



PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LAS VARIETADES DE TRIGO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS ORGÁNICOS Y CONVENCIONALES -

- ¿HAY UNA INFLUENCIA EN LA HISTORIA DE LA SELECCIÓN?

Isabell Hildermann, Andreas Fließbach, Paul Mäder

FiBL, Research Institute of Organic Agriculture, Switzerland-Frick

Ackerstrasse, Switzerland-5070 Frick, Switzerland, e-mail: isabell.hildermann@fibl.org

Los agricultores orgánicos usan a menudo las mismas variedades de trigo que los agricultores convencionales. La mayoría de estas variedades han sido seleccionadas bajo las mismas condiciones de elevados aportes. Frecuentemente los suelos gestionados orgánicamente no aportan los suficientes nutrientes y el uso de fertilizantes está limitado. Por lo tanto, las variedades seleccionadas bajo condiciones de altos aportes a menudo no pueden alcanzar la totalidad de la extensión de su gran potencial genético. Una mejor eficiencia en la captación de nutrientes sería de gran valor para los cultivos orgánicos y convencionales, produciendo bajo condiciones de bajos aportes. Los estudios con trigo de invierno mostraron que las variedades, seleccionadas directamente bajo condiciones orgánicas finalmente tuvieron un mayor rendimiento bajo condiciones de selección orgánico que las variedades seleccionadas bajo condiciones convencionales [1], indicando una adaptación exitosa a condiciones de bajo aporte durante la selección.

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) suelen ser los mayores macro-elementos limitantes en la agricultura orgánica. Una gran parte del P en suelos es aislado en minerales y compuestos orgánicos, o intensamente absorbido, y el suministro de N del suelo por mineralización está limitado. La simbiosis AMF puede influenciar positivamente el crecimiento de la planta y su salud. Los AMF son conocidos por estar fuertemente afectados por las concentraciones de nutrientes solubles, específicamente P, y también por el genotipo de la planta. Esto sugiere una supresión de la simbiosis AMF con variedades de trigo obtenidas en programas de selección bajo condiciones de elevado aporte. Además, la fisiología y el enraizamiento de tales variedades podría estar adaptada a un elevado contenido en nutrientes del suelo. Las nuevas variedades podrían tener una influencia negativa en la colonización de las raíces por AMF debido a la resistencia introducida frente a patógenos fúngicos de las raíces.

Un desafío para la selección en la agricultura orgánica es el de proveer de variedades con elevadas producciones y una calidad de crecimiento apropiada bajo condiciones limitadas de aportes de fertilizantes orgánicos. Nuestra hipótesis fue que las variedades seleccionadas en condiciones de bajos aportes (variedades antiguas y seleccionadas de forma orgánica) se desarrollarían mejor en sistemas de bajo aporte orgánico que las variedades seleccionadas de forma convencional, debido a la adaptación a las condiciones de bajos aportes durante el proceso de selección. Esto concuerda con la opinión de Wolfe *et al.* [2], quienes recientemente definieron las propiedades deseables de las variedades de trigo para la agricultura orgánica. Un mejor funcionamiento de la simbiosis AMF podría ser una razón para una mejor adaptación. Nuestro objetivo en este proyecto era evaluar el potencial de adquisición de la producción y de los nutrientes para las variedades. Por otra parte, queremos identificar el papel de AMF en la absorción de nutrientes y el crecimiento de la planta.

Estado de la ciencia

Para tener éxito en la agricultura orgánica, las variedades deben hacer frente a ciertas condiciones desfavorables ligadas típicamente a la agricultura orgánica, p.ej. el bajo estatus de nutrientes del suelo debido a la lenta liberación de fertilizantes orgánicos, presiones de las malas hierbas así como de plagas y enfermedades. Generalmente las variedades de trigo son menores bajo condiciones orgánicas que bajo las convencionales [1, 3-8]. Las razones principales son los problemas con las malas hierbas [9] y enfermedades, pero especialmente la baja aportación de nutrientes [1, 10].

