

**Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
in Zusammenarbeit mit der Universität-GH Essen**

Leitfaden

Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung

Handlungsempfehlungen für Planer, Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden

Mainz, Mai 1998

**Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
in Zusammenarbeit mit der Universität-GH Essen**

Leitfaden

Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung

Handlungsempfehlungen für Planer, Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden

Bearbeiter:

Prof. Dr. Wolfgang Burghardt

Universität Gesamthochschule Essen

Institut für Ökologie, Abt. Angewandte Bodenkunde

Dipl. Geogr. Norbert Demuth

RR Dr. Andreas Meuser

Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland - Pfalz

Leitfaden

Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung

Handlungsempfehlungen für Planer, Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden

1. Einleitung	4
1.1 Zielsetzung	4
1.2 Durchführungsplanung	4
2. Flächenbewertung	5
2.1 Vorauswahl geeigneter Flächen	5
2.1.1 Standortmerkmale	6
2.1.2 Bodenmerkmale der Versickerungs- und Speicherleistung	8
2.2 Verbesserung der Versickerungsleistung durch Melioration und Sanierung	12
2.2.1 Bodenaustausch	12
2.2.2 Auflockerung	13
2.2.3 Verdichtung	14
2.2.4 Beimengungen	14
2.2.5 Hinweise zur technischen Ausführung der Arbeiten	15
2.2.6 Setzungsverhalten saniertter Böden	15
2.3 Quantifizierung der Bodeneigenschaften durch Infiltrationsmessungen	16
2.3.1 Bestimmung geeigneter Meßstellen	16
2.3.2 Messung der Infiltrationsraten	16
2.3.3 Ermittlung der Luftkapazität	17
2.3.4 Plausibilitätsprüfung	17
2.3.5 Übertragung der Meßergebnisse auf die Fläche	18
2.3.6 Langzeitstabilität der Versickerungsleistung	18
2.4 Standortsauswahl für die Versickerung in Mulden	18
3. Grundlagen und Durchführung der Muldendimensionierung	18
3.1 Bemessungsregen	19
3.2 Dimensionierungsansatz	19
3.3 Muldendimensionierung	20
3.4 Vereinfachte Planung	20
3.5 Beispielhafte Auswertungen	20
4. Literatur	21

Leitfaden Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung

1 Einleitung

Die Versiegelung von Flächen durch Bauten, Straßen und Plätze verhindert die Versickerung des Niederschlagswassers an der Stelle seines Auftreffens an der Bodenoberfläche. Das Niederschlagswasser wird auf der versiegelten Fläche abgeleitet.

Als Alternative zur direkten Ableitung bietet sich im Rahmen der dezentralen Bewirtschaftung des **Niederschlagswassers die möglichst breitflächige Versickerung** von nicht schädlich verunreinigtem Wasser in flachen Mulden an. Die dezentrale Niederschlagswasserversickerung hat den besonderen Vorteil, daß

- der Bedarf an Kanalisation auf das Schmutzwasser begrenzt wird,
- bei Starkregen Überlastungsprobleme in der Kanalisation weitgehend vermieden werden,
- aufgrund der hydraulischen Entlastung bei bestehenden Kanalisationen höhere Anschlußwerte und damit eine Steigerung der Effizienz der Kanalisation möglich werden,
- insbesondere bei kleinen Einzugsgebieten örtlich eine merkliche Dämpfung der Hochwasserwellen erreicht wird,
- die Bodenwassergehalte, Grundwasserstände und -vorkommen sowie in Fließgewässern die Niedrigwasserstände weitgehend im natürlichen Zustand gehalten werden können.

Die Niederschlagswasserversickerung ist somit Teil eines fachübergreifenden Flächen- und Gewässermanagements zur Bewahrung und Verbesserung der Umwelt. Im Rahmen der Entwässerungskonzeption ist sie frühzeitig in die Bauleitplanung zu integrieren.

Der Erfolg der dezentralen Niederschlagswasserversickerung ist von den Bodeneigenschaften und den örtlichen Niederschlagsverhältnissen abhängig. Der vorliegende Leitfaden behandelt sowohl die Bewertung der grundsätzlichen Versickerungseignung von Standorten als auch darauf aufbauend die Dimensionierung von Versickerungsmulden. Die Bemessungsgrundlagen gelten entsprechend auch für zentrale Niederschlagsversickerungsanlagen. Hier ist neben den bodenkundlichen Grundlagen allerdings immer auch der tiefere (geologische) Untergrund zu bewerten. Der Leitfaden richtet sich an Planer, Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden.

1.1 Zielsetzung

Das auf einer versiegelten Fläche anfallende, nicht schädlich verunreinigte Niederschlagswasser [1,2] soll in nächster Nachbarschaft möglichst breitflächig versickert werden. Das zur Versickerung anfallende Wasservolumen wird dort ein Mehrfaches der Niederschlagshöhe betragen. Aufgrund

unterschiedlicher Bodeneigenschaften sind nicht alle Böden in gleicher Weise fähig, dieses Wasser aufzunehmen, zwischenzuspeichern und in den Untergrund abzuleiten. Böden weisen somit keine einheitliche Eignung für eine Niederschlagswasserversickerung auf. Damit ist auch der Flächenbedarf für die Niederschlagswasserversickerung von dem jeweils angetroffenen Boden abhängig. Die Eignung zur Niederschlagswasserversickerung kann aus den Bodenmerkmalen abgeleitet werden. Diese müssen entsprechend ermittelt werden. Die Bodenmerkmale sind das Produkt der Standortbedingungen einschließlich des Klimas und des geologischen Untergrunds.

Die dezentrale Bewirtschaftung des Niederschlagswassers ist mit mehreren Verfahren möglich. Neben der hier behandelten flächenhaften Versickerung in flachen Mulden sind die bekanntesten weiteren Verfahren die Versickerung in zentralen Mulden, Rigolen, Mulden-Rigolensystemen, Dräneinstau u.a.

Mulden erfordern die Verfügbarkeit ausreichender Freiflächen. Als dezentrale Versickerungsanlagen sind sie jedoch einfach und kostengünstig anzulegen, zu kontrollieren und zu pflegen.

Aufgrund der Vorteile ist die Muldenversickerung ein häufig geeignetes und zu empfehlendes Verfahren zur dezentralen Niederschlagswasserbewirtschaftung. Dieser Leitfaden behandelt die Niederschlagswasserversickerung durch Mulden mit einer Tiefe von bis zu 30 cm. **Hierbei wird zunächst davon ausgegangen, daß bei der Dimensionierung der Mulden das gesamte anfallende Niederschlagswasser auch zur Versickerung kommen soll. Dies bedeutet jedoch nicht, daß dies als Forderung in allen Fällen aufrechterhalten werden muß. Das Ziel einer ökologischen Niederschlagswasserbewirtschaftung läßt sich auch erreichen, wenn nur ein Teil des Wassers an Ort und Stelle versickert werden kann.**

1.2 Durchführungsplanung

Die Ausweisung von Flächen der Niederschlagswasserversickerung kann erfolgen in

- geplanten Baugebieten
- bereits bestehenden Baugebieten

Zur Planung der Niederschlagswasserversickerung (Abb.1) in Mulden müssen zunächst Grenzen und Größe der zur Bebauung vorgesehenen Flächen bekannt sein.

Anhand der Auswertung vorhandener Planungsunterlagen (z.B. geologische/bodenkundliche Karten) ist es bereits bei der Erstellung eines Flächennutzungsplanes möglich, die Annahme oder den Grad einer möglichen Eignung zur Niederschlagswasserversickerung anzugeben und damit Aussagen in der Form **ungeeignet**, **bedingt geeignet** und **geeignet** zu geben. Zu dieser Bewertung sind auch Anga-

ben zur Verteilung der Starkregenereignisse auf der Grundlage von KOSTRA [6] heranzuziehen.

Auf dieser Grundlage können weiterführende Untersuchungen zum Grad der Eignung des Bodens, zur Versickerung und Speicherung sowie zur Größe der benötigten Fläche für eine Muldenversickerung durchgeführt werden.

In Fällen, in denen die Versickerungseignung offensichtlich und auch das Flächenangebot hinreichend sind, genügen oft einfache Feldansprachen. In Verbindung mit dem vorliegenden Leitfaden kann dann auf die Bestimmung weitergehender Bodenmerkmale (biotische-, Gefüge- und Zusatzmerkmale vgl. 2.1) sowie Infiltrationstests verzichtet werden (vgl. 3.4). In allen anderen Fällen sind Felduntersuchungen der Böden entsprechend dieses Leitfadens für abschließende Entscheidungen notwendig.

In bestehenden Baugebieten kann die Untersuchung zum Beispiel im Rahmen der Vorplanung von Wohnbausanierungen stattfinden. Auch hierzu kann eine Vorentscheidung auf der Grundlage der Sichtung bereits vorhandener Karten, Bohrergebnisse und ähnlichem getroffen werden, sofern die Böden nicht durch Auf- und Abtrag sowie Verdichtung, Gartennutzung, Versiegelung und Schadstoffbelastung (Altlasten) verändert wurden.

Grundsätzlich gilt das Gebot des sparsamen und schonenden Umganges mit dem Boden zu befolgen. Boden ist weder als Fläche noch als Körper vermehrbar.

Weiterhin ist zu beachten, daß nach einer Bodenuntersuchung auf Merkmale einer Eignung zur Niederschlagswasserversickerung der Boden nicht mehr verändert werden soll. Mit Veränderungen am Boden werden die Untersuchungsergebnisse ungültig. Sie sind dann für die weiteren Betrachtungen nicht mehr brauchbar.

Es ist daher unbedingt zu beachten, daß nach erfolgter Untersuchung die vorgesehene Versickerungsfläche nicht mehr verdichtet, befahren, umgelagert, überdeckt und abgetragen wird. Ebenso sollte auf die Ablagerung von Baumaterialien, Erdaushub, Abstellen von Fahrzeugen, Bauwagen und ähnlichem auf der zukünftigen Muldenfläche verzichtet werden. Wird der sorgfältige Umgang mit dem Boden nicht beachtet, ist die Wiederherstellung eines intakten Grobporensystems und der Porenkontinuität zur Ableitung des Wassers in den Unterboden zeitaufwendig und mit hohen Kosten verbunden. Bei gefügelabilen Böden kann es zum Beispiel zu irreversiblen Verdichtungen kommen, als Sanierungsmaßnahme kommt hier nur der komplette Bodenaustausch in Frage.

Um den Schutz des Bodens sicherzustellen, sollte vor der Baumaßnahme bis zur Beendigung aller Baumaßnahmen die Versickerungsfläche z.B. mit einem Bauzaun abgesperrt und damit unzugänglich gehalten werden.

Die Mulde kann erstellt werden

- auf großen Flächen,

- durch Aushub von gewachsenem Boden. Hierbei ist zu beachten, daß die Arbeiten nur am abgetrockneten Boden erfolgen dürfen. Abziehen der Oberfläche mit der Baggerschaufel und damit Baggerschaufelverdichtung sind zu vermeiden.
- durch Aufschüttung der die geplante Mulde umgebenden Fläche. Dadurch bleibt die belebte und somit grobporenreiche Oberbodenschicht der Mulde erhalten. Dieses Verfahren ist in der Regel der Muldenerstellung durch Bodenabtrag vorzuziehen.
- in mächtigen Aufschüttungen (> 50 cm) aus Bodenaushub. Hier ist zu beachten, daß Oberbodenmaterial oder sonstiges Bodenmaterial sorgfältig und ohne Verdichtung abgelagert wird. Die Eignung kann sehr unterschiedlich sein. Der Boden muß bereits an der Entnahmestelle abgetrocknet sein und trocken auf der Versickerungsfläche eingebaut werden.

Die Bauplanung sollte möglichst Aufschüttungsflächen als Versickerungsflächen meiden. Die Muldenversickerung auf Aufschüttungen wirft infolge der zunächst fehlenden oder nicht ausreichenden biologischen Belebung des Bodens und infolge der Bodensetzung besondere Risiken auf (vgl. 2.1.1)

2 Flächenbewertung

Die Untersuchungen auf Eignung zur Niederschlagswasserversickerung umfassen die folgenden Arbeitsschritte (Abb.1):

- Mit Hilfe vorhandener Karten und anderen Unterlagen werden nach einer ersten Feldbegehung als erster Arbeitsschritt die potentiell versickerungsgeeigneten Flächen erfaßt.
- Für die konkrete Planung werden diese Flächen feldbodenkundlich ggf. auch geologisch aufgenommen und entsprechend für die Niederschlagswasserversickerung geeignete Areale ausgewiesen.
- Zur Konkretisierung wird für diese Flächen einheitlicher Bodenbeschaffenheit durch Infiltrationsmessungen und in einigen Fällen (z.B. Stauwasserböden)
- Grundwasserböden) ggf. durch ergänzende Bestimmungen der Speicherkapazität für Sickerwasser die Leistungsfähigkeit zur Niederschlagswasserversickerung ermittelt.
- Sowohl bei offensichtlich zur Versickerung geeigneten Flächen (z.B. Sandböden mit ausreichendem Grundwasserflurabstand) als auch bei einem großen Platzangebot bei "nur" grundsätzlich geeigneten Flächen kann auf die beiden vorgenannten Bearbeitungsschritte verzichtet und ein vereinfachtes Verfahren durchgeführt werden (s. 3.4).
- Abschließend wird die Muldendimensionierung durchgeführt.

2.1 Vorauswahl geeigneter Flächen

Die Eignung von Flächen zur Niederschlagswasserversickerung wird beeinflusst von

- den Bodeneigenschaften
- der bisherigen Nutzung
- der Lage im Relief
- Stau- und Grundwasservorkommen, Vernässung
- schadstoffhaltigen Ablagerungen, Altlasten
- der Rutschungsgefährdung.

Dazu liegen häufig, jedoch nicht in allen Fällen flächendeckende Informationen aus Kartenunterlagen oder aus der Flächennutzungsplanung vor:

- Bodenkarte 1:25.000 (Geologisches Landesamt)
- Reichsbodenschätzung 1 : 5000 (Finanzämter)
- Realnutzungskartierung (Gemeinden, Kreis, Planungsamt)
- Deutsche Grundkarte 1:5.000 (Topographie, Nutzung etc. / Katasteramt, Landesvermessungsamt)
- Geologischen Karte 1:25.000 (Geologisches Landesamt)
- Baugrundkarte (Geologisches Landesamt, Tiefbauämter)
- Altlasten-/Verdachtsflächenkataster
- Leitungs- und Kabelpläne (Post, Stadtwerke, Bahn, Strom- und Gasversorgungsunternehmen)
- Vegetationskartierung (Gemeinde, Kreis, Naturschutzverbände)
- Kriegsschadenskarte, Munitionsreste (Feuerwehr, Kampfmittelräumdienst)
- Untergrundaufschlüsse (Baugrundbohrungen, Grundwassermeßstellen u.a.)

Nach einer Feldbegehung mit Ortskundigen und einer einfachen Bodenansprache erfolgt die Auswertung der vorhandenen Unterlagen anhand der im folgenden erläuterten Kriterien.

Besonders die Bodenschätzungskarten sind aufgrund der großen Datenquelle hervorzuheben.

Bodenschätzung liefert Informationen zur Bodenart, Gründigkeit, Ausgangsmaterial, Klimaverhältnissen, sonstigen Besonderheiten, Profilaufbau, Bodentyp, Wasserverhältnissen

Die Bodenschätzung liegt

- für die landwirtschaftlich genutzte Fläche der Bundesrepublik
- nach einheitlichen Grundsätzen
- im Maßstab 1 : 1 000 bis 1 : 2 000 (Rheinland-Pfalz)
- mit der höchsten räumlichen Dichte aller Methoden zur Bodenuntersuchung
- mit 11 - 16 Proben je ha
- mit mindestens 1 ausführliche Profilbeschreibung bis 1 m Tiefe je ha
- bei den jeweiligen Finanzämtern, Abt. Bodeschätzung, bzw. Katasterämter vor.

„Die Bodenschätzung sollte weniger zur Ableitung konkreter bodenkundlicher Kenngrößen der Regenwasserinfiltration genutzt werden, als vielmehr zur Vereinfachung der Ausweisung von Flächentypen gleicher Versickerungseignung“ (Sauer, 1999).

