Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss foresty journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 134 (1983)

Heft: 12

Artikel: Bodenphysik und Ingenieur in der Praxis

Autor: Richard, Felix

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-767264

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: 15.07.2025

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

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen
Journal forestier suisse

134. Jahrgang | Dezember 1983 | Nummer 12

Bodenphysik und Ingenieur in der Praxis[1]

Von *Felix Richard*, CH-8142 Uitikon-Waldegg Oxf.: 114.1:114.3

1. Entstehung der Böden und Makromorphologie

Im Verlaufe der Erdgeschichte ist die äusserste Kruste unseres Globus laufend umgeformt worden.

Noch vor rund 20 000 Jahren hat die Würmvergletscherung den grössten Teil unseres Landes bedeckt.

Die nacheiszeitlichen Klimafolgen haben zusammen mit der Vegetation auf den vorverwitterten geologischen Ablagerungen und dem in jüngster Zeit wirksamen anthropogenen Einfluss unsere heutigen Böden entstehen lassen. Es ist wissenschaftlich schwierig, den Boden zu definieren. Man kann sich nicht einigen *(Jenny* 1980). Aber in dieser Beziehung sind die Bodenkundler nicht allein. Biologen können sich kaum einigen, was Leben ist, Mediziner nicht, was Gesundheit ist, Philosophen nicht, was Philosophie ist, Theologen nicht, was Gott ist, und vielleicht wir alle nicht, was normal ist.

Böden können permanent, periodisch oder nie Pflanzen tragen. Ein Boden ist ein Teil eines terrestrischen Ökosystems. *Öko-* erinnert uns an Ökologie, das Studium der Beziehungen der Organismen zu ihrer Umwelt; und *System* ist das magische Wort der exakten Wissenschaften (Jenny 1980).

Unsere Bodenbetrachtung ist holistisch: Ein Boden ist mehr als die Summe seiner Bestandteile. Das Resultat der Boden*bildung* ist meistens eine makromorphologisch deutlich feststellbare Gliederung des Bodens in Schichten, sogenannte Horizonte. Unter Makromorphologie verstehen wir die von blossem Auge sichtbare Form, Gestalt und Organisation eines Bodens. Die genetisch entstandenen Boden*horizonte* sind an einer charakteristischen Folge von Farben erkennbar *(Abbildungen 1, 3)*.

Wären diese Farbsequenzen *(Abbildung 3)*, die bestimmten Farbmischungen und das Spiel der Farbintensitäten nicht an einem ungewohnten Ort im Boden versteckt und nur unter festgelegten Randbedingungen beständig,

[1] Abschiedsvorlesung, gehalten am 7. Februar 1983 im Auditorium Maximum der ETH Zürich. Gedruckt mit Unterstützung des Fachbereichs Bodenphysik.

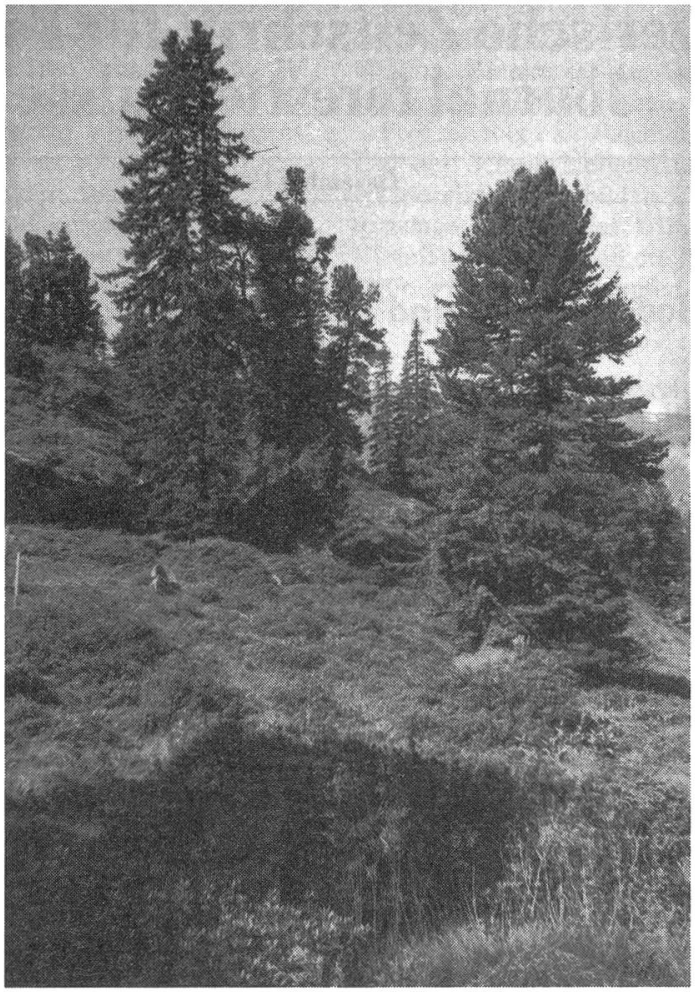


Abbildung 1. Lärchen-Arvenwald im Gental, 1845 m ü.M., Kanton Bern, *Larici-Pinetum cembrae (Ellenberg, Klötzli,* 1972, Nr. 59).

dann könnten einige dieser Naturschöpfungen als Meisterwerke gegenstandsfreier Malerei aufgefasst werden.

Wir sehen vor uns einen Boden, in dem durch mehr als 1000 Jahre wirksamer Auswaschung unter einer mächtigen organischen, filzigen Auflage ein weisser Auswaschungs- und ein roter eisenhaltiger Anreicherungshorizont entstanden sind. Man nennt ihn Podsol, ein russisches Wort für Ascheboden. Er entsteht bei uns unter Lärchen-Arven-Wäldern.

Dieses einfache Beispiel der Differenzierung eines Bodens in Horizonte zeigt uns, dass Eigenschaften, die am gewachsenen Bodenprofil im Gelände von blossem Auge erkannt werden, Ausdruck bestimmter Prozesse der Bodenbildung sind. Kennt man aus der Grundlagenforschung die Ursachen, die zu einer solchen Horizontdifferenzierung führen, dann ist das Studium der Makromorphologie von Böden im Gelände eine wohl anspruchsvolle, aber erfolgversprechende Methode, um wissenschaftlich erarbeitete Erkenntnisse mit einem grossen Grad an Verbindlichkeit auf den Boden im Gelände zu übertragen. In der Bodenphysik spielt die Kenntnis der Makromorphologie

für den Ingenieur in der Praxis eine dominierende Rolle. Wir können von einer kausalen Morphologie sprechen.

2. Physikalische Eigenschaften des Bodens

2.1 Der Boden als makroskopisches Sickersystem

Wir betrachten den Boden als ein terrestrisches, makroskopisches, offenes, poröses, biologisch aktives Filtersystem, das Pflanzen tragen kann.

Eine derart komplexe Definition kann Resignation auslösen und den Verzicht auf jegliche Forschungsarbeit nahelegen.

Da wir ein makroskopisch definiertes Filtersystem haben, erlaubt das der Bodenphysik unter Ausschluss lokaler mikroskopischer Effekte Wechselbeziehungen zwischen Materie, Energie und deren Einfluss auf die Pflanzen zu untersuchen. Wertvoll für uns war die jahrelange enge Zusammenarbeit mit der Hydromechanik ETH, vertreten durch Kollegen Dracos.

Wir können in einem Boden von einer *chemischen* und *physikalischen* Fruchtbarkeit sprechen.

Wenden wir uns Faktoren zu, die die physikalische Fruchtbarkeit beeinflussen. Dazu gehört das Wasser.

Ohne Gegenwart von genügend Wasser können keine Pflanzen leben. Was heisst genügend Wasser? Jedermann ist bekannt, dass Niederschlagswasser nicht unbehindert durch den Wurzelraum des Bodens in grössere Tiefen sickert. Es wird im Boden festgehalten. Auch bei Dürre ist immer noch Wasser vorhanden. Warum kann die Pflanze dieses Restwasser nicht aufnehmen? Die Ursache der Nichtverwertbarkeit liegt in der zu grossen Energie, die die Pflanze aufwenden muss, um Residualwasser aus den Bodenporen aufzunehmen.

2.2 Der Energieinhalt des Bodenwassers

Im Dilemma, wie man den Energieinhalt des Bodenwassers erfassen und mit Reaktionsabläufen im System Boden-Pflanze, Atmosphäre in Einklang bringen kann, hat man den thermodynamischen Begriff der Gibbschen Freien Energie zu Hilfe gezogen.

In unserem Fall entspricht die Gibbsche Freie Energie angenähert der Saugspannung, die, wie wir zeigen, im teilgesättigten Boden auf das Wasser wirkt.

In *Abbildung 2* ist ein mikroskopischer Schnitt aus einem natürlich gelagerten, porösen Boden dargestellt, in dessen Poren wir unter gekrümmten

Menisken Wasser eingezeichnet haben. Da Kapillaren vorliegen, steht das Wasser als benetzende Flüssigkeit unter gekrümmten Menisken (in *Abbildung 2* markiert), die im Wasser einen Unterdruck oder eine Saugspannung erzeugen. Diese wird umso grösser, je kleiner der Krümmungsradius ist. Die Pflanze muss Arbeit leisten, um kapillar gebundenes Wasser aufnehmen zu können.

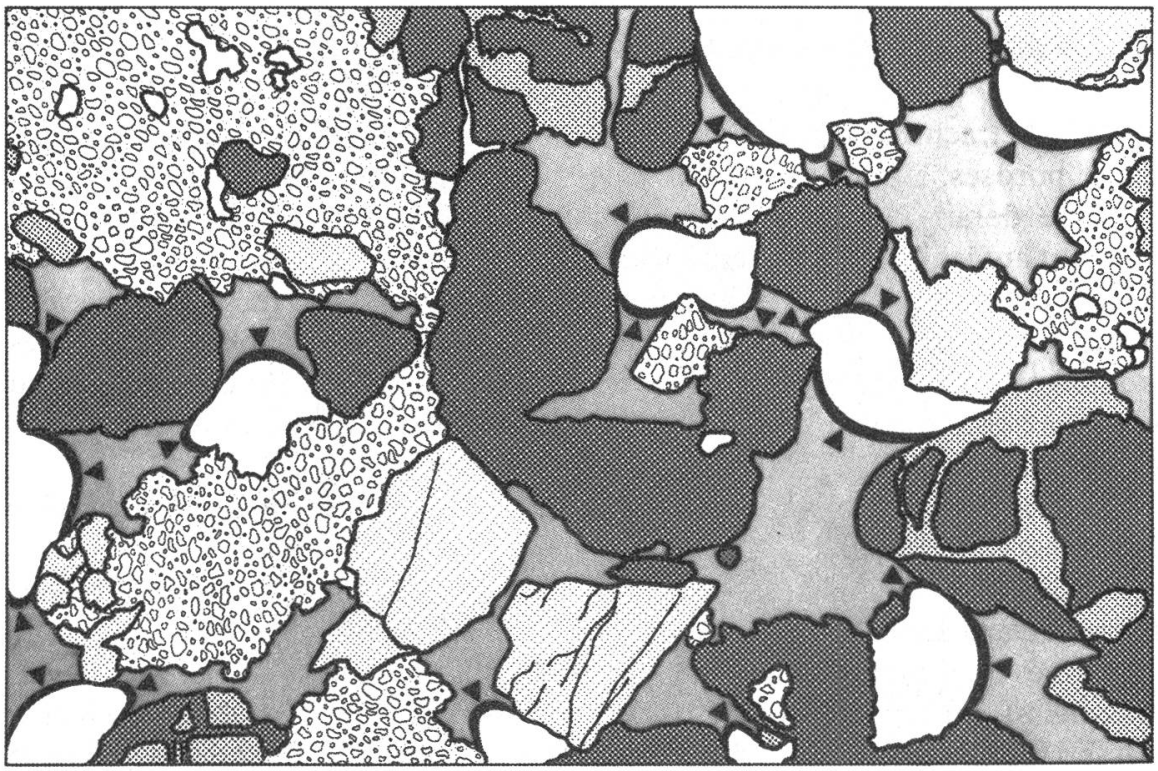


Abbildung 2. Mikroskopischer Schnitt durch einen Boden (Dünnschliff). In bestimmten Teilen des Porenraumes ist unter gekrümmten Menisken Wasser eingezeichnet (wasser-teilgesättigter Boden).

