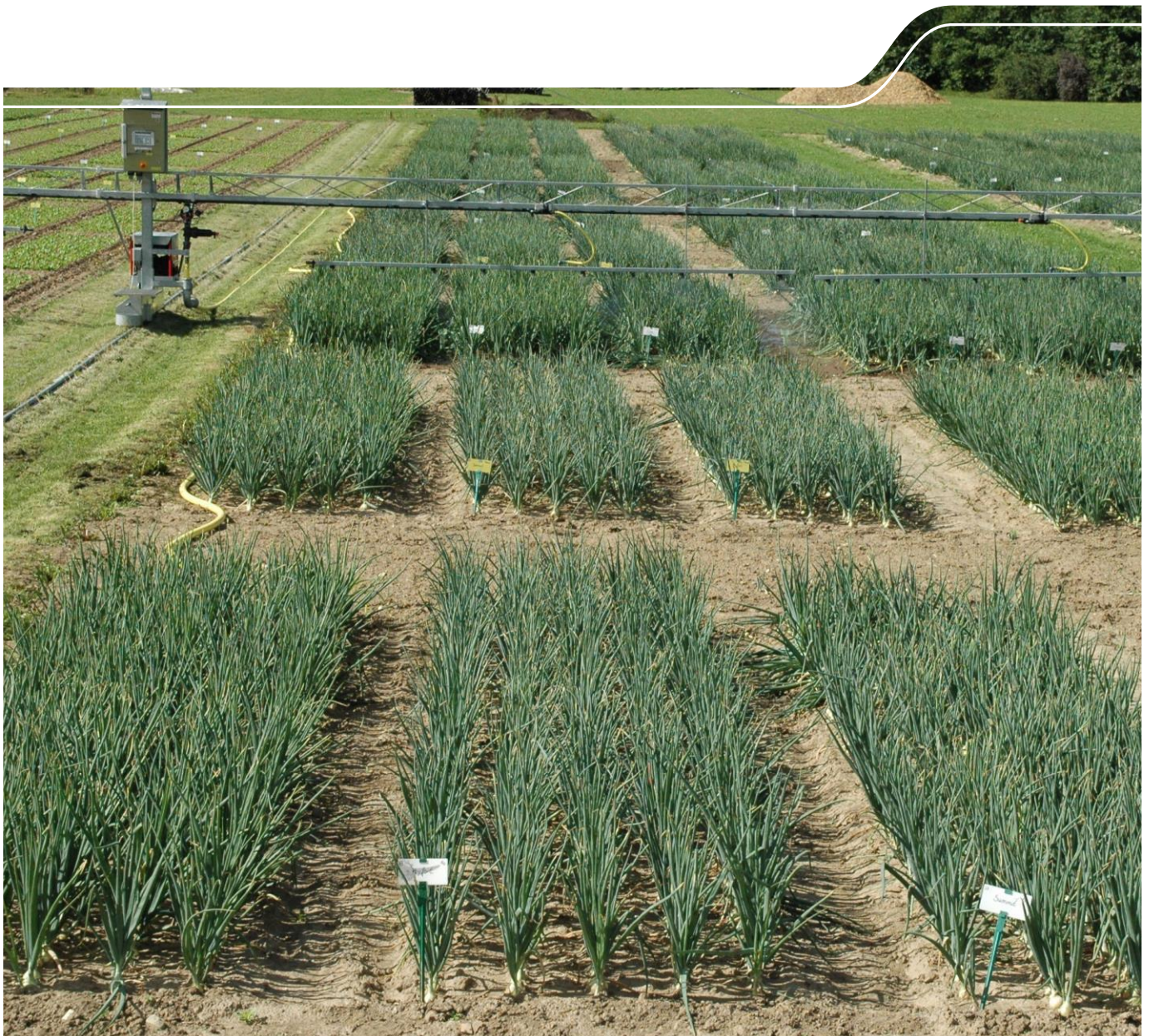


Bewässerungs- und Sorten- effekte bei Feldgemüse

Schriftenreihe, Heft 23/2015



Untersuchungen zur Bewässerungssteuerung und zur Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte bei verschiedenen Feldgemüsearten vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels in Sachsen

Dr. Hermann Laber

Inhalt

1	Einführung	18
2	Versuche mit Markerbsen	19
	Abstract	19
2.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	19
2.2	Material und Methoden	19
2.3	Ergebnisse	24
2.3.1	Versuchsjahr 2010.....	24
2.3.2	Versuchsjahr 2011.....	31
2.3.3	Versuchsjahr 2012.....	39
2.3.4	Versuchsjahr 2013.....	48
2.3.5	Versuchsjahr 2014.....	51
2.3.6	Zusammenfassung der fünf Versuchsjahre	59
3	Versuche mit Buschbohnen	68
	Abstract	68
3.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	68
3.2	Material und Methoden	68
3.3	Ergebnisse	74
3.3.1	Versuchsjahr 2010.....	74
3.3.2	Versuchsjahr 2011.....	80
3.3.3	Versuchsjahr 2012.....	84
3.3.4	Versuchsjahr 2013, Frühsommersatz.....	90
3.3.5	Versuchsjahr 2013, Spätsommersatz.....	97
3.3.6	Versuchsjahr 2014.....	104
3.3.7	Zusammenfassung der fünf Versuchsjahre	111
4	Versuche mit Speisezwiebeln	123
	Abstract	123
4.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	123
4.2	Material und Methoden	124
4.3	Ergebnisse	127
4.3.1	Versuchsjahr 2010.....	127
4.3.2	Versuchsjahr 2011.....	136
4.3.3	Versuchsjahr 2012.....	143
4.3.4	Versuchsjahr 2014.....	153
4.3.5	Zusammenfassung der vier Versuchsjahre	162
5	Versuche mit Spinat	172
	Abstract	172
5.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	172
5.2	Material und Methoden	172
5.1	Ergebnisse	175
5.1.1	Versuchsjahr 2010.....	175
6	Versuche mit Weißkohl	183
	Abstract	183
6.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	183
6.2	Material und Methoden	184
6.3	Ergebnisse	188
6.3.1	Versuchsjahr 2012.....	188
6.3.2	Versuchsjahr 2013.....	199
6.3.3	Versuchsjahr 2014.....	212
6.3.4	Zusammenfassung der drei Versuchsjahre	224
	Literaturverzeichnis	230

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2010].....	24
Abbildung 2:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2010].....	25
Abbildung 3:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2010].....	26
Abbildung 4:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2010].....	27
Abbildung 5:	Frischmasseertrag (Rohware) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 13,7 dt/ha) [Erbsenversuch 2010].....	28
Abbildung 6:	Tenderometerwert der Erbsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen mit jeweils 3 Messwiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 16,5) [Erbsenversuch 2010].....	28
Abbildung 7:	Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Erbsenversuch 2010].....	29
Abbildung 8:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 71,2 dt/ha; Bewässerung \times Sorte: 80,4 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2010].....	29
Abbildung 9:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 2,2 %; Bewässerung \times Sorte: 2,9 % = I) [Erbsenversuch 2010].....	30
Abbildung 10:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011].....	32
Abbildung 11:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2011].....	33
Abbildung 12:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011].....	33
Abbildung 13:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis ($ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$ bzw. $ET_0 \times k_{CFAO}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011].....	34
Abbildung 14:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011].....	35
Abbildung 15:	Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 21,3 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2011].....	36
Abbildung 16:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 29,1 dt/ha; Bewässerung \times Sorte: 42,7 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2011].....	37
Abbildung 17:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,9 %; Bewässerung \times Sorte: 3,6 % = I) [Erbsenversuch 2011].....	37
Abbildung 18:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten 'Intensiv' und 'Minimiert' bis zum 6-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012].....	39
Abbildung 19:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2012].....	40

Abbildung 20:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012].....	40
Abbildung 21:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN\ mini}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012].....	42
Abbildung 22:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012].....	42
Abbildung 23:	Blühbeginn (Tage nach Aussaat) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 1,0 Tage = I) [Erbsenversuch 2012]	43
Abbildung 24:	Tenderometerwert in Abhängigkeit von Erntetermin, Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 10,7 = I) [Erbsenversuch 2012]	44
Abbildung 25:	Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 25,6 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012].....	45
Abbildung 26:	Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) der Blöcke C und D in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 29,7 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012]	45
Abbildung 27:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 87,4 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012]	46
Abbildung 28:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 3,7 % = I) [Erbsenversuch 2012]	46
Abbildung 29:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 6-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\ reduziert}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2013].....	48
Abbildung 30:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2013].....	49
Abbildung 31:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Reduziert' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\ reduziert}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2013].....	49
Abbildung 32:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2014].....	51
Abbildung 33:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Minimiert' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\ minimiert}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014].....	52
Abbildung 34:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\ minimiert}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014].....	52
Abbildung 35:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante '66 % Minimiert' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\ 66\ \% \ mini}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014]	53
Abbildung 36:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014].....	54
Abbildung 37:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Erbsenversuch 2014] ..	54
Abbildung 38:	Tenderometerwert in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen mit jeweils 3 Messwiederholungen); $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 10,3; Bewässerung \times Sorte: 11,4 = I) [Erbsenversuch 2014]	55
Abbildung 39:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 12,6 = I) [Erbsenversuch 2014]	56
Abbildung 40:	Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 8,1 dt/ha) [Erbsenversuch 2014].....	56

Abbildung 41:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 39,0 dt/ha) [Erbsenversuch 2014].....	57
Abbildung 42:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,4 %; Bewässerung x Sorte: 2,8 % = I) [Erbsenversuch 2014]	57
Abbildung 43:	Potentielle Evapotranspiration des Erbsenbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (vgl. Tabelle 16) (*: In den Versuchen 2013 und 2014 wurde der Beginn des BBCH-Stadiums 69 nicht erfasst. Damit konnte nachträglich die ET_c nicht auf Basis der k_{CPEN} -Werte berechnet werden.)	60
Abbildung 44:	Potenzielle Evapotranspiration des Erbsenbestandes ($ET_c = ET_0 \times k_{CFAO \text{ minimiert}}$) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren	60
Abbildung 45:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO \text{ minimiert}}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der stärker bewässerten Varianten [Erbsenversuche]	62
Abbildung 46:	Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der stärker bewässerten Varianten [Erbsenversuche]	62
Abbildung 47:	Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Marktertrag (korrigiert auf TW 120) in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Erbsenversuche]	63
Abbildung 48:	Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Erbsenversuche]	64
Abbildung 49:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Erbsenversuche]	65
Abbildung 50:	Mehrertrag (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) der bewässerten Varianten gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014] = leeres Symbol) [Erbsenversuche]	65
Abbildung 51:	Relativer Ertrag ('Kontrolle' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014] = leeres Symbol) [Erbsenversuche]	66
Abbildung 52:	Relativer Ertrag ('Kontrolle' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{CFAO \text{ minimiert}}$) (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014] = leeres Symbol) [Erbsenversuche]	66
Abbildung 53:	Frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{CFAO \text{ minimiert}}$; 2012 war in der 'Intensiv'-Variante keine Ermittlung des Ernteindex möglich) [Erbsenversuche]	67
Abbildung 54:	Niederschlags- und Beregnungsmengen sowie berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2010]	74
Abbildung 55:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2010]	75
Abbildung 56:	Niederschlags- und Beregnungsmengen sowie berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2010]	75
Abbildung 57:	Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 4 mm Beregnung auch in der 'Kontrolle') [Bohnenversuch 2010]	77
Abbildung 58:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]	77
Abbildung 59:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]	78

Abbildung 60:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]	78
Abbildung 61:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2011]	81
Abbildung 62:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2011]	82
Abbildung 63:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ ('PENMAN') bzw. $ET_0 \times k_{CFAO}$ ('FAO') sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2011]	82
Abbildung 64:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis Blühbeginn auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2012]	84
Abbildung 65:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2012]	85
Abbildung 66:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]	85
Abbildung 67:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Minimiert' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN\ mini}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]	87
Abbildung 68:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]	87
Abbildung 69:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 17,6 dt/ha) [Bohnenversuch 2012]	88
Abbildung 70:	Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,1 %) [Bohnenversuch 2012]	88
Abbildung 71:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 53,8 dt/ha) [Bohnenversuch 2012]	89
Abbildung 72:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 2,1 %) [Bohnenversuch 2012]	89
Abbildung 73:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2013a]	91
Abbildung 74:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2013a]	92
Abbildung 75:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013a]	92
Abbildung 76:	Niederschlags- und Berechnungsmengen (theoretisch) und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ [Bohnenversuch 2013a]	93
Abbildung 77:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 10 mm Beregnung auch in der 'Kontrolle') [Bohnenversuch 2013a]	94
Abbildung 78:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 30,3 dt/ha) [Bohnenversuch 2013a]	94
Abbildung 79:	Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mischproben über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2013a]	95
Abbildung 80:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 39,6 dt/ha) [Bohnenversuch 2013a]	95

Abbildung 81:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2013a]	96
Abbildung 82:	Niederschlags- bzw. Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]	98
Abbildung 83:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2013b]	98
Abbildung 84:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]	99
Abbildung 85:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]	100
Abbildung 86:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 13,1 dt/ha) [Bohnenversuch 2013b]	101
Abbildung 87:	Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 0,7 %) [Bohnenversuch 2013b]	101
Abbildung 88:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 28,8 dt/ha) [Bohnenversuch 2013b]	102
Abbildung 89:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 3,1 % = I) [Bohnenversuch 2013b]	102
Abbildung 90:	Trockenmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 4,2 dt/ha) [Bohnenversuch 2013b]	103
Abbildung 91:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2014]	105
Abbildung 92:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2014]	105
Abbildung 93:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: die Niederschläge in Höhe von 4,8 mm fielen tatsächlich am 08.07. zwischen 02:00 und 03:00 Uhr. Sie wurden hier auf den 07.07. datiert, weil die am Morgen des 08.07. durchgeführte Bodenbeprobung den Wassergehalt am Ende des Vortages wiedergeben soll) [Bohnenversuch 2014]	106
Abbildung 94:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2014]	107
Abbildung 95:	Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2014]	108
Abbildung 96:	Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,5 %) [Bohnenversuch 2014]	108
Abbildung 97:	Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 46,4 dt/ha) [Bohnenversuch 2014]	109
Abbildung 98:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,1 %) [Bohnenversuch 2014]	109
Abbildung 99:	Trockenmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2014]	110
Abbildung 100:	Potentielle Evapotranspiration des Bohnenbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (k_{CPEN} : k_{C09-61} : 0,3; k_{C61-71} : 0,8; k_{C71-77} : 1,0; k_{CFAO} : k_{C09-61} : 0,4; k_{C61-71} : 1,1; k_{C71-77} : 1,4)	112
Abbildung 101:	Potenzielle Evapotranspiration des Bohnenbestandes ($ET_c = ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren	113

Abbildung 102:	Sickerwasserbildung der 'Intensiv'-Variante (aus der Bodenschicht 0-60 cm) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet auf Basis verschiedener Modelle zur Berechnung der Evapotranspiration der Bohnenbestände	114
Abbildung 103:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Bohnenversuche]	115
Abbildung 104:	Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Bohnenversuche]	115
Abbildung 105:	Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Hülseenertrag in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Bohnenversuche]	116
Abbildung 106:	Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Bohnenversuche]	117
Abbildung 107:	Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Bohnenversuche]	118
Abbildung 108:	Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Bohnenversuche]	118
Abbildung 109:	Mehrertrag der bewässerten Varianten (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge (Abzüglich der ggf. in der 'Kontrolle' verabreichten Wassergabe; Regression berechnet ohne Daten von PFLEGER et al. 2010) [Bohnenversuche]	119
Abbildung 110:	Relativer Ertrag ('Intensiv'- bzw. berechnete Variante = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von dem Bewässerungsdefizit gegenüber der 'Intensiv'- bzw. der berechneten Variante (Versuche v. PFLEGER et al. 2010 und PASCHOLD & KLEBER 2005) [Bohnenversuche]	120
Abbildung 111:	Relativer Ertrag ('Intensiv' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{CFAO}$) [Bohnenversuche]	121
Abbildung 112:	Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten; *: 8 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]	128
Abbildung 113:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2010]	129
Abbildung 114:	Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten)	129
Abbildung 115:	Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]	131
Abbildung 116:	Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]	131
Abbildung 117:	Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 23,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]	132
Abbildung 118:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2010]	133
Abbildung 119:	Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 3,5 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]	133
Abbildung 120:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung >70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 30,1 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]	134
Abbildung 121:	Nicht marktfähige Zwiebeln (in erster Linie Dickhälse) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2010]	134

Abbildung 122:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bei der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]	136
Abbildung 123:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2011]	137
Abbildung 124:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]	138
Abbildung 125:	Niederschlags- und Berechnungsmengen berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. $ET_0 \times k_{CFAO}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]	139
Abbildung 126:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' bzw. 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]	139
Abbildung 127:	Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 83,1 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]	140
Abbildung 128:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 54,6 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]	141
Abbildung 129:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 29,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]	141
Abbildung 130:	Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 4,1 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]	142
Abbildung 131:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]	144
Abbildung 132:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2012]	144
Abbildung 133:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]	146
Abbildung 134:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN \text{ minimiert}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]	146
Abbildung 135:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]	147
Abbildung 136:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Zwiebelversuch 2012]	148
Abbildung 137:	Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 74,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2012]	148
Abbildung 138:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 62,3 dt/ha = I) [Zwiebelversuch 2012]	149
Abbildung 139:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 49,9 dt/ha; Bewässerung \times Sorte: 67,5 dt/ha = I) [Zwiebelversuch 2012]	150
Abbildung 140:	Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 3,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2012]	150
Abbildung 141:	Trockensubstanzgehalt der Zwiebeln (Sortierung 40-70 mm) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mischproben über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2012]	151
Abbildung 142:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014]	154

Abbildung 143:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2012].....	154
Abbildung 144:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014].....	155
Abbildung 145:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_0 \times k_{CFAO\text{ minimiert}}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014].....	156
Abbildung 146:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014].....	156
Abbildung 147:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitlichen Wassergehalte wieder) [Zwiebelversuch 2014]	157
Abbildung 148:	Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 77,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014].....	158
Abbildung 149:	Ertrag an Zwiebeln > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 24,5 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014].....	159
Abbildung 150:	Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 62,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014].....	159
Abbildung 151:	Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2014].....	160
Abbildung 152:	Trockensubstanzgehalt der Zwiebeln der Größenklasse 40-70 mm (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2014].....	160
Abbildung 153:	Potenzielle Evapotranspiration des Zwiebelbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (k_{CPEN} : k_{C09-15} : 0,5; k_{C15-18} : 1,0; k_{C18-47} : 1,2; k_{CFAO} : k_{C09-15} : 0,7; k_{C15-18} : 1,4; k_{C18-47} : 1,7).....	162
Abbildung 154:	Potenzielle Evapotranspiration des Zwiebelbestandes ($ET_c = ET_{PEN} \times k_{CPEN}$) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren.....	163
Abbildung 155:	Sickerwasserbildung der 'Intensiv'-Variante (aus der Bodenschicht 0-60 cm) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Modi zur Berechnung der Evapotranspiration der Zwiebelbestände.....	164
Abbildung 156:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'Intensiv'-Variante [Zwiebelversuche].....	165
Abbildung 157:	Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Zwiebelversuche].....	166
Abbildung 158:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN\text{ minimiert}}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Minimiert'-Variante [Zwiebelversuche].....	166
Abbildung 159:	Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]).....	167
Abbildung 160:	Mehrertrag (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) an Zwiebeln > 40 mm der bewässerten Varianten gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge (Abzüglich der ggf. in der 'Kontrolle' verabreichten Wassergabe) (Regression berechnet ohne 'Praxis 2010' und 'PFLEGER et al. 2010').....	169
Abbildung 161:	Relativer Ertrag an Zwiebeln > 40 mm ('Intensiv'- bzw. berechnete Variante = 100 %) in Abhängigkeit von dem Bewässerungsdefizit gegenüber der 'Intensiv'- bzw. der berechneten Variante (Versuche v. PFLEGER et al.) (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten; Regression nur für Daten nach PFLEGER et al. berechnet).....	170
Abbildung 162:	Relativer Ertrag an Zwiebeln > 40 mm ('Intensiv' = 100 %) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{CFAO}$) bzw. um die kalkulierten Sickerwasserverluste erweiterten klimatischen Wasserbilanz (blaue Symbole).....	171

Abbildung 163:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010].....	176
Abbildung 164:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Spinatversuch 2010]	176
Abbildung 165:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-30 cm und 30-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Spinatversuch 2010].....	178
Abbildung 166:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010].....	178
Abbildung 167:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010].....	179
Abbildung 168:	Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$ bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010].....	179
Abbildung 169:	Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte versus gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgraden wurde auf 1,0 festgelegt) [Spinatversuch 2010]	180
Abbildung 170:	Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte versus gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgraden wurde auf 1,0 festgelegt) [Erbsenversuch 2011]	181
Abbildung 171:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 1+1/2/3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Weißkohlversuch 2012].....	189
Abbildung 172:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2012]	190
Abbildung 173:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 1+' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 1+}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012].....	190
Abbildung 174:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1+' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 1+}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]	191
Abbildung 175:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]	192
Abbildung 176:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]	193
Abbildung 177:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 3' auf Basis $ET_{PEN} \times k_{CVar 3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]	193
Abbildung 178:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (oben) bzw. 0-90 cm (unten) (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Weißkohlversuch 2012]	194
Abbildung 179:	Anzahl markt- bzw. nicht marktfähiger Pflanzen je Parzelle (Mittelwerte über die Wiederholungen; Differenz zu 56 möglichen Pflanzen gleich Ausfälle) [Weißkohlversuch 2012]	195
Abbildung 180:	Marktfähiger Ertrag ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 80$ dt/ha) und Ernterückstände (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012].....	196
Abbildung 181:	Mittlere Kopfmasse und Ernterückstände je Einzelpflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012].....	196
Abbildung 182:	Trockensubstanzgehalt von Marktertrag (Köpfe) und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012].....	197

Abbildung 183:	Mittlere Trockenmasse der Köpfe und Ernterückstände je Einzelpflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012].....	197
Abbildung 184:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten '1', '2' und '4' bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1/2/4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013].....	200
Abbildung 185:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2013]	200
Abbildung 186:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 1' bis zum Beginn der Kopfbildung auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' (Vorgabe: maximale Durchwurzelungstiefe 60 cm) sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013].....	201
Abbildung 187:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]	202
Abbildung 188:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]	203
Abbildung 189:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 4' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]	204
Abbildung 190:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'SVAT'-Variante auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]	204
Abbildung 191:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (oben) bzw. 0-90 cm (unten) (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Weißkohlversuch 2013]	205
Abbildung 192:	Gemessene Wasserspannung in 30, 60 und 90 cm Tiefe in der 'SVAT'-Variante (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe; Tagesmittelwerte: 12 ⁰⁰ Uhr bis 12 ⁰⁰ des Folgetages; mit Erreichen einer Tension von ca. 850 hPa sind die Messwerte nicht mehr aussagekräftig) [Weißkohlversuch 2013]	206
Abbildung 193:	Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte (0-30 cm: Mittelwerte der in 5, 15 und 25 cm Tiefe gemessenen Werte; 30-60 cm: 35, 45, 55 cm) versus gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgrade wurde auf 1,0 festgelegt) [Weißkohlversuch 2013].....	207
Abbildung 194:	Marktertrag ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 35,6$ dt/ha) und Ernterückstände ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 28,3$ dt/ha) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013].....	208
Abbildung 195:	Mittlere Kopfmasse ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 0,21$ kg/Pflanze) und Ernterückstände je Einzelpflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013].....	208
Abbildung 196:	Trockensubstanzgehalt von Marktware (Köpfe) und Ernterückständen ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 0,65$ %) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013].....	209
Abbildung 197:	Trockenmasse von Marktware ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 4,2$ dt/ha) und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013].....	209
Abbildung 198:	Frischmasse-Aufwuchs ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 51,8$ dt/ha) und frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]	210
Abbildung 199:	Trockenmasse-Aufwuchs ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 7,7$ dt/ha) und trockenmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013].....	210
Abbildung 200:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten '2', '3', '4' bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2/3/4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Ausgangs-Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	212
Abbildung 201:	Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2014]	213
Abbildung 202:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 2' bis zum Beginn der Kopfbildung auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014].....	213

