Vorträge Pflanzenzüchtung 81, 25-40, 2009

Klimawandel und Pflanzenzüchtung: Eine trans-disiziplinäre Herausforderung

Prof. Dr. Folkard Asch[1] und Dr. Annette Weidner[2]

[1] Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen und Subtropen, Fachgruppe Wasserstressmangement bei Kulturpflanzen, Garbenstr. 13, 70599 Stuttgart.

[2] Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK), Genbank, Corrensstr. 3, 06466 Gatersleben.

Agrarökosysteme werden in naher Zukunft, bedingt durch den Klimawandel, der mittlere Temperaturen ansteigen und Regenfälle variabler werden läßt, einschneidenden Veränderungen unterworfen sein. Dies gilt im besonderen Maße für tropische Systeme in Regionen, die bereits heute unter starken Schwankungen zwischen den Anbaujahren leiden. Um die Anbausysteme und insbesondere die Anbaukalender den veränderten Bedinungen anzupassen, werden entweder neue Sorten oder eine andere Artenzusammensetzung benötigt, die diese Systeme nachhaltig stabilisieren können. Dabei gilt es, das Augenmerk neben einem veränderten Schädlingsdruck auch verstärkt auf abiotische Stressresistenz zu lenken. Es wird zur Zeit allgemein davon ausgegangen, dass wir erheblich weniger Zeit haben, auf die Veränderungen zu reagieren, als noch 2001 vom IPCC angenommen wurde. Daher brauchen wir heute zügig Ansätze, die uns nachhaltige Lösungen ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind mehrere Disziplinen gefordert, zusammen an Lösungen zu arbeiten. Dies sind zum einen die Molekularbiologen, die an der genetischen Bais der Stressresistenz arbeiten, zum anderen die Pflanzenzüchter, die gewonnen Erkenntnisse in stabilen Sorten umsetzen, aber auch die Pflanzenphysiologen, die in der Lage sein müssen schnell und in großen Zahl Genotypen auf ihre Reaktionen auf Stress in Kombination mit einer ausreichend großen Zahl (klimatischer) Umwelten zu testen und schließlich Agronomen, die vielversprechendes Material sicher auf seine Ertragsstabilität in den veränderten Anbausystemen bewerten müssen. Es ist unabdingbar, dass diese Disziplinen Hand in Hand arbeiten. Im Folgenden wird an zwei ausgewählten Beispielen gezeigt, welcher Komplexität ein solcher Ansatz gegenüber steht und welche Lösungswege beschritten werden könnten. Ich möchte mich dabei auf zwei Kulturarten, nämlich Reis (*Oryza sativa*) und Gerste (*Hordeum vulgare*) beschränken und auch nur auf eine Stressform, nämlich Salzstress, näher eingehen.

Salinität ist einer der wichtigsten abiotischen Stresse überhaupt im Pflanzenreich. Ein Literatursuchlauf zeigte, dass in den letzten 60 Jahren 28200 Beiträge in internationalen Zeitschriften veröffentlicht wurden, die sich mit dem Thema beschäftigen. Etwa 5000 davon beschäftigen sich mit Salzstressauswirkungen und Salztoleranz. Von diesen wiederum bezog sich knapp ein Sechstel auf Getreide. Im Vergleich: bei Dürre waren es 16000 Beiträge, von denen sich etwa 10% mit Getreide beschäftigten. Das Ausmaß der Salzbelastung der globalen Landwirtschaft lässt sich nur mit Mühe abschätzen, da sehr unterschiedliche Zahlen kursieren. Etwa 7 % der globalen Landfläche sind salzbelastet sowie etwa der gleiche Anteil der bewirtschafteten Fläche (Munns et al., 2002). Die bewirtschaftete Fläche muss unterteilt werden in bewässerte (ca. 300 Mha weltweit - Flowers, 2004) und nicht-bewässerte Flächen. Außerdem muss zwischen inhärenter Salinität (ehemaliger Ozeanboden oder küstennaher Sickerbereich) und durch menschliche Nutzung induzierter Salinität (mit Abholzung einhergehender Anstieg salzigen Grundwassers oder Bewässerung) unterschieden werden. Obwohl durch Landnutzung induzierte Versalzung nicht immer die Hauptursache für Probleme in bewässertem Landbau darstellt (Thomas und Middleton, 1993), betrifft dieses Problem in der Hauptsache (abgesehen vielleicht von Australien) bewässerte Flächen. Bewässerte Flächen werden weltweit mit etwa 300 Mha angegeben, von denen bereits Anfang der 80er Jahre etwa die Hälfte von Versalzung und Staunässe betroffen war (Szabolcs, 1987 zitiert aus Flowers und Yeo, 1995), was ungefähr 16 % der gesamten salzbelasteten Fläche entspricht. Jährlich werden weltweit etwa 10 Mha bewässerten Ackerlandes aufgrund sekundärer Versalzung für die landwirtschaftliche Produktion aufgegeben (Flowers und Yeo, 1995).

Unterschiedliche Klimawandelszenarien gehen davon aus, dass die Klimaänderung die Salinisierung und damit auch den Salzstress für Kulturpflanzen noch verstärken wird (George and Parida, 2009). Der Klimawandel führt damit in landwirtschaftlichen Produktionssystemen zu einer Kopplung mehrerer Stresse, wie zum Beispiel Salzstress mit atmosphärischer Dürre. Relative Luftfeuchtigkeit ist eine entscheidende Determinante bei der Ausprägung von Salzstresssymptomen, weil bei weitem der größte Anteil des toxisch-wirkenden Natriums über den Transpirationstrom aufgenommen und in der Pflanze verteilt wird. Zur Beurteilung der Salzresistenz individueller Genotypen, wie sie zum Beispiel bei der Auswertung von Kartierungspopulationen notwendig ist, müssen unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden:

- Aufnahmestrategie – Includer oder Excluder
- Schadensschwelle
- Ionendiskriminierung an der Wurzel
- Kontrolle der Transpiration und Wassernutzungseffizienz
- Gewebetoleranz

- Relokation von Natrium in physiologisch weniger aktive Gewebe (Blattscheiden)
- Resistenz in Beziehung zum Entwicklungstadium

Multifaktorielle Experimente zur Evaluierung dieser unterschiedlchen Aspekte führen sehr schnell zu einer extrem hohen Anzahl an Beobachtungen, Proben und Analysen. Diese Art von Phänotypisierung mit großen Anzahlen sprengt häufig den rahmen der Mögichkeiten in Klimakammern oder Gewächshäusern und führt aus technischen Gründen sehr häufig zu einer einseitigen Fokussierung auf sehr frühe Entwicklungstadien.