La producción mundial de trigo se incrementó rápidamente, especialmente durante la segunda mitad del pasado siglo debido a un incremento en el uso de fertilizantes químicos y pesticidas [11], y la introducción de variedades semi-enanas [12]. La selección de trigo tuvo como objetivo mejorar la eficiencia del uso de nutrientes, especialmente de N y P. Se sabe poco sobre la influencia del nivel de nutrientes durante la selección en el comportamiento de las variedades bajo condiciones de bajo y elevado aporte. Brancourt-Hulmel *et al.* [13] evaluaron la eficiencia de los ambientes de selección de aportes bajos frente a los aportes elevados para mejorar el trigo para condiciones de bajos aportes. Concluyeron que los programas de selección con el objetivo de ambientes de bajos aportes deberían incluir ambientes de selección de bajos aportes para maximizar las mejoras de la selección. Los resultados en la cebada podrían mostrar una interacción del genotipo con el ambiente. Las líneas de alta productividad seleccionadas en ambientes de alta productividad mostraron menores producciones en los campos de los agricultores [11]. Además de la productividad, la calidad de horneado es el rasgo más importante para la cría de trigo de pan. L-Baekstrom *et al.* [10] encontraron claras diferencias en la calidad de horneado entre trigo crecido de forma orgánica y convencional con alta calidad de horneado en el sistema convencional. En ese estudio de diez años, las condiciones limitantes de nitrógeno (N) en los sistemas orgánicos causó la mayoría de las diferencias.

Las relaciones simbióticas de trigo y AMF pueden jugar un papel importante para el crecimiento y la productividad. Hay una clara evidencia que la colonización AMF está afectada por el aporte de nutrientes y el potencial de infección de AMF del suelo, como se ha mostrado en los ensayos en macetas para P [14]. Los valores más altos en pesos de brote y raíz de trigo se midieron en tratamientos de inoculación en un ensayo en macetas con un suelo bajo en P [15]. La simbiosis AMF puede llevar a un incremento de la captación de P por las plantas. La hifa AMF podría contribuir hasta un 50-80% de la captación total de P de la planta en ensayos en macetas con trigo [16]. La aparición de AMF y la diversidad muestran una fuerte dependencia en el manejo del uso de la tierra. La colonización de las raíces por AMF en el ensayo DOK disminuyó con el incremento de la intensidad agrícola. La colonización fue mayor en el control no fertilizado y un 30-60% mayor en el sistema orgánico frente al convencional. Se encontraron resultados similares en experimentos adicionales en maceta con suelos de campo para el ensayo DOK [17]. Los resultados concuerdan con Covacevich *et al.* [18], donde la colonización con AMF fue más elevada en plantas que no recibían un aporte anual de P comparadas con plantas que crecieron en niveles de nutrientes elevados. La AMF nativa podría contribuir considerablemente a la captación de P de trigo cultivado en campos, incluso con niveles de fertilidad del suelo típicos [19]. Oehl *et al.* [20] compararon la influencia de condiciones aportación bajas, moderadas, y altas en la aparición y diversidad de AMF. Los números de esporas fueron mayores bajo condiciones bajas y moderadas. Una rotación en la diversidad de AMF podría mostrarse con un mayor número de especies en el campo orgánico, el cual era parte de la comparación del sistema DOK.

Las variedades de trigo difieren en su habilidad para formar simbiosis AMF [21]. Hay evidencia que las variedades de trigo seleccionadas antes de 1900 y del comienzo de la

intensa fertilización química tuvieron mayor respuesta a la AMF que las variedades modernas [22]. Hetrick *et al.* [23] encontró una relación entre la colonización de raíces por AMF y la biomasa sólo en variedades de trigo receptivas. Los resultados del ensayo DOK también mostraron que las variedades más antiguas de trigo podrían tener una mayor capacidad para captar P. Granos de una antigua variedad de trigo tenían un contenido diferencialmente mayor en P que granos de variedades comercializadas recientemente, sugiriendo interacciones entre trigo x variedad x AMF [4].