Abbildung 203:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	214
Abbildung 204:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'TU'-Variante auf Basis $ET_0 \times k_{CTU}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	215
Abbildung 205:	Gemessene Bodenwasserspannung (Tagesmittelwerte) der 'TU'-Variante in 29, 52 und 76 cm Bodentiefe (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe) [Weißkohlversuch 2014]	215
Abbildung 206:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 3' auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	216
Abbildung 207:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 4' auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	217
Abbildung 208:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	218
Abbildung 209:	Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'SVAT'-Variante nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]	218
Abbildung 210:	Gemessene Bodenwasserspannung der 'SVAT'-Variante' in 20, 51 und 87 cm Bodentiefe (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe; Tagesmittelwerte: 12:00 bis 12:00 Uhr des Folgetages) [Weißkohlversuch 2014]	219
Abbildung 211:	Niederschlags- und Berechnungsmengen (theoretisch) und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 1}$ [Weißkohlversuch 2014]	219
Abbildung 212:	Marktertrag und Ernterückstände (Mittelwerte über die Wiederholungen; ohne Berücksichtigung von Fehlstellen) [Weißkohlversuch 2014]	220
Abbildung 213:	Mittlere Kopfmasse ($GD(\alpha < 0,05) = 0,17$ kg) und Ernterückstände pro Pflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]	221
Abbildung 214:	Frischmasse-Aufwuchs und frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]	221
Abbildung 215:	Trockensubstanzgehalt von Marktware (Köpfe) und Ernterückständen ($GD(\alpha < 0,05) = 0,9$ %) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]	222
Abbildung 216:	Trockenmasse von Marktware und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]	222
Abbildung 217:	Trockenmasse-Aufwuchs und trockenmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]	223
Abbildung 218:	Potenzielle Evapotranspiration des Weißkohlbestandes auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 2}$ und nach 'Agrowetter' und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren	225
Abbildung 219:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 3}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]	226
Abbildung 220:	Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times k_{CVar 2}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]	226
Abbildung 221:	Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]	227
Abbildung 222:	Absolute und relatives ('Variante 2' = 100 %) mittleres Kopfgewicht in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Wiederholungsmittel]) [Weißkohlversuche]	227
Abbildung 223:	Relative Kopfmasse ('Variante 2' = 100 %) in Abhängigkeit vom Bewässerungsdefizit gegenüber der 'Variante 2' [Weißkohlversuche]	228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Erbsenversuche]	20
Tabelle 2:	Einbezogene Markerbsensorten	20
Tabelle 3:	Kultur- und Versuchsdaten [Erbsenversuche]	21
Tabelle 4:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2010] ...	30
Tabelle 5a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2010] .	31
Tabelle 6:	Erntetermin, Tenderometerwert und Frischmasseerträge der verschiedenen Varianten [Erbsenversuch 2011]	35
Tabelle 7:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2011] ...	38
Tabelle 8a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2011] .	38
Tabelle 9:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2012] ...	47
Tabelle 10a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2012] .	47
Tabelle 11:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2013] ...	50
Tabelle 12a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2013] .	50
Tabelle 13:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2014] ...	58
Tabelle 14a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2014] .	58
Tabelle 15:	Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Erbsenversuche]	59
Tabelle 16:	Modus zur Berechnung der Verdunstung und die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Erbsenversuche]	61
Tabelle 17:	Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Bohnenversuche]	69
Tabelle 18:	Einbezogene Bohnensorten	69
Tabelle 19:	Kultur- und Versuchsdaten [Bohnenversuche]	71
Tabelle 20:	Sortierung der Bohnenhülsen [Bohnenversuch 2010]	79
Tabelle 21:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2010] ..	79
Tabelle 22a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2010] .	79
Tabelle 23:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2011] ..	83
Tabelle 24a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2011] .	83
Tabelle 25:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2012] ..	90
Tabelle 26a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2012] .	90
Tabelle 27:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2013a] .	96
Tabelle 28a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013a]	97
Tabelle 29:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2013b]	103
Tabelle 30a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013b]	104
Tabelle 30b:	Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013b]	104
Tabelle 31:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2014] .	110
Tabelle 32a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2014]	110
Tabelle 33:	Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Bohnenversuche]	111
Tabelle 34:	Modus zur Berechnung der Verdunstung der 'Intensiv'-Variante sowie die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Bohnenversuche]	113
Tabelle 35:	Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Zwiebelversuche]	124
Tabelle 36:	Einbezogene Sommerzwiebelsorten	124
Tabelle 37:	Kultur- und Versuchsdaten [Zwiebelversuche]	125
Tabelle 38:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2010] .	135
Tabelle 39a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2010]	135

Tabelle 40:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2011]	142
Tabelle 41a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2011]	143
Tabelle 42:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2012]	152
Tabelle 43a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2012]	152
Tabelle 44:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2014]	161
Tabelle 45a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2014]	161
Tabelle 46:	Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Zwiebelversuche]	162
Tabelle 47:	Modus zur Berechnung der Verdunstung der 'Intensiv'-Variante und die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Zwiebelversuche]	164
Tabelle 48:	Textur und Bodenart des Versuchsstandortes [Spinatversuch 2010]	172
Tabelle 49:	Einbezogene Spinatsorten	173
Tabelle 50:	Kultur- und Versuchsdaten [Spinatversuch 2010]	173
Tabelle 51:	Gravimetrisch und mittels FDR-Sonde bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Spinatversuch 2010]	181
Tabelle 52a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Spinats [Versuch 2010]	182
Tabelle 53:	Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Weißkohlversuche]	184
Tabelle 54:	Kultur- und Versuchsdaten [Weißkohlversuche]	185
Tabelle 55:	kc-Werte für die verschiedenen Bewässerungsvarianten (ohne 'SVAT'-Variante) [Weißkohlversuche].	186
Tabelle 56:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Weißkohlversuch 2012]	198
Tabelle 57a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2012]	198
Tabelle 58:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [2013]	211
Tabelle 59a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen [2013]	211
Tabelle 60:	Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Weißkohlversuch 2014]	223
Tabelle 61a:	Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2014]	224
Tabelle 62:	Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Weißkohlversuche]	224
Tabelle 63:	Zusatzbewässerung in den verschiedenen Varianten [Weißkohlversuche]	225

Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
ET_c	potenzielle Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes
$ET_{c\ adj}$	aktuelle Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes (nach 'Agrowetter')
$ET_{p_{PEN}}$	Evapotranspiration einer „stets feuchten, bewachsenen Landfläche“ berechnet nach der 'klassischen' [meist modifizierten] PENMAN-Beziehung
ET_0	FAO-Gras-Referenzverdunstung
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
kc-Wert	Verhältnis zwischen der ET_c und einer meteorologisch bestimmten Referenzverdunstung
kc_{FAO}	kc-Werte bezogen auf ET_0
kc_{PEN}	kc-Werte bezogen auf $ET_{p_{PEN}}$
nFK	nutzbare Feldkapazität (FK - Totwasser)
n. s.	nicht signifikant
Pfl.	Pflanze
RSME	Wurzel aus dem Mittel der Abweichungsquadrate (root mean square error)
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TW	Tenderometerwert
w_{fak}	windabhängiger Faktor zu 'Korrektur' von ET_0 (JANSSEN 2012)

1 Einführung

Gemüsebestände zeigen nur dann ein optimales Wachstum und damit quantitativ und qualitativ hohe Erträge, wenn sie im Boden oder Substrat genügend leicht verfügbares Wasser vorfinden. Vereinfachend (für 'normale' Transpirationsbelastungen) nimmt man an, dass nur etwa 40 % des bei Feldkapazität (FK) pflanzenverfügbaren Bodenwassers leicht verfügbar sind.

Die Bewässerungssteuerung kann direkt auf Basis des aktuellen Bodenwassergehaltes oder der Bodenwasserspannung (Saugspannung) erfolgen. Weil die Erfassung dieser Steuergrößen unter Feldbedingungen relativ aufwendig ist und vielen Fehlerquellen unterliegt, prognostiziert man hier meist die Bodenwassergehalte (oder davon abgeleitet die Wasserspannung) bzw. deren Änderungen über die Zeit mittels klimatischer Wasserbilanz.

Als 'Standardverfahren' hat sich hier für den Freilandgemüsebau die 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (HARTMANN et al. 1989; PASCHOLD et al. 2007) etabliert, die auf Basis einer meteorologisch erfassten bzw. berechneten Referenzverdunstung mittels kultur- und entwicklungsstadienspezifischer Korrekturfaktoren (kc-Werte) die Evapotranspiration der Bestände abschätzt.

Vor bzw. zu Beginn des hier dargestellten Forschungsprojektes bestand die Hypothese, dass eine Bewässerung auf Basis der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' in pflanzenbaulicher und auch (zumindest in Bezug auf Frischmarktgemüseproduktion) wirtschaftlicher Hinsicht als 'optimal' einzustufen ist. In den Versuchen sollte deshalb, auch vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels in Sachsen geklärt werden, welche Ertragseinbußen bei einer suboptimalen (\Rightarrow 'Praxis'-Varianten) bzw. unterlassenen Bewässerung ('Kontrolle') unter sächsischen Bedingungen zu erwarten sind. Gleichzeitig sollten Sorten geprüft werden, die unter derartigen Bedingungen ggf. einen geringeren Ertragsabfall zeigen als Vergleichssorten (Wechselwirkung Bewässerung \times Sorte).

Diese anfängliche Fragestellung trat in den Hintergrund als deutlich wurde, dass das 'Geisenheimer Modell' bei den untersuchten Kulturen (mit Ausnahme der Buschbohne) zu überhöhten, teilweise unter praktischen Gesichtspunkten nicht mehr nachvollziehbaren Wassergaben führte.

Die, auch an anderer Stelle aufgetretenen Probleme mit der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' führten dazu, dass das 'Geisenheimer Modell' ab 2012 im Rahmen eines deutschlandweiten Ringversuchs an der Beispielkultur Weißkohl überprüft werden sollte. Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes konnten dazu in den Jahren 2012 bis 2014 entsprechende Versuche angelegt werden, die Versuche mit Spinat wurden dafür allerdings eingestellt.

2 Versuche mit Markerbsen

Abstract

Im Rahmen eines fünfjährigen Projektes wurde am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz jährlich ein Bewässerungsversuch mit jeweils vier verschiedenen Markerbsensorten durchgeführt. Nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' mit den damals aktuellen kc-Werten waren Wassergaben von 115 bis 170 mm notwendig. Eine Variante mit 'minimierten' kc-Werten erhielt je nach Witterungsverlauf 16 bis 122 mm. In einer 'Praxis'-Variante und in einer weiteren Variante mit nochmals um $\frac{1}{3}$ reduzierten kc-Werten wurden 30 bis 44 mm verabreicht. Die 'Kontrolle' blieb jeweils unbewässert.

In einer Zusammenfassung der fünf durchgeführten Versuche werden die, je nach Modell, auf unterschiedlichen Referenzverdunstungen basierenden Verdunstungsberechnungen dargestellt und die damit kalkulierten Bodenwassergehalte den gemessenen gegenübergestellt.

Der Frischmasseertrag wurde durch eine Berechnung um maximal 12 % gegenüber der 'Kontrolle' erhöht. Mit zunehmender Berechnungsmenge nahm der Mehrertrag je mm Zusatzwasser von maximal 16 kg/(ha × mm) kontinuierlich ab, sehr hohe Wassergaben führten zu Mindererträgen. Die Bewässerung erhöhte die Aufwuchsmenge zumeist signifikant, mit zunehmender Beregnungsintensität nahm der Ernteindex aber deutlich ab. Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte konnte zumeist nicht festgestellt werden.

Insgesamt deuten die Versuchsergebnisse darauf hin, dass unter den gegebenen Boden- (relativ hohes Wasserhaltevermögen) und Witterungsbedingungen kc-Werte von maximal 1,2 bis 1,3 (bezogen auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung) eine ausreichende Wasserversorgung von Gemüseerbsen gewährleisten.

2.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

In Sachsen werden Markerbsen auf den Lössstandorten fast ausnahmslos ohne Beregnung angebaut. Der Klimawandel und dabei insbesondere die prognostizierte Frühsommertrockenheit stellen aber langfristig einen unberegneten Anbau in Frage. Neben der Überprüfung von vorhandenen Beregnungsmodellen sollten im Rahmen der Untersuchungen spezielle Sorten mit einer ggf. besseren Toleranz gegenüber Trockenstress getestet werden.

2.2 Material und Methoden

Versuchsstandort

Die Versuchsstation befindet sich in südöstlicher Randlage von Dresden (Pillnitz), ca. 120 m über NHN. Der alluviale Boden (Elbe) ist als Parabraunerde anzusprechen. Die genutzten Versuchsfelder (à 1.000 m²) weisen im Mittel in der Schicht 0-90 cm 17,2 % Ton, 36,4 % Schluff und 46,4 % Sand auf, womit die Bodenart nach der Kartieranleitung (BGR 2005) meist im Grenzbereich zwischen schwach (Ls2) bis mittel sandiger Lehm (Ls3) und stark lehmiger Sand (Sl4) bzw. schluffig-lehmiger Sand (Slu) einzuordnen ist (Tabelle 1). Die Feldkapazität (FK) der Versuchsfelder wurde, soweit möglich, jährlich ausgangs des Winters ermittelt (vgl. Versuchsergebnisse).

Tabelle 1: Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Erbsenversuche]

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
Versuchsjahr 2010				
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)
Versuchsjahr 2011 und 2013				
0-30 cm	17,4	41,7	40,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
30-60 cm	19,4	42,7	37,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	18,5	28,4	53,1	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	18,4	42,2	39,4	schwach sandiger Lehm (Ls2)
Versuchsjahr 2012				
0-30 cm	16,4	34,3	49,3	stark lehmiger Sand (SI4)
30-60 cm	17,4	38,3	44,3	mittel sandiger Lehm (Ls3)
60-90 cm	18,1	35,1	46,8	mittel sandiger Lehm (Ls3)
0-60 cm	16,9	36,3	46,8	stark lehmiger Sand (SI4)
Versuchsjahr 2014				
0-30 cm	15,2	42,6	42,2	schluffig-lehmiger Sand (SIu)
30-60 cm	20,5	41,8	37,7	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	19,1	28,0	52,9	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	17,9	42,2	40,0	schwach sandiger Lehm (Ls2)

Kulturdaten und Versuchsaufbau

In den Versuchen konnten jeweils vier Sorten aufgenommen werden (Tabelle 2). 2010-2012 wurden spätreifende Sorten angebaut, von denen jeweils 2 Sorten seitens der Züchter/Vertriebspartner als 'eher trockenstresstolerant' bzw. als 'eher wasser- bzw. beregnungsbedürftig' eingeschätzt wurden. 2013 und 2014 wurden frühe Sorten ausgesät, Angaben zu einer etwaigen Trockenstresstoleranz liegen hier nicht vor.

Tabelle 2: Einbezogene Markerbsensorten

Versuchsjahre 2010-2012				
Sorte	Puget	Ambassador	Naches	Mundial
Züchter	Van Waveren		Crites Seed	Seminis
Trockenstresstoleranz¹⁾	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein
Blattform	normal	normal	semi-leafless	normal
Reifetage²⁾	+12	+12	+12	+13
Sortierung	grob			
Versuchsjahr 2013				
Sorte	Prelado	Twinkle	Spring	Sherwood
Züchter	Syngenta	AGIS	Seminis	
Trockenstresstoleranz	keine Angaben			
Blattform	normal			
Reifetage²⁾	-1	-1	0	+1
Sortierung	grob			
Versuchsjahr 2014				
Sorte	Prelado	Spring	Sherwood	Crescendo
Züchter	Syngenta	Seminis		
Trockenstresstoleranz	keine Angaben			
Blattform	normal			
Reifetage²⁾	-1	0	+1	+2
Sortierung	grob			mittelfein

1) Einschätzung des Züchters/Vertriebspartners

2) im Vergleich zu 'Spring'

Die Kultur- und Versuchsdaten sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen waren die Erbsenbestände jeweils unkraut- und befallsfrei. Allerdings trat in den stark beregneten Varianten zum Erntetermin hin verstärkt Fäulnis in den unteren Blattetagen auf (vgl. Versuchsergebnisse). 2010 konnte die erreichte Bestandesdichte, mit Ausnahme der Sorte 'Puget' (85 Pflanzen/m²), mit nur rund 70 Pflanzen/m² nicht ganz befriedigen. Eine NA-Herbizidbehandlung führte insbesondere bei der Sorte 'Mundial' zu Schäden, die sich durch ein Absterben des Vegetationspunktes und dem Austrieb von einer, teilweise zwei Seitenknospen äußerten. Diese Schäden 'verwachsen' sich allerdings überraschend gut, sodass diese Variante/Sorte nicht verworfen werden musste.

Tabelle 3: Kultur- und Versuchsdaten [Erbsenversuche]

Versuchsjahr 2010	
21. April	Aussaat mit 90 Korn/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 12 cm, keine N-Düngung
2. Mai	Aufbrauch (BBCH 09)
29. Mai	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
21. Juni	Beginn der Blüte (BBCH 61)
29. Juni	Ende der Blüte/Beginn Hülsenbildung (BBCH 69)
12. Juli	Ernte der Sorten 'Puget' und 'Ambassador'
13. Juli	Ernte der Sorten 'Naches' und 'Mundial'
Versuchsjahr 2011	
19. April	Aussaat mit 90 keimfähige Körner/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 11,5 cm, keine N-Düngung
29. April	Aufbrauch (BBCH 09)
20. Mai	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
7. Juni	Beginn der Blüte (BBCH 61)
15. Juni	Beginn Hülsenbildung (BBCH 69)
28. Juni	erste Ernte ('Puget')
4. Juli	letzte Ernte ('Naches' und 'Mundial')
Versuchsjahr 2012	
18. April	Aussaat mit 90 keimfähige Körner/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 11,5 cm, keine N-Düngung
29. April	Aufbrauch (BBCH 09)
21. Mai	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
11. Juni	Beginn der Blüte (BBCH 61)
18. Juni	Beginn Hülsenbildung (BBCH 69)
4.-6. Juli	Ernte (BBCH 76)
Versuchsjahr 2013	
10. April	Aussaat mit 110 keimfähige Körner/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 11,5 cm, keine N-Düngung
22. April	Aufbrauch (BBCH 09)
15. Mai	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
22. Mai	Beginn der Blüte (BBCH 61)
ca. 24. Juni	BBCH 76 (keine Ertragsauswertung wegen Starkniederschläge und damit unwesentlicher Wassergaben)
Versuchsjahr 2014	
20. März	Aussaat mit 110 keimfähige Körner/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 11,5 cm, keine N-Düngung
4. April	Aufbrauch (BBCH 09)
27. April	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
10./12./14. Mai	Beginn der Blüte (BBCH 61) bei 'Sherwood', 'Prelado' und 'Spring' sowie 'Crescendo'
11. Juni	Ernte (BBCH 76)
alle Versuchsjahre	
Bodenart	s. Tabelle 1, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74; Grundwasserflurabstand > 7 m
Versuchsanlage	zweifaktorielle Spaltanlage (Haupteinheit Beregnung, Untereinheit Sorte) mit 4 Wiederholungen
Parzellengröße	Anlageparzelle: 8,0 m × 1,5 m (12,0 m ²); Randparzellen ohne Auswertung Ernteparzelle: 5,0 m × 1,2 m (2010) bzw. 5,0 m × 1,15 m (6,0 bzw. 5,75 m ²)
Beregnung	Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen (Gierhake Maschinenbau)
Drusch	Mini Sampling Viner (Tickhill Engineering Co Ltd), 2 Druschdurchläufe
Tenderometer	TM-2 Texture Press (Food Technology Corporation)

Die Ernte der Erbse erfolge im Versuchsjahr 2010 und 2014 (2010 sortenspezifisch) bei einem Soll-Tenderometerwert (TW) von 120 der 'intensiv'- bzw. 'minimiert'-bewässerten Varianten (hierzu wurden im Vorfeld entsprechende Randparzellen ein Probedrusch durchgeführt). Zeitgleich wurden hier auch die anderen Bewässerungsstufen geerntet. 2011 und 2012 wurde versucht, alle Varianten (Bewässerung x Sorte) bei einem TW von ca. 120 zu ernten, allerdings konnte dieses 2012 durch Niederschläge zur Erntezeit kaum realisiert werden. 2013 wurde der Versuch wegen Starkniederschläge nicht beerntet.

Um eine Vergleichbarkeit der Erträge sicherzustellen, wurden die Erträge mittels der Reife-Ertragsbeziehung

$$\text{relativer Ertrag [\%]} = -0,008248 \times (\text{TW} - 164,62)^2 + 116,40 \quad (\text{LABER 2011, überarbeitet})$$

auf einen TW von 120 umgerechnet.

Die Ernte selbst erfolgte durch Herausziehen der Erbsen und anschließendem stationärem Drusch. Neben der Kornmasse ('Frischmasseertrag' = Rohertrag mit geringen Anteilen an Hülsenteilen und anderen Ernterückständen) wurde auch die Menge an Ernterückständen erfasst. Eine Teilprobe des Erntegutes wurde mit Leitungswasser gewaschen und mit Hilfe von gewöhnlichen Küchensieben von Blatt- und Hülsenteilen befreit. An dieser Teilprobe wurde mit 3-facher Messwiederholung der TW ermittelt.

Bewässerungsvarianten

Neben einer 'Kontrolle', in der keine Beregnung durchgeführt wurde, sollten in einer 'Praxis'-Variante (nur 2010 und 2011) nur bei extremer Trockenheit 1 bis 2 Regengaben erfolgen. In der Variante 'Intensiv' (2010-2012) wurde nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010) eine klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - ET_c ; ET_c = Referenzverdunstung x kc-Wert) erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderungen über die Zeit berechnet.

Die veröffentlichten kc-Werte bezogen sich ursprünglich auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) (vgl. PASCHOLD 1999; PASCHOLD et al. 2007 u. 2009). Dieser Ansatz wurde auch an den Deutschen Wetterdienst (DWD) herangetragen und in der 'Agrowetter-Beregnungsberatung' (s. u.) umgesetzt (vgl. hierzu die nahezu identischen Evapotranspirationswerte des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes und der 'Agrowetter'-Werte der Versuchsjahre 2010 und 2011). Ab 2011 (FA-GM 2011c) wurden diese (niedrigeren) kc-Werte auf die sog. PENMAN-Verdunstung (ET_{PEN}) bezogen (daher hier als kc_{PEN} bezeichnet). Für die niedriger ausfallende FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) wurden um Faktor 1,4 höhere kc-Werte (hier als kc_{FAO} bezeichnet) empfohlen (FA-GM 2011b).

Die vormals für Gemüseerbsen empfohlenen kc-Werte (FA-GM 2010 bzw. FA-GM 2011b u. c) wurden (auch auf Grund der hier gewonnenen Ergebnisse) allerdings im Juni 2011 zurückgezogen (vgl. FA-GM 2011a). In Absprache mit den Geisenheimer Kollegen wurden ab 2012 in entsprechenden Varianten 'minimierte' bzw. 'reduzierte' kc-Werte verwendet. Bei der Variante '66 % Minimiert' (2014) wurden die kc-Werte nochmals um rund $\frac{1}{3}$ gesenkt. Die in den jeweiligen Versuchen verwendeten kc-Werte werden jeweils in den Grafiken zum Evapotranspirationsverlauf (z. B. Abbildung 2, Seite 25) dargestellt, Tabelle 16 (Seite 61) gibt einen Überblick über die in den verschiedenen Versuchen zur Anwendung gekommenen Modi zur ET_c -Berechnung.

Anders als in der Empfehlung (Hs-GM 2013), nach der der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 90 % nFK aufgefüllt wird, sollte der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde zunächst bis zum 6-Blatt-Stadium (BBCH 16) nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, danach wurde entsprechend mit 0-60 cm Tiefe kalkuliert. 2014 wurde die Schicht 30-60 cm erst ab Blühbeginn (BBCH 61; 38 Tage nach Auf-
lauf) einbezogen.