Semi-aride Bedingungen sind am besten geeignet

Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht in der Nutzung „natürlicher Labore". Als solche lassen sich Regionen mit saisonal stark unterschiedlichen Klimabedingungen definieren, in denen die zu betrachtende Spezies in beiden Saisons erfolgreich angebaut werden kann. Im Falle von Reis und gerste bieten sich semi-aride Systeme der Tropen und Subtropen an. Dort sind auch Internationale Agrarforschungszentren, wie z. B. ICARDA oder WARDA, angesiedelt, die über die entsprechenden Versuchsflächen, geschultes Personal und einen großen Bestand an Tagelöhnern verfügen.

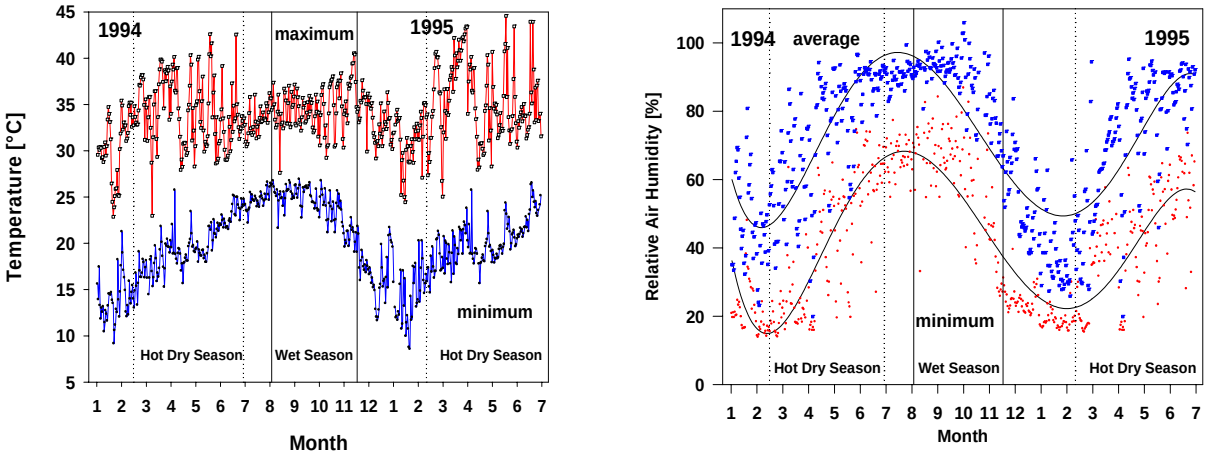

Abbildung 1: klimatische Variabilität im Jahresverlauf im Landesinneren von Senegal an der nördlichen Grenze zu Mauretanien für 1994 und 1995. Die beiden Hauptanbausaisons unterscheiden sich grundlegend in den klimatischen Bedingungen und in der Variabilitiät innerhalb der klimatischen Parameter. Während die feuchtheiße Saison (Juli bis Oktober einschließlich) relativ stabile Bedingungen aufweist, zeichnet sich die trockenheiße Saison (Februar bis Juni) durch Extrema in der Lufttemperatur und der minimalen Luftfeuchtigkeit aus.

In solchen Gebieten lassen sich eine trockene, heiße Saison (Nebensaison) und eine feuchte, heiße Saison (Hauptsaison) unterscheiden. Die feuchtheiße beginnt mit

niedrigen Nachttemperaturen (manchmal <10 °C) und Tagestemperaturen bis zu 38 °C begeleitet von sehr niedriger relativer Luftfeuchtigkeit (< 20%) und starken Schwankungen in der Sonneeinstrahlung, die durch häufige Staubstürme bedingt sind. Reis, der in dieser Saison ausgesät wird, muss in der vegetativen Phase mit diesen Klimabedingungen umgehen können und eventueller Salzstress wirkt im Wesentlichen auf das vegetative Stadium der Pflanzen ein, wodurch vor allem Biomassebildung beeinflusst und damit "source"-Eigenschaften negativ verändert werden. Am Ende der trockenheißen Saison stabilisieren sich die klimatischen Bedingungen, die relative Luftfeuchtigkeit steigt auf minimal Werte von 50-60 % an und die Temperaturenschwankungen sind weniger extrem. Dadurch verringert sich die Transpiration und somit auch die passive Salzaufnahme. In der trockenheißen Saison wird daher die reproduktive Phase der Reiskultur weniger stark durch Salzstress beeinträchtigt als die vegetative Phase, wodurch es besonders zu einer "source"-Beeinträchtigung kommt und hohe Ertragsverluste zu beobachten sind (Asch et al., 1997b).

In der feuchtheißen Saison ist es genau umgekehrt. Diese beginnt feucht und warm und aufgrund von Bewölkung mit geringerer Sonnenstrahlung. Transpirationsverluste sind gering und die Salzaufnahme mäßig. In der feuchtheißen Saison kann die "source" selbst unter Salzstress gut aufgebaut werden. Gegen Ende der Saison werden die Schwankungen in der relativen Luftfeuchtigkeit wieder stärker und die minimal Werte extremer. Dadurch kann es unter Salzstressbedingungen gegen Ende der Saison zu einem Intensitätsschub in der Salzbelastung kommen, was dann vor allem die reproduktive Phase der Reiskultur trifft und damit die "sink"-Bildung negativ beeinflusst. Dieses lässt sich an niedrigeren Tausendkorngewichten und höheren Sterilitätsraten ablesen (Dingkuhn et al., 1993; Asch et al., 1999a). Zusätzlich ist es nun so, dass in vielen Bewässerungsgebieten, die auch häufig in der Nähe größerer Flusse liegen, Salinität saisonal auftritt. Wenn also in unserem Beispiel im Senegal (Analoges gilt aber auch für den Niger, den Nil, den Euphrat, den Indus, den Sao Francisco [Heck et al., 2003], den Rio Grande [Walton et al., 1999] oder den Arkansas [Garcia und Foged, 2002]) nach der trockenen und kühlen Zwischenperiode (November bis Februar) die Felder wieder bewässert werden um die nächste Reissaison vorzubereiten, dann wird das in der Bracheperiode im Oberboden auskristallisierte Salz in der Krume gelöst. Die jungen Setzlinge werden folglich in einen bereits mehr oder weniger versalzten Oberboden umgepflanzt bzw. direkt ausgesät. Regelmäßige Be- und Entwässerung während der Saison kann einen Großteil des Salzes aus der Krume entweder entfernen oder in den Unterboden auswaschen (allerdings sind die Sickerraten in Reisfeldern meist gering d.h. < 2mm d^{-1}).

