

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 124 (1973)
Heft: 10

Artikel: Zusammenhänge zwischen dem entwässerten Porenvolumen und der Bodendurchlüftung
Autor: Flühler, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-767461>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

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

Zusammenhänge zwischen dem entwässerten Porenvolumen und der Bodendurchlüftung

Von H. Flühler, Birmensdorf

Oxf.: 114.13

(Aus der Professur für Bodenphysik der ETH-Zürich)

Die Wirkung einer Entwässerung beurteilen wir sehr oft aufgrund der erzielten Absenkung des Wasserspiegels. Damit setzen wir voraus, dass die Mächtigkeit des zusätzlich erschlossenen, besser durchlüfteten Bodenraumes etwa der Absenktiefe des Wasserspiegels entspricht. Die Durchlüftung über einem Wasserspiegel kann nun aber sehr verschieden sein. Bevor ich dies anhand einiger Beispiele zu zeigen versuche, möchte ich darauf hinweisen, was in diesem Begriff «Durchlüftung» enthalten sein kann. Wenn wir von der «Durchlüftung eines Bodens» sprechen, dann rechnen wir bewusst oder unbewusst damit, dass in diesem Boden irgendwelche Organismen bestimmte Gase veratmen oder produzieren. Sind in einem Boden jedoch weder Wurzeln, Pilze, Bakterien noch andere Organismen vorhanden, dann werden einzig infolge abiotischer Vorgänge und nur in geringen Mengen Gase gebunden oder freigesetzt. Ohne den Gasaustausch der Wurzeln und Mikroorganismen gäbe es im Boden praktisch kein Gaskonzentrationsgefälle, also keinen Gastransport und damit, streng genommen, auch keine «Durchlüftung».

Für gewisse Pflanzen spielt die Durchlüftung des Bodens nur eine untergeordnete Rolle. In solchen Pflanzen, wie beispielsweise in Schachtelhalmen, Binsen, in Weiden und vermutlich auch in der Schwarzerle, ist in der Pflanze selbst ein dem Standort angepasstes Durchlüftungssystem ausgebildet. Die zum Teil durchgehenden Luftkanäle im pflanzlichen Gewebe verbinden die atmenden Zellen mit der freien Atmosphäre. Diese luftgefüllten Interzellularräume nennt man Aerenchym. Die sternförmigen Aussparungen im Wurzelquerschnitt des Schachtelhalmes sind ein anschauliches Beispiel pflanzeninterner Gasdiffusionswege. An krautigen Pflanzen wurden das Vorhandensein und die Wirkung solcher Gasdiffusionswege schon wiederholt nachgewiesen (Wildenhain, 1966; Literaturhinweise, Flühler, 1972). Die Bedeutung des Gastransportes durch die Pflanzenwurzeln wurde auch an Baumarten, allerdings nur an Keimlingen und abgeschnittenen Wurzeln, untersucht:

An Keimlingen beispielsweise hat man festgestellt, dass dieser Gasdiffusionsweg bei einer Weide von Bedeutung ist, während er in gewissen Fichten- und Föhrenarten offenbar nicht oder nur ungenügend ausgebildet ist (Leyton, 1957).

An 6 cm langen Wurzelstücken konnte gezeigt werden, dass in den Wurzeln der Lärche, Buche, Weide, Hagebuche und des Nussbaumes durchgehende Luftkanäle vorhanden sind, die in den Wurzeln der Fichte und Waldföhre hingegen fehlen (Redies, 1962).

Solche anatomische Anpassungen bestimmter Arten bzw. Rassen an Nassstandorte können wirtschaftlich bedeutsam sein. Ich denke dabei vor allem an die biologische Entwässerung. Diese Hinweise auf den Gastransport in den Pflanzen sollen zeigen, dass die Bodendurchlüftung nicht losgelöst von der Reaktion der Pflanze betrachtet werden darf.

Je nach der Atmungsintensität der Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen müssen mehr oder weniger grosse Gasmengen transportiert werden. Der Gastransport ist der physikalische Aspekt der Bodendurchlüftung. Im folgenden gehe ich nun davon aus, dass ein wesentlicher Teil des *Gastransportes* zwischen der Atmosphäre und der Wurzel *durch den Porenraum* des Bodens zu erfolgen hat. Diese Annahme trifft höchstwahrscheinlich auf die Fichte zu, also ausgerechnet auf jene Baumart, die in den Flyschauforstungen am häufigsten verwendet wird.

Der wichtigste Mechanismus des Gastransportes im Boden ist die *Diffusion*. Sie gehorcht dem allgemeinen Transportgesetz:

$$n = -K \cdot \frac{dp}{dx}$$

wonach der Fluss n gleich der Leitfähigkeit K mal dem Gradienten $\frac{dp}{dx}$ ist.

Der Gradient ist die treibende Kraft. Im Falle der Diffusion versteht man darunter das örtliche Konzentrations- bzw. Partialdruckgefälle. Im Boden können die Gasmoleküle nicht frei diffundieren. Sie werden durch das Bodengerüst und das Wasser gebremst. Die Leitfähigkeit von Sauerstoff beispielsweise kann je nach Struktur und Wassergehalt des Bodens bis um den Faktor einer Million variieren. Sie ist in reiner Luft rund 300 000mal grösser als in reinem Wasser. Ein 1 mm langer Diffusionsweg im Wasser entspricht somit einer Distanz von 300 m in der Luft. Bei gleichem Gradienten verhalten sich die Transportgeschwindigkeiten von Sauerstoff in Luft und in Wasser vergleichsweise wie die Geschwindigkeiten eines Überschallflugzeuges und einer Schnecke. Ein noch so feiner und gekrümmter, jedoch kontinuierlicher Luftkanal stellt also einen weit wirksameren Diffusionsweg dar als der ganze übrige wassergesättigte Porenraum. Es ist also leicht einzusehen, dass unterhalb eines Wasserspiegels die allfällig vorhandenen, nicht kommunizierenden Gasblasen für die Gasleitfähigkeiten wenig wirksam sind. Aber auch oberhalb eines Wasserspiegels kann die Gasleitfähigkeit ausserordentlich klein sein, da die luftgefüllten Poren entweder nicht miteinander verbunden oder dann allzu vereinzelt sind.