Ausgehend von Wassersättigung, steigt die Saugspannung, je kleiner der Bodenwasser-Gehalt ist. Die Beziehung Bodenwasser zu Saugspannung wird Desorptionskurve *(Abbildung 4)* genannt.

Nahe Sättigung finden wir Wasser, das durch die Erdgravitation in 2 bis 3 Tagen entfernt wird. Bei zunehmender Saugspannung verändert sich der Wasserzustand für die Pflanzen von leicht, zu schwer, zu nicht verwertbar. Parallel dazu gehen die Transpiration und das Wachstum zurück. Bei 15 000 cm Saugspannung oder angenähert 15 bar ist der permanente Welkepunkt erreicht.

Für Sand-, Lehm- und Tonböden haben die Desorptionskurven einen charakteristischen Verlauf *(Abbildung 4)*. Sie sind für den Wasserhaushalt eines Bodens von fundamentaler Bedeutung.

Abbildung 3. Eisen- (Humus)-Podsol (auf Silikat-Hangschutt) des Lärchen-Arvenwaldes (1845 m ü.M.) in *Abbildung 1.* ▷

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
1
2
3
4
5
6

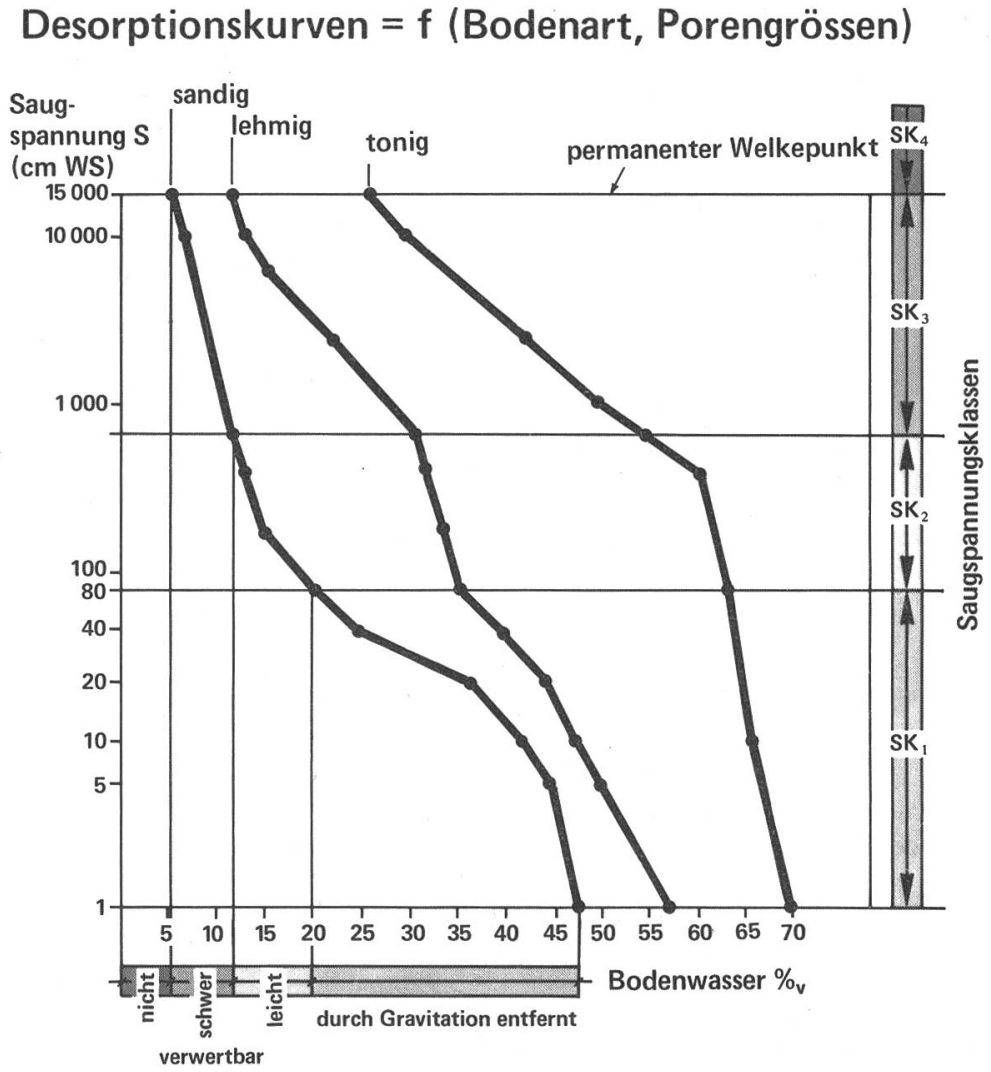


Abbildung 4. Desorptionskurve. Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Saugspannung. Beispiele für einen sandigen, lehmigen und tonigen Boden (halblogarithmische Darstellung).

Wir schlagen vor *(Abbildung 5)*, die mit steigender Saugspannung abnehmende pflanzliche Verwertbarkeit des residualen Bodenwassers, in Ergänzung zu *Schroeder* (1978), wie folgt zu benennen: Gesättigt — vernässt — nass — feucht — frisch — antrocken — trocken — dürr.

Saugspannungen werden mit Tensiometern gemessen, deren Feldtauglichkeit aus unserer Sicht Brülhart erstmals in einem Grossversuch in der Schweiz erfolgreich geprüft hat.

An einem Beispiel aus der Walliser Rhoneebene *(Abbildung 6)* zeigen wir, wie unter einem Doppelbestand aus Spalier-Apfelbäumen über Graskultur durch ständigen Wasserentzug bei ausbleibendem Regen, die Verwertbarkeit des Restwassers im Wurzelraum zunehmend schlechter wird.

Zu Beginn einer 19tägigen Trockenperiode *(Abbildung 7,* oben), enthält der Boden durchgehend leicht verwertbares Wasser. Am Ende der Trockenperiode war der Restwassergehalt an der Bodenoberfläche *nicht* mehr ver-

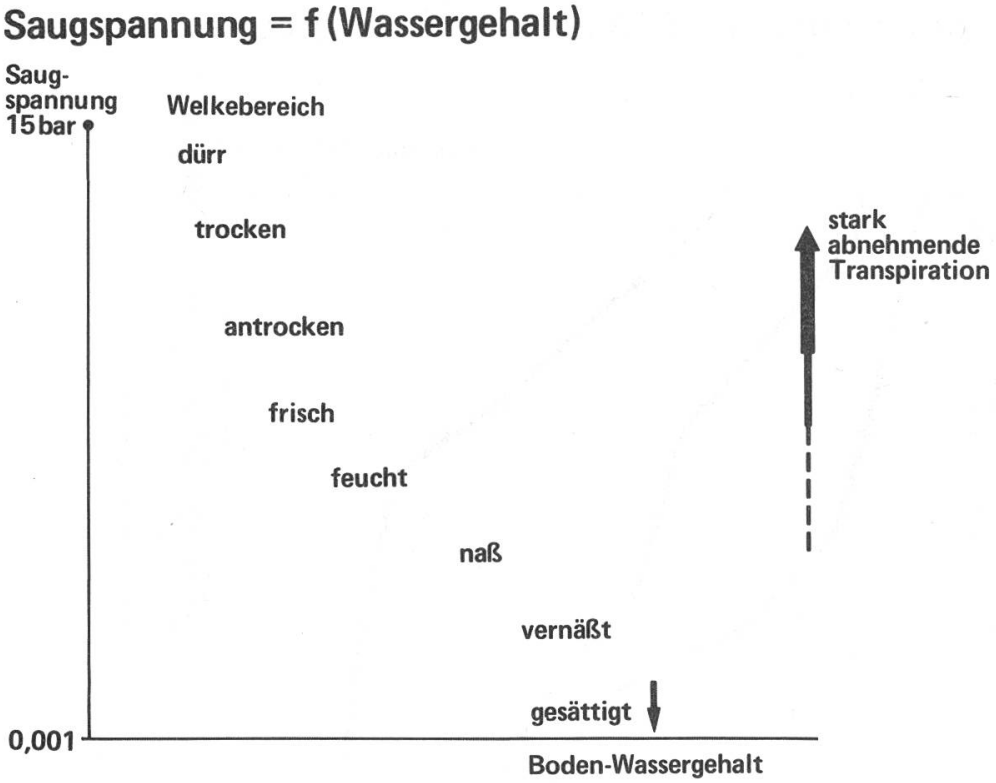


Abbildung 5. Vorschlag zur Benennung der Verwertbarkeit des Bodenwassers durch Pflanzen bei zunehmender Saugspannung, das heisst bei zunehmender Trockenheit im Boden.