Nach der Ernte, zu der das Reisfeld für einige Zeit trockengelegt wird, wird meist zügig mit der Hauptsaison begonnen, so dass diese mit einer relativ geringen Salzbelastung beginnen kann. Gegen Ende der Hauptsaison wird zur Ernte das Reisfeld trockengelegt. Diesmal trocknet der Oberboden aus, Risse entstehen. Wenn der Grundwasserspiegel nicht zu niedrig liegt, verbinden im Lauf der Zeit diese Risse die

Krume mit dem Grundwasser, das in diesen Gegenden meist einen hohen Salzgehalt hat. Über kappilare Kräfte gelingt das Salz wieder in den Oberboden. Auf diese Weise ergeben sich in solchen Gebieten zwei wesentliche Ursachen für Salzstress bei Reis. Dies sind zum einen klimatische Bedingungen, die einen erhöhten Wasserverbrauch zur Folge haben, was eine verstärkte Aufnahme von Natrium nach sich zieht, zum anderen edaphisch-klimatische Bedingungen, die ein erhöhtes Angebot von Natrium im Boden zur Folge haben und oft auch mit einer relativen Kaliumarmut gekoppelt sind. Dieser Effekt zeigt sich deutlich wenn man die Erträge betrachtet, die unterschiedliche Reissorten mit und ohne Salzbelastung in den beiden Saisons erzielen.

Einfache Selektionskriterien – welche sind das?

Erschwerend kommt hinzu, dass sich Sorten von Saison zu Saison im Ertragspotential unterscheiden (Abbildung 2). Unter Frischwasserbedingungen schwankt das Ertragspotential von der trockenheißen zur feuchtheißen Saison in einigen Fällen bis zu 100% (Asch *et al.*, 1997b), und die Erträge sind in der Regel in der trockenheißen Saison höher. Dagegen sind die Schwankungen im Ertragspotential und die Erträge im Allgemeinen unter Salzstress in der feuchtheißen Saison größer. Genotypen reagieren allerdings auf die Kombination von Salzstress und Saisoneinfluss auf den Ertrag zum Teil sehr unterschiedlich (Abbildung 3; Asch, 1997). Teilweise lässt sich diese unterschiedliche Ertragsantwort auf die jeweils durch den Genotypen verwirklichte Resistenzstrategie zurückführen.

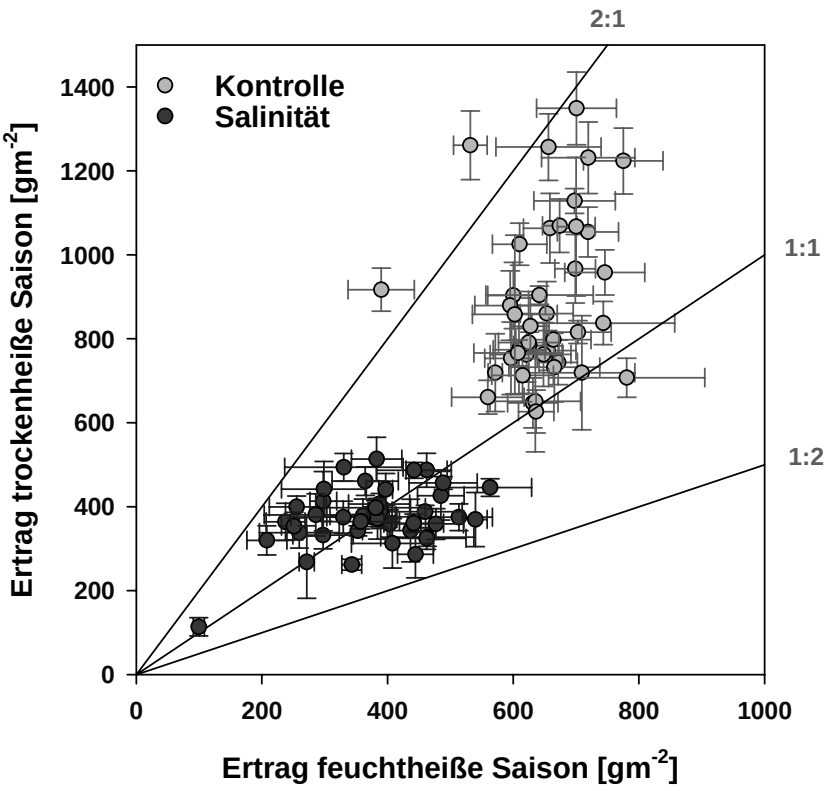

Abbildung 2 Mittlere Erträge von 41 Reisgenotypen unter Salzstress- und Kontrollbedingungen aus je vier trockenheißen und feuchtheißen Saisons (Details zum Experiment - Asch et al., 2000b)

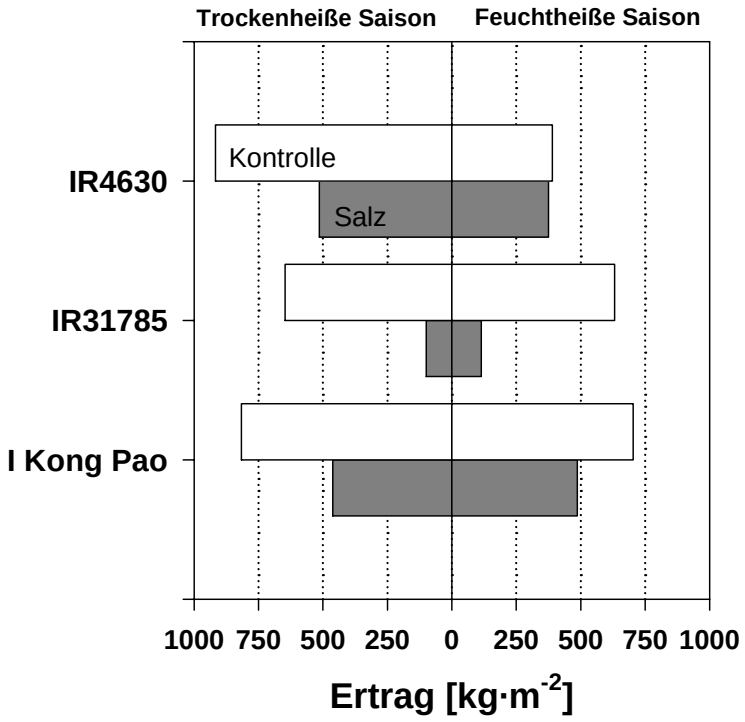

Abbildung 3 Unterschiede in der Saison- und Salzempfindlichkeit der Kornerträge, exemplarisch dargestellt für drei unterschiedlich salztolerante Reisgenotypen.

