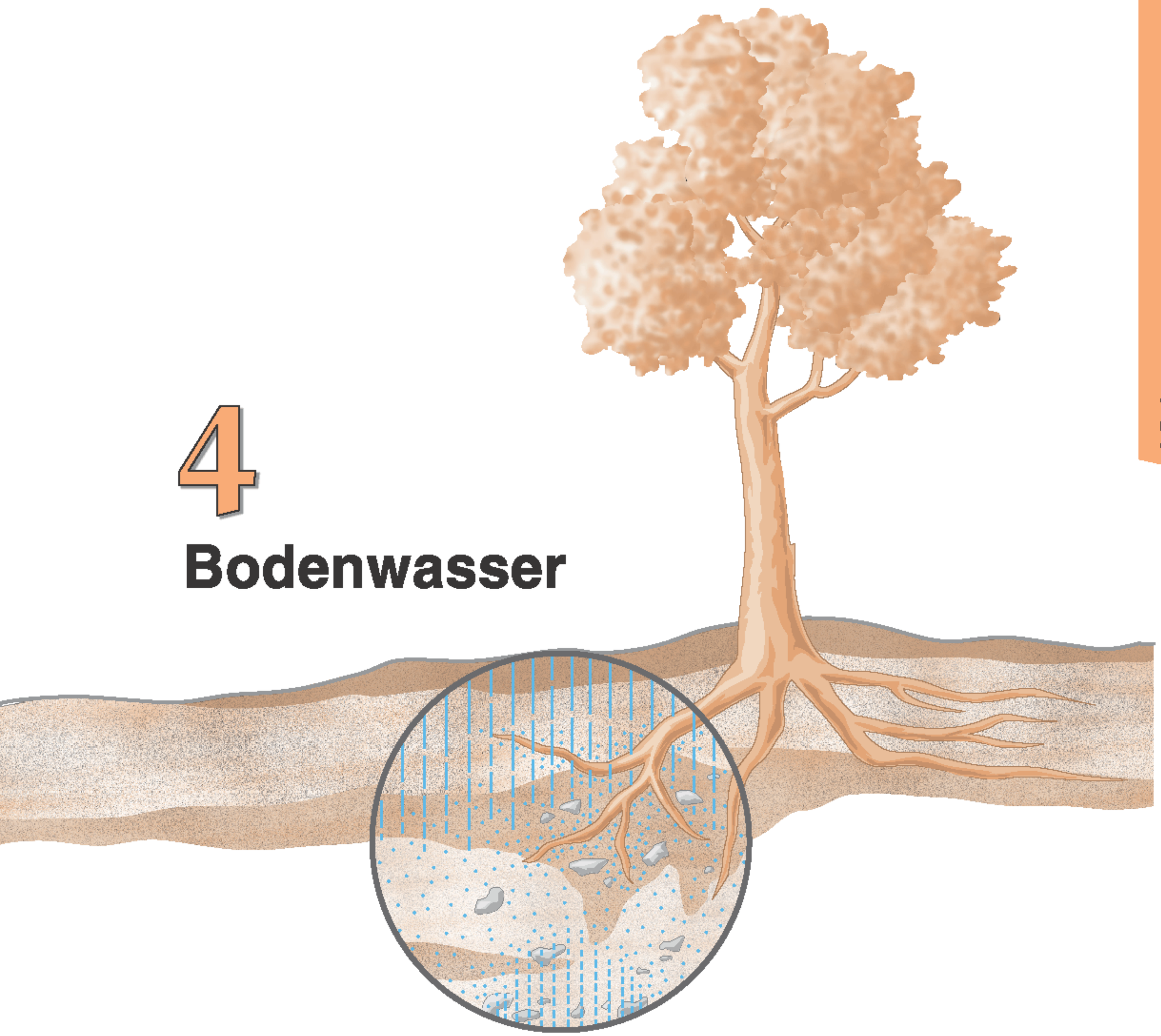
4

Bodenwasser



4.0 Einführung

Der Begriff Boden umschreibt die an der Erdoberfläche entstandene Verwitterungsschicht aus mineralischen und organischen Substanzen. Der Boden ist ein belebter Naturkörper, der in unterschiedlichem Maße Wasser und Luft enthält. Das jeweilige Zusammenspiel von Ausgangsgestein, Relief, Klima, Vegetation und Grundwasserverhältnissen bringt eine Vielzahl an unterschiedlichen Bodenformen hervor (Atlastafeln Kapitel 1 „Grundlagen"). Boden ist Substrat und Halt für die Vegetation und versorgt diese mit Wasser und Nährstoffen. Er ist darüber hinaus ein hervorragender Speicher für Mineralien, organische Substanzen, Energie und Wasser. Beim Durchströmen des Bodens können Wasser und Gase durch den Kontakt mit dem Substrat oder den Bodenlebewesen verändert werden.

Der Boden und seine Eigenschaften spielen somit eine zentrale Rolle in der Hydrologie und in der Umwelt. Wichtige hydrologische Parameter des Bodens sind seine Durchlässigkeit und seine Speichereigenschaften. Sie werden vor allem durch die Korngrößenverteilung des Substrats bzw. die Porosität bestimmt. Boden ist nicht zuletzt der *Umsatzraum für die Abflussbildung*, das heißt die Aufteilung des Niederschlags in die Bilanzgrößen Verdunstung, oberirdischer und unterirdischer Abfluss.

Die Fähigkeit Wasser aufzunehmen, zu speichern und gegen unterschiedliche Saugspannungen wieder abzugeben, macht den Boden zu einem System, das in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften, den Vorfeuchtebedingungen und den hydrometeorologischen Randbedingungen sehr differenziert reagiert. Die komplexen hydrologischen Prozesse können durch verschiedene Bodenwasserparameter teilweise erklärt werden.

Die Kartenthemen zum Bodenwasser lassen einige Eigenschaften des Umsatzraums Boden im Übersichtsmaßstab räumlich charakterisieren. Zunächst wird in Atlastafel 4.1 die Mächtigkeit des durchwurzelten Bodens angesprochen; sie ist ein Maß für die mögliche Ausschöpfungstiefe und damit für das verfügbare Wasservolumen für Vegetation und Verdunstung. Die Tafeln 4.2 bis 4.4 widmen sich den Kennwerten der Wasserbindung im Boden: Über die Größen Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität werden die Anteile der Fraktionen Grob-, Mittel- und Feinporen am Porenvolumen beschrieben. Diese Kenntnisse ermöglichen Aussagen über das verfügbare Wasserspeichervermögen und die Wasserwegsamkeit in den Poren des Bodens. Diese Speicherparameter können in Verbindung mit Daten zu Niederschlag, Verdunstung und möglichen Verlustgrößen in Form von Oberflächenabfluss auch zur Ermittlung der mittleren Sickerwasserrate aus dem Boden herangezogen werden.

HAD-Themen zum Bodenwasser

4.1 Tiefe des effektiven Wurzelraums

Die Tiefe des effektiven Wurzelraums stellt die potenzielle Ausschöpfungstiefe für pflanzenverfügbares Bodenwasser dar, das in Trockenjahren von Pflanzenwurzeln maximal entzogen werden kann. Aus diesem Tiefenintervall decken die Pflanzen ihre Wasser- und Nährstoffversorgung. Somit kennzeichnet der effektive Wurzelraum auch das Substratvolumen, aus dem durch die Evapotranspiration Wasser an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Tiefe des effektiven Wurzelraums ist von den Bodeneigenschaften, wie z.B. der Gründigkeit oder einem möglichen Grundwassereinfluss, aber auch von der Vegetation abhängig. In der Karte wird dies berücksichtigt, indem die Wurzelraumtiefen nach Acker- und Grünland bzw. nach Wald differenziert sind. Unter Wald sind bei sonst gleichen Bodeneigenschaften größere Wurzelraumtiefen zu erwarten.

4.2 Feldkapazität bis 1 m Profiltiefe

Die Feldkapazität (FK) beschreibt diejenige Wassermenge, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Wasser in gröberen Poren wird vom Boden nur langsam abgegeben, bis ein Gleichgewicht zwischen Saugspannung im Boden und Gravitationspotenzial erreicht wird. Die Feldkapazität wird konventionell als Wassergehalt in Vol.-% (entspricht mm Wassersäule pro dm Bodenmächtigkeit) bei einem Matrixpotenzial von pF 1,8 angegeben. Niederschlagsmengen, die über die erreichte Feldkapazität eines Bodens hinausgehen, werden nach Perkolation des Bodens als Sickerwasser an das Grundwasser abgegeben – sofern die Infiltrationskapazität des Bodens nicht überschritten ist und Oberflächenabfluss einsetzt.

4.3 Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum

Die nutzbare Feldkapazität (nFK), d. h. das pflanzenverfügbare Wasser, entspricht der Feldkapazität minus dem Wassergehalt, der beim permanenten Welkepunkt (PWP) nicht pflanzenverfügbar gespeichert ist. Das Restwasser am PWP kann von den Pflanzenwurzeln nicht mehr aufgenommen werden, da es zu stark in Feinporen und durch die Bodenmatrix gebunden ist. Das Wasservolumen der nutzbaren Feldkapazität wird somit durch zwei Matrixpotenzialwerte begrenzt, die üblicherweise als Saugspannung in pF-Werten angegeben werden (pF 1,8 bis pf 4,2). Die nFK ist der Wasserspeicher, der die Pflanzenwasserversorgung zwischen Niederschlagsereignissen aufrecht erhält.

4.4 Luftkapazität im effektiven Wurzelraum

Die Luftkapazität entspricht dem Grobporenvolumen im Boden, das durch die Schwerkraft entwässert werden kann und bildet zusammen mit der Feldkapazität das Gesamtporenvolumen. Diese groben Poren haben Einfluss auf die Durchlässigkeit des Bodens für Luft und Wasser, d.h. die Perkolation. Bei stärkeren Niederschlägen haben Böden mit hoher Luftkapazität höhere Infiltrationsraten, wodurch der Anteil von Oberflächenabfluss verringert und die Grundwasserneubildung erhöht wird. Dies setzt voraus, dass an der Bodenoberfläche keine infiltrationshemmenden Effekte auftreten.

4.5 Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden

Niederschlagswasser, das nach Abzug des Oberflächenabflusses in den Boden infiltriert, steht zuerst für die Wasserversorgung der Vegetation zur Verfügung. Überschreitet der Wassergehalt im Wurzelraum die Feldkapazität, bewegt sich das infiltrierte Wasser der Schwerkraft folgend nach unten und verlässt den Wurzelraum. Dieses Sickerwasser wird sich zum Grundwasserspiegel bewegen und zur Grundwasserneubildung beitragen oder zum Teil auch lateral als Zwischenabfluss abfliessen. Neben der quantitativen Bedeutung der Sickerwasserrate aus dem Boden für die Grundwasserneubildung, und damit für die Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasser, bestimmt das Sickerwasser in entscheidender Weise auch die Verlagerung und Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen aus dem Boden ins Grundwasser und in Oberflächengewässer. Insbesondere für qualitative Aspekte des Gewässerschutzes ist die Sickerwasserrate deshalb eine entscheidende Eingangsgröße. Die Sickerwasserrate aus dem Boden ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag minus Verdunstung und Oberflächenabfluss.

Prozesse der Abflussbildung im Boden

Der Boden stellt bezüglich der Abflussbildungsprozesse ein Regel- und Verteilungssystem dar. Zugeführtes Wasser verdunstet wieder oder wird auf verschiedene Speicher und Fließwege verteilt (Abb. 1).

Der Bodenoberfläche kann Wasser auf verschiedenen Wegen zugeführt werden. Niederschlag fällt beispielsweise in Form von Regen oder Schnee. Insbesondere in höheren Lagen können auch Nebelniederschläge eine gewisse Rolle als Speisungsgröße spielen. Daneben werden Niederschläge auch als Tau oder Reif abgesetzt. Wasser aus der künstlichen Beregnung stellt eine weitere Eingangsquelle dar.

Abhängig von der Vegetationsbedeckung des Bodens erreicht nicht alles Wasser die Bodenoberfläche, sondern wird teilweise von den Pflanzen abgefangen, zwischengespeichert und direkt wieder verdunstet (Interzeptionsverlust). Vegetation, Relief, Klima und Bodeneigenschaften bestimmen schließlich die weitere Aufteilung des Wassers in infiltrierendes Wasser und

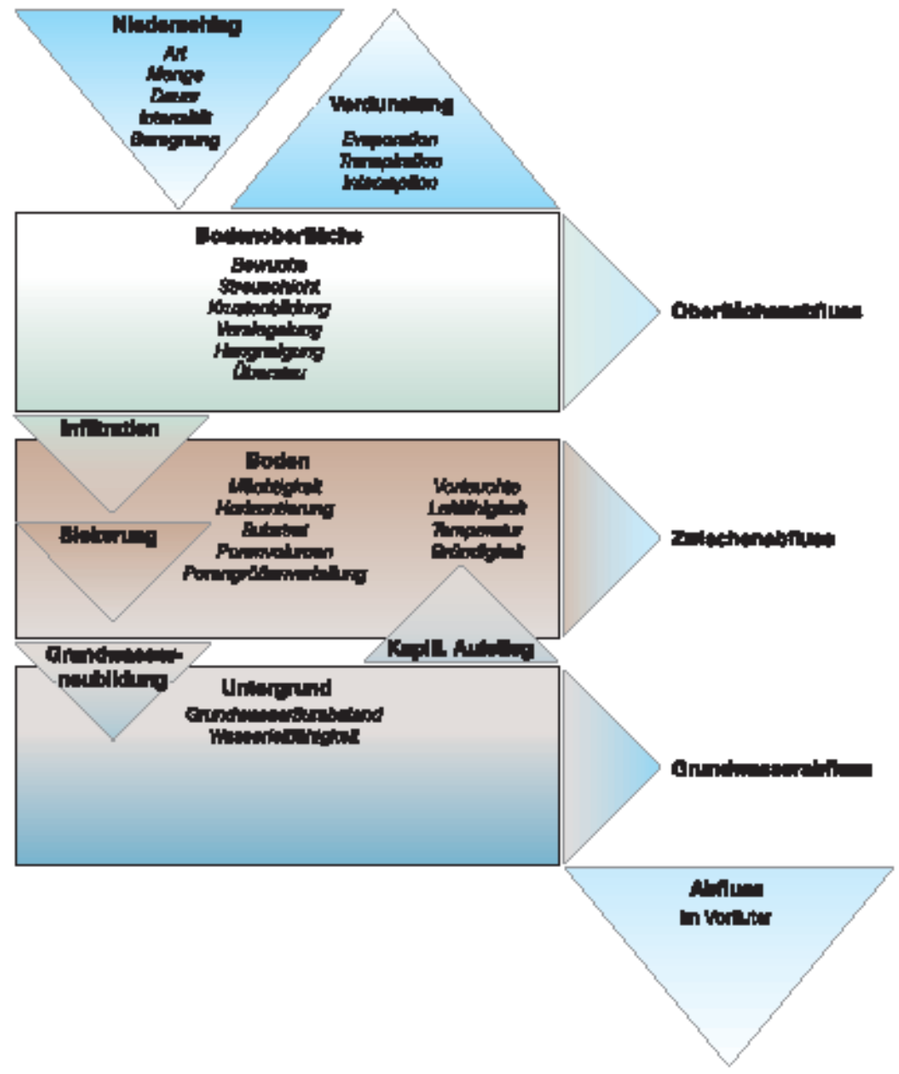


Abb. 1 Abflussbildungsprozesse und deren Haupteinflussfaktoren

Oberflächenabfluss. Indirekte Einflussgrößen auf die Abflussbildung in der ungesättigten Bodenzone sind die Eigenschaften des Niederschlags wie seine Dauer und Intensität, der atmosphärische Verdunstungsanspruch, die Ausbildung der Vegetation, die Morphologie der Bodenoberfläche, die verschiedenen Eigenschaften des Bodens, die Vorfeuchte und die hydrogeologischen Bedingungen unterhalb des Bodens.

Infiltrierendes Wasser wird der Bodenfeuchtespeicherung zugeführt und erhöht den Feuchtegehalt im Boden. Abhängig von Leit- und Speichervermögen der Bodenschichten wird das Wasser in den Poren- und Matrixräumen gespeichert bzw. sickert der Schwerkraft folgend in die Tiefe. Die Grob- und Makroporen sind dadurch charakterisiert, dass das darin befindliche Wasser nicht (maßgeblich) durch Kapillarkräfte beeinflusst wird. Die Wasserbewegung verläuft darin häufig turbulent, heterogen und anisotrop. In Mikroporen wird von einer laminaren, homogenen Bewegung ausgegangen und die Wasserspeicherfunktion überwiegt. Für die Wechselbeziehung zwischen Leit- und Speichervermögen des Bodens ist neben der absoluten Größe der Porosität und dem Verhältnis von Fein- zu Grob- und Makroporen (charakterisiert durch Bodenwasserparameter FK, nFK und Luftkapazität) die zu Beginn des Regens oder der Schneeschmelze vorhandene Porenfüllung oder Vorfeuchte (Mikroporen) sowie die Mächtigkeit einzelner Bodenhorizonte und die Größe bodenphysikalischer Unterschiede zwischen ihnen maßgebend. Skelettreiche, lockere Oberböden nehmen große Regenintensitäten auf, während verdichtete, strukturarme und bindige Böden sehr schnell Abfluss liefern (Landoberflächenabfluss bei versiegelten oder schlecht durchlässigen Flächen). Auf gesättigten bzw. aufgesättigten Flächen kann Sättigungsabfluss insbesondere auf Talböden und bei konvergierenden Fließwegen auftreten. Auch innerhalb des Bodens kann Wasser seitlich abgeführt werden und den Vorfluter erreichen, ohne zur Grundwasserneubildung beizutragen. Der hieraus entstehende (laterale) Zwischenabfluss wird durch vernetzte Makroporen oder einen oberflächennah anstehenden Boden-Gesteins-Übergang gefördert. Das Gefälle der Bodenoberfläche und von Bodenschichten (einzelne Horizontübergänge, Pflugsohle) tritt als abflussförderndes Element je nach Bewuchs und Aufnahmefähigkeit des Oberbodens bei unterschiedlich hohen Werten in Erscheinung, in Wäldern z.B. häufig erst ab 15-20% Hangneigung.

Gute Versickerungsbedingungen bieten Böden ohne stark differenzierte Schichtung mit einer Porengrößenverteilung, die einen hohen Grobporenanteil mit einer mittleren bis geringen nutzbaren Feldkapazität verbinden. Hierzu gehören alle sandigen und kiesigen Böden, während schluffige und tonige Böden mit einem umgekehrten Verhältnis ein gutes Wasserhaltevermögen zeigen.

Im mitteleuropäischen Raum ist während der Vegetationsperiode der Entzug von Bodenwasser durch Evapotranspiration häufig größer als der angebotene Niederschlag, so dass nur bei außergewöhnlichen Starkregenereignissen Wasser als Sickerwasser zur Grundwasserneubildung beitragen kann. In den Wintermonaten dagegen dominiert der Niederschlag, so dass dieser Zeitraum die eigentliche Bildungsperiode des Grundwassers ist.

Die Verdunstung hat als Zehrgröße großen Einfluss auf das Wasser im Boden. Sie hat einen mittleren Anteil von % am Wasserhaushalt in Deutschland (Atlastafel 3.5 und 5.5), d.h. der Großteil des Niederschlagswassers entweicht über die Verdunstung wieder in die Atmosphäre. Verdunstung tritt dabei sowohl direkt an der Bodenoberfläche auf (Evaporation) als auch über die Pflanzen (Transpiration). Bei entsprechend großen Matrixpotenzialgradienten – meistens bedingt durch Wasseraufnahme durch Wurzeln – kann Wasser aus dem Grundwasser und aus tieferen Bodenschichten in den Wurzelraum aufsteigen und zur Wasserversorgung der Vegetation beitragen (kapillarer Aufstieg).

