

Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck	Band 57 Festschr. Scheminzky	S. 123–141	Innsbruck, Dez. 1969
-------------------------------	---------------------------------	------------	----------------------

Die Wirkung von Akratothermen auf die Auskeimung von Pflanzensamen und das Wachstum junger Pflanzen

von

Carl JOB

(Aus dem Forschungsinstitut Gastein der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Mitteilung Nr. 347) und dem Institut für Physiologie und Balneologie der Universität Innsbruck; Vorstand beider Institute: Univ.-Prof. Dr. F. Scheminzky)

The effect of low mineralized thermal waters on the germination of plant seeds and the growth of young plants

Synopsis: Low mineralized thermal waters usually effect an initial inhibition of the germination of plant seeds, which later on turns into a promotion of the sprout- and root-development of the young plants. The present investigation deals with this plant physiological double effect of the thermal waters on white mustard (*Sinapis alba*).

Experiments with single salt solutions showed that it is particularly the Ca-ion among the cations (Na, K, Ca, Mg) and the HCO₃-ion among the anions (Cl, SO₄, HCO₃), which retard the speed of germination. Also the lack of O₂ in thermal waters is an important factor of inhibition. The germination speed depends strongly on pH, with acid environment being promotive and alkaline environment being inhibitive.

Despite the strong initial retardation of the germination in Ca-hydrogen-carbonate solutions the O₂-consumption is not reduced. Therefore the retarding effect of these ions is not due to an inhibition of cell breathing. In contrast to their initial inhibition on the germination Ca- and HCO₃-ions have an outspoken favorable effect on the number of growing plants as well as on their elongation.

The causative factors for the plant physiological double effect of low mineralized thermal waters as shown by these experiments are: Their O₂-lack causing inhibition and their content of Ca- and HCO₃-ions, which causes initial inhibition of germination and later on promotes the growth.

Akratische¹ Thermalwässer werden seit dem Altertum als Heilbäder verwendet. Ihr therapeutischer Nutzen gilt vor allem bei chronisch-entzündlichen Erkrankungen der Gelenke als gesichert. Eine Erklärung für ihre Heilkraft konnte jedoch bisher

¹ Als akkratisch bezeichnet man Wässer, die weniger als 1 g gelöste ionisierte Stoffe im kg Wasser enthalten.

nicht gefunden werden. Nur in Ausnahmefällen enthalten diese schwach mineralisierten naturwarmen Wässer Inhaltsstoffe mit nachweisbaren pharmakologischen Wirkungen (z. B. CO_2 , H_2S , Rn, F). In der Regel jedoch weist die chemische Analyse nur „banale“ Salze und Gase aus, die auch in gewöhnlichen Trink- und Brauchwässern vorkommen.

Auf der Suche nach den unbekanntem Wirkfaktoren der Heilwässer wurden u. a. auch einzellige Organismen, niedere Pflanzen (Algen und Moose) und schließlich auch höhere Pflanzen und deren Teile als Testobjekte herangezogen. In solchen Versuchen zeigten die akratischen Thermalwässer immer wieder besondere Wirkungen, die dem gewöhnlichen Trinkwasser zu fehlen schienen. Besonders gut faßbar erwiesen sich die Thermalwasserwirkungen bei den Keimungs- und Wachstumsvorgängen höherer Pflanzen. Die Mehrzahl der Untersucher berichtet über eine *initiale Hemmung der Samenauskeimung*, die in einem späteren Entwicklungsstadium der Pflanze in eine *Förderung des Sproß- und Wurzelwachstums* übergeht.

Aus der Fülle der Publikationen, die es auf diesem Sektor der balneologischen Forschung bereits gibt, sollen hier nur diejenigen Ergebnisse ausgewählt werden, die eine direkte Beziehung zu den experimentellen Untersuchungen dieser Mitteilung erkennen lassen. ALOY u. M. (1929) untersuchten schon 1925 den Einfluß verschiedener Mineralwässer auf das Wurzelwachstum von Raps- und Senfsamen und berichten, daß Ca-Hydrogencarbonatwässer fördernd und Na-Hydrogencarbonatwässer hemmend wirken. FRÉMONT (1933) bestätigte die wachstumhemmende Wirkung Na-hältiger Wässer in Versuchen mit Getreidekeimlingen. Andererseits fand SIMO (1927), daß das akratistische Na-Hydrogencarbonat-Wasser von Bad Schallerbach einen fördernden Einfluß auf die Keimung und das Wachstum von Getreide hat. Solche „Widersprüche“ sind in der einschlägigen Literatur nicht gerade selten; sie beruhen z. T. auf Konzentrationsunterschieden der untersuchten Wässer, z. T. auf den Eigenwirkungen der als Vergleichsnorm verwendeten Trinkwässer, deren Einfluß auf die Auskeimungsgeschwindigkeit sehr verschieden sein kann (SCHRÖCKSNADL 1958). Nach DYBOWSKI (1942) hemmt das Ca-Hydrogencarbonat-Wasser der Therme von Johannisbad im Vergleich zum Trinkwasser des Ortes² das Wurzelwachstum von Erbsen, Bohnen und anderen Samen. Diese Hemmung geht in eine Förderung über, wenn das Thermalwasser vor dem Versuch erhitzt oder längere Zeit gelagert wird. Ähnliche Beobachtungen hat KLAS (1961) bei Auskeimungsversuchen an Senfsamen mit dem Trinkwasser von Zagreb gemacht, das ebenfalls vorwiegend Ca-Hydrogencarbonat enthält. Durch das Altern und die Erwärmung wird nach Ansicht DYBOWSKIS ein thermolabiler entwicklungshemmender Faktor zerstört, so daß dann ein stabiler, wachstumsfördernder Faktor in Erscheinung treten kann. KLAS hat diese Beobachtungen im Sinne der Fervorhypothese von VOUK (1941) durch molekulare Strukturänderungen des Wassers zu

² Das Trinkwasser von Johannisbad (Janské Lázně) ist eine schwach mineralisierte Ca-Sulfat-Lösung (rd. 25 mg/l). Diese Angabe verdanke ich einer brieflichen Mitteilung des Kurdirektors Dr. Stanislav POHL.

erklären versucht. Das einzig sichere, aber auch wertvolle Resultat dieser Beobachtungen besteht in der Tatsache, daß manche Wässer biologische Wirkungen auf Pflanzen hervorrufen, die sich in einer *Hemmung des Keimungsprozesses* und in einer *Förderung des Wachstums* der Keimlinge äußern.

Auch das entemanierte Gasteiner Thermalwasser verzögert anfänglich die Keimung von Erbsen, Bohnen und anderen Samen gegenüber dem Gasteiner Trinkwasser und fördert in einem späteren Entwicklungsstadium das Wachstum der Jungpflanzen (F. und M. BUKATSCH 1940). Versuche mit Modellösungen, in denen die einzelnen Ionenarten des Gasteiner Thermalwassers variiert wurden, schienen zu zeigen, daß der anfängliche Hemmeffekt durch das Vorherrschen der Na-Ionen sowie durch den Chlorid- und Arsenat-Gehalt (Spuren), die spätere Wachstumsförderung aber durch den Bor-Gehalt bedingt sein könnte. VOUK (1957) sowie VOUK und SCHRÖCKSNADL (1957) haben die auskeimungshemmende Wirkung des Gasteiner Thermalwassers mit einer neuen, sehr wertvollen Versuchstechnik (Phytotest) bestätigt. Hirse- oder Senfsamen wurden bei Raumtemperatur mehrere Stunden im Thermalwasser eingequollen und anschließend in Keimchalen auf Filterpapier ausgelegt, das mit Thermalwasser befeuchtet wurde. Die ausgekeimten Samen wurden in bestimmten Zeitintervallen gezählt. Als Auskeimung definierte VOUK (1957) den Zeitpunkt des Durchbruchs der Wurzelspitze durch die Samenschale. Bezogen auf das Gasteiner Trinkwasser zeigte sich im Thermalwasser stets eine mehr oder weniger starke Verzögerung der Auskeimung. VOUK (1941, 1950) hat diese Auskeimungshemmung durch eine besondere Molekularstruktur des Thermalwassers zu erklären versucht und begründet seine Annahme damit, daß auch gewöhnliche Trinkwässer die Auskeimung hemmen, wenn sie vor dem Versuch im Autoklaven unter Druck erhitzt („fervorisiert“) werden. Erst kürzlich wiederum hat DOMBROWSKI (1965) über Wachstumstörungen und Veränderungen im Mineralhaushalt von Hyazinthen berichtet, wenn die Pflanzen in vorher gekochtem bzw. unter Druck erhitztem Aqua dest. aufgezogen werden. Eigene Auskeimungsversuche mit Senfsamen zeigten jedoch, daß die Hemmwirkung fervorisierter Wässer durch Belüftung beseitigt wird (JOB 1965a) und daß dadurch auch das Gasteiner Thermalwasser seine Hemmwirkung größtenteils verliert (JOB 1965b). Daraus folgt, daß der *Sauerstoffmangel* in beiden Fällen ein wichtiger *Hemmfaktor* ist. Weiters wurde gefunden, daß jener Teil der Hemmung, der im belüfteten Gasteiner Thermalwasser erhalten bleibt, durch Ca-Hydrogencarbonat hervorgerufen wird (JOB 1965b, 1966a).

