

Moderate Bewässerung führte unabhängig von der Bohnensorte zu einer deutlichen Ertragssteigerung

Buschbohnen, Bewässerung, Sorte

Zusammenfassung

Bei einem erneuten Bewässerungsversuch mit vier verschiedenen Buschbohnenarten am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz im Jahr 2012 waren nur in der zweiten Kulturhälfte Berechnungsgaben notwendig.

Die Bohnensorten reagierten einheitlich mit einem Ertragszuwachs von knapp 40 % auf eine Zusatzbewässerung von 68 mm. Eine weitere Steigerung der Bewässerung auf 100 mm brachte keine Ertragsvorteile, obgleich bei einer Zusatzbewässerung von nur 68 mm auch Bodenwassergehalte von zwischenzeitlich unter 40 % nFK aufgetreten sein dürften.

Versuchshintergrund u. -frage

Im hiesigen Anbaugbiet mit seinen Lössböden werden Buschbohnen nur relativ extensiv bewässert. Durch den Klimawandel und dabei insbesondere die prognostizierte (Früh)Sommertrockenheit dürfte aber langfristig eine intensivere Bewässerung notwendig werden.

Neben der Überprüfung von vorhandenen Berechnungsmodellen sollen im Rahmen der Untersuchungen spezielle Sorten mit einer ggf. besseren Toleranz gegenüber Trockenstress getestet werden.

Im Versuchsjahr 2010 konnten trotz massiver Austrocknung der unbewässerten Kontrolle in der ersten Kulturhälfte, dann aber einsetzender Starkniederschläge, keine Ertragseffekte einer Bewässerung beobachtet werden. Im Versuch 2011 fielen ausreichend Niederschläge, so dass keine Berechnungsgaben notwendig waren (LABER & BRENNER 2010 bzw. 2012).

Material und Methoden

In dem Versuch konnten 4 Sorten mit ähnlicher Reifezeit geprüft werden, wovon jeweils 2 seitens der Züchter als 'eher trockenstresstolerant', die anderen beiden als 'eher wasser- bzw. berechnungsbedürftig' eingeschätzt wurden (Tab. 1).

Tab. 1: Einbezogene Sorten

Sorte	Paulista	Livorno	Konza	Bomont
Herkunft	Seminis		Syngenta	
Trockenstresstoleranz ¹⁾	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein

¹⁾: Einschätzung/Angabe des Züchters

Die Aussaat erfolgte am 8. Juni mit jeweils 3 Reihen einer Sorte je Parzelle. Nach dem Auflaufen wurde am 18. Juni der Ausgang-Bodenwassergehalt bestimmt und mit der Verdunstungsbilanzierung (s. u.) begonnen.

Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen war der Bohnenbestand unkraut- und befallsfrei. Bei einer NA-Maßnahme kam es allerdings zu einem Herbizidschaden, der die Sorte 'Livorno' stark, die anderen Sorten nur leicht betraf. Da sich der Schaden bei der Sorte 'Livorno' nicht wieder 'verwuchs', konnte diese Sorte nicht ausgewertet werden.

Die Ernte der Buschbohnen erfolgte einheitlich am 23. August mit einer 2-reihig arbeitenden Bohnenpflückmaschine (Pixall 'Trac Pix'). Da hierbei die Ernterückstände nicht erfasst werden können, wurde die Aufwuchsmenge jeweils an einer weiteren Reihe durch Abschneiden unbeernteter Pflanzen bestimmt.

Versuche im deutschen Gartenbau
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie,
Abteilung Gartenbau, Dresden-Pillnitz
 Bearbeiter: Hermann Laber und Silvan Liebsch

2 0 1 2

Kultur- und Versuchsdaten:

- 8. Juni 2012: Einzelkornaussaat der Sorten, Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m²),
- 18. Juni: Bodenprobe: Ausgangs-Bodenwassergehalt (Tab. 4),
N_{min}-Vorrat (0-60 cm): 170 kg/ha ⇒ keine N-Düngung
- 23. Juli: Beginn der Blüte (BBCH 61)
- 6. Aug.: erste Hülse hat volle Länge (BBCH 71)
- 23. Aug.: Ernte
- Bodenart: s. Tab. 3, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74
- Versuchsanlage: Zweifaktorielle Spaltanlage (Haupteinheit Beregnung, Untereinheit Sorte) mit 4 Wiederholungen (Blöcken)
- Parzellengröße: Ernteparzelle: 5,0 m² (Ertrag) bzw. 2,5 m² (Ernterückstände)
- Beregnung: Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen (Gierhake Maschinenbau)

Neben einer '**Kontrolle**' (keine Beregnung) wurde in der Variante '**Intensiv**' nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010, FA-GM 2011) eine klimatische Wasserbilanz erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet. Allerdings sollte abweichend vom 'einfachen' Modellansatz (bei dem der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 100 % nFK aufgefüllt werden soll) der Boden nur bis ca. 90 % nFK auffüllt werden (auch PASCHOLD et al. empfehlen eine ähnliche Vorgehensweise, um einen Puffer für Niederschläge zu haben). Dabei wurde zunächst bis Blühbeginn (BBCH 61) nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, danach wurde entsprechend mit 0-60 cm Tiefe kalkuliert.

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration des Bohnenbestandes (ET_c) und damit der Klimatischen Wasserbilanz erfolgte nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010). Dabei wurde mit den entsprechenden kc-Werten für Buschbohnen gerechnet (vgl. Abb. 1), die auf die potentielle Verdunstung nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPENMAN}) ausgelegt sind (kc_{PENMAN}, FA-GM 2011).

In der Variante '**Minimiert**' wurde in Absprache mit den Geisenheimer Kollegen ab Blühbeginn (BBCH 61) mit um 0,2-Punkte geringeren kc-Werten gerechnet (vgl. Abb. 1).

