

Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen

Monika Bürger

Wind ist eine Ausgleichsbewegung der Luft. Er entsteht auf Grund von Luftdruckunterschieden als horizontale Luftbewegung vom hohen zum tiefen Druck. Als Bewegungsgröße ist der Wind damit das einzige Klimaelement, das neben der **skalaren** Komponente (Windgeschwindigkeit) auch eine **vektorielle** Komponente (Windrichtung) hat. Die Windrichtung ist die horizontale Bewegung der Luft, benannt nach der Richtung, aus der der Wind kommt **1**. Bei der Betrachtung der Luftbewegungen muss unterschieden werden zwischen dem Wind der freien Atmosphäre und dem Wind in Bodennähe. Die Luftbewegung in der freien Atmosphäre wird nur beeinflusst durch Druckunterschiede und durch planetarische Kräfte, die aus der Rotation der Erdkugel entstehen. Die wichtigste Kraft ist die durch Luftdruckunterschiede erzeugte **Gradientkraft**, die die Luft in Bewegung versetzt. Je größer der Gradient – also der Luftdruckunterschied bezogen auf eine bestimmte Entfernung – ist, desto höher ist die Windgeschwindigkeit. Die Bewegung der Luft vom Hoch zum Tief wird durch die Erdrotation abgelenkt und zwar auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links. Dadurch kommt es in unserem mitteleuropäischen Bereich zu einer westlichen Höhenströmung, die eigentlich eine nach rechts abgelenkte Luftströmung von Süd aus den subtropischen Hochdruckgebieten (z.B. Azorenhoch) nach Nord zur polaren Tiefdruckrinne (z.B. Islandtief) ist. Dies wirkt sich beispielsweise auf Flugzeiten aus: Der Flug von Europa nach

Nordamerika dauert in der Regel aufgrund des starken Gegenwindes länger als der Rückflug nach Europa mit Rückenwind.

In Bodennähe wird der Wind zusätzlich zu der Gradientkraft und den planetarischen Kräften noch von der Reibungskraft beeinflusst. Diese Kraft muss man sich als Strömungswiderstand durch die Rauigkeit der Erdoberfläche vorstellen. Die Bodenreibung führt zur Ablenkung und Abbremsung des Windes, die mit Annäherung an den Erdboden zunehmen **2**. Je rauer die Erdoberfläche ist, desto stärker wird der Wind abgebremst. Für den Vergleich von bodennahen Windverhältnissen ist es deshalb eine notwendige Voraussetzung, dass die Messungen in gleicher Höhe über Grund und über Flächen mit gleicher, möglichst geringer Rauigkeit stattfinden. Einen großen Einfluss auf den bodennahen Wind hat das Gelände-relief. Erhebungen stellen sich dem Wind als Hindernis entgegen und müssen um- und überströmt werden. Im Gipfelbereich von Hügeln und Bergen kommt es je nach Höhe und Steilheit der Erhebung zu zum Teil erheblichen Windgeschwindigkeitszunahmen, während der Wind im **Leebereich** eines Berges durch Wirbelbildung stark abgebremst werden kann. Taleinschnitte können zu einer Abschwächung des Windes, aber auch zu einer Verstärkung und Ablenkung des Windes durch die Kanalisierung der Strömung entlang des Talverlaufes führen.

Der Darstellung der bodennahen Windverhältnisse **3** liegen die Werte von 107 Windmessstationen in Deutschland mit Zeitreihen von mindestens 5-20 Jahren Länge aus dem Zeitraum von 1976 bis 1995 zugrunde (TRAUP/KRUSE 1996). Die Messungen wurden überwiegend in 10 m Höhe über Grund durchgeführt, allerdings mit Abweichungen bis zu 25 m Messhöhe an einigen Standorten. Außerdem waren die Stationsumgebungen durch unterschiedliche Oberflächen-Rauigkeiten im Umfeld geprägt. Deshalb wurden die mittleren Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten aller Stationen mittels eines Windmodells (MORTENSEN u.a. 1993) auf eine einheitliche Höhe von 10 m über Grund und eine geringe Rauigkeit, die Wiesen-/Weideflächen entspricht, umgerechnet (TRAUP/KRUSE 1996). An realen Standorten mit anderen Flächennutzungen kommt es dadurch zu lokalen Abweichungen gegenüber den in der Karte dargestellten Windverhältnissen.

