

Die Verdichtungschlorose - Hemmung des Wurzelwachstums als Ursache

Die Chlorose der Rebe wird durch zwei unterschiedliche Auslösungsmechanismen verursacht. Bei der «klassischen» Kalkchlorose liegt das Eisen im Boden in der dreiwertigen, durch die Reben nicht aufnehmbaren Form vor: Eisengaben über den Boden (Eisensulfat oder Eisenchelate) sind bei dieser Chloroseform wirksam, und beispielsweise in verschiedenen Rebgebieten Frankreichs gängige Praxis. Bei uns tritt die Chlorose aber meist in Böden mit genügend aufnehmbarem Eisen auf. Es ist deshalb logisch, dass unter diesen Bedingungen eine Eisengabe über den Boden versagt. Die in der Schweiz verbreiteten Chloroseformen werden hauptsächlich durch ein ungenügendes Wurzelwachstum während der Hauptwachstumszeit der Rebe verursacht. Das permanente, suberisierte (verkorkte) Wurzelwerk der Rebe kann, mit Ausnahme des Eisens, alle Nährstoffe nachliefern. Eisen wird nur von aktiv wachsenden Wurzeln an der Wurzelspitze aufgenommen. Deshalb verursachte jede Hemmung des Wurzelspitzenwachstums einen spezifischen Eisenmangel.

Peter Perret und Werner Koblet,

Die Chlorose ist definiert als eine «Störung im Eisenhaushalt» der Rebe (Gärtel 1965). Aus dieser Definition geht hervor, dass nicht ausschliesslich primärer Eisenmangel im Boden für die Krankheit verantwortlich ist. Mit wenigen Ausnahmen (z.B. Bleichsande) sind unsere Böden genügend mit Eisen versorgt. Blattaufhellung viröser Art sowie genetische Chlorophylldefekte werden nicht den Chlorosen zugerechnet.

Bereits 1843 konnte Gris durch Bestreichen von Blättern mit verdünnter Eisensulfatlösung ein Wiederergrünen chlorotischer Blätter bewirken (Molz 1907, 1908). Ende des 19. Jahrhunderts wurden erste erfolgreiche Bekämpfungsversuche mit Eisengaben über den Boden durchgeführt.

Es zeigte sich aber schon bald, dass bei weitem nicht alle Chloroseformen durch Eisen kuriert werden können. Vor allem in schweren, nassen Böden konnte mit Eisengaben über den Boden kein Behandlungserfolg erzielt werden.

Bereits früh wurde deshalb spekuliert, dass verschiedene Ursachen für das Auftreten der Chlorose verantwortlich sind.

Die Kalkchlorose

Diese Art der Chlorose tritt in warmen, gut durchlüfteten Kalkböden auf. In solchen Böden liegt das Eisen in der oxidierten, dreiwertigen, durch die Reben nicht aufnehmbaren Form vor. Mit Eisengaben über den Boden (Eisensulfat oder Eisenchelate) können bei dieser Chloroseform gute Behandlungserfolge erzielt werden. Auch mit den chloroseresistenten Unterlagen 41 B und Fercal sind gute Erfahrungen gemacht worden. Diese Unterlagen können durch eine Erhöhung der Reduktionskapazität in der Rhizosphäre das Eisen in eine pflanzenverfügbare Form umwandeln.

Auftreten der Verdichtungschlorose

Die «Verdichtungschlorose» tritt vor allem in schweren,

Einfluss der Wachstumsdynamik

Das Auftreten der Chlorose ist erfahrungsgemäss stark vom Witterungs- resp. Wachstumsverlauf abhängig. Unter den folgenden Bedingungen tritt die Chlorose am stärksten auf:

Bei ungünstigem Witterungsverlauf, das heisst bei nasskaltem Wetter vor und während der Blüte, treten meist noch keine Symptome auf. Auch wenn die Witterung nach der Blüte kühl bleibt, ist nur selten Chlorose festzustellen. Setzt aber während oder nach der Blüte warmes, wüchsiges Wetter ein, bewirkt dies ein starkes oberirdisches Wachstum. Der daraus resultierende grosse Eisenbedarf kann nun nicht gedeckt werden, weil das Wurzelwachstum respektive die Eisenaufnahme mit der oberirdischen Entwicklung nicht Schritt halten kann.

Beim Austrieb der Reben sind noch keine wachsenden Wurzelspitzen vorhanden, es kann deshalb auch kein Eisen aus dem Boden aufgenommen werden. Die Chlorophyllbildung ist in diesem Moment aber noch gering, das dafür notwendige Eisen kann aus pflanzerigenen Reserven mobilisiert werden: Normalerweise setzt das Wurzelwachstum erst ein, wenn die Triebe etwa 10 bis 20 cm lang sind: Mit dem Einsetzen des Haupttriebwachstums benötigt die Rebe plötzlich sehr grosse Mengen an Eisen. Sind die Wachstumsbedingungen für die Wurzeln in diesem Zeitpunkt ungünstig, kommen sie mit der Eisenaufnahme nicht mehr nach. Die Chlorose tritt deshalb besonders bei warmem, wüchsigem Wetter nach der Blüte besonders stark auf, weil der Eisenbedarf für die Chlorophyllbildung schlagartig ansteigt.

Weil die Rebe ein ausgedehntes altes Wurzelwerk hat (im Gegensatz zu annuellen Pflanzen), können alle Nährstoffe, mit Ausnahme des Eisens, durch suberisierte (verholzte) Wurzeln aufgenommen und in genügender Menge nachgeliefert werden. Nach der Hauptentwicklungszeit der Rebe, etwa zwei bis drei Wochen nach der Blüte, verschwindet die Chlorose meist wieder vollständig. Die Stressphase der Rebe ist vorbei, die Wurzelentwicklung hat eingesetzt.

