigkeit von bereits simulierten Tiefenlinien. In einem ersten Schritt wird die Baumstruktur des Tiefenliniennetzwerkes in Ordnungen gemäß den einzelnen Verzweigungen zerlegt. Eine Wasserscheide verläuft dann zwischen zwei Rasterzellen, wenn diese in zwei unterschiedliche Tiefenlinien entwässern. Besitzt eine Rasterzelle keinen Zufluß, so wird auch hier eine Wasserscheide angenommen. In stark divergierenden Bereichen, wo die Abflußrichtung zweier benachbarter Zellen einen großen Winkel aufweist, wird ebenfalls von einer Wasserscheide ausgegangen.

Die Ermittlung der Entfernung zur Wasserscheide erfolgt in gleicher Weise wie bei den Tiefenlinienentfernungen. Jedoch wird hier das Gitternetz von oben nach unten abgearbeitet. Entsprechend der Abflußverhältnisse kann hier die kürzeste und die längste Entfernung zur Wasserscheide berechnet werden. Beide Parameter werden in

Verbindung mit der Koordinate der zugehörigen Wasserscheide in einer getrennten Datei abgelegt.

Um Divergenzlinien als Hangobergrenze und somit nach DRM als "Wasserscheide" ableiten zu können, muß für  $E_{\min}$  ein geringer Wert eingesetzt werden. Für die Arbeitsgebiete wurden hierzu Werte zwischen 5 000 und 20 000 eingesetzt.

Liegt die Wasserscheide außerhalb des Arbeitsausschnittes, wird dies vom Modell erkannt. Es werden dabei die Strecken bis zum Gitterrand bestimmt und wie bei der Einzugsgebietsgröße mit negativem Vorzeichen markiert.

Aus den Dateien Entfernung zur Tiefenlinie bzw. zur Wasserscheide können mit Hilfe der Programme DRMTLP und DRMWSP Tiefenliniennetze bzw. Wasserscheiden als Linienvektoren auf Basis des Gauß-Krüger-Koordinatensystems abgeleitet werden.

#### **4.3.3 Ableitung von Faktoren aus Reliefattributen**

Die aus der Höhe über NN abgeleiteten Reliefparameter, insbesondere Ableitungen aus der Nachbarschaftsbeziehung, stellen numerische Wertebereiche dar, die bezüglich einer Interpretation für den Geomorphologen direkt einsetzbar sind. Diese können auch im Hinblick auf die digitale Reliefanalyse für eine Vielzahl von Aufgabenstellungen als geomorphometrische Größen verwendet werden. Hierzu zählt zunächst die Klassifizierung und Visualisierung der einzelnen Reliefparameter.

Für den Einsatz der Reliefattribute in komplexeren Reliefauswertungen oder Modellen müssen diese z. T. in Faktoren oder Indizes überführt werden, um sie für weiterführende Methoden zugänglich zu machen. Als Beispiel kann hier die Ableitung des LS-Faktors (Topographiefaktor) für die Universal Soil Loss Equation (USLE) von WISCHMEYER & SMITH (1978) herangezogen werden. Bei den verwendeten Reliefattributen wurde dies für die Exposition, Neigung sowie für die Vertikal- und Horizontalwölbung vorgenommen.

#### **Expositionsfaktor**

Während die Hangneigung einen kontinuierlichen Werteverlauf vom Minimum zu Maximum beschreibt, besteht bei der Exposition das Problem, daß eine Nordabweichung in Grad (Alt-Grad) ermittelt wird. Hierbei wird vom DRM ein Wertespektrum

von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  bestimmt. Der minimale und maximale Wert repräsentieren dabei die gleiche Exposition. Das heißt, weit auseinanderliegende Wertebereiche, wie bspw.  $5^\circ$  und  $355^\circ$ , liegen bezüglich ihrer Exposition sehr nahe beieinander. Für eine statistische Auswertung sowie bei der Reliefanalyse mit mehreren Reliefattributen läßt sich ein solches Wertespektrum nur bedingt verwenden. Daher wird für bestimmte Anwendungen die Exposition in einen Expositionsfaktor überführt.

Wie in Abschnitt 2.2 schon angesprochen, spielt die Exposition für die Ausprägung von Deckschichten eine entscheidende Rolle. Die Verteilung von Lößlehm wie auch die Solifluktionenprozesse während des Periglazialklimas, sind entscheidend von der Exposition abhängig. Anhand eines vorwiegenden Eintrags von äolisch transportiertem Löß in einer Hauptexposition läßt sich ein kontinuierlicher Expositionsfaktor bestimmen. Hierbei wird der Hauptexposition der Wert 1 zugeordnet. Die entgegengerichtete Exposition bekommt die Variable  $\min (<1)$  zugeordnet. Die Expositionen dazwischen werden mit und gegen den Uhrzeigersinn kontinuierlich zum  $\min$ -Wert abgesenkt. Da für den Lößeintrag jedoch weniger die Exposition an einem bestimmten Punkt als vielmehr die eines Hangbereiches wesentlich ist, wird hier nicht mit der Exposition der Rasterzelle, sondern mit der mittleren Exposition des Einzugsgebietes gearbeitet. Dies kommt den Eintragsprozessen gegenüber einer Mittelwertbildung mit der Fenstertechnik deutlich näher, da hier der Hangbereich betrachtet wird, der potentiell in Prozeßbeziehung mit der betrachteten Rasterzelle steht.

Im Hinblick auf die Prozesse der Solifluktion und insbesondere der Lößeinwehung ist vor allem die Exposition des hangaufwärts liegenden Prozeßbereiches bis zum betrachteten Punkt (Rasterzelle) von Interesse. Mit Hilfe des DRM können die Rasterzellen des Einzugsgebietes ermittelt werden. Analog zur Bestimmung der mittleren Neigung kann so die gerichtete Exposition des Oberflächeneinzugsgebietes bestimmt werden.

#### **4.3.4 Ableitungen aus Fenstertechniken**

Die bisher vorgestellten Ableitungen beschäftigten sich mit der unmittelbaren Nachbarschaftsanalyse oder einer Reliefanalyse im abflußgerichteten Prozeßgeschehen. Neben diesen soll hier noch eine weitere Variante vorgestellt werden, die sich an der Nachbarschaftsanalyse orientiert. Hierbei handelt es sich um eine Fenster- oder Windowtechnik. Diese Verfahren werden vor allem für die digitale Bildauswertung (z. B. Satelitenbildauswertung) bspw. zur Kontrastverstärkung eingesetzt. In modernen rasterorientierten Geographischen Informationssystemen ist diese Funktionalität meist



frei programmierbar eingebunden (bspw. GRASS, r.mapcalc; LARSON et al. 1991). Für den Bereich der räumlichen Reliefanalyse finden Filterverfahren Einsatz in der Reliefgeneralisierung (WAIBEL 1989) wie auch in der Reliefklassifizierung (KUNDERT 1988; DIKAU 1992). Dabei wird ein Fenster mit einer festzulegenden Rasterzellenanzahl in X- und Y-Richtung definiert. Dieses sollte eine zentrale Zelle besitzen, also als eine 3 x 3-, 5 x 5-, 7 x 7- usw. Umgebung vorliegen. Die Gestalt des zu betrachtenden Ausschnittes muß nicht rechteckig sein, sondern kann auch einen kreisförmigen Ausschnitt beinhalten. Das definierte Fenster kann nun zeilenweise über eine Rastermatrize verschoben werden. Für die zentrale Zelle wird aus den Daten innerhalb des Fensters eine umgebungsabhängige Ableitung vorgenommen. Dies können einfache Filter wie minimaler/maximaler Wert oder die Range (Reliefenergie innerhalb des Fensters) sein. Mit dem hierzu entwickelten Programmmodul DRMWIN können aber auch eine Vielzahl von statistischen Ableitungen vorgenommen werden, wie bspw. Mittelwert, Varianz und Standardabweichung. Da neben der Höhe über NN auch die abgeleiteten Reliefattribute als Eingangsparameter fungieren können, ergibt sich eine Vielzahl von Auswertungsmöglichkeiten. Hier heraus muß eine für die jeweilige Fragestellung wichtige Kombination aus Eingangsattribut, Fenstergröße und Verfahren gewählt werden.

Beispielhaft wurde das Verfahren von KUNDERT (1988) für die reliefgestützte Klassifikation von räumlichen Einheiten eingesetzt. Dabei wurde im Rahmen dieser Arbeit mit verschiedenen Auswertungsverfahren im Hinblick auf kleinere Maßstäbe (< 1 : 50 000) experimentiert. Für den Einsatz im Reliefbereich der Kleinformen, das heißt im Gliederungsbereich eines Hanges, kann dieses Verfahren nur untergeordnet eingesetzt werden. Das Verfahren bietet vom Ansatz der "lokalen Analyse" gute Möglichkeiten für die allgemeine Generalisierung oder Regionalisierung. Es kann für die Gliederung eines Arbeitsgebietes zur Regionalisierung des Reliefs eingesetzt werden (vgl. FRIEDRICH 1993b).

Einen lohnenden Einsatz verspricht die Fenstertechnik in der Reliefanalyse als Hilfsmittel für Klassifizierungsverfahren. Hier können durch eine räumlich eingeschränkte Betrachtung (Fenster) Faktoren für eine Klassifizierung ermittelt werden, die eine Anpassung von Schwellenwerten an die Lokalität ermöglichen (vgl. Abschn. 6.2.2).

#### **4.4 Methodische Ansätze zur Reliefgliederung**

Für die bodenkundliche Landesaufnahme wurden vor allem bei der Bearbeitung von Mittelgebirgslandschaften schon sehr früh geomorphologische Methoden eingesetzt.

Mit dem steigenden Bedarf an flächenhaften bodenkundlichen Daten bei gleichzeitig stagnierender oder rückläufiger Kartierung forderte SEMMEL (1985b) die Intensivierung der Anwendung geomorphologischer Methoden zur Beschleunigung der bodenkundlichen Landesaufnahme. Diese Forderung findet z. Zt. vor allem Niederschlag in der kleinmaßstäbigen bodenkundlichen Landesaufnahme für die BÜK 200.

Methodische Ansätze zur Reliefgliederung liegen aus der Geomorphologie wie auch aus der Bodenkunde bzw. der Bodengeographie vor. Die Geomorphologie stellt dabei ein traditionelles Arbeitsgebiet der Physischen Geographie dar (LESER 1978). Die Teildisziplinen Geomorphometrie und Geomorphographie beschäftigen sich mit der quantitativen und qualitativen Beschreibung des Reliefs. Im Hinblick auf die oben beschriebene Problematik zur Deckschichtengenese werden daher im Rahmen dieser Arbeit geomorphogenetische und geomorphodynamische Verfahren zurückgestellt. Den Schwerpunkt bilden geomorphographische Verfahren.

Die Geomorphometrie und Geomorphographie beschäftigen sich vornehmlich mit den habituellen und räumlichen Formen der Erdoberfläche sowie deren Eigenschaften. Im Sinne von KUGLER (1964) ist dabei die geomorphometrische Betrachtung des Reliefs ein untrennbarer Teilbereich der Geomorphographie. Die Geomorphometrie, als mathematisch definierbare, eindeutige Darstellung von Reliefparametern, ist jedoch nach SOHLBACH (1978) von der Geomorphographie zu trennen, da mit dieser eine subjektive und z. T. weniger exakte Reliefbeschreibung vorgenommen wird. Mit der exakten Definition der geomorphographischen Kennzeichnung des Oberflächenreliefs (ROESCHMANN & LEHMEIER 1993) werden beide Teilbereiche wieder eng zusammengeführt (vgl. Abschn. 4.3). Im Hinblick auf die digitale Reliefanalyse sollen im folgenden exakte Beschreibungen der Neigung, Krümmung etc. für einen betrachteten Punkt als geomorphometrische Reliefattribute verstanden werden. Diese stellen die Datengrundlage für eine Klassifizierung oder räumliche Gruppierung von ähnlichen Reliefverhältnissen zu geomorphographischen Reliefeinheiten.

Bei den Verfahren zur Reliefgliederung müssen zunächst einfache an Schwellenwerte gebundene und analytische Klassifikationsverfahren unterschieden werden. Einfache Schwellenklassifikationsverfahren liegen u. a. von PENK (1894), KUGLER (1974), BARSCH & STÄBLEIN (1978) und DIKAU (1988) vor. Eine umfassende Zusammenstellung und ein Vergleich im Hinblick auf die eingesetzten Reliefattribute und den hierarchischen Klassifikationsprinzipien ist in DIKAU (1992) dokumentiert. Diese Verfahren verwenden als Eingangsdaten geomorphographische Reliefattribute, die nach festen Schwellenwerten klassifiziert und z. T. in einer polyhierarchischen Gliederung abgebildet werden. Als Beispiel kann die Ableitung von Formelementen durch die

Klassifizierung der Vertikal- und Horizontalwölbung nach RICHTER (1962) herangezogen werden. Dieser hierarchische Ansatz wurde von GRIMM et al. (1964) und vor allem von KUGLER (1974) durch die hierarchische Untergliederung in Formfacetten als kleinste Reliefeinheit, unter Verwendung weiterer Reliefparameter, erweitert. Die Klassifizierung von Vertikalwölbung und Neigung stellt z. B. in der Geomorphologischen Karte 1 : 25 000 für den Bereich Geomorphometrie und Geomorphographie Teile einer Informationsschicht (vgl. LESER & STÄBLEIN 1975) dar.

Analytische Verfahren finden vor allem Verwendung bei der Auswertung bereits definierter räumlicher Beobachtungseinheiten. Diese können ganze Arbeitsgebiete, Einzugsgebiete, Hangprofile oder andere flächenhafte oder lineare Objekte darstellen. Zu den analytischen Auswertungen gehören z. B. klinographische und hypsographische Kurven und Reliefasymmetrieanalysen. Diese dienen der mathematischen Beschreibung eines Objektes, wodurch objektive Vergleiche durchgeführt werden können (vgl. STRAHLER 1956, HORMANN 1971 u. SOHLBACH 1978).

Neuere Ansätze der geomorphographischen Reliefgliederung nutzen analytische Verfahren zur Klassifikation bzw. Abgrenzung von flächenhaften Reliefeinheiten. Als Beispiel kann hier die Analyse von Profilen in Hangfallrichtung herangezogen werden. KÖTHE & LEHMEIER (1993) zerlegen ein Betrachtungsgebiet in Hangprofile, die hinsichtlich des Verlaufs analysiert werden. Dabei werden signifikante Veränderungen der Neigung (Neigungsunstetigkeiten) als Begrenzungskriterium von Reliefeinheiten ermittelt (flächenhafte Reliefeinheiten der Kategorie 3).

Neben diesen Raumgliederungsverfahren werden vor allem für hydrologische Fragestellungen häufig Indizes eingesetzt. Diese sind im allgemeinen dimensionslose Größen, welche einen Faktor innerhalb einer Modellauswertung beinhalten. Sie dienen somit dem relativen Vergleich bezüglich der Betrachtungsdimension. Als Beispiel kann hier der LS-Faktor aus der Bodenabtragsgleichung nach WISHMEYER & SMITH (1978) herangezogen werden.

Neben den Ansätzen zur Reliefgliederung aus streng geomorphologischer Sicht liegen auch zahlreiche Hanggliederungsverfahren aus der bodenkundlichen Betrachtung vor. Diese basieren vor allem auf der 2D-Betrachtungsweise des Reliefs, die auf dem Catena-Konzept von MILNE (1936, zit. in SEMMEL 1977:90) beruht. Im Hinblick auf die Anwendung digitaler Hanggliederungsverfahren ist hier vor allem das Klassifikationsmodell von DALRYMPLE et al. (1968) und CONACHER & DALRYMPLE (1977) zu nennen. Das "nine unit landsurface model" stellt einen pedo-geomorphologischen Ansatz dar, der auf einer Klassifizierung der Krümmungstendenz von Hangprofilen be-

ruht. In ähnlicher Weise verfahren RUHE & WALKER (1968). Hierbei kommt die horizontale Hanggliederung als dritte Dimension hinzu. Dies entspricht auch dem Ansatz von FIEDLER (1964), der eine bodenkundliche Reliefgliederung vornimmt, die vor allem auf der Klassifikation von Wölbungsradien in Anlehnung an RICHTER (1962) aufbaut und neben der Krümmung weitere Parameter, wie Hangposition, Neigung und Exposition berücksichtigt. Eine detaillierte Gegenüberstellung dieser Verfahrensansätze ist in KÖTHE (1988) vorgenommen.

Diese bodenkundlichen Ansätze sind sehr stark idealisierte Modelle, die m. E. den Kartierprinzipien der bodenkundlichen Landesaufnahme entsprechen.

Einen weiteren Ansatz zur Reliefgliederung stellen statistische Verfahren dar. Für die Klassifikation bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten wurde von GÜNDRA (1992) und HOFFMANN (1993) eine spezielle Form der Häufigkeitsanalyse eingesetzt, die auf der "failure-rate-Analyse" von ANIYA (1985) beruht. Hierzu wird die relative Häufigkeit von bodenkundlichen Beobachtungen mit den relativen Häufigkeiten von Reliefparametern in Beziehung gesetzt. Diese Methode eignet sich sehr gut, um Merkmalsgruppen zu vergleichen (vgl. Abschn. 5.3). Mit der Verwendung großer Grundgesamtheiten kann der Quotient als Wahrscheinlichkeitsverteilung interpretiert werden. Auf Grundlage von Auswertungen in Testgebieten können die Ergebnisse großflächig übertragen werden.

Zu den traditionellen Methoden im Hinblick auf die Bildung von Raumeinheiten gehören die Distanzgruppierungsverfahren. Hierzu zählen im allgemeinen Cluster- und Diskriminanzverfahren. Diese - insbesondere in der Satellitenbildverarbeitung eingesetzten - Methoden wurden von KUNDERT (1988) zur Klassifikation räumlicher Einheiten auf Basis von Reliefparametern eingesetzt. Im Gegensatz zur lokalen Differenzierung von Reliefeinheiten wurde von KUNDERT jedoch eine großräumige Landschaftsgliederung angestrebt. Trotz dieser konträren Problemstellungen sind die Verfahren auf die vorliegende Fragestellung übertragbar. Ein wesentlicher Vorteil von multivariaten Distanzverfahren liegt dabei in der offenen Wahl der Eingangsvariablen und deren Gewichtung. Zudem liegen hierzu eine Vielzahl von Standardanwendungen aus Statistikpaketen und Bildbearbeitungssystemen vor.

In Kapitel 6 werden unterschiedliche Verfahrensansätze zur geomorphographischen Reliefgliederung vorgestellt, die im Hinblick auf die Beziehung Relief - Deckschichten - Boden betrachtet werden müssen. Eine Auswertung der Deckschichten - Reliefbeziehung (vgl. Kap. 5) stellt die Grundlage für die Diskussion zur Verwendbarkeit der unterschiedlichen Verfahrensansätze für die Reliefgliederung.

## 5 Gesetzmäßigkeiten zur reliefabhängigen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes

Für eine Reliefanalyse im Hinblick auf die Bereitstellung von bodenkundlich relevanten Flächeneinheiten ist zunächst eine Auswertung auf Basis bestehender bodenkundlicher Kartenwerke ein wichtiges Hilfsmittel, um Zusammenhänge unter Nutzung von DHM zu beschreiben und Analysewerkzeuge entwickeln zu können.

In diesem Kapitel wird analog sowie unter Zuhilfenahme digitaler Datenbestände eine DV-orientierte Auswertung am Beispiel des Arbeitsgebietes Oberreifenberg vorgenommen. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der Deckschichtenausprägung und -verbreitung im Arbeitsgebiet Oberreifenberg. Eine Interpretation der räumlichen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes wird im Zusammenhang mit den statistischen Ergebnissen verglichen und als Arbeitsergebnis diskutiert.

### 5.1 Boden- und Deckschichtenverbreitung im Arbeitsgebiet Oberreifenberg

Das Arbeitsgebiet Oberreifenberg ist gekennzeichnet durch eine typische Verbreitung von Deckschichten und Bodenformen für das höhergelegene Rheinische Schiefergebirge. Schon eine erste Übersicht zeigt die deutlichen Zusammenhänge zwischen Relief und Deckschichtenausprägungen auf, da die Boden- bzw. Deckschichteneinheiten sich schwerpunktmäßig einzelnen Reliefformen zuordnen lassen. Die räumliche Verbreitung von Deckschichten kann für diesen Bereich sehr gut aufgezeigt werden, da der geologische Untergrund relativ einheitlich ist. Hierdurch können räumliche Verteilungsmuster sehr gut erkannt werden, da Differenzierungen aufgrund geologischer Wechsel im Hangverlauf selten erfolgen.

Die Senkenbereiche innerhalb der stark eingeschnittenen Täler sind mit schmalen Talsohlen ausgebildet. Die hier entwickelten "Auengleye" sind nur im nördlichen Teil, nach der Mündung des Au-Baches in die Weil, in fluviatilen Auensedimenten entwickelt. Oberhalb der Mündung stehen bei beiden Bächen in der Talsohle i. d. R. holozäne Abschwemmassen an, die vorwiegend von den seitlichen Hängen abgetragen wurden. In den Quellbereichen, die meist als weitgespannte Quelltrichter ausgeprägt sind, liegen häufig Quellengleye vor. Diese sind, entgegen der Beschreibung der Bodeneinheit 82, in recht unterschiedlichen Deckschichten ausgebildet. In den weitgespannten Hangdellen sind i. d. R. lößlehmreiche Mittellagen zu finden, während in den engeren Quelltrichtern oft nur Basislagen vorliegen.

Da die Senkenbereiche nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind, ist vor allem die Abgrenzung Hang - Senkenbereich von Interesse. Diese Abgrenzung bereitet bei einer deutlich ausgeprägten Talsohle wenig Schwierigkeiten. Der Talbereich ist jedoch häufig stark anthropogen überprägt, so daß künstlich erweiterte Talsohlen oder auch künstliche, verschieden hohe Niveaus ausgebildet sind. Im Übergangsbereich der Tiefenlinien zu den Hangdellen kann die Grenze allerdings gut mit dem deutlichen Anstieg der Hangneigung gezogen werden.

Auf den gestreckten Hangbereichen sind vorwiegend Braunerden aus Decklage über Basislage entwickelt (Bodeneinheit 3, Deckschichteneinheit 3; s. Kt. 1 im Anhang). Diese Bodeneinheit als Bodengesellschaft betrachtet, hat eine sehr flächenhafte Verbreitung in den höheren Lagen des gesamten Rheinischen Schiefergebirges. Die Bodenformen wechseln kleinräumig stark. Für die Bodenkarte 1 : 25 000 sind diese Unterschiede jedoch nicht darstellbar und bleiben einer Detailkartierung 1 : 5 000 vorbehalten. Sie reichen von skelettreichen Regosolen bis hin zu lößlehmreichen, skelettarmen Braunerden, örtlich sogar Parabraunerden mit Mittellage.

Diese breite Spanne der Bodenformen trägt schon in sich begründet, daß diese Bodeneinheit in sehr heterogenen Reliefformen verbreitet ist. Hier sind stark divergente, gestreckte und konvergente Hangbereiche berührt. Der Schwerpunkt liegt aber insgesamt bei den horizontal und vertikal gestreckten Formen. Die Neigung spielt im Verhältnis zur Divergenz oder Konvergenz einer Form eine wesentlich geringere Rolle (vgl. Abschn. 5.4). Erst ab Neigungen über  $30^\circ$  ist meist eine sehr skelettreiche geringmächtige Decklage entwickelt, die sich deutlich von der Decklage der flacheren Hangbereiche unterscheidet. Solche steilen Hangbereiche sind in den Arbeitsgebieten auf wenige kleine Flächen beschränkt.

Im Bereich stark divergenter Formen, wie Kamm, Rücken, Sporne und angebundenen Erhebungen, liegen vorwiegend flachgründige Regosole, Ranker oder kleinflächig sogar Syroseme vor, die meist in einer skelettreichen Decklage über Anstehendem entwickelt sind (Bodeneinheit 1, Deckschichteneinheit 1). Weitgespannte Rund- und Flachrücken weisen hingegen unter der Decklage meist schon eine Basislage auf. Hier verzahnen sich die Bodeneinheiten 1 und 3.

Insgesamt erscheint die sehr flächenhafte Darstellung der Bodeneinheit 3 im Vergleich zum Geländebefund als stark überzeichnet. Die großflächig dargestellte Verbreitung bspw. am SW Hang des Langhals und am Biemer-Berg kann im Gelände nur auf zurückgezogene Inselflächen nachgewiesen werden. Hierbei handelt es sich meist um schwach ausgeprägte Rücken, die im Hang deutlich hervortreten, in der TK 25

Höhendarstellung jedoch generalisiert wurden. Nachvollziehbar dagegen sind diese Bereiche am Schellenberg, die sich auf die lokal ausgeprägten Reliefformen zurückziehen. Dieser Befund konnte auch im Rahmen einer Detailkartierung im Bereich des Langhals festgestellt werden (vgl. LORZ 1992 und MOLDENHAUER 1992: Abb. 23).

Die Verbreitung dieser Deckschichteneinheit ist somit nicht nur an Top-Lagen gebunden. Der Verteilungsschwerpunkt liegt vielmehr auf stark divergenten Spornen, die bis zur Talsohle reichen können. Diese Formen zeigen dabei eine geringere Hangneigung als der angrenzende, gestreckte Hang. Die großflächig dargestellte Verbreitung der Bodeneinheit 3 am Langhals ist vermutlich im Hinblick auf die dort vorkommenden Erosionsprofile zu sehen. Vor allem der Ost-Hang des Langhals ist großflächig mit Ackerterrassen gegliedert, die vermutlich mittelalterlichen Ursprungs sind.

Die Bodeneinheit 2 (Deckschichteneinheit 2) nimmt eine mittlere Position bezüglich der geomorphologischen Verbreitung zwischen Einheit 1 und 3 ein. Diese, nur im Norden des Arbeitsgebietes vorkommende Einheit, ist schwerpunktmäßig auf mittel bis stark divergenten Formen zu finden. Sie liegt aber auch zu größeren Flächenanteilen in gestreckten Hangbereichen vor. Die Verbreitung beschränkt sich auf das nördliche Arbeitsgebiet, das mit 400 m bis 500 m NN deutlich tiefer als der südliche Bereich liegt und im Durchschnitt eine geringere Neigung der Hänge aufweist. Die heute vorliegende ackerbauliche Bodennutzung ist dabei vermutlich, im Gegensatz zu den südlich anschließenden steileren Hängen, einer dauerhaften historischen Ackernutzung ausgesetzt gewesen. Daher nimmt in diesem Gebiet der durch Bodenerosion gekennzeichnete Flächenanteil deutlich zu.

Mit der Bodeneinheit 2 sind somit vorwiegend Erosionsprofile verbunden, die aus einer Deckschichtenkonstellation der Einheit 3 hervorgegangen sind. Faktisch kommen innerhalb dieser Flächen extreme Erosionsprofile, voll entwickelte natürliche Profile, bis hin zu holozänen Abschwemmassen vor. Bezüglich der Morphologie dieser Areale ist damit auch die breite Streuung von Formen wie bei der Bodeneinheit 3 abgedeckt.

Die Bodeneinheiten 4 und 5 (Deckschichteneinheit 4) beschreiben skelettarme Dreischichtprofile mit DL/ML/BL. Dabei konnten nach Geländebefund keine Unterschiede zwischen den vorkommenden Böden in den Einheiten 4 und 5 festgestellt werden. Es liegt bei dieser Einheit eine Bodengesellschaft vor, die sich von Zweischicht-Braunerden über skelettreiche und skelettarme Parabraunerden bis hin zu Parabraunerden aus Lößlehm erstreckt. Örtlich sind die Parabraunerden bei entsprechendem Einzugsgebiet und Konvergenz der Form durch Hangzuzugswasser pseudovergleyt. In einigen Hangdellen werden die Parabraunerden zudem von mächtigen Kolluvien überlagert.

Geomorphologisch tritt diese Einheit im Schwerpunkt an Unterhängen auf und zieht dort die Hänge aufwärts, wo sich konvergente Formen wie Hangdellen und Hangnischen anschließen. Vereinzelt sind die Parabraunerden auch auf deutlich eingetieften Sattellagen zu finden. Dort stehen sie in räumlicher Verbindung mit den Parabraunerden der Hangdellen, wie dies z. B. am Fauls-Berg vorliegt.

Südlich des Arbeitsgebietes nimmt der Flächenanteil der Dreischichtprofile deutlich zu. Hier sind Parabraunerden z. T. auch in divergenten Hangpositionen zu finden. Diese Hänge, im Anschluß an den Taunuskamm, sind jedoch im Durchschnitt deutlich flacher als im stark zerschnittenen nördlichen Anschlußgebiet. Darüber hinaus sind hier häufig Hanglängen bis weit über 1 km Länge ausgebildet.

Die Verbreitung der Pseudogleye im Arbeitsgebiet ist an Hangdellen und an Unterhängen gebunden. Diese Böden sind i. d. R. in dreischichtigen Substraten entwickelt (DL/ML/BL) und mit der oben beschriebenen Bodeneinheit 4 und 5 vergesellschaftet.

Die Verbreitung der Deckschichteneinheiten kann generell in einen deutlichen Zusammenhang mit geomorphographischen Relief-Formtypen gestellt werden. Dabei zeigt sich, daß bei der Interpretation der einzelnen Bodeneinheiten jedoch die Überlegungen des Kartierers zur Bildung der Einheit nachvollzogen werden müssen. Dies konnte im vorliegenden Fall nur durch weitreichende Geländebegehungen erfolgen. Liegen Kenntnisse über die Verbreitung der Böden im betrachteten Gebiet vor, so kann durch eine analoge Interpretation sehr gut mit der Bodenkarte gearbeitet werden.

Im folgenden soll am Beispiel des Arbeitsgebietes Oberreifenberg eine geomorphometrische Reliefanalyse mit Hilfe des DHM und statistischer Auswertungen vorgenommen werden. Hierzu wird zunächst die Art der Datenbereitstellung aufgezeigt und im Anschluß daran werden die Ergebnisse der rechnergestützten Auswertung der Boden-Relief-Beziehung dargelegt. Die Ergebnisse der visuellen Interpretation werden dann in Verbindung mit den Auswertungen der digitalen Reliefanalyse diskutiert.

## **5.2 Aufbau einer Flächendatenbank Boden/Deckschichten**

Für die reliefbezogene Auswertung von räumlich verteilten Deckschichten wurden unterschiedliche Bodenkarten und Bodenmanuskriptkarten digitalisiert. Um eine systematische Auswertung der digitalisierten Karten vornehmen zu können, wurde die GIS-Technologie genutzt. Mit Hilfe dieses "Werkzeuges" ist es möglich, unterschiedliche Informationsebenen für einzelne Flächenobjekte bereitzustellen und auszuwerten. Ei-



ne hierzu konzipierte Flächendatenbank ermöglicht eine effiziente Auswertung bezüglich des oberflächennahen Untergrundes (vgl. FRIEDRICH & VORDERBRÜGGE 1993). Um eine Datenredundanz zu vermeiden, wurde in Anlehnung an den Datenschlüssel Bodenkunde (OELKERS et al. 1987) eine Trennung von Titeldaten/Profilkennzeichnung und Schicht-/Horizontdaten in einzelne Datentabellen vorgenommen. Die Inhalte der Datenbanktabellen orientieren sich an den Möglichkeiten bezüglich einer Interpretation der Angaben aus den Erläuterungen der Bodenkarte 1 : 25 000. Dabei werden alle erfaßbaren Parameter DV-gerecht mit einem Datenschlüssel in Anlehnung an den Datenschlüssel Bodenkunde (OELKERS et al. 1987) aufgenommen (s. Übersicht A3). Bezüglich der Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes und damit der Deckschichten ist versucht worden, eine möglichst detaillierte Interpretation abzuleiten, die eine gute Trennung unterschiedlicher Deckschichteneinheiten erlaubt.

Im folgenden sind die wesentlichen Ableitungskriterien zusammengefaßt:

1. Trennung des oberflächennahen Untergrundes in einzelne geologische Schichten sowie die weitere Differenzierung in Bodenhorizonte
2. Beschreibung der geologischen Schichten des oberflächennahen Untergrundes nach ihrer zeitlichen Entstehung und Position (Decklage, Mittellage ...)
3. Differenzierung der Schichten nach ihrer Zusammensetzung und Ausprägung durch Deckschichtenattribute (Bspw. Anteile an Untergrundmaterial, Lößlehm, ...)
4. Genetische Beschreibung der Schicht (bsp. Solifluktionsschutt, ...)

Bei der Beschreibung von einzelnen Schichten des oberflächennahen Untergrundes wurde eine DV-gerechte Systematik für die Einträge in die deckschichtenbeschreibenden Felder der Datentabellen entwickelt. Dabei konnte auf Konzeptionsarbeiten der AG Bodenkunde für die vierte Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung nur in geringem Maße zurückgegriffen werden. Die genetische Ansprache sowie die Definitionen zur Substratgliederung der Deckschichten wurde hierbei in letzten Jahren mehrfach völlig verändert.

Die oben genannten Grundüberlegungen zur Gliederung des oberflächennahen Untergrundes und der DV-technischen Umsetzung können mit dem nun vorliegenden Vorschlag zur Substratbeschreibung unter Berücksichtigung der Genese, Ansprache des Fein- und Grobbodens und lithogener Angaben (z. B. skelettbildende Gesteinsarten) weitestgehend verglichen werden (vgl. KÜHN et al. 1993).

Während in der vorliegenden Arbeit jedoch die Gliederung der Deckschichten mit der Substratbeschreibung gekoppelt ist, werden diese nach KÜHN et al. (1993) unabhängig voneinander beschrieben. Die Gliederung der pleistozänen Lagen erfolgt bei KÜHN et al. allein zur stratigraphischen Einordnung (vgl. auch ALTERMANN 1993). Diese strikte Trennung der stratigraphischen, petrographischen und genetischen Beschreibung ist im Hinblick auf eine breite Nutzungsanwendung im Rahmen eines Bodeninformationssystems als sehr sinnvoll anzusehen. Für die vorliegende Arbeit ist der erstellte petrographisch-genetische Datenschlüssel auf die Anwendung ausgerichtet und kann sehr effizient verwendet werden.

Ziel der aufgebauten Schichtenbeschreibung des Datenschlüssels war zunächst die Möglichkeit einer guten Trennung einzelner Deckschichten und Deckschichtenkonstellationen (vertikaler Schichtaufbau in Schichttabelle). Die vertikale Abfolge der Deckschichten und die Petrographie und Stratigraphie des Liegenden ist schon aus der Kopfdatentabelle zu ersehen (Feld DS\_Beschr, Lieg\_Pet, Lieg\_S; Tab. A1 im Anhang). Mit der zusätzlichen Beschreibung der Schicht wird in der Horizontdatentabelle eine direkte Einordnung der Schichtverhältnisse anhand eines zusammengesetzten Attributes möglich. Die Deckschichtenattribute werden gemäß ihrer vorherrschenden Ausprägung in Reihenfolge beschrieben. Ein (,) bedeutet einen geringeren Anteil des folgenden Attributes, ein (;) bedeutet eine Gleichstellung mit vorgeordnetem Attribut (Bsp.: DL mit lo,s;vt entspricht einer Decklage (DL) aus Lößlehm (lo) mit zurücktretenden Anteilen von Schutt (,s) und Zersatzmaterial (;vt). Der Datenschlüssel wurde im Hinblick auf die Arbeitsgebiete erstellt und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Eine Verwendung der Systematik in anderen Landschaftsräumen bedarf ggf. einer zusätzlichen Erweiterung.

Der Aufbau der Flächendatenbank ist in Tabelle A1 und A2 beispielhaft mit einem Auszug aus einer Kopf- und Horizontdatentabelle dargestellt. Eine weitgehende Einordnung der Deckschichten kann schon mit den drei Feldern DS\_Num, Deckschicht und DS\_Attribut erfolgen. Durch die Verwendung weiterer Felder kann zusätzlich nach Mächtigkeit, Petrographie u. a. eine Untergliederung vorgenommen werden.

### **5.3 Analyse von deckschichtenbeschreibenden Flächeneinheiten**

Mit Hilfe der abgeleiteten Deckschichtenkarten in unterschiedlichen Hierarchiestufen kann eine Reliefanalyse für einzelne Flächenobjekte oder für einzelne Boden- oder Deckschichteneinheiten durchgeführt werden. Da die Reliefattribute als Rasterdaten vorliegen, bietet sich die Bildung und Analyse von Flächenobjekten mit Hilfe raster-

orientierter Geographischer Informationssysteme an. Hierzu werden die vektoriell erfaßten und vorgehaltenen Deckschichtenkarten in Rasterkarten überführt. Dies geschieht im Ausschnitt des bestehenden DHM mit der gleichen Rasterauflösung, so daß die gerasterte Boden-/Deckschichtenkarte als Layer mit den ausgewerteten Reliefattributen, wie Neigung, Exposition, Krümmung u. a. inhaltlich in Bezug gesetzt werden können. Diese Verfahrensweise ist in der Rasterdatenverarbeitung weit verbreitet und wird schon seit den 80er Jahren im Rahmen des Digitalen Geomorphologischen Reliefmodells (DGRM) angewendet (DIKAU 1988, 1989).

Die Rasterlayer werden automatisiert in eine Datenbank überführt. Für jede Rasterzelle liegen die Flächenobjektnummer, Deckschichteneinheit sowie die Werte der einzelnen Reliefattribute vor. Unter Verwendung des SAS-Programmpaketes (SAS Inc. 1988a) stehen Prozeduren zur statistischen Auswertung von Flächenobjekten bzw. Deckschichteneinheiten zur Verfügung. Die Ergebnisse der Auswertungen können als Bericht ausgegeben oder mit einem GIS weiterverarbeitet werden (s. Abb. 14).

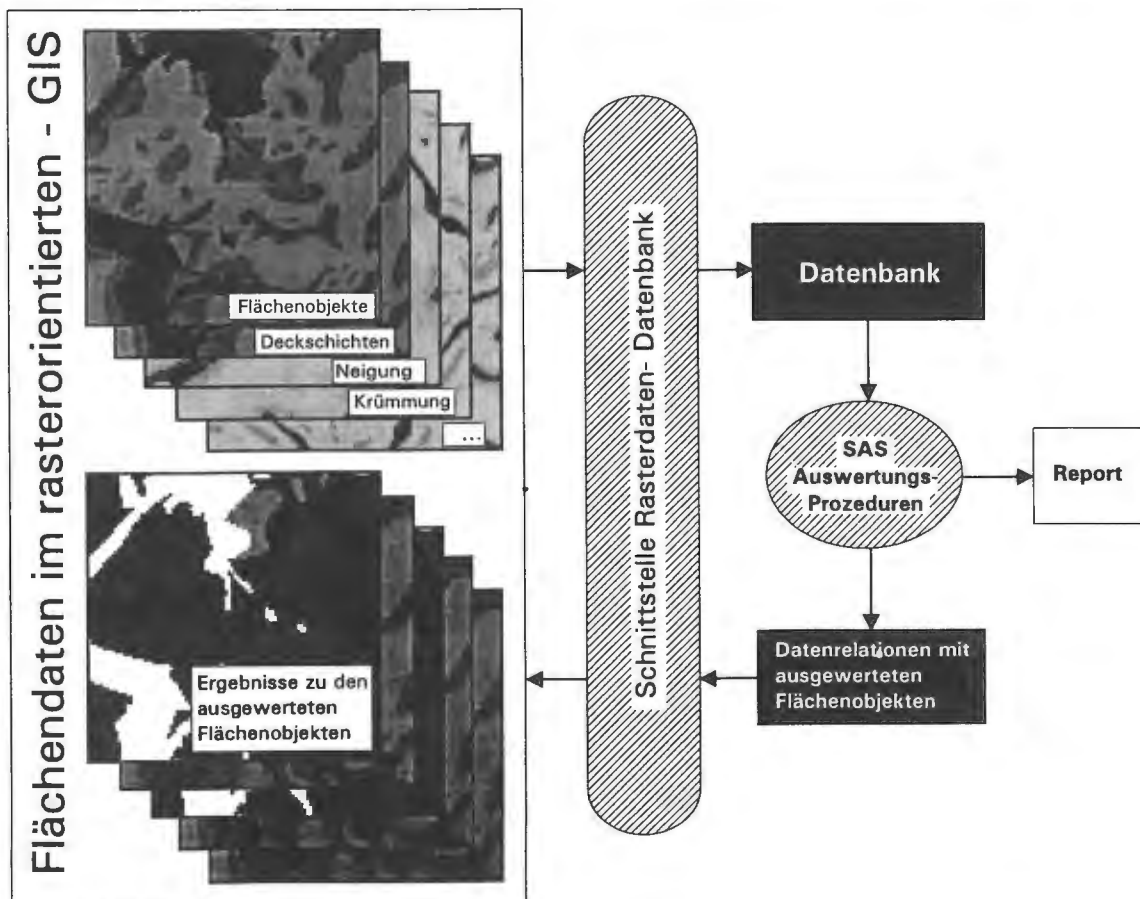


Abb. 14 Auswertung von rasterbasierenden Flächenobjekten einer Deckschichtenkarte unter Verwendung digitaler Reliefdaten

Für jedes Flächenobjekt liegen folgende Daten vor:

- Flächennummer
- Bodeneinheit
- Deckschichteneinheit
- Anzahl der Rasterzellen (Größe der Flächeneinheit)
- Für die Reliefattribute Höhe ü. NN, Neigung, Expositionsfaktor, Querkrümmung, Horizontalkrümmung, Vertikalkrümmung, Einzugsgebietsgröße sowie Entfernung z. Tiefenlinie und Wasserscheide liegen folgende statistische Größen vor:
  - Minimum
  - Maximum
  - Arithmetisches Mittel
  - Standardabweichung/Varianz
  - Schiefe

Für die analysierten Krümmungsdaten wird eine Differenzierung von konvex/divergenten und konkav/konvergenten Formen vorgenommen. Dies ist notwendig, da in größeren Flächenobjekten häufig Voll- und Hohlformen vertreten sind, die mit ihrem positiven und negativen Wertebereich für die Krümmung zu einer Mittelbildung ohne Aussagekraft führen.

#### **5.4 Auswertung von Boden- und Deckschichtenkarten mit Hilfe digitaler Reliefdaten**

Die Auswertung von Boden- und Deckschichtenkarten mit Hilfe geomorphometrischer Reliefattribute soll im folgenden Abschnitt dargestellt werden, um die Zusammenhänge Relief - Deckschichten - Boden aufzuzeigen und die Ergebnisse für eine deckschichtenorientierte Reliefgliederung zu nutzen. Hierzu sind zunächst die Ziele dieses Vorhaben zu definieren:

1. Ermittlung wichtiger Reliefattribute zur Kennzeichnung der räumlichen Verbreitung von Deckschichteneinheiten
2. Bewertung der Abgrenzbarkeit von Relief-Formtypen in Bezug zu Flächengrenzen von Deckschichteneinheiten
3. Erarbeitung von Schwellenwerten für eine Klassifizierung
4. Bewertung der Zusammenhänge Boden - Relief mit Hilfe der Interpretation von Bodenkarten und der DV-orientierten Auswertung von räumlichen Flächeneinheiten

Für die Auswertung der Daten war es zunächst erforderlich, einzelne geomorphometrische Reliefparameter in eine Datenverteilung zu überführen, die eine statistische

Nutzung ermöglicht. Hierzu zählt die schon in Abschnitt 4.3 angesprochene Überführung der Wölbungsradien in die Krümmung. Die Exposition in Grad kann hier nur kategorisiert verwendet werden und ist damit nur nominalskaliert im Zusammenhang mit anderen Reliefattributen auswertbar.

Für die Auswertung werden folgende Reliefattribute eingesetzt:

Höhe ü. NN	-	H_NN
Exposition	-	EX
Expositionsfaktor	-	EXF (ostgerichtet)
Querkrümmung	-	QK (gesamt, sowie getrennt divergent/konvergent)
Horizontalkrümmung	-	HK (gesamt, sowie getrennt divergent/konvergent)
Vertikalkrümmung	-	VK (gesamt, sowie getrennt konkav/konvex)
Flußkrümmung	-	FK (gesamt, l/r drehend, sowie Absolutwert)
Größe des Einzugsgeb.	-	EZG (Oberflächeneinzugsgebiet)

Um die Zusammenhänge der Reliefattribute untereinander aufzuzeigen, wurden zunächst eine Korrelationsanalyse sowie eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, daß die einzelnen Variablen weitgehend unabhängig voneinander sind, also keine Autokorrelationen vorliegen. Dies entspricht auch den Erfahrungen von KUNDERT (1988). Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in den Tabellen A3 und A4 im Anhang dargestellt.

Eine Ausnahme bildet die Beziehung von Querkrümmung und Horizontalkrümmung, die erwartungsgemäß hoch korrelieren. Zusätzlich kommen vereinzelt geringere Korrelationen bspw. zwischen der Vertikalkrümmung und Horizontal-/Querkrümmung vor, die auf dem Zusammenhang divergenter/konvexer und konvergenter/konkaver Formen beruhen. Gleiches gilt dabei für den negativen Zusammenhang von der Entfernung zur Tiefenlinie und Größe des Oberflächeneinzugsgebietes. Diese Ergebnisse konnten durch die Hauptkomponentenanalyse, unter Ausschluß der Exposition und Horizontalkrümmung, bestätigt werden. Hier zeigt sich eine weitgehend gleichbleibende Faktorengewichtung für alle eingesetzten Variablen.

Somit stellen alle auf Basis der Höhe ü. NN abgeleiteten Reliefattribute weitgehend eigenständige Größen zur geomorphometrischen Beschreibung des Reliefs dar. Für die Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten müssen darüber hinaus Zusammenhänge zwischen Deckschichteneinheiten, wie sie am Beispiel Oberreifenberg in Abschnitt 5.1 beschrieben wurden, und einzelnen Reliefattributen qualitativ und

quantitativ bewertet werden. Da die in einzelnen Flächenobjekten erfaßten Deckschichteneinheiten nominalskaliert vorliegen, sind die Möglichkeiten der statistischen Auswertung stark eingeschränkt. Jedoch kann aus der Gegenüberstellung der einzelnen Deckschichteneinheiten mit deskriptiven Verfahren schon eine deutliche Einordnung der Bedeutung der Reliefattribute vorgenommen werden.

Für die Auswertung liegen zunächst die Ergebnisse der allgemeinen deskriptiven Statistik zugrunde, die eine Übersicht zu Mittelwerten, Streuungen und Verteilung der Grundgesamtheit sowie einzelner Deckschichteneinheiten hinsichtlich der Reliefattribute bieten (Tab. A5). Um die Beziehung der einzelnen Deckschichteneinheiten in Bezug zur Grundgesamtheit herauszuarbeiten, kann auf die von ANIYA (1985) vorgestellte Form der Häufigkeitsanalyse zurückgegriffen werden. Dieses Verfahren wurde auch von DIKAU (1990) zur Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit und von GÜNDRA (1992) sowie HOFFMANN (1993) zur Beschreibung der Boden - Relief - Beziehung eingesetzt.

Mit der "Failure-Rate-Analyse" wird die Beziehung zwischen der relativen Häufigkeit einer Grundgesamtheit und einer betrachteten Klasse beschrieben. Für die vorliegende Fragestellung werden die Häufigkeitsklassen eines betrachteten Reliefattributes für das Untersuchungsgebiet mit den Häufigkeitsklassen der einzelnen Deckschichteneinheiten als Relativdaten in Beziehung gesetzt. Die "Failure Rate" bildet der Quotient aus der relativen Häufigkeit der Klasse durch die Grundgesamtheit (vgl. ANIYA 1985:108).

Durch die Darstellung der Relation einzelner Reliefattribute zwischen der Deckschichteneinheit und dem gesamten Untersuchungsgebiet kann über die Affinität einzelner Decklageneinheiten zu bestimmten Häufigkeitsklassen hinaus ein Verteilungsschwerpunkt in Beziehung zur Grundgesamtheit herausgearbeitet werden.

Zur Charakterisierung der Beziehung zwischen geomorphometrischen Reliefattributen und der Verbreitung einzelner Deckschichteneinheiten wird im folgenden eine nach Reliefattributen getrennte Bewertung vorgenommen. Im Anhang sind die wichtigsten Ergebnisse in den Abbildungen A1 bis A18 dokumentiert.

### **Höhe über NN und relative Hangposition**

Die Höhe ü. NN spielt für die Ausprägung von Deckschichten, im Sinne des räumlich regionalen Bezuges, nur eine übergeordnete Rolle. Von Interesse ist dabei vielmehr

eine relative Höhe innerhalb eines betrachteten Hanges. Diese Größe steht im Zusammenhang mit der Ableitung von Tiefenlinien als hypothetische Hanguntergrenze und der Wasserscheide als Hangobergrenze. Beide Grenzen sind für den Betrachtungsfall "Hang" unbefriedigend. Die Hanguntergrenze sollte nicht die Tiefenlinie, sondern die Grenze des i. d. R. fluviatil geprägten Senkenbereiches darstellen, da hier zwei völlig unterschiedliche Prozeßbereiche aneinanderstoßen. Zudem kann die Strecke von der Grenze Senkenbereich zur Tiefenlinie größer sein als zur Hangobergrenze.

Für die Hangobergrenze wird bei der Modellierung i. d. R. die Wasserscheide verwendet (BAUER et al. 1985; DIKAU 1990). Dies ist für einheitlich vertikal gegliederte Hänge sinnvoll, beinhaltet aber bei den stark horizontal gegliederten Hängen der Mittelgebirge Probleme. Hier sind die Hänge häufig durch angebundene Erhebungen gegliedert, die "lokale Wasserscheiden" beinhalten. Diese entsprechen den Divergenzlinien im Sinne von ROESCHMANN & LEHMEIER (1993). Aus der Sicht des Oberflächenabflusses sowie der periglazialen Bodenbewegungen ist hier eine Hangobergrenze zu sehen, auch wenn diese Positionen nahe am Senkenbereich vorliegen. Dies wird schon dadurch deutlich, daß von hier zur Hanguntergrenze i. d. R. auf kurzer Distanz eine ähnliche Catena entwickelt ist wie im gesamten Hangabschnitt bis zum Top.

Die vom DRM (BAUER 1985) und DGRM (DIKAU 1989) bereitgestellten relativen Hangpositionen können aufgrund dieser Überlegungen nicht sinnvoll eingesetzt werden.

### **Exposition**

Für die Exposition konnte aus der visuellen Interpretation der Deckschichtenkarte Oberreifenberg eine schwache Asymmetrie im Hinblick auf die Verteilung unterschiedlicher Deckschichteneinheiten festgestellt werden. Mit der statistischen Analyse kann diese Verteilung als Trend bestätigt werden.

In der Häufigkeitsverteilung ist der Abfall des Geländes nach Nordwesten aufgezeigt. Bei der Auswertung der einzelnen Deckschichteneinheiten kann durch die relative Häufigkeit jedoch eine deutlich gewichtete Ausrichtung festgestellt werden. Hierbei zeigt sich im Vergleich zur Grundgesamtheit eine Dominanz der Deckschichteneinheit 1 in östlicher Richtung sowie bei den Deckschichteneinheiten 4 und 6 (lößlehmreich DL/ML/BL) zur nordwestlichen Exposition. Dies kann durch die "Failure Rate" wie auch durch die relative Summenhäufigkeit in Abbildung A2 und A9 im Anhang ver-

deutlich werden. Die Deckschichteneinheit 3 dagegen weist eine fast gleichbleibende Verteilung auf.

Wertet man die Expositionsverteilung im gesamten Arbeitsgebiet aus, so wird der N- bis NW-Abfall des Arbeitsgebiets deutlich (vgl. Abb. A18). Betrachtet man die Exposition getrennt nach Neigungsklassen, so bilden die Klassen mittlerer bis starker Neigung (N3 bis N5) den größten Anteil. Die Expositionsverteilung dieser Neigungsklassen zeigt die gleiche Tendenz wie die Exposition insgesamt. Die Neigungsklasse 6 ( $> 20^\circ$ ) zeigt hingegen einen geringe Häufigkeitszunahme in Ostexposition. Eine deutliche Talasymmetrie liegt somit nicht vor, während die Deckschichtenausprägung eine asymmetrische Tendenz aufweist.

Im Gegensatz zum Arbeitsgebiet Oberreifenberg kann für das Arbeitsgebiet Waldeck eine wesentlich deutlichere Asymmetrie für die Deckschichtenverbreitung mit einem zunehmenden Lößlehmanteil in ostexponierten Lagen festgestellt werden. Dies wird durch eine ausgeprägte Talasymmetrie begünstigt, die ein ähnliches Verteilungsgewicht wie die Decklagen-Expositionsverteilung aufweist. Daher muß jedes Arbeitsgebiet im Hinblick auf die Talasymmetrie und den Lößlehmeinfluß betrachtet werden, um den Parameter Exposition bewerten zu können.

## Neigung

Die Auswertungsergebnisse für den Parameter Neigung, mit einem arithmetischen Mittelwert von  $10.7^\circ$ , zeigen eine fast ideale Normalverteilung auf. Die Standardabweichung ist mit  $s = 5.1$  allerdings sehr hoch. Vergleicht man die Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen Deckschichteneinheiten, so lassen sich nur geringe Unterschiede feststellen. Die Standardabweichung der Deckschichteneinheiten ist dabei zu über 80 % überdeckend zueinander verteilt (Abb. A1).

Dies wird auch durch die relative Häufigkeit der Deckschichteneinheiten zur Grundgesamtheit aufgezeigt (vgl. Abb. A3 und A10 im Anhang). Die "Failure Rate" weist jedoch einige Besonderheiten auf. Die Deckschichteneinheit 1 zeigt eine Erhöhung im flachen Gelände ( $0.5^\circ - 1^\circ$ ) sowie im sehr steilen Gelände auf ( $> 20^\circ$ ). Dies hängt damit zusammen, daß diese Einheit vorwiegend auf Kuppen, Rücken und angebundenen Erhebungen verbreitet ist. Die Rücken sind entlang des Grades sehr flach, gehen aber in Abflußrichtung meist in steile Hangbereiche über. Die zwei extremen Verteilungsschwerpunkte liegen somit räumlich häufig sehr nahe beieinander.



Die Deckschichteneinheit 6 zeigt dagegen einen deutlichen Schwerpunkt im mittleren Neigungsbereich ( $3^\circ - 10^\circ$ ). Dies sind die in der Gesamtrelation geringer geneigten konkaven/konvergenten Unterhangsituationen, die deutlich höhere Hangneigungen als die Senken aufweisen.

Die Zusammenhänge zwischen Deckschichteneinheiten und Neigung als isoliert betrachteten Reliefparameter sind somit gering. Dies entspricht auch den Ergebnissen von GÜNDRA (1992) und HOFFMANN (1993), die bei der Boden-Relief-Beziehung in einem Lößgebiet keine Zusammenhänge bezüglich der Neigung feststellen konnten.

### Krümmung

Mit den drei Krümmungsparametern Vertikalkrümmung, Querkrümmung und Flußkrümmung wird die Oberflächenform an einem Punkt beschrieben. Diese drei Krümmungsschnitte stellen weitgehend unabhängige Größen dar. Dies kann anhand einer Korrelationsanalyse belegt werden (Tab. A3 u. A4).

Die Flußkrümmung und die Querkrümmung zeigen jedoch ein ähnliches Verteilungsmuster, welches bei der Betrachtung von Karte 5 und 6 deutlich wird. Die rechts- und linksdrehende Flußkrümmung ist für die vorliegende Fragestellung als Absolutwert dargestellt. Es liegt somit eine Größe vor, die unabhängig von der Form eine absolute Krümmung beschreibt. Trennt man diese nach divergenten und konvergenten Formen, so wird eine deutliche Korrelation zur Querkrümmung erreicht. Unterschiede sind dann im Bereich der Wasserscheiden und Tiefenlinien zu finden, wo die Flußkrümmung als kategorisierter Abfluß gegenüber der Querkrümmung gestreckt ist (s. Karte 5 und 6). Die Abbildung dieser linearen Elemente ist dabei stark von der Auflösung des DHM abhängig. Für eine Reliefanalyse, insbesondere zur Beschreibung der Form, kann daher die Flußkrümmung vernachlässigt werden.

Der Zusammenhang von Quer- und Vertikalkrümmung ist nach der Korrelationsanalyse mit  $r = 0.26$  zwar gering, aufgrund der hohen Datenanzahl jedoch signifikant. Sieht man sich z. B. die Verteilung der Querkrümmung in den einzelnen Vertikalkrümmungsklassen an, so ist dieser schwache Zusammenhang erkennbar. Von den stark gekrümmten Klassen (-100 bis -300 m Krümmungsradius) zu den gestreckten Klassen ( $< -1000$  u.  $> 1000$  m) nimmt die Schiefe der Datenverteilung ab (s. Abb. A17 im Anhang). Mit steigender Vertikalkrümmung steigt also auch der Anteil stark gekrümmter Klassen der Querkrümmung und umgekehrt. Insgesamt zeigt aber die Verteilung eine breite Streuung in der Relation Querkrümmung - Vertikalkrüm-

mung. Dies verwundert nicht, da z. B. Hangstufen und Hangnicke kleine Vertikalkrümmungsradien beinhalten, während sie horizontal gestreckt sind. Dies wird gleichzeitig in der Datenverteilung deutlich. Auch bei extrem kleinen Radien der Vertikalkrümmung (Klassen  $\pm 100$  bis  $300$  m) zeigt die Querkrümmung die größte Häufigkeit bei Radien  $> 1000$  m bzw.  $< -1000$  m auf (gestreckte Hangbereiche). Dies gilt genauso in umgekehrter Weise für die Verteilung der Vertikalkrümmungsradien in den Querkrümmungsklassen (s. Abb. A17).

### Querkrümmung

Bei der Betrachtung der klassifizierten Querkrümmung in Karte 5 kann schon ein deutlicher Zusammenhang zur Verbreitung der Deckschichteneinheiten festgestellt werden (vgl. Karte 1). Vergleicht man dies mit der Häufigkeitsverteilung, so zeigt sich in Bezug zur Gesamtverteilung der Querkrümmung eine Gewichtung bestimmter Krümmungsklassen für die Deckschichteneinheiten (s. Abb. A5 im Anhang). Die Deckschichteneinheit 1 zeigt hierbei einen gewichteten Anteil stark divergenter Klassen ( $0 - 600$  m Krümmungsradius). Die "Failure Rate" liegt zwischen 3 und 10.9. Im Vergleich hierzu steigt die relative Häufigkeit der konvergenten Klassen bei der Deckschichteneinheit 4 und 6 an. Die Deckschichteneinheit 3 zeigt einen Schwerpunkt im gestreckten, schwach divergenten Bereich. Es liegt somit ein gleitender Übergang der Schwerpunkte der Failure Rate von der Deckschichteneinheit 1 zur Deckschichteneinheit 6 vor. Diese Verteilungsschwerpunkte können sehr gut anhand einer relativen Summenhäufigkeit in Abbildung A13 im Anhang aufgezeigt werden.

Betrachtet man die Verteilung jedoch absolut, so wird deutlich, daß bei allen Deckschichteneinheiten der Schwerpunkt im gestreckten Bereich liegt. Bei der Darstellung der Mittelwerte und der Streuung wird dies belegt, da im Sigmabereich immer geringe Krümmungen um 0 (gestreckt) erfaßt werden. Bei der Horizontalkrümmung ist die Streuung aufgrund der problematischen Projektion auf eine horizontale Ebene noch wesentlich größer (vgl. Tab. A5, Abb. A1 und A6 im Anhang).

Die relativen Häufigkeiten der Deckschichteneinheiten zur Grundgesamtheit weisen somit deutlich eine tendenzielle Verbreitung für divergente und konvergente Reliefformen auf. Während bei der Auswertung der Grundgesamtheit einer Deckschichteneinheit eine große Streuung vorliegt, kann bei isolierter Betrachtung einzelner Flächenobjekte einer Deckschichteneinheit meist eine deutliche Datengruppierung festgestellt werden. Eine geringe Streuung der Daten weist damit auf eine einheitliche Reliefform hin. In Abbildung 15 sind drei Flächenobjekte der Deckschichteneinheit 1, 6

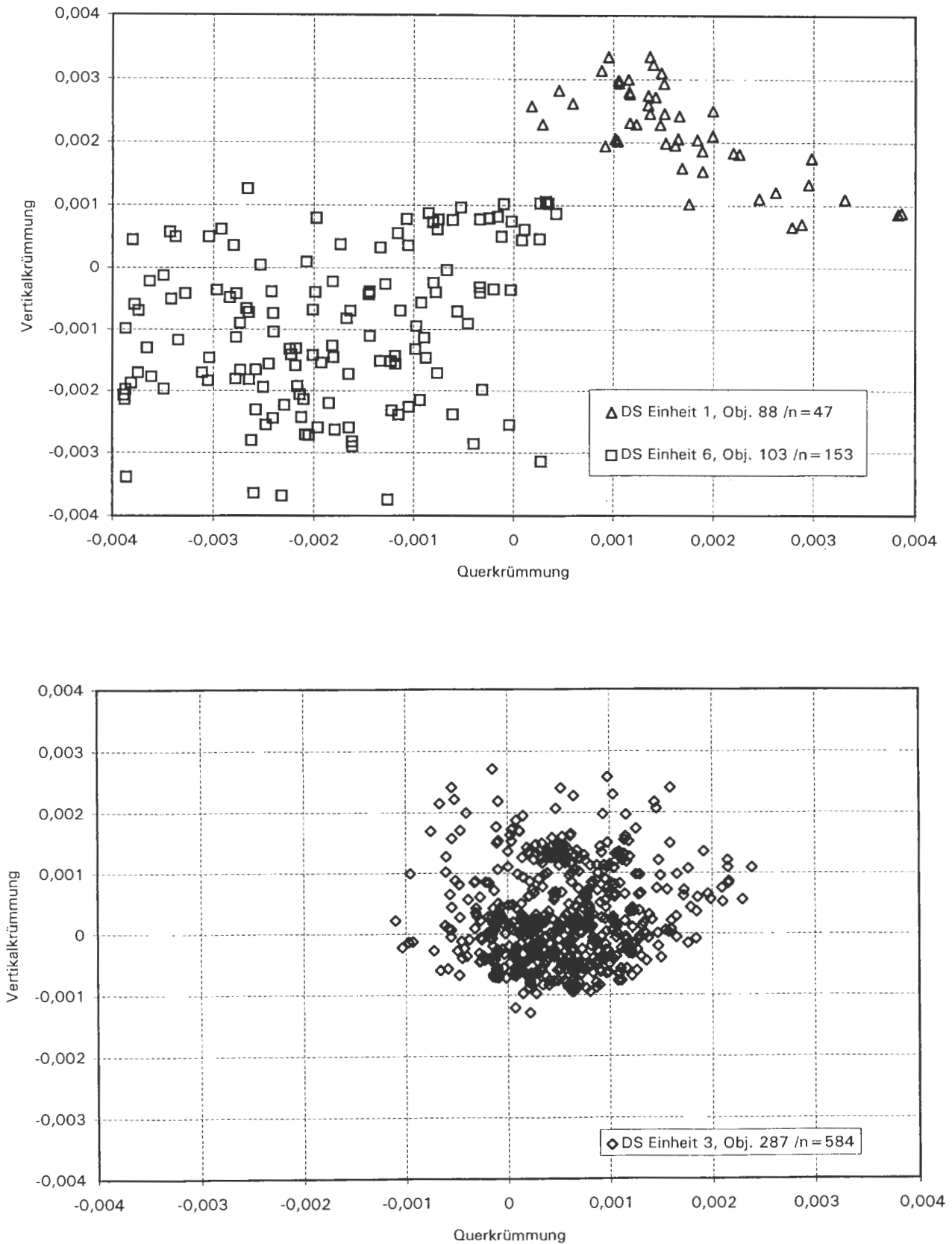


Abb. 15 Verteilung der Krümmung bei Rasterflächenobjekten unterschiedlicher Deckschichtenausprägung

OBJ 88 - DL s;vp,lo/ A uv | OBJ 103 - DL vp,lo;s / ML vp,lo;s / BL p;s |  
 OBJ 287 - DL vp,s,lo/ BL p;spos. Werte konvex, divergent - neg. Werte  
 konkav, konvergent

und 3 dargestellt, die aus der Verteilung der Krümmungsradien auf einheitliche Formen schließen lassen. Dies ist jedoch nur bei kleineren Flächen der Fall. Flächenobjekte mit einer Größe von mehr als 500 Rasterzellen zeigen zumindest in einem Krümmungsschnitt immer eine deutliche Variationsbreite der Datenverteilung auf.

Die Mittelwerte und die Streuung der einzelnen Flächenobjekte unterscheiden sich darüber hinaus meist deutlich. Für einzelne Flächenobjekte einer Deckschichteneinheit liegt häufig eine homogene Reliefform vor. Die Reliefeinheiten sind jedoch unterschiedlich stark gekrümmt.

Die Querkrümmung als geomorphometrischer Parameter der Reliefform stellt demnach eine wesentliche Größe zur Charakterisierung der Relief-Deckschichten-Beziehung dar. Ein direkter Zusammenhang kann jedoch nicht durch generelle Krümmungsklassen im Hinblick auf die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes hergestellt werden. Bei der Klassifizierung muß vielmehr die lokale Ausprägung der Reliefform Berücksichtigung finden.

### **Vertikalkrümmung**

Die Vertikalkrümmung zeigt sehr ähnliche Verhältnisse der relativen Häufigkeitsverteilung wie die Querkrümmung. Dies betrifft die Grundgesamtheit wie auch die relativen Häufigkeiten der einzelnen Deckschichteneinheiten. Die Kurve der "Failure Rate" zeigt bei beiden Krümmungen den tendenziell gleichen Verlauf (s. Abb. A4). Auch die Streuung der Daten, getrennt nach Deckschichteneinheiten, zeigt vergleichbare Verhältnisse (s. Abb. A1).

### **Größe des Oberflächeneinzugsgebietes**

Die Größe des Oberflächeneinzugsgebietes zeigt - bei der Betrachtung der Klassifizierung auf Karte 8 im Anhang - große Ähnlichkeiten mit dem Verbreitungsmuster der Querkrümmung (Karte 5). Damit wird deutlich, daß der hypothetische Abfluß und somit auch eine periglaziale Bodenbewegung nicht streng vertikal gerichtet, sondern in entscheidender Weise durch die Divergenz und Konvergenz der Formen bestimmt wird.

Dieser Zusammenhang wird auch durch die negative Korrelation der beiden Reliefparameter deutlich. Die relative Häufigkeitsverteilung ist analog hierzu umgekehrt zur

Querkrümmung gewichtet. Bei der Deckschichteneinheit 1 sind über 60 % an Flächen mit Einzugsgebietsgrößen von  $< 2000 \text{ m}^2$  gebunden. Wie bei der Querkrümmung ist hier von der Deckschichteneinheit 1 zur Deckschichteneinheit 6 eine gleitende Verschiebung des Verteilungsschwerpunktes zu größeren Einzugsgebieten festzustellen.

Entgegen den anderen Reliefparametern liegen bei der Einzugsgebietsgröße Standardabweichungen mit deutlichen Unterschieden für die einzelnen Deckschichteneinheiten vor. Dabei zeigen die Deckschichteneinheiten 1 und 6 die geringsten Variationskoeffizienten. Die Deckschichteneinheit 3 beinhaltet hingegen eine extrem große Standardabweichung.

Auf eine Auswertung der Entfernung zur Tiefenlinie wurde verzichtet, da diese Größe abhängig von der Emin Konstante ist, die den Startpunkt einer Tiefenlinie maßgeblich bestimmt.

#### **5.4.1 Diskussion der Auswertungsergebnisse**

Mit der Interpretation der Datenverteilung von geomorphometrischen Reliefattributen, getrennt nach klassifizierten Deckschichteneinheiten, lassen sich tendenzielle Zusammenhänge einzelner Variablen feststellen. Die erarbeiteten Zusammenhänge, bezogen auf einzelne Deckschichteneinheiten, können mit den Ergebnissen aus der visuellen Interpretation verglichen werden.

Die vorliegenden grundlegenden Arbeitsergebnisse sind hinsichtlich der Interpretation der Boden-Relief-Beziehung schon aus der analogen Interpretation der Bodenkarte ableitbar. Die statistischen Auswertungsergebnisse geben hingegen zunächst nur eingeschränkt die Zusammenhänge wieder. Für die Erarbeitung von Verfahren zur räumlichen Gliederung des Reliefs sind die statistischen Auswertungen jedoch von großem Interesse. Hiermit werden Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von geomorphometrisch/geomorphographischen Reliefattributen für die digitale geomorphographische Reliefanalyse und -gliederung (Manuskriptkartenerstellung) abgeleitet. Die Ergebnisse dienen somit als Grundlage zur Erstellung von Methoden.

Bezüglich der eingangs definierten Erwartungen an eine geomorphometrische Analyse bodenkundlicher/quartärgeologischer Flächeneinheiten lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen:

1. Die deutlichste Trennung der Deckschichteneinheiten zeigt sich anhand der Da-

tenverteilung bei der Querkrümmung und der Einzugsgebietsgröße. Die Horizontalkrümmung ist aufgrund der extrem starken Streuung zur Trennung der Deckschichteneinheiten wesentlich ungünstiger verteilt als die hierzu korrelierende Querkrümmung.