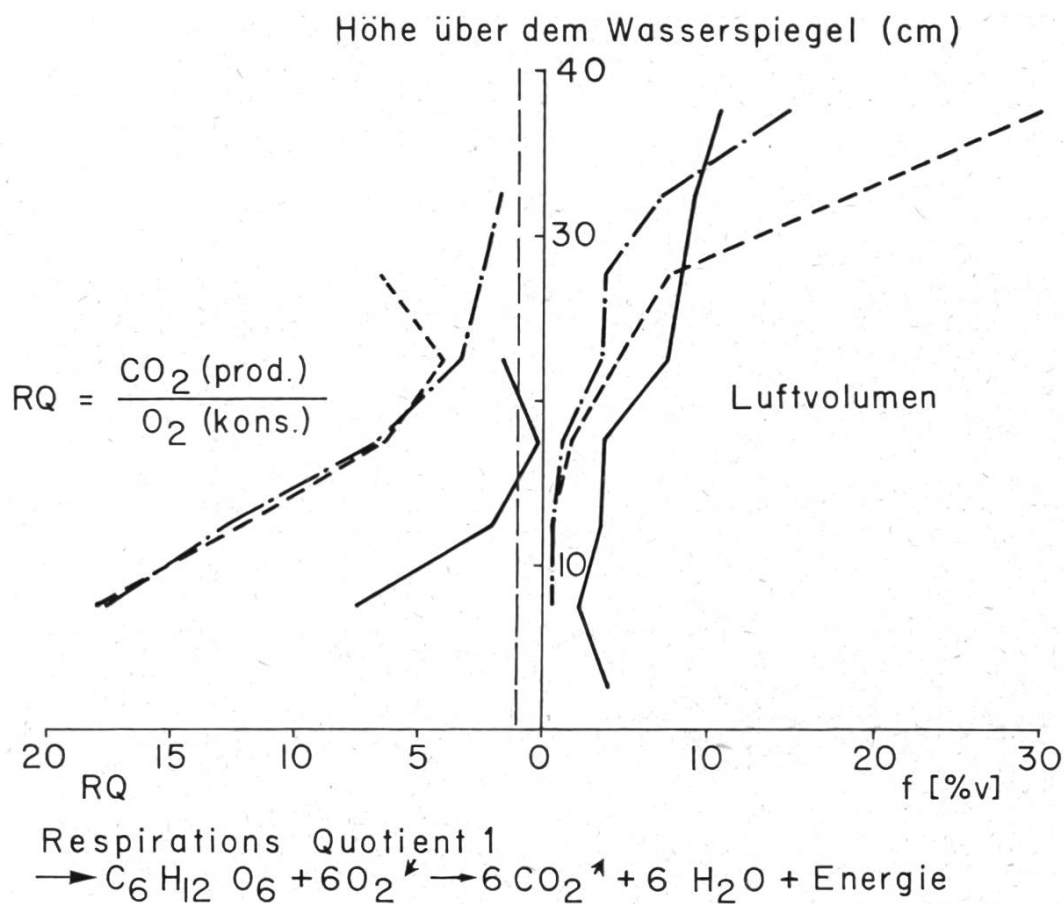
Bisher habe ich drei für die Bodendurchlüftung wesentliche Merkmale erwähnt:

1. Der Gastransport im Boden wird vorwiegend durch biologische Vorgänge verursacht.
2. Der Sauerstoffnachschub bzw. der Wegtransport von Kohlendioxyd atmender Wurzeln oder Mikroorganismen ist langfristig gesehen nur dann genügend wirksam, wenn er durch eine mehr oder weniger kontinuierliche Gasphase vor sich gehen kann.
3. Es gibt Pflanzen, die auf eine Gasphase im Boden angewiesen sind, und solche, bei denen diese Gasphase durch anatomische Anpassungen pflanzenintern gebildet wird.

In der Folge versuche ich drei Fragen zu beantworten:

1. In welchem Ausmass hängt die Durchlüftung des Bodenraumes über einem Wasserspiegel vom entwässerten Porenvolumen ab?
2. Welche minimalen Luftvolumenanteile gewährleisten unter unseren Klimabedingungen eine genügende Durchlüftung?
3. Wie wirkt sich die Bodenstruktur auf die Verteilung des Luftvolumens über einem Wasserspiegel aus?

In den Abbildungen 1 bis 3 ist die vertikale Verteilung verschiedener, die *Durchlüftung* kennzeichnender Grössen *über einem Wasserspiegel* dargestellt. Diese aus der Literatur entnommenen Ergebnisse beziehen sich auf Modellversuche an künstlich geschütteten, sandreichen Bodensäulen, die unter Laborbedingungen durchgeführt wurden (Kristensen, 1964, Abbildungen 1 und 2; Enoch, 1971, Abbildung 3). Da in diesen Versuchen keine Pflanzen verwendet wurden, waren die Veränderungen der Bodendurchlüftung allein ein Ausdruck der mikrobiellen Aktivität. In der Abbildung 1 wird die Verteilung des Respirationsquotienten $RQ = CO_2/O_2$, also das Verhältnis zwischen produziertem Kohlendioxyd und konsumiertem Sauerstoff, mit der Verteilung der entwässerten Porenvolumina f verglichen. Bei aerober Atmung ist der Respirationsquotient RQ etwa gleich eins, da ungefähr gleich viel Kohlendioxyd freigesetzt wie Sauerstoff veratmet wird. Ist die Gasleitfähigkeit zu klein, um den Sauerstoffnachschub zu den atmenden Zellen zu gewährleisten, dann beginnen diese ihren Energiebedarf durch Gärungsreaktionen zu decken. Dazu ist in beschränktem Mass auch pflanzliches Gewebe fähig (Redies, 1962; Amoore, 1961). Dabei wird Kohlendioxyd freigesetzt. Der Respirationskoeffizient RQ ist um so grösser, je stärker der Sauerstoffkonsum eingeschränkt ist. In den Modellversuchen an den Sandsäulen (Abbildung 1) war der Respirationsquotient RQ überall dort wesentlich grösser als 1,0 wo der *Luftvolumenanteil* f weniger als etwa 5 Vol.-% betrug. Der Anteil anaerober Vorgänge war offenbar bei entwässerten Porenvolumina von 0 bis 5 Vol.-% beträchtlich.