Die Auskeimungsversuche wurden nun auch auf andere in natürlichen Wässern vorkommende Ionen ausgedehnt (I. Teil der vorliegenden Mitteilung). Unter den geprüften Salzen nehmen die Hydrogencarbonate wegen ihres überaus starken Hemmeffektes eine Sonderstellung ein. Da diese Salze durch teilweise Hydrolyse das H/OH-Gleichgewicht des Wassers nach der alkalischen Seite verschieben, wurde auch der Einfluß von pH-Änderungen auf die Auskeimung untersucht (II. Teil). Im III. Teil wird über Messungen des Sauerstoffverbrauchs keimender Senfsamen

in Hydrogencarbonat-Lösungen und nach Einwirkung verschiedener Atmungs- und Stoffwechsellgifte berichtet. Diese Versuche sollten klären, ob der starken Hemmwirkung der Ca- und Hydrogencarbonat-Ionen eine Störung der Zellatmung zugrunde liegt. Im IV. Teil werden Wachstumsversuche an jungen Senfpflanzen beschrieben, die über die wachstumsfördernden Wirkfaktoren natürlicher Wässer Aufschluß geben.

I. Die Wirkung von Einzelsalzlösungen auf die Auskeimungsgeschwindigkeit von Senfsamen

Methode:

Alle Versuche wurden mit Senfsamen³ (*Sinapis alba*) ausgeführt, welche nach unseren Beobachtungen (JOB 1965 a) auch unter Wasser rasch und vollzählig auskeimen, wenn reiner Sauerstoff durch dieses geleitet wird. Dadurch konnte das von VOUK eingeführte Verfahren wesentlich vereinfacht werden, bei dem die Samen nach mehrstündiger Einquellung in dem zu prüfenden Wasser einzeln in Keimschalen auf befeuchtetem Filterpapier ausgelegt werden mußten.

Je 200 Senfsamen wurden in Plastiktuben mit einem Boden aus Nylonnetz gegeben, die in braune Pulvergläser eingesetzt werden konnten. Die Samen wurden mit 100 ml Test-Lösung übergossen und bei $25 \pm 0,1$ °C zur Auskeimung gebracht. Die Testlösungen wurden aus chemisch reinen Salzen mit Aqua bidest. hergestellt. Geprüft wurden Alkalisalze (Na, K) und Erdalkalisalze (Ca, Mg) als Sulfate, Chloride und Hydrogencarbonate. Während des Versuches wurden die Testlösungen durch ein zugespitztes Glasrohr entweder mit reinem Sauerstoff (O₂) oder mit einem Gemisch von 95% O₂ und 5% CO₂ (Oxymix) begast. Jede Testlösung wurde mindestens zweimal unter gleichen Bedingungen geprüft. Die ausgekeimten Samen, die mit der Wurzelspitze die Samenschale durchstoßen hatten, wurden erstmals 6 Stunden nach Versuchsbeginn und dann in zweistündigen Abständen in flachen Petrischalen gezählt. Der Auskeimungsprozentsatz wurde in einem Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Zeitachse eingetragen. Diese Darstellung ergibt in der Regel eine zeitlineare Zunahme der Auskeimung und ermöglicht es, die mittlere Auskeimungszeit für 50% der Samen unmittelbar aus dem Schnittpunkt der Auskeimungsgeraden mit der 50%-Linie des Wahrscheinlichkeitsnetzes abzulesen. Die Vertrauensgrenzen der Mittelwerte lieferte das für gruppierte Daten übliche statistische Verfahren.

Ergebnisse:

Einen Überblick über die Auskeimungszeiten in 10-mval-Einzelsalzlösungen gibt Abb. 1, deren Zeitachse (oben) sich auf den Versuchsbeginn, d. h. auf den Zeitpunkt der Einbringung der Samen in die Testlösungen bezieht. Die linke Hälfte der Abb. 1 zeigt die Ergebnisse in O₂-begasten Lösungen, rechts sind die Ergebnisse in Oxymix-begasten Lösungen dargestellt. Im O₂-begasten Aqua dest. keimen 50% der Samen in $8,6 \pm 0,1$ Stunden aus. Bezogen auf diesen Kontrollwert verläuft die Auskeimung in allen Salzlösungen deutlich verzögert (eingeklammerte Zeitangaben; die nicht eingeklammerten Zeitangaben beziehen sich auf den Versuchsbeginn). Im

³ Bezogen von der Samenhandlung Gebrüder Boschan, Wien.

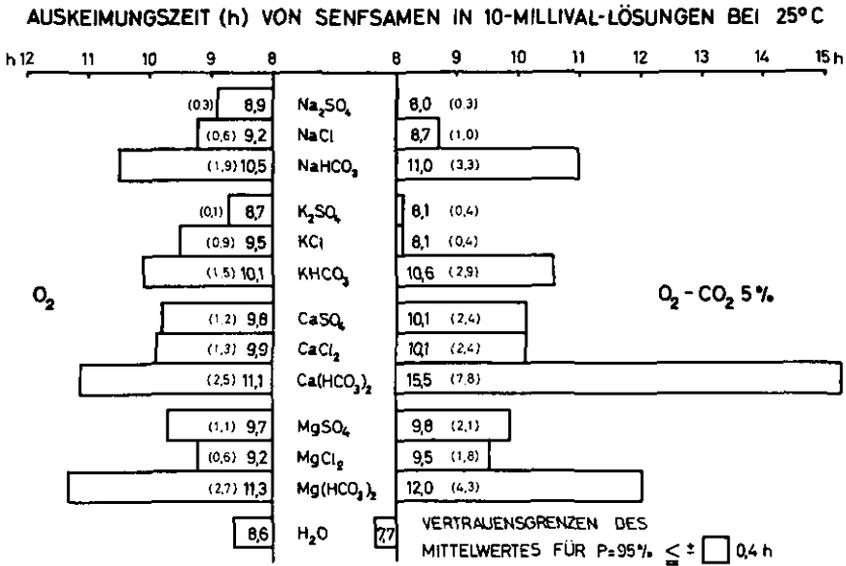


Abb. 1: Die mittleren Auskeimungszeiten ab Versuchsbeginn sind durch die Balkenlänge sowie durch Zeitangaben (große Zahlen) dargestellt. Die kleinen eingeklammerten Zahlen geben die Verzögerung der Auskeimung in den verschiedenen Salzlösungen gegenüber Aqua dest. an; links Versuche mit O₂-begasteten, rechts mit Oxymixbegasteten Lösungen.

allgemeinen hemmen *Erdalkalisalze* stärker als Anionen-gleiche *Alkalisalze*. Eine Ausnahme macht das Mg-Chlorid, welches die Auskeimung nicht stärker verzögert als Na-Chlorid. Die Stärke der Hemmung hängt nicht nur von der Art des Kations, sondern auch von der Art des Anions ab. Die *Alkalisulfate* hemmen weniger als ihre Chloride und diese wiederum weniger als Hydrogencarbonate. Letztere verzögern die Auskeimung auch als *Erdalkalisalze* wesentlich stärker als die Sulfate und Chloride. Ca-Sulfat und Ca-Chlorid erwiesen sich als nahezu wirkungsgleich. Mg-Sulfat hemmt im Gegensatz zu den Sulfaten der Alkalien stärker als Mg-Chlorid. Betrachtet man nun die Auskeimungszeiten bei *Oxymix*-Begasung (rechte Hälfte der Abb. 1), so fällt zunächst auf, daß die Auskeimung im *Oxymix*-begasteten Wasser (7,7 h) rascher erfolgt als unter O₂-Begasung (8,6 h). Bezogen auf den Kontrollwert im *Oxymix*-begasteten Wasser (7,7 h) verläuft die Auskeimung in den Salzlösungen mehr oder weniger verlangsamt. *Alkalisulfate* und -chloride hemmen hier relativ schwach. Die Wirkungsunterschiede zwischen den Sulfaten und Chloriden sind bei den Na-, Ca- und Mg-Salzen im großen und ganzen die gleichen, wie in den O₂-begasteten Lösungen, mit Ausnahme von K-Sulfat und K-Chlorid, welche wirkungsgleich sind. Alle Hydrogencarbonatsalze sowie die Sulfate und Chloride der Erdalkalien verzögern die Auskeimung unter *Oxymix*-Begasung stärker als unter O₂-Begasung.