Abweichend vom 'Geisenheimer Modell', das "nach starken Niederschlägen" mit einer Überschreitung der Feldkapazität (FK) die Bilanzierung für 2 Tage aussetzt und danach wieder mit FK 'startet' (PASCHOLD et al. 2010), wurde bei der eigenen Kalkulation die Nutzung der über die FK hinausgehenden Wassermenge (langsam bewegliches Sickerwasser) dadurch eingerechnet, dass sich der Boden auf bis zu 105 % nFK auffüllen konnte und nur die darüber hinausgegangene Niederschlagsmenge als versickert angenommen wurde.

Parallel wurde die Verdunstung/Wasserbilanz mit dem vom Deutschen Wetterdienst angebotenen Modul 'Agrowetter Beregnungsberatung' berechnet, dass sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' orientiert. Allerdings wird hier mit der gegenüber der ET_{pPENMAN} deutlich niedrigeren FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET₀) gerechnet. Seit Beginn der Saison 2012 wird diese ET₀ allerdings mit einem windabhängigen Faktor 'korrigiert' (JANSSEN 2012), so dass sie weniger stark von ET_{pPENMAN} abweicht.

Im Falle einer Überschreitung der FK wird bei diesem Modell die Bilanzierung ebenfalls nicht ausgesetzt, sondern die Versickerung in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften kalkuliert (AGROWETTER 2009). Eine Besonderheit von 'Agrowetter' ist die Berechnung einer aktuellen Verdunstung (ET_{c adj}), die im Falle einer nicht ausreichenden Wasserversorgung des Bestandes unter ET_c liegt (JANSSEN 2010). Damit kann mit 'Agrowetter' auch für die Varianten 'Minimiert' und 'Kontrolle' eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden.

Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Berechnungsbeginn (65 % bis BBCH 61, danach 45 %) einheitlich auf 60 % geändert, die maximale Durchwurzelungstiefe wurde von 50 cm (Voreinstellung) auf 60 cm erhöht.

Bei der Berechnung greift 'Agrowetter' auf die ET_0 -Werte der auszuwählenden nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurück, in diesen Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche Topographie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicher Weise die ET_{PENMAN} -Verdunstungswerte dieser Station zur Verfügung gestellt.

Die Niederschläge wurden 'vor Ort' mit einer Wetterstation des Versuchsbetriebes erfasst. Die so ermittelten Niederschlagswerte wurden auch bei der 'Agrowetter'-Berechnung zugrunde gelegt. Generell geben die dargestellten Niederschlags- und Verdunstungswerte sowie Bodenwassergehalte den Wert bzw. Zustand am Ende des angegebenen Tages (24:00 Uhr) wieder.

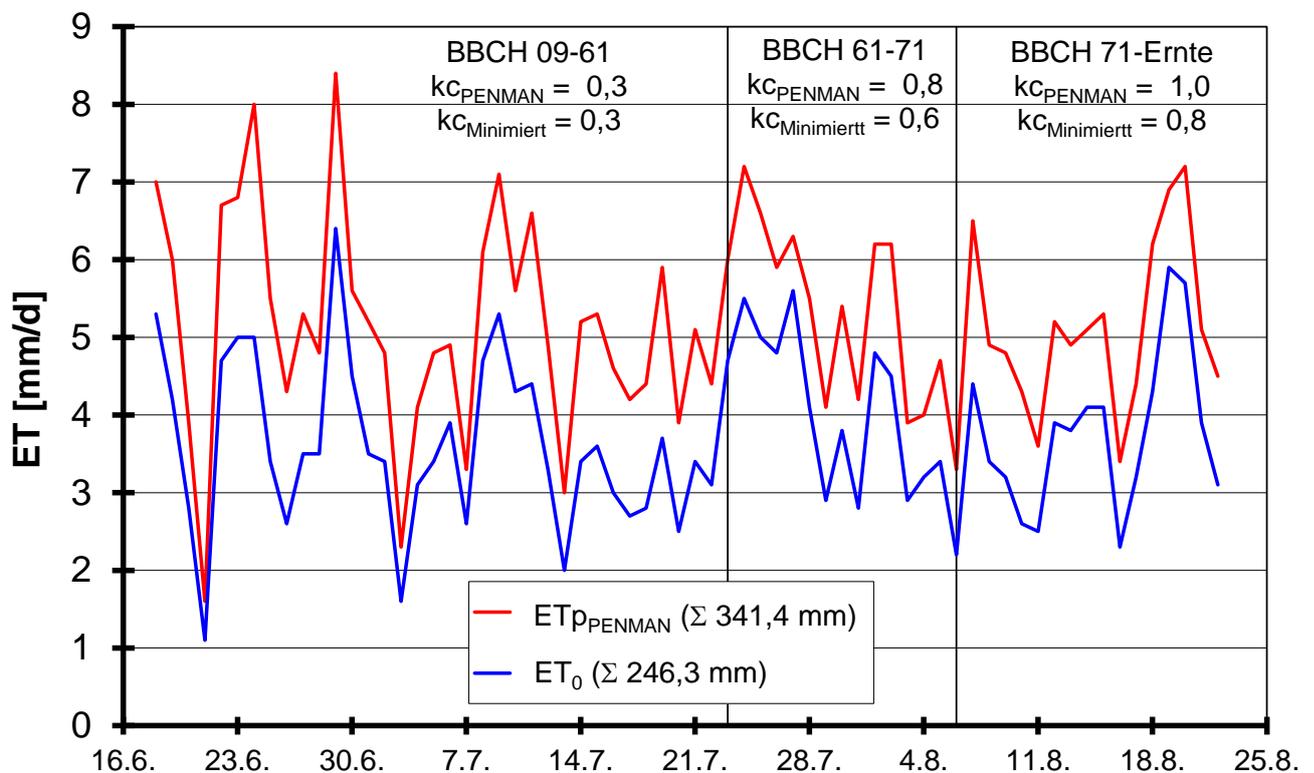


Abb. 1: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PENMAN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz

Die Beregnung der entsprechenden Parzellen (Haupteinheit) erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt zumeist nur 4 mm ausgebracht, so dass bis zu 6 Überfahrten pro Beregnungsgabe erforderlich waren. Die ausgebrachte Beregnungsmenge wurde jeweils mit Hilfe von bodennah aufgestellten Regenmessern überwacht.