Windrichtungsverteilung

Großklimatisch gesehen gehört Deutschland zur außertropischen West-



Windschur - Büsche und Bäume werden durch stetige, kräftige Winde aus weitgehend konstanter Richtung asymmetrisch verformt. Windschur tritt vorwiegend in Küstengebieten sowie in Kammgebieten von Gebirgen auf.

windzone. Geprägt wird das Klima durch den Durchzug von Tiefdruckgebieten, deren Zugbahnen häufig von Südwest nach Nordost verlaufen. Dementsprechend lässt sich an vielen der in der Karte **3** dargestellten Stationen ein Vorherrschen von Winden aus Südwest bis West feststellen. Insbesondere an den Küstenstandorten liegen sowohl die Hauptwindrichtung wie auch die zweithäufigste Windrichtung in den Sektoren West bis Südwest. In den Küstenregionen und im norddeutschen Flachland wird der Wind kaum von Hindernissen beeinflusst und abgelenkt. Bei Hochdruckwetterlagen führt die Strömung aus dem Hochdruckgebiet über Mitteleuropa in Deutschland häufig zu Winden aus nordöstlichen Richtungen. Deshalb zeigen einige Stationen neben

Mesoform – Form mittlerer Größenordnung

mesoskalig – auf mittlerem Maßstab

Morphographie – beschreibende Darstellung der Oberflächenformen

orographisch, Orographie – beschreibende Darstellung des Reliefs

skalar – größenmäßig

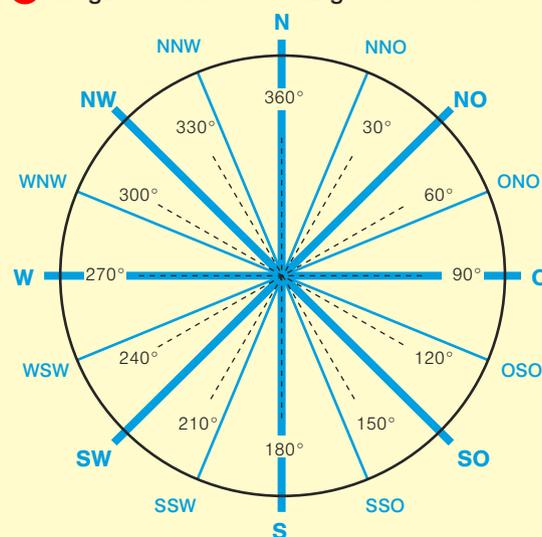
vektoriell – die Richtung betreffend

der südwestlichen Hauptwindrichtung ein sekundäres Windrichtungsmaximum aus nordöstlicher bis östlicher Richtung. Einige Windmessstandorte zeigen abweichend von diesen für ganz Deutschland typischen Windrichtungen ein regional geprägtes Windfeld. Der Standort Meiningen unterscheidet sich z.B. deutlich von den nahegelegenen Stationen Wasserkuppe und Schmücke. Die Hauptwindrichtung Süd und die sekundäre Windrichtung Nordwest wird in diesem Fall durch die Kanalisierung der Strömung zwischen Rhön und Thüringer Wald verursacht. Weitere Beispiele für eine Kanalisierung des Windes sind die Stationen Straubing und Mühldorf im Alpenvorland. Hier folgen die Windrichtungen dem Verlauf des Donau- bzw. des Inn Tales. Solche Windmessungen sind nur für ihre jeweilige regionale Lage repräsentativ.

Windgeschwindigkeitsverteilung

Die Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sind in Karte **3** stark generalisiert in der Einheit m/s angegeben, wobei 1 m/s genau 3,6 km/h entspricht. Auf den ersten Blick fällt die Abnahme der

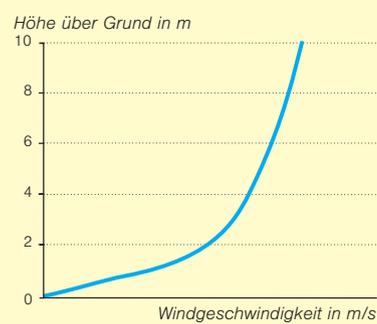
1 Mögliche Skaleneinteilungen der Windrose



Der Wind wird benannt nach der Richtung, aus der er weht. Die Windrichtung wird in Grad angegeben oder in einer 8-, 12-, 16- oder 32-teiligen Skala nach Himmelsrichtungen klassifiziert.