Die stärkere Hemmung unter *Oxymix*-Begasung war beim Ca-Hydrogencarbonat schon in früheren Versuchen aufgefallen (JOB 1966b). Durch die Begasung von Hydrogencarbonat-Lösungen mit reinem Sauerstoff wird die zugehörige CO_2 ausgetrieben und ein Teil der Hydrogencarbonate in Carbonate übergeführt. Dieser Vorgang führt in *Erdalkali*-Hydrogencarbonat-Lösungen zur teilweisen *Ausfällung* von Erdalkalicarbonaten. Carbonatbildung und Carbonatfällung verändern das pH und die elektrolytische Leitfähigkeit von Hydrogencarbonat-Lösungen in charakteristischer Weise (Tab. 1): *Alkali*-Hydrogencarbonat-Lösungen werden unter O_2 -

Tab. 1: Elektrolytische Leitfähigkeit (mS) und Wasserstoffexponent (pH) von 10 mval-Hydrogencarbonat-Lösungen bei 20°C und Begasung mit reinem O_2 bzw. einem Gemisch von 95% O_2 und 5% CO_2 (*Oxymix*). Vorwerte in luftgesättigten bzw. mit reinem CO_2 gesättigten Lösungen (Stern). In O_2 -begasten *Alkali*hydrogencarbonat-Lösungen steigt die Leitfähigkeit und das pH gegenüber den Vorwerten durch die teilweise Umwandlung der Hydrogencarbonate in Carbonate und die Zunahme der OH-Ionen. In O_2 -begasten *Erdalkali*hydrogencarbonat-Lösungen sinkt die Leitfähigkeit durch Ausfällung der Carbonate. In *Oxymix*-begasten Lösungen hat die Leitfähigkeit nur beim Ca-Salz gegenüber dem Vorwert etwas abgenommen.

	Vorwert		Sauerstoff		Oxymix	
	pH	mS	pH	mS	pH	mS
10 mval						
NaHCO_3	8,8	7,65	9,3	8,11	6,9	7,60
KHCO_3	8,3	9,60	9,6	10,00	6,9	9,58
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	6,3*	7,35	8,6	1,36	6,9	7,22
$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	6,3*	6,16	9,9	5,20	6,8	6,20

Begasung alkalischer und ihre Leitfähigkeit steigt durch die Zunahme des Carbonat- und OH-Gehaltes. In *Erdalkali*-Hydrogencarbonat-Lösungen bestimmt die Ausfällung der Carbonate den Gang der Meßwerte. Beim Ca-Salz geht die Leitfähigkeit 10millivaliger Lösungen von 7,35 mS auf 1,36 mS zurück, bei dem besser löslichen Mg-Salz von 6,16 mS auf 5,20 mS. Die stärkere Ausfällung von Ca-Carbonat vermindert auch Alkalität. Ca-Hydrogencarbonat-Lösungen sind deshalb nach O_2 -Begasung weniger alkalisch (pH = 8,6) als Mg-Hydrogencarbonat-Lösungen (pH = 9,9). Durch *Oxymix*-Begasung lassen sich diese Umwandlungs- und Fällungsvorgänge, wie Tab. 1 zeigt, weitgehend verhindern. O_2 -begaste Hydrogencarbonat-Lösungen hemmen daher die Auskeimung aus zwei Gründen weniger als *Oxymix*-begaste: Erstens nimmt die wirksame Salzkonzentration besonders in Ca-Lösungen durch die Carbonatfällung ab und zweitens erschwert der Verlust der „zugehörigen“ CO_2 das Eindringen der Hydrogencarbonate und der Kationen, wie im II. Teil gezeigt werden wird.

Zu den bisher geschilderten Auskeimungsversuchen waren durchwegs 10-mval-Lösungen verwendet worden, um die Wirkung der einzelnen Salze möglichst deutlich hervortreten zu lassen. Diese Konzentration ist zwar noch als akrotisch zu bezeichnen, jedoch sind zweifellos viele natürliche Wässer wesentlich geringer mineralisiert. Deshalb wurden auch schwächere Lösungen im Auskeimungstest geprüft.

Dabei stellte sich heraus, daß die Auskeimungshemmung praktisch nur in Hydrogencarbonat-Lösungen konzentrationsabhängig ist (Tab. 2). Der Hemmeffekt der *Alkali*-Sulfate und -Chloride ist in 2 bis 10 mval-Lösungen ungefähr gleich groß. Auch die *Erdalkali*sulfate und -Chloride zeigen nur zwischen 5 und 10 mval eine geringe Wirkungszunahme. Bei den Hydrogencarbonaten dagegen nimmt die

Tab. 2: Auskeimungsverzögerung in Na- bzw. Ca-Salzlösungen gegenüber dest. Wasser bei O₂- bzw. *Oxymix*-Begasung (Werte in Klammern). Keine Konzentrationsabhängigkeit der Auskeimungsverzögerung bei den *Alkali*-Sulfaten und -Chloriden. Schwache Konzentrationsabhängigkeit (zwischen 5 und 10 mval) bei den *Erdalkali*-Sulfaten und -Chloriden. Starke Konzentrationsabhängigkeit bei den Hydrogencarbonaten. Durch die Carbonatfällung ist die Auskeimungsverzögerung in der O₂-begasteten 10-mval-Ca-Hydrogencarbonat-Lösung nur wenig stärker als in der 5-mval-Lösung.

	0,6 mval	1 mval.	2 mval	5 mval	10 mval
Na ₂ SO ₄			0,3	= 0,2	= 0,3
NaCl			0,6	= 0,5	= 0,6
NaHCO ₃	0,1 (0,2)	< 0,4 (1,3)	< 0,6 (1,9)	< 1,4 (2,2)	< 1,9 (3,3)
CaSO ₄			0,9	= 1,0	< 1,2
CaCl ₂			1,0	= 1,0	< 1,3
Ca(HCO ₃) ₂	0,9 (2,0)	< 1,3 (2,4)	< 1,5 (3,1)	< 2,3 (4,3)	< 2,5 (7,8)

Hemmwirkung sowohl unter O₂- als auch unter *Oxymix*-Begasung (Werte in Klammer) mit steigender Konzentration (0,6 bis 10 mval) beträchtlich zu.

Die Ergebnisse dieser Auskeimungsversuche sind kurz gefaßt folgende: 5% CO₂ beschleunigt die Auskeimung in Aqua dest. Alle Salzlösungen verzögern die Auskeimung. *Erdalkalisalze* (ausgenommen MgCl₂) hemmen stärker als *Alkalisalze*. Die Hemmwirkung ist Anionen-abhängig: Hydrogencarbonate hemmen wesentlich stärker als Sulfate und Chloride. 5% CO₂ verstärkt die Hemmwirkung aller Hydrogencarbonatsalze. In geringerem Maß trifft dies auch für *Erdalkali*sulfate und -Chloride zu. Die Hydrogencarbonat-Hemmung nimmt zwischen 0,6 und 10 mval zu. Bei den Sulfaten und Chloriden ist die Konzentrationsabhängigkeit der Hemmung entweder sehr gering (Ca-Salze) oder überhaupt nicht vorhanden.

II. Der Einfluß der Wasserstoffionen-Konzentration auf die Auskeimung

Die starke Auskeimungshemmung durch Hydrogencarbonate, die als Verbindungen schwacher Säuren mit starken Basen teilweise hydrolysieren, so daß ihre wässrigen Lösungen mehr oder weniger alkalisch reagieren, läßt an einen Einfluß der Wasserstoffionen-Konzentration auf die Auskeimungsgeschwindigkeit denken. Als nächster Schritt wurde deshalb die Wirkung von Säuren und Basen auf die Auskeimung untersucht.

Methode:

Je 300 Senfsamen wurden in 3 Kunststofftuben mit Nylonnetzboden in ein zylindrisches Glasgefäß gebracht, das 750 ml Aqua dest. enthielt. Die Kunststoffgefäße mit den Samen wurden an einem Kunststoffstab befestigt, durch den sie zur besseren Durchmischung im Wasser auf und ab bewegt werden konnten. Da die üblicherweise zur Einstellung von pH-Werten verwendeten Pufferlösungen wegen der unbekanntenen Salzwirkungen zu dieser Untersuchung wenig geeignet erschienen, wurde das pH durch eine elektronisch gesteuerte Zufuhr von 0,1n H_2SO_4 bzw. 0,1n NaOH eingestellt. Das Signal hierfür wurde dem Ausgangskreis eines pH-Meßgerätes entnommen und betätigte über einen Transistorverstärker einen Schmitt-Trigger, der seinerseits über ein magnetisches Ventil den Zufluß der Säure bzw. der Lauge regulierte. So war es möglich, den pH-Wert im Keimungsgefäß auf $\pm 0,05$ pH konstant zu halten. Das Wasser des Keimungsgefäßes wurde mit reinem Sauerstoff begast. Nach einigen Vorversuchen, die der Ermittlung der günstigsten Zählzeiten dienten, wurden die drei Kunststofftuben mit den Samen im Hauptversuch in geeigneten Zeitintervallen entnommen und die mittlere Auskeimungsgeschwindigkeit bestimmt.