Während der Kulturzeit wurden Bodenproben im 30 cm-Raster bis 60 bzw. 90 cm Tiefe entnommen. Dazu wurden in jeder Haupteinheit in 2 der 4 Sorten je eine Bodenprobe mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60, ggf. 60-90 cm) gezogen, so dass je Variante und Tiefe eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 1000 bis 1500 g, je nach Bohrstock bzw. Tiefe) wurde durch Trocknen bei 105°C der gravimetrische Bodenwassergehalt bestimmt. Die Umrechnung in einem volumetrischen Bodenwassergehalt erfolgte mit einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³.

Ergebnisse

Nach einem Winter mit ausreichenden Niederschlägen (117 mm Niederschlag vom 1. November bis 4. Februar) wurde am 5. Februar die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ wurde als Mittel der mittlerweile vorliegenden 3 Untersuchungen eine FK von 27,3 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 26,1 Vol.-% (30-60 cm), im Mittel 26,7 Vol.-% errechnet (Tab. 4).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4, Rohdichte $1,5 \text{ g/cm}^3$) mit 30 Vol.-% eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Todwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 10,7 Vol.-% analog reduziert, so dass sich eine nFK von 16 Vol.-% errechnet (Kartieranleitung 18 Vol.-% nFK).

Kurz nach dem Auflaufen der Bohnen (BBCH 09) wurde Mitte Juni ein Ausgangsbodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 77 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis Blühbeginn 135 mm Niederschlag. Gleichzeitig bestand mit einer $ET_{pPENMAN}$ von 179,6 mm (durchschnittlich 5,1 mm/d, vgl. Abb. 1) aber auch ein hoher Verdunstungsanspruch. Auf Grund des geringen k_c -Wertes von 0,3 für diese Wachstumsphase berechneten beide Kalkulationsmodelle aber nur eine ET_c von rund 50 mm, so dass sich nach beiden Modellen eine Sickerwasserbildung von über 60 mm ergibt (Abb. 2 u. 3, Tab. 5a u. b).

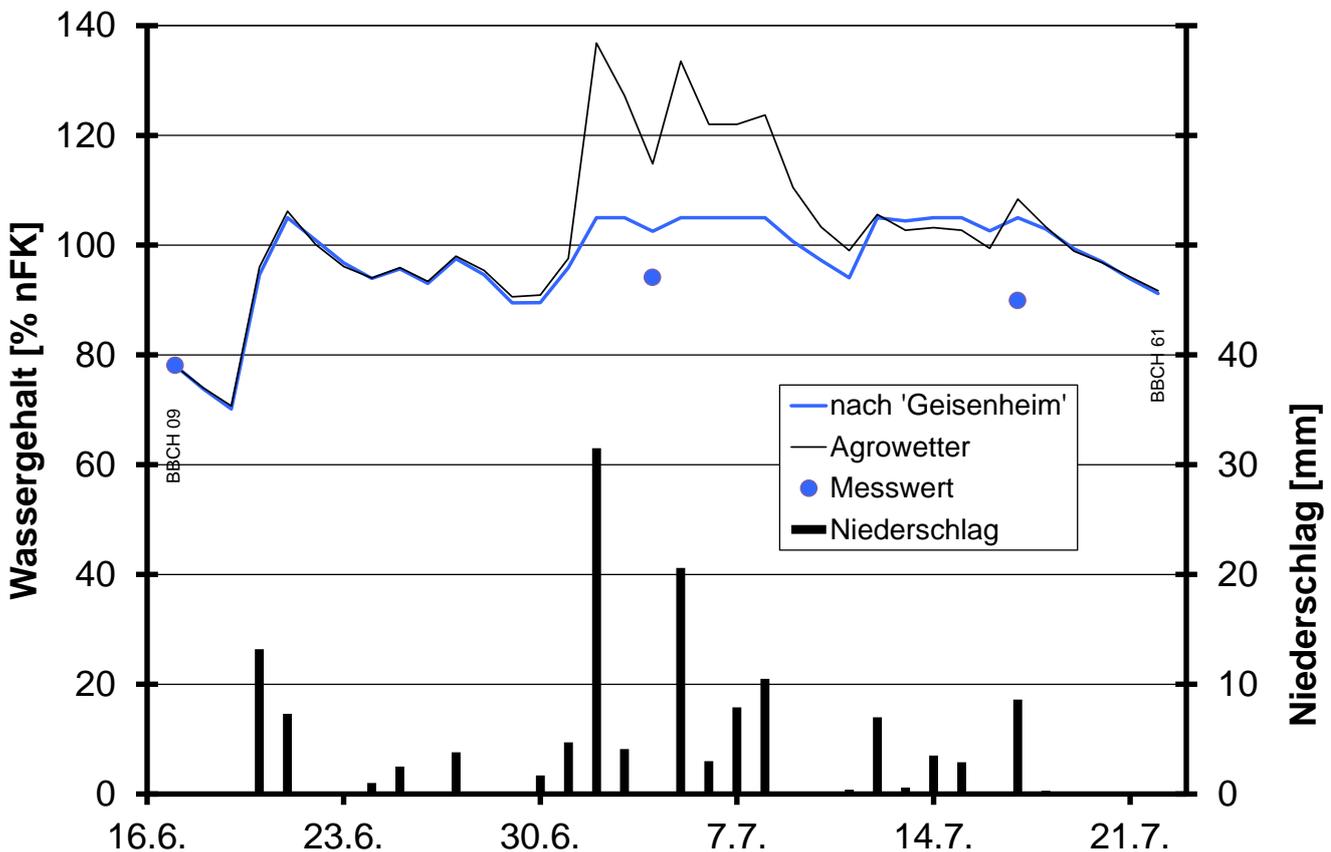


Abb. 2: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis Blühbeginn nach 'Geisenheim' ($ET_{pPENMAN} \times k_{cPENMAN}$) bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten)

In der zweiten Kulturhälfte herrschte mit einer durchschnittlichen $ET_{pPENMAN}$ von 5,2 mm/d ($\Sigma 161,8 \text{ mm}$) weiterhin eine hohe Verdunstung. Bei dann aber nur noch knapp 55 mm Niederschlag und steigenden ET_c -Werten war in der Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' insgesamt eine Bewässerung von 100 mm notwendig (Abb. 3). In der Variante 'Minimiert', bei der sich auf Grund geringer angesetzter k_c -Werte eine geringere ET_c errechnete, mussten nur 68 mm Zusatzwasser gegeben werden (vgl. Abb. 4).