Das Wachstum der Wurzeln kann durch äussere (exogene) und innere (endogene) Ursachen beeinflusst werden. Die auf das Wurzelwachstum einwirkenden Hemmfaktoren verhalten sich additiv, an der Auslösung der Chlorose sind meist mehrere Faktoren beteiligt.

nassen Böden auf. Im Gegensatz zu den warmen, leichten, gut durchlüfteten Kalkböden ist unter diesen Verhältnissen genügend reduziertes, und dadurch aufnehmbares Eisen vorhanden. Bei empfindlichen Kulturpflanzen können unter diesen Bedingungen sogar durch zu hohe Gehalte an verfügbarem Eisen die Wurzeln geschädigt werden. Es ist also anzunehmen, dass unter diesen Bedingungen ein grundsätzlich anderer Auslösemechanismus für das Auftreten der Chlorose vorhanden ist als bei der Kalkchlorose. Die Beobachtung, dass die chloroseresistenten Unterlagen 41 B und Fercal unter diesen Bedingungen ebenfalls chlorotisch werden, weist ebenfalls auf einen unterschiedlichen Auslösungsmechanismus hin. Stress- und Überlastungschlorose werden durch Überlastung der Rebe im Vorjahr verursacht. In Versuchen mit unterschiedlicher Ertragsbelastung tritt bei den stark belasteten Reben oft Chlorose auf. Vermutlich wird die Erscheinung durch eine zu geringe Reservestoffeinlagerung verursacht. Das gehäufte Auftreten der Chlorose nach frühem Blattfall, beispielsweise durch Frühfröste, dürfte ebenfalls durch eine ungenügende Reservestoffversorgung verursacht werden.

Bicarbonat als Chloroseursache?

In Nährlösungsversuchen konnte bei Kulturpflanzen durch Bicarbonat Chlorose erzeugt werden (Lindsay und Thorne 1954). In Topfversuchen konnten Kolesch et al. (1983) durch Bicarbonat bei einer empfindlichen Rebuterlage Chlorose auslösen, die Eisenkonzentration im Stamm und in den Blättern der empfindlichen Unterlagen wurden vermindert. Der Auslösung der Chlorose durch Bicarbonat wird von diesen Autoren zwei Ursachen zugeschrieben: die Rhizosphäre wird alkalischer, die enzymatische Eisenreduktion wird gestört. Bicarbonat entsteht im Boden bei hohen Kohlendioxidgehalten, in verdichteten Böden vermutet man höhere Gehalte. Wie wir später zeigen konnten, ist aber die Kohlendioxidkonzentration in Böden mit chlorotischen Reben nicht höher als in gesunden Teilparzellen. Durch Giessen mit bicarbonathaltigem Wasser konnten wir in unseren Versuchen nie Chlorose auslösen. Der Bicarbonat-Theorie steht gegenüber, dass wir durch Einsaaten oft eine Verminderung der Chlorose erreichen, durch die Bepflanzung des Bodens erhöhen wir aber den CO₂-Gehalt der Bodenluft markant. Gleichzeitig ist in verdichteten Böden oft Ammonium die dominierende Stickstoffform. Bei der Aufnahme von Ammonium wird aber das Rhizosphären-pH stark abgesenkt (Mengel 1983), was der obigen Theorie widerspricht.

Schadbild der Rebenchlorose

Der Befall zeigt sich zuerst an den jüngsten Blättern, durch Aufhellen der Blattfarbe. Die Vergilbung entwickelt sich vom Blattrand her über die Interkostalfelder. Die Blattadern bleiben aber grün. Einzelne, stark befallene Blätter weisen eine typische weissliche Verfärbung auf. Von Stickstoffmangelsymptomen ist die Chlorose leicht zu unterscheiden (Abb. 1). Beim N-Mangel ist der Blatt-Stielwinkel enger, die Blattrippen bleichen ebenfalls aus und die Blattstiele zeigen bei blauen Sorten meist eine charakteristische Rotverfärbung. Erst bei grösserer Ertragsbelastung, etwa ab dem 4. bis 7. Jahr tritt die Erscheinung auf. Verdichtungschlorosen treten meist nur in nassen Jahren auf.

Es ist aber davon auszugehen, dass alle das Wurzelwachstum hemmenden Faktoren die Chlorose fördern.

Sorten und Unterlageneempfindlichkeit

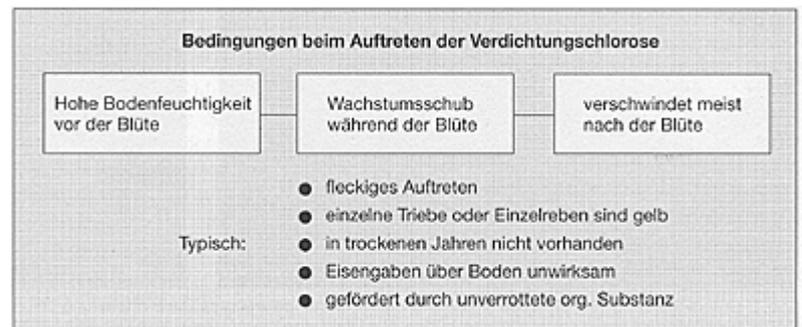
Von den in der Ostschweiz angebauten Sorten ist vor allem der RieslingxSilvaner sehr empfindlich. Widerstandsfähig sind Räuschling und Kerner, der Blauburgunder nimmt eine Mittelstellung ein. Über die Gründe für diese unterschiedliche Resistenz oder Empfindlichkeit können nur Vermutungen angestellt werden. Möglicherweise ist die Fähigkeit des Räuschlings, sehr schnell Adventivwurzeln zu bilden, ein Erklärung dafür. Wenn im Wurzelhorizont der Rebe ungünstige Wachstumsbedingungen für die Rebe herrschen, bildet sie den oberflächennahen Bodenschichten Adventivwurzeln. Diese wachsen in diesen gut durchlüfteten Böden sehr schnell (Abb. 1) und können die Eisenaufnahme positiv beeinflussen.

Bei der Kalkchlorose spielt die Unterlagenwahl eine wichtige Rolle. Von den bei uns angebauten Unterlagen ist die Couderc 3309 ziemlich empfindlich, die Kober 5BB ist am ehesten als resistent zu bezeichnen. In den gefährdeten Gebieten wird neben der traditionellen 41 heute vor allem die Fercal eingesetzt: Ein 1977 angelegter Versuch mit solchen Unterlagen in verdichteten Böden hat keine positiven Resultate gebracht: Bei unseren üblicherweise verwendeten Unterlagen besteht in bezug auf die Verdichtungs- oder Nässechlorose keine unterschiedliche Empfindlichkeit.

