Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

Band: 65 (1967)

Heft: 2

Artikel: Der Boden als poröses Mehrphasensystem und seine Entwässerbarkeit

Autor: Grubinger, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-221516

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik

Revue technique Suisse des Mensurations, de Photogrammétrie et du Génie rural

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik; Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie; Fachgruppe der Kulturingenieure des SIA

Editeurs: Société suisse des Mensurations et Améliorations foncières; Société suisse de Photogrammétrie; Groupe professionnel des Ingénieurs du Génie rural de la SIA

Nr. 2 · LXV. Jahrgang **Erscheint monatlich** **15. Februar 1967**

Der Boden als poröses Mehrphasensystem und seine Entwässerbarkeit

Von Prof. Dr. H. Grubinger, ETH, Zürich

Nach einem Referat für den Kulturtechnischen Fortbildungskurs 1967: Drainage mittels Kunststoffen

Zusammenfassung

Die Anwendung der Kunststoffe in der Bodenentwässerung, sei es als Filtermaterial oder besonders ausgebildetes Drainrohr, zwingt dazu, die Funktion des Wassers im Boden und seine Beeinflußbarkeit neu zu überdenken.

Das zentrale Problem hiebei ist der optimale Strömungsvorgang im System Boden–Filter–Rohr. Da der Boden selbst ebenfalls ein komplexes dynamisches Mehrphasensystem ist, wird man veranlaßt, vorerst den Aufbau der verschiedenen Strukturformen der Böden neuerlich zu studieren. Dazu muß man von der vorgegebenen Textur ausgehen, den Einfluß physiko-chemischer Phänomene auf die einzelnen Kornfraktionen beobachten und sich der Beurteilung der meliorationsbedürftigen Bodentypen (Gley, Podsol usw.) erinnern. Die Untersuchung der Ursachen einer Bodenvernässung und die Kenntnis der Hydraulik poröser Medien bilden den Ausgangspunkt für die technisch zweckmäßige, weil auch wirtschaftliche Lösung. Die vorliegende Arbeit soll, über die allgemeinen Grundlagen hinausgehend, die Befassung mit der modernen Kunststofftechnik in der Entwässerung erleichtern. Es gibt in der Bodenverbesserung keine simple Rezeptur; sie ist und bleibt echte Ingenieurarbeit.

Résumé

L'emploi de matières plastiques dans le domaine de l'assainissement du sol, soit comme matériel de filtrage, soit comme tuyaux de drainage, nous oblige de reconsidérer la fonction de l'eau dans le sol et les différentes façons de l'influencer.

Le problème central, c'est l'écoulement optimal dans le système sol–filtre–tuyaux. Puisque le sol lui-même est aussi un système polyphasique complexe et dynamique, on est amené tout d'abord a réétudier les différentes formes structurelles des sols. A cette fin, il nous faut partir de la

texture donnée, observer ensuite l'influence des phénomènes physico-chimiques sur les différentes fractions granulométriques et tenir compte des différents types de sol qui ont besoin d'être assainis (Gley, Podsol, etc.). L'examen des causes de la submersion du sol et la connaissance de l'hydraulique des matières poreuses sont la base pour une solution technique appropriée et économique.

L'étude ci-après tend à faciliter la compréhension de la technique moderne d'utilisation des matières plastiques dans l'assainissement du sol. Dans le domaine de l'amélioration des sols, il n'y a pas de simples recettes; l'intervention de l'ingénieur restera toujours nécessaire.

Einleitung

Die systematische Flächenentwässerung mittels offener Gräben und in den Boden versenkter Drainstränge hat innerhalb der letzten 100 Jahre besonders in kühl-humiden Klimazonen riesige Landflächen einer intensiven Nutzung zugänglich gemacht. Wir wissen aber auch, daß die Bewässerung in ariden und semiariden Regionen ohne systematische Drainage vielfach erfolglos bleiben muß. Diese Erfolge mußten jedoch mit zahlreichen Rückschlägen erkauft werden, weil die empirische Arbeitsweise überall dort versagt, wo die Böden extreme Eigenschaften zeigen. Es bedurfte jahrzehntelanger Forschung und praktischer Erprobung, um paradox erscheinende Phänomene überhaupt erklären zu können. Ein Beispiel hiezu sind die vollgesättigten Schluffböden, welche das Wasser nicht an die Drains abgeben.

So haben wir uns heute mit drei Gegebenheiten auseinanderzusetzen:

- Man verlangt die Verbesserung von Böden, die bisher als schwer oder nicht entwässerbar galten, sowie die neuerliche Sanierung von alten nicht mehr funktionierenden Anlagen.
- Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, Mechanisierung und neue Werkstoffe zwingen uns ein schärferes Kalkül auf.
- Die wissenschaftlichen Erkenntnisse in der gesamten Bodenforschung und insbesondere das Wissen vom Ineinanderwirken physikalischer, chemischer und biologischer Abläufe erlaubt uns, in Anwendung auf die Praxis systematischer als bisher vorzugehen.

Das Ziel dieses Kurses kann es daher nicht nur sein, über Kunststoffrohre zu informieren, sondern auch eine Einführung über die Grundlagen hiefür zu bieten. Wir wünschen wieder klarzustellen, daß es in der Drainage kein Einheitsrezept für die optimale Lösung geben kann. Das wirtschaftlichste Projekt ergibt sich im wesentlichen aus Entscheidungen auf Grund vertiefter Einsichten in die komplexen Vorgänge im Boden.

Der Boden als komplexes und veränderliches Mehrstoff- (Mehrphasen-) System

In bezug auf die Bodenmelioration betrachten wir als Boden nur die oberste mehr oder weniger mächtige Verwitterungsdecke, die unter Einwirkung von Klimafaktoren, Vegetation und Bodenleben aus dem Mutter-

gestein, sei dieses nun Fest- oder Lockergestein, entsteht. Die nun zu besprechenden Erscheinungen sind in der Mehrzahl auch für die Baugrundtechnik von Bedeutung.

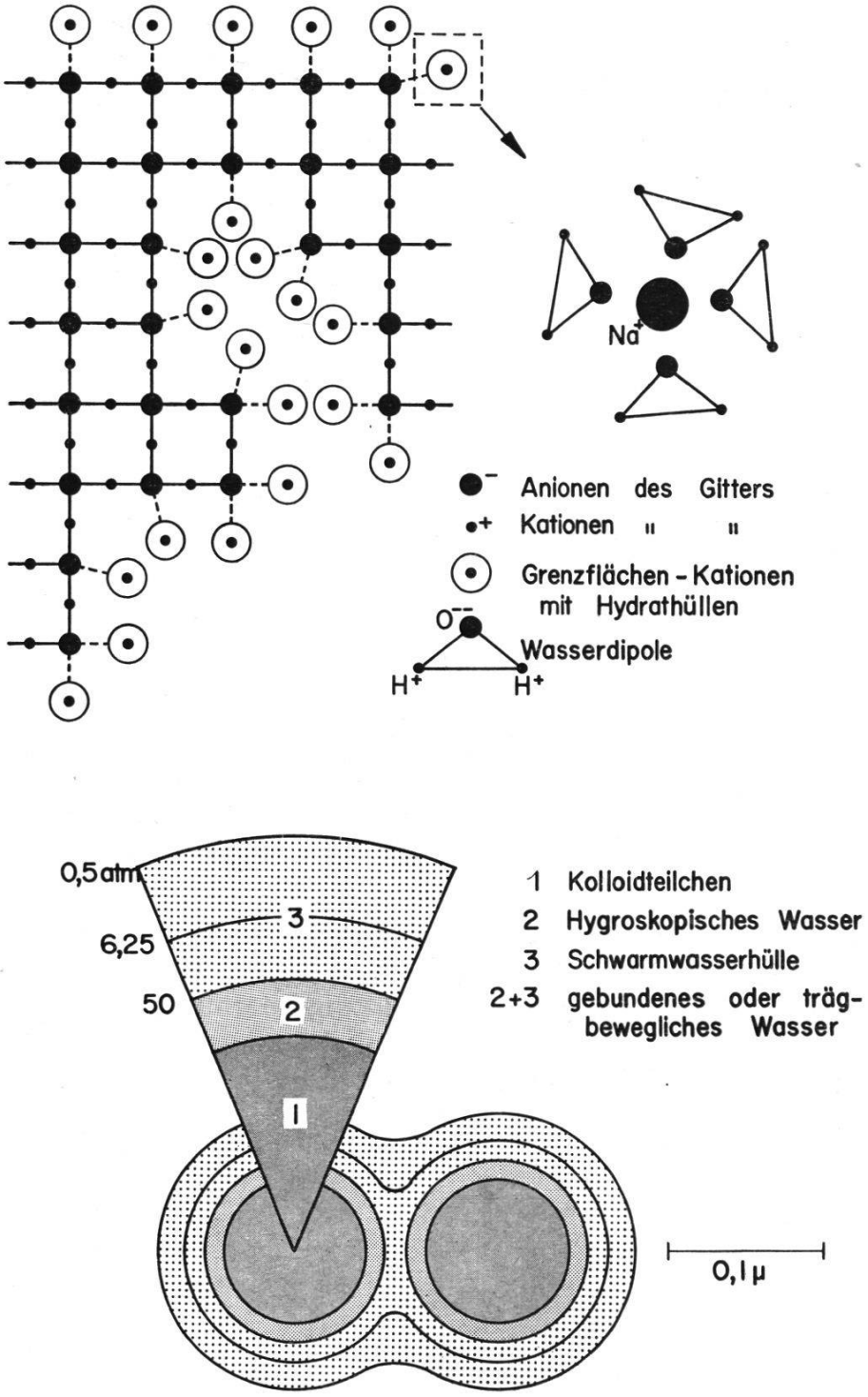


Abb. 1: Kristallgitter mit Grenzflächenkationen; Hydratation eines Na-Ions (Wasserdipole). Schwarmwasserhüllen (nach *Laatsch* und *Vageler*)

Einige Erkenntnisse aus dem Grenzbereich von Bodenphysik und Bodenchemie

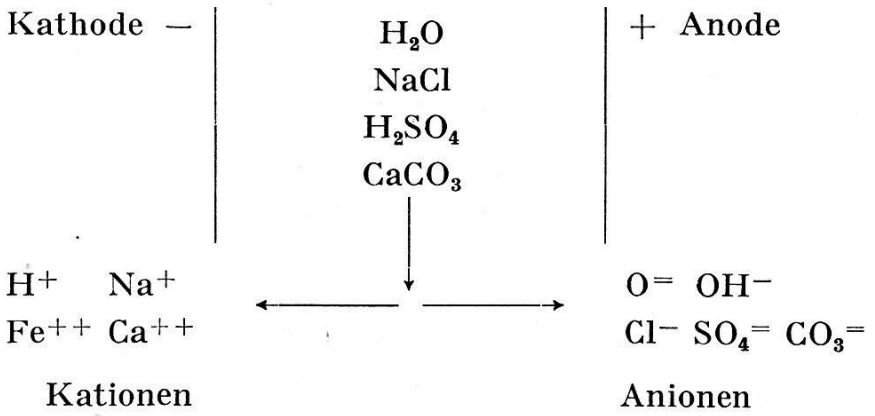
Die Bodendynamik samt der Wasserbewegung wird im wesentlichen von drei Kräftegruppen beherrscht; es sind dies:

- die Gravitationskräfte, die Wasserbewegung im Boden beeinflussend;
- die chemischen Bindungskräfte mit kolloid- und elektrochemischen Vorgängen;
- die Molekularkräfte mit thermodynamischen Vorgängen.