Bodensäule	I —	II ---	III -.-
Dichte ($g \cdot cm^{-3}$)	1,43	1,42	1,40
Tongehalt (%g)	5,6	10,5	15,5

Abbildung 1. Verteilung des Luftvolumenanteils f und des Respirationsquotienten RQ über einem Wasserspiegel in drei sandreichen Bodensäulen (berechnet nach Daten von Kristensen 1964).

In der Abbildung 2 ist dargestellt, wie die *Bodenatmosphäre* in verschiedenen Entfernungen vom Wasserspiegel zusammengesetzt ist (Kristensen, 1964). Die Summe der in Volumenprozenten ausgedrückten relativen Partialdrücke der drei wichtigsten Gaskomponenten O_2 , CO_2 und N_2 ergeben den Gesamtdruck (also 100 Vol.-%). In diesem Versuch wurden auch die Sauerstoffdiffusionsraten ODR (= oxygen diffusion rate, Lemon, 1955) gemessen, also jene Sauerstoffmengen, die zu einem 0,4 mm dicken Platindraht diffundieren:

Dieser Platindraht dient bezüglich Sauerstoffverbrauch als Modellwurzel. Zwischen dem Platindraht und dem Boden wird eine elektrische Spannung von 0,5 bis 0,7 Volt angelegt. Deshalb wird der Sauerstoff an der Platinoberfläche dauernd reduziert. Die Sauerstoffkonzentration an der Platinoberfläche ist deshalb Null. Dadurch entsteht ein Konzentrations- bzw. Partial-

druckgefälle, welches je nach Leitfähigkeit und Partialdruck der Boden-
umgebung einen bestimmten, messbaren Sauerstoffdiffusionsstrom ver-
ursacht. Sauerstoffdiffusionsraten von weniger als 10 bis $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{O}_2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ sind für eine normale Wurzelentwicklung ungenügend (Stolzy, 1964).

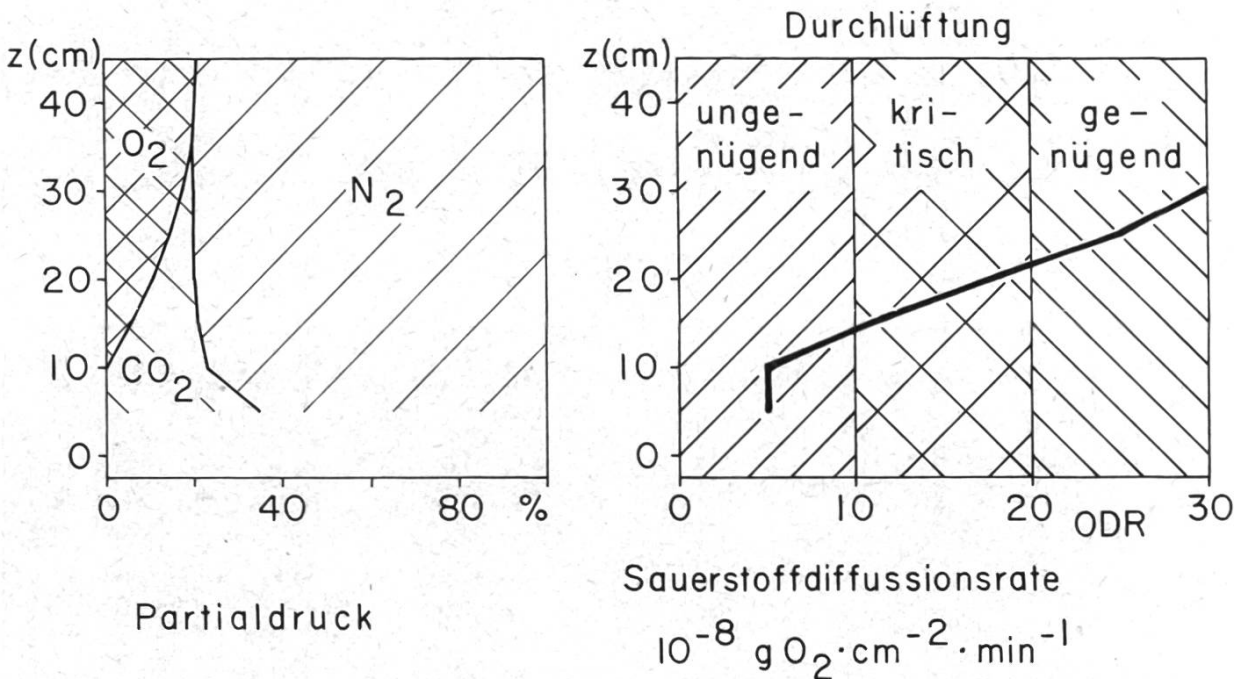


Abbildung 2. Zusammensetzung der Bodenatmosphäre und Verteilung der Sauerstoffdiffusionsraten ODR über dem Wasserspiegel in der Bodensäule III (Kristensen 1964).