Im ersten Versuchsjahr 2010 wurden, nach Zugang zur 'Agrowetter Berechnungsberatung' (s. u.), die Wassergaben nach diesen Empfehlungen bemessen. Berechnet wird auch hier bis zu einem Wassergehalt von 90 % nFK in der Bodenschicht 0-60 cm. (Dass dennoch in der Bodenschicht 0-60 cm durch Berechnungsgaben kurzzeitig Wassergehalte von über 90 % [vgl. Abbildung 1] auftraten beruht darauf, dass teilweise empfohlene Regengaben vorgezogen wurden.)

Abweichend vom 'Geisenheimer Modell', das „nach starken Niederschlägen“ mit einer Überschreitung der 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 DWD angebotenen Modul 'Agrowetter Berechnungsberatung' berechnet, das sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) orientiert. Seit Beginn der Saison 2012 wird diese ET_0 allerdings mit einem windabhängigen Faktor (w_{fak}) 'korrigiert' (JANSSEN 2012).

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 ($ET_{c \text{ adj}}$), die im Falle einer nicht ausreichenden Wasserversorgung des Bestandes (Bodenwassergehalt < 60 % nFK) unter ET_c liegt (JANSSEN 2010). Damit konnte auch für die 'Kontrolle' und die 'Praxis'- bzw. 'Minimiert'/'Reduziert'-Variante eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden.

Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Berechnungsbeginn (70 % bis BBCH 16, abfallend auf 50 % ab BBCH 69) einheitlich auf 60 % geändert, die maximale Durchwurzelungstiefe wurde von 40 cm (Voreinstellung) auf 60 cm erhöht.

Bei der Berechnung greift 'Agrowetter' auf die ET_0 -Werte der auszuwählenden nächstgelegenen Wetterstation des DWD zurück, in diesen Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche Topografie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicherweise die ET_0 - und ET_{PEN} -Verdunstungswerte dieser Station zur Verfügung gestellt. 2013 lieferte die Station nach einem Hochwasserschaden in Folge der Starkregenereignisse ab dem 4. Juni allerdings keine Daten mehr, sodass der DWD aus Daten der deutlich weiter entfernten Stationen Dresden-Klotzsche und Hoyerswerda Verdunstungsdaten für die Station Hosterwitz interpolieren musste (JANSSEN 2013).

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.

Die Berechnung der entsprechenden Parzellen (Haupteinheit) erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt nur 2 bis maximal 6 mm ausgebracht, sodass bis zu 8 Überfahrten pro Berechnungsgabe erforderlich waren. Die ausgebrachte Berechnungsmenge wurde 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 zwei (bei der Ernte ggf. nur einer) der vier Sorten je eine Bodenprobe mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60, ggf. 60-90 cm) gezogen, sodass je Variante und Tiefe eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 800 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.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Versuchsjahr 2010

Nach einem niederschlagsreichen Winter (156 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 18. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,3 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 25,3 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 4). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 30 Vol.-% eine etwas höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 11,0 Vol.-% ebenfalls leicht reduziert.

Beim Auflaufen der Erbsen (BBCH 09) Anfang Mai wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von knapp 95 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis zum 3. Juni 77,5 mm Niederschlag, sodass bis zu diesem Zeitpunkt der Boden praktisch ständig auf FK aufgefüllt war (Abbildung 1).

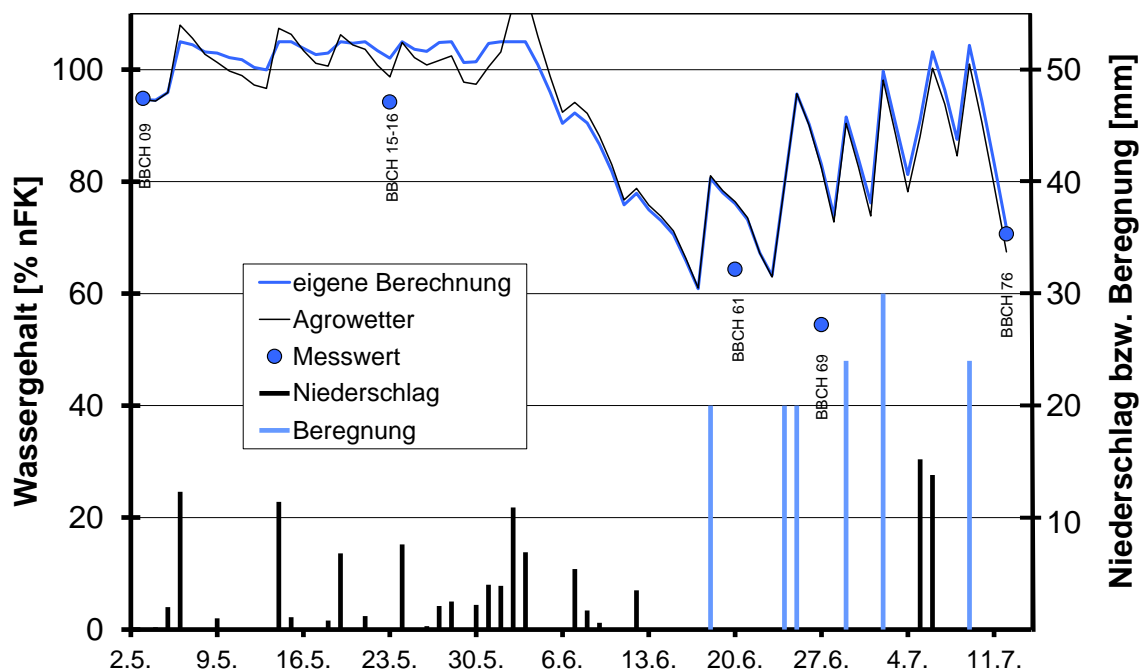


Abbildung 1: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2010]

Anfang Juni setzten dann trockenere Witterungsbedingungen mit bis zu 5-6 mm ET_0/d ein (vgl. Abbildung 2), die zu einem Absinken der Bodenfeuchte auf (rechnerisch) ca. 60 % nFK führten. Daraufhin wurde am 18. Juni in der Variante 'Intensiv' die erste Wassergabe in Höhe von 20 mm gegeben. Danach folgten, ab Anfang Juli in Anlehnung an die 'Agrowetter'-Empfehlungen, weitere Wassergaben, sodass in der Variante 'Intensiv' insgesamt 138 mm verabreicht wurden und der Boden zwischenzeitlich immer wieder auf \pm FK aufgefüllt wurde. In der 'Praxis'-Variante erfolgten zwei Beregnungsgaben mit insgesamt 44 mm, die 'Kontrolle' blieb unberegnat.

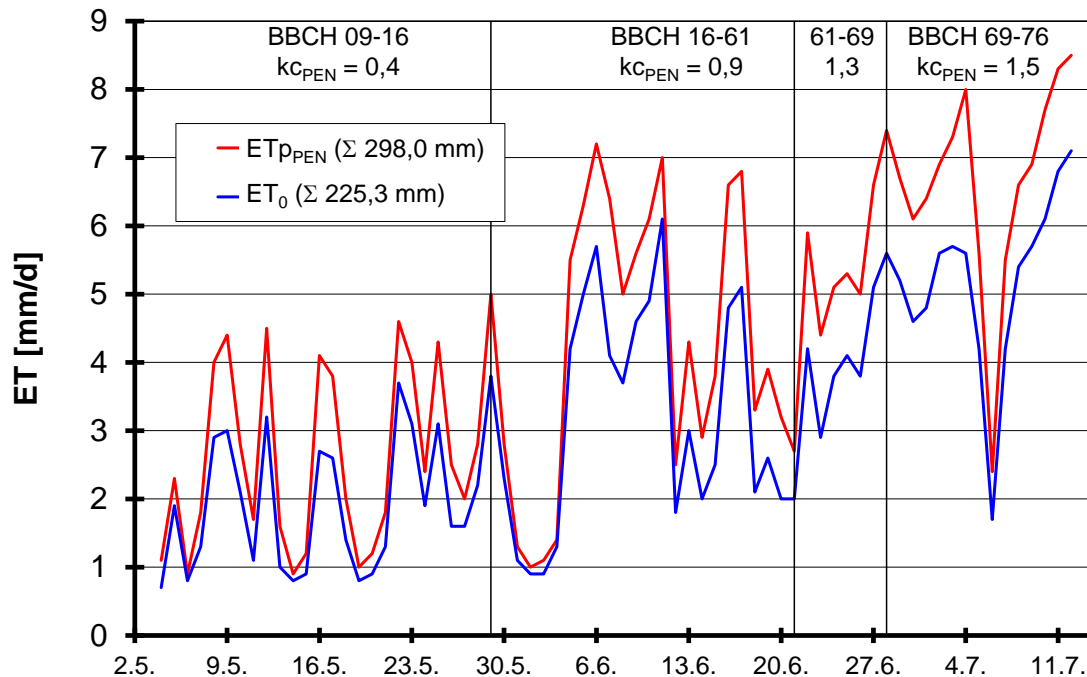


Abbildung 2: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2010]

Die auf Basis der ET_0 -Werte berechneten täglichen Verdunstungswerte nach 'Geisenheim' stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c\ adj} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 242,6 mm wies 'Agrowetter' aber einen geringfügig höheren Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung nach 'Geisenheim', die auf 236,8 mm kam (Tabelle 5a). Auf Grund der eingeschränkten Wasserversorgung wurde seitens 'Agrowetter' für die 'Praxis'-Variante nur eine $ET_{c\ adj}$ von 188,5 mm, für die 'Kontrolle' von 151,3 mm berechnet.

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' in der zweiten Kulturhälfte ebenfalls nahezu deckungsgleich (Abbildung 1). In der ersten, feuchten Kulturhälfte führten die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsberechnung aber zu einem etwas unterschiedlichen Verlauf: Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinaus gehende Menge von insgesamt 40,1 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' eine Versickerung von 37,5 mm (Tabelle 5b).

Die jeweils beim Erreichen des nächsten Pflanzenstadiums in der Bewässerungsvariante 'Intensiv' gezogenen Bodenproben zeigten während der Kulturzeit zum Teil deutlich geringere Bodenfeuchten auf als mit den beiden Modellen auf Basis der ET_0 -Werte berechnet worden sind (Abbildung 1). In der Phase 'Beginn Hülsenbildung' (BBCH 69) bis zur Ernte (BBCH 76) kam es dann aber zu einer Angleichung zwischen berechnetem und realem Bodenwassergehalt, sodass für den Erntetermin der Bodenwassergehalt nahezu exakt prognostiziert wurde.

Berechnet man die Verdunstung auf Basis der ET_{PEN} -Verdunstungswerte (für die Kulturzeit der Erbse um Faktor 1,34 höher als ET_0), so wird der Bodenwassergehalt insbesondere für die Phase Blühbeginn (BBCH 61) und Ende der Blüte (= Beginn Hülsenbildung, BBCH 69) recht gut prognostiziert (Abbildung 3).

In der Phase bis zur Ernte kommt es offensichtlich aber zu einer massiven Überschätzung der Verdunstung, sodass für den Erntetermin eine Bodenfeuchte von 1,1 % nFK prognostiziert wird, obwohl der Boden tatsächlich rund 70 % nFK aufwies. Ursache für diese 'Fehleinschätzung' dürfte der mit 1,5 zu hoch gewählte kc -Wert sein (mit ca. 1,1 ergibt sich eine deutlich bessere Anpassung), der gerade bei den in der letzten Kulturphase herrschenden sehr hohen Verdunstungsraten (vgl. Abbildung 2) zu einer großen Überschätzung von ET_c führte.

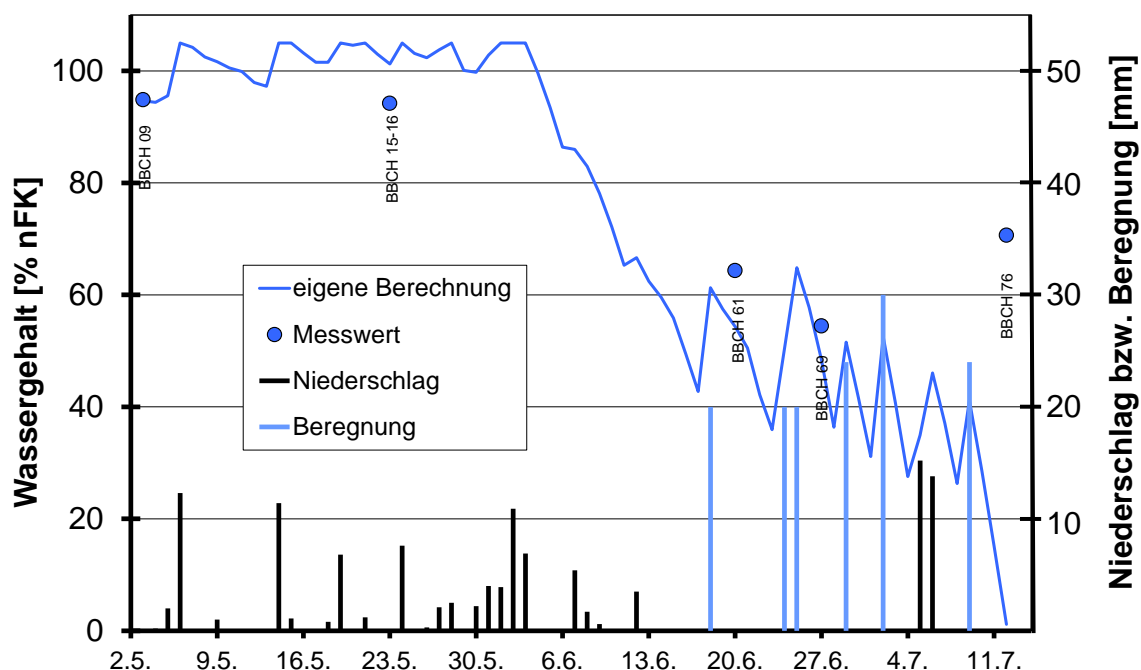


Abbildung 3: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbensversuch 2010]

Insgesamt betrug die effektive Wasserzufuhr (Niederschlag + Beregnung - Versickerung) in der 'Intensiv'-Variante 216 mm. Bei 237 mm ET_c ('Geisenheim' auf Basis der ET_0 -Werte) ergibt sich ein Saldo von -21 mm bzw. eine entsprechende Abnahme des Bodenvorrates. Tatsächlich wurde in der Schicht 0-60 cm mit 22 mm eine nahezu exakt gleiche Abnahme des Wasservorrates gemessen. Bezogen auf die Schicht 0-90 cm betrug die Wassergehaltsänderung aber 38 mm, sodass eine geringfügig höhere Verdunstung und/oder Versickerung stattgefunden haben muss.

Der Bodenfeuchtigkeitsgehalt (0-60 cm) der 'Kontrolle' wurde vom 'Agrowetter'-Modul auf Basis der berechneten $ET_{c\ adj}$ -Werte zu Blühbeginn (BBCH 61) auf 54 % nFK geschätzt. Tatsächlich lag er mit 35 % nFK noch tiefer und fiel dann weiter bis zum Erntetermin auf nur noch 8 % ab (Abbildung 4). Ganz offensichtlich wurde aber auch Bodenwasser der Schicht 60-90 cm genutzt, denn der Wassergehalt dieser Schicht fiel von 107 % nFK (BBCH 09) auf 23 % (BBCH 76) ab (Tabelle 4). Die 'Praxis'-Variante entleerte sich bis auf 24 % nFK (0-60 cm), wie bei der Variante 'Intensiv' wurde auch hier der Endwert durch 'Agrowetter' nahezu exakt kalkuliert. Auch in dieser Variante war eine deutliche Abnahme der Bodenwassergehalte in 60-90 cm zu verzeichnen.

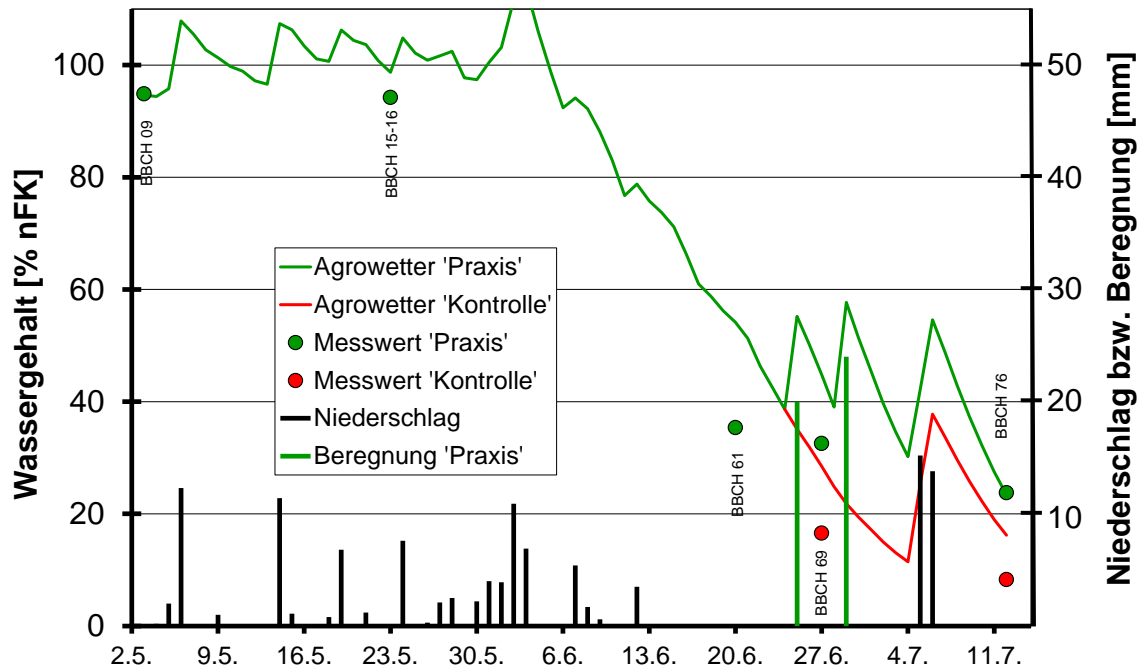


Abbildung 4: Niederschlags- und Beregnungsmengen und Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2010]

Der Erbsenbestand bzw. die unterschiedlichen Varianten zeigten während der Kulturzeit keine auffälligen Trockenstresssymptome wie (mittägliches) Welken etc. Optisch war nur eine größere Bestandeshöhe bei der 'Intensiv'-Variante auszumachen. Bei der Ernte fiel diese Variante allerdings durch stärkere Fäulnis in den unteren Blattetagen negativ auf (die Arbeitskräfte klagten bei dieser Variante über das 'schmierige' Dreschgut). Dass diese Fäulnis zu Ertragsminderungen führte, ist aber eher auszuschließen, weil die Pflanzen 'oberflächlich betrachtet' einen sehr vitalen Eindruck machten.

Beim Frischmasseertrag zeigte sich ein signifikanter Sorten- und Bewässerungseffekt, wobei die 'Praxis'-Variante mit 120 dt/ha (Sortenmittel) den höchsten Ertrag zeigte, während 'Intensiv' und auch die 'Kontrolle' nur knapp 105 dt/ha erbrachten (Abbildung 5). Eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte bestand nicht. Tendenziell ($p = 0,10$) zeigte (die als trockenresistent geltende) 'Puget' aber mit 31 % den größten Ertragszuwachs zwischen der 'Kontrolle' und der 'Praxis'-Variante, aber mit 24 % auch den stärksten Ertragsrückgang zwischen 'Praxis' und 'Intensiv'. Andererseits reagierte 'Naches' (entsprechend ihrer angegebenen Trockenresistenz) nur mit 10 % Ertragszuwachs zwischen der 'Kontrolle' und der 'Praxis'-Variante. Diese Sorte zeigte als einzige auch keinen Ertragsrückgang bei hoher Bewässerungsintensität.

Der in den verschiedenen Bewässerungsvarianten einheitliche Erntetermin orientierte sich an der Reife der Variante 'Intensiv', die mit einem TW von ca. 120 geerntet werden sollte, was mit einem mittleren Wert von 116 auch gelang (Abbildung 6). Die 'Praxis'-Variante bzw. die 'Kontrolle' zeigte mit rund 140 bzw. 170 Einheiten eine deutlich fortgeschrittene Reife, die einem Entwicklungsvorsprung von knapp 2 bzw. knapp 4 Normaltagen entspricht (vgl. LABER 2008a). Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte bestand nur tendenziell ($p = 0,08$).

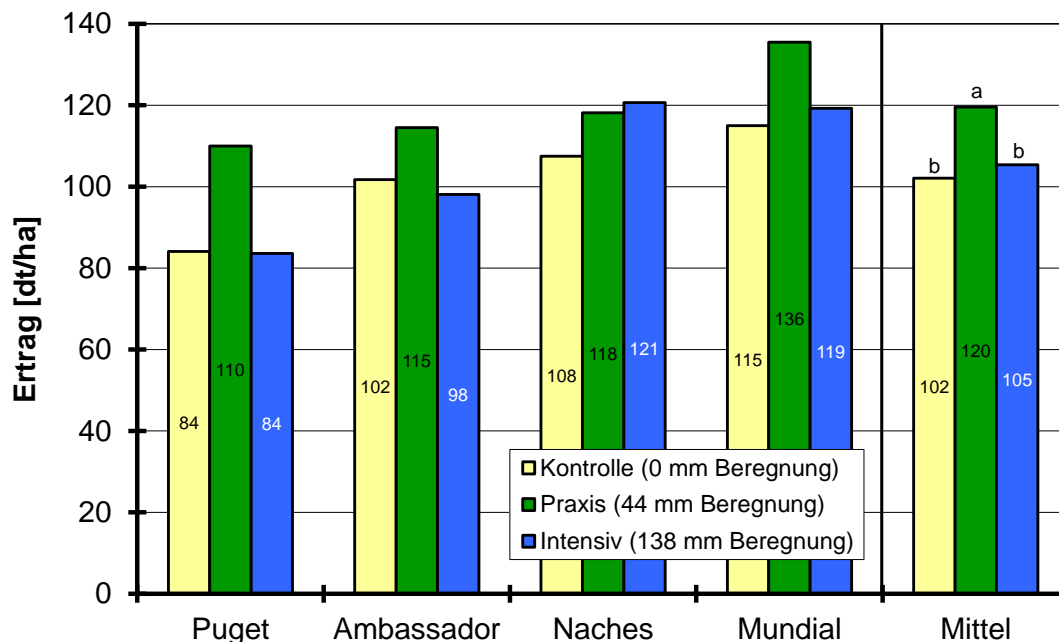


Abbildung 5: Frischmasseertrag (Rohware) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 13,7 dt/ha) [Erbsenversuch 2010]

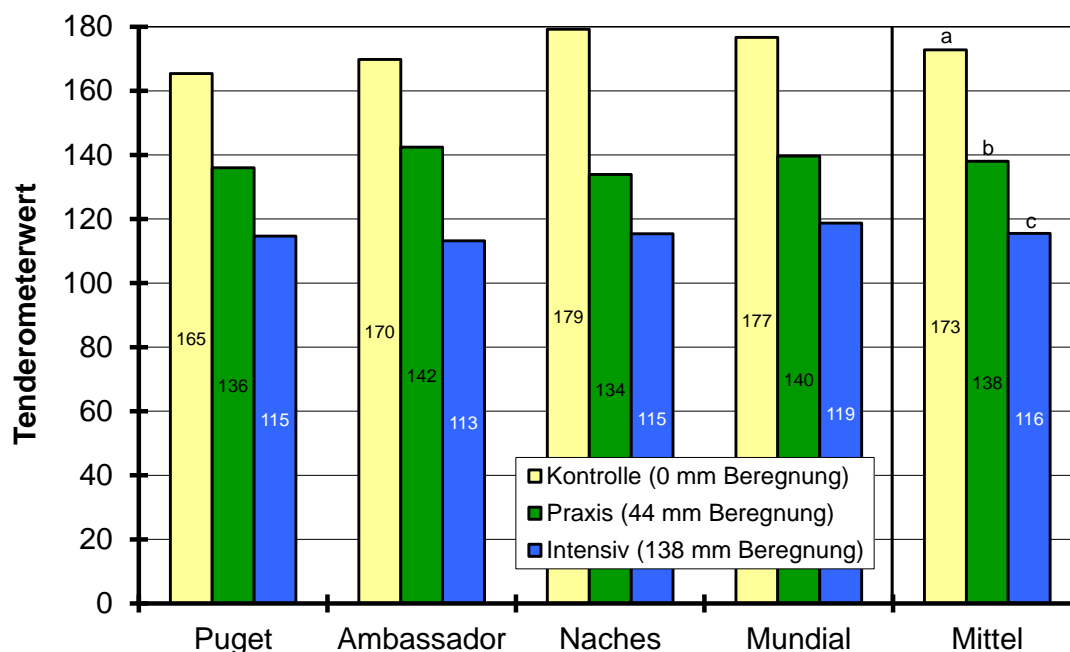


Abbildung 6: Tenderometerwert der Erbsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen mit jeweils 3 Messwiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 16,5) [Erbsenversuch 2010]

Korrigiert man den Ertrag auf einen einheitlichen TW von 120, so zeigen sich zwischen den Bewässerungsvarianten keine statistisch absicherbaren Ertragsunterschiede (Abbildung 7). Auch eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte konnte nicht abgesichert werden.