Abbildung 6. Rhoneebene bei Fully, Wallis. Landwirtschaftliche Intensivkulturen. Bewässerung. *Swissair Photo und Vermessungs AG.*

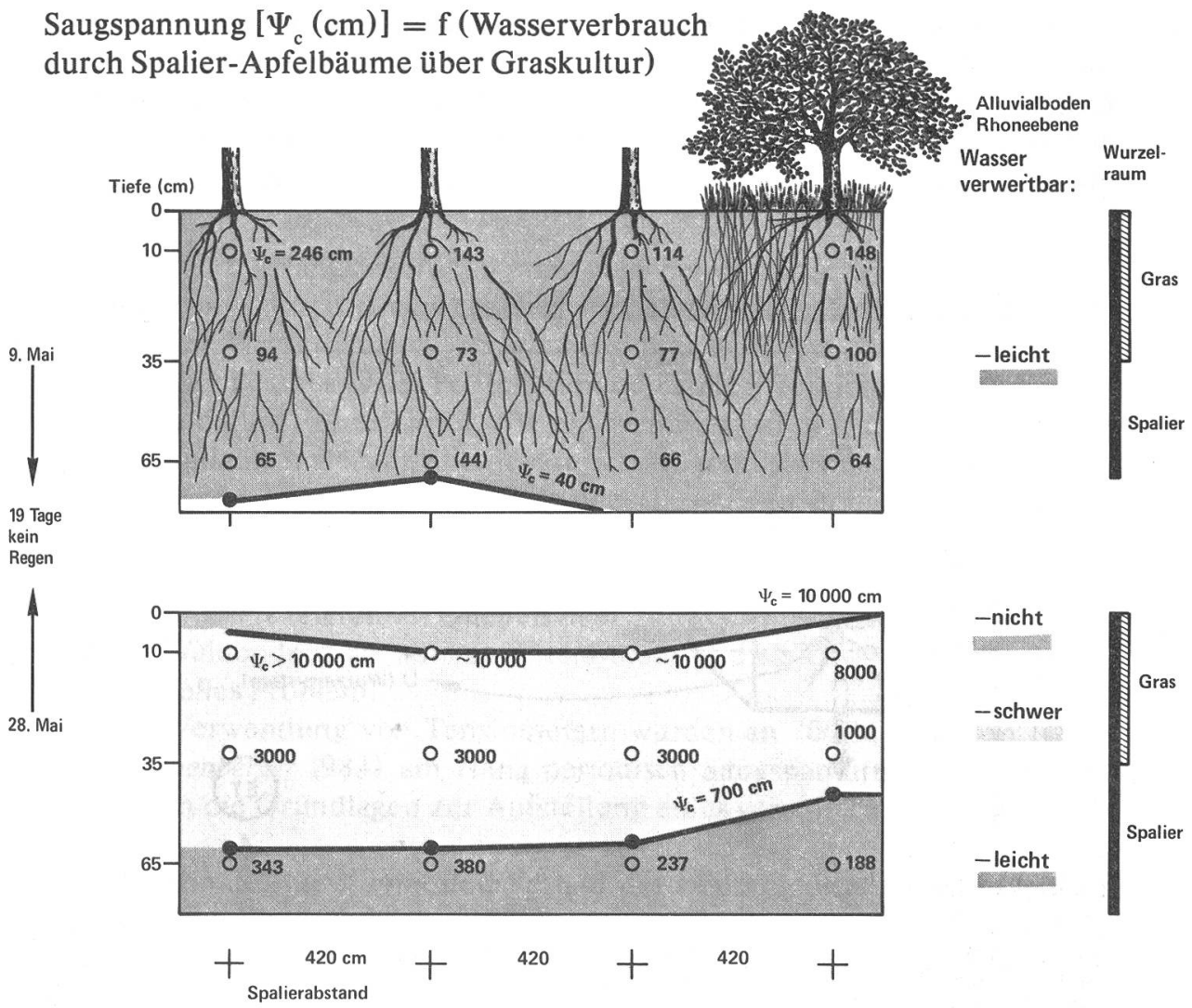


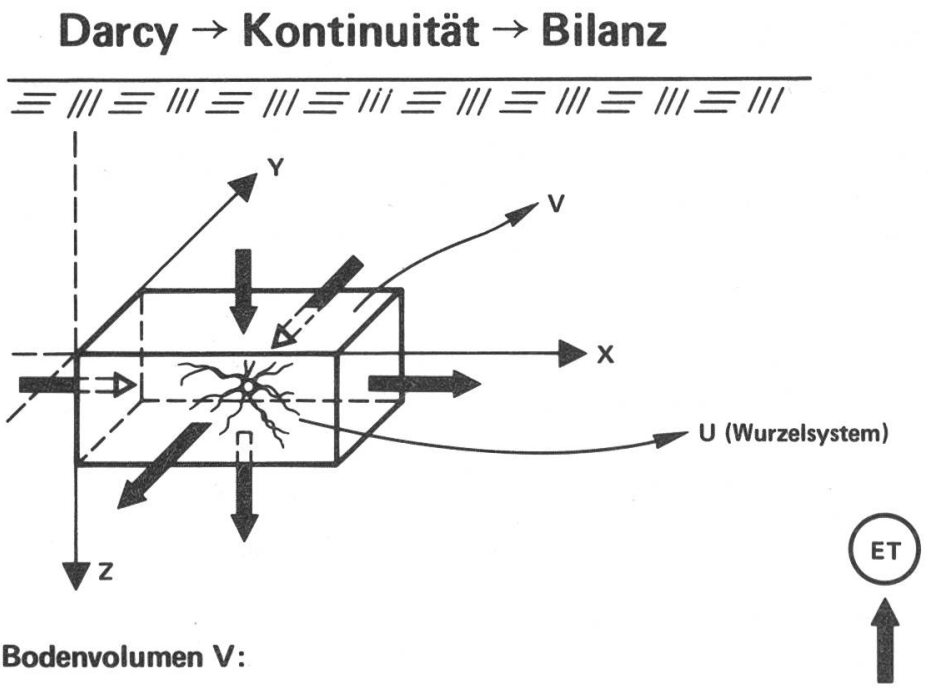
Abbildung 7. Wasserverbrauch durch Spalier-Apfelbäume in der Walliser Rhoneebene.

wertbar *(Abbildung 7,* unten). Nach unten anschliessend im Bild stand nur noch *schwer* verwertbares Wasser zur Verfügung. Das *leicht* verwertbare Wasser befindet sich unterhalb des Wurzelraumes. Eine solche Wasserversorgung ist für optimale organische Produktion ungenügend. Mit bodenphysikalischen Methoden werden die Wasserraten bestimmt, die in solchen Fällen periodisch zugegeben werden müssen.

3. Wasserbilanzen

Soll in einem natürlich gelagerten Boden, im Wurzelraum oder in Teilen davon der Wasserhaushalt quantitativ erfasst werden, dann müssen wir Randbedingungen festlegen.

So nehmen wir an, im betreffenden Volumenelement sei die Veränderung des Wassergehaltes gleich der Summe der Zu- und Wegflüsse plus der Entzug durch die Pflanzenwurzeln. Dieses Konzept führt zur Anwendung der sogenannten Bilanzgleichung *(Abbildung 8)*, die in mathematischer Formulierung pro Volumeneinheit das ausdrückt, was wir eben definiert haben.



Im Bodenvolumen V:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \cdot \frac{\partial H}{\partial z}\right) + U(x,y,z,t)\right]$$

Abbildung 8. Wasserbilanz pro Volumeneinheit in einem durchwurzelten Volumenelement Boden unter Anwendung des Sicker-Gesetzes nach Darcy, kombiniert mit der Kontinuitätsgleichung.

In dieser allgemeinen Form ist die Differentialgleichung nicht lösbar. Die Gleichung ist nicht linear, und die Parameter sind nicht bekannt.

Es bleibt nichts anderes übrig, als im Felde im Boden jene Parameter durch Messung zu bestimmen, die für die Lösung der Bilanzgleichung nötig sind. Das sind in erster Linie die vom Wassergehalt und der Zeit abhängige Leitfähigkeit ($k_{x,y,z}$) und die Saugspannung (in H enthalten). Dazu kommt die Messung der nötigen Begleitparameter. In der Praxis muss man nach *numerischen* Lösungen suchen. Man muss sich mit finiten Werten und Differenzen begnügen.

Unter Anwendung des Bilanzierungskonzeptes zeigen wir Beispiele über Wassergehaltsänderungen im Boden unter Vegetationseinfluss.

4. Beispiele über Zusammenhänge zwischen Bodenwasserhaushalt und Vegetation

4.1 Zweidimensionale Sickerungen

Im Projekt «Hangsickerung», das vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützt und durch *Greminger* (1982) geleitet wurde, untersuchten wir in Meggen den Wasserhaushalt zweidimensional in einem Hangboden unter Einfluss eines Bestandes des Peitschenmoos-Fichten-Tannenwaldes.

Es ging darum, zu erfahren, wie ein Waldbestand in Hanglage den Wassergehalt und die Sickerung in einem teilgesättigten, stark sauren Braunerdeboden in Abhängigkeit von der Zeit beeinflusst. Mit dem Wasserhaushalt verknüpft sind die Evapotranspiration, das Bestandeswachstum und die Tiefensickerung. Letztere ist jener Betrag, der aus dem offenen Sickersystem Boden in grössere Tiefen zu Quellen oder zum Grundwasser geht. Der Einfluss des Waldbodens als aktives Filtersystem und als Grundwasserspender ist ein aktuelles Problem.

Unter Verwendung von Tensiometern wurden an 700 Messstellen *(Greminger, Leuenberger* 1983) am Hang periodisch Saugspannungen gemessen. Diese gaben die Grundlagen zur Aufstellung eines vereinfachten Strömungsnetzes.

Das Strömungsnetz zeigt den Verlauf der Linien gleichen Wasserpotentials im Boden. Damit werden Sickerrichtung und Sickerbeträge festgelegt.

In den folgenden zwei Bildern zeigen wir für eine Nassperiode mit durchschnittlich 10 mm Niederschlag pro Tag und für das Ende einer 35tägigen Trockenperiode das typische Zusammenwirken von Vegetation und Wasserhaushalt im Hangboden:

Während der Nassperiode *(Abbildung 9)* verliefen die Äquipotentiallinien nahezu horizontal und in ähnlichen Abständen. Wir stellen eine lotrechte Sickerströmung fest, die vorwiegend durch die Gravitationskraft ausgelöst wird. Zu bemerken ist, dass durch die Wasseraufnahme der zwei Fichten, die im Gelände an diesem Ort des Sickersystems tatsächlich wurzeln, die Sickerrichtung nicht geändert wurde: Die lotrechte Strömung mit beträchtlichen Sickerraten hat für Wuchsgebiete bis rund 1200 mm gleichförmig verteilten Jahresniederschlags grundsätzliche Bedeutung. Viele normal und übermässig durchlässige Böden des Mittellandes erreichen den dazu nötigen Wassersättigungsgrad erst am Ende des Winters. Das ist dann die Zeit der grössten Tiefensickerung. *Germann* (1976) hat in einem Nationalfondsprojekt derartige Verlagerungsprozesse in Böden unter Wiesen- und Waldvegetation in ihrer jahreszeitlichen Veränderung eingehend untersucht.

Das Strömungsbild am Ende der 35tägigen Trockenphase *(Abbildung 10)* ist grundsätzlich anders. Die Fichtenwurzeln haben grosse Mengen Boden-

wasser aufgenommen. Die Sickerrichtung verläuft nun konzentrisch aus benachbarten Bodenpartien *in* den Wurzelraum der Fichten. Es gibt *keine* lotrechte Wassersickerung mehr. Die Gradientumkehr bewirkt, dass Wasser entgegengesetzt der Gravitationskraft von unten her *in* den Wurzelraum einsickert. Die durch die Fichten aufgenommene Wassermenge betrug im Mittel von zwei Vegetationsperioden 96 % der auf den Waldboden fallenden Niederschläge. Das entspricht einer Niederschlagsmenge von 500 mm pro Vegetationsperiode zu rund 180 Tagen oder rund 2,8 mm · d^{-1}. Auch diese Feststellung darf verallgemeinert werden: Im schweizerischen Mittelland werden die Niederschläge während der Vegetationszeit durch die Evapotranspiration der Pflanzen praktisch aufgezehrt. Es gibt in dieser Zeit keine nennenswerte Nachlieferung von Wasser zum Grundwasser.

