Diss. ETH No. 10862

MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF TROPICAL MAIZE (*ZEA MAYS* L.) TO PRE-ANTHESIS DROUGHT

Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

BERNHARD NEIDHART

Dipl. Ing. Agr. ETH Zurich (Switzerland)
born October 7, 1963
in Ramsen (SH)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Stamp, examiner
Dr. A. Riggenbach, co-examiner
Dr. U. Schmidhalter, co-examiner

Zurich, 1994

SUMMARY

Drought is a major cause of variation in the grain yield of maize (*Zea mays* L.) which is grown in tropical and subtropical lowland areas. Drought can also occur in temperate climatic zones; its occurrence and its intensity are unpredictable. Selection of cultivars with improved drought tolerance may be the only affordable option to many farmers, especially in regions where possibilities for irrigation (water and/or financial resources) do not exist. Selection for grain yield under severe drought stress has often been considered inefficient, because the estimate of heritability of grain yield has been observed to decline as yield falls. Under these conditions, other traits may increase selection efficiency provided they can adapt to drought, are easily heritable, are easy to measure, and become manifest during the vegetative stages. Such secondary traits have been evaluated in this study for their relevance to drought adaptation during repeated periods of drought from emergence to flowering. Determining the relevance of these traits is expected to provide information about ***drought-sensitive stages*** and, furthermore, to reveal useful ***traits for a selection program***.

Experiments were conducted in Thailand during the dry season in 1989/90, 1991/92, and 1992/93. Nine different water regimes, which included different intervals of drought stress during the vegetative stages, were based on furrow irrigation. Weekly irrigation was applied in the control treatment (T1) to avoid stress conditions. This and a second main treatment (T2), in which water was supplied only every four weeks until flowering, were repeated in all three years. Soil water contents were measured by Time Domain Reflectometry (TDR). The three cultivars (Suwan1, Suwan3, KTX2602) are locally adapted varieties which

are still being used by farmers. Fertilization and cultural practices such as weed and insect control were carried out according to local standards.

The grain yield of KTX2602 did not decrease (14%) as strongly as that of Suwan1 (27%) under drought conditions (T2). Contrary to Suwan1 and Suwan3, reduction in the grain yield of KTX2602 was based exclusively on a decrease in the number of kernels per plant (14%) and not on a decrease in the 1000-kernel-weight TKW (0%). The TKW of Suwan1 was reduced by 13% and that of Suwan3 by 6%. Stover yield of Suwan1 was affected to the same extent as grain yield and hence the harvest index HI (38%) did not change under T2. The stover yield of KTX2602, however, showed a much greater reduction (29%) than did grain yield and HI. As a result, the latter increased by 4% to 44%. This increase in HI was due only to the drought-insensitive TKW which is concluded to be a reliable parameter for drought selection in tropical germplasms. Other traits at the final harvest, such as the total length of the cob, the length of the kernel-covered surface of the cob, and the perimeter of the cob, did not reveal any effects of treatment or variety apart from a weak, significant effect of treatment on the perimeter of the cob. All three traits were reduced by only 5%.

Stem elongation demonstrated the ability of KTX2602 to make a recovery of about 10% in spite of the second stress period, whereas the other varieties remained at the level attained at the end of the first stress period. The longer stem improved its function as a source of carbohydrates for the later period of grain-filling and hence the development of the kernels (=TKW). The same function is attributed to the appearance of leaves which showed a similar varietal development as did stem elongation. The leaves of KTX2602 appeared faster and earlier than those of Suwan1 and Suwan3. KTX2602 had only one less leaf under T2 than under T1 at flowering. The other varieties had two fewer leaves under T2 as compared to T1. Although the leaves of KTX2602 dried out slightly faster, and the number of green, fully emerged leaves did not show any

differences to Suwan1 and Suwan3 during early stages of growth, KTX2602 finally had one more leaf available for photosynthesis because of its better ability to recover. The dry matter accumulation in the shoot behaved similarly to the number of green, fully emerged leaves throughout the vegetative period. KTX2602 was less affected (10%) at flowering than Suwan1 and Suwan3. A similar ability to recover was also observed for the visible leaf area of KTX2602. This variety had a larger leaf surface by about 30% under sufficient water supply and by about 15% under T2 until the sixth week after emergence. No varietal differences were found by flowering. Other measured morphological traits such as width, length, and area of single leaves were not sufficiently discriminatory for breeding purposes but are considered to be reliable indicators of drought stress because of their comparably short-term responses. The effect of drought disappeared one week after each irrigation. During other periods, these traits were reduced by about 25% to 35%. The parameters of growth analysis, such as net assimilation rate (NAR), leaf area ratio (LAR), and relative growth rate (RGR), were hardly affected by variety. The effect in T2 became obvious only at the end of the first drought period when NAR was reduced by about 3 g of shoot dry matter per unit leaf area (cm^2) and day, and RGR was reduced by about 0.04 g per unit total shoot dry weight (g) and day. LAR did not show differences due to variety or treatment. NAR of KTX2602 which was calculated on the basis of shoot dry matter showed a slightly greater reduction, and recovered more rapidly after irrigation than for Suwan1 and Suwan3. This supports the hypothesis that, during the first drought period, KTX2602 showed a higher priority in the distribution of assimilates to the roots than did the other varieties.