Ergebnisse:

Wie Abb. 2 zeigt, besteht eine deutliche Beziehung zwischen der Auskeimungsgeschwindigkeit der Samen und dem pH-Wert des Bades. Bei pH = 4 keimen 50% der Samen bereits in 5,3 Stunden aus. In weniger sauren

AUSKEIMUNGSGESCHWINDIGKEIT UND pH (50%IGE AUSKEIMUNG VON SENFSAMEN BEI 25°C) AQUA BIDEIST.

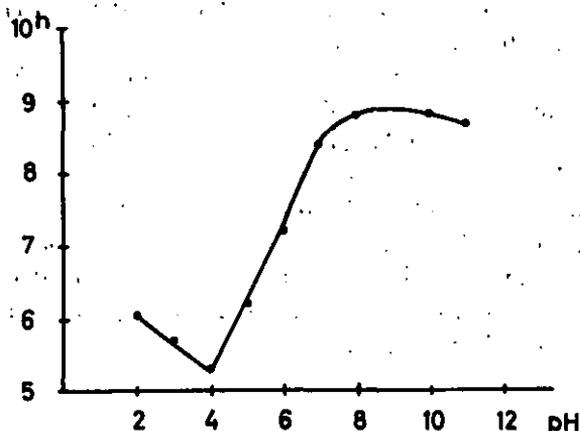


Abb. 2: Ordinate: Auskeimungszeit ab Versuchsbeginn; Abszisse: Wasserstoffexponent des Bades. Die pH-Einstellung erfolgte durch elektronisch gesteuerte Zugabe von n/100 H_2SO_4 bzw. n/100 NaOH. Lineare Zunahme der Auskeimungsgeschwindigkeit zwischen pH 4 und pH 7. Geringe Verzögerung zwischen pH 2 und pH 4. Alkalisierung vermindert die Auskeimungsgeschwindigkeit zwischen pH 7 und pH 8. Stärkere Alkalisierung ist ohne Einfluß.

der Samen bereits in 5,3 Stunden aus. In weniger sauren Lösungen nimmt die Auskeimungsgeschwindigkeit linear ab und verzögert sich im schwach alkalischen Bereich auf 8,8 Stunden. Stärker alkalische Reaktionen (bis pH = 12) führen zu keiner weiteren Zunahme der Hemmung. Ansäuerung unter pH 4 vermindert die Auskeimungsgeschwindigkeit.

Auf den ersten Blick scheint das Ergebnis dieser Versuche dafür zu sprechen, daß die starke auskeimungshemmende Wirkung der Hydrogencarbonate nicht allein durch die Alkalität dieser Lösungen bewirkt sein kann. Da aber Erfahrungen früherer Untersucher gezeigt haben, daß das intrazelluläre pH im alkalischen Bereich sehr häufig die pH-Änderungen im Außen-

milieu nicht mitmacht, wenn man zur pH-Einstellung NaOH verwendet und die Ergebnisse mit Ammoniumhydroxyd anders ausfallen können, ist diese Annahme nicht begründet. Daß die OH-Ionen-Konzentration des Bademediums nicht unmittelbar maßgebend für die Auskeimungsgeschwindigkeit ist; zeigen ja auch schon die im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuche, bei denen die Auskeimung unter O₂-Begasung bei pH-Werten zwischen 8,6 und 9,9 weniger gehemmt war als unter *Oxymix*-Begasung bei ungefähr neutraler Reaktion (pH=6,9).

Die Wirkung von Ammoniumhydroxyd (10 mval) wurde im gewöhnlichen Auskeimungsversuch nach der im I. Teil angegebenen Methode geprüft, wobei sich ergab, daß die Auskeimung unter O₂-Begasung bei pH = 10 praktisch vollständig unterdrückt wird. In 24 Stunden keimten nur 0,4% der Samen aus. Dabei handelt es sich um eine echte Verzögerung und nicht um eine irreversible Abtötung, da die Samen nach Überführung in Aqua dest. sofort zu keimen beginnen. In Anbetracht der fast normalen Auskeimungsgeschwindigkeit in NaOH-Lösungen kann man aus diesem Versuch den Schluß ziehen, daß die OH-Ionen des Bademediums die Membranen der Samenschale und / oder der Zellgrenzen nicht zu durchdringen vermögen, so daß eine alkalische Hemmung der Auskeimung nur möglich ist, wenn OH-Ionen innerhalb der Membranen gebildet werden, wie das in Ammoniumhydroxyd-Lösungen der Fall ist; hier dringt Ammoniak (NH₃) in die Zellen ein und liefert mit dem Zellwasser Ammoniumhydroxyd ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$).

Für die starke Hemmwirkung der Hydrogencarbonate bietet sich nunmehr folgende Erklärung an: Da in Hydrogencarbonat-Lösungen stets Kohlensäure vorhanden ist, die ebenso leicht durch Membranen dringt wie Ammoniak, entstehen intrazellulär Hydrogencarbonat-Ionen ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$), wobei die H-Ionen gegen extrazelluläre Kationen ausgetauscht werden. Die Kationen liegen dann in der Zelle wieder als Hydrogencarbonate vor. Durch teilweise Hydrolyse entstehen OH-Ionen, welche die Auskeimung hemmen. Diese Vorstellung würde auch die Verstärkung der Auskeimungshemmung durch den CO₂-Gehalt der *Oxymix*-begasten Lösungen einleuchtend erklären.

Labile Ionen (z. B. NH₄⁺ oder HCO₃⁻), aus denen sich nicht-ionisierte Gase bilden können, welche im allgemeinen biologische Membranen ungehindert passieren, ermöglichen zweifellos extreme Permeabilitätsunterschiede zwischen Kationen und Anionen. Geringere Permeabilitätsunterschiede bestehen jedoch gewöhnlich auch zwischen fixen Ionen (z. B. Na oder Cl). Wenn nun z. B. eine Kationenart leichter eindringt als die sie begleitenden Anionen, müssen zum Ausgleich der Elektroneutralität zelleigene Anionen herangezogen werden. Sie entstehen im Stoffwechsel in Form schwacher Säuren (HCO₃ und andere Pflanzensäuren) durch Abgabe von H-Ionen nach außen. Diese Annahme läßt sich durch einen Versuch belegen, bei dem der Säure- bzw. Laugenverbrauch gemessen wurde, der zur Aufrechterhaltung eines bestimmten pH-Wertes in der Badelösung erforderlich ist. Auf der linken Hälfte der Abb. 3 sind in den Balken Zahlen eingetragen, welche die Menge (ml) n/100 H₂SO₄ angeben, die benötigt wurde, um die H-Ionen-Konzentration des Bades

**SÄURE- BZW. LAUGEVERBRAUCH (n/100ml/g) UND AUSKEIMUNGSZEIT (h)
VON SENFSAMEN BEI 25°C IN AQUA BIDEST. BZW. 10mval Ca-LÖSUNGEN**

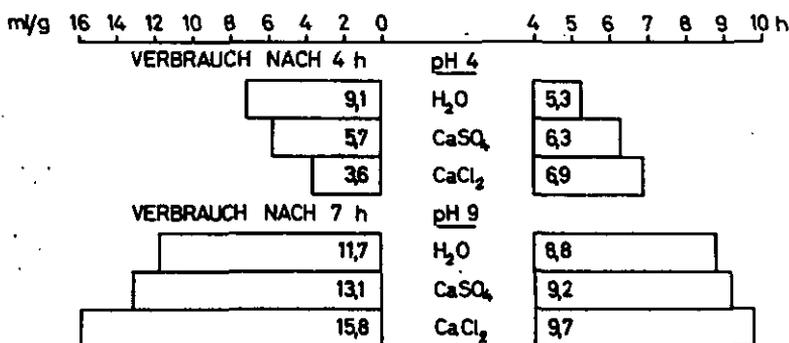


Abb. 3: Linke Abszisse und Zahlen in den Balken: Säureverbrauch (in 4 Stunden), Laugenverbrauch (in 7 Stunden) zur Konstanthaltung von pH 4 bzw. pH 9. Rechte Abszisse und Zahlen in den Balken: mittlere Auskeimungszeit ab Versuchsbeginn.

entsprechend einem pH von 4 konstant zu halten. In O₂-begastem Wasser werden bei pH 4 in 4 Stunden 9,1 ml n/100 H₂SO₄ pro Gramm Samen (Trockengewicht) verbraucht, in einer 10 mval Ca-Sulfat-Lösung unter sonst gleichen Bedingungen dagegen nur 5,7 ml und in einer 10 mval Ca-Chlorid-Lösung noch weniger (3,6 ml). Diese Unterschiede werden verständlich, wenn man annimmt, daß die in den Ca-Lösungen auskeimenden Samen H-Ionen abgeben. Der Gegenversuch mit n/100 NaOH bestätigt diese Vorstellung: Hier werden zur Konstanthaltung von pH 9 im O₂-begastem Wasser in 7 Stunden 11,7 ml n/100 NaOH verbraucht, während in der Ca-Sulfat- bzw. Ca-Chlorid-Lösung deutlich mehr Lauge erforderlich ist (13,1 bzw. 15,8 ml). Die rechte Hälfte der Abb. 3 zeigt, daß die Auskeimung in den Ca-Lösungen sowohl bei pH 4 als auch bei pH 9 gegenüber den jeweiligen Wasserkontrollwerten verzögert ist. Durch die Chlorid-Lösung wird die Auskeimung stärker gehemmt als durch die Sulfat-Lösung. Da in der Chlorid-Lösung auch die H-Ionen-Abgabe der Samen größer ist, scheint die stärkere Hemmwirkung der Chloride die Folge einer stärkeren intrazellulären Alkalisierung zu sein.