Zudem wurde festgestellt, dass bei einem Ansteigen der Saugspannung auf rund 200 cm die Evapotranspiration deutlich zurückgeht und bei 350 cm auf 60 bis 50 % gesunken ist. Die grosse Empfindlichkeit der Waldbestände,

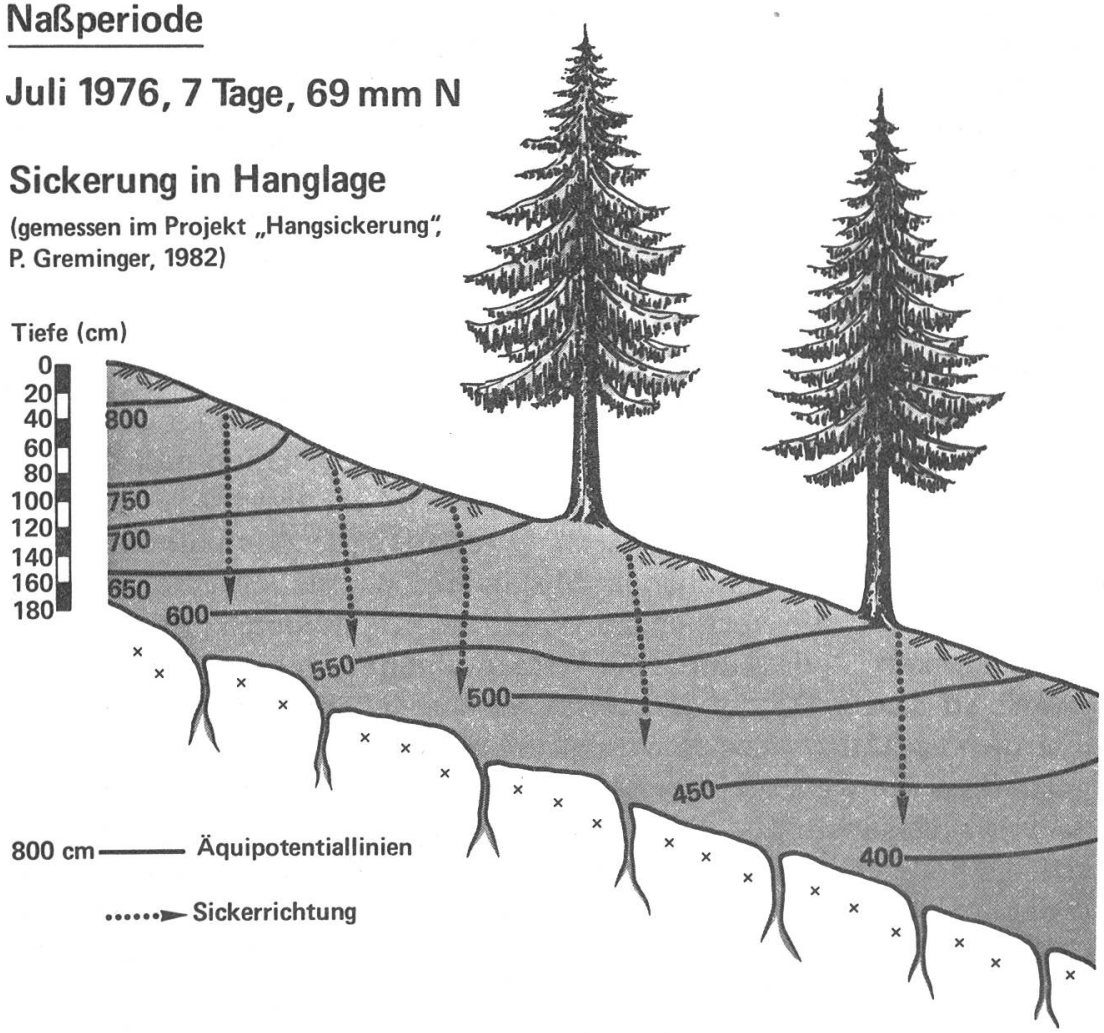


Abbildung 9. Nahezu horizontaler Verlauf der Äquipotentiallinien und nahezu lotrechte Sickerung während einer Nassperiode. Projekt «Hangsickerung»: zweidimensionale Sickerung, Polizeiwald, Meggen, Kanton Luzern. Nationalfondsprojekt.

bei ansteigender Saugspannung die Evapotranspiration rasch zu reduzieren, konnten wir auch hier wieder experimentell bestimmen.

Die kontinuierliche Wasseraufnahme durch standortsgerechte Laubmischwälder und Nadelwälder hat in unvollkommen durchlässigen und damit periodisch in variablen Bodentiefen staunassen Böden ökologisch extrem wichtige Bedeutung.

Staunässe und der dadurch verursachte Wasserspiegel erkennt man makromorphologisch am grau-blau-hellfleckigen Unterboden *(Richard, Lüscher* 1983, Lokalform «Abist»). Ein tiefstreichendes Wurzelwerk entzieht dem Boden durch Transpiration so viel Wasser *(Abbildung 11)*, dass die nutzbare Bodentiefe insbesondere während der Vegetationszeit nahezu verdoppelt wird. Eingehende Untersuchungen über Entwässerungen und Durchlüftungen sind durch *Flühler* (1973) und *Schuster* (1974) durchgeführt worden.

Kahlflächen als Folge unpassender Schlag- und Verjüngungsverfahren verursachen in unvollkommen durchlässigen Böden vom Typ «Abist» ein

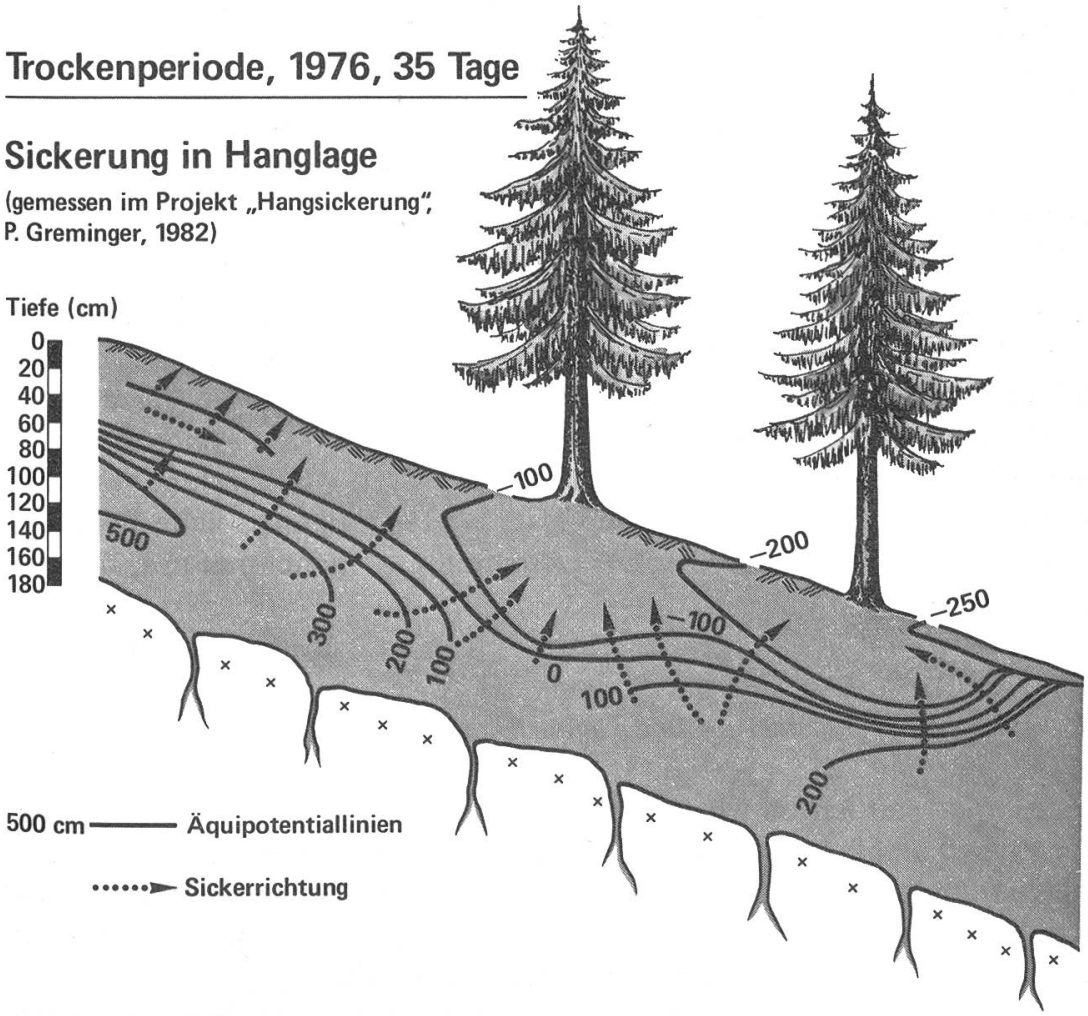
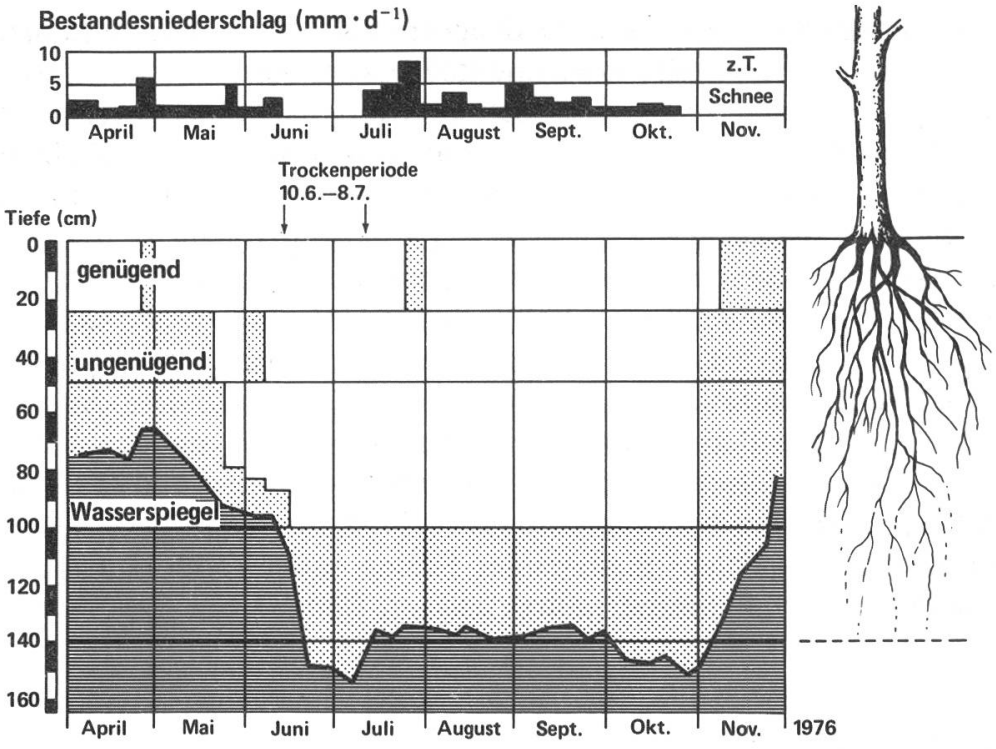


Abbildung 10. Konzentrische Wassersickerung aus benachbarten Bodenpartien in den Wurzelraum während einer Trockenperiode. Projekt «Hangsickerung»: zweidimensionale Sickerung, Polizeiwald, Meggen, Kanton Luzern. Nationalfondsprojekt.