Die Kenntnis der Abflussbildungsprozesse und deren gebiets- und ereignisspezifisches Zusammenwirken kann genutzt werden, um beispielsweise die Hochwasserentstehung oder die Grundwasserneubildung auf der Fläche zu beeinflussen. Maßnahmen, die den Anteil schneller Abflusskomponenten verringern, wirken hochwasserminderndund oft auch in Richtung einer erhöhten Grundwasserneubildung. Porensysteme des Bodens wirken dann hochwasserreduzierend, wenn neben einer guten Infiltrationskapazität durch große Poren auch gute Wasserspeichereigenschaften durch kleine Poren vorhanden sind. Die Steuerungsfaktoren Porenraumverteilung und Landnutzung sind auf den bewirtschafteten Flächen anthropogen beeinflusst und in Bereichen beeinflussbar. Eine gut ausgebildete Vegetationsbedeckung hält einen Teil des Niederschlagswassers zurück (Interzeption, Evapotranspiration) und beugt der Verschlämmung der Bodenoberfläche vor (abflusshemmende Streu). Die Durchwurzelung lockert den Oberboden, die biologische Aktivität schafft zusätzliche Grob- und Makroporen und unterstützt die Infiltrations- und Speicherleistung des Bodens durch eine günstige Porenstruktur. So ist beispielsweise unter Wald nur in Ausnahmefällen mit Oberflächenabfluss zu rechnen, während bei ackerbaulicher Nutzung mit teilweise freier Bodenoberfläche neben dem Oberflächenabfluss bei Starkregen zusätzlich noch mit den Erosionsfolgen gerechnet werden muss.

4.0 Introduction

The term "soil" is used for the layer of weathered mineral and organic matter on the earth's surface. The soil contains water, air, and living organisms. Many different kinds of soils are formed as a result of the interrelationships between the parent rock, relief, climate, vegetation and depth to groundwater table (Map Sets of Chapter 1 "Fundamentals"). For the vegetation, soils are the substrate and support, providing water and nutrients. They store minerals, organic substances, thermal energy, and water. Water and gases passing through the soil can be changed on contact with the soil or soil organisms.

The soil and its properties thus play a central role in hydrology and the environment. The important hydrological parameters of a soil are permeability and storativity. These parameters are governed primarily by the grain-size distribution and porosity of the soil. It is in the soil where runoff generation processes separate the precipitation water into the water balance terms evapotranspiration, surface and subsurface runoff.

The ability of a soil to take up and store water and to release it again despite existing capillary suction and absorption is dependent on the physical properties and the water content of the soil, and the hydrometeorological conditions. The complex of hydrological processes can be partly explained using various soil water parameters.

The regional distribution of some soil hydrological properties is shown on the thematic soil water maps of this atlas. The thickness of the rooting zone is a measure of the potential depth down to which plant roots can take up the maximum amount of water from the soil and therefore of the available water for vegetation and evaporation. The soil water retention parameters field capacity, available water capacity and air capacity are a measure of the pore-size distribution in the soil. These parameters provide information about the storativity and hydraulic conductivity of the soil. The storage parameters, together with precipitation rate, evapotranspiration, and surface runoff, can be used to determine the mean rate of percolation from the soil.

Soil Water Topics of the HAD

4.1 Depth of the Effective Root Zone

The depth of the effective root zone is the potential depth down to which, in dry years, plant roots can take up the maximum amount of plant-available water from the soil. From this zone plants obtain their supply of water and nutrients. The effective root zone is, thus, the soil interval from which water is lost to the atmosphere via evapotranspiration. The depth of the effective root zone depends on soil properties such as soil depth and depth to the groundwater table, as well as on the vegetation cover. A distinction is, therefore, made on the map between cropland/grassland and forests; the thickness of the root zone in a forested area is usually greater than in cropland/grassland areas with otherwise the same soil properties.

4.2 Field Capacity up to 1 m Soil Profile Depth

The field capacity is a measure of the amount of water that a soil can retain against the pull of gravity. Water in the larger pores slowly drains from the soil until an equilibrium is reached between capillary suction and the gravitation potential. The field capacity is conventionally expressed as water content in vol.% (corresponds to mm of water per dm of soil) at a matrix potential of pF 1.8. Precipitation over and above the field capacity percolates into the groundwater, if the infiltration capacity is not exceeded, otherwise surface runoff will occur.

4.3 Available Water Capacity in the Effective Root Zone

The available water capacity, i.e., the plant-available water corresponds to the field capacity minus the water content that is present but not plant-available at the permanent wilting point. The water remaining at the permanent wilting point is not available to the plant roots because it is too strongly held in the small pores by forces exerted by the solid matter. The available water capacity is thus given by two matrix potential values, normally expressed as pF values (e.g., pF 1.8–4.2). The available water capacity is the amount of water available to the vegetation between precipitation events.

4.4 Air Capacity in the Effective Root Zone

The air capacity corresponds to the volume of large pores in the soil that can be drained by gravity. Together with the field capacity it makes up the total pore volume. The large pores influence the permeability of the soil to air and water, i.e. the percolation. In the case of intense precipitation, soils with a high air capacity have higher infiltration rates and thus less surface runoff and higher groundwater recharge rates, assuming nothing at the surface inhibits or retards infiltration.

4.5 Mean Annual Rate of Percolation from the Soil

The amount of water that infiltrates into the soil after surface runoff is subtracted from precipitation is immediately available to the vegetation. If the water content in the root zone exceeds the field capacity, the excess percolates downwards out of the root zone towards the water table leading to groundwater recharge or lateral interflow. Besides the significance of the percolation rate for groundwater recharge, and thus for the drinking water supply, it is also of significance for the leaching of nutrients and contaminants from the soil and, therefore, an important parameter for groundwater protection. The rate of percolation from the soil is obtained by subtracting the rates of evapotranspiration and surface runoff from the precipitation rate.

Processes of Runoff Generation in the Soil

The soil builds a control system in the runoff processes, that distributes the water entering the soil. The water is returned to the atmosphere by evapotranspiration or it is passed on to one of several storage reservoirs (Fig. 1).

Water can arrive at the soil surface in different forms: rain, snow, fog, dew, or frost. Irrigation is another possibility. Not all of the precipitation reaches the soil. Part of it lands on the vegetation and evaporates directly back into the atmosphere (interception loss).

Vegetation, relief, climate, and soil thus govern the distribution of the water between infiltration and runoff. The processes in the unsaturated zone are influenced by parameters such as duration and intensity of the precipitation, potential evapotranspiration, the type of vegetation, the relief, various soil properties, the amount of water previously present in the soil, and the hydrogeology of the rocks below the soil.

Infiltrating water increases the volume of water in the soil. Depending on the permeability and storativity of the soil, the water is stored in the pores or percolates to deeper levels. The water in the large pores and macropores is not significantly influenced by capillary forces. Water movement in them is generally turbulent, heterogeneous, and anisotropic. Water movement in small pores is generally laminar and homogeneous and storage predominates. The relationship between the permeability and storativity of a soil is governed not only by the absolute values for porosity and the pore-size distribution (characterised by field capacity, available water capacity, and air capacity), but also by the amount of water present in the soil when the rain or snow melt begins, the thickness of the individual soil horizons, and the differences in the physical properties between them. Large amounts of water can be absorbed by uncompacted, gravelly top soils during intense rainfall; surface runoff is quite high in the case of compacted, cohesive soils. Water can also percolate laterally, entering the receiving stream without having entered the groundwater. This interflow is increased by networks of macropores and near-surface hard rock. The influence of slope of the soil surface and of the soil horizons on the amount of runoff

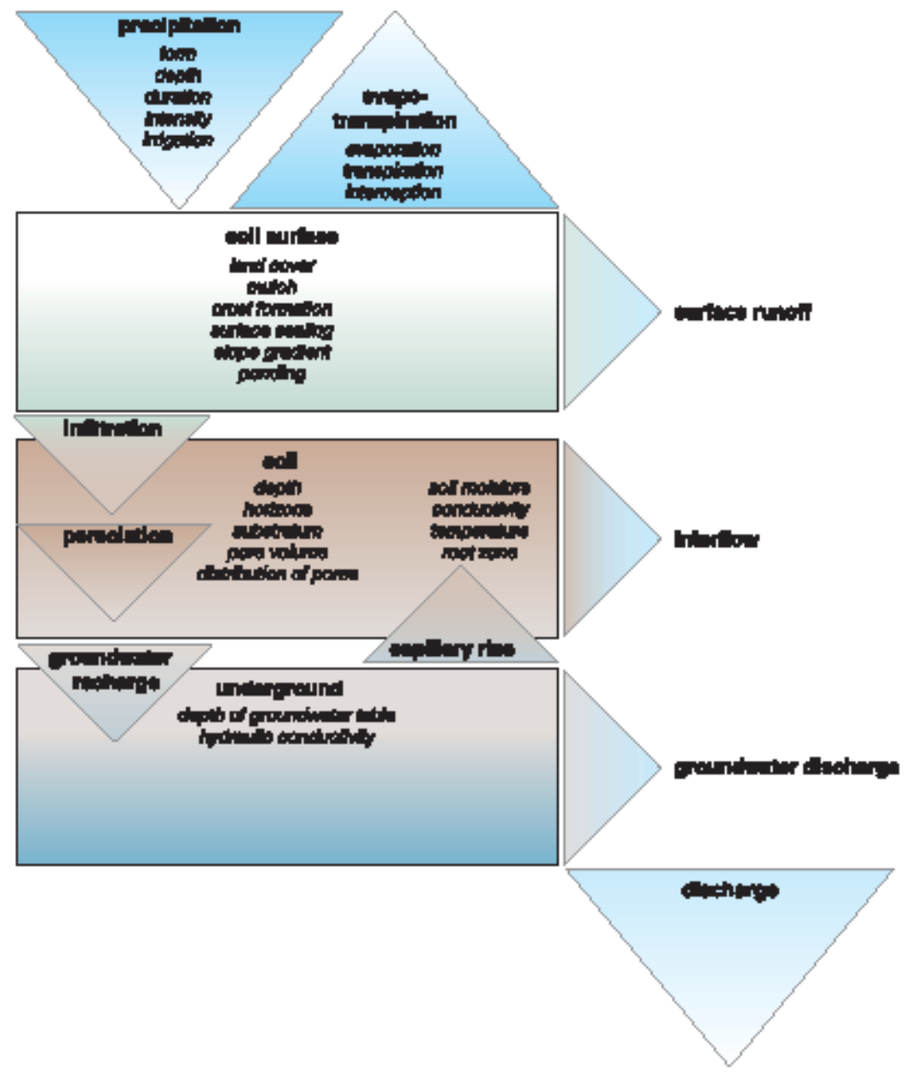


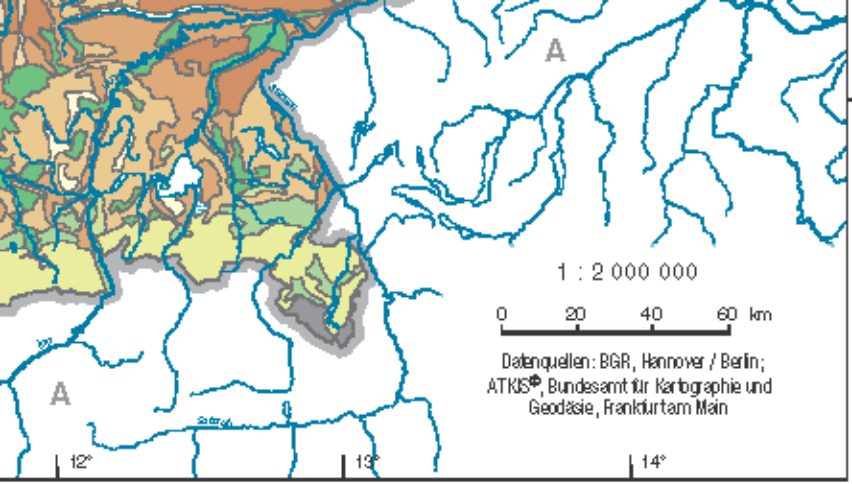
Fig. 1 Runoff generation processes and their main influencing factors

depends on the vegetation and infiltration capacity of the soil; in forests, e.g., it has an effect above 15 – 20 % slope gradient.

Good percolation conditions are provided by soils with little difference between layers and with a high proportion of large pores and a moderate to low available water capacity. Such soils include all sandy and gravelly soils. In contrast, silty and clayey soils have good water storage capacities.

Evapotranspiration has a large influence on the amount of water in the soil. In Germany it accounts for about two thirds of the water balance (Maps 3.5 and 5.5). During the vegetation period in central Europe, evapotranspiration is often greater than the precipitation rate, and only intense rainfall contributes to groundwater recharge via percolation. During the winter months, the precipitation rate is larger than evapotranspiration and thus this is the period of groundwater recharge. If the matrix potential gradient is high enough (usually resulting from take up of water by plant roots), water can ascend into the root zone by capillary rise.

Knowledge of the runoff generation processes by which water leaves the soil and the way they interact as a function of the properties in a specific area or the type of precipitation event can be used to prevent flooding or influence groundwater recharge in an area. If the soil has both a high infiltration capacity due to large pores and good storage properties due to the presence of small pores, these are beneficial conditions to reduce floods, as well as for increasing groundwater recharge. The pore-size distribution and the land cover are influenced by man in agricultural areas. A good vegetation cover intercepts parts of the precipitation and returns part of it to the atmosphere by evapotranspiration. The decaying vegetation on the soil surface hinters rapid runoff and silting of the soil surface at storm precipitation events. The plant roots loosen the soil, animal and microbial activity creates macropores, increasing the infiltration and storage properties of the soil. In a forest, surface runoff is the exception. In an area used for field crops, often with bare soil, there will be surface runoff and erosion involved during heavy rains.



Fels- und
iete

Salzwiesen

HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

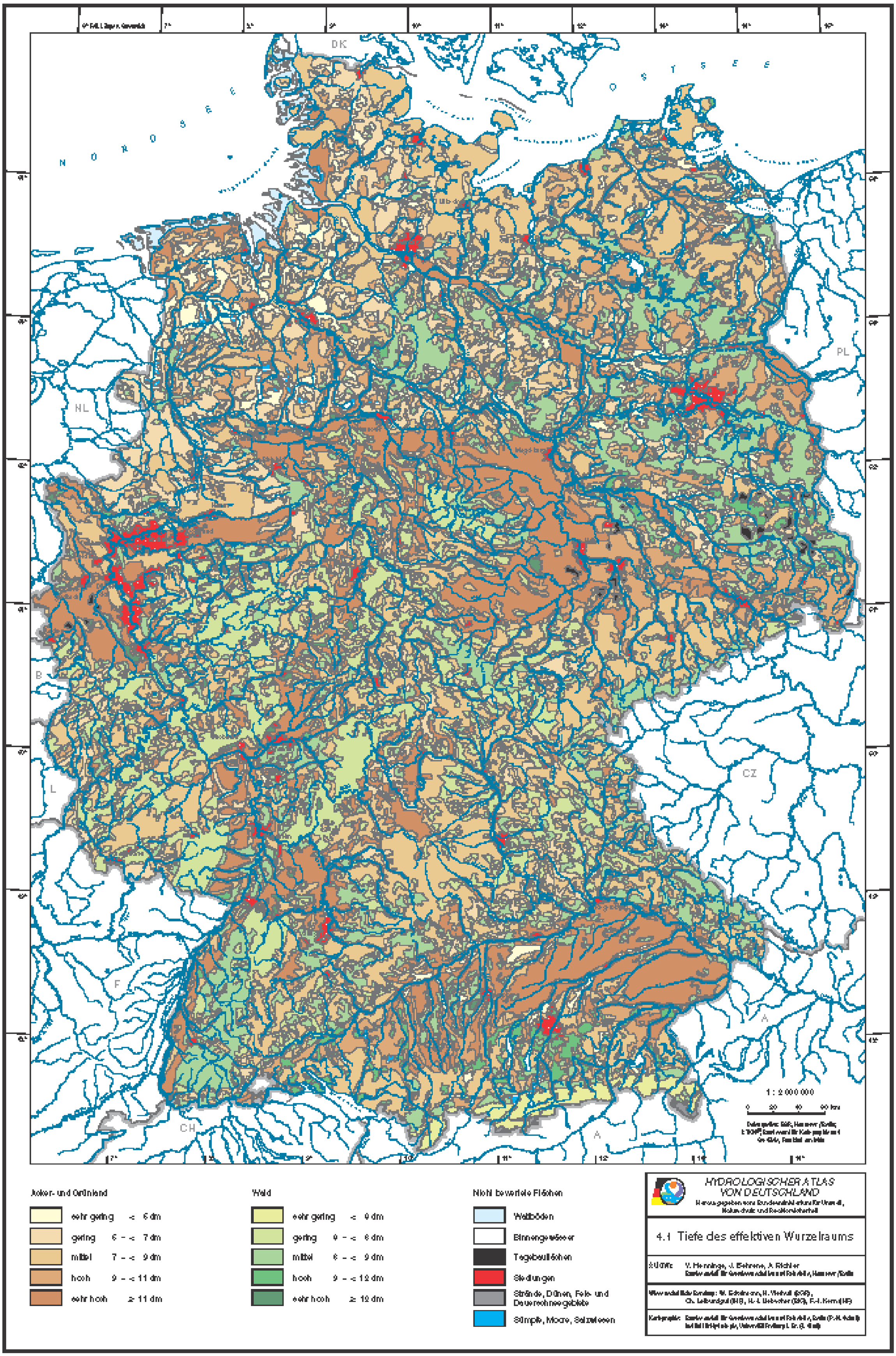
Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

4.1 Tiefe des effektiven Wurzelraums

Autoren: V. Hennings, J. Behrens, A. Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin

Wissenschaftliche Beratung: W. Eckelmann, H. Vierhuff (BGR), Ch. Leibundgut (IHF), H.-J. Liebscher (BfG), F.-J. Kern (IHF)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin (P.-N. Schulz)
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Strub)


DK
NORDSEE
OSTSEE
NL
PL
B
L
CZ
F
CH
A
1 : 2 000 000
0 20 40 60 km
Acker- und Grünland
sehr gering < 6 dm
gering 6 – < 7 dm
mittel 7 – < 9 dm
hoch 9 – < 11 dm
sehr hoch ≥ 11 dm
Wald
sehr gering < 9 dm
gering 9 – < 8 dm
mittel 8 – < 9 dm
hoch 9 – < 12 dm
sehr hoch ≥ 12 dm
Nicht bewertete Flächen
Wattböden
Binnengewässer
Tagebauflächen
Siedlungen
Strände, Dünen, Fels- und Dauerschneegebiete
Sümpfe, Moore, Salzstellen
HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND
4.1 Tiefe des effektiven Wurzelraums

4.1 Tiefe des effektiven Wurzelraums

Der bodenhydrologische Kennwert „Tiefe des effektiven Wurzelraums" bzw. „effektive Durchwurzelungstiefe" (We) ist als die potentielle Ausschöpftiefe von pflanzenverfügbarem Bodenwasser definiert, das durch Pflanzenwurzeln in Trockenjahren dem Boden maximal entzogen werden kann. Die effektive Durchwurzelungstiefe ist das entscheidende Tiefenintervall, aus dem die Pflanzen ihre Wasser- und Nährstoffversorgung decken. Sie bestimmt wesentlich die Art und Entwicklung des Pflanzenbestandes, dessen Evapotranspiration, Wachstum und Ernteertrag und ist daher Eingangsgröße für viele Modelle zur Abschätzung der Flächenwerte der Verdunstungshöhe.

Für die Darstellung in Karte 4.1 erfolgt die Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe vorrangig nach bodenphysikalischen Eigenschaften und läßt Nährstoffmangel und den Einfluß niedriger pH-Werte, die ebenfalls das Wurzelwachstum begrenzen können, unberücksichtigt.