Die chemischen Kräfte binden als elektrostatische Valenzen der Atome diese zu Molekeln. Innerhalb der Kristallgitter sind alle *Valenzen* gebunden. An den Randflächen, den sogenannten *Grenzflächen,* bleiben freie Valenzen übrig, die ein elektrostatisches Feld aufbauen. Da nun zum Beispiel 1 g Tonboden nach *Deuel* 500–800 m² Oberfläche aufweist, ist die Voraussetzung für die Anziehung anderer geladener Partikel gegeben. Auf diese Weise können Gasmoleküle, Ionen und besonders Moleküle mit Dipolcharakter gebunden (sorbiert) werden. Beim *Dipol,* wie zum Beispiel beim Wassermolekül, fällt der Schwerpunkt der beiden positiven H^+-Ladungen nicht mit dem $O^=$-Ion zusammen.

Diese *Sorption,* im Boden vor allem in der Form der Wasseranlagerung oder *Hydratation* bekannt, bewirkt die Tonquellung, wobei Wasser sowohl an die Grenzflächen angelagert als auch zwischen den Schichten eingelagert wird. Die Hydratationsenergie übersteigt dabei die molekularen Bindungskräfte und rückt die Partikel auseinander.

Wenn wir heute mit sogenannten Austauschern unser Trinkwasser aufbereiten oder damit Dekontaminierung radioaktiv verseuchter Substanzen versuchen und durch Gesundkalken oder Gipsen der Böden diese verbessern, anderseits aber bei Anreicherung von Natrium in den Böden einen Strukturverfall wahrnehmen, handelt es sich immer nur um ein und dasselbe Phänomen, den *Ionenaustausch* im Boden. Lösen wir Substanzen (Säuren, Laugen, Salze) in Wasser, so zerfallen deren Molekel teilweise in Atome und Atomgruppen; man sagt, sie sind in Ionen dissoziiert. Legt man mittels Elektroden an solch eine Lösung Spannung an, beginnen die Ionen zu wandern und transportieren dabei die Elektrizität. Diese sogenannte *elektrolytische Dissoziation* bewirkt dann eine Trennung der Ionen entsprechend ihrer Ladung und Wanderungsrichtung in Anionen und Kationen.



Die Bodenteilchen adsorbieren nun An- und Kationen. Im allgemeinen ist der Boden (insbesondere Ton) meist negativ geladen; es werden daher mehr Kationen sorbiert. Die Ionen selbst sind nun verschieden stark mit Wasserhüllen umgeben und demnach verschieden stark isoliert. Damit ist auch die *Eintauschstärke* weitgehend bestimmt, und man kennt zum Beispiel für ein- und zweiwertige Metallkationen Reihen des Hydratations- und Isolationsgrades.

In diesem Zusammenhang ist nun noch auf die Wasserstoffionenkonzentration zu verweisen. Als Folge der Dissoziation befinden sich in der Bodenwasserlösung auch H^+-Ionen, deren Konzentration den Säuregrad, auch *Reaktion* oder pH-Wert, bestimmen. Als negativer Logarithmus der H^+-Ionen-Zahl angeschrieben, ergibt sich

pH 14	alkalisch	↑
pH 7	neutral	
pH 1	sauer	↓

Das Zusammenspiel der genannten Faktoren bewirkt nun den Austausch von Ionen zwischen

der Bodenlösung und den Bodenteilchen,
der Bodenlösung und den Pflanzenwurzeln,
den Bodenpartikeln und den Pflanzenwurzeln,

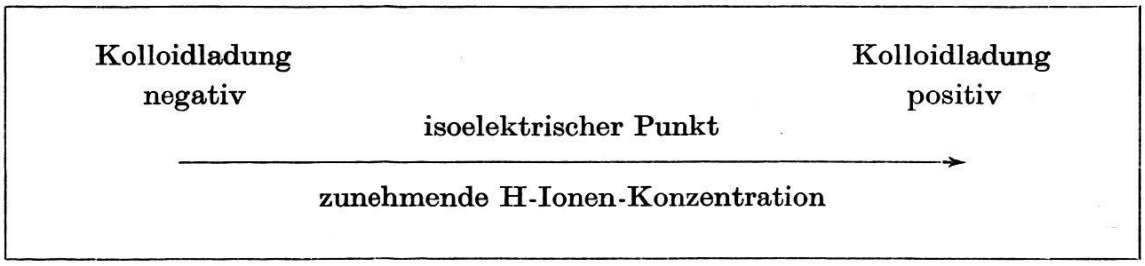
und ist maßgebend für das Bodengefüge und die Pflanzenernährung.

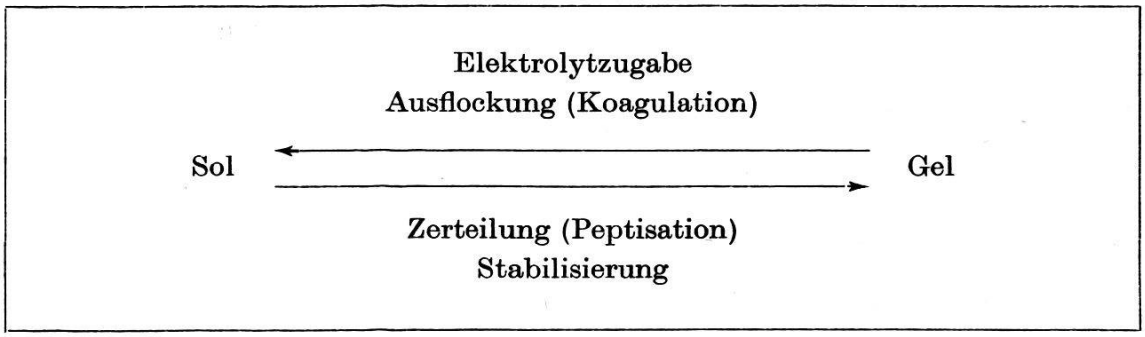
In der Bodenmelioration trachtet man nach einer Verdrängung des Belages aus stark hydratisierten Na^+-Ionen durch Ca^{++}- oder Al^{+++}-Ionen.

Als Drittes wären noch einige bodenkundlich wichtige Erscheinungen aus der *Kolloidlehre* zu erwähnen. In kolloidalen Dispersionen sind Stoffe, welche im gegebenen Lösungsmittel unlöslich oder nicht mischbar sind, so fein verteilt, daß sie als Folge ihrer Wärmebewegung und Grenzflächenkräfte in Schwebe bleiben. In kolloidchemischer Betrachtung läßt sich somit folgendes System aufstellen:

Nach *R. Wolff* [28]	Echte Lösungen	Kolloidale Dispersionen	Suspensionen
	molekulardispers	Kolloiddispers	grobdispers
Teilchengröße (cm)	10^{-8}–10^{-7}	10^{-7}–10^{-5}	10^{-5}–10^{-3}
Art der dispergierten Teilchen	Atome, Moleküle Ionen	Molekülgesellsch. Makromoleküle	Körnchen Tröpfchen
Sedimentation Entmischung	tritt nicht ein	tritt im stabilen Solzustand nicht ein	erfolgt allmählich

Die *Bodenkolloide* bestehen vor allem aus Kieselsäure, Humussäure, Metall- (Al, Fe, Mn) Hydroxyden und Tonmineralien. Die hier genannten Typen sind alle hydrophil (wasserliebend) und umgeben sich mit einer Hydrat- oder Schwarmwasserhülle, sie sind daher gut isoliert. Kristalline Substanzen sind hydrophob (wasserscheu), daher schwächer hydratisiert und somit weniger isoliert. Ein *Sol* ist eine stabile Dispersion, deren Festteilchen sich infolge gleichsinniger Ladung abstoßen, die hydratisiert sind und die Brownsche Molekularbewegung erkennen lassen. Durch Zugabe gegensinnig geladener Elektrolyte (im Boden meist Kationen wie K, Ca, Mg) erfolgt ein Ladungsaustausch bis zu einem neutralen Zustand, dessen pH-Wert nicht gleich 7 sein muß, der aber dem *isoelektrischen Punkt* entspricht. In diesem Moment beginnen sich die Teilchen zusammen zu ballen, zu flocken, womit der *Gel*-Zustand erreicht ist. Umgekehrt kann man die Flockungsneigung durch Stabilisatoren befristet oder dauernd unterbinden, wie das bei Laboranalysen oder in der Injektionstechnik oft erwünscht ist.





Nach *R. Wolff*

Diese Vorgänge sind für den Strukturaufbau in den Böden grundlegend.

Die Molekularkräfte zwischen den Molekülen reichen weiter als die Valenzkräfte. Sie verursachen den *Binnendruck,* bekannt als

- Kohäsion oder Zugfestigkeit bei festen Körpern,
- Oberflächenspannung bei flüssigen Körpern.

Diese Oberflächenspannung zeigt sich in der Neigung jeder Flüssigkeit, die bestehende Oberfläche zu verkleinern, sich also möglichst zur Kugelform zusammenzuziehen, wobei die potentielle Energie ein Minimum wird. Sie ist immer an der Oberfläche von Körpern oder an Trennflächen wirksam. Durch Zusätze (Detergentien, Netzmittel usw.) läßt sich diese Spannung herabsetzen.

Eine Folge dieses Verhaltens ist die *Adsorption,* also das Vermögen, gelöste Stoffe an Trennflächen zu binden. Tatsächlich ist die Adsorption an allen Trennflächen fest–flüssig, fest–gasförmig usw. vorhanden und verursacht Übergangsschichten und *Filme* von der Stärke einiger Moleküldurchmesser. Solch ein Film läßt sich nur durch Erhöhung der kinetischen Energie seiner Teilchen, etwa durch Erhitzen, entfernen (Desorption) oder aber durch einen anderen Stoff mit größerer *Affinität* zur adsorbierenden Oberfläche verdrängen. So ist die Adsorption von Wasser an einen ofentrockenen Boden ein Benetzungsvorgang, bei dem Luft vom Wasser zufolge seiner größeren Affinität verdrängt wird. Die dabei freiwerdende Wärme läßt sich einfach im Kalorimeter als Benetzungswärme bestimmen.