Tolerante, wassersparende Genotypen wie IR4630 haben ein niedriges Ertragspotential in der feuchtheißen Saison, aber aufgrund der geringen Natriumaufnahme in dieser Saison nur sehr geringe Ertragseinbußen durch Salzstress. In der trockenheißen Saison ist aufgrund der Umweltbedingungen und des längeren Zyklus das Ertragspotential fast doppelt so groß wie in der feuchtheißen Saison. Unter Salzstress ist der Ertrag auch höher, aber der relative Ertragsverlust ist in der trockenheißen Saison um ein Vielfaches größer als in der feuchtheißen. Das bedeutet, dass IR4630 zwar tolerant gegenüber Salz, aber gleichermaßen auch empfindlich auf das Klima reagiert. IR31785 als empfindlicher und I Kong Pao als toleranter Genotyp reagieren entsprechend dieser Einteilung auf Salzstress in beiden Saisons, sind aber auch bezüglich des Ertragpotentials in beiden Saisons ähnlich. Das liegt nicht zuletzt daran, dass beide einen relativ kurzen Zyklus haben und damit die zusätzlichen Möglichkeiten der trockenheißen Saison nicht voll nutzen können.

Dementsprechend finden sich saisonale Muster in der Aufnahme und Verteilung von Kalium und Natrium in unterschiedlichen Genotypen, die Rückschlüsse auf ihre Resistenzstrategien zulassen (Asch *et al.*, 1997b, Abbildung 4). Dieses Konzept wurde zu einem Modell weiterentwickelt, das auf der Basis der Kalium/Natriumverhältnisse der jüngsten drei Blätter auf den Kornertrag des Genotypen rückrechnen lässt (Asch, 1997), was nun in einem Werkzeug zur Selektion von ertragsstabilen Genotypen über Saisons und Salzstress hinweg eingesetzt wird (Asch *et al.*, 2000b).

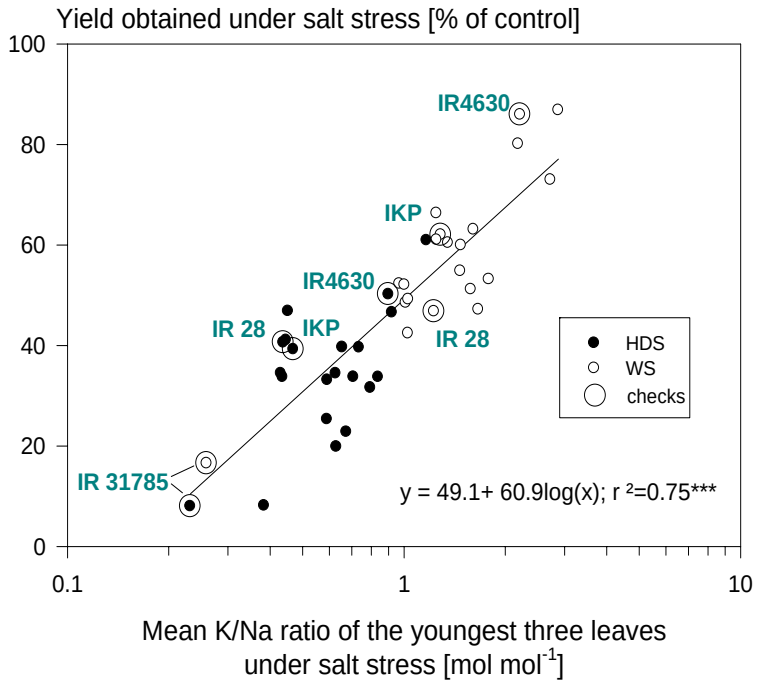

Abbildung 4 Beziehung zwischen dem K/Na Verhältnis der jüngsten drei vollentwickelten Blätter und den Ertragseinbußen aufgrund von Salzstress im Vergleich zu einer ungestressten Kontrolle und dem Entwicklungsstadium des jeweiligen Genotypus.

Komplexität durch Kopplung von Stressen

Der Ertrag ist in letzter Konsequenz eine Integration der Wachstumsgeschichte des betrachteten Individuums. Salzstress wirkt während unterschiedlicher Lebensphasen unterschiedlich stark auf die Reispflanze ein und Sorten bzw. Genotypen unterscheiden sich stark in entwicklungsphasen-abhängiger Salzempfindlichkeit. Bereits in der Keimung zeigen sich oft deutliche Sortenunterschiede. Unterschiede in der Keimungsrate sind ein geeignetes Früherkennungskriterium wenn es um die Anbaufähigkeit einer Sorte unter salinen Bedingungen geht. Da aber, wie oben ausgeführt, Salinität durchaus ein saisonales Phänomen sein kann, das unterschiedliche Entwicklungsphasen betreffen kann, würden mit einer Selektion im Keimungsstadium unter Umständen Merkmale, die erst in späteren Lebensphasen zum Ausdruck kommen, aus dem Züchtungsprogramm verschwinden, die in ihrer Kombination mit anderen wichtigen Merkmalen eventuell eine wertvolle Ergänzung darstellen könnten.

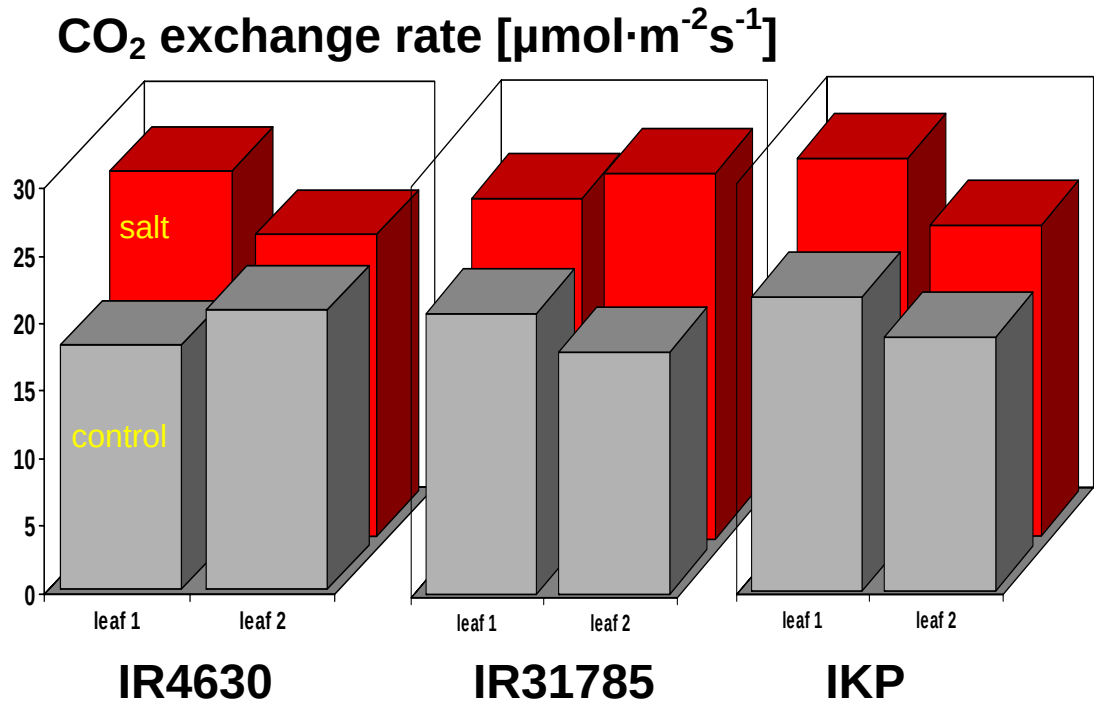

Abbildung 5 Junge Blätter bei Reis zeigen während der vegetativen Phase unter Salzstress eine gesteigerte Assimilationsrate, die die Verluste an Blattfläche aufgrund erhöhter Seneszenzraten auszugleichen Versucht. (Leaf 1 = jüngestes vollentwickeltes Blattt; leaf 2 zweitjüngestes vollentwickeltes Blatt – beide am Hauptrieb).