Grundlage für die Berechnung der effektiven Durchwurzelungstiefe ist die Wassergehaltsverteilung im Bodenprofil am Ende der Vegetationsperiode in niederschlagsarmen Jahren auf grundwasserfernen Standorten. Die effektive Durchwurzelungstiefe ist in der Tiefe anzusetzen (Abb. 1), in der die Differenz zwischen dem aktuellen Wassergehalt und dem permanenten Welkepunkt (gepunktete Fläche) gleich der Wassergehaltsdifferenz zwischen der Feldkapazität und dem aktuellen Wassergehalt ist (schraffierte Fläche).

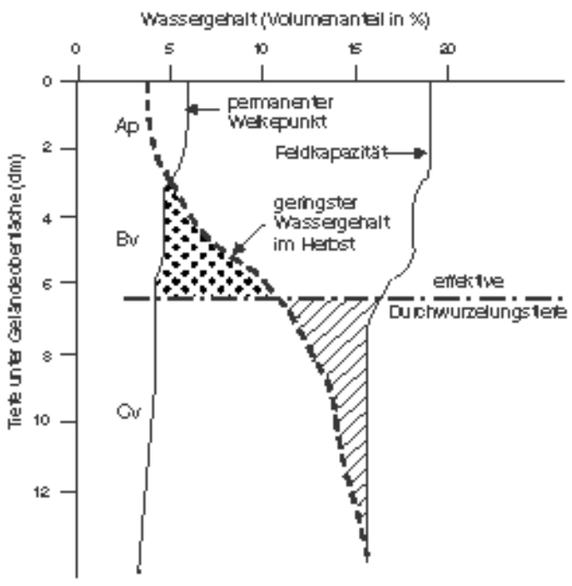


Abb. 1 Beispiel für die Bestimmung der effektiven Durchwurzelungstiefe aus Feldkapazität, permanentem Welkepunkt und Wassergehalt bei einer Braunerde aus Sand im Herbst eines Trockenjahres (aus RENGER & STREBEL 1980)

Die exakte Ermittlung eines bodenhydrologischen Kennwerts wie der effektiven Durchwurzelungstiefe erfordert zeit- und kostenaufwendige Geländemessungen an einer Vielzahl von Standorten. Eine Alternative bieten Pedotransferfunktionen, die es erlauben, die Zielgröße aus vergleichsweise leicht erhebbaren Bodeneigenschaften über empirische Beziehungen zu schätzen. Die effektive Durchwurzelungstiefe ist grundsätzlich nach der Art des Pflanzenbestandes eines Standortes zu differenzieren. Für Hackfrüchte, Getreide und Grünland haben RENGER & STREBEL (1980) eine Tabelle entwickelt, die die Zielgröße als Funktion der Bodenart und Lagerungsdichte abzuleiten erlaubt. Dieser Vorschlag wurde seitdem geringfügig modifiziert und erweitert und in der für Getreide konzipierten Form in die 4. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) aufgenommen.
Für forstwirtschaftlich genutzte Standorte existiert ein vergleichbarer Ansatz von LEHNHARDT & BRECHTEL (1980), der nach bodenkundlichen Standortverhältnissen stärker vereinfacht, jedoch eine Fallunterscheidung in bis zu sieben Baumarten und drei Altersklassen bietet. Falls kleinräumig differenzierte Informationen über die Bestandsstruktur nicht verfügbar sind, kann weiter auf einen Schätzrahmen vereinfacht werden, wie ihn der DVWK (1996) vorschlägt.

Zur Kartendarstellung

Ausgehend von Bodenart und Lagerungsdichte bieten Schluff- und Tonböden der Lößgebiete, des Tertiärhügellandes und der Flußauen die besten Bedingungen für eine tiefgründige Durchwurzelung. Lehm- und insbesondere Sandböden, wie sie für die Böden des pleistozänen Tieflands, aber auch für große Teile der Berg- und Hügelländer charakteristisch sind, weisen eine geringere effektive Durchwurzelungstiefe auf. In den Hoch- und Niedermooren pleistozäner Niederungen wirken geringe Grundwasserflurabstände als begrenzender Faktor. In den Berg- und Hügelländern, in den Mittelgebirgen sowie insbesondere in den Alpen begrenzen das anstehende Festgestein oder auch hohe Skelettgehalte periglazialer Schuttdecken die physiologische Gründigkeit.

In einem über Jahrtausende besiedelten Kulturraum wie Mitteleuropa sind die Standorte relativ höchsten Ertragspotentials üblicherweise ackerbaulich genutzt, während sich forstwirtschaftliche Nutzung vorwiegend auf flachgründige Böden der Mittelgebirge und nährstoffarme Sandböden in Norddeutschland konzentriert. Betrachtet man die Verteilung der Hauptlandnutzungsarten, so weisen die Böden der Küstenregion und der Moore mit ca. 80 % den höchsten Anteil an landwirtschaftlicher Nutzfläche (LN) auf, wobei die Grünlandnutzung überwiegt. In den Lößgebieten, deren LN-Anteil mit etwa 76 % nahezu ebenso hoch ist, dominiert dagegen die Ackernutzung. Auch auf den Böden der Flußtäler und Niederungen mit einem LN-Anteil von knapp 69 % überwiegt die Ackernutzung. Dies gilt ebenso für die Böden des wellig-hügeligen Flachlands und der Hügelländer mit rund 65 % LN-Anteil, die aber bereits zu 30 % mit Wald bedeckt sind. Ein ausgeglichenes Verhältnis von land- und forstwirtschaftlicher Nutzfläche (49 % zu 46 %) mit bedeutenden Grünlandanteilen an der LN weisen die Böden des Berglands sowie der Mittelgebirge auf, während auf den Böden des Hochgebirges der Wald mit rund 83 % dominiert und die LN, in der Regel Grünland, auf ca. 6 % der Fläche beschränkt bleibt.

Die höchsten Werte der effektiven Durchwurzelungstiefe verzeichnen unter den landwirtschaftlich genutzten Böden die Löß- und Sandlößlandschaften Mitteldeutschlands, die Tertiärhügelländer im Alpenvorland sowie die Talauen der großen Flußlandschaften und die Kalkmarschen des Küstenholozäns. Waldbestände, unter denen insbesondere tiefwurzelnde Arten zu einer tiefen Ausschöpfung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers in der Lage wären, sind in diesen Landschaften nur in geringem Umfang vertreten. Das führt dazu, daß Flächen mit hoch bewerteter effektiver Durchwurzelungstiefe unter Wald in der gesamten Bundesrepublik nur einen relativ geringen Flächenanteil aufweisen. Auf landwirtschaftlichen Flächen treten sehr geringe und geringe Werte bei Ackernutzung vorwiegend auf den leichten Sandböden des Altpleistozäns oder in den meist als Grünland genutzten Moorstandorten Niedersachsens und Mecklenburg-Vorpommerns auf. Die teilweise Flachgründigkeit der Mittelgebirgsstandorte wirkt sich dagegen auf Ackerflächen wenig begrenzend aus, da im Gebirge auf flachgründigen Böden Wälder dominieren. Insbesondere die Waldböden der Alpen, aber auch des Rheinischen Schiefergebirges und des Harzes sind durch sehr geringe oder geringe Wurzelraumtiefen gekennzeichnet.

Grundlage für Karte 4.1 ist eine *nutzungsdifferenzierte* Bodenübersichtskarte, da sich die typischen Böden einer Bodengesellschaft unter land- und forstwirtschaftlicher Nutzung deutlich voneinander unterscheiden. Für die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte wurde für alle Legendeneinheiten je ein nutzungsspezifisches, repräsentatives Bodenprofil ermittelt. Bei der Erschließung nutzungsspezifischer Referenzprofile wurde besonderes Augenmerk auf die für die effektive Durchwurzelungstiefe relevanten bodenphysikalischen Merkmale wie Skelettgehalt des Oberbodens und Tiefenlage der Festgesteinsobergrenze gelegt. Die Landnutzungsdaten entstammen dem CORINE Land Cover (STATISTISCHES BUNDESAMT 1997). Infolge der hohen Informationsdichte war zunächst eine inhaltliche Aggregierung und räumliche Generalisierung der Landnutzungsdaten erforderlich, die sich an der kartographischen Darstellbarkeit im Maßstab 1 : 2 000 000 orientiert. Ausgehend von der hierarchischen Gliederung der Bodenbedeckung im CORINE Land Cover, in der die 36 Nutzungsarten zu 15 Gruppen zusammengefaßt wurden (abweichend von der hydrologischen Reklassifikation der Bodenbedeckung, Atlastafel 1.4), erfolgte eine weitere Zusammenfassung in folgende Nutzungsklassen:

1 Siedlungsflächen (einschließlich Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen)
2 Tagebauflächen (einschließlich Deponien)
3 Landwirtschaftlich genutzte Flächen (Acker, Dauerkulturen, Grünland)
4 Wälder und naturnahe Flächen (einschließlich natürliches Grünland, Heiden und Moorheiden)
5 Flächen ohne bzw. mit geringer Vegetation (Strände, Dünen, Fels- und Dauerschneegebiete)
6 Feuchtflächen (Sümpfe, Torfmoore, Salzwiesen)
7 Binnengewässer
8 Wattflächen

Die kartographische Bearbeitung der Landnutzungsdaten konzentrierte sich auf die Zuordnung von Kleinstflächen unterhalb der darstellbaren Mindestgröße von 16 km² (4 mm² in der Karte) zu inhaltlich ausgewählten und darstellbaren Nachbarpolygonen. Damit wird gewährleistet, daß die räumliche Struktur der Flächennutzung, die sich aus den jeweils darstellbaren Flächen ergibt, erhalten wird. Veränderungen bleiben auf kleine Flächen beschränkt und bewegen sich in engen inhaltlichen Grenzen. Die im Ergebnis dieser Bearbeitungsschritte entstandene generalisierte Landnutzungsdarstellung wurde anschließend mit Karte 1.3 zu einer nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 2 000 000 verschnitten.

Für die entstehenden Flächen vorwiegend land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung werden separate Algorithmen zur We-Ermittlung und auch nutzungsartenspezifische Klasseneinteilungen verwendet, da eine bodenhydrologisch als Ausschöpftiefe definierte Durchwurzelungstiefe für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und Waldbäume bei ansonsten gleichen Standorteigenschaften sehr unterschiedlich ausfällt. Die Klasseneinteilungen orientieren sich jeweils an der Häufigkeitsverteilung der Werte aller Legendeneinheiten. Die weiteren Nutzungsklassen werden in der Karte zur Orientierung dargestellt, jedoch nicht thematisch bewertet. Dieser Ansatz gliedert die Karte primär nach den bodenkundlichen Standortverhältnissen und sekundär nach der dominanten Nutzungsart in zwei hierarchisch gestufte Raummuster. Die Tiefe des effektiven Wurzelraumes der Acker- und Grünlandböden wird durch eine Farbskala von Hellgelb bis Dunkelbraun, die der Wälder von Hell- bis Dunkelgrün dargestellt, die einer aufsteigenden Werte-Klassifizierung von „sehr gering" bis „sehr hoch" entspricht.

Pedotransferfunktionen zur Ermittlung des effektiven Wurzelraums

Im Falle überwiegend landwirtschaftlicher Nutzung wurde der bereits genannte Schätzrahmen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994) angewandt (Tab. 1), so daß Karte 4.1 für diese Flächen eine Aussage über die effektive Durchwurzelungstiefe bei einjährigen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bietet.
Gemäß Tabelle 1 ist zunächst ein Grundwert als Funktion der Bodenart (Abb. 2) und Trockenrohdichte zu ermitteln. Ergänzend sind folgende Bodeneigenschaften zu berücksichtigen, die gegebenenfalls zu Zu- oder Abschlägen führen:

- Der effektive Wurzelraum endet an unverwitterten Festgesteinshorizonten.
- Bei Grundwasserböden endet der effektive Wurzelraum an der Obergrenze des Gr-Horizontes, der näherungsweise dem mittleren Grundwassertiefstand entspricht.
- Bei Podsolen entscheidet der Verfestigungsgrad des Bh-, Bhs-, Bs- oder Bsh-Horizontes über eine eventuelle Begrenzung des effektiven Wurzelraumes.
- Bei Auenböden, Kolluvien und Plaggenesche wird ein Zuschlag von 1 dm erteilt, sofern der M- oder E-Horizont tiefer reicht, als es dem nach Tabelle 1 ermittelten We-Wert entspricht.

Bei der Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe im Falle überwiegend forstwirtschaftlicher Nutzung wurde der Empfehlung der Bodenkundlichen Kartieranleitung gefolgt, den für Ackernutzung gemäß Tabelle 1 ermittelten Wert um 20 % zu erhöhen. Ein solcher Zuschlag wird nur erteilt, wenn nicht anstehendes Festgestein, Grundwasser oder durch Sesquioxide verfestigte Anreicherungshorizonte eines Podsols (Ortstein) die effektive Durchwurzelungstiefe begrenzen.

Tab. 1 Mittlere effektive Durchwurzelungstiefe (We) homogener Böden in Abhängigkeit von Bodenart und Klasse der Rohdichte für Ackerkulturen

Bodenart	Klasse der Rohdichte		
	ϱt1 - ϱt2	ϱt3	ϱt4 - ϱt5
Ss	9	6	6
St2	9	7	6
St3	10	8	7
St4	13	9	8
Slu	13	9	8
Slt2	10	8	7
Slt3	13	9	8
Su2	9	7	6
Su3	9	7	6
Su4	9	7	6
Uu	13	10	8
Us	13	10	8
Uls	14	11	9
Ut2	14	11	9
Ut3	14	11	9
Ut4	14	11	9
Lu	14	10	8
Ls2	13	10	8
Ls3	13	11	9
Ls4	13	11	9
Lts	13	11	9
Lt2	13	11	9
Lt3	13	11	9
Tt	13	10	8
Tl	13	10	8
Ts2	13	10	8
Ts3	13	10	8
Ts4	13	10	8
Tu2	13	10	8
Tu3	13	10	9
Tu4	14	11	9

ϱt-Klassen 1+2 < 1,45 g/cm³
ϱt-Klassen 3 < 1,45 - 1,65 g/cm³
ϱt-Klassen 4+5 > 1,65 g/cm³

Praktische Hinweise

Der Inhalt von Karte 4.1 basiert wie Karte 1.3 auf dem digitalen Bestand des Fachinformationssystems Bodenkunde der BGR (FISBo BGR) (ECKELMANN et al. 1995). Dies betrifft sowohl die Referenzprofile der BÜK 1000 als Inhalt der Flächendatenbank, als auch den Algorithmus zur Ableitung der effektiven Durchwurzelungstiefe als Bestandteil der Methodenbank. Eine kritische Bewertung des Datenbestandes der BÜK 1000 nach Repräsentanzkriterien wird bereits im Erläuterungstext zu Atlastafel 1.3 gegeben. In Einzelfällen können nach Flächenanteilen aller Leit- und Begleitböden gewichtete Mittelwerte der effektiven Durchwurzelungstiefe von den dargestellten Werten abweichen. Karte 4.1 beschränkt sich auf zwei Nutzungsarten und bietet bei Landwirtschaft keine Fallunterscheidung in Acker- und Grünland, bei Forstwirtschaft keine Fallunterscheidung nach Baumarten und Bestandsalter. Wiesen oder Weiden würden den in Karte 4.1 für landwirtschaftliche Nutzung angegebenen Wert im Mittel um 1 - 2 dm reduzieren.
Im Falle forstwirtschaftlicher Nutzung gibt Karte 4.1 den effektiven Wurzelraum von tiefwurzelnden Baumarten wie Kiefer, Buche und Eiche für ein mittleres Bestandsalter von 15 - 45 Jahren wieder. Flach wurzelnde Arten wie Birken und Fichten würden diese Werte etwa um den Faktor 0,6 bis 0,7 vermindern. Grundsätzlich fehlt jedoch für Forststandorte noch eine Pedotransferfunktion zur Schätzung der effektiven Durchwurzelungstiefe, die das gesamtmögliche Spektrum bodenkundlicher Standortbedingungen, Baumarten und Altersklassen abdeckt. Vor diesem Hintergrund muß nochmals der Übersichtscharakter von Karte 4.1 sowie der folgenden Atlaskarten 4.2, 4.3 und 4.4 mit den Kennwerten der Wasserbindung herausgestellt werden.

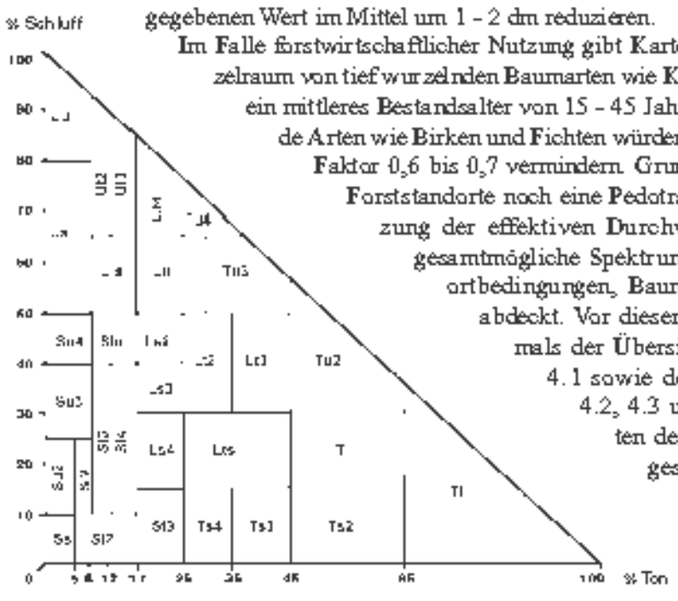


Abb. 2 Bodenarten des Feinbodens („Korngrößendreieck")

4.1 Depth of the Effective Root Zone

The parameter effective rooting depth, or the depth of the effective root zone, is defined as the potential depth down to which, in dry years, plant roots can take up the maximum amount of plant-available water from the soil. The zone between the surface and the effective rooting depth is the interval from which plants obtain their supply of water and nutrients. It is the main factor governing which type of crops are suitable, how they grow, the evapotranspiration, and the crop yield. The effective rooting depth is therefore used as input data in models used to estimate the evaporation loss per unit area.

During compilation of Map 4.1, the effective rooting depth was determined primarily from soil-physical properties neglecting the effects of nutrient deficiency or low pH, which also restrict root growth.

Calculation of the effective rooting depth is based on the moisture distribution in the soil profile at the end of the growing period in markedly dry years at sites with a low water table. The effective rooting depth is taken as the depth (Fig. 1) at which the difference between the moisture content and the permanent wilting point (dotted area) is the same as that between the in-situ field capacity and the moisture content (shaded area).

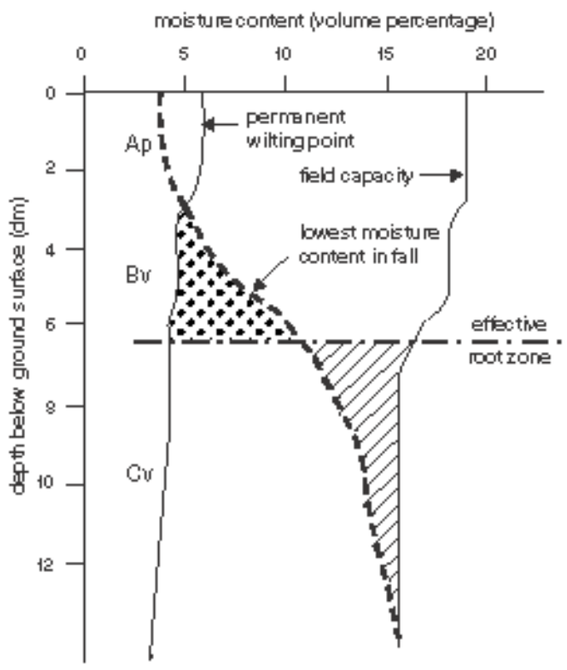


Fig. 1 Example for the determination of the depth of the effective root zone using the parameters field capacity, permanent wilting point und the water content of a Eutric Cambisol from sandy sediments in the fall of a dry year (from RENGER & STREBEL 1980)

The exact determination of a soil-hydrological parameter such as the effective rooting depth requires time-consuming and expensive field measurements at numerous sites. However, pedo-transfer functions are a possible alternative. These permit the effective rooting depth to be estimated from comparatively easily determined soil properties via empirical relationships. It is essential to determine the effective rooting depth specifically as a function of the type of plant at the site. RENGER & STREBEL (1980) compiled a table for root crops, cereals and pastures that permits the effective rooting depth to be derived from soil texture class and bulk density. This table was later slightly modified and expanded and then incorporated, in a form designed for cereal crops, in the 4th edition of the Bodenkundliche Kartieranleitung (German soil mapping guidelines, AG BODEN 1994).
A similar method has been developed for forest sites by LEHNHARDT & BRECHTEL (1980). The method is somewhat simplified with respect to soil conditions, but permits subdivision on the basis of up to seven tree types and three age classes. If detailed information is not available on the tree stands, then it is suggested that the table in DVWK (1996) is used, which provides still further simplification.