© Leibniz-Institut für Länderkunde 2003

2 Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe über Grund



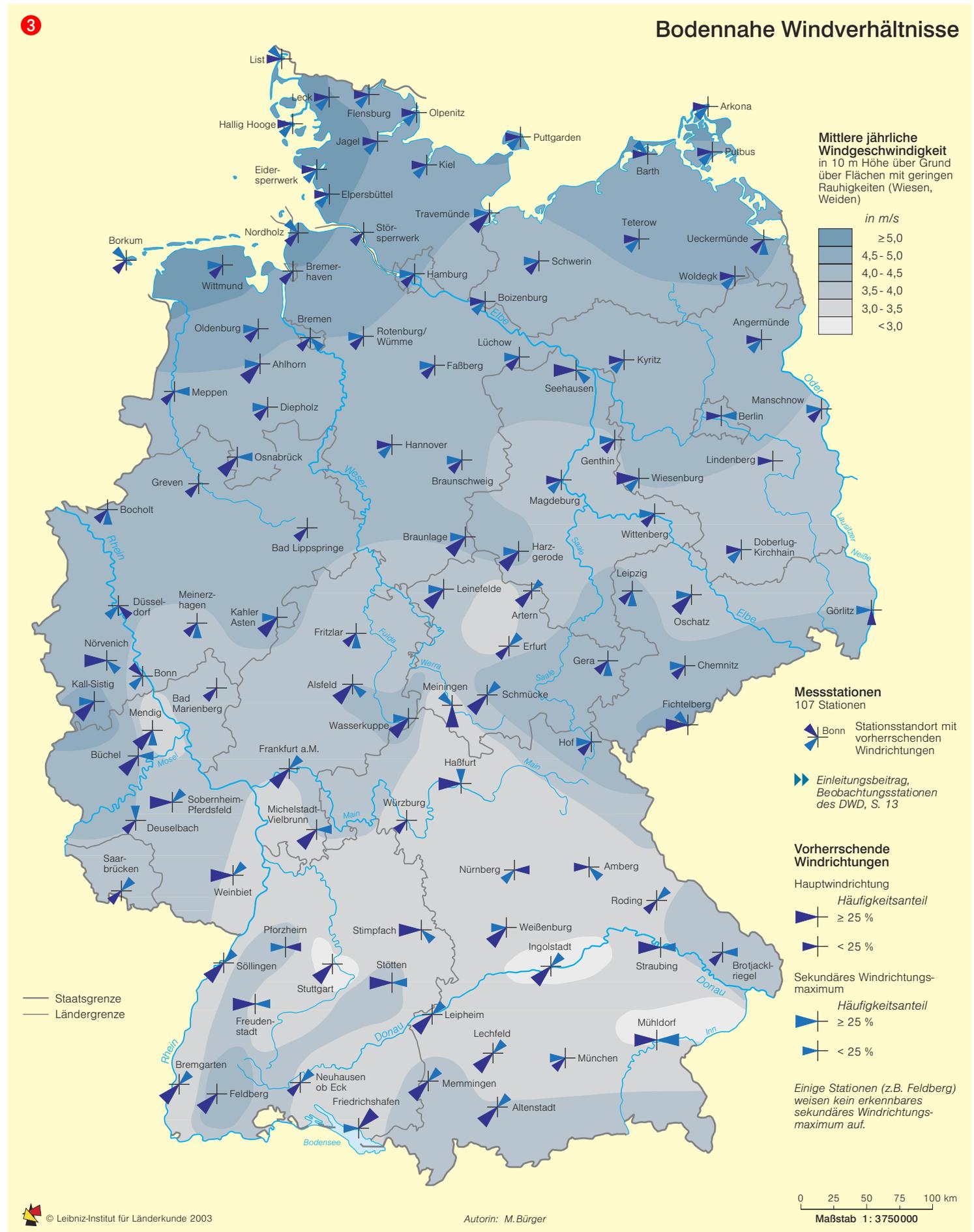
Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung vom Erdboden logarithmisch zu, d.h. erst sehr stark, dann immer schwächer bis die Windgeschwindigkeit der freien Atmosphäre ohne Bodenreibung erreicht ist.