Die Ausgrenzung mittels der Vertikalkrümmung zeigt die in Abschnitt 5.1 dargelegten Tendenzen bezüglich der Deckschichtenausprägungen in "Oberhang-" und "Unterhanglagen" wieder. Die Streuung ist jedoch so groß, daß eine isoliert vorgenommene Klassifizierung auf Basis dieses Reliefattributes hinsichtlich der Deckschichtenverbreitung keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Dies gilt auch für die Arbeitsgebiete Eiterfeld und Waldeck. In anderen Landschaftstypen, wie der Schichtstufenlandschaft, ist der Zusammenhang jedoch wesentlich deutlicher. Die Arbeitsergebnisse können demnach nicht verallgemeinert werden. Um die Reliefform im gesamten beschreiben zu können, ist die Vertikalkrümmung in Verbindung mit der Querkrümmung jedoch wichtig.

Die Flußkrümmung (Absolutwert) spielt erwartungsgemäß eine untergeordnete Rolle. Sie kann prinzipiell für die vorliegende Fragestellung außer Acht gelassen werden.

Die Reliefattribute Entfernung zur Tiefenlinie und Einzugsgebietsgröße zeigen eine deutliche Gewichtung der Häufigkeitsverteilung zu den einzelnen Deckschichteneinheiten. Der Parameter "Entfernung zur Tiefenlinie" ist jedoch problematisch einzuschätzen, da er direkt von der  $E_{\min}$ -Konstante für die Ermittlung Tiefenlinien (DRM) abhängt. Im Hinblick auf die Reliefgliederung von Hangbereichen sind beide Parameter kritisch zu betrachten, da die lokale Ausprägung der Deckschichten i. d. R. an die Reliefform gebunden ist.

Die Neigung kann bei isolierter Betrachtung als eine im Verhältnis zu anderen Reliefattributen relativ unabhängige Größe interpretiert werden. Wie bei der Vertikalkrümmung kann diese Größe jedoch bspw. in der Schichtstufenlandschaft als gliederndes Merkmal herangezogen werden.

Die Exposition spielt für das betrachtete Gebiet bezüglich einer asymmetrischen Talausbildung keine Rolle. Die räumliche Verteilung der Deckschichteneinheiten weist jedoch, im relativen Vergleich zur Grundgesamtheit, eine expositionsabhängige Tendenz auf.

Mit einer ausgeprägten Talasymmetrie ist im Arbeitsgebiet Waldeck eine erheb-

lich deutlicher gewichtete Expositionsausrichtung der Deckschichteneinheit verbunden. Mit einer stärkeren Talasymmetrie steigt vermutlich generell die expositionsabhängige, räumliche Verbreitung einzelner Deckschichtenkonstellationen (z. B. lößlehmreiche Mittellage in NO-Exposition).

2. Die generell starke Streuung der Daten ist dadurch begründet, daß die in der Bodenkarte ausgegliederten Flächen nur selten exakt geomorphologische Einheiten umgrenzen. Am besten kann dies anhand der Deckschichteneinheit 3 verdeutlicht werden, da diese über geomorphologische Grenzen hinweg flächenhaft vorkommt.

Im Abschnitt 5.1 wurde bereits auf die Überzeichnung bzw. Generalisierung einzelner Flächen oder auch einer gesamten Deckschichteneinheit hingewiesen. Im Geländebefund konnte ein deutlich stärkerer Zusammenhang zwischen Relief-form und der Abgrenzung von Flächeneinheiten festgestellt werden. Hierbei steht der Kartierer häufig in der Entscheidung, ob eine räumliche Untergliederung darzustellen ist oder nicht. Teilweise liegen differenzierte Unterschiede bei der Kartierung vor, die aber aufgrund der Höhendarstellung der TK 25 und der Maßstabsfrage generalisiert werden. Die Entscheidung hierzu ist subjektiv und i. d. R. nicht systematisch.

Wird durch die geomorphometrischen Daten ein stark gegliedertes Relief abgebildet, die auszuwertende Bodenkarte ist aber stark generalisiert, so führt dies zu einem formalen Fehler der Auswertung.

Die Möglichkeiten einer Abgrenzung der Deckschichteneinheiten als Flächenobjekte der verwendeten Kartengrundlage mit Hilfe einzelner bzw. mehrerer geomorphometrischer Reliefattribute ist nur bedingt möglich.

Die Verwendung einer "subjektiven" Kartengrundlage für die Auswertung der Relief-Deckschichten-Beziehung erscheint angesichts dessen als problematisch. Die Tendenzen der flächenhaften Verteilung von Deckschichteneinheiten können zwar herausgearbeitet werden, die Abgrenzung, gebunden an geomorphologische Formen, kann jedoch nicht im Detail nachvollzogen werden. Dieses Problem stellte sich in allen Arbeitsgebieten. Wobei hier die subjektiven Einflüsse der einzelnen Kartierer zum Ausdruck kommen. Bei der visuellen Betrachtung konnte dem für die Interpretation Rechnung getragen werden. Für eine DV-orientierte Auswertung können die vorliegenden Ergebnisse somit nur bedingt Verwendung finden.

3. In Anbetracht der oben diskutierten Probleme zur Auswertung bodenkundlicher/quartärgeologischer Flächenobjekte erweist sich eine direkte Ableitung von Schwellenwerten zur Reliefklassifizierung als schwierig. Für einzelne Flächenobjekte konnte eine eindeutige Abgrenzung zwar dargestellt werden, insgesamt ist dies aufgrund der starken Streuung der Daten bei allen Reliefattributen jedoch nicht möglich. Dies liegt vor allem daran, daß sich Reliefformen und damit verbundene Deckschichtenausprägungen nicht an jeder Position mit gleichen Schwellen abgrenzen lassen. Die Übergänge sind vielmehr gleitend. Daher müssen grundsätzlich Reliefgliederungsverfahren angestrebt werden, die eine räumliche Abgrenzung von Reliefeinheiten im Hinblick auf die Homogenität der Oberflächenform vornehmen.
4. Die Zusammenhänge der räumlichen Verbreitung periglazialer Deckschichten und Bodentypen lassen sich prinzipiell aus einer flächenhaften Kartierung erheblich besser ableiten als bei der Interpretation einer Catena. Die Verwendung der Catena für die bodengeographische Hanggliederung kann in Landschaften eine Anwendung finden, wo eine vorwiegend vertikale Gliederung der Hänge vorliegt. Dies ist bspw. in der Schichtstufenlandschaft der Fall. In den hessischen Mittelgebirgen erscheint hingegen häufig die horizontale Hanggliederung als maßgeblich. Dies wird schon bei der Übersicht von Bodenkarten in unterschiedlichen Regionen deutlich.

In der Literatur vorgestellte bodengeographische Hanggliederungen, die mit Hilfe der Catena vorgenommen werden (DALRYMPLE et al. 1968; CRONACHER & DALRYMPLE 1977), geben i. d. R. idealisierte vertikale Abfolgen wieder, die bei genauer Betrachtung im Hangverlauf unterschiedlich horizontal geprägte Formen durchlaufen. Daher erscheint die Verwendung von dreidimensionalen geomorphologisch-pedologischen Modellen, in Anlehnung an RUHE & WALKER (1968, 1969) und FIEDLER (1964), für die Betrachtung des Mittelgebirgsreliefs sinnvoll.

Der Zusammenhang Relief - periglaziale Deckschichten - Boden kann durch die Interpretation der Bodenkarte sowie durch die DV-orientierte Auswertung nach Deckschichten deutlich gemacht werden. Somit kann der bodengeographische Zusammenhang mit dem Relief, wie er nach SEMMEL (1964, 1977) beschrieben wird, auch auf Basis digitaler Daten tendenziell nachvollzogen werden. Eine lokale Übereinstimmung von bodenkundlichen und geomorphometrischen/geomorphographischen Grenzen liegt für die betrachteten Bodenkarten jedoch nur im Einzelfalle vor.



Mit der vorliegenden Auswertung werden einerseits die Zusammenhänge Relief - Deckschichten - Bodenverbreitung verdeutlicht, andererseits wird aber auch auf die Vielzahl der Probleme hingewiesen, die eine geomorphometrische-deckschichtenorientierte Reliefauswertung und -gliederung erschweren. Für den Aufbau und die Anwendung von Methoden zur Reliefgliederung hinsichtlich einer hypothetischen Deckschichtenverbreitung sind diese Ergebnisse zu berücksichtigen. Bereits vorliegende Reliefgliederungsverfahren müssen auf Basis dieser Ergebnisse diskutiert werden.

Für die Kartierung steht mit der vorliegenden Datenbank und den Auswertungsmethoden ein Werkzeug zur Verfügung, das es ermöglicht, die Kartiererergebnisse auf Basis des DHM ggf. bis zur Auflösung einzelner Flächenobjekte hinsichtlich der Reliefhomogenität zu überprüfen. Für einen Routineeinsatz kann die Auswertung weitgehend automatisiert werden, so daß der Zeitaufwand gering bleibt. Die Anwendbarkeit dieses Arbeitsverfahrens muß jedoch noch in verschiedenen Landschaftsräumen überprüft werden.

Die Datenbank kann darüber hinaus für weiterführende Anwendungen genutzt werden. Hierzu zählt bspw. die Ableitung von geomorphometrischen Daten für Punktdaten, die Charakterisierung der Bodeneinheiten für die Reliefbeschreibung sowie die Beschreibung des Grundrisses der Flächen. Diese Parameter bedürfen zukünftig einer geomorphometrisch-geomorphographischen Systematik, wie sie als Vorschlag von ROESCH-MANN & LEHMEIER (1993) vorliegt.

## **6 Methoden zur Reliefgliederung im Hinblick auf die räumliche Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes**

Die Ergebnisse der Kapitel 2 und 5 verdeutlichen, daß zunächst die Oberflächenform und damit die Krümmung eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Verbreitung periglazialer Deckschichten spielt. Dabei wird vor allem auf die Bedeutung der horizontalen Hanggliederung hingewiesen. Die Vertikalkrümmung zeigt für sich betrachtet nur bedingt eine Relevanz. Wird sie jedoch in Verbindung mit der Hangposition und der horizontalen Hanggliederung gesehen, so wird ihr Einfluß deutlicher. Gleiches gilt für die Neigung. Auch hier kann nur bei gleichzeitiger Betrachtung der Reliefform und der Hangposition ein Zusammenhang zur räumlichen Deckschichtenausprägung hergestellt werden.

Ein weiterer Zusammenhang zwischen Relief und Deckschichtenverbreitung kann mit der Reliefauswertung hinsichtlich der Einzugsgebietsgröße beschrieben werden. Diese Größe ist jedoch nur bedingt geeignet, um eine geomorphographische Gliederung im Sinne der Ausgrenzung homogener Oberflächenformen vorzunehmen. Hiermit liegt jedoch eine Hilfsgröße vor, die im Hinblick auf die Betrachtung von prozeßverbundenen Flächenbereichen eine Einordnung der Hangposition zuläßt, was durch das Reliefattribut "Hangposition" (Verhältnis aus Entfernung zur Tiefenlinie und Entfernung zur Wasserscheide) nicht oder nur sehr eingeschränkt erreicht werden kann.

Die Reliefanalyse kann für die räumliche Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes nur einen Teilaspekt beinhalten. Der geologische Untergrund und vor allem der regional und lokal unterschiedliche Eintrag von äolischem Material bleiben bei der Reliefanalyse unberücksichtigt. Änderungen des Deckschichtenaufbaus treten jedoch oft dort auf, wo Veränderungen des Reliefs vorliegen. Daher muß ein wesentliches Ziel der geomorphographischen Reliefanalyse die Abgrenzung in sich homogener Reliefelemente sein.

Ein weiteres Ziel einer Reliefgliederung liegt in der Erstellung einer geomorphographischen Karte. Diese wird durch spezielle Methoden aus der Analyse von DHM und daraus abgeleiteten geomorphometrischen Parametern (z. B. Krümmung und Neigung) erstellt. Mit der graphischen Überlagerung einer Reliefgliederung der Senken- und Hangbereiche mit Siedlungsflächen und Höhenlinien erfolgt die Visualisierung der Auswertung (Abb. 16).

Für die Erarbeitung und Anwendung von Reliefgliederungsverfahren wird in den folgenden Abschnitten ein Schwerpunkt auf Verfahren gelegt, die eine Abgrenzung von

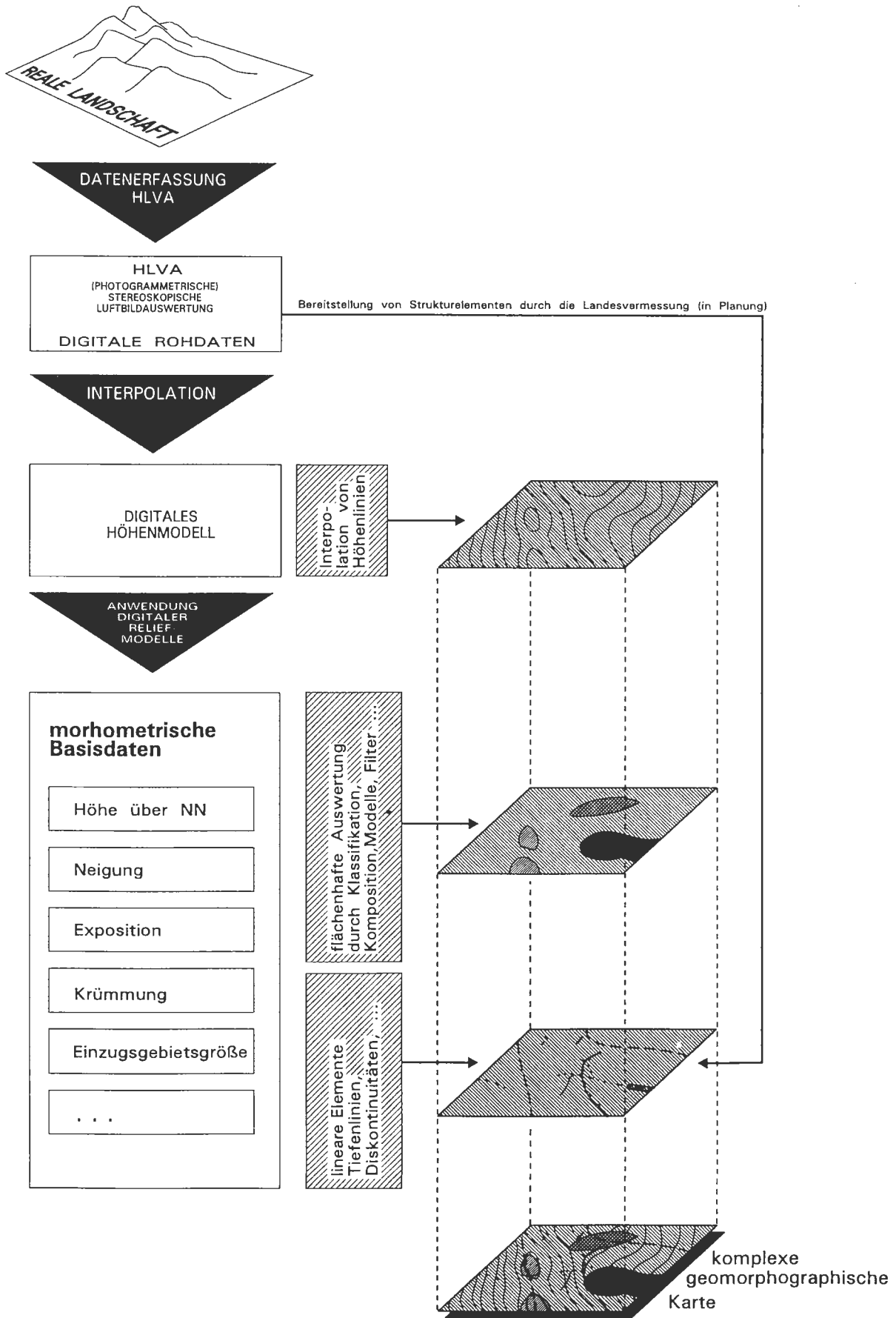


Abb. 16 Verfahrensschritte zur Erstellung komplexer geomorphographischer Karten

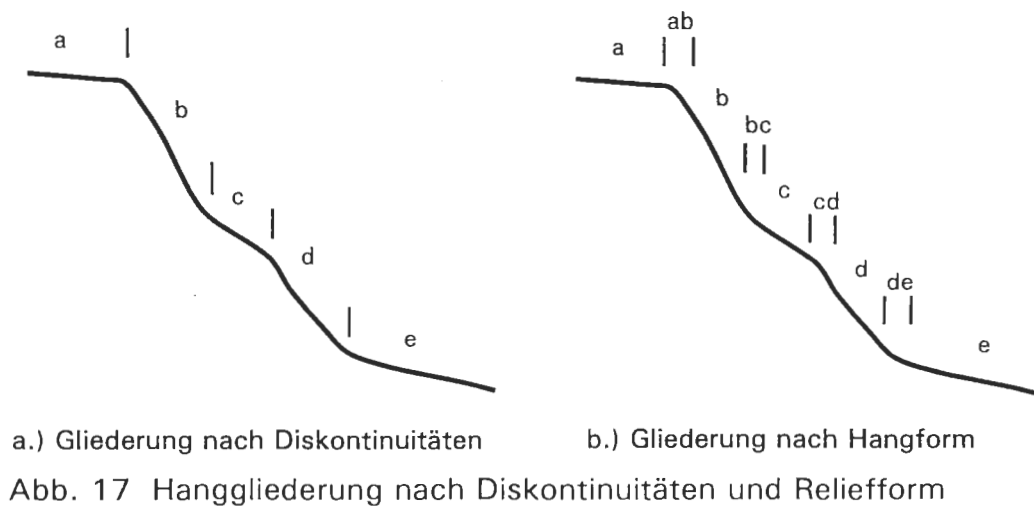
reliefformenbeschreibenden Flächeneinheiten vornehmen. Eine einfache Herangehensweise ist die Reliefgliederung in Formelemente nach RICHTER (1962) und KUGLER (1974). Dieses Verfahren wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt und diskutiert.

Neben den einfachen Klassifikationsverfahren sollten jedoch vor allem komplexe analytische Klassifizierungsverfahren für die geomorphographische Reliefgliederung zum Einsatz kommen. Mit der Analyse von Hangprofilen oder von Nachbarschaftsbeziehungen kann die Klassifizierung aus einer lokalen Reliefsituation heraus unabhängig von Schwellenwerten vorgenommen werden. Eine Abgrenzung von benachbarten Reliefeinheiten orientiert sich dabei an der lokalen Reliefsituation.

Im Hinblick auf die analytische Klassifikation von Reliefelementen liegen bereits weit entwickelte Methoden von KÖTHER & LEHMEIER (1993, 1994a) vor. Hierbei kommen jedoch Verfahren zum Einsatz, die eine getrennte Hanggliederung für die vertikale und horizontale Formbetrachtung vornehmen. Die vertikale Gliederung orientiert sich an Hangdiskontinuitäten und trennt somit Bereiche unterschiedlicher Neigung. Die horizontale Gliederung ermöglicht unter Verwendung vorgegebener Einstellungsparameter die Differenzierung von Divergenz-, Intermediär- und Konvergenzbereichen. Diese in Anlehnung an die geomorphographischen Definitionen von LEHMEIER (1993) erstellten Reliefauswertungsverfahren stellen fachlich unabhängige, rein geomorphographische Verfahren dar. Die Auswertung von Bodenkarten und Geländebegehungen zeigen in Mittelgebirgslagen jedoch Einschränkungen für den Einsatz dieser Verfahren im Hinblick auf eine quartärgeologische, bodengeographische Reliefgliederung auf.

Die Vertikalgliederung eines Hanges am Beispiel von Abbildung 17 trennt Hangabschnitte an Diskontinuitäten (Abb. 17a), die im realen Gelände i. d. R. keine abrupten, sondern kontinuierliche Veränderungen, also konvexe oder konkave Formen darstellen (Abb. 17b). Sofern kein geologischer Schichtwechsel vorliegt, wechselt die Ausprägung der Deckschichten grundsätzlich mit der Hangform. Daher müssen Reliefabschnitte mit gestreckter, konvexer und konkaver Krümmung herausgearbeitet werden. Gleiches gilt für die horizontale Hanggliederung hinsichtlich konvergenter und divergenter Formen.

Wie bereits angeführt, zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 5, daß die Ausprägung von Deckschichten in Abhängigkeit des Reliefs nicht mit einer isolierten Betrachtung einzelner Reliefparameter zu erklären ist. Nur die kombinierte Betrachtung der Relief-form, als Zusammenspiel von Vertikal- und Horizontalkrümmung (bzw. Querkrümmung) bietet eine geomorphographische Herangehensweise, die zur Erklärung der Deckschichtenverbreitung sinnvoll erscheint. Die kartentechnische Verschneidung



von unterschiedlichen Auswertungen mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen bietet hierzu nur einen behelfsmäßigen Ansatz. Daher müssen Verfahren angestrebt werden, die eine primäre komplexe geomorphographische Reliefgliederung unter Verwendung aller wichtigen Reliefattribute ermöglichen.

Die im analytisch, statistischen Bereich einzusetzenden Verfahren, wie bspw. der wahrscheinlichkeitstheoretische Ansatz, der von GÜNDRA (1992) und HOFFMANN (1993) verwendet wurde, erscheint für eine anwenderorientierte Reliefgliederung weniger brauchbar. Die Ergebnisse einer an Bodentypen orientierten Reliefgliederung aus der Lößlandschaft des Kreichgaus zeigen durchaus Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Bodenausprägungen auf. Die Bodengesellschaften sind hier durch die historische Bodenerosion geprägt. Die unmittelbar mit dem Relief verbundenen erosionsabhängigen Bodeneinheiten, in Verbindung mit dem homogenen Ausgangsgestein Löß, bieten für die bodenbezogene Reliefanalyse ideale Bedingungen, wie sie in der Mittelgebirgslandschaft selten zu finden sind.

Die Auswertungen zeigen den generellen Trend der Bodenverbreitung auf, bieten aber nur bedingt eine Hilfe z. B. für die Kartierung. Für den Kartierer ist weniger eine tendenzielle Verbreitung von Bodengesellschaften interessant, da dies mit einer Übersichtskartierung sehr schnell erfaßt werden kann. Hier ist von Seiten des geomorphographisch betrachteten Reliefs vor allem eine Differenzierung aneinandergrenzender homogener Reliefeinheiten von Bedeutung. Die Auswertungen aus dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz zeigen jedoch gerade hier eine Schwäche, da nicht das betrachtete Relief in sich geomorphographisch gegliedert wird, sondern eine Klassifizierung auf Basis einer Auswertung auf bestimmte Bodenformen erfolgt. Prinzipiell geht dieser Ansatz damit über die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten

Verfahren hinaus, da bereits eine direkte Zuordnung der Klassifizierungsergebnisse bezüglich spezieller Bodeneinheiten vorgenommen wird.

Die isolierte Betrachtung des Reliefs ohne Berücksichtigung weiterer bodenbildender Faktoren kann jedoch eine Raumgliederung nur für diese Betrachtungsdimension liefern. Eine Reliefgliederung ist daher immer unter Zuhilfenahme weiterer Faktoren für die Beschreibung bodenrelevanter Flächeneinheiten zu interpretieren.

Eine weitere Herangehensweise der Reliefgliederung ist der Einsatz multivariater Gruppierungsverfahren. Für die Regionalisierung, unter Verwendung von räumlich orientierten multivariaten Daten (Rasterdaten), werden vor allem Distanzverfahren in Form von Cluster- und Diskriminanzverfahren angewendet.

In Abschnitt 6.4 wird der Einsatz allgemeiner Distanzverfahren für die geomorphographische Reliefgliederung diskutiert. In Anlehnung daran wird ein raumorientiertes Gruppierungsverfahren vorgestellt, das auf Basis der speziellen Anforderungen einer digitalen Reliefgliederung entwickelt wurde.

Unabhängig von verschiedenen Verfahrensansätzen können grundlegende Anforderungen an eine geomorphographische Reliefgliederung gestellt werden. Diese orientieren sich an den mehrfach beschriebenen fachlichen Anforderungen zur Gliederung deckschichtenrelevanter Flächeneinheiten. Sie richten sich aber auch an die großräumige Anwendbarkeit der Verfahren. Im Hinblick auf die Entwicklung und Anwendung von Reliefgliederungsverfahren sind daher folgende Punkte zu berücksichtigen:

1. Das Verfahren sollte möglichst objektive geomorphographische Ansätze verfolgen. Die Ergebnisse müssen zumindest intersubjektiv nachvollziehbar sein.
2. Die Abgrenzung von Reliefelementen sollte aufgrund der Formausprägung (Oberflächenkrümmung) und Neigung erfolgen. Die Einordnung der relativen Hangposition und Exposition wird aus der Lage der ausgegliederten Reliefeinheiten ermöglicht.
3. Die Reliefeinheiten sind in der betrachteten Reliefdimension (verwendete Eingangsvariablen) als möglichst homogene Einheiten auszugliedern.
4. Die Nachbarschaftsverhältnisse von Reliefelementen sollten im Hinblick auf deren Beziehung (z. B. Verwandtschaft der Formen) dokumentiert werden.
5. Eine blattschnittfreie Anwendbarkeit des Verfahrens ist anzustreben.
6. Die Reliefgliederung sollte auf das Betrachtungsgebiet optimiert werden können.

Dabei müssen auch völlig verschiedene Reliefbereiche innerhalb eines Betrachtungsausschnittes sinnvoll differenzierbar sein.

7. Es ist eine Reliefgliederung mit frei wählbarer Generalisierungsintensität zu ermöglichen, da Fragestellungen in unterschiedlichen Maßstäben vorliegen. Die Generalisierung sollte dabei nicht durch Verwendung eines gering auflösenden DHM erfolgen.
8. Die abgeleiteten Reliefeinheiten sind als Flächenobjekte zu verwalten, um sie für weiterführende Auswertungen verwenden zu können (z. B. Bestimmung der mittl. Exposition, Hangposition der Reliefeinheiten).
9. Die Karten zur Reliefgliederung müssen leicht interpretierbar sein. Außerdem sind Großstrukturen wie auch Detaildifferenzierungen durch geeignete Gestaltungselemente abzubilden.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Verfahrensansätze vorgestellt und zunächst aus Sicht einer geomorphographischen Reliefgliederung diskutiert. Im Anschluß erfolgt eine vergleichende Bewertung der Verfahren im Hinblick auf die räumlich differenzierte Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes.

## **6.1 Reliefanalyse zur Ausgrenzung von Senkenbereichen**

### **6.1.1 Methodische Beschreibung**

Die vorliegende Untersuchung betrachtet Scheitel- und Hangbereiche bezüglich der Verbreitung periglazialer Deckschichten. Senkenbereiche müssen grundsätzlich hiervon abgegrenzt werden. Senken beinhalten einen Prozeßbereich, der im allgemeinen nicht durch Solifluktion, sondern fluviatil geprägt ist. Die Charakteristik des Vorfluters, die pleistozäne und holozäne Sedimentation sowie die hydromorphe Dynamik bestimmen in entscheidender Weise die Substratschichtung und Bodengenese der Senkenbereiche von Bach- und Auentälern.

Allgemein kann unter Senkenbereich ein Flächenabschnitt verstanden werden, der sich an eine Tiefenlinie oder einen Tiefenpunkt anschließt. Dieser ist ein im Verhältnis zur Neigung des angrenzenden Hanges geringer geneigter Bereich (vgl. LEHMEIER 1991). Sinngemäß handelt es sich somit um eine Talsohle bzw. um einen ebenen Tiefenbereich (TE nach AG Bodenkunde 1982:40). Die Ausgrenzung einer Talaue mit einer Talsohle kann an der als Knick ausgeprägten seitlichen Versteilung zum Hang erfolgen. Bei kleinen Bachtälern und Trockentälern ist der Übergang zum Unterhang jedoch häufig kontinuierlich, was eine eindeutige Abgrenzung zum Hang erschwert.

Betrachtet man Prozeßbereiche, so ist eine Abgrenzung des Senkenbereichs zum Hang dort erforderlich, wo sich solifluidale und fluviatile Ablagerungen verzahnen. Während Hangdellen und Dellentäler in der Mittelgebirgslandschaft i. d. R. mehrgliedrige periglaziale Deckschichten tragen (vgl. SEMMEL 1968:120f.), fehlen im tiefenliniennahen Bereich von Bachtälern mit entsprechend größerem Einzugsgebiet die Deck- und die Mittellage. In Landschaften, die in historischer Zeit ackerbaulich intensiv genutzt wurden, sind Trockentäler und kleinere Bachtäler zudem häufig von mehr oder weniger mächtigen holozänen Abschwemmassen überdeckt.

Die Formgestalt eines kleinen Bachtals oder eines Dellentälchens an einem Querschnitt kann identisch sein, unterscheidet sich jedoch meist durch die Neigung der Tiefenlinie in Abflußrichtung. Für die Ausgliederung muß daher neben der lokalen Oberflächenform ein weiteres Kriterium herangezogen werden, welches Aufschluß über die Längenausdehnung der Form gibt. SEMMEL (1968) differenziert Dellen, Dellentälchen und Trockentäler durch eine unterschiedliche Neigung und Längenausdehnung. Im Hinblick auf die Möglichkeiten, die eine digitale Reliefanalyse bietet, erscheint hier die Verwendung der Neigung an der Tiefenlinie und die Einzugsgebietsgröße gemäß der Definition in Abschnitt 4.3 als geeignet. Die Einzugsgebietsgröße kommt dabei den Vorstellungen einer fluviatilen Überprägung deutlich näher als die Formlänge, die nur bedingt Aussagen über hydrologische Verhältnisse zuläßt.

Somit wird als Senkenbereich eine Abgrenzung zwischen vorwiegend solifluidal und fluviatil geprägten Deckschichtenbereichen verstanden. Es sind Flächen zu ermitteln, die im Überflutungsbereich eines Vorfluters liegen und somit die Aue darstellen. Darüber hinaus sind aber auch kleinere Bachtäler bis zum Übergangsbereich zu heutigen Trockentälern zu bestimmen. Diese Standorte zeigen, in Abhängigkeit zum geologischen Untergrund, i. d. R. Verglebungseigenschaften und sind auch im Sinne der bodengenetischen Ansprache abzugrenzen.

Die weitere Untergliederung der Senkenbereiche nach ihren Deckschichten bzw. Sedimenten oder nach Prozeßbereichen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Ausgliederung der Senkenbereiche dient vor allem zur räumlichen Abgrenzung der hier untersuchten Hang- und Scheitelbereiche.

Gemäß dieser Vorgaben wurde eine Methode entwickelt, die auf spezielle Anforderungen aus Sicht der räumlichen Deckschichtenverteilung abgestimmt werden konnte. Die Kriterien zur Bestimmung von Senkenbereichen im hier verwendeten Sinne stützen sich dabei auf Geländebefunde und auf die Auswertung der Boden- bzw. Deckschichtenkarten sowie der geologischen Karten der Arbeitsgebiete. Zur Abgrenzung wurden folgende Kriterien abgeleitet:



1. Die Senkenbereiche schließen sich an Tiefenlinien an.
2. Das Einsetzen der Tiefenlinien wird durch den Eingangsparameter der minimalen Einzugsgebietsgröße ( $E_{\min}$ ) gesteuert. Dieser muß gemäß der Gebietserfahrung vorgegeben werden.
3. Der Anfangspunkt eines Senkenbereiches muß eine vorgegebene Neigung unterschreiten.
4. Die Ausgrenzung der Sohle erfolgt durch hangaufwärts gerichtete Talquerprofile. Als Ausgrenzungskriterium ist das Unterschreiten einer definierten Hangneigung und einer Höhendifferenz über der Tiefenlinie festzulegen. Die Höhe über der Tiefenlinie wird für jedes Talquerprofil aus einem Verhältnis der Einzugsgebietsgröße und der Abflußneigung an der zugehörigen Tiefenlinienrasterzelle bestimmt.

Für die Modellierung dient als Basis die Größe des Oberflächeneinzugsgebietes. Der Beginn einer Tiefenlinie des Senkenbereiches wird durch einen Schwellenwert der minimalen Einzugsgebietsgröße definiert ( $E_{\min}$ -Wert). In Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße und der Neigung einer betrachteten Tiefenlinienrasterzelle (Abflußneigung) wird ein Schwellenwert der "Höhe über Tiefenlinie" für jede Tiefenlinienrasterzelle bestimmt. Dieser bewegt sich in einem vorgegebenen Minimal- und Maximal-Wertebereich (Eingangsparameter HLTA und HLT).

Von der Tiefenlinienrasterzelle ausgehend, werden entlang hangaufwärts gerichteter Talquerprofile so lange Senkenrasterzellen ausgegliedert, bis die an der Tiefenlinienrasterzelle definierte Höhe über der Tiefenlinie überschritten wird. Diese Vorgehensweise bringt Vorteile gegenüber eines starren Wertes für die maximale Höhe über der Tiefenlinie (HLT), wie sie von DALCHOW (1991:81f.) verwendet wird. Deutlich wird dies bei der Betrachtung von weitgespannten Hangdellen und kleineren Seitentälern, die bei fester HLT sehr viel breitere Abgrenzungsareale aufweisen würden. Hier ist der Senkenbereich im Vergleich zu Bachtälern und Auen jedoch nur auf den tiefenliniennahen Bereich begrenzt.

Um eine flächenhafte Ausgliederung auch an konvergierenden Hangabschnitten zu erreichen, werden entlang der Hangprofile die Nachbarzellen ebenfalls mitbetrachtet. Bei den Hangprofilen handelt es sich nicht nur um Profile von 90 und -90 Grad abweichend von der Abfußrichtung, sondern es werden auch um +/- 135 Grad abweichende Profilansätze entsprechend der Exposition verfolgt. Überschreitet die Hangneigung im Profilverlauf den vorgegebenen Schwellenwert für die "Höhe über Tiefen-

linie" oder die vorgegebene Neigungsschwelle, wird der Profillauf abgebrochen (s. Abb. 18).

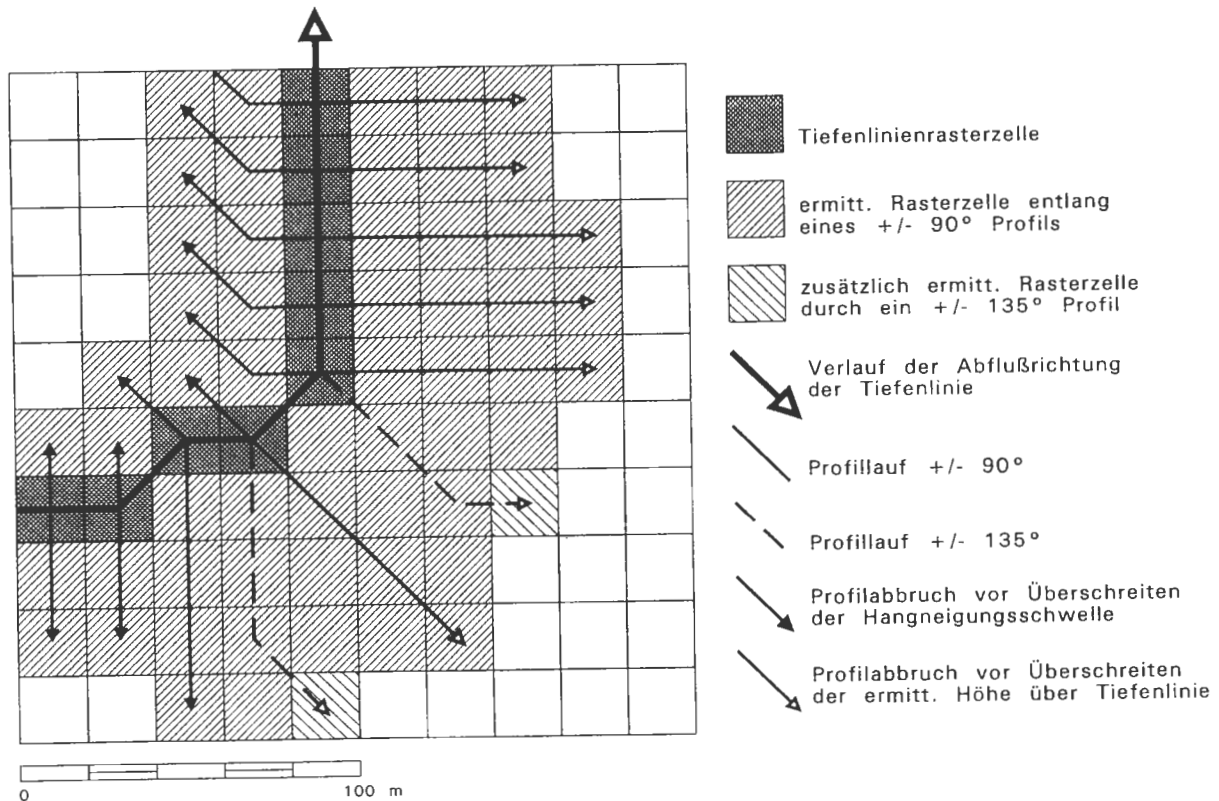


Abb. 18 Ermittlung von Senkenbereichen durch Talquerprofile

Als Eingangsparameter gehen somit folgende Größen ein:

EMIN	Startparameter der Tiefenlinien im $m^2$ (Standardwert 25 000)
HLTA	min. "Höhe über der Tiefenlinienrasterzelle" (Standardwert 0.5)
HLT	max. "Höhe über der Tiefenlinienrasterzelle" (Standardwert 1.5)
HGSA	min. Hangneigungsschwellenwert zum Erreichen der größten möglichen Höhe über Tiefenlinie (HLT) (Standardwert 0.5)
HGS	max. Hangneigungsschwellenwert zum Erreichen der geringsten Höhe über Tiefenlinie (HLTA)
GREA	min. Einzugsgebietsschwellenwert zum Erreichen der geringsten Höhe über Tiefenlinie (HLTA)
GREE	max. Einzugsgebietsschwellenwert zum Erreichen der größten möglichen Höhe über Tiefenlinie (HLT)

Die Schwelle der "Höhe über Tiefenlinie" wird für die einzelnen Profile wie folgt bestimmt (dabei sei HGRAS die Neigung der Tiefenlinienrasterzelle, GRERAS die Einzugsgebietsgröße der Tiefenlinienrasterzelle):

Es gilt für den Schwellenwert der Neigung ( $N_{SW}$ )

$$N_{SW} = HLT - \frac{(HGRAS - HGSA) * (HLT - HLTA)}{(HGS - HGSA)}$$

Für den Schwellenwert der Einzugsgebietsgröße ( $EZG_{SW}$ ) gilt

$$EZG_{SW} = HLTA + \frac{(GRERAS - GREA) * (HLT - HLTA)}{(GREE - GREA)}$$

Der Schwellenwert der "Höhe über Tiefenlinie" ( $HTL_{SW}$ ) unter Verwendung von Faktoren für Neigung ( $FN$ ) und Einzugsgebietsgröße ( $FEZG$ ) wird wie folgt bestimmt:

$$HTL_{SW} = \frac{(N_{SW} * FN) + (EZG_{SW} * FEZG)}{(FN + FEZG)}$$

### 6.1.2 Abgrenzung von Senken- und Hangbereichen

Zur Ausgrenzung von Senkenbereichen wird in der Modellanwendung der Parameter "Größe des Einzugsgebietes" (bezogen auf Tiefenlinienrasterzellen) als Startwert der Längenausdehnung genutzt. In den geologisch relativ einheitlichen Arbeitsgebieten Grävenwiesbach und Oberreifenberg zeigt sich hier eine gute Übereinstimmung der Quellaustritte mit der Größe des Einzugsgebietes an der simulierten Tiefenlinie bei ca. 20 ha. Als Startwert für die Ausgrenzung der Senkenbereiche erzielt ein  $E_{min}$ -Wert von 200 000 (m<sup>2</sup>) gute Ergebnisse. Die Klassifizierung der hangaufwärts angrenzenden Rasterzellen erfolgt in Abhängigkeit der Größe des Einzugsgebietes und der Neigung. Zunächst wurde die Neigungsschwelle in Abflußrichtung der Tiefenlinien ermittelt, ab der einerseits Senkenbereiche beginnen können. Andererseits wird eine Neigungsschwelle für die seitliche Abgrenzung zum Hang benötigt. Hier erwies sich eine Neigungsschwelle von 2° als sinnvoll. Mit Unterschreiten dieser Schwelle und dem vorgegebenen  $E_{min}$ -Wert werden die Tiefenlinienrasterzellen als Senkenbereich ausgegliedert. Neben dem Startwert für  $E_{min}$  und dem Neigungsschwellenwert wird für die Ausgrenzung von Rasterzellen als Senkenbereich ein Parameter für die "Höhe über der Tiefenlinie" benötigt, die auf Grundlage der Einzugsgebietsgröße und Ab-

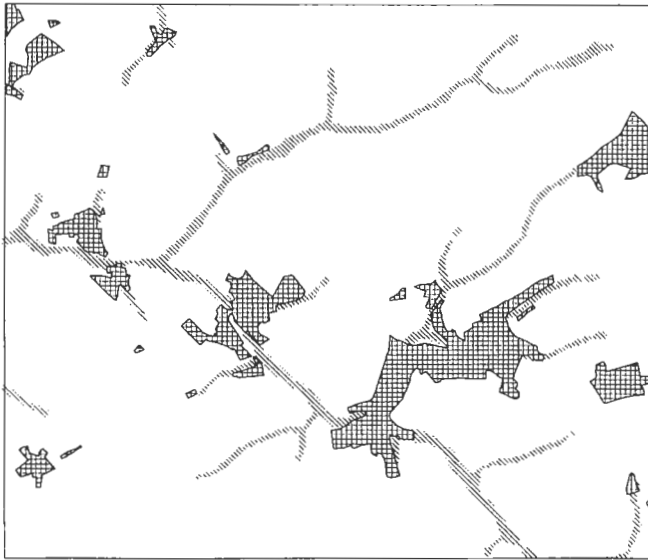
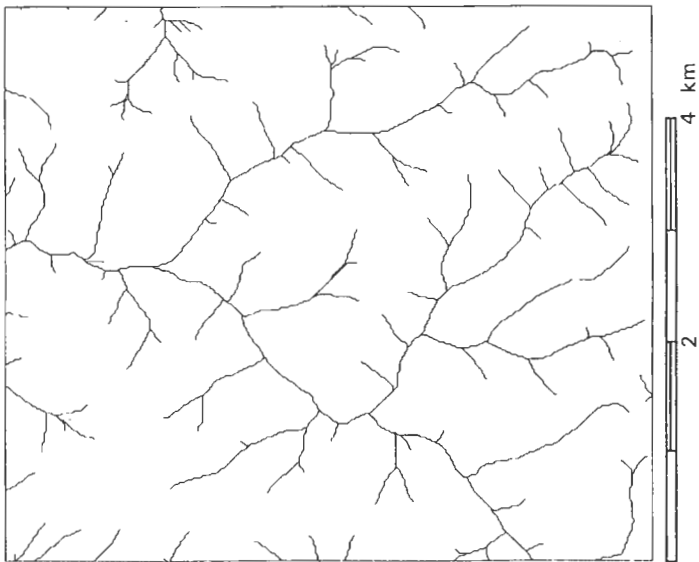
flußneigung an der Tiefenlinie für jedes Talquerprofil automatisch bestimmt wird (s. 6.1.1). Als HLTA-Wert wurde für die Arbeitsgebiete Oberreifenberg und Grävenwiesbach 0.5 (m), als HLT-Wert 2 (m) eingesetzt. Als Neigungsschwellen wurden für HGSA 0.5°, für HGS 2° vorgegeben.

Neben dem Startwert  $E_{\min}$  müssen die Einzugsgebietsschwellen für die gleitende Anhebung von HLT eingesetzt werden. Ab einer Einzugsgebietsgröße von 25 ha wird der Wert von HLTA linear bis zum Erreichen von  $G_{REE} = 500$  ha angehoben.

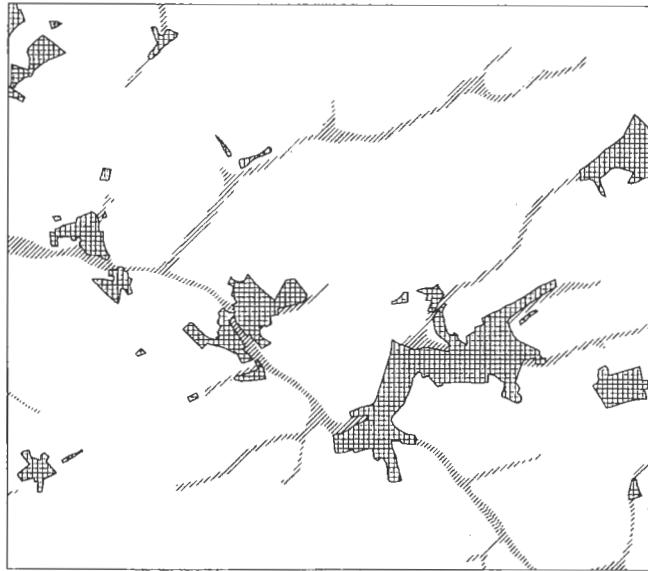
Die Ergebnisse der Ausgrenzung des Senkenbereiches können beispielhaft für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg aufgezeigt werden. Hier stehen die Bodeneinheiten der Bodenkarte, die Senkenbereiche begleiten, zur Verfügung.

Die Ausgrenzung von Senkenbereichen für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg ist in Abbildung 19 im Vergleich zu Auszügen der Bodenkarte dargestellt. Der linke Kartenausschnitt zeigt das berechnete Tiefenliniennetzwerk mit einem sehr geringen  $E_{\min}$ -Wert. Entlang dieser Tiefenlinien wurden Senkenbereiche beim Überschreiten von  $E_{\min} = 25$  ha entsprechend der oben beschriebenen Grundeinstellungen ermittelt (mittlerer Kartenausschnitt). Die Flächenausgrenzung weist dabei eine gute Übereinstimmung mit den begleitenden Bodeneinheiten der Senken auf, wie sie im rechten Kartenausschnitt dargestellt sind. An einigen Stellen lassen sich jedoch bei der Ausgrenzung mit Hilfe des DHM Senkenbereiche ermitteln, die durch die Bodeneinheiten 83 bis 85 der Bodenkarte Oberreifenberg (FICKEL 1977) nicht ausgegrenzt sind. Diese sind in der Bodenkarte aus Generalisierungsgründen anderen Bodeneinheiten zugeordnet (vgl. Bodenkarte 5716 Oberreifenberg, Bodeneinheit 71 und 82).

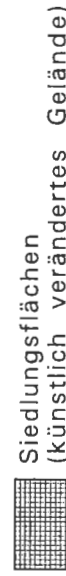
Bei der Anwendung des vorgestellten Verfahrens zeigt sich somit, daß tendenziell eine Abgrenzung erreicht wird, die der bodenkundlichen Kartierung entspricht. Im detaillierten Geländevergleich wird aber auch deutlich, daß eine Abgrenzung von Senken im oben definierten Sinne nicht immer erreicht werden kann. Während die Ausgliederung einer Talau mit ausgeprägter Talsohle meist gute Ergebnisse zeigt, ist vor allem für Seitentäler, insbesondere bei Trockentälern, die Klassifizierung von Senkenbereichen im Hinblick auf eine Deckschichtengliederung schwieriger. An Standorten mit vergleichbarem Einzugsgebiet und Neigung der Tiefenlinie sind z. T. deutlich unterschiedliche Deckschichtenausprägungen zu finden. Während z. B. im Seitentälchen des Au-Baches, das den Langhals und den Biemer Berg im Arbeitsgebiet Oberreifenberg trennt, holozäne Abschwemmassen über Schieferschutt vorliegen, sind in den Seitentälchen der Weil nördlich von Schmitten z. T. kolluvial überdeckte Deck- und Mittellagen vorzufinden. Einerseits spielt also der Einfluß der äolischen Kompo-



**Ausgegliederte Senkenbereiche unter Verwendung des DTM**



**Senkenbereiche nach Bodeneinheiten BK 5716 Oberreifenberg, Fickel (1977)**



Senkenbereiche ermittelt aus Bodeneinheiten der Bodenkarte



**Abb. 19** Ausgrenzung von Senkenbereichen und Vergleich mit senkenbereichsrelevanten Bodeneinheiten der Bodenkarte (Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)

nente eine entscheidende Rolle, andererseits kann für das Seitentälchen des Au-Baches vermutet werden, daß hier eine holozäne Abschwemmung stattgefunden hat, wodurch zunächst die Solifluktsdecken entfernt und zu einem späteren Zeitpunkt die holozänen Abschwemmungen sedimentiert wurden.

Lokale Besonderheiten wie dieses Beispiel lassen sich nur durch intensive Geländeuntersuchungen erarbeiten und können auch durch komplexe Modelle nicht erfaßt werden.

Die Abgrenzung entlang des Tiefenliniennetzwerkes, also der Übergang von divergenten Hangbereichen zur Senke, kann i. d. R. sehr gut mit dem Übergang vom Oberlauf der Bachtäler in die Dellentäler gesetzt werden. Als eine repräsentative Ausprägung kann z. B. der Oberlauf des Sattelbaches (südl. des Kartiergebietes 2 im Arbeitsgeb. Grävenwiesbach) herangezogen werden. Hier ist im Senkenbereich eine Basislage ausgebildet, die von 40 bis 60 cm mächtigen Abschwemmungen überlagert wird. Mit dem Übergang vom Bachtälchen zum hangaufwärts eingesenkten Dellentälchen setzt die Mittel- und Decklage ein. Parallel dazu verläuft auch die Bodentypengrenze mit dem Übergang von vergleyten zu pseudovergleyten Standorten.

Im kleinräumigen Geländevergleich und bei der großmaßstäbigen Kartierung zeigen sich darüber hinaus Schwächen, die auf eine ungenügende Datenqualität des DHM zurückzuführen sind. Wie in Kapitel 4 bis Abschnitt 4.2 beschrieben, zeigen die verwendeten Höhenmodelle vor allem Fehler in den tiefenliniennahen Bereichen auf. Hiervon sind insbesondere abflußlose Mulden betroffen, die zu ausbuchtungsartigen Verbreiterungen der ausgegliederten Senken führen. Dieses Phänomen tritt z. B. im Arbeitsgebiet Oberreifenberg östlich von Dorfweil am Au-Bach auf.

Darüber hinaus liegt ein im Gelände häufig gut erkennbarer Knick im Übergang vom Unterhang zur Senke im DHM deutlich geglättet vor. Ursache ist zunächst die Auflösung des verwendeten DHM mit 20 x 20 m. Hauptursache ist jedoch in der quantitativ ungenügenden Erfassung von Höhendaten in diesen Bereichen zu sehen. Die digital erfaßten Höhenlinien der TK 5 oder auch TK 25 werden hier durch andere topographische Objekte wie Straßen, Häuser u. a. verdrängt. Um ein harmonisches Höhenlinienbild bei einer Linieninterpolation auf Grundlage des DHM zu erreichen, werden vom Hessischen Landesvermessungsamt Filter verwendet, die zu einer Glättung von Kleinformen wie Kerbtäler und Hangknicke führen. Hierdurch sind die ermittelten Grenzen örtlich um 1 bis 2 Rasterzellen (20 m bis 40 m) von den tatsächlichen Grenzen verschoben.

Mit geringen Einschränkungen kann das angewandte Verfahren im Hinblick auf die Abgrenzung von Senken und Hang im Hinblick auf eine räumliche Deckschichtengliederung in sinnvoller Weise eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für den Maßstabsbereich ab 1 : 25 000 und kleiner. Damit können die Prozeßbereiche Senkenbereich und Hang-/Scheitelbereich einer getrennten Betrachtung durch eine Relieffanalyse und Reliefgliederung unterzogen werden.

## 6.2 Reliefgliederung durch Klassifizierung von Reliefformelementen

Die Bedeutung einer systematischen, hierarchischen Gliederung des Reliefs wurde schon von PENK (1894) hervorgehoben. Die Geomorphologie mit ihrer Teildisziplin Geomorphographie tat sich jedoch in der Vergangenheit durch die Verwendung mehr oder weniger gut definierter Begriffe mit der Beschreibung von Reliefformen schwer. Mit den Arbeiten von RICHTER (1962), KUGLER (1964, 1974) und HORMANN (1968, 1971) gewann die Geomorphometrie als Grundlage zur Beschreibung von Reliefformen in "Maß und Zahl" zunehmend an Gewicht. Hiermit wurde eine objektivierbare Größe zur geomorphographischen Beschreibung der Erdoberfläche geschaffen. Die Geomorphometrie wird in Bezug zur Geomorphographie daher auch als quantitative Geomorphographie verstanden (vgl. DIKAU 1988:3).

Die hierarchische Gliederung des Reliefs in Reliefeinheiten unterschiedlicher Ordnung wurde von KUGLER (1964 u. 1974) dargestellt und von DIKAU (1988) zur digitalen Reliefgliederung eingesetzt. Die EDV-orientierte Gliederung des Reliefs in homogene Reliefeinheiten wurde dabei im Hinblick auf die Anforderungen der Geomorphologischen Karte (GMK 25) konzipiert (vgl. BARSCH & STÄBLEIN 1978; STÄBLEIN 1981). Die maßstabsabhängige Reliefgliederung wurde daher vorwiegend auf das Mesorelief bis hin zur Größenordnung des Mikroreliefs ausgerichtet (s. Abb. 20).

Der Größentyp Mikrorelief bis Mesorelief entspricht etwa dem Betrachtungsmaßstab des Reliefs, der für die bodenkundliche Landesaufnahme 1 : 25 000 bis 1 : 50 000 im Sinne der geomorphologischen Kartierung eingesetzt wird. Aus diesem Grund erscheint die Integration von Reliefgliederungsverfahren aus der Geomorphologie für die vorliegende Fragestellung interessant, zumal als gliedernde Größe in erster Linie die Oberflächenkrümmung herangezogen wird. Die Bedeutung dieses reliefbeschreibenden Faktors hinsichtlich der räumlichen Deckschichtenausprägung wurde bereits in Kapitel 5 dargelegt.

		GRÖßENTYP			Beispiele
		Erstreckung (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Höhenausdehnung (m)	
MEGARELIEF					Schilde
MAKRO-RELIEF	B	10 <sup>6</sup>	10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>3</sup>	kontinentale Gebirge
	A	10 <sup>5</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>3</sup>	Mittelgebirge
MESORELIEF	B	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>2</sup>	Berge, Täler
	A	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>1</sup>	Moränenhügel
MIKRORELIEF	B	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>0</sup>	Doline, Hangmulde
	A	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>-1</sup>	Erosionsrinne
NANORELIEF		10 <sup>0</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	Karren, Tafoni
PIKORELIEF		10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>	< 10 <sup>-1</sup>	Gletscherschramme

☒ betrachtete Größenordnungstypen

Abb. 20 Größenordnungstypen von Reliefeinheiten  
(aus DIKAU 1988, verändert)

### 6.2.1 Methodische Beschreibung

Für die Beschreibung eines Reliefformelementes wird, ausgehend von RICHTER (1962) und KUGLER (1972), bis heute die Vertikal- und Horizontalkrümmung (Radien) eingesetzt. Dies setzt sich in den Arbeiten von BARSCH & STÄBLEIN (1978), DIKAU (1988), KLEEFISCH & KÖTHE (1993) und KÖTHE (1988) fort und ist auch heute noch Bestandteil zur geomorphographischen Kennzeichnung des Oberflächenreliefs (ROESCHMANN & LEHMEIER 1993:9).

Zur Beschreibung der Krümmung einer Oberfläche ist die Horizontalkrümmung jedoch ungeeignet, da sie, sofern nicht gleichzeitig die Neigung berücksichtigt wird, nichts über die Form aussagt (vgl. HORMANN 1971:110f.). Die Horizontalkrümmung eines betrachteten Standortes ist eine Funktion der Querkrümmung und Neigung (vgl. 4.3). Betrachtet man ein sehr flach geneigtes Gelände wie z. B. eine Talsohle, so weist der zentrale Teil entlang der Tiefenlinie für die Horizontalkrümmung extrem kleine Radien auf, während diese schon in geringer Distanz zur Tiefenlinie sehr groß werden. Bezüglich der Reliefform sind jedoch nur geringe Unterschiede festzustellen. Für die Klassifizierung der Reliefformen im Hinblick auf das taxonomisch-hierarchische Modell von KUGLER wird daher die Verwendung der Querkrümmung als sinnvoll erachtet.



Die Reliefgliederung erfolgt in Anbetracht des Größenordnungstypes in Formelemente (Formgliederung einheitlicher Hang-, Scheitelflächen) oder Formfazetten (Untergliederung der Hang- und Scheitelbereiche). Hauptgliederungskriterium ist die Oberflächenkrümmung (Vertikal- und Horizontalwölbungsradius). Dabei werden in der Vertikalen und der Horizontalen Abgrenzungen in konvex, gestreckt und konkav vorgenommen. Mit der Kombination einer klassifizierten Vertikal- und Horizontalkrümmung lassen sich so 9 Klassen bilden (Abb. 21).

Die Klassengrenze (Krümmungsradius, KR-Kriterium) zur Unterscheidung von gestreckten und gekrümmten Hangbereichen muß dabei vorgegeben werden. Von DIKAU (1988) wird hier ein KR-Kriterium von 600 m Radius eingesetzt, das je nach Anwendung modifiziert werden kann. Eine veränderliche Klassifizierung widerspricht jedoch den Grundüberlegungen bezüglich einer Vergleichbarkeit von Ergebnissen in unterschiedlichen Gebieten. Für eine Relieffklassifizierung ist dies aber unbedingt erforderlich, da in unterschiedlichen Landschaften auch verschiedene Krümmungsradien von Bedeutung sind. Zur Gliederung eines schwach reliefierten Hochflächenreliefs werden z. B. erheblich größere Krümmungsradien zur Abgrenzung benötigt als bei stark geneigten und kleinräumig gegliederten Hängen.

Insgesamt spiegeln Radiusunterschiede von 100 m zu 1000 m deutlich größere Standortunterschiede hinsichtlich der Deckschichtenausprägung wider als Radien zwischen 10 000 m und 100 000 m. Generell kann festgestellt werden, daß Krümmungsradien mit mehr als 3000 m für die Ausprägung der Deckschichten nur eine untergeordnete Bedeutung haben. Dies wurde auch im Entwurf zur KA4 bezüglich der Beschreibung des Oberflächenreliefs berücksichtigt (FLECK 1994:7), wo Krümmungsradien oberhalb dieser Grenze als gestreckt bezeichnet und nicht weiter untergliedert werden.

Sehr wichtig ist zudem eine unterschiedliche Handhabung der Quer- und Vertikalkrümmung in Kombination mit der Unterscheidung der Klassengrenzen für konvexe und konkave Formen. Wird der Parameter "Horizontalkrümmung" verwendet, so ist dies um so wichtiger, da eine völlig andere Datenverteilung im Vergleich zur Vertikalkrümmung vorliegt. Dies kann an den Häufigkeitsverteilungen der Krümmungsradien aufgezeigt werden (Abb. A4 u. A6 ).

Es bietet sich somit ein getrenntes KR-Kriterium für die Quer- und Vertikalkrümmung an, das an die Häufigkeitsverteilung der Krümmungsradien eines betrachteten Gebietes angepaßt ist. Das KR-Kriterium ist zusätzlich für den konvexen und konkaven Bereich getrennt zu bestimmen.

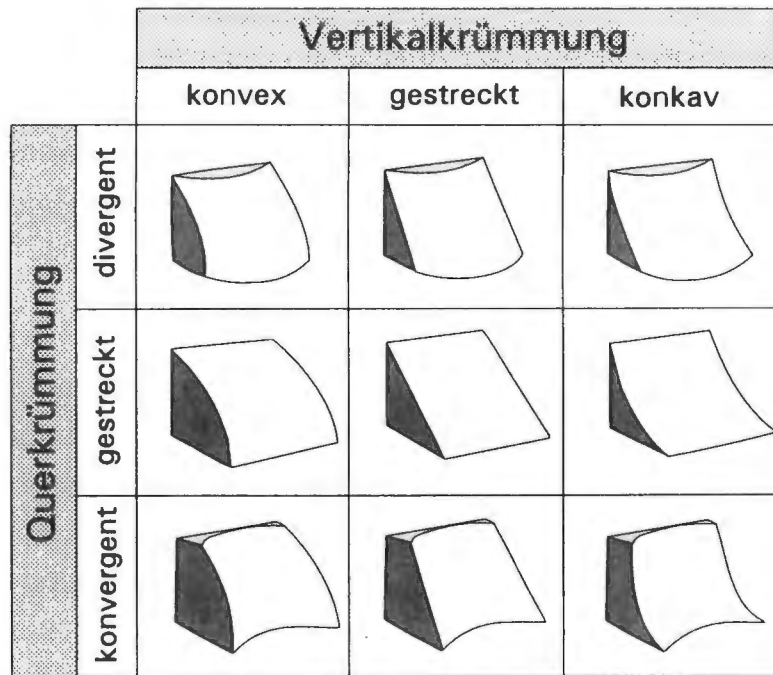


Abb. 21 Schematische Darstellung von Formelementen  
(nach RICHTER 1962, KUGLER 1974 u. DIKAU 1988)

Erheblich besser als der Krümmungsradius gibt die Krümmung ( $1/r$ ,  $r$  = Krümmungsradius in m) als geomorphometrische Größe den Zusammenhang einzelner Oberflächenformen für statistische Auswertungen wieder. Große Krümmungsradien werden durch den Kehrwert gegen 0 gestellt und verlieren so für viele statistische Auswertungen ihre überproportionale Bedeutung. Kleine Krümmungsradien, die Formen mit großer Krümmung beschreiben, stehen dagegen mit relativ großen Distanzen im Wertespektrum zueinander, was eine Charakterisierung und Trennung der deutlich gekrümmten Formen erleichtert.

Um statistische Ergebnisse für die Bestimmung der KR-Kriterien verwenden zu können, wird daher die Krümmung statt des Krümmungsradius verwendet. Für die automatisierte Erfassung dieser Schwellenwerte ist die Verwendung des arithmetischen Mittelwertes sinnvoll, wenn diese für konvexe und konkave Bereiche getrennt bestimmt werden. Gegenüber dem Median liegt das arithmetische Mittel der Krümmung aufgrund der Schiefe der Datenverteilung deutlich höher, also im stärker gekrümmten Bereich.

Dies ist für eine Klassifizierung im Hinblick auf bodenkundlich zu unterscheidende Flächeneinheiten sinnvoll, da die Krümmung bodenkundliche Relevanz vor allem dort zeigt, wo relativ gestreckte Hangbereiche in deutlich gekrümmte Bereiche übergehen.

zeigt, wo relativ gestreckte Hangbereiche in deutlich gekrümmte Bereiche übergehen. Die Auswertung einzelner deckschichtenbeschreibender Flächenobjekte in konvexen (DS-Einh. 1) und konkaven (DS-Einh. 6) Hangsituationen im Arbeitsgebiet Oberreifenberg zeigen dabei in etwa "Grenzkrümmungen", wie sie auch über die oben beschriebene Erfassung der KR-Kriterien ermittelt werden.

Die Ableitung der KR-Kriterien aus Testgebieten nach Boden- bzw. Deckschichteneinheiten ist aufgrund der starken Streuung der Daten nicht möglich. Das heißt, es kann hierbei ein Häufigkeitsschwerpunkt bestimmt werden, der für eine betrachtete Kartiereinheit im konvexen Bereich liegt, insgesamt aber auch weit in das konkave Datenspektrum hineinreicht und somit eine eindeutige Zuordnung von Krümmungsbereichen zu Deckschichtenausprägungen nicht zuläßt (vgl. 5.4; Abb. A4 u. A5).

Dies liegt sicherlich, wie bereits erwähnt, in der generalisierten Darstellung der Bodeneinheiten in den Bodenkarten 1 : 25 000 begründet, die hier als Auswertungsgrundlage Verwendung findet. Die Oberflächenform stellt zwar einen wesentlichen Einflußparameter für die Verbreitung der Deckschichten, eine starre Klassifizierung wird jedoch der Abgrenzung lokal benachbarter Formen nicht gerecht. Dies gilt insbesondere, wenn unterschiedliche Reliefverhältnisse vorliegen.

Neben der Ableitung von KR-Kriterien aus der Grundgesamtheit der Daten in einem Betrachtungsgebiet gibt es durch die Verwendung der Fenstertechnik die Möglichkeit einer lokalen Bestimmung von KR-Kriterien. Hierbei wird, analog zur Bestimmung von Mittelwerten für konvexe und konkave Krümmungen, nicht das gesamte Testgebiet, sondern nur ein Fenster mit definierter Größe (z. B. 21 x 21 Rasterzellen) verwendet und so für jede Rasterzelle ein lokales Kriterium bestimmt. Hierdurch kann für unterschiedliche Reliefbereiche eine kontinuierliche Anpassung erfolgen.

Als weiteres Gliederungsmerkmal der Formfazetten wird von DIKAU (1988) die Hangneigung und die Exposition herangezogen. Hierbei werden einheitliche, nach der Krümmung klassifizierte Reliefelemente weiterhin nach Neigungs- und Expositionsklassen untergliedert. Mit einer Einteilung in jeweils 4 Klassen für die Wölbungsrichtungen sowie 7 Neigungsklassen und 8 Expositionsklassen kommt DIKAU (1988:22) auf 896 Formfazettentypen. Die Darstellung und Interpretation einer solchen Klassifizierung kann auch bei einer gezielten Zusammenfassung der Klassen nicht sinnvoll erfolgen. Schon allein die Interpretation der Formelemente auf Basis der Krümmung bereitet aufgrund der lokal stark streuenden Krümmungsradien Schwierigkeiten. Daher wurde im Rahmen der Anwendung dieses Verfahrens darauf verzichtet.

### 6.2.2 Anwendung des Klassifikationsverfahrens

Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.4 haben gezeigt, daß die Krümmung als Reliefparameter ein wesentliches Gliederungsmerkmal für die räumlich differenzierte Ausprägung von Deckschichten darstellt. Jedoch wurde deutlich, daß eine Klassifizierung von Krümmungsradien zur geomorphometrisch-geomorphographischen Beschreibung eines Reliefformelementes im Vergleich zur vorliegenden Kartierung nur eingeschränkt bewertet werden kann. Daher darf die folgende Anwendung des in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Verfahrens nicht als Klassifizierung von Flächeneinheiten verstanden werden, die spezielle Deckschichteneinheiten repräsentieren. Das Verfahren soll vielmehr genutzt werden, um eine systematische, geomorphographische Reliefgliederung vorzunehmen. Die von RICHTER (1962), KUGLER (1974) und DIKAU (1988) vorgeschlagene Systematik wird dabei im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung angepaßt.

Während sich die Häufigkeitsverteilung der Krümmung für ein betrachtetes Gebiet bezüglich Vertikal- und Horizontalkrümmung stark unterscheidet, zeigt die Querkrümmung meist ein ähnliches Verteilungsspektrum wie jenes der Vertikalkrümmung auf. Die Horizontalkrümmung wird entgegen der Querkrümmung sehr stark durch die Extremwerte am Wendepunkt der maximalen Divergenz bzw. Konvergenz geprägt, die aufgrund des Horizontalschnittes entstehen. Dies wird aus den Mittelwerten der Krümmungsdaten für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg und Grävenwiesbach deutlich (s. Tab. A6 u. A7). Als Beispiele zweier Klassifizierungen mit Horizontalwölbung und Querwölbung ist ein Ausschnitt aus Blatt Grävenwiesbach im Anhang dargestellt (Karte 9 u. 10). Die Horizontalkrümmung bildet vor allem in flachen Bereichen große Krümmungen ab (zentrale Teile von flachen Scheitel- und Senkenbereichen), die mit der Querkrümmung - der Oberflächenform entsprechend - homogen klassifiziert werden können. Entscheidend aber ist, daß durch Verwendung der Horizontalkrümmung sehr stark gekrümmte Oberflächenformen (linker unterer Bereich in Karte 9) mit Rücken- und Tiefenlinienbereichen geringer Reliefenergie (Mitte und rechter Bereich) gleichgesetzt werden. Ohne Zuhilfenahme der Höhenlinien und damit der Information zur Neigung müßte die Klassifizierung der Horizontalwölbung auf ein einheitliches Relief im betrachteten Ausschnitt hinweisen. Die Unterschiede des Reliefs sind jedoch sehr groß. Mit der Verwendung der Querkümmung zur Formgliederung werden diese herausgearbeitet. Es wird der vom Weiltal stark zerschnittene Bereich gegliedert, während die in Relation hierzu größeren Formen im zentralen Bereich des Ausschnittes größtenteils als gestreckt klassifiziert werden (Karte 10).

Für die Trennung von konvexen bzw. konkaven und gestreckten Bereichen wird von

DIKAU (1988) ein Schwellenwert (KR-Kriterium) von 600 m verwendet. Dieser Wert kann grundsätzlich nicht allgemein Verwendung finden, da je nach Landschaftstyp unterschiedliche Formgrößen vorliegen. Zur Ermittlung sinnvoller, die Gegebenheiten eines Gebietes repräsentierende KR-Kriterien wurden für die betrachteten Testgebiete zunächst die Krümmungsradien bzw. die Krümmung analysiert und im Hinblick auf die Verbreitung der Bodeneinheiten im Arbeitsgebiet Oberreifenberg und Grävenwiesbach überprüft.

Zur Trennung von gewölbten und gestreckten Formen zeigt sich, daß aufgrund der Datenverteilung unterschiedliche KR-Kriterien für die beiden betrachteten Krümmungstendenzen (Quer- und Vertikalkrümmung) sowie weiter untergliedert für konvexe (KRX) und konkave (KRV) Formen benötigt werden. Schon bei der Betrachtung der Mittelwerte der Krümmung können die Unterschiede zwischen Quer-, Vertikal- und insbesondere der Horizontalkrümmung aufgezeigt werden (Tab. 1 u. 2). Aber auch die Abgrenzung von konvex-gestreckt und konkav-gestreckt sollte aufgrund der verschiedenen Formausprägung mit getrennten Schwellenwerten abgegrenzt werden. Die Verteilung und die Mittelwerte können hierbei sehr unterschiedlich sein (vgl. Tab. 3, Teilgebiet 1).