Damit haben wir den Schlüssel für den *Kapillareffekt.* Ist ein fester Körper durch eine bestimmte Flüssigkeit benetzbar, zum Beispiel Glas oder Boden durch Wasser, so überzieht sich der ganze Körper damit und verdrängt die Luft. (Ist das Glas fett, so bleibt es durch Wasser unbenetzbar.) Benetzt sich ein Haarröhrchen, das unten in Wasser eintaucht, so steht der Film an der inneren Wand unter starker Oberflächenspannung. Zur Verkleinerung der Oberfläche wird Wasser hochgezogen und das Röhrchen gefüllt. Die kapillare Steighöhe entspricht dem jeweiligen Gleichgewicht zwischen Oberflächenspannung und Gewicht der Wassersäule. Sehr ausführlich stellt dies *Bernatzik* [1] dar.

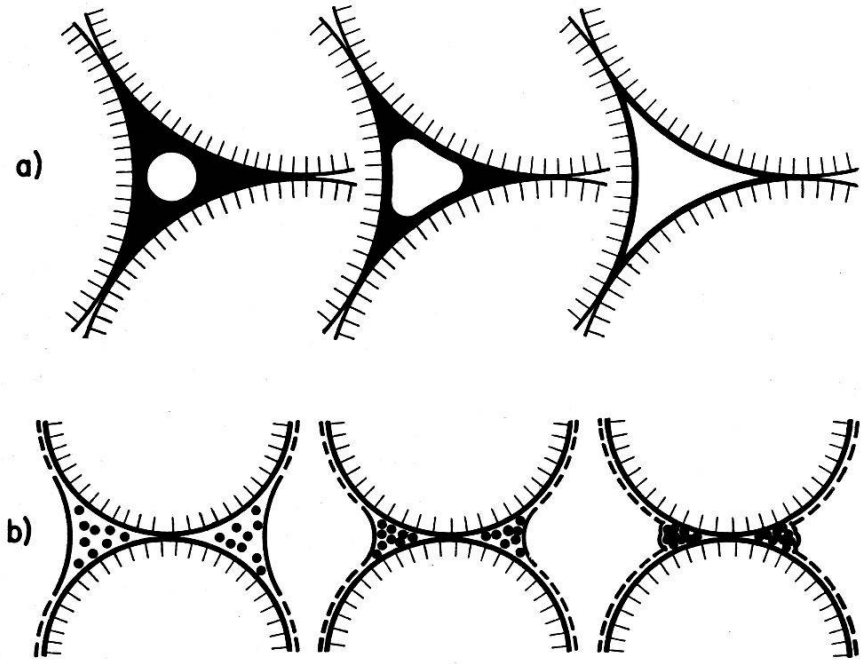
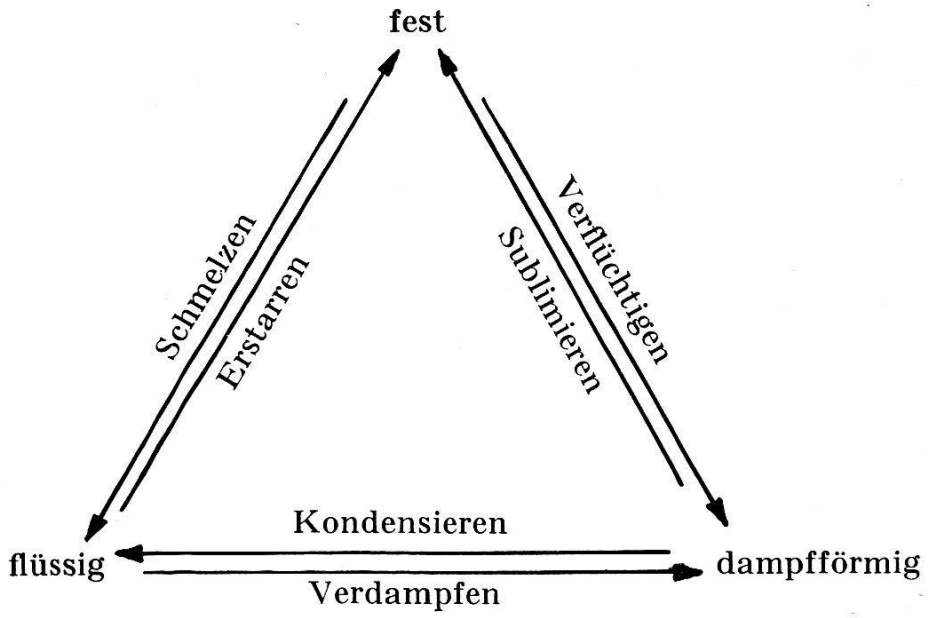


Abb. 2: a) Porenwinkelwasser; Austrocknung der Poren und zunehmende Krümmung der Menisken

b) Der gleiche Vorgang in Sand bei Anwesenheit von Tonteilchen (nach *Bernatzik*)

Wenn nun mit Hydrathüllen umgebene Bodenteilchen im Haufwerk liegen, berühren sich diese, stehen aber auch unter starker Oberflächenspannung. Bei Wasserzutritt wird dieses adsorbiert und bis in die Porenwinkel gezogen. Umgekehrt bleibt bei der Austrocknung von Tonböden, aber auch von Sanden mit geringem Tongehalt, schließlich nur mehr ein feiner, unter hoher Kapillarspannung stehender Wasserfilm in den Porenwinkeln zurück, der anderseits adsorptiv an die Bodenpartikel gebunden ist und diese sehr fest miteinander verbindet. Man kennt das von trockenen harten Tonklumpen und bezeichnet diese als «pseudofeste Körper».

Zum Verständnis des Dreiphasensystems Boden (feste, flüssige und dampfförmige Phase) sind nun noch einige Anmerkungen aus der *Thermodynamik* zu machen.



Die Moleküle der festen Stoffe befinden sich innerhalb eines Kristallgitters in Gleichgewichtslage. Durch Wärme-, also Energiezufuhr geraten die Moleküle innerhalb ihrer Bindung in Schwingungen und verlassen bei weiterer Energiezufuhr den Kristallverband, womit der flüssige Zustand erreicht ist. In einer nächsten Energiestufe wird die Teilchenbewegung nochmals beschleunigt und der gasförmige Zustand erreicht. Die Moleküle verlassen die Oberfläche der Flüssigkeit (verdampfen). Ist diese Oberfläche jedoch gekrümmt wie bei Kapillarmenisken, wird die Verdampfung durch die radial einwirkenden Molekularkräfte gebremst. Diese freie Bewegung ist als *Brownsche Molekularbewegung* bekannt und in kolloidalen Dispersionen zu beobachten.

Die Abhängigkeit der drei Aggregatzustände eines Stoffes von Temperatur, Druck und Volumen unter Berücksichtigung der Molekularkräfte ist in der Van der Waalschen Zustandsgleichung dargestellt. Die kritischen Werte und die Voraussetzungen für den Übergang von einem zum anderen Zustand sind ebenfalls berücksichtigt. Unsere Abbildung bringt nur die Nomenklatur [28].

Nun zirkuliert im Boden nicht chemisch reines Wasser, sondern eine nach Konzentration und Chemismus sowie Temperatur stark variierte chemische Lösung. Aus der Brownschen Molekularbewegung leitet sich die Tendenz zu möglichst gleichmäßiger Verteilung der Moleküle ab. Bei Unterschieden in der Lösungskonzentration führt dies zu *Diffusionsvorgängen* mit dem Ziel eines Dichteausgleiches. Die Pflanzen beteiligen sich an diesen Vorgängen in besonderer Weise. Der Zellsaft besitzt eine gegenüber der Bodenlösung hohe Konzentration und zeigt daher Verdünnungstendenz. Bei ungleich oder halbdurchlässigen Zwischenmembranen wird daher die Bodenlösung, welche Nährlösung ist, in die höher konzentrierte Zellsaftlösung gesaugt. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Osmose.*

Die Vorgänge in den Pflanzen selbst sollen hier nicht weiter verfolgt werden. Desgleichen wurden zahlreiche Folgerungen aus den grundsätzlichen Erkenntnissen nicht erwähnt, weil sie die großen Linien nicht ändern, der Leser bei der gegebenen Kürze dieses Überblickes jedoch irritiert würden.

Textur, Struktur und Bodentypus

Der geotechnischen Terminologie zufolge sind die Meliorationsböden unter die losen, rolligen oder bindigen Lockergesteine einzureihen, die teilweise verfestigt sein können [13]. Zur weiteren Unterscheidung teilt man *Kornklassen,* abhängig vom sogenannten Äquivalentdurchmesser, ein. Da man die feineren Fraktionen, nach ihrer Sinkgeschwindigkeit entsprechend dem Stokesschen Gesetz differenziert, werden Gesteinsart, Kornform usw. nicht berücksichtigt; es entscheidet das äquivalente Verhalten.

Die Grenzen der einzelnen Fraktionen wurden von Atterberg um 1912 vorgeschlagen und von der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft angenommen. Sie sind bodenphysikalisch und von ihrem Einfluß auf typische Bodeneigenschaften her begründet, erfuhren jedoch mehrfach gewisse Verschiebungen [6]. Wir unterscheiden nach *Atterberg* (siehe [7] und DIN 1185, mineralische Bodenarten):

Äquivalentdurchmesser mm	*Nomenklatur*	
größer 200	Steine und Blöcke	Grobboden
60–20	Grobkies	
20–2	Mittel- und Feinkies	
2–0,02	Grob-Feinsand	Feinboden
0,02–0,002	Grob-Fein-Schluff	
kleiner als 0,002	Rohton	

Für Zwecke der Bodenmelioration ist die Klassifikation nach VSS-Normen (SNV 70005) weniger geeignet, weil sie die Einflüsse der feinsten Fraktionen zu wenig berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen liegen in Gewichtsprozenten je Fraktion vor. Die übliche graphische Darstellung als Kornverteilungskurven im semilogarithmischen Netz erlaubt rasche empirische Vergleiche hinsichtlich Gleich- oder Ungleichkörnigkeit eines Bodens.

Diese Zusammensetzung oder Textur der Böden ist für ihr Verhalten von großer Bedeutung, weswegen dieses Merkmal als Basis der Einteilung in *Bodenarten* gilt. Die Bestimmung erfolgt am zweckmäßigsten mittels Bodendreieckes nach *Laatsch* oder *Tommerup,* in welches die Gewichtsprozente der drei Feinfraktionen (Sand–Schluff–Ton) eingehen [6]. Für die Schweiz wurde später ein eigenes Dreieck samt 10teiliger Skala von Frei [7] entwickelt.