Verdichtungschlorose in nicht verdichteten Böden

In Wädenswil wurden 1972 zwei Einzelparzellen gerodet und gemeinsam neu bepflanzt. Im dritten und vierten Jahr trat im Bereich der einen Parzelle (Feld 1) starke Chlorose auf, während die frühere Parzelle 2 gesund blieb. Da beide Parzellen einheitlich bepflanzt wurden, muss der Grund für das Auftreten der Chlorose in der Geschichte der Parzelle liegen. Bei Profilgrabungen konnten wir zwischen den beiden Parzellen deutliche Unterschiede feststellen. Der chlorotische Parzellenteil wies eine gute Bodenstruktur mit einem hohen Anteil wasserfester Krümel auf. Der gesunde Teil dagegen, hatte einen deutlich tieferen Humusgehalt und war über das ganze Profil leicht verdichtet. Nach dieser Beobachtung müsste die Chlorose eher hier auftreten. Durch die Bodengasuntersuchungen wurden diese Beobachtungen auch bestätigt, die chlorotische Parzelle war praktisch während der ganzen Untersuchungsperiode besser durchlüftet als die gesunde.

Die Vorgeschichte der beiden Parzellen ist genau dokumentiert. Die chlorotische Parzelle wurde 1912 von Hand auf zirka 100 cm rigolt. Die Bodenstruktur im Wurzelhorizont wurde dadurch wesentlich verbessert. Die Durchwurzelung des Bodens ist in dieser Parzelle wesentlich einheitlicher, das Porenvolumen deutlich grösser. Trotzdem wird die Parzelle regelmässig stark chlorotisch. In 100 cm Bodentiefe liegt heute eine undurchlässige Lehmschicht. An dieser Grenzschicht staut sich das Wasser und füllt bei hohen Niederschlägen das grobporensystem auf. Vermutlich begünstigt die bessere Bodenstruktur bei starkem Regen zusätzlich die Wasseraufnahme. Weil im Untergrund verhältnismässig viel organische Substanz vorhanden ist, sind die Voraussetzungen für die Bildung von Aethylen geschaffen.



Ursachen der Rebenchlorose in verdichteten Böden

1976 wurde mit den Arbeiten über die Ursachen der Rebenchlorose begonnen. Die Krankheit war zu diesem Zeitpunkt noch sehr stark verbreitet. Damals wurden bereits zwei grundsätzlich unterschiedliche Mechanismen für die Chloroseauslösung postuliert. Die Ursachen der Kalkchlorose waren bereits gut abgeklärt, wirkungsvolle Gegenmassnahmen bekannt. Die Gründe für das Auftreten der Verdichtungschlorose wurden damals vor allem in einem zu hohen Kohlendioxydgehalt und einem zu tiefen Sauerstoffgehalt der Bodenluft vermutet. Als eigentlicher Auslöser der Chlorose wurde Bicarbonat postuliert (Mengel 1983).

Als erstes untersuchten wir deshalb den Verlauf des CO₂- und Sauerstoffgehaltes in zwei direkt nebeneinander liegenden Parzellen (Abb. 3), von denen eine regelmässig chlorotisch wurde.

Die chlorotische Parzelle ist im Ober- und Mittelgrund (30 und 80 cm Bodentiefe) eher besser durchlüftet, der Sauerstoffgehalt ist höher und der CO₂ Gehalt niedriger. In 160 cm Bodentiefe ist es, besonders in der Zeit des Hauptwachstums, eher umgekehrt. Die Unterschiede in den CO₂ und O₂-Konzentrationen zwischen der gesunden und der chlorotischen Parzelle sind jedoch relativ gering.

Gleichzeitig wurden in speziell umgebauten Wurzelschaukästen Begasungsversuche mit wesentlich tieferen Sauerstoff und höheren Kohlendioxydgehalten durchgeführt (Perret und Koblet 1979). Bei den extremsten Varianten (10% CO₂, 0% Sauerstoff) wurde zwar ein geringer Einfluss auf das Triebwachstum festgestellt, Chlorose konnte aber bei keiner der Varianten ausgelöst werden.

Bei weiteren Untersuchungen der Bodenluft chlorotischer Parzellen fanden wir Äthylen in physiologisch relevanten Konzentrationen. Begasungsversuche in den Wurzelschaukästen zeigten dann bald, dass Äthylen in den Konzentrationen, wie es in den chlorotischen Parzellen vorkommt, das Wurzelspitzenwachstum vollständig hemmt. Begasungsversuche mit Äthylen in Wurzelschaukästen (Perret et al. 1981) bestätigten diese Wirkung von Äthylen unter praxisnahen Bedingungen. Allerdings konnte damit nur leichte Chlorose ausgelöst werden.

Aus Untersuchungen von Chaney und Brown (1972) war bekannt, dass die Eisenaufnahme nur direkt hinter der Wurzelspitze an aktiv wachsenden Wurzeln erfolgen kann. In späteren Untersuchungen konnte dann aber gezeigt werden, dass durch die Begasung mit Äthylen tatsächlich Chlorose ausgelöst werden kann. Allerdings braucht es dazu zusätzlich einen starken Wachstumsschub. Dieser Wachstumsschub, der in der Praxis das Auftretender Chlorose begünstigt, verursacht einen hohen Eisenbedarf, der dann von den Wurzeln nicht gedeckt werden kann.

Aethylen

Aethylen ist bekannt als «Reifegas» bei Früchten. In der Pflanzenphysiologie spielt es eine wichtige Rolle als Stressaethylen, das bei Verletzungen der Pflanze produziert wird. Unter anderem spielt es auch eine Rolle bei der Ablösung von Blättern und Früchten. Verschiedene Wachstumsvorgänge der Pflanze, unter anderem auch das Wurzelwachstum, werden von Äthylen gesteuert, allerdings in viel tieferen Konzentrationen, als wir es in der Bodenluft gefunden haben. In den vorgefundenen Konzentrationen stoppt es das Wurzelwachstum vollständig. Dieses Äthylen ist nicht endogener Herkunft, sondern wird exogen durch fakultativ anaerobe Mikroorganismen und Pilze gebildet.