Der fördernde Einfluß der H-Ionen auf die Auskeimung läßt sich auch mit sauren Ammoniumsalzen zeigen (Tab. 3). Oxymix-Begasung verstärkt hier wie in Aqua dest. die Auskeimung. In diesen Salzlösungen kommt es aber nicht annähernd zu so starken Auskeimungsbeschleunigungen wie im pH-statischen Versuch mit

Tab. 3: Auskeimungsbeschleunigung in 10-mval-Lösungen saurer Ammoniumsalze gegenüber O₂-begastem dest. Wasser (Auskeimungszeit 8,6 Stunden).

	O ₂ -Begasung		Oxymix-Begasung	
	pH	h	pH	h
(NH ₄) ₂ SO ₄	6,4	-0,8	4,3	-1,4
NH ₄ Cl	6,1	-1,1	-	-

n/100 H₂SO₄, vermutlich weil der eindringende Ammoniak eine stärkere intrazelluläre pH-Verschiebung nach der sauren Seite verhindert.

III. Der Sauerstoffverbrauch keimender Senfsamen

Der Pflanzenembryo ist im Samen in der Regel chlorophylllos und kann daher nicht assimilieren. Er bezieht die zum Wachstum nötige Energie aus dem Abbau organischer Stoffe, die ihm von der Mutterpflanze mitgegeben wurden. Dieser Abbau geschieht in höheren Pflanzen vorwiegend durch oxydative Prozesse. Dementsprechend nimmt der O₂-Verbrauch und die CO₂-Bildung erheblich zu, sobald die Keimung durch Wasseraufnahme in Gang kommt. Auch die Auskeimungshemmung im O₂-armen Gasteiner Thermalwasser und im O₂-armen ferverisierten Wasser zeigt, welche entscheidende Bedeutung die Atmung für den Prozeß der Keimung hat. Die nachstehend beschriebenen Versuche sollten klären, ob die Hydrogencarbonate und die Ammoniumsalze die Zellatmung beeinflussen und vielleicht auf diesem Wege die Auskeimung verzögern bzw. beschleunigen.

Methode:

500 Senfsamen wurden in braune gasdicht verschraubbare Glasflaschen (500 ml) gegeben, die mit O₂- bzw. *Oxymix*-gesättigtem Wasser randvoll gefüllt waren. Die Flaschen rotierten während der Versuche horizontal in einem Wasserbad von 25 °C. Nach 6 Stunden wurde eine Wasserprobe unter Luftabschluß entnommen und der Sauerstoffgehalt nach der Methode von OHLE (1960) bestimmt. Jede Testlösung wurde mindestens zweimal geprüft. Der O₂-Verbrauch nach 6stündiger Auskeimung ergab sich durch Subtraktion der nach dieser Zeit noch vorhandenen O₂-Menge vom O₂-Gehalt der Ausgangslösung. Die Werte wurden gemittelt und auf mg/g Samen (Trockengewicht) umgerechnet. Sofort nach Entnahme der Wasserprobe für die O₂-Analyse wurde die Keimungsaktivität durch Zugabe von 25 mg Kaliumcyanid gestoppt, da sonst einige Samen während der Zählung auskeimen.

Ergebnisse:

Zur Überprüfung der Methode wurde zunächst der O₂-Verbrauch und die Auskeimungsgeschwindigkeit im O₂-begasteten Aqua dest. untersucht und durch Zugabe verschiedener Atmungs- und Stoffwechselgifte variiert. Wie die rechte Hälfte der Abb. 4 zeigt, keimen im Aqua dest. in 6 Stunden 21,3% der eingebrachten Samen aus und verbrauchen in dieser Zeit pro g Samen 2,92 mg Sauerstoff (linke Seite der Abb. 4). Nach Zugabe von 5 mg Cyanid sinkt der Auskeimungsprozentsatz auf 2,9% und der O₂-Verbrauch auf 0,78 mg/g Samen. Natriumacid (NaN₃), das im Nervensystem zwar die Aktionsatmung, aber im Gegensatz zu den Cyaniden nicht die Ruheatmung hemmt, vermindert dosisabhängig den O₂-Verbrauch und die Auskeimung. Ähnlich wirkt auch Arsen in Konzentrationen über 1 mg/Liter. Dagegen hemmt Fluor (40 mg/Liter) die Auskeimung (10% in 6 Stunden) ohne den O₂-Verbrauch zu verringern. (Dieser Befund entstammt einer späteren Versuchsreihe und ist deshalb in Abb. 4 nicht dargestellt). Auch in Hydrogencarbonat- bzw. Ammonium-

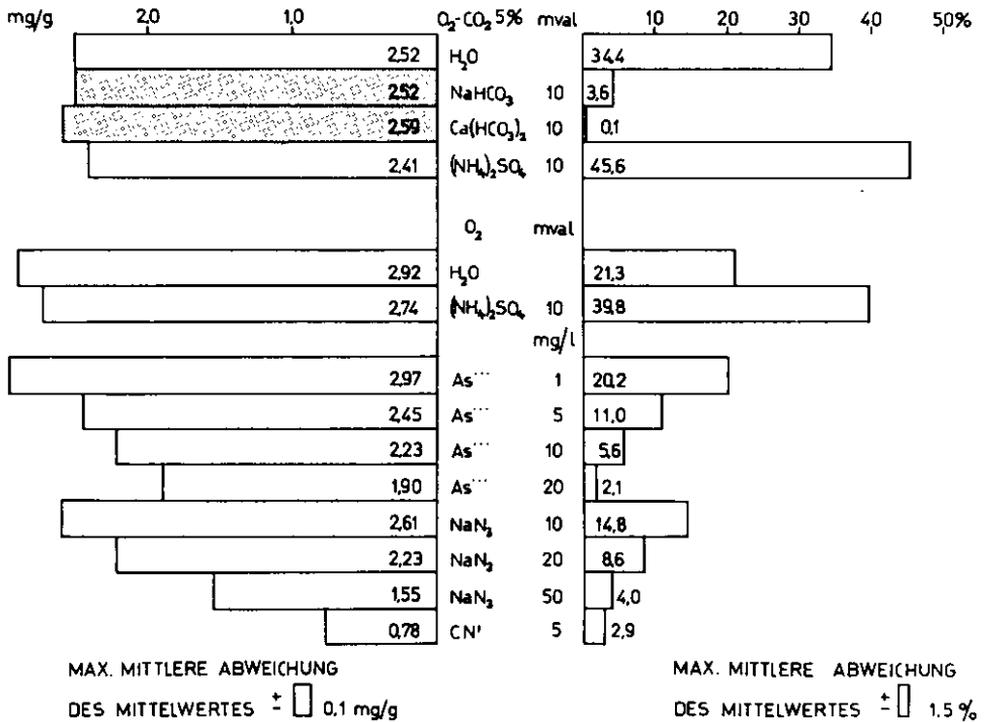
O₂-VERBRAUCH (mg/g) UND AUSKEIMUNG (%) VON SENFSAMEN IN 6 h BEI 25°C

Abb. 4: Links: O₂-Verbrauch (mg/g Samen); rechts: Auskeimungsprozentsatz in 6 Stunden. Die 4 obersten Zeilen beziehen sich auf Oxymix-begaste, die übrigen auf O₂-begaste Wässer. Na- und Ca-Hydrogencarbonat (dunkle Balken) vermindern den O₂-Verbrauch trotz starker Auskeimungshemmung nicht. In der Ammoniumsulfat-Lösung wird die Auskeimung beschleunigt, der O₂-Verbrauch aber eher etwas vermindert. Arsen (As), Na-Acid (NaN₃) bzw. Cyanid (CN) vermindern dosisabhängig die Auskeimungsrate und den O₂-Verbrauch.

sulfat-Lösungen bleibt der O₂-Verbrauch, trotz beträchtlicher Unterschiede in der Auskeimungsrate normal. Diese Stoffe beeinflussen also die Auskeimung sicher nicht über die Zellatmung. Als Nebenfund sei noch erwähnt, daß der O₂-Verbrauch in Oxymix-gesättigtem Wasser immer etwas geringer ist als im CO₂-freien mit reinem O₂ gesättigten Wasser.