Map Structures

On the basis of soil texture class and bulk density, the best conditions for deep rooting occur in the silty and clayey soils of the loess areas, Tertiary hilly areas and flood plains. Loam soils and especially sandy soils such as are developed in the Pleistocene lowlands and are also characteristic of the low mountain and hilly lands show a shallower effective rooting depth. The fen and raised-bog peatlands of the Pleistocene lowlands also show a shallow effective rooting depth, which is restricted by the shallow depth of the water table. In hilly country and uplands (Mittelgebirge) and especially in the Alps, the shallow depth of the bedrock and the large amount of periglacial rock debris tend to reduce the effective rooting depth.

In Central Europe, which has been inhabited for thousands of years, the most fertile land is normally used for crops and the shallow soils of the central German uplands are normally forested. Considering the distribution of the main types of land-use, the soils of the coastal region and peatlands are seen to have the largest share (80 % by area) of agricultural land, of which the largest proportion is grassland. In the loess areas, where the proportion of agricultural land is nearly as high, about 76 %, arable land is predominant. On the valley bottoms and lowlands, which consist of almost 69 % of agricultural land, arable land is again predominant. Similarly, about 65 % of the undulating and hilly lowlands comprise agricultural land, and about 30 % is forest. The soils of the central German uplands and other mountainous areas support almost equal proportions of agriculture and forestry, 49 % and 46 %, respectively, much of the agricultural land being grassland. The soils of the high mountains support mostly forest (83 % of the area) and the agricultural land, which is chiefly grassland, is restricted to 6 % of the area.

The highest values of the effective rooting depth are recorded for the agricultural soils in the loess and sandy loess areas of central Germany, the Tertiary hilly areas in the Alpine foreland, on the flood plains of large valleys and the coastal belt of Holocene calcareous marshland. Forest stands, including deep-rooting types that can use the deepest plant-available water, are only present in small amounts in these areas. Thus, areas with high values for the effective rooting depth beneath forest comprise a relatively small proportion of the area of the Federal Republic of Germany. One finds low and very low values of the effective rooting depth for agricultural land mostly on arable land on light sandy soils in Lower Pleistocene areas and in the peatlands of Niedersachsen (Lower Saxony) and Mecklenburg-Vorpommern (Mecklenburg Western Pomerania), which are mostly grassland. However, in the central German uplands little arable land with shallow effective rooting depth is found because the shallow soils of this region currently support forest. The forest soils of the Alps, of the Rheinisches Schiefergebirge and of the Harz Mountains are characterised by shallow to very shallow rooting depths.

Map 4.1 is based on a soil map that is subdivided with respect to land use, since the typical soils of a given soil association under agriculture and forestry are quite clearly different. In this land-use soil map, one soil profile representative of agricultural land and one of forest land were selected for each map unit in the legend, paying special attention to soil properties relevant to the effective rooting depth, such as content of rock fragments and depth of bedrock. The land-use data were obtained from the "CORINE Land Cover" (STATISTISCHES BUNDESAMT 1997), a digital map derived from satellite images. As a result of the high information density, it was necessary to generalise the land-use data for use on 1 : 2,000,000 maps. The 36 land-use types of Germany visible on the satellite images are arranged in 15 groups in the CORINE Land Cover (different from the hydrological classification of land use, Map 1.4) and were then further classified into the following land-use categories:

1 Built-up areas (including industrial and commercial areas, and roads and railways),
2 Mine areas (including waste disposal sites),
3 Agricultural areas (arable land, plantations and pastures),
4 Forest and quasi-virgin land (including natural pasture, heath and peatland heath),
5 Areas that have little or no vegetation (beaches, dunes, rocky areas, and permanently snow-covered areas),
6 Wetlands (swamps, marshes, mires, and salt meadows),
7 Lakes, rivers, reservoirs, and canals,
8 Tidal flats.

The generalisation of the land-use data concentrated on the assignment of areas smaller than the smallest size that can be represented on a map, i.e. 16 km² (4 mm² on the map), to neighbouring areas of related land use. In this way, the original land-use pattern was largely retained. Modifications are confined to small areas and the changes in land-use classification of these areas are minimal. The land-use map produced by this process of generalisation was then superimposed on Map 1.3 to produce a 1 : 2,000,000 soil map subdivided according to land-use.

Tables showing land-use-specific algorithms were used to determine the effective rooting depth for the areas of agricultural and forestry land produced as above. The resulting effective rooting depths are subdivided using land-use specific classes since the rooting depths are different for agricultural crops and forest trees, even though the sites have otherwise similar soil properties. Subdivision into different classes is done on the basis of the frequency distribution of the values for all map units in the legend. The other land-use classes are given on the map but with no rooting-depth information.

This procedure subdivides the map firstly according to soil conditions and secondly according to dominant land-use type. The effective rooting depth in arable and grassland soils is shown by a colour scale from pale yellow to dark brown, and in forest soil from pale to dark green, indicating increasing depth from very shallow to very deep.

Determination of the effective rooting depth using pedo-transfer functions

In the case of predominantly agricultural land, the table mentioned above, in the German soil mapping guidelines (AG BODEN 1994) was used, so that Map 4.1 provides us with the effective rooting depth in these areas when used for annual agricultural crops.
An initial value as a function of the soil texture class (Fig. 2) and dry bulk density can be read off from Table 1. In addition the following soil properties were taken into consideration, and they lead to positive or negative corrections:

- The effective root zone is bounded at depth by unweathered bedrock,
- in soils in which the water table is shallow, the effective rooting depth corresponds to that of the upper boundary of the Gr horizon, which is approximately the same as the mean lowest depth of the water table,
- in Podsols, the degree of compaction of the Bh, Bhs, Bs or Bsh horizon possibly sets a limit to the effective rooting depth,
- in flood-plain soils, colluvium and plaggen-esch, 10 cm is added to the effective rooting depth if the typical colluvial or esch horizon is deeper than the effective rooting depth in Table 1.

For determination of the effective rooting depth in the case of areas that are predominantly forest, the procedure recommended by the soil mapping guidelines was followed, i.e. the value for arable land was obtained from Table 1 and then increased by 20 %. The effective rooting depth was only increased when the effective root zone was not bounded by bedrock, groundwater or a Podsol (ortstein) zone enriched in sesquioxides.

Table 1 Mean depth of the effective root zone for homogeneous soils in dependance of soil texture class and class of bulk density given for arable land

soil texture class	class of bulk density		
	ßt1 - ßt2	ßt3	ßt4 - ßt5
Ss	8	6	6
Sl2	9	7	6
Sl3	10	8	7
Sl4	13	9	8
Slu	13	9	8
St2	10	8	7
St3	13	9	8
Su2	9	7	6
Su3	9	7	6
Su4	9	7	6
Uu	13	10	8
Us	13	10	8
Uls	14	11	9
Ut2	14	11	9
Ut3	14	11	9
Ut4	14	11	9
Lu	14	10	8
Ls2	13	10	8
Ls3	13	11	9
Ls4	13	11	9
Lts	13	11	9
Lt2	13	11	9
Lt3	13	11	9
Tt	13	10	8
Tl	13	10	8
Ts2	13	10	8
Ts3	13	10	8
Ts4	13	10	8
Tu2	13	10	8
Tu3	13	10	9
Tu4	14	11	9

ßt-classes 1+2 < 1,45 g/cm³
ßt-classes 3 < 1,45 - 1,65 g/cm³
ßt-classes 4+5 > 1,65 g/cm³

Practical Information

The content of Map 4.1, as with Map 1.3, is based on the digital data stored in the BGR soil information system (FISBo BGR) (ECKELMANN 1995). This applies to the reference soil profiles of the 1 : 1,000,000 Soil Map of Germany (BÜK 1000) stored in the spatial database and the algorithms used to derive the effective rooting depth stored in the method base. A critical assessment of the data content of the BÜK 1000 map according to representativeness criteria has already been given in the explanatory notes on Map 1.3. In individual cases, the values given on the map (derived only from dominant soils) may differ considerably from mean values of the effective rooting depth calculated according to the proportions of the areas occupied by all dominant and associated soils. Map 4.1 only shows two types of land-use and does not distinguish between arable land and grassland, and in the case of land used for forestry no distinction is made to reflect tree type or age of stand. The effective rooting depth values given in Map 4.1 for agricultural land would have to be reduced by an average of 10 to 20 cm for pastures and meadows.

In the case of forest land, Map 4.1 gives the effective rooting depth for deep-rooting trees such as pine, beech and oak with an average stand age of 15 45 years. Shallow rooting trees such as birch and spruce would reduce these depths by a factor of about 0.6 0.7. In fact, as far as forests are concerned, there is as yet no satisfactory pedo-transfer function for estimating an effective rooting depth that covers the largest possible spectrum of soil conditions, tree type and age class. In the light of this, we must stress the overview nature not only of Map 4.1 but also of Maps 4.2, 4.3 and 4.4, which show water-retention parameters.

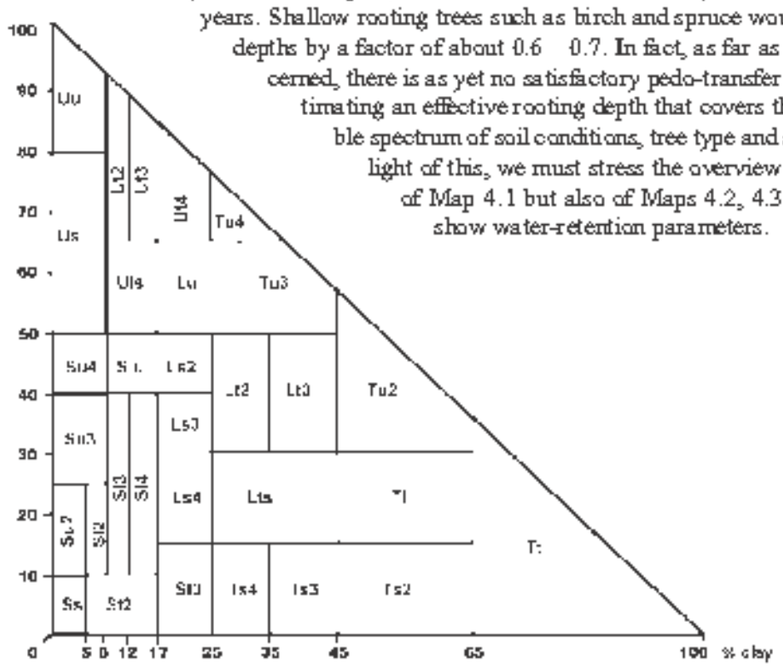
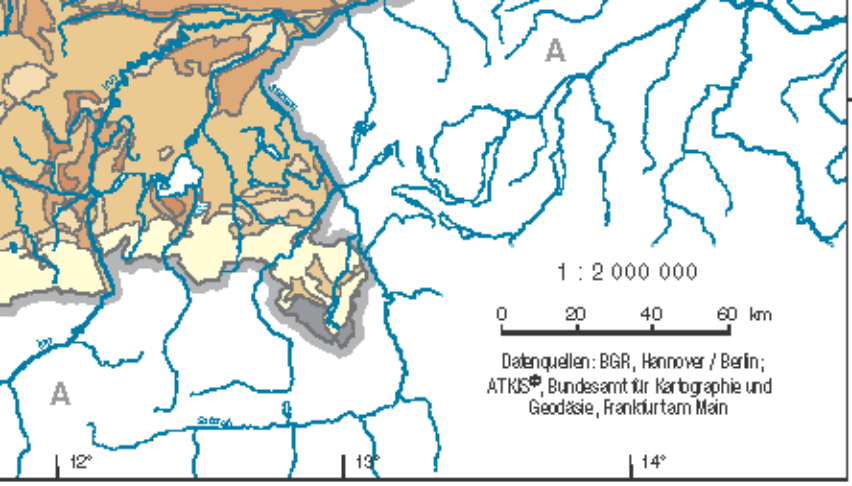


Fig. 2 Soil texture classes



HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

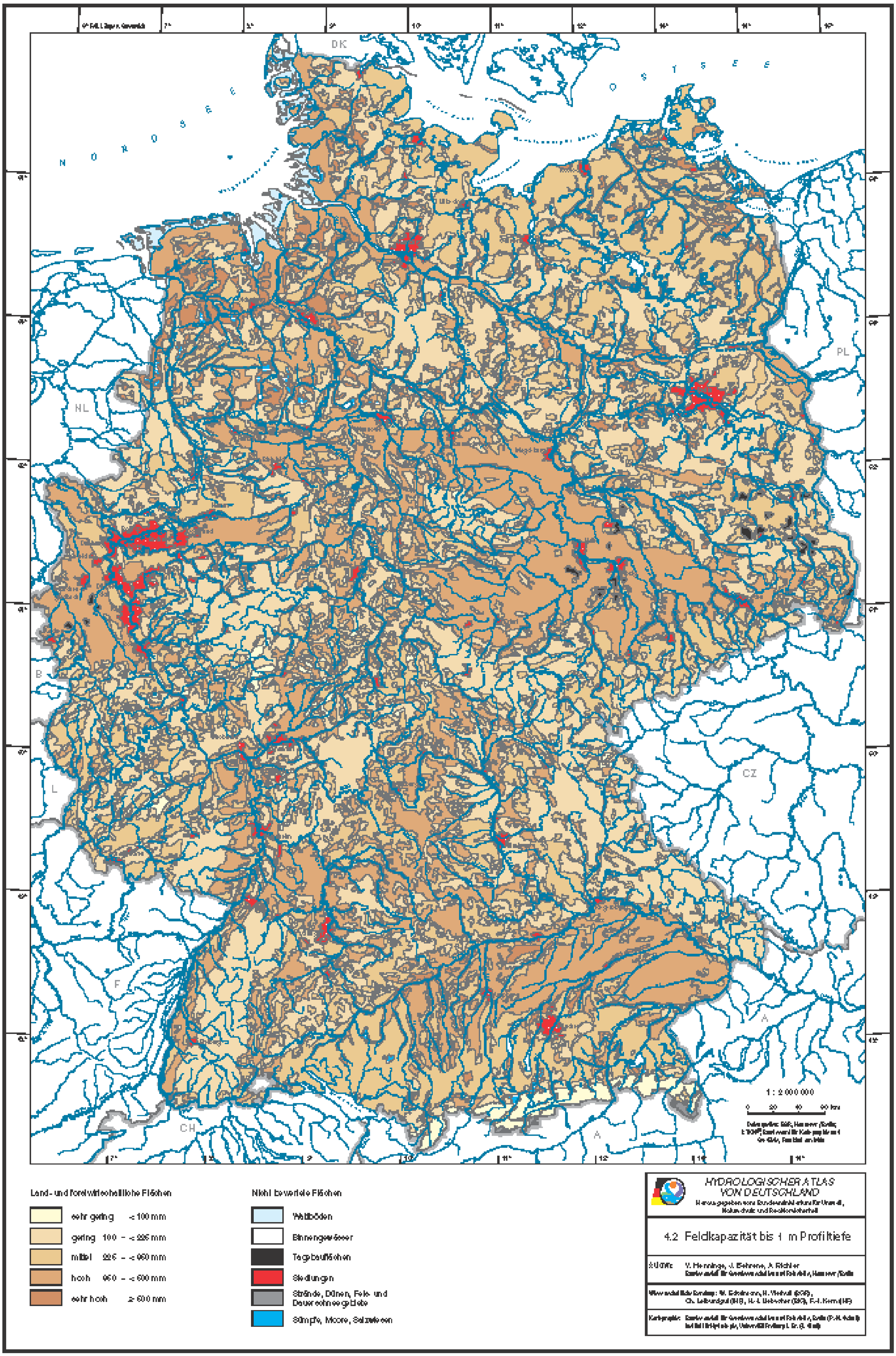
Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

4.2 Feldkapazität bis 1 m Profiltiefe

Autoren: V. Hennings, J. Behrens, A. Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin

Wissenschaftliche Beratung: W. Eckelmann, H. Vierhuff (BGR), Ch. Leibundgut (IHF), H.-J. Liebscher (BfG), F.-J. Kern (IHF)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin (P.-N. Schulz)
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Strub)


DK
NORDSEE
OSTSEE
NL
PL
B
L
CZ
F
CH
A
1 : 2 000 000
0 20 40 60 km
Land- und forstwirtschaftliche Flächen
sehr gering < 100 mm
gering 100 – < 225 mm
mittel 225 – < 450 mm
hoch 450 – < 600 mm
sehr hoch ≥ 600 mm
Nicht bewertete Flächen
Wattböden
Binnengewässer
Tagebauflächen
Siedlungen
Strände, Dünen, Fels- und Dauerschneegebiete
Sümpfe, Moore, Salzwiesen
HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND
4.2 Feldkapazität bis 1 m Profiltiefe

4.2 bis 4.4 Kennwerte der Wasserbindung im Boden

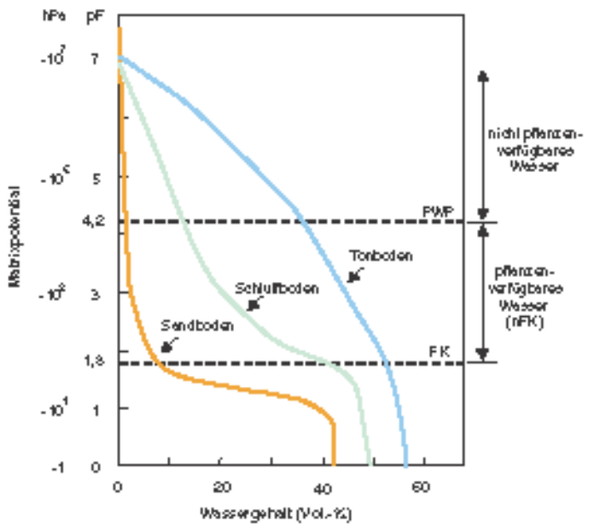


Abb. 1 pF-Kurve als Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt am Beispiel typischer Sand-, Schluff- und Tonböden

Der Wasserhaushalt eines Bodens zeigt sich in seinen Speicher- und Sickereigenschaften und bestimmt damit u. a. die Güte des Bodens als Pflanzenstandort. Das durch Niederschläge dem Boden zugeführte Wasser ist im Boden nur zum Teil frei beweglich und unter der Einwirkung der Schwerkraft als Sickerwasser verlagerbar; ein wesentlicher Teil unterliegt Bindungen der festen Phase, der Bodenmatrix, und wird als Haft- und Kapillarwasser zurückgehalten. Die von der festen Phase im Boden ausgehenden Kräfte werden nach dem Potentialkonzept durch das Matrixpotential beschrieben und z. B. in der Einheit hPa gemessen (1 hPa entspricht einer Wasserspannung von 1 cm Wassersäule). Die Beziehung zwischen logarithmiertem Matrixpotential und dem Wassergehalt in Gew.- oder Vol.-% wird als *Wasserspannungs- oder pF-Kurve* bezeichnet. Sie wird häufig herangezogen, um den Einfluß der bodenkundlichen Standorteigenschaften auf den Bodenwasserhaushalt zu charakterisieren.