© Leibniz-Institut für Länderkunde 2003

Windgeschwindigkeit von der Küste ins Binnenland auf. Hier macht sich die von Nordwest nach Südost zunehmende Abbremsung des Windes über Land bemerkbar. Diese Windgeschwindigkeitsabnahme ist von einer höhenabhängigen Zunahme der Geschwindigkeit in den Mittelgebirgsregionen überlagert. Auf den Hochflächen der Eifel und im Gipfelbereich des Erzgebirges werden wie im Küstenvorland über 4,5 m/s als Jahresmittel erreicht. Werte über 4 m/s erreichen neben dem norddeutschen Tiefland die Höhenlagen von Harz, Rothaargebirge, Eifel, Hunsrück, Vogelsberg, Rhön, Thüringer Wald, Fichtelgebirge, Erzgebirge und der Hochschwarzwald. In diesen Mittelgebirgsregionen ist mit einer kleinräumigen Veränderung der Windgeschwindigkeit je nach Lage im Gipfel- oder Talbereich zu rechnen, so dass die in der Karte angegebenen Windgeschwindigkeiten nur für exponierte freie Lagen gelten. Die Gipfellen der Alpen bleiben in der generalisierten Darstellung unberücksichtigt, hier können aber Werte wie an der deutschen Küste erreicht werden (CHRISTOFFER/ULBRICHT-EISSING 1989). Die Stationen Mendig und Erfurt fallen durch ihre – relativ zur Umgebung – geringen Windgeschwindigkeiten auf. Sie repräsentieren windabgeschattete Regionen in Beckenlage oder – wie im Fall von Meiningen – in Leelage hinter der Rhön. Die geringsten Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s im Jahresmittel finden sich im Bereich von süddeutschen Becken- (Stuttgarter Becken) und Tallandschaften (Donau-, Inntal).

Berechnung windrelevanter Relieftypen

Seit einigen Jahren hat sich in der Windklimatologie mit Untersuchungen zur Windenergienutzung (► [Beitrag Klein, Bd. 8](#)) ein neues Forschungsgebiet ergeben. Hier stellt sich die Frage nach einer schnellen groben Abschätzung des Windenergiepotenzials, bevor anschließend an geeigneten Standorten teure, zeitaufwendige Messungen durchgeführt werden. Eine weitere Frage ist die Übertragbarkeit von an einem Punkt erfassten Windverhältnissen auf die weitere Umgebung. Da ► [mesoskalige](#) Windströmungen in erster Linie durch das Relief modifiziert werden, waren vorhandene Reliefabgrenzungen für die Belange der Strömungssimulationen und Windfeldvergleiche nicht ausreichend. Daraus ergab sich die Notwendigkeit für eine windrelevante Reliefklassifizierung. Diese neue Methode führt für das Untersuchungsgebiet Deutschland zur Abgrenzung von zehn verschiedenen ► [orographischen](#) Typen



(BÜRGER 2002). In Gebieten mit ähnlicher Reliefstruktur kann eine Übereinstimmung im Auftreten von regionalen Windströmungen erwartet werden, wenn sich die atmosphärischen Zustandsgrößen nicht prinzipiell unterscheiden. Damit sind einmal gewonnene Mess- oder Simulationsergebnisse zum Wind auf Gebiete mit vergleichbarer Reliefstruktur übertragbar.

Eine Typisierung der Orographie auf Grundlage von windklimatologisch relevanten Reliefparametern ergibt eine detaillierte Beschreibung und Abgrenzung der Oberflächenformen hinsichtlich ihrer Relevanz für das mesoskalige Strömungsfeld. Die Anwendung mathematischer Methoden auf digitale Höhendaten mit dem Ziel der Ableitung von Charakteristika, die für die ► [Morphographie](#)

der Erdoberfläche von Bedeutung sind, wird mit dem Begriff der Computer-Morphographie (BÜRGER 2002) bezeichnet. Aus Rasterdaten (AMT FÜR MILITÄRISCHES GEOWESSEN 1996) wurde in mehreren aufeinander folgenden Analyseschritten von der Auswahl und Reduzierung der Reliefparameter bis hin zur Clusterung der Rasterfelder eine flächendeckende Verteilung →



von zehn verschiedenen Relieftypen für das Untersuchungsgebiet Deutschland errechnet.