Wie in Abschnitt 6.2.1 bereits dargelegt, eignen sich die nach Hohl- und Vollformen getrennt erhobenen arithmetischen Mittelwerte der Krümmung sehr gut als Gliederungskriterium. Sie stellen ein objektives und leicht abzuleitendes Kriterium dar.

Für die räumliche Gliederung mit Hilfe vorgegebener oder statistisch ermittelter KR-Kriterien ist jedoch zu beachten, daß eine Klassifizierung in einem Landschaftsausschnitt mit einheitlichem Relief erfolgen sollte. Liegt ein Arbeitsgebiet vor, das sehr unterschiedliche Reliefformen aufweist, so kann eine Schwellenbildung auf Basis der Gebietsdaten nur bedingt eine sinnvolle Gliederung ermöglichen. Nimmt man die Klassifizierung für unterschiedliche Teilräume vor, so können diese wiederum nicht zueinander in Bezug gesetzt werden.

Verschiebt man somit einen betrachteten Ausschnitt, so verändert sich entsprechend der Grundgesamtheit das KR-Kriterium. Für das Testgebiet Grävenwiesbach ergeben sich so unterschiedliche KR-Kriterien, wenn man dieses in Teilräume untergliedert. Tabelle 3 zeigt hierzu die Kriterien für das gesamte Testgebiet sowie für den stark reliefierten Teil des Teilgebietes 1 und den gering reliefierten Bereich des Teilgebietes 2.

Ein Vergleich der Klassifizierung beider Teilgebiete ist am Beispiel der Querkrümmung

in Abbildung 22 dargestellt. Auf der linken Seite sind die beiden Teilgebiete mit den KR-Kriterien des gesamten Testgebietes Grävenwiesbach abgebildet. Der rechte Teil beinhaltet die beiden Gebiete, klassifiziert aus den gebietsbezogenen Daten. Dabei zeigt sich, daß im stark zerschnittenen Teilgebiet 1, bei Verwendung der KR-Kriterien des gesamten Testgebietes Grävenwiesbach, eine großflächige Darstellung divergenter und konvergenter Bereiche erreicht wird. Im rechten Teil der Abbildung treten diese Abgrenzungen flächig zurück. Im unteren Beispiel verhält es sich umgekehrt. Hier werden die divergenten und konvergenten Formen im linken Teil stark zurückgenommen, während sie bei Nutzung des lokalen KR-Kriteriums größere zusammenhängen-

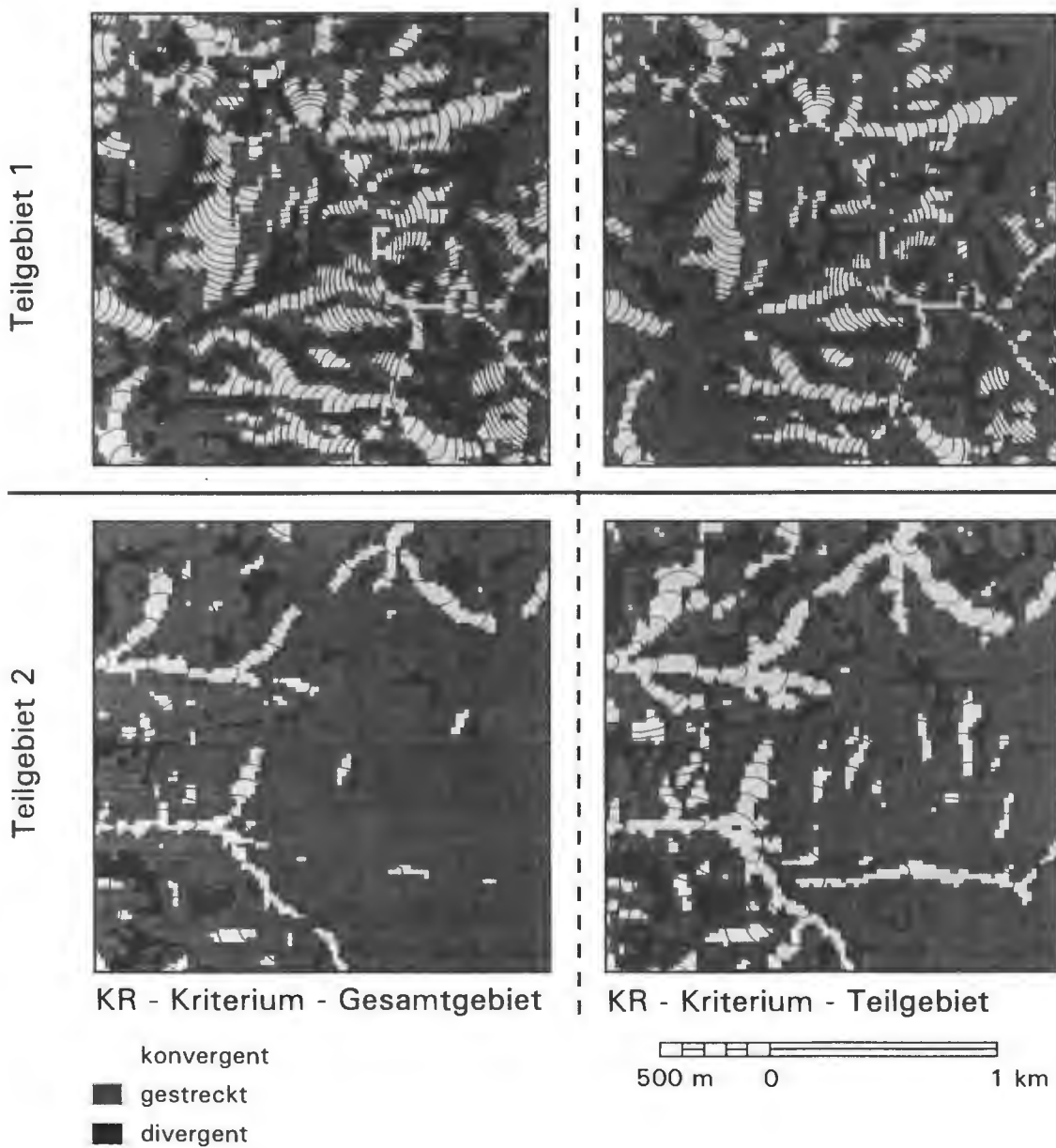


Abb. 22 Vergleich einer Klassifizierung der Querkrümmung mit KR-Kriterien von Teilgebieten und des Gesamtgebietes

Tab. 1 Deskriptive Statistik der Horizontal-, Quer- und Vertikalkrümmung  
(Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 76669)

Variable	n	Krümmung Minimum	Krümmung Maximum	arithmetisches Mittel Krümmung r		Standard- abweichung
Vertikalkümmung (+, konvex)	39270	1.8748E-8	0.01089	0.00104	956	0.0010091
Vertikalkrümmung (-, konkav)	37429	-0.01733	-9.2420E-9	-0.00129	-771	0.0013881
Querkrümmung (+, diverg.)	41820	2.4966E-8	0.01574	0.00100	996	0.0010281
Querkrümmung (-, konverg.)	34849	-0.02932	-3.2097E-8	-0.00097	-1024	0.0011348
Horizontalkrümmung (+, diverg.)	41820	2.8879E-7	0.87836	0.00727	138	0.01594121
Horizontalkrümmung (-, konverg.)	34849	-4.04943	-3.9183E-7	-0.00837	-119	0.029274

Tab. 2 Deskriptive Statistik der Horizontal-, Quer- und Vertikalkrümmung  
(Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)

Variable	n	Krümmung Minimum	Krümmung Maximum	arithmetisches Mittel Krümmung r		Standard- abweichung
Vertikalkümmung (+, konvex)	46777	1.87898E-8	0.01694	0.000731	1366	0.0009095
Vertikalkrümmung (-, konkav)	44427	0.012332	-6.04806E-9	-0.000882	-1133	0.001217
Querkrümmung (+, diverg.)	48297	7.39278E-8	0.02074	0.000737	1355	0.00105
Querkrümmung (-, konverg.)	42907	-0.009728	-1.0785E-8	-0.000698	-1432	0.0008608
Horizontalkrümmung (+, diverg.)	48297	9.774E-8	1.42516	0.007744	129	0.0170628
Horizontalkrümmung (-, konverg.)	42907	-2.67921	-2.9111E-7	-0.008617	-116	0.0221428

Tab. 3 Deskriptive Statistik zu Krümmungsdaten kleiner Teilgebiete  
(Arbeitsgebiet Grävenwiesbach - Teilgebiet 1 u. 2, n = 10000)

Variable	n	arithmetisches Mittel Krümmung	Wölbungs- radius
Vertikalkümmung (+, konvex)	4898	0.00136949	730
Vertikalkrümmung (-, konkav)	5102	-0.00178986	-558
Querkrümmung (+, diverg.)	5130	0.00144792	691
Querkrümmung (-, konverg.)	4870	-0.00104251	-959
Horizontalkrümmung (+, diverg.)	5130	0.00824176	121
Horizontalkrümmung (-, konverg.)	4870	-0.00900536	-111

Vertikalkümmung (+, konvex)	5192	0.00058139	1720
Vertikalkrümmung (-, konkav)	4808	-0.00056176	-1780
Querkrümmung (+, diverg.)	5012	0.000458734	2180
Querkrümmung (-, konverg.)	4988	-0.00040123	-2492
Horizontalkrümmung (+, diverg.)	5012	0.0081021	123
Horizontalkrümmung (-, konverg.)	4988	-0.00698603	-143

de Flächen bilden. Einheitliche KR-Kriterien für ein inhomogenes Betrachtungsgebiet führen so zu einer Klassifizierung, die für keinen Bereich eine sinnvolle Abbildung der lokalen Formen ermöglicht, da einerseits die Formen überzeichnet werden oder aber eine ungenügende Differenzierung stattfindet.

Diese z. T. räumlich unzureichende Gliederung der Formelemente kann durch eine gleitende lokale Anpassung verbessert werden. Hierzu werden die KR-Kriterien nicht aus dem gesamten Gebiet berechnet, sondern lokal erhoben. Mit Hilfe eines nach der Größe frei wählbaren Ausschnittfensters werden die KR-Kriterien für jede Rasterzelle getrennt ermittelt. Damit wird erreicht, daß die lokalen Reliefverhältnisse direkt in die Klassifizierung eingehen.

Im Vergleich zur Klassifizierung mit gebietsbezogenen KR-Kriterien kann damit, unabhängig von den lokalen Unterschieden, eine angepaßte Formgliederung erfolgen. Für das Testgebiet Grävenwiesbach konnten bei der gebietsbezogenen Klassifizierung die gering gekrümmten Bereiche nicht oder nur unzureichend gegliedert werden. Dies ist am Beispiel der Querkrümmung in Karte 10 dokumentiert. Mit der Klassifizierung "lokaler Reliefformen" durch ein gleitendes KR-Kriterium werden die flachwelligen Formen im Nordosten des Gebiets deutlich in Voll- und Hohlformen getrennt. Gleichzeitig werden aber auch die stark zerschnittenen Hänge entlang der Weil, im Südosten des Gebietes, relativ zum Formenschatz herausgearbeitet (Karte 11).

Führt man nun die gleitende Klassifizierung mit Quer- und Vertikalkrümmung getrennt durch und stellt diese zu Formelementen i. S. v. RICHTER (1962) zusammen, so lassen sich hiermit "lokale Formelemente" beschreiben (Karte 12).

Dieser Verfahrensansatz in Anlehnung an RICHTER (1962) bietet somit eine automatisierte, lokal angepaßte Klassifizierung, die blattschnittfrei angewendet werden kann. Durch die Verwendung gleitender Schwellenwerte ist jedoch die systematische Betrachtung und Auswertung der Ergebnisse erschwert. Für die vorliegende Fragestellung ist dies jedoch weniger von Bedeutung, da hier vor allem die Abgrenzung der Flächeneinheiten im Vordergrund steht. Wertet man zudem die einzelnen Reliefelemente statistisch aus, so kann auch eine systematische Beschreibung bzw. Visualisierung der Reliefelemente vorgenommen werden.

Die vorgestellten Verfahren können mit Hilfe jedes rasterorientierten Geographischen Informationssystems vorgenommen werden. Bei der Nutzung eines starren KR-Kriteriums liegt hierbei ein standardisiertes, objektives Klassifizierungsverfahren vor. Auch bei Anpassung der KR-Kriterien an die Reliefbedingungen des betrachteten Bereiches



bleibt das Verfahren transparent für die Interpretation der Klassifizierungsergebnisse. Es ist zudem universell einsetzbar. Damit wird ein Verfahren auch für allgemeine Anwendungen in der Geomorphologie zur Diskussion gestellt, das für Aufgaben zur Klassifizierung von Relief-Formelementen eingesetzt werden kann. Die objektive Klassifizierung ohne vorgegebene Schwellen und die Einsetzbarkeit unabhängig vom Relieftyp bieten deutliche Vorteile gegenüber der Verfahrensweise von DIKAU (1988).

### **6.3 Anwendung multivariater Distanzverfahren zur Gliederung homogener Relief-einheiten**

Die Anwendung multivariater Distanzverfahren hat in der Geographie Tradition und kann als Standardmethode zur statistischen Klassifizierung bzw. Differenzierung von Raumeinheiten betrachtet werden (vgl. BAHRENBURG & GIESE 1975). Ziel dieser Verfahren ist es, Raumeinheiten zu analysieren oder zu differenzieren, die innerhalb einer Gruppe geringe Unterschiede (Distanzen) aufweisen. Die Unterschiede zwischen den Gruppen oder der räumlichen Klassen sollen hingegen möglichst groß sein.

In der Geomorphologie beschränkte sich der Einsatz von multivariaten Verfahren vorwiegend auf die Analyse von ausgegliederten Flächenobjekten mit Hilfe geomorphometrischer Daten. Hierzu gibt die Arbeit von SIEGBURG (1987) einen methodischen Überblick für die Hangneigungs- und Hangformanalyse. Die Nutzung statistischer Verfahren zur Raumgliederung, das heißt zur Abbildung homogener räumlicher Einheiten, erfolgte hingegen vor allem in der Fernerkundung. Die Verfahren zur Auswertung von Multispektralscannerdaten sind sehr weit entwickelt und auf die speziellen Eigenschaften von Spektraldaten abgestimmt. Als Standardverfahren sind dabei überwachte Diskriminanzverfahren, wie z. B. die Maximum Likelihood Methode und unüberwachte Verfahren, meist iterative Clusterverfahren zu nennen.

Ein Vergleich unterschiedlicher Standardverfahren zur automatischen Klassifikation räumlicher Einheiten auf der Grundlage von geomorphometrischen und statistischen Reliefattributen wurde bereits von KUNDERT (1988) vorgenommen. Ziel der methodischen Anwendung von KUNDERT war dabei jedoch keine gezielte geomorphographische Reliefgliederung im hier vorgestellten Sinne, sondern eine großräumige Regionalisierung der Landschaft unter Verwendung reliefbezogener Daten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen jedoch auf, daß die Verwendung solcher Verfahren auch für eine mittel- und großmaßstäbige geomorphographische Reliefgliederung Einsatzmöglichkeiten bietet.

Der Einsatz von multivariaten Distanzverfahren für die geomorphographische Reliefgliederung liegt in ähnlicher Weise nah wie die Anwendung dieser Verfahren in der Satellitenbilddauswertung. Mit der Ableitung von geomorphometrischen Reliefdaten (Krümmung, Neigung u. a.) liegen mehrere Betrachtungsdimensionen des Reliefs vor. Die Zusammenführung aller reliefbeschreibenden Teilaspekte ergeben wie bei der Kombination von multispektralen Daten ein "Bild des Reliefs".

Entgegen dem Ansatz von KÖTHE & LEHMEIER (1993), die einzelne Reliefkategorien ableiten (vertikale- und horizontale Gliederung), wird hier die Meinung vertreten, daß eine Reliefgliederung auf Grundlage einer Erfassung der gesamten Formgestalt erreicht werden kann und muß. Mit der multivariaten Distanzgruppierung stehen hierzu Verfahrensprinzipien zur Verfügung, die eine Gruppierung auf Basis unterschiedlicher Reliefattribute zu Reliefeinheiten ermöglichen.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Möglichkeiten der Nutzung von multivariaten Standardverfahren zur geomorphographischen Reliefgliederung am Beispiel der Clusteranalyse dargestellt und diskutiert. Die speziellen Erfordernisse der Reliefanalyse führen dabei zu einem angepaßten Verfahrensansatz (vgl. Abschn. 6.3.2). In den anschließenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Methode unter Verwendung unterschiedlicher Einstellungsparameter aufgezeigt.

### **6.3.1 Anwendung eines iterativen Clusterverfahrens zur Bildung reliefbezogener Raumtypen**

Für die Anwendung statistischer Methoden, insbesondere multivariater Verfahren, müssen i. d. R. normalverteilte Daten vorausgesetzt werden. Reliefdaten, hier insbesondere von der Höhe über NN abgeleitete Reliefattribute, entsprechen dieser Vorgabe nur in Ausnahmefällen. Wie in Abschnitt 4.3 ausführlich dargelegt, ist grundlegend eine Verwendung von Wölbungsradien als Eingangsdaten vor allem für Distanzverfahren zu vermeiden. Durch die Verwendung der Krümmung ( $1/r$  Krümmungsradius in m) kann eine sinnvolle Häufigkeits- und Distanzverteilung erreicht werden (vgl. Abschn. 6.2). Mit einer Standardisierung der Eingangsvariablen liegen dann annähernd normalverteilte Daten vor.

Mit den so vorbereiteten Daten kann eine Clusteranalyse bzw. Diskriminanzanalyse durchgeführt werden. Bei den Clusterverfahren ist man hierbei auf iterative Verfahren angewiesen, da die traditionellen hierarchischen Clusterverfahren bezüglich der Datenmengen Einschränkungen aufweisen.

Prinzipiell können Verfahren aus der Satellitenbildverarbeitung angewendet werden. Diese sind jedoch weitgehend auf die Distanzgruppierung von Spektraldaten abgestimmt und erlauben nur bedingt spezielle Einstellungen, wie sie für die Verarbeitung der Reliefdaten nötig sind. Aufgrund der weitreichenden Möglichkeiten der Datenvorbehandlung und Einstellungsoptionen ist die Prozedur "Fastclus" des Statistikpaketes SAS (SAS Institute Inc. 1988b) für die Verarbeitung geomorphometrischer Daten sehr gut geeignet. Die Anbindung an eine Datenbank sowie die Vorbehandlungsprozeduren (Standardisierung) und weiterführende statistische Methoden zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse bieten sehr gute Auswertungsmöglichkeiten.

Für die Distanzgruppierung muß zunächst die Anzahl der gewünschten Ergebnisgruppen (Cluster) angegeben werden. Für diese Gruppen kann als Vorgabe ein Klassenzentrum definiert werden (Initial Seeds). Von dieser Anfangspartition ausgehend, werden die Seeds mit jedem Zuweisungsschritt neu bestimmt, bis die bestmögliche Partition gefunden ist (vgl. KUNDERT 1988:31ff.). Bei der praktischen Anwendung des Verfahrens ergaben sich jedoch keine bzw. unbedeutende Unterschiede der Clusterergebnisse aufgrund unterschiedlich vorgegebener Anfangspartitionen oder einer Zufallspartition. Das Verfahren ermittelt somit eine möglichst optimale Partitionierung auf Grundlage der verwendeten Daten.

Die Ergebnisse einer Clusteranalyse werden im folgenden am Beispiel des Arbeitsgebietes Oberreifenberg dargestellt. Hierzu wurden die Merkmale Querkrümmung, Vertikalkrümmung und Neigung verwendet. Die ersten beiden Variablen repräsentieren die Oberflächenform. Im Zusammenhang mit der Neigung finden somit wesentliche geomorphometrische Reliefparameter hinsichtlich der Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes Verwendung (vgl. Kap. 5). Die Eingangsvariablen wurden auf den Mittelwert 0 und die Standardabweichung 1 standardisiert. Die Variablen sind damit einheitlich gewichtet.

Die Resultate zeigen hinsichtlich einer formalen Bewertung des Verfahrens, das heißt aus statistischer Sicht, eine gute Trennung von Gruppen auf Basis der eingesetzten Variablen und des Datenbestandes. Mit der multivariaten Distanzgruppierung liegt jedoch keine strukturierte Klassifizierung hinsichtlich der von RICHTER (1962) beschriebenen Reliefformen oder Formfazetten vor, wie sie von DIKAU (1992:76ff.) für die digitale geomorphographische Reliefmodellierung eingesetzt wird. Die gebildeten Cluster werden durch die Cluster-Zentroide der verwendeten Variablen beschrieben. Im Hinblick auf die optimierte Distanzgruppierung aus dem Gesamtdatenbestand sind die Cluster-Zentroide in der multivariaten Raumverteilung nicht systematisch, sondern distanzoptimiert verteilt. In Tabelle 4 und Abbildung 23 sind die Zentroide mit den

Koordinaten der Variablen für die ermittelten 10 Cluster dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, daß die Zentroidkoordinate der Querkrümmung im stark positiven Bereich (Cluster 1) mit einer positiven Koordinate der Vertikalkrümmung vorliegt. Gegenteiliges ist für den Cluster 10 zu erkennen. Dies entspricht auch den Formanalysen, wie sie aus Kapitel 5 vorliegen. Es werden somit Zentroide gebildet, die in Abhängigkeit zur Datengrundgesamtheit stehen, also eine optimierte Gruppierung der Reliefdaten des betrachteten Gebietes darstellen. Als Vorgabe muß dabei die Anzahl der Gruppen vorgegeben werden. Hiermit wird der Grad der Generalisierung beeinflusst.

Tab. 4 Ergebnisse der Clusteranalyse mit den standardisierten Variablen Querkrümmung (QK), Vertikalkrümmung (VK) und Neigung (NEIG) bei 10 Klassen,  $n = 76720$  (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)

Cluster	Cluster Seed			Häufigkeit (n)	RMS mittl. Abweichung	max.Distanz Seed - Beob.	nächster Cluster	Distanz zwischen Seeds
	QK	VK	NEIG					
1	2.57728	0.72122	0.46569	2.584	0.9548	10.1097	2	2.1139
2	0.66604	0.16711	-0.24746	12.742	0.4337	2.5061	5	1.1545
3	0.47157	1.70123	0.16577	4.961	0.6753	5.1252	2	1.6007
4	0.20072	0.46350	1.43318	9.563	0.5511	3.7637	6	1.4667
5	-0.03739	0.29358	-1.15411	13.722	0.4225	2.3633	2	1.1545
6	-0.07722	-0.94134	1.11627	8.222	0.5804	5.2298	4	1.4667
7	-0.34529	-2.94495	-0.14219	2.397	0.8909	9.0305	8	2.0006
8	-0.35842	-1.03847	-0.74830	6.370	0.5107	2.5334	5	1.4290
9	-0.56608	0.13485	0.05370	13.271	0.4298	2.6167	2	1.2688
10	-2.64336	-0.43955	-0.52787	2.888	0.9406	17.5657	9	2.2323
min	-2.64336	-2.94495	-1.15411	2.397	0.4225	2.3633		1.1545
max	2.57728	1.70123	1.43318	13.722	0.9548	17.5657		2.2323
mittel	-0.01122	-0.18828	0.04147	7.672	0.6390	6.0844		1.5888
range	5.22064	4.64618	2.58729	11.325	0.5323	15.2024		1.0778

Von dieser theoretischen Betrachtung ausgehend, kann durch den vorhandenen Koordinatenbezug der Daten das Ergebnis im räumlichen Zusammenhang als Rasterkarte (Karte 13) abgebildet werden. Die räumlich benachbarten Rasterzellen eines gleichen Clusters ergeben so zusammenhängende Rasterflächen bzw. Flächenobjekte.

Die in Karte 13 ausgewiesenen Flächeneinheiten können mit Hilfe der Verteilung der Cluster-Zentroide (Abb. 23) einzelnen geomorphographischen Einheiten zugewiesen werden. Mit dem Cluster 1 werden Flächenbereiche mit hoher Divergenz ausgeglie-

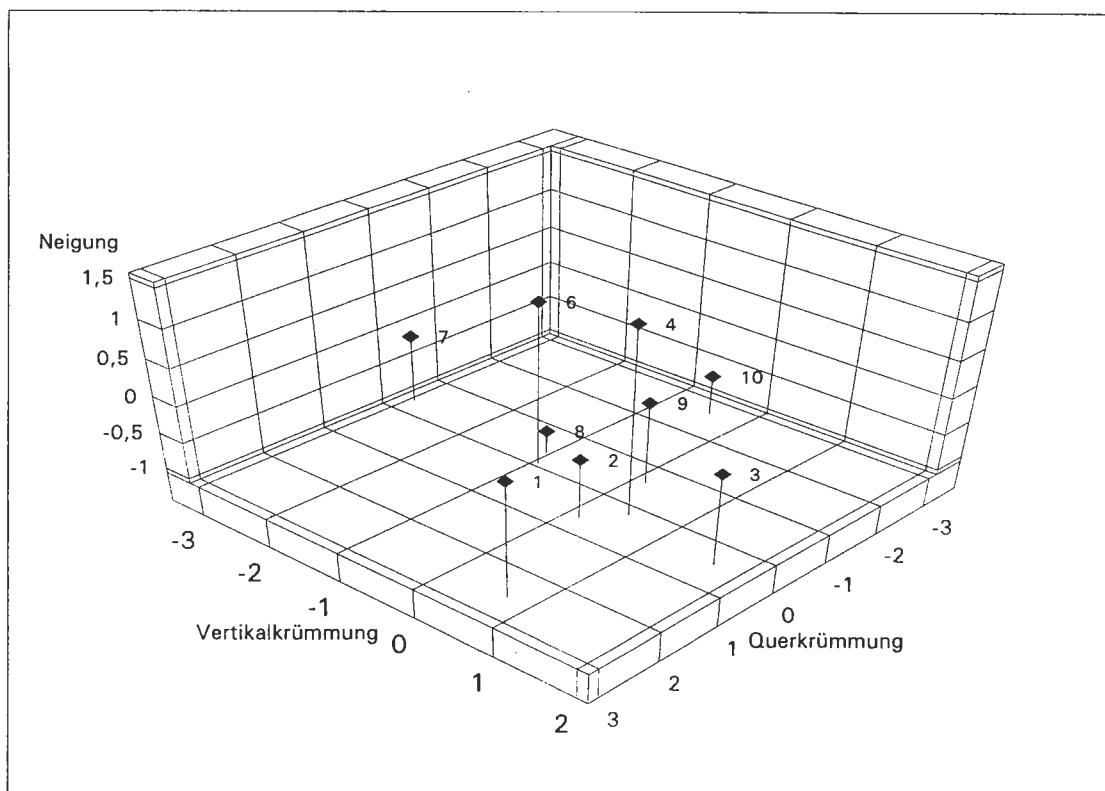


Abb. 23 Verteilung der Cluster-Zentroide mit den standardisierten Variablen Querkrümmung, Vertikalkrümmung und Neigung (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)

dert, die gleichzeitig eine mittlere vertikale Konvexität aufweisen. Mit dem zweiten Cluster sind Formen mit einer mittleren Divergenz vertreten, die vertikal weitgehend gesteckt sind. Für die konvergenten Formen sind diese zwei Krümmungsintensitäten als Hohlformen in den Clustern 10 und 9 gruppiert. Die weitgehend gesteckten Hangformen mit vergleichsweise hoher Neigung werden durch die Cluster 4 (gestreckt bis schwach divergent) und Cluster 6 (gestreckt bis schwach konvergent) abgebildet. Mit dem zentralen Cluster 5 werden die schwach geneigten Flächenbereiche mit dadurch bedingter geringer Krümmung erfaßt. Diese grenzen im betrachteten Gebiet vorwiegend die Scheitelbereiche aus. Die Senkenbereiche sind nur dort betroffen, wo die Aue der engen Täler eine breitere Talsohle beinhaltet.

Im Gegensatz zu den Clustern 1/2 und 9/10 bilden die Cluster 3 und 7 Reliefformen ab, die eine geringe Querkrümmung und eine relativ hohe Vertikalkrümmung beinhalten. Mit dem Cluster 3 werden dabei vertikal konvexe Formen differenziert, die vorwiegend im Übergang vom Scheitelbereich zum Hang vorkommen (Oberhangposition). Der Cluster 7 gliedert analog dazu die stark konkaven Unterhänge. Mit dem Cluster 8 schließen sich hier Formen mit mittlerer Konkavität an, die typisch für die

engen Täler des Arbeitsgebietes sind. In den konkav ausgeprägten Verebnungen von Hangpartien ist diese Gruppe ebenfalls vertreten.

Die Einordnung der Cluster ist somit nach der Interpretation der Clusterergebnisse nicht nur statistisch möglich. Die gefundenen Cluster zeigen aus geomorphographischer Sicht sinnvoll getrennte Gruppen, die hier als räumliche Objekte betrachtet werden können. Ausgehend von der systematischen geomorphographischen Klassifizierung im Sinne von RICHTER (1962), muß der Betrachter bei diesem Verfahren die Clusterergebnisse für jedes betrachtete Gebiet oder bei Veränderung der Einstellungsparameter neu interpretieren. Die Ergebnisse einer Clusteranalyse für das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach zeigen, z. B. bei Verwendung der gleichen Variablen und gleicher Grundeinstellung, eine deutlich andere Verteilung der gefundenen Cluster-Zentroide (vgl. Tab. 5 und Abb. 24).

Tab. 5 Ergebnisse der Clusteranalyse mit den standardisierten Variablen Querkrümmung (QK), Vertikalkrümmung (VK) und Neigung (NEIG) bei 10 Klassen, n = 91204 (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach)

Cluster	Cluster Seed			Häufigkeit (n)	RMS mittl. Abweichung	max.Distanz Seed - Beob.	nächster Cluster	Distanz zwischen Seeds
	QK	VK	NEIG					
1	5.96246	1.57062	1.70514	579	1.8506	11.4552	2	4.6785
2	1.49723	0.21024	1.38986	4.401	0.7736	6.0459	9	1.8708
3	0.89312	2.33598	1.30112	2.944	1.0291	10.6583	2	2.2117
4	0.63408	0.45956	-0.25107	14.546	0.4293	3.4755	5	0.9756
5	-0.11382	0.02865	-0.70589	37.767	0.3021	2.5007	4	0.9756
6	-0.23280	-1.00253	0.19460	9.499	0.5190	2.7613	5	1.3742
7	-0.30406	-3.69311	0.86009	2.198	1.1069	6.9038	6	2.7726
8	-0.32734	0.40262	0.41303	10.708	0.4606	2.9351	4	1.1699
9	-0.54867	-0.34023	2.39937	4.813	0.8492	5.0819	8	2.1322
10	-2.28592	-0.40326	-0.08889	3.749	0.8083	6.3256	6	2.1575
min	-2.28592	-3.69311	-0.70589	579	0.3021	2.5007		0.9756
max	5.96246	2.33598	2.39937	37.767	1.8506	11.4552		4.6785
mittel	0.51743	-0.04315	0.72174	9.120	0.8129	5.8143		2.0319
range	8.24838	6.02909	3.10526	37.188	1.5485	8.9545		3.7029

Wird mit der Distanzgruppierung eine Optimierung der Gruppen in Bezug zum Gesamtdatenbestand erreicht, so muß unter dem räumlichen Aspekt (Abbildung der Rasterzellen im Koordinatensystem) festgestellt werden, daß in der lokalen Situation nur bedingt eine gute Trennung unterschiedlicher Reliefeinheiten möglich ist. Die lo-

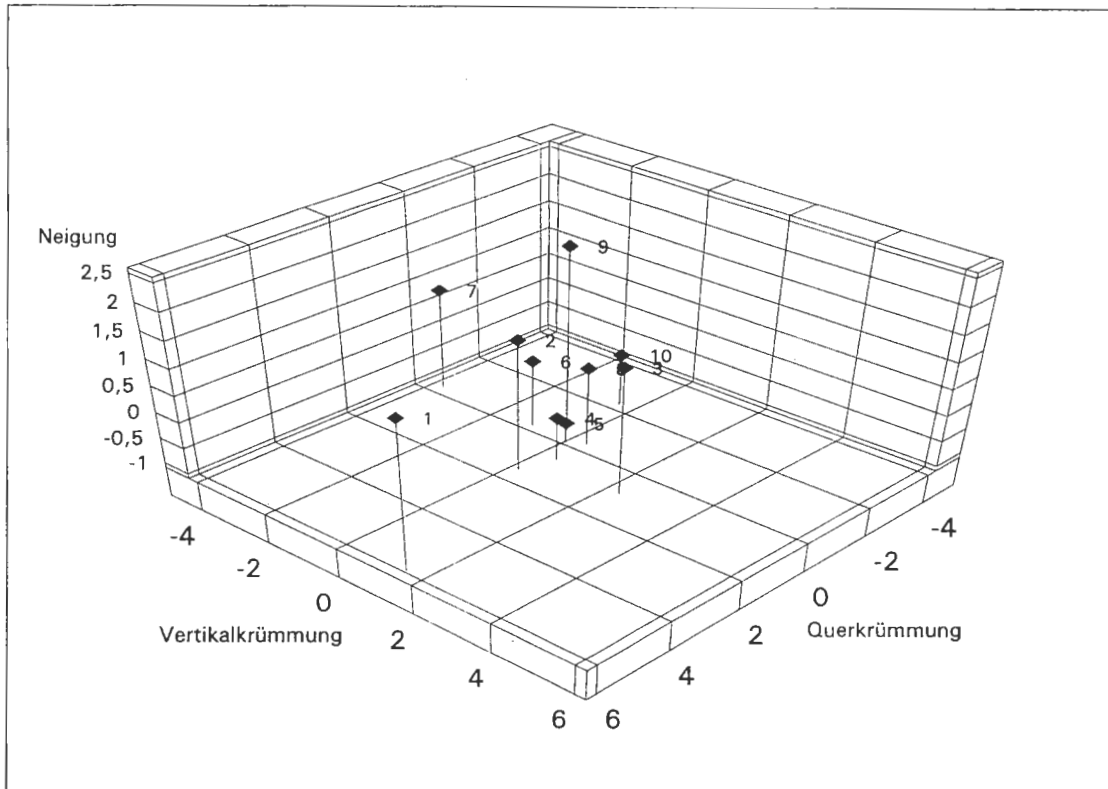


Abb. 24 Verteilung der Cluster-Zentroide mit den standardisierten Variablen Querkrümmung, Vertikalkrümmung und Neigung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach)

kal gebildeten Flächenobjekte (zusammenhängende Rasterzellen gleicher Gruppierung) sind nur durch die Anordnung im Koordinatensystem entstanden. Diese Form der Gruppierung ist deutlich von einer Objektbildung zu unterscheiden, bei der neben einer Distanzgruppierung im multivariaten Raum die Nachbarschaft innerhalb eines räumlichen Koordinatensystems berücksichtigt wird.

Die "unscharfe" Trennung von Reliefeinheiten kann z. B. an den Flächenobjekten des Clusters 9 aufgezeigt werden (Arbeitsgebiet Oberreifenberg). Die Gruppierung erfolgte hier vor allem durch eine geringe Distanz innerhalb der Neigung und der Vertikalkrümmung. Bezüglich der Querkrümmung sind jedoch Bereiche mittlerer Konvergenz bis hin zu sehr schwachen Konvergenzen zusammengefaßt. Diese Formen müssen jedoch im vorliegenden Fall getrennt werden, um die Flächenbereiche ausgliedern zu können, in denen Mittellagen häufig vorkommen (vgl. Kt. 1).

Eine bessere Differenzierung der Querkrümmung kann erreicht werden, indem diese Variable mit einem Faktor gewichtet wird. Eine Versuchsreihe brachte durch die Verwendung unterschiedlicher Gewichtungen lokal eine deutlich bessere Gruppierung. Andererseits traten aber immer Schwachpunkte für einzelne Reliefformen und Lokali-

täten auf. Die Reliefeinheiten können im allgemeinen flächenhaft erfaßt werden, die lokale Abgrenzung der Flächenobjekte gelingt jedoch meist nur eingeschränkt, da der Gesamtdatenbestand für die Klassifizierung verwendet wird.

Die aufgezeigten Probleme sind noch ausgeprägter, wenn das Betrachtungsgebiet sehr unterschiedliche Reliefbereiche beinhaltet. Im Arbeitsgebiet Grävenwiesbach liegen diesbezüglich Teilgebiete mit extrem unterschiedlicher Reliefenergie vor. Die Anwendung des Verfahrens bei gleicher Parametereinstellung hatte zur Folge, daß fast der gesamte flachere nordöstliche Teil des Arbeitsgebietes in einer Klasse gruppiert wurde.

Neben der iterativen Clusteranalyse wurden auch überwachte Verfahren hinsichtlich der Reliefanalyse überprüft. Mit der Möglichkeit, Klassen-Zentroide zu definieren, kann prinzipiell, im Gegensatz zur Clusteranalyse, eine Klassifizierung entscheidend gesteuert werden. Dies kommt der Forderung einer systematischen Klassifizierung erheblich näher. Mit der Vorgabe von Klassen-Zentroiden muß jedoch nach festen Klassifizierungsregeln verfahren werden, womit den unterschiedlichen Landschaftsformen ungenügend Rechnung getragen wird. Werden für das Arbeitsgebiet optimierte Zentroide verwendet, bedeutet dies einerseits eine intensive Auseinandersetzung mit dem Betrachtungsgebiet und den zugrundeliegenden Daten. Andererseits treten mit der Anpassung der überwachten Klassifizierung an das Untersuchungsgebiet größtenteils die gleichen Probleme auf, wie sie bereits für die iterative Clusteranalyse aufgezeigt wurden.

Der Vorteil gegenüber der Clusteranalyse liegt in der steuerbaren Klassifizierung, die hinsichtlich der geomorphographischen Fragestellung zu einer gezielten Reliefgliederung eingesetzt wird. Dies setzt allerdings voraus, daß die Trainingsgebiete oder Klassen-Zentroide entsprechend des betrachteten Landschaftsausschnittes für typische Reliefeinheiten gewählt werden. Der Aufwand für eine Klassifizierung, kann dadurch sehr hoch werden. Zudem sind neben den fachlichen und geomorphologischen Kenntnissen weitreichende statistische Kenntnisse erforderlich, um so eine Klassifizierung durchführen zu können. Hinsichtlich der Objektivität der Klassifizierung und des Aufwandes erscheinen daher überwachte Diskriminanzverfahren für die Reliefanalyse nur bedingt geeignet.



### 6.3.2 Gliederung von homogenen Reliefeinheiten mit Hilfe eines raumbezogenen iterativen multivariaten Distanzverfahrens

Die erheblichen Einschränkungen bei der Verwendung von allgemeinen multivariaten Distanzverfahren für die geomorphographische Reliefanalyse führten zur Entwicklung einer Methode, die als Erweiterung den räumlichen Zusammenhang der eingesetzten Variablen im Koordinatensystem (Rastermatrix) berücksichtigt. Damit soll erreicht werden, daß eine Gruppierung nicht aus dem Gesamtdatenbestand eines Betrachtungsgebietes erfolgt. Durch einen räumlichen Nachbarschaftsbezug soll vielmehr eine lokale Optimierung der Abgrenzung von geomorphographisch unterschiedlichen Reliefeinheiten vorgenommen werden.

Für die Erstellung und Anwendung von Reliefgliederungsverfahren kann die Betrachtung der geomorphologischen Arbeitsweisen des Kartierers von größerer Hilfe sein. Unter geomorphologischen Gesichtspunkten nutzt der Kartierer - vereinfacht ausgedrückt - räumliche geomorphographische und geomorphometrische Grenzen zur Erfassung von Boden- und Substratwechseln. Dabei werden im Gelände vor allem dort Bodengrenzen gesucht und ausgewiesen, wo unterschiedliche Reliefformen aneinanderstoßen. Dies ist bspw. die Abgrenzung einer konvexen Oberhangsituation von einem gestreckten Hangbereich. Oder es wird eine schwache Hangdelle, Runse oder Trockental - als konvergierende Form - in einem sonst horizontal gestreckten Hang ausgegliedert. Eine konvergente Form kann aber auch vertikal nach oben und unten abgeschlossen sein, also eine Hangmulde darstellen. Unter dem geomorphographischen Begriff Hangdelle kann deshalb aus geomorphometrischer Sicht eine letztlich unendlich differenzierte Abgrenzung einer konvergenten Form verstanden werden. Eine genaue Beschreibung und Abgrenzung einer solchen Reliefform ist aber für viele Fragestellungen sehr wichtig. Für die Verbreitung von Bodentypen stellen diese "Relief-Grenzen" sehr häufig Bodengrenzen dar. Daher sollte ein Verfahren zur Differenzierung von Reliefeinheiten im Hinblick auf den Zusammenhang Boden - Relief räumliche Abgrenzungen aus einer lokalen - die engere Nachbarschaft betreffende - Reliefanalyse heraus vornehmen.

#### 6.3.2.1 Methodische Beschreibung

Für die Beschreibung und Abgrenzung der Reliefform ist zunächst die Krümmung der Oberfläche ausschlaggebend. Wie bei den vorgestellten Verfahren können auch die geomorphometrischen Reliefattribute Vertikalkrümmung und Querkrümmung herangezogen werden. Mit Einschränkung kann (vgl. Abschn. 4.3.1) ausgehend von GRIMM

et al. (1964), mit der Beschreibung zweier Wölbungsrichtungen die Form einer Oberfläche gekennzeichnet und abgegrenzt werden. Das Verfahren ermöglicht darüber hinaus die Einbindung weiterer geomorphometrischer Reliefattribute (z. B. Neigung). Die räumliche Auflösung der Reliefgliederung kann konstant bleiben. Es wird dabei keine einfache inhaltliche "Verschneidung" vorgenommen, die meist zu einer unüberschaubaren Anzahl von Flächen führt.

Grundgedanke des Verfahrens ist, daß zwei benachbarte Standorte, die sich in ihren geomorphometrischen Eigenschaften gleich oder sehr ähnlich sind, zu einer lokalen räumlichen Einheit zusammengeschlossen werden können. Dies entspricht im Grunde dem Ansatz statistischer, agglomerativer Verfahren, den sogenannten Clusterverfahren. Allgemein wird diese Zuordnungsmethode als "complete-linkage-Methode" bezeichnet (vgl. KUNDERT 1988:28). Wie oben beschrieben, sollen aber nur "Standorte" zusammengefaßt werden, die zum einen im multivariaten Raum (Reliefattribute) geringe Distanzen aufweisen, aber auch in der Datenmatrix "räumliche Nachbarn" sind. Bei Rasterdaten werden somit nur benachbarte Rasterzellen eines Raster-Grids mit einer sehr geringen Euklidischen Distanz im mehrdimensionalen Variablenraum (Reliefattribute) zu einer Flächeneinheit zusammengeführt. Die Verwendung der Euklidischen Distanz zeigt sich als sehr vorteilhaft, da hierdurch eine Möglichkeit der selektiven Gewichtung einzelner Variablen vorgenommen werden kann. Dies ist für die vorliegende Fragestellung notwendig, da die Verbreitung von Deckschichten und Böden in unterschiedlicher Abhängigkeit zu den einzelnen Reliefattributen steht.

Im Gegensatz zu gebräuchlichen Clusterverfahren werden räumlich zusammenhängende Klassen durch die Zusammenfassungen in der unmittelbaren Nachbarschaft gebildet. Einzelne räumliche Klassen sind sich dabei wiederum sehr ähnlich und können mit Hilfe eines anschließenden Verfahrensschrittes zu einer Gebietsklasse zusammengeführt werden.

Zunächst wird jede Rasterzelle als eigenständige Klasse betrachtet. Bei einem Rasterfeld von  $10 \times 5$  Rasterzellen sind so 50 Klassen vorhanden. Diese werden entsprechend von 1 bis 50 durchnummeriert (siehe Abb. 25). Jede Rasterzelle hat acht Nachbarn, an den Randgebieten des Grids entsprechend weniger. Zu jedem Paar benachbarter Rasterzellen  $(x, y)$  wird nun die Euklidische Distanz  $(d)$  der zugehörigen Variablenvektoren  $(x_1, \dots, x_n)$  und  $(y_1, \dots, y_n)$  berechnet ( $x_i$  bzw.  $y_i$  bezeichnet den Wert der  $i$ -ten Variable in  $x$  bzw.  $y$ ). Im Hinblick auf den Berechnungsaufwand kann auf die Ermittlung der Quadratwurzel verzichtet werden, da die Ergebnisse später ausschließlich bezüglich der Kleinerrelation verglichen werden und die Wurzelfunktion streng monoton wächst.

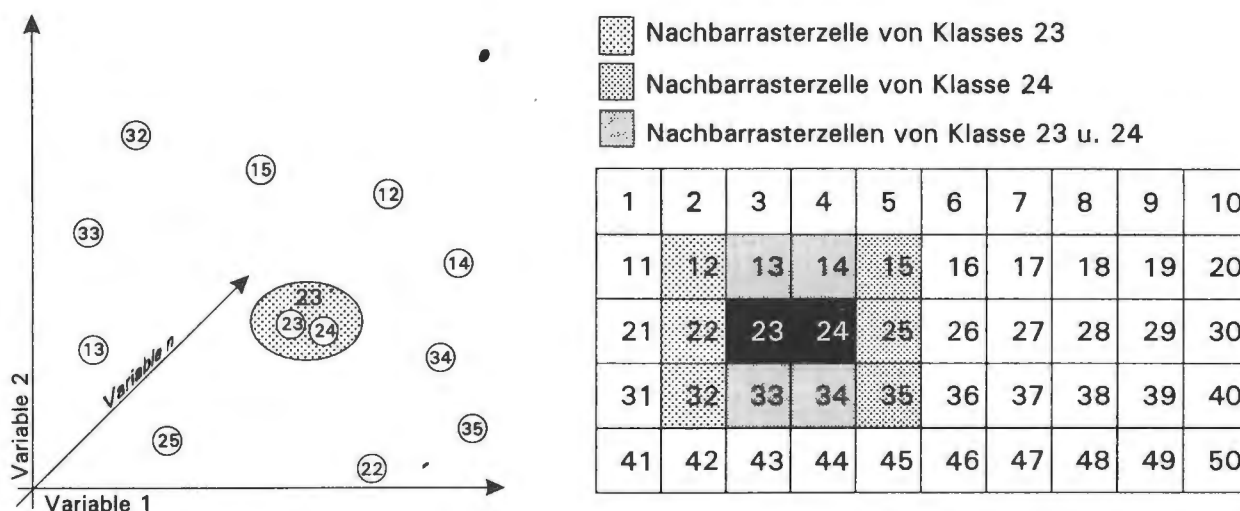


Abb. 25 Ableitung homogener räumlicher Einheiten mit Hilfe der Euklidischen Distanz und der complete-linkage-Methode

Somit ergibt sich für die Euklidische Distanz ( $d$ ):

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$$

Ausgehend von den berechneten Distanzen werden schrittweise die beiden benachbarten Rasterzellen vereinigt, welche die geringste Distanz innerhalb der gesamten Datenmatrix aufweisen. In einem Arbeitsgang wird nur eine Vereinigung vorgenommen. Durch die Zusammenfassung muß die "Nachbarschaft" neu definiert werden. Wie in Abbildung 25 dargestellt, werden z. B. Rasterzelle 23 und 24 aufgrund der geringsten Distanz zusammengefaßt. Die neue Klasse bekommt nun die Klassenzahl 23'. Die Klasse 24 entfällt als Klasseneinheit, wird aber als Untermenge von 23' weiter verwaltet. Um die neue Klasse in Bezug zur Nachbarschaft zu setzen, wird dann die **maximale Distanz** der einzelnen Rasterzellen der neu gebildeten Klasse 23' zu allen Nachbarn gesucht. Die Nachbarn sind nun die Klassen 12, 13, 14, 15, 22, 25, 32, 33, 34 und 35. Für die Nachbarn, die an Rasterzelle 23 und 24 grenzen, wird die jeweils größere Distanz eingetragen. Für die Nachbarn von 24, die nicht an 23 grenzen, muß dann die Euklidische Distanz berechnet werden (23 zu 15, 23 zu 25, 23 zu 35). Im Anschluß daran wird die größere Distanz eingetragen. Somit gilt:

$$d(23, 15) > d(24, 15) \rightarrow d(23', 15) = d(23, 15)$$

$$d(23, 15) < d(24, 15) \rightarrow d(23', 15) = d(24, 15)$$

Das gleiche Verfahren wird auch auf die restlichen Nachbarn der Rasterzelle 23 angewendet. Die Klasse 24 kann nun mit den Distanzangaben zu ihrer früheren Umgebung gelöscht werden.

Werden anschließend zwei Nachbarn vereinigt, die bereits jeweils aus mehreren Rasterzellen bestehen, so muß zur Bestimmung der neuen maximalen Distanz jede einzelne Rasterzelle einer Klasse mit allen Rasterzellen der Nachbarklasse verglichen werden, um die größte Distanz zu ermitteln. Die Verwendung der maximalen Distanz ist - im Gegensatz zur minimalen oder mittleren Distanz - für das Verfahren sehr wesentlich, da nur hierdurch gewährleistet ist, daß für den gesamten Flächenbereich homogene Einheiten ausgegrenzt werden. Bei der Nutzung der mittleren Distanz kommt es zu einem unerwünschten Anwachsen einzelner Klassen mit großer räumlicher Ausdehnung. Das liegt daran, daß zwei benachbarte Klassen mit mehreren Rasterzellen eine große maximale Distanz aufweisen können, bei der Betrachtung von Mittelwerten jedoch u. U. geringe Distanzen vorliegen.

Die Vereinigung von Klassen wird solange durchgeführt, bis eine vorgegebene Anzahl räumlicher Klassen erreicht ist. Hierbei hat sich ein Wert zwischen 2 % und 4 % der Anfangsklassen für die vorliegende Fragestellung bei einem Interpretationsmaßstab von 1 : 25 000 bewährt. Die Anzahl der räumlichen Klassen muß vor allem aber im Hinblick auf die erwünschte Differenzierung des Reliefs gewählt werden. Für die Bearbeitung kleinerer Maßstäbe muß daher die Ziel-Klassenanzahl herabgesetzt werden. Als weiteres steht die Klassenanzahl in Bezug zur Auflösung der verwendeten Rasterdaten. Mit steigender Auflösung muß ebenfalls die Klassenanzahl angepaßt werden.

Bei den Reliefattributen tauchen erfahrungsgemäß immer "Ausreißer" auf, die eine sehr große Distanz zu den gebildeten Klassen besitzen und nach Beendigung der Vereinigung als Klassen mit nur einer Rasterzelle vorliegen. Diese isolierten Rasterzellen werden daher zum Nachbarn mit der geringsten Distanz zugeschlagen (generalisiert). Die eliminierten Klassen werden in einer Datei zur Dokumentation abgelegt. Es können aber auch über eine Voreinstellung räumliche Klassen mit einer Rasterzellenanzahl  $< n$  generalisiert werden, was vor allem bei Bearbeitungsmaßstäben kleiner 1 : 25 000 sinnvoll ist.

Die räumliche Abgrenzung einzelner Flächenobjekte (räumliche Klassen) ist hiermit abgeschlossen. Die Flächenobjekte können nun als Grenzkarte ausgegeben werden. Dabei fehlt den Flächenobjekten allerdings ein inhaltlicher Bezug. Die gebildeten räumlichen Klassen müssen daher auf Grundlage der verwendeten geomorphometrischen Reliefattribute charakterisiert werden. Es erfolgt zunächst eine neue Durchnummerierung der Klassen. Für jede räumliche Klasse werden die zugehörigen Rasterzellen verwaltet. Unter Verwendung der klassenzugehörigen Rasterzellen erfolgt eine statistische Auswertung der Attribute.

Die Ergebnisse werden in einer Tabelle mit folgendem Inhalt abgelegt:

1. Klassenname (Nummer des Flächenobjektes)
2. Anz. der Rasterelemente
3. Variable 1 bis n (z. B. Vertikal- und Querkrümmung, Neigung) mit den Variablen Minimum, Maximum, Median, arithmetisches Mittel, Standardabweichung.

Als anschließender Verfahrensschritt werden die räumlichen Klassen zu Gebietsklassen zusammengefaßt. Einzelne voneinander getrennte räumliche Reliefeinheiten (Flächenobjekt  $\approx$  lokale Klasse), die in ihrer Ausprägung sehr ähnlich sind, werden für den gesamten Gebietsausschnitt zu einer Klasse (Gebietsklasse) vereinigt. Hierzu werden für die räumlichen Klassen die arithmetrischen Mittelwerte der einzelnen Variablen bestimmt. Sie stellen den repräsentativen Wert der Flächeneinheit. Mit Hilfe dieser kann nun eine weitere Aggregation vorgenommen werden.

Dies wird durch zwei Verfahren ermöglicht:

1. Eine Klassifizierung wird durch vorgegebene Klassenzentren (seeds) für die einzelnen Variablen (alle verwendeten Variablen oder Auswahl) vorgenommen. Die Zuweisung erfolgt für jede lokale Klasse durch die geringste Euklidische Distanz zu einem seed.
2. Die Erstellung der Gebietsklassen erfolgt durch ein nachgeschaltetes Clusterverfahren.

Beide Verfahren bieten, je nach Fragestellung, Vorteile für die Auswertung. Prinzipiell sind die Auswertungen aus der direkten Zuordnung sehr viel einfacher zu interpretieren, da die Klassenzentren als Vorgabe des Bearbeiters vorliegen. Bei der Verwendung von Standard-Klassenzentren können unterschiedliche Gebiete miteinander verglichen werden.

### 6.3.2.2 Datenvorbehandlung und Einstellungsparameter

Ein wesentliches Kriterium zum Einsatz von skalenabhängigen Distanzverfahren ist die Häufigkeitsverteilung der Daten. Für die geomorphographische Reliefanalyse kommt hinzu, daß bestimmten Skalenabschnitten eine größere Bedeutung zukommt. Die verwendeten Variablen (Reliefattribute) müssen daher bezüglich ihrer Skalenver-

teilung kritisch betrachtet werden. Wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben, erfolgt die iterative Klassenvereinigung durch die Vereinigung von Nachbarzellen mit der geringsten multivariaten Distanz. Dabei ist zu beachten, daß z. B. Querwölbungen eines Rückens mit 150 m Radius und eines divergenten Hangbereiches mit 600 m Radius unterschiedliche Reliefformen mit entsprechend differenten Deckschichtenausprägungen darstellen. Im Vergleich hierzu erscheint der Unterschied in einem weitgehend gestreckten Hang mit 5 000 m oder 10 000 m Radius gering. Dies wird insofern berücksichtigt, indem die Wölbungsradien in die Krümmung ( $k$ ) überführt werden ( $k = 1/\text{Wölbungsradius in m}$ ). Hierdurch wird zunächst erreicht, daß die extremen Unterschiede von stark konvexen und stark konkaven Formen, die in der Skala der Wölbungsradien sehr nah beieinanderliegen (- 100 m / + 100 m Radius), in Relation deutlich differenziert werden. Somit kann in erwünschter Weise das beschriebene Distanzproblem bereinigt werden. Nun liegen jedoch gestreckte Hangbereiche mit ihrem Wertespektrum nahe 0. Um aber auch diese in einzelne Reliefeinheiten gliedern zu können, ist eine Transformation der Krümmungsdaten durch eine Funktion notwendig. Damit wird erreicht, daß große Krümmungen einer relativen Stauchung unterzogen werden und damit eine Verkürzung der Distanzen eintritt. Im Gegensatz dazu sind kleine Krümmungen entsprechend relativ zu strecken. Dies kann sehr einfach mit einer vorgegebenen Transferkonstante ( $kt$ ) erreicht werden, die in der Skala für  $f(k)$  auf 0.5 (bzw. -0.5) abgebildet wird.

Dies wird mit folgender Funktion erreicht:

$$f(k) = \frac{k}{(|k| + kt)}$$

Hinsichtlich der Abgrenzung von Flächenobjekten, die eine geomorphographische Relevanz für die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes zeigen, muß die Wahl der Transferkonstante im Hinblick auf das betrachtete Relief gewählt werden. In einer Landschaft mit flachwelligen Riedeln und Verebnungsflächen sind z. B. wesentlich kleinere Oberflächenkrümmungen von Bedeutung als in den stark zerschnittenen Landschaften der zentralen Mittelgebirge.

Neben den Optimierungsmöglichkeiten durch die Variation der Transferkonstante bleibt trotzdem gewährleistet, daß innerhalb eines Betrachtungsraumes sehr unterschiedliche Reliefformen in sinnvoller Weise gegliedert werden können. Das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach eignet sich hier als Testgebiet in besonderer Weise, da das Relief sehr stark variiert.

Um die Wirkungsweise der Transferkonstante zu verdeutlichen, kann das Verfahren

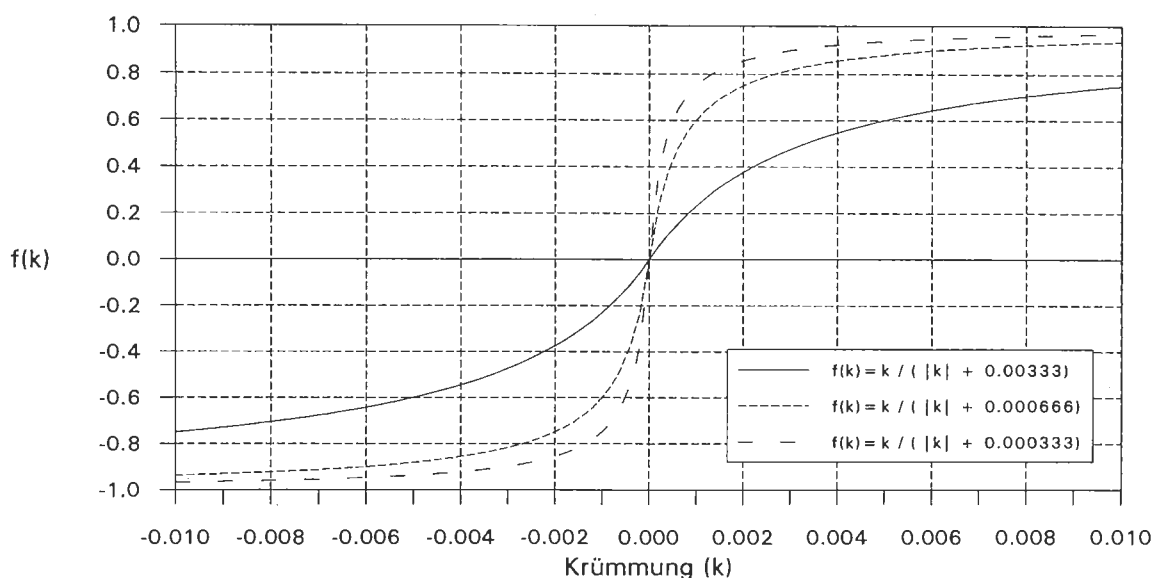


Abb. 26 Transferfunktion für Krümmungsdaten mit unterschiedlichen Konstanten für den Skalenwert 0.5

mit nur einer Variablen angewendet werden. Als Beispiel wird im folgenden die Querkrümmung eingesetzt. Für die Reliefformen im Hinblick auf die Gliederung des oberflächennahen Untergrundes sind im Kartiergebiet 1 (Zerschneidungsbereich der Weil, s. Kt. 17) relativ kleine Wölbungsradien zwischen etwa 200 m bis 600 m Querkwölbung entscheidend. Im Gegensatz hierzu sind Differenzierungen des Deckschichtenaufbaus im Kartiergebiet 2 (Kt. 18) vorwiegend an Wölbungsradien von 3000 m bis 10 000 m Wölbungsradius gebunden. Um diese beiden Reliefsituationen sinnvoll gliedern zu können, muß die Transferkonstante so gewählt werden, daß die Krümmung für diesen Bereich in Relation eine Gewichtung erfährt. In Abbildung 26 sind hierzu 3 Funktionen mit unterschiedlichen Transferkonstanten abgetragen. Die Krümmungen, die in der Praxis mit Werten zwischen -0.01 und 0.01 vorkommen (entspricht Wölbungsradien von -100 m bis +100 m), werden auf ein Skalenspektrum zwischen  $> -1$  und  $< 1$  umgesetzt. Der Skalenwert 0.5 (-0.5) entspricht dabei der Transferkonstante. Die Funktionsverläufe zeigen die unterschiedliche Intensität der Datenmanipulation in Abhängigkeit zur Transferkonstante auf.

In den Abbildungen A19a bis A19c sind die Ergebnisse der Reliefgliederung unter Verwendung der unterschiedlichen Transferkonstanten aufgezeigt. Die Darstellung beschränkt sich auf die Abbildung der ermittelten homogenen Formelemente durch Grenzlinien. Diese Formelemente sind entsprechend der Ähnlichkeit benachbarter Flächen mit unterschiedlichen Liniensignaturen begrenzt. Die Bearbeitung erfolgte einheitlich mit einer Generalisierung von 98.7 %, wodurch das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach in ca. 1200 Flächenobjekte gegliedert wird (Startklassen 91204).

In der Abbildung A19a ist dabei zu erkennen, daß die zerschnittenen Bereiche entlang des Weiltals (SW des Arbeitsgebietes) sehr stark gegliedert werden, während für die ebeneren Gebiete mit minimalen Formunterschieden eine relativ geringe Gliederung in Flächenobjekte vorliegt. Mit einer Transferkonstante von 0.0033 werden somit die Distanzen im Bereich kleiner Krümmungen ungenügend gestreckt, um eine durchgehend aussagekräftige Reliefgliederung zu erreichen. Im Gegensatz hierzu wird durch das Einsetzen einer Transferkonstanten von 0.00033 der Bereich mit großen Krümmungswerten so stark gestaucht, daß nur noch die wesentlichsten Formunterschiede abgegrenzt werden. Innerhalb der Gebiete mit geringen Reliefunterschieden wird aber eine intensive Gliederung erreicht. Mit der Transferkonstante von 0.00066 hingegen wird eine ausgeglichene Reliefgliederung im Hinblick auf die Querkrümmung für das gesamte Arbeitsgebiet erzielt. Hiermit werden (mit Einschränkung der hier nur verwendeten Querkrümmung) Flächeneinheiten ausgegliedert, die eine deutliche Affinität zu den Kartiererergebnissen in Teilgebiet 1 sowie 2 besitzen.

Damit werden die Krümmungen oberhalb und unterhalb eines Wölbungsradius von 1500 m für das Distanzverfahren verändert. Dieser Wert stellt in etwa den Mittelwert der eingangs erwähnten wesentlichen Spanne von 100 m bis 3000 m Wölbungsradius. Versuche mit Daten aus verschiedenen Mittelgebirgsregionen ergaben als parallelen Vergleich zufriedenstellende Ergebnisse mit Transferkonstanten zwischen 0.001 und 0.00066 (entspr. Wölbungsradien von 1000 m bis 1500 m). Das Verfahren läßt sich somit im Mittelgebirgsrelief mit einer Standardeinstellung von 0.00074 (1350 m Wölbungsradius) zufriedenstellend anwenden, kann mit einer Anpassung aber auch für extrem flache Reliefverhältnisse eingesetzt werden.

Neben der Datentransformation für die Optimierung der Distanzgruppierung muß der Generalisierungsgrad der Auswertung festgelegt werden. Damit wird bewirkt, in welcher Intensität Reliefeinheiten nach Beendigung der Auswertung differenziert werden. Die Methode behandelt zu Beginn jede Rasterzelle als eigenständiges Flächenobjekt. Es folgt eine sukzessive Zusammenfassung von benachbarten Flächenobjekten, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist, das durch den Grad der gewünschten Generalisierung bestimmt wird. Am Beispiel des Arbeitsgebietes Grävenwiesbach liegen 91204 Rasterzellen als Flächenobjekte zu Beginn der Auswertung vor. Mit einer Generalisierung um 97.3 % wird bei 2463 Flächenobjekten die Gruppierung abgebrochen. Die oben beschriebene Relevanz der Datentransformation ist im Hinblick auf die Generalisierung sehr wichtig, um eine ausgewogene Reliefgliederung zu erreichen.

Als Beispiel liegen mit den Abbildungen A20a bis A20c drei unterschiedlich stark generalisierte Zustände einer Auswertung bei sonst gleichen Rahmenbedingungen vor.



Als Eingangsvariable ist wiederum die Querkrümmung eingesetzt, die mit einer Transferkonstante von 0.00074 manipuliert wurde. Die Abbruchkriterien sind hierbei mit 97.3 %, 98.4 % und 99.5 % vorgegeben. Auf Grundlage der Gesamttrasteranzahl liegen bei den drei Auswertungen nach dem Abbruch ca. 2500, 1500 und 500 Flächenobjekte vor.

In Abbildung A20a ist zu erkennen, daß die Differenzierung von Reliefeinheiten weit über das Maß der kartierten Flächeneinheiten hinausreicht. Im Hinblick auf die Kartierung im Maßstab 1 : 25 000 erschwert die starke Differenzierung des Reliefs, das Erkennen wesentlicher Reliefgrenzen. Im Gegensatz dazu wird bei einer Generalisierung von 99.5 % (Abb. A20c) eine übersichtliche Gliederung erzielt. Überträgt man diesen Generalisierungsgrad auf einen Blattschnitt der TK 25, so entspricht die Anzahl von ca. 2000 Flächenobjekten etwa der Flächenanzahl einer gut differenzierten Bodenkarte. Als Kartierungsunterstützung hingegen ist die Reliefgliederung als zu generalisiert zu werten. Vor allem in stark gegliedertem Gelände sollten alle erkennbaren Veränderungen im Relief erfaßt sein, wenn auch ein Großteil der aufgezeigten Grenzen keine oder eine kartiertechnisch nicht erfaßbare Relevanz bezüglich des oberflächennahen Untergrundes besitzen. Damit liegt, wie in Abbildung A20b dargestellt, eine ausgewogene Differenzierung bei 98.4 % Generalisierung vor.

Neben einer allgemeinen Abgrenzung von Flächeneinheiten kann die Beziehung von benachbarten Flächen (Ähnlichkeit der Reliefsituation) durch eine Liniensignatur dargestellt werden, wie es bei den oben besprochenen Beispielen vorgenommen wurde. Die Liniensignatur wird dabei durch die Distanzgröße der benachbarten Flächenobjekte bestimmt. Als Koordinate im Variablenraum dient das arithmetische Mittel, bezogen auf die Rasterzellen eines Flächenobjektes. Gestrichelte Linien zeigen eine geringe Distanz auf, die Reliefeinheiten sind somit relativ ähnlich. Dünne Linien stehen für eine mittlere Distanz, während dicke Linien eine große Distanz symbolisieren und somit sehr unterschiedliche, benachbarte Reliefeinheiten abgrenzen. Als Abgrenzungskriterium dieser drei Klassen ergibt die mittlere Distanz aller Nachbarschaftsbeziehungen  $\pm$  der halben Standardabweichung gute Ergebnisse. Damit wird i. d. R. eine ausgewogene Dreiteilung der Klassenzuweisung erreicht. Die Abgrenzungskriterien werden für jede Auswertung bestimmt, da je nach Datenvorbehandlung und Gewichtung unterschiedliche Distanzen auftreten.

Die dargestellten Nachbarschaftsbeziehungen stützen sich auf die vorbehandelten Daten. Die Verwendung von standardisierten Daten würde hier eine Differenzierung der Abgrenzung zur Folge haben, die stark reliefierte Bereiche grundsätzlich mit großer und Bereiche mit geringen Reliefunterschieden mit geringer Distanz ausweist. Mit

dem vorliegenden Ansatz wird hingegen erreicht, daß die Nachbarschaftsbeziehung in Relation zum Relief der Umgebung dargestellt wird. Das bedeutet, daß auch in Lokaltäten mit relativ geringen Reliefunterschieden Grenzlinien von Nachbarflächen mit großer Nachbarschaftsdistanz klassifiziert werden, wenn z. B. eine deutlich konvergente Form neben einer divergenten Form vorkommt.

Entgegen einer systematischen Reliefgliederung wird diese Vorgehensweise bevorzugt, da bei der bodenkundlichen oder quartärgeologischen Kartierung größerer Flächenbereiche eine lokal angepaßte relative Differenzierung der Geomorphologie nötig ist, um Unterschiede in der Ausprägung quartärer Deckschichten zu erfassen. Als Beispiel können hier die lößlehmreichen Deckschichten in Kartiergebiet 2 (Karte 18) herangezogen werden. Bei sehr geringen Reliefunterschieden sind diese größtenteils auf schwach konvergente Hangdellen beschränkt, während die gestreckten bis schwach divergenten Hangbereiche nur skeletthaltige Decklagen mit geringem Lößlehmanteil tragen.

Die Nachbarschaftsbeziehungen bleiben bei zunehmender Generalisierung nicht konstant, sondern werden durch die fortschreitende Vereinigung von Flächenobjekten verändert. Bei relativ geringer Generalisierung werden Übergangsbereiche, wie z. B. ein gestreckter bis schwach konvexer Hangabschnitt zwischen einer konvexen und einer konkaven Form, als separate Flächenobjekte ausgegliedert. Durch eine solche Übergangsform sind die jeweilig benachbarten Flächen relativ "ähnlich". Mit zunehmender Generalisierung erfolgt die Vereinigung im vorliegenden Beispiel mit der benachbarten konvexen Fläche. Die dann benachbarten Formobjekte sind hinsichtlich ihrer Formgestalt relativ unterschiedlich und werden entsprechend klassifiziert.