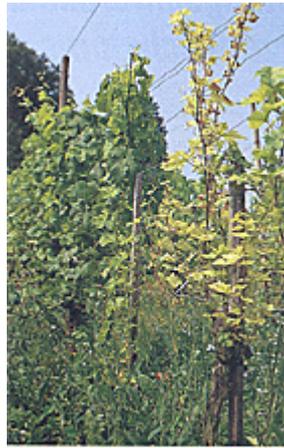


Abb.1: Unterscheidung von Chlorose (links) und Stickstoffmangel (rechts). Die Blattstellung chlorotischer Reben (links) ist gestreckt, während die Blätter bei N-Mangel einen spitzen Winkel bilden. Die Blattfarbe der chlorotischen Reben ist eher weisslich gelb.



Abb.2: Typisch für die Verdichtungschlorose einzelne Reben oder einzelne Triebe sind chlorotisch, während die Nachbarreben völlig gesund sind.

Tab. 1: Unterscheidung von Kalk- und Verdichtungschlorose, resp. von primärem und sekundärem Eisenmangel.

Tab. 2: «In-vitro» Äthylenbildung organischer Materialien in ppm nach 55 Tagen Inkubation und Chloroseintensität im Felde durch Abdeckung mit verschiedenen organischen Materialien.

Primärer Eisenmangel	Sekundärer Eisenmangel (Häufige Ursache)
(Selten)	
Kein Eisen im Boden vorhanden oder in nicht aufnehmbarer Form	Genügend aufnehmbares Eisen im Boden vorhanden, dieses kann aber von den Wurzeln nicht aufgenommen werden.
Bezeichnungen Gelbsucht, Kalkchlorose, Calciöse, Ikter	Bezeichnungen Gelbsucht, Schlechtwetterchlorose, Verdichtungschlorose, Traktorenchlorose, Überlastungschlorose, Stresschlorose, Phosphorchlorose, Kupferchlorose
Symptome Symptome bereits beim Austrieb. Tritt all-jährlich, unabhängig von der Witterung auf.	Symptome Symptome treten erst in der Phase des intensiven Wachstums auf, plötzliches Auftreten bei nassem Boden und Beginn des intensiven Wachstums. Verschwindet oft wieder. Fleckiges Auftreten, teilweise

Als Substrat dient unvollständig abgebaute organische Substanz. In Bodenpartikeln, die vollständig von der Sauerstoffzufuhr abgeschnitten sind (anaeroben Kompartimenten) und die abbaubare organische Substanz enthalten, wird der Aethylen-Vorläufer ACC gebildet. In den sauerstoffhaltigen Randzonen wird dann das Aethylen synthetisiert. Durch die luftführenden Bodenporen verteilt es sich im Boden.

Die Bedeutung von Aethylen bei der Auslösung der Rebenchlorose

Aus der Praxis ist bekannt, dass durch das Einarbeiten von frischem Mist in feuchten Jahren Chlorose ausgelöst werden kann. In einem Abdeckversuch mit verschiedenen organischen Düngern beobachteten wir sehr grosse Unterschiede im Auftreten der Chlorose. Je unverrotteter die organische Substanz war, desto stärker trat die Chlorose auf, die Verfahren mit Einsaaten hingegen waren vollständig gesund. In einem Inkubationsversuch untersuchten wir deshalb die Aethylenbildung verschiedener organischer Substanzen. Dabei zeigte sich, dass die Aethylenbildung stark vom Verrottungsgrad der organischen Substanz abhängig ist. Je unverrotteter eine organische Substanz ist, desto grösser ist deren Aethylenbildung im «in vitro» Versuch (Tab. 2).

Aethylen entsteht auch in nicht verdichteten Böden, durch unvollständig abgebaute organische Substanz. Werden grosse Mengen an abbaubarer organischer Substanz oberflächlich verabreicht, kann Aethylen in toxischen Konzentrationen gebildet werden. Das gleiche geschieht, wenn nicht vollständig verrottete organische Materialien zu tief in den Boden eingearbeitet werden. Unsere Untersuchungen (Perret et al. 1986) ergaben, dass diese Aethylenkonzentrationen das Wurzelspitzenwachstum vollständig hemmen. Im weiteren konnte gezeigt werden, dass die Aethylenbildung auch im «in vitro»-Versuch stark mit dem Wassergehalt korreliert. Erfahrungsgemäss begünstigt ein hoher Wassergehalt im Boden das Auftreten der Chlorose (Perret und Koblet 1986).

Im Verlauf der weiteren Untersuchungen haben wir erfahren, dass nicht in allen Böden mit chlorotischen Reben Aethylen nachgewiesen werden kann. In allen Böden mit Chlorose waren aber weitere, das Wurzelspitzenwachstum hemmende Faktoren vorhanden. Wir postulieren deshalb, dass die Wirkung des Aethylens bei der Auslösung der Chlorose auf einer Hemmung des Wurzelspitzenwachstums beruht.

Die temporäre Hemmung des Wurzelwachstum als Ursache der Rebenchlorose (Hypothese)

Eisen kann nur durch aktiv wachsende Wurzelspitzen aufgenommen werden, graktisch alle anderen Nährstoffe aber auch durch alte, bereits suberisicrte Wurzeln. Im Gegensatz zu annuellen Pflanzen besitzt die Rebe ein ausgedehntes verholztes Wurzelsystem, welches befähigt ist, mit Ausnahme des Eisens, alle Nährstoffe aufzunehmen. Die Hemmung des Wurzelspitzenwachstums dürfte deshalb die Ursache der unter dem Oberbegriff « Verdichtungs- und Überlastungschlorose» zusammengefassten Chlorosen sein. Alle Faktoren, welche das Wurzelspitzenwachstum hemmen, fördern deshalb die Chlorose!