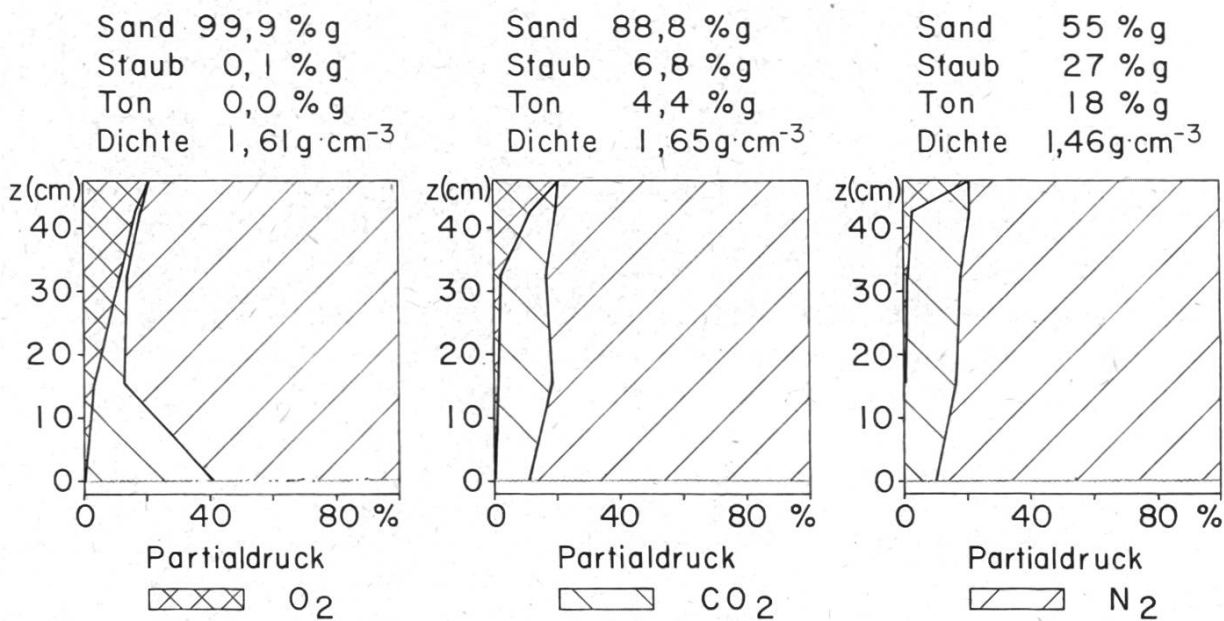


Abbildung 3. Zusammensetzung der Bodenatmosphäre oberhalb eines Wasserspiegels in drei Sandsäulen mit verschiedenem Tongehalt (nach Enoch 1971).

Aufgrund der gemessenen Sauerstoffdiffusionsraten ODR scheinen diese durchweg sehr sandreichen Bodensäulen erst oberhalb 20 bis 25 cm über dem Wasserspiegel genügend durchlüftet zu sein, also bei einem Sauerstoffpartialdruck von mehr als 14 % O_2 und einem Kohlendioxidpartialdruck von weniger als 6 % CO_2 . In dieser Distanz vom Wasserspiegel betrug das entwässerte Porenvolumen f etwa 5 Vol.-% (Säule III, Abbildung 1).

In der Abbildung 3 ist die Zusammensetzung der Bodenatmosphäre von drei anderen, ebenfalls sandreichen Bodensäulen mit variablem Tongehalt dargestellt (Enoch, 1971). Sie wurden etwa 40 bis 50 Tage nach Versuchsbeginn, also mehr oder weniger in einem Gleichgewichtszustand, gemessen. Mit zunehmendem Tongehalt nimmt die Mächtigkeit jenes Bodenraumes zu, in dem der Partialdruck von Kohlendioxid wesentlich grösser ist als derjenige von Sauerstoff. Die Bodenatmosphäre der relativ tonreichen Sandsäule, welche hinsichtlich Korngrössenzusammensetzung und Lagerungsdichte am ehesten mit einem natürlich gelagerten Boden vergleichbar ist, ist bis 5 cm unter die Bodenoberfläche ausgesprochen arm an Sauerstoff und reich an Kohlendioxid, also schlecht durchlüftet. Diese Beispiele zeigen, dass die Grenze zwischen guter und schlechter Bodendurchlüftung einige 10 cm über dem Wasserspiegel liegen kann.

Der in Grundwasserrohren oder in Gräben leicht feststellbare Wasserspiegel ist eine rein physikalisch mittels Drucks definierte aber keineswegs eine für das Pflanzenwachstum entscheidende Grenze. Wie gross der Bodenraum oberhalb des Wasserspiegels ist, in welchem anaerobe Vorgänge vorherrschen, hängt einerseits von der Atmungsintensität der Organismen und andererseits ganz wesentlich von den Gasleitfähigkeiten ab. An acht Bodenmaterialien verschiedener Struktur versuchten wir nun die Abhängigkeit der Sauerstoffleitfähigkeit vom entwässerten Porenvolumen zu messen (Flühler, 1972). Die Resultate sind in der Abbildung 4 aufgezeichnet. Auf der Abszisse ist das entwässerte Porenvolumen f (Vol.-%) und auf der Ordinate die Sauerstoffleitfähigkeit K aufgetragen. Als Sauerstoffleitfähigkeit K bezeichne ich jene Sauerstoffmenge, die durch eine Bodenprobe von 1 cm^2 Querschnitt und 1 cm Dicke diffundiert, wenn auf der einen Seite der Probe eine reine Sauerstoff-, auf der anderen Seite eine reine Stickstoffatmosphäre vorhanden ist. Ausgehend vom wassergesättigten Zustand ($f = 0$ Vol.-%) nimmt die Sauerstoffleitfähigkeit bei einer Entwässerung auf etwa 5 Vol.-% um etwa das 10 000fache zu. Dieser ausserordentlich steile Kurvenverlauf zeigt ganz deutlich, dass im Bereich hoher Wassersättigungsgrade schon eine geringe Verminderung des Wassergehaltes die Diffusionseigenschaften eines vernässten Bodens entscheidend verändert. Die beiden ausgezogenen Kurven stellen die theoretisch in Extremfällen zu erwartende Abhängigkeit der Sauerstoffleitfähigkeit $K(f)$ dar.

In den Untersuchungen an den Bodensäulen (Abbildungen 1 und 2) haben sich Luftvolumenanteile unter 5 Vol.-% für die Durchlüftung als kri-

tisch erwiesen. Es stellt sich nun die Frage, ob dieser Luftvolumengrenzwert von etwa $f = 5 \text{ Vol.-%}$ lediglich für diese künstlich geschütteten Sandsäulen typisch ist oder ob der kritische Bereich des entwässerten Porenvolumens in natürlich gelagerten Böden in einer ähnlichen Größenordnung liegt.