Métodos

Experimento DOK a largo plazo

Se realizó un experimento de campo con diez variedades de trigo de invierno en el ensayo DOK con manejo orgánico y convencional del terreno [3] en 2006/2007. El ensayo DOK a largo plazo se preparó en 1978 en Therwill (7°33'E, 47°30'N) en las proximidades de Basilea, Suiza, por la Estación de Investigación Agroscope Reckenholz-Tänikon y en Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica (FiBL, Frick) comparando sistemas de agricultura orgánica (biodinámica y bioorgánica) y dos convencionales ("K inventionell" con y sin estiércol). Es suelo es un Luvisol háplico (sL) (Haludalf típico) en depósitos profundos de loess aluvial. El clima es relativamente seco y suave con una precipitación media de 785 mm al año y una media anual de temperatura de 9.5°C. La rotación cada siete años fue la misma para todos los sistemas y desde 1999 – 2006 se plantaron los siguientes cultivos: patatas, trigo de invierno 1, soja, maíz, trigo de invierno 2, prado de trébol 1, prado de trébol 2. En el sistema convencional, los pesticidas se aplicaron sólo si se excedían los umbrales económicos para plagas y enfermedades de acuerdo con el plan integral de protección de la planta. En los sistemas de agricultura orgánica la protección de la planta se realizó según las guías de consulta biodinámicas. El experimento de campo está diseñado como un bloque escogido al azar con cuatro réplicas.

Para nuestro experimento se probaron diez variedades en dos sistemas orgánicos (BIODYN 1 y 2), un sistema convencional (CONMIN) y un control sin fertilizar (NOFERT). Estos sistemas se diferenciaban principalmente en la estrategia de fertilización y la protección de la planta. Los sistemas orgánicos representan granjas mixtas con tierra arable y ganado, CONMIN para un sistema convencional sin ganado. El nivel de fertilización se incrementa gradualmente de NOFERT a BIODYN 1 (0.7 unidades de ganado ha⁻¹), BIODYN 2 (1.4 unidades de ganado ha⁻¹) y CONMIN [24], resultando unos contenidos en fósforo (P) y potasio (K) más altos en el sistema convencional cuando se comparan con los sistemas orgánicos (Tabla 1).

Tabla 1.- Acidez del suelo, contenido en carbono orgánico del suelo y elementos minerales solubles en el suelo al inicio del experimento en Diciembre 2006 (0-20 cm de profundidad del suelo), (n=32). Entre las columnas las diferentes letras indican diferencias basadas en un test de menor diferencia significativa (p < 0.05)

System	pH [H ₂ O]	C_{org} [%]	N_{min}^a [kg ha ⁻¹]	P^b [mg kg ⁻¹]	K^b [mg kg ⁻¹]
NOFERT	5.84 c	1.11 c	27.55 c	8.30 c	13.65 d
BIODYN 1	6.14 b	1.22 b	32.26 b	8.68 c	24.23 c
BIODYN 2	6.40 a	1.41 a	40.90 a	12.99 b	34.51 b
CONMIN	6.34 a	1.23 b	31.95 b	24.45 a	39.95 a

^a N_{min} = NO₃ - N + NH₄ - N ^b measured in a double lactic acid extract

Experimento de variedad de trigo de invierno en el ensayo DOK y variedades seleccionadas

En el ensayo se sembraron las variedades antiguas, seleccionadas de forma orgánica y convencional, escogidas entre 1840 y 2006 – en total nueve variedades y una población cruzada compuesta (Tabla 2). En la población cruzada compuesta (CCP) un gran número de variedades del Reino Unido fueron cruzadas y propagadas como un grupo [25]. Todas las variedades tenían que ser de calidad de trigo de pan y apropiadas para las condiciones de crecimiento que se dan en el noroeste de Suiza. Las variedades antiguas (Rouge de Bordeaux, Mont Calme 245 y Probus) fueron seleccionadas y liberadas antes de 1950 y representan la época anterior a la intensificación de la agricultura. Las variedades denominadas “seleccionadas orgánicamente” (Scaro, Sandomir y CCP) derivaron de programas de selección realizados en agricultura orgánica, p.ej. todos los pasos reproductivos se llevaron a cabo en zonas manejadas de forma orgánica. Por otra parte, las técnicas de selección y propagación son conformes a principios orgánicos. Por lo tanto estas variedades se pueden denominar “seleccionadas directamente para agricultura orgánica” según las definiciones de selección orgánica de Wolfe *et al.* [2]. Las variedades seleccionadas convencionalmente (Titlis, Caphorn, Antonius y DI 9714) se originaron en programas de selección para agricultura convencional. Las variedades Titlis y Antonius también son variedades recomendadas para agricultura orgánica en Suiza [26]. Cuatro variedades suizas – adaptadas a las condiciones locales (Mont Calme 245, Probus, Titlis y Scaro) representan el desarrollo de la selección de trigo en Suiza durante el último siglo.