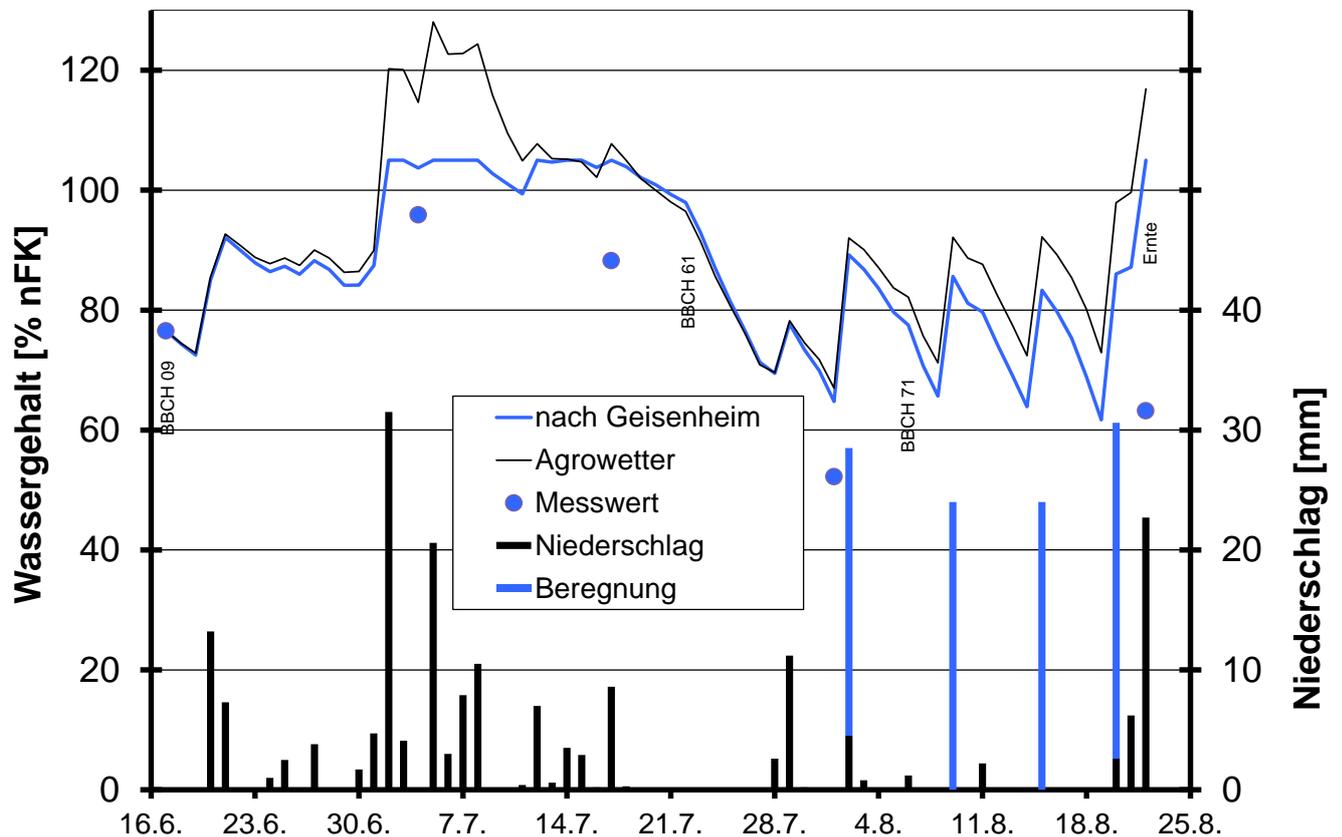


Abb. 3: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' ($ET_{pPENMAN} \times KC_{PENMAN}$) bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' eine ET_c von 200,4 mm. Obgleich 'Agrowetter' ET_c auf Basis der hier um Faktor 1,4 (vgl. Tab. 5a) geringeren FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) berechnet, kam das Modell mit 181,3 mm zu einer nur um Faktor 1,11 geringeren ET_c , was auf die 'Windkorrektur' zurückzuführen ist.

Entsprechend den ähnlichen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' bei beiden Modellen sehr ähnlich (Abb. 2 u. 3). Nur die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsberechnung führten zwischenzeitlich zu einem unterschiedlichen Verlauf: Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinaus gehende Menge von insgesamt 60,9 mm als versickert angenommen wurde) und danach nur noch die Verdunstung zu einer Abnahme der Bodenfeuchte beitrug, kann sich nach dem 'Agrowetter-Ansatz' der Boden auch höher auffüllen, dann aber durch Verdunstung und Versickerung schneller das Wasser wieder verlieren. Mit insgesamt 67,5 mm berechnete 'Agrowetter' aber eine Versickerung in ähnlicher Größenordnung wie der eigene Modellansatz (Tab. 5b). Entsprechend der berechneten Versickerung wies die Bodenschicht 60-90 cm zu Kulturrende einen höheren Wassergehalt auf als zu Kulturbeginn (Tab. 4).