Weiterhin sollte bei der Auswahl repräsentativer Flächen für nachfolgende Infiltrationsmessungen die Grablöcher (Profilbeschreibung) ausgewertet werden.

2.1.1 Standortmerkmale

Natürliche Böden

Für eine Wasserversickerung in Mulden kritische Böden sind Gleye, Pseudogleye, Ranker, Rendzinen über Festgestein und Festgesteinssyroeme. Hier wird die Tiefenversickerung und das Speichervolumen zur Aufnahme von Sickerwasser entweder durch oberflächennah anstehendes Grundwasser, Stauwasser oder Festgestein begrenzt. Ungeeignet aufgrund eines hohen Tongehaltes im Unterboden ist der Pelosol; Terra Fusca und Plastosol (Fersialit) sind teilweise geeignet. Problematisch sind auch natürlich verdichtete Böden (z.B. Podsol). Eine natürliche Verdichtung kann entweder bei der Sedimentation und Überlagerung von Lockersedimenten oder durch die Bodenbildung (Sackung, Einlagerung) entstanden sein.

Die kritischen Böden, die grundsätzlich zur Niederschlagswasserversickerung kaum geeignet sind, werden nachfolgend kurz beschrieben. Eine weitergehende Darstellung ist in der Bodenkundlichen Kartieranleitung [3] enthalten. Das Vorkommen dieser Böden kann aus Bodenkarten entnommen werden. Der Maßstab der Karten bedingt jedoch eine Ungenauigkeit, die die Abgrenzung geeigneter Flächen erschwert. Bei bodenkundlichen Felduntersuchungen sind die entsprechenden Böden in der Regel eindeutig identifizierbar.

Gleye

Grundwasser füllt sämtliche Bodenhohlräume aus. Daher kann nur oberhalb des Grundwassers im Boden Wasser gespeichert werden, um dann mit dem Grundwasserstrom seitlich abgeleitet zu werden. In Gleyen steigt das Grundwasser zeitweise bis in die oberen 40 cm des Bodens. Dies gilt auch für Subtypen, die mit der Bezeichnung Gley enden, z.B. Podsol-Gley. Da der Anstieg des Grundwassers im Winter eintritt, sind Gleye für eine Versickerung ausgeschlossen. Die Grundwasserhöchststände müssen bei Sandböden für eine Versickerung tiefer als **80 cm** und für die übrigen Böden **130 cm** unter der Bodenoberfläche liegen. Auf starke Vernässung weisen Anmoor- und Moorbildungen hin. Sie sind für eine Versickerung ebenfalls ungeeignet. Gleye in grundwasserabgesenkten Gebieten können verkittete, harte Eisenkonkretionen bis hin zu Raseneisenstein aufweisen. Hier müssen auch Informationen zur Entwässerung sowie zur Gewinnung von Trink- und Brauchwasser beachtet werden.

Pseudogleye

Temporäre Wassersättigung von Böden tritt bei Stauwasserböden auf. Die einzelnen Stauwasserböden unterscheiden sich durch die Tiefenlage des wasserstauenden Horizontes (Sd-Horizont). Der über dem Sd-Horizont gelegene Sw-Horizont wird durch Niederschlagswasser unterschiedlich hoch gefüllt. Dies ist abhängig von dem über dem Sd-Horizont befindlichen, durch die Luftkapazität (LK) gekennzeichneten, Grobporenvolumen (Poren > 0,05 mm Ø). Die zeitliche Dauer des Auffüllungszustandes hängt außer von der Witterung von der Durchlässigkeit des Sd-

Horizontes und in Hanglagen vom seitlichen Zu- und Abfluß ab. Ausgeprägte Stauwasserböden sind Pseudogleye. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß der Sw-Horizont nicht tiefer als 4 dm unter der Oberfläche beginnt. Damit ist das Volumen des Bodens für eine zusätzliche Wasserspeicherung gering. Pseudogleye sind daher für eine Wasserversickerung ungeeignet. Übergangsformen von anderen Böden zu Pseudogleyen weisen Sw-Horizonte auf, die tiefer als 4 dm unter der Oberfläche beginnen. Je nach Bodenart, Relief und Durchlässigkeit des Sd-Horizontes können sie noch nutzbar sein. Haftnässepseudogleye weisen Horizonte mit sehr geringem (< 3%) Grobporenvolumen auf. Diese Böden sind für die Versickerung nicht nutzbar.

Podsol

Durch Auswaschung stabilisierender Stoffe wie Huminstoffe und metallorganischer Komplexe sackt der Boden im Ausbleichungshorizont zusammen, gleichzeitig entsteht oft im darunterliegenden Horizont dichter, wenig durchlässiger Ortstein.

Böden der Feuchtgebiete

Gleye, Anmoor- und Moorböden und Pseudogleye sind Böden der Feuchtgebiete und damit bevorzugte Flächen des Natur- und Landschaftsschutzes. Sie können aus der dezentralen Niederschlagswasserablenkung zusätzlich mit Wasser über Muldenversickerung versorgt werden. Hier ist eine dem Schutzziel angepaßte Einzelfallbewertung der Eignung der Böden vorzunehmen.

Festgesteinsböden

Bei Sysrosemen, Rankern aus carbonatfreiem und Rendzinen aus carbonathaltigem Gestein liegt Festgestein innerhalb 30 cm unter der Oberfläche vor. Sie sind zur Muldenversickerung ungeeignet. Auch Übergangsformen zu anderen Böden sind nur bedingt geeignet, wenn das Festgestein nicht tiefer als 8 dm unter der Oberfläche liegt (z.B. Braunerde-Ranker).

Pelosole

Pelosole entstehen aus Tongestein und Tonmergelgestein. Sie weisen Unterbodenhorizonte (P-Horizonte) mit Tongehalten über 45% auf. Sie sind häufig dicht. Die Böden neigen daher zur Stauwasserbildung. Sie sind für eine Versickerung in der Regel ungeeignet.

Terra Fusca

Diese Böden weisen Unterbodenhorizonte (T-Horizonte) mit mehr als 65% Ton auf. Sie besitzen ein ausgeprägtes Polyedergefüge. Infolge dieses Gefüges sind sie wasserundurchlässig. Da Tone in langen Feuchteperioden quellen und damit wasserundurchlässig werden können, sind diese Böden sorgfältig auf Stauwassermerkmale zu untersuchen.

Plastosole

Plastosole kommen in Rheinland-Pfalz als Bodenrelikte aus Zeiten mit subtropisch-tropischem Klima vor. Sie sind meist umgelagert und kommen in unterschiedlichen Anteilen zusammen mit jüngeren Bodenbildungen vor. Sie können staunass sein. Sie sind daher auf Staunässe hin zu untersuchen.

Steinhaltige Böden

Hoher Steingehalt verringert das Speichervolumen und den Leitungsquerschnitt für Sickerwasser der Böden. Die Wasserleitfähigkeit wird besonders dann beeinträchtigt, wenn eine abgestufte Korngrößenkurve vorliegt, d. h. alle Korngrößen liegen in gleichen Anteilen vor. Dies ist vor allem bei feinkörnigen Böden wie Ton-, Schluff- und Lehmböden zu erwarten. Daher sind feinkörnige Böden mit Kies-, Grus-, Steingehalten über 50% in der Regel ungeeignet. Aus der Bodenartenangabe der Bodenkarten ist dies entnehmbar.

Anthropogen überformte und gestörte Böden

Baugebiete werden häufig in urban überformten Gebieten erschlossen. Die Bodeneigenschaften weichen daher mehr oder weniger von denen natürlicher Böden ab. Weiterhin kann der Bodenkörper durch die Baumaßnahmen selbst verändert worden sein. Es handelt sich hierbei insbesondere um Verdichtungen, Aufschüttungen und anthropogene Beimengungen, Schichtungen usw.

Verdichtungen

Zu Verdichtungen kommt es durch kurzfristige Belastungen bei Befahren mit Baumaschinen und landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen oder durch längerfristige Belastungen z.B. durch Parkplatz- oder Lagerplatznutzung. Verdichtungen treten immer dann auf, wenn die Auflast größer ist als der vom Boden entgegengebrachte Scherwiderstand. Die Bodenteilchen verschieben sich dabei und der Boden setzt sich. Überwiegend handelt es sich um irreversible Bodenverformung, bei der gefügebabhängige Grob- und Makroporen zerstört werden. Verdichtete Böden können durch natürliche Prozesse wie Bioturbation und Frostgare nur sehr langsam, dafür aber nachhaltig und beständig aufgelockert werden.

Wie stark nun Böden verdichtet werden und wie weit sich die Auflast in die Tiefe auswirkt, hängt in erster Linie von der aktuellen Bodenfeuchte, von der Bodenart, vom Humusgehalt und der Aggregatstabilität ab. Generell kann gesagt werden, daß

- Mischsubstrate (lehmige Sande bis tonige Lehme) verformungsempfindlicher sind als Sande
- feuchte Böden verdichtungsempfindlicher sind als trockene Böden
- Humusgehalte bis 15 % die Stabilität erhöhen
- bei Feuchtestufen höher als Feldkapazität die Böden nicht verdichtet, sondern in erster Linie zerknetet werden. Das Bodengefüge wird dabei kohärent.

Aufschüttungen

Aufschüttungen finden sich meist auf Flächen nach Bautätigkeiten. Frisch aufgeschüttete Böden sind ähnlich wie Böden nach erfolgter Auflockerung, erhöht setzungsempfindlich. Ihr Gefüge besteht primär aus mehr oder weniger groben Klumpen, Schollen usw. Durch Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsvorgänge entsteht mit der Zeit ein Sekundärgefüge, welches den Luft- und Wasserhaushalt verbessert.

Aufschüttungen können das zur Wasserspeicherung zur Verfügung stehende Bodenvolumen vergrößern, so z.B. über Auenböden, Gleyen, Pseudogleyen und Festgesteinsböden. Unter der Voraussetzung größter Sorgfalt können daher Aufschüttungsflächen auch zur Niederschlagswasserversickerung angelegt werden.

Böden im Bereich von Siedlungen und Industriegebieten

Im Bereich von Siedlungen und Industriegebieten können Ablagerungen aus technogenem Material sowie Mischungen und Schichtungen solcher Ablagerungen mit natürlichem Bodenmaterial vorliegen. Dies beeinflusst die stoffliche Beschaffenheit des Sickerwassers [7], wie auch die Wasserversickerungsleistung der Böden infolge der bodenartigen Zusammensetzung und des Skelettgehaltes der technogenen Substrate. Skelettgehalt verringert im allgemeinen das Wasserspeichervolumen der Böden. Eine Ausnahme bildet poröser Bauschutt.

Nutzung der Fläche

Das Porenvolumen, die Größe der Poren und deren Verteilung im Boden wird durch die Nutzung beeinflusst. Daher kann auch eine nutzungsabhängige Niederschlagswasserversickerung erwartet werden. Die Nutzungsform der einzelnen Flächen muß daher ermittelt werden. Einzelne Gemeinden verfügen über eine Realnutzungskartierung. Angaben zur Nutzung sind auch der Deutschen Grundkarte 1:5000 entnehmbar. Beachtet werden muß auch die vorgesehene Nutzung, da sie versickerungsverträglich sein muß und die Eignung einer Fläche zur Versickerung mit beeinflusst.

In Trinkwasserschutzgebieten ist in der Regel eine Versickerung in der Regel nur in den Zonen IIIA und IIIB möglich [1, 2]. Problematisch können sehr gut durchlässige Böden (Endinfiltrationsraten $> 5 \times 10^{-3}$ m/s [1, 2]) im Hinblick auf die Reinigungsleistung des belebten Oberbodens sein.

Dichte Bebauung mit Unterkellerung schränkt das verfügbare Volumen des Bodens zur Zwischenspeicherung von Sickerwasser ein. Als grober Anhalt für den notwendigen Abstand einer Mulde von Gebäuden sind 6 m einzuplanen. Dieser Wert kann sich bei Grundwasserständen von mehr als etwa 3 m unter der Muldensohle oder der angrenzenden Gebäude bei sandigem bis kiesigem Untergrund bis auf 3 m verringern.

Lage im Relief

Auenflächen (auch eingedeichte) können Vernässungen aufweisen. Kies- und Sandschichten im Untergrund der Auenböden leiten Flußwasser bei Hochwasser in die Aue. Die Eignung dieser Flächen zur Niederschlagswasserversickerung ist abhängig von der Häufigkeit der Vernässung und der Tiefe der Vernässungshorizonte (s. Gleye). Für Auenflächen, die vor der Bebauung ganzjährig trocken sind und keine Vernässungsmerkmale aufweisen, kann angenommen werden, daß sich dies auch bei Niederschlagswasserversickerung nicht ändert.

Hanglagen begünstigen von Natur aus den lateralen Abfluß des Niederschlagswassers im Boden. Damit werden je nach Bodenart und Tiefenlage von Stauschichten die Oberhangböden von Sickerwasser ent- und die Unterhangböden belastet. Die am Unterhang anfallenden Wassermengen werden mit zunehmender Hanglänge ansteigen. Dieser Vorgang wird durch Dräne um die Keller verstärkt, da sie das Wasser schneller talabwärts leiten als es im Boden der Fall sein würde. Die örtlichen geologischen Verhältnisse sind zu beachten, um zu vermeiden, daß versickertes Wasser beim tiefer liegenden Grundstück wieder austritt oder zu Vernässungen führt.

Bei konstantem Hanggefälle ist auf jeder Teilfläche des Hanges der laterale Zu- und Abfluß gleichbleibend. Ein zusätzliches Wasserspeichervolumen wird daraus nicht erforderlich. Mit zunehmender Hanglänge und damit längerer Fließstrecke wird jedoch im unteren Hangbereich die Sickerwasserbewegung länger andauern. Am Übergang zu abflachenden Hangpartien und somit auch am Hangfuß verlangsamt sich meist die Sickerwasserbewegung. Es kommt zum Rückstau des Wassers im Boden. Solche Flächenteile sind für eine Muldenversickerung häufig ungeeignet. Vernässungsmerkmale des Bodens und der Vegetation weisen in vielen Fällen bereits darauf hin.

Rutschungen und Setzungen

Rutschungen und Setzungen werden durch starke Durchfeuchtung des Bodens ausgelöst und können somit durch gezielte Wasserversickerung gefördert werden. Die Versiegelung auf vorher unversiegelten Hängen bewirkt eine lokale Umverteilung des Niederschlagswassers: hohe Wassergehalte unterhalb und im Nahbereich der Mulde, geringe Wassergehalte unter den versiegelten Flächen. Auf die Gesamtwasserbilanz für den Hang hat die Versiegelung/dezentrale Versickerung nur geringe Auswirkungen [12].

Rutschungen sind zum Beispiel dann zu erwarten, wenn Sand oder Lehm geringer Lagerungsdichte über Ton oder Mergel vorkommen. Der mit Wasser übersättigte Oberboden kann sich dann vom Untergrund ablösen.

Sichtbare Zeichen der Rutschgefährdung sind Hinweise auf bereits erfolgte natürliche Erdbewegungen. Dies sind z.B. gekrümmter Wuchs des unteren Stammabschnittes von Bäumen (Säbelwuchs) und stufenartige Gestalt der Hänge. Ebenso geben unruhige Verläufe oder Einschnürungen von Höhenlinien in den TK 25 und DGK 5 erste Hinweise zu Rutschungen. Erdbeben treten vermehrt ab Hangneigungen von 20% auf. Eine Rutsch- und Setzungsgefährdung kann Baugrunderkundungen und Baugrundgutachten entnommen werden. Entsprechende Flächen sind grundsätzlich zur Niederschlagswasserversickerung ungeeignet, es sei denn, hydro-/ingenieurgeologische Untersuchungen bis in die relevanten Horizonte kommen zu dem Ergebnis, daß eine Versickerung/Teilversickerung das Gefährdungspotential nicht signifikant erhöht. Hangneigungen > 30% innerhalb eines Baugebietes sind von einer Niederschlagswasserversickerung auszuschließen, bei Flächen, bei denen die Hangneigung zwischen 15% und 30% liegen ist nur bedingt eine Versickerung möglich. Hier müssen weitere ingenieurgeologische Untersuchungen hinzugezogen werden. Bei Hangneigungen < 10% sind die Flächen grundsätzlich für eine Versickerung geeignet. Liegen die Hänge außerhalb eines Baugebietes, so kann auch bei größeren Hangneigungen versickert werden, in dem das Oberflächenwasser des Baugebietes dort hingeleitet werden.