Cultivar	Country of origin	Year of release	Origin/Breeder
Old cultivars and landraces			
Rouge de Bordeaux	FR	1840	L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), F-75338 Paris
Mont Calme 245	CH	1926	National gene bank ACW Changins, CH-1260 Nyon 1
Probus	CH	1948	National gene bank ACW Changins, CH-1260 Nyon 1
Organically bred cultivars			
Scaro	CH	2006	Sativa Rheinau AG, CH-8462 Rheinau, Getreidezüchtung Peter Kunz, CH-8634 Hombrechtikon
Sandomir	DE	not registered	Getreidezüchtung Darzau, Karl Josef Müller, DE-29490 Neu Darchau
Composite Cross Population	GB	not registered	The Organic Research Center, Elm Farm, GB-Hamstead Marshall, Newbury, Berkshire RG20 0HR
Conventionally bred cultivars			
Titlis (standard)	CH	1996	Delley seeds and plants, CH-1567 Delley / National gene bank ACW Changins, CH-1260 Nyon 1
Antonius	AT	2003	Delley seeds and plants, CH-1567 Delley/ Saatzucht Donau Ges.m.b.H. & CoKG, 2301 Probstdorf
DI 9714	FR	not registered	L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), FR-75338 Paris
Caphorn	FR	2001	Delley seeds and plants, CH-1567 Delley

Figura 1.- Variedades de trigo de invierno seleccionadas y su país de origen y año de comercialización

Las variedades de trigo de invierno fueron sembradas tras el maíz el 26.10.2006 en diez subparcelas marginales de 16 parcelas DOK (5 m x 20 m, cuatro sistemas de uso de tierra cada uno con cuatro réplicas) en los cuatro sistemas descritos y en todas las cuatro réplicas, resultando 160 subparcelas (3 m x 1 m). Las parcelas de BIODYN 1 estaban adyacentes a las de BIODYN 2, las parcelas de NOFERT estaban adyacentes a las CONMIN. La densidad de siembra fue de 420 semillas germinadas por m², según las recomendaciones de agricultura orgánica. La densidad de semillas fue la misma en todos los sistemas y para todas las variedades como es recomendado para los tests de variedades [27]. El número de semillas fue ajustado de acuerdo con los resultados de un test de germinación previo. La germinación de las variedades estuvo en el rango entre el 92% y el 98%. La distancia de las filas fue de 16.7 cm. Las variedades fueron distribuidas al azar en cada réplica del experimento DOK.

El experimento de campo pretende observar la diferencia del crecimiento agronómico y los parámetros de cosecha, la captación de nutrientes y el que ocurra la simbiosis AMF durante la época de crecimiento. Al principio del experimento, se analizaron los parámetros del suelo y se contó el número de esporas AMF. Las muestras de raíces (muestra de suelo de Ø 4 cm y 20 cm de profundidad) y los brotes se cogieron al retoñar y florecer para medir la captación de nutrientes y las estimaciones de AMF. Durante la época de crecimiento se contó la densidad de las plantas, se midió su longitud, el estado de crecimiento, y se registraron las plagas y enfermedades. Se cosechó al final de Julio. Analizamos la producción de grano y paja, los componentes de la producción como el peso de mil semillas y el peso del hectolitro. Se hizo una estimación basta de la calidad de horneado del trigo analizando los parámetros relevantes como el contenido en proteína cruda del grano, el valor Zeleny, número de caída Hagberg y el contenido en gluten total y el correspondiente índice en gluten. Por otra parte, analizamos macro y micro nutrientes en brotes, grano y paja para trazar la reubicación de nutrientes.

En la ponencia presentamos los resultados de producción de grano, contenido de proteína en grano, un análisis de redundancia de los parámetros de producción y calidad así como los resultados de las evaluaciones de micorrizas.