IV. Die Wirkung reiner Salzlösungen auf das Wachstum von Jungpflanzen

Zahlreiche Untersucher, die sich mit der Frage der Wirkung von Thermalwässern auf die Auskeimung befaßt haben, fanden nach anfänglicher Hemmung der Keimung eine Beschleunigung des Wachstums der Jungpflanzen. Eine Untersuchung über die Thermalwasserwirkung auf Pflanzen kann deshalb erst dann als abge-

schlossen betrachtet werden, wenn die Ursachen dieses pflanzenphysiologischen Doppelleffektes geklärt sind. Als ersten Schritt in dieser Richtung erschien es nötig, nicht nur den Auskeimungsprozeß, sondern auch das Wachstum der Jungpflanzen in einfachen Salzlösungen zu untersuchen.

Methode:

Weithalsgefäße aus Kunststoff (500 ml) wurden an der Verjüngung kreisförmig abgeschnitten. Der Stutzen mit dem Schraubgewinde wurde mit einem Nylonnetz bespannt und umgekehrt in den zylindrischen Unterteil eingepreßt. Die Gefäße hatten seitlich über der Wasseroberfläche beiderseits Anschlüsse, durch die sie miteinander gasdicht verbunden werden konnten. Auf diesem Wege wurde während des Versuches ein schwacher *Oxy-mix*-Strom über die Wasseroberflächen geleitet, die ca. 3 mm über den Netzen standen, auf die die Samen (1 g = ca. 180 Stück) ausgelegt waren. Jedes der Gefäße hatte außerdem ein dünnes Kunststoffrohr eingedichtet, das bis zum Gefäßboden reichte. Über dieses Rohr wurden die Testlösungen mittels eines Pumpmechanismus bewegt, so daß keine lokalen Konzentrationsänderungen auftreten konnten. Als Bademedien dienten wiederum einfache Salzlösungen: in drei Versuchsreihen wurden 1, 5 und 10 mval-Lösungen der *Alkalien* (Na, K) und *Erdalkalien* (Ca, Mg) in Form ihrer Sulfate, Chloride und Hydrogencarbonate geprüft. Zu Vergleichszwecken wurde in jeder Versuchsreihe auch ein Versuch mit einer Lösung des Pflanzennährsalzes Hydral ausgeführt. Die Versuche wurden in einem hellen Raum durchgeführt und erstreckten sich über 10 Tage bei Raumtemperaturen zwischen 18 und 22 °C. Am 10. Tag wurden die Pflanzen geerntet, gezählt, in Sprosse und Wurzeln geteilt und im Trockenschrank bei 80 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. In den Badelösungen wurde der Wasserstoffexponent und der Kaliumpermanganatverbrauch bestimmt, letzterer als Maß für den organischen Substanzverlust der Pflanzen in den verschiedenen Salzlösungen.

Ergebnisse:

Die geprüften Salzlösungen beeinflussten das Wachstum der Senfpflanzen sehr unterschiedlich (Abb. 5). Das zu Vergleichszwecken verwendete „Hydral“ gewährleistete keine optimale Entwicklung, sondern wurde von einigen einfachen Salzlösungen bei weitem übertroffen: in den Hydrallösungen entwickelten sich in allen drei Versuchsreihen aus rund 180 Samen nur 70 bis 71 Jungpflanzen. Das durchschnittliche Trockengewicht der *einzelnen* Sprosse betrug ca. 4 mg, dasjenige der *einzelnen* Wurzeln ca. 0,5 mg. Da trockene Senfsamen im Durchschnitt 5,5 mg wiegen, ist es während der Entwicklung zur Jungpflanze zu einem Substanzverlust von rund 1 mg gekommen. Wie der Kaliumpermanganatverbrauch von rund 60 mg/g Samen zeigt, ist dieser Verlust z. T. darauf zurückzuführen, daß organische Substanz in das Bademedium übergetreten ist.

Betrachtet man nun die Resultate in den einfachen Salzlösungen, so lassen sich zweifellos gewisse Zusammenhänge zwischen den untersuchten Entwicklungskriterien und der Art sowie auch der Konzentration der verwendeten Salzlösungen erkennen.

In 1-mval-Lösungen haben *alle* Hydrogencarbonat-Salze — verglichen mit der Hydral-Lösung — einen ausgesprochen günstigen Einfluß auf die Zahl der aufkommenden Pflanzen (94 bis 111). Auch Ca-Sulfat und Ca-Chlorid fördern das

TROCKENGEWICHTE (mg) DER SPROSSE UND WÜRZELN, ANZAHL DER SPROSSE (SP) VON 1g SENFSAMEN NACH 10 TÄGIGEM WACHSTUM, WASSERSTOFFEXONENT (pH) UND OXYDIERBARKEIT (KMnO₄) DER NÄHRLÖSUNGEN, VERSUCHSTEMPERATUR 18 - 22° C

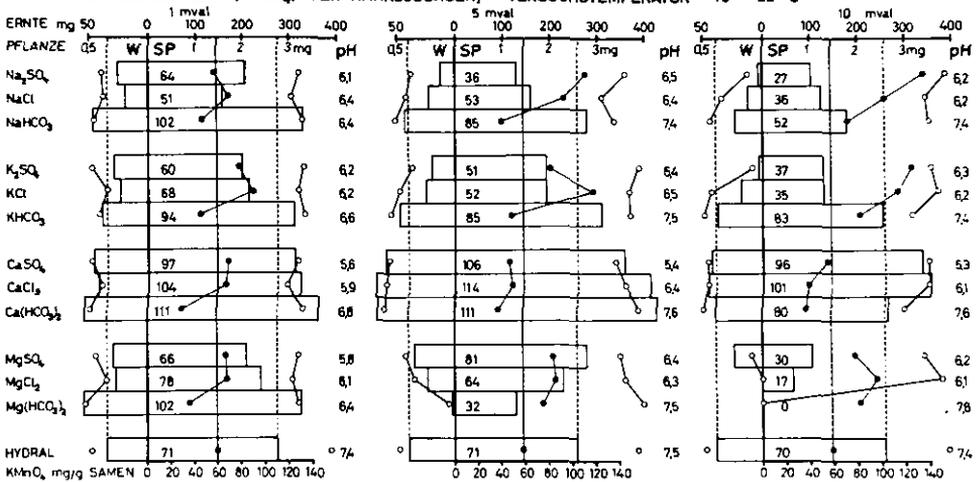


Abb. 5: 3 Versuchsreihen mit 1, 5 und 10 mval Einzelsalzlösungen. Erste Zeile der oberen Abszisse (Ernte) und Balkenlänge: Erntetrockengewicht (mg) der Wurzeln (W) und Sprosse (SP). Zahlen in den Balken: Anzahl der geernteten Sprosse. Zweite Zeile der oberen Abszisse (Pflanze) und offene Kreise: Durchschnittliches Trockengewicht der Wurzeln bzw. Sprosse. Untere Abszisse und gefüllte Kreise: Kaliumpermanganatverbrauch der Badelösung in mg pro g Samen. Das Erntegewicht und der Kaliumpermanganatverbrauch in der Hydral-Lösung (unterste Balken) wurde zum besseren Vergleich mit den übrigen Salzlösungen als gestrichelte bzw. ausgezogene Linie dargestellt.

Aufkommen der Jungpflanzen (97 bzw. 104). In den Na-, K- und Mg-Sulfat-Lösungen entwickelten sich dagegen nur 60 bis 66 Pflanzen. Die bei weitem schlechteste Ernte ergab die Na-Chlorid-Lösung (51). Deutlich besser war die Entwicklung in der K-Chlorid-Lösung (68) und in der Mg-Chlorid-Lösung (78). Die Unterschiede im Trockengewicht der Wurzel bzw. Sproßernte sind im wesentlichen durch die verschiedene Anzahl der geernteten Pflanzen bedingt; denn nach Umrechnung auf die Einzelpflanze ergaben sich in allen Salzlösungen ziemlich ähnliche Trockengewichte, die durchwegs etwas niedriger waren, als in der äquilibrierten Salzlösung (Hydral). In den Chlorid-Lösungen waren die Trockengewichte der Sprosse und Wurzeln regelmäßig etwas geringer als in den Sulfat- und Hydrogencarbonat-Lösungen. Der Kaliumpermanganatverbrauch lag in allen Hydrogencarbonat-Lösungen niedriger als in den übrigen Salzlösungen.