Wasserspiegel – Wasserentzug – Durchlüftung

Abbildung 11. Biologische Entwässerung des Wurzelraumes eines braunerdigen Mullbodens über Gley durch einen Laubholzbestand. Lokalform «Abist» (Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz, Band 3, 1983).

Ansteigen des Wasserspiegels und längere Phasen der Wassersättigung des Bodens. Für viele Wirtschaftsbaumarten bedeutet das eine wesentliche Verschlechterung des Standortes. Unter landwirtschaftlicher Kultur müssen solche Böden künstlich entwässert werden. Als Waldböden gehören sie bei streng angepasster Bestockung zu unseren optimalen Wuchsorten. Während des Zweiten Weltkrieges hat man immer davon abgeraten, solche Bodentypen unter landwirtschaftliche Kultur zu nehmen – manchmal mit, manchmal ohne Erfolg.

4.2 Skipiste, Vegetationsänderung und Tiefensickerung

Vor einiger Zeit hatten wir uns zusammen mit Zeller und von Wattenwyl mit der Frage zu befassen, ob zur Verbesserung von Skipisten eine eventuelle Waldrodung einen nachteiligen Einfluss auf die Wasserinfiltration und damit auf die Stabilität eines postglazialen Rutschhanges haben könnte. Der Hang verläuft von Sass Runzöl hinunter nach St. Moritz.

Im Verlaufe der Jahrhunderte sind durch das langsame, heute noch andauernde Kriechen des Hanges Lärchen, Arven wie auch der Kirchturm von St. Moritz schief gestellt worden.

Durch heliotropische, kontinuierliche, pflanzeneigene Steuerung stellt die Natur ihre Erzeugnisse mindestens partiell wieder senkrecht. Die Baumspitze strebt senkrecht dem Himmel zu.

Der Kirchturm kann das nicht. Bis heute wird die Baukunst noch nicht verletzt, wenn der Baumeister nicht in der Lage ist, seinem Bauwerk eine analoge Vorrichtung zur automatischen Selbstkorrektur seiner abnormal gewordenen Ortslage einzubauen.

Der Mensch korrigiert seine Bauwerke seltener, aber markanter. So hat der Gemeinderat von St. Moritz zuhanden einer Abstimmung beantragt, den Turm mit 1,63 Millionen Franken wieder lotrecht zu stellen.

Wir nahmen an *(Abbildung 12)*, dass nach der Waldrodung Weide entstehen werde. Somit galt es, den mutmasslichen Unterschied in der Tiefensickerung q (im Rechteck) zu bestimmen, der sich bei diesem Vegetationswechsel einstellen könnte.

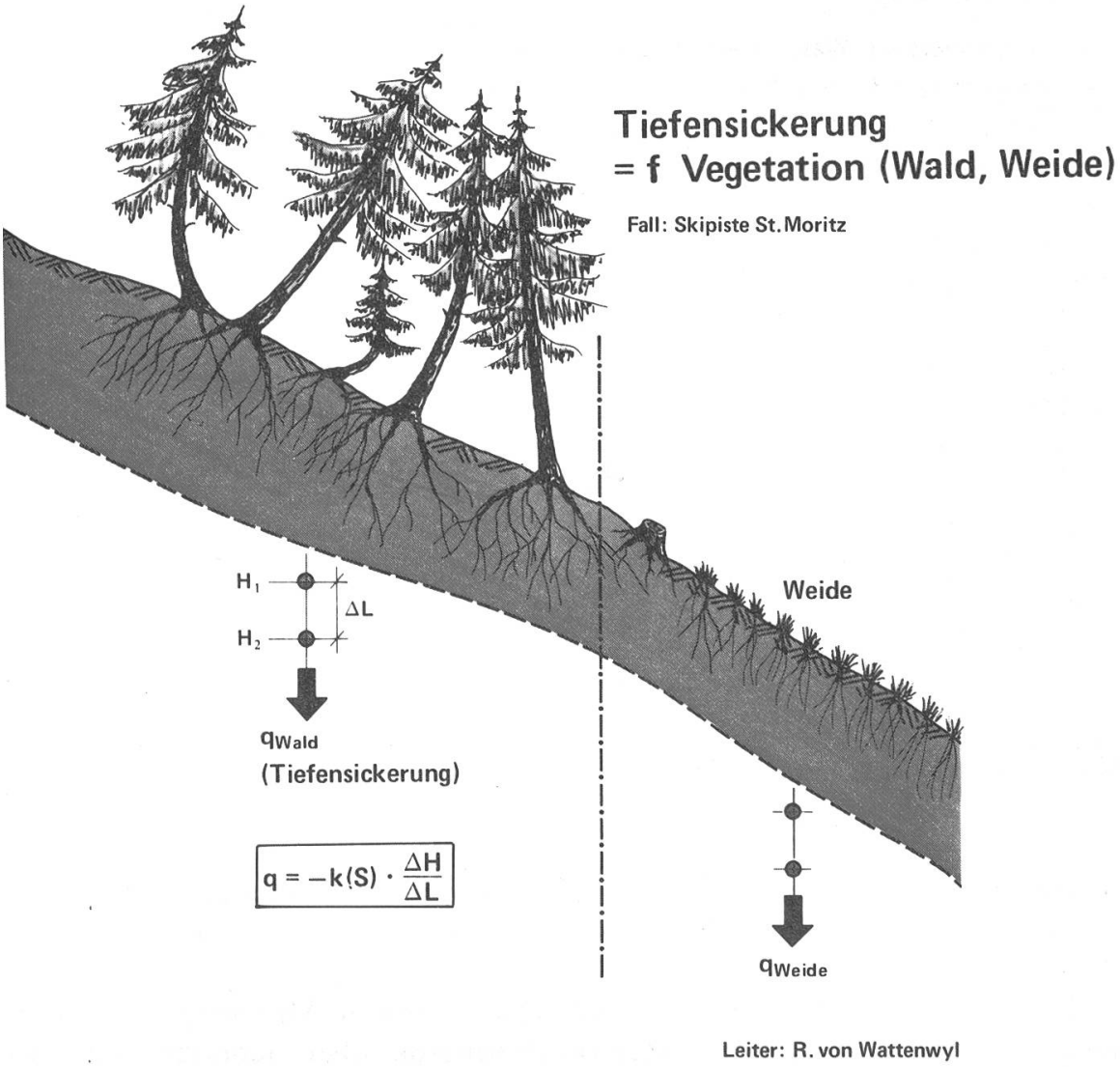


Abbildung 12. Messdispositiv zur Bestimmung der Tiefensickerung q unterhalb des Wurzelraumes unter Wald- und Weidevegetation. Projekt «Skipiste», St. Moritz.

Da neben den Arven-Lärchen-Wäldern auf vergleichbaren Böden schon Weiden vorhanden waren, konnten wir in repräsentativ über die Fläche verteilten Stichproben beider Vegetationstypen die zeitabhängige Tiefensickerung am unteren Rande des Wurzelraumes im teilgesättigten Boden nach Darcy bestimmen.

Die Messungen ergaben *(Abbildung 13)*, dass von Mai bis September unter Wald und unter Weide ungefähr gleich viel Wasser in die Tiefe sickert. Im Frühjahr nach der Schneeschmelze waren es rund 1 bis 10 m^3 Wasser pro Hektar und Tag. Im Verlaufe des Sommers ging die Sickerung auf rund 1 und weniger m^3 pro Hektar und Tag zurück. Im August sickerte zeitweise Wasser infolge Gradientenumkehr sogar von unten her *in* den Wurzelraum *hinauf*. Wir kamen zum Schluss, dass der Vegetationswechsel die Tiefensikkerung nicht grundsätzlich veränderte.

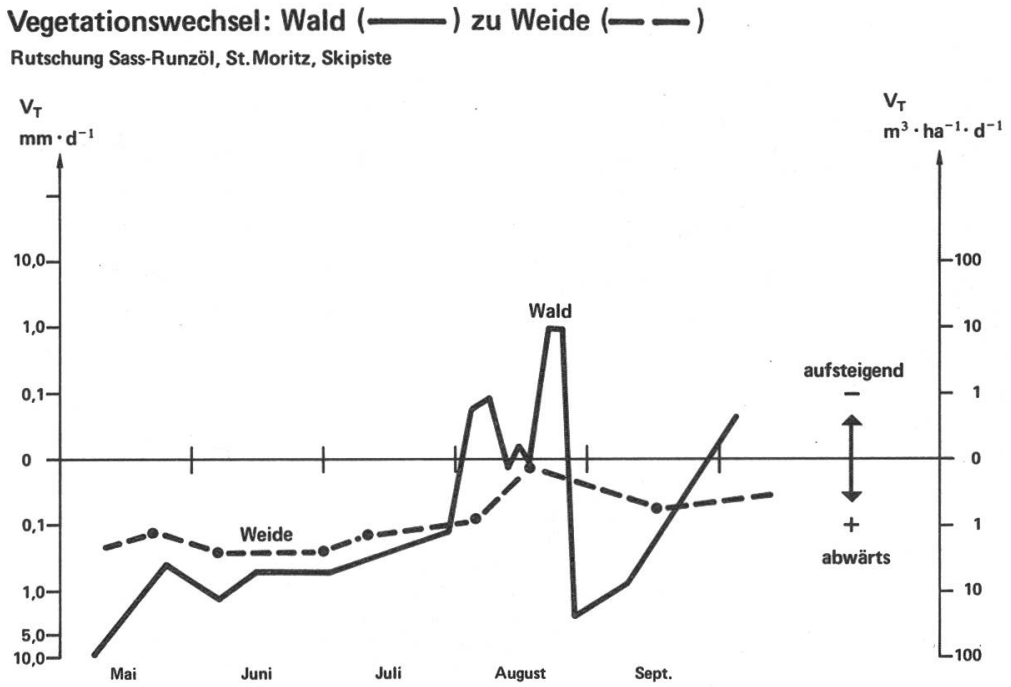


Abbildung 13. Zeitabhängige Tiefensickerung V_T ($mm \cdot d^{-1}$ und $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}$) unterhalb des Wurzelraumes unter Wald und unter Weide. Projekt «Skipiste», St. Moritz.

4.3 Der Einfluss der Schichtung auf die Infiltration, den Wasservorrat und die Evapotranspiration

Zweischichtige Böden sind in der Schweiz verbreitet. Man vergleiche hiezu beispielsweise eine saure Moder-Parabraunerde über Schotter vom Typ «Winzlerboden» (Lokalform Nr. 11, Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz, Band 3, 1983).