2.1.2 Bodenmerkmale der Versickerungs- und Speicherleistung

Die Leistung des Bodens, aus Mulden versickerndes Niederschlagswasser aufzunehmen, ist von 3 Vorgängen abhängig:

- Aufnahme an der Oberfläche, d.h. Infiltration des in der Mulde gestauten Wassers
- Zwischenspeicherung des Wassers im Boden
- vertikale und laterale Weiterleitung des Wassers in den Untergrund.

Grundlagen

Die folgenden Ausführungen dienen zunächst dem weiteren Verständnis der Auswahl der bei der Untersuchung berücksichtigten Bodenmerkmale.

Das Niederschlagswasser wird in der Mulde zur Versickerung zwischengespeichert. Die Wasseraufnahme erfolgt somit in der Mulde aus einer überstauten Fläche. Dieser Vorgang ist nicht identisch mit der normalen Niederschlagswasseraufnahme durch den Boden, bei der das Wasser den Boden nicht überflutet und daher nahe der Stelle des Tropfenaufpralles aufgenommen wird. Bei der Muldenversickerung kann das angestaute Wasser zu den durchlässigsten Stellen der Bodenoberfläche und damit zu den Poren mit dem größten Wasseraufnahmevermögen strömen. Dies sind tiefgehende Grobporen mit Durchmesser > 0,05 mm. Sie erreichen häufig Durchmesser von mehreren Millimetern und sind dann auch direkt sichtbar.

Damit stellen sich die Fragen nach der Häufigkeit des Vorkommens solcher Poren, nach deren Verteilung an der Oberfläche und nach den Ursachen dieser Verteilung. Dazu ist generell festzustellen, daß die natürliche räumliche Variabilität von physikalischen Bodenmerkmalen sehr hoch ist. Nach den derzeitigen Kenntnissen kann man davon ausgehen, daß hinsichtlich der Merkmale der Porensysteme auf 1 bis 5 m²

Fläche bereits das gleiche Maß an Variabilität auftritt wie auf 100 bis 10.000 m² der umgebenden Fläche, sofern Einflüsse, wie sie durch Radspuren, Trampelpfade und ähnliches vorliegen, unberücksichtigt bleiben.

Ursachen kleinräumiger Variabilität sind

- biogene Poren, entstanden durch Pflanzenwurzeln und Tiergänge, wobei sich Regenwurmgänge besonders stark auswirken
- Bodenlockerung und -mischung durch Bodenorganismen
- Gefügebildung durch Aggregation von Bodenteilchen
- Korngrößenverteilung
- Entstehung von Schrumpfrissen durch Abtrocknung der Böden und unvollständige Rückquellung bei Befeuchtung und damit dauerhafte Hohlrumbildung durch verbleibende Restschrumpfung
- auf Äckern im Furchenbereich Pflugsohlenbildung mit kleinräumig wechselnder Intensität und im Furchenbereich uneinheitliche Quellung und Schrumpfung als Folge ungleichmäßiger Wasserversickerung
- Mikrorelief mit Wirkung auf die Abtrocknung, Belüftung, Besiedlung durch Organismen
- die Frostgare durch kalte Winter. Durch Gefrieren bildet der Boden ein ausgeprägtes Aggregatgefüge aus.

Das Merkmal der Heterogenität des Porensystems tritt ausgeprägt in Böden der Körnungsklassen mit hohem Lehmanteil, weniger stark in reinen Sand- und Tonböden auf.

Grobporen treten besonders in Oberböden (0 - 40 cm Tiefe unter Geländeroberfläche) auf, so daß sie bei der Niederschlagswasserversickerung in Muldenanlagen ohne oder mit nur geringfügigem Bodenabtrag wirksam werden. Der Oberboden sollte daher bei der Anlage der Sickermulden möglichst nicht abgetragen werden.

Für die Anzahl der Bodenmerkmale zur Kennzeichnung von Flächen einheitlicher Merkmale der Niederschlagswasserversickerung sind somit nicht nur die Merkmale Bodenart und Lagerungsdichte, die zur Schätzung des Porenvolumens, der Luftkapazität, Feldkapazität und Wasserleitfähigkeit [3] herangezogen werden, von Bedeutung, sondern auch die biogene Porung, Bioturbation, Gefügebildung, Ribbildung und Mikroreliefwirkung.

Die Ausbildung der Heterogenität des Porensystems ist von der Bodennutzung und Bodenbearbeitung abhängig.

Somit sind für die maßgebende Infiltrationsstärke Merkmale des Bodens, der Bodenoberfläche, der Bodennutzung und der Biosphäre von Bedeutung.

Aus der oben beschriebenen heterogenen Verteilung von Bodenporen hoher Versickerungsleistung folgt für die Fläche der Versickerungsmessung, daß sie möglichst groß zu wählen ist.

Für die kurzzeitige Zwischenspeicherung des Wassers sind der Porenanteil, in dem Wasser gegen die Schwerkraftwirkung im Boden festgehalten wird, d.h. die Feldkapazität (Poren < 0,05 mm) weitgehend ungeeignet. Diese werden nur langsam, insbesondere durch die Verdunstung entwässert. Nutzbar sind hingegen die schnell drainierenden Poren (> 0,05 mm), in denen das Wasser schnell abfließt. Sie sind vor einem Versickerungsereignis luftgefüllt. Das Volumen dieses Porensystems im Boden wird als Luftkapazität (LK) bezeichnet. Zur Kennzeichnung der Luftkapazität kann die Mineralbodenart, der Humusgehalt und die Lagerungsdichte des Bodens herangezogen werden (vgl. [3]). Allerdings wird beim Versickerungsvorgang dieses Grobporenvolumen nur teilweise ausgefüllt und ist daher für die Speicherung von Niederschlagswasser bei einzelnen Böden von unterschiedlicher Bedeutung. Anders verhält sich dies bei Stau- und Grundwasserböden sowie flachgründigen Böden mit dichtem Gestein. Dort wird über der Stausohle (Sd-Horizont) und dem Grundwasserspiegel das gesamte Grobporenvolumen aufgefüllt.

Merkmale und ihre Ermittlung

Die Ermittlung der Merkmale erfolgt mit den Zielsetzungen der Ausweisung bzw. Abgrenzung von Flächen annä-

hernd einheitlicher Bodenmerkmale für die Niederschlagswasserversickerung.

Dazu sind die Bodenmerkmale zu erfassen, die die Infiltrationsrate, die Zwischenspeicherung und die Ableitung des Wassers aus dem Unterboden kennzeichnen. Erfasst werden die Merkmale des

- Oberbodens, was durch Schürfe von mindestens 40 cm Tiefe, Breite und Länge geschieht. Eine Schürfgrube sollte als Leitprofil mindestens so tief sein, daß alle wichtigen Horizonte und Schichten untersucht werden können, um die biotischen Merkmale, die Gefüge- und ggf. Zusatzmerkmale hinreichend genau zu erfassen.
- Ober- und Unterbodens, was bis 1 m Tiefe z.B. mit einem Pürckhauer-Bohrer (Rillenbohrer) von 3 cm Durchmesser geschieht.
- tieferen Unterbodens, was in 1-2 m, oder flacher bis zu festen Gesteinsflächen z.B. mit einem Linnemannbohrer, Durchmesser der Bohrnut 1.5 cm, erfolgt. Alternativ kann die Bohrung mit einer Rammkernsonde durchgeführt werden, wobei es von Vorteil sein kann, den Durchmesser des Bohrers größer zu wählen.

Der tiefergelegene Untergrundbereich - besonders bei Hanglagen - sollte in die Bewertung stärker einbezogen werden, wenn bis in die Tiefe der Gründungssohle der geplanten Baumaßnahmen das Festgestein ansteht oder ein Wechsel der Untergrundverhältnisse zu vermuten ist (z.B. angedeutet durch die Morphologie oder Hinweise aus der geologischen Karte). In diesen Fällen sind hydro-/ingenieurgeologische Erkundungen vorzunehmen mit dem Ziel, die lateralen Wassertransportwege einzuschätzen und Empfehlungen zur Lage der geplanten Mulden und zur Bauausführung (z.B. Dräne um die Keller) vorzugeben. Auf derartige Untersuchungen kann unter der Voraussetzung eines ausreichend versickerungsfähigen Bodenvolumens (vgl. 2.1.2.3) verzichtet werden bei:

- breitflächiger Versickerung (z.B. 10 cm tiefe Mulden)
- Teilversickerung
- ausreichend dimensionierten Dränen um die Bausubstanz

Für die Flächenausweisung werden zunächst Bohrungen im Abstand von höchstens 50 x 50 m auf ebenen Flächen, an Hängen 25 m in Gefällrichtung und 50 m quer zum Gefälle durchgeführt. Auf bebauten Flächen ist auf jedem Grundstück mindestens ein Untersuchungspunkt anzulegen.

Der Aufbau des Bodens in Horizonte (entstanden durch Bodenentwicklung) und Schichten (entstanden durch Genese und Anthropogenese, d.h. meist durch Ablagerung) wird durch die Ansprache folgender Bodenmerkmale ermittelt:

- Bodenfarben
- Bodenarten
- Humusgehalte
- Carbonatgehalte
- Feuchte
- Festgesteinsoberfläche

Nach Auswertung der Bohrerergebnisse ist auf den Flächen annähernd einheitlicher Bodenmerkmale (vgl. 2.1.2.3) jeweils mindestens ein Schurf (Leitprofil, s.o) anzulegen. Durch die Schürfe werden ergänzend ermittelt:

- Gefügeform, Aggregatgröße und Verfestigungsgrad
- Durchwurzelung
- Biogene Porung

Die Grundlage der folgenden Bodenansprache enthält die bodenkundliche Kartieranleitung ([3], im folgenden kurz KA4 genannt). Die Ergebnisse werden in ein Feldaufnahmeblatt eingetragen (vgl. Abb. 2).

Farbansprache (KA4, Farben auf S. 105-107, Erscheinungsformen S. 51-53)

Mit der Farbansprache können Bodeneigenschaften, wie Humusgehalt, Staunässe u.a. eingeschätzt werden. Farben werden subjektiv nach dem Farbempfinden des/r Kartierers/in oder mit Hilfe einer Bodenfarbtafel angesprochen. Treten mehrere Farben nebeneinander auf, so ist die Erscheinungsform des Farbgemenges anzugeben (z.B. fleckig, marmoriert, vertikal orientiert, horizontal orientiert).

Mineralbodenartenansprache (KA4, Feinboden (Körnung < 2 mm) S. 132-142, Schätztafel des Flächenanteils des Grobbodens, S. 55)

Die Bodenart ist ein maßgebender Kennwert der Wasserdurchlässigkeit. Die Feldansprache erfolgt für den Feinboden. Die Art des Festgesteins ist z.B. der geologischen Karte zu entnehmen. Der Grobbodenanteil (> 2 mm) kann im Bereich der Schürfe ermittelt werden. Hinweise über das Vorliegen von Grobboden und dessen Gehalte sind z.B. aus den Angaben der geologischen Karte zum Ausgangsgestein der Bodenbildung zu entnehmen. Dabei sind Grobbodengehalte erst ab Gehalten von 30% (d.h. Stufe g4, gr4, x4) von merklicher Bedeutung.

Besonders zu beachten ist die 25% Tongehaltsgrenze, da ab dieser durch die höheren Tongehalte deutliche Riß- und Gefügebildung durch Schrumpfung und Quellung zu erwarten sind. Ebenso ist auf Feinboden mit Gehalten unter 8% Ton und zwischen 0 und 40% Schluff die Regenwurmtätigkeit eingeschränkt.

Humusgehalte

Ihre Wirkung ist bei Sandböden verschieden von der von Lehm- und Tonböden. Die Humuspartikel lagern sich zwischen Sandpartikeln ein, wodurch die Luftkapazität und die Wasserleitfähigkeit der Sande stark reduziert werden. Dies macht sich deutlich bei Sandböden (Tongehalt 0-17%) im Bereich von 8 bis 30 Gewichts-% Humus bemerkbar. Hingegen bei Lehm- und Tonboden fördern steigende Gehalte organischer Substanz die Krümelgefügebildung und die Entstehung von Aggregaten, wodurch der Gehalt grober, versickerungsfähiger Bodenporen ansteigt.

Sehr hohe Humusgehalte sind bei Acker-, Grünland- und anderen Formen der nicht-forstlichen Bodennutzung sichere Hinweise auf nasse Böden und damit auf Grundwasser- oder Stauwassereinflüsse. Nässe schränkt die Bodenbelüftung und damit den Abbau von Humus durch Mineralisation ein. Daher ist es für die Kennzeichnung der Versickerungsleistung nur von Interesse, die Humusgehalte im Bereich 0 bis 8% weiter zu unterteilen. Humusgehalte lassen sich in grober Annäherung aus dem Grad der Grau- und Schwarzfärbung der Böden abschätzen. Dabei ist die Eigenfarbe des Bodens zu beachten. Sande färben Humus dunkler als Lehme und Tone.

Carbonate (KA4, S. 109-110) treten im Boden überwiegend als Calciumcarbonate auf. Ihre Anwesenheit weist auf pH-Werte um den Neutralpunkt hin. Im Bereich neutraler pH-Werte finden die meisten Bodenorganismen ihre besten Lebensbedingungen vor. Entsprechend liegt eine starke Bodendurchporung und ein starker Regenwurmbesatz vor. Unter diesen Bedingungen erfolgt eine intensive Durchmischung (Bioturbation), Auflockerung und Durchporung des Bodens.

Bodenfeuchtewechsel im Unterboden kann auf Stauwasserschichten hinweisen. Weiterhin kann er in Sommermonaten Wasserausschöpfung durch Pflanzenwurzeln und damit die Durchwurzelungstiefe anzeigen.

Die Angaben zur Ermittlung des Bodenfeuchtezustandes enthält Tab. 22 der KA4 (S. 114).

Das Gefüge (KA4, S. 116-121) kennzeichnet die räumliche Anordnung der Festsubstanzpartikel in Böden und damit auch das Auftreten von Poren unterschiedlicher Größe und deren Verteilungsmuster.

Bei der Poren- bzw. Hohlraumgestaltung von Böden sind 2 Gruppen von Gefügeformen zu unterscheiden:

- Grundgefüge (Einzelkorn-, Kitt- und Kohärentgefüge)
- Aggregatgefüge (Krümel-, Subpolyeder-, Polyeder-, Prismen-, Platten- und Fragmentgefüge).

Zur Kennzeichnung der Porositätsmerkmale von Grundgefügeformen bedient man sich des Verfestigungsgrades (KA4, S. 122). Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, daß durch stoffliche Einlagerungen zwischen Sandkörnern ein Einzelkorngefüge in ein Kittgefüge übergeht. Damit verringert sich aber auch die Porosität. Weiterhin führen Tonpartikel, die bei einem Kohärentgefüge dichter zusammenlagern, zu festeren Böden und damit ebenfalls zu geringerer Porosität. Mit abnehmender Porosität steigt die Lagerungsdichte.

Die Beurteilung der aggregatbildenden Gefügeformen wird an einem großen Bodenstück vorgenommen. Es wird die Aggregatgröße ermittelt. Aggregate weisen eine höhere Lagerungsdichte auf als der gesamte Bodenkörper. Mit der Abnahme der Aggregatgröße nimmt die Zahl der Hohlräume zwischen den Aggregaten zu. Damit steigt mit der Abnahme der Aggregatgröße die Porosität und die Anzahl grober Poren. Entsprechend fällt die Lagerungsdichte geringer aus. Die Aggregatgrößengruppierung beschreibt die KA4. Mit abnehmender Porosität steigt die Lagerungsdichte. Entsprechend werden aus Verfestigungsgrad und Aggregatgröße die effektive Lagerungsdichte (Rohdichte trocken + 0.009% x Ton %) abgeleitet, in dem die effektive Lagerungsdichteklasse der Verfestigungs- bzw. Aggregatgrößeklasse gleichgesetzt wird.