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt von beiden Modellen zu allen Beprobungsterminen überschätzt (Abb.2 u. 3). Auch in den bisherigen beiden Versuchen war dies der Fall (LABER & BRENNER 2010 u. 2012). Hierbei muss man allerdings berücksichtigen, dass die kc -Werte beim 'Geisenheimer Modell', die ursprünglich aus der Relation zwischen der im Lysimeter-Versuch gemessenen ET_c und der ET_p errechnet wurden, im Laufe des 'Evaluierungsprozesses' häufig gesenkt wurden, wenn in Feldversuchen mit entsprechend geringeren Beregnungsgaben gleich hohe oder (wie im

Fälle von Buschbohnen) sogar höhere Erträge erzielt wurden (KLEBER 2012; vgl. auch PASCHOLD & KLEBER 2004 u. 2005).

Die Überschätzung der Bodenwassergehalte und damit Unterschätzung der ET_c könnte in der ersten Kulturhälfte noch deutlich größer gewesen sein, als dies die Abb. 2, 3 (und 4) andeuten, da sich die Bodenfeuchte nach den ergiebigen Niederschlägen durch die (angenommene) Sickerwasserbildung auf FK-Niveau 'einpendelt'. Ein gegenüber der Modellberechnung tatsächlich deutlich trockenerer Boden würde sich bei entsprechenden Niederschlägen ebenfalls auf FK-Niveau auffüllen, so dass sich unter derartigen Bedingungen Modell und Realität angleichen. Im Versuchsjahr 2010 mit bis zur Blüte trockenen Bedingungen wurde eine große Diskrepanz zwischen kalkulierte und tatsächlichem Bodenwassergehalt gefunden (LABER & BRENNER 2010).

Für die nur moderat berechnete Variante 'Minimiert' berechnete 'Agrowetter' Bodenwassergehalte von kurzzeitig unter 50 % nFK (Abb. 4). (Die Bemessung der Berechnung erfolgte aber nach der eigenen Berechnung, nach der es zu keiner Unterschreitung von 60 % nFK kam.) In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach dem Modell bis auf 20 % nFK aus; dieser Wert dürfte insofern relativ realistisch sein, da 'Agrowetter' wenige Tage später (Ernte) den tatsächlichen Bodenwassergehalt von 47 % nFK mit einem Wert von 44 % sehr gut prognostizierte.

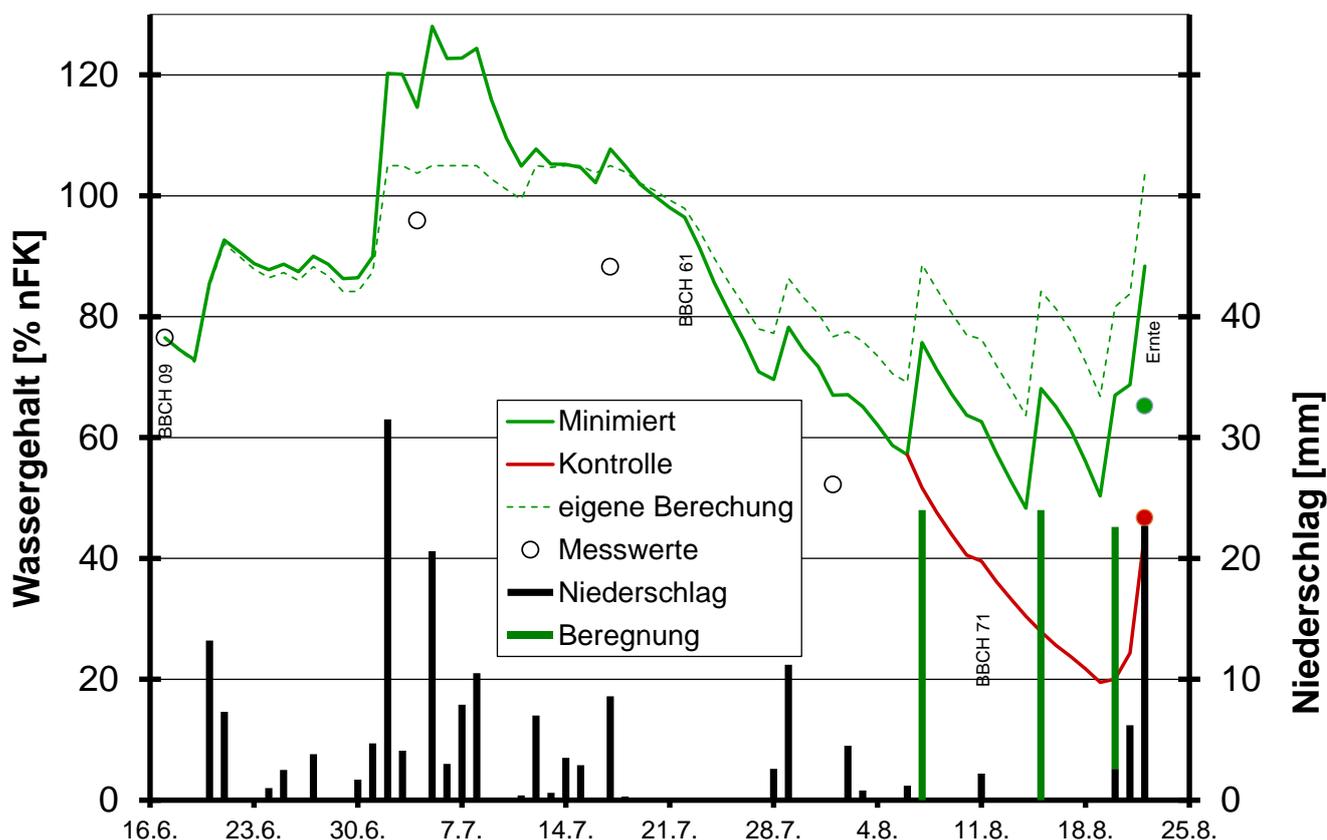


Abb. 4: Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Minimiert' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt

Trotz der offensichtlich massiven Austrocknung des Bodens in der 'Kontrolle' zeigten die Bohnen hier auch an den letzten trockenen Tagen vor der Ernte keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Bei der Ernte wurden dann aber signifikante Beregnungseffekte deutlich. (Mit Ausnahme des Harvest-Indexes wurden bei allen Parametern auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.) So wurde der FM-Ertrag durch eine Beregnung um gut 50 dt/ha bzw. um knapp 40 % gesteigert, wobei zwischen den Beregnungsvarianten 'Intensiv' und 'Minimiert' kein Unterschied zu verzeichnen war (Abb. 5). Damit wurde in der Variante 'Minimiert' je mm Wassergabe ein Mehrertrag von 75 kg/ha realisiert, während dieser in der Variante 'Intensiv' nur 52 kg/ha betrug.