Typische Repräsentanten solcher Bodentypen sind Sand-Schotter-Ablagerungen. Die sandige Deckschicht wird forst- und landwirtschaftlich genutzt. Sie ist austrocknungsgefährdet.

Befindet sich in bestimmter Tiefe des Schotters Grundwasser, dann werden solche Gebiete je nach Lage als potentielle Zonen der Grundwasseranreicherung betrachtet. Im Hinblick auf ihre standörtliche und technische Bedeutung lohnt es sich, die Physik des Wasserhaushaltes derartiger Filtersysteme unter den örtlich gegebenen Nutzungs- und Umweltbedingungen zu untersuchen.

Im Forschungsprojekt «Sand/Schotter» wählten wir im Hardwald bei Laufenburg eine stark saure, sandreiche Moder-Parabraunerde, die in 90 bis 110 cm Tiefe durch karbonathaltigen Schotter abgelöst wurde. Die Sandschicht ist der Wurzelraum, der unterliegende Schotter ist praktisch wurzelfrei.

Aus der Vielzahl der Untersuchungen von *Vogelsanger* (1983) zeigen wir den wasserstauenden Einfluss der Grenzschicht, die zwischen dem *über*liegenden Sandboden und dem *unter*liegenden Schotter vorhanden ist.

Wir betrachten eine Aufsättigungsphase *(Abbildung 14, mit Diagrammen 1, 2, 3)* und stellen fest, dass der Wassergehalt w im Sandboden *(Diagramm 1)* auf 30 bis 40 $\%_V$ des Gesamtbodens ansteigen konnte, ohne dass Wasser durch die Grenzzone nach unten in den Schotter sickerte. Die *sprunghafte* Abnahme des Wassergehaltes durch die Grenzschicht auf rund 5 % im Schotter belegt das. In *Diagramm 2* ist, von oben nach unten betrachtet, die über die Grenzschicht Sand/Schotter sprunghafte Zunahme der Saugspannung S

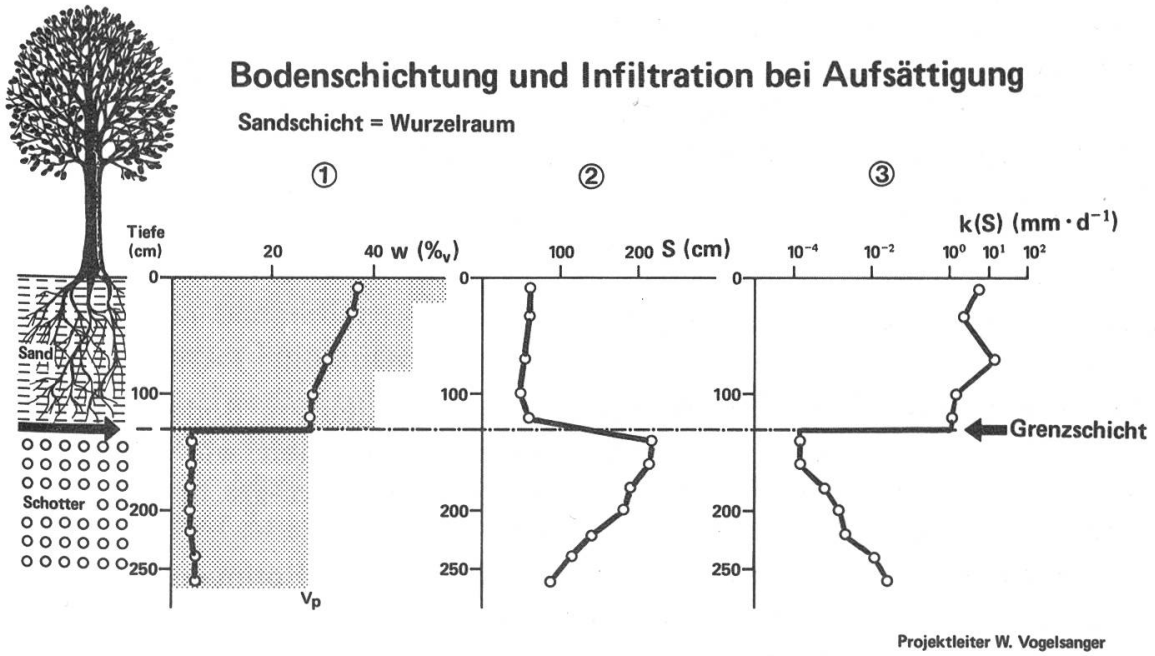


Abbildung 14. Darstellung einer Aufsättigungsphase: Verteilung des Wassergehaltes w ($\%_V$), der Saugspannung S (cm) und der Wasserleitfähigkeit k(S) ($mm \cdot d^{-1}$) in einer sandreichen Moder-Parabraunerde über karbonathaltigem Schotter mit Grenzschicht «Sand/Schotter», Gemeinde Kaisten, Staatswald «Hard», Kanton Aargau.

dargestellt. Sie ist eine Folge des starken Unterschiedes in der Porengrössenverteilung im Sand und im Schotter.

Gleichzeitig sehen wir in der sprunghaften Abnahme der Wasserleitfähigkeit k(S) *(Diagramm 3),* dass diese im Schotter rund 10 000mal kleiner ist. Hydromechanisch gesehen wirkt die Grenzschicht als *undurchlässige* Schicht.

Durch die Präsenz der Grenzschicht wurden im Wurzelraum zusätzlich 15 bis 25 mm leicht verwertbares Wasser zurückbehalten. Das entspricht einer zusätzlichen Wasserreserve für rund 10 Schönwettertage.

Grenzschichten Sand/Schotter verursachen in den an sich zur Austrocknung neigenden sandigen Böden eine ökologisch äusserst willkommene Reserve an leicht verwertbarem Wasser.

Die Messungen ergaben, dass erst bei sehr niedrigen Saugspannungen von 10 bis 15 cm, das heisst bei Wassergehalten nahe Sättigung, der Durchbruch des Sickerwassers durch die Grenzschicht nach unten in den Schotter erfolgte.

Grenzschichten sind in Feldböden makromorphologisch leicht erkennbar. Stellt man an einem weiter nicht untersuchten Boden X eine solche fest, dann kann unter sonst vergleichbaren Bedingungen deren günstige Wirkung auf den Wasserhaushalt dieses Bodens vorausgesagt werden.

Die Untersuchungen haben ferner ergeben, dass die Waldbestände auf diesem Standort mit Vorliebe das leicht verwertbare Wasser aus 0 bis 90 cm Wurzelraumtiefe aufnehmen. Erst wenn das aufgebraucht ist, entnehmen sie solches aus 90 bis 140 cm Tiefe. Regnet es, dann schalten die Wurzeln rasch wieder in oberflächennahe Räume um.

Sickerströmungen sind in teilgesättigten Schotter- und Grobskelettböden noch ungenügend untersucht. Unterstützt durch den Nationalfonds untersucht *Buchter* (1983) in einem Grundlagenprojekt, wie der Sickerprozess in derartig inhomogenen Sickersystemen gemessen und rechnerisch bestimmt werden kann.

4.4 Wasserrückhaltevermögen durch Vegetation

Eine interessante Zusammenarbeit mit Bauingenieuren, Bodenmechanikern und Geologen stellte uns die Aufgabe zu untersuchen, wie viel Wasser mehr in einen Hangboden ohne Vegetation einsickert als in denselben Boden mit Vegetation.

Es handelt sich um den Rutsch am Edelweisshang bei Eptingen. Die Grasnarbe des Edelweisshanges wurde progressiv auf einer Fläche bis 4,8 ha abgetragen, um Hangschutt für den Autobahnbau zu erhalten. Der Rutsch kam und ergab das Schadenbild, das seinerzeit mehrfach besprochen wurde.

Im Zusammenhang mit dem Hangrutsch galt es im Nachgang abzuschätzen, wie viel Wasser mehr nach fortschreitendem Abtrag der Vegetations-

decke in den Hang auf der gegebenen Fläche mutmasslich einsickerte als vorher.

Die Summationskurve der Einsickerungsmengen *(Abbildung 15)* zeigt, dass in der Zeitperiode vom Juli 1968 bis Juli 1969 durch kontinuierlichen Humusabtrag ungefähr 36 000 m³, das heisst 1,5 mal mehr Wasser durch 4,8 ha Hangoberfläche einsickerte, als bei Grasbedeckung durchgegangen wäre. Das Rückhaltevermögen und der Verbrauch von Niederschlagswasser durch die Vegetation ist gross.