Aus dem Verlauf der Wasserspannungskurve (Abb. 1) leiten sich für die Praxis drei verschiedene *Kennwerte der Wasserbindung* ab, die durch Wassergehaltsdifferenzen bestimmter Matrixpotential- bzw. pF-Intervalle definiert sind:

Feldkapazit t (FK)	pF > 1,8	Wassermenge, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann
Nutzbare Feldkapazit t (nFK)	pF 1,8 - 4,2	Feldkapazität abzüglich Totwasseranteil; Anteil der Feldkapazität, der für Pflanzenwurzeln verfügbar ist
Luftkapazit t (LK)	pF < 1,8	Luftgehalt des Bodens bei Feldkapazität; entspricht der Speicherkapazität für Grund- und Stauwasser

Feldkapazität (FK) und Permanenter Welkepunkt (PWP) gliedern die pF-Kurve. Die *Feldkapazität* wird in Deutschland konventionell als Wassergehalt in Vol.-% (entspricht mm Wassersäule pro dm Bodenmächtigkeit) bei einem Matrixpotential von pF 1,8 angegeben, alternativ in anderen Ländern aber auch bei pF 2,5 angesetzt. Der *permanente Welkepunkt*, konventionell durch ein Matrixpotential von pF 4,2 angegeben, markiert den Grenzwert, bei dessen Erreichen landwirtschaftliche Nutzpflanzen irreversibel zu welken beginnen.
Das für Pflanzen verfügbare Wasser, die *nutzbare Feldkapazität*, wird also von zwei Matrixpotentialwerten begrenzt: Oberhalb von pF 4,2 ist alles Wasser in Feinporen gebunden (nicht pflanzenverfügbar), unterhalb von pF 1,8 werden die Poren vergleichsweise schnell entwässert (Luftkapazität). Feldkapazität und Luftkapazität addieren sich zum Gesamtporenvolumen.

Die Kennwerte der Wasserbindung sind von Porenvolumen und Porengrößenverteilung abhängig und daher für jeden Boden unterschiedlich. Abbildung 1 zeigt exemplarisch pF-Kurven für typische Sand-, Schluff- und Tonböden. Danach ist für den Sandboden ein hoher Anteil schwach gebundenen Wassers und eine hohe Luftkapazität charakteristisch. Der andersartige Verlauf der pF-Kurven der beiden anderen Böden beruht auf ihrer abweichenden Porengrößenverteilung: während beim Schluffboden Mittelporen dominieren, sorgen beim Tonboden die Feinporen für die starke Bindung des Bodenwassers. Im Vergleich zeichnet sich der Tonboden durch die größte Feldkapazität, der Schluffboden durch die höchste nutzbare Feldkapazität aus. Neben der Bodenart bestimmen Lagerungsdichte, Humusgehalt und Gefügeeigenschaften die Eigenschaft des Bodens, Wasser zu speichern.

Zur Kartendarstellung

Die Kennwerte der Wasserbindung im Boden lassen grundlegende Rückschlüsse auf die Intensität der Wasserbindung und -speicherung, die Geschwindigkeit von Entwässerungsvorgängen sowie die Verfügbarkeit des Bodenwassers für die Pflanzen zu. Sie sind in den Karten 4.2 bis 4.4 flächendeckend ausgewiesen:

- **4.2 Feldkapazität bis 1 m Profiltiefe (FK_{10dm})**
- **4.3 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFK_{We})**
- **4.4 Luftkapazität des effektiven Wurzelraums (LK_{We})**

Zur Charakterisierung eines kompletten Bodenprofils werden nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität meist auf den effektiven Wurzelraum bezogen (Karte 4.1). Die Feldkapazität ist darüber hinaus ein Maß für den Einfluß des Bodens auf Stoffverlagerungsbedingungen und -rückhaltevermögen und wird nicht auf den vom jeweiligen Bodentyp abhängigen effektiven Wurzelraum, sondern auf ein starres Tiefenintervall von 1 m (FK_{10dm}) bezogen. Andernfalls würden Schluff- und Tonböden gleich beurteilt und erschienen in der entsprechenden Kartendarstellung undifferenziert.

Karte 4.2 wurde nicht nutzungsdifferenziert auf der Basis von Atlastafel 1.3 erarbeitet. Bezugsgrundlage der Feldkapazität FK_{10dm} ist eine einheitliche Profiltiefe von einem Meter. Die Klasseneinteilung des Kennwerts FK_{10dm} wird auf die Gesamtheit aller Werte von land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten bezogen. Durch eine Farbskala von Hellgelb bis Dunkelbraun werden qualitativ Werteklassen von „sehr gering" bis „sehr hoch" wiedergegeben.

Geometrische Bezugsgrundlage der Karten 4.3 und 4.4 ist die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte, d. h. das Ergebnis einer Verschneidung der „Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000" (BÜK 1000; HARTWICH et al. 1995) und einer Karte der aktuellen Landnutzung (CORINE Land Cover, STATISTISCHES BUNDESAMT 1997), generalisiert auf den Zielmaßstab 1 : 2 000 000. Nutzbare Feldkapazität nFK_{We} und Luftkapazität LK_{We} sind auf die Tiefe des effektiven Wurzelraums bezogen und für die Kennwerte wurde die Klasseneinteilung individuell je Nutzungsart vorgenommen, da die Tiefe des effektiven Wurzelraumes nach bodenhydrologischen Ansprüchen der Pflanzen definiert und für land- und forstwirtschaftlich genutzte Standorte nach separaten Algorithmen beurteilt bzw. an Forststandorten im Mittel 20 % höher eingestuft wird.
Räumlich differenzierend wirken in den Karten 4.3 und 4.4 also sowohl der effektive Wurzelraum insgesamt als auch horizontweise die die Wasserbindung bestimmenden Eigenschaften. Der Ansatz gliedert die Karten nach den bodenkundlichen Standortverhältnissen und der dominanten Nutzungsart in zwei hierarchisch gestufte Raummuster; nicht bewertete Flächen, deren Anteil an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland 3,2 % beträgt, sind gesondert ausgewiesen. Sowohl nFK_{We} als auch LK_{We} der Acker- und Grünlandböden werden wie bereits der Parameter We durch eine Farbskala von Hellgelb (sehr gering) bis Dunkelbraun (sehr hoch), die der Wälder von Hellgrün (sehr gering) bis Dunkelgrün (sehr hoch) dargestellt. Identisch gewählte Farbskalen, die einheitliche verbale Einstufung und die Werte der Klassengrenzen erleichtern die vergleichende Karteninterpretation.

Maxima der nFK_{We} im bundesweiten Maßstab verzeichnen die Böden der Lößlandschaften, sowohl unter land- als auch unter forstwirtschaftlicher Nutzung. Hier addieren sich Höchstwerte der We und der nFK in ihrer Wirkung. Bei der FK_{10dm} liegen die Maxima auf den landwirtschaftlich genutzten Nieder- und Hochmoorböden sowie den tonreichen Auenböden. Die Vergleichswerte der Lößböden fallen jedoch nicht wesentlich geringer aus. Die Minima beider genannter Größen liegen in den Bodengesellschaften der Berg- und Hügelländer, wo geringe Durchwurzelungstiefen und zusätzlich hohe Skelettgehalte des Solums beide Kennwerte begrenzen. Hohe Werte der FK_{10dm} besitzen für die Stoffaustragsgefährdung in das Grundwasser an Standorten mit geringem Grundwasserflurabstand nur begrenzten Aussagewert, z. B. bei flachen Gleyen. Ein komplementäres Raummuster zur Feldkapazität zeigt die Luftkapazität: Maximale Luftkapazitäten erreichen die Böden unter Waldnutzung aus glazifluviatilen und fluviatilen Sanden in den Alt- und Jungmoränenlandschaften sowie in den pleistozänen Niederungen. Da diese Standorte zugleich die Böden geringster Durchwurzelungstiefen stellen, wird die Spannbreite möglicher LK_{We}-Werte insbesondere bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen eingeschränkt.

Pedotransferfunktionen zur Ermittlung der Kennwerte der Wasserbindung

Bereits die 3. Auflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 3; AG BODENKUNDE 1982) beinhaltete ein Tabellenwerk, das die Schätzung von Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität, Luftkapazität und Gesamtporenvolumen aus Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt erlaubte. Da unter den Substraten der damaligen Datenbasis pleistozäne Sande und Lehme deutlich unterrepräsentiert waren, wurden die in der KA 3 angegebenen Schätzwerte anhand einer breiteren Datengrundlage nochmals überprüft (HENNINGS & MÜLLER 1993). Eine Auswertung von ca. 1700 pF-Kurven der Labordatenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS) hatte zum Ergebnis, daß die Anwendung des Schätzrahmens der KA 3 zu einer Überbewertung der Gesamtporenvolumina führte. Ferner wurden die humusbedingten Zu- oder Abschläge zu den Kennwerten der Wasserbindung deutlich unterschätzt.
Da die Neuauflage der Bodenkundlichen Kartieranleitung als 4. Auflage (KA 4; AG BODEN 1994) ein neues Bodenartendiagramm mit 31 zum Teil neu definierten Bodenarten enthält (Atlastafel 4.1, Abb. 2), mußten auch alle Tabellen zur Ableitung bodenphysikalischer Kennwerte neu berechnet werden. Zu diesem Zweck wurden mehr als 6000 Datensätze vorliegender Meßwerte aus acht Bundesländern in einer zentralen Datenbank zusammengeführt und zur Berechnung neuer Pedotransferfunktionen ausgewertet (KRAHMER et al. 1995). Als Ergebnis stehen neue, repräsentative, statistisch gesicherte Schätzwerte der LK, FK, nFK und Wasserdurchlässigkeit als Funktion der Bodenart sowie der Trockenrohdichte oder effektiven Lagerungsdichte und des Humusgehalts zur Verfügung, die unverändert in die KA 4, die Merkblätter zur Wasserwirtschaft des DVWK und die DIN 4220-1 Eingang gefunden haben.

Im internationalen Kontext stehen weitere Pedotransferfunktionen bereit, die zum Teil auf anderen physiko-empirischen Ansätzen beruhen und andere Eingangsgrößen verwenden. Eine Klassifikation und vergleichende Bewertung unternehmen u.a. TIETJE & TAPKENHINRICHS (1992) und TIETJE & HENNINGS (1993). Auf europäischer Ebene vorliegende Meßdaten bodenphysikalischer Parameter wurden in der Vergangenheit in eine europaweite Datenbank „HYPRES" (Hydraulic Properties of European Soils) eingebracht, um diese zur Ableitung weiterer Pedotransferfunktionen für die wichtigsten europäischen Substrat- und Horizontgruppen nutzen zu können (WOSTEN et al. 1999).

Tab. 1 Kennwerte der Wasserbindung in mm/dm Horizontm chtigkeit in Abh ngigkeit von Bodenart und Klasse der Rohdichte

Bodenart	nFK Poren-Ø 0,2 - 50 µm pF 4,2 - 1,8			LK Poren-Ø > 50 µm pF < 1,8			FK Poren-Ø < 50 µm pF > 1,8		
	g/l-Klasse			g/l-Klasse			g/l-Klasse		
	1+2	3	4+5	1+2	3	4+5	1+2	3	4+5
Sa	15,5	11	10,5	24	21,5	18,5	22	15,5	14,5
Sl2	19,5	17,5	17	17	14,5	10,5	28	24,5	22
Sl3	22,5	18,5	16	12,5	11,5	7,5	34,5	27	24
Sl4	20,5	17,5	14,5	11,5	10	6	34	29	25,5
Slu	27	21,5	18,5	8	7	5,5	41,5	32	29
Uls	20	15,5	11,5	18,5	17	16	28,5	22,5	20
Ut3	17	14,5	12	12	9,5	7,5	33	29	26
Ut2	19,5	16,5	14,5	16	15,5	12,5	27,5	22	20
Ut3	24	22	19	12	9,5	8	33,5	28,5	25,5
Ut4	26,5	24,5	21,5	10,5	8	5	35	31	28,5
Tu	28	25,5	23	7,5	5	2	41	36,5	35
Tu	28,5	26	22	8,5	6,5	3,5	41	34	30
Tu	26	22,5	20,5	8,5	7	3,5	40,5	33,5	31,5
Tu	27,5	25,5	23	9,5	5	2	40	36	34,5
Tu	25,5	24	22	10	4,5	2	38	36	34,5
Tu	22	20,5	17,5	9,5	5	2	33	36	33,5
Lu	19,5	16	14	6,5	5,5	4	42	35,5	33
Lu	20	14,5	13	9	7	5,5	39,5	32,5	29
Lu	19,5	15	12,5	7,5	6,5	4,5	41,5	32,5	28,5
Lu	19	15,5	12	8,5	7,5	5,5	40	32	27,5
Uu	15	12	10	4	3,5	3	46	38,5	30,5
Uu	16,5	13	10,5	5,5	4,5	3	44,5	38,5	31,5
Uu	14,5	10,5	8	4	3	2,5	46	38,5	33
Tl	18	11,5	8	3	2,5	1,5	54	42	39,5
Tl	14	9	6,5	4	3	2,5	50	40	34,5
Tu	15,5	10	7,5	5	4	2	47,5	33,5	35
Tu	18	10,5	8	9	7	3,5	42	34	31,5
Tu	18	10,5	8	11	8,5	4,5	37,5	30,5	29,5
Tu	15	10	7,5	8	2,5	2	50	40,5	35,5
Tu	15,5	11	6,5	4,5	4	3	46	37,5	33
Tu	17	15	12	7	5	2,5	41	36	33,5

Für alle drei Kennwerte der Wasserbindung wurde der genannte Schätzrahmen der Bodenkundlichen Kartieranleitung angewandt. Gemäß Tabelle 1 wird zunächst ein Grundwert ermittelt, der für Mineralböden mit bis zu 1 % organischer Substanz gilt. In Abhängigkeit vom Humusgehalt wird dieser Wert nachfolgend durch Zu- oder Abschläge modifiziert. Für vollständige Bodenprofile erfolgt die Ermittlung der Kennwerte der Wasserbindung bis zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums durch Aufsummieren der horizontbezogenen Größen.

Das Konzept einer aus stabilen, zeitkonstanten Bodeneigenschaften geschätzten pF-Kurve suggeriert, daß es sich bei den dargestellten Kennwerten wie der Feldkapazität um quasistatische Bodenkonstanten handelt, die einer häufig wiederkehrenden hydraulischen Gleichgewichtssituation entsprechen. Besonders bei großen Grundwasserflurabständen wird jedoch vielfach der Boden so stark entwässert, daß sich die Einstellung dieser Gleichgewichtssituation infolge geringer Wasserleitfähigkeit so stark verzögert, daß z. B. Tonböden keine Feldkapazität erkennen lassen. Den Einfluß der Hysterese, d. h. verschiedenartiger Wasserspannungskurven für den Be- und Entwässerungsvorgang, können durch Pedotransferfunktionen gewonnene mittlere pF-Kurven in jedem Fall nicht widerspiegeln.

Die in den Karten 4.2, 4.3 und 4.4 dargestellten Werte basieren auf Pedotransferfunktionen, die nur Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalt als Eingangsdaten verwenden, den Einfluß des Gefüges jedoch unberücksichtigt lassen.

Die Güte einer Schätzung mittels Pedotransferfunktionen läßt sich mit verschiedenen Fehlermaßen bewerten, die die Abweichung zwischen gemessenen und geschätzten pF-Kurven quantifizieren. Auch für die relativ „besten" Verfahren ergibt sich über ein breites Bodenartenspektrum eine mittlere Abweichung von gemessenen Wassergehalten von ca. 3 bis 4 Volumenprozent (TIETJE & HENNINGS 1993). Außerdem variiert die Schätzgüte in Abhängigkeit von der Bodenart: Alle bestbewerteten Pedotransferfunktionen zeigen danach Minima des Fehlermaßes für die Bodenarten der tonigen Schluffe bis schluffigen Tone, zunehmende Abweichung der Schätz- von den Meßergebnissen bei den Lehmen und die geringste Schätzgüte für fast ton- und schlufffreie Sande.

Fast alle in der Fachliteratur publizierten Pedotransferfunktionen wurden an Wasserspannungskurven validiert, die unter Laborbedingungen an Stechzylinderproben auf keramischen Platten gemessen wurden. Die Übertragbarkeit auf Geländebedingungen ist damit noch nicht bewertet. Eine alleinige Validierung an gemessenen Wassergehalten läßt weiterhin die Frage unbeantwortet, welche Pedotransferfunktion für Simulationsmodelle des Bodenwasserhaushalts am besten geeignet ist. Eine abschließende Bewertung sollte dieses Kriterium in den Mittelpunkt stellen.

Praktische Hinweise

Die Qualität der Datengrundlage der Karten 4.2, 4.3 und 4.4 Referenzprofile eines ausgewählten Leit- oder Begleitbodens der in der BÜK 1000 abgebildeten Bodengesellschaften (FISBo BGR, ECKELMANN et al. 1995) wurde bereits im Begleittext zu Atlastafel 1.3 kritisch bewertet. Die nach Flächenanteilen aller Leit- und Begleitböden gewichteten Mittelwerte der Kennwerte der Wasserbindung können von den dargestellten Werten abweichen.

Grundsätzlich können Kennwerte wie die nFK_{We} als Eingangsdaten für einfache Kapazitätsmodelle zur Simulation des Bodenwasserhaushalts oder auch für empirische Nomogramme und Regressionsgleichungen zur Bestimmung der mittleren jährlichen Sickerwasserrate verwandt werden. Gleiches gilt für die FK_{10dm} als Maß für das Rückhaltevermögen anorganischer, nicht von der Bodenmatrix sorbierter Schadstoffe, mit deren Hilfe unter zusätzlicher Einbeziehung klimatischer Informationen z.B. die Nitratverlagerungstiefe im Winterhalbjahr oder die potentielle Nitratauswaschungsgefährdung abgeschätzt werden können.

4.2 to 4.4 Soil-Water Retention Parameters

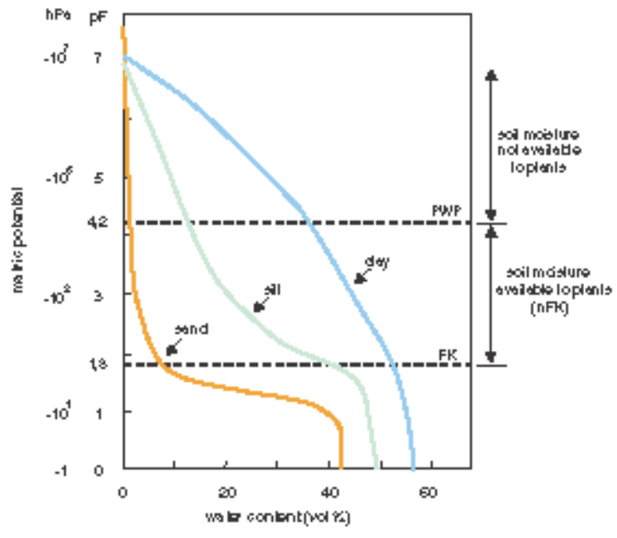


Fig. 1 pF-curve as relation between matric potential and soil moisture content for typical sandy, silty, and clay soils

The moisture regime of a soil is a function of its storage and percolation properties and thus determines amongst other things the quality of the soil as habitat for plants. The water input into the soil from precipitation is only partly free to move and migrates downwards under gravity as percolating water; a certain proportion of it is retained as capillary and adsorbed water. The forces exerted by the solid matter in the soil are described according to the potential concept in terms of the soil-water matric potential and measured in hPa. The relationship between log of the soil-water matric potential and the moisture content in wt % or vol % is called water retention curve or **pF** curve. It is often used to characterise the influence of soil properties on the soil moisture regime.