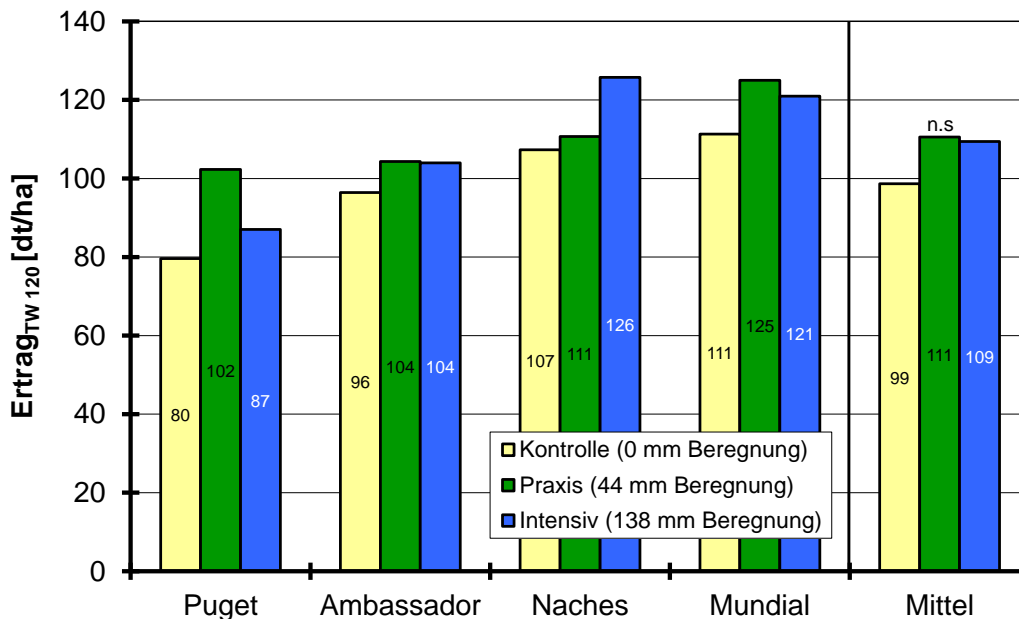


Abbildung 7: Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Erbsenversuch 2010]

Entsprechend der Abnahme an Ernterückständen mit abnehmender Beregnungsintensität (o. Abbildung) nahm auch die gesamte Aufwuchsmenge ab (Abbildung 8). Allerdings bestand eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte, die sich insbesondere bei der Sorte 'Puget' zeigte, die im Gegensatz zu den drei anderen Sorten zwischen der Variante 'Intensiv' und 'Praxis' keinen Abfall aufwies.

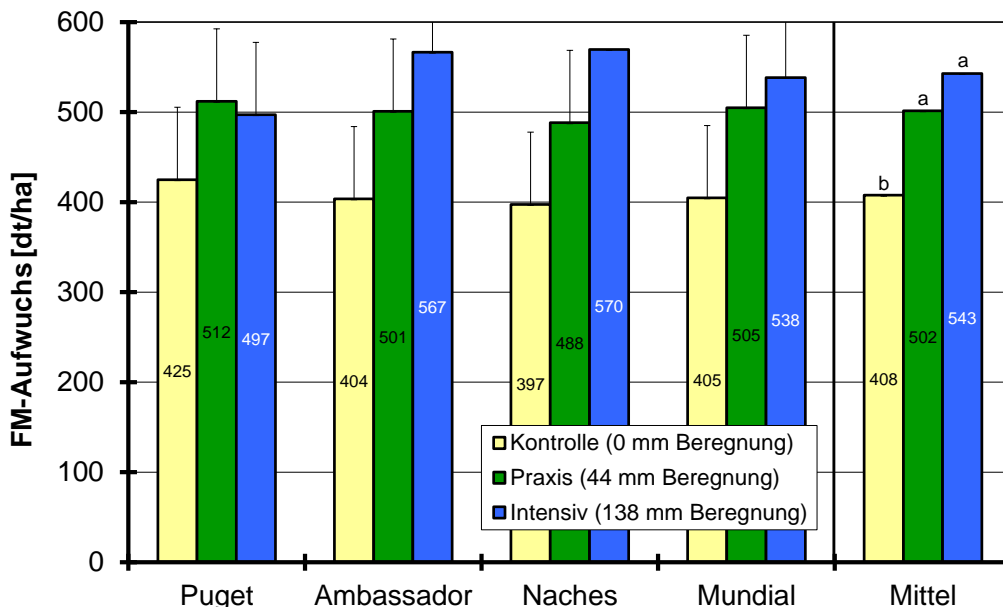


Abbildung 8: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 71,2 dt/ha; Bewässerung x Sorte: 80,4 dt/ha = 1) [Erbsenversuch 2010]

Weil zwischen der 'Kontrolle' und der 'Intensiv'-Variante kein Ertragszuwachs zu verzeichnen war, der Frischmasse-Aufwuchs aber deutlich zunahm, muss sich der Ertragsanteil am gesamten Aufwuchs deutlich vermindert haben. Tatsächlich fiel der Ernteindex (Anteil Erntegut am gesamten Aufwuchs) mit steigender Bewässerungsintensität von 25 % auf knapp 20 % ab (Abbildung 9); die Erbsen sind somit durch die Wassergaben sprichwörtlich 'ins Kraut geschossen'. Es bestand allerdings auch eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte, die sich wiederum bei der Sorte 'Puget' zeigte, die im Gegensatz zu den drei anderen Sorten in der 'Praxis'-Variante den höchsten Ernteindex aufwies.

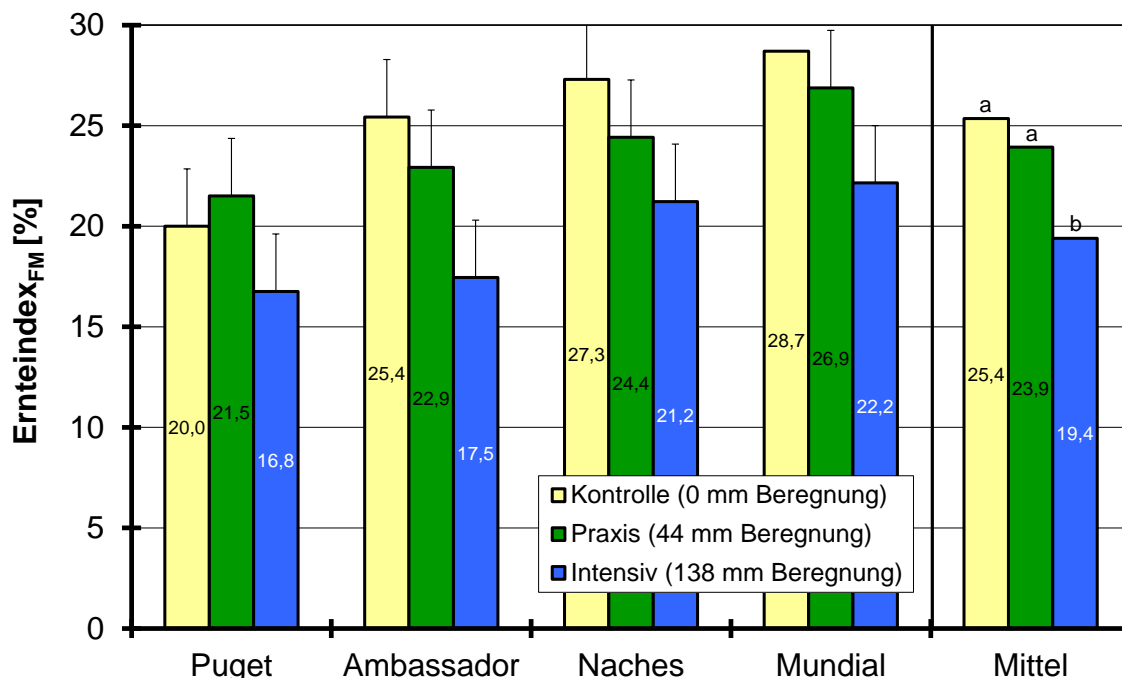


Abbildung 9: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 2,2 %; Bewässerung x Sorte: 2,9 % = 1) [Erbsenversuch 2010]

Tabelle 4: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2010]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ²⁾			% nFK ³⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
18. März ¹⁾		alle	27,3	25,3	27,1	100	100	100
03. Mai ⁴⁾	09	alle	26,0	25,0	28,3	92	98	107
23. Mai	15-16	alle	24,9	25,8	25,1	85	103	87
20. Juni	61	Kontrolle + Praxis	15,7	17,0	21,4	29	42	64
		Intensiv	21,1	20,6	24,5	62	67	83
27. Juni	69	Kontrolle	13,4	13,7	18,4	14	19	46
		Praxis	15,1	16,7	21,7	25	40	66
		Intensiv	20,6	18,1	22,3	59	50	70
12. Juli	76	Kontrolle	12,1	12,4	14,7	7	10	23
		Praxis	15,4	13,9	17,3	27	20	39
		Intensiv	22,1	21,5	23,2	68	73	75

1) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET_0): 15.3.: +10,3; 16.3.: +2,5; 17.3.: -0,5

2) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³, Ermittelt an Mischproben aus 8 Einstichen (2 Bodenproben pro Wiederholung), Trocknung bei 105 °C

3) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 11,0 Vol.-%

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 5a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2010]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]					
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ETp _{PEN} ²⁾	ETp _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾			
				ET ₀ × kc _{PEN}	ETp _{PEN} × kc _{PEN}	ET ₀ × kc _{PEN}		Kontrolle	
			Intensiv		Intensiv	Praxis			
09-16	46,6	63,7	1,37	18,6	25,5	19,1			
16-61	74,5	99,0	1,33	67,1	89,1	68,7			
61-69	25,9	35,0	1,36	33,7	45,5	34,8	34,8	34,8	
69-76	78,3	100,3	1,29	117,5	150,5	120,0	120,0	120,0	
09-76	225,3	298,0	1,34	236,8	310,5	242,6	242,6	242,6	

Tabelle 5b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2010]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁶⁾				
		Intensiv	Praxis	Geisenheim		Agrowetter		
				ET ₀ × kc _{PEN}	ETp _{PEN} × kc _{PEN}	ET ₀ × kc _{PEN}		Kontrolle
				Intensiv		Intensiv	Praxis	
09-16	49,6	0	0	21,5	14,6	23,3		
16-61	39,1	20	0	18,6	16,6	13,8		
61-69	0,1	40	20	0,0		0,0		
69-76	29,0	78	24	0,0		0,4	0,0	
09-76	117,8	138	44	40,1	31,2	37,5	37,1	

1) FAO-Gras-Referenzverdunstung

2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (über Wasser)

3) Mittelwerte der täglichen Quotienten

4) potenzielle Evapotranspiration der Variante 'Intensiv' berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'

5) aktuelle Evapotranspiration des Erbsenbestandes laut 'Agrowetter', bei Variante 'Intensiv' ≈ ET_c

6) aus der Bodenschicht 0-60 cm

2.3.2 Versuchsjahr 2011

Nach einem niederschlagsreichen Winter (190 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 21. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,4 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 29,8 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 7). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen schwach sandigen Lehm (Ls2, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 34 Vol.-% eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%) mit 12,6 Vol.-% ebenfalls reduziert.

Beim Auflaufen der Erbsen (BBCH 09) Ende April wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von knapp 89 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis Mitte Mai mit 25,7 mm ausreichend Niederschläge, um nach 'Agrowetter' und den eigenen Berechnungen (ET₀ × kc_{PEN}) den Boden in 0-30 cm Tiefe im Bereich von 80 % nFK zu halten (Abbildung 10).

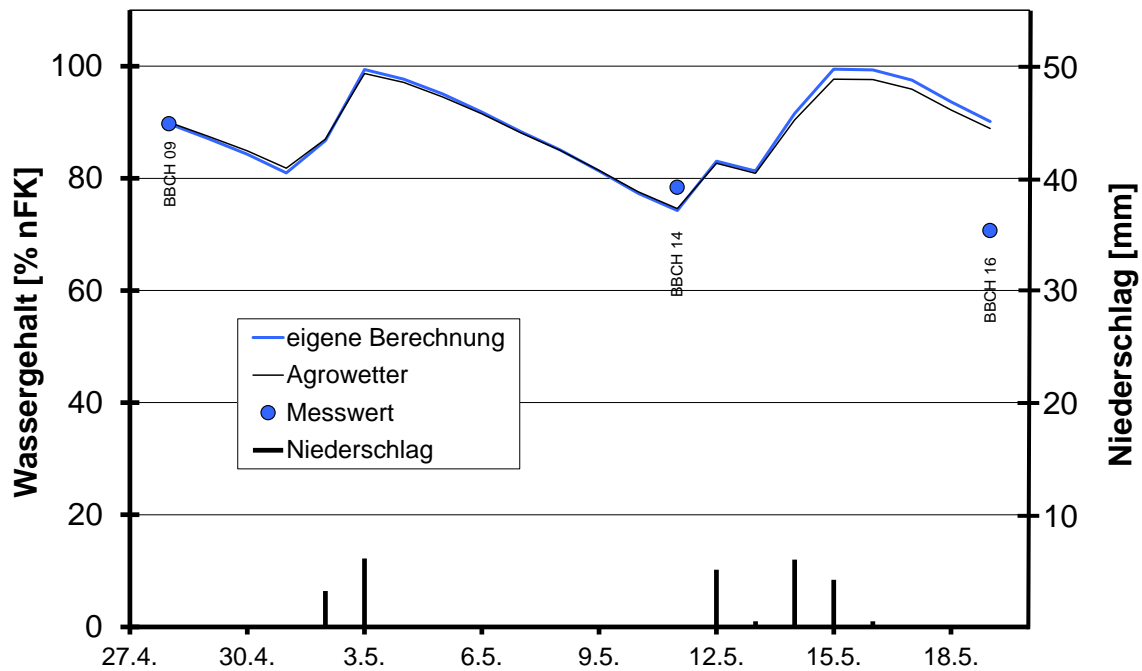


Abbildung 10: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011]

Insgesamt war der Mai mit einer ET_0 von 111,0 mm recht trocken (Abbildung 11), die Erbsen verbrauchten aber nur 72,3 mm (ET_c nach 'Agrowetter'), sodass sich bei 55,4 mm Niederschlag über den Monat hinweg nur ein mäßiges Wasserdefizit ergibt.

Weil sich Ende Mai nach 'Agrowetter' und der eigenen Berechnung ein Absinken der Bodenfeuchte andeutete und sich nach den Ergebnissen der Bodenproben zu BBCH 16 eher eine Überschätzung der Bodenfeuchte zeigte, wurde die Variante 'Intensiv' am 25. Mai zum ersten Mal mit 20 mm beregnet (Abbildung 12). Allerdings fielen am folgenden Tag entgegen der Wettervorhersage noch 13 mm Niederschlag, sodass sich der Boden rechnerisch auf knapp 100 % nFK auffüllte.

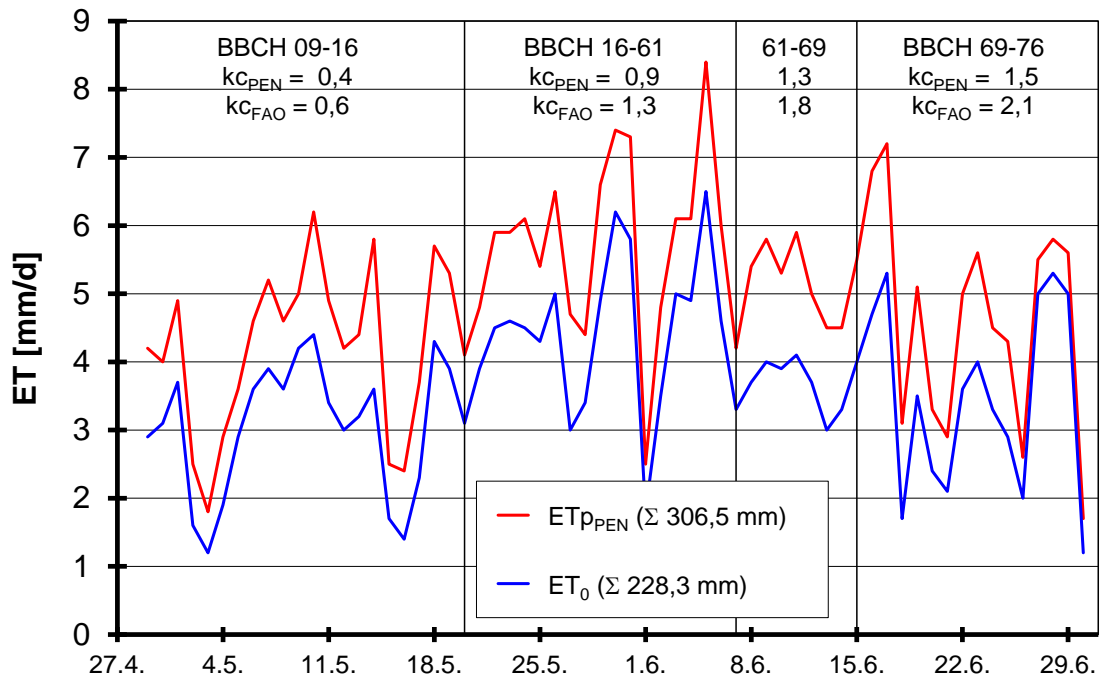


Abbildung 11: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2011]

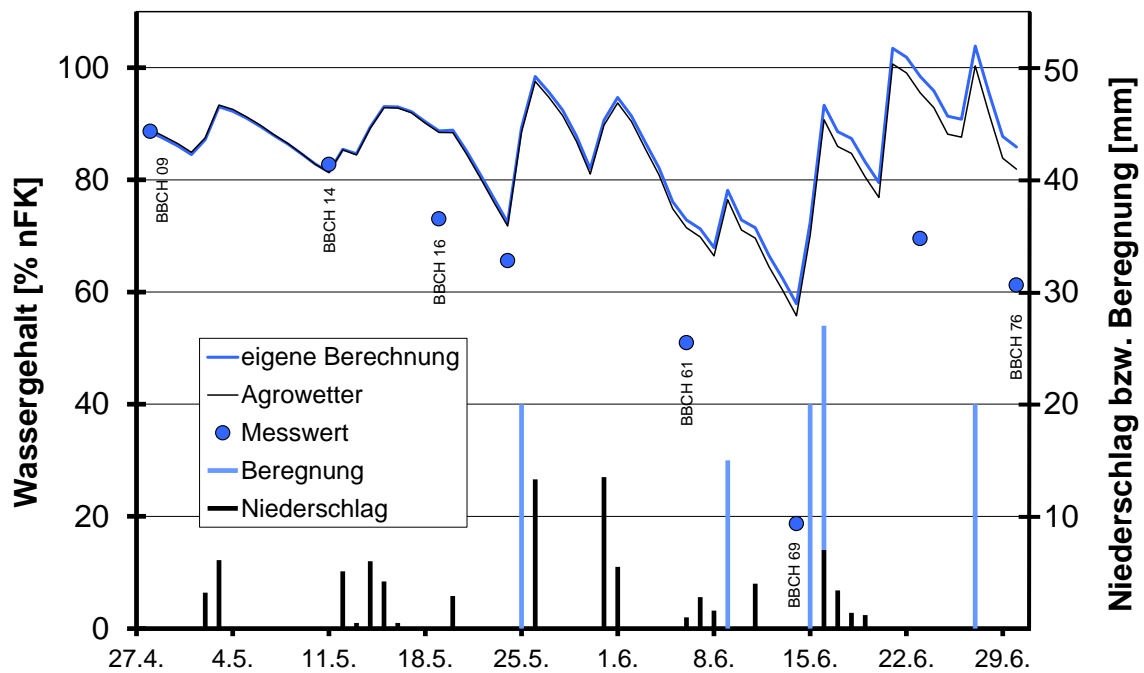


Abbildung 12: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011]

Die auf Basis der ET_0 -Werte mit k_{CPEN} berechneten täglichen Verdunstungswerte stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c\ adj} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 223,1 mm wies 'Agrowetter' aber einen geringfügig höheren Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung, die auf 218,8 mm kam

(Tabelle 8a). Auf Grund der eingeschränkten Wasserversorgung wurde seitens 'Agrowetter' für die 'Praxis'-Variante nur eine $ET_{c\text{adj}}$ von 190,2 mm, für die 'Kontrolle' von 169,1 mm berechnet.

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' ebenfalls sehr ähnlich (Abbildung 12). 'Agrowetter' berechnete zwar an mehreren Terminen für die obere Bodenschicht eine Bodenfeuchte von über 100 % nFK, zu einer Versickerung kam es aber dennoch nicht, weil die Schicht 30-60 cm jeweils noch keine 100 % nFK aufwies. Bei der eigenen Berechnung ergab sich ebenfalls keine Versickerung, weil mit maximal 103,8 % nFK nicht der gesetzte Schwellenwert von 105 % nFK überschritten wurde.

Der Ansatz $ET_0 \times kc_{PEN}$ (auch 'Agrowetter') führte ab BBCH 14 offensichtlich zu einer deutlichen Unterschätzung der ET_c , sodass der Boden bis zu 40 %-Punkte trockener war als kalkuliert (Abbildung 12). Damit fiel mit diesem Ansatz die Prognose der Bodenfeuchte deutlich schlechter als im Vorjahresversuch aus, wo bei zwar auch zwischenzeitlicher Unterschätzung der ET_c für den Erntetermin ein nahezu exakter Bodenwassergehalt vorhergesagt werden konnte.

Berechnet man auf Basis ET_0 die Evapotranspiration der Erbsen mit den dafür vom 'Geisenheimer Modell' damals vorgesehenen kc_{FAO} -Werten, so ergibt sich insgesamt eine ET_c von 311,4 mm. In der ersten Kulturphase errechnet sich so eine um rund 13 mm höhere ET_c (Tabelle 8a), die zu einem Absinken der Bodenfeuchte in 0-30 cm auf unter 60 % nFK führte (o. Abbildung). Im weiteren Kulturverlauf sank mit der so errechneten ET_c die Bodenfeuchte in 0-60 cm aber bis zum permanenten Welkepunkt (0 % nFK) ab (Abbildung 13). Im Vergleich mit den in ein- bis zweiwöchigem Abstand gravimetrisch ermittelten Bodenwassergehalten ist allerdings eine deutliche Überschätzung der ET_c durch den Ansatz $ET_0 \times kc_{FAO}$ zu erkennen. Mit der für ET_{PEN} vom 'Geisenheimer Modell' vorgesehene Berechnung $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ ergibt sich eine ET_c von 292,6 mm, sodass die berechneten Bodenwassergehalte etwas höher ausfielen als beim $ET_0 \times kc_{FAO}$ -Ansatz.