In der vegetativen Phase sind unter Salzstress die Assimilationsraten der jüngeren Blätter oft relativ zu Kontrollbedingungen gesteigert (Abbildung 5). Daher stellt die Assimilationsrate kein geignetes Werkzeug zur Bestimmung der Salzresistenz dar.

Ein außerordentlich wichtiges regulatives Merkmal der Salzresistenz stellt die Kontrolle der Transirationsraten dar (Yeo et al., 1985a; Yeo et al., 1985b). Diese ist genotyp-spezifisch, blattflächen- und klimaabhängig und kann durch die Salzbelastung im Wurzelraum beeinflusst werden (Dingkuhn et al., 1993; Asch, 1997; Asch et al., 1997b - Abbildung 6)

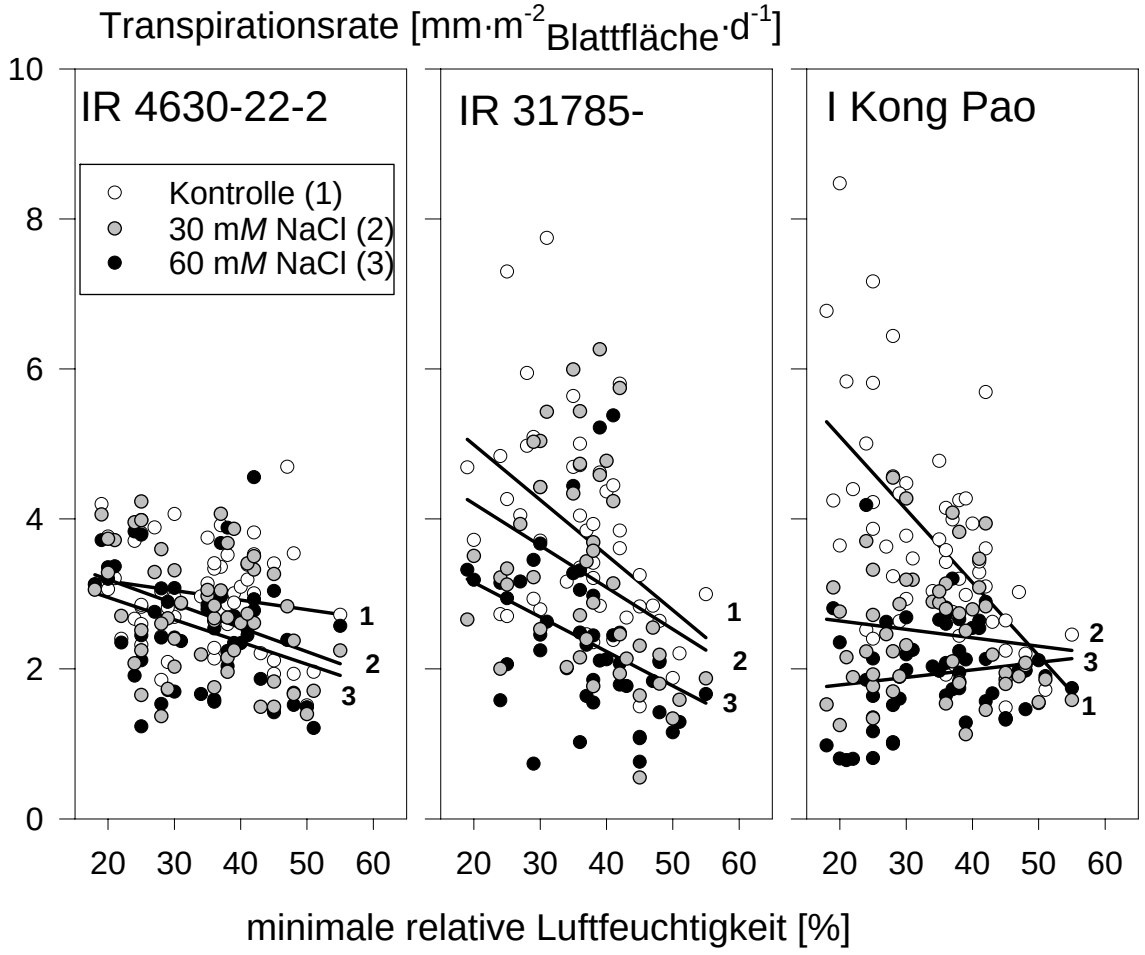

Abbildung 6 Tägliche Transpirationsraten dreier Reisgenotypen, bezogen auf die jeweils aktuelle Blattfläche für drei unterschiedliche Salzbehandlungen als Funktion der minimalen relativen Luftfeuchtigkeit der Lichtperiode. Die Transpiration wurde durch Differenzwägung bestimmt.

I Kong Pao und IR31785 reagierten unter Kontrollbedingungen bei absinkender relativer Luftfeuchtigkeit mit einem deutlichen Anstieg der Transpirationsrate, wohingegen dieser Anstieg bei IR4630 nur gering ausfiel. Unter Salzstressbedingungen verringerte sich die Transpirationsrate bei IR3178 in Abhängigkeit von der Salzkonzentration im Medium, aber stieg dennoch als Funktion absinkender relativer Luftfeuchtigkeit an. Bei I Kong Pao und IR4630 blieben die Transpirationsraten unter Salzstress auf einem konstant niedrigen Niveau und reagierten nicht auf absinkende Luftfeuchtigkeit.

Daraus ließ sich schlussfolgern, dass IR4630 generell eine Wasser sparende Strategie verfolgt, indem dieser Genotyp bei absinkender relativer Luftfeuchtigkeit den stomatären Widerstand erhöht und auf diese Weise keine übermäßigen Wasserverluste erleiden muss. Dieses Verhalten passt gut zu seinem langsamen Wachstum und seinem relativ langen Zyklus. Aufgrund der stomatären Reaktion ist eine zusätzliche Reaktion der Transpirationsrate unter Salzstress gar nicht mehr notwendig. I Kong Pao zeigt diese stomatäre Reaktion nur in Anwesenheit von Salz und IR31785 zeigt keine stomatäre Reaktion. Dieses unterschiedliche Transpirationverhalten sowohl in Bezug auf VPD als auch in Bezug auf die an der Wurzel anliegende Salzkonzentration schlägt sich in den in der Pflanze auf Blattebene wiedergefunden Salzkonzentrationen nieder (Abbildung 7).