Resultados y discusión

Producción de grano y proteína cruda en grano

Los sistemas y variedades afectan significativamente las producciones de grano y paja, considerando que no se detectaron interacciones entre el genotipo y el ambiente en una ANOVA de dos vías. Elevadas tasas de aportación de N en los sistemas da como resultado elevadas producciones. Las producciones en el sistema convencional CONMIN fueron mayores que en los sistemas orgánicos. A lo largo de todas las variedades, la producción de grano fue un 62% más alta en el sistema convencional CONMIN que en el sistema orgánico BIODYN 2. Se observó una tendencia del incremento de producciones durante el año de comercialización de variedades. La selección de la variedad convencional Antonius alcanzó las mayores producciones en todos los sistemas y el 29% más que la producción total de la variedad más antigua Rouge de Bordeaux. Nuestros resultados no muestran que las variedades seleccionadas bajo condiciones de baja aportación (variedades antiguas y seleccionadas de forma orgánica) tuvieran producciones mayores bajo condiciones de baja aportación – en contraste con otros estudios sobre el trigo [1, 13] o la cebada [28]. Se encontró una situación contradictoria para las condiciones convencionales, donde las variedades seleccionadas de forma convencional dieron mayores producciones en comparación con las variedades más antiguas y seleccionadas de forma orgánica. Una explicación para estos resultados contradictorios podría ser que el suelo Loess profundo en

el lugar del experimento DOK tenía una mayor fertilidad inherente al suelo, buena retención hídrica y baja presión de malas hierbas.

Los contenidos de proteína cruda del grano fueron mayores en el sistema convencional CONMIN debido al uso de fertilizantes minerales. En el control no fertilizado NOFERT la proteína en grano fue elevada debido a las bajas cantidades y pesos de los granos. La proteína en grano fue un 23% más baja en el sistema orgánico BIODYN 2 que en el sistema CONMIN. La proteína en grano se incrementó con el aporte de nutrientes en los sistemas agrícolas. Para todos los sistemas las variedades antiguas alcanzaron un contenido de proteína en grano significativamente más alto que las variedades seleccionadas de manera orgánica y convencional. Durante su año de comercialización la variedad antigua Probus alcanzó los mayores contenidos en proteína en el grano, mientras que la variedad Caphorn, seleccionada convencionalmente, tuvo los más bajos. Estos resultados concuerdan bien con los estudios de varios autores [29-32]. En BIODYN 2 así como en las variedades CONMIN seleccionadas de manera orgánica se obtuvieron contenidos ligeramente mayores, pero no estadísticamente significativos, en proteína que en las variedades seleccionadas de forma convencional.

Los resultados de un análisis de redundancia para la producción de grano y los componentes de la producción mostraron claramente que la producción y los componentes de producción fueron influenciados principalmente por sistemas, lo que significa por el aporte de nutrientes, mientras que las variedades jugaron un papel menor. En contraste, la calidad fue determinada principalmente por las variedades y difícilmente afectada por el aporte de nutrientes.

Colonización de raíces por AMF

La colonización de raíces por AMF fue disminuyendo dentro del aporte de nutrientes en las muestras de raíces cogidas tanto en las fases de brote como de floración, siendo las más altas en el sistema de manejo de forma orgánica BIODYN 2. Los valores más bajos se midieron al brotar en el sistema convencional CONMIN y en la floración en el control no fertilizado NOFERT. Puede que no observemos diferencias estadísticas significativas en la colonización de raíces por AMF entre las diez variedades. Nuestros datos no indican que las condiciones de selección influenciaran en la colonización de las raíces de las variedades por AMF.

Conclusión

Nuestros datos muestran que las variedades de trigo de invierno y los sistemas afectan significativamente a la producción y los parámetros de calidad. Bajo condiciones agrícolas convencionales, las producciones se incrementan fuertemente durante el año de comercialización de las variedades, mientras que el mismo conjunto de variedades mostró sólo un menor incremento bajo condiciones de agricultura orgánica. Los resultados implican que la selección para producción tuvo éxito durante el pasado siglo, pero sólo bajo condiciones de alta aportación, donde el desarrollo estaba acompañado del incremento de los aportes de recursos externos como los fertilizantes minerales. Bajo condiciones de bajo aporte y limitación de nutrientes, las variedades modernas podrían no desarrollar toda la extensión de su potencial genético, independientemente de si la selección tuvo lugar bajo condiciones de cultivo convencionales u orgánicas. La agricultura orgánica pretende mantener un sistema resistente en el suelo para producir productos saludables sin explotar los recursos naturales. Pero aparte de los aspectos de protección ambiental, calidad y salubridad del producto, la agricultura orgánica tiene que hacer esfuerzos para aumentar las producciones para hacer frente al desafío del suministro de alimentos. Además el incremento de producciones podría mejorar la situación económica de los agricultores