Wurzeln (KA4, Tabelle 22, S. 130-131) haben je nach Vegetationstyp nur eine geringe Lebensdauer. Nach dem Absterben bilden sich Wurzelporen, über die Niederschlagswasser in den Boden eindringen und abgeleitet werden kann. Je stärker die Durchwurzelungsintensität ist, um so größer wird die Anzahl der Wurzelporen sein.

Es wird zwischen sichtbaren Grob- (> 2 mm Durchmesser) und sichtbaren Feinwurzeln (< 2 mm) unterschieden. Weitere Merkmale sind die Wurzelverteilung, wie unregelmäßig, nesterartig, in Spalten. Die Schätzungen der Durchwurzelungsintensität beruhen auf der Erfassung der Wurzelanzahl je dm² eines/r angeschnittenen Horizontes bzw. Schicht. Grob- und Feinwurzeln werden getrennt erfaßt.

Die biogenen Makroporen (KA4, S. 123-124) sind mit dem bloßen Auge erkennbar. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß sie von der Oberfläche bis mehrere Dezimeter Tiefe in den Boden reichen. Bei größeren Röhren, die durch Grobwurzeln und Regenwürmer entstehen, ist ihr Verlauf im Boden an der Grubenwand erkennbar und kann herauspräpariert werden. Die Größe und Anzahl der Poren der einzelnen Horizonte und Schichten kann an einem mit dem Spaten herausgebrochenen Bodenstück erfaßt werden. Dazu wird das Bodenstück horizontal aufgebrochen und die Poren werden ausgezählt.

Die zuvor beschriebenen biotischen Merkmalsausbildungen und Gefügemerkmale finden sich in der **Packungsdichte** wieder. Die Packungsdichte ist letztendlich ein Maß für die Locker- und Kompaktheit des Bodens.

In der Abbildung ist schematisch der Einfluß der Packungsdichte auf die vorher beschriebenen Bodeneigenschaften aufgezeigt.

Ableitung der Packungsdichte aus Gefügemerkmalen und Wurzelverteilung

Aggregatgröße	Zusammenhalt (Verfestigungsgrad)	Eindringwiderstand	Lagerungsart der Aggregate	Biog. Makroporenanteil	Wurzelverteilung	Packungsdichte (Pd.)
sehr fein bis fein	sehr lose (nicht verfestigt)	sehr gering	sperrig	sehr hoch	sehr gleichmäßig	Pd 1 sehr gering
sehr fein bis mittel	lose (schwach verfestigt)	gering	offen	hoch	fast gleichmäßig	Pd 2 gering
fein bis grob	mittel (mittel verfestigt)	mittel	halboffen	mittel	etwas ungleichmäßig	Pd 3 mittel
mittel bis grob	fest (stakt verfestigt)	hoch	fest geschlossen	gering	starke Häufung in Rissen	Pd 4 hoch
grob bis sehr grob	sehr fest (sehr stark verfestigt)	sehr hoch	geschlossen	sehr gering	sehr starke Häufung in Rissen	Pd 5 sehr hoch

Einfluß der Packungsdichte auf die Bodeneigenschaften

Packungsdichte	Anteil sekundärer Grobporen	se- gesättigte Wasserleitfähigkeit	Mittelporenanteil	ungesättigte Wasserleitfähigkeit	Durchwurzelbarkeit	mechanische Belastbarkeit
Pd1 sehr gering bis gering	sehr hoch	sehr hoch	geringer	geringer	sehr hoch	sehr gering
Pd2 mittel bis hoch	sehr gering	sehr gering	höher	höher	sehr gering	sehr hoch
Pd3 sehr hoch						

Klassifizieren, Bewerten und Darstellung der Bodenmerkmale

Die Ergebnisse der Feldaufnahme liegen im Feldaufnahmeblatt (Abb.2) vor. In diesem wurden bereits Grundkennwerte (Basismerkmale) klassifiziert eingetragen. Anhand dieser Klassenbildung erfolgt eine Gruppenbildung zur Kennzeichnung verschiedener Flächentypen und zur Bewertung der Flächen. Die Ausweisung von Flächentypen erfolgt nach Kriterien der Wasserversickerungseignung. Eine darüberhinausgehende Nutzung noch weiterer Bodenmerkmale sollte zur Wahrung der Übersichtlichkeit nicht vorgenommen werden. Die Aufnahme im Feldaufnahmeblatt muß jedoch darüber hinausgehen, um eine Klärung komplexer Bodenverhältnisse zu ermöglichen. Es muß hier betont werden, daß die Bewertung keine Aussage über die absolute Höhe der Infiltrationsrate ermöglicht, sondern Flächen mit günstigen und ungünstigen Bodeneigenschaften für eine Wasserversickerung ausweist.

Die Höhe der Wasserversickerung läßt sich mit der Infiltrationsmessung feststellen. Weichen die Erwartungen stark von den gemessenen Werten ab, so steuern andere als die ermittelten Eigenschaften die Wasserversickerung oder die Stelle der Infiltrationsmessung ist für die ihr zugeordnete Fläche nicht repräsentativ (vgl. 2.3.4).

Die Ausweisung zur Versickerung geeigneter Flächen erfolgt getrennt für natürliche und gestörte/anthropogen

überformte Böden. Sie gliedert sich in folgende Merkmalskomplexe (Abb.3):

1. Begrenzung des versickerungsfähigen Bodenvolumens (V)
2. Bodenarten (B)
3. Biotische Merkmale (WB)
4. Gefügemerkmale (A)
5. Zusatzmerkmale (Z)

Zur Bewertung der Flächen werden aus den Merkmalskomplexen (bei gestörten Böden sind die Merkmale 3 bis 5 häufig nicht zu bewerten) Kennziffern abgeleitet.

Als Beispiel sei aufgeführt: V1B1WB2A1Z2, vereinfacht V1B1A1- Braunerde aus lehmigen Sand, 2 Wurzeln je Quadratdezimeter bis 80 cm Tiefe, Verfestigungsgrad 2, mit 4 cm mächtigem Ah - Horizont. Für die weitere Nutzung sind zunächst nur die Merkmale mit dem Index 1 von Bedeutung. Daher kann die Kennziffer, wie oben geschehen, auch vereinfacht angegeben werden.

Für die Versickerungseignung von Standorten muß zunächst V1 erfüllt sein. Liegt V2 vor, dann muß selbst bei ausreichender Infiltrationsleistung eine sorgfältige Abwägung (z.B. Teilversickerung) vorgenommen werden. Mit V3 sind Flächen gekennzeichnet, die die Bodenuntersuchung für eine Versickerung ungeeignet ausweisen.

Ist V1 erfüllt, dann muß geprüft werden, wieweit eines oder mehrere der Bodenartenmerkmale, der biotischen Merkmale, oder der Gefügemerkmale auf ein "geeignet" hinweisen. Die drei genannten Merkmalskomplexe sind gleichwertig. Für den Hinweis "geeignet" reicht die Einstufung eines der Merkmalskomplexe als geeignet. Die Untersuchungen sollten dann durch Infiltrationsmessungen weitergeführt werden.

Erreicht die Einstufung bei allen Merkmalskomplexen B, WB, A nur ein bedingt geeignet, dann wird eine sorgfältige Abwägung erforderlich. Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Einstufung "bedingt geeignet" der Merkmalskomplexe B, WB, A durch die Kennziffer 2, kann der Merkmalskomplex Zusatzmerkmale herangezogen werden.

Ist nur V2 erfüllt, sollten die Untersuchungen nur dann weitergeführt werden, wenn die Merkmalskomplexe B, WB und A in ihrer Gesamtheit auf "geeignet" (Kennziffer 1) hinweisen. Erreicht die Einstufung eines der genannten Merkmale nur ein "bedingt geeignet" (Kennziffer 2), so kann zur Entscheidungsfindung auch hier der Merkmalskomplex Zusatzmerkmale herangezogen werden.

Unter bestimmten Bedingungen kann sowohl bei natürlichen als auch gestörten Böden, die zunächst als zur Versickerung ungeeignet eingestuft wurden, durch Melioration oder Sanierung (2.2) die Versickerungsleistung erhöht werden, so daß sie dann als "geeignet" eingestuft werden können (Abb.4).

2.2 Verbesserung der Versickerungsleistung durch Melioration und Sanierung

Sanierungs- und Meliorationsmaßnahmen zur Verbesserung der Versickerungsleistung sind zeit- und kostenintensiv und werden nur in Ausnahmefällen zu rechtfertigen sein (1.2).

Zur Sanierung und Melioration stehen folgende Maßnahmen zur Verfügung:

- Bodenaustausch
- Auflockerung
- Verdichtung
- Beimengungen

Bodenbelastungen lassen sich von Altlasten unterscheiden und werden getrennt erfaßt und behandelt. Für die Niederschlagswasserversickerung stellen beide Sachverhalte eine Gefährdung für Natur und Umwelt dar. Durch das vermehrte Wasserangebot im Bereich einer Versickerungseinrichtung können Schadstoffe möglicherweise ins Grundwasser gelangen. Im Gegensatz zu Altlasten, bei denen es sich um Altstandorte oder Ablagerungen handelt, deren Grenzen klar nachvollziehbar sind, haben Bodenbelastungen flächige Verbreitung mit fließenden Grenzen nach außen.

Um jegliche Gefährdung auszuschließen, muß bei einer Bodensanierung durch Bodenaustausch der gesamte kontaminierte Bodenkörper erfaßt werden. Dies erfordert eine technische Erkundung der Untersuchungsfläche, um Schadstoffquellen aufzufinden und deren Verteilungsmuster punktgenau zu erfassen. Der Boden muß im Bezug auf die beinhalteten Schadstoffe analysiert werden und bei Ausbaggerung entweder saniert oder deponiert werden.

Sind Böden aufgrund ihrer Substrateigenschaften für die Versickerung von Niederschlagswasser ungeeignet, bietet sich auch hier unter Umständen ein Bodenaustausch an. Der ausgehobene Boden kann in diesen Fällen (ebenso wie beim Austausch oberflächennah verdichteten Bodens) auf dem Grundstück verbleiben und nur im Bereich der Versickerungseinrichtung würde ein neuer Bodenkörper eingebracht, dessen Eigenschaften (vgl. Merkmalskomplexe 2.1) zur Versickerung geeignet sind.

2.2.1 Bodenaustausch

Der Bodenaustausch kann erfolgen, wenn die Bodenuntersuchungen ergeben haben, daß der anstehende Boden zur Versickerung ungeeignet ist. Dies ist dann der Fall, wenn

- an der Bodenoberfläche eine Verdichtung vorliegt, die eine ausreichende Infiltration des Niederschlagswassers nicht zuläßt und die Horizonte darunter zur Niederschlagswasserversickerung geeignet sind.
- an der Oberfläche eine geringmächtige Altlast aus einer früheren Aufschüttung oder aus sonstiger Kontamination des Bodens vorliegt, die sich nicht auf die darunter befindlichen Horizonte ausgedehnt hat, die sonst zur Versickerung geeignet sind.
- die Substrateigenschaften der oberen Horizonte (z. B. Ton oder hoher Humusgehalt) zur Ausbildung von Staulagen führt, die durch Auflockerung (siehe 2.2.2) nicht zu beseitigen sind.

Oberflächennahe Bodenverdichtungen können durch Druck von Baumaschinen, Verschlammung, Setzung und durch Einlagerung entstehen. Dieses Problem wird bei der Erstellung von Versickerungsmulden in erster Linie durch die Bautätigkeit verursacht. Dabei wird das Baugrundstück meist mit schweren Maschinen (LKW, Radlader, Bagger) befahren und nachhaltig verdichtet. Manche Böden können nachträglich gelockert werden (2.2.2). Ist dieses nicht möglich, kann ein Austausch erfolgen.

Die verdichteten Bodenbereiche, die bei den Bautätigkeiten entstehen, betreffen im Regelfall die obersten 20 cm bis 35 cm [13]. Dies hängt u. a. vom vorherrschenden Wassergehalt im Boden bei der Befahrung ab. Um einen möglichen Verdichtungsbereich zu bestimmen, sollten mit einem Bohrstock die Bereiche, auf denen die Mulden gebaut werden beprobt und mit einem unbefahrenen Bereich verglichen werden. In den Bohrstock wird etwa mit gleicher Kraft ein Messer über die gesamte Profiltiefe gedrückt. Durch den unterschiedlichen Eindringwiderstand im Bohrstockprofil kann halbquantitativ festgestellt werden, wo Verdichtungen durch mechanische Belastungen stattfanden. Wichtig ist hierbei, daß immer ein Vergleich zu einer Fläche, die von den Baumaßnahmen unbeeinflusst war hinzugezogen wird. Der verdichtete Bereich muß dann wie unter 2.2.2 beschrieben aufgelockert werden.

2.2.2 Auflockerung

Bestimmung der Lockerungsfähigkeit

Verdichtete Böden können aufgelockert werden, um ihre Eignung zur Versickerung zu verbessern. Verdichtete Böden müssen vor einer Auflockerungsmaßnahme auf ihre Lockerungsfähigkeit hin beurteilt werden. Die Kriterien hierfür sind Verschlammungsneigung und Gefügestabilität sowie die Tiefenlage vernäster Horizonte.

Böden mit hohen Schluff- und Feinstsandanteilen ffS (Bestimmung der Sandfraktionen nach KA4, Tab. 29, S.139) neigen zur **Verschlammung**, vor allem, wenn die Böden nur geringe Tongehalte aufweisen. Solche Böden sind für Lockerungsmaßnahmen ungeeignet. Lockerungsfähig sind hauptsächlich ungleichkörnige Lehmböden, bedingt lockereungsfähig sind genügend abgetrocknete Tonböden. Die Bewertung der Lockerungsfähigkeit nach der Bodenart erfolgt nach folgender Tabelle [nach [8], geändert]:

Lockerungsfähigkeit von Böden nach der Bodenart

(Gruppe 1 - geeignet, Gruppe 2 - bedingt geeignet, Gruppe 3 - ungeeignet)

Gruppe 1:	gS, mS, Sl3, Sl4, Sl2, St3, Ls2, Ls3, Ls4, Lts, Lt2, Lt3, Lu	X1
Gruppe 2:	Ut3, Ut4, Tt, Ts2, Ts3, Ts4, Tl, Tu2, Tu3, Tu4	X2
Gruppe 3:	fs, ffS, Sl2, Slu, Su2, Su3, Su4, Uu, Us, Uls, Ut2	X3

Die Bodenarten der Bewertungsgruppe X1 weisen eine sehr schwache bis schwache Verschlammungsneigung auf. Sie sind für Lockerungsmaßnahmen geeignet. Bodenarten der mit X2 bewerteten Klasse sind bedingt lockerungsfähig. Sie weisen eine mittlere Verschlammungsneigung auf. Bodenarten der Gruppe X3 neigen stark bis sehr stark zur Verschlammung. Böden, die bis zu einer Tiefe von 80 cm Bodenarten der Gruppe X2 oder X3 aufweisen, sollten keiner Auflockerung unterzogen werden.

Nach Lockerung sind die Böden hinsichtlich ihrer Merkmalskomplexe wie Böden mittlerer Lagerungsdichte (2.1.2.3) zu bewerten.

Bei lehmigen oder tonigen Böden ist die Wirkungsdauer der Auflockerung abhängig von der Gefügestabilität und Dispergierung. Böden mit deutlicher Dispergierungsneigung finden sich u.a. bei Böden aus mesozoischen Tonen (z.B. Pelosol-Pseudogley), [8]. Diese sind in der Regel für die Versickerung nicht geeignet.

Hinweise auf die Dispergierungsneigung liefert die Ausbildung des Bodengefüges. Typisch ist ein Makrogefuge als Säulengefüge, ohne daß Makrofeingefüge erkennbar sind, oder als Rißgefuge mit grobem Prismengefüge als Makrofeingefüge. Auf den Gefügegrenzflächen finden sich meist Tonhäutchen ohne daß es jedoch zu einer deutlichen Tonverlagerung aus dem Ober- in den Unterboden gekommen war [8]. Böden, die solche Merkmale aufweisen, sollten nicht aufgelockert werden. Sie sind zur Auflockerung ungeeignet.