In 1992/93 a small field experiment revealed that measurements of leaf water relation could also be made from 12.00 to 14.00 h without a significant effect of climatic factors. The components of leaf water status, i.e., water

potential, pressure potential (turgor), and osmotic potential, were measured before dawn (1991/92, 1992/93) and during the early afternoon (only in 1992/93) and did not show any significant differences among the three varieties. During the early afternoon the climatic conditions masked the effect of treatment on leaf water potential to a great extent. Then, the water potential tended to be at –1.2 MPa, 0.2 MPa lower than under T1 (-1.0 MPa). Pre-dawn values of all three components differed so that no comparison could be made between treatments in both years except for the similar reactions of the cultivars under T1 and T2 during the second drought period. This may indicate an increasing tolerance with age.

The dynamics of water content were expressed as water deficit which is the cumulative lack of water and calculated as the difference between the volumetric soil water content and the value measured one day after the second irrigation during the ninth week after emergence. Volumetric soil water contents obtained at a depth of 30 cm were better correlated with plant traits than those at 60 cm. If water balance is not required, then values at a depth of 30 cm are sufficiently representative of the dynamics of water availability.

The tasseling and silking dates were delayed by 2.4 and 3.5 days for KTX2602, by 4.2 and 5.3 days Suwan1, and by 4.0 and 5.7 days for Suwan3. The anthesis-silking-interval (ASI) was only slightly affected due to the irrigation just before flowering. Days to tasseling and silking were well correlated with grain yield and varied from -0.35 to -0.82, depending on variety and year. These parameters showed two peaks of high correlation coefficients (r=0.5 to 0.7) during the third and eighth weeks after emergence, when correlated with the above mentioned water deficit accumulated during each week of the vegetative stage. These peaks coincided with supposedly critical phases in the ontogeny of tassel (at about the third week after emergence) and development of silk (at about the seventh to eighth week after emergence). This coinci-

dence indicates different levels of drought sensitivity during the vegetative stages, a fact which may be important for farmers to economize on water and for researchers to improve models for growth and yield.

The linear curves of the three varieties obtained by the regression of grain yield on water input (rainfall and irrigation) are characterized by high coefficients of determination (r^2=0.56 to r^2=0.84). The slopes represent somehow the drought tolerance of each variety. According to these slopes grain yield per plant was reduced by 13 g for Suwan1, by 11 g for Suwan3 and by only 9 g for KTX2602 per 100 mm water shortage. This general indicator supports the observation that KTX2602 is less sensitive to drought than are Suwan1 and Suwan3.

ZUSAMMENFASSUNG

Ertragsausfälle bei Mais (*Zea mays* L.) im tropischen und subtropischen Tiefland gründen vorwiegend auf einer ungenügenden Wasserverfügbarkeit. Auch in gemässigten Klimazonen können Dürreperioden unerwartet und in unterschiedlichen Intensitäten auftreten. Da vielfach gerade in Trockengebieten die nötigen finanziellen Mittel und damit die entsprechenden Bewässerungsmöglichkeiten fehlen, ist die Züchtung von trockenheitstoleranten Sorten wohl der einzig gangbare Weg. Die traditionelle Ertragsmaximierung bei Trockenheit scheint wenig effizient, da ihre Heritabilität mit zunehmender Ertragseinbusse sinkt. Deshalb sind Pflanzenmerkmale gesucht, die nicht nur Dürretoleranz anzeigen, sondern zusätzlich gut vererbbar und messbar sind und während frühen Wachstumsstadien zur Ausprägung kommen. Solche phänotypische Merkmale wurden auf ihre ***Relevanz für die Züchtung*** von dürretoleranten Sorten geprüft. Sie sollten auch Hinweise auf speziell ***trockenheitssensible Entwicklungsstadien*** der Pflanze geben.