- Bodenverdichtung
- Hohe Bodenwassergehalte
- Tiefe Temperaturen

nur ein Teil des Stockes befallen. Oft zu sätzlich N-Mangelsymptome.

Auftreten

In leichten, warmen, gut durchlüfteten Kalkböden

Auftreten

In schweren, vernässen, verdichteten Böden bei ungünstiger Bodendurchlüftung. Nach starker Ertragsbelastung oder frühzeitigem Blattverlust im Vorjahr, da durch geringe Reserven.

Ursache

Hoher Kalkgehalt

Ursache

Bodenverdichtung. Ungenügendes Wurzelspitzenwachstum Eisen ist in genügender Menge und in der reduzierten Form im Boden vorhanden. Es kann aber nicht aufgenommen werden, weil keine aktiv wachsenden Wurzeln vorhanden sind.

Eisen ist in der oxidierten, dreiwertigen Form im Boden vorhanden. Eisen kann aber nur in der reduzierten, zweiwertigen Form aufgenommen werden.

Massnahmen Chlorosefeste Unterlagen, Eisendüngung

(Chelate, Eisensulfat)

Massnahmen Verbesserung der Wachstumsbedingungen für das Wachstum der Wurzelspitzen im Boden. Verminderung der Stockbelastung.

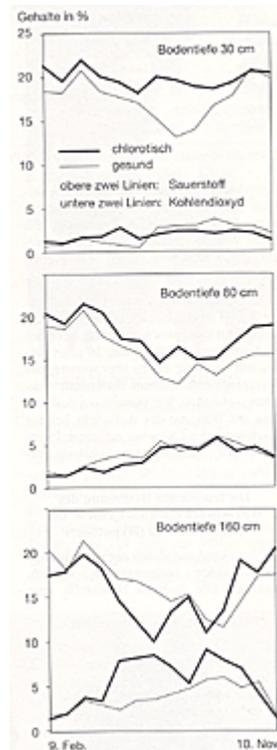


Abb. 3: Kohlendioxyd und Sauerstoffverlauf in chlorotischer und gesunder Teilparzelle.

- Schwermetalle
- hohe Ammoniumgehalte im Boden
- tiefe Reservestoffgehalte in den Reben

Es ist zu vermuten, dass zwischen diesen Hemmfaktoren additive oder synergistische Interaktionen stattfinden. So ist im verdichteten Boden bei hohem Wassergehalt die Nitrifizierung gehemmt. Das kann zu einer Erhöhung des Ammoniumgehaltes im Boden führen. Nimmt die Rebe anstatt Nitrat Ammonium auf, sinkt das pH in der Rhizosphäre stark ab (Marschner 1983). Die Toxizität der Schwermetalle ist stark vom Rhizosphären-pH abhängig. Je tiefer das pH, desto grösser ist die Toxizität der Schwermetalle. Diese hemmen das Wurzelspitzenwachstum, wodurch die Eisenaufnahme gehemmt wird.

Literatur

Chaney R.L. und Brown J.C.: Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiology* 50, 208-213, 1972.

Gärtel W.: Über die Ursachen der Verdichtungschlorose auf verdichteten Kalkböden. *Weinberg und Keller* 12, 143-166, 1965.

Kolesch H., Höfner W. und Schaller K.: Effect of bicarbonate and phosphate on iron chlorosis of grape vines with special regard to the susceptibility of two rootstocks Part II: pot experiments. *J. plant nutrition* 1987 10 (2), 231-240, 1987.

Lindsay und Thorne: Bicarbonate Ion and Oxygen Level as Related to Chlorosis. *Soil Sc.* 77, 271-279, 1954.

Mengel K. und Bübl W.: Verteilung von Eisen in Blättern von Weinreben mit HCO_3^- -induzierter Fe Chlorose. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146, 560-571, 1983.

Molz E.: Untersuchungen über die Chlorose der Reben. *Zentralbl. Bakteriologie* 1907, 1908 19, 461-480, 563-572, 715-734, 788-790, 20, 7188, 126-149.

Perret P und Koblet W.: Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Aethylengehalt der Bodenluft und dem Auftreten der Rebenchlorose. *Weinwissenschaft* 34 (3), 151-170, 1979.

Perret P und Koblet W.: Nachweis erhöhter Aethylen-Gehalte in der Bodenluft eines von der Verdichtungschlorose befallenen Rebberges. *Vitis* 20, 320-328, 1981.

Perret P und Koblet W.: Aethylenbildung durch organische Dünger als mögliche Ursache der verdichtungsinduzierten Nässechlorose. *Mitt. Klosterneuburg* 36, 5-13, 1986.



Abb. 4: Hemmung des Wurzelwachstums durch natürlich gebildetes Äthylen. Die Stecklinge wurden in perforierten Saatschalen angetrieben und später auf mit Erde gefüllte Töpfe gestellt. Links die Kontrolle, rechts die gleiche Erde mit Zugabe von frischem Mist. Bei langsamem Wachstum entwickeln sich Reben in beiden Verfahren praktisch normal. Erst wenn durch optimale Wachstumsbedingungen ein rasches Wachstum einsetzt, werden die Reben im Verfahren Mist chlorotisch.

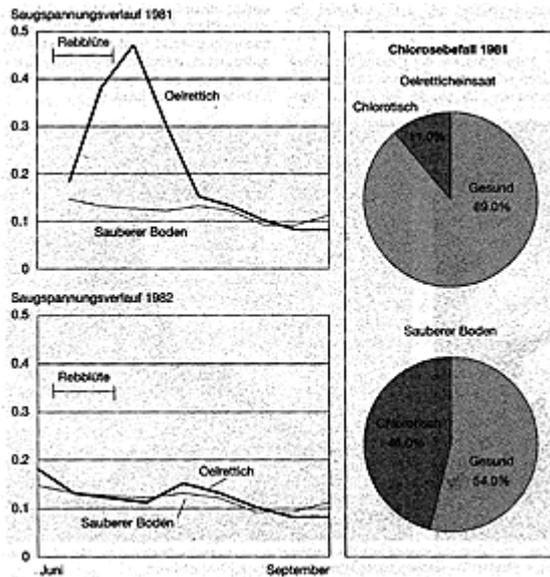


Abb. 3: Saugspannungsverlauf und Chlorosebefall bei sauberem Boden und bei Einsaat mit Ölrettich in den Jahren 1981 und -1982.