orgánicos. Sugerimos que la selección actual debería centrarse en contenidos aceptables de proteínas también bajo aportes bajos de nitrógeno. Los primeros resultados de la colonización de micorrizas no muestran que hubiera una influencia en la simbiosis AMF de las variedades de trigo durante la selección o por las condiciones de selección. Se están realizando evaluaciones de AMF posteriores en tres lugares diferentes de Suiza en suelos menos fértiles. Esas evaluaciones mostrarán si los factores de estrés abiótico como bajas precipitaciones o condiciones pobres del suelo llevarán a interacciones entre variedades y ambiente.

Referencias

- [1] Murphy, K.M.; Campbell, K.G.; Lyon, S.R.; Jones, S.S. (2007). Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102, pp. 172-177.
- [2] Wolfe, M.; Baresel, J.; Desclaux, D.; Goldringer, I.; Hoad, S.; Kovacs, G.; Löschenberger, F.; Miedaner, T.; Østergård, H.; Lammerts van Bueren, E. (2008). Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica* 163, pp. 323-346.
- [3] Mäder, P.; Fliessbach, A.; Dubois, D.; Gunst, L.; Fried, P.; Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, pp. 1694-1697.
- [4] Mäder, P.; Hahn, D.; Dubois, D.; Gunst, L.; Alföldi, T.; Bergmann, H.; Oehme, M.; Amado, R.; Schneider, H.; Graf, U.; Velimirov, A.; Fliessbach, A.; Niggli, U. (2007). Wheat quality in organic and conventional farming: results of a 21-year old field trial. *J. Sci. Food Agri.* 87, pp. 1826-1835.
- [5] Ryan, M.H.; Derrick, J.W.; Dann, P.R. (2004). Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management. *J. Sci. Food Agri.* 84, pp. 207-216.
- [6] L-Baekstrom, G.; Hanell, U.; Svensson, G. (2006). Nitrogen use efficiency in an 11-year study of conventional and organic wheat cultivation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37, pp. 417-449.
- [7] Schwaerzel, R.; Levy, L.; Menzi, M.; Anders, M.; Winzeler, H.; Dörnte, J. (2006). Winter wheat cultivars in organic and extensive conditions *Agrarforschung* 13, pp. 68-73.
- [8] Mason, H.; Navabi, A.; Frick, B.; O'Donovan, J.; Niziol, D.; Spaner, D. (2007). Does growing Canadian Western Hard Red Spring wheat under organic management alter its breadmaking quality? *Renew. Agr. Food Syst.* 22, pp. 157-167.
- [9] Mason, H.E.; Spaner, D. (2006). Competitive ability of wheat in conventional and organic management systems: A review of the literature. *Can. J. Plant. Sci.* 86, pp. 333-343.
- [10] L-Baekstrom, G.; Hanell, U.; Svensson, G. (2004). Baking quality of winter wheat grown in different cultivating systems, 1992-2001: A holistic approach. *J. Sustain. Agric.* 24, pp. 53-79.
- [11] Ceccarelli, S. (1996). Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica* 92, pp. 203-214.
- [12] Manske, G.G.B.; Ortiz-Monasterio, J.I.; Van Ginkel, M.; Gonzalez, R.M.; Rajaram, S.; Molina, E.; Vlek, P.L.G. (2000). Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid Andisol in Mexico. *Plant and Soil* 221, pp. 189-204.
- [13] Brancourt-Hulmel, M.; Heumez, E.; Pluchard, P.; Beghin, D.; Depatureaux, C.; Giraud, A.; Le Gouis, J. (2005). Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-input levels. *Crop Sci.* 45, pp. 1427-1431.
- [14] Zhu, Y.-G.; Smith, S.E.; Barritt, A.R.; Smith, F.A. (2001). Phosphorus (P) efficiencies and mycorrhizal responsiveness of old and modern wheat cultivars. *Plant and Soil* 237, pp. 249-255.