Three different water-retention parameters can be derived from the water retention curve (Fig. 1). These are defined by the different moisture contents for different soil-water matric potential intervals, as follows:

Field capacity (FK)	pF > 1.8	The amount of water that the soil can hold against gravity
Available water capacity (nFK)	pF 1.8 - 4.2	Field capacity minus the water held in the fine pores; proportion of the field capacity available to plants
Air capacity (LK)	pF < 1.8	Air content at field capacity, which corresponds to the storage capacity for groundwater and/or perched water

Field capacity is conventionally quoted in Germany as moisture content in vol % at a soil-water matric potential of **pF** 1.8 (equivalent to mm head of water per dm soil thickness) and in some other countries at **pF** 2.5. The permanent wilting point, conventionally quoted as matric potential of **pF** 4.2, is the limit at which crops begin to wilt irreversibly. The available water capacity is defined by two soil-water matric potentials: above **pF** 4.2 all the moisture is held in the fine pores and is not available for plants, and below **pF** 1.8 the moisture is relatively readily removed from the pores (air capacity). The sum of the field capacity and the air capacity is the total pore volume of the soil.

The water-retention parameters of a soil depend on pore volume and pore size distribution and therefore vary with type of soil. Figure 1 shows typical water retention curves for a sand, a silt and a clay. It can be seen that the sand is characterised by a high proportion of loosely bound water and a high air capacity. The different shapes of the characteristic curves for the two other types of soil is caused by their different pore size distributions: medium size pores dominate in the silt, and fine pores in the clay, which tends to hold the moisture tightly. In comparison, the clay has the higher field capacity and the silt the higher available water capacity. Apart from the soil texture class, the bulk density, humus content and structure affect the capacity of the soil to hold water.

Map Structures

The soil water retention parameters allow us to draw conclusions about how tightly water is held and how much is stored in the soil, the velocity with which water is released from the soil and the availability of the water for plants. They are shown in Maps 4.2. to 4.4:

- **4.2 Field capacity up to 1 m soil profile depth (FK_{10dm})**
- **4.3 Available water capacity in the effective root zone (nFK_{We})**
- **4.4 Air capacity in the effective root zone (LK_{We})**

To characterise a complete soil profile, the available water capacity and the air capacity are usually summed over the effective rooting depth (Map 4.1). In addition, the field capacity is a measure of the influence of the soil on water and solute transport conditions and is not summed over the effective rooting depth corresponding to the type of soil, but to a fixed depth interval of 1 m (FK_{10dm}). If this were not so, then silty and clayey soils would be assessed the same and would appear undifferentiated in the corresponding map.

Map 4.2, which is not subdivided according to land-use, was compiled on the basis of Map 1.3. The field capacity FK_{10dm} refers to a standard profile depth of 1 m. The classes of the parameter FK_{10dm} are derived from a frequency distribution of all values regardless of whether they refer to agricultural or forest land. The field capacity classes are differentiated by colours from pale yellow for very low to dark brown for very high.

The polygon pattern of Maps 4.3 and 4.4 is the same as that of the land-use soil map of Germany (see notes on Map 4.1 "Depth of the effective root zone"), i.e. the result of superimposing the 1 : 1,000,000 Soil Map of Germany (BÜK 1000) (HARTWICH et al. 1995) and a map showing the current land use pattern (CORINE Land Cover, STATISTISCHES BUNDESAMT 1997), generalised to the scale of 1 : 2,000,000. The available water capacities nFK and air capacities LK of the individual horizons are both summed over the effective rooting depth. The resulting nFK_{We} and LK_{We} values are then classified separately for the two types of land use, since the effective rooting depth is a function of the soil water requirements of the specific plants and is assessed separately for agricultural and forest sites on the basis of separate algorithms, i.e. is increased by 20 % on average for forest sites.

In Maps 4.3 and 4.4, both the effective rooting depth and the water-retention parameters of each individual horizon have a spatially differentiating effect. This approach subdivides the maps according to soil conditions and the dominant type of land use into two hierarchically classified spatial patterns. Areas that have not been assessed, about 3.2 % of the area of Germany, are given a special symbol. Both nFK_{We} and LK_{We} of the arable and grassland soils, like the parameter effective rooting depth described above, are represented by a colour scale from pale yellow (very low) to dark brown (very high), and those of the forests are pale green (very low) to dark green (very high). The same colour scale, the same classes and the same values have been chosen to facilitate comparison of the maps.

The highest values of the available water capacity nFK_{We} on a national scale are characteristic of the soils of the loess landscapes under both agriculture and forest. In this case the effects of We and nFK are additive. The highest FK_{10dm} values lie on the agriculturally used fen and raised-bog soils and on clay-rich flood-plain soils. The FK_{10dm} of the loess soils is insignificantly smaller. The lowest values of both these parameters are those of the soil associations of the mountainous and hilly areas, where shallow rooting depths as well as a large proportion of rock fragments in the solum tend to limit the two parameters. The air capacity shows a complementary spatial pattern to that of the field capacity: The maximum air capacities occur in soils in forests developed from glaciofluvial and fluvial sand in the old and young moraine landscapes and in the Pleistocene lowlands. Since these sites have soils that show the shallowest rooting depths, the range of possible LK_{We} values is limited, especially in agricultural areas.

Pedo-transfer functions for determining the water-retention parameters

The old (3rd) edition of the German soil-mapping guidelines (KA 3; AG BODENKUNDE 1982) contained tables permitting the field capacity, available water capacity, air capacity, and total pore space to be estimated from soil texture class, bulk density, and humus content. Since Pleistocene sands and loams were markedly underrepresented in the previous database, the estimated values given in KA 3 were again checked on the basis of a large database (HENNINGS & MÜLLER 1993). Evaluation of about 1700 pF curves in the laboratory database of the Lower Saxony soil information system (Niedersächsisches Bodeninformationssystem, NIBIS) showed that use of the tables in KA 3 led on average to an over-estimation of the total volume. In addition, the humus-dependent positive and negative corrections to the water-retention parameters were significantly underestimated.

Since the 4th edition of the German soil mapping guidelines (KA 4; AG BODEN 1994) contains a new soil texture class triangle with 31 partially newly defined soil texture classes (Map 4.1, Fig. 2), the tables used to derive soil physical parameters had also to be recalculated. For this purpose, over 6000 datasets of existing measured values from eight of the German Federal States were placed into a central database and evaluated for calculation of new pedo-transfer functions (KRAHMER et al. 1995). As a result, we have new, representative, statistically sound estimates of LK, FK, nFK and saturated hydraulic conductivity as functions of soil texture class, dry bulk density and humus content, which have been incorporated unchanged into KA 4, the DVWK guidelines on water management, as well as into the German standards publication DIN 4220-1.

In the international context, there are further pedo-transfer functions available, which are partly based on other physico-empirical approaches and which incorporate other input variables. TIETJE & TAPKENHINRICHS (1992) and TIETJE & HENNINGS (1993) classified and assessed several of the existing approaches. At the European level, the available measurement values of soil physical parameters were placed in a Europe-wide database HYPRES (hydraulic properties of European soils), in order to use them to derive further pedo-transfer functions for the most important European parent material and horizon groups (WOSTEN et al. 1999).

All three water-retention parameters shown on Maps 4.2, 4.3 and 4.4 were estimated using the table in the soil mapping guidelines mentioned above. First a basic value is determined from Table 1, which is valid for mineral soils with up to 1 % organic matter. This value is then modified by positive or negative corrections depending on the humus content. In the case of complete soil profiles, the parameters are determined for the effective rooting depth by summing the values for every horizon.

Table 1 Soil water retention parameters given in mm/dm horizon thickness depending on soil texture class and class of bulk density

soil texture class	nFK pore-Ø 0.2 - 50 µm pF 4.2 - 1.8			LK pore-Ø > 50 µm pF < 1.8			FK pore-Ø < 50 µm pF > 1.8		
	µ-class			µ-class			µ-class		
	1+2	3	4+5	1+2	3	4+5	1+2	3	4+5
Ss	15.5	11	10.5	24	21.5	18.5	22	15.5	14.5
Sl2	19.5	17.5	17	17	14.5	10.5	28	24.5	22
Sl3	22.5	18.5	16	12.5	11.5	7.5	34.5	27	24
Sl4	20.5	17.5	14.5	11.5	10	6	34	29	25.5
Slu	27	21.5	18.5	8	7	5.5	41.5	32	29
St2	20	15.5	11.5	18.5	17	13	28.5	22.5	20
St3	17	14.5	12	12	9.5	7.5	33	29	26
Su2	19.5	16.5	14.5	18	15.5	12.5	27.5	22	20
Su3	24	22	19	12	9.5	8	32.5	28.5	25.5
Su4	26.5	24.5	21.5	10.5	8	5	36	31	28.5
Uu	28	25.5	23	7.5	5	2	41	36.5	36
Ut	28.5	26	22	8.5	6.5	3.5	41	34	30
Ut4	26	22.5	20.5	8.5	7	3.5	40.5	33.5	31.5
Ut2	27.5	25.5	23	9.5	5	2	40	36	34.5
Ut3	25.5	24	22	10	4.5	2	39	36	34.5
Ut4	22	20.5	17.5	9.5	5	2	39	36	33.5
Lu	19.5	16	14	6.5	5.5	4	42	35.5	32
Ls2	20	14.5	13	9	7	5.5	39.5	32.5	29
Ls3	19.5	15	12.5	7.5	6.5	4.5	41.5	32.5	28.5
Ls4	19	15.5	12	8.5	7.5	5.5	40	32	27.5
Lt2	15	12	10	4	3.5	3	45	36.5	30.5
Lt3	16.5	13	10.5	5.5	4.5	3	44.5	36.5	31.5
Lt4	14.5	10.5	8	4	3	2.5	45	38.5	33
Tl	16	11.5	8	3	2.5	1.5	54	42	33.5
Tl	14	9	6.5	4	3	2.5	50	40	34.5
Ts2	15.5	10	7.5	5	4	2	47.5	38.5	35
Ts3	16	10.5	8	9	7	3.5	42	34	31.5
Ts4	16	10.5	8	11	8.5	4.5	37.5	30.5	28.5
Tu2	15	10	7.5	3	2.5	2	50	40.5	35.5
Tu3	15.5	11	6.5	4.5	4	3	45	37.5	33
Tu4	17	15	12	7	5	2.5	41	36	33.5

The concept of an estimated water retention curve derived from stable, time-constant soil properties suggests that the parameters shown on the maps, such as the field capacity, are quasi-constant soil parameters that correspond to an often recurring hydraulic equilibrium situation. Particularly in the case of a deep water table, the soil is so thoroughly drained that the equilibrium situation is not attained owing to the low hydraulic conductivity, as especially in clays. The influence of hysteresis, i.e. different water retention curves corresponding to wetting and drainage conditions, cannot always be reflected in a mean water retention curve derived from pedo-transfer functions.

The values on Maps 4.2, 4.3 and 4.4 are based on pedo-transfer functions, which in turn are derived from soil texture class, bulk density and humus content, but do not take the soil structure into consideration.

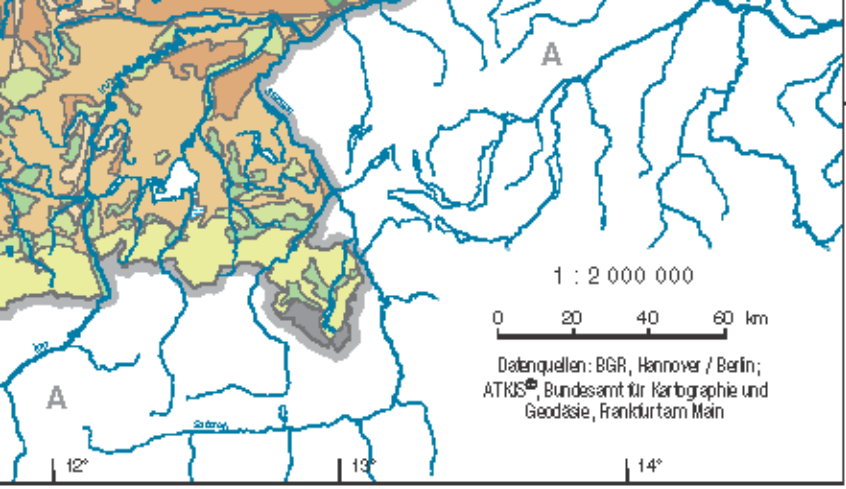
The accuracy of the estimate obtained using pedo-transfer functions can be assessed with different measures of error which quantify the deviation of the measured and estimated water retention curves. Even the relatively "best" method produces a mean deviation (over a wide range of soil texture class) of measured moisture contents of about 3-4 vol % (TIETJE & HENNINGS 1993). In addition, the quality of the estimate varies as a function of soil texture class: all pedo-transfer functions valued as "best" show minimal errors for the clayey silts to silty clays, increasing deviation of the estimated from the measured results for the loams and the poorest estimate for almost clay- and silt-free sands.

Almost all the pedo-transfer functions in the literature were validated using water retention curves, which were derived from measurements made on core samples under laboratory conditions on ceramic plates. It is not yet certain whether results obtained with this method are also valid under field conditions. Validation based solely on the measured moisture contents does not answer the question as to which pedo-transfer function is the most suitable to use for simulation models of the soil moisture regime. Future work should concentrate on solving this problem.

Practical Information

The quality of the data on which Maps 4.2, 4.3 and 4.4 are based, i.e. data from reference profiles of selected dominant soils of the soil associations in the 1 : 1,000,000 Soil Map of Germany or BÜK 1000 has already been discussed in the explanatory notes to Map 1.3. The values given on the maps (derived only from dominant soils) may show some divergence from the mean water-retention parameters calculated according to the proportions of the areas occupied by the dominant soils and all associated soils.

In principle, the parameters such as nFK_{We} can be used as input data for simple functional models to simulate the soil moisture regime or for empirical nomograms and regression equations for determining of the mean annual percolation rate. The same is true of FK_{10dm} as a measure of the retention capacity of inorganic contaminants not absorbed by the soil matrix, with whose help, for example, the potential hazard of nitrate leaching can be assessed, as long as information on the climate is also taken into account.



Fels- und
ete

Salzwiesen

HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

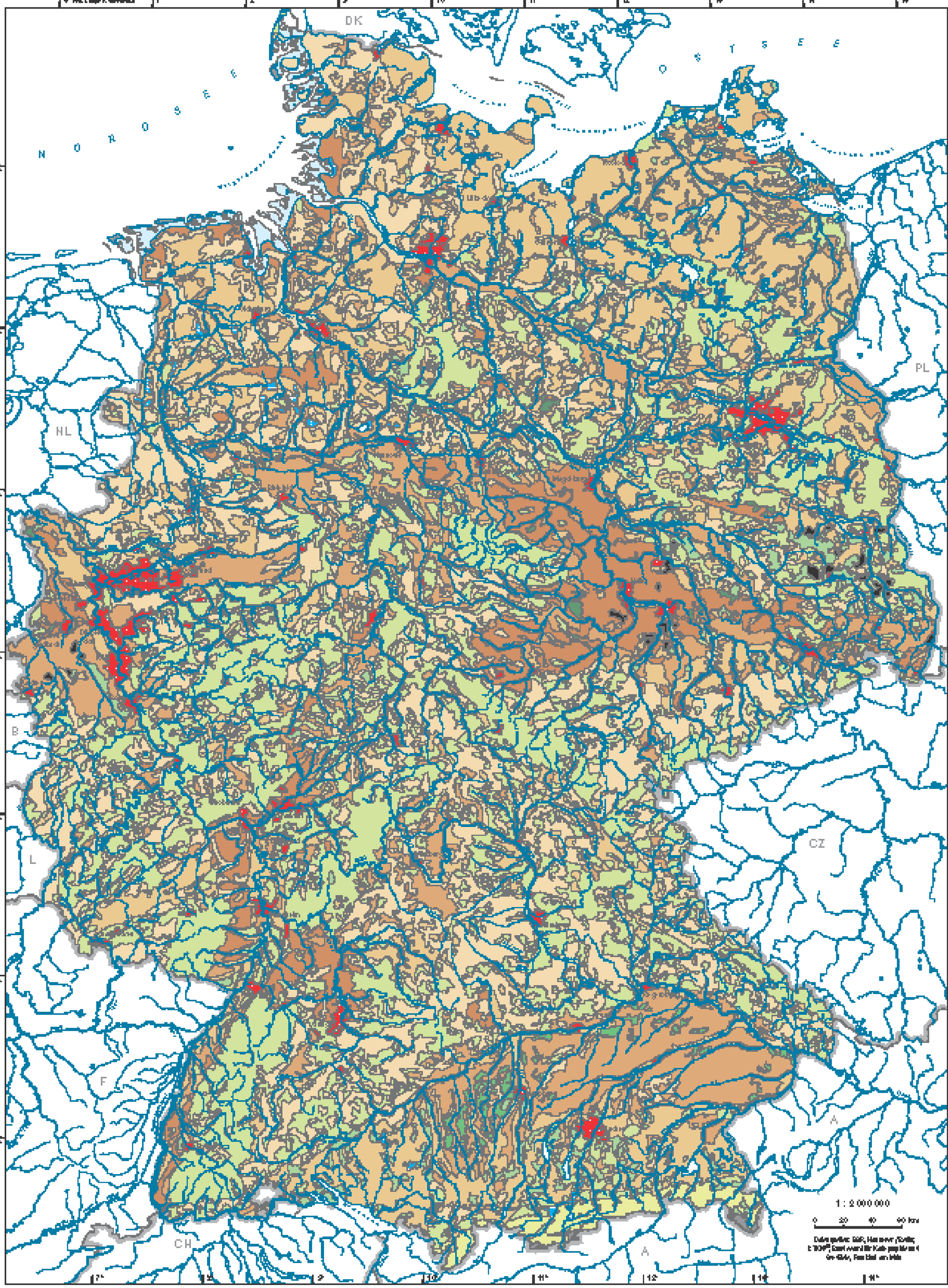
Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

4.3 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums

Autoren: V. Hennings, J. Behrens, A. Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin

Wissenschaftliche Beratung: W. Eckelmann, H. Vierhuff (BGR), Ch. Leibundgut (IHF), H.-J. Liebscher (BfG), F.-J. Kern (IHF)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin (P.-N. Schulz)
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Strub)



Acker- und Grünland

- sehr gering < 60 mm
- gering 60 – < 110 mm
- mittel 110 – < 170 mm
- hoch 170 – < 290 mm
- sehr hoch ≥ 290 mm

Wald

- sehr gering < 40 mm
- gering 40 – < 110 mm
- mittel 110 – < 180 mm
- hoch 180 – < 250 mm
- sehr hoch ≥ 250 mm

Nicht bewertete Flächen

- Wattböden
- Binnengewässer
- Tagebauflächen
- Siedlungen
- Strände, Dünen, Fels- und Deutrechnungsgebiete
- Sümpfe, Moore, Salzwiesen

HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

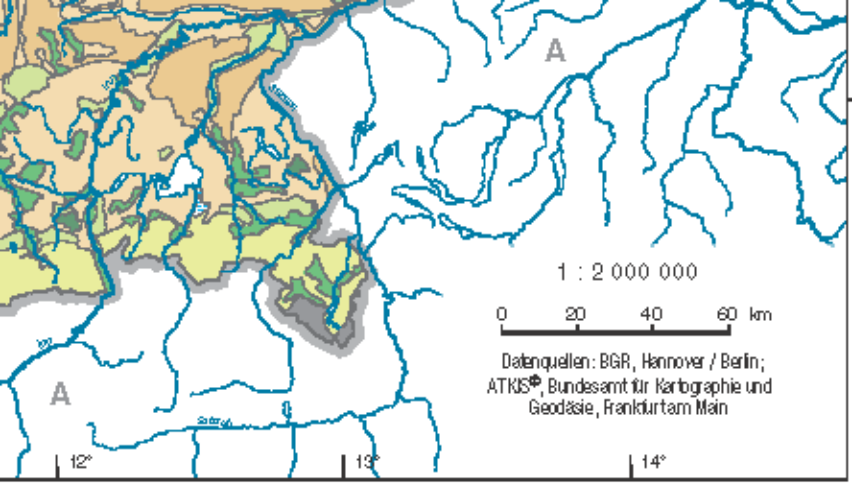
Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