Bei geringer **Austauschkapazität der Tonfraktion** kann, trotz ausreichendem Tongehalt (>17%) und geringer Dispergierungsneigung, die Stabilität des Gefüges unbefriedigend sein. Die Austauschkapazität ist abhängig von den vorliegenden Tonmineralen. Böden, in denen Tonminerale dominieren, die geringe Austauschkapazitäten aufweisen, entstehen auf folgenden, verbreiteten Gesteinen: Granit, Gneis; stärker verwitterter Geschiebemergel, Löß oder Schlick; extrem verwitterte Mergel- oder Kalkgesteine (z.B. tertiäre Verwitterungsdecke) sowie Juratone. In Zweifelsfällen sollte Auskunft beim Geologischen Landesamt eingeholt werden [8]. Auch auf solchen Böden sollte von einer Auflockerung abgesehen werden.

Vernäste Böden lassen sich nicht lockern. Reicht ein Grund- oder Stauwasserhorizont in den Bereich von 0 bis 80 cm Tiefe hinein, so ist von einer Auflockerung abzusehen.

Durchführung der Auflockerung

Zum Zeitpunkt einer Auflockerung sollte die Bodenfeuchte bindiger Böden unterhalb der Ausrollgrenze liegen. Die Bodenfeuchte nichtbindiger Böden sollte unterhalb der Fließgrenze liegen. (KA 4, Schätzung des Bodenfeuchtezustandes, Tab. 15, S. 114).

In der Regel sind nur in den Monaten Mai bis Oktober optimale Bodenfeuchtebedingungen für eine Auflockerung gegeben. Sie sind abhängig von der vorausgegangenen

Witterung. Je trockener der Boden, desto besser gelingt die Auflockerung.

Die zur Lockerung einzusetzende Technik sollte nach Art und Ausmaß der Verdichtung ausgewählt werden. Der Einsatz von Geräten, die eine Tiefendüngung, z.B. mit gefügestabilisierendem Kalk ermöglichen, sollte geprüft werden.

Zum Auflockern von Böden gibt es verschiedene Möglichkeiten.

oberflächliche Verdichtung bzw. Aufreißen der Oberfläche mit einem Rechen oder Harke	
Verschlammung (1 bis 3 mm):	
Verdichtungen bis 35 cm:	bei Mulden mit einem Spaten, bei flächenhaften Verdichtungen mit einem kleinen Raupenfahrzeug mit Pflug. Wichtig ist hierbei, daß große Schollen zerkleinert werden. Die Auflockerung darf wiederum nur bei einem bestimmten Wassergehalt durchgeführt werden. Dieser läßt sich aus der Konsistenz des Bodens abschätzen (siehe weiter unten).
Verdichtungen > 35 cm:	Tiefpflügen mit einem Tiefpflug,

Konsistenzzahl

Die Konsistenzzahl stellt den Quotienten der Wassergehaltsdifferenz von Fließgrenze und aktuellen Wassergehalt und dem plastischen Bereich (Plastizitäts-

zahl = Wassergehalt Fließgrenze – Wassergehalt Ausrollgrenze) dar. Tabelle X gibt einen Überblick der Konsistenzen, Konsistenzgrenze und –zahl.

Konsistenz (Zustandsform)	Konsistenzgrenze (Grenz-wassergehalt)		Wassergehalt (w) zur Zeit der Prüfung	Konsistenzzahl I_c
flüssig	Fließgrenze	wl	beliebig hoch	$I_c < 0$
breiig			$w > w_l$	$I_c = 0$
weich			$w = w_l$	$I_c = 0 \text{ bis } 0,25$
steif	Ausrollgrenze	wp	$w < w_p$	$I_c = 0,25 \text{ bis } 0,75$
halbfest			$w < w_p$	$I_c = 0,75 \text{ bis } 1,0$
fest			$w < w_p$	$I_c = 1,0$
	Schrumpfgrenze	ws	$w = 0$	$I_c > 1,0$

Maßnahmen nach der Auflockerung

Nach erfolgter Auflockerung sind Böden erhöht setzungsempfindlich. Sie sollten deshalb so wenig wie möglich

belastet werden. Fahrzeuge sollten die Fläche überhaupt nicht befahren. Weitere Bearbeitungsschritte, wie das Ausbringen geeigneten Saatguts, sind von Hand zu erledigen.

Das mechanisch erstellte primäre Lockerungsgefüge besteht aus mehr oder weniger groben Schollen, Klumpen oder Prismen. Druckentlastet und unter dem Einfluß wechselnder Durchfeuchtung und Austrocknung gliedern sich diese in kleinere Gefügeelemente als Bröckel und Polyeder. Dieses Sekundärgefüge ist zu stabilisieren. Dabei spielen Pflanzenwurzeln eine große Bedeutung. Sie vernetzen nicht nur die einzelnen Gefügeelemente, sondern sind auch Nahrung für Bodenorganismen, die den weiteren Verbau und die Gefügestabilisierung fördern. Hierfür kann ein Saatgut sinnvoll sein, welches einen hohen Anteil an Tiefwurzler aufweist. Es sollte aber darauf geachtet werden, daß diese sich auf eine folgende Raseneinsaat nicht negativ auswirken.

2.2.3 Verdichtung

Bisher wurde die Bodenverdichtung ausschließlich als Verhinderungsfaktor der Niederschlagswasserversickerung betrachtet, da ein verdichteter Boden eine geringere Wasserdurchlässigkeit aufweist als ein unverdichteter.

Böden, die eine zu hohe Wasserdurchlässigkeit und Infiltrationsrate aufweisen, sind aber ebenfalls für die Versickerung ungeeignet, da sie keine oder nur eine geringe Filterwirkung auf das Wasser ausüben. Um diese Filterwirkung zum Schutz des Grundwassers zu erhalten, wird gefordert, das Niederschlagswasser durch mindestens 20 cm belebte Bodenschicht sickern zu lassen, die einen k_f -Wert von $5 \cdot 10^{-3}$ m/s nicht überschreitet.

Kiesige Mittelsande und Lehmsande weisen eine hohe Luftkapazität auf und sind daher für Wasser gut durchlässig. In diesem Fall kann möglicherweise eine Verdichtung zur Erniedrigung der Infiltrationsrate durchgeführt werden. Diese Maßnahme sollte allerdings nur auf Bodenarten wie Sanden, keinesfalls aber auf tonig schluffigen oder schluffig lehmigen Böden Anwendung finden.

2.2.4 Beimengungen

Die Merkmalskomplexe von Böden können durch bestimmte Beimengungen verändert werden. Um Niederschlagswasserversickerung zu ermöglichen, können ggf. ungeeignete Böden oder Böden bei Aufschüttungen und Austausch mit bodenverbessernden Beimengungen vermischt werden. Solche Beimengungen können sein:

- Kalk
- Sand
- Bauschutt
- Recyclingmaterial
- Blähton
- Grobstoffkomposte
- Stroh

Kalk, Stroh und Komposte stabilisieren den Porenraum und fördern dadurch die Versickerungseignung, besonders Stroh und Grobstoffkomposte vergrößern den Porenraum und erhöhen somit die Speicherfähigkeit des Bodens. Die anderen oben aufgeführten Materialien erhöhen ebenfalls die Speicherfähigkeit des Bodens und verändern (in erster Linie Sand) die Bodenartenzusammensetzung.

Über den Einsatz von Kalk, Sand und Stroh liegen umfangreiche Informationen aus der Landwirtschaft vor, wo hingegen über die anderen Zuschlagstoffe keine oder nur wenige Literaturhinweise zu erhalten sind.

2.2.5 Hinweise zur technischen Ausführung der Arbeiten

Der Einsatz von Maschinen und Baufahrzeugen führt unter Umständen zur Verschlechterung des vorliegenden und nicht zur Erlangung des angestrebten Bodenzustandes.

Zufahrtwege für Baufahrzeuge können vor Beginn der Arbeiten festgelegt und möglicherweise durch Überdeckung oder Geotextilien gegen starke Verdichtung oder Verschlammung geschützt werden.

Die Einebnung und Modellierung des Bodens sollte möglichst per Hand erfolgen, um zu verhindern, daß der frisch geschüttete Boden bereits bei der Einbringung stark verdichtet wird.

Der Boden darf grundsätzlich nicht in feuchtem Zustand überfahren werden. Ein weitgehend unbedenklicher Einsatz von Maschinen kann durch den Einsatz von Tensiometern, mit denen die aktuelle Saugspannung des Porenraumes ermittelt werden kann, gewährleistet werden. Sinkt die Saugspannung unter pF 2,5 (300 hPa) ab, ist der Wassergehalt des Bodens zu hoch und eine ausreichende Stabilität des Porenraumes würde nicht mehr gegeben sein. Die Saugspannung muß jeweils unmittelbar vor Einsatz der Maschinen abgelesen werden. Wird der Boden in diesem Zustand dennoch befahren, wird der Porenraum zu stark zusammen gedrückt, so daß es zu Verdichtungen kommt. Der Einsatz von Tensiometern ist nach der Bodenschutzrichtlinie der Schweiz [9] dort im Bereich des Rohrleitungsbaus bereits gängige Praxis.

Hinweise, welche Böden bei welchem Wassergehalt bearbeitet und befahren werden dürfen, gibt u.a. DIN 18915. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die angegebenen Bodengruppen nur bedingt mit denen im Leitfaden angegebenen übereinstimmen. Im Anhang findet sich eine Gegenüberstellung. Generell kann festgehalten werden:

- Nichtbindige und nichtbindige steinige Böden dürfen bei allen Bodenfeuchten bearbeitet werden, ohne daß es zu einer Gefügeschädigung kommt. Ausnahme hier ist jedoch der Humusgehalt: bei Humusgehalten (> 5 Gew.-%) kann es zu oberflächennahen Verschmierungen kommen und die Versickerung beeinträchtigen.
- Schwachbindige Böden dürfen nur bei Konsistenzzahlen $\geq 0,75$ bearbeitet werden.
- Bindige Böden dürfen nur bei Konsistenzzahlen $\geq 1,0$ bearbeitet werden, da sie entweder extreme Kornumlagerung erfahren oder zu intensiv zusammengeknetet oder verschmiert werden.

Eine Bearbeitung dieser Bodengruppen im falschen Zustand ist ein klarer Verstoß gegen die Regeln der Technik.

Beim Einbau des Oberbodens muß darüber hinaus beachtet werden, daß der pH-Wert im neutralen bis schwach basischen Bereich liegt. Um einer Versauerung entgegen zu wirken, soll der Muldenboden weiterhin 2 Gew.-% freien, schwerlöslichen Dolomitmalk enthalten. Pro Tonne Boden sind dies 20 kg Kalk, bzw. pro m³ Boden 30 kg Kalk. Alle 3 Jahre sollte der Kalkgehalt überprüft und gegebenenfalls nachgekalkt werden.

Wie hoch etwa der Kalkgehalt im Boden ist, kann mit Hilfe einer 10%igen Salzsäure vor Ort bestimmt werden. Tritt bei Aufträufeln der Säure auf den Boden keine sichtbare (Bläschenbildung) noch hörbare Reaktion auf, ist der Boden carbonatfrei. Sind die Reaktionen schwach (leicht erkennbare Bläschenbildung, hörbar), so liegt der Carbonatgehalt bei 0,5 bis 2 Gew.-%. Bei schwacher, nicht anhaltender, jedoch sichtbare Bläschenbildung durch CO₂-Entwicklung liegt der Carbonatgehalt bei etwa 3 Gew.-%. Enthält der Boden Dolomitmalk, fallen die Reaktionen später und schwächer aus

2.2.6 Setzungsverhalten sanierter Böden

Die Setzung von Böden ist im wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

- Vom Setzungswiderstand, d. h. von dem Widerstand, den ein Boden einer Setzung entgegensetzt.
- Von der Stärke der Setzung, damit wird die Höhe der Setzung beschrieben.

Beide Faktoren werden durch den Tongehalt des Bodens stark beeinflusst. So setzt sich ein Boden (z. B. Sand) mit geringerem Tongehalt im Gegensatz zu einem Boden mit hohem Tongehalt sehr leicht, da er der Setzung wenig Widerstand entgegensetzt. Die Setzungshöhe ist gering.

2.2.6.1 Bodenartengruppen nach ihrem Tongehalt

Tongehalt [%]	Bodenartengruppe
≤ 10	Ss, Su 2, Su 3, Su 4, Us, Uu, Sl 2, Sl 3, Ut 2
10 - 20	St 2, St 3, Sl 4, Slu, Uls, Ut 3, Ut 4, Ls 2, Ls 3, Ls 4
20 - 45	Ts 4, Ts 3, Lts, Lt 2, Lt 3, Lu, Tu 3, Tu 4
> 45	Ts 2, Tl, Tu 2, Tt

Stärke der Setzung und Setzungsempfindlichkeit sind für die Bodenartengruppen wie folgt zu unterscheiden:

- Böden mit bis 10 % Ton setzen sich leicht, die Höhe der Setzung ist gering.
- Böden mit 10 - 20 % Tongehalt setzen sich noch leicht, die Höhe der Setzung ist ebenfalls gering. Der Setzungsvorgang wird kaum von der Korngrößenzusammensetzung und dem Humusgehalt (< 5 %) beeinflusst.
- Böden mit 20 - 45 % Tongehalt setzen sich ebenfalls noch leicht, die Höhe der Setzung steigt etwas, mit Zunahme des Ton- und Humusgehaltes (< 5 %) nimmt die Setzungsneigung ab.

- Böden mit > 45 % Tongehalt setzen sich nur schwer, das Ausmaß der Setzung ist jedoch sehr hoch.

2.3 Quantifizierung der Bodeneigenschaften durch Infiltrationsmessungen

Die Einschätzung der Eignung zur Niederschlagswasserversickerung durch bodenkundliche Felduntersuchungen (siehe 2.1.2.2 und 2.1.2.3) muß durch Versickerungsmessungen quantifiziert werden. Dies geschieht durch Infiltrationsmessungen und bei Stau- und Grundwasserböden sowie sonstigen in der Tiefe begrenzten Böden durch zusätzliche Ermittlung des Grobporenvolumens in Form der Luftkapazität.

2.3.1 Bestimmung geeigneter Meßstellen

Die Lage der Meßstellen hängt von mehreren Faktoren ab. Diese sind

- Repräsentativität für die ausgewiesene Flächeneinheit
- Lage der für die Niederschlagswasserversickerung vorgesehenen Muldenfläche

Es sollte darauf geachtet werden, daß die Infiltrationsmeßstelle möglichst in der Nähe einer bodenkundlichen Feldaufnahmestelle (siehe 2.1.2.2) liegt.

2.3.2 Messung der Infiltrationsraten

Verfahren und Durchführung

Die Infiltrationsraten weisen, wie oben ausgeführt, zwischen kleinen Teilflächen erhebliche Unterschiede auf. Daher muß die Messung auf großen Versickerungsflächen erfolgen. Dem wird z.B. durch den Einsatz großer Infiltrationsringe in Form von Doppelringinfiltrometern mit Innenringdurchmesser vom 30 cm und Außenringdurchmesser von 60 cm entsprochen. Parallelmessungen können auch noch Abweichungen der Infiltrationsraten von mehreren 100% aufweisen. Daher sind die Infiltrationsraten

- mit mindestens 3 Doppelringinfiltrometermessungen (nach DIN 19682, Teil 7)
- mit einer Beetinfiltrometermessung von mindestens 1 m² Grundfläche zu bestimmen.