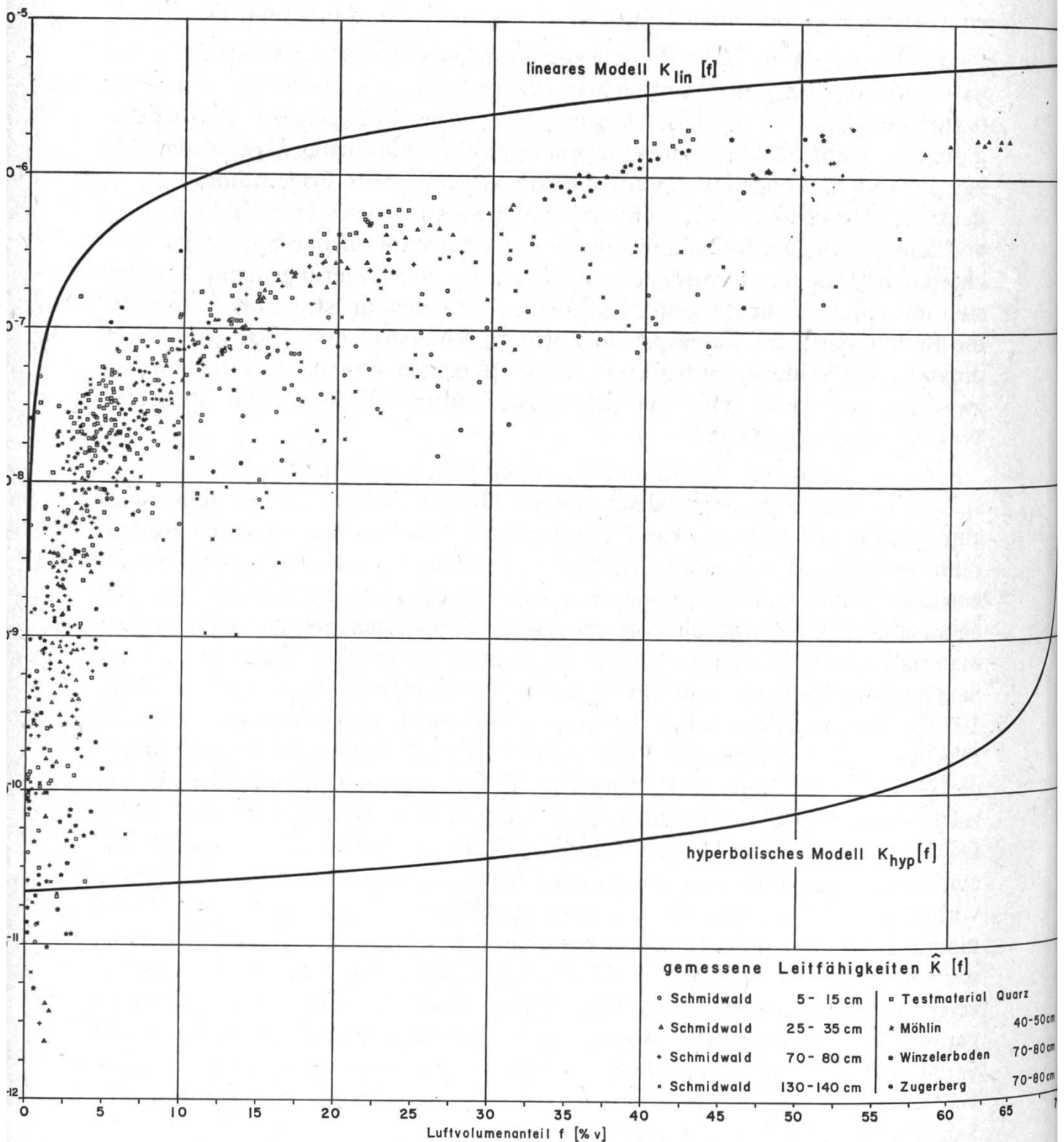


Abbildung 4. Abhängigkeit der Sauerstoffleitfähigkeit K vom entwässerten Porenvolumen f .