4.3 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums

Autoren: V. Henninger, J. Eichmann, A. Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover/Berlin

Wissenschaftliche Beratung: M. Schneider, H. Wenzel (BGR), Ch. Leibundgut (BfG), H.-J. Liebscher (BfG), F.-H. Kern (BfG)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin (F.-H. Kern)
Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt a. M. (G. Kraus)



Fels- und
iete

Salzwiesen

HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

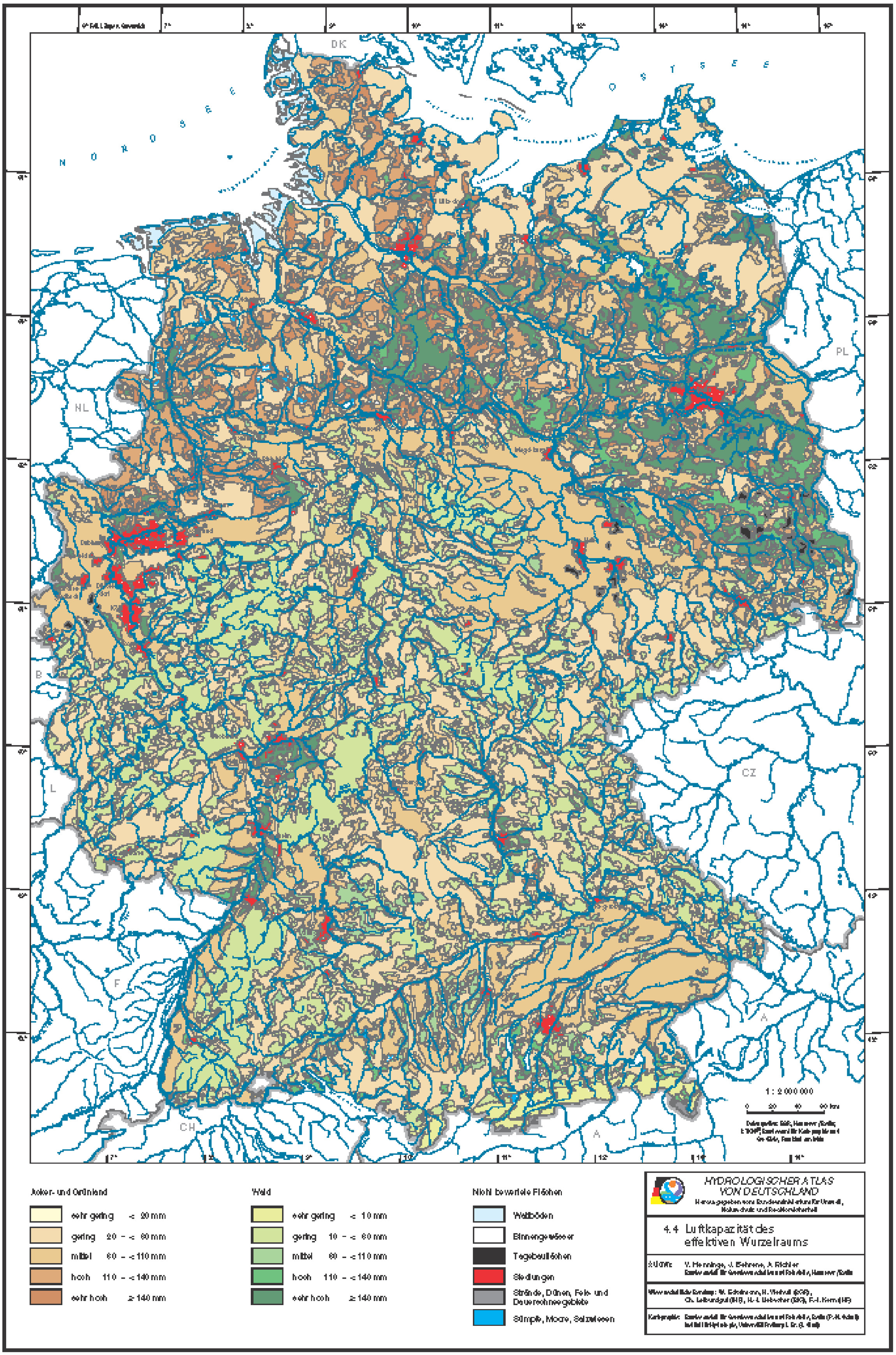
Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

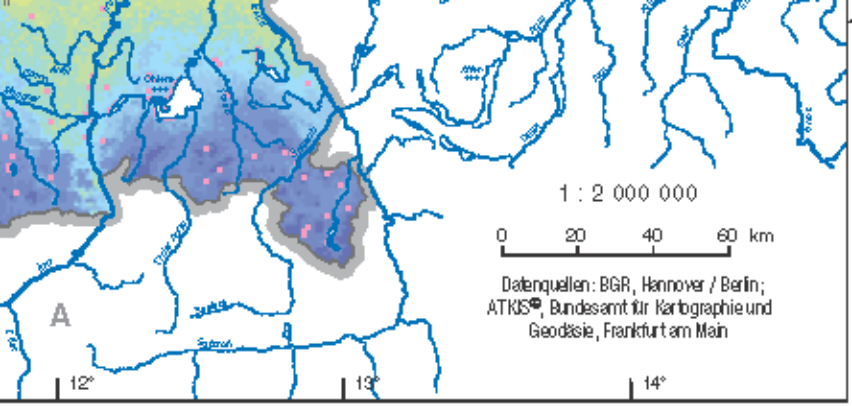
4.4 Luftkapazität des effektiven Wurzelraums

Autoren: V. Hennings, J. Behrens, A. Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin

Wissenschaftliche Beratung: W. Eckelmann, H. Vierhuff (BGR), Ch. Leibundgut (IHF), H.-J. Liebscher (BfG), F.-J. Kern (IHF)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin (P.-N. Schulz)
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Strub)


DK
NORDSEE
OSTSEE
NL
PL
B
L
CZ
F
A
CH
1 : 2 000 000
0 20 40 60 km
Acker- und Grünland
sehr gering < 20 mm
gering 20 – < 60 mm
mittel 60 – < 110 mm
hoch 110 – < 140 mm
sehr hoch ≥ 140 mm
Wald
sehr gering < 10 mm
gering 10 – < 60 mm
mittel 60 – < 110 mm
hoch 110 – < 140 mm
sehr hoch ≥ 140 mm
Nicht bewertete Flächen
Wattböden
Binnengewässer
Tagebauflächen
Siedlungen
Strände, Dünen, Fels- und Dauerschneegebiete
Sümpfe, Moore, Salzwiesen
HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND
4.4 Luftkapazität des effektiven Wurzelraums



HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

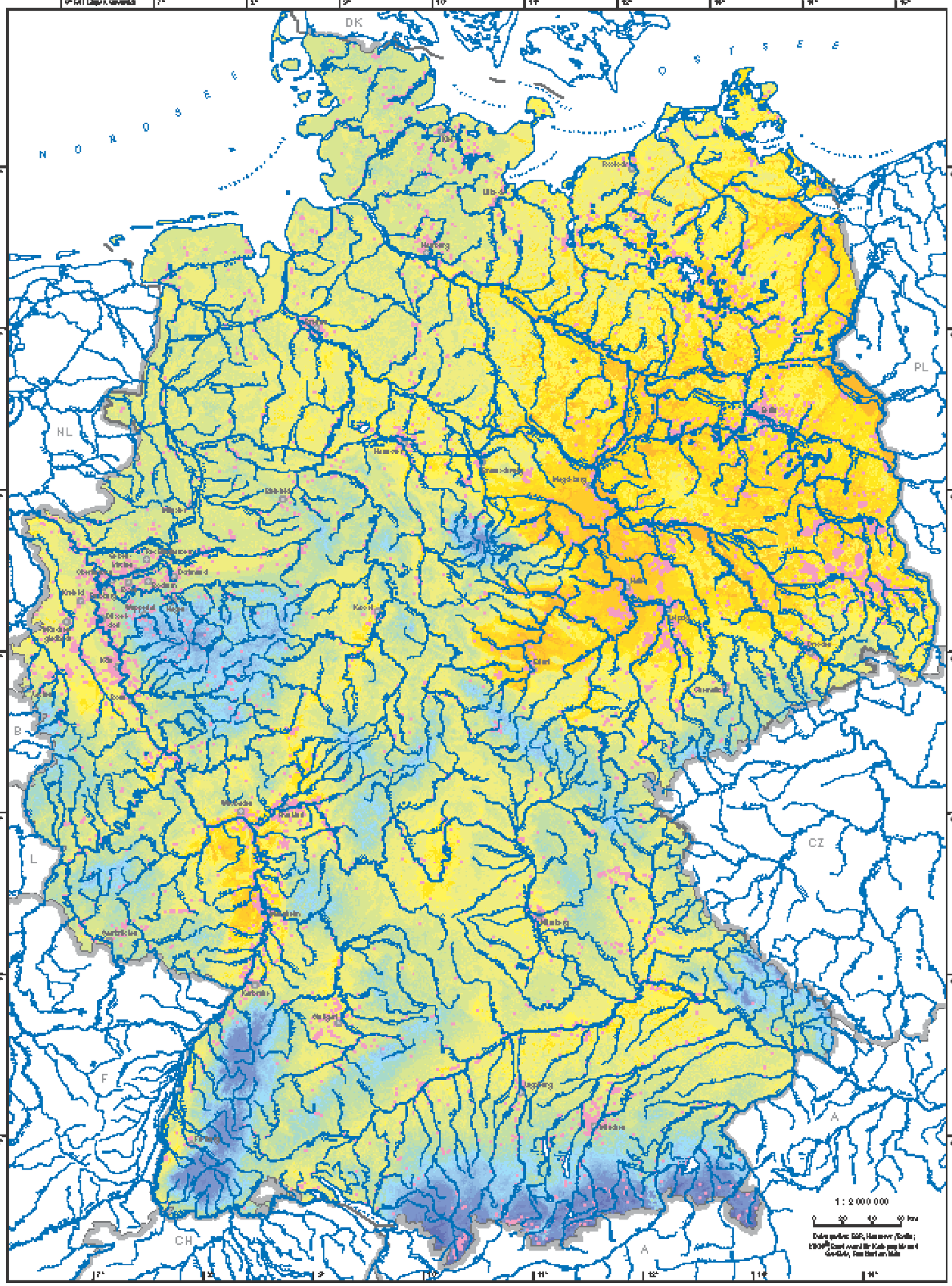
4.5 Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden

Autoren: W. Duijnisveld, V. Hennings, W. Stolz
N. Martin, A. Richter, J. Behrens
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin

Wissenschaftliche Beratung: W. Eckelmann, W. Struckmeier (BGR), K. Wilke (BfG), Ch. Leibundgut, F.-J. Kern (IHF), G. Wessolek (TU Berlin)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (U. Stegger)
Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Strub)

hstoffe, Hannover



Sickerwasserrate in mm/a

0 50 100 150 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1500 2000

nicht bewertete Flächen

HYDROLOGISCHER ATLAS VON DEUTSCHLAND

Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

4.5 Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden

Autoren: M. Duijnisveld, V. Hennings, M. Wolf, H. Martin, J. Richter, J. Behrens
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover/Berlin

Mitwirkende Bundesanstalt: M. Schaumann, M. Hinderscheid (BGR), K. Müller (BGR), Ch. Leibundgut, R.-H. Kern (BfG), G. Wessolek (TU Berlin)

Kartographie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (V. Hoppe) in Amt für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br. (J. Wolf)

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

4.5 Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden

Die mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden ist als die Sickerwasserhöhe definiert, die den Boden unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs im langjährigen Mittel abwärts verlässt. Sie wird in mm/a angegeben.

Die Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone wird durch die Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts beeinflusst: als Einnahmegrößen zählen Infiltration aus Niederschlag, Beregnung und kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser, maßgebliche Verlustgrößen sind die Evaporation und die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln. Das Sickerwasser, das sich aus dem Bilanzüberschuss ergibt, verlässt den Boden als Zwischenabfluss oder füllt durch Grundwasserneubildung aus Sickerwasser den Grundwasserspeicher auf. Im Unterschied zur mittleren jährlichen Abflusshöhe (Atlastafel 3.5) schließt die Sickerwasserrate aus dem Boden den auf Oberflächenabfluss entfallenden Abflussanteil nicht mit ein. Im Unterschied zur Grundwasserneubildung (Atlastafel 5.5) beinhaltet die Sickerwasserrate aus dem Boden zusätzlich den Zwischenabfluss.

Die Sickerwasserrate aus dem Boden ist für die Trinkwasserversorgung aus Grundwasser quantitativ von Bedeutung. Darüber hinaus bestimmt die Sickerwasserrate in entscheidender Weise auch den Ablauf bodenbildender Prozesse und die Verlagerung und Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen. Sie ist deshalb für qualitative Aspekte des Gewässerschutzes eine entscheidende Eingangsgröße.

Zur Methodik

Die Sickerwasserrate aus dem Boden wird primär durch den Bodenwasserhaushalt bestimmt und vorzugsweise mit bodenkundlichen Methoden ermittelt. Für die Bestimmung von Evapotranspiration und Sickerwasserrate in geringer zeitlicher Auflösung wie z. B. langjähriger Mittelwerte wurden in der Vergangenheit in mehreren Stufen empirische Gleichungen und Nomogramme entwickelt (RENGER & STREBEL 1980, RENGER & WESSOLEK 1990). Ausgangsbasis für diese Verfahren waren zahlreiche Geländemessdaten der jährlichen Sickerwasserrate sowie Ergebnisse von Modellrechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell GWNEU (RENGER et al. 1977, RENGER & STREBEL 1982, WESSOLEK 1989). Bei der Entwicklung der empirischen Verfahren wurde darauf geachtet, dass die Eingangsdaten (bodenkundliche und klimatologische Größen) einfach zu bestimmen sind bzw. routinemäßig vorgehalten werden, sodass eine breite Anwendung der Regressionsgleichungen in der Praxis gewährleistet ist. Für die Darstellung der Sickerwasserrate aus dem Boden im HAD wird deshalb eine Methode nach dem Vorbild der genannten Regressionsverfahren favorisiert.

RENGER & STREBEL (1980) haben die ersten multiplen Regressionsgleichungen abgeleitet. Nach weiteren Untersuchungen wurden von RENGER & WESSOLEK (1990) verbesserte Regressionsgleichungen vorgelegt, mit denen es möglich ist, die jährliche Sickerwasserrate nutzungsspezifisch für Nadelwald, Acker und Grünland mit einer Standardabweichung von 20 bis 30 mm/a für Norddeutschland zu bestimmen (RENGER 1992). Da dieser Ansatz nicht auf ganz Deutschland übertragbar ist bzw. das bisherige Spektrum der Standortbedingungen, die der Ableitung der Regressionsgleichungen zugrunde gelegen haben, für eine bundesweite Anwendung nicht ausreichend ist, war eine Weiterentwicklung des Regressionsverfahrens mit folgenden Schwerpunkten notwendig:

- weitere Klimaregionen mit größeren Unterschieden in Niederschlag und potentieller Evapotranspiration,
- geneigte Flächen (Berücksichtigung des Oberflächenabflusses bei ackerbaulicher Nutzung),
- grundwassernahe Böden (bessere Berücksichtigung der kapillaren Nachlieferung aus dem Grundwasser).

Die Regressionsgleichungen zur Ermittlung der Sickerwasserrate aus dem Boden waren noch aus zwei weiteren Gründen zu modifizieren:

- Für Deutschland liegt mit der Atlastafel 2.12 eine neue, bundesweit einheitliche Verdunstungsberechnung (FAO-Gras-Referenzverdunstung) anstelle der bisher in Deutschland üblichen Haude-Verdunstung vor.
- Die neue, bundesweit vorliegende Korrektur der Niederschlagshöhe (Atlastafel 2.5) erfordert eine entsprechende Anpassung der Regressionsgleichungen.

Vor diesem Hintergrund wurden nochmalige Modellrechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell GWNEU für eine Vielzahl bodenkundlicher und klimatischer Standortvarianten durchgeführt und die Ergebnisse mittlerer jährlicher Sickerwasserraten zur Ableitung verbesserter Regressionsgleichungen genutzt. Das Spektrum der berücksichtigten Standortvarianten umfasste vier Böden unterschiedlichen Wasserspeichervermögens, sechs Typen von Grundwasseramplituden, sechzehn Klimastationen, die nach ihren klimatischen Kennwerten als repräsentativ für die Klimaregionen Deutschlands angesehen werden dürfen, sowie die Nutzungsarten Acker (mit einer typischen Fruchtfolge aus Getreide und Hackfrüchten), Grünland, Nadel- und Laubwald. Die Ergebnisse aller Szenarien wurden mittels multipler Regressionsanalyse ausgewertet, neue Regressionsgleichungen abgeleitet und somit verlässliche Schätzungen der Sickerwasserrate aus dem Boden erzielt. Im Unterschied zu früheren Ansätzen werden durch das neue Regressionsmodell TUB_BGR die nichtlinearen Abhängigkeiten der Sickerwasserrate vom pflanzenverfügbaren Bodenwasser und von den klimatischen Einflüssen am jeweiligen Standort deutlich besser berücksichtigt.

Vor Ermittlung der Sickerwasserrate aus dem Boden wurde mit Hilfe eines empirischen Verfahrens der auf den Oberflächenabfluss entfallende Niederschlagsanteil abgeschätzt und von der Eingangsgröße des mittleren korrigierten Jahres- bzw. Sommerniederschlags abgetrennt. Zu diesem Zweck wurde das Curve-Number-Verfahren (USDA-SCS 1972) gewählt, da es eine vielfach erprobte Methode darstellt, die in der Berechnung des Direktabflusses nach Landnutzung, Boden, Niederschlag und Neigung differenziert und daher der vorliegenden Datenlage angemessen ist. Das Verfahren in seiner vom DVWK (1984) veröffentlichten Form erfordert die interpretative Zuordnung aller Böden zu vier Klassen „hydrologischer Bodentypen", die eine halbquantitative Bewertung des Versickerungsvermögens widerspiegeln. Unter zusätzlicher Einbeziehung der Neigungsstufe und der langjährigen Häufigkeit definierter Starkregenereignisse wurde der mittlere jährliche Oberflächenabfluss auf ackerbaulich genutzten Flächen berechnet. Für Grünland und Wald wird aufgrund der ganzjährigen Bodenbedeckung davon ausgegangen, dass Oberflächenabfluss eine untergeordnete Rolle spielt: auf diesen Flächen infiltriert der Niederschlag nahezu vollständig in die dauerhaft ausgebildeten Porensysteme mit Makroporen und in die Humusauflage.