Verteilung windrelevanter Relieftypen

Die Karte 5 zeigt einen Überblick über das Auftreten der verschiedenen windrelevanten Relieftypen (BÜRGER 2002). Auf den ersten Blick lässt sich eine Dreiteilung der Fläche der Bundesrepublik Deutschland erkennen. Der gesamte Nordteil wird durch die Flachlandtypen 1 und 2 geprägt. Im Mittelteil ist eine stärkere Differenzierung vorhanden mit einem Vorherrschen des Relieftyps 3. Der Süden wird, abgesehen vom Alpenraum, vom Relieftyp 4 dominiert.

Entsprechend der Dominanz der Relieftypen 1-4 in weiten Bereichen Deutschlands haben diese vier Typen zusammen einen Flächenanteil von rund 83% am gesamten Untersuchungsgebiet 4. Die beiden ersten Typen umfassen die Mesformen des Flachlandes, aufgeteilt in flaches Küstengebiet sowie weite, flache Tallandschaften (Typ 1) und in leicht strukturiertes Flachland einschließlich des norddeutschen Jungmoränengebietes (Typ 2). Der Typ 3 repräsentiert die hügeligen Mittelgebirgslandschaften, beispielsweise die Schwäbisch-Fränkische Gäulandschaft und Randbereiche des Rheinischen Schiefergebirges. Relieftyp 4 fasst alle Bereiche mit Hochflächencharakter, also mit einer mittleren Landschaftshöhe von rund 500 m über NN, geringen Höhenvarianzen und flachen Neigungen zusammen. Dazu gehört in erster Linie fast das gesamte Alpenvorland.

Mittelgebirge mit Berglandcharakter sowie eingeschnittene Täler und einzelne Höhenzüge werden durch die Relieftypen 5, 6 und 7 beschrieben. Sie haben zusammen einen Anteil von rund 15% an der Untersuchungsfläche. Typ 5 re-

Eine Windhoose richtete am 12. Juni 2002 in Lutherstadt Wittenberg (Sachsen-Anhalt) große Schäden an.

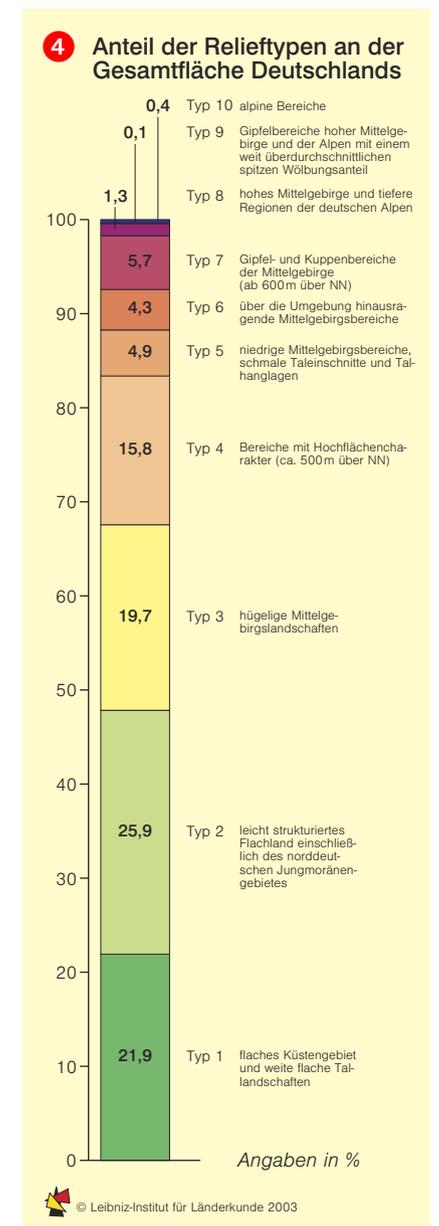
präsentiert niedriger als ihre Umgebung liegende Mittelgebirgsbereiche sowie schmale Taleinschnitte und Talhanglagen mit jeweils überdurchschnittlich starken vertikalen Wölbungen. Der Relieftyp 5 tritt meist linienhaft z.B. entlang des Moseltales, im Donau-, Neckar- und Saaletal auf. Die Gebiete des Relieftyps 6 liegen leicht über der mittleren Höhe der Umgebung, und horizontale Wölbungen treten überdurchschnittlich stark auf. Dieser Relieftyp kommt mit geringen Anteilen in allen Mittelgebirgsregionen vor, die größten zusammenhängenden Flächen mit dem Typ 6 treten im westlichen Odenwald und westlichen Mittelschwarzwald auf. Relieftyp 7 ist mit durchschnittlich 600 m über NN der höchste Mittelgebirgstyp. In diesem Typ sind alle Gipfel- und Kuppenbereiche der Mittelgebirge sowie ausgeprägte Einzelkuppen wie der Vogelsberg vertreten. Deshalb liegt die Höhe über NN im Rasterfeld deutlich über der mittleren Landschaftshöhe. Die ausgeprägte Schichtstufe der Schwäbischen Alb ist ebenfalls diesem Typ zugeordnet.