In 5-mval-Lösungen war die Pflanzenernte bei den *Alkali*-Hydrogencarbonaten schon merklich geringer (85). Von den *Erdalkali*-Hydrogencarbonaten wirkte das Ca-Salz nach wie vor günstig (111), während das Mg-Salz das Aufkommen der Sprosse (32) und besonders der Wurzeln stark hemmte. Na-Sulfat (36) hemmt etwas stärker als Na-Chlorid (53), dessen Hemmwirkung ungefähr gleich groß ist wie die von K-Chlorid und K-Sulfat. Ca-Sulfat (106) und Ca-Chlorid (114) erreichen

in der Konzentration von 5 mval ein Wirkungsoptimum. Mg-Sulfat ermöglicht in 5-mval-Lösung ein besseres Aufkommen der Pflanzen als in 1-mval-Lösung. Das durchschnittliche Trockengewicht der Sprosse liegt in den 5-mval-Lösungen im allgemeinen über den Werten, die in den 1-mval-Lösungen gefunden wurden. Bei den Wurzeln gilt dies nur für Ca-Lösungen. Der Kaliumpermanganatverbrauch war in den *Alkali*-Hydrogencarbonat-Lösungen und in allen Ca-Lösungen wiederum deutlich geringer als in den übrigen Salzlösungen. In den letzteren hat er gegenüber den 1-mval-Lösungen deutlich zugenommen.

In 10-mval-*Alkalisalz*-Lösungen hat die Anzahl der ausgekeimten Pflanzen weiter abgenommen. Na- und K-Hydrogencarbonate (54 bzw. 83) wirken aber immer noch günstiger als Sulfate (27 bzw. 37) und Chloride (36 bzw. 35). Der günstige Einfluß der entsprechenden Ca-Salze hat sich in dieser Konzentration deutlich vermindert (96 bzw. 101), vor allem beim Ca-Hydrogencarbonat (80). Alle 10-mval-Mg-Salzlösungen beeinträchtigten das Wachstum (30 bzw. 17) am stärksten die Mg-Hydrogencarbonat-Lösung, in der die Entwicklung der Pflanzen nach Durchbruch der Wurzelspitze durch die Samenschale plötzlich zum Stillstand kam. Das durchschnittliche Trocken gewicht der Sprosse war in den K- und Ca-Hydrogencarbonat-Lösungen, das durchschnittliche Trockenge-

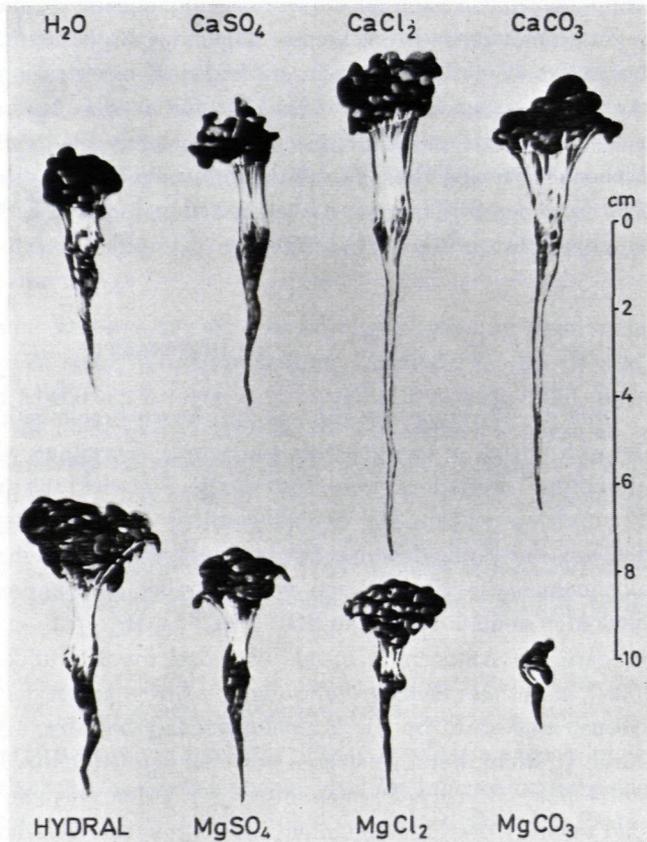


Abb. 6: Senfpflanzen nach 10tägigem Wachstum in 5 mval Erdalkalisulfat-, -chlorid- und -hydrogencarbonat-Lösungen, sowie in Aqua dest. (links oben) und in der Nährlösung „Hydral“ (links unten). In der Ca-Chlorid- und Ca-Hydrogencarbonat-Lösung hatten die Pflanzen rein weiße Wurzeln, in allen übrigen Lösungen waren die Wurzeln bräunlich verfärbt. Die Einzelaufnahmen wurden zu einer Tafel zusammengefaßt und mit Absicht hart reproduziert, so daß sie den Charakter von Zeichnungen annahmen.

wicht der Wurzeln in den *Alkali*-Sulfat-Lösungen und in der Mg-Chlorid-Lösung deutlich geringer als in den übrigen Salzlösungen. Der Kaliumpermanganatverbrauch liegt nur mehr bei den Ca-Lösungen unter dem Hydral-Kontrollwert, bei allen übrigen Salzen aber deutlich darüber.

Die im vorstehenden betrachteten Entwicklungskriterien geben noch kein richtiges Bild über den äußeren Aspekt der frischen Pflanzen. Das Trockengewicht z. B. war nur wenig verschieden, obwohl das Streckungswachstum der Pflanzen in den verschiedenen Salzlösungen sehr große Unterschiede aufwies, wie die photographische Aufnahme (Abb. 6) zeigt, die anlässlich eines Kontrollversuches mit 5-mval Ca- bzw. Mg-Salzlösungen nach 10 Versuchstagen gemacht wurde.

Zusammenfassend erscheinen folgende Ergebnisse dieser Wachstumsversuche besonders bemerkenswert: in niedrigen Konzentrationen wirken alle Hydrogencarbonate entwicklungsfördernd. Ihr fördernder Einfluß nimmt in höheren Konzentrationen ab und schlägt in eine Wachstumshemmung um. Beim Ca-Hydrogencarbonat erreicht die Wachstumsförderung in der 5-mval-Lösung ein Optimum. Alle Ca-Salze fördern, verglichen mit den übrigen Kationensalzen, das Wachstum am deutlichsten in 5-mval-Lösungen.

Diskussion:

Über die Wirkung von Einzelsalzen liegen bereits zahlreiche Untersuchungen vor, die sich auf ganz verschiedene biologische Vorgänge wie z. B. Muskelerregbarkeit, Hämolyse, Verhalten von Einzellern, Entwicklung von niederen und höheren Pflanzen erstrecken. Die Wirkungsstärke der Ionen zeigt zumeist Beziehungen zu den aus der Kolloidchemie bekannten lyotropen Reihen. Die Anionen fördern im allgemeinen die Hydratation von Eiweißen und anderen hydrophilen organischen Kolloiden gemäß der Reihe $\text{SO}_4'' < \text{Cl}' < \text{Br}' < \text{J}' < \text{SCN}'$. In dieser Reihenfolge steigern die Anionen u. a. als K-Salze die Kaliumkontraktur und als Na-Salze (0,2% in isotoner Saccharoselösung) die Erregbarkeit der quergestreiften Muskulatur. Ebenso abgestuft ist die Anionenwirkung bei der Hämolyse von Erythrozyten durch Urethan, beim Austreten von Zellpigmenten aus Einzellern und bei der Harnstoff- bzw. Glycerin-Permeabilität der Pflanzenepidermis (BOGEN 1948). Jedoch sind auch „Unregelmäßigkeiten“ und Umkehrungen der Reihe nicht selten (HÖBER 1947). Die allgemeine Grundlage dieser Anionenwirkungen ist eine Permeabilitätsänderung, durch Lockerung oder Verfestigung kolloidaler Aggregate in den Zellmembranen.

Hydrogencarbonate wurden bisher nur selten mit anderen Anionen verglichen; es konnte darüber nur die Mitteilung von HASSAN und OVERSTREET (1952) gefunden werden, nach der Na-Salze (5 bis 200 mval/Liter) das Wurzelwachstum von Radieschen unmittelbar nach der Auskeimung in derselben Reihenfolge ($\text{SO}_4 < \text{Cl}' \ll \text{HCO}_3'$) hemmen, wie die Auskeimung von Senfsamen in unseren Versuchen.