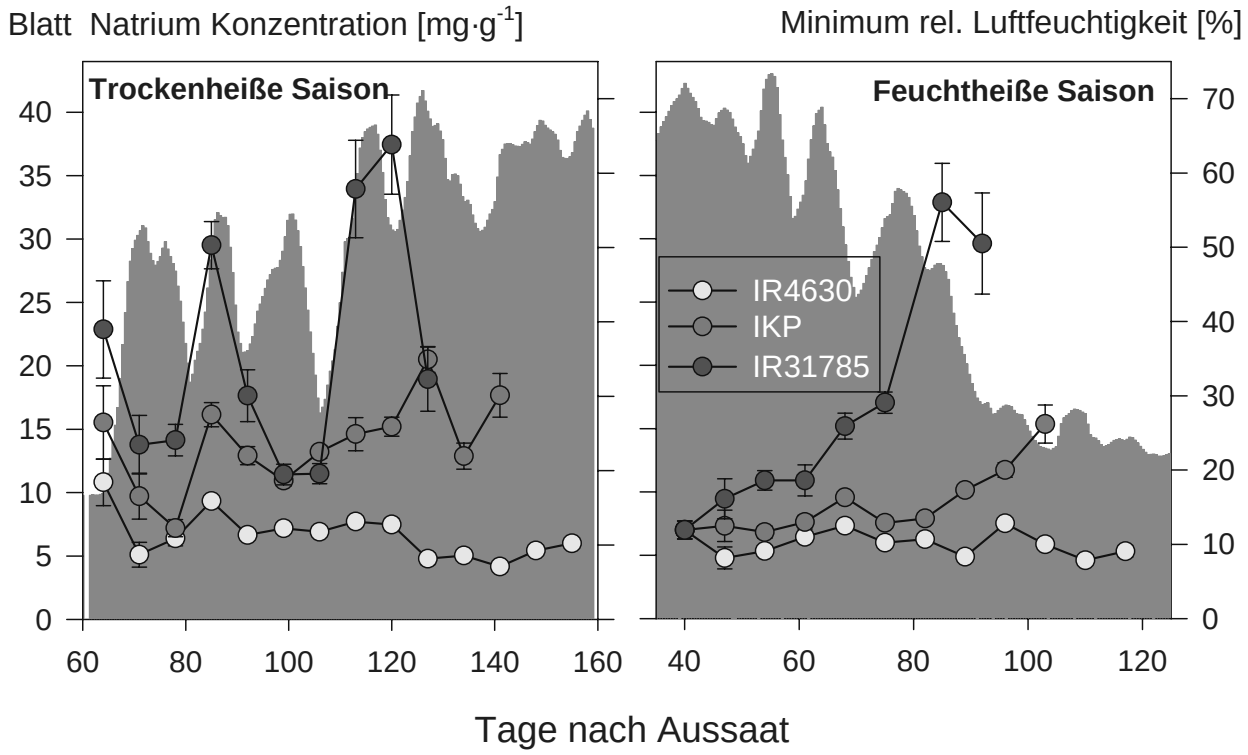

Abbildung 7 Natriumkonzentrationen der jüngsten drei Blätter von IR4630-22-2, I Kong Pao und IR31785-58-1-2-3-3 aus destruktiven Probennamen in 10 tägigen Intervallen über zwei Saisons 1994 und die minimale relative Luftfeuchtigkeit im Jahresverlauf. Adaptiert von Asch et al., 2003b.

Wurden von verschiedenen Reisgenotypen unter mildem Salzstress die jüngsten drei vollentwickelten Blätter über die Saison hinweg in regelmäßigen Abständen beprobt, zeigten Natriumkonzentrationen in diesen Blättern deutliche Unterschiede zwischen den Genotypen und den beiden Saisons (
Abbildung).

Tolerante „excluders“ hatten grundsätzlich niedrige Natriumkonzentrationen in den Blättern, „includers“ entsprechend höhere und variablere, und der empfindliche Genotyp (IR31785-58-2-3-3) zeigte starke Schwankungen von einer Probennahme zur nächsten. Da es sich bei Salzstress um einen akkumulativen Stress handelt und aufgrund der sequenziellen Beprobung immer wieder unterschiedliche Blattetagen die jüngsten drei Blätter konstituierten, kann solch eine schwankende Natriumkonzentration in den Blättern nur auf eine unterschiedliche Aufnahmegeschichte für Natrium hinweisen (Asch et al., 2003b). Wurden diese Konzentrationen mit der relativen Luftfeuchtigkeit in den zwei Wochen unmittelbar vor der Probennahme in Beziehung gesetzt zeigte sich, dass die meisten Veränderungen in der Blattnatriumkonzentration mit den Veränderungen in der relativen Luftfeuchtigkeit korrelierten (Abbildung 7). Das galt für alle Genotypen, wenn auch auf deutlich unterschiedlichem Niveau.

Lassen sich Merkmal und Gen koppeln?

Wie schon oben ausgeführt, werden in der molekularen Analyse der genetischen Grundlagen einer Stressresistenz, große Zahlen Genotypen auf ihre phenotypischen Merkmale untersucht. Dies führt dazu, dass Kompromisse zwischen der Anzahl der Testglieder und der Zeit die zur Verfügung steht gefunden werden müssen, die häufig dazu führen, dass nur besonders frühe phänologische Stadien zur Betrachtung herangezogen werden. Für Salzstress basieren viele QTL Berechnungen auf den Ergebnissen von Keimungstests (Badridze et al., 2009). Bei diesen werden die am schlechtesten gekeimten Linien als salzempfindlich und die besetn Keimer als salztolerant eingestuft. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel einer solchen Analyse für die W766 (Angora x W704/137) Kartierungpopulation (Weidner et al., 2006). Die blau markierten Linien haben auf drei unterschiedlichen Salzkonzentrationen die höchsten kumulativen Keimungsboniturwerte erhalten und die rotmarkierten die niedrigsten. Dieselben Linien wurden in einem großangelegten Feldversuch auf ihre Salzstressantworten über die ganze phänologische Entwicklung bis hin zur Reife untersucht. Auf der Basis der Ergebnisse beider Experimente wurden QTLs errechnet um Genomabschnitte zu identifizieren, die potentiell Kandidatengene für Salztoleranz bei Gerste tragen könnten. Die meisten QTLs waren für die beiden Experimente unterschiedlich. Jedoch wurde ein QTL auf den Chromosom 3H gefunden, das in beiden Entwicklungstadien hervorstach. Genauere Analysen der potentiellen Funktion der Gene, die in diesem Abschnitt liegen, zeigte, dass höchstwahrscheinlich keine physiologischen Reaktionen auf Salzstress hinter diesem QTL zu vermuten sind, sondern eher die Fähigkeit der Pflanzen zur Mobilisierung gespeicheter Kohlehydrate hier eine Rolle spielt. (Weidner et al., 2007).