Während bei einer geringen Generalisierung die Distanzbeziehung zu allen Nachbarn sehr unterschiedlich ist, nimmt mit zunehmender Gruppierung im Durchschnitt die Anzahl der Nachbarn je Flächenobjekt ab, und es werden größere Formgegensätze gegeneinander abgegrenzt. Am Beispiel der Auswertungen in den Abbildungen A20a bis A20c kann verfolgt werden, daß mit der größten Generalisierung großflächige Flächenobjekte mit deutlichen Formunterschieden vorliegen. Diese sind daher mit einer stärkeren Liniensignatur hinsichtlich der geringen Ähnlichkeit der Formen abgegrenzt.

Bei den bisher vorgestellten Gruppierungen war das Ziel, homogene Reliefbereiche unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einstellungsmöglichkeiten gegeneinander abzugrenzen. Damit liegen Flächenobjekte vor, die im einzelnen mit statistischen Kennwerten belegt sind. Eine hochauflösende geomorphographische Interpretation ist somit möglich. Für die praktikable Auswertung der Ergebnisse sowie zur Erstellung

einer geomorphographischen Karte müssen die räumlichen Klassen jedoch zu einer überschaubaren Anzahl von Gruppen zusammengefaßt werden. Diese Aggregation hat dabei vorwiegend den Zweck einer schnellen Übersicht, da die Abgrenzung der ursprünglich ermittelten Flächenobjekte erhalten bleibt. Hierzu sind zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt worden.

Als konsequente Fortführung des Verfahrens kann auf Grundlage der Mittelwerte (verwendete Variablen) der einzelnen Flächenobjekte eine Clusteranalyse durchgeführt werden, die eine definierte Anzahl von Gruppen bildet. Damit bezieht sich eine Klassifizierung nur auf den betrachteten Ausschnitt. Eine blattübergreifende Bearbeitung kann nicht vorgenommen werden. Zudem muß, wie bei der beschriebenen Clusteranalyse in Abschnitt 6.3.1, die Gruppierung zunächst interpretiert werden, um die Gesamtergebnisse der Reliefanalyse zu deuten. Ein Beispiel hierzu wird im Rahmen der multivariaten Anwendung vorgestellt (Abschn. 6.3.2.3)

Als Alternative hierzu können die Mittelwerte der Flächenobjekte einer einfachen Klassifizierung unterzogen werden. Hierzu kann man sich Wölbungs- und Neigungsklassen bedienen, wie sie mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung, 4. Aufl., vorliegen. Als Beispiel wurden die ausgegliederten homogenen Flächenobjekte nach Querswölbungsradien klassifiziert (Karte 14). Benachbarte Flächenobjekte können dabei die gleiche Klasse belegen. Die ursprünglichen Reliefelemente bleiben jedoch erhalten und werden durch die Grenzlinien aufgezeigt. Für den nordöstlichen Bereich des Arbeitsgebietes Grävenwiesbach wird so, trotz weitgehend horizontal gestreckter Hangformen, eine Differenzierung der Reliefeinheiten ermöglicht. Der Anwender kann hier durch die abgebildeten Höhenlinien im einzelnen sehr schnell erfassen, ob z. B. divergente und konvergente Formen aneinandergrenzen. Mit dieser Darstellungsart wird eine detaillierte Reliefgliederung in der Übersicht gut lesbar. Die Akzeptanz dieser übersichtlichen Sekundärklassifizierung ist bei Anwendern sehr hoch, da sich diese an traditionellen Klassifizierungsverfahren orientiert. Soll die Reliefgliederung im Rahmen einer weiterführenden Reliefanalyse Verwendung finden, so kann auf die flächenobjektbezogenen Daten zurückgegriffen werden.

### **6.3.2.3 Anwendung des Verfahrens mit multivariaten Daten**

Die oben ausgeführten Möglichkeiten zur Parametrisierung des Verfahrens wurden detailliert am Beispiel einer Variablen (Reliefattribut Querkrümmung) dargelegt. Die Datenverteilung der einzelnen Variablen und der Einfluß der Einstellungsparameter auf die Ergebnisse müssen zunächst bekannt sein, um beim multivariaten Verfahrensab-

lauf sinnvolle Ergebnisse erzielen zu können. Die Interpretation der Ergebnisse und vor allem deren Plausibilitätsprüfung werden mit jeder zusätzlichen Variablen erschwert. Um die Ergebnisse möglichst transparent zu gestalten, ist daher die Anzahl der Variablen gering zu halten.

Zunächst soll eine Reliefformengliederung mit Hilfe der Quer- und Vertikalkrümmung vorgenommen werden. Für die Querkrümmung ergab sich dabei eine sinnvolle Einstellung mit einer Generalisierung von 98.5 % und einer Transferkonstante von 0.00066. In Kapitel 5 wurde dargestellt, daß die Datenverteilung der Vertikalkrümmung große Ähnlichkeit mit der Häufigkeitsverteilung der Querkrümmung aufweist. Bei der isolierten Betrachtung der Vertikalkrümmung ergibt sich daher eine ähnlich gute Formendifferenzierung für das Arbeitsgebiet wie bei der Auswertung der Querkrümmung. Mit der Karte 15 werden die Ergebnisse einer Reliefformenanalyse vorgestellt, die mit identischen Einstellungen für die beiden Krümmungsvarianten gerechnet wurde. Die Zusammenfassung der Flächenobjekte ist hier durch eine Klassifizierung der Wölbungsradien erfolgt. Die primäre Klassifizierung der Formelementflächen ist mit den Grenzlinien zusätzlich dargestellt. Mit dieser kombinierten Darstellung erhält der Kartierer aufgrund der geläufigen Klassifizierung der Wölbungsradien im Sinne von RICHTER (1962) einen schnellen Überblick. Zusätzlich bleibt jedoch die Detailinformation der abgegrenzten Flächeneinheiten erhalten. Dadurch werden auch Bereiche differenziert, die aufgrund der Wölbungsklassifizierung in einer Gruppierung dargestellt werden.

Mit einer konsistenten Betrachtung der Oberflächenform durch die Gleichgewichtung der Quer- und Vertikalkrümmung wird eine objektivierbare Formengliederung vorgenommen. Die Ergebnisse sind aus geomorphographischer Sicht überzeugend. Im Gegensatz zum Verfahrensansatz nach KUGLER (1974) und DIKAU (1988) sind hiermit homogene Formelemente differenziert, die in ihrer lokalen Abgrenzung immer nachvollziehbar sind. Für die lokale Betrachtung ist dabei weniger die sekundäre Klassifikation nach Wölbungsradien wesentlich, die hier nur eine übersichtliche Gliederung repräsentiert.

Hinsichtlich der Nutzung einer geomorphographischen Reliefgliederung zur Ableitung von Flächeneinheiten, die eine Relevanz für die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes zeigen, kann dieses Ergebnis allerdings nur bedingt überzeugen. Bei der Auswertung für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg wurde schon deutlich, daß die Verbreitung der unterschiedlichen Deckschichtenkonstellationen vorwiegend einen Bezug zur Querkrümmung aufzeigen. Dies trifft auch für die Kartiergebiete 1 und 2 im Arbeitsgebiet Grävenwiesbach zu. Vertikal-konvexe Hangformen spielen z. B. nur dann

eine Rolle, wenn diese extrem ausgebildet sind, also relativ große Krümmungen aufweisen. In der vorliegenden Auswertung sind jedoch die Hänge vertikal stark gegliedert. Diese Gliederung kann in der räumlichen Verbreitung der periglazialen Deckschichten nicht nachvollzogen werden. Aus diesem Grund muß für diese angewandte geomorphographische Reliefgliederung von der objektiven Formenbeschreibung mit einer Gleichstellung von Quer- und Vertikalkrümmung abgewichen werden.

Um der Bedeutung der horizontalen Hanggliederung für die Ausprägung periglazialer Deckschichten gerecht zu werden, wird die Querkrümmung einer relativen Gewichtung unterzogen. Dies wird dadurch erreicht, daß die Vertikalkrümmung mit der Gewichtungskonstante  $< 1$  in der oben beschriebenen Transferfunktion berücksichtigt wird. Für die Arbeitsgebiete hat sich eine Gewichtung mit 0.4 als sinnvolles Verhältnis erwiesen. Hiermit werden im Hangbereich nur noch deutliche Stufen und stark konvexe Oberhanglagen berücksichtigt. Um vor allem vertikal stark gekrümmte Formen zu gewichten, wurde zusätzlich die Transferkonstante auf 0.001 gesetzt.

Neben der Abgrenzung unterschiedlicher Hangformen stellt die Neigung eine weitere wichtige Größe dar. Sieht man diese isoliert, so kann kein kausaler Zusammenhang zwischen Neigung und Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes festgestellt werden (vgl. Kap. 5). In Verbindung mit der Hangform stellt sie jedoch eine wichtige zusätzliche Größe dar. So kann z. B. eine vertikal gestreckte Form eine Ebene oder ein steiler Hangbereich sein. Aber auch gekrümmte Formen sind entsprechend ihrer mittleren Neigung zu unterscheiden.

Hiervon ausgehend liegt es nah, die Neigung als dritte Variable für die Reliefgliederung hinzuzunehmen. Auch hier zeigt sich, wie bei der Krümmung, daß bestimmten Skalenabschnitten bei einer linearen Verwendung der Neigungsdaten für die geomorphographische Reliefgliederung eine größere Bedeutung zukommt. In Gebieten mit geringer Neigung sind i. d. R. auch die Neigungsunterschiede gering, während bei hoher Reliefenergie in Relation große Neigungswechsel häufig vorkommen. Im Hinblick auf eine möglichst gute Abgrenzung lokaler Formen ist es daher sinnvoll, die Distanzen im Bereich geringer Neigung zu vergrößern. Zunächst wird ein Skalenbereich benötigt, der im Verhältnis zu den Krümmungsdaten steht. Dazu bietet sich die Verwendung der Steigung an. Diese Tangensfunktion wirkt jedoch den Überlegungen entgegen, wie in Abbildung 27 zu erkennen ist.

Um geringe Neigungen stärker zu gewichten, kann mit der Transformationsfunktion gearbeitet werden, wie sie auch bei der Krümmung Verwendung findet. In Abbildung 27 sind hierzu drei Funktionen mit unterschiedlichen Konstanten abgebildet. Wie in

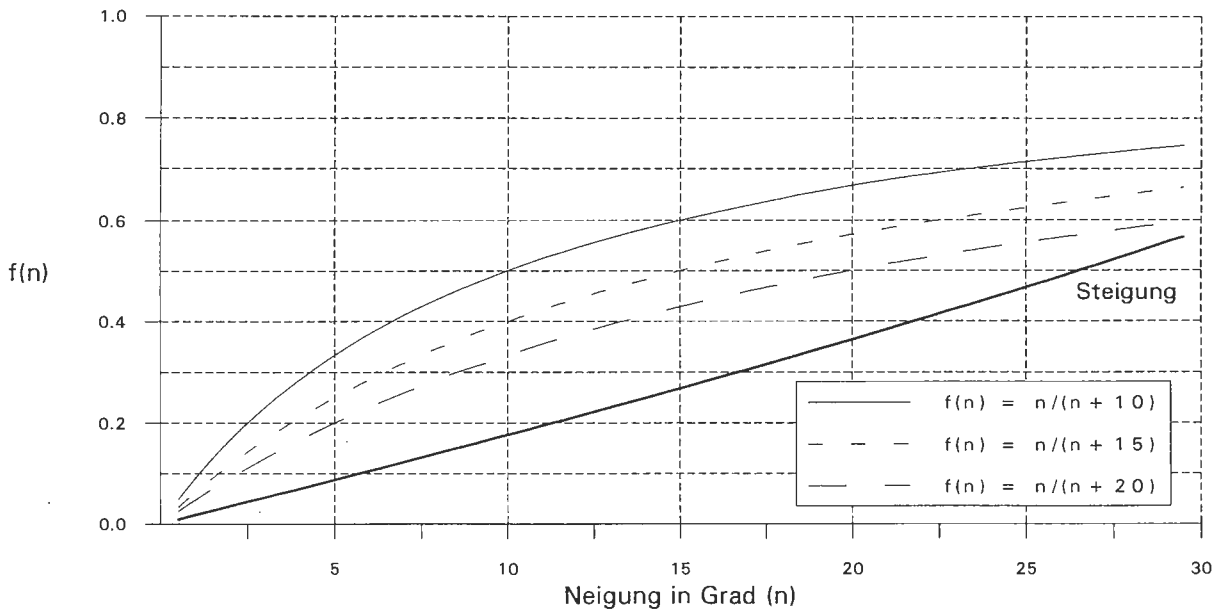


Abb. 27 Funktion zur Transformation der Neigung

der Abbildung zu ersehen ist, wird erst bei einer Konstanten von 20 eine deutlich größere Steigung der Kurve im Bereich geringerer Neigungen erreicht.

Als günstige Gewichtung der Neigung ergab sich ein Wert von 0.6 in Bezug zur Querkrümmung von 1. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß die Krümmungsdaten zwischen -1 und 1 verteilt sind, was eine reale Gewichtung der Neigung von 0.3 ergibt.

Mit dieser gewichteten Einbindung kann erreicht werden, daß vor allem die flacheren Gebiete einer etwas stärkeren räumlichen Differenzierung unterzogen werden. Dies wird vor allem im nordöstlichen Viertel des Arbeitsgebietes deutlich (vgl. Kt. 16). Die vertikale Gliederung wird insgesamt verstärkt, wenn eine deutliche Hangstufe ausgeprägt ist. Dies geschieht jedoch ohne eine Einschränkung der Abgrenzung horizontaler Formen, wie dies bei größerer Gewichtung der Vertikalkrümmung der Fall ist.

Mit der Verwendung von drei Variablen ist die Darstellung einer sekundären Klassifizierung schon eingeschränkt. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu erhalten, bietet sich eine Gruppierung der "räumlichen Klassen" nach nur zwei Variablen an. Gut geeignet sind hierzu die Querkrümmung und die Neigung. In Karte 16 sind die Ergebnisse der Reliefgliederung unter Verwendung der Variablen Quer-, Vertikalkrümmung und Neigung dargestellt. Mit der Klassifizierung der Neigung statt der Vertikalwölbung wird eine bessere Übersicht erreicht, da die Bereiche hoher Reliefenergie durch die Verwendung intensiver Farben herausgehoben werden können.

Die vorgenommene Auswertung wurde nach geomorphographischen Gesichtspunkten im Hinblick auf die Differenzierung von bodenkundlich und quartärgeologisch relevanten Flächeneinheiten vorgenommen. Mit der Gewichtung und Parametrisierung der verwendeten Variablen wurde dabei gezielt Einfluß auf die Reliefgliederung genommen, um im Hinblick auf die räumliche Verbreitung und Ausprägung von Deckschichten relevante Flächenbereiche ausgliedern zu können. Dabei wurde keine direkte Optimierung der Einstellungen bezüglich der Kartierergebnisse angestrebt. Ein Vergleich zur Reliefgliederung zeigt dabei auch, daß z. T. nur eine bedingte Übereinstimmung von geomorphographischen Einheiten zu kartierten Deckschichteneinheiten vorliegt. Grundsätzlich wird deutlich, daß für Bereiche hoher Reliefenergie eine deutlich bessere Korrelation auftritt als in schwach geneigten Gebieten. Eine Bewertung der Ergebnisse der geomorphographischen Reliefgliederung erfolgt im Vergleich der unterschiedlichen Verfahren in Abschnitt 6.5.

Als weiteres Gruppierungsverfahren zur Aggregation von "räumlichen Klassen" zu Gebietseinheiten kann auch ein Clusterverfahren eingesetzt werden. Als Beispiel einer Aggregation wurden die Mittelwerte der "räumlichen Klassen" getrennt nach Reliefattributen (Variablen) anstatt der originären Rasterdaten (vgl. Abschn. 6.3.1) verwendet. Mit diesem Ansatz wird erreicht, daß gemäß der Gebietsverhältnisse eine optimierte Klassenverteilung erstellt werden kann. Die Cluster werden aus der Distanzverteilung gebildet, wodurch eine objektive Klassifizierung vorliegt. Wie beim Verfahrensansatz in Abschnitt 6.3.1 werden auch hier in sinnvoller Weise Hohl-, Voll- sowie gestreckte Formen ausgegliedert. Da jedoch die Mittelwerte der zuvor bestimmten homogenen räumlichen Reliefeinheiten Verwendung finden, ist bei diesem Verfahrensansatz eine geomorphographisch sinnvolle Abgrenzung der Flächeneinheiten gewährleistet. In Tabelle A6 sind die Distanzbeziehungen und Häufigkeiten der Cluster einer Auswertung für das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach dokumentiert.

Die Trennung der Gebietsklassen ist bei dieser Verfahrensweise im Gegensatz zur starren Klassifizierung statistisch abgesichert. Die Interpretation der Klassifizierung erfordert jedoch eine intensive Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der Clusteranalyse. Im Hinblick auf die Nutzung der Karten als geomorphographische "Informationsschicht" für die bodenkundliche und geologische Landesaufnahme wird daher die Auswertung unnötig erschwert und die Akzeptanz herabgesetzt. Für eine schnelle Erfassung der Reliefeinheiten genügt eine starre Klassifizierung. Die Detailergebnisse räumlich getrennter Einheiten sind bei beiden Ansätzen identisch und werden durch die Grenzlinien der lokalen Reliefeinheiten repräsentiert.

Für wissenschaftliche Fragestellungen in der Geomorphologie kann der statistische

Ansatz jedoch eine breite Anwendung finden. Hierzu können gezielt Agglomerationsverfahren eingesetzt werden, die im Hinblick auf eine Reliefhierarchisierung Einheiten zusammenfassen. Eine Hierarchisierung kann dabei systematisch aufgebaut und unabhängig von Schwellenwerten statistisch abgesichert werden.

Zusammenfassend betrachtet kann das vorliegende Verfahren die in Kapitel 6 gestellte Anforderung nach einer Abgrenzung von homogenen Reliefbereichen in zufriedenstellender Weise erfüllen. Für die Ausgliederung von Reliefeinheiten können beliebige Reliefparameter herangezogen und in unterschiedlicher Gewichtung zueinander verwendet werden. Damit ist sowohl eine objektive Formgliederung als auch eine für die Deckschichtenverbreitung angepaßte Reliefgliederung möglich.

Die Abgrenzung der lokalen Reliefeinheiten ist an die Reliefsituation angepaßt, ohne daß eine blattschnittübergreifende Auswertung eingeschränkt wird. Je nach betrachtetem Maßstab kann die Generalisierung der Reliefgliederung gesteuert werden. Die ausgegliederten lokalen Reliefeinheiten liegen als Flächenobjekte mit den ermittelten Attributen vor und können für weiterführende DV-gestützte Anwendungen verwendet werden.

Die Flexibilität des Verfahrens ermöglicht dabei nicht nur eine angepaßte Parametrisierung zur Optimierung der Ergebnisse für den betrachteten Landschaftsraum. Es kann vielmehr für viele Bereiche der geomorphographischen Reliefanalyse eingesetzt werden.

#### **6.4 Relative Massenbilanz der solifluidalen Hangüberformung**

In den vorhergehenden Kapiteln wurden Verfahren vorgestellt, die analog zur Kartierung und Darstellung von Deckschichten- und Bodeneinheiten eine Reliefgliederung mit flächenhaften, geomorphographischen Einheiten zum Ziel hatten. Die reale räumliche Ausprägung der Deckschichten und Bodenformen ist jedoch kleinräumig sehr stark schwankend. Bei großmaßstäbigen Kartierungen muß auch die Betrachtung des Reliefs differenzierter vorgenommen werden. Einen Ansatz zur Reliefbeschreibung unter Berücksichtigung verschiedener Parameter bieten Indizes. Im folgenden soll hierzu ein Verfahrensansatz vorgestellt werden.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 haben gezeigt, daß die Formgestalt der Reliefoberfläche ein wesentlicher Faktor für die Verteilung von Deckschichten ist. Dabei zeigt sich z. B. mit zunehmender Divergenz und Konvexität eine Ausbildung von geringmächtigen,



skelettreichen Deckschichten. In konvergent/konkaven Formen sind hingegen meist mehrschichtige, feinbodenreiche Deckschichten ausgeprägt. Im Gegensatz zu den deutlichen Unterschieden bei diesen ungleich gewölbten Hangbereichen kann bei gestreckten Hängen, auch bei sehr differenten Neigungen, meist nur ein geringer Unterschied in der Ausprägung der Deckschichten festgestellt werden. Für die Transportprozesse der periglazialen, solifluidalen Hangsedimente ist somit die Hangform von entscheidender Bedeutung.

Neben der geomorphographischen Reliefgliederung zur Ausgrenzung deckschichtenrelevanter Flächeneinheiten können auch Verfahren eingesetzt werden, die einfache aber maßgebliche Prozeßzusammenhänge berücksichtigen. Prozeßmodelle zur solifluidalen Hangüberprägung liegen z. Zt. nicht vor. Jedoch kann auf einfache Ansätze aus dem Bereich der Hangentwicklung zurückgegriffen werden (ROHDENBURG et al. 1976; ROHDENBURG 1989).

ROHDENBURG, wie auch YOUNG (1963) und AHNERT (1973), experimentieren dabei mit vertikalen Profilschnitten an einfachen Hangformen und unter weitreichender Abstraktion der Einflußgrößen. Bei der Simulation wird jedoch nicht berücksichtigt, daß sehr unterschiedliche Prozesse (Abspülung, Solifluktion und Gravitation) in Abfolge oder gleichzeitig und in zeitlich unterschiedlichen Intensitäten, für die Hangformung verantwortlich sind. BIBUS et al. (1976) zeigen hierzu auf, daß die solifluidale Hangüberprägung gegenüber der Abspülung einen sehr geringen Anteil an der eigentlichen Reliefformung in rezenten Periglazialgebieten einnimmt. Die Übertragung der oben erwähnten abstrakten Ansätze in ein 4-dimensionales Raum-Zeit-Modell ist somit mit Vorsicht zu betrachten.

Schränkt man die Betrachtung jedoch auf die solifluidale Überprägung der Hangbereiche ein, so lassen sich durch einfache Ansätze relative Aussagen insbesondere über die Sedimentmächtigkeiten solifluidal entstandener Deckschichten machen. Im folgenden wird versucht, ein Modell in eine DV-gestützte Reliefauswertungsmethode zu überführen.

Die unter Periglazialklima abgelaufenen Prozesse der Solifluktion führen zu einer Differenzierung der Schichtausprägung, insbesondere aufgrund lokal variierender Hangformen. Betrachtet man zunächst einen ebenen Standort (z. B. ebener Scheitelbereich), so ist auch hier ein Sediment entwickelt, das durch kryogene und solimixtive Prozesse (unter Einmischung äolischer Komponenten) in situ entstanden ist.

Folgt man hinsichtlich des Massentransportes den allgemeinen Beschreibungen von

ROHDENBURG (1989:20ff.), so ist ein Standort in einem gestreckten Hang ebenso als ausgeglichen anzusehen. Mit steigender Hangneigung nimmt die "Transportgeschwindigkeit" zu, die Abtragung geht jedoch gegen 0, da der Materialversatz in Hangrichtung dem Materialantransport entspricht. Die "Transportgeschwindigkeit" ist hierbei im Rahmen des solifluidalen Transportes zu verstehen.

Dieser abstrakte Ansatz entspricht in wesentlichen Teilen den oben beschriebenen Erfahrungen mit Deckschichtenausprägungen in gestreckten Hangbereichen. Liegt ein vertikal konvexer Hangabschnitt vor, so kann dieser als Bereich kontinuierlich steigender Neigung in Abflußrichtung betrachtet werden. Parallel dazu wächst auch das Verhältnis des Materialtransportes zum Antransport. Die damit verbundene "relative Massenbilanz" ist daher negativ. Da die Gelifluktion als "gebundener" Transport zu verstehen ist, führt dies zu einem "Ausdünnen" der Deckschichten. In konkaven Hangformen liegt demzufolge eine positive Massenbilanz vor, da der Antransport den Abtransport überwiegt, und es zu einem "Aufstauen" des Materials kommt.

Dies trifft jedoch nur dort zu, wo Solifluktionsprozesse unter Periglazialklima vorliegen. Im tiefenliniennahen, stark konvergenten Bereich haben Abspülungsprozesse das Material z. T. ausgeräumt, wodurch der vorliegende Ansatz auf die Betrachtung von Hangbereichen beschränkt werden muß. In stark eingeschnittenen Tälern mit steilen Hängen ist zudem auch der Hangbereich betroffen, da z. T. auch gravitative Massenbewegungen an der Hangformung beteiligt waren.

In Abbildung 28 sind schematisch ein Vertikalprofil und eine Horizontalaufsicht dargestellt. Die Pfeile in der Horizontalaufsicht zeigen die Expositionsrichtung, die Größe der Pfeile steht für die Neigung. Die exemplarisch gekennzeichneten Bereiche mit negativer, ausgeglichener und positiver solifluidaler Massenbilanz müssen für die Horizontale und Vertikale einer gekoppelten Betrachtung unterzogen werden, da der solifluidale Materialtransport von der Oberflächenform und somit von beiden Krümmungstendenzen beeinflusst wird.

Die Intensität des Massentransportes wird durch die Stärke der Neigung bestimmt. Liegt z. B. eine konvexe Form vor, so bestimmt die Neigungsstärke die Größe der "negativen Massenbilanz". Betrachtet man einen Hangrücken, so weist der zentrale Bereich geringere Neigungen als der Schulterbereich auf (vgl. Abb. 28). Der Übergang vom Rücken zum Hang mit divergenter, vertikal konvexer Form zeichnet sich somit durch eine deutliche "negative Massenbilanz" aus.

Während die Mittellage und Basislage in stark divergenten bzw. konvexen Hangsitua-

tionen meist fehlen, weist die Decklage mit Ausnahme von Spornen und Felsausbissen eine flächenhafte Verbreitung auf. Im Vergleich zur Ausprägung der Decklage im gestreckten Hang, unterscheidet sich diese in stark divergenten Positionen jedoch durch geringere Mächtigkeiten und höhere Skelettgehalte. Betrachtet man somit den gesamten solifluidal geprägten Deckschichtenkörper des oberflächennahen Untergrundes, so kann die oben beschriebene Affinität von Gesamtmächtigkeiten periglazialer Deckschichten zu Reliefpositionen hergestellt werden.

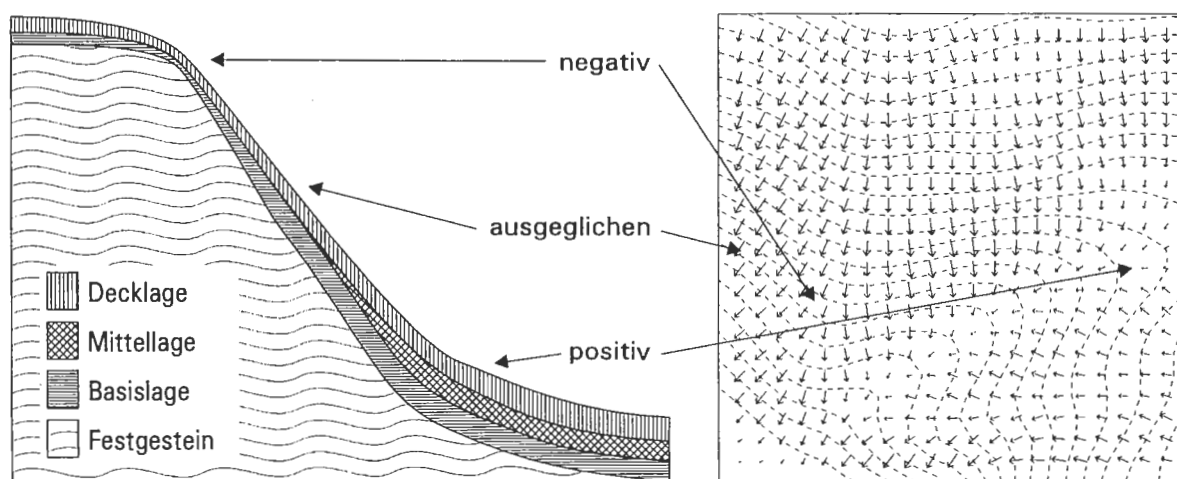


Abb. 28 Relative Massenbilanz der solifluidalen Hangüberformung im Vertikal- und Horizontalschnitt

Die primäre Hangentwicklung kann und soll auf Basis dieses Modellansatzes nicht erklärt werden. Auch die differenzierte modellhafte Abbildung eines Deckschichtenaufbaus, wie es im Vertikalprofil in Abbildung 28 dargestellt ist, läßt sich auf Basis dieses einfachen Modellansatzes nicht bestimmen. Hierzu wären genaue Kenntnisse des geologischen Untergrundes sowie die regional und lokal stark schwankenden Einflüsse von äolischem Materialeintrag erforderlich. Zudem bleiben Abspülungsprozesse unberücksichtigt.

Mit diesem Ansatz soll eine Reliefgliederung vorgenommen werden, die nicht Flächeneinheiten für bestimmte Deckschichtenausprägungen ermittelt, sondern das Relief in Bereiche unterschiedlicher relativer Massenbilanzen hinsichtlich der solifluidalen Hangüberformung gliedert. Diese Auswertung kann vom Betrachter unter Kenntnis weiterer Rahmenbedingungen für die Interpretation räumlich verteilter Deckschichten genutzt werden.

### 6.4.1. Methodische Beschreibung

Mit der Reliefanalyse zur relativen Massenbilanz sollen keine Abtrags- bzw. Akkumulationsbeträge bestimmt werden. Hiermit soll vielmehr ein Relativ-Index für jede Rasterzelle ermittelt werden, der für einen räumlichen Vergleich herangezogen werden kann.

Als Basisgrößen dienen die Reliefattribute Vertikalkrümmung, Querkrümmung und Neigung. Eine Verwendung der Horizontalkrümmung ist auch in diesem Zusammenhang problematisch, da sie keine Aussage über die Krümmung der Form zuläßt, sondern nur die Krümmungen aus Sicht eines künstlichen Horizontalschnittes abbildet.

Die Oberflächenform zeigt einen Einfluß auf die Deckschichtenausprägung vor allem im Bereich mittlerer bis großer Krümmung (Wölbungsradien  $< 2000$  m). Gestreckte Hangbereiche sind nur dann bei schwacher Krümmung für die Massenbilanz von Bedeutung, wenn sie sehr steil sind. Daher ist eine rechnerische Verknüpfung zwischen der Krümmung (Vertikal- und Querkrümmung) und der Neigung herzustellen.

Wie bei der Abgrenzung homogener Reliefformelemente ist es auch hier nötig, die Krümmungsdaten einer Datenvorbehandlung zu unterziehen. Dadurch kann der gekrümmte Wertebereich ( $< 2000$  m Wölbungsradius) gewichtet werden, der für die hypothetischen Massentransporte wichtig ist. Hierzu wird eine Funktion verwendet, die diesen Krümmungsbereich relativ streckt. Der Funktionsverlauf ist mit unterschiedlichen Einstellungen (Transferkonstanten) in Abbildung 29 dargestellt. Der Krümmungsbereich kleiner 0.001 (Wölbungsradien  $> 1000$  m) wird dabei zunehmend geringer gewichtet, während der Bereich größer 0.001 (Wölbungsradius  $< 1000$  m) eine Streckung erfährt. Die Gewichtung der Spannbreite erfolgt in Abhängigkeit zur Transferkonstante unterschiedlich. Damit kann gezielt der Krümmungsbereich beeinflusst werden, der im Hinblick auf die hypothetische Massenbilanz wichtig ist (vgl. Abschn. 6.4.2).

Der Krümmungsfaktor wird zunächst mit Hilfe dieser Funktion für die Vertikal- und Querkrümmung bestimmt. Die Wertespanne liegt dann zwischen  $-1$  und  $1$ , wobei der Wert  $0$  als gestreckt gilt. Mit der Addition der Vertikal- und Querkrümmung wird die Oberflächenform im ganzen als Krümmungsfaktor (FK) erfaßt.

Die Neigungsdaten müssen als weitere wichtige Größe ebenfalls vorbehandelt bzw. standardisiert werden. Dabei spielt zunächst die Gewichtung gegenüber dem Krümmungsfaktor eine wichtige Rolle. Die direkte Verwendung der Steigung ist auch hier

problematisch. Wird diese durch eine lineare Gewichtung verwendet, so wächst deren Einfluß auf den Index schon bei mittleren Neigungen stark an.

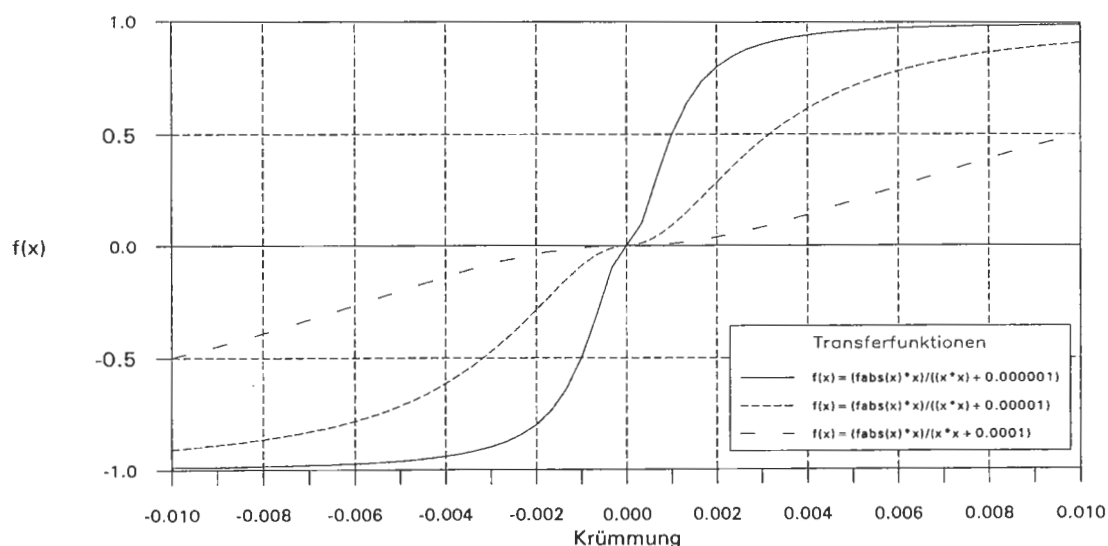


Abb. 29 Transferfunktion zur Gewichtung von Krümmungsbereichen

Dies entspricht nicht der Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes im Hangbereich. Auch an Hängen mit  $> 10^\circ$  Neigung sind im gestreckten Hang ähnliche Deckschichtenverhältnisse wie bei Neigungen von  $5^\circ$  bis  $10^\circ$  festzustellen. Erst bei sehr starker Neigung ( $> 15^\circ$  bis  $20^\circ$ ) liegen meist geringmächtigere Decklagen mit hohem Grobbodenanteil vor. Daher wird hier eine Transferfunktion verwendet, um den Bereich schwacher Neigungen im Verhältnis zu gewichten. Eine Transferkonstante von 15 ( $^\circ$ ) hat sich dabei bewährt (vgl. Abb. 27).

Der Index zur relativen Massenbilanz wird nun aus dem Verhältnis der Gesamtkrümmung zur Neigung bestimmt. Der Neigungsfaktor (FN) aus oben genannter Funktion wird mit dem Krümmungsfaktor (FK) multipliziert. Für den positiven Datenbereich des Krümmungsfaktors (FK) wird der Massenbilanz-Index (rM) wie folgt bestimmt:

$$rM = FK \cdot [FN + 1]$$

Mit steigender Neigung oder steigender Gesamtkrümmung wächst somit auch der Massenbilanz-Index an ("negative Massenbilanz").

Das Resultat der Auswertung ist ein Relativindex mit einem Wertespektrum zwischen -2 und 2. Werte nahe 0 können in der hypothetischen Massenbilanz als ausgeglichen angesehen werden. Mit zunehmender bzw. abnehmender Größe steigt die positive bzw. negative Massenbilanz an.

Der Index kann durch Gewichtung und Wahl der Transferkonstanten in unterschiedlicher Weise beeinflusst werden. Die gewählten Einstellungen beruhen dabei auf einer Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf die Deckschichtenmächtigkeiten und -ausprägungen in den Arbeitsgebieten.

#### **6.4.2 Die Reliefanalyse mit Hilfe der relativen Massenbilanz**

Für die Bestimmung der relativen Massenbilanz steht die Krümmung (bzw. Wölbungsradien) als Eingangsgröße zur Verfügung. Um eine geeignete Gewichtung der Eingangsparameter vornehmen zu können, muß zunächst festgestellt werden, ab welcher Krümmungsintensität ein Einfluß auf die Deckschichtenausprägung in Relation zu einem gestreckten Hang auftritt.

Die Auswertungen der Arbeitsgebiete Oberreifenberg und Grävenwiesbach zeigten vergleichbare Ergebnisse. Geringmächtige, skelettreiche Decklagen über anstehendem Festgestein oder festgesteinsnaher Basislage sind in divergenten Positionen ab Wölbungsradien von etwa 800 m und kleiner vorzufinden (Vertikal- und Querwölbungsradius). Konvergente Formen mit lößlehmreichen Deckschichten (Mittellage) sind durch Wölbungsradien von kleiner 1200 m (neg. Wertebereich - Hohlform) gekennzeichnet.

Mit zunehmender Divergenz und Konvexität (kleinere Wölbungsradien) ist generell eine Zunahme der Skelettgehalte festzustellen. Die Decklage liegt ab Wölbungsradien von kleiner 100 m i. d. R. anstehendem Gestein auf, und die Basislage fehlt. Bei den konvergenten Formen hingegen sind die Wölbungsextreme in Kerbtälchen oder Runsen häufig nicht mit einer zunehmenden Mächtigkeit der Deckschichten gekoppelt. Hier liegen z. T. auch anthropogen bedingte Erosionsformen vor (vgl. BAUER 1993; SEMMEL 1993).

Die Vertikalwölbung zeigt ihren Einfluß auf die Deckschichtenausprägung vorwiegend bei der Betrachtung ganzer Hangprofile. Die Hangform sollte daher im Zusammenhang mit der Hangposition Beachtung finden. Häufig sind stärker gekrümmte Bereiche oder Hangdiskontinuitäten an Gesteinsgrenzen unterschiedlicher morphologischer Härte gebunden, wie es im Deckgebirge vorzufinden ist.

Bei konstantem geologischen Untergrund und horizontal gestrecktem sowie vertikal konvexem Hang sind deutlich differenzierbare Deckschichtenausprägungen festzustellen (Oberhang und Hangnick). Bei längeren Hängen (> 200 m) mit mittlerer und

hoher Neigung setzen in konkaven Formen häufig Mittellagen an der Grenze vom Mittelhang zum Unterhang ein. In Hangdellen (konvergente Formen) kommt die Mittellage hangaufwärts häufig bis zu Sattelpositionen vor.

Hieraus wird deutlich, daß die Verbreitung des unterschiedlich ausgeprägten oberflächennahen Untergrundes nicht mit getrennten Wölbungsklassifikationen assoziiert werden kann. Die Prozeßeigenschaften eines Standortes bezüglich der solifluidalen Massenbewegung werden von der Reliefform insgesamt bestimmt. Ein Gesamtkrümmungsindex bildet die Abhängigkeiten der einzelnen Krümmungsschnitte auf die Prozeßeigenschaften in einer Größe ab.

Insgesamt zeigt die Querkrümmung für die Arbeitsgebiete aber einen wesentlich stärkeren Einfluß auf die Deckschichtenausprägung als die Vertikalkrümmung. Dies wird schon bei der Auswertung der Bodenkarte Oberreifenberg deutlich, wo Differenzierungen von Deckschichteneinheiten vor allem an Hangdellen und -rücken gebunden sind. Entgegen anderer Bodenlandschaften (z. B. im Deckgebirge) ist dies zu berücksichtigen, und die horizontale Hanggliederung muß entsprechend gewichtet werden.

Bei der statistischen Auswertung der Krümmungen in Bezug zu den Deckschichteneinheiten (Oberreifenberg) sind sehr hohe Standardabweichungen festzustellen, was auf die generalisierte Darstellung der Bodeneinheiten zurückzuführen ist. Die Auswertungen zu Kapitel 5 zeigen jedoch die tendenzielle Affinität von Decklageeinheiten zur Krümmungstendenz auf. Berücksichtigt man diese Einschränkungen des statistischen Vergleichs, so können "Orientierungswerte" in Verbindung mit einer analogen Interpretation der Deckschichtenkarte sowie durch einen Geländevergleich abgeleitet werden. Die Vertikal- und Horizontalkrümmung zeigt dabei einen Zusammenhang, da die Voll- und Hohlformen insbesondere im Grundgebirge meist konvex-divergent bzw. konkav-konvergent vorliegen (vgl. Tab. A7 u. A8). Stark konvexe Werte sind dabei in der Kreuztabelle deutlich mit stark divergenten Werten korreliert. In Abbildung A17 sind hierzu die relativen Häufigkeiten der Krümmungsradien (Vertikal- bzw. Querkrümmung) für eine Krümmungsklasse des jeweils anderen Krümmungsschnittes dargestellt. Mit zunehmender Querkrümmung steigt dabei der Anteil hoher Vertikalkrümmung und umgekehrt an. Es wird aber auch deutlich, daß z. B. innerhalb einer Klasse mit konvexer Querkrümmung ein hoher Prozentsatz vertikal gestreckter oder konkaver Klassen vorliegt.

Die Auswertung der Deckschichteneinheiten im Arbeitsgebiet Oberreifenberg zeigt bei allen Einheiten einen Schwerpunkt im gestreckten Bereich. Bei der Einheit 1 und 6 ist jedoch eine deutliche Schiefe der Verteilung der Wölbungsradien zu verzeichnen. Da-

bei steigt der Anteil vertikal stark gekrümmter Bereiche mit Radien von  $< 1000$  m in der Einheit 1 (skelettreiche DL) und Radien  $> -1000$  m in der Einheit 6 (DL/ML/BL) an. Bei der Querkrümmung wächst der Klassenanteil für die genannten Deckschichteneinheiten in ähnlicher Weise. Jedoch ist das Verhältnis der Deckschichteneinheit innerhalb der Wölbungsklassen zur gesamten Wölbungsklasse unterhalb/oberhalb  $1000/-1000$  m größer. Diese Ergebnisse sind mit der analogen Auswertung vergleichbar. Eine Gewichtung der Krümmung muß daher für den Wölbungsbereich  $\leq 1000$  m vorgenommen werden.

Neben der Oberflächenform ist die Neigung verantwortlich für die Intensität von Materialverlagerungsprozessen am Hang. Betrachtet man z. B. eine divergente Form entlang einer Kulminationslinie eines flachen Scheitelbereiches, so sind hier i. d. R. feinbodenreichere Deckschichten entwickelt als an stärker geneigten Hangrücken und Spornen. Dies ist sehr gut am Beispiel des Kartiergebietes 1 im Arbeitsgebiet Grävenwiesbach zu erkennen (Karte 17).

Unter konstanten Bedingungen kann der Einfluß der Neigung mathematisch exakt abgeleitet werden. Neben der Neigung sind jedoch auch die Substratzusammensetzung, Wasserhaushalt, Exposition, Bewuchs und weitere Parameter wie z. B. Prozeßzeiträume für die Transportleistung verantwortlich, so daß eine Transportgleichung auf Basis der hier vorliegenden Reliefparameter nicht abgeleitet werden kann. Für die vorliegende relative Betrachtung von Standorten wurde daher der Neigungsfaktor in Zusammenhang zu den Formfaktoren der Oberflächenkrümmung so dimensioniert und gewichtet, daß die im Gelände erfaßten Deckschichtenverbreitungen bestmöglichst im Modell wiedergegeben werden. Schon bei gesteckter bis schwacher Divergenz der Hänge bewirkt eine lineare Verwendung der Steigung eine grundsätzlich "negative Massenbilanz", wenn die Neigung mehr als  $10^\circ$  aufweist. Um das Verhältnis den empirischen Befunden anzupassen, wurde daher eine Funktion der Neigung bestimmt, die mit zunehmender Neigung abflacht.

Die Ergebnisse einer Auswertung zur relativen Massenbilanz sind in den Karten 19 und 20 für die Arbeitsgebiete Oberreifenberg und Grävenwiesbach dargestellt. Als ausgeglichene Massenbilanz gelten die Wertebereiche nahe 0, die in der Karte als mittlere Graustufen dargestellt sind. Von diesen Graustufen ausgehend wird eine ansteigende positive bzw. negative Massenbilanz durch einen zunehmenden bzw. abnehmenden Schwarzanteil gekennzeichnet. Entgegen den Auswertungen zu homogenen geomorphographischen Reliefeinheiten in Abschnitt 6.3 werden in den vorliegenden Karten gleitende Relationen dargestellt. Diese sind nur aus Darstellungsgründen in 15 Graustufen gegliedert.



Die Querkrümmung geht mit Hilfe der in Abbildung 29 dargestellten Funktion mit einer Transferkonstante von 0.000001 in die Berechnung ein. Der Vertikalkrümmungsfaktor wird hingegen mit einer Konstante von 0.000005 bestimmt. Damit wird in Anlehnung an die oben beschriebene Bedeutung der Querkrümmung eine Gewichtung des Querkrümmungsfaktors gegenüber der Vertikalrichtung im Bereich der Krümmung  $> 0.001$  vorgenommen.

Vergleicht man das räumliche Muster der Auswertung z. B. mit der Ausgliederung von Formelementen auf Basis lokaler KR-Kriterien (Abschn. 6.2), so lassen sich gute Übereinstimmungen feststellen (vgl. Kt. 12 u. 20). Mit der unklassifizierten relativen Massenbilanz liegt ein kontinuierliches Wertespektrum vor, das eine lokal differenzierte Betrachtung innerhalb einer relativ homogenen Form zuläßt. So wird z. B. der vertikal-konvexe Übergang eines Rückens in den Hang gegenüber dem zentralen Bereich des Rückens deutlich unterschieden, obwohl die Form einheitlich ausgebildet ist. Hierfür ist im wesentlichen die zunehmende Neigung verantwortlich.

Damit wird die Zielrichtung der vorliegenden Auswertung deutlich. Mit den Methoden zur Auswertung von homogenen Reliefeinheiten wird versucht, eine Reliefgeneralisierung zu erreichen. Die abgegrenzten Reliefeinheiten stehen dabei für einheitliche Reliefformen, die häufig - in der generalisierten Betrachtung - einheitliche Bodeneinheiten aufweisen. Entsprechend des betrachteten Maßstabes werden ab 1 : 50 000 i. d. R. schon Bodengesellschaften beschrieben. Die generalisierte Betrachtung des Reliefs stellt dabei ein wesentliches Kriterium zur Nutzung der Reliefanalyse dar. Die auf der Rastergröße differenzierte Auswertung zur relativen Massenbilanz stellt hingegen eine Methode dar, die insbesondere für die großmaßstäbige Kartierung einen Einsatz finden kann. Die Anwendbarkeit gerade dieser Methode ist dann jedoch in entscheidender Weise an die Qualität des DHM gebunden. Eine hohe Differenzierung kann nur von Nutzen sein, wenn das Relief sehr realitätsnah abgebildet wird. Dies ist zumindest in Hessen, wie es bereits in Kapitel 4 dargelegt wurde, nur in eingeschränkter Weise gegeben.

Eine automatisierte Zuordnung der Auswertungsergebnisse zu charakteristischen Deckschichteneinheiten kann, wie bei der Ermittlung homogener geomorphographischer Einheiten, nicht oder nur eingeschränkt vorgenommen werden. Der geologische Untergrund, die Exposition sowie der regional unterschiedliche Einfluß von Lößlehm bzw. Löß und die differenzierten Formungsabläufe im pleistozänen periglazialen Milieu sind weitere deckschichtenprägende Faktoren, die in ihrer Bedeutung regional und auch lokal stark variieren. Zudem ist die holozäne Reliefentwicklung bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen (vgl. Abschn. 6.5.2). Diese Faktoren sind in

einem DV-Modell schwer formalisierbar und sollten daher aus zusätzlichen Informationsquellen und der regionalen Geländekenntnis in eine Kartierung einfließen.

## **6.5 Diskussion der Verfahren zur geomorphographischen Reliefgliederung**

Mit den vorgestellten Verfahren werden geomorphographische Methoden eingesetzt, um zunächst eine objektive und strukturierte Trennung von homogenen Reliefbereichen zu erzielen. Bereits bestehende Verfahren aus der Geomorphologie wurden hierbei berücksichtigt.

Die räumliche Verteilung unterschiedlich ausgeprägter Deckschichten zeigt vor allem einen Zusammenhang zur Ausprägung der Formgestalt des Reliefs. Daher liegt es nahe, eine Reliefgliederung mit Hilfe der "Oberflächenkrümmung" vorzunehmen. Die angewandten Verfahren werden zum einen für eine streng morphographische Reliefgliederung eingesetzt. Hinsichtlich der Abbildung relevanter Flächeneinheiten für die zugrundeliegende Fragestellung zeigt sich jedoch, daß bereits etablierte Verfahren aus der Geomorphologie angepaßt werden müssen. Darüber hinaus werden neue Methoden vorgestellt, die hinsichtlich der geomorphographischen Reliefgliederung eine Weiterentwicklung darstellen.

Die Eignung von Gliederungsverfahren für die vorliegende Fragestellung muß sich dabei vor allem an den Anforderungen messen, die zu Beginn des Kapitels 6 dargelegt wurden. Da die Geomorphologie nur ein Prozeßparameter in der polygenetischen Bildung der Deckschichten darstellt, kann auch die geomorphographische Reliefgliederung nur ein Teilaspekt für die bodenkundliche und geologische Kartierung beinhalten. Abgeleitete geomorphographische Grenzen oder Flächeneinheiten bedürfen daher immer einer Interpretation im Zusammenhang mit anderen Bildungsfaktoren.

Bei der Analyse zur räumlichen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes zeigt sich, daß Substratgrenzen häufig dort auftreten, wo eine Reliefdiskontinuität vorliegt. Dabei ist das Relief in den meisten Fällen nicht durch eine deutliche ausgeprägte Diskontinuität, wie beispielsweise ein Hangknick, gekennzeichnet. Die Hangformen gehen häufig gleitend ineinander über. Dies erschwert eine Reliefgliederung in entscheidender Weise gegenüber anderen Fragestellungen zur Raumgliederung. Neben einer flächenhaften Abbildung in sich homogener Reliefelemente ist daher eine Grenzfindung an Diskontinuitäten und Übergangsschwellen von Reliefformen von größtem Interesse.

Zunächst erfolgt die Abgrenzung von Senkenbereichen, da hier eine Grenze vorliegt, die i. d. R. den Aufbau des oberflächennahen Untergrundes mit periglazialen Deckschichten und holozänen/pleistozänen Deckschichten trennt. Die Übergänge sind z. T. fließend und können nur durch geomorphogenetische Untersuchungen im Detail differenziert werden.

Mit dem vorgestellten Verfahren in Abschnitt 6.1 konnten die Bereiche ausgegrenzt werden, die gemäß der Bodenkarte Blatt Oberreifenberg (FICKEL 1977) Senken begleitende Bodentypen ausweisen. Dabei zeigt sich vor allem die Ausgrenzung der Aue mit deutlichem Sohllental als unproblematisch. Erheblich differenzierter als die seitliche Abgrenzung ist die Festlegung des Beginns von Senkenbereichen. Der Übergang von Dellentälchen mit periglazialen Deckschichten zu Bachtälern ist vor allem bei geringen Reliefunterschieden gleitend. Morphographische Reliefdiskontinuitäten liegen hier meist nicht vor. Eine Abgrenzung ist hierdurch unsicher und bedarf i. d. R. einer Überprüfung im Gelände.

Die Bereiche außerhalb der Senken sind in den Mittelgebirgen weitgehend flächendeckend durch periglaziale Deckschichten beeinflusst. Daher wird auf eine weitere großräumige Gliederung des Mesoreliefs mit einer Differenzierung von Hang- und Scheitelbereichen verzichtet. Ein Ansatz hierzu liegt von KÖTHE & LEHMEIER (1993) vor.

Mit den vorgestellten Methoden zur Reliefgliederung von Hang- und Scheitelbereichen wurden sehr unterschiedliche Verfahrensansätze am Beispiel der Arbeitsgebiete Oberreifenberg und Grävenwiesbach vorgestellt. Als geomorphometrische Eingangsparameter werden vorwiegend Krümmungsdaten sowie die Neigung verwendet. Die Auswertungen mit dem unterschiedlichen Verfahren zeigen bei einer generalisierten Betrachtungsweise ähnliche Ergebnisse auf. Das heißt, mit allen Verfahren ist eine mittel- bis kleinmaßstäbige geomorphographische Landschaftsgliederung möglich. Für die bodenkundliche und quartärgeologische Kartierung sind die Verfahren jedoch unterschiedlich zu bewerten, da hier lokal eine räumlich exakte Differenzierung von Reliefseinheiten im Vordergrund steht. Die geforderte Detailgenauigkeit richtet sich vor allem nach dem Betrachtungsmaßstab.

Die Klassifikation von Reliefformelementen auf Basis der Oberflächenkrümmung nach RICHTER (1962), KUGLER (1974) und DIKAU (1988) hat in der Geomorphologie vor allem im Hinblick auf eine systematische Reliefgliederung Eingang gefunden. Darüber hinaus liegt hiermit ein sehr einfaches Verfahren vor, das mit jedem rasterbasierenden GIS durchgeführt werden kann. Die Ergebnisse sind jedoch, vor allem bei der Verwendung von starren, einheitlichen Klassengrenzen, in geomorphographischer wie in

der hier vorliegenden fachlichen Hinsicht als unbefriedigend einzustufen. Der Informationsgewinn liegt für den erfahrenen Kartierer nur bedingt über den ohnehin bestehenden Interpretationsmöglichkeiten einer Topographischen Karte. Mit der Verwendung der gleitenden KR-Kriterien erfolgt eine erhebliche Verbesserung der Auswertungsergebnisse. Hiermit wird eine Klassifizierung an einen kleinräumigen Ausschnitt angepaßt, wodurch lokale Formunterschiede herausgearbeitet und dargestellt werden können. Darüber hinaus kann damit blattschnittfrei gearbeitet werden. Die Klassengrenzen passen sich gleitend an den gewählten Landschaftsausschnitt an.

Eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse zeigt auf, daß mit den ausgegliederten Reliefformelementen eine feinstrukturierte Gliederung prinzipiell möglich ist. Durch die Fenstertechnik treten jedoch verfahrenbedingte Fehler auf. So kommt es im Übergangsbereich von Hängen zu Tälern teilweise zu einer unzutreffenden Abgrenzung von Formelementen, wenn sich der betrachtete Fensterausschnitt zu einem steilen Hang hin bewegt und die KR-Kriterien hierdurch einer relativ raschen Veränderung durch die zeilen-/spaltenweise Fortbewegung des Fensters unterliegen. Diesem Problem kann z. T. mit der Vergrößerung des Fensters entgegnet werden. Hierdurch wird jedoch wiederum eine Glättung erzielt, die zu Lasten der lokalen Differenzierung geht. Insgesamt ist daher eine möglichst exakte Abbildung von Reliefdiskontinuitäten nur bedingt möglich.

Die allgemeine Anwendung von multivariaten Distanzverfahren zeigt für die Geomorphologie sehr vielversprechende Möglichkeiten hinsichtlich einer reliefbezogenen Raumgliederung auf. Schon mit einfachen Gruppierungsverfahren, wie der iterativen Clusteranalyse, lassen sich geomorphographische Reliefgliederungen vornehmen. Aus statistischer wie auch aus geomorphographischer Sicht sind hiermit Gruppierungen zu erzielen, die auf den betrachteten Gebietsausschnitt abgestimmt sind. Dabei können beliebige geomorphometrische Reliefattribute zum Einsatz kommen. Mit Ausnahme einer ggf. erforderlichen Transformation der Eingangsdaten ist das Verfahren objektiv und bleibt für den Benutzer transparent. Mit der überwachten Klassifizierung ist es darüber hinaus möglich, auf die Klassifizierungsergebnisse direkt Einfluß zu nehmen. Damit kann eine gesteuerte Klassifizierung erfolgen, die eine Gruppierung unabhängig vom betrachteten Arbeitsgebiet vornimmt.

Mit dem Ziel der Abgrenzung von homogenen Reliefeinheiten entlang von räumlichen Reliefdiskontinuitäten zeigen sich jedoch sehr schnell die Grenzen der allgemeinen Verfahren zur Distanzgruppierung. Vergleicht man die Reliefgliederung mit anderen Anwendungen von multivariaten Distanzverfahren zur Raumgliederung, wie bspw. der Satellitenbildauswertung, so kann dies konkretisiert werden. Bei einer Nutzungs-

klassifizierung von Satellitenbilddaten als Beispiel werden vorwiegend überwachte Verfahren eingesetzt, die räumlich benachbarte Bodennutzungen differenzieren sollen. Die unterschiedlichen Nutzungsarten sind dabei in einem jeweils bestimmten Spektralbereich dominant abgebildet. Bei der Gliederung von Reliefformen müssen diese, aus der lokalen Reliefsituation heraus, abgegrenzt werden. Betrachtet man z. B. eine konvexe Oberhangsituation, so kann diese zunächst in unterschiedlicher Intensität gekrümmt sein. Der Übergang zum Scheitelpunkt wie auch zum Hangbereich kann darüber hinaus abrupt oder gleitend vorliegen. Dabei sind gleitende Übergänge von Reliefformen in den Mittelgebirgen sehr häufig. Dies erschwert die Distanzgruppierung in entscheidender Weise.

Aus diesen Gründen konnte erst bei der Integration von räumlichen Nachbarschaftsverhältnissen eine lokal sinnvoll differenzierte Reliefgliederung mit Hilfe eines neu entwickelten iterativen Distanzverfahrens zur Ableitung homogener Reliefeinheiten erreicht werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Reliefgliederungen zeigen eine exakte Differenzierung von Hangdiskontinuitäten.

Die Abgrenzung räumlicher Einheiten wird durch die Betrachtung der unmittelbaren Nachbarschaft der Flächen (Raster) und nicht durch die Analyse von Richtungsprofilen vorgenommen. Damit wird unter Berücksichtigung der verwendeten Eingangsdaten eine sehr exakte Reliefgliederung möglich. Darüber hinaus wird hiermit aber auch eine befriedigende Grenzfindung erreicht, wenn ein gleitender Übergang von Reliefeinheiten vorliegt. Mit der Dokumentation der Nachbarschaftsbeziehungen durch unterschiedliche Liniensignaturen liegt zudem eine zusätzliche Information zur Abgrenzung von Reliefeinheiten vor. Mit der Datenvorbehandlung wird eine Bearbeitung sehr unterschiedlicher Reliefsituationen blattschnittfrei ermöglicht. Bereiche mit hoher und sehr geringer Reliefenergie können hierdurch geomorphographisch gegliedert werden.

Eine Funktionalität dieses Verfahrens bezüglich der vorliegenden Anwendung ist die Möglichkeit, unterschiedliche geomorphometrische Daten und unterschiedliche Gewichtungen verwenden zu können. Hierdurch kann eine neutrale geomorphographische Reliefanalyse vorgenommen werden, aber auch gleichzeitig eine angepaßte Auswertung hinsichtlich einer Fragestellung erfolgen. Darüber hinaus kann ein beliebiger Generalisierungsgrad der Auswertung bestimmt werden.

Das Verfahren kann somit sehr universell eingesetzt werden. Mit einer Standardisierung der Voreinstellungen steht eine Methode für die allgemeine Geomorphographie und damit auch der Geomorphologie zur Verfügung. Der Anwendungsbereich ist dabei nicht allein auf die geomorphographische Reliefgliederung beschränkt. Erste Ver-

suche zur Auswertung von hochauflösenden Multispektralscannerdaten zur Klassifizierung von Pflanzenbonitäten innerhalb einheitlicher Bodennutzung zeigen ebenfalls sehr gute Ergebnisse.

Das Verfahren zur Kennzeichnung der relativen Massenbilanz hat entgegen der anderen vorgestellten Methoden keine Ausgliederung von Formelementen zum Ziel. Es soll neben der Abgrenzung von homogenen Reliefeinheiten eine geomorphometrische Größe als Relativ-Index bereitgestellt werden, die auch im Hinblick auf die präholozäne und holozäne Massenbewegung interpretiert werden kann. Mit diesem Verfahren wird die Reliefform zunächst als Gesamtkrümmungsindex beschrieben. Unter weiterer Berücksichtigung der Neigung wird hieraus ein Relativ-Index zur Massenverlagerung berechnet. Im Gegensatz zum Verfahren der Flächen-Kategorie 2 von KÖTHER & LEHMEIER (1994a) soll somit keine beschränkte Betrachtung einer Formdimension vorgenommen werden, sondern der Zusammenhang des Massentransportes unter Berücksichtigung der Gesamtform und der Neigung erfolgen.

Die klassifizierten Auswertungsergebnisse zeigen große Ähnlichkeit mit den Ergebnissen der Verfahren zur Differenzierung homogener Reliefeinheiten. Dies liegt einerseits an der Verwendung der gleichen Datengrundlagen. Darüber hinaus wurde jedoch die Gliederung homogener Reliefelemente so beeinflusst, daß Reliefeinheiten abgebildet werden, die in Bezug zur Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes stehen. Da der Index zur relativen Massenbilanz jedoch keine räumliche Klassifizierung darstellt, sondern als kontinuierliches Datenspektrum vorliegt, wird hierzu eine zusätzliche Information bereitgestellt, mit der die als homogen klassifizierten Reliefeinheiten differenziert betrachtet werden können. In Bezug zur Abgrenzung von möglichst homogenen Reliefelementen stellt dieses Reliefgliederungsverfahren somit eine zusätzliche Komponente zur Interpretation zur Verfügung.

Bezüglich eines Vergleiches der Verfahren zeigt der multivariate statistische Ansatz die weitaus besten Ergebnisse im Hinblick auf eine Reliefgliederung. Die zu Eingang des Kapitel 6 gestellten Erfordernisse können hiermit erfüllt werden.

Das Verfahren zur Bestimmung eines Index zur relativen Massenbilanz kann aus geomorphographischer Sicht nur eingeschränkt bewertet werden, da es sich hier um eine spezielle fragestellungsorientierte Anwendung handelt. Das Ziel des Verfahrens liegt dabei nicht in einer exakten Abgrenzung von homogenen Flächeneinheiten. Hiermit soll vielmehr auf Basis der Rasterzelle als kleinste Einheit eine relative Massenbilanz dargestellt werden. Im Hinblick auf die vorgestellten Verfahren bietet es eine zusätzliche Auswertungsvariante, die neben der Ableitung von homogenen Reliefeinheiten

verwendet werden kann. Eine Diskussion erfolgt daher im Zusammenhang mit der fachlichen Interpretation der Ergebnisse.

### **6.5.1 Die Reliefanalyse im Hinblick auf die Ausgliederung deckschichten- und bodenrelevanter Flächeneinheiten**

Für eine Bewertung der abgeleiteten Reliefeinheiten hinsichtlich der räumlichen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes und der darin entwickelten Böden kann nur bedingt ein Vergleich mit einer Deckschichtenkarte bzw. Bodenkarte herangezogen werden. Dies hängt zunächst damit zusammen, daß ein DHM nicht immer den im Gelände vorzufindenden Gegebenheiten entspricht. Dies betrifft insbesondere den bewaldeten nördlichen Anteil des Kartiergebietes 2 sowie die stark gekrümmten und steilen Bereiche im Kartiergebiet 1 des Arbeitsgebiets Grävenwiesbach sowie das gesamte Arbeitsgebiet Oberreifenberg. Durch die fehlerhaften oder generalisierten DHM müssen die geomorphographisch ausgegliederten Flächen immer in Bezug zur verwendeten Datengrundlage gesehen werden.

Eine Kartierung stellt immer eine Generalisierung der räumlichen Bodenausprägung dar. Die Kartiereinheiten werden dabei im Hinblick auf den Maßstab und die Heterogenität des Gebietes gebildet. Bei der Darstellung in der Karte wird zusätzlich Rücksicht auf die dargestellte Geomorphologie der topographischen Kartengrundlage genommen, was i. d. R. nicht systematisch geschieht. Somit wird die Bodenverbreitung auf Karten in subjektiver Weise lokal unterschiedlich stark differenziert dargestellt. Teilweise wird die dargestellte Topologie der verwendeten Kartengrundlage zur Grenzziehung genutzt, oder es wird streng nach Kartierergebnissen verfahren.

Diese Problematik zeigte sich vielfach bei den Geländebegehungen, wo Kartierung und Reliefanalyse verglichen wurden. Lagen hier deutliche Unterschiede vor, so konnten häufig Bodengrenzen auf der Basis der Reliefanalyse berichtigt werden, wenn die Kartiergrenzen an die generalisierte Darstellung der topographischen Karte angepaßt waren. Andererseits sind auch die auf den TK 5-Höhenlinien basierenden Höhenmodelle z. T. unter Wald mangelhaft oder generalisiert, wodurch eine ungenaue Reliefgliederung hervorgerufen wird.

Für die großmaßstäbige Reliefgliederung bedeutet dies, daß immer nur in beschränktem Umfang ausgewiesene Reliefeinheiten und Kartiereinheiten übereinstimmen können. Ein statistischer Vergleich, wie er in Kapitel 5 dargestellt wurde, kann so nur eine tendenzielle Übereinstimmung von Reliefeinheiten und kartierten Bodeneinheiten

bzw. Deckschichteneinheiten aufzeigen. Dies wird auch durch die Ergebnisse von WALTHER (1994) bestätigt. Auf einen statistischen Vergleich der vorliegenden Kartierung und einer Relieffanalyse wurde daher weitgehend verzichtet. Die Klassifizierungsergebnisse der unterschiedlichen Verfahren werden daher im folgenden vor allem deskriptiv diskutiert.

Für das Arbeitsgebiet Oberreifenberg wurde die Verbreitung der quartären, insbesondere der periglazialen Deckschichten in Kapitel 5 diskutiert. Für das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach liegen zudem 2 Detailkartierungen vor. Aufgrund der sehr heterogenen Reliefverhältnisse und des hier vorliegenden DHM auf Basis von TK 5-Höhenlinien eignet sich vor allem das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach für eine detailliertere Betrachtung der Ergebnisse aus der Relieffanalyse.

Im Kartiergebiet 1 sind aufgrund der starken Reliefunterschiede die periglazialen Deckschichten sehr deutlich an Reliefformen gebunden (vgl. Kt. 17). Die im Vergleich zur Boden-Deckschichtenkarte wesentlich stärker differenzierte Reliefgliederung ist bezüglich der Deckschichtenausprägung im Gelände meist gut nachzuvollziehen. Eine weitere Differenzierung, insbesondere der Bodeneinheit 3, wurde bei der Kartierung jedoch nicht vorgenommen, da nur wesentliche Unterschiede der Deckschichten erfaßt werden sollten. Dabei ist jedoch festzuhalten, daß von den divergenten zu den konvergenten Formen eine generelle Abnahme der Skelettgehalte in der Deck- und Basislage festzustellen ist. Darüber hinaus erreicht die Basislage in den konvergenten Bereichen meist Mächtigkeiten über 1 m.

Eine etwas andere Situation ist in Kartiergebiet 2 gegeben. Während die steilen Hänge und Scheitelpunkte meist einheitlich Braunerden wie in Kartiergebiet 1 (Einheit 3) zeigen, sind die flacheren Hangpartien der Mittel- und Unterhänge deutlich differenziert (vgl. Kt. 18). Auch hier können vielfach geomorphographische Grenzen mit den Kartiereinheiten verknüpft werden. Die an stark konvex/divergente Formen gebundenen Kartiereinheiten 1 und 2 werden in ihrer Flächenabgrenzung bei allen Auswertungsmethoden als morphographische Reliefelemente ungenau erfaßt. Dies liegt in der Generalisierung des verwendeten DHM begründet, das vor allem extreme Formen geglättet abbildet.

Das expositionsabhängige Vorkommen von lößlehmreichen Deckschichten kann nur bedingt geomorphographisch erfaßt werden. Eine lößlehmreiche Mittellage setzt dabei bevorzugt in konvergenten Formen im Mittelhang ein, wo häufig keine signifikanten geomorphographischen Grenzen vorliegen. Darüber hinaus führt das großflächig in der Basislage aufgearbeitete saprolitische Material zu Staunässebildungen und latera-



len Wasserbewegungen, was eine kleinräumige Petrovarianz vor allem im östlichen Kartiergebiet zur Folge hat.

Die Reliefanalyse durch Ausgliederung von Reliefformelementen mit Hilfe lokaler KR-Kriterien (Abschn. 6.2) sowie die Anwendung des statistischen Verfahrens zur Klassifikation von homogenen Reliefeinheiten (Abschn. 6.3.2) ermöglichen beide eine zufriedenstellende mittelmaßstäbige Reliefgliederung zur Abbildung deckschichtenrelevanter Flächeneinheiten. Die abgegrenzten Einheiten bilden in diesem Betrachtungsmaßstab mit der grundlegenden Gliederung der Oberflächenform die wichtigsten reliefabhängigen Verteilungsmuster periglazialer Deckschichtenverhältnisse ab. Die abgegrenzten Flächeneinheiten stellen dabei einen Informationsgehalt dar, der weit über die Interpretationsmöglichkeiten bezüglich der Oberflächenformen aus den Isohypsen der Topographischen Karte hinausgeht. Für jedes Flächenelement sind zudem reliefbezogene statistische Größen verfügbar, die weiterführend ausgewertet werden können. Für die praktische Kartierung ist aber i. d. R. nur die Abgrenzung von einheitlichen Flächenobjekten von Interesse. Diese Auswertungen können unter Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Geologie, Lößlehmeinfluß und anthropogene Überprägung lokal bewertet werden und fließen so in die Abgrenzung von Bodenarealen mit ein.