Die Sorten reagierten jeweils gleichartig positiv auf die Bewässerungsgaben (= keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte), so dass die Einschätzung der Züchter, dass sich bestimmte Sorte durch eine besondere Trockentoleranz auszeichnen, hier (mit allerdings nur 3 im Versuch verbliebenen Sorten) nicht untermauert werden konnte.

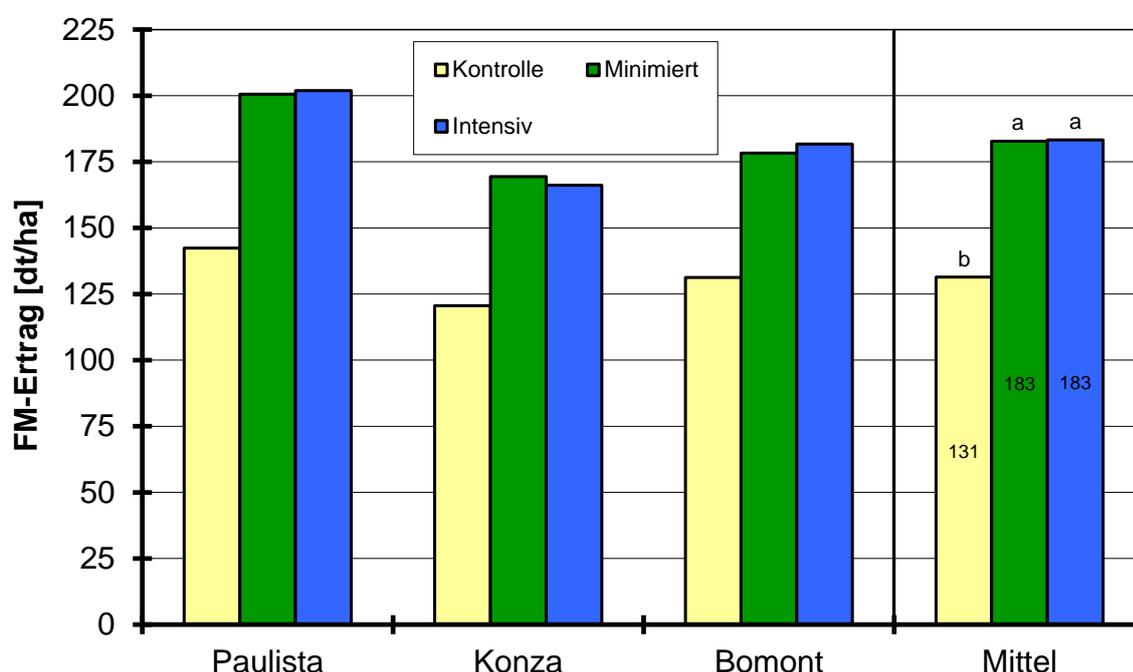


Abb. 5: Frischmasse-Ertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte
($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 17,6 dt/ha)

PFLEGER & RÖBLER (2009) fanden in einer 9-jährigen Sortenversuchsserie mit/ohne Bewässerung im Mittel von zumeist 12 jährlich getesteten Sorten Ertragszuwächse durch eine Beregnung (40 bis 95 mm) von 10 bis 114 dt/ha bzw. 6 bis 139 %. Bezogen auf die Beregnungsmenge betrug der Mehrertrag 21 bis 126 kg/ha je mm. Die Autoren deuteten an, dass die Sorten unterschiedlich auf die Zusatzbewässerung reagierten, gaben aber leider nicht an, in wie weit dieses statistisch abgesichert ist. Ähnlich wie im aktuellen Versuch zählte die Sorte 'Paulista' (der vom Züchter eine gewisse Trockenstresstoleranz nachgesagt wird) sowohl unter unberegneten wie beregneten Bedingungen mit zu den ertragsstärksten Sorten.

Der Trockensubstanzgehalt der Hülsen (ein Kriterium für die (Über)Reife von Buschbohnen) fiel in der unberegneten Kontrolle mit 12,9 % deutlich höher aus als in den beregneten Varianten (10,7 bzw. 10,0 %) (Tab. 2). Wie zu erwarten wurde auch der gesamte Aufwuchs durch die Beregnung beeinflusst (Abb. 6). Obgleich hier die Sorten 'augenscheinlich' etwas unterschiedlich reagierten, war auch hier keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte zu verzeichnen.