Das Doppelringinfiltrometer wird in möglichst horizontaler Lage leicht in den Boden eingeschlagen, wobei auf einen dichten Sitz des Infiltrometers zu achten ist. Daraufhin werden Innen- und Außenzylinder gleich hoch mit Wasser gefüllt. Das Wasser im Außenzylinder soll eine zu starke laterale Ausbreitung des im Innenzylinder versickernden Wassers verhindern. Der Innenring ist mit einer Skala versehen, so daß die Sickerhöhe pro Zeiteinheit, d.h. die Infiltrationsrate, bestimmt werden kann. Ein Versuch wird jeweils so lange fortgeführt, bis die Infiltrationsrate annähernd konstant wird. In der Regel reichen dazu 120 Minuten (2 Stunden) aus. Anschließend werden die Ringe aus dem Erdreich gezogen, so daß sich das Restwasser verteilt.

Beim Beetinfiltrometer werden in rechteckiger Anordnung 4 Bleche der Abmessung ≥ 100 cm Länge und 25 cm Höhe 10 cm tief an den Ecken wasserdicht miteinander verschraubt und in den Boden 10 cm tief eingelassen. Zur Wasserversorgung wird je nach zu erwartender Infiltrationsra-

te ein Tank oder Behälter mit Schlauchanschluß an eine Wasserleitung/Hydrant benötigt. Ein Außenrechteck analog dem Außenring des Doppelringinfiltrometers wird nicht benötigt, da infolge der großen Fläche des Beetinfiltrometers der Einfluß seitlicher Wasserversickerung gering ist. Diese Versuchsanordnung entspricht annähernd einer Versickerungsmulde. Dem Beetinfiltrometer sollte daher der Vorzug gegeben werden.

Infiltrationstest bei sanierten Böden

Bei der Umlagerung oder Schüttung von Böden wird das natürliche Gefüge verändert und zerstört. Daher benötigt ein frisch umgelagerter Boden genügend Zeit zur Regeneration und zur Ausbildung eines stabilen Bodengefüges. Aus diesem Grund darf nicht unmittelbar nach der Einbringung des Bodens mit der Niederschlagswassereinfiltration begonnen werden.

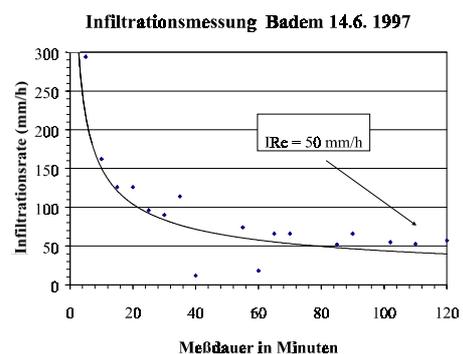
Infiltrationstests zur Eignungsprüfung und Bemessung der Versickerungsanlagen müssen mit besonderer Vorsicht durchgeführt werden, da durch ein hohes Wasserangebot die Poren zerstört werden können. Dieses führt zu Sackungen und Einlagerungen, die die weitere Niederschlagswassereinleitung ausschließen würden. Die Vorgehensweise bei der Infiltrationsmessung muß sich daher den gegebenen Bodenverhältnissen anpassen. Es wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

An der Bodenoberfläche wird vorsichtig das Infiltrometer eingeschlagen und die vegetationslose Bodenoberfläche ist mit einem Vlies (Schaumstoff, Geotextil) zu bedecken, damit die Oberfläche bei Wasserzugabe nicht verschlämmt.

Vor Beginn der Messung wird die zu untersuchende Fläche nach und nach mit kleinen Mengen Wasser beschickt, um ein Zusammenfallen der Bodenporen und somit eine Sackung zu verhindern. Diese Maßnahme sollte je nach Mächtigkeit der Bodenschicht mindestens einen Tag dauern. Im Anschluß an die schrittweise Vorbeschickung erfolgt die Infiltrationsmessung wie oben beschrieben.

Darstellung der Ergebnisse

Die Infiltrationsraten IR (mm/h) werden in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen, so daß der zeitliche Verlauf der Infiltration erkennbar wird. Die folgende Abbildung zeigt hierfür ein Beispiel. Die Infiltrationsrate der letzten Messung wird als Endinfiltrationsrate (IRE) zusätzlich als Zahl angegeben.



Verlauf der Wasserversickerung

Die verschiedenen Böden werden typische Infiltrationsverläufe und Infiltrationsintensitäten aufweisen. Diese werden weiter unterteilbar sein in verschiedene Formen der Überprägung durch die Bodennutzung, das Mikrolief der Bodenoberfläche und die Vegetation. Diese Merkmale werden oben unter 2.1.1 bereits erfaßt. Anhand des Vergleiches typischer Verläufe mit dem tatsächlich ermittelten Verlauf wird es möglich, die

Verlauf wird es möglich, die Ergebnisse abzusichern. Ist dieses nicht gegeben, dann dienen die abweichenden Ergebnisse als Hinweis auf weitere und bisher nicht berücksichtigte Faktoren, die die örtliche Infiltration bestimmen. Es ist daher sinnvoll, nicht nur die Infiltrationsraten und die Endinfiltration zu bewerten, sondern auch solche Grundtypen des Infiltrationsverlaufes festzulegen, die für einzelne Boden- und Nutzungsgruppen charakteristisch sind. In der Literatur bestehen hierzu kaum Vorbilder. Die Ergebnisse aller im Rahmen von Versickerungsgutachten durchgeführten Infiltrationsmessungen sollten daher dem Landesamt für Wasserwirtschaft zugeleitet werden. Hiermit kann dann eine Dokumentation typischer Infiltrationskurven erstellt werden.

Bewertung der Ergebnisse

Bewertet werden:

- die Höhe der Endinfiltrationsrate . Dies ist die Infiltrationsrate nach etwa 2 Stunden Wasserversickerung. Sie gibt die Wasserversickerungsleistung des feuchten Bodens wieder, wie er nach anhaltenden Niederschlägen und längeren Niederschlagsperioden vorliegt.
- ggf. Ähnlichkeit mit bekannten Infiltrationsverläufen.

Die Endinfiltrationsraten werden in Klassen eingeteilt.

Klasse	Infiltrationsrate (mm/h)	Kurzzeichen
sehr gering	< 6	IR 1
gering	6-20	IR2
mittel	21-60	IR3
hoch	61-200	IR4
sehr hoch	> 200	IR5

2.3.3 Ermittlung der Luftkapazität

Für den Fall, daß das in den Boden sickernde Wasser nicht sofort oder zügig in den Untergrund abgeleitet werden kann, wird das im Boden befindliche Grobporenvolumen zum Speicher. Dies ist insbesondere bei Stauwasser- und Grundwasserböden der Fall. Die Kapazität des Grobporenvolumens kann in Form der Luftkapazität aus Bodenart, Humusgehalt und Lagerungsdichte (siehe 2.1.2.2) gemäß [3] abgeschätzt oder im Anschluß an die Infiltrationsmessung im Bodenlabor bestimmt werden. Für Erstabschätzungen sind für gering durchlässige Böden 3 %, für mittel durchlässige Böden 10 % und für gut durchlässige Böden 15 % anzusetzen (KA4, S.303).

Darstellung der Ergebnisse

Die Summen der Luftkapazitätswerte bis zur jeweiligen Tiefe geben die maximal zusätzliche Speicherung für Wasser an.

Weist die Luftkapazität (LK) im gesamten Profil Werte > 3 Vol. % auf, dann werden die LK-Werte je dm Tiefenabschnitt aufaddiert. Dies ergibt die Speicherkapazität für Infiltrationswasser (SKI). Treten Horizonte mit LK-Werten von 3 Vol. % und kleiner im Profil auf, dann werden die

LK-Werte nur bis in diese Tiefe aufaddiert und als Speicherkapazität für Infiltrationswasser bewertet.

Merkmale der Wasserspeicherleistung

Die als Luftkapazität (LK) bekannte zusätzliche Speicherleistung im Grobporenvolumen ist von Bodenart, Humusgehalt und Volumengewicht trocken abhängig ([3], vgl. dort Tabellen 54 -58). Somit kann aus dem Aufbau von Böden aus Horizonten und aus der Beschaffenheit der Horizonte die Speicherkapazität für Infiltrationswasser (SKI) geschätzt werden. Liegen Messungen der Luftkapazität vor, dann kann daraus die Speicherkapazität für Infiltrationswasser berechnet werden.

Ursachen einer geringen Speicherkapazität für Infiltrationswasser können liegen in der Bodenart, dem Humusgehalt und im Bodentyp. Die Bodenart Ton und Schluff, Humusgehalte von 8-30% und die Bodentypen Pseudogley, Gley, Pelosol, Ranker, Rendzina bewirken eine Verringerung der SKI.

Pseudogleye, Gley, Pelosol, Ranker und Rendzinen begrenzen die Tiefe und damit die Möglichkeiten der für eine Wasserspeicherung zur Verfügung stehenden Bodenschicht.

Bewertung der Ergebnisse

Die Speicherkapazität für Infiltrationswasser (SKI) bezogen auf 1 m Tiefe wird auf der Grundlage der Luftkapazität (LK) wie folgt in Klassen eingeteilt:

Klasse	Speicherkapazität für Infiltrationswasser mm	Kurzzeichen
sehr gering	<30	SKI1
gering	31-70	SKI2
mittel	71-120	SKI3
hoch	121-180	SKI4
sehr hoch	>180	SKI5

2.3.4 Plausibilitätsprüfung

Die Vorauswahl der Flächen, die für eine Wasserversickerung geeignet sind, geht von der erreichbaren Endinfiltrationsrate aus. Diese sollte möglichst hoch liegen, einen Wert von 5×10^{-3} m/s [1, 2] jedoch nicht überschreiten, um eine ausreichende Reinigung des Sickerwassers während der Bodenpassage zu gewährleisten. Die Einschätzung der Infiltrationsraten kann aus der Gesamtheit des Auftretens der auf ein "geeignet" hinweisenden Merkmalskomplexe B1, WB1, A1, Z1 abgeleitet werden.

Werden Infiltrationsraten bestimmt, die der Einschätzung aus der bodenkundlichen Felduntersuchung entsprechen, dann ist die Fläche als geeignet auszuweisen. Die ermittelten Infiltrationsraten können dann im Rahmen einer Klassenbewertung, d.h. nicht als Einzelmeßwerte, weiter für die Muldendimensionierung verwendet werden.

Erreicht die Endinfiltrationsrate nicht die erwartete Höhe, dann sind die möglichen Ursachen zu ergründen. Sie sind zunächst in den oben bereits dargestellten Merkmalskomplexen der Bodeneigenschaften, des Reliefs und der Nutzung zu suchen. Es sind außerdem an einer weiteren Stelle Infiltrationsmessungen durchzuführen. Ist deren Ergebnis ebenfalls unzureichend, dann sollten alternative Lösungen erarbeitet werden (z.B. Mulden-Rigolen o.ä.). Fällt das Ergebnis der zusätzlichen Infiltrationsmessung günstig für eine Muldenversickerung aus, dann muß eine Abwägung

der auf der Fläche ungünstig und günstig wirkenden Eigenschaften erfolgen. Liegen die Ergebnisse der Infiltrationsmessungen im Grenzbereich der Versickerungseignung, so sollte für eine abschließende Bewertung eines Standortes die Speicherkapazität für Infiltrationswasser (SKI, vgl. 2.3.3) mit einbezogen werden und/oder alternative Lösungen erarbeitet werden (z.B. Mulden - Rigolen o.ä.).

2.3.5 Übertragung der Meßergebnisse auf die Fläche

Alle Ergebnisse sind auf die Flächen als Klassenangaben zu übertragen. Die Kennzeichnung von Flächen durch Einzelwerte ist infolge der natürlichen wie auch anthropogen bedingten Heterogenität von Böden und Bodeneigenschaften nicht sinnvoll. Durch Klassenangaben wird ein großer Teil der Heterogenität in die Aussage zur Bodeneignung für eine Wasserversickerung auf der Fläche mit eingeschlossen.

Die Flächenkennzeichnung erfolgt durch die Angaben der bestimmenden Merkmalskomplexe nach 2.1.2 und der Endinfiltrationsleistung nach 2.3.2. Bei Stauwasser- und Grundwasserböden sowie Böden mit begrenzter Tiefe ist dies zu ergänzen durch die Speicherkapazität (SKI) für Infiltrationswasser (2.3.3).

2.3.6 Langzeitstabilität der Versickerungsleistung

Bodentyp wie auch Bodenart verändern sich außer durch starken Eingriff des Menschen nicht. Dagegen können Gefüge und biotische Merkmale einer zeitlichen Veränderung unterliegen.

Wesentlichste Merkmale für die Langzeitstabilität des Gefüges wie auch der biotischen Merkmale und damit der Versickerungsleistung sind der Carbonatgehalt und der pH-Wert.

Böden mit einem Carbonatgehalt von 1 - 5% weisen eine hohe Langzeitstabilität auf. Bei höheren Carbonatgehalten ist nicht auszuschließen, daß durch eine Verlagerung tieferliegende Poren teilweise verschlossen werden.

Böden mit pH-Werten des Ober- und Unterbodens zwischen pH 6 und 7 sind mittelfristig stabil. Sie sollten mit mehreren kleineren Kalkgaben (insgesamt 500 - 1000 g CaCO_3/m^2) über 3 bis 5 Jahre hinweg aufgekalkt werden. Aufgrund der Korngrößenform von Kalk würden höhere Kalkgaben an der Bodenoberfläche einen Teil der Porenöffnungen verschließen. Böden mit pH-Werten unter pH 6 sind auf ihren Kalkbedarf hin genauer zu untersuchen.

Insbesondere bei meliorierten und sanierten, aber auch natürlichen Böden können sich durch die Niederschlagswasserversickerung die Kräftesysteme im Boden verändern. Die eine Dichtlagerung fördernden Kräfte werden dabei in aller Regel erhöht. Eine Stabilisierung geschieht

daher durch eine Veränderung der Kornkontaktflächen, z. B. durch Zugabe organischer Substanz (Stroh), Wurzeln, Hyphen, Kalk oder synthetische Stabilisatoren. Ein wesentlicher Faktor beruht dabei auf der Veränderung der Wechselwirkung zwischen fester und flüssiger Phase des Bodenkörpers. Pflanzenwurzeln und Pilzhypen sowie die Bildung der Mykorrhiza und die dadurch angesiedelten Mikroorganismen stabilisieren nachhaltig das Bodengefüge und bilden bei Absterben einzelner Wurzeln präferentielle Fließpfade aus.

Bis die Vegetationsschicht (Rasenansaat) flächendeckend ausgebildet ist, ist allerdings die Dauer von mindestens zwei Vegetationsphasen (d. h. 2 oder mehr Jahre) erforderlich. Ebenfalls beeinflusst die Wahl der Saatgutmischung die Funktionalität der Mulde. In [10] werden Empfehlungen zur Wahl der Saatgutmischungen gegeben.

Durch die Ausbildung des Wurzelwerkes und das Pflanzenwachstum sowie durch allmähliche Aggregatbildung durch Befeuchtungs- und Austrocknungsprozesse kann bei lehmigen, schluffigen, und tonigen Böden innerhalb von 4 - 8 Jahren eine günstige Gefügeausbildung und damit eine Erhöhung der Infiltrationsrate in Mulden erwartet werden.

2.4 Standortauswahl für die Versickerung in Mulden

Die durch bodenkundlichen Felduntersuchungen und Infiltrationsmessungen für eine Niederschlagswasserversickerung als geeignet ausgewiesenen Flächen werden auf einer Karte eingetragen. Die Karte kann dazu dienen, dezentralen Mulden oder Gemeinschaftsmulden zum Anschluß mehrerer Gebäude zu planen. Letzteres kann vor allem auf Flächen wechselnder Versickerungseignung erforderlich werden.

Die Lage der Mulde muß mit dem Bauablauf verträglich sein (vgl. 1.2). Weiterhin sind die Bedeutung der Mulde für die Gartenplanung sowie die Abstände der Mulde zu Gebäuden (vgl. 2.1.1) und Nachbargrundstücken zu beachten.

3 Grundlagen und Durchführung der Muldendimensionierung

Die Mulde soll eine zügige Niederschlagswasserversickerung auf einer begrenzten Teilfläche eines Grundstückes ermöglichen. Die Größe der Muldenfläche ist im wesentlichen abhängig von

- der gewählten Bemessungshäufigkeit
- der regional unterschiedlichen Höhe der Niederschläge bei Starkregenereignissen
- Infiltrationsrate des Bodens
- Größe der zu entwässernden Dachfläche und anderer zum Anschluß vorgesehenen versiegelten Flächen.