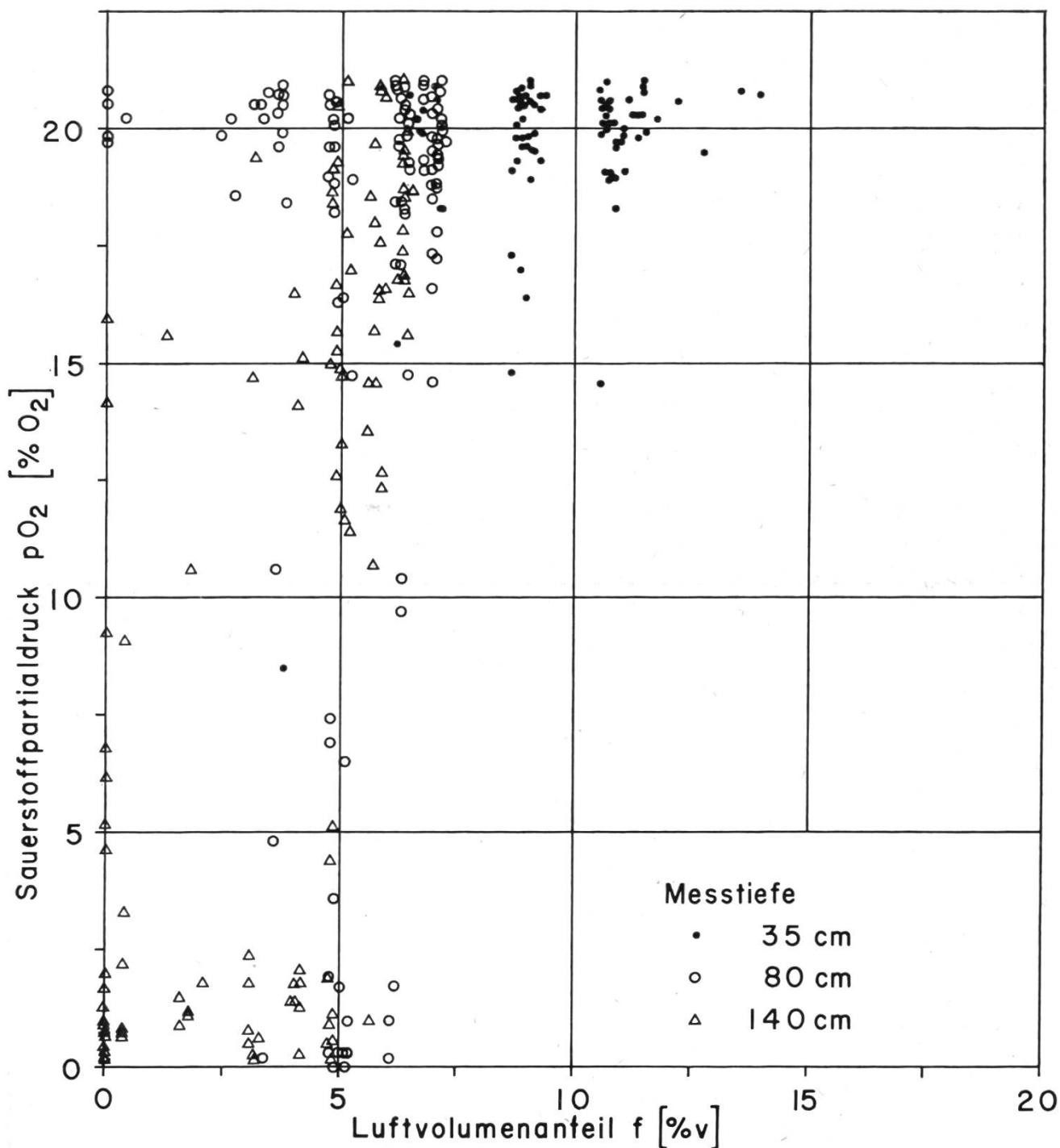


Abbildung 5. Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffpartialdruck pO_2 und dem entwässerten Porenvolumen f in einem staubreichen, dichten Rissmoräneboden (Pseudogley «Schmidwald»).

In einem staubreichen, dichten Rissmoräneboden in der Nähe von Langenthal haben wir während eines Jahres in drei verschiedenen Bodentiefen den Sauerstoffpartialdruck und den Luftvolumenanteil gemessen (Abbildung 5), nämlich in 35, 80 und in 140 cm Tiefe. Der Hauptwurzelraum reicht bis in etwa 100 cm Tiefe. Der Nebenzurzelraum zwischen 100 bis 280 cm ist derart dicht gelagert, dass praktisch der gesamte Niederschlag im

Haupt- und Nebenwurzelraum aufgestaut wird. Die Gravitationsbewegung des Wassers ist so gering, dass der Boden nur infolge des Wasserentzuges der Wurzeln entwässert wird. Der Sauerstoffpartialdruck sinkt also erst dann unter etwa 15 ‰, wenn der Luftvolumenanteil die 6 Vol.-%-Grenze unterschreitet. Dieser Grenzwert bzw. Grenzbereich entspricht somit angenähert dem oben erwähnten kritischen Luftvolumenanteil. Das Winterhalbjahr 1971/72 wies die trockenste 4-Monats-Periode des Jahrhunderts auf. Der durchschnittliche tägliche Niederschlag war nur halb so gross wie in der vorangegangenen Vegetationsperiode, nämlich 1,8 mm pro Tag. Trotz diesen geringen Niederschlagsmengen während der Vegetationsruhe wurde der Boden so stark vernässt, dass die untere Hälfte des Hauptwurzelraumes praktisch dauernd schlecht durchlüftet war. Dieser Boden wird nur dann genügend entwässert bzw. durchlüftet, wenn die Evapotranspiration der Baumvegetation wirksam ist (Flühler, 1972).

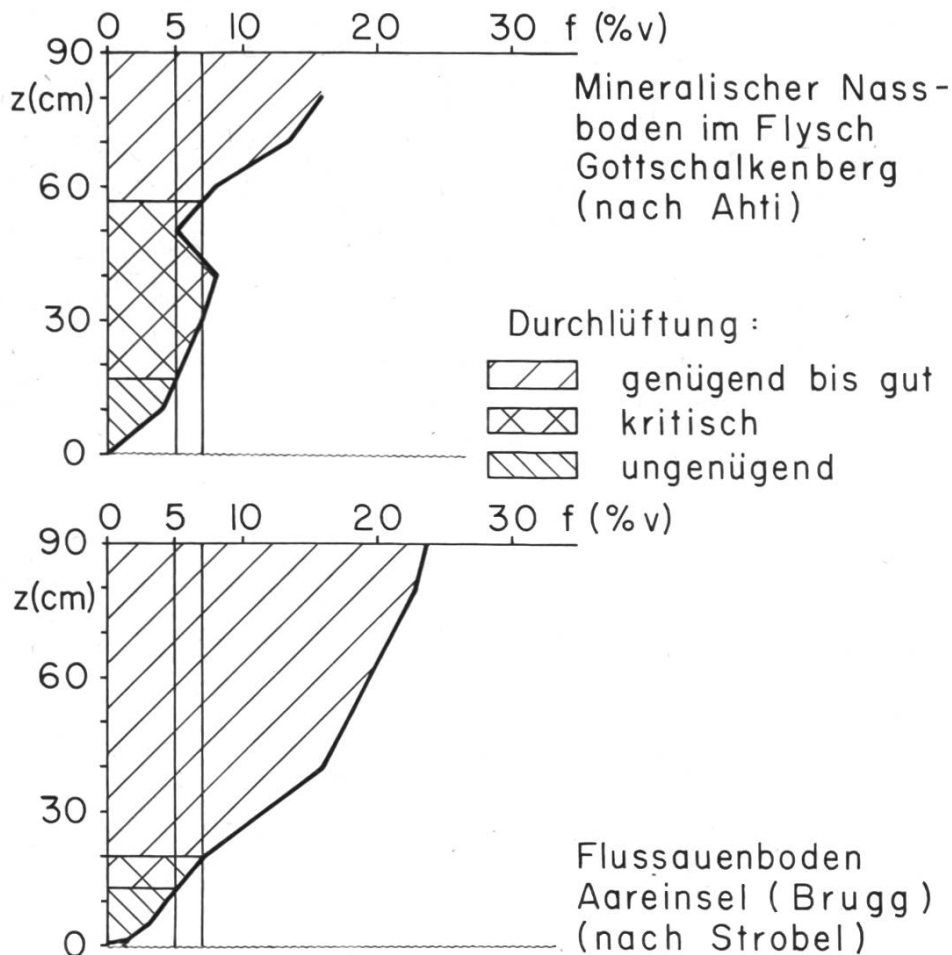


Abbildung 6. Verteilung des entwässerten Porenvolumens f über einem 90 cm tief liegenden Wasserspiegel im Flussaueboden «Aareinsel» und im Flyschnassboden «Gottschalkenberg».