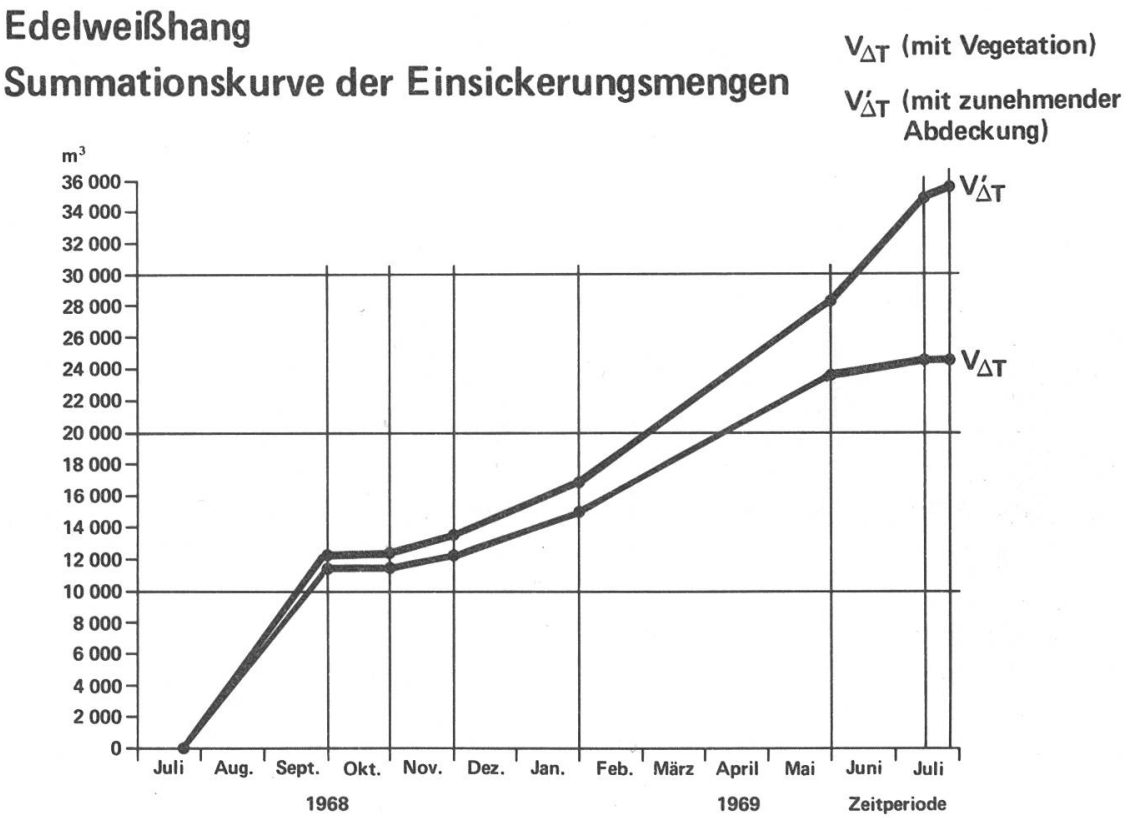


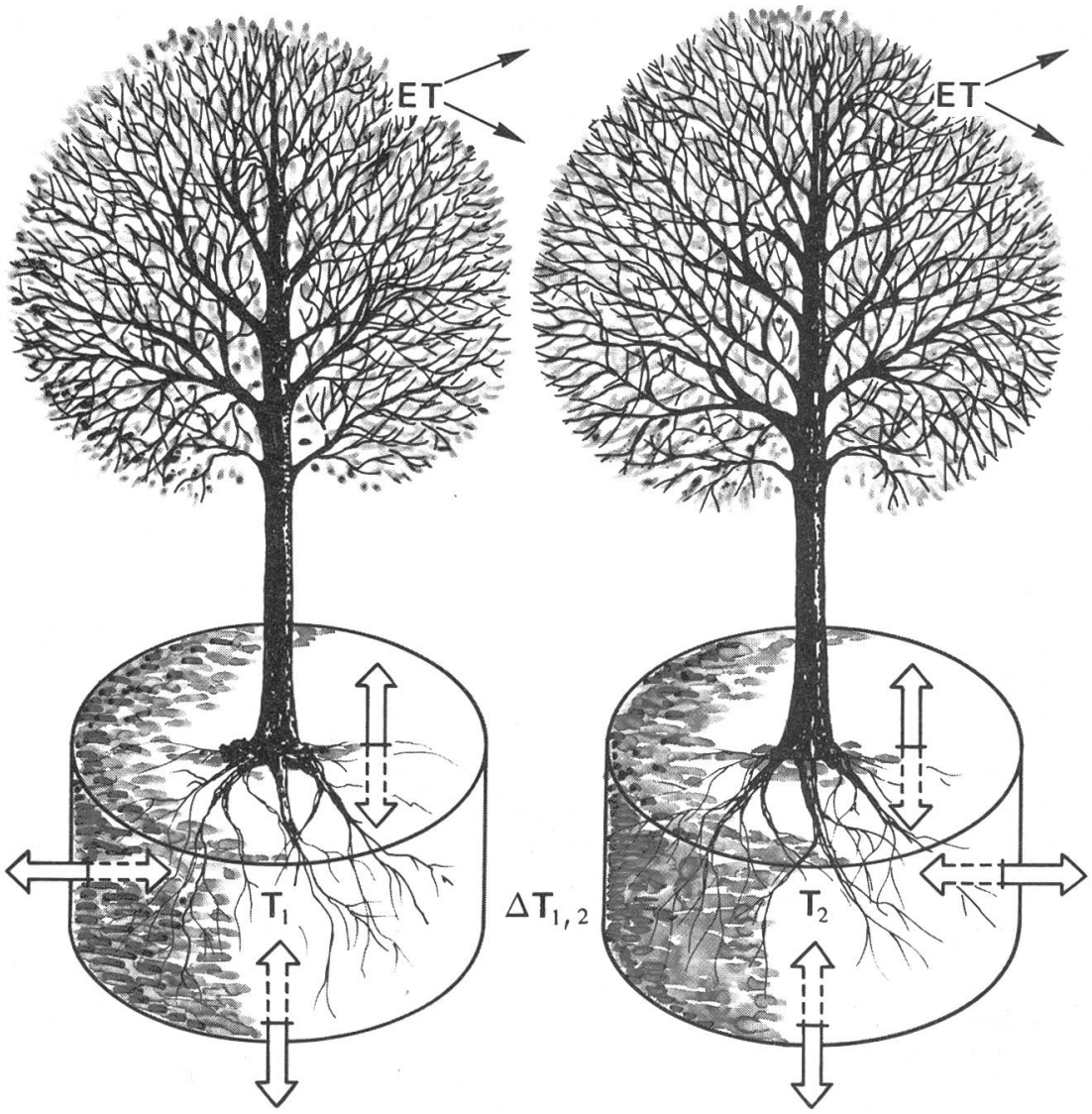
Abbildung 15. Einsickernde Wassermenge im Hangboden mit und ohne Vegetation aufsummiert. Edelweisshang.

Nach den bodenmechanischen Untersuchungen war dieser Mehrbetrag an Sickerwasser kein entscheidender Grund für das Auslösen des Rutsches. Der heutige Hang ist ruhig. Das kann jedermann feststellen, wenn er auf der Autobahn bei Eptingen Richtung Basel fährt.

Die obigen Angaben erfolgen mit Zustimmung des damals mit der Untersuchung dieser Angelegenheit beauftragten Bezirksgerichtes Waldenburg.

4.5 Bodenwasserhaushalt und Bodenabkühlung

Die industrielle Nutzung von Wärme aus dem Grundwasser kann zu einem forst- oder landwirtschaftlichen Produktionsproblem werden. Man be-



$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \mathrm{div}\,(\vec{q}) + \overset{\approx ET}{(U)}$$

Einfluß ΔT auf Wasserbilanz $\frac{\Delta \Theta}{\Delta t}$ im Wurzelraum

Abbildung 16. Schema zur Berechnung der Differenz in der Wasserbilanz in einem gekühlten und in einem unter natürlichen Bodentemperaturen stehenden Wurzelraum einer Buche. Projekt «Wasserbilanz-Kühlung-Vegetation», Hardwald, Gemeinde Kaisten, Staatswald, Kanton Aargau. Nationalfondsprojekt.

fürchtet mehr oder weniger grosse Schädigungen an vorhandenen Pflanzenbeständen.

Bodenphysikalisch-ökologisch weiss man heute recht wenig über den Einfluss einer im Vergleich zur ungestörten Umwelt reduzierten Bodentemperatur auf das Bestandeswachstum.

In unserem Wärmeprojekt, das durch den Schweizerischen Nationalfonds finanziert und durch *Hurst* (1983) geleitet wird, untersuchen wir den Einfluss der Wurzelraumabkühlung auf die Evapotranspiration einer im Waldbestand mitherrschenden Buche im Vergleich zu einer benachbarten Buche, die auf demselben Boden unter normalen Bodentemperaturen wächst *(Abbildung 16)*.

Unsere Arbeitshypothese nimmt an, dass die Abkühlung des 150 m^3 messenden Wurzelraumes einen Rückgang der Evapotranspiration und damit grundsätzlich des Wachstums zur Folge hat.

Trifft dieser Rückgang zu, dann ist die Wasseraufnahme aus dem Wurzelraum durch die Buche kleiner geworden. Es entsteht eine Differenz in der Wasserbilanz zwischen Normalboden und abgekühltem Boden. Diese Differenz ist zu berechnen, ihre Signifikanz zu prüfen und mit der Transpirationsabnahme zu korrelieren.

Die Natur gleicht in ihrer Partnerschaft mit dem Menschen aber sehr oft einem Spitzbuben, der sich seltsamerweise vorbehält, etwas doch anders zu tun, als «vereinbart».

Mathematisch in schmeichelhafter Kurzform geschrieben *(Abbildung 16)* ist die Veränderung des Wassergehaltes $\partial\Theta / \partial t$ pro Volumeneinheit Boden gleich der Divergenz des Sickerflusses plus den Betrag aus der hydromechanischen Senke U ($\approx$ ET $\equiv$ Evapotranspiration).

Zur numerischen Lösung dieser Beziehung benötigt man in der Praxis eine aufwendige Versuchsanlage an Tensiometern mit Begleitinstrumenten, damit die Druckpotentiale und die Flüsse in ihrer Zeitabhängigkeit berechnet werden können.

Das Projekt steht am Ende der Testphase der Vergleichbarkeit beider Buchen und ihrer Wurzelräume. Sie ist verheissungsvoll verlaufen. Die gute Analogie der Vitalität zeigt sich beispielsweise in der Kronenmächtigkeit und im verblüffend gleichzeitigen Blattausbruch in der Zeit vom 21. April bis 16. Mai 1982.

5. Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz

Die Kenntnis der physikalischen Fruchtbarkeit der Wald- und Landwirtschaftsböden ist für die organische Produktion unseres Landes von entscheidender Bedeutung.

In der Forstwirtschaft ist der komplexe Faktor Wasserhaushalt richtungsweisend für die Wahl der Betriebsart, die Baumartenmischung, die Mischungsform und den Mischungsgrad. *Ohne Wasser gibt es kein Wachstum.* Wasser kann je nach der physikalischen Struktur eines Bodens optimal, ungenügend oder exzessiv vorhanden sein. Im Forschungsprojekt *«Douglasie»* berechnet *Borer* (1982) beispielsweise aus der Bodenwasserbilanz bei normaler Wasserversorgung einen plausiblen Jahreszuwachs von $16 m^3 \cdot ha^{-1}$. Wasserhaushalt im Wurzelraum und Zuwachs sind korrelierbar.

Im landwirtschaftlichen Pflanzenbau spielt die Erhaltung der nachhaltig hohen Produktion der Böden bei minimalster Umweltbelastung eine dominierende Rolle. Wasserstress und Ertragsprobleme sind analog jenen der Forstwirtschaft. In Kulturböden besonders aktuell sind die Probleme der Bodenverdichtung und der Bodenbearbeitung. Diese können je nach Pflanzenbestand wichtiger sein als Probleme der Schädlingsbekämpfung.

An 29 repräsentativ ausgelesenen Böden der Schweiz, sogenannten Lokalformen, haben wir dank dem engagierten Einsatz von Lüscher die Physik natürlich gelagerter Wald- und in kleinerer Anzahl auch Landwirtschaftsböden untersucht. Die Art der Untersuchung und der Interpretation sind in Beispielen auch hier grundsätzlich gezeigt worden (Richard, Lüscher, *Strobel* 1978, 1981; und Richard, Lüscher 1983).

Wie gezeigt, hat jeder Boden als Folge spezifischer Bildungsprozesse eine kausale makromorphologische Charakteristik.

Werden in der Ingenieurausbildung auf akademischer Stufe die Zusammenhänge zwischen Makromorphologie und physikalischen Bodeneigenschaften instruiert, dann erlaubt der Vergleich der Makromorphologie eines unbekannten Bodens X mit jener einer ähnlich aussehenden, eingehend untersuchten Lokalform, im vergleichenden Analogieschluss physikalische und weitere Bodeneigenschaften zu diagnostizieren. Transfer und Valorisierung von Forschungsresultaten auf nicht näher untersuchte Feldböden ist damit auf einfache Art möglich geworden.

Forstingenieure, Ingenieur-Agronomen und Kulturingenieure stellen ähnliche Anforderungen an die physikalische Fruchtbarkeit.