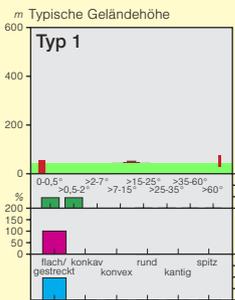
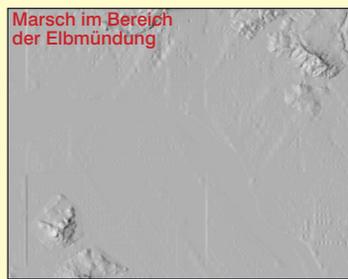
Den geringsten Flächenanteil an der Gesamtfläche mit zusammen nur 1,7% haben die Relieftypen 8-10. Aufgrund ihrer starken Abweichungen bei allen Reliefvariablen lassen sich diese Typen nicht weiter zusammenfassen. Der Relieftyp 8 umfasst hohes Mittelgebirge und die tieferen Regionen der deutschen Alpen. Zusammenhängende Flächen im Mittelgebirgsbereich treten nur im Schwarzwald und im Bayerischen Wald auf. Der Relieftyp 9 muss als Ausreißertyp bezeichnet werden. Hier sind Rasterfelder mit einem weit überdurchschnittlichen spitzen Wölbungsanteil zusammengefasst. Typ 9 zeigt zudem eine mittlere Höhe über NN, die fast 20% über der mittleren Landschaftshöhe liegt. Dieser Typ tritt nur vereinzelt im hohen Mittelgebirge auf und konzentriert sich auf die Gipfelbereiche der Alpen. Relieftyp 10 fasst den Großteil des deutschen Alpenraumes zusammen.

Die im Raum um Leipzig und in der Niederlausitz punkthaft innerhalb der Flachlandtypen 1 und 2 (grün) auftretenden Typen 5 und 8 repräsentieren den Braunkohletagebau in diesen Regionen. Hier sind in den vergangenen hundert Jahren durch anthropogenen Einfluss windrelevante Reliefstrukturen entstanden.

In den Abbildungen am Rand von Karte 5 (BÜRGER 2002) werden alle 10 im Untersuchungsgebiet vorkommenden Relieftypen anhand von beispielhaften Ausschnitten, die ein Gebiet von rund 40 x 40 km abdecken, vorgestellt. Zur Charakterisierung jedes Relieftyps werden die mittleren Werte der