Weiterhin sind die Tiefe der Mulde und der in der Mulde maximal angestrebte Wasserstand von Bedeutung. Letzteres wird auch durch die angestrebte Entleerungszeit der Mulde (in der Regel etwa zwei Tage) bestimmt; d.h. bei

geringen Durchlässigkeiten müssen unter Umständen auch geringe Muldentiefen gewählt werden. Das bedeutet, daß die Niederschlagswasserversickerung in flachen Mulden auf Endinfiltrationsraten von etwa $\geq 1 \times 10^{-6}$ m/s beschränkt bleibt und selbst dann kann aufgrund des relativ großen Flächenbedarfs der Mulden nicht in allen Fällen das gesamte Niederschlagswasser zur Versickerung gelangen. Hier sind Kombinationen unterschiedlichen Niederschlagswasserbewirtschaftungen (vgl. 1.1) gefragt.

3.1 Bemessungsregen

Für die Muldendimensionierung ist zunächst, die grundsätzliche Fragen zu klären, welche Bemessungshäufigkeit einer derartigen Anlage angestrebt wird. Vernünftigerweise sind als Bemessungsgrundlage Niederschläge zur Versickerung zu bringen, die im Mittel etwa alle 5 oder 10 Jahre auftreten ($n = 0,2$ bzw. $0,1$). Diese Jährlichkeit orientiert sich an den bisher in Deutschland üblichen Überstauhäufigkeiten der Entwässerungssysteme, die bei vorhandenen Kanalnetzen – bezogen auf Geländeoberkante – etwa bei $n = 0,3$ liegen. Eine Dimensionierung der Mulden mit $n = 0,2$ bzw. $0,1$ liegt also im Vergleich zu "normalen" Kanalnetzen auf der sicheren Seite.

Im folgenden wird von einer Wiederkehrzeit der maßgebenden Niederschlagsereignisse von 5 Jahren ausgegangen. Dies ist auch gängige Praxis. Entsprechende Bemessungsniederschläge werden z.B. aus Regenserien, die aus kontinuierlichen Regenreihen abgeleitet werden, ermittelt. Diese Möglichkeit ist jedoch nur für relativ wenige Fälle gegeben. In der Regel werden Blockregen verwendet, die durch Niederschlagsdauer und mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit charakterisiert sind. Hierbei wird noch häufig von Regenspendenlinien ausgegangen, die aus den "Reinhold'schen Regenreihen" resultieren, wie auch im Arbeitsblatt ATV A138 [4] vorgeschlagen wird.

Wie Reinhold selbst im Abschlußbericht [5] seiner Regenauswertungen 1940 ausführt, sollten mit den abgeleiteten Regenspendenlinien einfache Intensitäts-Dauerbeziehungen innerhalb vertretbarer Unsicherheiten gewonnen werden. Wegen der z.T. sehr kurzen Auswertzeiträume und wegen weiterer Mängel im Datenmaterial konnte er bestehende Unterschiede im Verlauf von Regenspendenlinien nicht feststellen. Da inzwischen jedoch ausreichend lange Meßreihen vorliegen und außerdem verfeinerte statistische Methoden verfügbar sind, konnten diese Starkregenauswertungen auf besseren Grundlagen neu durchgeführt werden. Dabei wurden auch die klimatischen und orographischen Unterschiede innerhalb von Rheinland-Pfalz berücksichtigt. Die "Reinhold'schen Regenreihen" sind daher als Bemessungsgrundlage nicht mehr heranzuziehen. Die angesprochenen neueren Auswertungen lassen sich aus KOSTRA [6] ("Koordinierte Starkregen-Regionalisierung-Auswertung") entnehmen. Die Ergebnisse sind in Rasterkarten dargestellt bzw. können dem umfangreichen Kartenwerk entnommen werden.

Die maßgebende Bemessungsregendauer ist insbesondere abhängig von

- dem regionalen Starkregenverhalten
- den Versickerungseigenschaften des Bodens (Endinfiltrationsrate)
- der geplanten Muldentiefe (Speichermöglichkeit)

Im Gegensatz zur Kanalnetzdimensionierung, bei der die maximalen Durchflüsse eine Rolle spielen, kommt bei der Muldendimensionierung v.a. der Rückhalt (Volumen) zum Tragen. Dies bedeutet, daß in Abhängigkeit von den o.g. Einflußgrößen für die Bemessung von Versickerungsmulden auch längere als die für die Kanalnetzdimensionierung üblichen 15 Minuten herangezogen werden müssen.

Zur Bestimmung der maßgebenden Regendauer und der entsprechenden Niederschlagshöhe lassen sich mit Hilfe von KOSTRA [6] (für die gewählte Bemessungshäufigkeit, z.B. 5 Jahre) Niederschlags-Höhen-Dauer-Funktionen (Abb. 5) ableiten.

3.2 Dimensionierungsansatz

Als grundlegender Ansatz für die Muldendimensionierung wird das Kontinuitätsprinzip herangezogen. Die Summe aller Ein- und Ausgaben in das System *Mulde* in jedem Augenblick ist gleich der Speicherungsänderung im System. Als weitere Bedingung wird für die Speicherung jeweils eine Maximalbedingung angenommen, d.h. die Verhältnisse Muldenfläche zu angeschlossener versiegelter Fläche implizieren eine maximale Ausnutzung der vorhandenen Speichermöglichkeiten.

Als Eingaben in das System wird der Niederschlag der angeschlossenen Fläche sowie der Niederschlag, der auf die Versickerungsfläche selbst trifft, angenommen. Als Ausgabe aus dem System wird die Abgabe des Wassers in den Untergrund angenommen. Die Abgabe wird gleich der ermittelten Endinfiltrationsrate (ggf. der Ober-/Untergrenze der Endinfiltrationsklasse, vgl. 2.3.2) gesetzt. Die Endinfiltrationsrate ist die Wassermenge, die pro Zeiteinheit mindestens infiltriert. Die tatsächliche Infiltrationsrate liegt aufgrund der Speichermöglichkeiten i.d.R. höher (vgl. 2.3.2), ist aber von der Vorfeuchte des Untergrunds abhängig. Sie wird deshalb zur Bemessung nicht herangezogen, stellt aber einen Sicherheitszuschlag dar. Bei Grenzfällen (vgl. 2.3.3) kann ggf. noch die Luftkapazität als zusätzliche Speichergröße bei der Bemessung mit berücksichtigt werden.

Entgegen der häufig geäußerten Befürchtung, daß Versickerungsmulden bei Frost versagen, ist davon auszugehen, daß

- die meteorologische Wahrscheinlichkeit eines Bemessungsereignisses im Anschluß an eine Frostperiode als sehr gering einzustufen ist und damit die Speicherkapazität der Mulde allein schon zur Aufnahme des anfallenden Niederschlagswassers ausreicht,
- die Wärmekapazität von Niederschlagswasser ausreicht den Boden zumindest in Teilen aufzutauen,

- auch bei gefrorenem Boden die hydraulische Funktion der Infiltrationswege insbesondere der Makroporen in der Regel gewährleistet ist und
- die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, daß ein durch einen Vorregen gesättigter Boden tiefgründig gefriert (geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Wärmekapazität von Wasser).

Es ist somit von einer einwandfreien hydraulischen Funktion der Anlage auszugehen [11] und kein weiterer Sicherheitszuschlag erforderlich.

3.3 Muldendimensionierung

Die Muldendimensionierung läßt sich wie folgt herleiten:

1. Herleitung der Muldenfläche:

$$MF = MFZ \times VF$$

2. Maximale Speicherung in Mulde und Boden:

$$S_{MAX} = \underset{\text{Muldenspeicherung}}{MF \times MT} + \underset{\text{Bodenspeicherung}}{MF \times SKI}$$

3. Kontinuitätsbedingung bei maximaler Speicherung:

$$S_{MAX} = \underset{\text{Niederschlag auf die Mulde}}{N \times MF} + \underset{\text{abflußwirksame Fläche}}{N \times VF} - \underset{\text{Versickerung aus Mulde + Boden}}{MF \times ENDINF}$$

4. Gleichung 3 läßt sich nach MFZ auflösen:

$$MFZ = N / (MT + SKI - N + ENDINF)$$

MF	= Muldenfläche	L ²
MFZ	= Mulden-Flächenzahl = Verhältnis von MF zu VF	[-]
VF	= angeschlossene abflußwirksame Fläche (z.B. Dachfläche)	L ²
S _{MAX}	= maximale Speicherung	L ³
MT	= Muldentiefe	L
SKI	= Speicherkapazität für Infiltrationswasser (Ansatz in besonderen Fällen, vgl. 2.3.3)	L
N	= Niederschlag	L
ENDINF	= Endinfiltration	L

Während des Berechnungszeitintervalles werden die Prozesse als stationär angesehen.

Diese Gleichung wird bei gegebener Endinfiltrationsrate und Muldentiefe mit Hilfe der Niederschlags-Höhen-Dauer-Funktion für jede Niederschlagsdauer gelöst. Er-

gebnis ist die Mulden-Flächenzahl als Funktion der Niederschlagsdauer. Wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, weist die Funktion ein Maximum auf. Dieses Maximum legt die Höhe und Dauer des Bemessungsregens und die Mulden-Flächenzahl zur Dimensionierung der Mulde bei vorgegebener Muldentiefe und Endinfiltration fest.

3.4 Vereinfachte Planung

Ein vereinfachtes Verfahren (Abb.1) zur Planung von Versickerungsmulden kann nach der Vorauswahl geeigneter Flächen (2.1) angewendet werden bei:

- offensichtlich geeigneten Flächen (z.B. Sandböden mit ausreichendem Grundwasserflurabstand)
- grundsätzlich geeigneten Flächen, sofern für die Versickerung ein großes Platzangebot besteht.

Hierzu wird die Infiltrationsleistung der Böden mit Hilfe der Kartieranleitung [3] abgeschätzt und die MFZ unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages über das örtliche Niederschlagsverhalten [6] ermittelt (3.3.).

Bei großen zur Verfügung stehenden Flächen kann in der Regel eine MFZ von 0.2 für eine Muldentiefe von 30 cm, eine MFZ von 0.3 bei einer Muldentiefe von 20 cm und eine MFZ von 0.6 bei einer Muldentiefe von 10 cm herangezogen werden. Ggf. sind aufgrund örtlicher Besonderheiten v.a. im Niederschlagsverhalten Zu- oder Abschläge vorzunehmen.

3.5 Beispielhafte Auswertungen

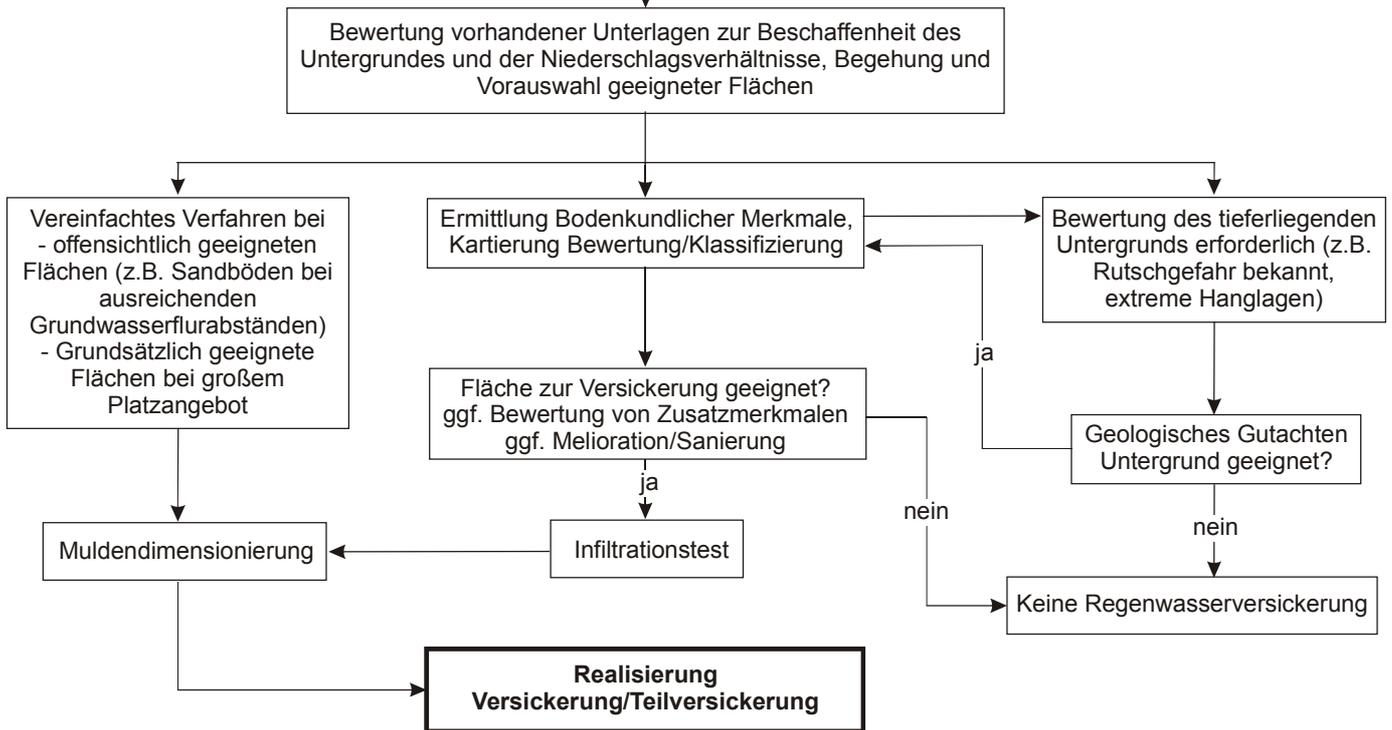
Für den Bereich Bad Kreuznach wird die Ermittlung der Mulden-Flächen-Zahl beispielhaft dargestellt. In den Abbildungen 6 - 10 ist die Mulden-Flächen-Zahl als Funktion der Regendauer für verschiedene Endinfiltrationsraten dargestellt. Aus diesen Abbildungen sind auch die Einflüsse der Muldentiefe und der ggf. angesetzten Speicherkapazität für Infiltrationswasser auf der Grundlage der Luftkapazität (Abb. 10 bezogen auf 50 cm Bodentiefe, vgl. 2.3.3) zu entnehmen. Abbildung 11 zeigt für 6 verschiedene Standorte zusammenfassend die Mulden-Flächen-Zahl für eine 30 cm tiefe Mulde als Funktion der Endinfiltrationsrate.