Abb. 1: Reaktion der Sorte Räuschling auf das Einarbeiten von Mist in den Unterboden. In einen durch eine Folie separierten Unter- und Oberboden werden Reben eingepflanzt. Im äusserst nährstoffarmen dichten Oberboden entwickeln sich vorerst keine Wurzeln, diese befinden sich hauptsächlich im Unterboden. Nach dem Einbringen von frischem Mist in den Unterboden wird das Wurzelwachstum im Unterboden vollständig gehemmt, innert kürzester Zeit entwickelt der Räuschling im

Das Auftreten der Chlorose wird von der Wachstumsdynamik der Rebe beeinflusst; das Auftreten der Chlorose ist besonders stark, wenn nach einer Kälteperiode wüchsiges Wetter folgt. Unter diesen Bedingungen ist der Bedarf an Eisen besonders gross, weil in kurzer Zeit sehr viel Blattgrün gebildet wird. Das Wachstum der jungen Rebwurzeln kann durch äussere und innere Bedingungen gehemmt werden. Bei der Überlastungschlorose wurden im Vorjahr zu wenig Reservestoffe eingelagert; die Neubildung junger Wurzeln im Frühjahr wird dadurch vermindert. In nassen, verdichteten Böden sind die Wachstumsbedingungen für die jungen Wurzeln besonders ungünstig. Schwermetalle sind unter diesen Bedingungen erheblich toxischer und hemmen zusätzlich das Wurzelwachstum. Mit der Begrünung kann die Chlorose kurzfristig (Einsaat von Ölrettich) oder langfristig durch die Verbesserung der Bodenstruktur vermindert werden.

Exogene Ursachen

Unter den äusseren Faktoren, die das Wurzelwachstum hemmen, spielt die Bodenverdichtung die wichtigste Rolle. Durch sie werden im Boden verschiedene Wachstumsbedingungen für die jungen Wurzelspitzen negativ beeinflusst. Die Hauptursache der Bodenverdichtungen liegt im früher praktizierten Sauberhalten des Bodens. Diese Verdichtungen wurden aber weniger durch das Befahren verursacht; hauptsächlich ist es die fehlende Durchwurzelung des Unterbodens, die zu Strukturschäden führte.

Absackungsverdichtung

Absackungsverdichtung nennt man die durch das Zusammenfallen der Krümelstruktur im Boden verursachten Strukturschäden. Die Krümelstruktur wird gebildet, wenn höhere Bodenlebewesen z.B. Regenwürmer, mit ihrer organischen Nahrung Lehmteile aufnehmen. Im Verdauungstrakt dieser Tiere entstehen dann die sogenannten Ton-Humuskomplexe. Diese sind wasserstabil, das heisst, der Ton ist darin fest eingebunden. Zwischen diesen Bodenkrümeln kann die Luft frei zirkulieren, dadurch finden Wurzeln optimale Entwicklungsbedingungen.

Verhinderung der Absackungsverdichtung:

Die Ton-Humuskomplexe sind im Boden aber einem laufenden Abbau ausgesetzt. Das System funktioniert deshalb nur, wenn ständig neue Krümel gebildet werden, es ist deshalb ein permanenter Nachschub an organischer Substanz notwendig. Im Untergrund kann der Ersatz der abgebauten organischen Substanz nur durch Wurzeln erfolgen. Der wichtigste Faktor zur Verhinderung der Bodenverdichtung ist deshalb die Begrünung, am besten mit tiefwurzelnden Pflanzen.

Einschwemmverdichtung

Die Einschwemmverdichtung oder innere Erosion entsteht, wenn der Oberboden zu oft und zu fein bearbeitet wird. Mit dem Regen werden feine Partikel in den Unterboden eingewaschen und verstopfen mit der Zeit die feinen Bodenporen. Dadurch werden einzelne Bodenzone (anaerobe Kompartimente) von der Sauerstoffzufuhr abgeschnitten. Ist in solchen

Oberboden ein rasch wachsendes Wurzelsystem. Bei weniger chloroseresistenten Sorten entwickeln sich diese Wurzeln erheblich langsamer.



Abb. 2: Magnesiummangel auf Riesling x Silvaner (links): Die Vergilbung beginnt im Interkostalraum, ein relativ breiter Streifen in der Umgebung der Blattnerven bleibt grün. Rechts: Chlorose auf Riesling x Silvaner. Die Ausbleichungen erfassen den ganzen Interkostalraum.

Chlorose durch tiefe Bodenbearbeitung im Frühjahr

Aus der Praxis wurden wir mehrmals darauf angesprochen, dass durch eine «gründliche» Bodenbearbeitung im Frühjahr oder Vorsommer die Chlorose gefördert wurde. Dies erscheint eigentlich im Widerspruch zur Erkenntnis zu liegen, dass die Chlorose durch Bodenverdichtung verursacht wird. Wir haben zwei solcher Fälle untersucht und dabei festgestellt, dass durch das tiefe Spaten viele wachsende Wurzeln abgerissen wurden. Vor allem bei durchnässtem Untergrund können sich die jungen Wurzeln hauptsächlich in den obersten, gut durchlüfteten Bodenzone entwickeln. Werden diese aber durch das Hacken zerstört, so wird die Chlorose gefördert. Hackarbeiten zur Stickstoffmineralisierung (Perret und Koblet 1989), sollten deshalb nur möglichst oberflächlich erfolgen.