Während der niederschlagsfreien Zeit der Jahre 1989/90, 1991/92 und 1992/93 wurden in Thailand Feldversuche mit drei lokalen Maissorten (Suwan1, Suwan3 und KTX2602) angelegt. Das Kontrollverfahren (T1) wurde wöchentlich bewässert, um jeglichen Stress vermeiden zu können. Ein zweites, über alle Jahre hinweg wiederholtes Verfahren (T2) wurde einem vierwöchigen Bewässerungsrhythmus unterzogen, wobei Wassermangel nur bis zur Blüte induziert wurde. Sieben weitere Behandlungsarten, die jeweils nur in einem Jahr durchgeführt wurden, ergänzten das Versuchsprogramm. Bodenwassergehalte wurden mittels Time Domain Reflectometry (TDR) erhoben und dienten der Quantifizierung der Stressintensität. Bodenbearbeitung, Düngung, Unkraut- und

Insektenbekämpfung wurden den lokalen Gepflogenheiten entsprechend durchgeführt.

Das Stressverfahren T2 beeinträchtigte den Kornertrag der Sorte KTX2602 um 14%, wobei die Ertragseinbusse ausschliesslich auf die Reduktion der Kornzahl pro Pflanze (14%) zurückzuführen ist. Bei den Sorten Suwan1 und Suwan3 entstanden die Ertragsminderungen (27% resp. 17%) aus Reduktion sowohl der Kornzahl als auch des Tausendkorngewichtes TKG (13% resp. 6%). KTX2602 wurde als einzige Sorte weniger im Korn- als im Strohertrag beeinträchtigt, womit der Ernteindex um 4% auf 44% anstieg. Da ein solcher Anstieg als Möglichkeit zur Ertragssteigerung bei tropischen Sorten angesehen wird, ist TKG ein valabler Selektionsparameter für Trockenheitstoleranz. Weitere Eigenschaften des Kolbens, wie Gesamtlänge, Länge der kornbesetzten Fläche und Umfang ergaben kaum Unterschiede, weder zwischen den Sorten noch zwischen den Behandlungen. Ihre Schwankungen lagen maximal bei 5%.

Trotz einer zweiten Stressphase war KTX2602 in der Lage, das Stengelwachstum in der Behandlung T2 zu beschleunigen und den Rückstand der ersten Dürreperiode gegenüber T1 um 10% zu reduzieren. Suwan1 und Suwan3 hingegen wiesen kein kompensatorisches Wachstum auf. Diese Kompensationsfähigkeit von KTX2602 mag vorteilhaft für die Assimilatspeicherung und somit auch für die Kornfüllung sein. Das stresstolerante TKG darf als Hinweis dafür gelten. Aehnliches gilt auch für die Blatterscheinungsrate, die kurz nach Auflauf vergleichsweise zu den anderen Sorten bei KTX2602 am höchsten war. T2 verminderte die bei der Blüte erhobene Blattzahl von KTX2602 um nur ein, bei Suwan1 und Suwan3 aber um zwei Blätter. Obwohl die Absterberate bei KTX2602 leicht erhöht war, wies diese Sorte während frühen Stadien nicht weniger grüne, vollentwickelte Blätter aus. Bei der Blüte hatte diese Sorte aber ein Blatt mehr für die Photosynthese zur Verfügung. Die Zunahme der Trockenmasse ergab einen den oben erwähnten Blattmerkmalen ähnlichen

Verlauf und resultierte in einer 10% geringeren Einbusse unter Stressbedingungen (T2). Die sichtbare Blattfläche von KTX2602 war in T1 bis zur sechsten Woche nach Auflauf um 30% höher als bei Suwan1 and Suwan3. Doch zur Blütezeit war kein sortentypischer Unterschied mehr feststellbar. Blattbreite, -länge und Einzelblattfläche unterschieden zu wenig nach Sorten, um als Parameter in ein Züchtungsprogramm aufgenommen zu werden. Dank rascher Anpassung der neuentwickelten Blättern an die sich verändernde Wasserverfügbarkeit, wie zum Beispiel nach Beendigung einer Trockenperiode (keine signifikante Einbusse), können diese Blattmerkmale als gute Stressindikatoren gelten. Während grösseren Stressintensitäten wurden sie um 25% bis 35% reduziert. Nettoassimilationsrate (NAR), Blattflächenverhältnis (LAR) und relative Wachstumsrate (RGR) bildeten kaum sortentypische Unterschiede aus. Auch T2 beeinträchtigte NAR um 3 g Sprosstrockenmasse pro Blattfläche [cm^2] und Tag und RGR um 0.04 g Trockensubstanz pro Sprosstrockenmasse [g] und Tag nur am Ende der ersten Dürreperiode. NAR von KTX2602 wurde anfangs leicht schneller verringert, erholte sich aber nach der Bewässerung vergleichsweise besser als bei Suwan1 resp. Suwan3. Dies stützt die Hypothese, dass KTX2602 eine höhere Priorität der Wurzel bei der Assimilatzuteilung als die anderen zwei Sorten aufweist, zumal sich NAR nur auf Sprossmasse bezieht. Dies wurde auch durch die Tatsache erhärtet, dass unter Stress nur KTX2602 die gleiche Anzahl Kronenwurzeln wie unter Kontrollbedingungen ausbilden konnte.