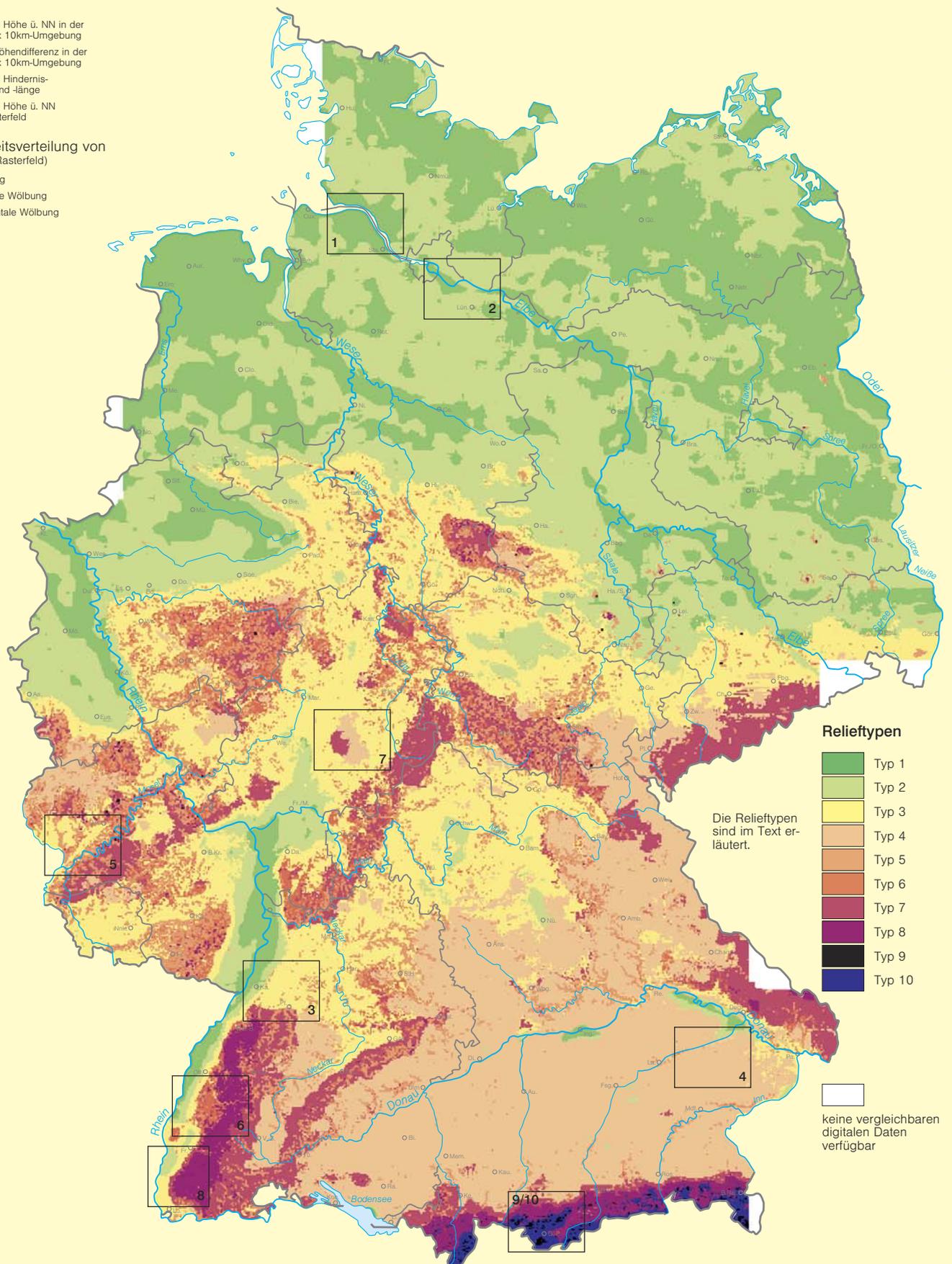
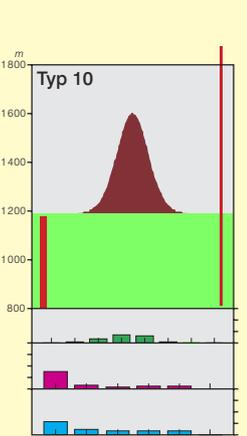
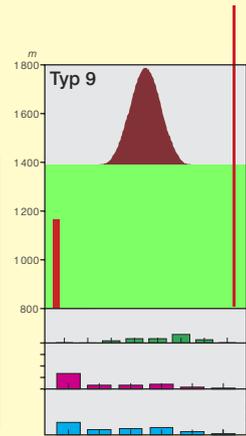
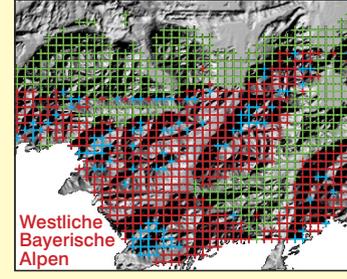
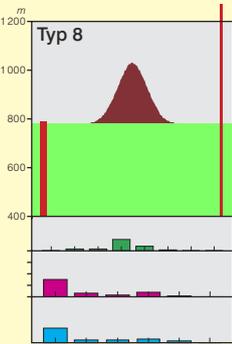
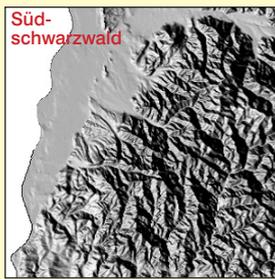
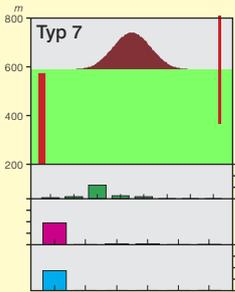
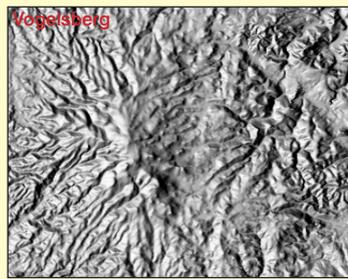
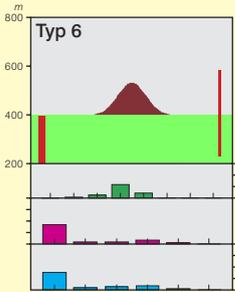
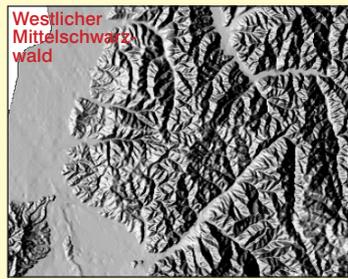
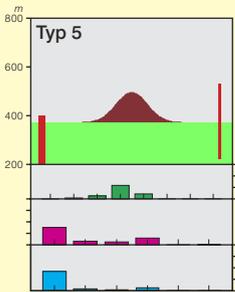
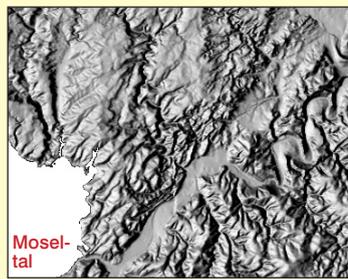
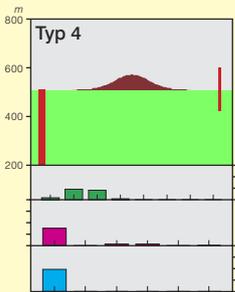
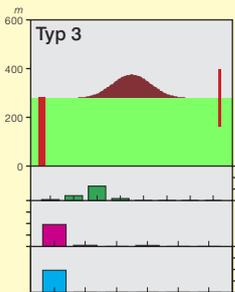
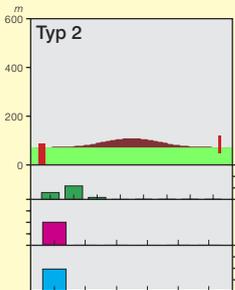
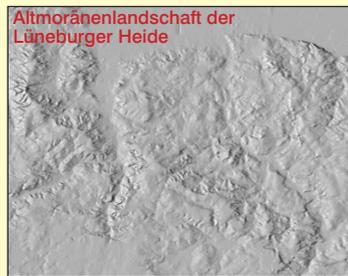
Reliefvariablen jeweils in einer kombinierten Abbildung veranschaulicht. Neben der mittleren Höhe über NN im 1-km²-Rasterfeld im Vergleich zur mittleren Landschaftshöhe (roter Balken am linken Rand der Diagramme) und der maximalen Höhendifferenz in der 100-km²-Umgebung (roter Balken am rechten Rand der Diagramme) ist