Der Unterschied besteht aber darin, dass die Umtriebszeit von der Bestandesbegründung bis zur Ernte in der Forstwirtschaft meistens mehr als 100 Jahre, in der Landwirtschaft dagegen nur 1 Jahr beträgt. In der Landwirtschaft können Korrekturen in der Art der Bodennutzung rasch durchgeführt werden. In der Forstwirtschaft zeigen sich Fehlentschlüsse viel später, aber umso schwerwiegender. In beiden Fällen ist aber die Sorge um die Nachhaltigkeit der hohen Produktivität unter Achtung der natürlichen Produktionsgrundlagen eines Bodens ein wesentliches Gebot.

6. Erhaltung der Fruchtbarkeit der Landesoberfläche

In langfristigen Zeiträumen ist unsere gebirgige Landesoberfläche dem deutlich feststellbaren Abtrag ausgesetzt. Die Ordnung in unserem Gebirgssystem ist zu gross, die Unordnung zu klein. Durch den Alpenabtrag wird ein Endsystem mit grösserer Unordnung und kleinerer Ordnung entstehen. Das ist ein irreversibler Naturvorgang. Die Entropie nimmt zu. So drückt es der zweite Hauptsatz der Wärmelehre aus.

Dem genannten Abtrag ist primär die äusserste Erdkruste ausgesetzt. Damit sind es auch unsere produktiven Wald- und Landwirtschaftsböden. Dasselbe gilt für unsere eigene Existenz. Wir haben kein Interesse, durch ungeschickte menschliche Massnahmen Abtrag, Erosion und Auswaschung zu beschleunigen. Im Gegenteil, wir wollen so lange als möglich den jetzigen, partiell noch gesunden Zustand unserer pflanzenproduzierenden Landesoberfläche erhalten.

Doch die Naturgewalten sind gross. Schäden, die wir nicht kontrollieren können, erscheinen als 100jährige oder noch seltenere Ereignisse. Ihre Wirkung ist jedesmal schockierend: Lawinenniedergänge zerstören Wald und Weiden und die dazugehörenden Böden. Föhnstürme vernichten im Gebirge Wälder, die schwer wieder herstellbar sind.

Überschwemmungen zeigen, dass die technische Dimensionierung eines Flussverbaues sich auf bestimmte Hochwassermengen stützt. Wird diese überschritten, ist der Schutz des Menschen und seiner Einrichtungen nicht gewährleistet. Ein Hochwasser welcher Grösse darf uns überschwemmen? Tolerieren wir eines, das alle 30 oder alle 60 oder alle 100 Jahre erscheint?

Die Natur schützt sich selber nicht.

Den gerichteten Verlauf zur Unordnung beschreibt Busch wie folgt:

«LEIDER

So ist's in alter Zeit gewesen,
So ist es, fürcht ich, auch noch heut.
Wer nicht besonders auserlesen,
Dem macht die Tugend Schwierigkeit.

Aufsteigend musst du dich bemühen,
Doch ohne Mühe sinkest du.
Der liebe Gott muss immer ziehen,
Dem Teufel fällt's von selber zu.»

Unser Kampf gegen Naturgewalten können wir am besten führen, wenn wir versuchen, der Natur hinter ihre Schliche zu kommen. Wir müssen ihre Prozesse verstehen.

Intensive Forschung unter Feldbedingungen leistet einen fundamentalen Beitrag zur Erhaltung der nachhaltigen Fruchtbarkeit unserer Böden. Wenn

es hoch kommt, können wir etwa 50 bis 80 Jahre souverän überblicken. Das ist für uns ein verhältnismässig langer Zeitraum. Sehen wir uns vor, dass wir mindestens in dieser Zeit eine hohe Ordnungsqualität aufrechterhalten und die Entropie so klein als möglich halten.

Für die Natur ist das jedoch eine unendlich kleine Zeiteinheit. Sie kann uns während Menschengenerationen ohne grosse Störung in Ruhe lassen, wenn sie will.

Die Bodenphysik ist heute in Theorie und Praxis in der Lage, zum Verständnis der natürlichen Produktionsgrundlagen unserer Pflanzenbestände einen entscheidenen Beitrag zu leisten.

7. Es geht weiter

An der ETH Zürich ist die Bodenphysik aus der forstlichen Bodenkunde heraus entstanden. Die Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen hat ihre Geburt finanziell, materiell und personell möglich gemacht. Wir danken ihr herzlich für die 30jährige Zusammenarbeit.

Vor 17 Jahren hat die Forstabteilung, unterstützt durch die Kulturingenieure der ETHZ eine Professur für Bodenphysik beantragt und erhalten. Heute existiert der Fachbereich Bodenphysik im Institut für Wald- und Holzforschung. Die Landwirtschaft hat intensiv nachgestossen.

Uns freut es, dass in der jetzigen kritischen Zeit des Personalstopps die Schulleitung mit uns die Bedeutung der Bodenphysik als Lehr- und Forschungsgebiet der ETH teilt.

Der Forschungskommission, dem Schweizerischen Nationalfonds danken wir für die massive Unterstützung. Allen Projektleitern, Ingenieuren und technischen Mitarbeitern der Bodenphysik danke ich für das Durchstehen bei allen bodenphysikalischen Hürdenläufen, die die Natur uns aufgezwungen hat.

Arbeit gleicht einem Marathonlauf. Aus respektabler Entfernung betrachtet, gleicht er einer laminaren, sanften Strömung. Wer vom Engadiner Ski-Marathon eine bestimmte Postkarte erhalten hat, kennt dieses Laufverhalten. Der einzelne Läufer sieht das anders. Er steht in Konkurrenz mit seiner nächsten Umgebung um eine eigene Laufspur. Er kollidiert mit dem Vordermann, stoppt den Hintermann und bedrängelt den Nachbarn. Materialverschleiss reduziert die Laufsicherheit, physische und psychische Resistenz wird auf die Probe gestellt. Ab und zu hilft ein Freund, der aufmuntert. Man schwört, einen solchen Lauf nie mehr zu tun. Am Ziele angekommen, wandelt sich die gespeicherte Wut euphorisch in neu erworbene Erfahrung. Psychisch erhalten wir Auftrieb. Man rüstet sich sogleich zum Training für den nächsten Lauf.

Résumé

Le rôle de la physique du sol dans l'activité de l'ingénieur

Nos sols résultent de l'action conjuguée du climat postglaciaire, de la végétation et de l'homme sur les dépôts géologiques désagrégés. Le résultat de cette formation est une structuration du sol en horizons, macroscopiquement plus ou moins visible. On peut parler d'une morphologie causale. Nous considérons le sol dans son ensemble.

L'ingénieur dans la pratique est dans l'obligation d'émettre des hypothèses simplifiées, tout en définissant clairement le cadre des conditions.

Dans une aire homogène de croissance, une macromorphologie analogue de deux sols signifie qu'ils ont approximativement les mêmes propriétés. On peut ainsi transposer les propriétés constatées dans un sol sur un autre sol de macromorphologie semblable. Cette technique permet d'utiliser dans la pratique forestière et agricole les caractéristiques physiques des sols telles qu'elles furent déterminées en Suisse dans des formes locales.

La physique du sol traite des états, des processus et des propriétés physiques des sols. Elle étudie particulièrement les facteurs qui pour des peuplements végétaux données nous renseignent sur la fertilité physique.

Le régime de l'eau des sols producteurs de plantes, qui représentent un système complexe d'infiltration, est l'objet d'une recherche physico-pédologique intensive. L'énergie thermodynamique selon Gibbs est la base théorique pour expliquer la rétention de l'eau, son utilisation par la plante et son infiltration. La transpiration et la croissance des plantes dépendent de la capacité de rétention de l'eau utilisable dans les pores du sol. Le sol avec les racines constitue un filtre actif et sélectif pour l'eau et les substances dissoutes. Les processus d'infiltration dans le sol sont compliqués, les racines, du fait de leur absorption d'eau, agissant hydromécaniquement comme une dépression. Le manque d'homogénéité de la matrice du sol et son influence sur le régime de l'eau sont démontrés à l'aide de modèles. Des études ont prouvé que l'infiltration en profondeur, l'accumulation de l'eau souterraine et l'alimentation des fontaines dépendent des saisons et de l'intensité de la transpiration du peuplement.

Les processus uni- et bidimensionnels d'infiltration et leur dépendance du temps sont des facteurs de croissance décisifs de la station et de l'environnement. Ces facteurs constituent le centre des problèmes de nombreux projets de recherche.

L'exploitation de l'énergie du sol et de l'eau souterraine sous forme de chaleur est un besoin industriel. Son influence sur le régime de l'eau et les dommages qui en résultent pour la production végétale est un problème physico-pédologique actuel. La physique du sol contribue, aussi bien au niveau de la science que de celui de l'ingénieur et de la technique, à cerner du point de vue qualitatif et quantitatif les problèmes de production et d'environnement de l'économie agricole et forestière.

Traduction: *O. Lenz*

Borer, F. (1982): Zum Wasserhaushalt einer dominierenden Douglasie in einem Waldbestand. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. Band *58,* Heft 1: 3–162.

Buchter, B. (1983): Rendzina als Waldstandort. Schweiz. Z. Forstwes., *134* (1983) 10: 795–799.

Ellenberg, H. und *Klötzli, F.* (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswes. Band *48,* Heft 4: 587–930.

Flühler, J. (1973): Sauerstoffdiffusion im Boden. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswes., Band *49,* Heft 2: 123–250.

Germann, P. (1976): Wasserhaushalt und Elektrolytverlagerung in einem mit Wald und einem mit Wiese bestockten Boden in ebener Lage. Mitt. eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Band *52,* Heft 3: 161–309.

Greminger, P. (1982): Physikalisch-ökologische Standortsuntersuchung über den Wasserhaushalt im offenen Sickersystem Boden unter Vegetation am Hang. Diss. ETH Nr. 7023.

Greminger, P. und *Leuenberger, J.* (1983): Auswirkung der Trockenperiode 1976 auf den Wasserhaushalt eines Waldbestandes in Hanglage. Teilergebnisse des Nationalfondsprojektes «Hangsickerung». Schweiz. Z. Forstwes., *134* (1983), 10: 801–810.

Hurst, A. (1983): Einfluss der Wärmeentnahme aus dem System Boden auf die Vegetation. Schweiz. Z. Forstwes., *134* (1983), 10: 811–815.

Jenny, H. (1980): The Soil Resource. Origin and Behavior. Ecological Studies *37,* Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.

Richard, F., Lüscher, P. und *Strobel, Th.* (1978, 1981): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz: Band 1 und 2, Sonderserie, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Birmensdorf.

Richard, F. und *Lüscher, P.* (1983): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Band 3, Lokalform Nr. 10 «Abist». Sonderserie, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Birmensdorf.

Schroeder, D. (1978): Bodenkunde in Stichworten. 3. völlig neu bearbeitete Auflage. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel.

Schuster, Chr. (1974): Wasserspiegelabsenkung zwischen zwei Drainagegräben in natürlich gelagertem Boden am Hang. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswes. Band *50,* Heft 1: 3–83.

Vogelsanger, W. (1983): Untersuchung über den Wasserhaushalt eines zweischichtigen Bodenprofiles unter Waldbestockung. Dargestellt an einer sandigen Parabraunerde über Schotter. Diss. ETH Nr. 7307.