Obwohl die Parameter des Blattwasserhaushaltes stark von den täglichen Wetterbedingungen abhängen, erwies sich die Zeitspanne von 1200 bis 1400 Uhr als geeignet, um reproduzierbare Messungen durchzuführen. Blattwasser-, Turgorpotential und osmotisches Potential zeitigten weder bei Messungen in der Morgendämmerung (0200 bis 0500 Uhr), 1991/92 und 1992/93, noch bei Mittagsmessungen (1200 bis 1400), 1992/93, sortentypische Unterschiede. Obwohl die Werte der Mittagsmessungen weitgehendst durch Klimafaktoren

überdeckt wurden, wiesen die gestressten Pflanzen ein um 0,2 MPa tieferes Wasserpotential auf. Messungen in der Morgendämmerung divergierten so stark von Jahr zu Jahr, dass keine Vergleiche möglich waren. Einzig das ähnliche Verhalten während der zweiten Hälfte der vegetativen Phase, sowohl in T1 als auch in T2, ergab eine Bestätigung der schon erwähnten Alterstoleranz.

Die Dynamik des Bodenwassergehaltes wurde als Veränderung des Wasserdefizits dargestellt. Dieses wurde als Differenz vom Standardwert, der für jede Sonde bei voller Feldkapazität (ein Tag nach der Bewässerung) ermittelt wurde, zu den wöchentlich zweimal gemessenen Werten berechnet. Volumetrische Wassergehalte, gemessen in 30 cm Tiefe, waren höher korreliert mit Pflanzenmerkmalen als solche, die in 60 cm Tiefe gemessen wurden. Sie scheinen auch genügend repräsentativ für die Wasserdynamik im Boden zu sein, sofern keine eigentlichen Wasserbilanzen erforderlich sind.

Der Zeitpunkt der Rispenblüte und des Scheidenschiebens wurde bei KTX2602 (2,4 resp. 3,5 Tage) nur halb so stark verzögert wie bei Suwan1 (4,2 resp. 5.3 Tage) oder Suwan3 (4,0 resp. 5,7 Tage). Die Protandrie aller Sorten wurde durch T2 nur schwach verlängert, da kurz vor der Blüte wieder bewässert wurde. Die Zeitspanne von Auflauf bis Rispenblüte bzw. Seidenschieben zeitigte signifikante Korrelationswerte mit dem Kornertrag von r=-0,5 bis -0,82, je nach Sorte und Jahr. Werden diese Blühparameter mit den erwähnten Wasserdefiziten, die wöchentlich aufsummiert wurden, korreliert, so ergeben sich während der ganzen vegetativen Phase zwei deutliche Spitzen mit Korrelationswerten von r=0,5 bis r=0,7. Diese Spitzen decken sich zeitlich mit den ontogenetisch kritischen Phasen der Rispenentwicklung (drei Wochen nach Auflauf) und der Fruchtknoten- und Seidenanlage (sieben bis acht Wochen nach Auflauf). Diese Koinzidenz deutet auf unterschiedliche Sensitivität einzelner vegetativer Phasen gegenüber Trockenheit hin, was eine ökonomische Bewässerungsplanung erlaubt und Wachstumsmodelle verfeinern hilft.

Die linearen Zunahmen des Kornertrages bzw. der Sprosstrockenmasse bei steigender Wasserverfügbarkeit (= Bewässerung + Niederschlag) zeichnen sich durch hohe Bestimmtheitsmasse (r^2=0,56 bis r^2=0,84) aus. Die Steigungen dieser Geraden widerspiegeln in etwa die Dürretoleranz der einzelnen Sorten. Bei einer Verringerung des Wasserangebotes um 100 mm wird der Kornertrag bei Suwan1 um 13 g, bei Suwan3 um 11 g und bei KTX2602 um 9 g pro Einzelpflanze reduziert. Dieses grobe Ertragsmodell bekräftigt die beobachtete und gegenüber den anderen zwei Sorten erhöhte Dürretoleranz von KTX2602.