Mit diesen Hinweisen, also den Sandsäulenversuchen und dem Versuch auf dem Rissmoränenboden bei Langenthal, versuchte ich zu zeigen, dass der kritische Bereich des Luftvolumenanteils in völlig verschiedenen Böden

größenordnungsmässig zwischen 5 bis 7 Vol.-% liegt, also wesentlich kleiner ist, als man bisher anzunehmen geneigt war (vgl. Literaturhinweise, Kühnel, 1969).

Der Anteil des entwässerten Porenvolumens hängt weitgehend von der Struktur bzw. den Wassersorptionseigenschaften des Bodens ab. In der Abbildung 6 sind für zwei völlig verschiedene Böden jene Luftvolumenverteilungen eingezeichnet, welche sich bei Gleichgewicht oberhalb eines 90 cm tief liegenden Wasserspiegels einstellen. In einem tonreichen Nassboden des Flyschgebietes (Schuster, 1972; Ahti, 1970) und einem sandigen Auenwaldboden (Strobel, 1973) wurden die Saugspannungsverteilungen über einem ruhenden Wasserspiegel und die Desorptionskurven der einzelnen Bodenhorizonte gemessen. Die Ermittlung der Luftvolumenanteile beruht auf der vereinfachenden Annahme, dass einer bestimmten Saugspannung ein bestimmter Wasser- bzw. Luftvolumenanteil entspricht. Aufgrund der besprochenen Untersuchungen habe ich drei Entwässerungsgrade unterschieden:

$f < 5 \text{ Vol.-%}$	Durchlüftung ungenügend
$5 < f < 7 \text{ Vol.-%}$	Durchlüftung kritisch
$f > 7 \text{ Vol.-%}$	Durchlüftung genügend

Im sandigen Flussauenboden ist die Grenze zwischen dem kritisch und genügend durchlüfteten Bodenraum etwa 20 cm über dem Wasserspiegel, im bindigen Flyschnassboden jedoch mehr als 50 bis 60 cm.

In der Abbildung 7 versuchte ich die Mächtigkeiten dieser drei Luftvolumenbereiche und damit den Durchlüftungszustand eines nicht entwässerten bzw. eines durch engliegende Gräben entwässerten Nassbodens zu vergleichen (berechnet anhand der Daten von Schuster, 1972). Die beiden Versuche lagen wenige Meter auseinander. Im folgenden betrachte ich eine Schönwetterperiode unmittelbar nach einem starken Regen von 60 mm. Der intensive Regen vermochte den entwässerten Boden nicht völlig aufzusättigen. Der nicht entwässerte Boden zeigte erst nach drei niederschlagsfreien Tagen jenen Sättigungsgrad, welcher der entwässerte Boden schon am Anfang aufwies. Zwischen den ausserordentlich eng liegenden Gräben (2,70 m) lag der Wasserspiegel nach drei Tagen in etwa 50 cm Tiefe, im nicht entwässerten Boden in 25 cm. Die Grenze zwischen dem kritisch und dem genügend durchlüfteten Bodenraum lag in der entwässerten Fläche in diesem Zeitpunkt in 25 cm, in der nicht entwässerten in 15 cm Tiefe. Die Wirkung der Entwässerung liegt nun vor allem darin, dass dieser Zustand am ersten Tag nach dem Regen nahezu schon erreicht war. Die Entwässerung wirkt also vor allem in der für die Durchlüftung kritischen, immer wiederkehrenden Periode während und unmittelbar nach dem Regen. Entscheidend scheint mir aber auch die Tatsache, dass selbst nach sieben niederschlagsfreien Tagen praktisch nur der durchwurzelte Oberboden genügend durchlüftet war.