Bei dem Vergleich der ausgegliederten lokalen Reliefelemente mit der Verbreitung unterschiedlich ausgeprägter Deckschichten ist eine deutliche Übereinstimmung, vor allem bei den Vollformen mit großer Krümmung, zu erkennen. Hierunter sind Kammbereiche, Rücken und Sporne zu verstehen. Eine skelettreiche, i. d. R. lößlehmarne Decklage über anstehendem Gestein oder Basislage ist dabei meist in vertikal konvexen bis gestreckten und divergenten Hangformen zu finden. Diese Formen können durch die Reliefanalyse sehr gut herausgearbeitet werden. Die Flächenbereiche in Hohlformen an Unterhängen und in Hangdellen, die mit lößlehmreichen, skelettarmen Deckschichtenausprägungen mit Mittellagen gekennzeichnet sind, stimmen nur bedingt mit der Abgrenzung geomorphographischer Einheiten überein. Die Hangdellen weiten sich z. B. häufig zum Unterhang hin zunehmend aus, bis sie in gestreckte Bereiche übergehen. Die Mittellagen setzen dabei in den konvergenten Formen schon im Mittel, z. T. auch im Oberhang ein und dehnen sich im Mittel- und Unterhang auch auf die gestreckten Formen aus. Eine Veränderung der Klassifizierung durch eine Gewichtung der konkaven Vertikalkrümmung bringt keine deutlichen Vorteile. Zudem werden die konkaven Formen innerhalb der Oberhänge nur noch überzeichnet.

Die deutliche Differenzierung von Deckschichten und Bodenformen im Kartiergebiet 2 kann ebenfalls nur bedingt auf Grundlage dieser Reliefauswertungen nachvollzogen werden. Südlich des Galgenkopfes (Kartiergebiet 2) reichen schon im Mittelhang ge-

ringförmige geomorphologische Unterschiede aus, um mächtigere lößlehmreiche von skelettreichen Deckschichteneinheiten zu trennen.

Auch die deutlich ausgeprägte Asymmetrie der Deckschichtenverteilung kann durch das vorliegende Verfahren nicht abgebildet werden. Hier kann zwar die Exposition als zusätzlicher Reliefparameter in die Auswertung mit einbezogen werden, die kartographische Darstellung wird durch die Ausweitung der Klassenanzahl jedoch stark überladen. Die Exposition stellt eine Größe dar, die durch die Höhenlinien ohnehin im Kartenbild als Informationsebene vorliegt. Die abgegrenzten Reliefeinheiten können so immer unter Berücksichtigung der Exposition interpretiert werden. Betrachtet man zudem ganze Reliefformen wie Hangdellen und Rücken, so weisen diese entgegengesetzte Expositionen innerhalb einer Fläche auf. Die Aufteilung z. B. von kleinen Hangdellen nach Expositionsrichtungen ist im Regelfalle unerheblich. Hier interessiert vor allem die Gesamtausrichtung der ausgegliederten Reliefform. Für die DV-technische Weiterverarbeitung kann die mittlere Expositionsrichtung als statistische Größe ermittelt werden.

Die expositionsabhängige Deckschichtenausprägung kann beispielhaft an einem Hangrücken im SW des Kartiergebiets 2 verdeutlicht werden (Karte 18). Bei zwei gegenüberliegenden Hangdellen zeichnet sich die Nordost exponierte Delle durch lößlehmreiche Deckschichten mit DL/ML/BL aus. Die in Südwestrichtung verlaufende Hangdelle hingegen weist nur eine lößlehmbeeinflusste, skeletthaltige DL über BL auf.

Neben dem Deckschichtenaufbau führt im Kartiergebiet 2 vor allem der Stauwasser einfluß zu unterschiedlichen Bodenformen. Ein deutlicher Anteil von saprolitischem Material in der Basislage führte hier vor allem in konvergenten Formen zur Pseudovergleyung durch Hangzuzugswasser. Beinhaltet die Basislage keine oder geringe Mengen an tonigem Substrat, so wechseln diese sehr rasch mit Braunerden. Hierbei spielt der laterale Transport von Bodenwasser eine wichtige Rolle. Der entscheidende Faktor ist jedoch das heterogene Material des Untergrundes, das durch die periglazialen Deckschichten aufbereitet wurde.

Von diesen allgemeinen Zusammenhängen der Reliefgliederung und der räumlichen Ausprägung periglazialer Deckschichten unterscheiden sich jedoch die Auswertungsergebnisse in der Detailbetrachtung wesentlich. Bei der Klassifizierung von Formelementen in Anlehnung an RICHTER (1962) wird nur die Vertikal- und Querkrümmung berücksichtigt. Eine weitere Differenzierung nach der Neigung durch eine graphische Verschneidung mit Neigungsklassen führt zu einem räumlich diffusen Klassifizierungsbild, das bei weiteren 5 Neigungsklassen schwer auszuwerten ist.

Die Klassifizierung von Formelementen auf Basis lokaler KR-Kriterien kann kleinräumige geomorphographische Unterschiede insgesamt nur eingeschränkt aufzeigen. Vor allem für die großmaßstäbige Kartierung sind jedoch diese engräumigen Reliefveränderungen innerhalb eines Hanges von großer Bedeutung.

Mit der Nutzung der Fenstertechnik wird ein definierter Umgebungsbereich zur Findung einer Klassengrenze nur hinsichtlich einer groben Differenzierung in konvex - gestreckt - konkav genutzt. Die Erhöhung der Klassenanzahl in stark konvex, konvex, gestreckt, konkav und stark konkav bringt zwar eine stärkere Gliederung, die Lesbarkeit der Karten wird jedoch deutlich erschwert.

Für die Abgrenzung bodenkundlicher Einheiten können aus geomorphographischer Sicht Hangdiskontinuitäten in vertikaler- und horizontaler Richtung verantwortlich sein. Mit einem vorgegebenen Schwellenwert werden solche Hangunstetigkeiten nur in begrenztem Umfang erfaßt. Die Auswertung einer weiteren Umgebung in einem Fenster in der Rasterdatenmatrix zur Berechnung eines lokalen Schwellenwertes stellt hierzu schon eine Annäherung dar. Es wird aber nicht die direkte Umgebung der betrachteten Rasterzelle untersucht bzw. ausgewertet. Für die geomorphographische Abgrenzung eines Standortes (Rasterzelle) sollte daher, analog zur Kartierweise im Gelände, eine Grenzfindung durch die direkte Betrachtung der räumlichen, unmittelbaren Nachbarschaft erfolgen, wie es bei raumbezogenen iterativen Distanzverfahren geschieht.

Mit der Klassifizierung homogener Reliefeinheiten mit dem raumbezogenen iterativen Distanzverfahren wurden bei Verwendung der Quer- und Vertikalkrümmung und der Neigung die besten Ergebnisse erzielt, um deckschichtenrelevante Flächeneinheiten auszugrenzen (Karte 16). Dabei wurde die Querkrümmung deutlich gegenüber der Vertikalkrümmung und der Neigung gewichtet, um der in deutlicher Weise an Hangrücken und -dellen angelehnten Deckschichtenverbreitung gerecht zu werden. Ein visueller Vergleich der Auswertung mit den Kartierungen (Karte 17 und 18) zeigt, daß in vielen Fällen geomorphographisch ermittelte Grenzen mit den Bodengrenzen übereinstimmen. Die Reliefgliederung ist dabei meist erheblich differenzierter als der dargestellte Wechsel von Bodeneinheiten. Dies wurde bewußt gewählt, um eine möglichst kleinräumige Reliefgliederung zu erhalten.

Im Kartiergebiet 1 werden die Flächenbereiche skelettreicher Decklagen über anstehendem Festgestein oder Basislage (Einheit 1 u. 2) entsprechend der Geomorphologie im wesentlichen erfaßt. Das DHM bildet jedoch gerade in diesem bewaldeten Bereich das Relief deutlich geglättet ab, wodurch eine Vielzahl von Flächen mit kartierten

Ranken oberhalb von Felsausbissen bei der Reliefgliederung unberücksichtigt bleiben. Die konvergenten Reliefeinheiten sind in der Bodenkarte nur bedingt differenziert. Hier liegt aber eine deutliche Abnahme der Skelettgehalte gegenüber gestreckten Hangbereichen vor, die Unterschiede sind jedoch aufgrund der hohen Neigung des Geländes gering. Daher wurde keine separate Bodeneinheit ausgewiesen.

Für das Kartiergebiet 2 können ähnliche Ergebnisse aufgezeigt werden. In schwach divergenten bis gestreckten Hangbereichen treten weitgehend unabhängig von der Neigung Braunerden aus Decklage (Schieferschutt, -zersatz) über Basislage auf (Kartiereinheit 3). In den stark divergenten Bereichen dünnt die Decklage meist aus und ist erheblich skelettreicher. Die Basislage fehlt oder ist geringmächtig. Diese Bereiche werden durch die Reliefgliederung erfaßt, aber in ihrer Ausdehnung nicht immer exakt abgebildet. Im Südostteil kommen zudem Erosionsprofile auch auf schwach divergenten Standorten vor.

Die lößlehmreichen Deckschichten mit Mittellageprofilen sind vorwiegend auf konvergente Formen beschränkt. Dabei sind z. T. sehr geringe Krümmungsunterschiede für die Trennung lößlehmreicher und -armer Standorte ausschlaggebend. Gleiches gilt für die Ausprägung von Pseudogleyen. Auch hier kann an vielen Stellen eine Übereinstimmung der Grenzen aus der Reliefanalyse zur Abgrenzung der Bodenareale festgestellt werden.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse aus der unabhängig von der Reliefgliederung vorgenommenen Kartierung muß berücksichtigt werden, daß neben dem Kartierungsmaßstab die Ergebnisse subjektiv beeinflußt sind. Die Kenntnisse des Kartierers und die angewandte Kartierungsmethode bestimmen in starkem Maße die Arbeitsergebnisse. Das Resultat einer digitalen Reliefgliederung ist dagegen, unter Beachtung der manipulierbaren Einstellungsparameter, als objektiv einzustufen. Mit den Ergebnissen einer digitalen Reliefgliederung soll daher versucht werden, eine Vorauswertung zu schaffen, die eine Beschleunigung, aber auch eine objektivere Kartierung ermöglicht.

Insgesamt wird deutlich, daß die Abgrenzung homogener Reliefelemente in Mittelgebirgslagen z. T. einen direkten Bezug zur unterschiedlichen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes liefern kann. Bei geringen Reliefunterschieden, stark wechselndem Untergrund und unterschiedlicher lokaler Lößlehmkomponente tritt die direkte Bedeutung der geomorphographischen Reliefgliederung zurück. Sie bietet aber zumindest dem Kartierer ein objektives geomorphographisches Grundgerüst, mit dessen Hilfe der Kartieraufwand eingeschränkt werden kann.

Trotz der gewöhnungsbedürftigen Darstellung, vor allem durch die rasterförmigen Grenzen, ist die Akzeptanz der Auswertungskarten auf Basis dieses Verfahrens bei den Kartierern am Hessischen Landesamt für Bodenforschung sehr hoch. Die Reliefgliederung wird dabei neben der Geologischen Karte als wesentliche Informationsgrundlage für die bodenkundliche Landesaufnahme verstanden.

Für die Auswertungen aus der Bestimmung eines Relativ-Index zur Massenbilanz treffen die oben genannten Ergebnisse mit Einschränkungen ebenfalls zu. Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, weist die Auswertung für das Arbeitsgebiet Grävenwiesbach ähnliche räumliche Muster auf wie bei den Reliefgliederungsverfahren zur Abgrenzung homogener Reliefeinheiten. Entgegen diesen Verfahren wird hier jedoch keine Abgrenzung von Reliefeinheiten vorgenommen, sondern ein Index unklassifiziert zur Darstellung verwendet. Hinsichtlich der gleitenden Übergänge des Aufbaus des oberflächennahen Untergrundes von divergenten, konvexen Hangpositionen zu konvergenten, konkaven Formen kommen die Ergebnisse der Deckschichtenausprägung von skelettreichen Deckschichten zu skelettarmen, meist lößlehmreichen Deckschichten sehr nahe. Vor allem für die großmaßstäbige Kartierung können hiermit schon geringe Reliefunterschiede erkannt werden.

Mit den vorgetellten Verfahren stehen unterschiedliche Ansätze zur Reliefgliederung zur Verfügung, die in Abgängigkeit der Fragestellung einzeln oder auch kombiniert eingesetzt werden können. Die in Kapitel 6 gestellten Anforderungen können mit Hilfe des multivariaten Distanzverfahrens erfüllt werden. Neben der Erstellung von Reliefauswertungskarten stehen die Daten aller Auswertungsverfahren darüber hinaus für weitergehende DV-gestützte Auswertungen zur Verfügung.

### **6.5.2 Anmerkungen zur historischen Bodenerosion**

Die Ausprägung der periglazialen Deckschichten wird in wesentlichen Teilen der Mittelgebirge durch eine anthropogene Überprägung beeinflusst. Die historische Bodenerosion muß für große Flächenanteile als ein wesentlicher Faktor für den rezenten Deckschichtenaufbau und damit für die Ausbildung der Bodengesellschaften angesehen werden. Dieser Sachverhalt stellt eines der Probleme bei der rechnergestützten Reliefgliederung und deren Anwendung für die räumliche Differenzierung des oberflächennahen Untergrundes dar. Die unterschiedliche Nutzungsgeschichte einzelner Landschaftsabschnitte wie auch einzelner Hangbereiche ist dabei nur bedingt in Abhängigkeit von der Reliefsituation als entscheidender Faktor für die Bodenerosion zu sehen.

Bei Geländearbeiten und Auswertungen von Bodenkarten konnte immer wieder festgestellt werden, daß Erosions- und Akkumulationsprofile häufig einer charakteristischen Verbreitung unterliegen. In den höheren Lagen der Mittelgebirge sind sehr häufig terrassierte Hänge zu finden, die einen kleinräumigen, meist hangparallelen Wechsel von Erosions- und Akkumulationsprofilen aufweisen (vgl. MACHANN & SEMMEL 1970). Die z. T. bis zu 1 m hohen Ackerterrassen konnten in keinem der verwendeten Höhenmodelle des Hessischen Landesvermessungsamtes erfaßt werden, sofern sie unter heutiger Waldnutzung liegen. Unter landwirtschaftlicher Nutzung fehlen i. d. R. diese kleinräumigen Terrassierungen, da mit der Vergrößerung der Ackerschläge, als Folge der Flurbereinigung, eine Einebnung der Oberfläche einhergeht. Örtlich weisen jedoch schwache hangparallele Bodenwellen auf eine ehemalige Terrassierung hin. Für die mittelmaßstäbige Bodenkartierung sind diese Erosionsformen nicht von Belang, während sie für große Maßstäbe von Bedeutung sind. Die Reliefanalyse kann hierzu jedoch erst dann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn Höhenmodelle in hoher Qualität und Auflösung vorliegen.

Betrachtet man die Hänge nicht kleinräumig, sondern über den gesamten Hangverlauf, so fällt örtlich eine weitere charakteristische Verteilung von erosionsbedingten Profilabfolgen auf. Die in Mittelgebirgslagen häufig durch Hangdellen und -rücken gegliederten Hänge zeigen z. T. Erosionsformen, die sehr eng mit divergenten und konvergenten Hangformen vergesellschaftet sind. Im Arbeitsgebiet Grävenwiesbach konnten östlich Niederlauken und westlich Oberlauken auf heute noch landwirtschaftlich genutzten Flächen typische reliefabhängige Abfolgen von Erosionsprofilen kartiert werden. Schon sehr schwach ausgeprägte divergente Bereiche zeigen z. T. eine völlige Erosion der Decklage vor allem entlang der Kulminationslinie. Der Ap-Horizont ist in einer Basislage entwickelt. Im erheblich steileren, in Abflußrichtung anschließenden Hang, ist die Decklage meist noch voll erhalten. Die Hangdellen und Dellentälchen sind wiederum mit Abschwemmassen von z. T.  $> 2$  m Mächtigkeit gefüllt. Diese werden meist von einer Deck- und Mittellage unterlagert. In vertikal konvexen Situationen fehlt die Decklage nur, wenn eine sehr deutliche Hangversteilung, also eine sehr große Krümmung, vorliegt.

Zur Charakterisierung der reliefbedingten Erosionsanfälligkeit wird häufig der LS-Faktor (Topographiefaktor) als Bestandteil der Universal Soil Loss Equation (WISCHMEYER & SMITH 1978) herangezogen. Während in der Lößlandschaft mit langen, relativ flachen, horizontal gestreckten Hängen ein Zusammenhang zwischen LS-Faktor und Erosionsmerkmalen z. T. hergestellt werden kann, weisen KLEEFISCH & KÖTHER (1993) darauf hin, daß in einer durch Riedel und Hangdellen gegliederten Landschaft keine gesicherte Abhängigkeit zu verzeichnen ist. Dies erscheint offensicht-

sichtlich, denn schon ein schwach ausgeprägtes Kleinrelief mit abwechselnden Hohl- und Vollformen hat eine erhebliche Wirkung auf den Oberflächenabfluß. Der divergierende und konvergierende Oberflächenabfluß bedingt dabei eine sehr ungleichmäßige Erosionsintensität (THIEMEYER 1988:139f.).

In den Arbeitsgebieten zeigte sich, daß die Erosions- und Akkumulationsprofile meist einen deutlichen Zusammenhang mit der Auswertung zur relativen Massenbilanz aufweisen. Die oben beschriebene Verbreitung der von Bodenerosion betroffenen Flächenbereiche auf divergenten und vertikal stark konvexen Standorten entspricht dabei den in Abschnitt 6.4 definierten Bereichen mit mittlerer bis hoher negativer Massenbilanz. Konvergente sowie konkave Reliefformen mit positiver Massenbilanz wie z. B. Hangdellen tragen häufig holozäne Abschwemmassen. Diese Sedimente liegen jedoch häufig völlig erodierten Bodenprofilen auf. Die Abtragungsbedingungen sind damit einem grundlegenden Wandel unterzogen (vgl. THIEMEYER 1988:142).

Auf vergleichbaren Standorten unter heutiger landwirtschaftlicher Nutzung sind jedoch schon innerhalb des Arbeitsgebietes sehr unterschiedliche Intensitäten der Bodenerosion festzustellen. Die lokale unterschiedliche Nutzungsgeschichte ist hierfür verantwortlich. Jedoch zeigt sich auch bei einer insgesamt geringeren Intensität der Bodenerosion ein ähnliches Verteilungsmuster der Erosions- und Akkumulationsstandorte.

Damit kann die Auswertung zur relativen Massenbilanz in der stark gegliederten Mittelgebirgslandschaft eine Kartierungsunterstützung darstellen. Die flächenhafte Kartierung bleibt jedoch wichtigstes Arbeitsmittel, da vor Ort der Bodenzustand erfaßt werden muß. Eine Auswertung von historischen Karten kann hier nur bedingt einen Aufschluß über die Geschichte des Nutzungswandels geben, da hiermit nur ein kurzer Zeitabschnitt abgedeckt werden kann.

## 7 Zusammenfassung

Die Kartierung periglazialer Deckschichten ist vor allem in den Mittelgebirgslandschaften ein wichtiges Bindeglied zwischen der klassischen geologischen Kartierung und der bodenkundlichen Landesaufnahme. Die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes zeigt daher einen deutlichen Zusammenhang mit den geomorphographischen Reliefformen auf. Mit der Verfügbarkeit von digitalen Höhendaten kann daher eine flächenhafte Relieffanalyse als ein wichtiges Hilfsmittel für die bodenkundliche und geologische Kartierung eingesetzt werden.

Mit der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Verfahren zur Relieffgliederung im Hinblick auf die räumliche Differenzierung von deckschichtenrelevanten Flächeneinheiten für die Mittelgebirgslandschaft vorgestellt. Diese werden insbesondere bezüglich der Anwendung für die bodenkundliche Landesaufnahme diskutiert.

Dem digitalen Höhenmodell (DHM) kommt als Datengrundlage für die digitale Relieffanalyse eine zentrale Bedeutung zu, was eine kritische Betrachtung der Qualität und Eignung dieser Daten erfordert. Das derzeit in Hessen beziehbare DHM ist grundsätzlich für den hier vorgestellten Zweck ungeeignet. Die Auflösung und Qualität des Höhenrasters mit 40 m x 40 m kann für geomorphographische Untersuchungen erst ab einem Maßstab von 1 : 50 000 und kleiner sinnvoll eingesetzt werden.

Angesichts der Bedeutung des DHM/DGM für eine Vielzahl von Fragestellungen - allein im geowissenschaftlichen Bereich - hat dies weitreichende Konsequenzen. Die Bereitstellung eines hochwertigen DGM mit einer Auflösung von min. 20 m x 20 m ist zumindest für Hessen in einem absehbaren Zeitraum nicht zu erwarten. Aufgrund der ähnlichen Situation in anderen Bundesländern ergibt sich für Anwendungen, die auf der Datengrundlage DHM/DGM aufbauen, daß die vorliegenden Erfahrungen und Entwicklungen zum Teil nur eingeschränkt in die Praxis umgesetzt werden können.

Aufgrund der zahlreichen Mängel des hessischen DHM wurde in Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt eine Untersuchung über Datenbestand und geeigneter Verfahren zur Herstellung eines hochwertigen DGM durchgeführt (FRIEDRICH & SEMMEL 1993). Das Interesse der Landesvermessung an der Erstellung eines hochauflösenden DHM bleibt aufgrund des hohen Aufwandes allerdings gering. Die Verfügbarkeit von hochwertigen Datengrundlagen wächst somit mittelfristig nur mit der schrittweisen Bearbeitung der Höhenplatte für die TK 5.



Auf der Grundlage des DHM können verschiedene geomorphometrisch/geomorphographische Reliefattribute abgeleitet werden. Hierzu zählen die Neigung, Exposition, Krümmung sowie komplexe Parameter, die durch eine Simulation des Oberflächenabflusses bestimmt werden. Diese stellen die geomorphometrischen Basisdaten für die Reliefanalyse und Reliefgliederung.

Mit den Arbeiten von ALTERMANN et al. (1977), FRIED (1984), FRÜHAUF (1985), SEMMEL (1975, 1977, 1985b) u. a. liegen eine Vielzahl von Beschreibungen vor, die sich vordringlich mit der Ausprägung und räumlichen Verbreitung von periglazialen Deckschichten beschäftigen. Der Zusammenhang Boden - Relief wird hierbei anhand von vertikalen Profilabfolgen dargelegt. Aufgrund des deutlichen Einflusses der horizontalen Hanggliederung auf die Deckschichten lassen sich diese Ansätze jedoch nur eingeschränkt auf eine flächenhafte, digitale Reliefanalyse übertragen. Bis heute fehlt somit eine kausale, formalisierbare Beschreibung der Deckschichtenentwicklung, die als Grundlage für eine Modellanwendung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußfaktoren Verwendung finden kann. Der Aufbau eines dynamischen Modells zur periglazialen Hangentwicklung ist somit derzeit nicht, bzw. nur unter Verwendung stark vereinfachter Modellparameter möglich.

Für die automatisierte Reliefgliederung ist zunächst ein Vergleich der geomorphographischen Reliefbeschreibung mit den Ergebnissen einer flächenhaften Kartierung von Deckschichten und Böden ein wichtiges Arbeitsmittel. Hieraus werden Kriterien für eine räumliche Reliefgliederung abgeleitet. Dies erfolgt mit einer kritischen Prüfung der Auswertungsergebnisse, um eine Dokumentation von Autokorrelationen aus Reliefauswertung und geomorphologisch gestützter Bodenkartierung zu verhindern.

Eine wichtige Informationsgrundlage für die flächenhafte Erfassung des Deckschichtenaufbaus ist die Bodenkarte von Hessen 1 : 25 000. Hiermit steht für die Mittelgebirge eine Grundlage zur Erfassung der räumlich differenzierten Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes zur Verfügung. Bei der Auswertung der einzelnen bodenkundlichen Kartenblätter 1 : 25 000 (Hessen) muß jedoch festgestellt werden, daß die Beschreibung der quartären Deckschichten in sehr unterschiedlicher Form und Qualität vorliegt. Die genaue Betrachtung der einzelnen Kartenblätter ist für die Auswertung des Zusammenhangs Relief-Deckschichten deshalb wesentlich.

Zur Charakterisierung der reliefabhängigen Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes wurden digitale Boden- bzw. Deckschichtenkarten bezüglich des Reliefs statistisch ausgewertet. Hierzu wurde eine Flächendatenbank konzipiert, die eine detaillierte Beschreibung der Deckschichten ermöglicht. Auf Grundlage dieser Flächendaten

kann nach unterschiedlichen Deckschichten und Deckschichtenabfolgen recherchiert und ausgewertet werden.

Die Analyse der Deckschichten-Relief-Beziehung auf Grundlage mittelmaßstäbiger Kartierungen zeigt einen deutlichen Zusammenhang bei der Betrachtung der Oberflächenform (Oberflächenkrümmung), Hangposition (Entfernung zur Tiefenlinie/Wasserscheide) und der Größe des Oberflächeneinzugsgebietes auf. Diese geomorphometrischen Größen sind jedoch für eine Reliefanalyse unterschiedlich zu bewerten. Während mit dem Parameter Oberflächenkrümmung eine Möglichkeit zur Beschreibung des Standortes durch eine Nachbarschaftsanalyse vorliegt, stellen die Parameter "Entfernung zur Tiefenlinie" oder "Größe des Oberflächeneinzugsgebietes" komplexe Größen einer Abflußsimulation dar. Letztere korrelieren, als geomorphometrische Größen in einem Gebiet mit einheitlichem Relief, in hohem Maße mit dem Aufbau des oberflächennahen Untergrundes. Mit zunehmender Komplexität des Reliefs nimmt jedoch der Zusammenhang ab, wenn diese Parameter einzeln betrachtet werden. Dies liegt z. B. daran, daß mit einem ständigen Wechsel der Hangformen (getreppter Hang) die Entfernung zur Tiefenlinie bzw. Wasserscheide (Hangposition) nur eine übergreifende Rolle spielt. Hier hat die lokale Relief-form entscheidenden Einfluß auf die Ausprägung der Deckschichten.

Die Neigung als isoliert betrachteter Reliefparameter zeigt mit Einschränkungen keine Zusammenhänge zur räumlichen Ausprägung der Deckschichten. Betrachtet man jedoch die Neigung im Zusammenhang mit der Oberflächenform, so ist sie ein wesentlicher Parameter zur Unterscheidung von verschieden geneigten Relief-formelementen.

Mit der Auswertung von Deckschichteneinheiten mit Hilfe dieser Reliefparameter kann eine empirische Dokumentation in Ergänzung zu einer herkömmlichen Karteninterpretation geleistet werden. Eine differenzierte Unterscheidung von Deckschichteneinheiten bspw. durch charakteristische Krümmungsradienklassen kann nicht erfolgen.

Betrachtet man jedoch statt der Gesamtheit einer Deckschichteneinheit nur einzelne Flächenobjekte, so sind diese häufig an weitgehend homogene Relief-formen gebunden. Verwendet man bspw. die Krümmung zur Ausgliederung solcher Reliefeinheiten, so zeigt sich, daß für eine Abgrenzung zu Nachbarelementen unterschiedliche Schwellenwerte (z. B. Quer-, Vertikalkrümmung) vorliegen. Eine Grenze liegt somit häufig an Relief-Diskontinuitäten oder bei gleitenden Übergängen an der Übergangsschwelle.

Mit diesen Ergebnissen werden entscheidende Kriterien für eine digitale Reliefgliederung bereitgestellt. Reliefgliederungsverfahren sollten einen objektiven geomorphographischen Ansatz verfolgen, bei dem insbesondere die Oberflächenwölbung Berücksichtigung findet. Die Abgrenzung der Reliefeinheiten erfolgt im Hinblick auf eine Ausgliederung homogener Reliefbereiche. Die Raumgliederung erfolgt damit durch eine lokale Analyse der Nachbarschaft, wodurch eine Betrachtung unterschiedlicher Reliefverhältnisse und eine blattschnittfreie Bearbeitung ermöglicht wird. Die Erstellung von Reliefauswertungskarten für die Unterstützung der Kartierung ist als einfach lesbare Karte mit hoher Detailinformation vorzunehmen. Gleichzeitig sollten die Auswertungsergebnisse auch durch GIS-Funktionalitäten weiter bearbeitet werden können, um Reliefinformationen auch für andere Aufgaben verfügbar zu machen.

Die Erstellung und Anwendung von Reliefgliederungsverfahren im Hinblick auf die räumliche Ausprägung quartärer Deckschichten muß sich somit an diesen Forderungen orientieren. Der Schwerpunkt liegt dabei insbesondere auf der Betrachtung periglazialer Deckschichten und damit auf einer detaillierten Reliefgliederung von Scheitel- und Hangbereichen für den mittel- bis großmaßstäbigen Bereich.

Mit der vorgenommenen Abgrenzung von Senkenbereichen wird zunächst versucht, die Prozeßbereiche der solifluidalen Hangüberformung von den vorwiegend fluvial geprägten Talbereichen zu trennen. Die Ergebnisse des vorgestellten Modells sind geeignet, um Auen- und Bachtäler von den Hangbereichen zu differenzieren.

Für die Bearbeitung einfacher, einheitlicher Arbeitsausschnitte kann eine sinnvolle Klassifizierung von Wölbungsattributen (Vertikal- und Querwölbung) schon zu einem einfachen Ansatz einer Reliefgliederung führen. Meist ist aber mit deutlichen Reliefunterschieden schon innerhalb eines Arbeitsausschnittes zu rechnen. Hier kann ein starres Klassifizierungsverfahren, wie es mit der Gliederung von Reliefelementen nach RICHTER (1962) vorliegt, nur mit Einschränkung Ergebnisse hervorbringen, wie sie oben gefordert werden. Daher wird ein Klassifizierungsverfahren in Anlehnung an RICHTER angestrebt, das nicht mit starren Klassengrenzen, sondern mit lokal ermittelten Abgrenzungskriterien (KR-Kriterien) arbeitet. Hierdurch wird zudem eine blattschnittfreie Bearbeitung ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen im Detail jedoch verfahrensbedingte Schwächen. Eine weiterführende Berücksichtigung von Reliefattributen über die Krümmung hinaus ist sehr einfach möglich und aus systematischer Sicht objektiv. Das von DIKAU (1988) vorgestellte hierarchische Modell führt durch Hinzunahme weiterer Reliefattribute zu einer großen Anzahl von Reliefeinheiten (Klassen), die in der Handhabung hinsichtlich einer Kartierungsunterstützung nur mit großem Aufwand ausgewertet werden können.

Durch eine getrennte Klassifizierung einzelner Reliefparameter entsteht ein Informationsverlust, da schon vor der inhaltlichen Verknüpfung durch eine graphische Verschneidung der Reliefattribute (Vertikal-, Querkrümmung, Neigung etc.) eine Gruppierung vorgenommen wird. Mit der hierarchischen Gliederung in Formelemente bis zur Formfazette mit einer sehr großen Anzahl von theoretischen Einheiten wird daher nur eine scheinbar differenzierte Reliefgliederung vorgestellt. Tatsächlich aber sind sehr viele Klassen hinsichtlich der Prozeßeigenschaften des Reliefs ähnlich, diese sind jedoch sehr schwer objektiv zusammenzufassen. Darüber hinaus wird durch Verwendung subjektiver Schwellenwerte keine befriedigende räumliche Abgrenzung von Flächenobjekten erreicht.

Diese Ergebnisse einer Reliefgliederung nach RICHTER (1962), KUGLER (1974) und DIKAU (1988) führten unter Berücksichtigung der Verfahren von KÖTHER & LEHMEIER (1993) zu einem neuen Verfahrensansatz. Hier werden die verwendeten Reliefattribute mit Hilfe multivariater Distanzen direkt in Bezug gesetzt, ohne eine Einzelklassifizierung und Verschneidung durchzuführen. Das Ziel ist dabei die Aggregation von sehr ähnlichen, räumlich benachbarten Reliefsituationen (auf Basis der Rasterzelle). Die Ergebnisse zeigen, daß hierdurch einheitliche Reliefelemente gegeneinander abgegrenzt werden können. Die "Verwandtschaft" benachbarter Reliefelemente wird durch die multivariate Distanz dokumentiert und kann durch Liniensignaturen visualisiert werden. Das Resultat einer Reliefgliederung nach diesem Verfahren ist von den verwendeten Reliefparametern und deren Gewichtung abhängig. Die Einstufung der abgegrenzten räumlichen Reliefeinheiten erfolgt erst dann, wenn das Flächenobjekt gebildet ist.

Mit Hilfe einer einfachen, leicht interpretierbaren Kartengestaltung liegt hiermit ein Verfahren vor, das die oben genannten Kriterien erfüllt. Die Möglichkeiten dieses Verfahrensansatzes gehen jedoch weit über diese Fragestellung hinaus. Durch die Zusammenfassung von benachbarten Flächeneinheiten nach den Kriterien der multivariaten Distanz ist bspw. auch eine objektive geomorphographische Hierarchisierung des Reliefs möglich.

Die Verknüpfung von Distanzverfahren und Raumbezug ermöglicht aber auch eine Verwendung dieses Verfahrens für andere raumbezogene Rasterdaten. Erste Versuche bei der Auswertung von Multispektralscannerdaten zeigen gute Ergebnisse bei der Differenzierung von einheitlichen Nutzungspartellen hinsichtlich der Pflanzenbonität. Das Verfahren bietet somit allgemein Einsatzmöglichkeiten für die Auswertung von multivariaten Rasterdaten im Hinblick auf räumliche Muster und deren Hierarchisierung.

Mit dem Verfahrensansatz zur relativen Massenbilanz werden die Krümmungs- und Neigungsdaten direkt in Bezug gesetzt. Ziel des Verfahrens ist aber die Erstellung eines Relativ-Indizes. Die Anwendung dieser Reliefanalyse liegt in dem kleinräumigen Vergleich eines hypothetischen solifluidalen Massentransportes im Hinblick auf den Faktor Relief. Diese Auswertung kann für großmaßstäbige Fragestellungen eine wichtige Hilfe bieten, da kleinste Reliefunterschiede dokumentiert werden. Für die flächenhafte Kartierung liegt hiermit eine zusätzliche Informationsebene bereit. Diese kann zur weiteren Differenzierung flächenhafter Reliefeinheiten verwendet werden.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der vorgestellten Verfahren kommt der statistische, multivariate Ansatz den Erhebungen aus der geologischen und bodenkundlichen Landesaufnahme sehr nahe. Die Ausprägung des oberflächennahen Untergrundes kann jedoch für gleiche oder ähnliche Reliefeinheiten im regionalen Vergleich unterschiedlich sein. Der geologische Untergrund, die Exposition, die Höhenlage und der Lößlehmeinfluß spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Die direkte Berücksichtigung weiterer Reliefattribute wie Exposition und Höhe über NN erbringen keine Verbesserung der Auswertungsergebnisse. Diese Parameter sind als Information sehr gut direkt aus dem Höhenlinienbild ablesbar. Hiermit werden die Möglichkeiten der digitalen Reliefgliederung und die Interpretation des Kartierers unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten in effizienter Weise gekoppelt.

Mit den vorliegenden Ergebnissen der Reliefgliederung werden keine Flächeneinheiten ermittelt, die spezifische Deckschichteneinheiten darstellen. Die abgegrenzten Objekte repräsentieren vielmehr eine, an den Einstellungsparametern orientierte, geomorphographische Gliederung zur Abbildung deckschichtenrelevanter Flächeneinheiten. Hiermit liegt eine subjektiv vorgenommene Auswertung vor, der aber ein durchgehendes Klassifizierungsschema zugrunde liegt. Die Ergebnisse der Reliefgliederung zeigen dabei einen erkennbaren Zusammenhang mit kartierten Einheiten. Dies konnte für verschiedene Reliefbereiche am Beispiel des Arbeitsgebietes Grävenwiesbach dokumentiert werden.

Die Auswertung eines statistischen Zusammenhangs zwischen ausgegliederten Reliefeinheiten und Kartiereinheiten ist kritisch zu betrachten. Einerseits stellt die bodenkundliche Kartierung eine subjektive Aufnahme dar, die mit Einschränkung die örtlichen Standortverhältnisse wiedergibt. Zudem ist das Relief nur ein Faktor für die Ausprägung der Deckschichten. Ein statistischer Zusammenhang kann daher nur bedingt vorliegen. Wertet man die Reliefgliederung jedoch analog aus, so können weitere, z. T. schwer formalisierbare Parameter bei der Interpretation berücksichtigt werden. Hierzu gehört z. B. der regional unterschiedliche Einfluß von Lößlehm.

Eines der größten Probleme bleibt die holozäne anthropogene Überprägung der Landschaft, die durch ihre historische Landnutzung zu einer erheblichen Veränderung der Standortverhältnisse geführt hat. Die Bodenerosion läßt sich dabei nur bedingt durch das Relief erklären. Neben dem Relief ist vor allem die Nutzungsgeschichte eines Standortes für den heutigen Bodenzustand in entscheidendem Maße verantwortlich. Dabei reicht die Auswertung historischer Kartenwerke nicht aus. Die vom Mittelalter bis zum Neolithikum zurückreichende Landnutzungsgeschichte muß gleichfalls Berücksichtigung finden.

Die Ergebnisse weisen für einige Bereiche auf weiteren Forschungsbedarf hin. Wesentlich erscheint hier zunächst die Kooperation mit den Landesvermessungsämtern, um mittelfristig zu einer flächendeckenden, qualitativ hochwertigen und einheitlichen Datengrundlage zu gelangen. Im Bereich der Deckschichtenforschung besteht dringender Bedarf an Erkenntnissen bezüglich der Prozeßdynamik auf unterschiedlichen Ausgangsgesteinen. Darüber hinaus ist der räumlich unterschiedlich starke Einfluß von Löß und Lößlehm noch nicht ausreichend geklärt. Mit der Integration der geologischen Verhältnisse und einer verbesserten Berücksichtigung der Löß- bzw. Lößlehmverbreitung könnte die Auswertung einer geomorphographischen Relieffanalyse noch weiter gegliedert und verbessert werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- ADAM, F. & KANTELHARDT, H. (1987): Das Konzept für ein digitales Geländemodell in Hessen. - Allg. Vermess.-Nachr., **9**: 294-298; Karlsruhe.
- AG Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. - BGR u. Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland [Hrsg.]: 3. Aufl.: 331 S.; Hannover.
- AG Bodenkunde (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. - BGR u. Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland [Hrsg.]: 4. Aufl.: 392 S.; Hannover.
- AHNERT, F. (1970): An approach towards a descriptive classification of slopes. - Z. Geomorph., N. F., Suppl., **9**: 71-84; Berlin, Stuttgart.
- AHNERT, F. (1973): COSLOP2 - A comprehensive model program for simulating slope profile development. - Geocom Programs, **8**: 24 S.; London.
- AHNERT, F. (1976): Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of Landform development. - Z. Geomorph., N. F., Suppl., **25**: 29-49; Berlin, Stuttgart.
- AK TOP der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (1991): Standardisierung bei der Abgabe von topographischen Höhendaten. - Vorbericht AK TOP zum TOP 2.1 der 40. AK TOP-Tagung: 7 S.; Bonn.
- ALTERMANN, M. (1993): Gliederung von pleistozänen Lagen. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **72**: 825-828; Oldenburg.
- ALTERMANN, M. & MAUTSCHKE, J. & ERBE, C. & PRETZSCHEL, M. (1977): Kennzeichnung der quartären Deckschichten im Unterharz. - Petermanns Geogr. Mitt., **121**(2): 95-110; Gotha, Leipzig.
- ANIYA, M. (1985): Landslide-Susceptibility Mapping in the Amahata River Basin, Japan. - Ann. Assoc. Amer. Geographers, **75**: 102-114; Washington D. C.
- ARMSTRONG, A. C. (1976): A three-dimensional simulation of slope forms. - Z. Geomorph., N. F., Suppl., **25**: 20-28; Berlin, Stuttgart.
- ARMSTRONG, A. C. (1980): Soils and slopes in a humid temperate environment - a simulation study. - Catena, **7** (4): 327-338; Braunschweig.

- BARSCHE, D. & STÄBLEIN, G. [Hrsg.] (1978): EDV gerechter Symbolschlüssel für die geomorphologische Detailaufnahme. - Berliner Geogr. Abh., **30**: 63-78; Berlin.
- BAUER, A. (1993): Bodenerosion in den Waldgebieten des östlichen Taunus in historischer und in heutiger Zeit - Ausmaß, Ursachen und geoökologische Auswirkungen. - Frankfurter geowiss. Arb., Ser. D, **14**: 196 S.; Frankfurt a. M.
- BAUER, J. (1985): Digitales Reliefmodell (DRM) - Benutzerhandbuch. - TU Berlin, Fachgebiet Reg. Bodenkde.: 28 S.; Berlin. - [Unveröff.].
- BAUER, J. & ROHDENBURG, H. & BORK, H. - R. (1985): Ein Digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse. - Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, **10**: 1-15; Braunschweig.
- BORK, H. R. & DIEKCRÜGER, B. & ROHDENBURG, H. (1985): Applikation eines deterministischen Gebietsmodells zur Beschreibung der Wasserflüsse in Agrarökosystemen. - Landschaftsgenese u. Landschaftsökologie, **10**: 83-95; Braunschweig.
- BIBUS, E. (1971): Zur Morphologie des südlichen Taunus und seiner Randgebiete. - Rhein-Main. Forsch., **74**: 279 S.; Frankfurt a. M.
- BIBUS, E. & NAGEL, G. & SEMMEL, A. (1976): Periglaziale Reliefformung im zentralen Spitzbergen. - Catena, **3**: 29-44; Gießen.
- Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1987): Maßnahmen zum Bodenschutz. - Beschluß des Bundeskabinetts vom 8.12.1987: 70 S.; Bonn.
- CONACHER, A. J. & DALRYMPLE, J. B. (1977): The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. - Geoderma, **18**: 1-154; Amsterdam, Oxford, New York.
- DALCHOW, C. (1991): EDV-gestützte Prognose der Verbreitung und Eigenschaften der quartären Sedimente im Einzugsgebiet des Krummbaches (nördliches Harzvorland). - Bodenökologie und Bodengenese, **1**: 167 S.; Berlin.
- DALRYMPLE, J. B. & BLONG, R. J. & CRONACHER, A. J. (1968): An hypothetical nine unit landsurface model. - Z. Geomorph., Suppl., **12**: 60-76; Berlin, Stuttgart.
- DIKAU, R. (1988): Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefeinheiten. - Heidelberger Geographische Bausteine, **5**: 1-45; Heidelberg.



- DIKAU, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. - In: HAPER, J. [Hrsg.]: Three Dimensional Application in Geographic Information Systems: 51-77; London.
- DIKAU, R. (1990): Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. - Z. Geomorph., N. F., Suppl., **80**: 45-55; Berlin, Stuttgart.
- DIKAU, R. (1992): Computergestützte Geomorphologie. - Habilschr. Fak. Geowiss., Univ. Heidelberg: 303 S.; Heidelberg. - [Unveröff.].
- EBENER, H. (1992): Digital Terrain Models and their Applications. - GIS, **3**: 27-30; Karlsruhe.
- EASTMAN, J. R. (1990): IDRISI A Grid-Based Geographic Analysis System. Revision/Update Information Vers. 3.2. - The graduate school of geography Clark Univ.: 363 S.; Worcester.
- ELGHAZALI, M. S. & HASSAN, M. M. (1986): A simplified terrain relief classification from DEM data using finite differences. - Geo-Processing, **3**: 167-178; Zürich.
- EVANS, I. S. (1972): General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. - In: CHORLEY, R. J. [Hrsg.]: Spatial Analysis in Geomorphologie: 17-90; London.
- EVANS, I. S. (1980): An integrated system of terrain analysis and slope mapping. - Z. Geomorph., N. F., Suppl., **36**: 274-295; Berlin, Stuttgart.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (1990): Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke (MTV) im Rheinischen Schiefergebirge. - Relief, Boden, Paläoklima, **6**: 192 S.; Stuttgart.
- FICKEL, W. (1977): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen 1 : 25 000, Blatt 5716 Oberreifenberg: 120 S.; Wiesbaden.
- FIEDLER, H. J. (1964): Die Untersuchung von Böden. - Bd. 1: 235 S.; Dresden, Leipzig.
- FLECK, W. (1994): Entwurf Kapitel "Oberflächenrelief". - Entwurf zur bodenkundlichen Kartieranleitung, 4. Aufl.; Freiburg i. Br. - [Unveröff.].
- FRIED, G. (1984): Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein-Odenwald. - Frankfurter geowiss. Arb., Ser. D, **4**: 201 S.; Frankfurt a. M.

- FRIEDRICH, K. (1993a): Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung Digitaler Höhenmodelle für ein Bodeninformationssystem in Hessen. - Geol. Jb. Hessen, **121**: 151-168; Wiesbaden.
- FRIEDRICH, K. (1993b): Anwendung digitaler Höhenmodelle zur automatisierten Kartierung von Deckschichten. - Abschlußbericht zum DFG-Projekt Th 240/1-6: 38 S.; Wiesbaden. - [Unveröff.].
- FRIEDRICH, K. & SEMMEL, A. (1993): Externe Daten und Datenvisualisierung im FIS Bodenkunde, Teil 1 Untersuchungen zur Qualität und Verwendbarkeit des Digitalen Höhenmodells Hessen im FIS Bodenkunde. - HLfB-Bericht: 51 S.; Wiesbaden. - [Unveröff.].
- FRIEDRICH, K. & VORDERBRÜGGE, T. (1993): Möglichkeiten der Auswertung von Bodenkarten auf periglaziale Deckschichten unter Verwendung eines Bodeninformationssystems. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **72**: 899-902; Oldenburg.
- FRITSCH, D. (1991): Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle. - Dt. Geodät. Komm., **C 369**: 113 S.; München.
- FRÜHAUF, M. (1985): Beiträge zum Boden- und Substratwandel am NE Harzrand. - Petermanns Geogr. Mitt., **3**: 171-175; Gotha, Leipzig.
- FUCHS, A. (1978): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Blatt 5716 Oberreifenberg, 3. erg. Aufl.: 101 S.; Wiesbaden.
- GRIMM, F. & HAASE, H. & KUGLER, H. & LAUKNER, M. & RICHTER, H. (1964): Empfehlung für den Inhalt und die Bearbeitung einer Geomorphologischen Grundkarte im Maßstab 1: 10 000. - Petermanns Geogr. Mitt., Jg. **1964** (1/2): 150-157; Gotha.
- GÜNDRA, H. (1992): Untersuchungen zur Relief- und Bodenverbreitung im Einzugsgebiet des Biddersbach, Nord-Kraichgau. - Dipl. Arb., Geogr. Inst., Univ. Heidelberg: 86 S.; Heidelberg. - [Unveröff.].
- HEINEKE, H. - J. & KLEEFISCH, B. & OELKERS, K. - H. (1988): A Model for the Computerized Construction of Pedological Field Base Maps. - Geol. Jb., **A 104**: 309-318; Hannover.
- HENNINGS, V. & SPONAGEL, H. (1991): Wege der zukünftigen Bodenkartierung im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung. - Geol. Jb., **A 126**: 21-36; Hannover.

- HENSEL, H. & BORK, H. R. (1987): EDV-gestützte Erstellung von Erosions-Akkumulations-Karten. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **53**: 39-45; Oldenburg.
- Hessisches Landesvermessungsamt (o. J.): Digitales Höhenmodell. - Informationsblatt zum DHM Hessen: 5 S.; Wiesbaden.
- HINZE, C. & JERZ, H. & MENKE, M. & STAUDE, H. (1989): Geogenetische Definition quartärer Lockergesteine für die Geologische Karte 1: 25 000 (GK25). - Geol. Jb., **A 112**: 243 S.; Hannover.
- HOFFMANN, K. (1993): Modellierung zu Boden - Reliefbeziehungen im Lößhügelland, Süd-Kraichgau. - Dipl. Arb., Geogr. Inst., Univ. Heidelberg: 79 S; Heidelberg. - [Unveröff.].
- HORMANN, K. (1968): Rechenprogramm zur morphometrischen Kartenauswertung. - Schr. Geogr. Inst., Univ. Kiel, **29** (2): 154 S.; Kiel.
- HORMANN, K. (1971): Morphometrie der Erdoberfläche. - Schr. Geogr. Inst., Univ. Kiel, **36**: 178 S; Kiel.
- HORN, M. & KULICK, J. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt 4720 Waldeck: 227 S.; Wiesbaden.
- HÖLTING, B. & LAEMMLEN, M. & SEMMEL, A. (1967) Quartär. - Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt 5224 Eiterfeld: 78-89; Wiesbaden.
- HÖPFNER, J. (1990): Methoden zur Höheninterpolation in digitalen Reliefmodellen. - Vermessungstechnik, 38 Jg., **9**: 317-320; Berlin.
- KAMMERER, P. (1987): Computergestützte Reliefanalyse unter Verwendung des Digitalen Geländemodells. - Münchner Geogr. Arb., **A 36**: 94 S.; München.
- KARRASCH, H. (1970): Das Phänomen der klimabedingten Reliefasymmetrie in Mitteleuropa. - Göttinger Geogr. Abh., **56**: 299 S.; Göttingen.
- KLEEFISCH, B. (1993): Die automatisierte Vorhersage der Bodenverbreitung - eine Anwendung für wissensbasierte Systeme? - Geol. Jb., **F 27**: 39-57; Hannover.
- KLEEFISCH, B. & KÖTHE, R. (1993): Wege zur rechnergestützten bodenkundlichen Interpretation digitaler Reliefdaten. - Geol. Jb., **F 27**: 59-122; Hannover.

- KNEIB, W. (1979): Untersuchungen zur Gruppierung von Böden als Grundlage für die Bodenkartierung. - Diss., Univ. Kiel: 150 S.; Kiel.
- KÖTHER, R. (1988): Versuch einer computergesteuerten morphographisch-prozeßorientierten Reliefanalyse für die bodenkundliche Kartierung. - Dipl. Arb., Geogr. Inst., Univ. Hannover: 228 S. u. Anl.; Hannover. - [Unveröff.].
- KÖTHER, R. & LEHMEIER, F. (1991): Digitale Reliefanalyse - Ein Projekt zur geomorphologischen Auswertung Digitaler Gelände Modelle (DGM). - Freiburger geogr. Hefte., **34**: 99-109; Freiburg i. Br.
- KÖTHER, R. & LEHMEIER, F. (1993): SARA - Ein System zur Automatischen Relief-Analyse. - Standort, **4**: 11-21; Köln.
- KÖTHER, R. & LEHMEIER, F. (1994a) : SARA System zur Automatischen Relief-Analyse - Morphographie. - Benutzerhandbuch Programm SARA-GR Version 1.15; Göttingen. - [Unveröff.].
- KÖTHER, R. & LEHMEIER, F. (1994b): SARA System zur Automatischen Relief-Analyse - Morphometrie. - Benutzerhandbuch Programm SARA-ME Version 2.22; Göttingen. - [Unveröff.].
- KUGLER, H. (1964): Die geomorphologische Reliefanalyse als Grundlage großmaßstäbiger geomorphologischer Kartierung. - Wiss. Veröff. Dt. Inst. f. Landeskde., NF, **21/22**: 541-655; Leipzig.
- KUGLER, H. (1974): Das Georelief und seine kartographische Modellierung. - Diss. B, Martin-Luther Univ. Halle-Wittenberg; Halle-Wittenberg: 514 S. - [Unveröff.].
- KÜHN, D. & ALTERMANN, M. & SPIES, E. - D. (1993): Vorschlag zur Substratgliederung. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **72**: 989-994; Oldenburg.
- KUNDERT, K. (1988): Untersuchungen zur automatischen Klassifikation von räumlichen Einheiten. - Geoprocessing Reihe, **7**: 113 S.; Zürich.
- LARSON, M & SHAPIRO, M. & TWEDDALE, S. (1991): Performing Map Calculation on GRASS Data: r.mapcalc Program Tutorial. - U. S. Army Corps Engineers Construction, Environmental Division: 13 S.; Champaign.
- LEHMEIER, F. (1991): Vergleichende Zusammenstellung der digitalen Geländemodelle (DGM) der deutschen Bundesländer (Stand 1990/91). - Freiburger geogr. Hefte, **34**: 77-80; Freiburg i. Br.

- LEHMEIER, F. (1993): Auszug des Symbolschlüssels Geomorphologie (DARG). - Geol. Jb., F 26: 47-135; Hannover.
- LESER, H. (1978): Landschaftsökologie. - 2. Aufl.: 433 S.; Stuttgart.
- LESER, H. & STÄBLEIN, G. [Hrsg.] (1975): Geomorphologische Kartierung - Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten 1: 25 000. - Berliner Geogr. Abh., Sonderh.: 39 S.; Berlin.
- LORZ, K. (1992): Schwermetallverteilung in Böden des Hintertaunus unter besonderer Berücksichtigung periglazialer Schuttdecken. - Dipl. Arb., Univ. Frankfurt, Fachber. Geographie: 109 S.; Frankfurt a. M. - [Unveröff.].
- MACHANN, R. & SEMMEL, A. (1970): Historische Bodenerosion auf Wüstungsfluren deutscher Mittelgebirge. - Geogr. Zeitschr., 58: 250-267; Wiesbaden.
- MEYER, H. - H. & KOTTMEIER, C. (1989): Die atmosphärische Zirkulation in Europa im Hochglazial der Weichsel-Eiszeit - abgeleitet von Paläowind-Indikatoren und Modellsimulationen. - Eiszeitalter u. Gegenwart, 39: 10-18; Hannover.
- MICHELS, F. (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt 5617 Usingen. - 2. erg. Aufl.: 92 S.; Wiesbaden.
- MOLDENHAUER, K. - M. (1992): Kennzeichnung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen unter Berücksichtigung geogener Grundgehalte sowie anthropogener Zusatzbelastung. - Forschungsvorh. der GLÄ, Teil 2, Arbeitsbl. IV/2 Regionalisierung Bergland, HLFB-Bericht: 46 S.; Wiesbaden. - [Unveröff.].
- MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M. (1967): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Blatt 5224 Eiterfeld. - 213 S.; Wiesbaden.
- MÜLLER, K. H. & RASCHKE, N. (1991): Geographische Inventur. - In: BMFT-Forschungsvorhaben modellhafte Erarbeitung eines ökologisch begründeten Sanierungskonzeptes für die Lahn, Teilpr. 3: Flächenbezogene Nutzungen, 1. Zwischenbericht: 9-16; Gießen. - [Unveröff.].
- OELKERS, K. - H. (1984): Datenschlüssel Bodenkunde, Symbole für die automatische Datenverarbeitung bodenkundlicher Geländedaten. - BGR und den Geologischen Landesämter der Bundesrepublik Deutschland [Hrsg.]; 100 S.; Hannover.
- OELKERS, K. - H. (1993): Aufbau und Nutzung des Niedersächsischen Bodeninforma-

tionssystem NIBIS - Fachinformationssystem Bodenkunde (FIS BODEN). - Geol. Jb., **F 27**: 5-38; Hannover.

OELKERS, K. - H. & VINKEN, R. (1988): Neue Wege bei der Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen für den Bodenschutz im Rahmen eines bodenkundlichen Dienstes. - In: ROSENKRANZ, D. & EINSELE, G. & HARRESS, H. - M. [Hrsg.]: Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Abschn. 3060, Landschaft und Grundwasser: 25 S.; Berlin.

PENCK, A. (1894): Morphologie der Erdoberfläche. - Bd. 1: 471 S. u. Bd. 2: 696 S.; Stuttgart.

PIKE, R. J. (1988): The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. - Math. Geology, **20** (5): 491-511; New York.

PLASS, W. (1968): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen 1: 25 000, Blatt 4720 Waldeck: 144 S.; Wiesbaden.

PLASS, W. (1969) Die Böden. - Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1: 25 000, Blatt 4720 Waldeck: 182-190; Wiesbaden.

POSER, H. (1948): Boden und Klimaverhältnisse in Mittel- und Westeuropa während der Würmeiszeit. - Erdkunde, **2**: 53-68; Bonn.

POSER, H. (1951): Die nördliche Lößgrenze in Mitteleuropa und das spätglaziale Klima. - Eiszeitalter und Gegenwart, **1**: 27-55; Öhringen.

PREUSS, J. & VINKEN, R. & VOSS, H. - H. (1991): Symbolschlüssel Geologie. Symbole für die Dokumentation und Automatische Datenverarbeitung (ADV) geologischer Feld- und Aufschlußdaten. - 3., vollst. überarb. Aufl.: 328 S.; Hannover.

REINHARDT, W. (1991): Interaktiver Aufbau hochqualitativer digitaler Geländemodelle an photogrammetrischen Stereosystemen. - Dt. Geodät. Komm., **C 381**: 79 S.; München.

RICHTER, H. (1962): Eine neue Methode der großmaßstäbigen Kartierung des Reliefs. - Petermanns Geogr. Mitt., **106**: 309-312; Gotha.

ROESCHMANN, G. & LEHMEIER, F. (1993): Vorschläge zur morphographischen Kennzeichnung des Oberflächenreliefs für punktbezogene geowissenschaftliche Profilaufnahmen (REPA). - Geol. Jb., **F 26**: 3-46; Hannover.

- ROHDENBURG, H. (1971): Einführung in die Klimagenetische Geomorphologie anhand eines Systems von Modellvorstellungen am Beispiel des fluviatilen Abtragungsreliefs. - 2. Aufl.: 350 S.; Gießen.
- ROHDENBURG, H. (1989): Landschaftsökologie - Geomorphologie [Aus d. Manusk. bearb. u. hrsg. v. Margot Rohdenburg]. - 220 S.; Cremlingen-Destedt.
- ROHDENBURG, H. & SABELBERG, U. & WAGNER, H. (1976): Sind konkave und konvexe Hänge prozeßspezifische Formen? - *Catena*, **3**: 113-136; Gießen.
- RUHE, R. V. & WALKER, P. H. (1968): Hillslope models and soil formation, 1, Open Systems. - Trans. 9th. Int. Congr. Soil Sci., **4**: 551-560; Sydney, London, Melbourne.
- SAS Institute Inc. (1988a): SAS Procedures Guide, Release 6.03 Edition. - 441 S.; Cary, NC (U.S.A.).
- SAS Institute Inc. (1988b): SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. - 1028 S.; Cary, NC (U.S.A.).
- SCHILLING, W. & WIEFEL, H. (1962): Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes. - *Geologie*, **11**: 428-460; Berlin.
- SCHLOSSMACHER, K. (1983): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt 5616 Grävenwiesbach. - 2., erg. Aufl.: 94 S.; Wiesbaden.
- SCHÖNHALS, E. (1957): Spätglaziale äolische Ablagerungen in einigen Mittelgebirgen Hessens. - *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **8**: 5-17; Öhringen.
- SCHÖNHALS, E. (1974): Die Bedeutung geologischer, insbesondere quartärgeologischer Vorgänge für die Bodenbildung in Hessen. - *Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges.*, **18**: 11-17; Oldenburg.
- SEMMELE, A. (1961): Beobachtungen zur Genese von Dellen und Kerbtälchen im Löß. - *Rhein-Main. Forsch.*, **50**: 135-140; Frankfurt a. M.
- SEMMELE, A. (1964): Junge Schuttdecken in hessischen Mittelgebirgen. - *Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch.*, **92**: 275-285; Wiesbaden.
- SEMMELE, A. (1966a): Erläuterungen zur Bodenkarte von Hessen 1: 25 000, Blatt 5224 Eiterfeld: 89 S.; Wiesbaden.

- SEMMELE, A. (1966b): Zur Entstehung von Flächen und Schichtstufen im nördlichen Rhönvorland. - Tagber. u. wiss. Abh. dt. Geogr. Tag Bochum **1965**: 340-350; Wiesbaden.
- SEMMELE, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. - Frankfurter geogr. Hefte, **45**: 133 S.; Frankfurt a. M.
- SEMMELE, A. (1972): Untersuchungen zur jungpleistozänen Talentwicklung in deutschen Mittelgebirgen. - Z. Geomorph., N. F., **14**: 105-112; Berlin, Stuttgart.
- SEMMELE, A. (1975): Schuttdecken im Bundsandstein-Odenwald. - Aufschluß, Sonderbd. **27**: 321-329; Heidelberg.
- SEMMELE, A. (1977): Grundzüge der Bodengeographie. - Studienbücher Geographie, 1. Aufl.: 120 S.; Stuttgart.
- SEMMELE, A. (1978): Böden und Bodenkunde in der geomorphologischen Forschung. - In: Festschr. J. FINK: 511-520; Wien.
- SEMMELE, A. (1985a): Periglazialmorphologie. - Erträge der Forsch., **231**: 116 S.; Darmstadt.
- SEMMELE, A. (1985b): Geomorphologie als Hilfsmittel der Bodenkartierung. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **43** (II): 789-794; Oldenburg.
- SEMMELE, A. (1991): Relief, Gestein, Boden - Grundlagen der Physischen Geographie I. - 148 S.; Darmstadt.
- SEMMELE, A. (1993): Bodenerosionsschäden unter Wald - Beispiele aus dem Kristallinen Odenwald und dem Taunus. - Jber. wetterau. Ges. ges. Naturkunde: **144.-145.** Jg.: 5-15; Hanau.
- SEMMELE, A. (1994): Zur umweltgeologischen Bedeutung von Hangsedimenten in deutschen Mittelgebirgen. - Z. dt. geol. Ges., **145**: 225-232; Hannover.
- SEMMELE, A. & PLASS, W. (1965): Spätkaltzeitliche Umlagerungen in Parabraunerde-Profilen. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **4**: 33-40; Oldenburg.
- SIEGBURG, W. (1987): Großmaßstäbige Hangneigungs- und Hangformanalyse mittels statistischer Verfahren. - Bonner Geogr. Abh., **75**: 243 S.; Bonn.



- SOHLBACH, K. (1978): Computergestützte geomorphometrische Analyse von Talformen. - Gött. Geogr. Abh., **71**: 210 S.; Göttingen.
- SPIESS, E. D. (1991): Böden und Deckschichten der Münchberger Hochfläche und des Frankenwaldes. - Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges., **64**: 139-210; Oldenburg.
- STÄBLEIN, G. (1981): Geomorphologische Standortaufnahme mit dem EDV-Symbol-schlüssel, Beispiele von Dateien und Auswertungen. - Z. Geomorph., N. F., **39**: 39-49; Berlin, Stuttgart.
- STRAHLER, A. N. (1956): Quantitative Slope Analysis. - Geol. Soc. Amer. Bull., **67**: 571-596; Boulder (Colorado).
- WALTHER, C. (1994): Vergleich automatisch ermittelter morphographischer Relief-einheiten mit Ergebnissen der bodenkundlichen Kartierung mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS). - Dipl. Arb., Geogr. Inst., Univ. Göttingen: 111 S.; Göttingen.
- WEIBEL, R. (1989): Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung. - Geoprocessing Reihe, **15**: 218 S.; Zürich.
- WEIBEL, R. (1990): Verarbeitung und Anwendung digitaler Geländemodelle im Bereich der Geographie. - Geographica Helvetica, **4**: 145-153; Basel.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. - USDA Agric. Handbook, **537**: 58 S.; Washington D. C.
- WITTMANN, O. (1991): Berichte aus dem Arbeitskreis für Bodensystematik der DBG. - Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges., **66** (1): 69-74; Oldenburg.
- WU, HE-HAI (1981): Prinzip und Methode der Automatischen Generalisierung der Relief-formen. - Nachr. Kart. Vermess., Rh. I, **85**: 163-174; Frankfurt a. M.
- YOUNG, A. (1963): Deductive Models of Slope Evolution. - Nachr. Akad. Wiss. Göttingen II, Math.-Phys. Klasse: 45-66; Göttingen.