สรุป

การขาดน้ำ เป็นสาเหตุสำคัญของความไม่คงที่ของการให้ผลผลิตของข้าวโพด (Zea mays L.) ที่ปลูกตามที่ราบต่ำ(lowland) ของเขตร้อน(tropical area) และเขตกึ่งร้อน(subtropical area) สำหรับในเขตภูมิอากาศแบบอบอุ่น(temperate climate zones) การขาดน้ำสามารถเกิดขึ้นได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และความรุนแรงของการขาดน้ำไม่สามารถคาดคะเนได้ การคัดเลือกพันธุ์ที่ทนต่อการขาดน้ำ อาจจะเป็นทางออกเพียงทางเดียวสำหรับเกษตรกรส่วนใหญ่ โดยเฉพาะเกษตรกรในบริเวณที่ไม่สามารถให้น้ำชลประทาน การคัดเลือกพันธุ์ภายใต้สภาพการขาดน้ำที่รุนแรง โดยวัดจากการให้ผลผลิตเมล็ด(grain yield) เป็นวิธีการที่ใช้ไม่ได้ผล เนื่องจากความแม่นยำในการคำนวณหาค่าการถ่ายทอดการให้ผลผลิตผ่านทางพันธุกรรมจะลดลง เมื่อผลผลิตลดลงภายใต้สภาพเหล่านี้ ลักษณะอื่น ๆของต้นข้าวโพด อาจจะเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดเลือก ถ้าลักษณะเหล่านั้นสามารถปรับตัวได้ในสภาพการขาดน้ำ และเป็นลักษณะที่ถ่ายทอดมาสู่ลูกหลานด้วย และเป็นลักษณะที่วัดได้ง่ายและเป็นลักษณะที่แสดงออกในช่วงการเจริญเติบโตทางต้น(vegetative stages) ในการศึกษานี้ ได้ทำการวัดลักษณะรอง ๆ เหล่านั้นว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสามารถในการปรับตัวเข้ากับการขาดน้ำ เมื่อข้าวโพดขาดน้ำเป็นช่วงต่าง ๆ กัน ตั้งแต่งอก(emergence) ถึงออกดอก(flowering) การศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะรองเหล่านี้กับการขาดน้ำ น่าจะทำให้ได้ข้อมูลว่า ช่วงการเจริญเติบโตของข้าวโพดช่วงใดบ้างที่ไวต่อการขาดน้ำ(drought-sensitive stages) และยิ่งกว่านั้นอาจจะได้ทราบถึงลักษณะที่เป็นประโยชน์ต่อการคัดเลือกพันธุ์ข้าวโพด

การทดลองหลายการทดลองได้ดำเนินการในประเทศไทยระหว่างปี 1989/90, 1991/92 และ 1992/93 โดยการให้ข้าวโพดได้รับน้ำจำนวน 9 แบบ ในแต่ละแบบข้าวโพดจะได้รับน้ำเฉพาะบางช่วงของการเจริญเติบโตทางต้น(vegetative stage) โดยการให้น้ำแบบตามร่อง(furrow irrigation) โดยมีแปลงข้าวโพดที่ได้รับน้ำทุกสัปดาห์ในลักษณะไม่ขาดน้ำเป็นตัวเปรียบเทียบ(T1) การให้น้ำแบบหนึ่งคือ T2 แบบนี้ต้นข้าวโพดจะขาดน้ำเป็นเวลา 4 สัปดาห์ เป็นจำนวน 2 ครั้ง ก่อนออกดอก ทั้ง T1 และ T2 ได้ทำซ้ำทุกปี การทดลองนี้มีการวัดปริมาณน้ำในดิน(soil water

contents) ด้วยเครื่องมือที่มีชื่อว่า Time Domain Reflectometry (TDR) ข้าวโพดสามพันธุ์ที่ใช้ในงานทดลองนี้ได้แก่ สุวรรณ 1, สุวรรณ 3 และ KTX 2602 ซึ่งทั้งสามพันธุ์นี้ปรับตัวได้ดีในท้องถิ่นต่าง ๆ ในประเทศไทย และเป็นพันธุ์ที่เกษตรกรนิยมใช้อยู่ การใส่ปุ๋ย และการเขตกรรมต่าง ๆ ตลอดงานทดลองนี้ เช่น การควบคุมวัชพืช และการควบคุมแมลง ใช้วิธีการที่ใช้ทั่วไปในการปลูกข้าวโพด