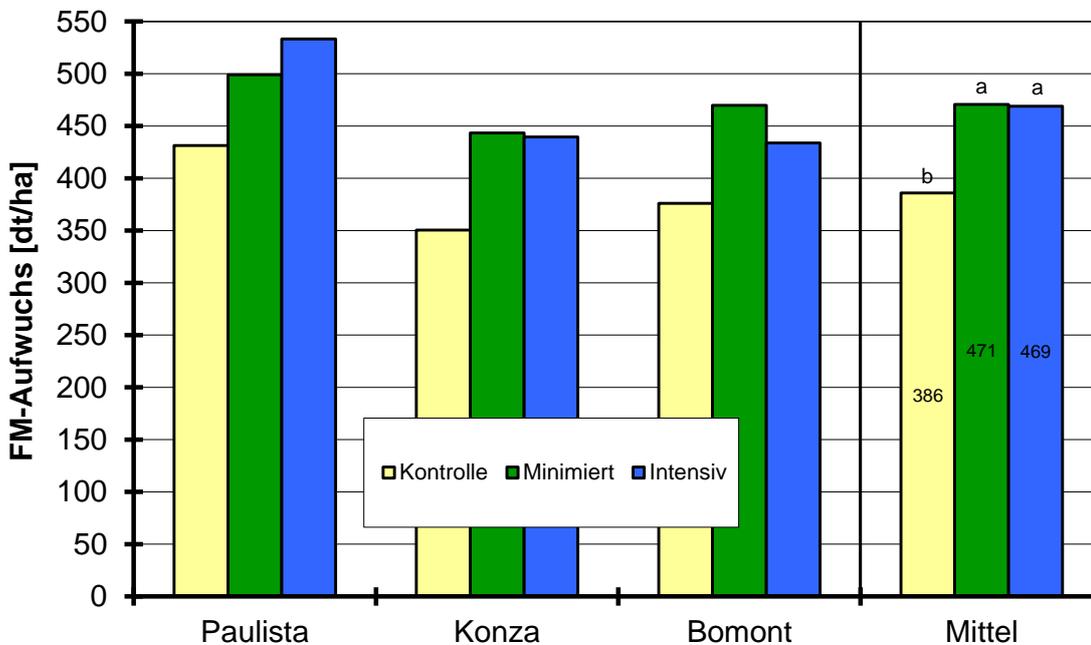


Abb. 6: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 53,8 dt/ha)

Die im Vergleich zum FM-Ertrag etwas geringere Zunahme der Aufwuchsmenge bei Zusatzbewässerung spiegelt sich auch im Harvest-Index wieder, der in der Kontrolle mit 34,7 % etwas geringer ausfiel als in den bewässerten Varianten (Abb. 7).

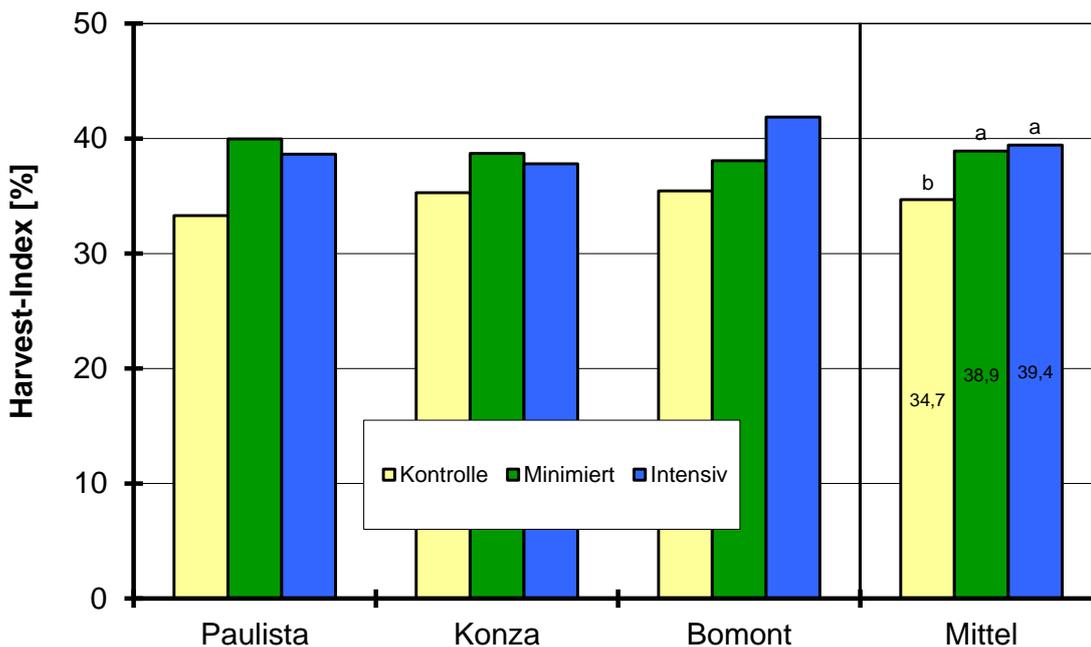


Abb. 7: Harvest-Index (Anteil Erntegut am gesamten Aufwuchs) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseff.: 2,1 %)

Aus den Daten von PASCHOLD & KLEBER (2004) errechnet sich bei einer 'großzügigen' Bewässerung (kc-Werte: BBCH 09: 0,5 (ab 5-Blatt-Stadium 0,8); BBCH 61: 1,0; BBCH 71: 1,2) ein Harvest-Index von 41,5 %, der bei minimierter Bewässerung (0,3; 0,6; 0,8) auf (ungewöhnlich hohe) 53,3 % anstieg. Allerdings sind diese Ergebnisse nur bedingt mit den eigenen vergleichbar, insbesondere da die Bohnen in den Versuchen von PASCHOLD & KLEBER durch (mehrmalige?) Handpflücke geerntet wurden, während im aktuellen Versuch mit maschineller Ernte auch unterschiedlich große Ernteverluste (nicht gepflückte Hülsen, aber auch von der Windsichtung erfasste Hülsen) aufgetreten sein könnten.

Fazit:

Die nahezu identischen Erträge der Variante 'Intensiv' (bewässert nach aktuellen Geisenheimer kc-Werten) und 'Minimiert' deuten darauf hin, dass die Buschbohnen zumindest in der zweiten Kulturhälfte auch bei der Variante 'Minimiert' ausreichend mit Wasser versorgt worden sind. Allerdings muss beachtet werden, dass durch die relativ hohen Niederschläge in der ersten Kulturhälfte die zweite Kulturhälfte mit einem hohen Bodenwasservorrat startete, was bei deutlich geringeren Niederschlägen in der ersten Kulturhälfte (oder auch einen Boden mit deutlich geringerer Wasserkapazität) vermutlich nicht der Fall gewesen wäre.