Insgesamt acht Regressionsgleichungen bilden die Basis des neuen von der TU Berlin und der BGR entwickelten TUB_BGR-Verfahrens (WESSOLEK et al. 2003). Die Gleichungen berechnen die Sickerwasserrate aus dem Boden für die Nutzungsarten Acker, Grünland, Nadelwald und Laubwald jeweils für grundwassernahe (unter Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs) und grundwasserferne Standortbedingungen. Sie nutzen dazu folgende Eingangsdaten:

mittlere korrigierte jährliche Niederschlagshöhe	Atlastafel 2.5
mittlere korrigierte Niederschlagshöhe im Sommerhalbjahr	Atlastafel 2.6
mittlere jährliche potentielle Verdunstungshöhe als Gras-Referenzverdunstung	Atlastafel 2.12
nutzbare Feldkapazität nFK_{We} im effektiven Wurzelraum	Atlastafel 4.3
berechneter Oberflächenabfluss R_o	Abbildung 1
kapillarer Aufstieg	

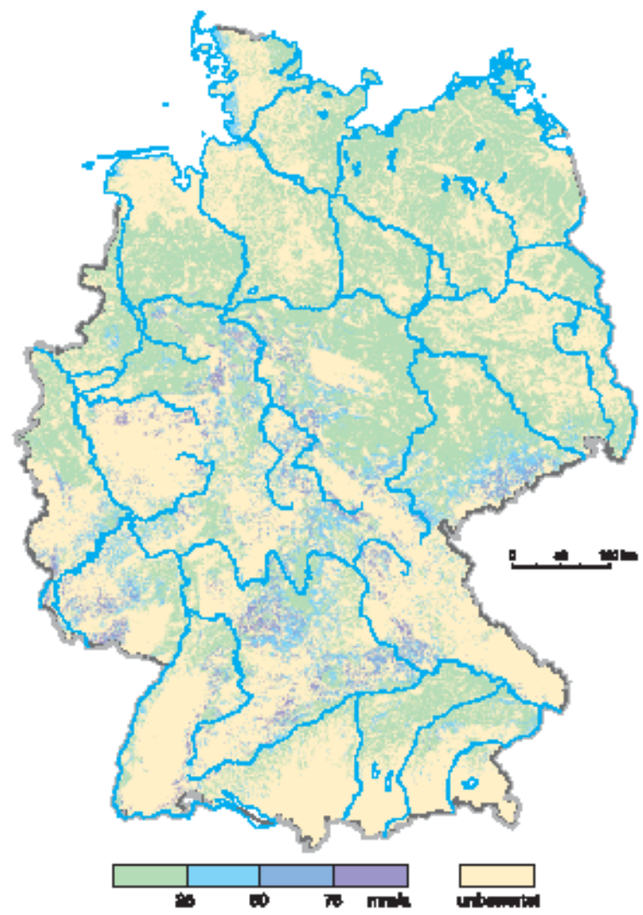


Abb. 1 Oberflächenabfluss auf Ackerflächen in Deutschland

Grundlage der in Karte 4.5 dargestellten Werte war – wie im Fall der Karten 4.1 bis 4.4 – eine nutzungsdifferenzierte Version der BÜK 1000 (HARTWICH et al. 1995) mit ausgewählten Profilen ihrer Legendeneinheiten, für die bei einer Fallunterscheidung in Acker, Grünland und Wald je ein nutzungsspezifisches repräsentatives Bodenprofil mit Bodenkennwerten ermittelt wurde. Für die Profilzuweisung wurden die Einheiten der Bodenbedeckung nach CORINE Land Cover (Atlastafel 1.4) auf die genannten drei Nutzungsarten aggregiert. Um die Sickerwasserrate mit dem TUB_BGR-Verfahren für alle im CORINE Land Cover ausgewiesenen Nutzungsvarianten errechnen zu können, war für jede Nutzungsvariante eine Klassifizierung nach den prozentualen Anteilen der Hauptnutzungsvarianten Acker, Grünland, Laubwald und Nadelwald erforderlich. So wird beispielsweise die CORINE-Klasse „Komplexe Parzellenstrukturen" als Kombination aus 40% Ackerland, 35% Grünland, 25% Laubwald und 0% Nadelwald parametrisiert.

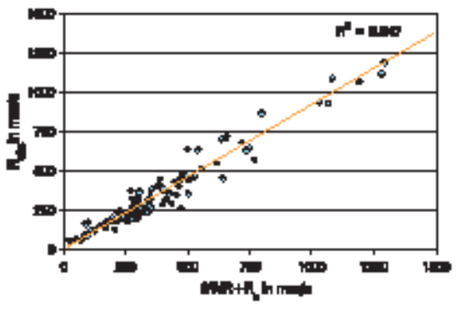


Abb. 2 Vergleich von gemessenen Abflusshöhen (R_{gem}) und aus Sickerwasserrate (SWR) und Oberflächenabfluss (R_o) berechneten Abflusshöhen in ausgewählten Einzugsgebieten (Lage der Testeinzugsgebiete: Atlastafel 5.5, Abb. 4 rechts)

Zur Kartendarstellung

Im Unterschied zu den Atlastafeln 4.1 bis 4.4 wurde für Karte 4.5 eine rasterbezogene Berechnung und Darstellung der Zielgröße favorisiert, da die Streubreite der Niederschlagsdaten in den Arealen der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte so groß war, dass sie im Maßstab von 1: 2000000 nicht mehr die Ausweisung von einheitlichen Raumeinheiten gestattete. Die Klasseneinteilung in Karte 4.5 gliedert bis 200 mm/a die Gebiete mit geringer jährlicher Sickerwasserrate und Grundwasserzehrgebiete in 50 mm/a-Intervallen. In den niederschlagsreichen Hochlagen der Mittelgebirge fasst sie Flächen hoher Sickerwasserraten in Klassen von 500 mm/a Spannbreite zusammen. Versiegelte Flächen in größeren Städten, sonstige anthropogen überprägte Flächen wie Abbauflächen und Halden mit technogen gestalteten Böden sowie weitgehend vegetationslose Flächen wie Felsen- und Dauerschneegebiete sind in Karte 4.5 nicht bewertet und als solche gesondert ausgewiesen.

Die räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus dem Boden ist in Deutschland primär vom Niederschlag bestimmt. Erst an die zweite Stelle treten die Einflussgrößen Nutzungsart und Bodeneigenschaften. Das makroskalige Raummuster ähnelt daher der räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhen (Atlastafeln 2.2 bis 2.6). Die höchsten Werte werden in den Alpen und in den Hochlagen der Mittelgebirge erreicht (Harz, Rheinisches Schiefergebirge, Schwarzwald, Bayerischer Wald, Thüringer Wald und Erzgebirge). Sehr geringe Werte von < 50 mm/a verzeichnen die ostdeutschen Trockengebiete in der Magdeburger Börde und im Thüringer Becken. Sie korrelieren räumlich mit Jahressummen des Niederschlags von < 550 mm. In Gebieten mit Jahresniederschlägen ab etwa 800 mm/a aufwärts haben Bodeneigenschaften und Grundwasserflurabstand kaum noch Einfluss auf die Höhe der Sickerwasserrate; die räumliche Differenzierung ist hier im wesentlichen nur noch von der Nutzung abhängig. Der Einfluss von Bodeneigenschaften und Grundwasserflurabstand auf die Höhe der Sickerwasserrate gewinnt bei abnehmender Niederschlagshöhe jedoch zunehmend an Bedeutung. Dies ist insbesondere in Nordostdeutschland deutlich zu beobachten: Die typischen Böden der Flusslandschaften tragen hier kaum zur Versickerung bei, oder es findet sogar eine Grundwasserzehrung statt, da bei meist nur geringen Grundwasserflurabständen eine optimale Wasserversorgung der Vegetation durch kapillaren Aufstieg gewährleistet ist. Dadurch ist eine Verdunstung nahezu in Höhe der potentiellen Evapotranspiration möglich, die örtlich höher sein kann als die Niederschlagshöhe.

Im Mittel wurde für die Bundesrepublik Deutschland eine mittlere langjährige Sickerwasserrate von 316 mm/a und ein mittlerer Oberflächenabfluss von 7 mm/a ermittelt.

Praktische Hinweise

Zur Verifizierung des TUB_BGR-Verfahrens wurde für 106 Einzugsgebiete unterschiedlicher Größe, Landnutzung, Bodeneigenschaften sowie geomorphologischer und klimatischer Bedingungen (Atlastafel 5.5, Abb. 4 rechts) die einzugsgebietsgemittelte Sickerwasserrate SWR zuzüglich Oberflächenabfluss R_o der am entsprechenden Kontrollpegel ermittelten Abflusshöhe gegenübergestellt. Die Streuung von gemessenen und berechneten Abflusshöhen liegt im Mittel unter 10% und ist zum Teil durch anthropogene Einflüsse (z. B. Grundwasserentnahme für Trinkwasser und Beregnung) begründet. Die Regression zeigt eine gute Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Werten (Abb. 2), wobei jedoch im Mittel die gemessenen Werte ca. 8% unter den berechneten Werten liegen. Eine Überschätzung in vergleichbarer Höhe wurde auch bereits bei Karte 3.5 festgestellt. Einen detaillierten Vergleich der Ergebnisse der für die Atlastafeln 3.5, 4.5 und 5.5 herangezogenen Verfahren bietet die Arbeit von JANKIEWICZ et al. (2003). Die generelle Überschätzung der Sickerwasserrate durch das TUB_BGR-Verfahren soll in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht werden.

Karte 4.5 basiert allein auf den bodenhydrologischen Kennwerten eines ausgewählten Leit- oder Begleitbodens der in der BÜK 1000 abgebildeten Bodengesellschaften. Die Qualität dieser Datengrundlage wurde bereits in Atlastafel 1.3 kritisch bewertet. In Einzelfällen können die Werte, die als Berechnungsgrundlage für Karte 4.5 dienten, von flächengewichteten Mittelwerten des pflanzenverfügbaren Bodenwassers aller Leit- und Begleitböden abweichen.

Eine bundesweite Bilanzierung der Sickerwasserrate aus dem Boden müsste auch den Einfluss von Beregnungsmaßnahmen auf die Höhe der Sickerwasserrate mit berücksichtigen. Auf eine regional differenzierte Erfassung wird in vorliegender Darstellung verzichtet, da die Erhöhung der Sickerwasserrate durch Beregnung bei einer guten Beregnungssteuerung im langjährigen Mittel nur ca. 20 mm/a betragen dürfte.

Das neu entwickelte TUB_BGR-Verfahren basiert auf der Vorgabe, einfache nutzungsdifferenzierte Regressionsgleichungen bundesweit einheitlich einsetzen zu können. Bei der Ableitung der Regressionsgleichungen zeigte sich jedoch, dass mit einer weiteren Differenzierung nach Klimaregionen eine höhere Signifikanz der Regressionsgleichungen erreicht werden kann. Außerdem sollte das Konzept des effektiven Wurzelraums in Beziehung zur klimatischen Wasserbilanz gesetzt werden. Diese Aspekte sollen zusammen mit einer verbesserten Berücksichtigung der kapillaren Nachlieferung auf grundwassernahen Standorten in zukünftigen Arbeiten Berücksichtigung finden.

4.5 Mean Annual Rate of Percolation from the Soil

The mean annual rate of percolation from the soil is defined as the amount of water that leaves the soil after consideration of capillary rise (Map explanations 5.5, Fig. 1). It is expressed in mm/a.

Movement of water in the unsaturated zone is affected by infiltration of precipitation and irrigation water, evaporation, absorption of water by plant roots, and ascent of water from the groundwater table by capillary action. The percolating water leaves the soil as interflow, discharging into surface water bodies, or via the groundwater table, recharging the groundwater. In contrast to the mean annual runoff (Map 3.5), the mean rate of percolation from the soil does not include surface runoff. In contrast to groundwater recharge (Map 5.5), it includes interflow.

In addition to its significance for quantifying the amount of water available for the water supply, percolating water affects soil formation and the migration and leaching of plant nutrients and contaminants. Knowledge of the rate of percolation is of particular importance for protecting groundwater quality.

Methodology

The rate of percolation from the soil is determined primarily by the soil water balance, for which mainly pedological methods are used. Empirical equations and nomograms have been used up to now to calculate long-term mean values for the rates of evapotranspiration and percolation (RENGER & STREBEL 1980, RENGER & WESSOLEK 1990). These methods are based on extensive field measurements of the annual rate of percolation and simulations using the GWNEU hydrologic budget model (RENGER et al. 1977, RENGER & STREBEL 1982, WESSOLEK 1989). In the development of these empirical methods, only input data (pedological and meteorological parameters) that can be determined easily or are available in a database were used. In this way the regression equations can be used widely in practice. Map 4.5 is based on a new method comparable to those listed above.

RENGER & STREBEL (1980) derived the first multiple regression equations for calculating soil-influenced components of the hydrological budget. After further studies, they developed improved equations with which the annual rate of percolation from the soil in northern Germany could be calculated for a specific land use, e.g., coniferous forest, arable land, and grassland, with a standard deviation of 20–30 mm/a. Because these equations could not be applied for the whole of Germany, i.e., the spectrum of site conditions on which the equations were based was not sufficient, further development of the regression method was necessary that included

- further climatic regions with larger differences in precipitation and evapotranspiration,
- slopes (with consideration of surface runoff on arable land),
- soils near the groundwater table (with better consideration of capillary rise).

The regression equations to calculate the rate of percolation from the soil were modified for two further reasons:

- A new calculation of the potential evapotranspiration depth (FAO grass reference evapotranspiration) of Germany is available (Map 2.12), replacing the previously used Haude formula for evapotranspiration.
- The new countrywide correction of the precipitation depths (Map 2.5) makes it necessary to adjust the regression equations.

Thus, model calculations using the GWNEU water budget model were repeated using a larger number of site variations of soil and climatic parameter values, using the resulting mean annual rate of percolation to derive improved regression equations. The spectrum of site variations included four soils with different water storage capacities, six types of groundwater amplitudes, sixteen climate stations whose climate parameter values can be viewed as representative for the climatic regions of Germany, and four land use types (arable land (with the typical succession of grain and root crops), grassland, coniferous forest, and deciduous forest). The results of all the scenarios were analysed using multiple regression methods. New regression equations were derived, from which reliable estimates of the rate of percolation from the soil can be calculated. In contrast to the equations used previously, the nonlinear dependence of the rate of percolation on plant-available soil water and the climatic conditions at the respective site is distinctly better reproduced.

Fig. 1 Surface runoff from arable land in Germany

Before the rate of percolation from the soil was calculated, the proportion of precipitation accounted for by the surface runoff was estimated empirically and subtracted from the mean corrected precipitation depth. The empirical curve number method (USDA-SCS 1972) was used for this purpose. This is an often tested method that takes land use, soil, precipitation, and slope into consideration. As published by DVWK (1984), the method requires that the soil be classified as one of four "hydrological soil types", reflecting a semi-quantitative assessment of the infiltration capacity. With the additional consideration of the slope and the long-term frequency of rain events defined as heavy rain, the mean annual surface runoff was then calculated for arable land (Fig. 1). For grassland and forest, it was considered that surface runoff plays only a minor role, owing to the year-round vegetation cover and a nearly complete infiltration of precipitation in permanent pore systems with macropores and in the humus layer.

The new method of the Technical University of Berlin (TUB) and BGR (WESSOLEK et al. 2003) consists of eight regression equations. In order to calculate the mean annual rate of percolation for arable land, grassland, coniferous forest, and deciduous forest and alternatively for sites with a shallow groundwater table (under consideration of capillary rise) or for sites with a deep groundwater table (i.e., no capillary rise), six kinds of input variables have to be known:

mean annual corrected precipitation depth	Map 2.5
mean corrected precipitation depth during the summer half-year	Map 2.6
mean annual potential evaporation depth as grass reference evapotranspiration	Map 2.12
available field capacity in the effective root zone	Map 4.3
calculated mean annual surface runoff R_0	Fig. 1
mean amount of capillary rise	

The base map for Map 4.5 – as for Maps 4.1 to 4.4 – was a land-use version of the 1 : 1 000 000 Soil Map of Germany (BÜK 1000; HARTWICH et al. 1995). The legend of the land-use version of the soil map shows representative soil profiles for each of the land cover arable land, grassland, and forest. The land cover data were obtained from the "CORINE Land Cover" (Map 1.4) and aggregated into the three land-use classes of this map. In order to be able to calculate the percolation rate with the TUB_BGR method, the percentage of arable land, grassland, coniferous forest and deciduous forest in each of the classes of the CORINE land cover map had to be estimated (e.g. the unit "complex cultivation patterns" is parameterised as 40% arable land, 35% grassland, 25% deciduous forest and 0% coniferous forest, respectively).

Map Structures

In contrast to Maps 4.1 to 4.4, a grid calculation was chosen for Map 4.5, because at the 1 : 2 000 000 scale the range of precipitation values within the individual polygons of the land-use soil map was too large. Areas with an annual rate of percolation of up to 200 mm were subdivided into 50 mm intervals; areas with high precipitation rates at high elevations were divided into 500 mm intervals. Intertidal flats, the built up areas of large cities, areas of large open mineral extraction sites, dump sites, and rocky areas without vegetation or with permanent snow cover were not evaluated.

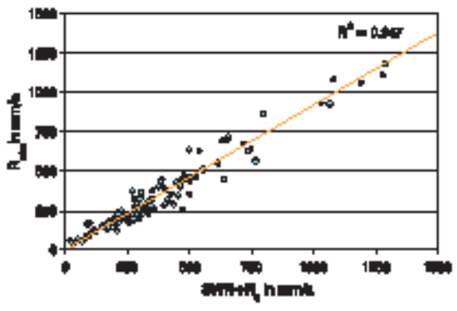


Fig. 2 Comparison of the measured runoff rates (R_{obs}) with the mean rate of percolation from the soil (SWR) plus surface runoff (R_0) in selected catchment areas (for the locations of the test catchment areas see Explanatory Notes for Map 5.5, Fig. 4)

In Germany, the areal distribution of the long-term mean rate of percolation from the soil is primarily a function of precipitation depth and only secondarily influenced by land cover and soil properties. The regional pattern, therefore, resembles that of precipitation depths in the Maps 2.2 to 2.6. The highest percolation rates are found in the Alps and high elevations of the Harz Mts., the Rheinisches Schiefergebirge (Rhenish Slate Mts.), the Black Forest, the Bayerischer Wald (Bavarian Forest), the Thüringer Wald (Thuringian Forest), and the Erzgebirge (Ore Mts.).

Very low values of less than 50 mm/a are found in the Magdeburg Börde and Thuringian basin regions. These areas correlate with those with annual precipitation depths of less than 550 mm. In regions with annual precipitation depths of more than about 800 mm, soil properties and depth to the groundwater table have little influence on the rate of percolation and differences are due essentially only to land use. The influence of soil properties and depth to the water table on the rate of percolation increases in importance with decreasing precipitation depth. This is observed particularly clearly in northeastern Germany. The typical soils of river valleys contribute little to the percolation rate or even capillary rise predominates: The groundwater table is so high that the vegetation has an optimal water supply via capillary rise and the potential evapotranspiration is nearly reached, which can be higher than the local precipitation depth.

For Germany as a whole, a mean annual rate of percolation from the soil of 316 mm/a was calculated and a mean surface runoff of 7 mm/a.

Practical Information

To verify the TUB_BGR method, the mean rate of percolation plus surface runoff in 106 catchment areas (Map 5.5, Fig. 4) of different sizes, land cover, soil properties, and geomorphological and climatic conditions was compared with the runoff measured by gauging stations. The differences between the measured and calculated runoff values average less than 10 % and are due in part to anthropogenic influences (e.g., tapping of groundwater for drinking water and irrigation). Regression analysis shows a good correlation between the measured and calculated values (Fig. 2), with the calculated values averaging about 8 % higher than the measured values. The calculated values of Map 3.5 are also higher than the measured ones by about the same amount. A detailed comparison of the results and methods used for Maps 3.5, 4.5, and 5.5 is given by JANKIEWICZ et al. (2003). The overestimation of the mean rate of percolation from the soil by the TUB_BGR method should be investigated in future research.

Map 4.5 is based only on the hydrological parameter values of one of the soils of the soil associations shown on the 1 : 1 000 000 soil map (BÜK 1000). The quality of this data base is discussed in the explanations of Map 1.3. The values on which the calculations for Map 4.5 are based can in some cases deviate from the mean values for the plant-available soil water of all soils weighted according to size of the area.

The mean rate of percolation from the soil for Germany as a whole must take into consideration the influence of irrigation. A regional differentiation was not made for this map because well managed irrigation will increase the mean rate of percolation by only about 20 mm/a.

The new TUB_BGR method is based on the assumption that separate regression equations for different land use can be applied for the whole of Germany. It was found, however, that further differentiation according to climate yielded a larger correlation coefficient. In addition, climate zones should be taken into consideration in the calculation of the effective root zone, as well as improved consideration of capillary rise in areas of near-surface groundwater.