das Höhen-Längenverhältnis eines typischen Hindernisses dargestellt. Der untere Teil der Diagramme für jeden Relieftyp enthält die Häufigkeitsverteilungen der Hangneigungen, der vertikalen und der horizontalen Wölbungen im 1-km²-Rasterfeld. Durch diese symbolhafte Darstellung können die Charakteristika der als windklimatologisch relevant angesehenen Reliefparameter für jeden Typ auf einen Blick verglichen werden. ♦





- mittlere Höhe ü. NN in der 10km x 10km-Umgebung
- max. Höhendifferenz in der 10km x 10km-Umgebung
- mittlere Hindernishöhe und -länge
- mittlere Höhe ü. NN im Rasterfeld

- Häufigkeitsverteilung von (im 1 km²-Rasterfeld)
- Neigung
 - vertikale Wölbung
 - horizontale Wölbung



- Relieftypen
- Typ 1
 - Typ 2
 - Typ 3
 - Typ 4
 - Typ 5
 - Typ 6
 - Typ 7
 - Typ 8
 - Typ 9
 - Typ 10

Die Relieftypen sind im Text erläutert.

keine vergleichbaren digitalen Daten verfügbar

0 25 50 75 100 km
Maßstab 1 : 3750000

- Typ 8
- Typ 9
- Typ 10