Literatur:

- AGROWETTER 2009: Modellbeschreibung. Online-Hilfe zur Agrowetter Berechnungsberatung. auch www.dwd.de (Stand 30.01.2009)
- BGR 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.], Schweizerbart, Stuttgart, 5. Aufl.
- FA-GM 2011: Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2011 - für Penmann-Verdunstung. Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Gemüsebau. www.fa-gm.de (Stand 27.06.2011)
- JANSSEN, W. 2012: Mündliche/schriftliche Mitteilungen zum aktuellen Berechnungsmodus bei der 'Agrowetter Berechnungsberatung'. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- JANSSEN, W. 2010: Schriftliche Mitteilung zur Berechnung der Sickerwassermenge und der Verdunstungsberechnung bei der 'Agrowetter Berechnungsberatung'. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- KLEBER, J. 2012: Mündliche Erläuterungen zur Bestimmung der kc-Werte beim 'Geisenheimer Modell'. Versuchsansteller-Besprechung zur "Klimatischen Wasserbilanz", Erfurt, 24.01.2012
- LABER, H. und S. BRENNER 2012: Ergiebige Niederschläge deckten Wasserbedarf von Buschbohnen; Bodenwassergehalte durch Modelle aber allgemein überschätzt. www.hortigate.de
- LABER, H. und S. BRENNER 2010: Keine Bewässerungswirkung wegen Regens; Modell bildet zwischenzeitlich extrem niedrigen Bodenwassergehalt aber nicht ab. www.hortigate.de
- PASCHOLD, P.-J. und J. KLEBER 2004: Mit weniger Wasser mehr Buschbohnen. *Gemüse* **40** (4), S. 18- 20
- PASCHOLD, P.-J. und J. KLEBER 2005: Geisenheimer Bewässerungssteuerung bei Buschbohne. www.hortigate.de
- PASCHOLD, P.-J., J. KLEBER und N. MAYER 2010: Geisenheimer Bewässerungssteuerung. Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Gemüsebau. www.fa-gm.de (Stand 4.5.2010)
- PFLEGER, I. und U. RÖßLER 2009: Wie viel Wasser brauchen Buschbohnen? *Gemüse* **45** (4), S. 14-16 (inkl. ergänzende Grafiken)

Tab. 2: Erträge und Aufwuchsmengen der verschiedenen Varianten

Bewässerung Sorte	Kontrolle			Minimiert			Intensiv			GD _{0,05}
	Paulista	Konza	Bomont	Paulista	Konza	Bomont	Paulista	Konza	Bomont	
FM-Ertrag [dt/ha]	142	121	131	201	169	178	202	166	182	n.s.
Mittel	131			183			183			17,6
Wassernutzung¹⁾				75 kg/(ha x mm)			52 kg/(ha x mm)			
TS-Gehalt [%]	11,8	13,7	13,2	10,3	11,1	10,8	9,9	10,1	9,9	n.s.
Mittel	12,9			10,7			10,0			1,1
FM-Aufwuchs [dt/ha]	431	351	376	499	443	470	533	440	434	n.s.
Mittel	386			471			469			53,8
Harvest-Index [%]²⁾	33	35	35	40	39	38	39	38	42	n.s.
Mittel	35			39			39			2,1

GD: Grenzdifferenz ($\alpha < 0,05$); n.s.: nicht signifikant;

¹⁾: Mehrertrag je mm Bewässerung

²⁾: Anteil Erntegut am gesamten FM-Aufwuchs (FM-Ertrag ÷ FM-Aufwuchs)

Tab. 3: Textur und Bodenart des Versuchsstandortes

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
0-30 cm	14,1	35,7	50,2	Stark lehmiger Sand (SI4)
30-60 cm	14,2	38,2	47,6	Stark lehmiger Sand (SI4)
60-90 cm	16,1	30,3	53,6	Stark lehmiger Sand (SI4)
0-60 cm	14,2	37,0	48,9	Stark lehmiger Sand (SI4)

Tab. 4: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [mm] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
5. Febr. ³⁾		alle	83	78	83			
Mittel ⁴⁾		alle	82	78	85	100	100	100
17. Jun ⁵⁾	09	alle	71	67	67	78	75	65
04. Jul ⁵⁾		alle	79	77		94	98	
17. Jul ⁵⁾		alle	77	72		90	87	
01. Aug ⁵⁾		alle	51	63		36	68	
22. Aug ⁵⁾		Kontrolle	71	57	69	77	49	75
		Minimiert	71	59	73	77	54	82
		Intensiv	59	53	70	53	41	75

¹⁾: Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³;

²⁾: zugrunde gelegter Totwassergehalt: 10,9 Vol.-% (0-30 cm), 10,5 Vol.-% (30-60 cm), 11,3 Vol.-% (60-90 cm)

³⁾: aktuelle Bestimmung der FK;

⁴⁾: Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2012);

⁵⁾: Die Proben wurden jeweils am frühen Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder

Tab. 5a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]			
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET _{PEN} × kc _{PENMAN} Intensiv	Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PENMAN} Intensiv Minimiert Kontrolle		
09-61	125,7	179,6	1,44	53,9	48,8		
61-71	58,0	76,2	1,33	61,0	55,5	55,5	55,5
71-Ernte	62,6	85,6	1,39	85,6	77,0	74,5	48,8
09-Ernte	246,3	341,4	1,40	200,4	181,3	178,8	153,1

Tab. 5b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾			
		Intensiv	Minimiert	Geisenheim ET _{PEN} × kc _{PENMAN} Intensiv	Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PENMAN} Intensiv Minimiert Kontrolle		
09-61	135,3	0	0	60,9	67,5		
61-71	19,4	24	0	0	0,3	0,3	0,3
71-Ernte	35,0	76	68	0	2,3	0	0
09-Ernte	189,7	100	68	60,9	70,1	67,8	67,8

¹⁾: FAO Gras-Referenzverdunstung; ²⁾: Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras);

³⁾: Mittelwerte der täglichen Quotienten;

⁴⁾: potentielle Evapotranspiration des Bestandes berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell';

⁵⁾: aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter';

⁶⁾: windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012); ⁷⁾: aus der Bodenschicht 0-60 cm