4 Literatur

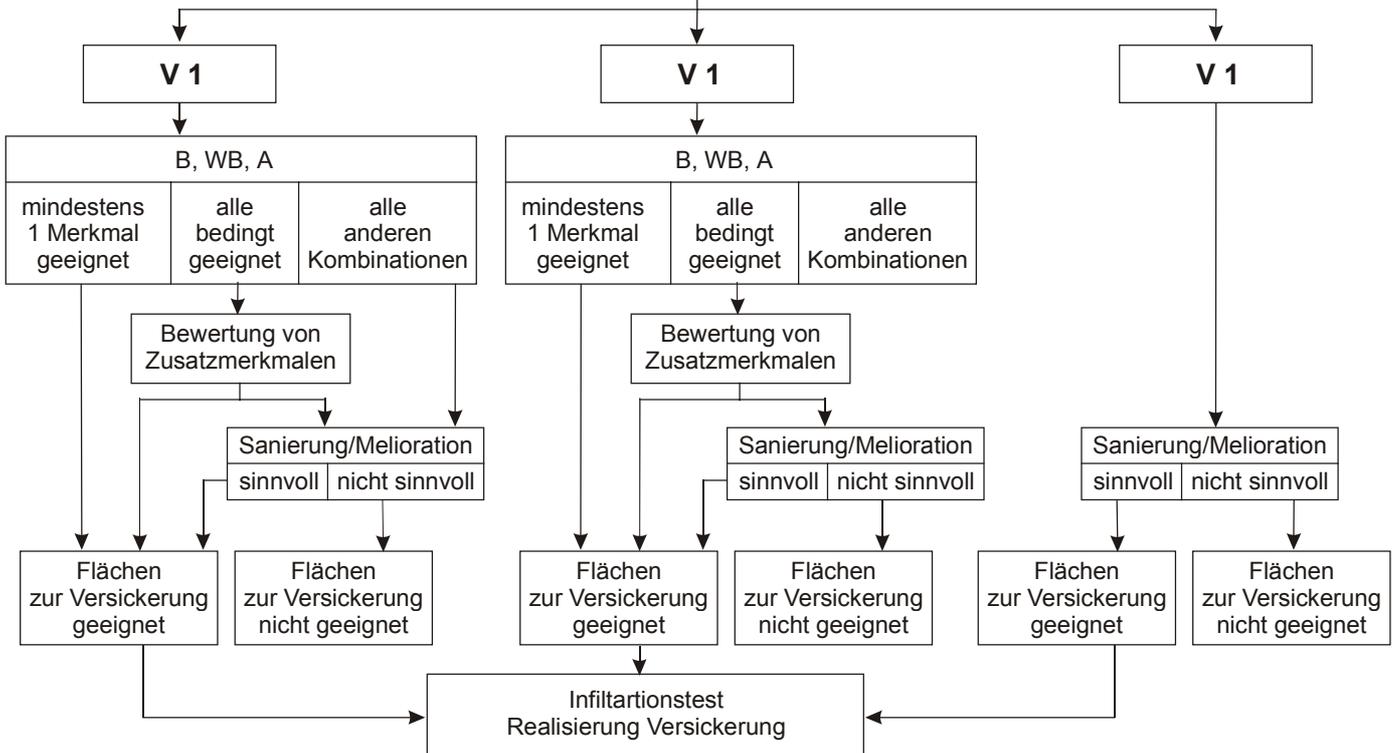
- [1] GEOLOGISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ: *Handlungsschema zur Versickerung von Niederschlagswasser befestigter Flächen, insbesondere der Versickerung in Wasserschutzgebieten*, Mainz 1997 (unveröffentlicht)
- [2] ATV (Hrsg.): *Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe 1.4.3, St. Augustin 1996*
- [3] ARBEITSGRUPPE BODEN (Hrsg.): *Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage*. Hannover (E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart) 1994. (= Informationen aus den Bund-/Länder-Arbeitsgruppen der Geologischen Dienste)
- [4] ATV (Hrsg.): *Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser ATV Arbeitsblatt 138, korrigierter Nachdruck* St. Augustin 1992.
- [5] REINHOLD, F.: *Regenspenden in Deutschland Grundwerte für die Entwässerungstechnik, GE 1940* In: *Archiv für die Wasserwirtschaft*, Jg. 1940.
- [6] BARTELS, H.; G. MALITZ; S. ASMUS ET AL: *Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland KOSTRA*, Offenbach am Main (Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes) 1997.
- [7] MEUSER, H.: *TECHNOGENE SUBSTRATE ALS AUSGANGS-GESTEIN DER BÖDEN URBAN-INDUSTRIELLER VERDICHTUNGS-RÄUME - DARGESTELLT AM BEISPIEL DER STADT ESSEN*. INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE, UNIVERSITÄT KIEL, BAND 35, 1996.
- [8] DVWK (HRSG): *BODENKUNDLICHE GRUNDUNTERSUCHUNGEN IM FELDE ZUR ERMITTLUNG VON KENNWERTEN MELIORATIONS-BEDUERFTIGER STANDORTE, TEIL III ANWENDUNG DER KENNWERTE FÜR DIE MELIORATION*, DVWK- REGELN ZUR WASSERWIRTSCHAFT, H.117; BONN 1986
- [9] BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (HRSG.): *RICHTLINIEN ZUM SCHUTZE DES BODENS BEIM BAU UNTERIRDISCH VERLEGTER ROHRLEITUNGEN*, Eidgenössische Druck-Sachen- und Materialzentrale, BERN 1997
- [10] STECKER, A.: *EMPFEHLUNGEN ZUR WAHL DER SAATGUT-MISCHUNG SOWIE DER KORNVERTeilUNG DER MUTTERBODEN-SCHICHT DES MULDEN-RIGOLEN-SYSTEMS*; INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, HYDROLOGIE UND LANDWIRTSCHAFT-LICHEN WASSERBAU, UNIVERSITÄT HANNOVER
- [11] REMMLER, F., HÜTTER, U. UND STECKER, A.: *HYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN AN EINEM MUDLEN-RIGOLEN-SYSTEM*; KORRESPONDENZ ABWASSER, 45, 657-669, 1998
- [12] BRONSTERT, A., DEMUTH, N., MEUSER, A. (1999): *Einfluß von Versiegelung mit anschließender Versickerung des Niederschlagswassers auf den Wasserhaushalt von Hängen*. Wasser u. Boden.

ANHANG:

Planung Regenwasserversickerung



Flächenbewertung auf Grundlage der Bodenmerkmale



Feldaufnahmeblatt zu Bodenkennwerten der Niederschlagswasserversickerung (in Anlehnung an KA4 1994)

Titeldaten																					
TK-Nr.		Projekt-Nr		Profil-Nr		Datum der Aufnahme			Bearbeiter		Rechtswert					Hochwert		Höhe ü.	Aufschlußart	Bemerkungen	
1		2		3		Jahr	Monat	Tag	5		6					7		NN	9	10	
Aufnahmesituation																					
Relief							Bodenabtrag / Bodenauftrag		Nutzungsart		Vegetation	Witterung	Anthropogene Veränderungen		Bemerkungen						
Neigung	Exposition	Wölbung	Reliefformtyp	metrische Angaben zum Reliefformtyp		Mikrorelief	Lage im Relief														
Horizontbezogene Daten																					
lfd Nr.	Horizont- untergrenzen		Ho- ri- zont sym bol	Bo- denart	Bodenfarbe	Hu- mus %	Car- bo- nat %	pH CaCl ₂	Bo- den- feu- chte	Gefüge- form	Aggre- gat- größe	Verfesti- gungs- grad	Risse	Wur- zel- poren	Bioge- ne Makro- poren	Lage- rungs- dichte	Durch- wurze- lungsin- tensität	Wur- zelver- tei- lung	Regen- würmer	Techno- gene Substra- te %	Bemer- kungen/ sonstige Merkmale
	Tie- fe cm	Form, Schär- fe u. Lage																			
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
Profilkennzeichnung																					
Bodentyp			Humus- form	Wasserstand unter GOK cm	Vernässungs- grad	Höchstwasser stände, cm	Stausohlentiefe cm	Festgesteintiefe cm	Tiefe Grob- boden > 50%, cm	Tiefe Tongehalt, cm			Bemerkungen								
										> 25%	> 45%	> 65%									

1. Versickerungsfähiges Bodenvolumen (V)

	0-40 cm	40-80 cm	> 80 cm
Grundwassereinfluß (*)	V3	V3	V2
Stauwassereinfluß (**)	V3	V3	V2
Festgesteinstiefe	V3	V3	V2
Steingehalt > 50 % (***)			
- bei lockerer Lagerung bzw. porösen Steinen	V1	V1	V1
- bei dichter Lagerung dichter Steine im Gesteinsverband	V3	V3	V2
anthropogen überformte/gestörte Böden (****)	V3	V2	V2
hohe Lagerungsdichte	V2	V2	V2

* erkennbar an der Graufärbung des Bodens bzw. an freiem Wasser im Profil

** erkennbar an Marmorierungserscheinungen (Rostflecken)

*** bei hohen Steingehalten verminderte Filterwirksamkeit des Bodens wahrscheinlich, Zufuhr belasteter Wässer vermeiden

**** Schadstoffpotential technogener Materialien beachten

2. Bewertung der Bodenarten (B)

2a. Bodenarten (B) bei mittlerer Lagerungsdichte

Bewertung ohne Tiefenwechsel der Bodenart

Gruppe G1: S, Sl, St, Su, Ls, Uls -> B1

Gruppe G2: Slu, Lu, Us, Tu3, Tu4 -> B2

Gruppe G3: Lt, Lts, U, Ut, T, Tl, Tu2 -> B3

2b. Bodenarten (B) bei hoher Lagerungsdichte

Bewertung ohne Tiefenwechsel der Bodenart

Gruppe H1: S, Sl, Su2, St2, Ls2 -> B1

Gruppe H2: Sl4, Su3, St3 -> B2

Gruppe H3: Slu, Su4, Ls3, Ls4, Lt, Lts, Lu, U, Uls, Ut, T, Tl, Tu -> B3

a) Bewertung bei Tiefenwechsel

Wechsel von ... nach ...	schon in 0-40 cm	in 40-80 cm	erst unterhalb 80 cm
G1/G2 bzw. H1/H2	B2	B1	B1
G1/G3 bzw. H1/H3	B3	B2	B1
G2/G3 bzw. H2/H3	B3	B3	B2

b) Bewertung bei Tiefenwechsel

Wechsel von ... nach ...	schon in 0-40 cm	in 40-80 cm	erst unterhalb 80 cm
G2/G1 bzw. H2/H1	B1	B2	B2
G3/G1 bzw. H3/H1	B2	B2	B3
G3/G2 bzw. H3/H2	B2	B3	B3

3. Biotische Merkmale (WB)

	nur bis 40 cm	nur bis 80 cm	bis > 80 cm
Makroporen oder Grobwurzeln, (Durchmesser > 2 mm) mehr als 3 Stück/dm ²	WB2	WB1	WB1
Feinwurzeln, Durchmesser < 2mm, > 2 Stück/dm ²	WB3	WB2	WB1
Feinwurzeln, Durchmesser < 2mm, > 5 Stück/dm ²	WB2	WB1	WB1
geringere Wurzel- bzw. Porengehalte		WB3	

4. Bewertung der Gefügemerkmale (A)

	schon in 0-40cm	erst in 40-80cm	erst ab 80cm
Aggregatgröße > 20mm	A3	A3	A3
Aggregatgröße 5-20mm	A3	A3	A1
Aggregatgröße < 5mm	A2	A1	A1

oder

	schon in 0-40cm	erst in 40-80cm	erst ab 80cm
Verfestigungsgrad 4 oder 5	A3	A3	A3
Verfestigungsgrad 3	A3	A2	A1
Verfestigungsgrad 1 oder 2	A2	A2	A1

5. Bewertung von Zusatzmerkmalen

	nur in 0-40cm	auch in 40-80cm	auch unterhalb von 80cm
Wurzelporen > 1mm	Z3	Z2	Z1

	schon in 0-40 cm	erst in 40-80 cm	erst ab 80 cm
Carbonate vorhanden	Z1	Z2	Z3
pH-Wert > 6	Z1	Z2	Z3
pH-Wert < 6		Z3	

Mächtigkeit, Form und Schärfe des Ah-Horizontes (außer bei Ackerböden)

Mächtigkeit, cm	bis 2 cm = Z3	2-5 cm = Z2	über 5 cm = Z1
Form der Horizontgrenze	waagrecht = Z3	wellig = Z2	taschenförmig = Z1
Schärfe der Horizontgrenze	scharf = Z3	deutlich = Z2	diffus = Z1

	nein	nur in 0-40 cm	auch unterhalb von 40cm
Lagerungsdichte gering bis mittel	Z3	Z2	Z1

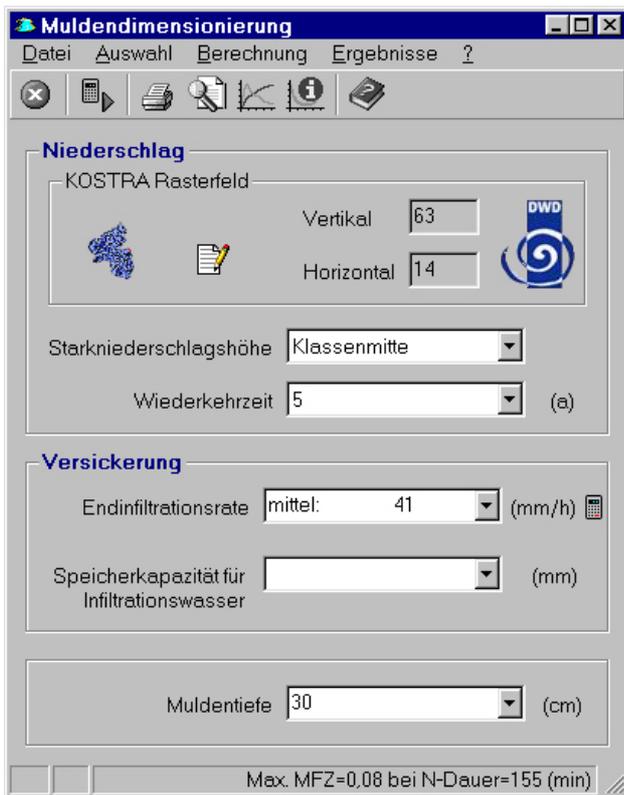
Bearbeitbarkeit von Bodengruppen (in Anlehnung an DIN 18915)

Bodenart nach Leitfaden	Bodengruppe DIN 18196 (Beispiel)	Bearbeitbarkeit ohne Gefügeschädigung
S (kiesig)	alle Sande und Kiese,	keine Einschränkungen
Sl, St, Su, Us, U, (kiesig)	schwach bindige und schwach bindige steinige Böden, Sandlöß, Löß, Tertiärsand	erst nach oberflächiger Abtrocknung bei mindestens halbfester Konsistenz ($I_c \geq 0,75$)
Ls, Uls, Slu, Tu3, Tu4, Lt, Lts, Ut, T, Tl, Tu2	bindige und bindige steinige Böden, stark bindiger und stark bindiger steiniger Boden stark lehmiger Sand, sandiger Lehm, Geschiebelehm, leicht plastische bis ausgeprägt plastische Schluffe und Tone, Lößlehm	erst nach oberflächiger Abtrocknung bei mindestens halbfester Konsistenz ($I_c \geq 1,00$)

Kurzdokumentation MUDI

Mudi unterstützt den Anwender, für den Bereich Rheinland-Pfalz sinnvolle Lösungen bei der Dimensionierung von Versickerungsmulden zu finden. Das Programm rechnet nach dem im Leitfaden „Flächenhafte Niederschlagswasserversickerung“ vorgegebenen Algorithmus.

Das Hauptfenster von Mudi dient der Eingabe der Größen, die zur Muldendimensionierung notwendig sind. Über die Menüleiste und die Schaltflächenleiste werden Aktionen ausgeführt wie z.B. Start der Berechnung, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse, etc..



Niederschlag

KOSTRA: Ein Klick auf das Rheinland-Pfalz-Symbol öffnet das Kartenfenster von Mudi. Dort kann man, unterstützt durch verschiedene Layer, die Zuordnung zu einem KOSTRA-Rasterfeld ermitteln.

Die durch das Rasterfeld festgelegten Bereiche der Bemessungsniederschläge können über das Tabellen-Symbol bearbeitet werden. Aus lizenzrechtlichen Gründen funktioniert das nicht, wenn bereits ein Rasterfeld festgelegt wurde.

Über das Logo des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wird die Online-Hilfe geöffnet und zeigt einen Artikel des DWD zum KOSTRA-Atlas.

Starkniederschlagshöhe: Aus einer Liste wird ausgewählt, ob der untere, der obere oder der Klassenmittelwert als Bemessungsniederschlag verwendet werden soll.

Wiederkehrzeit: Aus einer Liste wird die Bemessungs-Wiederkehrzeit ausgewählt.

Versickerung

Endinfiltrationsrate: Auswahl eines Wertes über die Klassenbezeichnung der Liste oder Eingabe eines Wertes über die Tastatur. Ein Klick auf das Taschenrechner-Symbol öffnet ein neues Fenster mit einem Umrechner für Durchlässigkeits-Einheiten.

Speicherkapazität für Infiltrationswasser:

Auswahl eines Wertes über die Klassenbezeichnung der Liste oder Eingabe eines Wertes über die Tastatur.

Muldentiefe: Auswahl der Muldentiefe aus der Liste oder Eingabe eines neuen Wertes über die Tastatur.