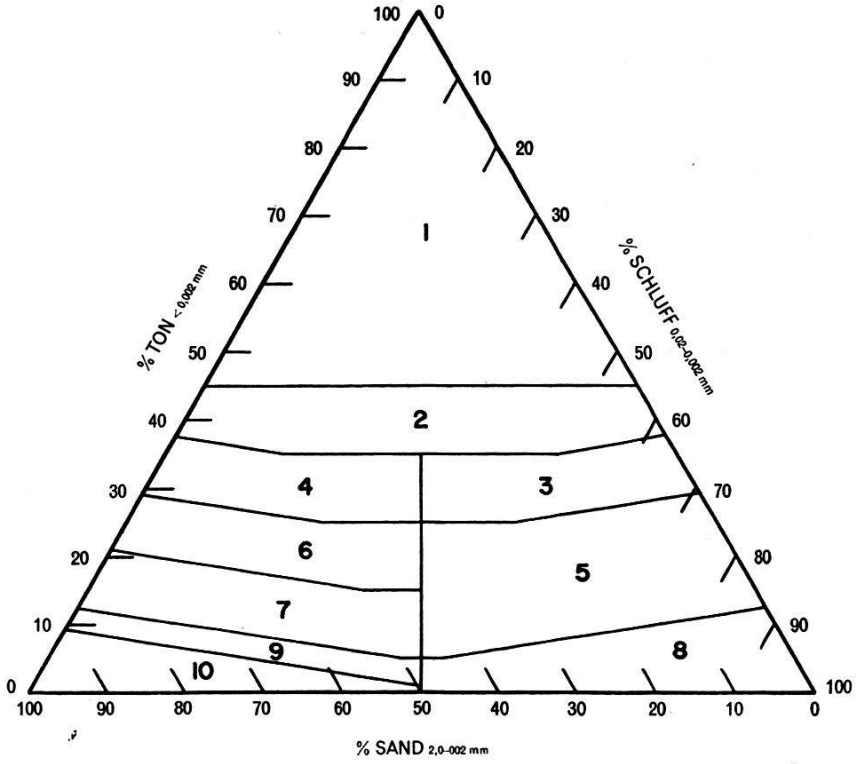


Abb. 3: Bodendreieck nach Atterberg-Frei

1. Ton
2. Toniger Lehm
3. Toniger Schlufflehm
4. Schwach toniger Lehm
5. Schlufflehm
6. Schwach sandiger Lehm
7. Sandiger Lehm
8. Schluff
9. Lehmiger Sand
10. Sand

Bei hohem *Sand*anteil treten außer der Schwerkraft und Kapillarität wenige der eingangs besprochenen physiko-chemischen Reaktionen auf. Je nach Ungleichkörnigkeit und Vorbelastung ist eine verschieden dichte Lagerung möglich. Die fehlende Hydratation begünstigt einen großen Winkel innerer Reibung. Beim Austrocknen zerfallen die Sande, Kohäsion fehlt. Sie sind wasserdurchlässig, gut durchlüftet, unterliegen aber rascher Auswaschung, zeigen nur geringen Kapillareffekt und dementsprechend geringe Speicherfähigkeit.

Die *Schluffe* sind die Ursache besonders ungünstiger Bodeneigenschaften. Wenngleich man die Einzelkörner in der Fühlprobe nicht mehr spürt (Paste), sind sie noch zu groß, um oberflächenaktiv zu sein; somit schwache Sorption und Kohäsion, geringe Plastizität, jedoch niedrige

Fließgrenze, sehr dicht gelagert, schwer durchlässig, keine Neigung zur Flockung. Auch mit Hilfe von Koagulatoren ist bei dieser Fraktion eine Flockung mit Gefügeaufbau kaum möglich.

Der *Rohton* und Böden mit *hohem Tonanteil* zeichnen sich durch hohe Oberflächenaktivität aus, so daß – in verschiedener Stärke und Kombination – alle chemischen und physikalischen Erscheinungen, wie im ersten Abschnitt besprochen, wirksam sind. Besonders hervorzuheben ist die vielfach starke Hydratation samt Quellung und die Schrumpfung bei starker Wasserabgabe der Kolloide. Das führt zu Absonderungsaggregaten, was in der Form der Frostgare (Frieren und Wiederauftauen) wie auch Bildung kleiner Risse erwünscht ist. Öffnen sich jedoch in Hanglagen tiefere Spalten und Risse, so ist die Gefahr tiefreichender Wiedervernässung gegeben. Man beobachtet scheinbare und echte Kohäsion. Durch Ionenaustausch mit Flockung, durch Komplexbildung und Einwirkung der Bodenlebewesen ist ein zyklisch wechselnder oder konsequenter Wandel des Gefüges möglich.

G. Wiegner [27] hat den Einfluß der Kornfraktionen auf die wichtigsten Bodeneigenschaften übersichtlich dargestellt.

Die *organische Substanz* im Boden besteht aus zahlreichen Komponenten. Meliorationstechnisch wichtig ist jedoch der Humus, definiert als die «sowohl makroskopisch wie auch mikroskopisch strukturlos, das heißt frei von Gewebestrukturen, erscheinende organische Masse des Bodens» [14]. Wir unterscheiden verschiedene Humusformen (Rohhumus, Mull usw.) und Huminstoffe, welche zum Beispiel Komplexverbindungen mit Tonmineralien eingehen (Tonhumus-, Eisenhumuskomplex) und durch die besonderen kolloidchemischen Eigenschaften schon bei geringen Prozentanteilen am Mineralboden dessen physikalisches Verhalten wesentlich beeinflusse. *Frei* gibt eine Nomenklatur für die Humusgehalte [7]. Auf die Besonderheiten der Moorböden kann hier nicht eingegangen werden.

Während die Textur eines Bodens vorgegeben und weitgehend unveränderlich ist, erweisen sich die Bodenstrukturen als ein dynamisches System, das für den Landwirt und Meliorationsfachmann noch dazu mit sehr subjektiven Fragestellungen nach guten und nach ungünstigen Strukturen und deren Entstehung verknüpft ist. - Gefüge

Generell ungünstig ist für uns die verdichtete Einzelkornstruktur (auch Elementargefüge genannt), wünschenswert hingegen ein tiefgründiger, nährstoffreicher Boden mit Krümelstruktur. Folgen wir den Bodenkundlern, so ergäbe sich folgende idealisierte aufsteigende Entwicklung:

Durch Elektrolytzufuhr und Ionenaustausch wird zwischen den Primärteilchen eine Koagulation eingeleitet, wobei mit Kalzium abgesättigte Flocken nicht größer, wohl aber beständiger sind als mit Wasserstoff und Natrium belegte Flocken. In die Koagulate kann auch etwas Sand oder Schluff eingebettet sein. Größere Aggregate entstehen durch Verkittung und Verklebung solcher Flocken unter Einschluß gröberer Gemengteile als Folge chemischer Fällung, Komplexbildung und Einwirkung der Bodenlebewesen, welche nach *Sekera* «eine Lebendverbauung» besorgen [24].

Wirkung der Dispersität des Bodens auf die wichtigsten Bodeneigenschaften nach G. Wiegner

Abnehmende Dispersität →

Relativ hohe Dispersität (Rohton)	Mittlere Dispersität (Schluff und Feinsand)	Relativ geringe Dispersität (Feinsand und Grobsand)
Hohe Wasserkapazität,	→	Geringe Wasserkapazität,
schlechte Wasserführung	←	gute Wasserführung
Hohe Kohäsion	→ ←	Geringe Kohäsion
Hoher Nährstoffgehalt	→ ←	Geringer Nährstoffgehalt
Gute chemische, schlechte physikalische Eigenschaften	→ ←	Schlechte chemische, gute physikalische Eigenschaften
Kalter, untätiger, schwer bearbeitbarer, nährstoffreicher Boden mit geringer Auswaschung	→ ←	Warmer, tätiger, leicht bearbeitbarer, lockerer, nährstoffarmer Boden mit hoher Auswaschung
Absolute *Wiesen-* und *Weideböden* mit höheren Ansprüchen an die chemischen, geringeren an die physikalischen Bodeneigenschaften	*Ackerböden* mit nach beiden Seiten hin durch Kulturmaßnahmen leicht beeinflußbaren chemischen und physikalischen Eigenschaften	Absolute *Waldböden* mit höheren Ansprüchen an die physikalischen, geringen an die chemischen Bodeneigenschaften

→ Zunahme der guten physikalischen Bodeneigenschaften

← Zunahme der guten chemischen Bodeneigenschaften

Unterstützt wird diese Aggregierung durch Absonderung aus der Frostgare oder wiederholte Austrocknung und Schrumpfung.

Aus dem ganzen System von Gefügetypen seien nur die für uns wichtigen Hauptformen genannt [6, 14]:

- Primär- oder Elementargefüge (strukturlos, ungünstig bis unbrauchbar für den Landbau).
- Aggregatgefüge 1. Ordnung (zeigen nur eine Mikrostruktur aus Mineralkörnern und Kolloiden; Prismen- und Polyederstruktur).
- Aggregatgefüge 2. Ordnung (mit deutlicher Makrostruktur aus Aggregierung und Absonderung usw. sowie viel Hohlräumen, als Krümel- und Wabengefüge bekannt und erwünscht).

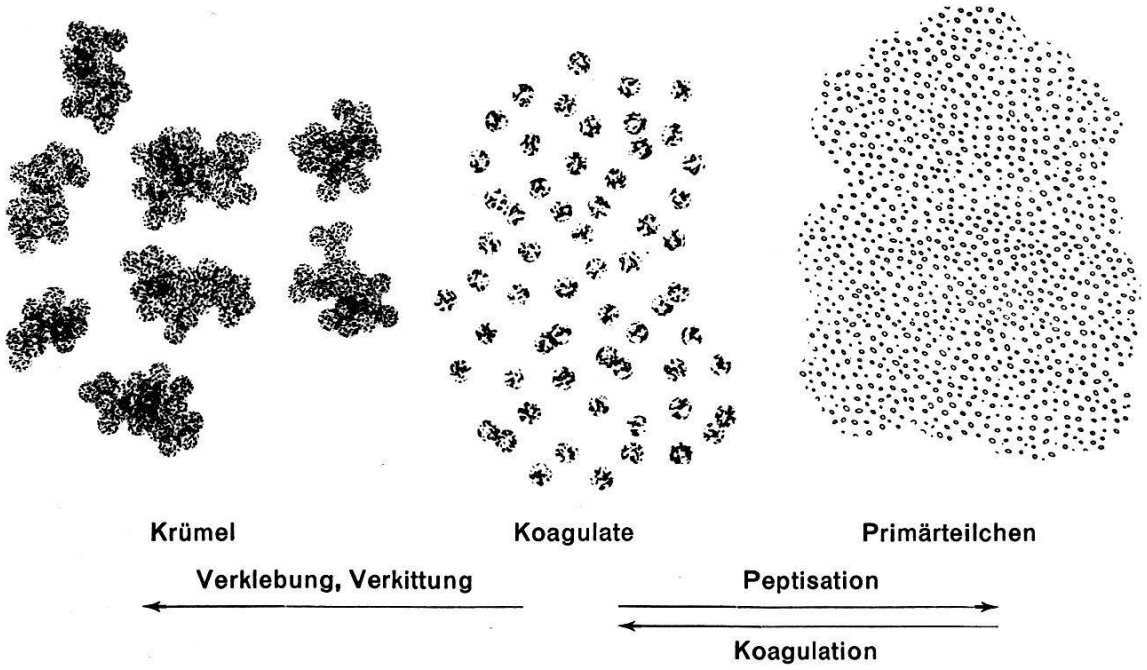


Abb. 4: Schema der Krümelbildung (nach *Scheffer*)

Daß es dazu auch eine absteigende Entwicklung gibt, wissen wir aus der Podsolierung, Vergleyung und in ariden Gebieten aus der Versalzung mit Strukturzerfall. Gewisse Strukturformen treten gehäuft bei bestimmten Bodentypen auf.