- [15] Rubio, R.; Borie, F.; Schalchli, C.; Castillo, C.; Azcon, R. (2003). Occurrence and effect of arbuscular mycorrhizal propagules in wheat as affected by the source and amount of phosphorus fertilizer and fungal inoculation. *Appl. Soil Ecol.* 23, pp. 245-255.
- [16] Li, H.; Smith, S.E.; Holloway, R.E.; Zhu, Y.; Smith, F.A. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses. *New Phytol.* 172, pp. 536-543.
- [17] Mäder, P.; Edenhofer, S.; Boller, T.; Wiemken, A.; Niggli, U. (2000a). Arbuscular mycorrhizae in al long-term field trial comparing low-input ('organic', 'biological') and high-input ('conventional') farming systems in a crop rotation. *Biol. Fertil. Soil* 31, pp. 150-156.
- [18] Covacevich, F.; Echeverria, H.E.; Aguirrezabal, L.A.N. (2007). Soil available phosphorus status determines indigenous mycorrhizal colonization of field and glasshouse-grown spring wheat from Argentina. *Appl. Soil Ecol.* 35, pp. 1-9.
- [19] Schweiger, P.F.; Jakobsen, I. (1999). Direct measurement of arbuscular mycorrhizal phosphorus uptake into field-grown winter wheat. *Agron. J.* 91, pp. 998-1002.
- [20] Oehl, F.; Sieverding, E.; Ineichen, K.; Mäder, P.; Boller, T.; Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Appl. Envir. Microbiol.* 69, pp. 2816-2824.
- [21] Hetrick, B.A.D.; Wilson, G.W.T.; Gill, B.S.; Cox, T.S. (1995). Chromosome location of mycorrhizal responsive genes in wheat. *Can. J. Bot.* 73, pp. 891-897.
- [22] Hetrick, B.A.D.; Wilson, G.W.T.; Cox, T.S. (1992). Mycorrhizal Dependence of Modern Wheat-Varieties, Landraces, and Ancestors. *Can. J. Bot.* 70, pp. 2032-2040.
- [23] Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., Todd, T.C. (1996). Mycorrhizal response in wheat cultivars: relationship to phosphorus. *Can. J. Bot.* 74, pp. 19-25.
- [24] Mäder, P.; Fliessbach, A.; Dubois, D.; Gunst, L.; Jossi, W.; Widmer, F.; Oberson, A.; Frossard, E.; Oehl, F.; A., W.; Gattinger, A.; Niggli, U. 2006 The DOK experiment (Switzerland). In *Long-term Field Experiments in Organic Farming*. International Society of Organic Agriculture Research (ISOFAR), Scientific Series. Eds. J Raupp, C Pekrun, M Oltmanns and U Köpke. pp 41-58. Verlag Dr. Köster, Berlin.
- [25] Phillips, S.L.; Wolfe, M.S. (2005). Evolutionary plant breeding for low input systems. *J. Agric. Sci.* 143, pp. 245-254.
- [26] FiBL - Forschungsinstitut für biologischen Landbau (2008) Sortenliste Biogetreide. <https://www.fibl.org/shop/pdf/sl-1034-biogetreide.pdf>. Accessed 10 Sept 2008
- [27] Donner, D.; Osman, A. Eds. 2006 Handbook Cereal variety testing for organic and low input agriculture. Available through COST SUSVAR 860 <http://www.cost860.dk/publications/handbook>
- [28] Abeledo, L.G.; Calderini, D.F.; Slafer, G.A. (2003). Genetic improvement of yields responsiveness to nitrogen fertilization and its physiological determinants in barley. *Euphytica* 133, pp. 291-298.
- [29] Calderini, D.F.; Torres-Leon, S.; Slafer, G.A. (1995). Consequences of Wheat Breeding on Nitrogen and Phosphorus Yield, Grain Nitrogen and Phosphorus Concentration and Associated Traits. *Ann. Bot.* 76, pp. 315-322.
- [30] Smith, G.P.; Gooding, M.J. (1999). Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agric. Forest. Meteorol.* 94, pp. 159-170.
- [31] Guarda, G.; Padovan, S.; Delogu, G. (2004). Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *Eur. J. Agron.* 21, pp. 181-192.
- [32] Acuna, M.L.; Savin, R.; Cura, J.A.; Slafer, G.A. (2005). Grain protein quality in response to changes in pre-anthesis duration in wheats released in 1940, 1964 and 1994. *J. Agron. Crop Sci.* 191, pp. 226-232.