Auch die biologischen Wirkungen der *Kationen* hat man immer wieder zu „reihen“ versucht. Die Ergebnisse sind hier jedoch weniger einheitlich als bei den Anionen, vor allem wohl wegen der sehr spezifischen Aufgaben, die gewisse Kationen für manche Zellfunktionen haben. Ein Unterschied in den Wirkungen der Kationen hat sich aber regelmäßig bestätigen lassen: *Alkalisalze* wirken auf Zellmembranen wie auch auf hydrophile Kolloide „dispergierend“, während *Erdalkalien*, vor allem Ca-Salze, sowohl im Falle physiologischer Objekte als auch bei kolloidalen Modellen „verfestigend und verdichtend“ wirken und die dispergierende Wirkung der Alkalien auszugleichen vermögen. Der „verfestigende“ Einfluß von Erdalkalien ist durch unzählige Beobachtungen belegt, besonders an Geweben, deren zelluläre Bausteine durch Calciummangel gelockert werden wie z. B. die Blastomeren von Seeigeleiern, die Zellen von Wurzelhaaren und das Epithel von Schleimhäuten (HÖBER 1947). HÖBER nimmt an, daß die Zellen dieser Gewebe normalerweise durch eine schwach saure Kittsubstanz zusammengehalten werden, die ziemlich unlösliche Ca-Salze (Pectinate, Proteinate u. a.) bildet und bei Fehlen des Ca in weichere und löslichere Na-Salze übergeht. Im Einklang damit steht unsere Beobachtung, daß die Abgabe organischer Substanz (Kaliumpermanganatverbrauch) aus Senfwurzeln in Ca-Lösungen besonders gering ist.

Ältere pflanzenphysiologische Arbeiten zeigen, daß Lösungen einzelner Salze auch in schwachen Konzentrationen das Wurzelwachstum vermindern, die Wurzel schädigen und mitunter zum Absterben bringen (Literatur bei FISCHER 1956). Eine Ausnahme machen Ca-Salze, die nicht nur wachstumsfördernd wirken, sondern auch die nachteiligen Wirkungen anderer Salze aufzuheben vermögen. LIBBERT (1953) fand im Kresswurzelttest, daß das Ca (als Chlorid) das Wurzelwachstum gegenüber Na- und K-Chloriden zwischen 0,02 mval und 10 mval fördert (Optimum bei 1 mval), während das Mg-Chlorid über 0,2 mval hemmt. Dieser Wirkungsunterschied zwischen den beiden Erdalkalisalzen war auch in unseren Wachstumsversuchen mit Senfpflanzen festzustellen.

Beim Senf verzögern Ca-Ionen zunächst die Auskeimung, fördern dann aber das Wachstum der Wurzel. Eine Deutung dieser Doppelwirkung im Sinne der Kolloidtheorie (Verdichtung) scheint nur möglich, wenn zwei Angriffspunkte des Ca angenommen werden. Hier bietet sich zunächst die Vorstellung an, daß Ca-Ionen einerseits das embryonale Teilungswachstum (Zellvermehrung) durch Dehydratation des Protoplasten verzögern, andererseits aber durch Versteifung der Zellwände das Streckungswachstum begünstigen könnten.

Eine gleichartige Doppelwirkung wie die Ca-Ionen zeigen auch Hydrogencarbonat-Ionen, deren auskeimungshemmende bzw. wachstumsfördernde Wirkung zumindest in niedrigen Konzentrationen (1 mval) weitgehend unabhängig von den begleitenden Kationen ist. In Hydrogencarbonat-Lösungen war die Auskeimung wie bei den Ca-Salzen verzögert und das Wachstum von Sprossen und Wurzeln begünstigt; und hier wie dort spricht der geringe Kaliumpermanganatverbrauch des Bade-

mediums dafür, daß eine besondere Verfestigung des Wurzelgewebes vorliegt, die in Ca-freien Sulfat- und Chlorid-Lösungen fehlt.

Da alle Hydrogencarbonat-Salze schwach alkalisch reagieren und die OH-Ionen, wenn sie in geeigneter Form (z. B. als Ammoniumhydroxyd) zugeführt werden, die Auskeimung stark verzögern, liegt es nahe, den entscheidenden Wirkungsfaktor des pflanzenphysiologischen Doppelleffektes der Hydrogencarbonate in einer schwachen intrazellulären Alkalisierung zu vermuten. Falls dies zutrifft, könnte der Wirkungsmechanismus der Ca- und Hydrogencarbonat-Ionen eine gemeinsame Grundlage haben, wenn sich der Hydratationsgrad der Zellkolloide im schwach alkalischen Bereich vermindert. Diese Vorstellung ist aber zur Zeit noch recht spekulativ, da das pH des Hydratationsminimums (isoelektrischer Punkt) der Zellkolloide von Senfsamen nicht bekannt ist. Hier bleiben noch viele Fragen offen. Experimentell belegt ist vorläufig nur, daß die Ca- und die Hydrogencarbonat-Ionen die Auskeimung hemmen, ohne die Zellatmung (den O₂-Verbrauch) zu vermindern, so daß ihre Hemmwirkung nicht wie in Wässern mit geringem O₂-Gehalt atmungsbedingt sein kann.

Neutralsalze können intrazelluläre pH-Verschiebungen bewirken, wenn Kationen und Anionen verschieden stark durch die Zellwände permeieren. Die Wirkung schwacher Neutralsalz-Lösungen hängt dann nicht so sehr von der Konzentration und der Art der eindringenden Ionen ab als vielmehr von der Richtung und der Größe der intrazellulären pH-Verschiebung. Auch hier gibt es noch viel zu klären. Die Wirkungsfaktoren aber, die dem pflanzenphysiologischen Doppelleffekt der Akratothermen zugrundeliegen, stehen fest: abgesehen vom O₂-Mangel dieser Wässer, der die Auskeimung hemmt, sind für diesen Effekt zwei — auch in vielen gewöhnlichen Oberflächenwässern anzutreffende — Ionen verantwortlich, nämlich *Calcium* und *Hydrogencarbonat*. Das schließt nicht aus, daß in einigen Thermalwässern auch noch andere spezielle Faktoren (z. B. Radon, Fluor) mit pflanzenphysiologischen Wirkungen vorhanden sein können.

Herzlich danken möchte ich:

Herrn Univ.-Prof. Dr. F. SCHEMINZKY, dem diese Mitteilung zu seinem 70. Geburtstag gewidmet ist, für die Anregung und Förderung der Untersuchungen.

Frl. Margit EGGER, med. techn. Ass., für wertvolle Unterstützung und stete Hilfsbereitschaft im Laboratorium.

Frau Helma STÖVER für Mühe und Sorgfalt bei der Gestaltung der Abbildungen.

Literatur

- ALOY, G., G. BILLARD und S. VALDIGUIÉ (1929): La Presse Medicinale **34**: 546—550.
 BOGEN, H. J. (1948): Biol. Zbl. **67**: 490—503.
 BUKATSCH, F. und M. (1940): Balneologie **7**: 1—7; 37—44.
 DOMBROWSKI, H. (1965): Archiv f. physikal. Therapie **17**: 183—186.
 DYBOWSKI, U. (1942): Balneologie **9**: 120—126.
 FISCHER, H. (1956): Handbuch der Pflanzenphysiologie II, S. 715.

- FRÉMONT, Th. (1933): *Compt. Rend. Soc. Biol.* **114**: 128–130.
- HASSAN, M. N. und R. OVERSTREET (1952): *Soil Science* **73**: 315–326.
- HÖBER, R. (1947): *Physikalische Chemie der Zellen und Gewebe*, S. 319–343, Verlag Stämpfli & Co., Bern.
- JOB, C. (1965 a): *Fund. baln. bioclim.* **3**: 150–158.
- JOB, C. (1965 b): *Archiv f. physikal. Therapie* **17**: 187.
- JOB, C. (1966 a): *Archiv f. physikal. Therapie* **18**: 413.
- JOB, C. (1966 b): *Sitzber. Österr. Akad. Wiss., Math.-natw. Kl. II* **175**: 155–162.
- KLAS, Z. (1961): *Fund. baln. bioclim.* **2**: 77–84.
- LIBBERT, E. (1953): *Planta* **41**: 396–435.
- OHLE, W. (1960): in „*Deutsche Einheitsverfahren zur Wasseruntersuchung*“, Verlag Chemie.
- SCHRÖCKSNADEL, H. (1958): *Fund. baln. bioclim.* **1**: 251–260.
- SIMO, A. (1927): *Zeitschr. f. physikal. u. diätet. Therapie* **33**: 163–166.
- VOUK V. (1941): *Balneologie* **8**: 71–73.
- VOUK, V. (1950): *Grundriß zu einer Balneobiologie der Thermen*. Verlag Birkhäuser, Basel.
- VOUK, V. (1957): *Sitzber. Österr. Akad. Wiss. Math.-natw. Kl. II* **166**: 162–182.
- VOUK, V. und H. SCHRÖCKSNADEL (1957): *Sitzber. Österr. Akad. Wiss. Math.-natw. Kl. II*, **166**: 184–197.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1969

Band/Volume: [57](#)

Autor(en)/Author(s): Job Carl

Artikel/Article: [Die Wirkung von Akratothermen auf die Auskeimung von Pflanzensamen und das Wachstum junger Pflanzen. 123-141](#)