Diese Systeme erhalten eine weitere Dynamik durch die exogenen bodenbildenden Faktoren, wie Ausgangsgestein, Topographie und Klima. Dazu kommt als besonders einflußreich das Regime des Bodenwassers.

Damit entrollt sich vor uns das ganze große System der Bodentypen mit einem reichen regionalen und lokalen Formenschatz, der sich bei einiger Kenntnis der bodenbildenden und umbildenden Kräfte auf einige wenige Grundtypen zurückführen läßt. Für den Kulturingenieur sind es vor allem die meliorationswürdigen Mineralböden, die er kennen sollte.

Als entwässerungsbedürftig in der Schweiz:

- Semiterrestrische Böden: Roh-Auböden und Grundwasserböden als Anmoore und Gleye.
- Terrestrische Böden: wechselfeucht und staunaß, Pseudo- und Stagnogleye.

Eine Analyse der Bodenprofile offenbart uns das Zusammenwirken von textur- und strukturbeeinflussenden Faktoren zum jeweiligen Bodentyp, läßt uns deutlich die einzelnen Horizonte eines ganzen Profils erkennen und erinnert an die Inhomogenität des Bodenkörpers sowie die Tatsache einer dauernden Umwandlung.

Das Wasser im Boden

Der sorptiv gebundene Wasseranteil

Ein Boden, zum Beispiel Lehm, der bei 105 °C im Ofen getrocknet wurde, nimmt aus der Luft Feuchtigkeit auf. Dieses *hygroskopische* Verhalten ist eine Folge der *Hydratationsspannung* von mindestens 15–25 atü an den Grenzflächen der Bodenteilchen. Die Wasserfilme sind dann 25–40 Å dick.

Stellt man eine Bodensäule mit der Basis ins Wasser, beginnt von unten her die Benetzung und die Wirkung der *Kapillarspannung,* deren Größe verkehrt proportional dem Porendurchmesser einer Kapillare ist. So erfolgt der kapillare Anstieg des Wassers in den Porenzügen verschieden hoch und rasch bis zum jeweiligen Gleichgewicht: Gravitation – kapillare Saugspannung. Wie *Houwink* erklären konnte, werden die kleinsten Poren und Winkel als Folge der größeren Oberflächenspannung in den am stärksten gekrümmten Menisken zuerst gefüllt. Fehlt der Wassernachschub von unten her, so versucht die Meniskusoberfläche durch Anlagerung von Wasserdampf aus der Luft her den Krümmungsradius zu vergrößern (*Kapillarkondensation*). Zu weite Poren bleiben ohne kapillaren Wasseraufstieg. Ihr spannungsfreier Durchmesser wird um die Stärke der Filme, auch Schwarmwasser genannt, verringert.

Im Falle der Anfeuchtung eines trockenen Bodens durch Niederschlag, also von oben her, verzeichnet man ebenfalls zuerst die Hydratation, dann die Sättigung der Kapillaren und daneben die Füllung aller sonstigen Hohlräume mit Wasser, das jedoch, der Schwerkraft folgend, direkt in die Tiefe sickert oder bei einer undurchlässigen Schicht dem vorhandenen Maximalgefälle folgt.

Für die Art und das Maß der Wasserbindung im Boden ist neben der Kenntnis des gesamten Porenvolumens je Bodenvolumen vor allem dessen Aufteilung in verschieden große Durchmesser interessant. Da es sich im Boden kaum je um geometrisch klar begrenzte Kapillaren handelt, sondern um Porenzüge und Systeme, die an typischen Spannungswerten im Kapillarimeter erkennbar sind, hat *Donat* [4] den Begriff der *Äquivalentporen* eingeführt.

Je nach Bodenart und ihrem Gefügezustand wird das gesamte Porenvolumen gleichmäßig über alle Porenklassen verteilt sein oder einseitig überwiegen. Während nun die Menge des aufgenommenen hygroskopischen Wassers vor allem von dem austauschbaren Ionenbelag abhängt, liegt der Unterschied bei Böden annähernd gleichen Porenraumes aber abweichender Porenklassierung (Sand: Lehm) in der Größe der wirkenden Saugspannung, also Wasserbindung.

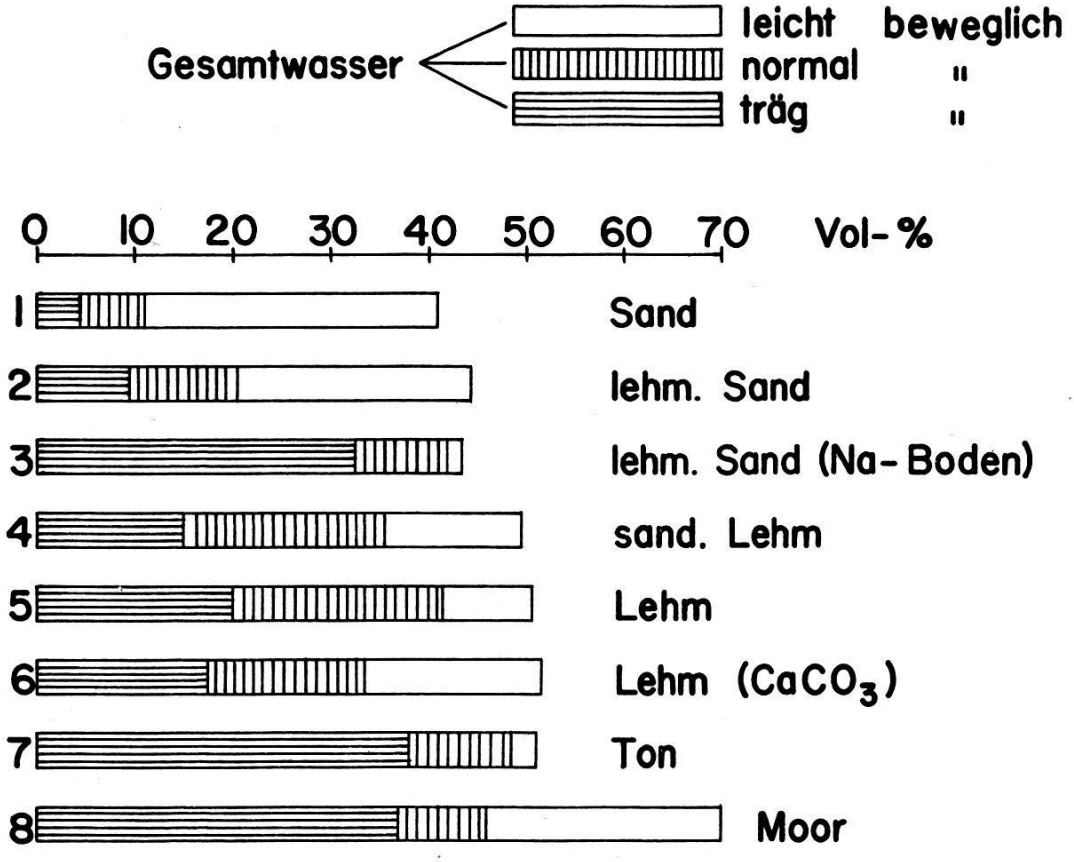


Abb. 5: Wasserbindung in verschiedenen Bodenarten (nach *Sekera*)

Legt man daher an einen Boden, dessen Kapillaren wassererfüllt sind, stufenweise gesteigerte Saugspannungen an, werden die jeder Stufe äquivalenten Porenklassen durch Überwinden der Kapillarspannung entleert. Das Ergebnis sind Saugspannungs-Wassergehalts- (SW-) Kurven, auch *Sorptionskurven* genannt, und damit Poren- beziehungsweise Gefügeanalysen der Bodenproben. Begonnen wurde mit dem Kapillarimeter von *Fischer* und *Donat* beziehungsweise *Sekera;* weiterentwickelt wurde die Theorie und Meßpraxis von *Schofield, Richards* und anderen (siehe den Beitrag *Richard* [19], 1964, in dieser Zeitschrift.

Zur raschen Kennzeichnung der Böden beziehungsweise Horizonte und ihrer Wasserbindung dient der pF-Wert als dekadischer Logarithmus der in Zentimetern Wassersäule ausgedrückten Saugspannung und die Sorptionskurve.

Die Fachliteratur bringt zu diesem Kapitel zahlreiche Begriffe und Definitionen, was einigermaßen verwirrend ist. Man kann jedoch drei fundamentale Betrachtungsweisen unterscheiden:

1. Die physikalisch-hydraulische
2. Die physiologische
3. Die bilanzmäßige

ad 1. Unter Einfluß der Grenzflächenkräfte:

Hydratationsspannungen		Kapillarspannungen
	ergeben	
je nach Ionenbelegung		je nach Äquivalentporendurchmesser
hydroskopisches Wasser (Hy) (Schwarmwasser) pF: 4,7 S = 50 atm ⌀ 0,06 μ	→	← Kapillarwasser (Steighöhen) pF: 4,7–2,7 S = 50–0,55 atm ⌀ 0,06–6,0 μ
	↓ Haftwasser	

Theoretische Wasserkapazität (WK) eines Bodens, annähernd gleich dem Bereich des *trägbeweglichen* Bodenwassers nach *Sekera* sowie den Fein- und Mittelporenbereich nach *Richard.*

Unter Einfluß der Schwerkraft:

Sickerwasser
pF: 2,7 S = 0,55–0,0 atm
⌀ > 6 μ

vergleichbar dem *normal* und *leichtbeweglichen* Bodenwasser nach *Sekera,* dem Grobporenbereich nach *Richard.*

ad. 2. Physiologisch wichtig ist der Anteil am Bodenwasser, welcher von den Pflanzen genutzt werden kann.
Die Grenze gegen das hygroskopische Wasser ist der sogenannte *permanente Welkepunkt* (PWP); er liegt zwischen S = 9–22 atm (pF: 3,9–4,3) im Mittel bei S = 15 atm (pF: 4,2). Ein PWP gilt jeweils nur für eine bestimmte Kombination Pflanze–Boden.