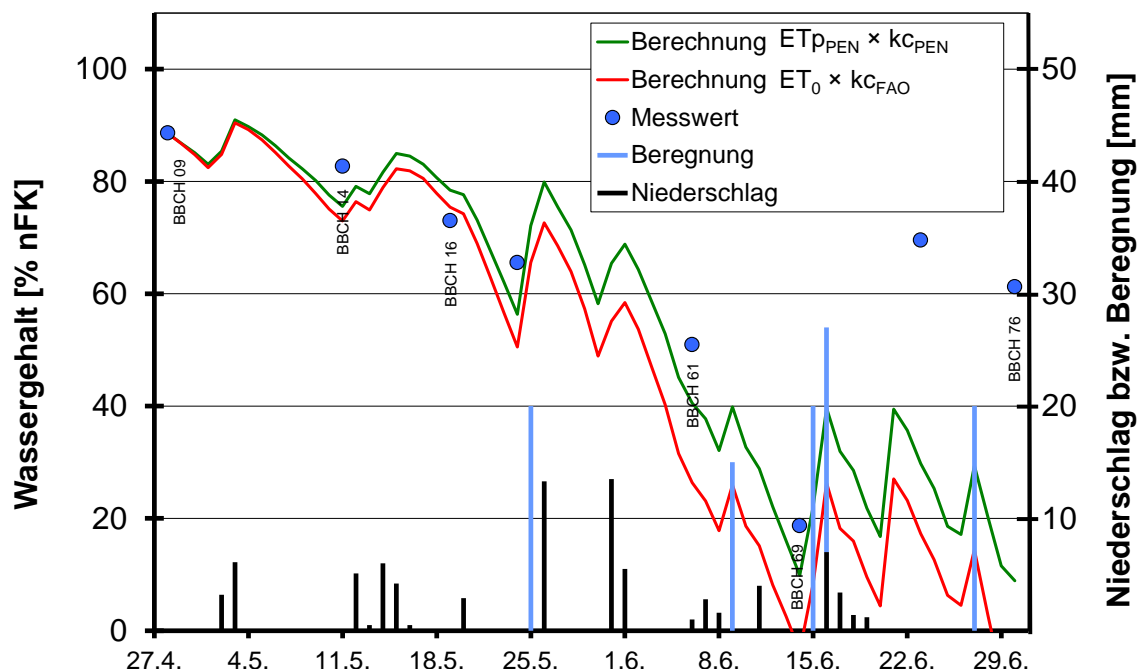


Abbildung 13: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis ($ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011]

Der Bodenfeuchtigkeitsgehalt der 'Praxis'-Variante wurde vom 'Agrowetter'-Modul im Gegensatz zur 'Intensiv'-Variante wie im Vorjahresversuch sehr gut prognostiziert (Abbildung 14). Die 'Kontrolle' sank bis zur Ernte rechnerisch bis auf knapp 20 % nFK ab, tatsächlich wurde sogar nur ein Wassergehalt von 8 % nFK ermittelt.

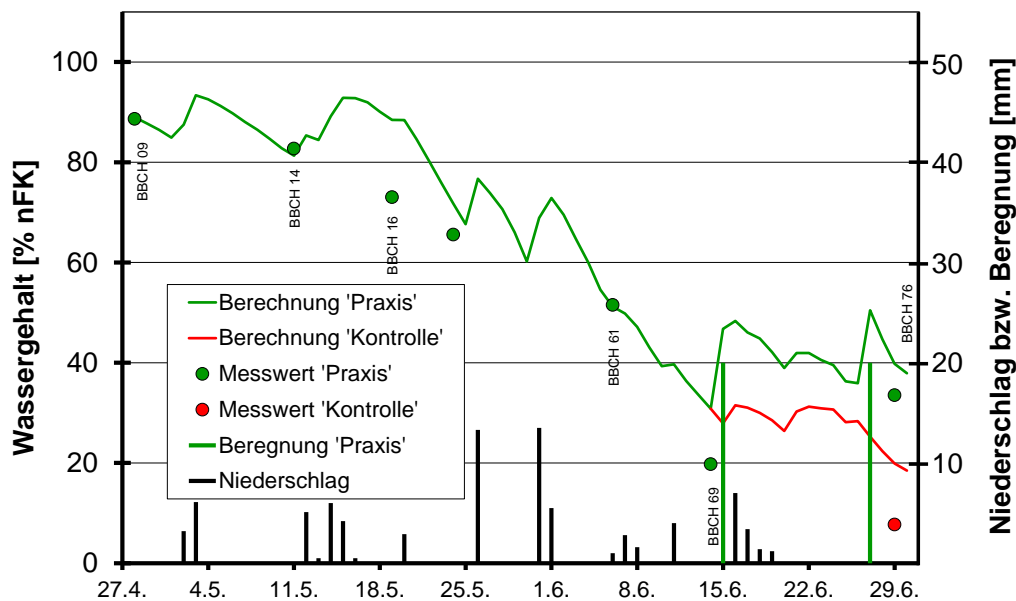


Abbildung 14: Niederschlags- und Beregnungsmengen und Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2011]

Der Erbsenbestand bzw. die unterschiedlichen Varianten zeigten während der Kulturzeit keine auffälligen Trockenstresssymptome wie (mittägliches) Welken etc. Optisch war nur eine größere Bestandeshöhe bei der 'Intensiv'-Variante auszumachen. Abgeschwächt als im Vorjahresversuch war in dieser Variante wiederum eine *Botrytis*-Fäulnis in den unteren Blattetagen festzustellen.

Im Gegensatz zum Vorjahresversuch mit einem für jede Sorte einheitlichen Erntetermin wurde versucht, die verschiedenen Sorten bzw. Varianten jeweils mit einem TW von ca. 120 zu ernten. Dazu wurden, nach vorherigem Probedrusch, die 'Intensiv'-Varianten bis zu 3 Tage nach der 'Kontrolle' beerntet (Tabelle 6). Bei der Sorte 'Naches' wurde die rechtzeitige Ernte der 'Kontrolle' und 'Praxis'-Variante versäumt, sodass hier mit einem TW von 152 bzw. 144 ca. zwei Tage zu spät geerntet wurde. Gleichzeitig wurde die Variante 'Intensiv' mit einem TW von 111 etwas zu früh geerntet, sodass sich auch hier für die 'Praxis'-Variante ein Reifevorsprung von ca. 3 Tagen errechnet. Bei der Sorte 'Puget' belief sich der Reifevorsprung der 'Kontrolle' nur auf maximal einem Tag.

Tabelle 6: Erntetermin, Tenderometerwert und Frischmasseerträge der verschiedenen Varianten [Erbsenversuch 2011]

Bewässerung Sorte ¹⁾	Kontrolle				Praxis				Intensiv			
	Pug	Amb	Nac	Mun	Pug	Amb	Nac	Mun	Pug	Amb	Nac	Mun
Erntetermin	28.6.	30.6.	4.7.	1.7.	28.6.	30.6.	4.7.	4.7.	29.6.	1.7.	4.7.	4.7.
Tenderometerwert ²⁾	124	122	152	116	119	115	144	134	128	107	111	112
FM-Ertrag [dt/ha] ³⁾	91	97	111	107	92	84	128	133	97	104	125	86

1) Puget, Ambassador, Naches, Mundial

2) Mischprobe über die Wiederholungen (je 3 Messwiederholungen)

3) $GD(\alpha < 0,05)$ Bewässerungseffekt: n. s.; Bewässerung x Sorte: 20,8 dt/ha

Beim dem auf einen TW von 120 korrigierten Frischmasseertrag konnte keine signifikante Bewässerungswirkung ermittelt werden (Abbildung 15). Allerdings errechnete sich neben einem signifikanten Sorteneffekt ($GD_{(\alpha<0,05)}$: 12,4 dt/ha) eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte. So zeigte die Sorte 'Puget' (entsprechend ihrer 'Trockenstresstoleranz') praktisch keine Ertragsreaktion auf die Bewässerung, während 'Ambassador' („wasserbedürftig“) und 'Naches' („trockenstresstolerant“) deutlich positiv auf die Bewässerung reagierten. 'Mundial' („wasserbedürftig“) zeigte in der 'Kontrolle' und 'Praxis'-Variante den höchsten Ertrag. Bei intensiver Bewässerung kam es aber hier zu einem massiven Ertragseinbruch, der allerdings nur 2 der 4 Wiederholungen betraf, sodass bei alleiniger Betrachtung der Sorte 'Mundial' keine Bewässerungseffekte abzusichern waren. Ursache für den starken Ertragseinbruch in den beiden Wiederholungen dürfte der hier nur geringe Ernteindex (s. u.) gewesen sein.

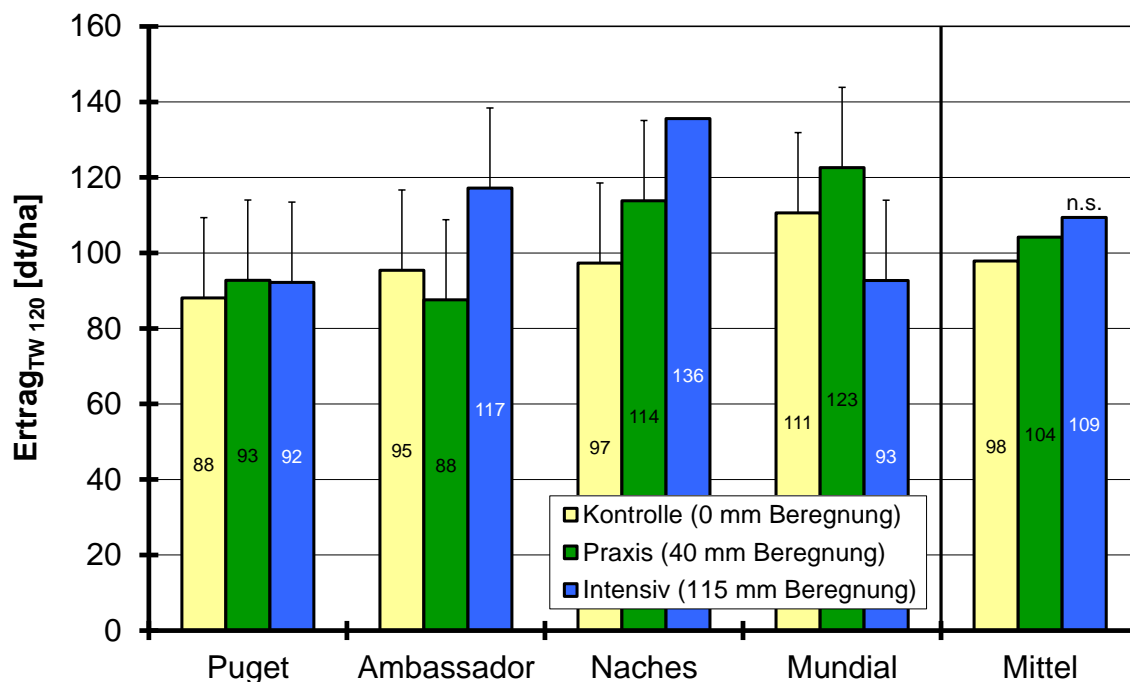


Abbildung 15: Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung x Sorte: 21,3 dt/ha = I) [Erbseversuch 2011]

Im Gegensatz zum diesjährigen Ergebnis reagierte 'Puget' im Vorjahresversuch tendenziell mit dem größten Ertragszuwachs durch eine moderate Bewässerung, zeigte aber auch den stärksten Ertragsrückgang zwischen 'Praxis'- und 'Intensiv'-Variante.

Entsprechend der Abnahme der Ernterückstände mit abnehmender Beregnungsintensität (o. Abbildung) nahm auch die gesamte Aufwuchsmenge sehr deutlich ab (Abbildung 16). Allerdings bestand neben einem Sorteneffekt ($GD_{(\alpha<0,05)}$: 21,0 dt/ha) eine signifikante Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte, die sich insbesondere bei der Sorte 'Puget' zeigte, die im Gegensatz zu den drei anderen Sorten kaum auf die Wassergaben reagierte.

Analog der nur geringfügigen Beeinflussung des Aufwuchses und des Ertrages durch die Bewässerung bei der Sorte 'Puget' wurde der Ernteindex (Anteil Marktware am gesamten Aufwuchs) bei dieser Sorte nicht von der Bewässerungsintensität beeinflusst (Abbildung 17). Bei den Sorten 'Ambassador' und 'Naches' fiel er mit der intensiven Wassergabe um rund 3,8 bzw. 2,5 %-Punkte ab. Bei 'Mundial' wurde in den beiden ertragschwachen Wiederholungen nur ein Ernteindex von 11 % ermittelt, aber auch in den anderen beiden Wieder-

holungen fiel der Index von rund 25 % ('Kontrolle'/'Praxis') auf 19 % ab. (Vermutlich beruht der starke Abfall des Ernteindex bei dieser Sorte aber nur zum Teil auf einen tatsächlich geringeren Kornanteil. Wahrscheinlich war auch die 'Dreschbarkeit' beeinträchtigt, sodass möglicherweise vermehrt Hülsen ungeöffnet blieben und/oder die Siebe durch das 'schmierigere' Dreschgut verstopften. Eine entsprechende Beobachtung wurde allerdings seitens der Arbeitskräfte nicht vermerkt.)

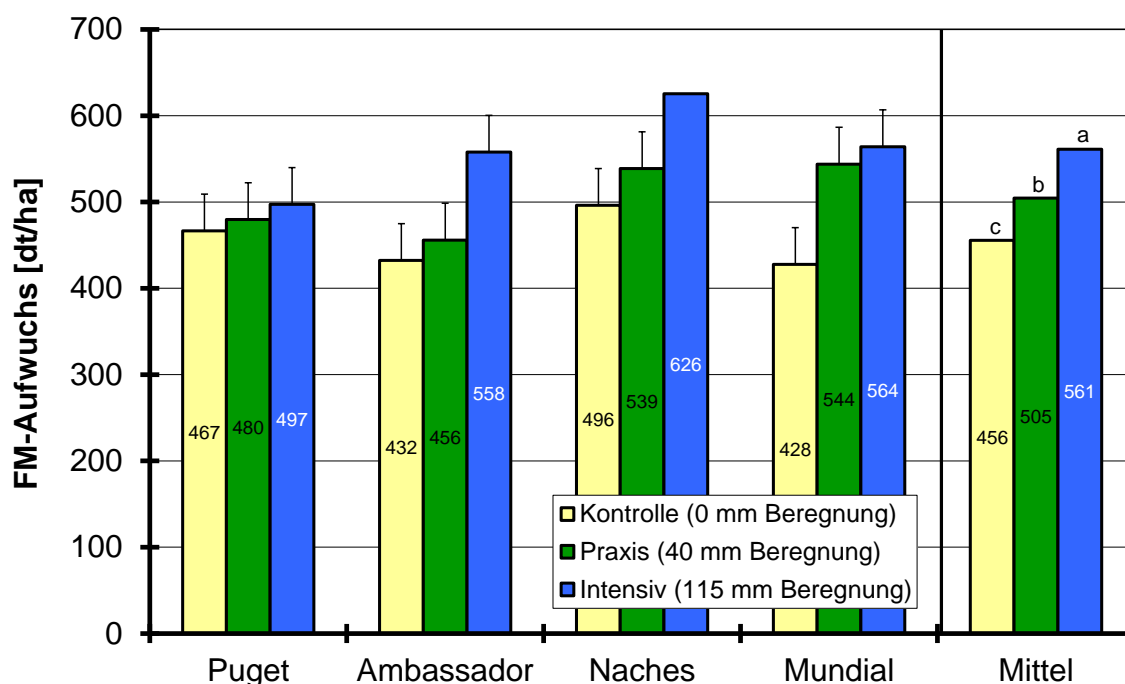


Abbildung 16: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte
 ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 29,1 dt/ha; Bewässerung x Sorte: 42,7 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2011]

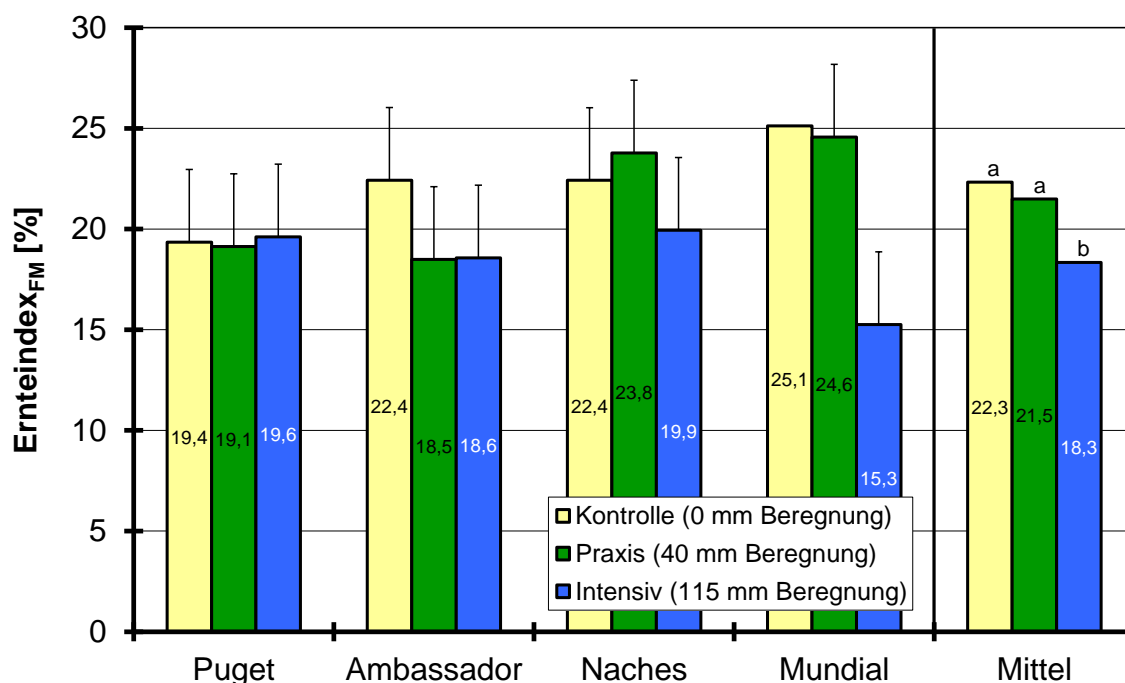


Abbildung 17: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte
 ($GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,9 %; Bewässerung x Sorte: 3,6 % = I) [Erbsenversuch 2011]

Tabelle 7: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2011]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ²⁾			% nFK ³⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
21. März ¹⁾		alle	27,4	29,8	30,5	100	100	100
28. April	09	alle	25,9	27,6	27,1	90	88	80
11. Mai	14	alle	24,2	27,5		78	87	
19. Mai	16	alle	23,1	25,5	27,1	71	75	80
24. Mai		alle	20,4	26,0		53	78	
6. Juni	61	Kontrolle + Praxis	18,8	23,2	25,4	42	62	69
		Intensiv	19,2	22,4	25,7	45	57	71
14. Juni	69	Kontrolle + Praxis	14,8	16,9	18,3	15	25	26
		Intensiv	15,2	16,0	20,3	18	20	38
23. Juni		Intensiv	25,4	21,7		86	53	
29. Juni	76	Kontrolle	13,5	14,2	18,1	6	9	25
		Praxis	17,2	18,8	20,9	31	36	42
30. Juni	76	Intensiv	23,6	20,9	21,9	74	48	48

1) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET₀): 18.3.: +13,6; 19.3.: -0,9; 20.3.: -0,9

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

3) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 12,6 Vol.-%

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 8a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2011]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]					
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾	ET _{pPEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾			Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾		
				ET ₀ × k _{C PEN}	k _{C FAO}	ET _{pPEN} × k _{C PEN}	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-16	63,8	88,4	1,41	25,5	38,3	35,4	26,1		
16-61	79,5	103,0	1,31	71,6	103,4	92,7	72,8	72,2	
61-69	29,0	40,6	1,40	37,7	52,2	52,8	38,5	28,1	
69-76	56,0	74,5	1,37	84,0	117,6	111,8	85,7	63,8	42,7
09-76	228,3	306,5	1,37	218,8	311,4	292,6	223,1	190,2	169,1

Tabelle 8b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2011]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁶⁾					
		Intensiv	Praxis	Geisenheim			Agrowetter		
				ET ₀ × k _{C PEN}	k _{C FAO}	ET _{pPEN} × k _{C PEN}	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-16	25,7	0	0	keine Versickerung					
16-61	36,3	20	0						
61-69	8,4	15	0						
69-76	30,8	80	40						
09-76	101,2	115	40						

1) FAO-Gras-Referenzverdunstung

2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (über Wasser)

3) Mittelwerte der täglichen Quotienten

4) potenzielle Evapotranspiration der Variante 'Intensiv' berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'

5) aktuelle Evapotranspiration des Erbsenbestandes laut 'Agrowetter', bei Variante 'Intensiv' ≈ ET_c

6) aus der Bodenschicht 0-60 cm

2.3.3 Versuchsjahr 2012

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 27,0 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,1 Vol.-% (30-60 cm) errechnet (Tabelle 9). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 30 Vol.-% (SI4, Rohdichte $1,5 \text{ g/cm}^3$) bzw. 33 Vol.-% (Ls3) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%, Ls3: 17 Vol.-%) mit 10,8 Vol.-% bzw. 14,0 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 14,7 Vol.-% errechnet.

Kurz nach dem Auflaufen der Erbsen (BBCH 09) wurde Anfang Mai ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von nur 57,5 % nFK ermittelt. Weil Niederschläge nicht in der angekündigten Höhe fielen, mussten die Variante 'Intensiv' und 'Minimiert' am 8./9. Mai mit insgesamt 24 mm Zusatzwasser bis auf knapp 90 % nFK (0-30 cm: > 100 % nFK) aufgefüllt werden (Abbildung 18 und Abbildung 20, Tabelle 10b).

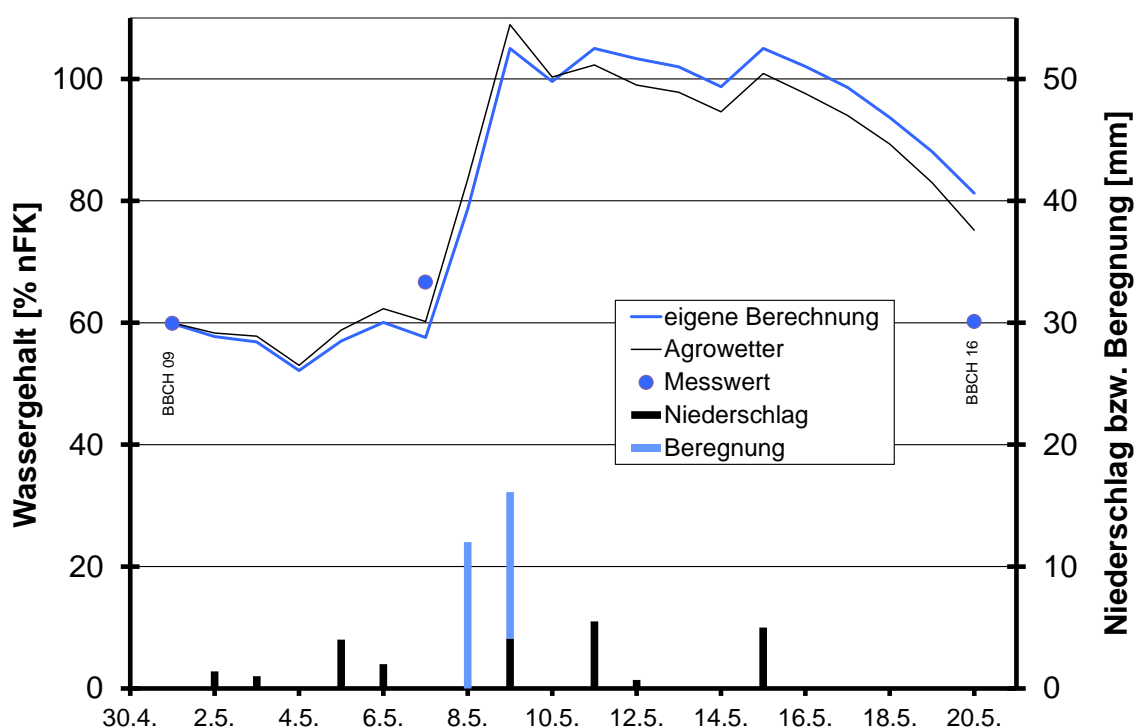


Abbildung 18: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten 'Intensiv' und 'Minimiert' bis zum 6-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012]

Um/nach dem 6-Blatt-Stadium herrschten mit ET_{pPEN} -Werten von bis zu 8 mm/d (Abbildung 19) und ausbleibenden Niederschlägen sehr trockene Bedingungen, sodass die Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' binnen 9 Tagen mit insgesamt 74 mm beregnet werden musste. Nachfolgende Niederschläge füllten dann den Boden (rechnerisch) bis auf FK auf (Abbildung 20). Nach dem Hülsenansatz (BBCH 69) mussten weitere 72 mm gegeben werden, wobei die am 23. Juni notwendig gewesene Bewässerung aus terminlichen Gründen erst am 26. Juni gegeben werden konnte. Nach dem 29. Juni blieben Niederschläge in der angekündigten Höhe zunächst aus, sodass auch hier die Bodenfeuchte (rechnerisch) kurzfristig auf 40 % nFK sank. Insgesamt wurde die Variante 'Intensiv' mit 170 mm bewässert (Tabelle 10b). In der Variante 'Minimiert', bei

der sich auf Grund geringer angesetzter k_{cPEN} -Werte eine geringere ET_c errechnete, mussten insgesamt nur 122 mm Zusatzwasser gegeben werden (vgl. Abbildung 21).