เมื่อต้นข้าวโพดอยู่ในสภาพขาดน้ำ(T2) การลดลงของผลผลิตเนื่องจากขาดน้ำของพันธุ์ KTX 2602 จะมีปริมาณน้อยกว่าสุวรรณ 1 กล่าวคือ พันธุ์ KTX 2602 ผลผลิตลดลง 14% ในขณะที่พันธุ์สุวรรณ 1 ลดลง 27% การลดลงของผลผลิตของ KTX 2602 เมื่อขาดน้ำ เนื่องจากลดลงของจำนวนเมล็ดต่อฝัก (คือลดลง 14%) แต่การขาดน้ำไม่ทำให้น้ำหนัก 1000 เมล็ดลดลงแต่อย่างไร (1000 kernel-weight, TKW) แต่ในทางตรงกันข้าม ค่า TKW ของสุวรรณ 1 ลดลง 13% และสุวรรณ 3 ลดลง 6% เช่นเดียวกับผลผลิตทางเมล็ดน้ำหนักต่อซังของสุวรรณ 1 ก็ลดลง ด้วยเหตุนี้ the harvest index, HI ของสุวรรณ 1 จึงไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขาดน้ำ(T2) ในขณะเดียวกัน KTX 2602 จะมีน้ำหนักต่อซังลดลงอย่างมาก (ลดถึง 29%) ในสภาพขาดน้ำ ด้วยเหตุนี้ค่า HI ของ KTX 2602 ในสภาพขาดน้ำจึงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 4% ถึง 44% เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า HI ขึ้นอยู่กับค่า TKW ซึ่งในกรณีของ KTX 2602 นั้น ค่า TKW ของ KTX 2602 เป็นลักษณะที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อกระทบแล้ง ดังนั้นลักษณะนี้เป็นลักษณะที่เชื่อถือได้ สำหรับการคัดเลือกพันธุ์ข้าวโพดทนแล้งในเขตร้อน ลักษณะอื่น ๆ ที่วัดในช่วงเก็บเกี่ยว ไม่แสดงให้เห็นถึงผลของทรีทเมนท์และพันธุ์ ลักษณะเหล่านี้ได้แก่ ความยาวของฝัก ความยาวของฝักข้าวโพดเฉพาะส่วนที่มีเมล็ดอยู่ และเส้นรอบวงของฝัก ยกเว้นความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย (a weak significant) ระหว่างทรีทเมนท์และเส้นรอบวงของฝัก กล่าวคือลักษณะทั้งสามลดลงอย่างมากที่สุดเพียง 5%

การทดลองยังพบว่า ในช่วงขาดน้ำช่วงที่ 2 (ซึ่งกินเวลา 4 สัปดาห์) พันธุ์ KTX 2602 ยังยืดตัวได้ถึง 10% ในขณะที่พันธุ์อื่น ๆ ไม่มีการยืดตัวในช่วงขาดน้ำช่วงนี้ การที่มีลำต้นที่ยาวกว่าช่วยปรับปรุงการทำงาน(function)ของต้นข้าวโพด โดยเป็นแหล่งของ carbohydrates ในช่วง grain-filling ด้วยเหตุนี้การพัฒนาการของเมล็ดในช่วงดังกล่าวจะเป็นไปด้วยดี ซึ่งทำให้ค่า TKW คงที่ ใบข้าวโพดก็มีลักษณะการเจริญเติบโต คล้ายคลึงกับการยืดตัวของลำต้น กล่าวคือการปรากฏของใบของ KTX 2602 จะปรากฏให้เห็นก่อน และรวดเร็วกว่า การปรากฏของใบของพันธุ์สุวรรณ 1 และพันธุ์สุวรรณ 3 จำนวนใบของ KTX 2602 ในสภาพขาดน้ำ(T2) จะน้อยกว่าจำนวนหนึ่งใบเมื่ออยู่ใน