## 9 Anhang



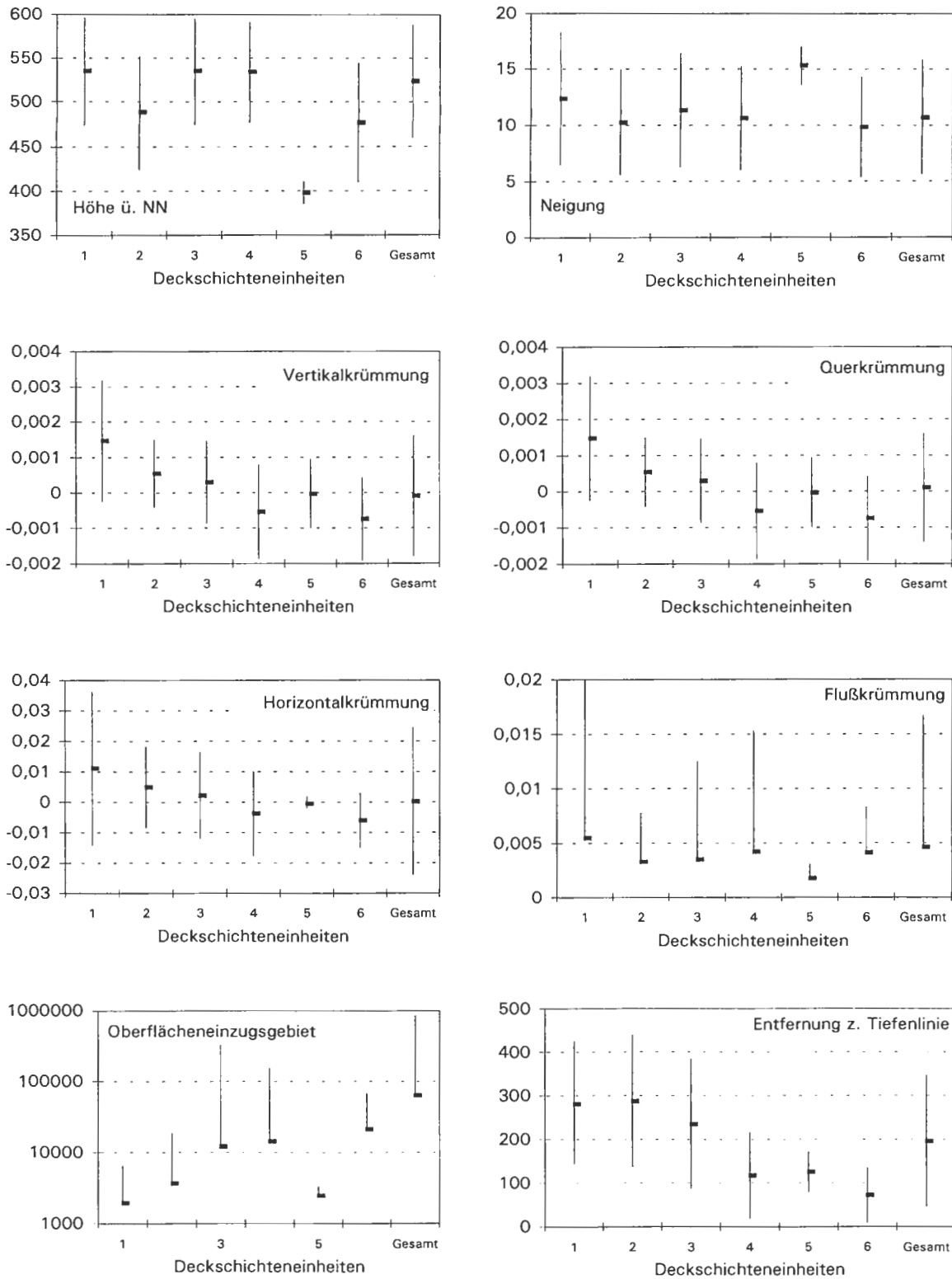


Abb. A1 Mittelwerte und Standardabweichung verschiedener Reliefparameter, getrennt nach Deckschichteneinheiten (Arbeitsgebiet Oberreifenberg)

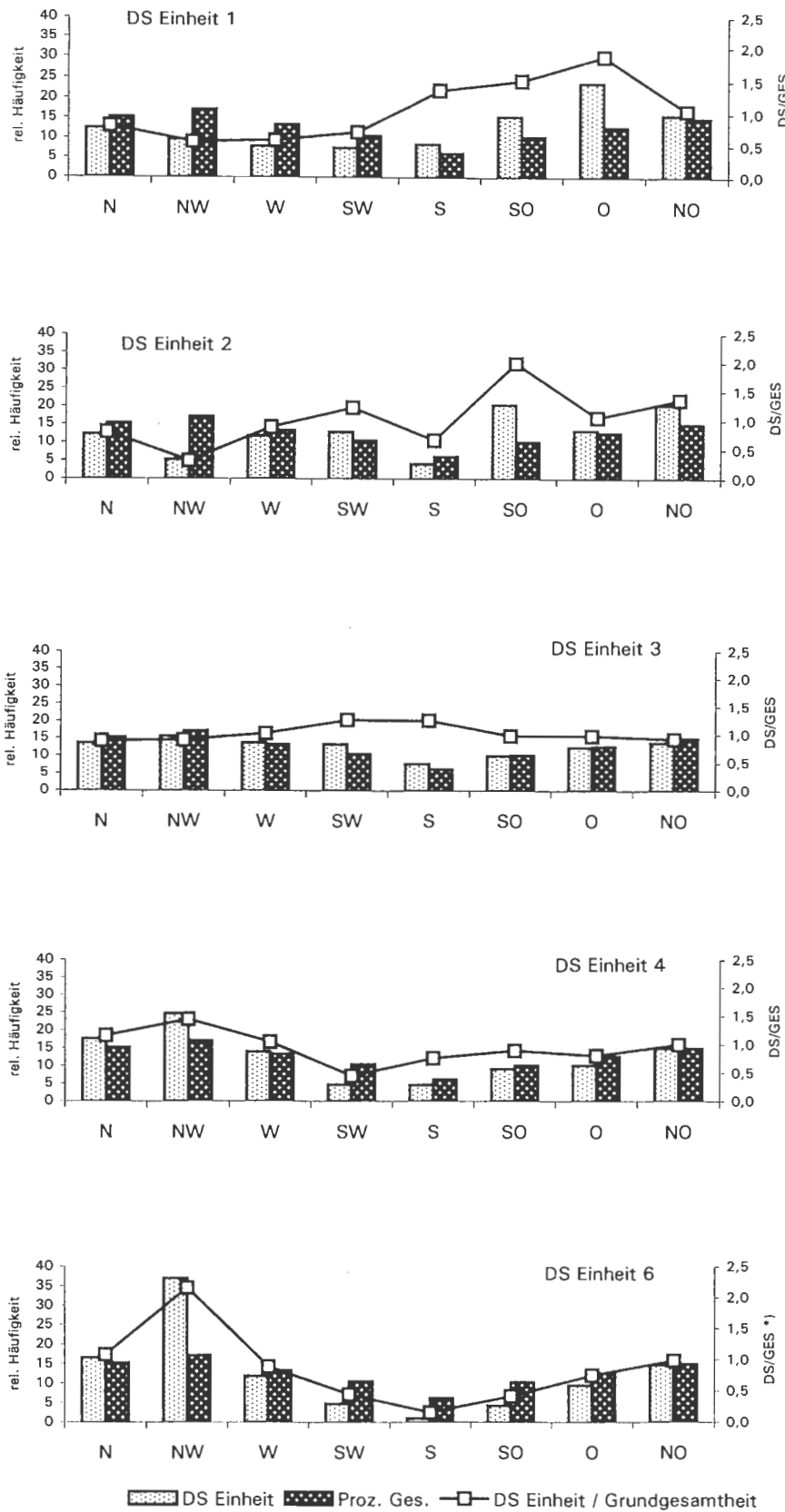


Abb. A2 Relative Häufigkeit der Exposition (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

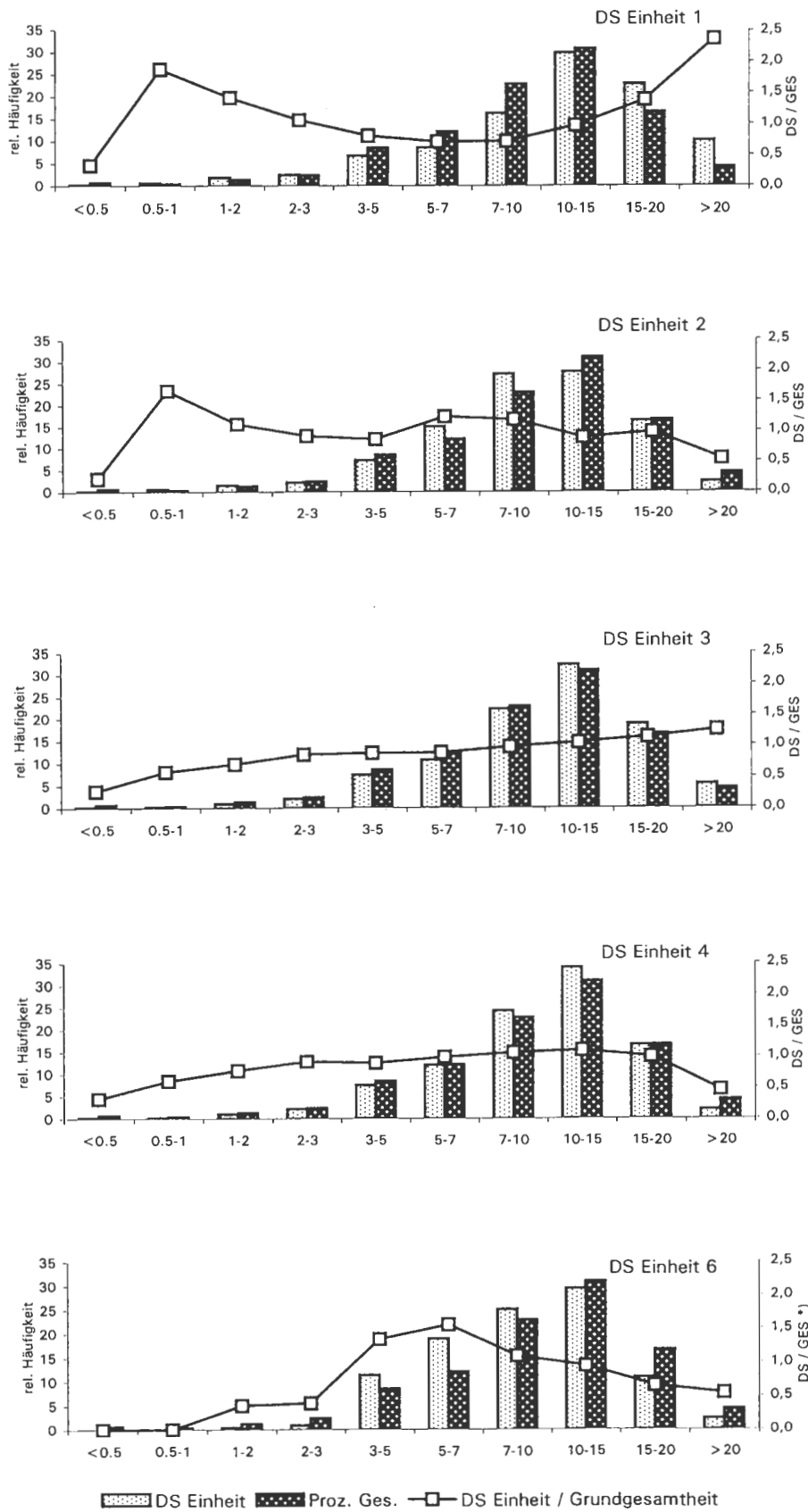


Abb. A3 Relative Häufigkeit der Neigung in Grad (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

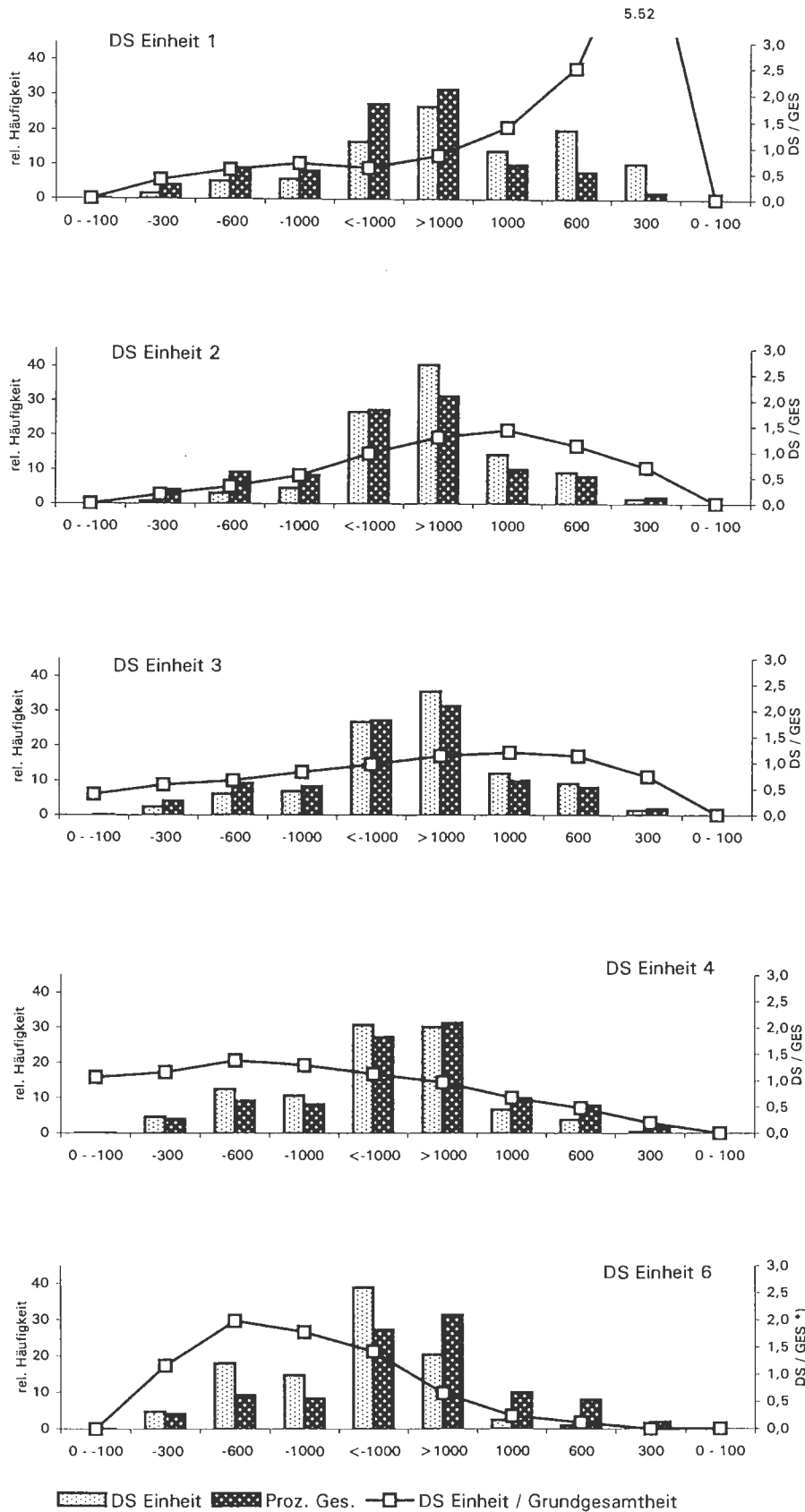


Abb. A4 Relative Häufigkeit der Vertikalkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet



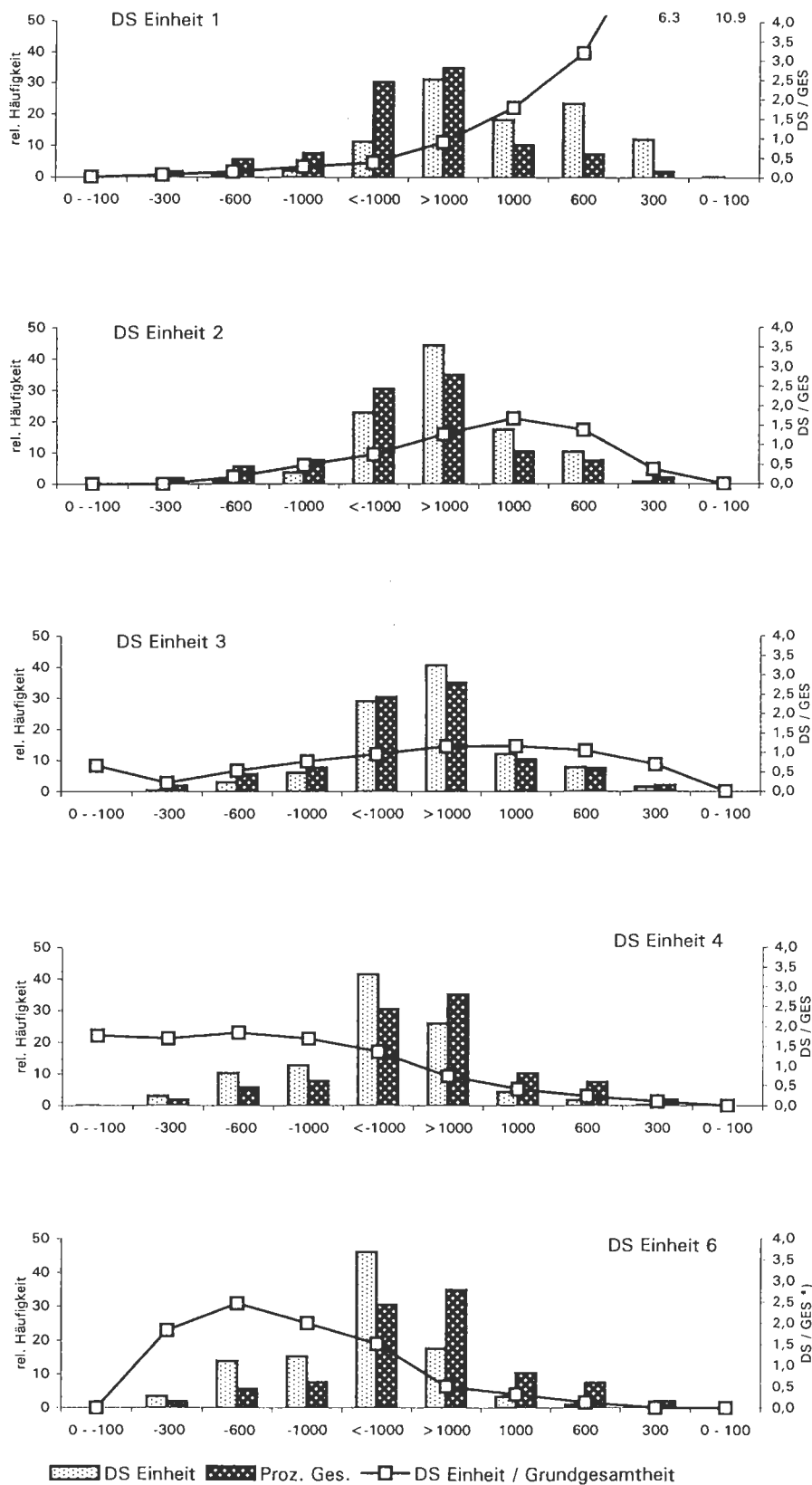


Abb. A5 Relative Häufigkeit der Querkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

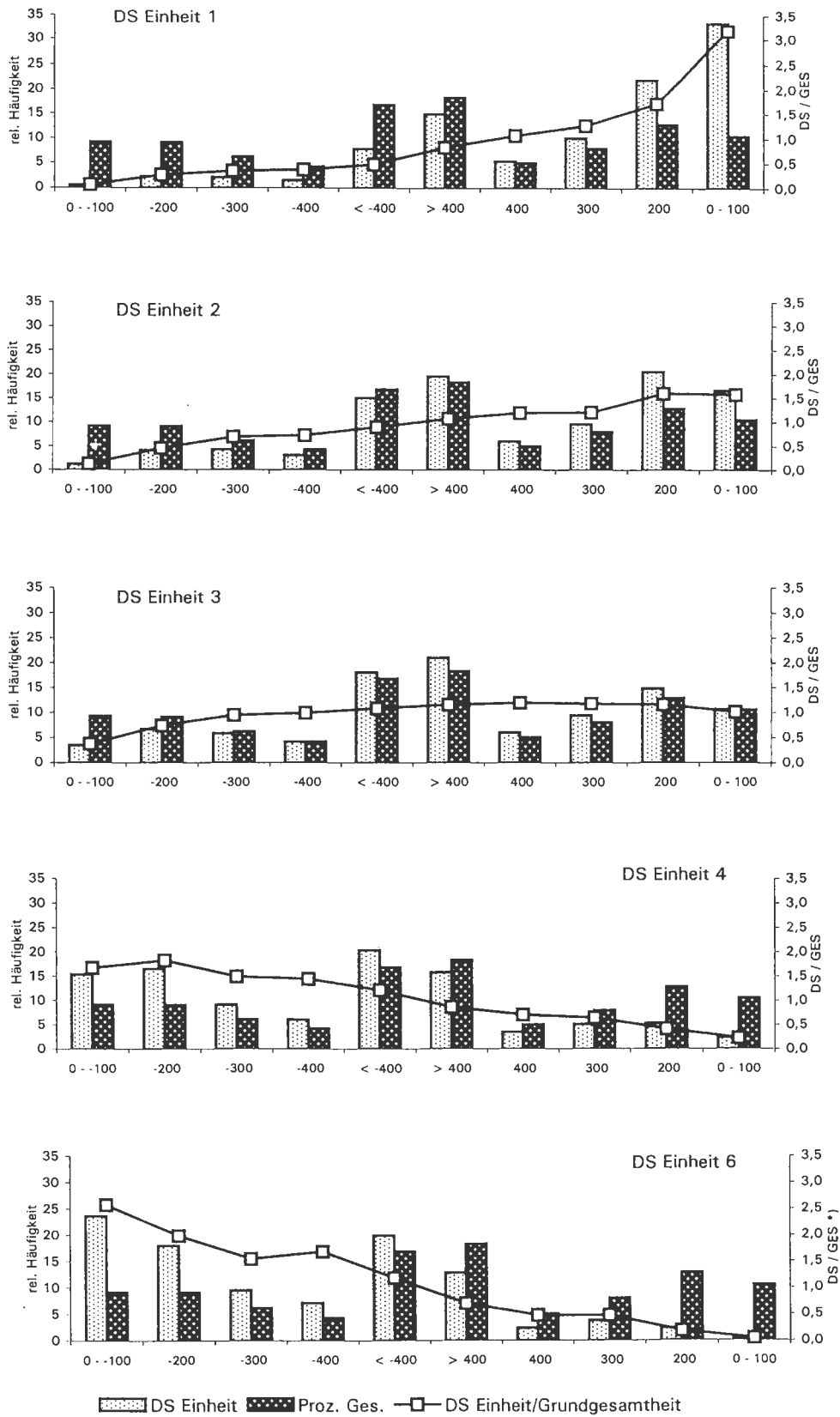


Abb. A6 Relative Häufigkeit der Horizontalkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

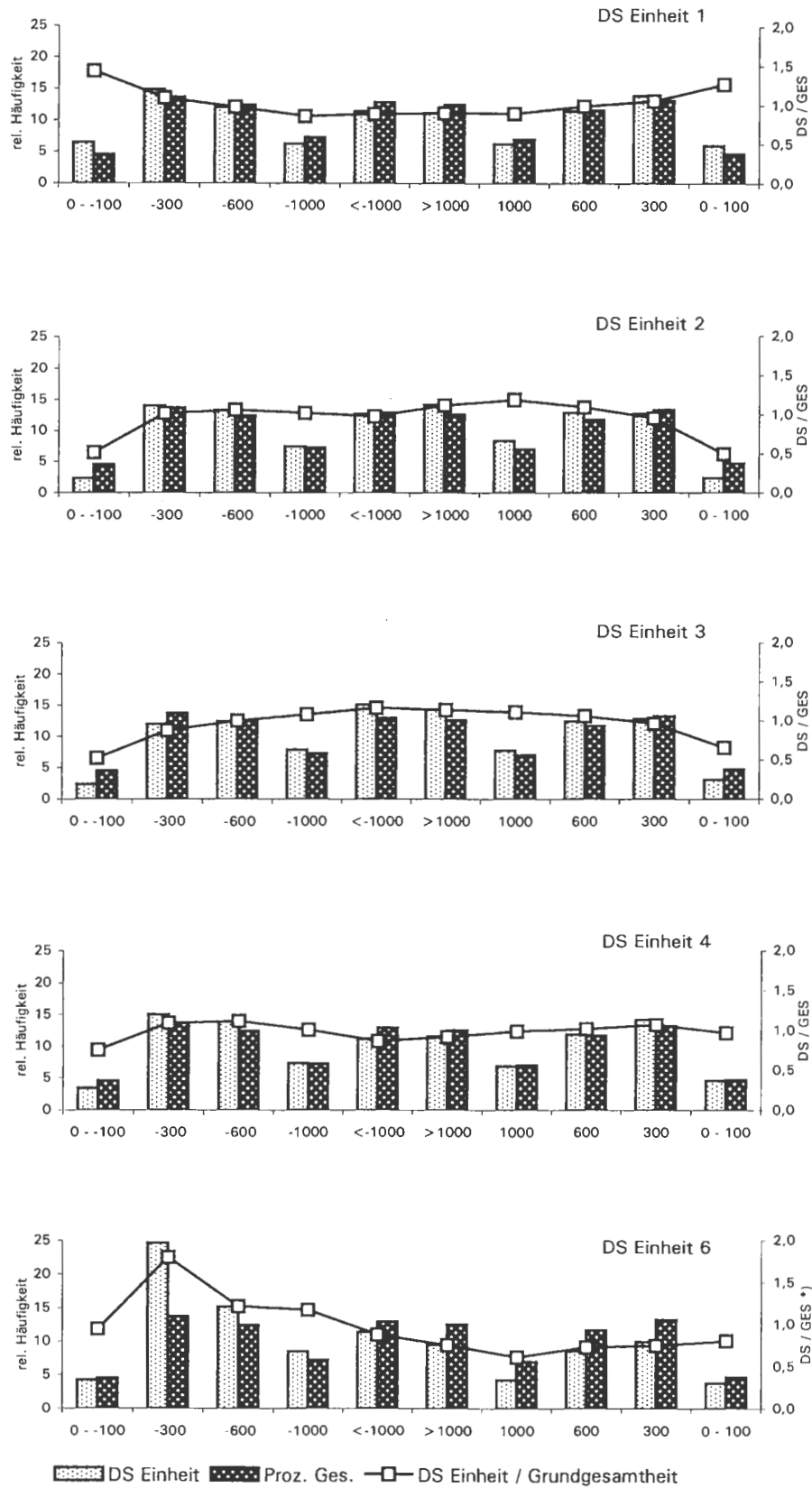


Abb. A7 Relative Häufigkeit der Flußkrümmung als Wölbungsradius in m (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

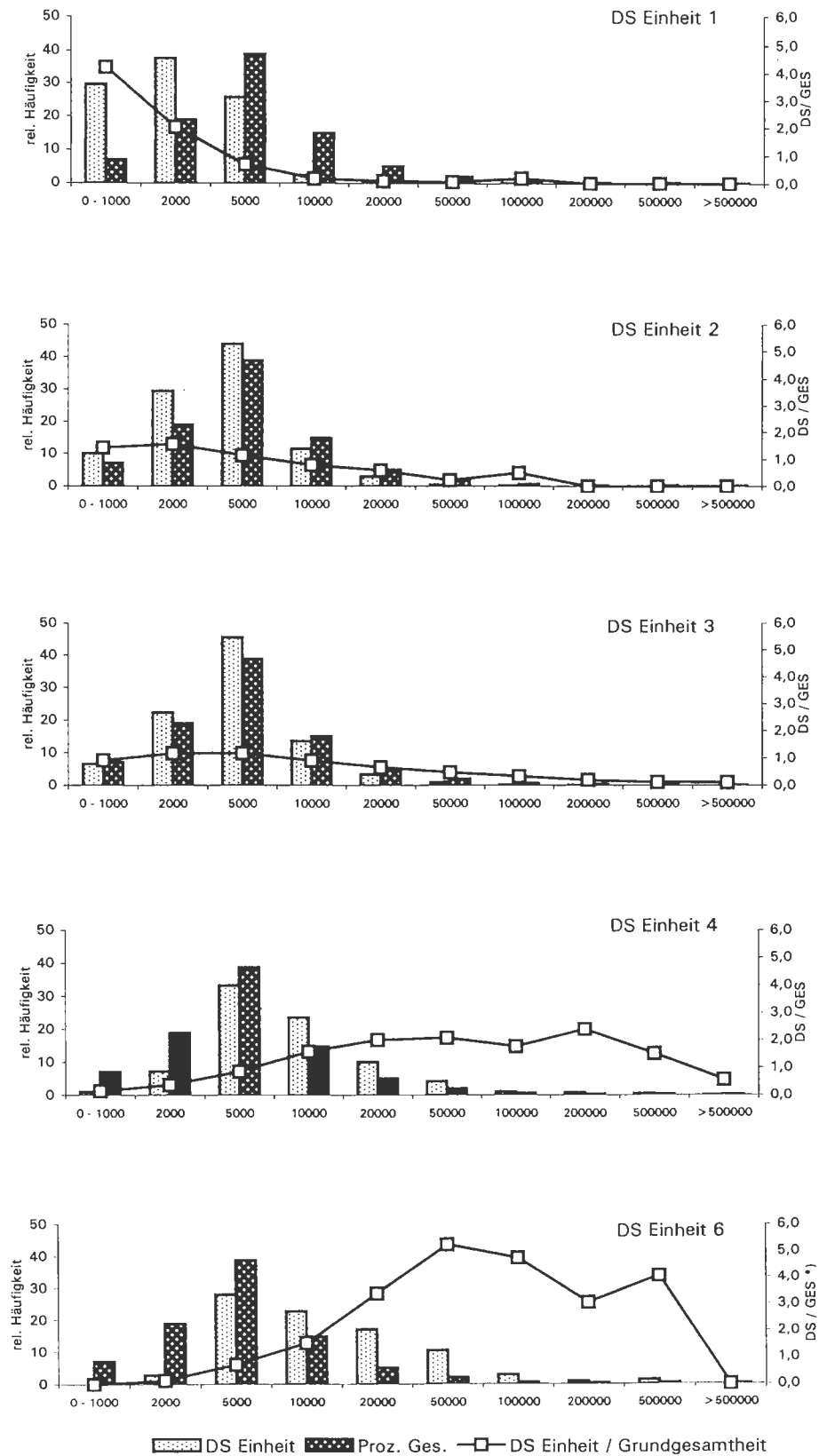


Abb. A8 Relative Häufigkeit der Größe des Einzugsgebietes (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

\*) DS/GES - Quotient der Prozent-Klassen Deckschichteneinheit/Gesamtgebiet

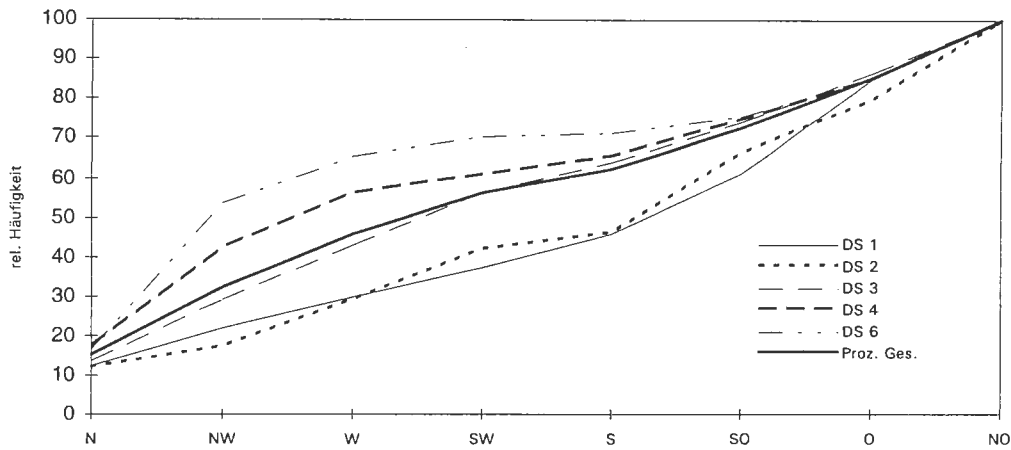


Abb. A9 Relative Summenhäufigkeit der Exposition, getrennt nach DS-Einheiten

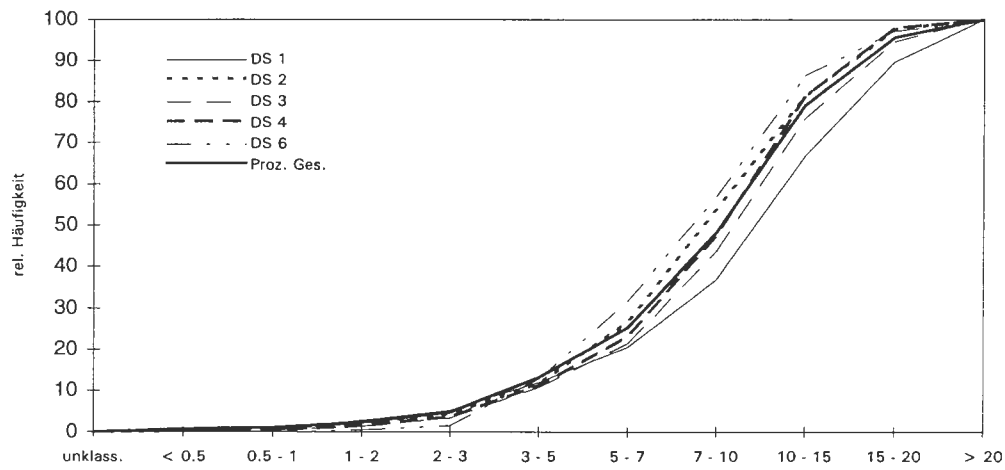


Abb. A10 Relative Summenhäufigkeit der Neigung, getrennt nach DS-Einheiten

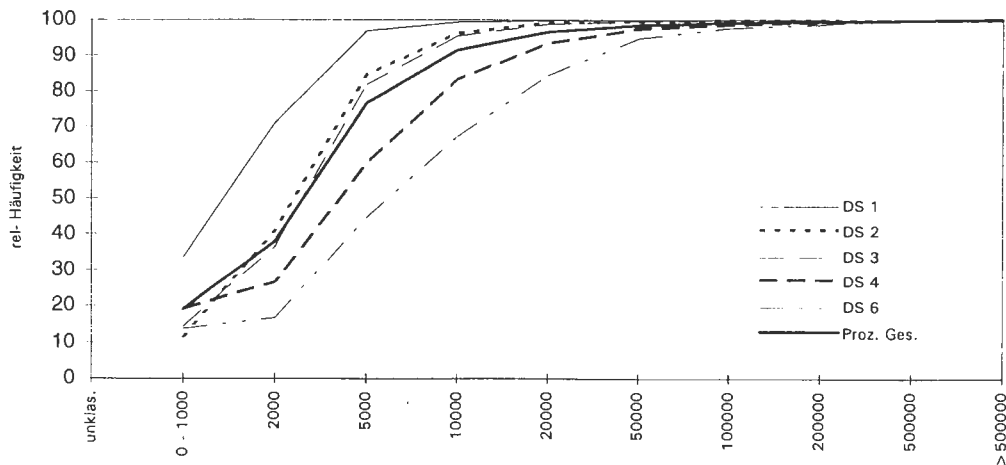


Abb. A11 Relative Summenhäufigkeitsverteilung der Größe des Oberflächeneinzugsgebietes, getrennt nach DS-Einheiten

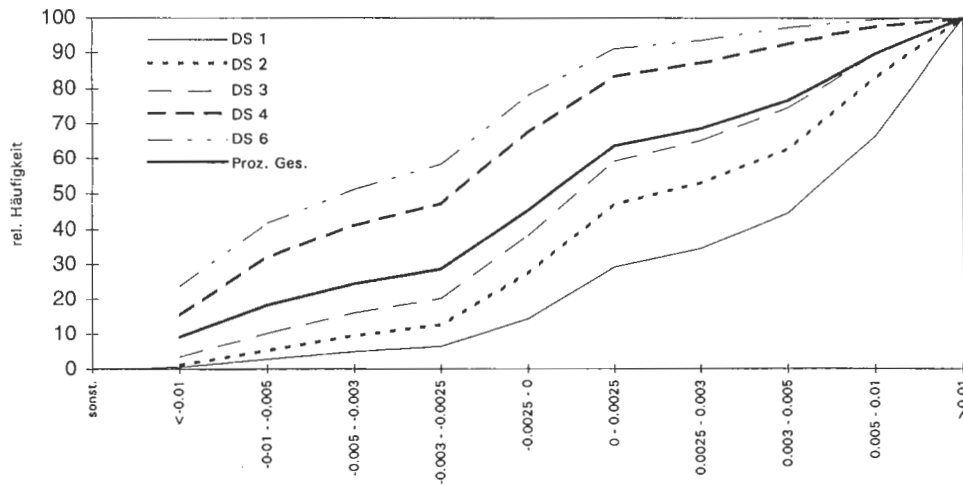


Abb. A12 Relative Summenhäufigkeit der Horizontalkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten

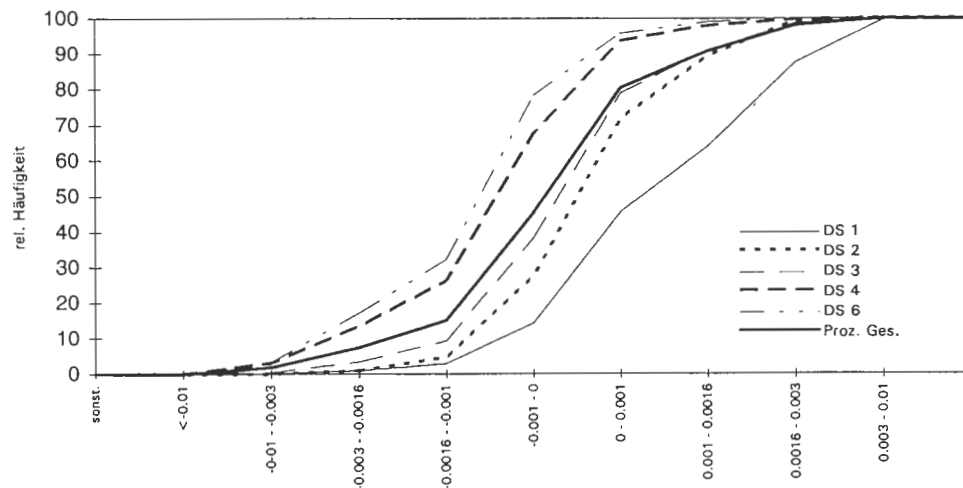


Abb. A13 Relative Summenhäufigkeit der Querkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten

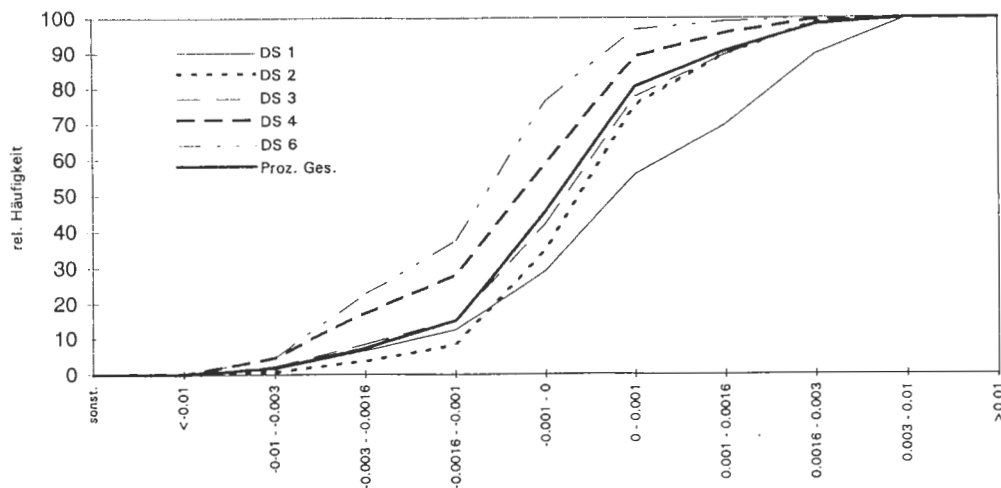


Abb. A14 Relative Summenhäufigkeit der Vertikalkrümmung, getrennt nach DS-Einheiten

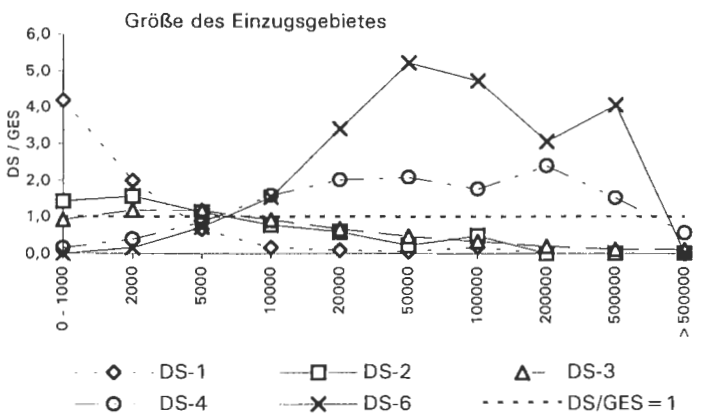
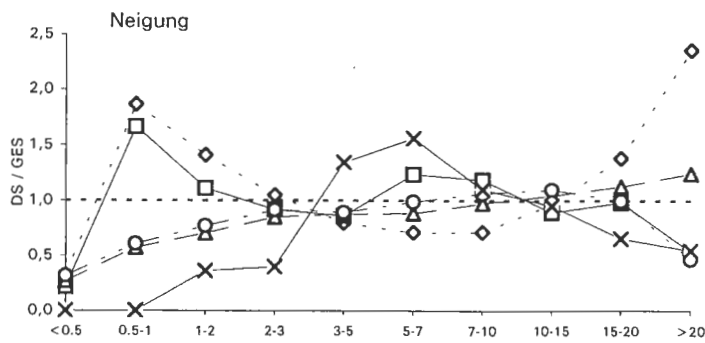
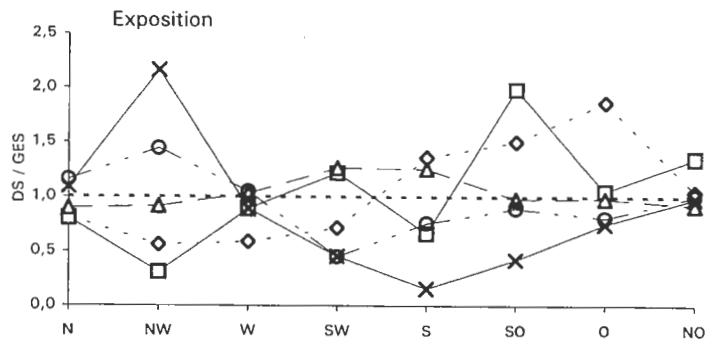


Abb. A15 Quotient der relativen Häufigkeit aus DS-Einheit und Grundgesamtheit der Exposition, Neigung und Größe des Einzugsgebietes, getrennt nach Deckschichteneinheiten, (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n=77832)

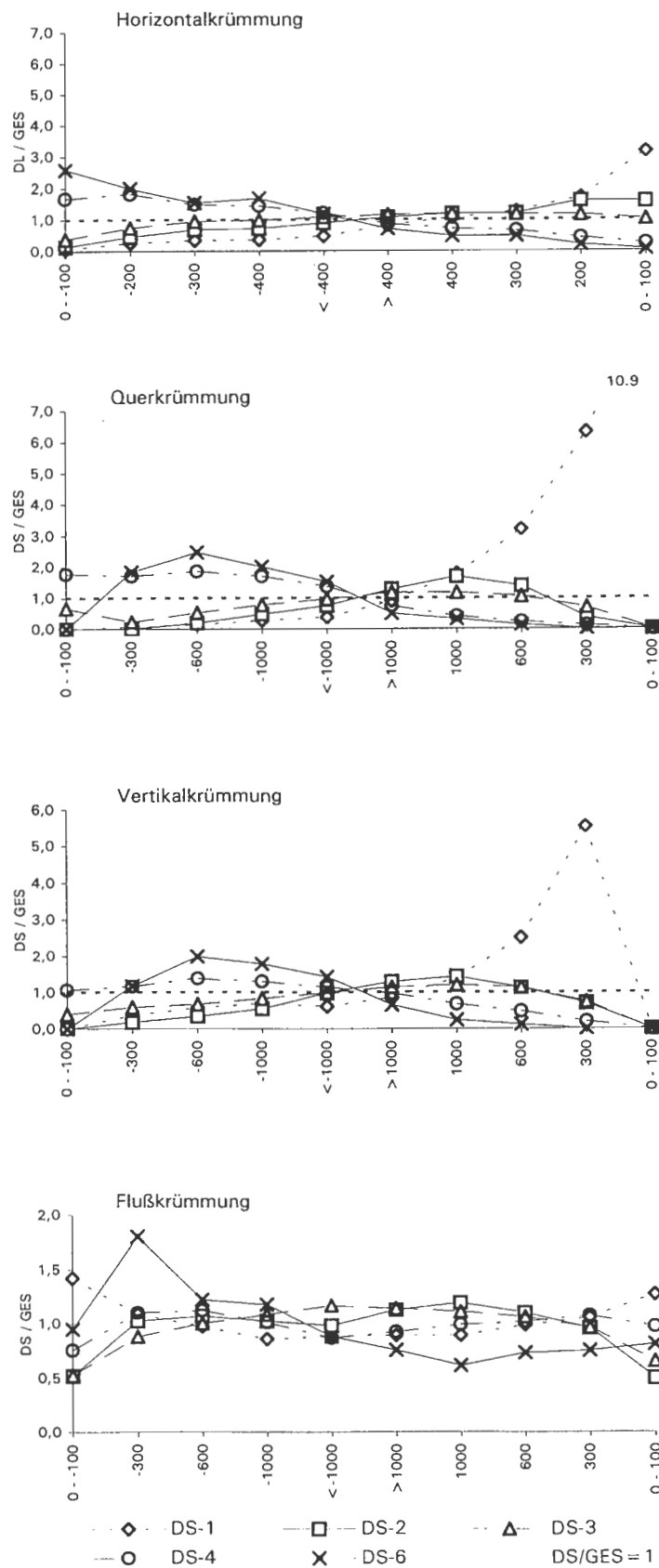


Abb. A16 Quotient der relativen Häufigkeit aus DS-Einheit und Grundgesamtheit für die Krümmungsradien (Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)



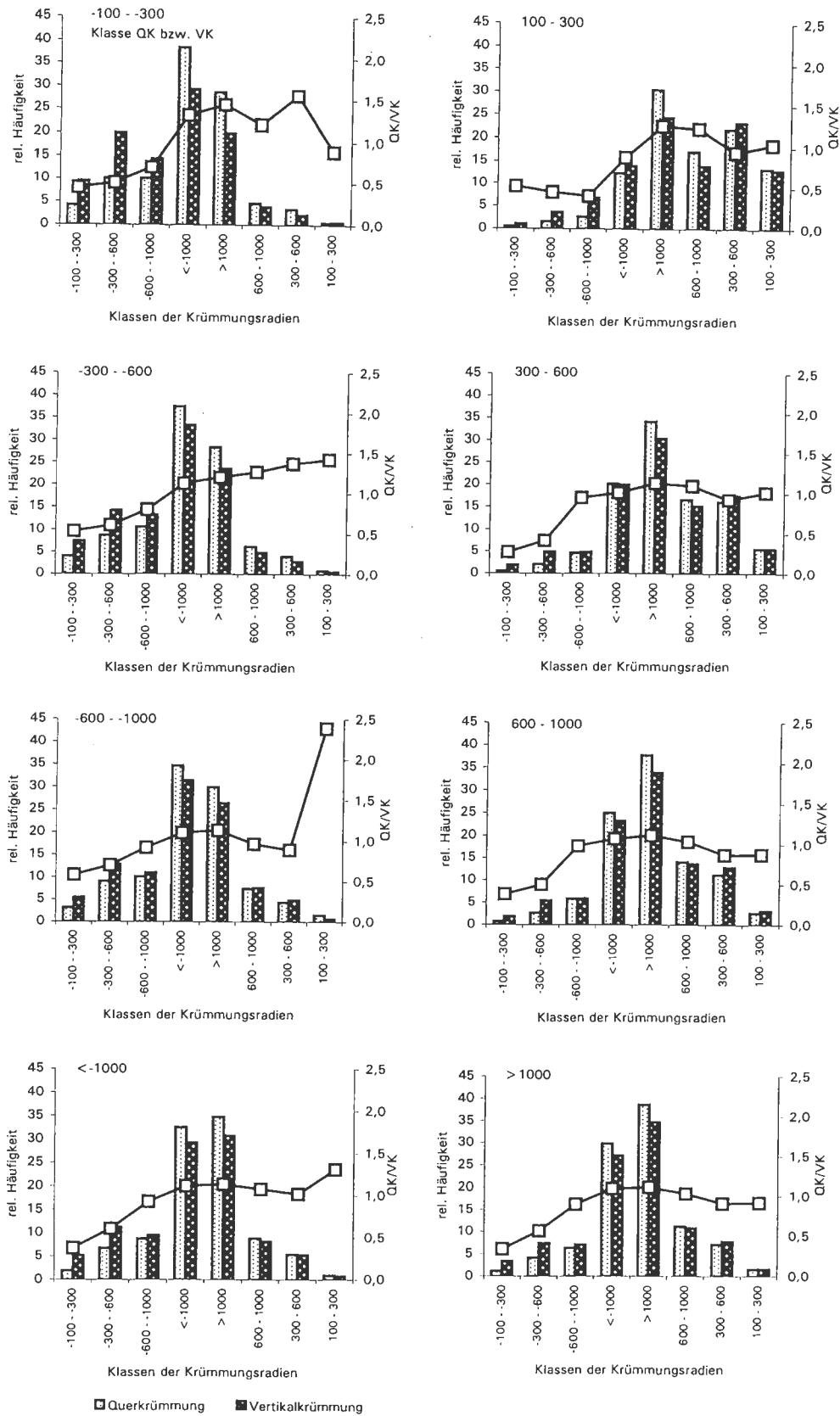


Abb. A17 Relative Häufigkeit von Vertikal- und Querkrümmungsradien innerhalb Krümmungsklassen des anderen Krümmungsschnittes (Wölbungsradius in m, Arbeitsgebiet Oberreifenberg, n = 77832)

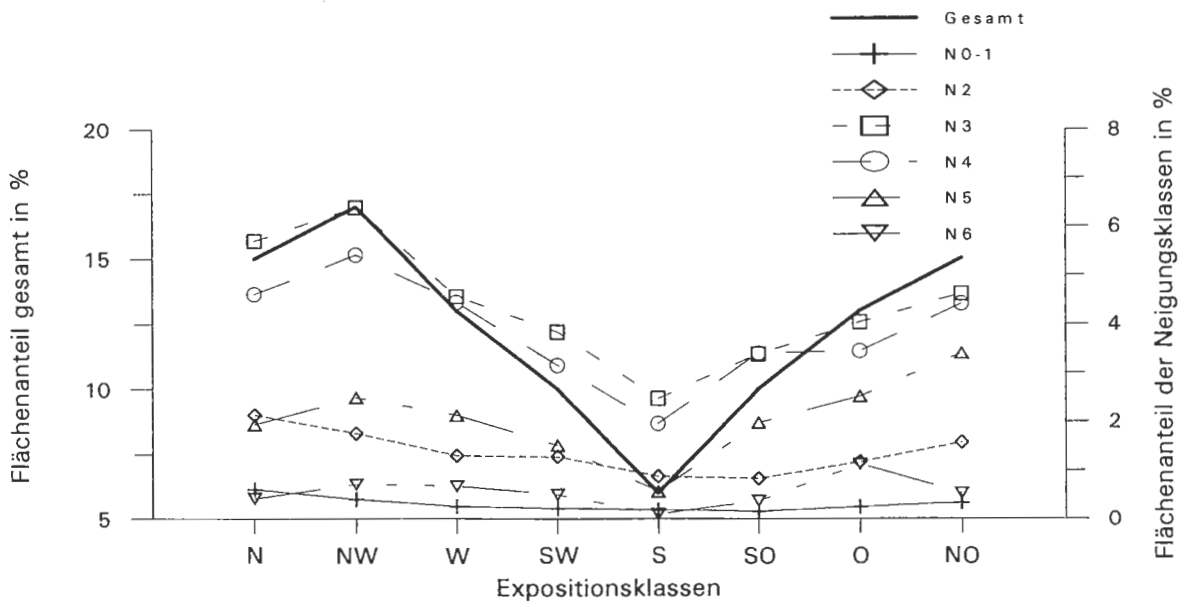
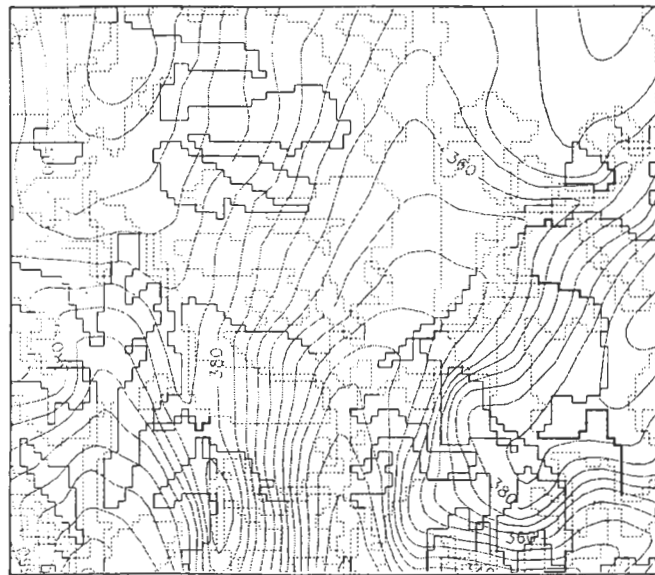
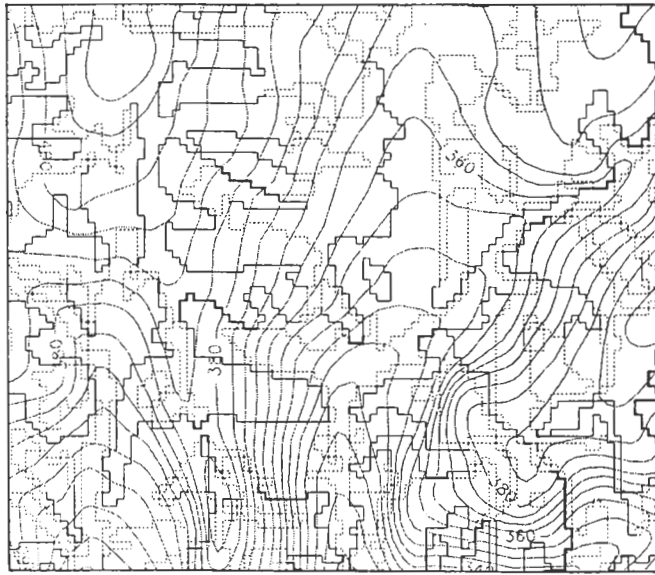


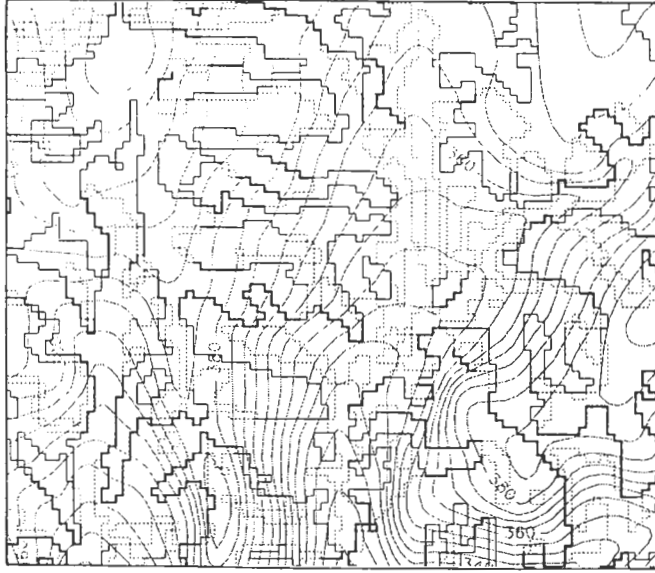
Abb. A18 Zusammenhang der Exposition und der Neigung im Arbeitsgebiet Oberreifenberg  
(Klassen nach AG Bodenkunde 1982, n = 76720)



Transferkonstante: 0.00333 (Radius 300 m)



Transferkonstante: 0.00666 (Radius 1500 m)



Transferkonstante: 0.000333 (Radius 3000 m)

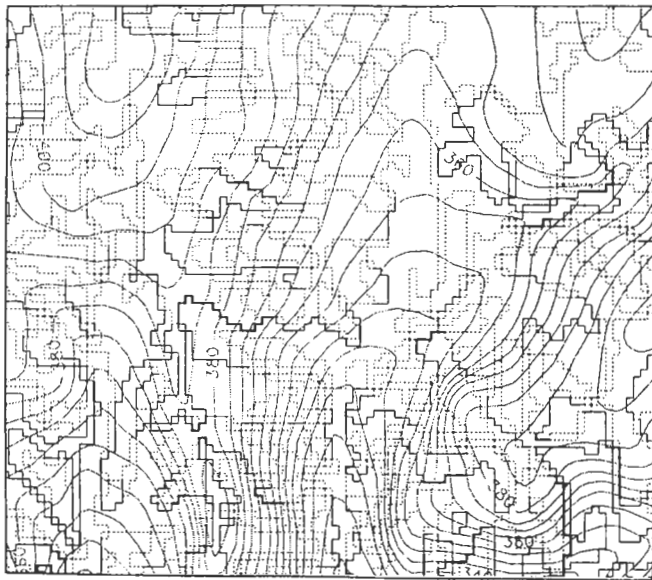
Grenzlinien homogener Reliefseinheiten

Nachbarschaftsdistanz

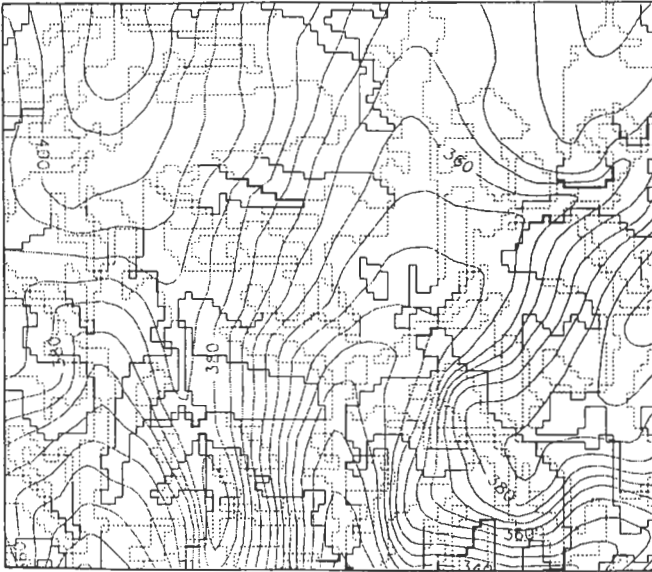
- ..... gering
- mittel
- hoch

Variable: Querkrümmung  
 Generalisierungsgrad: 98,7 %  
 Maßstab: 1 : 20 000

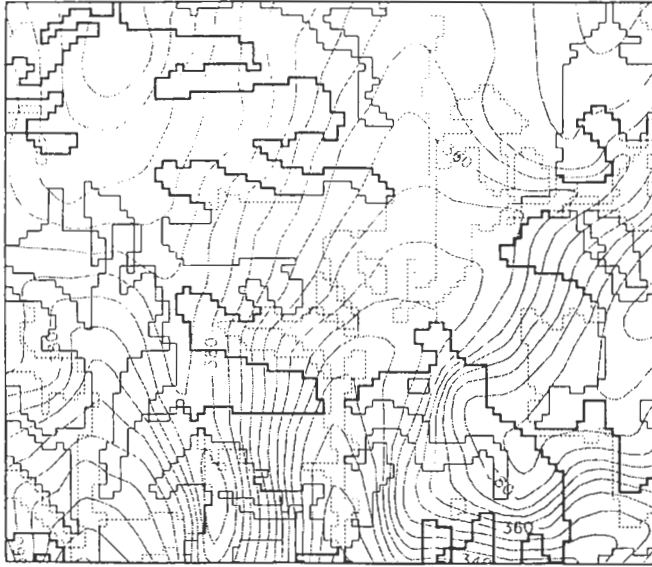
Abb. A19 Einfluß der Transferkonstante auf das Klassifizierungsergebnis (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, Kartiergebiet 2)



Generalisierung: 97.3 %



Generalisierung: 98.4 %



Generalisierung: 99.5 %

Grenzzlinien homogener Reliefeinheiten

Nachbarschaftsdistanz

gering

mittel

hoch

Variable: Querkrümmung

Transferkonstante: 0.00074 (Radius 1350 m)

Maßstab: 1 : 20 000

Abb. A20 Einfluß des Generalisierungsgrades auf das Klassifizierungsergebnis (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, Kartiergebiet 2)

Tab. A1 Auszug aus der Kopfdatentabelle BK 5716 Oberreifenberg NO

BE	BE_N	Bodentyp	BT_K	Bodengesellschaft	DS-A	DS-Beschreib.	Lieg_Pet	Lieg_s	Horizontabfolge	HA	EN	E_V	E_B	E_R	GR	DW	G <sub>W</sub>	G <sub>V</sub>	ST	HF	TR	vorw. Reliefposition	Nutz
5	1	Braunerde-Ranker	B-N	B-N, örtl. N, stw. O, B	2	DL/Am	*sf)*gsf	du	Ah\Ap/Bv/IIImC	2	1	10	30	20	2	40	6	0	0	3	3	KK,HOX,KR	W
3	2	erodierte Braunerde	eB	erod. B, örtl. B, N-B, N, stw. O	2	DL/BL\Am	*sf)*ph	du	Ah\Ap/Bv/IIICv/IIImC	3	6	10	50	40	2	60	6	0	0	3	3	KK,KR,HOX	W,A
11	3	Braunerde	B	B, stw. eL, Bl, N	2	DL/BL\Am	*sf	du	Ah\Ap/Bv/IIICv/IIImC	3	1	30	60	50	3	70	6	0	0	3	3	KK,HOX,HMG	W
12	4	Parabraunerde	L; L-B	L, stw. S-L, S-B, B	3	DL/ML/BL	*sf	du	Ah\Ap/Al/IIIBt/IIICv	3	1	60	100	80	4	110	6	0	1	3	3	HMM,HU	W
13	5	Parabraunerde	L; L-B	L, stw. S-L, S-B, B	3	DL/ML/BL\Am	*sf	du	Ah\Ap/Al/IIIBt/IIICv/IIImC	4	1	60	100	80	4	100	6	0	1	3	3	HMM,HU	W
14	6	Parabraunerde	L; L-B	L, stw. S-L, S-B, B	3	DL/ML/BL	*q\*s	du	Ah\Ap/Al/IIIBt/IIICv/IIImC	4	1	60	120	80	4	100	6	0	0	3	3	HMM,HMV,HU,HF	W
63	7	Pseudogley-Parabraunerde	S-L	S-L, stw. L, S, K, S-K	3	DL/ML/BL\Am	*sf	du	Ah\Ap\SAI/IIISbt/IIICv/IIImC	4	1	40	100	60	4	80	6	0	2	3	3	HU,HMM,HF	W,G
66	8	Pseudogley	S	S, stw. B, L, QG, S-K	3	DL/ML/BL\Am	*sf)*ph	du	Ah\Ap\Sw/IIISd/IIIBjIcV/IIImC	3	1	30	80	60	4	80	6	0	4	3	3	HMG,HUV,HF,HMM,HUM	G,A
68	9	Pseudogley; S-L	S;L-S	S, stw. L-S, L, K	3	DL/ML/BL\Am	*sf	du	Ah\Ap\Sw/IIISd/IIIBjIcV/IIImC	4	8	60	120	80	4	100	6	0	4	3	3	HUV,TV,HFV	G,W
71	10	Pseudogley	S;S-K	S, stw. S-K, L-S, QG	3	DL/ML/BL\Am	*sf	du	Ah\Ap\SM\Sw/Sd/IIIBjIcV/IIImC	4	8	60	110	80	4	100	6	0	4	3	3	HUV,TV	G
81	11	Brauner Auenboden	A	A, stw. G-A, AG, K	2	SL/SL	Lhf/*sf\ph	qp/du	Ah\Ap\M/Go	3	8	60	120	100	5	100	4	1	1	4	2	TE,TV	G
82	12	Quellengley o. Hanggley	QG; NG	QG, stw. NG, S, HN	2	SL/BL	*sf,*ph,*q	du	Aa\Hn\Gor	2	7	30	120	70	4	40	2	0	0	8	4	H_M	W
83	13	Gley	G	G, stw. GA, örtl. AG	2	DL/BL	*q,*sf	du	Ah\Go\Gr	3	3	30	100	60	3	30	3	0	0	8	4	H_M,TV	G,W
84	14	Gley	G	G, stw. AG, örtl. K	2	HL/HL	Lf\ol/Lf	qh\qp	Ah\M\Go\Gr	3	8	100	120	100	5	40	3	1	0	8	2	TV,TE	G
85	15	Anmoorgley	GA	GA, stw. GN, G, S-G	2	HL\DL/BL	*sf	du	Aa\Gr\IIGr\IIICv	4	8	100	120	100	5	30	2	0	0	9	4	TE,TV	G
87	16	Auengley	AG	AG, stw. G, AS, AS-G,A ,GA , K-G	1	HL	Lf	qh/du	Ah\Ap\M\Go\Gr	4	8	100	120	100	5	50	3	1	0	8	2	TE,TV	G
89	17	Niedermoorgley	GHn	GHn, stw. GA, NG, örtl. HN	2	HL/BL	*sf/*q	du	Ah\M\Hn\IIGr	2	8	100	150	100	5	30	1	0	0	10	5	TE,TV,H_M	G
90	18	Künstl.verändert. Gelände	Y	Y, YJ, YY	1	Y	Y	Y	YY	1	0	100	100	100	4	0	6	0	0	0	0	TE, HU	Y

**BE** - Bodeneinheit der Bodenkarte, **BE\_N** - Bodeneinheit einer Auswertung, **BT\_K** - vorherrschender Bodentyp (Kurzzeichen), **DS-A** - Anzahl der erfaßten Deckschichten, **DS-Beschreibung** - Beschreibung der Deckschichtenfolge, **Lieg\_pet** - Anstehendes Petrographie, **Lieg\_s** - Anstehendes Stratigraphie, **HA** - Anzahl der aufgenommenen Horizonte, **EN** - Entwicklungstiefe Stufe, **E\_V** - min. Entwicklungstiefe, **E\_B** - max. Entwicklungstiefe, **E\_R** - repräsentative Entwicklungstiefe, **GR** - Gründigkeit, **DW** - geschätzte mittl. Durchwurzelungstiefe, **G<sub>W</sub>** - GW-Stufe, **G<sub>V</sub>** - Grundwasserschwankung Stufe, **ST** - Staunässestufe, **HF** - Humusform, **TR** - Trophie, **Nutz** - vorwiegende Nutzung der Einheit



Tab. A2 Auszug von Datenfeldern aus der Horizontdatentabelle BK 5716 Oberreifenberg NO

BE	BT_Kurz	Hor Nr	Horizont	DS Num	DS Attribut	M. min	M. max	M. otief	utief	Boart von	Boart bis	Boart rep.	skel. von	skel. bis	skel. rep	skel. art	öol. kom	öol. ant	lieg. ant
3	N-B	1	Ah\Ap	1	DL s;vp;lo	2	10	0	7	Ls3	Lt3	Ls3	4	4	4	6	Lol	1	5
3	N-B	2	BvCv	1	DL s;vp;lo	10	30	7	30	Ls3	Lt3	Ls3	4	4	4	6	Lol	1	5
3	N-B	3	IIImCv\IIICv	2	BLVA vt;s\m	60	80	30	100	Lu	UI3	UI2	4	5	4	6		0	6
5	B-N	1	Ah\Ap	1	DL s;vp	0	8	0	5	SI4	Ls3	Lsu	3	5	4	6	Lol	1	5
5	B-N	2	Bv	1	DL s;vp	10	40	5	35	SI4	Ls3	Lsu	3	5	4	6	Lol	1	5
5	B-N	3	IIImC	2	A m	100	100	35	100	SI4	Ls3	Lsu	6	6	6	3		0	6
11	B	1	Ah\Ap	1	DL s;vp;lo	2	5	0	5	Ls3	Lt3	Ls3	3	4	3	6	Lol	2	4
11	B	2	Bv	1	DL s;vp;lo	20	50	5	50	Ls3	Lt3	Ls3	3	4	3	6	Lol	2	4
11	B	3	IIICv\IIImC	2	BLVA s;vp\m	10	50	50	100	SI4	Ls3	SI4	3	4	4	6		0	6
12	L;L-B	1	Ah\Ap	1	DL vp;lo;s	2	5	0	5	UI3	Ltu	UI3	3	2	3	6	Lol	2	4
12	L;L-B	2	AI	1	DL vp;lo;s	20	45	5	45	UI3	Ltu	UI3	3	2	3	6	Lol	2	4
12	L;L-B	3	IIIBt	2	ML vp;lo;s	20	40	45	75	Ls3	Lt3	Ltu	3	1	2	6	Lol	3	3
12	L;L-B	4	IIICv	3	BLVA s;vp\m	25	25	75	100	UI2	UI3	UI3	2	4	3	6		0	6
13	L;L-B	1	Ah\Ap	1	DL vp;lo;s	2	10	0	5	UI3	Ltu	UI3	3	2	3	6	Lol	3	3
13	L;L-B	2	AI	1	DL vp;lo;s	20	55	5	55	UI3	Ltu	UI3	3	2	3	6	Lol	3	3
13	L;L-B	3	IIIBt	2	ML vp;lo;s	20	40	55	85	UI3	Lt3	Ltu	3	1	2	6	Lol	3	3
13	L;L-B	4	IIICv\IIImC	3	BLVA vp;s\m	15	15	85	100	UI3	UI2	UI2	2	4	3	6		0	6
14	L;L-B	1	Ah\Ap	1	DL vp;lo;s	2	5	0	5	Ls3	Lt2	Lsu	3	2	3	6	Lol	3	3
14	L;L-B	2	AI	1	DL vp;lo;s	20	45	5	45	Ls3	Lt2	Lsu	3	2	3	6	Lol	3	3
14	L;L-B	3	IIIBt	2	ML vp;lo;s	20	40	45	75	Ls3	Ltu	Ltu	3	2	3	6	Lol	3	3
14	L;L-B	4	IIICv\IIImC	3	BLVA vp;s\m	25	25	75	100	SI3	Ls3	SI3	4	5	5	6		0	6
63	S-L	1	Ah\Ap	1	DL s;vp;lo	2	10	0	5	Us3	Lu	Lu	3	4	4	6	Lol	2	4
63	S-L	2	SAI	1	DL s;vp;lo	10	50	5	40	Us3	Lu	Lu	3	4	4	6	Lol	2	4
63	S-L	3	IIIBt	2	ML s;vp;lo	20	40	40	70	Uls	Ltu	Ltu	3	4	3	6	Lol	3	3
63	S-L	4	IIICv\IIImC	3	BLVA s;vp\m	30	30	70	100	U	UI3	UI2	2	4	2	6		0	6
66	S	1	Ah\Ap	1	DL vp;s;lo	2	10	0	5	UI3	Lu	Lu	3	2	3	6	Lol	2	4
66	S	2	Sw	1	DL vp;s;lo	10	30	5	25	UI3	Lu	Lu	3	2	3	6	Lol	2	4
66	S	3	IIISd	2	ML vp;lo;s	10	30	25	55	Lu	Lt3	Ltu	3	2	3	6	Lol	2	4
66	S	4	IIIBjCv\IIImC	3	BLVA s;vt\m	45	45	55	100	U	UI3	UI2	2	4	2	6		0	6
68	S;L-S	2	Sw	1	DL vp;lo;s	10	30	5	25	Uls	Lu	Lu	2	3	2	6	Lol	3	3

Fortsetzung Tab. A2

68	S;L-S	3	IIIsd	2	ML	vp;lo;s	40	70	25	75	Lu	Lt3	Lt3	3	2	3	6	Lol	3	3
68	S;L-S	4	IIIBjCv\IIImC	3	BLVA	vt;s\m	25	25	75	100	Lu	UI4	UI3	1	4	2	6		0	6
71	S;S-K	1	AhAp	1	DL	vp;lo;s	2	10	0	5	Uls	Lu	Lu	2	3	2	6	Lol	3	3
71	S;S-K	2	Sw	1	DL	vp;lo;s	5	25	5	25	Uls	Lu	Lu	2	3	2	6	Lol	3	3
71	S;S-K	3	IIIsd	2	ML	vp;lo;s	40	70	25	75	Lu	Lt3	Lt3	2	3	2	6	Lol	4	2
71	S;S-K	4	IIIBjCv\IIImC	3	BL	vt;s\m	25	25	75	100	UI4	Lu	UI3	2	4	2	6		0	6
81	G-K	1	AhAp	1	SL	Ihf	2	10	0	5	Ls3	Lu	Lu	0	1	1	6		0	6
81	G-K	2	M	1	SL	Ihf	40	80	5	70	Ls3	Lu	Lu	0	1	1	6		0	6
81	G-K	3	Go	1	BL	vp;s	30	30	70	100	Ls3	Lt3	Ls3	2	3	2	6		0	6
82	QG;NG	1	Aa\Hh	1	HL	b;;vp;s;lo	10	30	0	30	Ls3	Lt3	Lt2	0	1	1	6	Lol	1	5
82	QG;NG	2	Gor	2	BL	s;vp	10	70	30	100	Ls3	Tl	Lt3	3	4	4	6		0	6
83	G	1	Ah	1	DL	s;vp;lo	2	10	0	5	SI3	Ltu	Ls3	4	5	4	6	Lol	2	4
83	G	2	Go	1	DL	s;vp;lo	10	30	5	30	SI3	Ltu	Ls3	4	5	4	6	Lol	2	4
83	G	3	Gr	2	BL	s;vp	50	70	30	100	SI3	Lt3	Ls3	4	5	4	6		0	6
84	G	1	Ah\IM	1	HL	Ihf	2	8	0	5	Lsu	Lu	Lu	1	2	1	6	\Lol	0	6
84	G	2	Go	1	HL	Ihf	10	40	5	40	Lu	Lt3	Lu	1	2	1	6		0	6
84	G	3	Gr	1	HL	Ihf	60	80	40	100	Ls3	Lsu	Lsu	1	2	1	6		0	6
85	GA	1	Aa	1	HL\DL	Ihf\vp;s	20	50	0	30	Lsu	Ltu	Lu	1	3	2	6		0	2
85	GA	2	Gr	1	HL\DL	Ihf\vp;s	10	50	30	60	Lu	Lt3	Lu	1	2	1	6		0	6
85	GA	3	IIGr	2	BL	s;vp	20	60	60	100	Slu	Lsu	Slu	2	4	3	6		0	6
87	AG	1	Ah\Ap\IM	1	HL	Ihf	2	10	0	5	Lu	Uls	Lu	1	2	1	6		0	6
87	AG	2	Go	1	HL	Ihf	10	30	5	35	Lu	Lt3	Lt3	1	2	1	6		0	6
87	AG	3	Gr	1	HL	Ihf	60	80	35	100	Ls3	Lsu	Lsu	1	2	1	6		0	6
89	GHh	1	Ah\IM\Hh	1	HL	b;;vp	30	100	0	60	SI3	Ls3	SI3	0	0	0	0		0	1
89	GHh	2	IIGr	2	BL	s;vp	20	70	60	100	Ls3	Lt3	Lt2	3	1	2	1		0	6
90	Y	1	Yh	1	HL	yy	0	100	0	100	Y	Y	Y	0	0	0	0		0	6