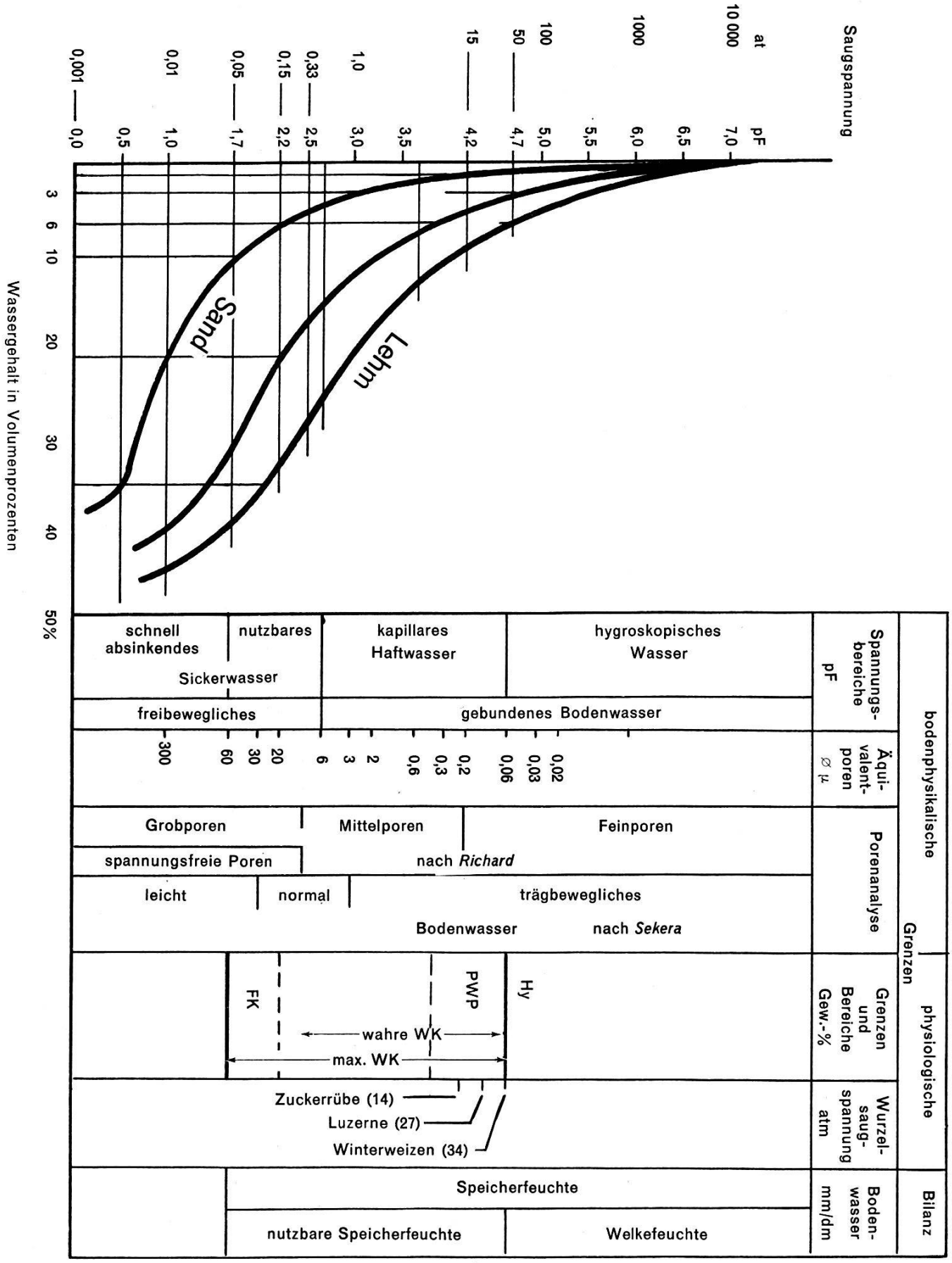
Das Sickerwasser vermögen die Pflanzen nur zum Teil auszunutzen. Die stark variierende Grenze dahin ist die Feldkapazität (*FK*); also diejenige Wassermenge, welche 2–3 Tage nach Vollsättigung eines Bodens im Felde noch nachweisbar ist. Diese Grenze schwankt in den einzelnen Böden in einem weiten Bereich.

FK (Gew.-%) – PWP (Gew.-%) = nutzbare WK (Gew.-%);
die nutzbare WK liegt zwischen S = 0,33–15 atü (pF: 2,5–4,2).

ad 3. Zur Berechnung des Wasserhaushaltes, zum Beispiel bei der Bestimmung der Wassergaben, wird mit der *Wasserspeicherung* in Millimeter Wasserschicht je Dezimeter Bodenschicht (mm/dm) gerechnet (1 mm/dm ≡ 1 Vol.-%).

Speicherfeuchte	F_s mm/dm	
– Welkefeuchte	F_w mm/dm	variiert mit der Bodenart
Nutzbare Speicherfeuchte	F_{ns} mm/dm	

Abb. 6: Sorptionskurven (pF-Kurven) (zum Teil nach *Laatsch*)



Das frei bewegliche Bodenwasser

Im spannungsfreien Porenraum zirkuliert das Sickerwasser in annähernd vertikaler Richtung; das Grundwasser folgt der dem Druckgefälle entsprechenden Bewegungsrichtung. Die Fließzustände werden durch die Gesetze der *Porenhydraulik* beschrieben [5, 25].

Das Bodenwasser wird als zähe Flüssigkeit mit innerer Reibung betrachtet. Seine Bewegung in einer *Kapillare* erfolgt laminar und stationär; die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt ist parabelförmig, wenn man den Einfluß der Wasserfilme an den festen Oberflächen vernachlässigt. Die Bewegung erfolgt unter Wirkung des Druckgefälles.

Das geometrische Gefälle ist $i = \mathrm{tg}\alpha = \frac{h}{l}$

Das Druckgefälle ist $i' = \mathrm{tg}\alpha \cdot \gamma = \frac{h}{l} \cdot \gamma$

Die mittlere Profilgeschwindigkeit nach Hagen-Poiseuille ist

$$v = \frac{\gamma \cdot d^2}{32 \cdot \eta} \cdot i = k \cdot i$$

und gilt für den Bereich der Reynoldsschen Zahl

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} \lessgtr 4, \quad \text{wobei} \quad = \frac{\eta}{\varrho}$$

η Viskosität in Poise ($g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)
ϱ Dichte ($g \cdot cm^{-3}$)
ν Kinematische Zähigkeit ($cm^2 \cdot sec^{-1}$)

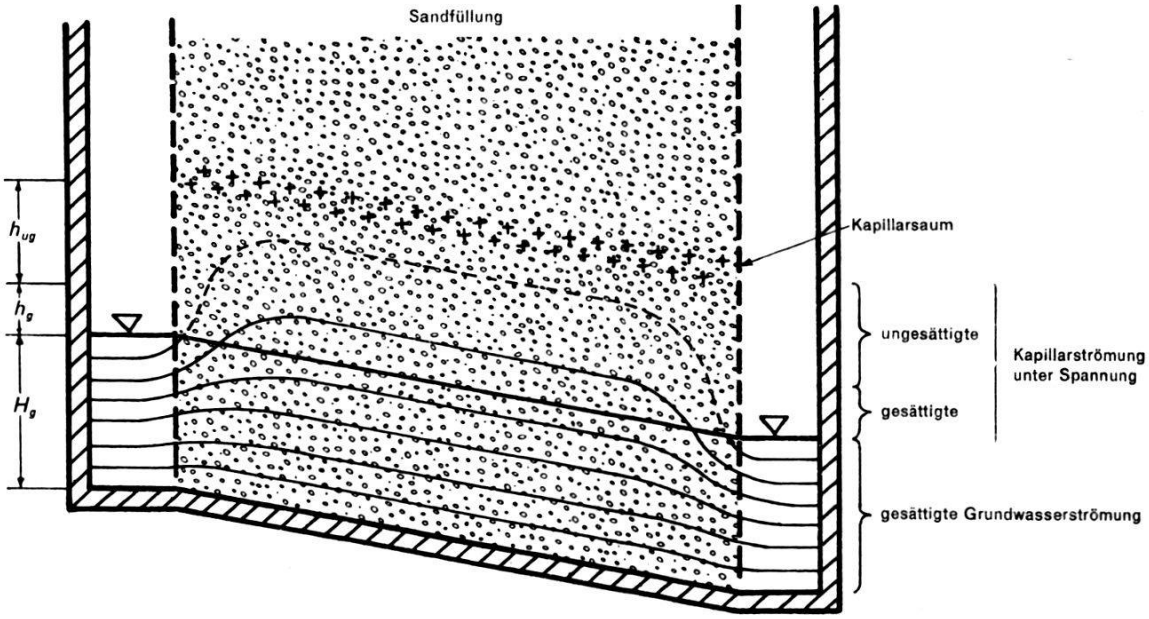


Abb. 7: Das Darcy-Gesetz im gesättigten und ungesättigten Bereich (zum Teil nach *Bernatzik*)

Bodentextur	*Physikalisch-chemische Reaktionen*	*Bodenbiologische Reaktionen*	*Bodenstruktur (Gefüge)*	*Wasser im Boden*
Kornklassen Grob- und Feinboden Kornform Bodenarten Porenvolumen	Elektro- und chemische Kräfte: Elektrolytische Dissoziation Reaktion (pH) Ionenaustausch Hygroskopizität Chemische Fällung Echte } Lösungen Kolloidale } Lösungen Suspensionen Sol-Gel Thixotropie Elektroosmose Molekularkräfte (Van der Waalssche Kräfte): Wärme- und Molekularbewegung Diffusion Osmose Gravitationskräfte: Aggregatzustände Binnendruck Kohäsion Oberflächenspannung	Wurzelwachstum Hydratur (Osmose) Evapotranspiration Nährstoffaufnahme Humifizierung aerober } Abbau anaerober } Abbau	Hydratationsspannung: Hydratisierung Quellung Schrumpfung Gefügeaufbau und Umwandlung: Flockung Krümelung Aggregierung Absonderung Elementargefüge Mikrogefüge Makrogefüge Peptisation Kapillarspannung: Adsorption Affinität (Benetzbarkeit)	Sorptionsverhalten: Gebundenes Bodenwasser Hygroskopisches Wasser (mit Schwarmwasser) Kapillarwasser Spannungsfreies Bodenwasser Porenwasserströmung Kapillarströmung Filterströmung Filterströmung: Wasserbewegung im gesättigten } Bereich ungesättigten } Bereich stationäre } Fließbewegung instationäre } Fließbewegung homogen poröse } Medien inhomogen poröse } Medien Feuchtebilanzen

Reaktionen im Boden und ihr Einfluß auf das Bodenwasser im humiden Klima ($N > V$)

Wenn ein ganzes Bündel von Kapillaren betrachtet wird, wie sich dies bei einem Bodenquerschnitt ergibt, gilt bei konstanter Temperatur $v = k \cdot i$. Um nun mit dem geometrischen und nicht dem Druckgefälle rechnen zu müssen, wird γ im Beiwert k berücksichtigt. Somit ist der Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = f(d, \eta, \gamma)$ mit der Dimension (cm/s) und ist bei $i = 1$ und $t =$ Konst. der Geschwindigkeit identisch.