Die Bekämpfung der Chlorose

Direkte Massnahmen

Die Bodenfeuchtigkeit ist einer der wichtigsten, chloroseauslösenden Faktoren, welche durch Kulturmassnahmen direkt beeinflusst werden kann. Die einzige Möglichkeit, den Wassergehalt des Bodens im Frühjahr effizient abzusenken, ist die frühzeitige Einsaat tiefwurzelnder Pflanzen (Perret und Koblet 1982). Um eine befriedigende Wirkung zu erreichen, muss der Wassergehalt des Bodens frühzeitig im Frühjahr, vor dem Auftreten der Chlorose, im Bereich der Rebwurzeln reduziert werden. In der Abbildung 3 ist der Verlauf der Saugspannung im Wurzelbereich der Reben bei sauberem Boden und unter dem tiefwurzelnden Ölrettich dargestellt. Es zeigt sich, dass mit der Einsaat von Ölrettich Ende März/Anfang April die Saugspannung im Wurzelbereich der Rebe bis zur Hauptwachstumszeit der Rebe deutlich erhöht wird. Gleichzeitig ist der Boniturwert der Chlorose dargestellt. Im Jahre 1981 zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Saugspannung im Verfahren Ölrettich, gleichzeitig wurde die Chlorose praktisch vollständig zum verschwinden gebracht. Im Folgejahr wurde der Versuch wiederholt. Alle Verfahren waren in diesem Jahre stark von der Chlorose betroffen, auch das Verfahren mit Ölrettich. Die Ursache des Misserfolges ist offensichtlich in den hohen Niederschlägen zu suchen, welche unmittelbar vor der Blüte den Boden völlig durchnässten. Der Ölrettich vermochte den Boden bis zum Zeitpunkt des Hauptwachstums nicht mehr auszutrocknen, die Saugspannung in der Ölrettichparzelle stieg in diesem Jahr nicht an.

Blattbehandlungen

Im Handel wird eine ganze Reihe von Produkten zu diesem Zweck angeboten. Beim primären Eisenmangel sind es meist «Cocktails», welche neben Eisen hauptsächlich Stickstoff sowie alle möglichen Nährstoffe enthalten. Wir haben verschiedene Produkte ausprobiert. Teilweise bewirken die Produkte ein punktförmiges Ergrünen auf den

Kompartimenten unverrottete organische Substanz vorhanden, werden durch anaerobe Mikroorganismen die Vorstufen zu Aethylen (ACC) gebildet. Diffundiert dieses ACC in aerobe Zonen, wird es wiederum durch Bakterien und Pilze in Aethylen umgewandelt.

Verhinderung der Einschwemmverdichtung:

Durch möglichst seltene und grobe Bodenbearbeitung kann diese Art der Bodenverdichtung vermieden werden, wichtig ist auch hier eine gute Versorgung des Bodens mit organischer Substanz. Dadurch wird vermieden, dass feine Lehmd und Tonteile freigesetzt werden.

Schwermetalle

In vielen Rebböden sind durch den Pflanzenschutz (Kupfer) und durch die jahrelange Verwendung schwermetallhaltiger Komposte verschiedene wurzeltoxische Schwermetalle angereichert. Die toxische Wirkung von Schwermetallen auf das Wurzelwachstum ist stark von den Randbedingungen im Boden abhängig. Die Toxizität der Schwermetalle wird durch die Bodenverdichtung gefördert. Einer der wichtigsten Faktoren der Toxizität von Schwermetallen ist das pH in der Rhizosphäre. Dieses kann vom gemessenen Boden-pH mehrere Einheiten abweichen. Es wird vor allem von der Aufnahme positiv oder negativ geladener Ionen beeinflusst. Dabei spielt die Stickstoffform eine wichtige Rolle. Wird der Stickstoff in kationischer Form als Ammonium (NH_4^+) von der Wurzel aufgenommen, sinkt das pH in der Rhizosphäre ab. Im verdichteten Boden ist die Nitrifizierung oft gehemmt, dadurch kommt es zu einem Anstieg der Ammoniumgehalte. Als Folge davon sinkt das RhizosphärenpH ab, wodurch die Schwermetalle toxischer werden. Hohe Kalzium- und Magnesiumgehalte in der Bodenlösung, sowie ein hohes Nitratangebot wirken diesem Effekt entgegen.

Weitere Faktoren

Faktoren, welche im verdichteten Boden das Wurzelspitzenwachstum zusätzlich hemmen respektive die Eisenaufnahme vermindern:

- Ein schwerer, verdichteter Boden ist meist kälter, und nasser als ein gut durchlüfteter.

- Der mechanische Eindringwiderstand für die Wurzeln dürfte ebenfalls höher sein.

Endogene Ursachen

Neben äusseren Bedingungen ist das Wurzelspitzenwachstum auch von genetischen Eigenschaften der Sorte abhängig. Die offensichtliche Resistenz des Räuschlings gegenüber der Chlorose ist möglicherweise dadurch bedingt, dass er bei ungünstigen Wachstumsbedingungen im Untergrund in den oberflächennahen Zonen sehr rasch Adventivwurzeln bilden kann, wenn im Hauptwurzelbereich ungünstige Entwicklungsbedingungen für die Wurzeln vorhanden sind. Diese Bildung von Reaktionswurzeln scheint dabei von der Unterlage ziemlich unabhängig zu sein. Diese Vermutung stützt sich auf Beobachtungen in der Praxis und einige Experimente, in denen durch eine Folie abgetrennte Untergrund durch unverrottete organische Substanz mit Aethylen begast wurde. Räuschling reagiert darauf viel

Blättern. Wir konnten jedoch bis heute nie einen Einfluss auf Ertrag oder Qualität im Herbst feststellen. Meist bessert sich die Situation bei der Verdichtungschlorose nach der Blüte von selbst. Bei Behandlungen gegen die Chlorose sollten deshalb immer einige unbehandelte Kontrollreihen (Spritzfenster) belassen werden.