**BE** - Bodeneinheit der Bodenkarte, **BT\_Kurz** - Kürzel des Bodentypes, **Hor\_Nr** - Nummer des Horizontes, **DS\_Num** - Nummer der erfaßten Deckschicht, **DS** - Kürzel der erfaßten Deckschicht, **DS\_Attribut** - Attribut zur Charakterisierung der Deckschicht, **M\_min** - min. Mächtigkeit des Horizontes, **M\_max** - max. Mächtigkeit des Horizontes, **otief** - repräsentative obere Tiefe des Horizontes, **utief** - repräsentative untere Tiefe des Horizontes, **Boart von/bis** - Bodenart Variation, **Boart rep.** - repräsentative Bodenart des Horizontes, **skel.** von/bis - Grobbodenanteil Variation, **skel. rep.** - repräsentativer Grobbodenanteil, **äol. kom/ant** - äolische Substratkomponente und -anteil, **lieg. ant** - Anteil des Anstehenden Substrates



Tab. A3 Korrelationsanalyse geomorphometrischer Reliefattribute Arbeitsgebiet Oberreifenberg  
(konvergent/konkave Formen)

9 'VR' Variables: HOEHE NEIG EXPOSF GRE ETL VKNEG QKNEG HKNEG FK  
Spearman Correlation Coefficients / Prob > |R| under Ho: Rho=0 / Number of Observations

	HOEHE	NEIG	EXPOSF	GRE	ETL	VKNEG	QKNEG	HKNEG	FK
<b>HOEHE</b>	1	-0.10125	-0.02783	-0.33728	0.35416	0.24231	0.01116	0.00673	0.02278
	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0373	0.2088	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	37435	34849	34849	76720
<b>NEIG</b>	-0.10125	1	-0.05434	0.07443	0.03090	-0.11097	0.02053	0.42076	-0.38364
	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	37435	34849	34849	76720
<b>EXPOSF</b>	-0.02783	0.05434	1	0.00061	0.06924	0.04822	0.06042	0.06036	-0.02199
	0.0001	0.0001	0.0	0.8653	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	37435	34849	34849	76720
<b>GRE</b>	-0.33728	0.07443	0.00061	1	-0.57304	-0.10865	-0.46100	-0.44614	-0.10329
	0.0001	0.0001	0.8653	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	37435	34849	34849	76720
<b>ETL</b>	0.35416	0.03090	0.06924	-0.57304	1	0.38866	0.49680	0.55728	-0.18014
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	74066	74066	74066	74066	74066	36436	34050	34050	74066
<b>VKNEG</b>	0.24231	-0.11097	0.04822	-0.10865	0.38866	1	0.04904	0.02883	-0.17532
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001
	37435	37435	37435	37435	36436	37435	20318	20318	37435
<b>QKNEG</b>	0.01116	0.02053	0.06042	-0.46100	0.49680	0.04904	1	0.88752	-0.26428
	0.0373	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001
	34849	34849	34849	34849	34050	20318	34849	34849	34849
<b>HKNEG</b>	0.00673	0.42076	0.06036	-0.44614	0.55728	0.02883	0.88752	1	-0.42218
	0.2088	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001
	34849	34849	34849	34849	34050	20318	34849	34849	34849
<b>FK</b>	0.02278	-0.38364	-0.02199	-0.10329	-0.18014	-0.17532	-0.26428	-0.42218	1
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0
	76720	76720	76720	76720	74066	37435	34849	34849	76720

Tab. A4 Korrelationsanalyse geomorphometrischer Reliefattribute Arbeitsgebiet Oberreifenberg  
(divergent/konvexe Formen)

9 'VAR' Variables: HOEHE NEIG EXPOSF GRE ETL VKNEG QKNEG HKNEG FK  
Spearman Correlation Coefficients / Prob > |R| under Ho: Rho=0 / Number of Observations

	HOEHE	NEIG	EXPOSF	GRE	ETL	VKPOS	QKPOS	HKPOS	FK
HOEHE	1	-0.10125	-0.02783	-0.33728	0.35416	0.08225	0.07619	0.15611	0.02278
	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	39277	41820	41820	76720
NEIG	-0.10125	1	-0.05434	0.07443	0.03090	0.18046	0.11319	-0.34877	-0.38364
	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	39277	41820	41820	76720
EXPOSF	-0.02783	-0.05434	1	0.00061	0.06924	-0.04385	-0.05480	-0.00665	-0.02199
	0.0001	0.0001	0.0	0.8653	0.0001	0.0001	0.0001	0.1736	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	39277	41820	41820	76720
GRE	-0.33728	0.07443	0.00061	1	-0.57304	-0.28784	-0.51545	-0.64411	-0.10329
	0.0001	0.0001	0.8653	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	76720	76720	76720	76720	74066	39277	41820	41820	76720
ETL	0.35416	0.03090	0.06924	-0.57304	1	0.08464	0.18882	0.26338	-0.18014
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	74066	74066	74066	74066	74066	37622	39965	39965	74066
VKPOS	0.08225	0.18046	-0.04385	-0.28784	0.08464	1	0.20503	0.11008	0.08271
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001	0.0001
	39277	39277	39277	39277	37622	39277	24727	24727	39277
QKPOS	0.07619	0.11319	-0.05480	-0.51545	0.18882	0.20503	1	0.85891	0.16137
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	0.0001
	41820	41820	41820	41820	39965	24727	41820	41820	41820
HKPOS	0.15611	-0.34877	-0.00665	-0.64411	0.26338	0.11008	0.85891	1	0.33049
	0.0001	0.0001	0.1736	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001
	41820	41820	41820	41820	39965	24727	41820	41820	41820
FK	0.02278	-0.38364	-0.02199	-0.10329	-0.18014	0.08271	0.16137	0.33049	1
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0
	76720	76720	76720	76720	74066	39277	41820	41820	76720

Tab. A5 Deskriptive Statistik ausgewählter Variablen für das gesamte Arbeitsgebiet Oberreifenberg und für einzelne Deckschichteneinheiten

HOEHE - Höhe in m über NN  
 EXPOS - Exposition in Altgrad (N = 0°)  
 EXPOSF - Expositionsfaktor  
 NEIG - Neigung in Altgrad  
 HK - Horizontalkrümmung  
 HKPOS - Horizontalkrümmung positiver Wertebereich (gestreckt bis konvex)  
 HKNEG - Horizontalkrümmung negativer Wertebereich (gestreckt bis konkav)  
 VK - Vertikalkrümmung  
 VKPOS - Vertikalkrümmung positiver Wertebereich (gestreckt bis konvex)  
 VKNEG - Vertikalkrümmung negativer Wertebereich (gestreckt bis konkav)  
 QK - Querkrümmung  
 QKPOS - Querkrümmung positiver Wertebereich (gestreckt bis konvex)  
 QKNEG - Querkrümmung negativer Wertebereich (gestreckt bis konkav)  
 FK - absolute Flußkrümmung unabhängig von Rechts- und Linksdrehung  
 ETL - Entfernung zur Tiefenlinie in Meter ( $E_{\min} = 5\ 000$ )  
 GRE - Größe des Einzugsgeb in  $m^2$

Tab. A5a Gesamtes Arbeitsgebiet

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	76720	524.0343802	63.9540498	373.6800000	666.0100000
EXPOS	76720	177.4992961	113.8886799	0	360.0000000
EXPOSF	76720	0.6080227	0.2365145	0.2000000	1.0000000
NEIG	767201	0.7264723	5.0944197	0.0063056	32.9426700
HK	76720	0.000163052	0.0242576	-4.0494320	0.8783639
HKPOS	41820	0.0072747	0.0159412	2.887995E-7	0.8783639
HKNEG	34849	-0.0083710	0.0292740	-4.0494320	-3.918307E-7
VK	76720	-0.000097387	0.0016830	-0.0173330	0.0108924
VKPOS	39277	0.0010458	0.0010091	1.874827E-8	0.0108924
VKNEG	37435	-0.0012969	0.0013881	-0.0173330	-9.242084E-9
QK	76720	0.000103483	0.0014605	-0.0293283	0.0157431
QKPOS	41820	0.0010038	0.0010281	2.496672E-8	0.0157431
QKNEG	34849	-0.000976784	0.0011348	0.0293283	-3.209795E-8
FK	76720	0.0046053	0.0147083	0	1.9519450
ETL	74066	195.4608361	151.0843535	0	1182.25
GRE	76720	63677.10	798361.13	400.0000000	22399680.00

Tab. A5b Deckschichteneinheit 1

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	7058	535.4687206	60.9599225	383.67	666.01
EXPOS	7058	211.6822046	100.9837485	0	360
EXPOSF	7058	0.5130197	0.2319813	0.2000000	1.0000000
NEIG	7058	12.3325208	5.8795851	0.1122090	30.2591700
HK	7058	0.0111190	0.0251869	-0.0800851	0.7502732
HKPOS	6049	0.0135262	0.0263805	2.620891E-6	0.7502732
HKNEG	1009	0.0033119	0.0047404	-0.0800851	-0.000011611
VK	7058	0.000932376	0.0019589	-0.0103524	0.0108924
VKPOS	5004	0.0017907	0.0015123	1.043415E-6	0.0108924
VKNEG	2054	-0.0011587	0.0012029	-0.0103524	-9.242084E-9
QK	7058	0.0014749	0.0017225	-0.0043071	0.0157431
QKPOS	6049	0.0018289	0.0015873	4.72807E-7	0.0157431
QKNEG	1009	-0.000647264	0.000628514	-0.0043071	-2.890633E-6
FK	7058	0.0054702	0.0147681	3.617718E-8	0.8485985
ETL	6755	281.1766192	144.8367220	0	1182.25
GRE	7058	1952.21	4535.39	400	223888.20

Tab. A5c Deckschichteneinheit 2

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	5261	488.2628987	63.5175417	386.82	660.9200000
EXPOS	5261	216.8026991	99.6504129	0	360.0000000
EXPOSF	5261	0.5506684	0.2370713	0.2	1.0000000
NEIG	5261	10.2319081	4.6972993	0.2088347	26.7212400
HK	5261	0.0048320	0.0132995	-0.1231199	0.5617064
HKPOS	3808	0.0079402	0.0141606	1.067286E-6	0.5617064
HKNEG	1453	-0.0033141	0.0048232	-0.1231199	-4.147143E-6
VK	5261	0.000362710	0.0011807	-0.0072741	0.0054262
VKPOS	3415	0.000966311	0.000815080	1.116544E-6	0.0054262
VKNEG	1846	-0.000753920	0.000907294	-0.0072741	-2.079928E-7
QK	5261	0.000538373	0.000946300	-0.0033809	0.0058284
QKPOS	3808	0.000953300	0.000718923	8.74045E-8	0.0058284
QKNEG	1453	-0.000549062	0.000503979	-0.0033809	-7.779054E-7
FK	5261	0.0032677	0.0045151	9.560237E-7	0.0709902
ETL	4902	288.4425797	152.0641320	0	1105.10
GRE	5261	3654.53	15044.32	400	1037185.00

Tab. A5d · Deckschichteneinheit 3

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	38314	534.8237461	59.9011242	374.1600000	661.0900000
EXPOS	38314	175.7948531	109.7226870	0	360.0000000
EXPOSF	38314	0.6161860	0.2363058	0.2000000	1.0000000
NEIG	38314	11.3080846	5.0687044	0.0110658	29.8716100
HK	38314	0.0021673	0.0142024	-0.9127056	0.8783639
HKPOS	23659	0.0064448	0.0129017	2.887995E-7	0.8783639
HKNEG	14655	-0.0047384	0.0134688	-0.9127056	-5.114752E-7
VK	38314	0.000128592	0.0014575	-0.0173330	0.0108762
VKPOS	22195	0.0010030	0.000884660	2.230101E-8	0.0108762
VKNEG	16119	-0.0010754	0.0012123	-0.0173330	-8.042755E-8
QK	38314	0.000295966	0.0011563	-0.0207998	0.0139702
QKPOS	23659	0.000925334	0.000863944	2.496672E-8	0.0139702
QKNEG	14655	-0.000720084	0.000786461	-0.0207998	-3.209795E-8
FK	38314	0.0034770	0.0090599	5.511462E-8	0.6878331
ETL	36785	235.2754243	148.5081913	0	1150.54
GRE	38314	12091.77	347162.89	400.0000000	20926010.00

Tab. A5e Deckschichteneinheit 4

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	14452	533.8951853	57.2341427	383.4500000	659.3800000
EXPOS	14452	163.4179352	120.7980675	0	360.0000000
EXPOSF	14452	0.6248725	0.2294820	0.2000000	1.0000000
NEIG	14452	10.6279719	4.6112154	0.0089175	32.9426700
HK	14452	-0.0037999	0.0139234	-0.6743910	0.5754238
HKPOS	4664	0.0043082	0.0123395	1.339226E-6	0.5754238
HKNEG	9788	-0.0076635	0.0129399	-0.6743910	-3.918307E-7
VK	14452	-0.000476723	0.0015355	-0.0161391	0.0054048
VKPOS	5956	0.000762077	0.000689970	1.874827E-8	0.0054048
VKNEG	8496	-0.0013452	0.0013590	-0.0161391	-5.660766E-8
QK	14452	-0.000544126	0.0013257	-0.0293283	0.0061428
QKPOS	4664	0.000626350	0.000620547	5.010997E-7	0.0061428
QKNEG	9788	-0.0011019	0.0012032	-0.0293283	-8.830616E-8
FK	14452	0.0041883	0.0111234	1.108018E-6	0.6771045
ETL	14176	116.8314005	98.5205153	0	699.4113000
GRE	14452	14368.33	139437.30	400.0000000	14595760.00

Tab. A5f Deckschichteneinheit 5

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	79	398.1681013	12.6801532	380.5900000	425.7100000
EXPOS	79	155.8607595	7.8442110	132.0000000	169.0000000
EXPOSF	79	0.7072855	0.0348632	0.6488889	0.8133333
NEIG	79	15.3124773	1.6950183	10.9804600	18.4400700
HK	79	-0.000149807	0.0037666	-0.0088319	0.0077124
HKPOS	36	0.0032961	0.0020902	4.653974E-6	0.0077124
HKNEG	43	-0.0030347	0.0020019	-0.0088319	-0.000120922
VK	79	-0.000542695	0.0015480	-0.0032409	0.0018691
VKPOS	35	0.000949168	0.000464756	0.000118260	0.0018691
VKNEG	44	-0.0017294	0.000960869	-0.0032409	-0.000026895
QK	79	-0.000041078	0.000976402	-0.0023409	0.0017634
QKPOS	36	0.000857808	0.000509105	1.194771E-6	0.0017634
QKNEG	43	-0.000793635	0.000531173	-0.0023409	-0.000034469
FK	79	0.0017501	0.0013359	0.000075291	0.0079056
ETL	79	125.3635008	47.4957317	48.2842700	233.1371000
GRE	79	2464.98	837.6264339	1279.07	5046.94

Tab. A5g Deckschichteneinheit 6

	n	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
HOEHE	1617	476.6286195	66.8789572	374.2978000	618.8000000
EXPOS	1617	148.3945578	124.2626726	0	360.0000000
EXPOSF	1617	0.6544383	0.2204980	0.2000000	1.0000000
NEIG	1617	9.8147902	4.4995806	0.4614135	25.3000600
HK	1617	-0.0059736	0.0089759	-0.0743732	0.0509012
HKPOS	350	0.0028393	0.0036634	1.282203E-6	0.0509012
HKNEG	1267	-0.0084081	0.0084697	-0.0743732	-0.000011848
VK	1617	-0.000852533	0.0012402	-0.0087840	0.0025814
VKPOS	380	0.000514830	0.000474554	1.270335E-6	0.0025814
VKNEG	1237	-0.0012726	0.0010911	-0.0087840	-1.22403E-8
QK	1617	-0.000748643	0.0011740	-0.0073966	0.0028735
QKPOS	350	0.000559218	0.000536897	2.269248E-7	0.0028735
QKNEG	1267	-0.0011099	0.0010375	-0.0073966	-2.079252E-6
FK	1617	0.0040541	0.0042025	2.193747E-6	0.0434357
ETL	1612	72.2111677	62.8620554	0	486.2742000
GRE	1617	21277.57	47393.30	844.8251000	534353.10

Tab. A6 Ergebnisse einer Clusteranalyse der Mittelwerte von abgeleiteten Reliefeinheiten mit den Variablen Querkrümmung (QK) und Vertikalkrümmung (VK) (Transferkonstante 0.000666; Gew. QK 1; Gew. VK 0.5)

Cluster	Cluster Seed		Häufigkeit	max. Distanz Seed - Beob.	nächster Cluster	Distanz zwischen den Seeds
	QK	VK				
1	-0.585716	-0.300416	40	0.1543	12	0.1979
2	0.104538	0.061533	50	0.1228	17	0.1772
3	0.492922	-0.110887	44	0.207	11	0.2342
4	0.190329	-0.16942	42	0.1292	9	0.1875
5	-0.497332	0.07663	43	0.1439	6	0.1869
6	-0.523487	-0.108463	45	0.1393	5	0.1869
7	-0.372923	-0.330097	29	0.1409	23	0.1929
8	0.701644	0.278499	49	0.1853	21	0.1865
9	0.084098	-0.323887	46	0.1514	4	0.1875
10	-0.270702	0.027333	68	0.1347	23	0.1929
11	0.427812	0.11403	44	0.1203	21	0.1536
12	-0.727923	-0.162802	25	0.2232	1	0.1979
13	0.640898	-0.309689	64	0.3746	3	0.2478
14	0.374685	-0.326062	59	0.1607	4	0.2419
15	-0.127392	0.156916	59	0.1497	10	0.1932
16	-0.055546	-0.085375	72	0.1339	2	0.2173
17	0.276673	0.019505	52	0.1222	2	0.1772
18	0.244163	0.282663	37	0.1563	11	0.2493
19	-0.009659	0.311564	43	0.1874	15	0.1944
20	-0.139808	-0.337433	49	0.145	23	0.2171
21	0.579663	0.137463	51	0.1821	11	0.1536
22	-0.657535	0.280442	38	0.2531	5	0.2592
23	-0.272349	-0.165546	36	0.1332	7	0.1929
24	-0.372964	0.293113	58	0.174	5	0.2497
25	0.493386	0.320339	31	0.1488	21	0.2022
min	-0.727923	-0.337433	25	0.1203		0.1536
max	0.701644	0.320339	72	0.3746		0.2592
mittel			47	0.1669		0.2031
Range	1.429567	0.657772	47	0.2543		0.1056

Tab. A7 Kreuztabelle der Quer- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)

		Klassen der Querwölbungsradien													Gesamt
		< -3000	-3000 - -2000	-2000 - -1000	-1000 - -600	-600 - -300	-300 - 0	0 - 300	300 - 600	600 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	> 3000		
Klassen der Vertikalwöl- bungsradien	< -3000	5093	1174	1674	778	484	116	61	260	658	1638	1263	4897	18096	
	-3000 - -2000	1269	442	692	361	227	57	25	98	240	507	345	1199	5462	
	-2000 - -1000	1841	754	371	790	591	178	58	95	350	826	504	1609	9067	
	-1000 - -600	856	415	901	619	471	145	41	143	252	416	245	733	5237	
	-600 - -300	729	344	760	539	436	141	54	135	195	369	179	554	4435	
	-300 - 0	277	151	381	298	205	51	40	84	115	174	102	252	2130	
	0 - 300	46	17	38	30	23	5	255	229	141	112	29	67	992	
	300 - 600	309	135	232	162	108	15	289	710	606	693	223	437	3919	
	600 - 1000	689	269	391	231	138	34	174	558	794	1066	401	949	5694	
	1000 - 2000	1781	502	807	389	269	49	121	557	1057	1942	995	2396	10865	
	2000 - 3000	1240	338	480	219	138	34	41	196	430	946	646	1627	6335	
	> 3000	4645	993	1467	618	370	85	71	368	820	2240	1637	5658	18972	
	Gesamt neg.	10065	3280	5779	3385	2414	688	279	915	1810	3930	2638	9244	44427	
Gesamt pos.	8710	2254	3415	1649	1046	222	951	2618	3848	6999	3931	11134	46777		
Gesamt	18775	5534	9194	5034	3460	910	1230	3533	5658	10929	6569	20378	91204		



Tab. A8 Kreuztabelle der Horizontal- und Vertikalkrümmung (Arbeitsgebiet Grävenwiesbach, n = 91204)

		Klassen der Horizontalwölbungsradien													Gesamt
		< -3000	-3000 - -2000	-2000 - -1000	-1000 - -600	-600 - -300	-300 - 0	0 - 300	300 - 600	600 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	> 3000		
Klassen der Vertikalwöl- bungsradien	< -3000	385	240	631	775	1670	5618	5053	1693	792	612	215	412	18096	
	-3000 - -2000	112	60	172	229	562	1913	1276	512	233	201	68	124	5462	
	-2000 - -1000	205	97	303	403	910	3607	1769	735	386	323	102	227	9067	
	-1000 - -600	105	58	179	253	575	2237	838	403	218	186	66	119	5237	
	-600 - -300	104	59	174	246	549	1817	638	363	194	152	43	96	4435	
	-300 - 0	46	20	73	112	232	880	378	156	88	61	25	59	2130	
	0 - 300	10	5	13	20	33	78	697	73	25	20	4	14	992	
	300 - 600	61	27	105	125	207	436	2182	383	179	110	34	70	3919	
	600 - 1000	100	56	155	198	376	867	2761	593	242	169	66	111	5694	
	1000 - 2000	220	111	326	352	790	1998	4762	1129	479	337	122	239	10865	
2000 - 3000	122	62	174	237	481	1373	2611	641	280	170	59	125	6335		
> 3000	413	198	589	746	1594	4638	6731	1981	795	651	224	412	18972		
Gesamt neg.	957	534	1532	2018	4498	16072	9952	3862	1911	1535	519	1037	44427		
Gesamt pos.	926	459	1362	1678	3481	9390	19744	4800	2000	1457	509	971	46777		
Gesamt	1883	993	2894	3696	7979	25462	29696	8662	3911	2992	1028	2008	91204		



## Übersicht A1 Verwendete Programmodule des DRM (BAUER 1985)

DRMCTL	Programm zum Erstellen einer Steuerdatei für die verwendete Rasterdatei(en)
DRNGEF	Programm zur Berechnung der Exposition, Hangneigung, Vertikalkrümmung, Horizontalkrümmung
DRMSEE	Programm zum Auffüllen von abflußlosen Hohlformen
DRMEGN	Programm zur Berechnung von Oberflächeneinzugsgebieten-Größe und mittleren Hangneigung
DRMDTL	Programm zur Berechnung der Entfernung einer Rasterzelle zur Tiefenlinienrasterzelle
DRMDWS	Programm zur Berechnung der kürzesten Entfernung zur Wasserscheide und Koordinaten der Wasserscheidenrasterzellen
DRMMWS	Programm zur Berechnung der längsten Entfernung zur Wasserscheide und Koordinaten der Wasserscheidenrasterzellen
DRMTLP	Programm zur Konvertierung der Tiefenlinienrasterzellen in Vektorlinien
DRMWSP	Programm zur Konvertierung der Wasserscheidenrasterzellen in Vektorlinien

## Übersicht A2 Entwickelte Programmodule

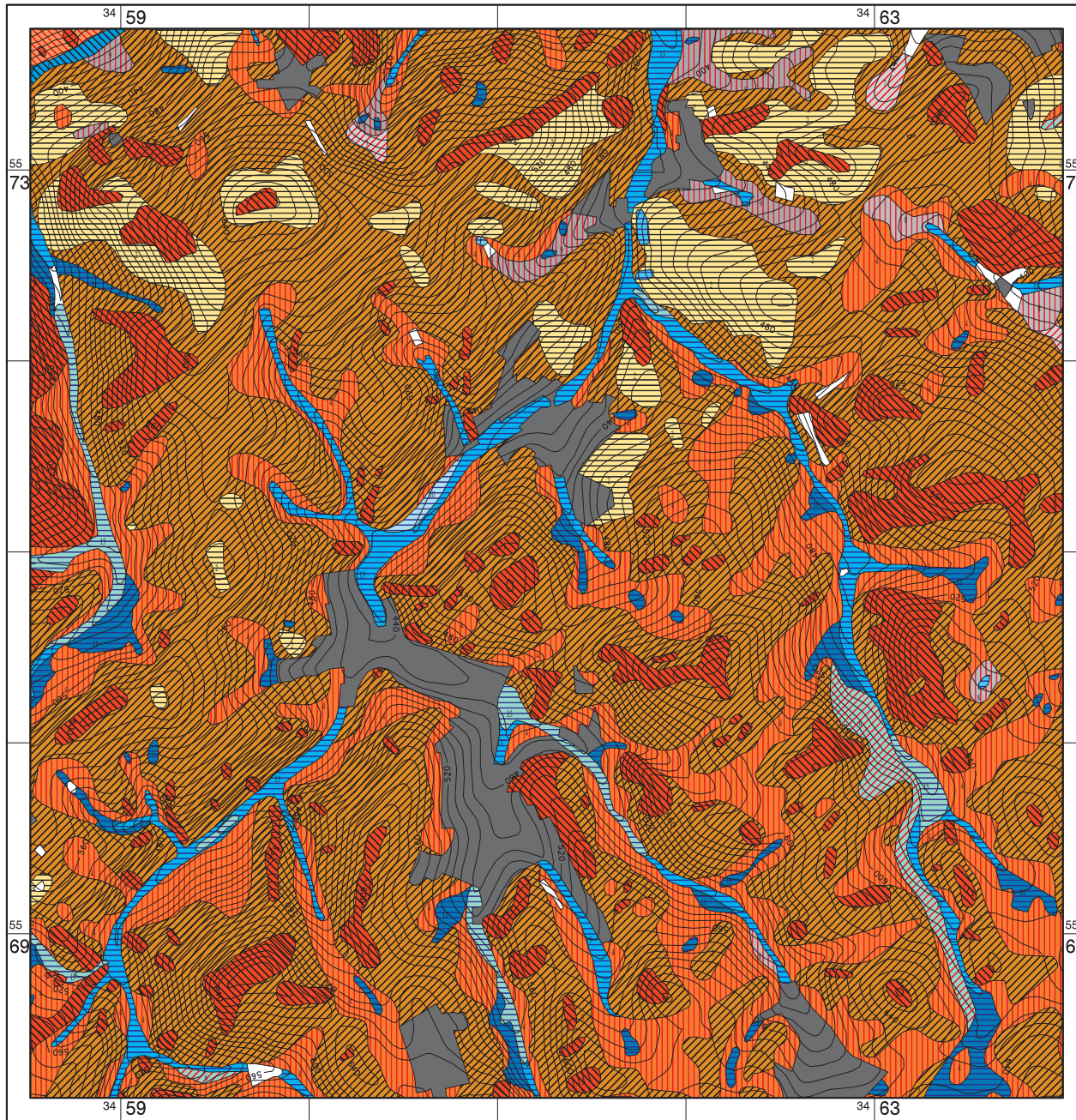
Programm-name	Erläuterung	System
PENK	Programm zur Berechnung von Exposition, Neigung und Krümmung (Vertikal-, Horizontal-, Quer- und Flußkrümmung); wahlweise Wölbungsradien	PC (Win 3.11) UNIX in Plan.
SENKEN	Programm zur Ausgliederung von Senkenbereichen	PC (DOS)
IVHG	Iteratives, multivariates Distanzverfahren zur Bestimmung homogener Reliefeinheiten, mit ARC-INFO Modulen zur Kartenherstellung	UNIX
RELMAS	Programm zur Ermittlung eines Index der relativen Massenbilanz	PC (WIN 3.11)
KR-FORM	Programm zur Bestimmung von Reliefformelementen nach Vertikal- und Querwölbung mit lokal ermittelten KR-Kriterien (WR) - Programm ist unter WIN 3.11 in PENK integriert	PC (DOS)
IDR-SURF IDR-GIRV IDR-GIRR IDR-ARCG	Datenkonvertierungsprogramme von/nach IDRISI zu Giros (Vektor, Raster), ARC - GRID (ASCII), SURFER (GRID, .bln)	PC (DOS)
PLOTLVA	Programm zur Visualisierung und Editierung von Primär-Höhendaten des Hessischen Landesvermessungsamtes	PC (DOS)

Übersicht A3 Schüssel zur Beschreibung des oberflächennahen Untergrundes  
(qh/qp Deckschichten)

<b>HL</b>	
<b>Holozäne Überlagerung</b>	
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch	
f	Solumsediment - fluviatil
a	Solumsediment - äolisch
lf	Auensediment
yy	anthropogene Überlagerung aus ganz oder teilweise nicht natürlichem Bodenmaterial
iy	anthropogene Überlagerung aus natürlichem Bodenmaterial
<b>DL</b>	
<b>Decklage</b>	
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch	
s	Solifluktionsschutt
sb	Solifluktionsschutt aus Blöcken
b	Laacher-See-Tephra (durch Geländebefund festgest. deutliche Komponente)
lo	Lößlehm
los	Sandlößlehm
sa	Flugsand
hfl	Hochflutlehm / -ton
hfs	Hochflutsand
vp	zu Feinmaterial aufgearbeitetes Gestein - vorwiegend physikalische Verwitterung
vt	Zersatz - Ton, Schuff - vorwiegend chemische Verwitterung
ve	Entkarbonatisiert - Residualton
lgs	Lockergestein (allgemein) - vorwiegend Sandfraktion
lgu	Lockergestein (allgemein) - vorwiegend Schlufffraktion
lgt	Lockergestein (allgemein) - vorwiegend Tonfraktion
Zusätzliche Beschreibungen zur DL	
g	geringmächtig DL (bspw. in divergierenden Hangbereichen). Die Beschreibungen zum Bodenerosionszustand beziehen sich auf die Decklage.
e	erodiert (nach Geländebefund unsicher, ohne Abstufung)
Et	örtlich gering bis mittel erodiert
E	erodiert (nach Geländebefund) Stufen von 1 bis 3
<b>ML</b>	
<b>Mittellage</b>	
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch entspricht den Attributen der DL mit Ausnahme von b - (Bimstoffkomponente)	
<b>SL</b>	
<b>qp Sedimentäre Lage</b>	
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch	
lo	Lößlehm
lö	Löß
los	Sandlöß
sa	Flugsand
gf	Terrassensand, -Kies
lhf	Hochflutablagerungen
li	limnische Ablagerungen allgemein
slo	Schwemmlöß
sl	Schwemmlehm, verspülter Lößlehm
ss	Schwemmsand

## Fortsetzung Übersicht A3

BL		Basislage
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch		
s	Schutt	
sb	Schutt aus Blöcken	
hfl	Hochflutlehm / -ton	
hfs	Hochflutsand	
vp	zu Feinmaterial aufgearbeitetes Anstehendes oder hangaufwärts Anstehendes - vorwiegend physikalische Verwitterung	
vt	Zersatz - Ton, Schuff - vorwiegend chemische Verwitterung	
ve	Entkarbonatisiert - Residualton	
A		Anstehendes Gestein
Deckschichtenattribute petrographisch/genetisch		
lu	unverwittertes anstehendes Lockergestein	
lv	verwittertes anstehendes Lockergestein	
lt	anstehende Tone (bspw. Röt, Keuper, ...), in situ	
u	anstehendes Festgestein (nicht grabbar)	
uv	verwittertes anstehendes Festgestein; in situ - noch im primären Verband	
uvt	Zersatz - Ton, Schluff; in situ	
uve	Residualton in Klüften auf Kalk/Dolomitgestein - durch vorwiegend chemische Verwitterung	
ug	Grus, in situ	
um	Mergel, in situ	
Genetische Beschreibungen zu den Deckschichten		
p	durch "P"erstruktion, Solimixtion mehr oder weniger verändertem Stoffbestand gegenüber dem Anstehenden geprägte Decklage (im Sinne "Decksediment" nach SEMMEL)	
fl	Solifluktionsfließerde mit geringerem Anteil an Bodenskelett ( $\leq x3$ ) und hohem Anteil an äolischen Bestandteilen	
sh	Solifluktionsschutt mit hohem Anteil an Bodenskelett ( $> x3$ )	
sj	Schutt ohne Solifluktionsmerkmale (Steineinregelung, ...), durch Schlammstrom, Rutschungen o. ä. Prozessen verlagertes Material mit mehr oder weniger chaotischer Lagerung	
f	fluviatiles Sediment	
a	äolisches Sediment	
l	limnisches Sediment	



# Karte 1

## Boden- und Deckschichtenkarte

### Arbeitsgebiet Oberreifenberg

#### Tellblattschnitt BK25 Bl. 5716 Oberreifenberg

Quelle: Bodenkarte Bl. 5716 Oberreifenberg, FICKEL (1977),  
 Bodenmanuskriptkarten, Bohrbücher (E. Thiel), Hess. Landesamt für Bodenforschung.  
 Die Beschreibung der Bodeneinheiten wurde gegenüber der orig. BK verändert.  
 Eine erweiterte Legende ist im Datenbankauszug in Tab. A1 dokumentiert.

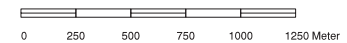
#### Bodentypen

- 1 Braunerde-Ranker (\*sf\*gsf)
- 2 erod. Braunerde (\*sf\*ph)
- 3 Braunerde (\*sf)
- 4 Parabraunerde (\*sf)
- 5 Parabraunerde (\*q-l-s)
- 6 Pseudogley-Parabraunerde (\*sf)
- 7 Pseudogley (\*sf\*ph)
- 8 Pseudogley; SL (\*sf)
- 9 Pseudogley (\*sf)
- 10 Brauner Auenboden (Lhf/\*sf\*ph)
- 11 Quellengley; Hanggley (\*sf\*ph\*q)
- 12 Gley (\*q\*sf)
- 13 Gley (Lf)
- 14 Anmoorgley (\*sf)
- 15 Auengley (Lf)
- 16 Niedermoorgley (Hn/\*sf\*q)
- künstlich verändertes Gelände
- Siedlungsflächen

#### Deckschichten









- | Deckschichten   | DS-Einheit |
|---|------------|
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL s;vp / A m                                 | 1          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL s;vp;lo / BL vplvt;sIA m (*sf*q)           | 3          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL(rest) s;vp;lo / BL vt;sIA m (*sf*gsf)      | 2          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL vp,lo;s / ML vp,lo;s / BL vplvt;s (*sf)    | 4          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL vp,lo;s / ML vp,lo;s / BL vplvt;s (*q-l-s) | 5          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> DL vp;s;lo / ML vp;s;lo / BL s;vplvt (*sf)    | 6          |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; border-style: dashed; margin-right: 5px;"></span> HL/SL ungetgliedert                           | 98         |


Höhenlinien, Äquidistanz 10 m



**Karte 2**  
**Klassifizierung der Exposition**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Expositionsrichtung in 8 Klassen  
 (nach AG Bodenkunde 1982)

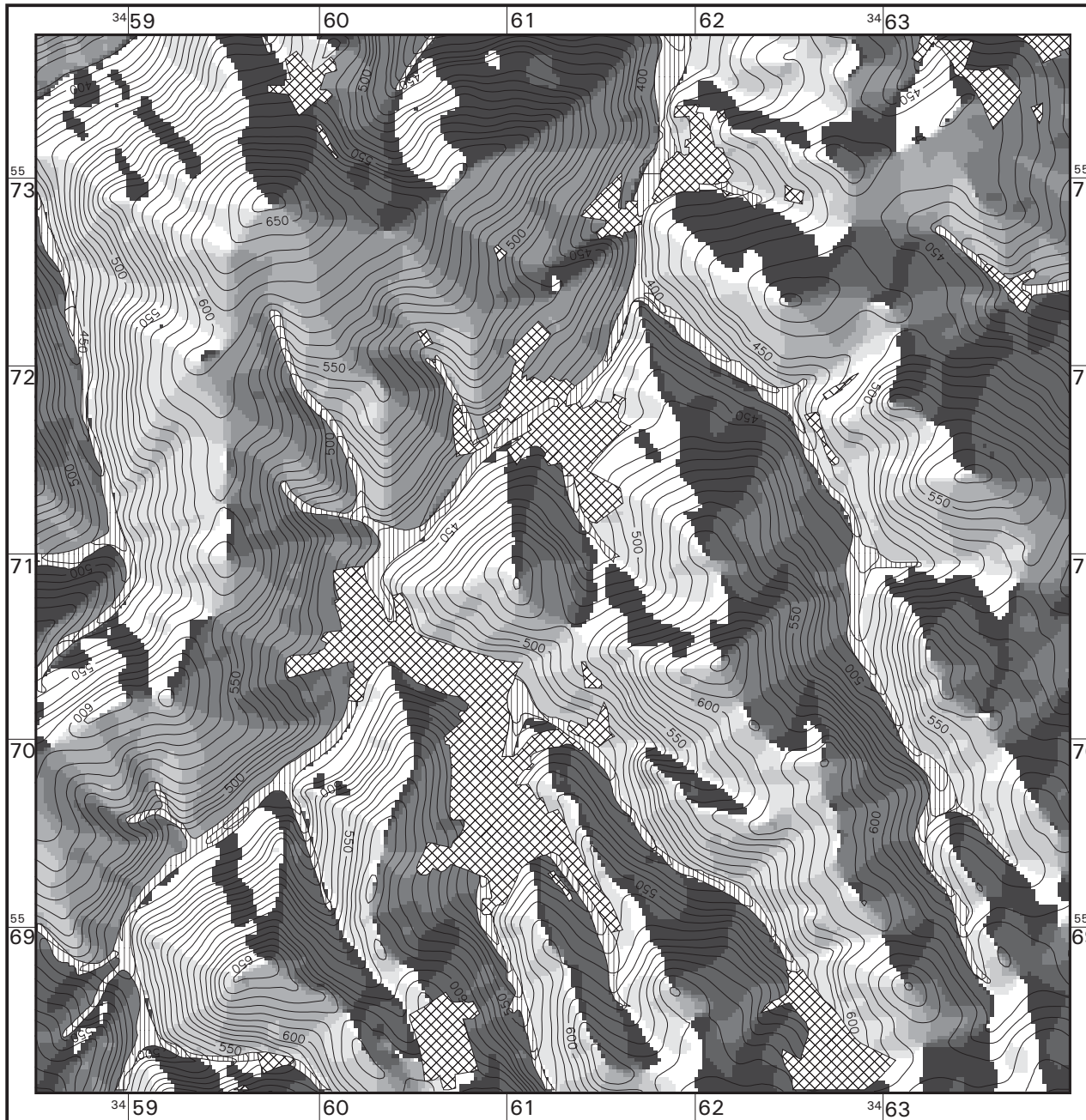
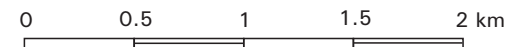
-  N
-  NW
-  W
-  SW
-  S
-  SO
-  O
-  NO

 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

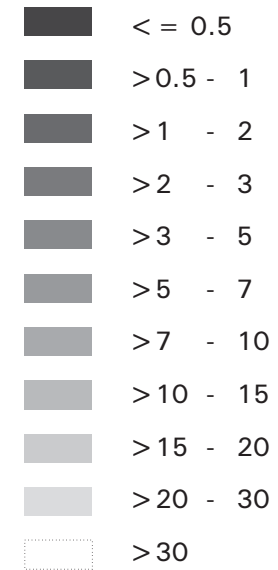
 Senkenbereich


Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274





**Karte 3**  
**Klassifizierung der Hangneigung**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Neigungsklassen in Grad  
 (nach AG Bodenkunde 1982)

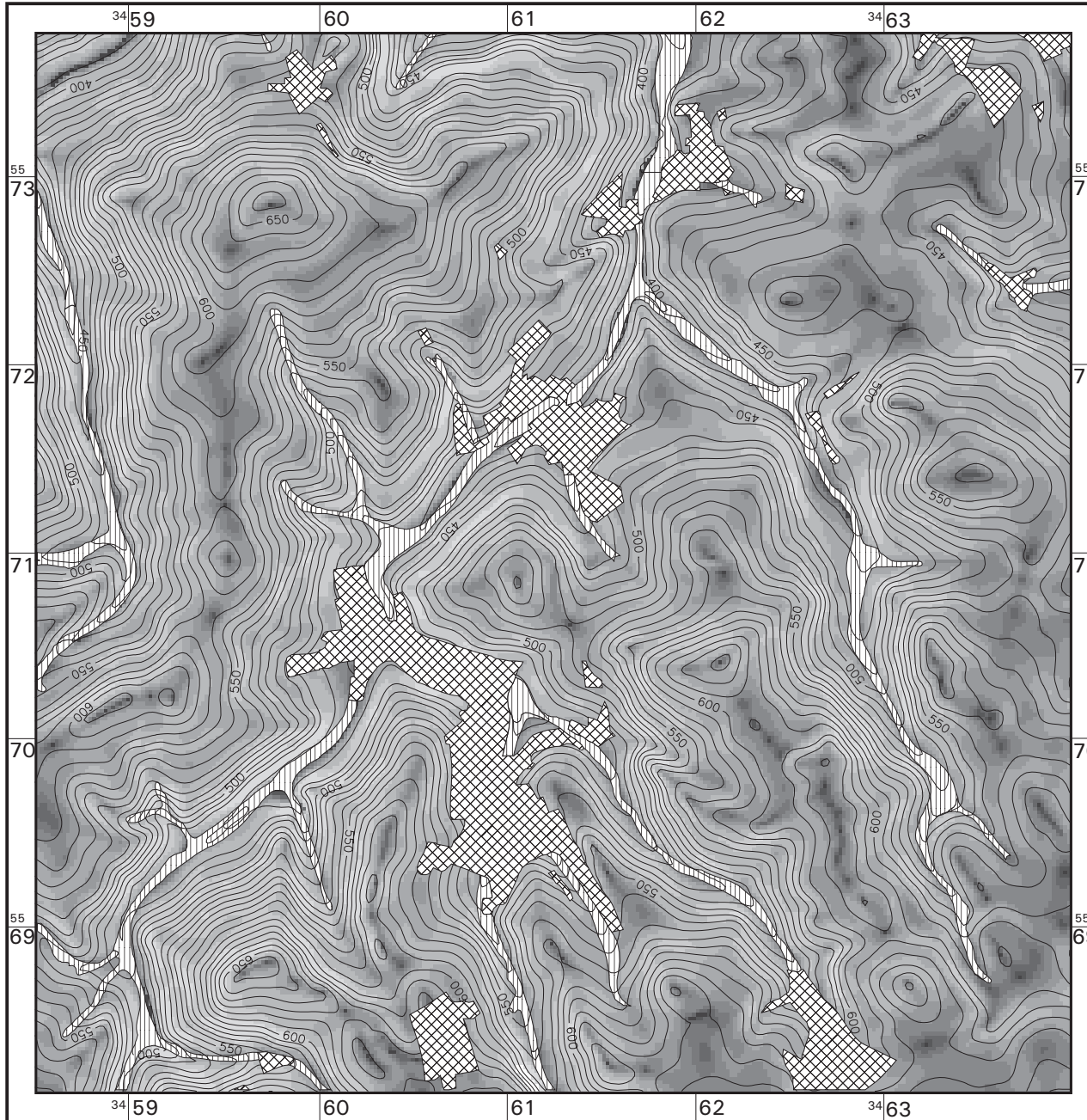
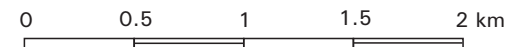


 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

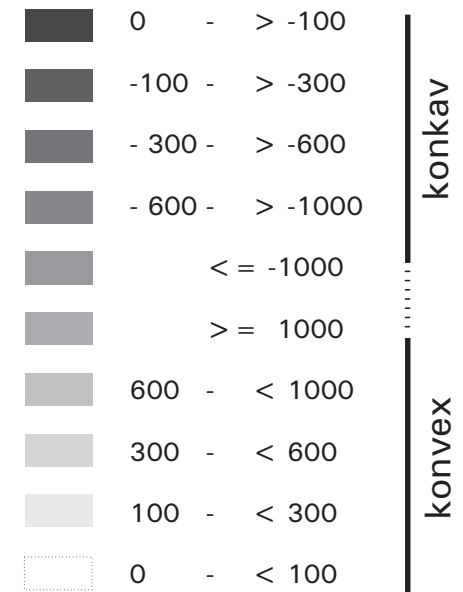
Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274







**Karte 4**  
**Klassifizierung der Vertikalkrümmung**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Vertikalkrümmungsradius in Meter

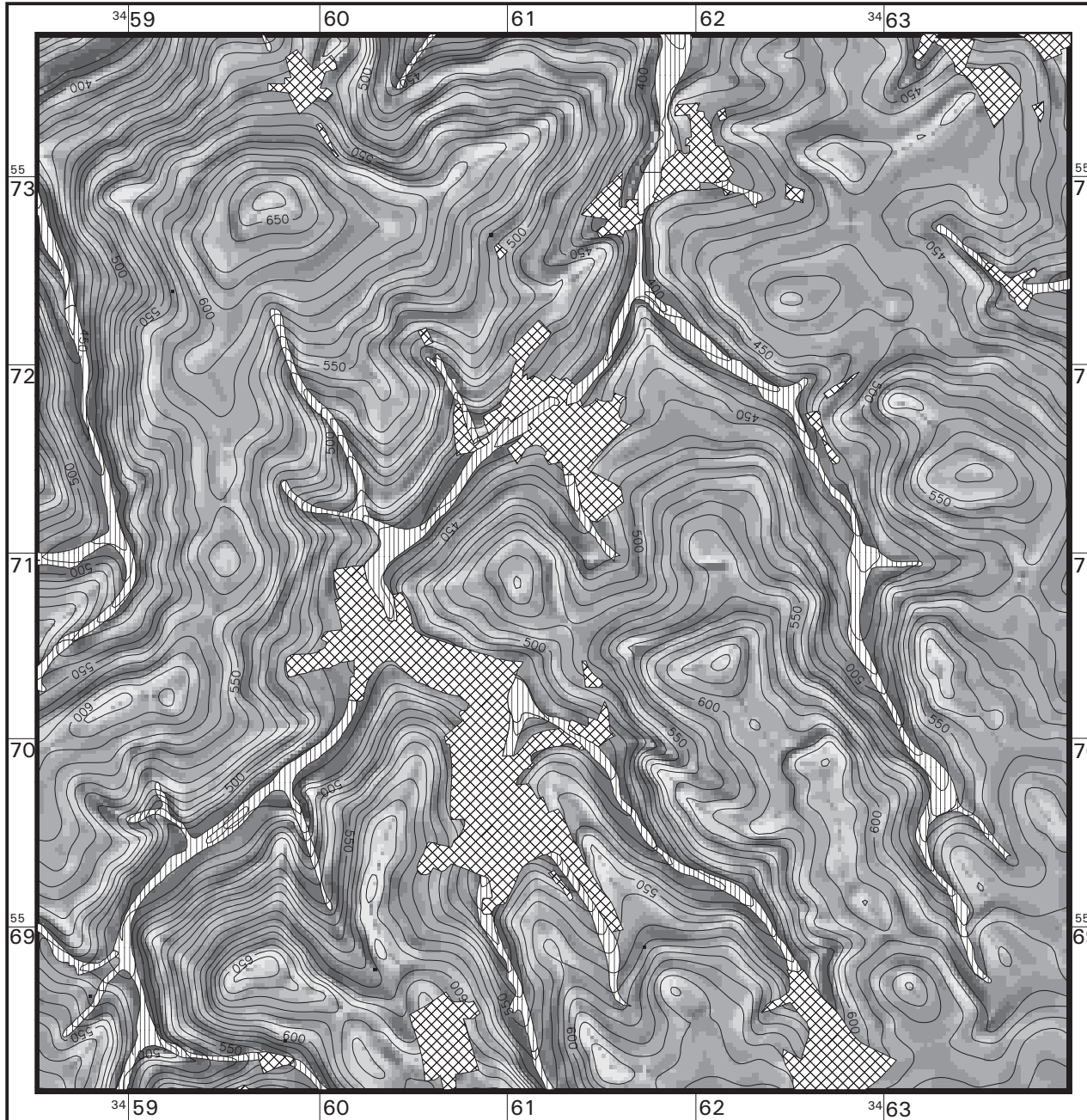
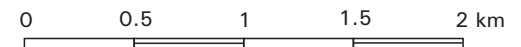


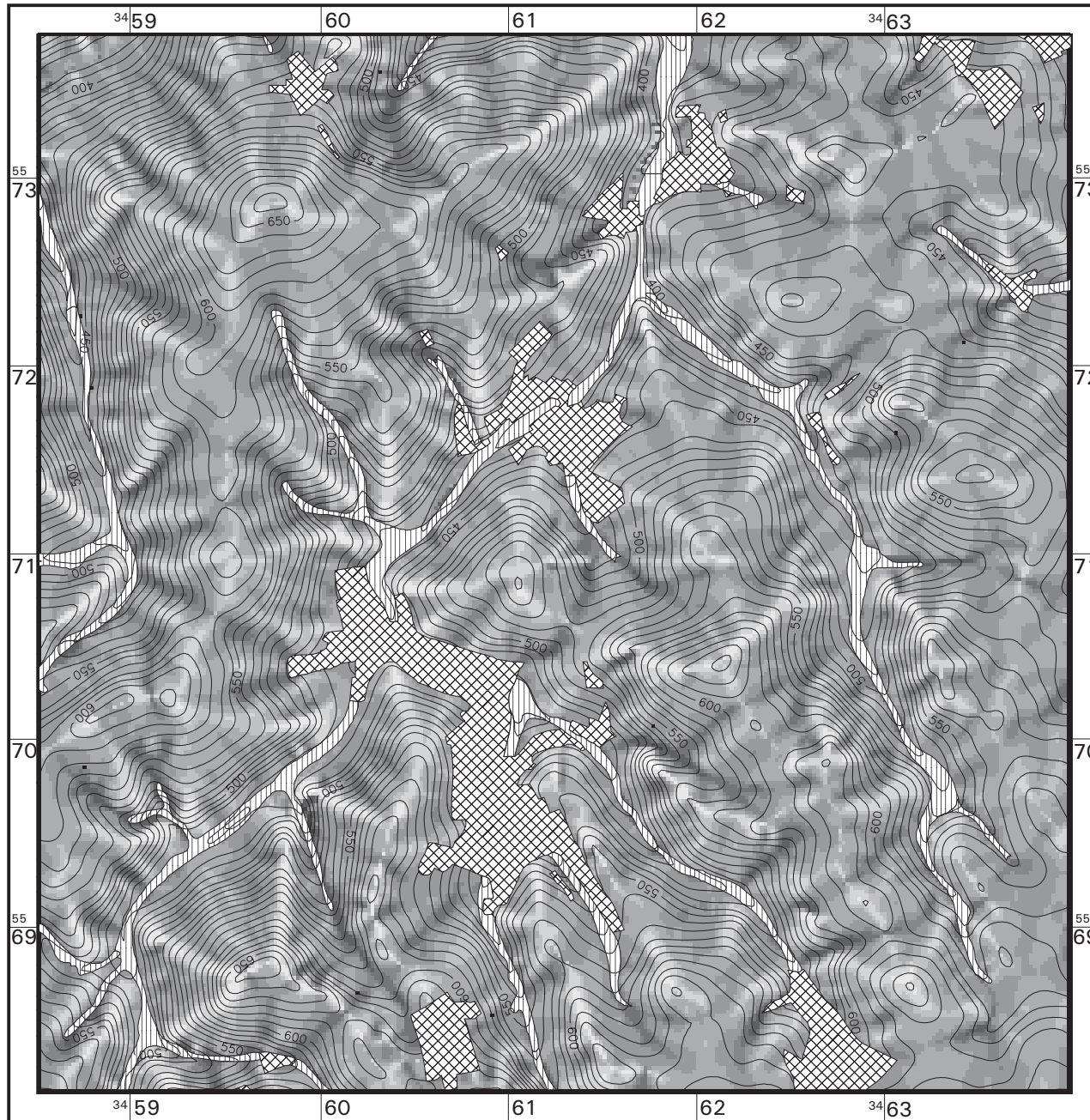
 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274



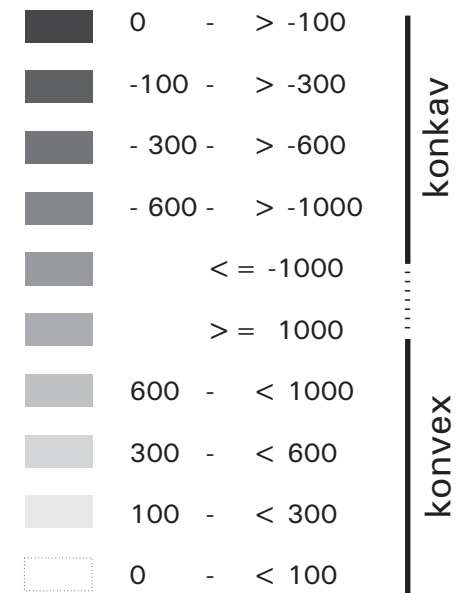



### Karte 5

### Klassifizierung der Querkrümmung

Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Querkrümmungsradius in Meter

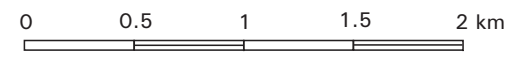


 Isohypsen  
Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

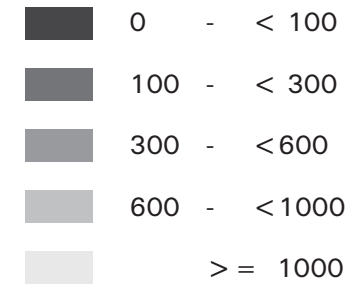
 Senkenbereich


Rastergröße des DHM: 20 m  
Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274




**Karte 6**  
**Klassifizierung der Flußkrümmung**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Flußkrümmungsradius in Meter (Absolutwert)

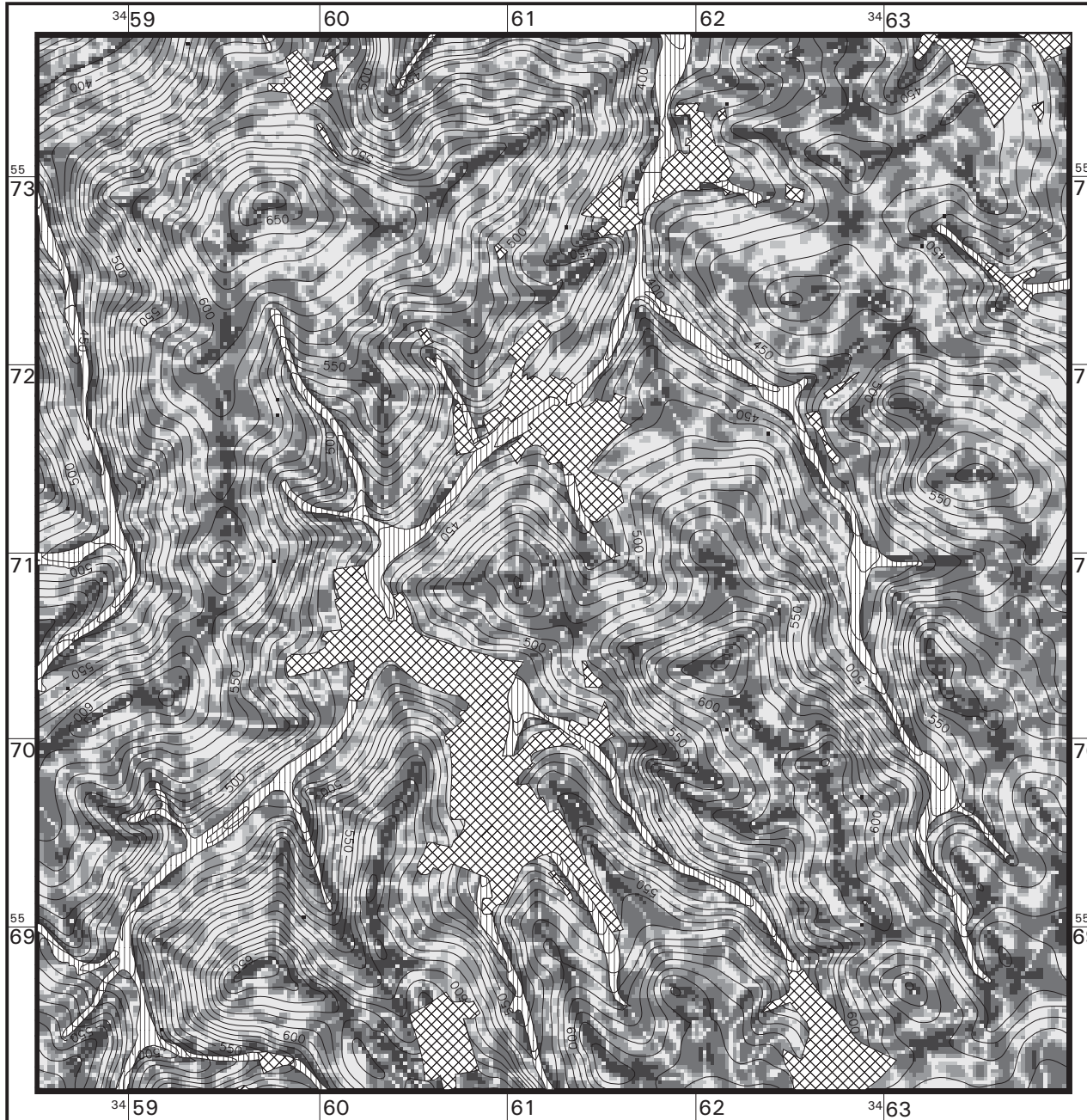
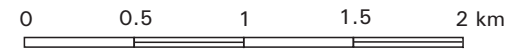


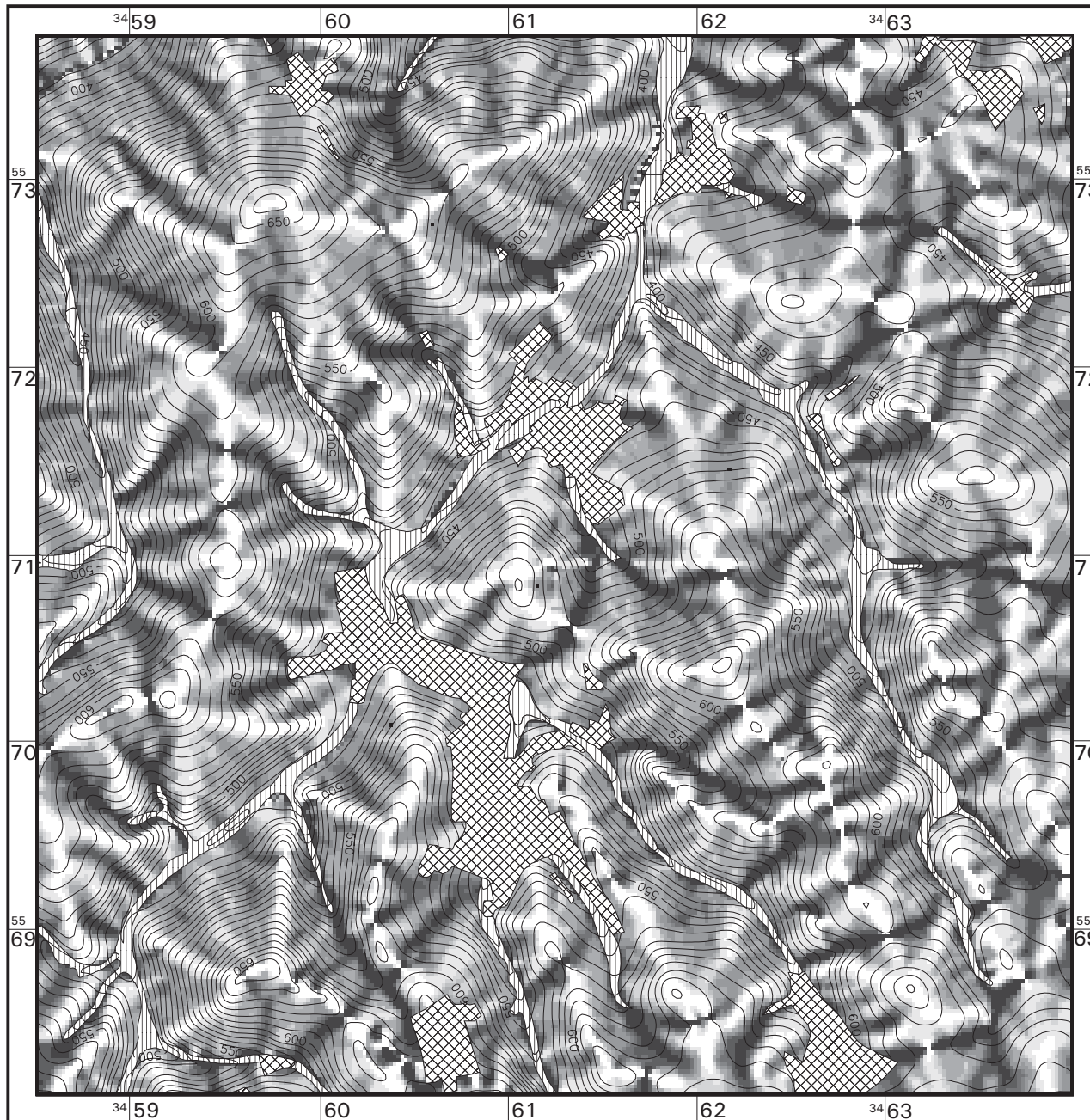
 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

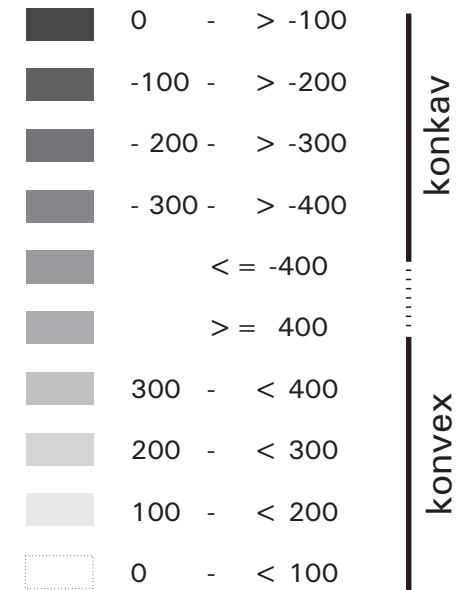
Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274





**Karte 7**  
**Klassifizierung der Horizontalkrümmung**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

Horizontalkrümmungsradius in Meter

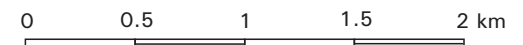


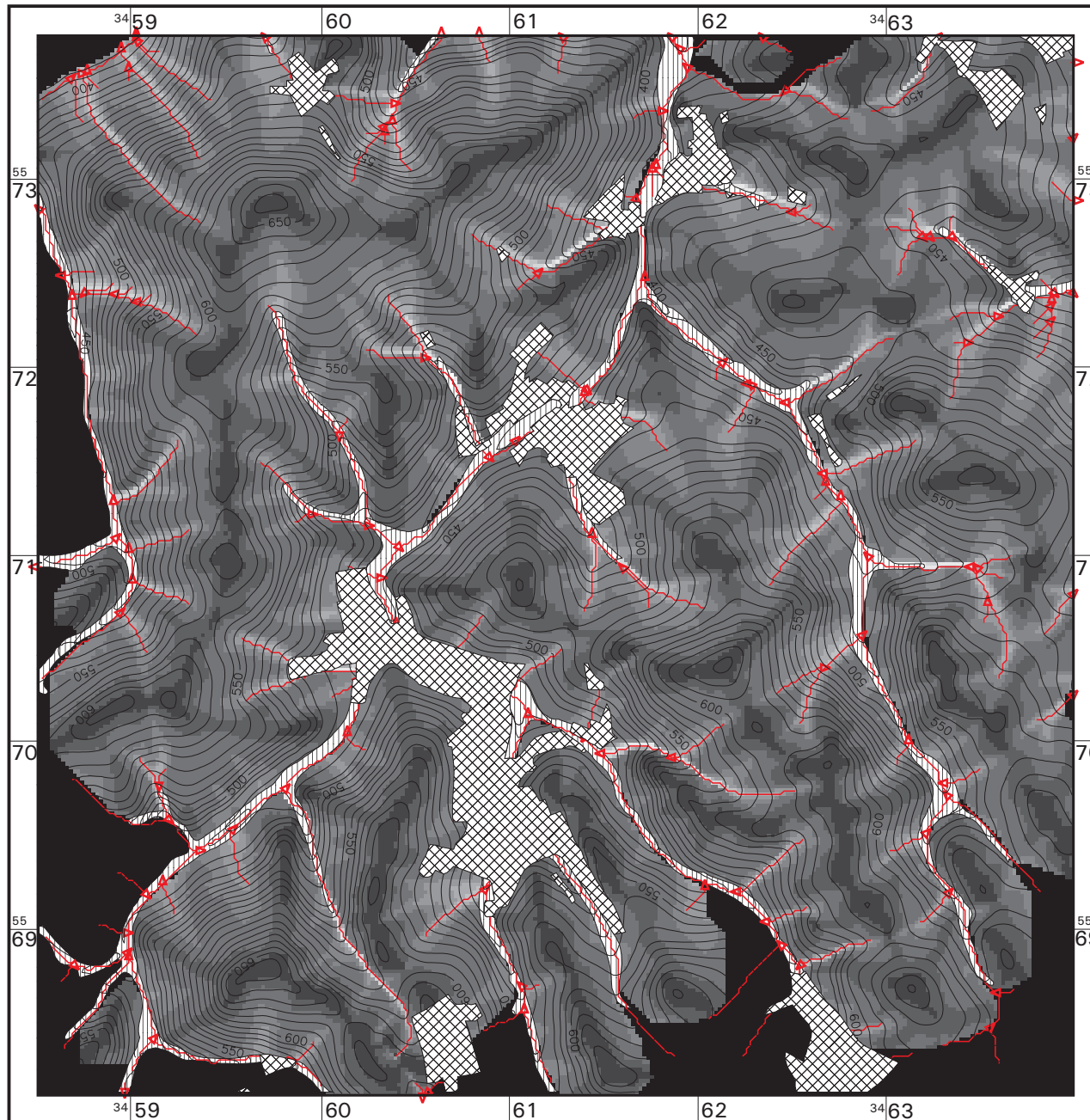
Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

Siedlungsfläche

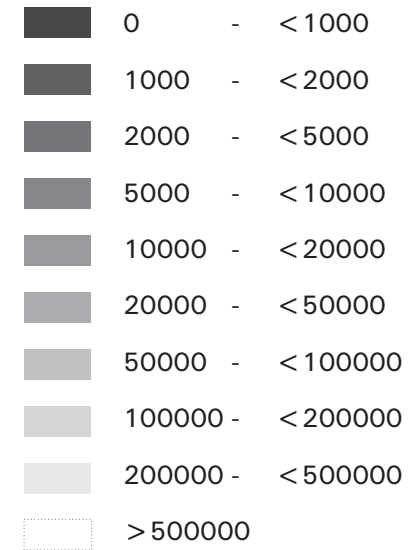
Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274





**Karte 8**  
**Klassifizierung der Einzugsgebietsgröße**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg  
 Einzugsgebietsgröße eines simulierten  
 Oberflächenabfluß\* (EZG in qm)



Tiefenlinien (E<sub>min</sub> = 5.000)

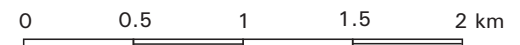
Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