Die *Filtergeschwindigkeit* errechnet sich, wenn der ganze Bodenquerschnitt (Feststoff und Poren) in die Kontinuitätsbedingung eingeht. Sie ist dann geringer als die tatsächliche Sickergeschwindigkeit.

Die Formel $v = k_f \cdot i$, als *Filtergesetz von Darcy* bekannt, gilt so lange, als infolge geringer Geschwindigkeiten auch bei gekrümmten Wasserbahnen die Trägheitskräfte vernachlässigt werden können.

Die normale Filterströmung erfolgt im Zustand vollgesättigten Bodens, also unterhalb des Grundwasserspiegels. Darüber ist jedoch der Kapillarsaum entwickelt, dessen vollgesättigter Teil als Zweiphasensystem bereits unter Kapillarspannung steht. Da die Filterströmung jedoch nur von k_f und dem (Druck-) Gefälle abhängig ist, gilt auch im gesättigten Kapillarbereich das Gesetz von Darcy.

Über diesem Bereich besteht nun eine ungesättigte Zone, ein Dreiphasensystem. Die Luft wirkt darin wie ein undurchlässiger Stoff, wodurch der freie Porenraum nochmals verringert erscheint. Abhängig vom Grad der Sättigung ergibt sich ein k_{fu} (Filterdurchlässigkeit, ungesättigt), welche in die lineare Darcy-Formel eingeht. *Lecher* [15] wies an Sandmodellen nach, daß im gesättigten Kapillarbereich, etwa dem untersten Drittel des Saumes, die Geschwindigkeit gleich groß derjenigen des Grundwassers sei. Im mittleren (ungesättigten) Drittel nimmt v_f gegen Null hin ab. Der Durchfluß im ungesättigten Bereich sollte dann nicht vernachlässigt werden, wenn die Grundwassersohlschicht nicht tief liegt.

Das hydraulische System des Bodens und seine Beeinflußbarkeit

Der Entwässerungsvorgang

Der *theoretische Verlauf der Entwässerung* im *homogenen porösen* Medium ist einer Potentialströmung gleichzuhalten. Bei voller Sättigung und konstanter Wassernachlieferung stellt sich eine *stationäre* Wasserbewegung gegen die Drains hin ein. Das jeweilige Strömungsbild ist von den geometrischen Beziehungen abhängig: also von der Tiefenlage der einzelnen Drainagepunkte (Senken) unter Gelände oder zum Wasserspiegel; ihr Abstand voneinander; sonstige Randbedingungen, gegeben durch eine undurchlässige Schicht, seitliche Begrenzungen und Hangneigung. Für eine bestimmte derartige Anordnung bleibt das Strömungsbild unverändert, auch wenn die ablaufende Wassermenge der jeweiligen Durchlässigkeit k_f entsprechend variiert. Das heißt, daß etwa in Sand und Lehm, wenn die geometrischen Beziehungen und die Druckverhältnisse gleichbleiben, auch idente Strömungsbilder entstehen. Im Sand mit größerer Durch-

lässigkeit vermag dann allerdings eine größere Wassermenge je Zeiteinheit abzulaufen als im Lehm.

Viel häufiger ergibt sich jedoch eine *instationäre* Wasserbewegung, weil der die Druckhöhe bestimmende Wasserspiegel als Folge abnehmenden oder unterbrochenen Wassernachschubes im Boden absinkt und dabei eine gekrümmte Oberfläche annimmt. Siehe die Strömungsbilder in den Heften 4/1962 und 2/1967 dieser Zeitschrift: *Grubinger* [9], *Widmoser* [26].

Der *tatsächliche Entwässerungsvorgang* im Boden ist hauptsächlich instationär und als solcher aus den Ganglinien des Drainabflusses mit kurzfristig hohen Abflußspitzen abzulesen.

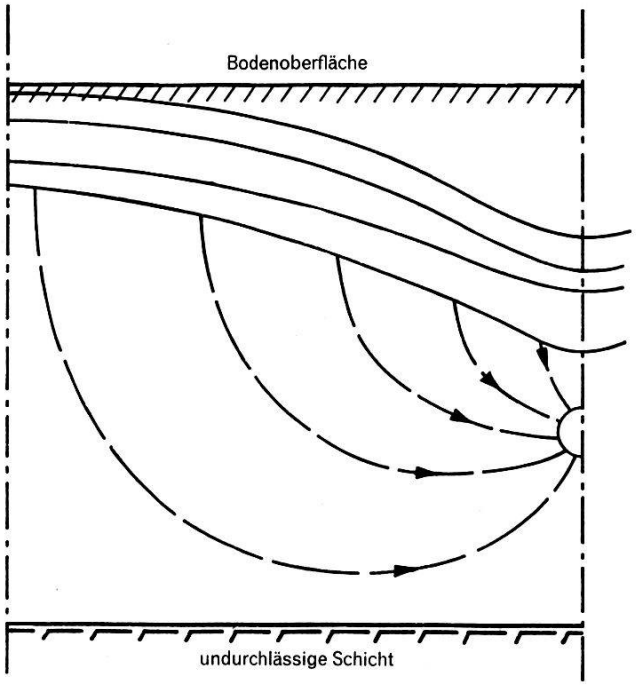


Abb. 8: Strömungsverlauf in einem Drainbeet bei instationärem Verlauf. Der Grundwasserspiegel sinkt im Verlauf von mehreren Tagen ab

Von entscheidendem Einfluß auf die Wasserbewegung ist jedoch das Bodengefüge, das sich aus den nun bekannten mannigfaltigen Ursachen in dauernder Umwandlung befindet. Damit macht sich die *Inhomogenität* des Bodens bemerkbar, die sich im Bodenprofil mit seinen Horizonten einmal statisch und in der Gefügeumwandlung auch dynamisch manifestiert. Die Ursachen einer *Gefügeverschlechterung* sind zahlreich und als komplex bekannt, wie etwa die Vergleyung als Folge dauernder oder periodischer Vernässung, Verdichtungen durch Weidegang, unsachgemäße Bodenbearbeitung und Düngung sowie Bodenbewegungen am Hang.

Gefügeverbesserungen sollten sich als Folge technischer Maßnahmen einstellen. Dies wäre insbesondere die schrittweise Veränderung nach Entwässerung mit einsetzender Durchlüftung, Flockung und Krümelbildung sowie Zunahme der Durchlässigkeit und Stabilität der Struktur. Es sei auf die Erfahrungen vom Versuchsfeld Fußach verwiesen, die von *Schwendinger* [21] in Heft 5/1963 dieser Zeitschrift referiert wurden. Die Verbesserungen verlaufen dort ja nach Bodenart und sonstigen Einflüssen rasch, also in absehbarer Zeit; in Fußach daran erkennbar, daß die Felddurchlässigkeit innerhalb von 9 Jahren, aus den Draingräben gegen Beetmitte vordringend, in 1 m Tiefe um 2 Zehnerpotenzen zugenommen hat (zum Beispiel System von $6 \cdot 10^{-5}$ auf $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ cm/s).

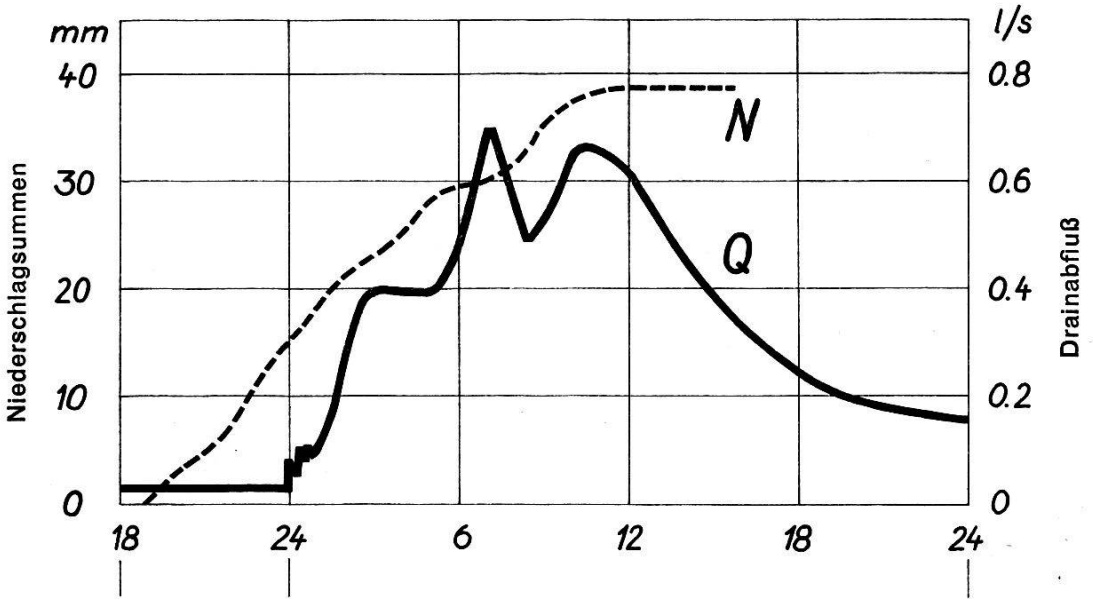


Abb. 9: Ganglinie des Drainabflusses und Summenlinie des Niederschlages (zum Teil nach Donat)

Zur Sicherung und Ergänzung der technischen Maßnahmen stehen uns in gewöhnlichen Fällen die Verfahren der Bodenpflege zur Verfügung, wie Tieflockerung, saubere Bodenbearbeitung, Tiefkalken und Gipsen, Düngung und Humuspflege.