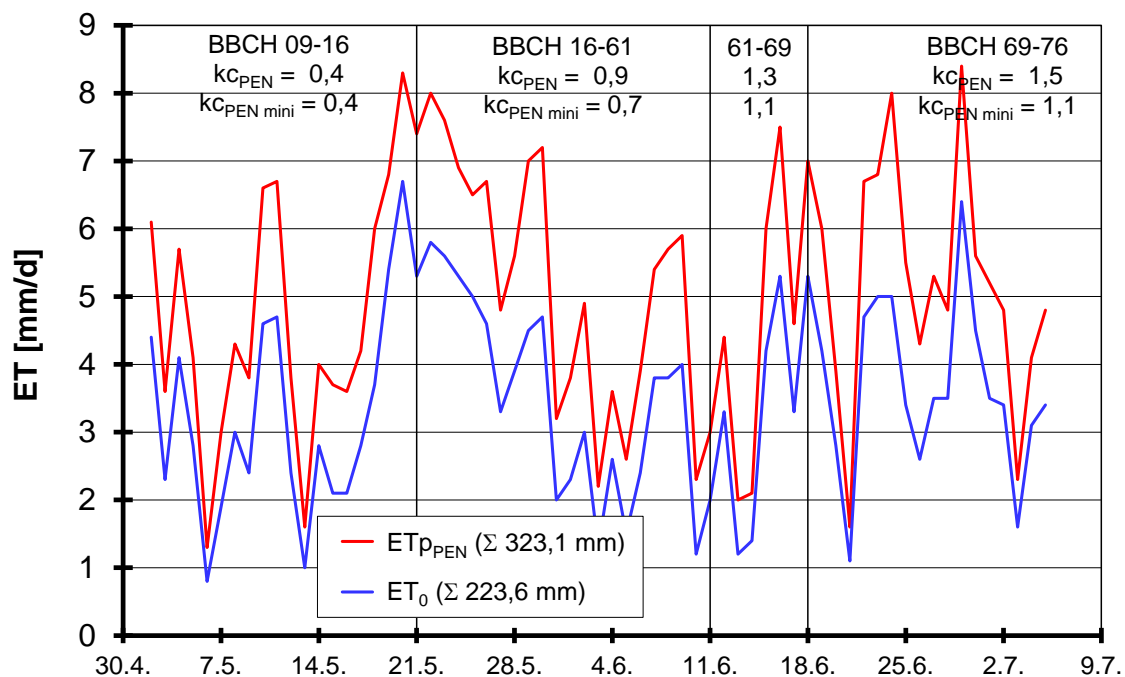


Abbildung 19: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2012]

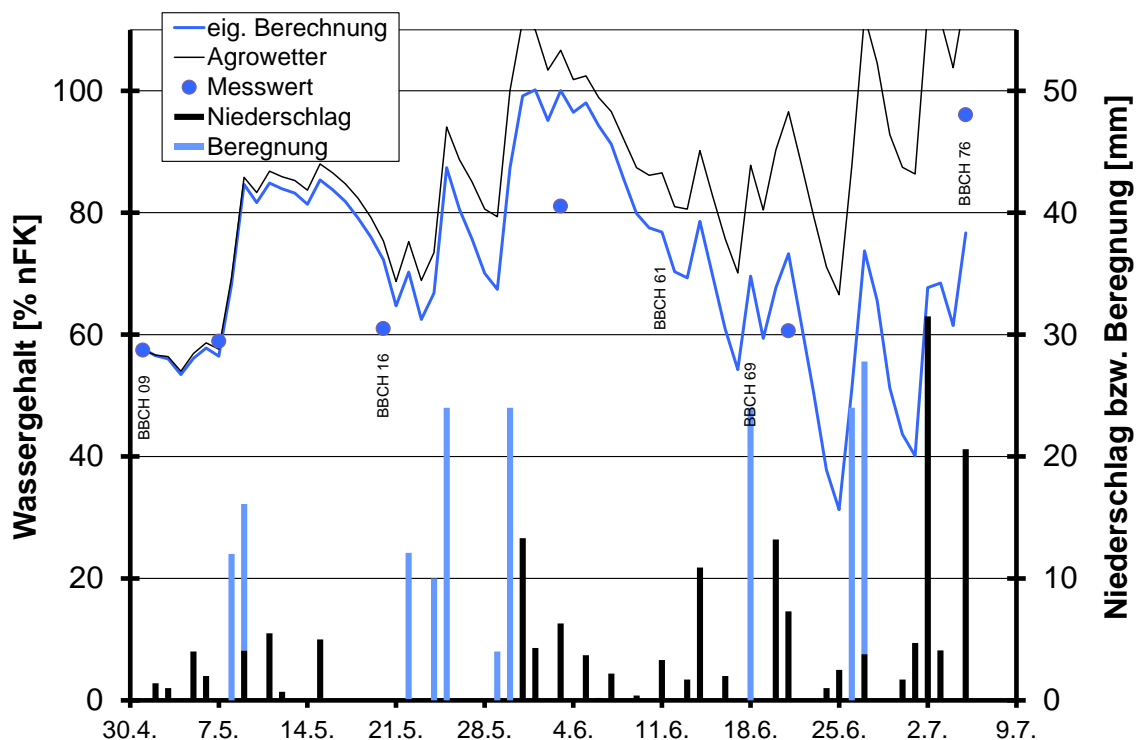


Abbildung 20: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{cPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012]

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' eine ET_c von 316,1 mm. Obgleich 'Agrowetter' ET_c auf Basis der hier um Faktor 1,48 (vgl. Tabelle 10a) geringeren ET_0 rechnet, kam das Modell mit 253,5 mm zu einer nur um Faktor 1,25 geringeren ET_c . Dieses ist auf die 'Windkorrektur' und die etwas geringeren k_c -Werte (0,4; 0,85; 1,25; 1,3; JANSSEN 2012) zurückzuführen.

Entsprechend der unterschiedlichen Verdunstungswerte bei den beiden Modellen drifteten die berechneten Bodenfeuchtegehalte bei der Variante 'Intensiv' mit der Zeit auseinander (Abbildung 20). Hinzu kam, dass 'Agrowetter' etwa zu Kulturmitte eine Versickerung von 11,7 mm und zu Kulturende von 15,0 mm berechnete, während sich der Boden nach dem 'Geisenheimer Modell' auf maximal 100,1 % auffüllte und damit keine Versickerung angenommen wurde. Dass tatsächlich eine Versickerung stattgefunden haben muss, lässt sich aus den Bodenwassergehalten der Schicht 60-90 cm ableiten, die zu Kulturende einen höheren Wassergehalt aufwiesen als zu Kulturbeginn (Tabelle 9).

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt von 'Agrowetter' zumeist deutlich überschätzt (Abbildung 20). Lediglich zu Kulturende glichen sich Modell und Realität wieder an, weil sich nach 'Agrowetter' die Bodenfeuchte nach den ergiebigen Niederschlägen durch die Sickerwasserbildung auf FK-Niveau 'einpendelte', was offensichtlich auch der Realität entsprach.

Auch die Berechnung nach dem 'Geisenheimer Modell' führte zunächst zu einer mäßigen Überschätzung der Bodenwassergehalte. Wie in den vorangegangenen 2 Versuchen wurde dann aber zu Kulturende der Bodenwassergehalt unterschätzt, sodass anzunehmen ist, dass der hier angenommene k_c -Wert von 1,5 zu hoch angesetzt ist.

Hierbei muss man allerdings berücksichtigen, dass die k_c -Werte beim 'Geisenheimer Modell', die ursprünglich aus der Relation zwischen der im Lysimeter-Versuch gemessenen ET_c und der Referenzverdunstung errechnet wurden, im Laufe eines 'Evaluierungsprozesses' häufig gesenkt wurden, wenn in Feldversuchen mit entsprechend geringeren Beregnungsgaben gleich hohe oder sogar höhere Erträge erzielt werden (KLEBER 2012). Bei Erbsen war dieser Prozess noch nicht abgeschlossen.

Für die nur moderat berechnete Variante 'Minimiert' berechneten sich (nach eigener Berechnung und, nahezu identisch, nach 'Agrowetter') auf Grund von zu späten Wassergaben bzw. ausgebliebener Niederschläge kurzzeitig Bodenwassergehalte von unter 60 % nFK, in einem Fall unter 50 % nFK (Abbildung 21).

In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach 'Agrowetter' ab Kulturmitte über längere Zeit auf Werte um 30 % nFK aus; am 21. Juni wird dies auch durch eine Bodenwasserprobe bestätigt (Abbildung 22). Auch zu anderen Terminen prognostizierte 'Agrowetter' die Bodenwassergehalte dieser Variante relativ gut, nur zu Kulturmitte wurde der Wassergehalt der Variante 'Minimiert' deutlich unter-, der Wassergehalt der 'Kontrolle' deutlich überschätzt.

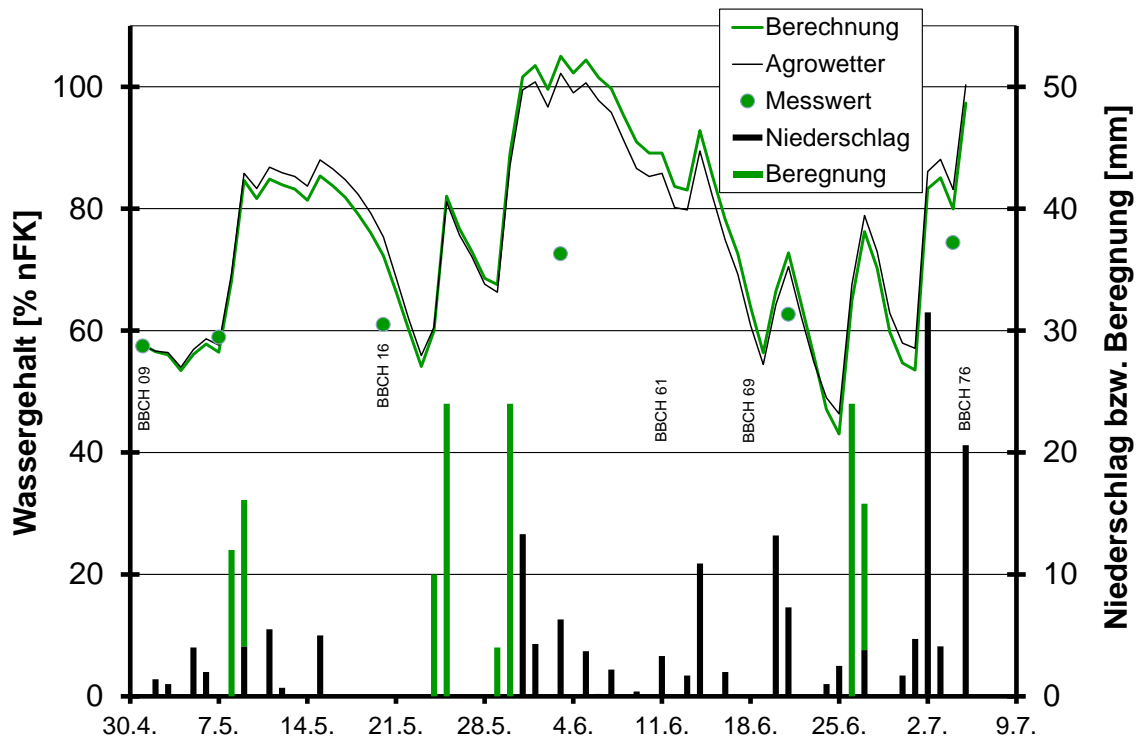


Abbildung 21: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_{PEN} \times KC_{PEN_{mini}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012]

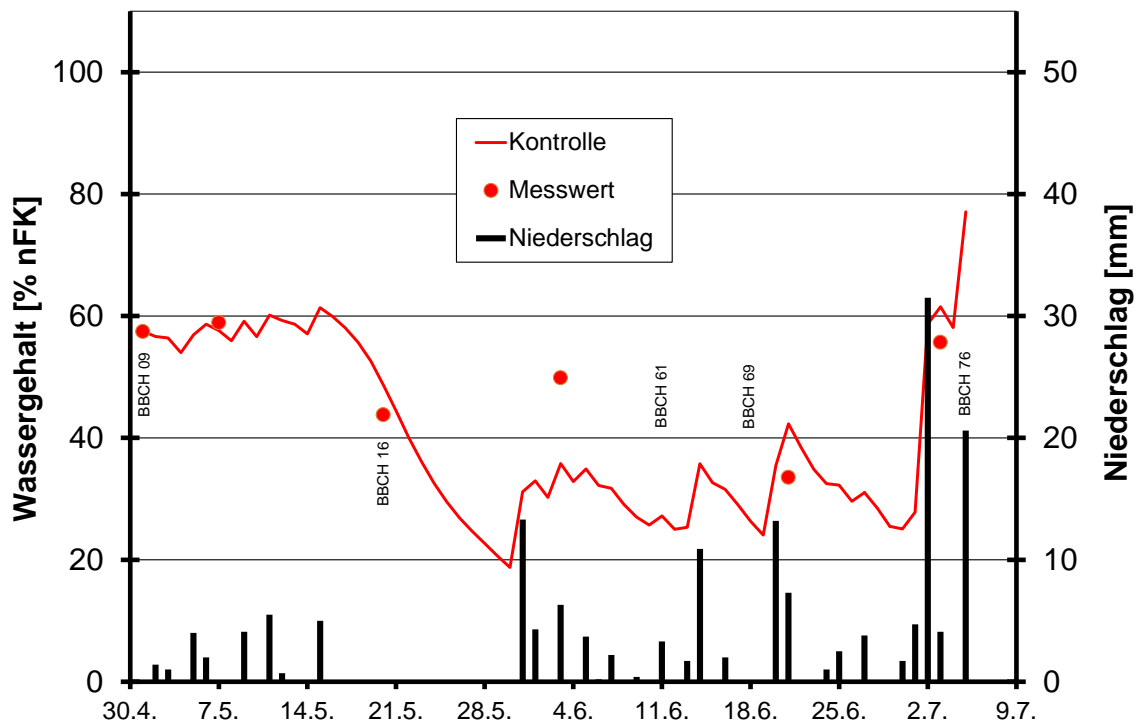


Abbildung 22: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2012]

Trotz der offensichtlich massiven Austrocknung des Bodens in der 'Kontrolle' zeigten die Erbsen hier auch vor den kurz vor der Ernte einsetzenden Niederschlägen keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Signifikante Beregnungseffekte wurden aber bereits bei der Bonitur des Blühbeginns sichtbar. (Mit Ausnahme des Ernteindizes wurden bei allen Parametern auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.) So blühten die unberegneten Erbsen in der 'Kontrolle' im Schnitt drei Tage vor den bewässerten (Abbildung 23).

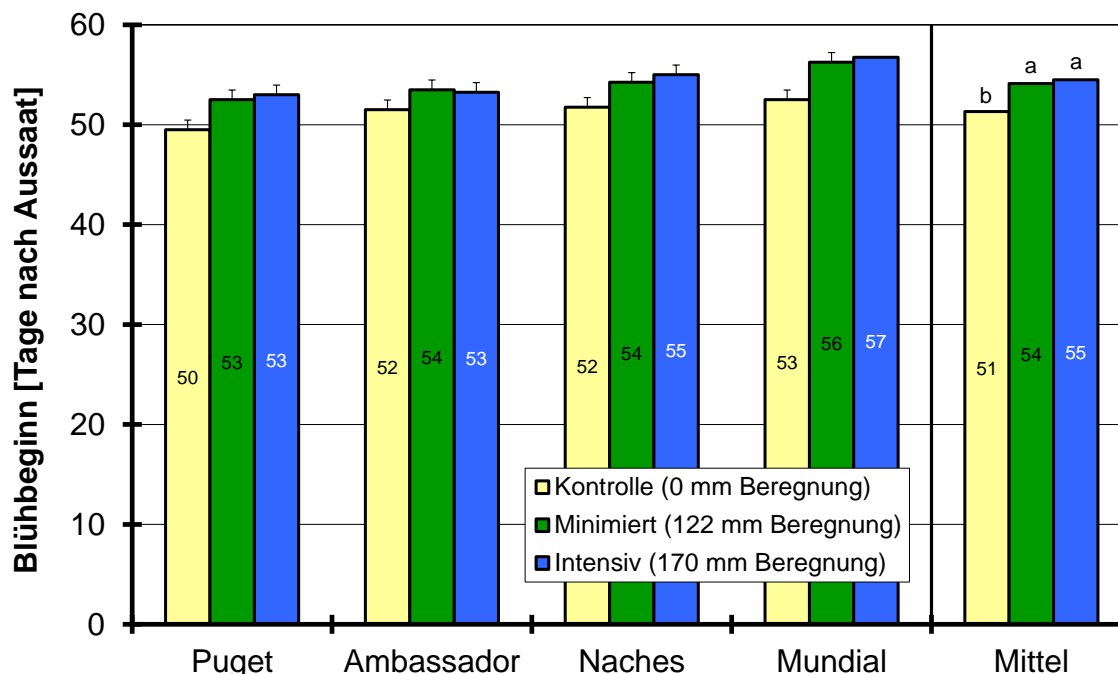


Abbildung 23: Blühbeginn (Tage nach Aussaat) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte
 (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 1,0 Tage = 1) [Erbsenversuch 2012]

Die Ernte der Erbse wurde stark von den zu diesem Zeitpunkt herrschenden Witterungsbedingungen beeinträchtigt. Nach 31,5 mm Niederschlag am 2. Juli konnte erst am 4. Juli mit der Ernte der 'Kontrolle' begonnen werden; die Sorte 'Puget' wies hier bereits einen TW von 183 auf (Abbildung 24). An den beiden folgenden Tagen mussten die Varianten 'Minimiert' und 'Intensiv' unter dem Einfluss von weiteren 20,6 mm Niederschlag geerntet werden, ohne dass hierbei auf die aktuelle Reife der Varianten Rücksicht genommen werden konnte. Trotzdem wurden zumeist 'akzeptable' TW erzielt.

Trotz der um 1 bzw. 2 Tage früheren Ernte wiesen die Erbsen der 'Kontrolle' einen signifikant höheren TW auf als die beregneten Varianten, die auch unter Berücksichtigung des um einen Tag unterschiedlichen Erntetermins praktisch die gleiche Reife zeigten.

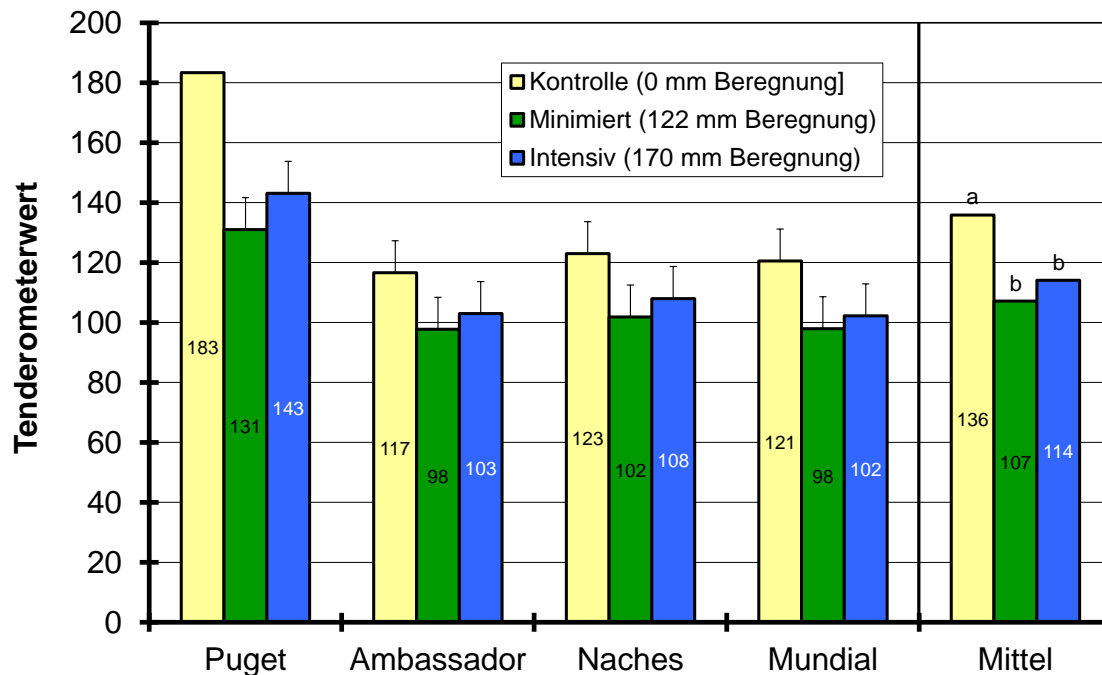


Abbildung 24: Tenderometerwert in Abhängigkeit von Erntetermin, Bewässerung und Sorte
(Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha < 0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 10,7 = 1) [Erbsenversuch 2012]

Wesentlich ausgeprägter als bei den vorangegangenen 2 Versuchen war in der Variante 'Intensiv' und abgeschwächt auch in der Variante 'Minimiert' eine starke Fäulnis der unteren Hälfte der Pflanzen zu verzeichnen. Dieses faulige Material verstopfte die Siebe der Dreschmaschine binnen kürzester Zeit, sodass trotz regelmäßiger Reinigung der Siebe viele Erbsen in den Ernterückständen verblieben. Bei der Variante 'Intensiv' war so ein ordnungsgemäßes Dreschen praktisch unmöglich. Erst nachdem das Pflanzenmaterial auf einer gepflasterten Fläche ausgebreitet wurde und abtrocknete, konnte 'normal' gedroschen werden. Allerdings wurde so nur bei 2 der 4 Wiederholungen dieser Variante verfahren. Durch das Antrocknen (und auch die geringeren Mengen an Erbsen) veränderte sich allerdings die Frischmasse an Ernterückständen sehr deutlich.

Auf Grund der unterschiedlichen Reifegrade ist ein Ertragsvergleich nur mit dem auf TW 120 korrigierten Ertrag möglich. Hier zeigte sich, wie auch in den vorangegangenen Versuchen, keine von der Sorte unabhängige (= signifikante Wechselwirkung) Bewässerungswirkung (Abbildung 25). Wie im Vorjahresversuch reagierte die Sorte 'Puget' kaum auf die Bewässerung, während 'Mundial' bei Bewässerung einen Ertragsrückgang zeigte. 'Naches' brachte in der Bewässerungsstufe 'Minimiert' den höchsten Ertrag.

Der sich abzeichnende geringere Ertrag der 'Intensiv'-Variante dürfte vor allem auf die erwähnten Druschprobleme und nicht auf einen geringeren Hülsenansatz etc. zurückzuführen sein. Betrachtet man nämlich nur die beiden Wiederholungen, bei denen in der Variante 'Intensiv' das Druschgut angetrocknet wurde, so ist bei keiner der Sorten mehr ein signifikanter Ertragsabfall zwischen der 'Kontrolle' und der 'Intensiv'-bewässerten Variante festzustellen (Abbildung 26). (Auch bei praxisüblichen Erbsen-Pflückdreschern treten bei starker Fäulnis druschbedingte Ertragsverluste auf. Allerdings verfügen diese über Bürsten, die die Siebe kontinuierlich reinigen, sodass die Verluste vermutlich weniger 'dramatisch' ausgefallen wären.)