Siedlungsfläche

Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274

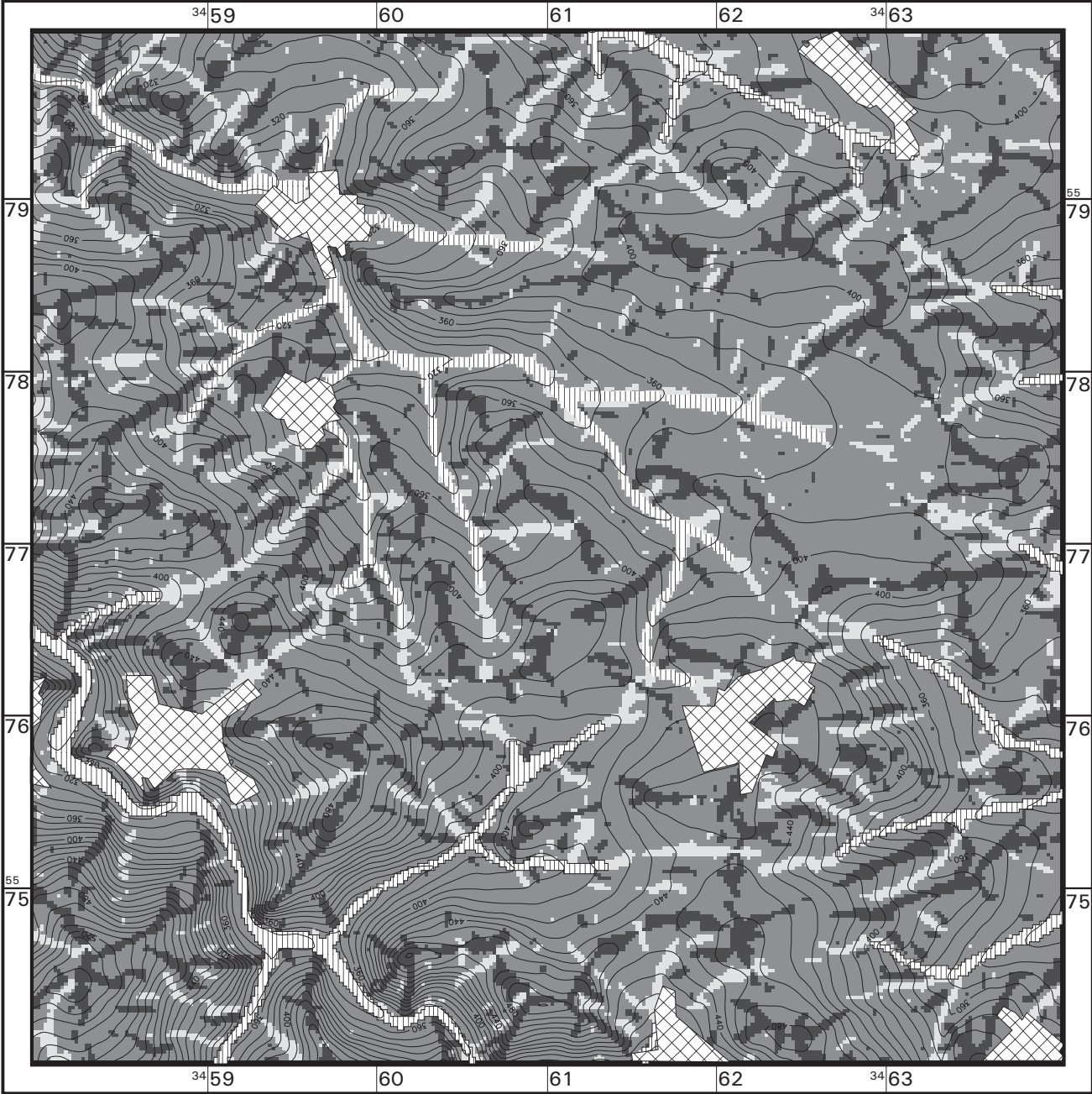
\*) Randbereiche mit schwarzer Markierung  
 weisen einen Zufluß von außerhalb des  
 Ausschnittes auf







# Karte 9


## Klassifizierung der Horizontalkrümmung nach KR-Kriterien


Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgeb.)  
 KR-Kriterien der diverg./konverg. Grundgesamtheit



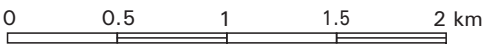
Form	KR-Kriterium der Krümmung
 konverg.	$< -0.0086179$ ( $r = -116$ m)
 gestreckt	
 diverg.	$> 0.0077449$ ( $r = 129$ m)

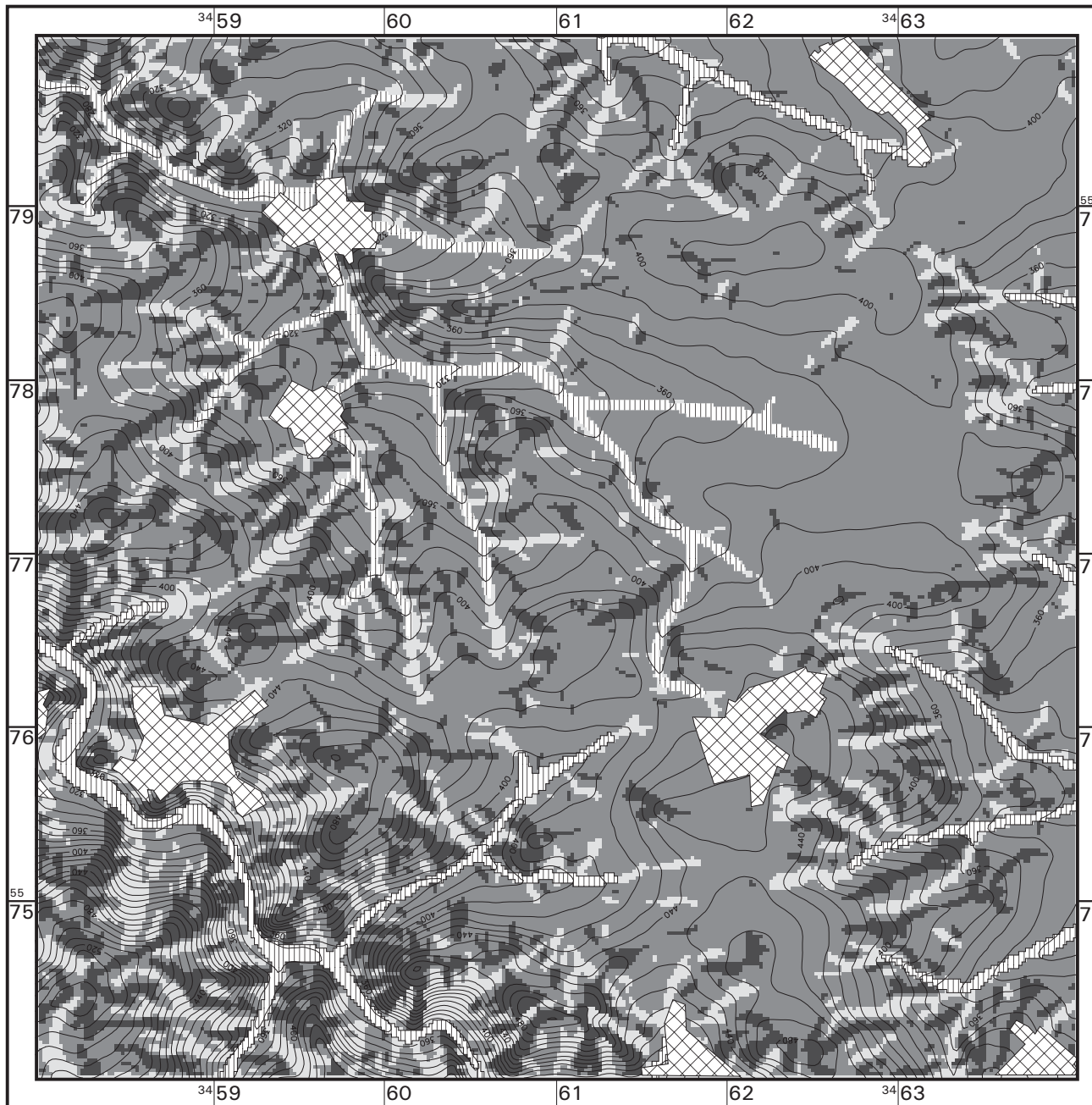
 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 302/302









## Karte 10

### Klassifizierung der Querkrümmung nach KR-Kriterien

Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgeb.)  
 KR-Kriterien der diverg./konverg. Grundgesamtheit

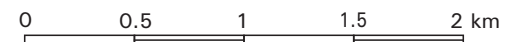
Form	KR-Kriterium der Krümmung
 konverg.	$< -0.000698017$ ( $r = -1432\text{m}$ )
 gestreckt	
 diverg.	$> 0.000737602$ ( $r = 1355\text{m}$ )

 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich




Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 302/302




# Karte 11

## Klassifizierung der Querkrümmung mit gleitendem KR-Kriterium

Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgeb.)  
 Klassifiz. mit lokalen KR-Kriterien (Fenster 21x21)

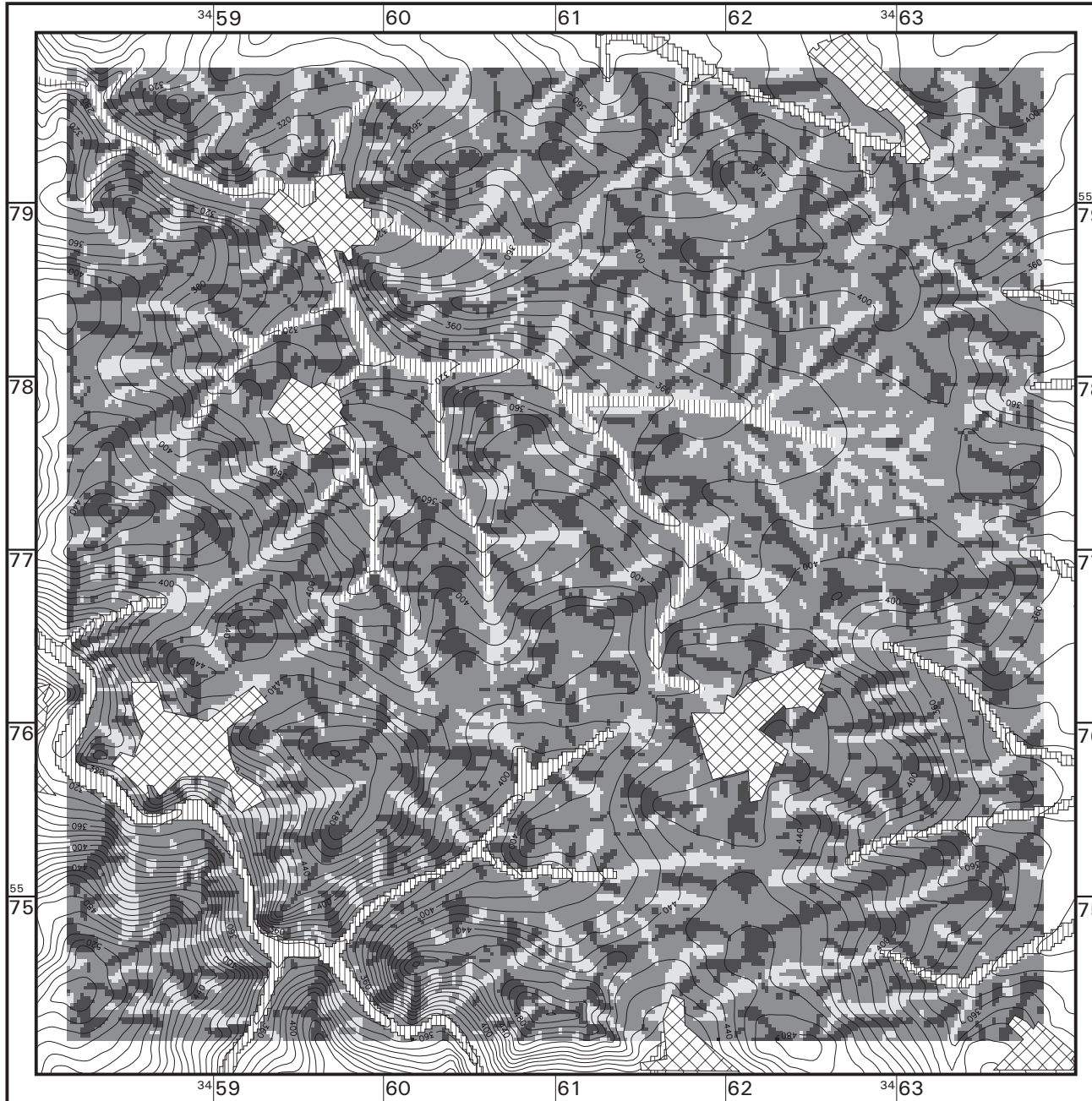
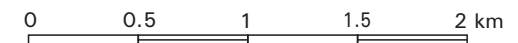
- Krümmungstendenz
-  konvergent
  -  gestreckt
  -  divergent

 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 284/284















## Karte 12


### Klassifizierung der Krümmung in Formelemente


Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach (Testgeb.)  
 Klassifiz. mit lokalen KR-Kriterien (Fenster 21x21)

#### Vertikalkrümmung/Querkrümmung

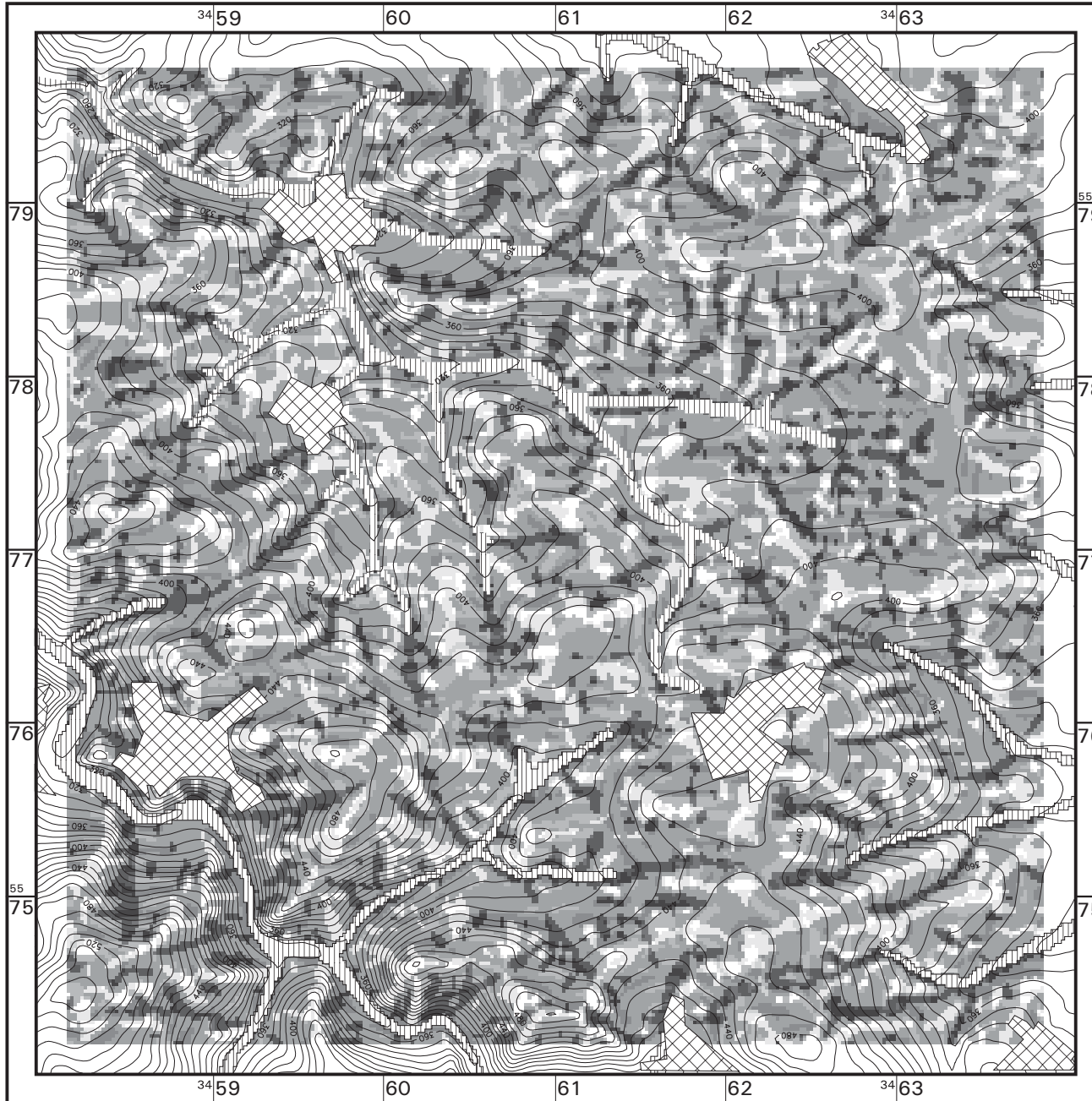
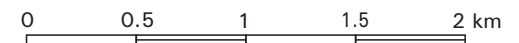
	V/V	V - konvergent/konkav G - gestreckt X - divergent/konvex
	G/V	
	X/V	
	V/G	
	G/G	
	X/G	
	V/X	
	G/X	
	X/X	

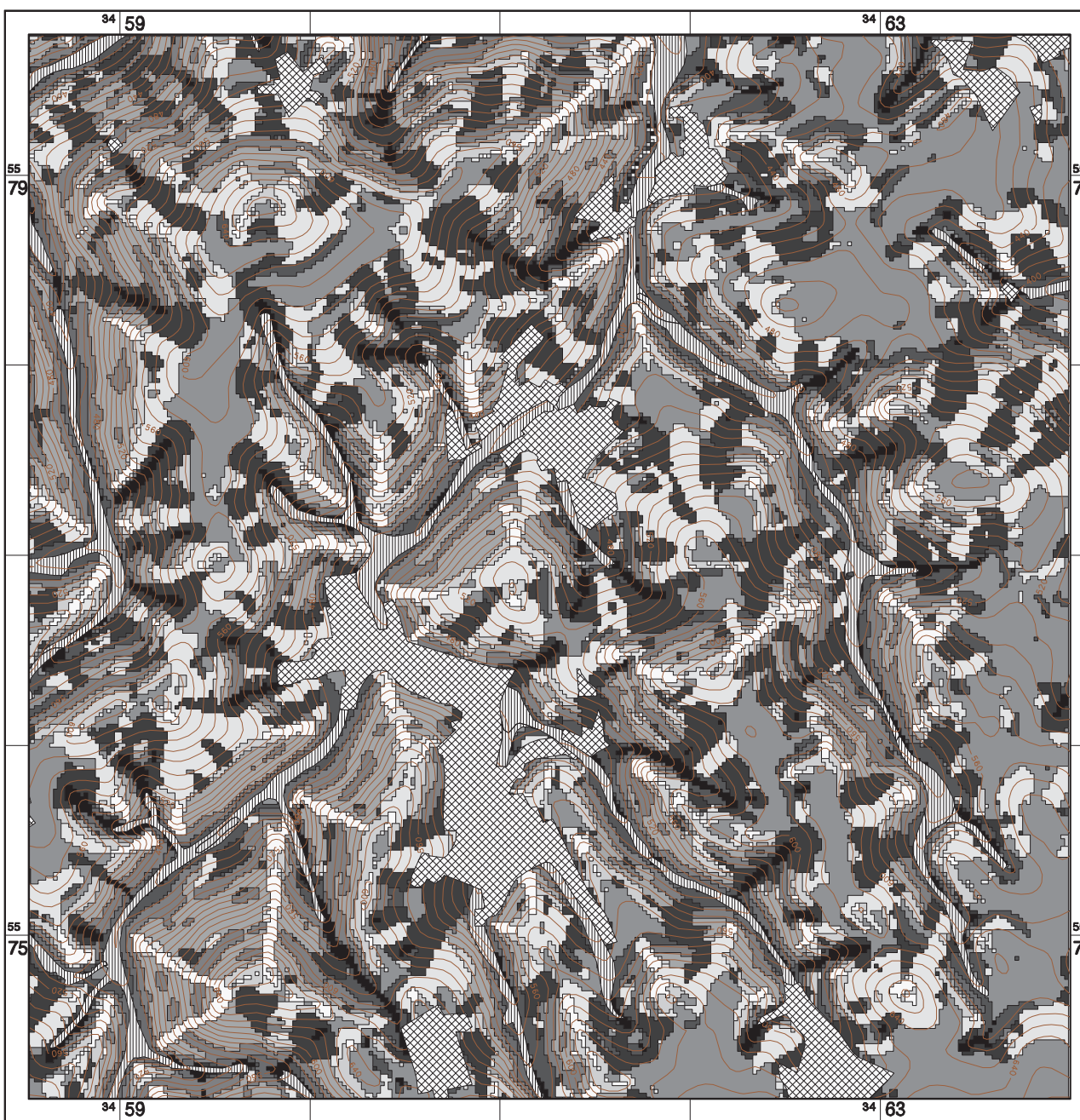
 Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

 Siedlungsfläche

 Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 284/284





# Karte 13

## Klassifizierung von Reliefeinheiten

- iteratives Clusterverfahren -

(Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg)

Variablen: Querkrümmung, Vertikalkrümmung, Neigung

### Cluster - Zentroide der Variablen

Cluster	Querkr.	Vertikalkr.	Neigung
1	2.5800	0.7200	0.4700
2	0.6700	0.1700	-0.2500
3	0.4700	1.7000	0.1700
4	0.2000	0.4800	1.4300
5	-0.0400	0.2900	-1.1500
6	-0.0800	-0.9400	1.1200
7	-0.3500	-2.9400	-0.1400
8	-0.3600	-1.0400	-0.7500
9	-0.5700	0.1300	0.0500
10	-2.6400	-0.4400	-0.5300

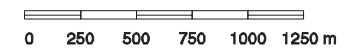
 Höhenlinien Äquidistanz 10 m

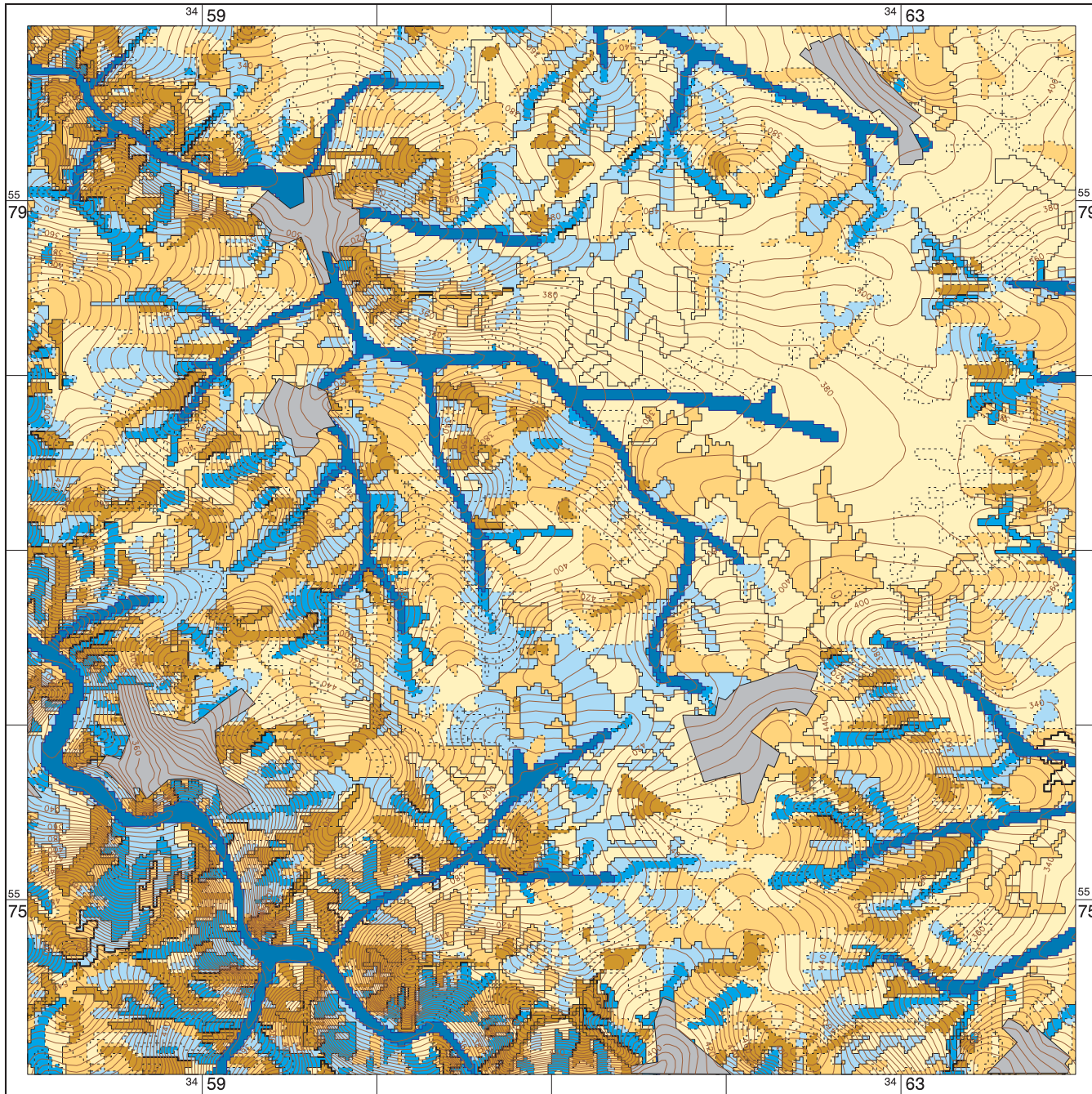
 Siedlungsflächen

 Senkenbereich

Rasterauflösung 20 m  
Anzahl der Zeilen = 282  
Anzahl der Spalten = 274

Standardisierung der Variablen:  
Mittelwert = 0  
Standardabweichung = 1  
SAS-Proceduren Standard/Fastclus  
Datengrundlage: DHM (Basis: TK25-Höhenlinien)

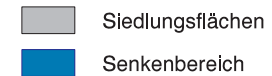
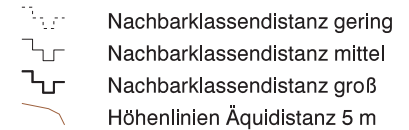
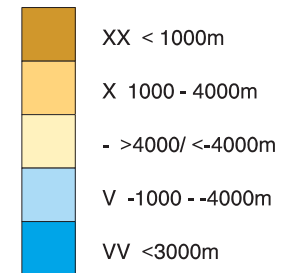




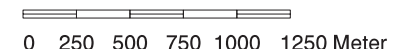
## Karte 14

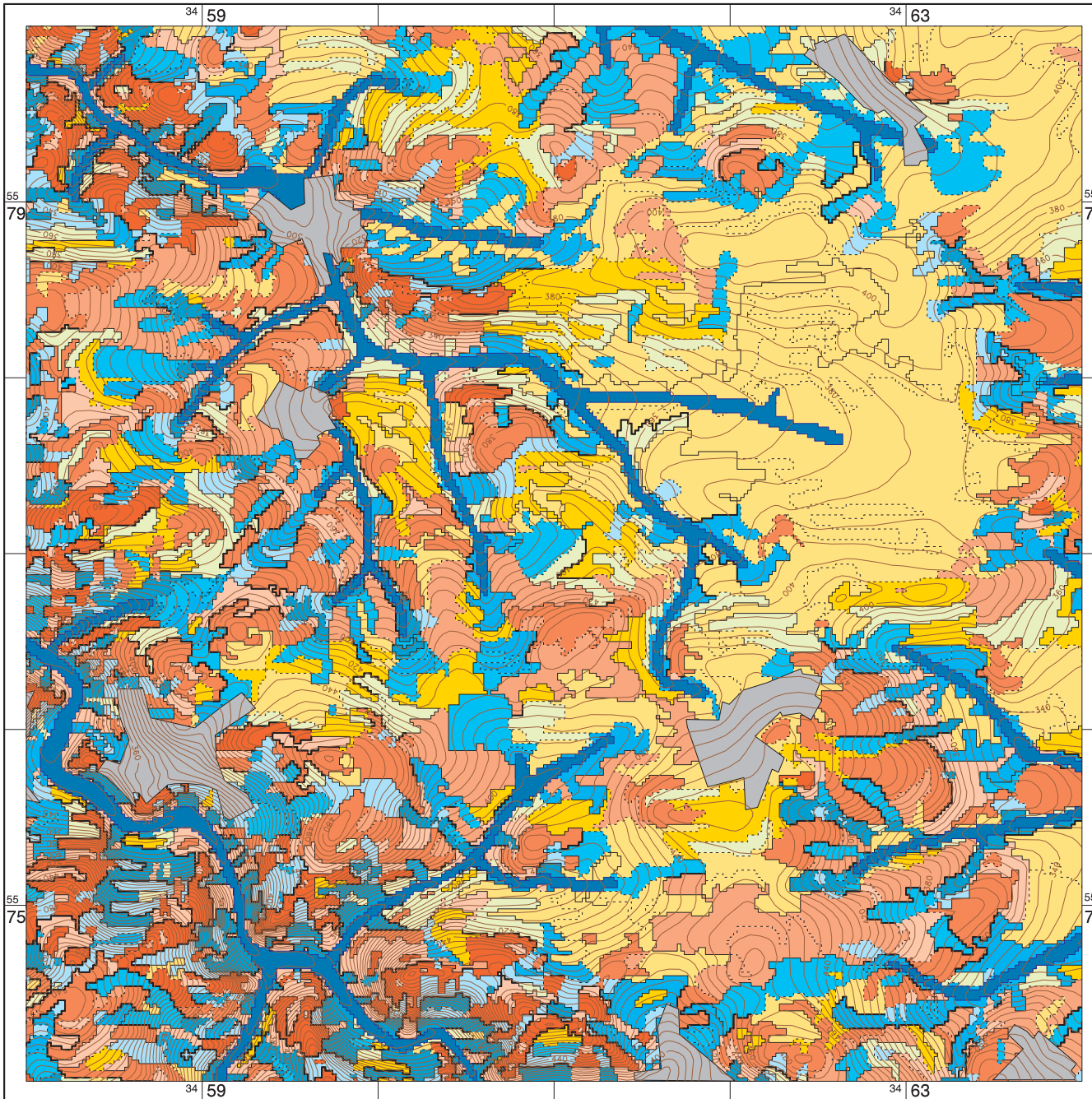
**Klassifizierung homogener Reliefformen**  
 raumorientiertes multivariates Distanzverfahren  
 (Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)  
 Variablen: Querkrümmung - Einzelauswertung

### Klassifizierte Querwölbungsradien



Rasterauflösung 20 m  
 Klassen bei Start = 91204  
 Klassen bei Abbruch = 1200  
 Transferfaktor QK = 0,00333  
 Gewichtung QK = 1  
 Datengrundlage: DHM (Basis TK5 Höhenlinien HLVA)  
 IVHG-Datei: gw-qrkr1-c

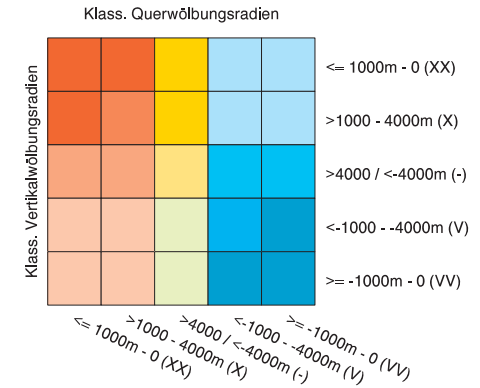




## Karte 15

**Klassifizierung homogener Reliefformen**  
 raumorientiertes multivariates Distanzverfahren  
 (Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)  
 Variablen: Querkrümmung, Vertikalkrümmung

### Klassifizierte Wölbungsradien



- Nachbarklassendistanz gering
- Nachbarklassendistanz mittel
- Nachbarklassendistanz groß
- Höhenlinien Äquidistanz 5 m

Siedlungsflächen

Senkenbereich

Rasterauflösung 20 m

Klassen bei Start = 91204

Klassen bei Abbruch = 1200

Transferfaktor QK = 0,000666

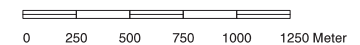
Gewichtung QW = 1

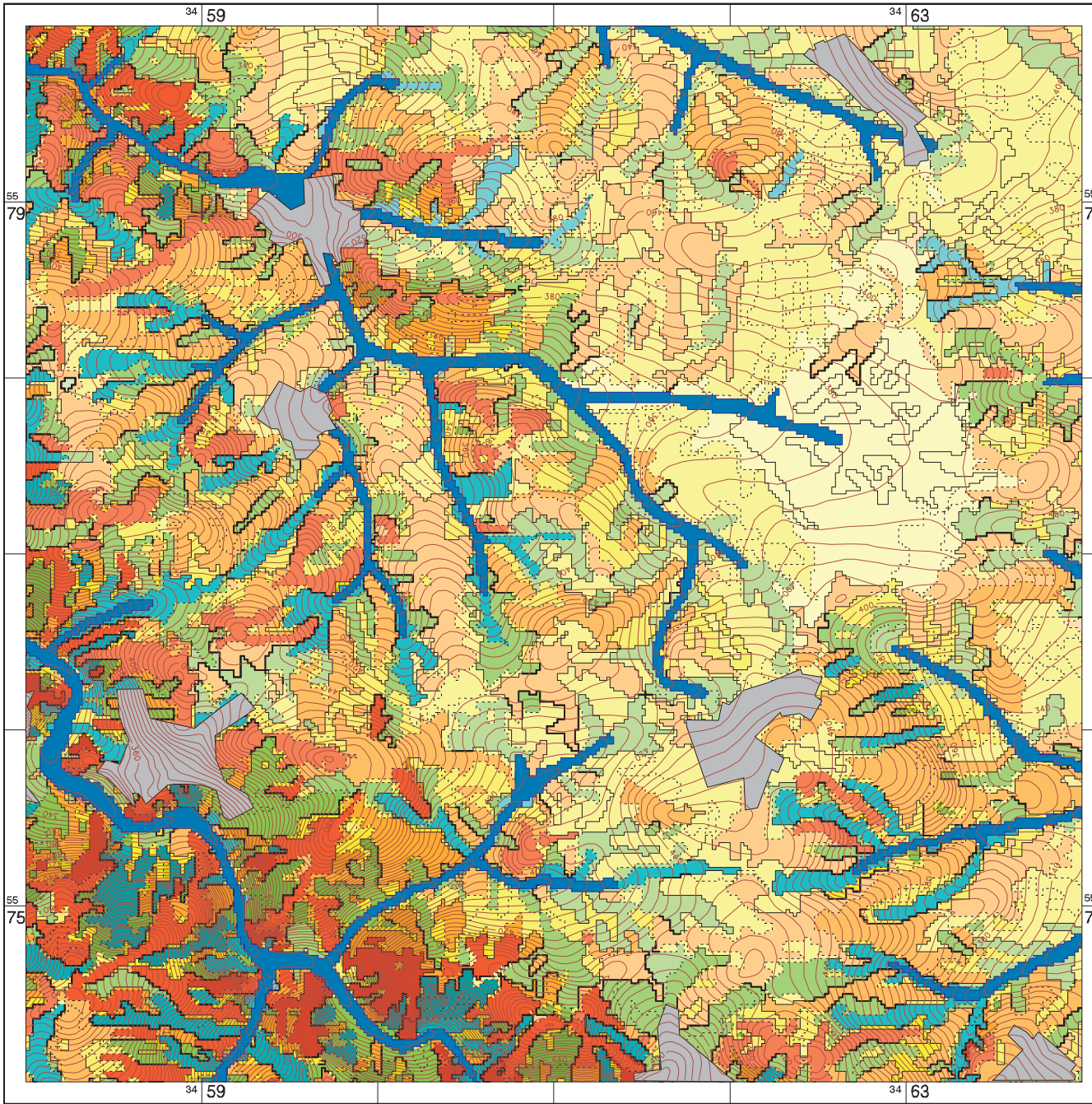
Transferfaktor VK = 0,000666

Gewichtung VW = 1

Datengrundlage: DHM (Basis TK5 Höhenlinien HLVA)

IVHG-Datei: gw-qv1-c

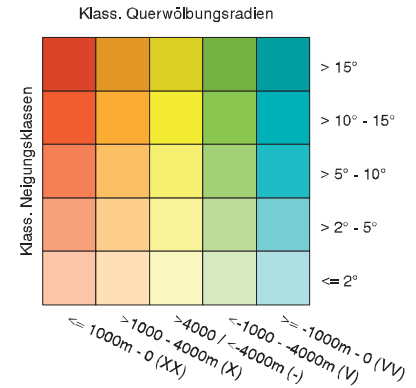




## Karte 16

**Klassifizierung homogener Reliefeinheiten**  
 raumorientiertes multivariates Distanzverfahren  
 (Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach)

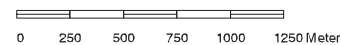
### Klassifizierte Querwölbung / Neigung (Mittelwerte der Flächenobjekte)

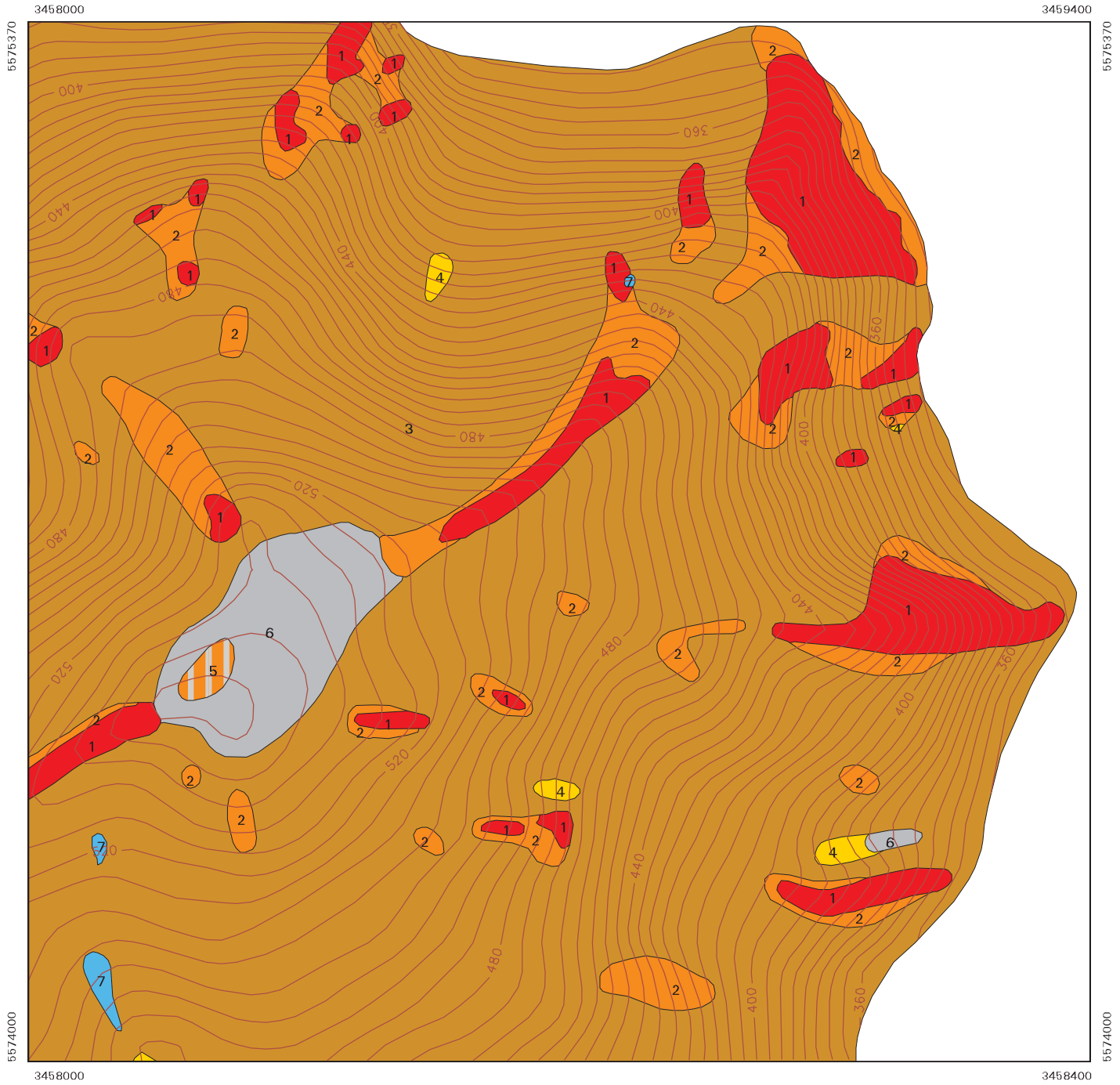


- Nachbarklassendistanz gering
- Nachbarklassendistanz mittel
- Nachbarklassendistanz groß
- Höhenlinien Äquidistanz 5 m

- Siedlungsflächen
- Senkenbereich

Rasterauflösung 20 m  
 Klassen bei Start = 91204  
 Klassen bei Abbruch = 1172  
 Transferkonstante QK = 0.000666  
 Gewichtung QK = 1  
 Transferkonstante VK = 0.001  
 Gewichtung VK = 0.4  
 Transferkonstante Neigung = 20  
 Gewichtung Neigung = 0.6  
 Datengrundlage: DHM (Basis TK5 Höhenlinien HLVA)  
 IVHG-Datei: gw-qvn34-c

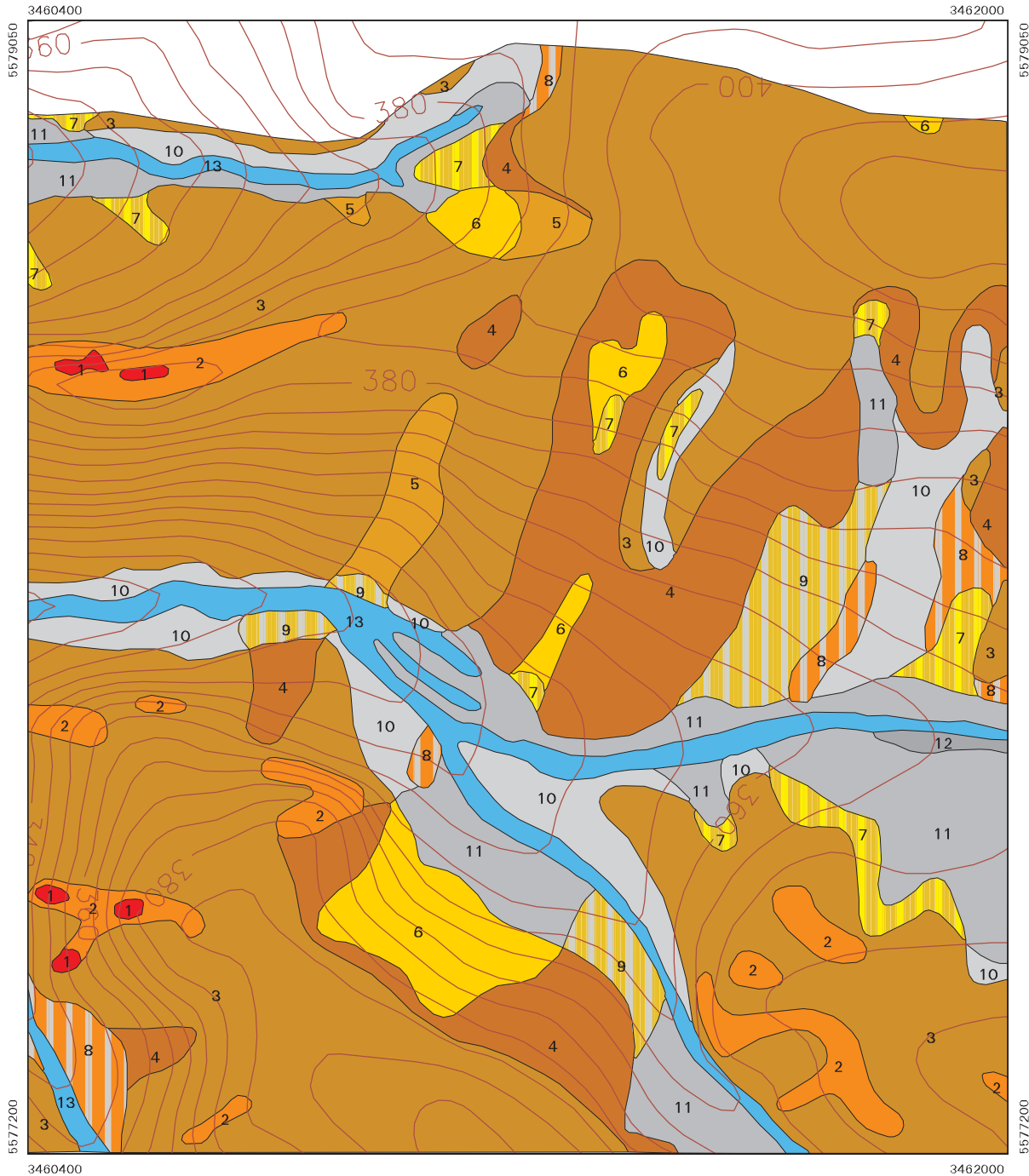




**Karte 17**  
**Bodenkarte Kartiergebiet 1**  
 Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach

- 1** Ranker  
DLg s,,vp,lo / A u
- 2** Braunerde-Regosol  
DLg s,,vp,lo / BL s,vp,,vt
- 3** Braunerde  
DLg s,,vp,lo / BL s,vp,,vt
- 4** Parabraunerde  
DL lo,s,,vp,vt / ML lo,,s,vt / BL s,vt
- 5** Braunerde-Pseudogley  
DL vt,s,,lo / BL vt,s
- 6** Pseudogley  
DL s,,vt,lo / BL s,,vt
- 7** Quellengley  
DL vt,s,,lo / BL s,vt
















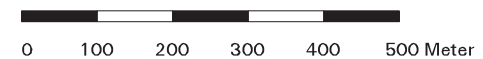


## Karte 18

### Bodenkarte Kartiergebiet 2

Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach

- |   |           |   |
|---|-----------|---|
|    | <b>1</b>  | Ranker<br>DL s,,vt,,lo / A u                            |
|    | <b>2</b>  | Braunerde-Regosol<br>DL vt,s,,lo / BL s,vt              |
|    | <b>3</b>  | Braunerde<br>DL s,,vt,,lo / BL s,vt                     |
|    | <b>4</b>  | Braunerde<br>DL lo,s,,vt / BL s,,vt                     |
|    | <b>5</b>  | Braunerde<br>DL lo,,s,vt / BL s,,vt                     |
|    | <b>6</b>  | Parabraunerde<br>DL lo,,s,,vt / ML lo,,vt,,s / BL s,,vt |
|    | <b>7</b>  | Parabraunerde-Pseudogley<br>DL lo,s,,vt / ML lo,,vt     |
|    | <b>8</b>  | Braunerde-Pseudogley<br>DL vt,s,,lo / BL vt,s           |
|  | <b>9</b>  | Braunerde-Pseudogley<br>DL lo,s,,vt / BL s,,vt          |
|  | <b>10</b> | Pseudogley<br>DL vt,s,,lo / BL s,,vt                    |
|  | <b>11</b> | Pseudogley<br>DL lo,,s,vt / ML lo,,vt,s                 |
|  | <b>12</b> | Pseudogley-Gley<br>DL lo,,s,vt / ML lo,,vt,s / BL s,,vt |
|  | <b>13</b> | Gley<br>HL f / BL s,,vt\SL gf                           |



**Karte 19**  
**Klassifizierung der rel. Massenbilanz**  
**der solifluidalen Hangüberformung**  
 Ausschnitt Blatt 5716 Oberreifenberg

relative Massenbilanz	Parameter	
	Transferfaktor VK	0.00001
	Transferfaktor QK	0.000001
	Transferfaktor Neigung	10

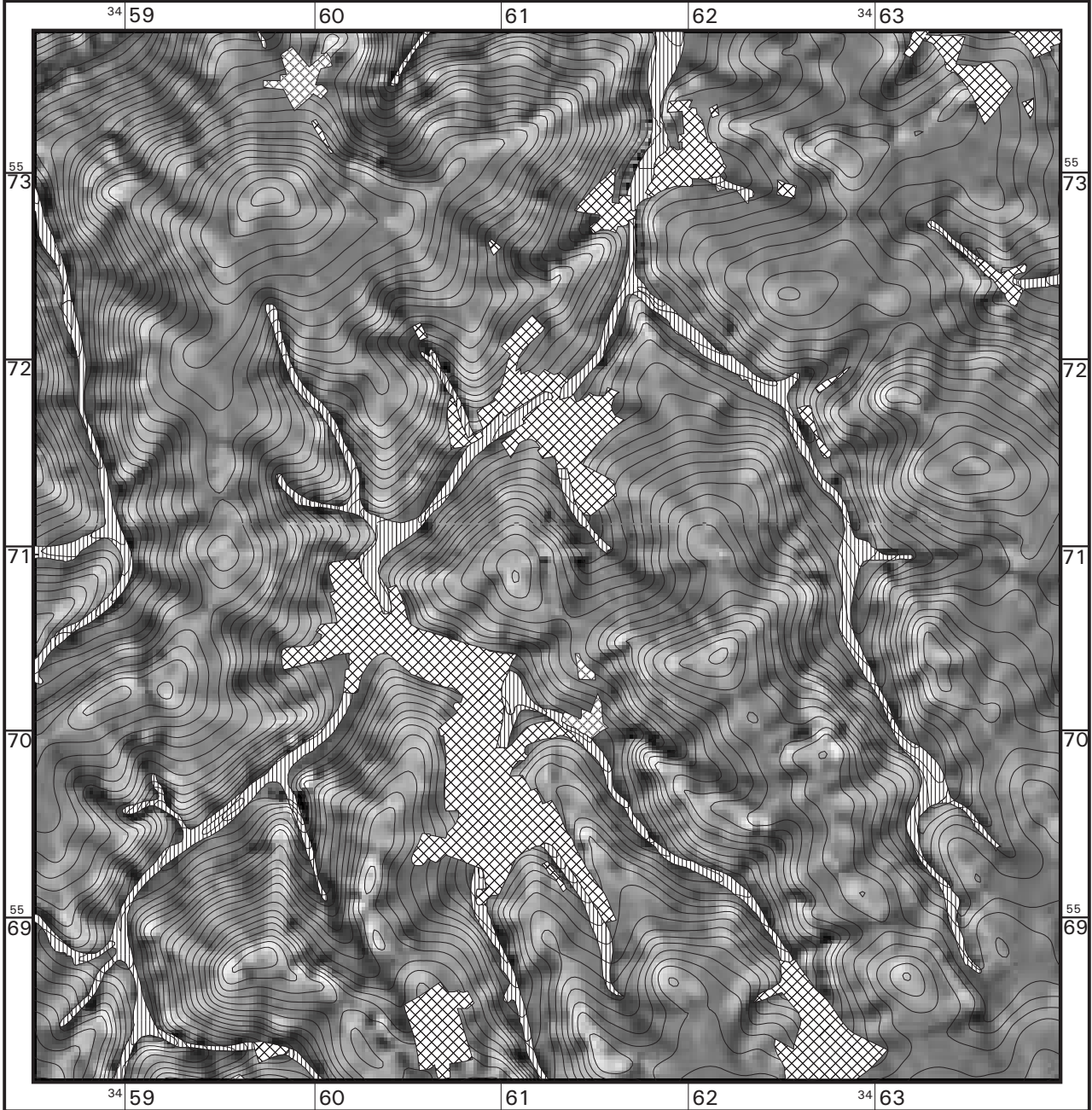
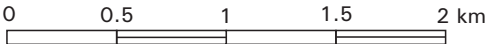


Isohypsen  
 Äquidistanz 10 m

Siedlungsfläche

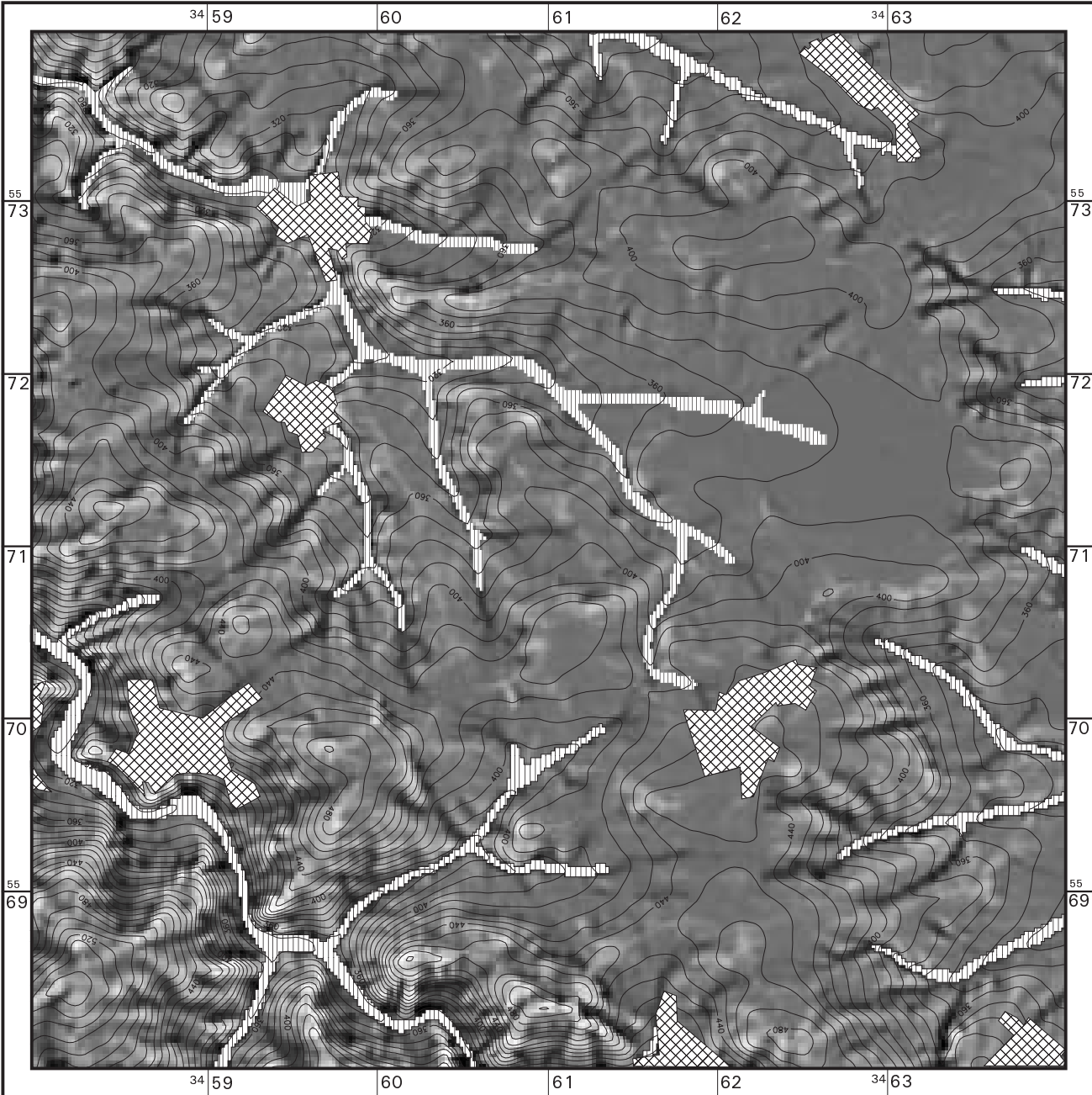
Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 280/274

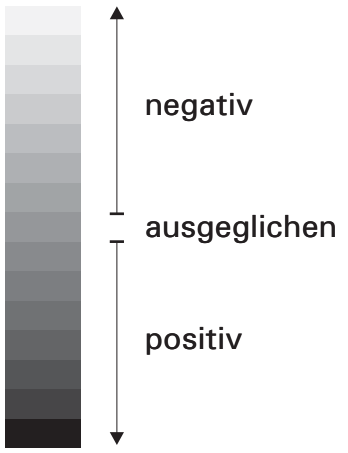







**Karte 20**  
**Klassifizierung der rel. Massenbilanz**  
**der solifluidalen Hangüberprägung**  
 Ausschnitt Blatt 5616 Grävenwiesbach

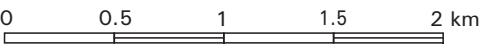


relative Massenbilanz Parameter:  
 Transferfaktor VK: 0.00001  
 Transferfaktor Q.K: 0.000001  
 Transferfaktor Neigung: 10



-  Isohypsen  
Äquidistanz 10 m
-  Siedlungsfläche
-  Senkenbereich

Rastergröße des DHM: 20 m  
 Anz. der Zeilen/Spalten: 302/302



## FRANKFURTER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Herausgegeben vom Fachbereich Geowissenschaften  
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Serie A: Geologie - Paläontologie

- Band 1** MERKEL, D. (1982): Untersuchungen zur Bildung planarer Gefüge im Kohlengebirge an ausgewählten Beispielen. - 144 S., 53 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 10,--
- Band 2** WILLEMS, H. (1982): Stratigraphie und Tektonik im Bereich der Antiklinale von Boixols-Coll de Nargó - ein Beitrag zur Geologie der Decke von Montsech (zentrale Südpirenen, Nordost-Spanien). - 336 S., 90 Abb., 8 Tab., 19 Taf., 2 Beil.; Frankfurt a. M.  
DM 30,--
- Band 3** BRAUER, R. (1983): Das Präneogen im Raum Molaoi-Talanta/SE-Lakonien (Peloponnes, Griechenland). - 284 S., 122 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 16,--
- Band 4** GUNDLACH, T. (1987): Bruchhafte Verformung von Sedimenten während der Taphrogenese - Maßstabsmodelle und rechnergestützte Simulation mit Hilfe der FEM (Finite Element Method). - 131 S., 70 Abb., 4 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 10,--
- Band 5** KUHL, H.-P. (1987): Experimente zur Grabentektonik und ihr Vergleich mit natürlichen Gräben (mit einem historischen Beitrag). - 208 S., 88 Abb., 2 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 6** FLÖTTMANN, T. (1988): Strukturentwicklung, P-T-Pfade und Deformationsprozesse im zentralschwarzwälder Gneiskomplex. - 206 S., 47 Abb., 4 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 21,--
- Band 7** STOCK, P. (1989): Zur antithetischen Rotation der Schieferung in Scherbandgefügen - ein kinematisches Deformationsmodell mit Beispielen aus der südlichen Gurktaler Decke (Ostalpen). - 155 S., 39 Abb., 3 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 8** ZULAUF, G. (1990): Spät- bis postvariszische Deformationen und Spannungsfelder in der nördlichen Oberpfalz (Bayern) unter besonderer Berücksichtigung der KTB-Vorbohrung. - 285 S., 56 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 20,--
- Band 9** BREYER, R. (1991): Das Coniac der nördlichen Provence ('Provence rhodanienne') - Stratigraphie, Rudistenfazies und geodynamische Entwicklung. - 337 S., 112 Abb., 7 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 25,90
- Band 10** ELSNER, R. (1991): Geologische Untersuchungen im Grenzbereich Ostalpin-Penninikum am Tauern-Südostrand zwischen Katschberg und Spittal a. d. Drau (Kärnten, Österreich). - 239 S., 61 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 24,90
- Band 11** TSK IV (1992): 4. Symposium Tektonik - Strukturgeologie - Kristallingeologie. - 319 S., 105 Abb., 5 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 14,90
- Band 12** SCHMIDT, H. (1992): Mikrobohrspuren ausgewählter Faziesbereiche der tethyalen und germanischen Trias (Beschreibung, Vergleich und bathymetrische Interpretation). - 228 S.,  
DM 21,90

**Band 13** ZINKE, J. (1996): Mikrorißuntersuchungen an KTB-Bohrkernen - Beziehungen zu den elastischen Gesteinsparametern. - 195 S., 88 Abb., 14 Taf.; Frankfurt a. M.  
DM 23,--

**Band 14** DREHER, S. (1996): Totalfeldmessungen des Erdmagnetfeldes im Vorderen Vogelsberg und ihre Interpretation im Hinblick auf Förderzonen der tertiären Vulkanite und den Schollenbau der Basaltbasis. - 194 S., 59 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 19,--

Bestellungen zu richten an:

Geologisch-Paläontologisches Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Postfach 11 19 32,  
D-60054 Frankfurt am Main

## FRANKFURTER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Herausgegeben vom Fachbereich Geowissenschaften  
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Serie B: Meteorologie und Geophysik

- Band 1** BIRRONG, W. & SCHÖNWIESE, C.-D. (1987): Statistisch-klimatologische Untersuchungen botanischer Zeitreihen Europas. - 80 S., 26 Abb., 5 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 7,-- (vergriffen)
- Band 2** SCHÖNWIESE, C.-D. (1990): Grundlagen und neue Aspekte der Klimatologie. - 2. Aufl., 130 S., 55 Abb., 11 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 10,-- (vergriffen)
- Band 3** SCHÖNWIESE, C.-D. (1992): Das Problem menschlicher Eingriffe in das Globalklima ("Treibhauseffekt") in aktueller Übersicht. - 2. Aufl., 142 S., 65 Abb., 13 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 8,-- (vergriffen)
- Band 4** ZANG, A. (1991): Theoretische Aspekte der Mikrorißbildung in Gesteinen. - 209 S., 82 Abb., 9 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 19,--
- Band 5** RAPP, J. & SCHÖNWIESE, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. - 2., korr. Aufl., 255 S., 32 Abb., 12 Tab., 129 Ktn.; Frankfurt a. M.  
DM 14,--

Bestellungen zu richten an:

Institut für Meteorologie und Geophysik der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Postfach 11 19 32,  
D-60054 Frankfurt am Main

## FRANKFURTER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Herausgegeben vom Fachbereich Geowissenschaften  
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Serie C: Mineralogie

- Band 1** SCHNEIDER, G. (1984): Zur Mineralogie und Lagerstättenbildung der Mangan- und Eisenerzvorkommen des Urucum-Distriktes (Mato Grosso do Sul, Brasilien). - 205 S., 99 Abb., 9 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 12,--
- Band 2** GESSLER, R. (1984): Schwefel-Isotopenfraktionierung in wäßrigen Systemen. - 141 S., 35 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 9,50
- Band 3** SCHRECK, P. C. (1984): Geochemische Klassifikation und Petrogenese der Manganerze des Urucum-Distriktes bei Corumbá (Mato Grosso do Sul, Brasilien). - 206 S., 29 Abb., 20 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 13,50
- Band 4** MARTENS, R. M. (1985): Kalorimetrische Untersuchung der kinetischen Parameter im Glas-transformations-Bereich bei Gläsern im System Diopsid-Anorthit-Albit und bei einem NBS-710-Standardglas. - 177 S., 39 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 15,--
- Band 5** ZEREINI, F. (1985): Sedimentpetrographie und Chemismus der Gesteine in der Phosphoritstufe (Maastricht, Oberkreide) der Phosphat-Lagerstätte von Ruseifa/Jordanien mit besonderer Berücksichtigung ihrer Uranführung. - 116 S., 11 Abb., 5 Taf., 27 Tab., 36 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 16,--
- Band 6** ZEREINI, F. (1987): Geochemie und Petrographie der metamorphen Gesteine vom Vesleknatten (Tverrfjell/Mittelnorwegen) mit besonderer Berücksichtigung ihrer Erzminerale. - 197 S., 48 Abb., 9 Taf., 26 Tab., 27 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 15,--
- Band 7** TRILLER, E. (1987): Zur Geochemie und Spurenanalytik des Wolframs unter besonderer Berücksichtigung seines Verhaltens in einem südostnorwegischen Pegmatoid. - 173 S., 25 Abb., 2 Taf., 20 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 12,--
- Band 8** GÜNTER, C. (1988): Entwicklung und Vergleich zweier Multielementanalysenverfahren an Kohlenaschen- und Bodenproben mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. - 124 S., 38 Abb., 37 Tab., 1 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 9** SCHMITT, G. E. (1989): Mikroskopische und chemische Untersuchungen an Primärmineralen in Serpentiniten NE-Bayerns. - 130 S., 39 Abb., 11 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 14,--
- Band 10** PETSCHICK, R. (1989): Zur Wärmegeschichte im Kalkalpin Bayerns und Nordtirols (Inkohlung und Illit-Kristallinität). - 259 S., 75 Abb., 12 Tab., 3 Taf.; Frankfurt a. M.  
DM 16,--
- Band 11** RÖHR, C. (1990): Die Genese der Leptinite und Paragneise zwischen Nordrach und Gengenbach im mittleren Schwarzwald. - 159 S., 54 Abb., 15 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 15,--

- Band 12** YE, Y. (1992): Zur Geochemie und Petrographie der unterkarbonischen Schwarzschieferserie in Odershausen, Kellerwald, Deutschland. - 206 S., 58 Abb., 15 Tab., 5 Taf.; Frankfurt a. M.  
DM 19,--
- Band 13** KLEIN, S. (1993): Archäometallurgische Untersuchungen an frühmittelalterlichen Buntmetallfunden aus dem Raum Höxter/Corvey. - 203 S., 28 Abb., 14 Tab., 12 Taf., 13 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 33,--
- Band 14** FERREIRO MÄHLMANN, R. (1994): Zur Bestimmung von Diagenesehöhe und beginnender Metamorphose - Temperaturgeschichte und Tektonogenese des Austroalpins und Südpenninikums in Voralberg und Mittelbünden. - 498 S., 118 Abb., 18 Tab., 2 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 25,--
- Band 15** WEGSTEIN, M. M. (1996): Vergleichende chemische und technische Untersuchungen an frühneuzeitlichen Glashüttenfunden Nordhessens und Südniedersachsens. - 236 S., 40 Abb., 18 Tab., 11 Anl.; Frankfurt a. M.  
DM 22,--

Bestellungen zu richten an:

Institut für Geochemie, Petrologie u. Lagerstättenkunde der J. W. Goethe-Universität, Postfach 111932, D-60054 Frankfurt am Main

## FRANKFURTER GEOWISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Herausgegeben vom Fachbereich Geowissenschaften  
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

### Serie D: Physische Geographie

- Band 1** BIBUS, E. (1980): Zur Relief-, Boden- und Sedimententwicklung am unteren Mittelrhein. - 296 S., 50 Abb., 8 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 25,--
- Band 2** SEMMEL, A. (1991): Landschaftsnutzung unter geowissenschaftlichen Aspekten in Mitteleuropa. - 3., verb. Aufl., 67 S., 11 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 10,--
- Band 3** SABEL, K. J. (1982): Ursachen und Auswirkungen bodengeographischer Grenzen in der Wetterau (Hessen). - 116 S., 19 Abb., 8 Tab., 6 Prof.; Frankfurt a. M.  
DM 11,50 (vergriffen)
- Band 4** FRIED, G. (1984): Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein-Odenwald. - 201 S., 57 Abb., 11 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 15,-- (vergriffen)
- Band 5** VEIT, H. & VEIT, H. (1985): Relief, Gestein und Boden im Gebiet von "Conceição dos Correias" (S-Brasilien). - 98 S., 18 Abb., 10 Tab., 1 Karte; Frankfurt a. M.  
DM 17,--
- Band 6** SEMMEL, A. (1989): Angewandte konventionelle Geomorphologie. Beispiele aus Mitteleuropa und Afrika. - 2. Aufl., 116 S., 57 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 7** SABEL, K.-J. & FISCHER, E. (1992): Boden- und vegetationsgeographische Untersuchungen im Westerwald. - 2. Aufl., 268 S., 19 Abb., 50 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 18,--
- Band 8** EMMERICH, K.-H. (1988): Relief, Böden und Vegetation in Zentral- und Nordwest-Basilien unter besonderer Berücksichtigung der känozoischen Landschaftsentwicklung. - 218 S., 81 Abb., 9 Tab., 34 Bodenprofile; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 9** HEINRICH, J. (1989): Geoökologische Ursachen luftbildtektonisch kartierter Gefügespuren (Photolineationen) im Festgestein. - 203 S., 51 Abb., 18 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 10** BÄR, W.-F. & FUCHS, F. & NAGEL, G. [Hrsg.] (1989): Beiträge zum Thema Relief, Boden und Gestein - Arno Semmel zum 60. Geburtstag gewidmet von seinen Schülern. - 256 S., 64 Abb., 7 Tab., 2 Phot.; Frankfurt a. M.  
DM 16,-- (vergriffen)
- Band 11** NIERSTE-KLAUSMANN, G. (1990): Gestein, Relief, Böden und Bodenerosion im Mittellauf des Oued Mina (Oran-Atlas, Algerien). - 163 S., 17 Abb., 13 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 12,--
- Band 12** GREINERT, U. (1992): Bodenerosion und ihre Abhängigkeit von Relief und Boden in den Campos Cerrados, Beispielsgebiet Bundesdistrikt Brasilia. - 259 S., 20 Abb., 15 Tab., 24 Fot., 1 Beil., Frankfurt a. M.  
DM 18,--
- Band 13** FAUST, D. (1991): Die Böden der Monts Kabyè (N-Togo) - Eigenschaften, Genese und Aspekte ihrer agrarischen Nutzung. - 174 S., 33 Abb., 25 Tab., 1 Beil.; Frankfurt a. M.  
DM 14,--

- Band 14** BAUER, A. W. (1993): Bodenerosion in den Waldgebieten des östlichen Taunus in historischer und heutiger Zeit - Ausmaß, Ursachen und geoökologische Auswirkungen. - 194 S., 45 Abb.; Frankfurt a. M.  
DM 14,--
- Band 15** MOLDENHAUER, K.-M. (1993): Quantitative Untersuchungen zu aktuellen fluvial-morphodynamischen Prozessen in bewaldeten Kleinzugsgebieten von Odenwald und Taunus. - 307 S., 108 Abb., 66 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 18,--
- Band 16** SEMMEL, A. (1996): Karteninterpretation aus geoökologischer Sicht - erläutert an Beispielen der Topographischen Karte 1 : 25 000. - 2. Aufl., - 85 S.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 17** HEINRICH, J. & THIEMEYER, H. [Hrsg.] (1994): Geomorphologisch-bodengeographische Arbeiten in Nord- und Westafrika. - 97 S., 28 Abb., 12 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 13,--
- Band 18** SWOBODA, J. (1994): Geoökologische Grundlagen der Bodennutzung und deren Auswirkung auf die Bodenerosion im Grundgebirgsbereich Nord-Benins - ein Beitrag zur Landnutzungsplanung. - 119 S., 17 Abb., 26 Tab., 2 Kt.; Frankfurt a. M.  
DM 18,--
- Band 19** MÜLLER-HAUDE, P. (1995): Landschaftsökologische Grundlagen der Bodennutzung in Gobnangou (SE-Burkina Faso, Westafrika). - 170 S., 65 Abb., 2 Tab., 1 Beil.; Frankfurt a. M.  
DM 14,--
- Band 20** SEMMEL, A. [Hrsg.] (1996): Pleistozäne und holozäne Böden aus Lößsubstraten am Nordrand der Oberrheinischen Tiefebene - Exkursionsführer zur 15. Tagung des Arbeitskreises Paläopedologie der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft vom 16. - 18. 5. 1996 in Hofheim am Taunus. - 144 S., 25 Abb., 20 Tab.; Frankfurt a. M.  
DM 16,--
- Band 21** FRIEDRICH, K. (1996): Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. - 258 S., 49 Abb., 13 Tab., 20 Kt.; Frankfurt a. M.  
DM 22,--

Bestellungen zu richten an:

Institut für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Postfach 11 19 32,  
D-60054 Frankfurt am Main