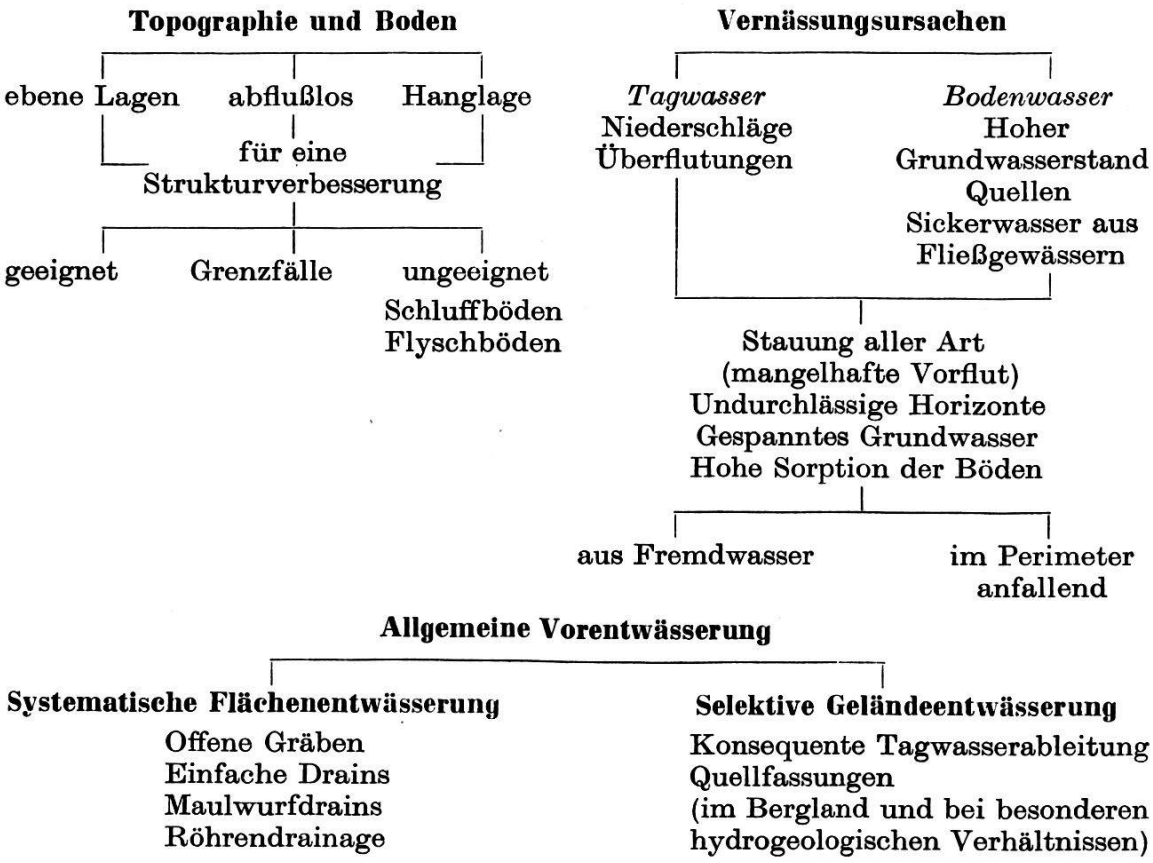
Sehr oft entwickeln sich jedoch diese Strukturumwandlungen trotz herkömmlichen technischen Maßnahmen und gezielter Bodenpflege so schleppend und langsam, daß ein greifbarer Erfolg nicht abzusehen ist. Es sei an die Schluffböden in den großen Verlandungsbecken des St.-Galler Rheintales oder anderer Täler erinnert, die sich nicht ausflocken lassen, und an die weitverbreiteten tagwasservernäßten Pseudogleye mit hoher Sorption auf Flysch und Bündner Schiefer in den Schweizer Berggebieten.

Anpassung des Drainageverfahrens

Kriterium für die Wirksamkeit einer Bodenentwässerung ist deren Vermögen, jeweils rasch genug die für Bodenbearbeitung und Pflanzenbestand oder den Weidebetrieb schädliche Bodennässe abzuführen. Als Einschränkung gilt die Bedingung der Wirtschaftlichkeit.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Laufe der Zeit zahlreiche Entwässerungsverfahren und Bautypen entwickelt. Meist nur auf praktischer Erfahrung aufbauend, gab es neben Erfolgen auch zahlreiche Mißerfolge, besonders dann, wenn gewisse Rezepte ungeprüft übernommen wurden.

Die Aufhellung vieler Zusammenhänge ermöglicht es heute, vor allem die *Vernässungsursachen* genauer zu bestimmen und den Einfluß von *Topographie und Boden* festzulegen, um daraus das *günstigste Verfahren* oder eine Kombination von solchen zu entwickeln. Im Rahmen dieses Beitrages kann darauf nicht näher eingegangen werden. Das folgende Schema soll jedoch die wichtigsten Zusammenhänge und die Nomenklatur erkennen helfen.



Als Folgerung ergibt sich:

- Grundlage jeglicher Entwässerung ist die *Bodenuntersuchung* und das Studium der Vernässungsursachen.

- Bei Böden, die «*schwer*» oder «*nicht*» *entwässerbar* sind, und bei besonderen hydrogeologischen Verhältnissen ist eine *selektive Geländeentwässerung* angezeigt; von forstlicher Seite wird das wenig glücklich als Skelettentwässerung bezeichnet, ohne damit die ganze Aufgabe zu umschreiben. Darüber wird einmal in einem anderen Zusammenhang berichtet werden.
- In allen anderen Fällen ist die sogenannte *systematische Flächenentwässerung* angebracht. Sie geht darauf hinaus, mittels hohlraumreicher (zum Beispiel Steindrains) oder röhrenförmiger Drains einsickerndes Tagwasser oder Grundwasser aufzunehmen und abzuführen.

Die Ausgestaltung dieser Drains und ihre vermeintliche und tatsächliche Wirkungsweise ist nun eine besondere technische Aufgabe.

Das System Boden–Filter–Drain

Das Aufkommen neuer Verfahren, wie etwa die Maulwurfdrainage vor 20 Jahren, und neuer Rohrwerkstoffe, wie insbesondere die Kunststoffe, sowie das Bedürfnis nach Mechanisierung der Drainagearbeit einerseits und nach Melioration weiter Berglandzonen anderseits haben neuerliche technische und ökonomische Überlegungen angeregt.

Als wichtigste Teilfrage, die bisher auch bei der Anwendung von Tonröhren noch nicht genügend aufgeklärt wurde, betrachten wir den Übergang des Wassers aus dem gewachsenen Boden in die Füllung des Draingrabens, von dieser in die Filterzone und darnach ins Rohr. Es ist bekannt, daß der zu entwässernde Boden sein Gefüge verändern und sich auflockern sollte, daß aber das Verfüllmaterial im Draingraben umgekehrt eine Verdichtung erleidet. Je nach Gefügezustand und Strömungsdruck kommt es dabei zur Ausschwemmung feinster Teilchen in Richtung Filterzone. Insgesamt sind die Änderungen der Durchlässigkeit im Betrag von ein bis drei Zehnerpotenzen gegeben, die auf einer Distanz von wenigen Dezimetern wirksam werden.

In der Meliorationstechnik wurde die Filterung bisher vor allem empirisch betrachtet, auch die Einführung neuer Filterstoffe hat daran noch wenig geändert. Bei industriellen Filterprozessen ist man da schon viel weiter. Das Filter soll für Wasser gut durchlässig sein und womöglich auch die Anströmung der Sickerleitung verbessern, jedoch Bodeneinschwemmungen so weit verhindern, daß die Rohrleitungen geschützt bleiben. Die Filter dürfen sich aber auch nicht völlig zusetzen.

Der Wassereintritt in die Drainstränge selbst läßt sich seit dem Aufkommen der Kunststoffrohre weitgehend beeinflussen, da wir grundsätzlich den jeweils hydraulisch günstigsten Querschnitt und die entsprechende Lochung oder Schlitzung herzustellen vermögen. Im Referat *Widmoser*, «Allgemeines über den Eintrittsbereich am Drainrohr» [26], wird darauf näher eingegangen.

Bleibt noch als entscheidendes Fragenpaket die Festigkeit der neuen Werkstoffe und die Möglichkeit der zumindest teilmechanisierten Verlegung.

[1] *Bernatzik, W.:* Baugrund und Physik. Schweizerisches Druck- und Verlagshaus, 1947.

[2] *Dachler, R.:* Grundwasserströmung. Springer, Wien 1936.

[3] – DIN 1185, Drainanweisung. 8. Aufl. 1958.

[4] *Donat, J.:* Das Gefüge des Bodens und dessen Kennzeichnung. Verh. der 6. Kommission der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft, Zürich 1937.

[5] *Forchheimer, Ph.:* Hydraulik. Leipzig-Berlin 1930.

[6] *Franz, H.:* Feldbodenkunde. Fromme-Verlag, Wien 1960.

[7] *Frei, E.:* Beurteilung der Körnung des Bodens nach dem Dreieckdiagramm 1953. Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz *67,* 1953; S. 575.

[8] *Frei, Schütz:* Dispergierung von Bodensuspensionen mit Komplexsalzen zum Zweck der Körnungsanalysen. Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz *67,* 1953; S. 563.

[9] *Grubinger, H.:* Über Bodenentwässerung. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 4/1962.

[10] – Kunststoffrohre in der Draintechnik. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 3/1964.

[11] *Internationale Bodenkundliche Gesellschaft:* Proceedings of the Second Congress, Moscow 1930, Vol. I, Komm. I.

[12] *Jaeger, Ch.:* Technische Hydraulik. Birkhäuser, Basel 1949.

[13] *Kollbrunner, C.:* Fundation und Konsolidation. Schweizerisches Druck- und Verlagshaus, 1945.

[14] *Laatsch:* Dynamik der mitteleuropäischen Mineralböden. 4. Aufl. 1957.

[15] *Lecher, K.:* Sickerströmung im Grundwasserbereich und Kapillarsaum. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 2/1965.

[16] *Niggli, P.:* Zusammensetzung und Klassifikation der Lockergesteine. Erdbaukurs der ETH, 1938.

[17] *Ramsauer, B.:* Der Boden. Im Taschenbuch «Landw. Wasserbau» von Uhden. Franck'sche Verlagshandlung, 1964.

[18] *Ramser:* Das neue Schema zur Klassifizierung der Böden. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 7/1953.

[19] *Richard, F.:* Der Bodenwasserhaushalt. Sorption und Desorption in schwer durchlässigen Böden. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 5/1964.

[20] *Scheffer, F.:* Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde, Bd. I. Enke, Stuttgart 1956.

[21] *Schwendinger:* Der Nachweis der Drainbedürftigkeit auf Grund neuester Versuchserfahrungen. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 5/1963.

[22] *Sekera:* Die Strukturanalyse des Bodens. Zeitschrift für Bodenkunde und Pflanzenernährung *6* (51), 1938, S. 259ff.

[23] – Statik und Dynamik des Bodenwassers. Zeitschrift für Bodenkunde und Pflanzenernährung *6* (51), 1938, S. 288.

[24] – Beobachtungen über Mikroerosion des Bodens. Zeitschrift für Bodenkunde und Pflanzenernährung (55), 1951, S. 193ff.

[25] *Terzaghi:* Erdbaumechanik, Wien 1925.

[26] *Widmoser, P.:* Allgemeines über den Eintrittsbereich am Drainrohr. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, Heft 2/1967.

[27] *Wiegner, G.:* Boden und Bodenbildung in kolloidchemischer Betrachtung. Dresden-Leipzig 1926.

[28] *Wolff, R.:* Physikalische Chemie. Dümmeler, Bonn 1966.