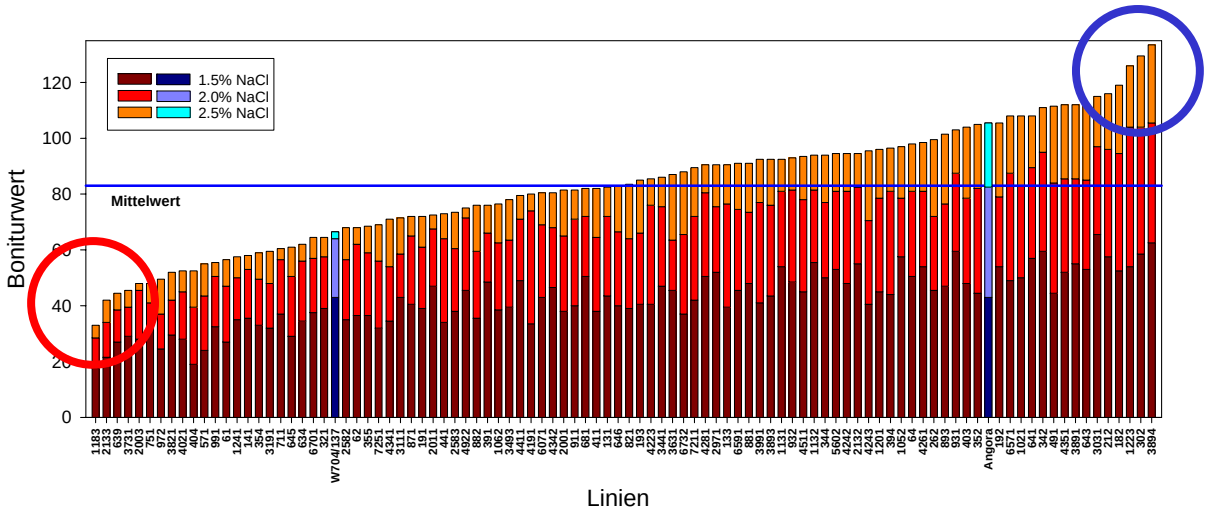

Abbildung 8 Kumulativer Boniturwert aus einem Keimungsversucht für 108 Linien einer DH Kartierungspopulation die auf Nährlösungen mit 1,5%, 2% und 2.5% NaCl gezogen wurden. Blaue Balken zeigen die Eltern. Der rote und der blaue Kreis weisen auf die 5 besten und die 5 schlechtesten Keimer hin.

Im Feld ausgesät und mit 2 unterschiedlichen Salzbehandlungen aufgezogen (Dadshani, 2006), wurden diese 108 Linien auf Ertrag, Kalium- und Natriumgehalte in der Biomasse und andere agronomisch-physiologische Merkmale untersucht. Diese Ergebnisse wurden in einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) verabeitet (Abbildung 9). Auf der Basis der PCA ließen sich die Genotypen in empfindliche, resistente und tolerante Genotypen aufteilen und nach der Strategie, nämlich Includer bzw. Excluder, unterscheiden. Dabei stellte sich heraus, dass die meisten der Linien die in Abbildung 8 mit einem blauen Kreis gekennzeichnet sind sich unter den toleranten Includer einreihten, wohingegen die, die in der Abbildung 8 mit einem roten Kreis gekennzeichnet sind, sich hauptsächlich in der Gruppe der resistenten Excluder wiederfanden (Abbildung 9). Es zeigte sich , das in Bezug auf den Ertrag diese beiden Gruppen sich in nichts nachstanden und daher die Frage nach der Sinnhaftigkeit solcher Keimungsversuche für die Auswahl von Resistenzmerkmalen gestellt werden muss.