สภาพปกติ(T1) ในขณะที่พันธุ์อื่น ๆ จะมีจำนวนใบลดลงถึง 2 ใบ เมื่ออยู่ในสภาพขาดน้ำ(T2) ถึงแม้ว่าในช่วงต้น ๆ ของการเจริญเติบโต(early stages of growth) KTX 2602 จะแห้งเร็วกว่า แต่จำนวนใบที่โตเต็มที่ และยังเขียวอยู่ของพันธุ์ KTX 2602 ก็ไม่แตกต่างจากพันธุ์สุวรรณ 1 และสุวรรณ 3 แต่ในช่วงท้ายของการเจริญเติบโต พันธุ์ KTX 2602 จะมีใบมากกว่าพันธุ์อื่น ๆ 1 ใบ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง ทั้งนี้ เนื่องจากการฟื้นตัวที่เร็วกว่าของพันธุ์ KTX 2602 การสะสมของน้ำหนักแห้ง(dry matter)ของต้น คล้ายคลึงกับการสะสมจำนวนใบในช่วง vegetative period พันธุ์ KTX 2602 เมื่อกระทบกับการขาดน้ำในช่วงออกดอก จะได้รับผลกระทบน้อยกว่า(เพียง 10%)พันธุ์สุวรรณ 1 และสุวรรณ 3 ความสามารถในการฟื้นตัวของพันธุ์ KTX 2602 สามารถสังเกตุเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใบ เมื่ออยู่ในสภาพน้ำเพียงพอ พันธุ์ KTX 2602 จะมีพื้นที่ผิวใบสูงกว่าพันธุ์อื่นๆ และเมื่ออยู่ในสภาพขาดน้ำ(T2) พันธุ์ KTX 2602 จะมีพื้นที่ผิวใบสูงกว่าพันธุ์อื่น ๆ 15% ทั้งนี้ตั้งแต่งอกจนถึงสัปดาห์ที่หก อย่างไรก็ตาม จะไม่พบความแตกต่างของพื้นที่ผิวใบ เนื่องจากพันธุ์ในช่วงออกดอก(flowering) ความแตกต่างที่น้อยมากของลักษณะทาง morphology อื่น ๆ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และพื้นที่ผิวใบ จนไม่สามารถใช้เป็นเครื่องมือคัดเลือกพันธุ์ข้าวโพด แต่ลักษณะเหล่านี้สามารถบอกถึงความรุนแรงของการขาดน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อต้นข้าวโพดได้รับน้ำ ลักษณะเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ถึงแม้ความแตกต่างของลักษณะเหล่านี้ เนื่องจากการขาดน้ำไม่สามารถเห็นได้หลังจากให้น้ำ 1 สัปดาห์ แต่ในช่วงขาดน้ำต่าง ๆ ลักษณะดังกล่าวจะลดลง 25 ถึง 35% ลักษณะ(parameter)ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การเจริญเติบโต เช่น net assimilation rate (NAR), leaf area ratio (LAR) และ relative growth rate (RGR) ไม่มีความแตกต่างเนื่องจากพันธุ์ แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงปลายของการขาดน้ำ(T2) ค่า NAR จะลดลงประมาณ 3 กรัม ของน้ำหนักแห้งของต้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใบ(cm^2)ต่อวัน และค่า RGR จะลดลงประมาณ 0.04 กรัมต่อน้ำหนักแห้งทั้งหมดของต้น(g)ต่อวัน ในขณะที่ LAR ไม่แสดงความแตกต่าง อันเนื่องจากพันธุ์หรือทรีทเมนท์ ค่า NAR ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักแห้งของต้น ค่า NAR ของ KTX 2602 จะลดลงรุนแรงกว่าเนื่องจากขาดน้ำ แต่จะฟื้นตัวเร็วกว่าเมื่อได้รับน้ำชลประทาน เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์สุวรรณ1 และพันธุ์สุวรรณ 3 ผลอันนี้สนับสนุนข้อสมมุติฐานที่ว่า KTX 2602 จะส่ง assimilate ไปที่รากมากกว่าที่ต้นในช่วงขาดน้ำ