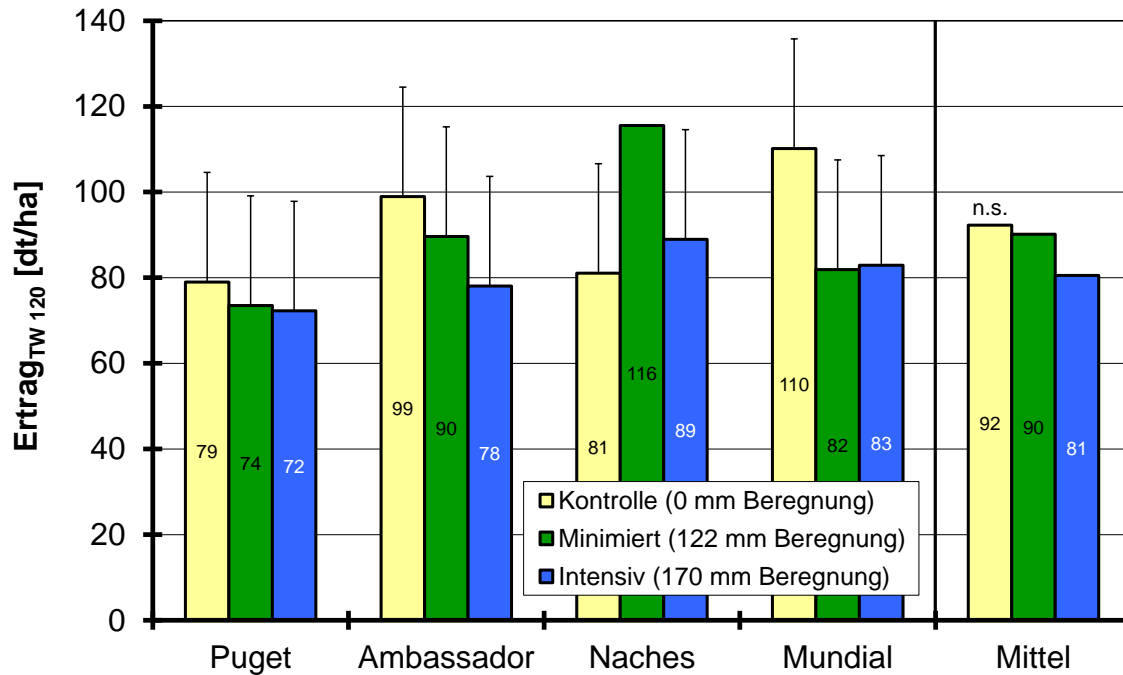


Abbildung 25: Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 25,6 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012]

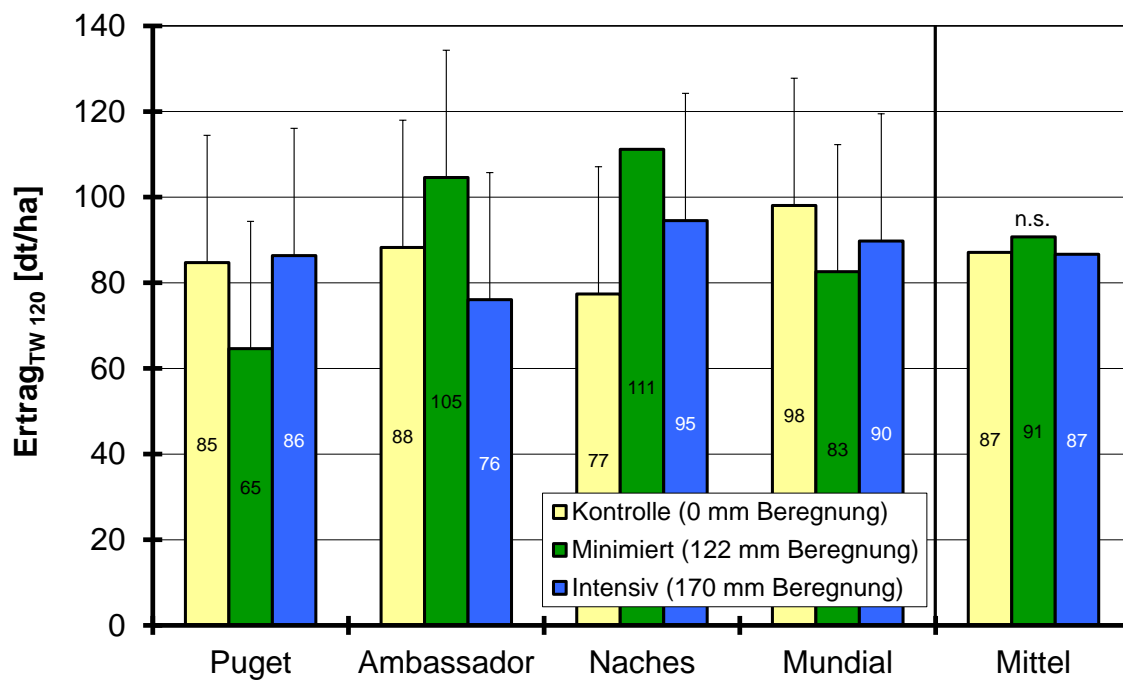


Abbildung 26: Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) der Blöcke C und D in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 29,7 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012]

Die Menge an Ernterückständen und damit die gesamte Aufwuchsmenge konnte wegen des teilweise durchgeführten Antrocknens nur in der 'Kontrolle' und der Variante 'Minimiert' ermittelt werden (Abbildung 27). Wie auch beim Ertrag konnte eine höhere Aufwuchsmenge bei Zusatzbewässerung nur bei der Sorte 'Naches' statistisch abgesichert werden. Der Ernteindex wurde durch eine Zusatzbewässerung wiederum negativ beeinflusst, nur bei 'Naches' war dies nicht abzusichern (Abbildung 28).

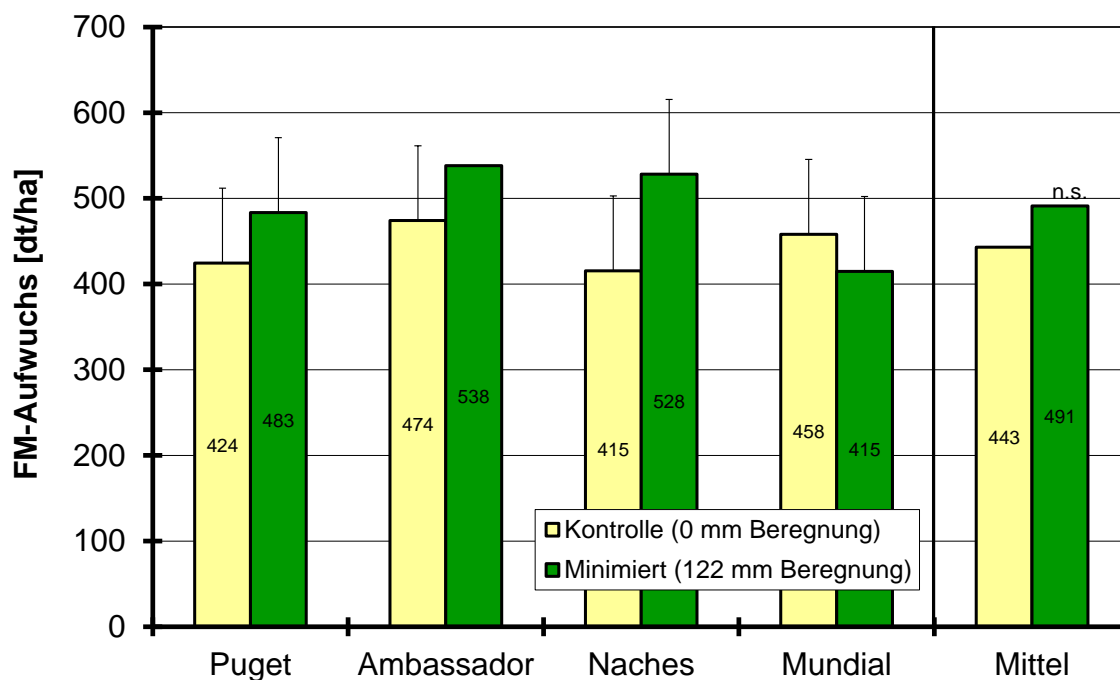


Abbildung 27: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 87,4 dt/ha = I) [Erbsenversuch 2012]

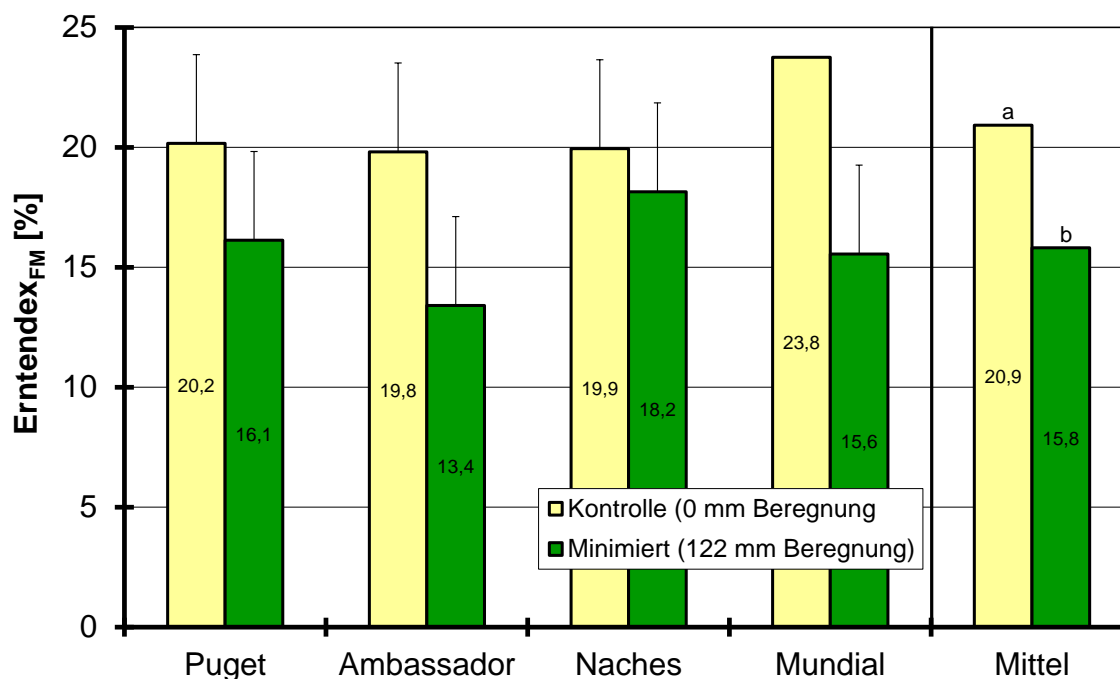


Abbildung 28: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung \times Sorte: 3,7 % = I) [Erbsenversuch 2012]

Tabelle 9: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2012]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] 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	26,1	26,4	27,4			
Mittel ⁴⁾		alle	27,0	27,1	27,8	100	100	100
01. Mai ⁵⁾	09	alle	20,5	21,2	24,4	60	55	75
07. Mai		alle	21,6	20,7		67	51	
20. Mai		Kontrolle	18,6	19,2		48	40	
		Intensiv+Minimiert	20,6	22,1		60	62	
03. Juni		Kontrolle	19,9	19,7		56	44	
		Minimiert	24,2	22,2		82	63	
		Intensiv	25,8	23,1		92	70	
21. Juni		Kontrolle	19,1	16,1		51	16	
		Minimiert	22,6	20,9		73	52	
		Intensiv	24,8	18,5		86	35	
03. Juli	76	Kontrolle	21,9	19,6	21,8	68	43	56
04. Juli	76	Minimiert	24,8	22,2	24,0	86	63	72
05. Juli	76	Intensiv	28,1	25,2	27,5	107	86	98

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 10,8 Vol.-% (0-30 cm), 14,0 Vol.-% (30-60 cm), 14,3 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) aktuelle Bestimmung der FK
- 4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2012)
- 5) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 10a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2012]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]			
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET _{PEN} × kc _{PEN} Intensiv	Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN} Intensiv Minimiert Kontrolle		
09-16	60,0	87,2	1,50	34,9	31,6		
16-61	75,9	111,2	1,51	100,1	83,2	82,9	51,4
61-69	20,7	29,6	1,46	38,5	32,5	32,5	15,0
69-76	67,0	95,1	1,43	142,7	106,2	98,6	47,1
09-76	223,6	323,1	1,48	316,1	253,5	245,6	145,1

Tabelle 10b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2012]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾			
		Intensiv	Minimiert	Geisenheim ET _{PEN} × kc _{PEN} Intensiv	Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN} Intensiv Minimiert Kontrolle		
09-16	23,7	24		0,0	0,0	0,0	0,0
16-61	30,7	74	62	0,0	11,7	0,7	0,0
61-69	18,0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
69-76	90,4	72	36	0,0	15,0	0,0	0,0
09-76	162,8	170	122	0,0	26,7	0,7	0,0

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle 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

2.3.4 Versuchsjahr 2013

Nach einem Winter mit ausreichenden Niederschlägen (191 mm Niederschlag vom 1. November bis 5. März) wurde am 6. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde als Mittel der mittlerweile vorliegenden 4 Untersuchungen eine FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,9 Vol.-% (30-60 cm) errechnet (Tabelle 11). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 34 Vol.-% (Ls2, Rohdichte 1,5 g/cm³) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%) mit 14,4 Vol.-% bzw. 14,8 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 13,0 Vol.-% errechnet.

Zum Auflauftermin der Erbsen (BBCH 09) wurde am 21. April ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 85 % nFK ermittelt. Weil bis zum 6-Blatt-Stadium (BBCH 16) 31,6 mm Niederschlag fielen, waren laut Berechnung in dieser Phase keine Zusatzwassergaben erforderlich (Abbildung 29).

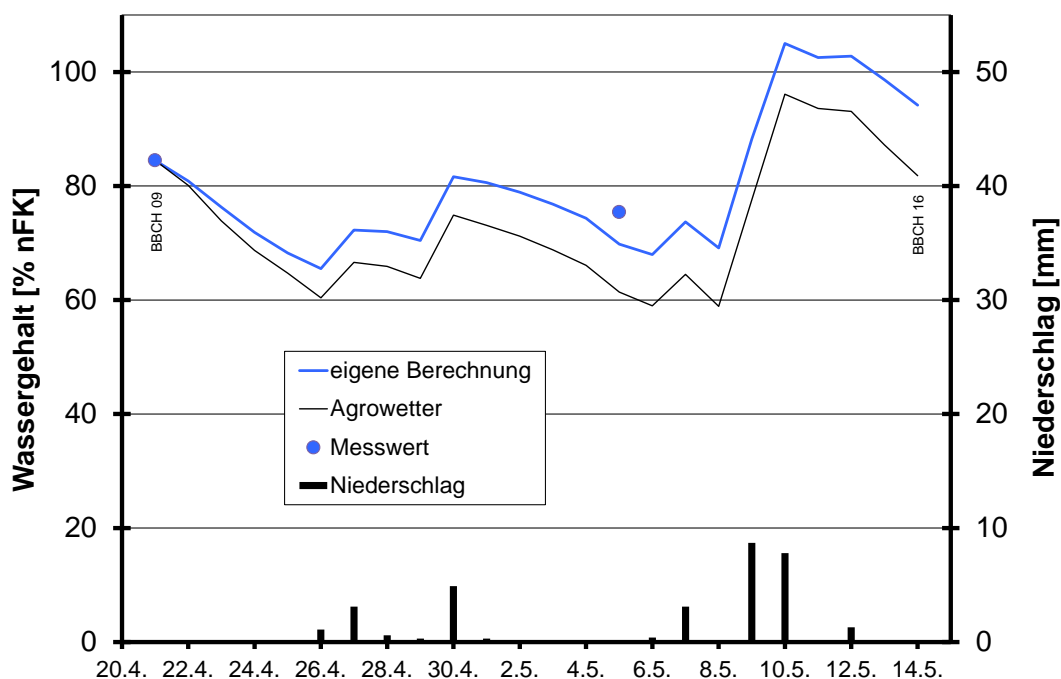


Abbildung 29: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 6-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times K_{CFAO}$ reduziert bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2013]

Bei zumeist nur mäßiger Transpirationsbelastung (Abbildung 30) und leichten Niederschlägen waren auch bis Blühbeginn (BBCH 61) keine Bewässerungsgaben notwendig (Abbildung 31). Am 24. Mai mussten dann aber 16 mm verabreicht werden. Zwei Tage später setzte eine Regenperiode ein, die binnen 10 Tagen rund 170 mm Niederschlag brachte.

Am 17. Juni sank der Bodenwassergehalt auf Werte unter 60 % nFK ab. Weil aber stärkere Niederschläge angekündigt waren, wurde auf eine Beregnung verzichtet. Bei einem Starkregenereignis am 20. Juni fielen dann 53,1 mm Niederschlag. Damit erhöhten sich die insgesamt während der Erbsenkultur gefallenen Niederschläge auf 287,5 mm. Für die Variante 'Reduziert' errechnete sich eine Sickerwasserbildung von 133,0 mm (Tabelle 12b). 'Agrowetter' kam zu einem geringeren Wert (90,2 mm), weil nach diesem Modell der Boden vor dem Starkregenereignis am 20. Juni stärker ausgetrocknet war.

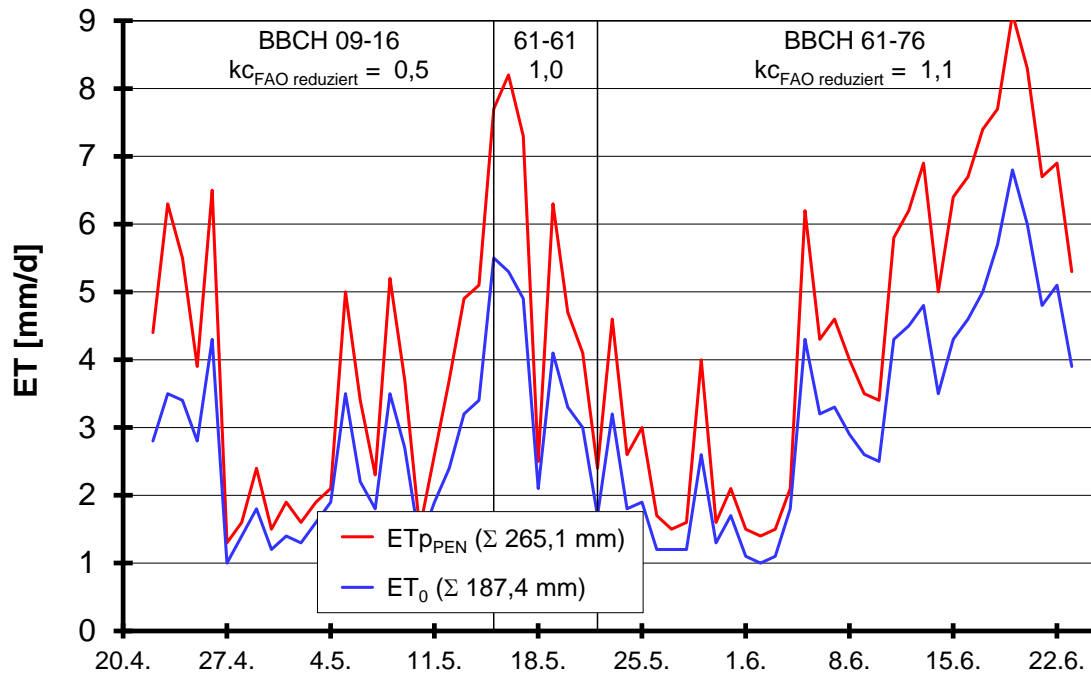


Abbildung 30: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2013]

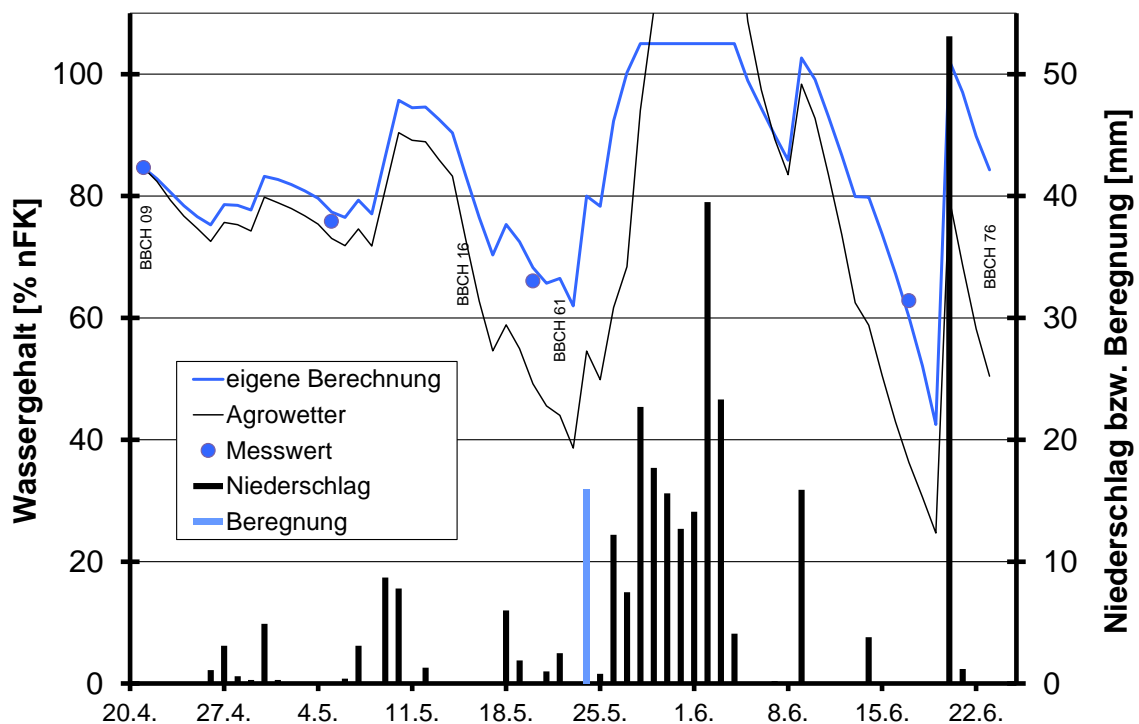


Abbildung 31: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Reduziert' auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO \text{ reduziert}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2013]

Die mit dem Ansatz $ET_0 \times kc_{FAO \text{ reduziert}}$ berechneten Bodenwassergehalte stimmten nahezu exakt mit den an den entsprechenden Terminen gravimetrisch ermittelten Werten überein. 'Agrowetter' überschätzte offensichtlich die ET_c etwas, sodass der Boden jeweils trockener eingeschätzt wurde.

Aufgrund der hohen Niederschläge (auch vor der Ernte) und der zu vernachlässigen Zusatzwassergabe wurde der Versuch nicht ertraglich ausgewertet und am 24. Juni beendet.

Tabelle 11: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2013]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
6. März ³⁾		alle	27,5	27,2	29,3			
Mittel ⁴⁾		alle	27,2	27,9	28,8	100	100	100
21. April ⁵⁾		alle	25,2	25,9	25,6	85	85	78
5. Mai		alle	24,1	24,8		75	76	
20. Mai		alle	22,1	24,2		60	72	
17. Juni		Reduziert	21,1	24,3		52	73	

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 14,4 Vol.-% (0-30 cm), 14,8 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) aktuelle Bestimmung der FK
- 4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)
- 5) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 12a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2013]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]		
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾ [mm]	ET _{pPEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET ₀ × kc _{FAO} reduziert Reduziert	Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN} Reduziert Kontrolle	
09-16	54,3	78,3	1,39	27,2	32,5	
16-61	28,2	40,8	1,42	28,2	38,3	
61-76	104,9	146,0	1,38	115,4	169,1	166,7
09-76	187,4	265,1	1,39	170,7	239,9	237,5

Tabelle 12b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2013]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm] Reduziert	Versickerung [mm] ⁷⁾		
			Geisenheim ET ₀ × kc _{FAO} reduziert Reduziert	Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN} Reduziert Kontrolle	
09-16	31,6	0	0	0,0	
16-61	9,0	0	0	0,0	
61-76	246,9	16	133,0	90,2	76,7
09-76	287,5	16	133,0	90,2	76,7

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle 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

2.3.5 Versuchsjahr 2014

Aufgrund ausbleibender ergiebiger Niederschläge Ausgangs des Winters (Monatssummen Januar bis April max. 17,2 mm) konnte die FK der Versuchsfläche nicht aktuell bestimmt werden. Daher konnte der mittlere Wert der vorliegenden 4 Untersuchungen aus den Jahren 2010-2013 mit einer FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 28,2 Vol.-% (30-60 cm) nicht um eine aktuelle Messung erweitert werden (Tabelle 13).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 33 Vol.-% (Slu, Rohdichte 1,5 g/cm³) bzw. 34 Vol.-% (Ls2) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Slu: 12 Vol.-%, Ls2: 18 Vol.-%) mit 9,9 Vol.-% und 14,9 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 15,3 Vol.-% errechnet.