Vorbeugende Massnahmen

Erhaltung der Bodenstruktur

Wichtigste Massnahme zur Vermeidung der Chlorose ist die Erhaltung einer guten Bodenstruktur, vor allem im Untergrund: Nur durch absterbende Wurzeln und Wurzelauausscheidungen der Begrünung kann die Bodenstruktur auch im Untergrund erhalten und verbessert werden. Die Strukturschäden, die wir heute in vielen Rebböden antreffen, sind vielfach während der Zeit entstanden, als der Boden mechanisch oder chemisch unkrautfrei gehalten wurde. Um die Bodenstruktur zu erhalten, genügt im Normalfall eine übliche Begrünung mit der standortspezifischen Unkrautflora. Natürlich zusammengesetzte Flora setzt sich im Normalfall aus tief- und flachwurzelnden Pflanzen zusammen. In besonders schweren und verdichteten Böden wird mit der Einsaat tiefwurzelnder Einsaaten, wie zum Beispiel Ölrettich, eine schnellere Strukturverbesserung erreicht. Mechanische Untergrundlockerungen können mit den heutigen Maschinen (z.B. Abbruchlockerung) auch in bestehenden Rebanlagen durchgeführt werden. Die Sanierungsarbeiten müssen aber bei optimalen Bedingungen erfolgen. Nicht alle Böden sind zur mechanischen Untergrundlockerung geeignet. Neben der Lockerungsbedürftigkeit muss vorher auch die Lockerungsfähigkeit abgeklärt werden (Flugschrift 115, Vorbereitung des Bodens für eine Neupflanzung). Mechanische Lockerungsmassnahmen sind nur sinnvoll, wenn unmittelbar nach der Lockerung eine Einsaat mit tiefwurzelnden Pflanzen zur Stabilisierung des Bodengefüges erfolgt. Untergrundlockerungen sowie weitere Unterbodenmeliorationsverfahren sollten aber nur bei ausgewiesenem Bedarf durchgeführt werden. Im Normalfall sollte nur die durchwurzelbare Schicht des Bodens gelockert respektive gepflügt werden. Ansonsten wird vor allem in schweren Böden das bestehende Makroporensystem zerstört. An der Grenzschicht zum gewachsenen Horizont kann auf diese Weise eine «Pflugsohle» entstehen.

Reserveeinlagerung

Ungenügende Reservestoffeinlagerung im Vorjahr verzögert die Wurzelentwicklung im Frühjahr und hemmt dadurch die Eisenaufnahme. Die Ursachen ungenügender Reservestoffeinlagerung sind vorzeitiger Blattverlust im Vorjahr wegen Frühfrost oder Pilzbefall, übermässiger Behang infolge ungenügender Blattfläche oder später Weinlese. Ein zurückhaltender Anschnitt bei obigen Voraussetzungen kann das Auftreten der Chlorose im Folgejahr vermindern.

Literatur

Marschner H. und Römheld V.: In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil root interface: effect of plant species and nitrogen source. Z. Pflanzenphysiologie 111, 241-251, 1983.

Mengel K. und Bübl W.: Verteilung von Eisen in Blättern von Weinreben mit HC0_3 -induzierter Fe Chlorose. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 146, 560-571, 1983.

Molz E.: Untersuchungen über die Chlorose der Reben. Zentralbl. Bakteriologie 1907, 1908 19, 461-480, 563-572, 715-734, 788-790, 20, 7188, 126-149.

Munsier F. und Briquet C.: Rendement et chlorose de la vigne. Rev. Suisse Vitic., Arboric., Hortic. 20, 165-172, 1988.

Perret P und Koblet W.: Nachweis erhöhter Aethylengehalte in der Bodenluft eines von der Verdichtungschlorose befallenen Rebbödes.

intensiver und schneller mit der Bildung von Adventivwurzeln als der chloroseempfindliche Riesling x Silvaner (Abb.1).

Versorgungszustand der Rebe

Die Begriffe Schwäche-, Überlastungs- oder Stresschlorose weisen darauf hin, dass der Versorgungszustand der Rebe (Reserven) beim Auftreten der Chlorose eine Rolle spielt. Ist die Reservestoffeinlagerung als Folge von Überbelastung oder frühem Blattfall im Vorjahr ungenügend, ist die Gefahr eines Chlorosebefalles grösser. Dabei scheint der Stickstoffgehalt im Boden während des Sommers und Herbstes im Vorjahr keine Rolle zu spielen; in Untersuchungen über die Optimierung des Stickstoffangebotes konnte kein Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt des Bodens im Spätsommer/Herbst und dem Auftreten der Chlorose im Folgejahr gefunden werden.

Hingegen hatte der Behang der Reben einen sehr starken Einfluss auf das Auftreten der Chlorose im Folgejahr. Chlorotisch wurden nur Verfahren mit grossem Behang. Es scheint, dass ein Mangel an Reservestoffeinlagerung (Stärke) das Auftreten der Chlorose begünstigt.

Die Schwächechlorose ist in der Westschweiz, vor allem beim Chasselas, weit verbreitet. Murisier (1988) konnte zeigen, dass die Überlastung der Rebe ebenfalls einen Einfluss auf das Wurzelwachstum hat. Im Vorjahr stark belastete Stöcke begannen mit dem Wurzelwachstum später und die jungen Wurzeln wachsen weniger schnell. Auch bei dieser Chloroseursache scheint ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Wurzelwachstum und dem Auftreten der Chlorose zu bestehen.

Aethylenbildung	Inkubiertes organisches Material	Rang	Organisches Material als Bodenabdeckung	Chloroseintensität im Felde
ppn1				
9,18	Frischkompost	1	Frischkompost	4,1
5,60	Glucose	2	Kompost teilweise abgebaut	3,2
3,04	Rebwurzeln	3	Stallmist	3,0
1,29	Rebholz	4	Grasabdeckung	2,1
0,51	Kompost teilweise abgebaut	5	Sauberer Boden	0
0,02	Torfmuld	6	Torfmuld	0,3
0,00	Kontrolle	7	Ölrettich	0,0

Chloroseintensität : Boniturschema von 0 bis 5 Punkte (Perret 1984)

Vitis 20, 320-328, 1981.

Perret P. und Koblet W.: Erfolgreiche Bekämpfung der verdichtungsinduzierten Rebenchlorose durch frühzeitige Einsaat von Ölrettich. Schweiz. Z. Obst-Weinbau 118, 46-49, 1982.

Perret P: Bodenverdichtung und Rebenchlorose. Bulletin BGS 8, 39-46, 1984.

Perret P und Koblet W.: Aethylenbildung durch organische Dünger als mögliche Ursache der verdichtungsinduzierten Nässechlorose. Mitt. Klosterneuburg 36, 5-13, 1986.