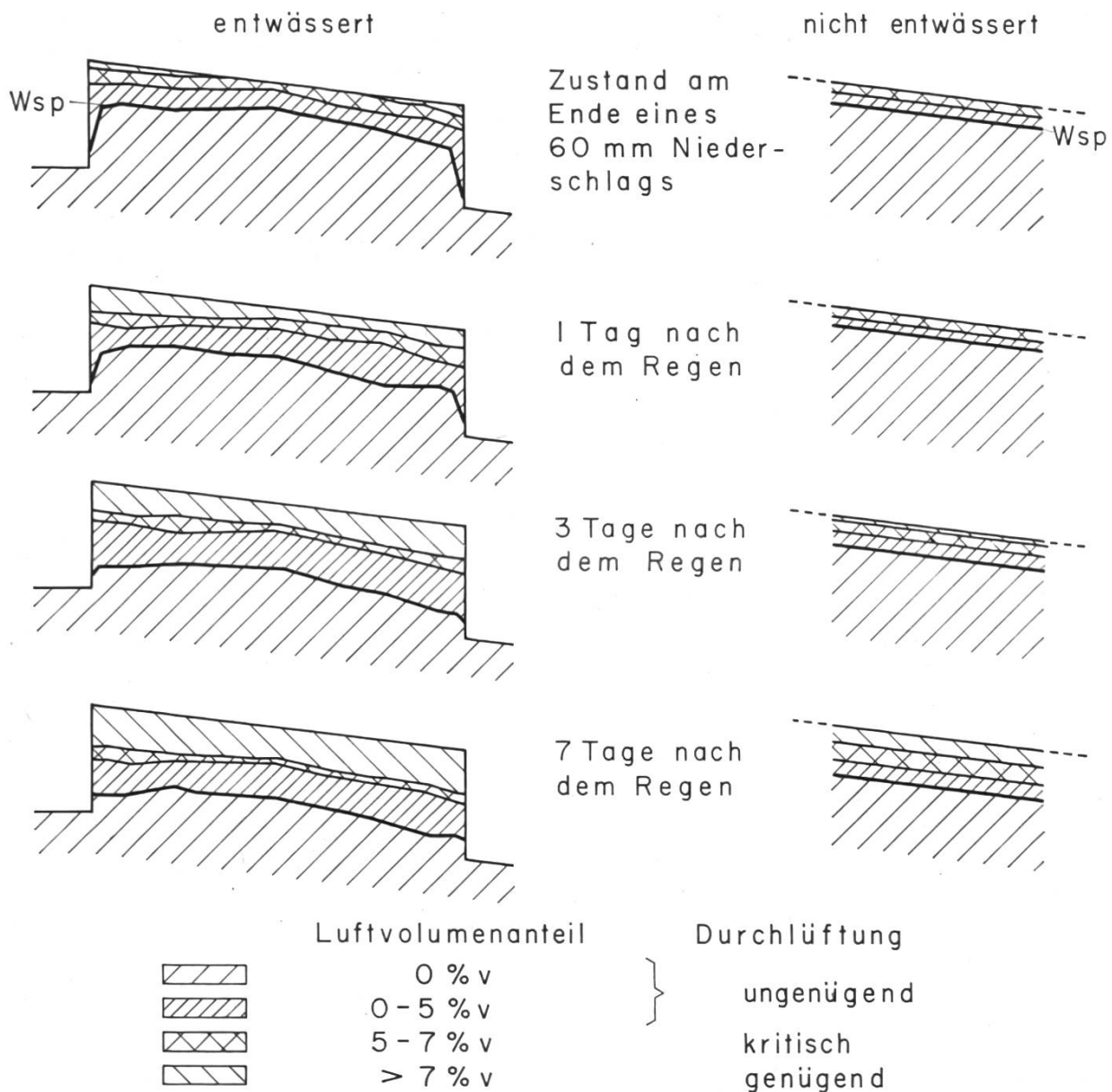


Abbildung 7. Einfluss einer Grabenentwässerung auf die Verteilung des entwässerten Porenvolumens über einem Wasserspiegel (Gottschalkenberg).

Für die Entwässerung von grobporenarmen Nassböden ergeben sich aus diesen Ausführungen zwei Konsequenzen:

1. Da schon wenige Volumenprozent Luftvolumenanteil eine genügende Durchlüftung gewährleisten, sind die wasserdurchlässigen, durchwurzelten Horizonte im oberen Profilverteil meist gut entwässerbar.
2. Die dichten, undurchlässigen Horizonte im unteren Profilverteil weisen eine sehr geringe Zunahme des Luftvolumenanteils über dem Wasserspiegel auf. Deshalb müsste der Wasserspiegel deutlich mehr als einen Meter abgesenkt werden, um überhaupt eine Verbesserung der Durchlüftung zu erzielen. Solche, meist graublau gefärbte Horizonte sind nicht entwässerbar.

Résumé

L'aération du sol dépend surtout de deux facteurs, à savoir de l'intensité de respiration de tous les organismes végétaux et animaux du sol et de la perméabilité du sol aux gaz, racines y comprises. La perméabilité des gaz dans le sol dépend en premier lieu de la teneur en volume anhydre des pores du sol.

Sur la base d'expériences sur des colonnes de sable remblayées artificiellement et d'essais en champ, on a démontré qu'une teneur en volume d'air de moins de 5 à 7 % n'assure pas une aération suffisante du sol. Selon les différentes structures des sols, la zone insuffisamment drainée au-dessus d'un plan d'eau, peut être d'une épaisseur très différente. Ce phénomène est démontré à l'exemple d'un sol du Flysch et d'un sol alluvionnaire. L'effet de fossés de drainage est le plus nettement perceptible pendant les deux premiers jours suivant une forte précipitation.

Traduction: J.-Ph. Schütz

Literatur

- Ahti, E., 1970: Einfluss der Vegetation auf die Saugspannungsverteilung über einem Wasserspiegel in einem dichten, mineralischen Nassboden. Unveröffentlichte Arbeit, Bodenphysik ETH
- Amoore, J. E., 1961: Dependence of mitosis and respiration in roots upon oxygen tension. *Proc. roy. Soc. B.* 154: 95—108
- Enoch, H., und Dasberg, S., 1971: The occurrence of high CO₂ concentration in soil air. *Geoderma* 6: 17—21
- Flühler, H., 1972: Sauerstoffdiffusion im Boden. Diss. Nr. 4950 ETH-Zürich
- Kristensen, K. J., und Enoch, H., 1964: Soil air composition and oxygen diffusion rate in soil columns at different height above a water table. 8th. Congr. Int. Soc. Soil Sci I: 159—170
- Kühnel, H., 1969: Untersuchung des Dränerfolges an 50 Jahre alten Anlagen. *Mitt. schweiz. Anst. forstl. Vers'wes.* 15: 331—436
- Lemon, E. R., und Erickson, A. E., 1955: Principle of the platinum microelectrode as a method of characterizing soil aeration. *Soil Sci.* 79: 383—392
- Leyton, L., und Rousseau, L. Z., 1957: Root growth of tree seedlings in relation to aeration; in: «The tree physiology», Symp. Harvard Forest, Ronald Press, N. Y. 1958
- Redies, H., 1962: Über «homobare» und «heterobare» Interzellularsysteme in höheren Pflanzen. *Beitr. zur Biologie der Pfl.* 37/3: 411—445
- Schuster, Ch., 1972: Wasserspiegelabsenkung zwischen zwei Drainagegräben in natürlich gelagertem Boden am Hang. Diss. Nr. 4935 ETH-Zürich
- Stolzy, L. H., und Letey, J., 1964: Measurements of oxygen diffusion rate with the Pt-microelectrode. III. Correlation of Plant response to soil oxygen diffusion rates. *Hilg.* 35: 567—576
- Strobel, Th., und Läser, H. P., 1973: Einfluss der Vegetation auf die Saugspannungsverteilung über einem Wasserspiegel in einem sandreichen Flussauenboden. Unveröffentlichte Arbeit, Bodenphysik ETH
- Wildenhain, J., 1966: Das Interzellularsystem der Wurzeln in Abhängigkeit von der Bodendurchlüftung bei verschiedenen Pflanzenvertretern in wechselnden Grünlandassoziationen. Diss. Rhein. F. W. Univ. Bonn, 163 S.