ในปี 1992/93 ได้ทำการทดลองเล็ก ๆ อันหนึ่ง ผลการทดลองปรากฏว่า การวัดความชื้นสัมพัทธ์ในใบ(leaf water relation) สามารถทำได้ตั้งแต่เวลา 12.00 ถึง 14.00 น. โดยภูมิอากาศไม่มีผลต่อการวัด ซึ่งองค์ประกอบของความชื้นสัมพัทธ์ในใบได้แก่ water potential, pressure potential(tugor) และ osmotic potential การวัดค่าเหล่านี้ก่อนตะวันขึ้น (ทำในปี 1991/92, 1992/93) และวัดระหว่างช่วงบ่าย (ซึ่งทำในปี 1992/93) ไม่พบความแตกต่าง เนื่องจากพันธุ์ อย่างไรก็ตาม การวัดในช่วงบ่าย สภาพอากาศในขณะนั้นจะบดบังผลของทรีทเมนท์ที่มีต่อค่า leaf water potential ภายใต้สภาพน้ำปกติ(T1) มีค่าเท่ากับ -1.0 MPa และภายใต้สภาพขาดน้ำ(T2) มีค่าเท่ากับ -1.2 MPa นอกจากนั้นค่าที่วัดทั้ง 3 ค่าในช่วงรุ่งอรุณ แตกต่างกันอย่างมาก จนไม่สามารถเปรียบเทียบผลของทรีทเมนท์ในระหว่างสองปีนี้ แต่มันมีความคล้ายคลึงกันของปฏิกริยาที่วัด ในช่วงขาดน้ำช่วงที่ 2 ระหว่างใน T1 และ T2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความทนทานเพิ่มขึ้นต่อการขาดน้ำเมื่อต้นข้าวโพดมีอายุมากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของน้ำในดิน บอกถึงสถานะภาพการขาดน้ำในดิน การวัดสถานะภาพการขาดน้ำในดินเป็นการวัดการขาดน้ำที่สะสมมาเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถคำนวณจากความแตกต่างของปริมาณน้ำในดิน (the volumetic soil water content) ณ วันใดวันหนึ่งกับปริมาณน้ำในดินของวันที่สองหลังจากให้น้ำครั้งที่ 2 ในสัปดาห์ที่ 9 หลังจากงอก ผลการทดลอง ปรากฏว่า volumetic soil water contents ที่ได้จากความลึก 30 ซม. จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของต้นข้าวโพดมากกว่าการวัดจากดินที่ระดับความลึก 60 ซม.

ในพันธุ์ KTX 2602 การขาดน้ำทำให้การออกดอกตัวผู้ล่าช้าออกไป 2.4 วัน และการออกดอกตัวเมียล่าช้าออกไป 3.5 วัน แต่ในพันธุ์สุวรรณ 1 การออกดอกตัวผู้จะล่าช้าออกไป 4.2 และตัวเมีย 5.3 วัน และสำหรับพันธุ์สุวรรณ 3 การออกดอกตัวผู้และตัวเมียจะล่าช้าออกไป 4.0 และ 5.7 วัน ตามลำดับ ช่วงห่างระหว่างการออกดอกตัวผู้ และไหมตัวเมียได้รับการกระทบเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการให้น้ำก่อนออกดอกของข้าวโพด จำนวนวันตั้งแต่งอกจนถึงออกดอกตัวผู้และออกไหมตัวเมีย มีความสัมพัทธ์อย่างใกล้ชิดกับผลผลิตของเมล็ดและผันแปรอยู่ในช่วง -.035 ถึง -.082 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และปี ลักษณะเหล่านี้ สัมพันธ์กับการขาดน้ำ(water deficit) และการขาดน้ำคำนวณจากทุกสัปดาห์ของช่วงเจริญเติบโตทางต้น(vegetative stage) ซึ่งแสดงให้เห็นสองระยะที่มี high correlation coefficient ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง r = 0.5 ถึง 0.7 โดยระยะแรกอยู่ที่สัปดาห์ที่ 3

และระยะที่สองอยู่ระหว่างสัปดาห์ที่ 7 และ 8 หลังจากงอก สองระยะนี้ตรงกับระยะของการพัฒนาของตัวผู้และตัวเมีย สองระยะนี้เป็นระยะที่วิกฤติมาก ดังนั้นสองระยะนี้อ่อนไหวมากต่อการขาดน้ำ

การค้นพบความจริงนี้มีความสำคัญสำหรับเกษตรกร สำหรับประกอบการพิจารณาการให้น้ำ และสำหรับนักวิจัย เพื่อใช้ปรับปรุงแบบของการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิต (yield production)

ความสัมพันธ์แบบ the linear curves ของพันธุ์ทั้งสามที่ได้จากการเข้าสมการ regression ระหว่างผลผลิต และการใช้น้ำ รวมถึง rainfall และการชลประทาน ซึ่งให้ค่า coefficient of determination (r^2 = 0.56 ถึง r^2 = 0.84) ความลาดชันของเส้น curve แสดงถึงความทนแล้งของแต่ละพันธุ์ ดังนั้นผลผลิตต่อต้นของสุวรรณ 1 ลดลงถึง 13 g สำหรับสุวรรณ 3 ลดลงประมาณ 11g และสำหรับ KTX 2602 ลดลงเพียง 9 g ต่อ 100 mm ของน้ำที่ขาดหายไป ความจริงข้อนี้สนับสนุนการสังเกตุที่ว่า ความอ่อนไหวต่อการขาดน้ำของพันธุ์ KTX 2602 มีน้อยกว่าพันธุ์สุวรรณ 1 และพันธุ์สุวรรณ 3