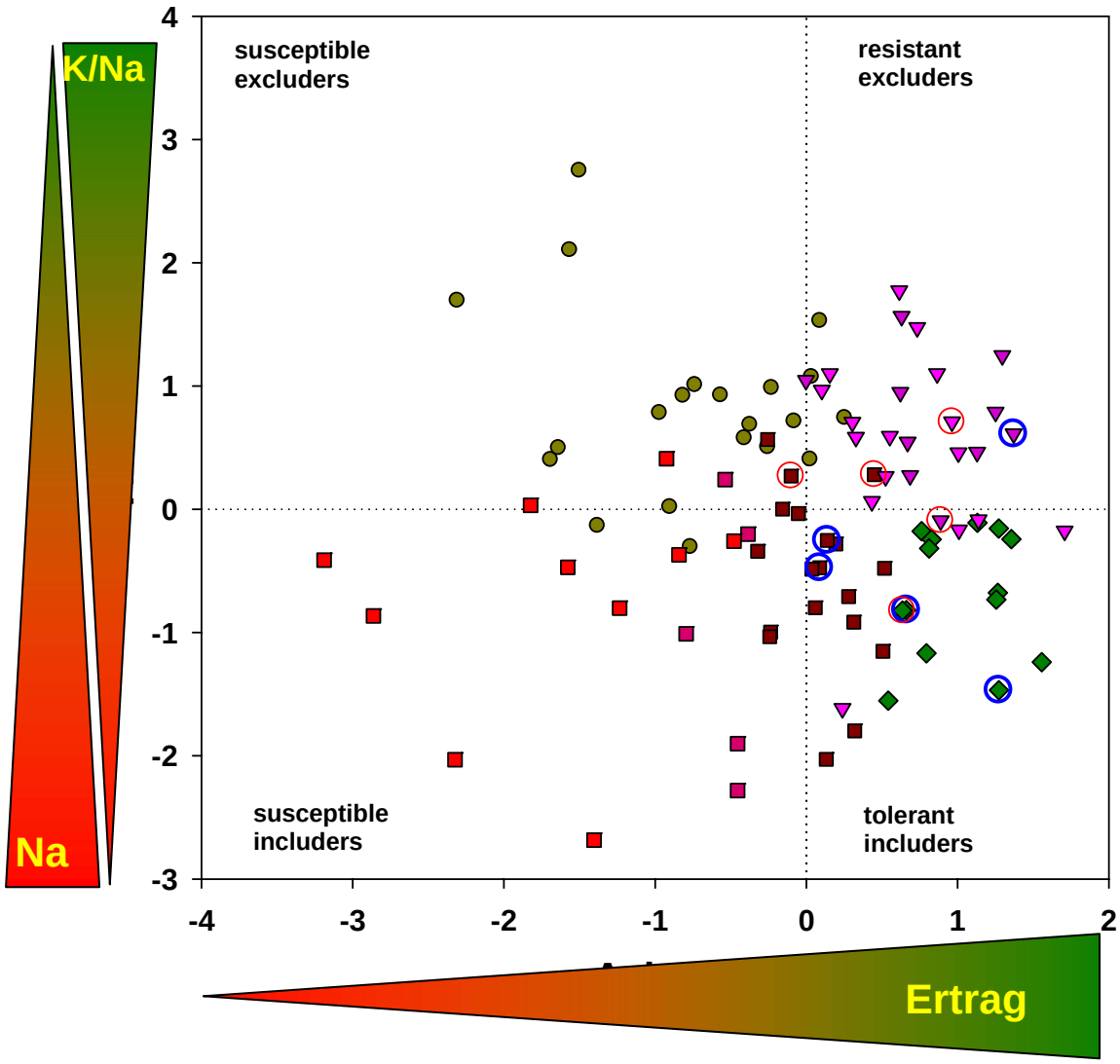

Abbildung 9 Hauptkomponentenanalyse für 108 Linien der W766 Kartierungspopulation für Ergebnisse aus einem Feldversuch mit zwei unterschiedlichen Salzbehandlungen. Die Symbole unterscheiden die vier grundlegenden pflanzlichen Strategien im Umgang mit Salzstress basierend auf einer Analyse der Salztoleranz vor der statistischen Auswertung durch die PCA.

Zusammengefasst gefolgert...

- Reaktionen auf Salzstress werden durch klimatische Effekte moduliert
- Direkte, früh messbare Kriterien für Salztoleranz bei Reis gibt es nicht
- Indirekte integrative Parameter (z.B. K/Na) erlauben es den Salzeffekt abzuschätzen
- Die zugrunde liegenden Mechanismen sind nicht bekannt
- Untersuchungen zur genetischen Basis der Salztoleranz können helfen solche Mechanismen aufzuklären

- Züchter, Physiologen und Molekularbiologen brauchen Modelle um die extreme Vielfalt und Variabilität schneller auswerten zu können – „functional genomics“
- QTL Bestimmungen für die Auswirkungen gekoppelter Stresse sind notwendig
- Marker gestützte Analyse von Anpassungsmechnismen könnte Züchtern und Physiologen viel Zeit sparen

Literatur

Asch F. 1997. Physiologische Faktoren der Salzresistenz bei Reis (*Oryza sativa* L.). Dissertation (Ph.D. thesis). University of Hamburg, Hamburg.

Asch F, Dahal KP, Das US. 2003b. Is the transpiration history of leaves indicative for the salt load of individual leaves? In Wollny C, Deininger A, Bhandari N, Maass B, Maning W, Muuss U, Brodeck F, Howe I, eds, *International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development: Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development*, Vol Book of Abstracts. klartext GmbH, Göttingen, p 124.

Asch F, Dingkuhn M, Dörffling K. 1997b. Physiological stresses of irrigated rice caused by soil salinity in the Sahel. In *Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development*. West Africa Rice Development Association, Dakar, pp 247-273.

Asch F, Dingkuhn M, Dörffling K, Miezan KM. 2000b. Leaf K/Na ratio predicts salinity induced yield loss in irrigated rice. *Euphytica* 113, 109-118.

Asch F, Dingkuhn M, Wittstock C, Dörffling K. 1999a. Sodium and potassium uptake of rice panicles as affected by salinity and season in relation to yield and yield components. *Plant and Soil* 207, 133-145.

Badridze G., Weidner A., Asch F., Börner A. 2009. Variation in salt tolerance within a Georgian wheat germplasm collection. *Genetic Resources and Crop Evolution*, In press.

Dadshani S. 2006. "Untersuchungen zur genotypischen Salzresistenz von Gerste in semi-ariden Gebieten“. Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diplomarbeit. Pp 74.

Dingkuhn M, Asch F, Miezan KM. 1993. Salt tolerance of rice varieties under irrigated conditions in the Sahel. In *Annual Report 1992*. West Africa Rice Development Association, Bouake, 01, BP 2551, Ivory Coast, pp 3-11.

Flowers TJ. 2004. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany* 55, 307-319.

Flowers TJ, Yeo AR. 1995. Breeding for Salinity Resistance in Crop Plants: Where Next? *Aust. J. Plant Physiol.* 22, 875-884.

Garcia LA, Foged N. 2002. Field Scale Monitoring and Modeling of Salinity and Waterlogging in the Lower Arkansas River Basin of Colorado. In *Central Plains Irrigation Short Course and Exposition*, Lamar, CO

George S, Parida A. 2008. Impact of climate-change-enhanced salinity stress on rice and maintaining productivity in the future. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3, pp 13.

Heck RJ, Tiessen H, Salcedo IH, Santos MC. 2003. Soil chemical changes under irrigated mango production in the Central Sao Francisco River Valley, Brazil. *Journal of Environmental Quality* 32, 1414-1421.

Munns R, Husain S, Rivelli AR, James RA, Condon AG, Lindsay MP, Lagudah ES, Schachtmann DP, Hare RA. 2002. Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. *Plant and Soil* 247, 93-105.

Szabolcs I. 1987. The global problems of salt-affected soils. *Acta Agronomica Hungarica* 36, 159-172.

Thomas DSG, Middleton NJ. 1993. Salinization: new perspectives on a major desertification issue. *Journal of Arid Environments* 24, 95-105.

Walton J, Ohlmacher GC, Utz D, Kutianawala M. 1999. Response of the Rio Grande and shallow ground water in the Mesilla Bolson to irrigation, climate stress, and pumping. *Environmental and Engineering Geoscience* 5, 41-50.

Weidner A, Asch F, Buck-Sorlin GH, Dadshani S, Börner A. 2006. "Improving Salt Tolerance: A worldwide challenge for plant nutrition and breeding". Annual Meeting of the German Society for Plant Nutrition: "Plant Nutrition meets Plant Breeding", 26.-28.10.2006, Hohenheim

Weidner A, Asch F, Buck-Sorlin GH, Börner A. 2007. QTLs for salt resistance vary with development stage in field grown barley. In: Thielkes, E. (Ed.) Tropentag 2007 - Utilisation of diversity in land use systems: Sustainable and organic approaches to meet human needs, Book of Abstracts, p. 449. Cuvillier Verlag Göttingen.

Yeo AR, Caporn SJM, Flowers TJ. 1985a. The Effect of salinity upon photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.): Gas exchange by individual leaves in relation to their salt content. *Journal of Experimental Botany* 36, 1240-1248.

Yeo AR, Yeo ME, Caporn SJM, Lachno DR, Flowers TJ. 1985b. The use of 14C-ethane diol as a quantitative tracer for the transpirational volume flow of water and an investigation of the effects of salinity upon transpiration, net sodium accumulation and endogenous ABA in individual leaves of *Oryza sativa* L. *Journal of Experimental Botany* 36, 1099-1109.