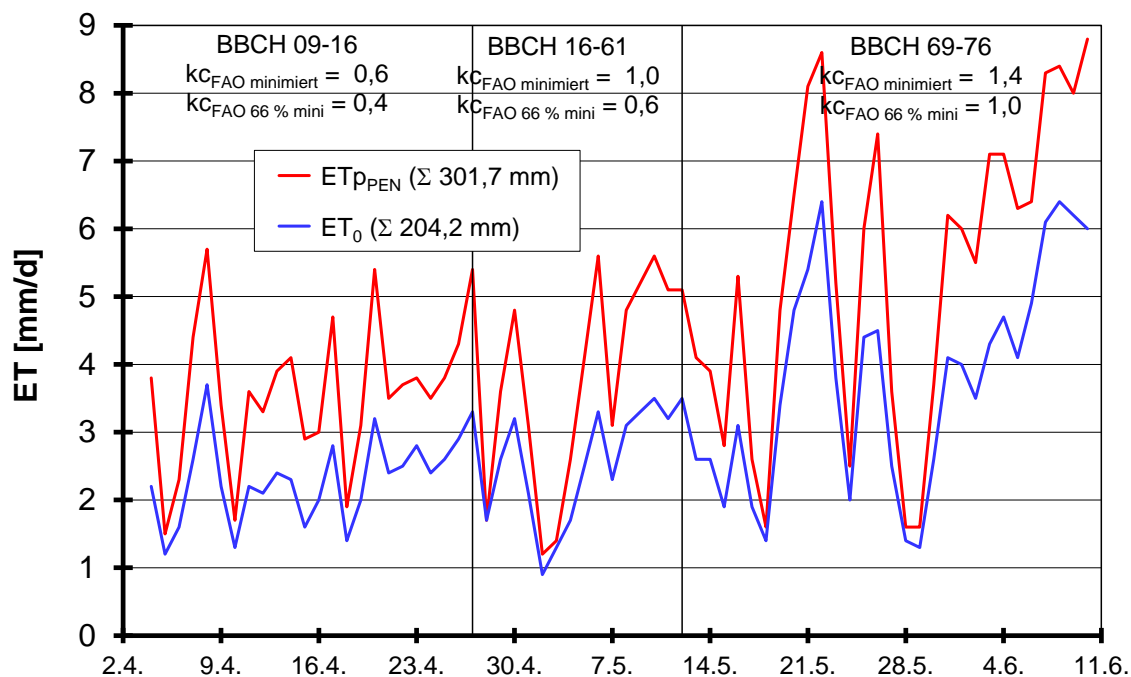


Abbildung 32: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Erbsenversuch 2014]

Zum Auflauftermin (4. April) wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 73,4 % nFK ermittelt (Tabelle 13). Bis Blühbeginn (BBCH 61) der Sorten 'Prelado' und 'Spring' am 12. Mai fielen 33,1 mm Niederschlag, sodass die Variante 'Minimiert' bis zu diesem Termin mit insgesamt 34 mm bewässert werden musste (Abbildung 33).

Nach Blühbeginn musste zunächst noch zweimal mit je 20 mm beregnet werden, Ende Mai füllten dann zwei Niederschlagsereignisse mit insgesamt gut 50 mm den Boden (rechnerisch) bis auf FK auf. Hier berechnete sich eine Sickerwasserbildung von 6,6 mm, nach 'Agrowetter' kam es zu keiner Sickerwasserbildung (Tabelle 14b).

Fünf Tage vor der Ernte wurde nochmals mit 20 mm beregnet, auf eine weitere Beregnung kurz vor der Ernte wurde wegen der schlechten Dreschbarkeit feuchten Ernteguts (Verstopfung des Dreschkorb) verzichtet; hier sank der Bodenwassergehalt kurzfristig auf fast 40 % nFK ab.

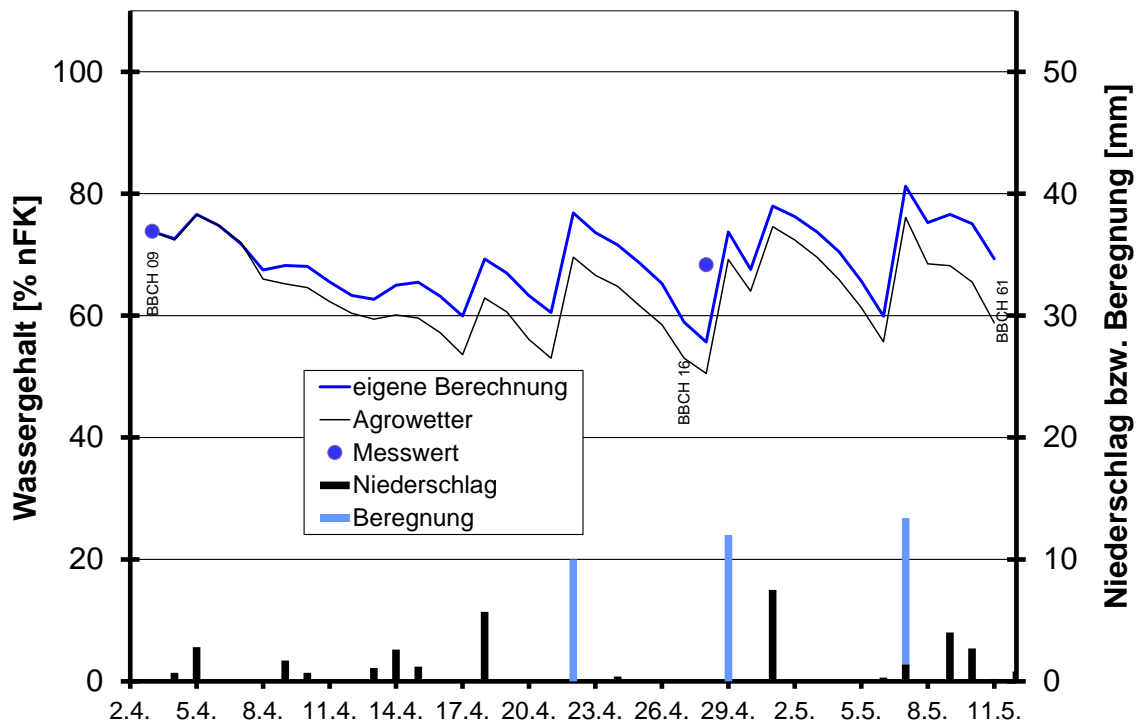


Abbildung 33: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Minimiert' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ minimiert bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014]

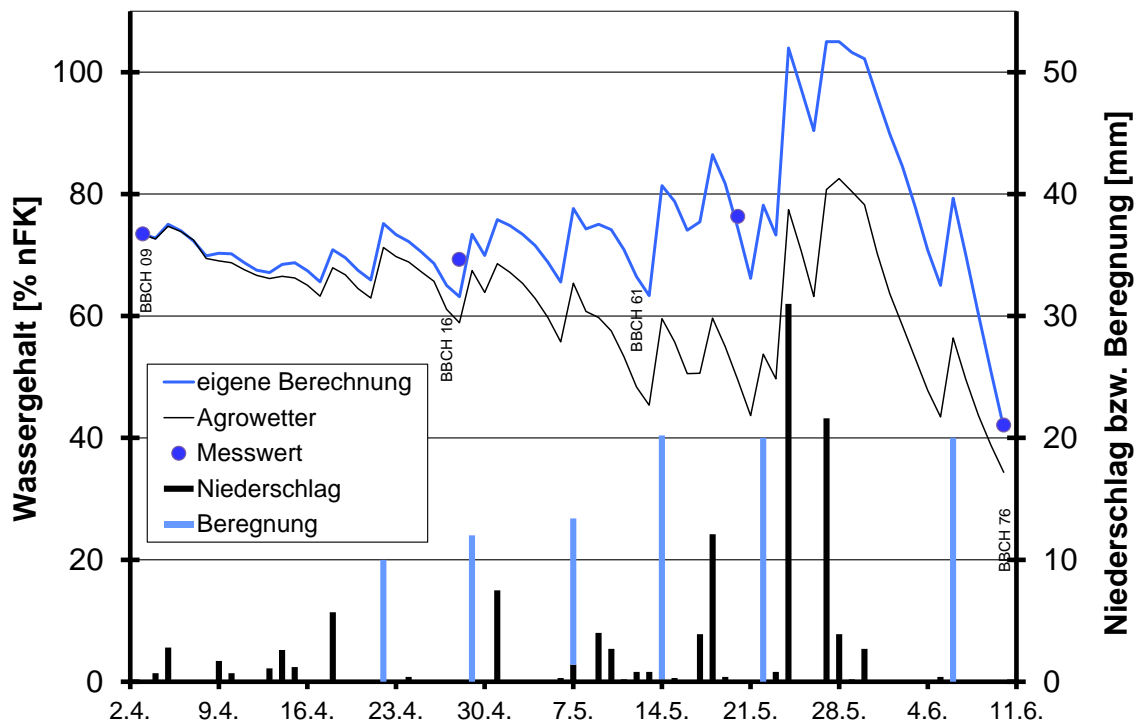


Abbildung 34: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ minimiert bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014]

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Minimiert' auf Basis der ET_c -Werte eine ET_c von 228,8 mm (Tabelle 14a). 'Agrowetter' kam mit 242,4 mm zu einer etwas höheren Evapotranspiration, sodass die von den beiden Modellen kalkulierten Bodenfeuchtegehalte auseinanderliefen.

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Wassergehalt mit den hier verwendeten $k_{C_{FAO\ minimiert}}$ -Werten nahezu exakt abgeschätzt. Entsprechend der höher angesetzten ET_c unterschätzte 'Agrowetter' die Wassergehalte.

Die Variante '66 % Minimiert' musste bei einer angenommenen ET_c von 158 mm nur kurz nach Blühbeginn und 5 Tage vor der Ernte mit insgesamt 30 mm beregnet werden (Abbildung 35). Insbesondere zur Ernte hin wurde der Bodenwassergehalt mit diesem Rechenmodus überschätzt. Die an den drei Terminen während der Kulturzeit gemessenen Bodenwassergehalte lagen jeweils nur etwas (maximal 6 %-Punkte) unter denen der 'Minimiert'-Variante (Abbildung 37, Tabelle 13).

'Agrowetter' prognostizierte entsprechend einer $ET_{c\ adj}$ von insgesamt 189 mm schon kurz vor dem 6-Blatt-Stadium eine Unterschreitung der 60 % nFK-Marke.

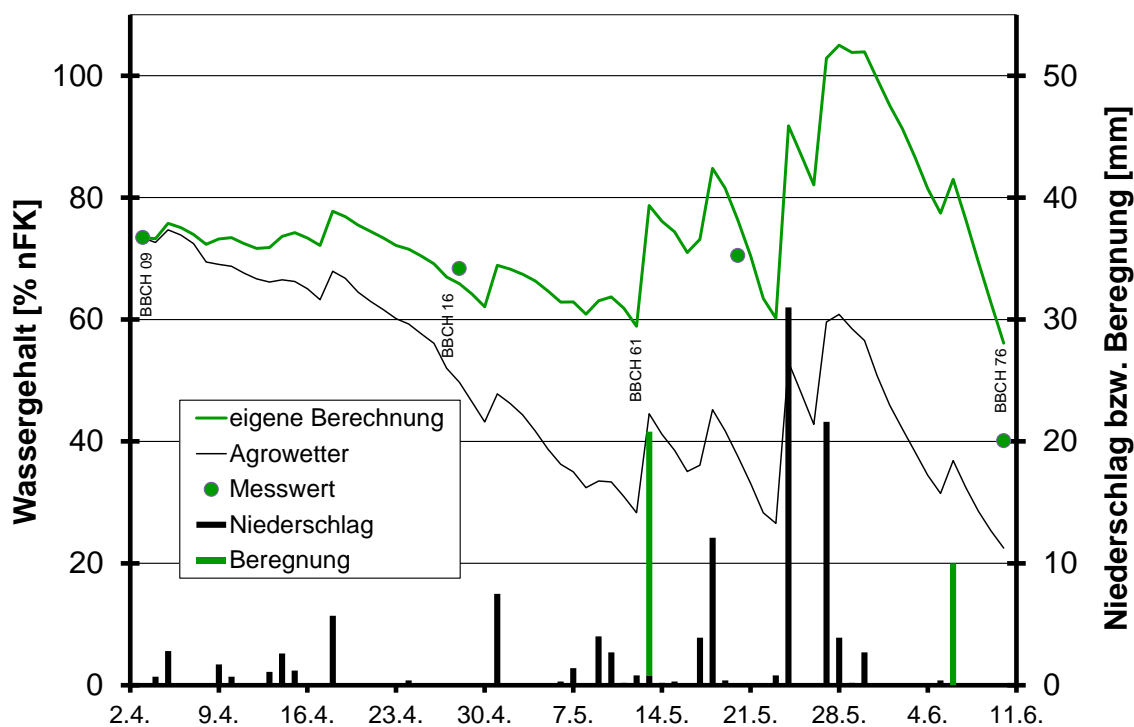


Abbildung 35: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante '66 % Minimiert' auf Basis $ET_0 \times k_{C_{FAO\ 66\ \% \ mini}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014]

Die von 'Agrowetter' für die 'Kontrolle' kalkulierten Bodenwassergehalte sind in Abbildung 36 wiedergegeben.

Abbildung 37 stellt die während der Kulturzeit ermittelten Bodenwassergehalte der drei Varianten gegenüber. In Verbindung mit dem kalkulierten Bodenwassergehalt wird deutlich, dass es in der 'Kontrolle' nur kurz vor den ergiebigen Niederschlägen am 24. und 27. Mai und vor der Ernte (hier bei allen Varianten) zu einer Unterschreitung von 60 % nFK gekommen sein kann.

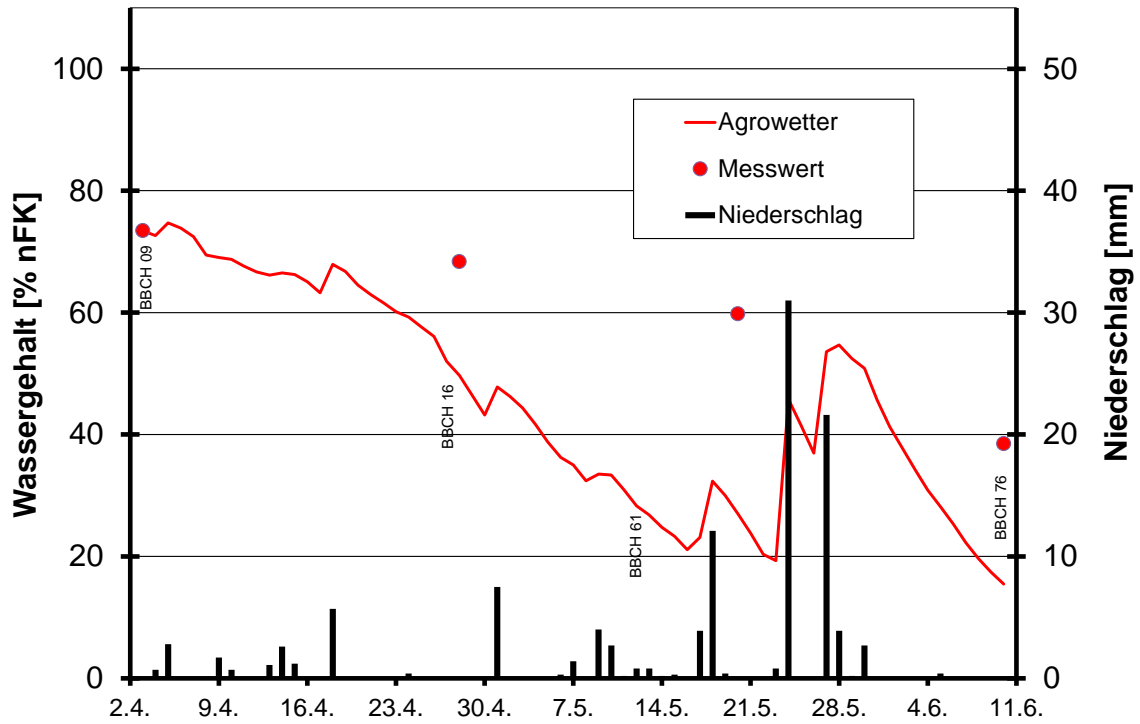


Abbildung 36: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Erbsenversuch 2014]

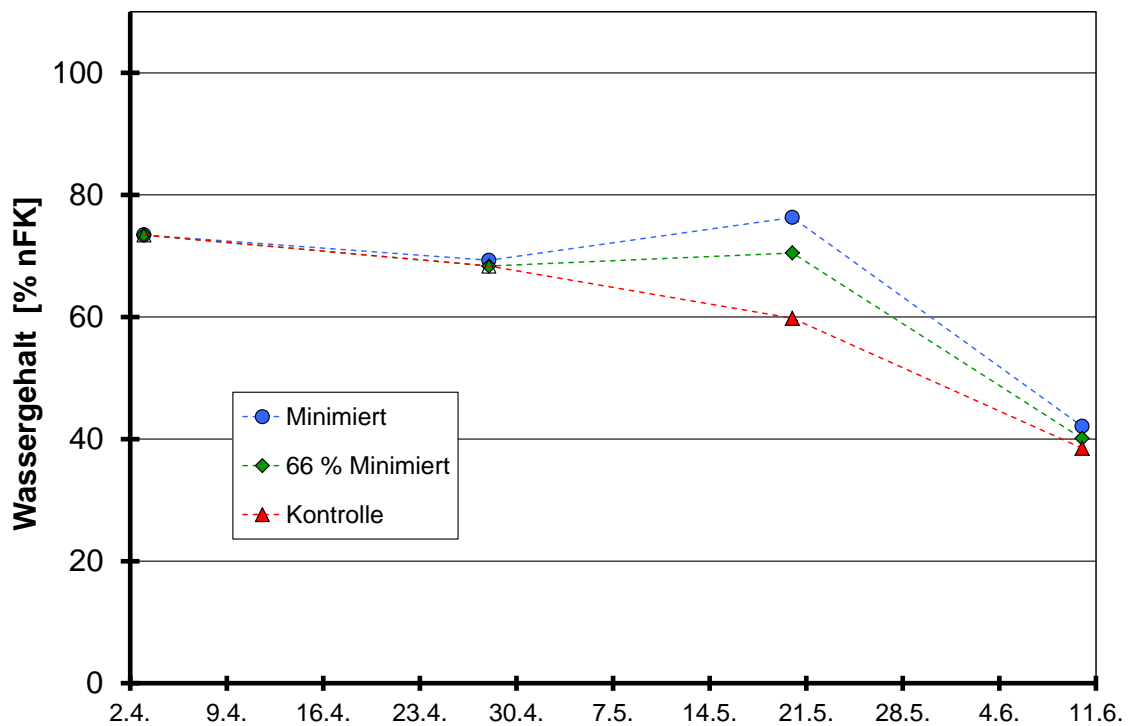


Abbildung 37: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Erbsenversuch 2014]

Wie in den Vorversuchen auch zeigten die Erbsen der 'Kontrolle' keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Ein Spätfrost am 4. Mai (-2,8 °C in 20 cm Höhe) führte bei der Sorte 'Prelado' zum Abwerfen der Blütenknospen, die anderen Sorten waren davon nicht betroffen. 'Prelado' setzte damit in allen Varianten zunächst nur wenige Hülsen an und blühte dann nochmals nach (Zwiewuchs). Auf eine Ertrags erfassung wurde daher bei dieser Sorte verzichtet.

Die Erbsen wurden einheitlich am 11. Juni geerntet, Fäulnisprobleme und damit eine beschränkte Dreschbarkeit wie in den Vorversuchen waren in allen Varianten nicht zu beklagen. Im Mittel wiesen die 'minimiert'-bewässerten Varianten den anvisierten TW von 120 auf, entsprechend der unterschiedlichen Frühzeitigkeit der Sorten lag der TW von 'Crescendo' (+2) am niedrigsten (Abbildung 38). Der TW bzw. die Reife wurde deutlich durch die Bewässerung beeinflusst bzw. verzögert, sodass in der 'Kontrolle' TW von bis zu 198 (mithin ein Reifevorsprung von rund 5 Tagen, vgl. LABER 2011) gefunden wurden. (Bei allen erfassten Ertragsparametern mit Ausnahme der Menge an Ernterückständen wurden auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.)

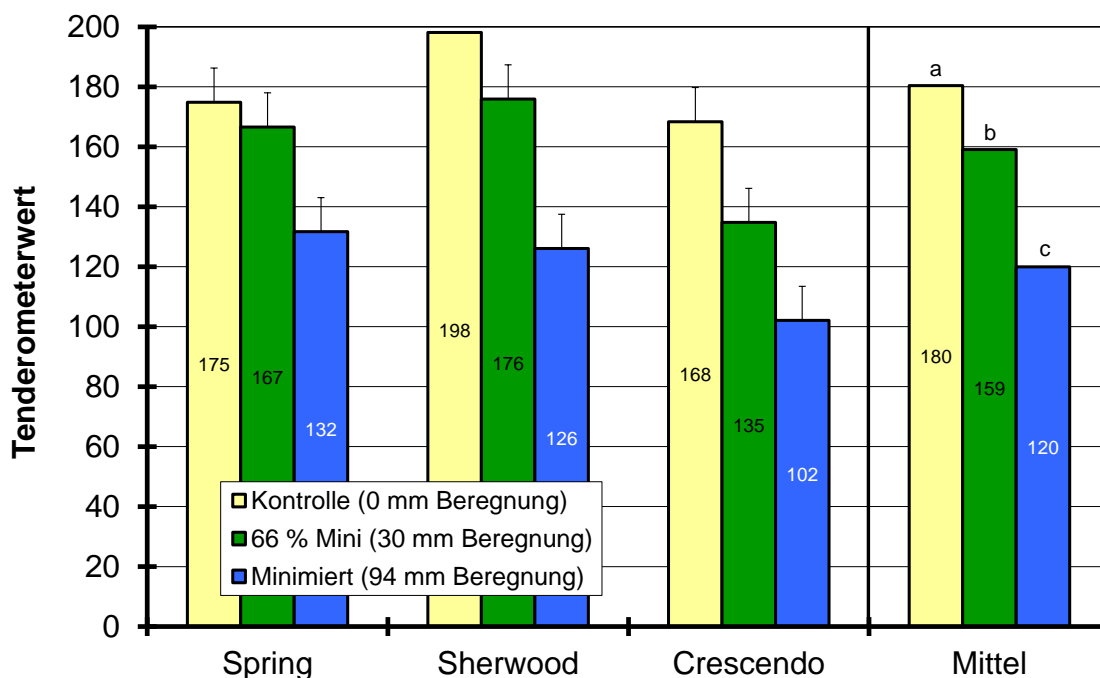


Abbildung 38: Tenderometerwert in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen mit jeweils 3 Messwiederholungen); $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 10,3; Bewässerung x Sorte: 11,4 = 1) [Erbsenversuch 2014]

Beim Frischmasseertrag zeigte sich keine einheitliche, sortenunabhängige Bewässerungswirkung. Während bei 'Spring' keine signifikante Ertragsreaktion gefunden wurde, zeigte sich bei 'Crescendo' ein Ertragsrückgang (Abbildung 39).

Auf Grund der unterschiedlichen Reifegrade ist ein Ertragsvergleich allerdings nur mit einem auf einen einheitlichen TW korrigierten Ertrag sinnvoll. Hier zeigte sich zwar zwischen der '66 % Minimiert'- und der 'Minimiert'-Variante eine signifikante Ertragsdifferenz, zur 'Kontrolle' konnten aber jeweils keine Ertragsunterschiede abgesichert werden (Abbildung 40).

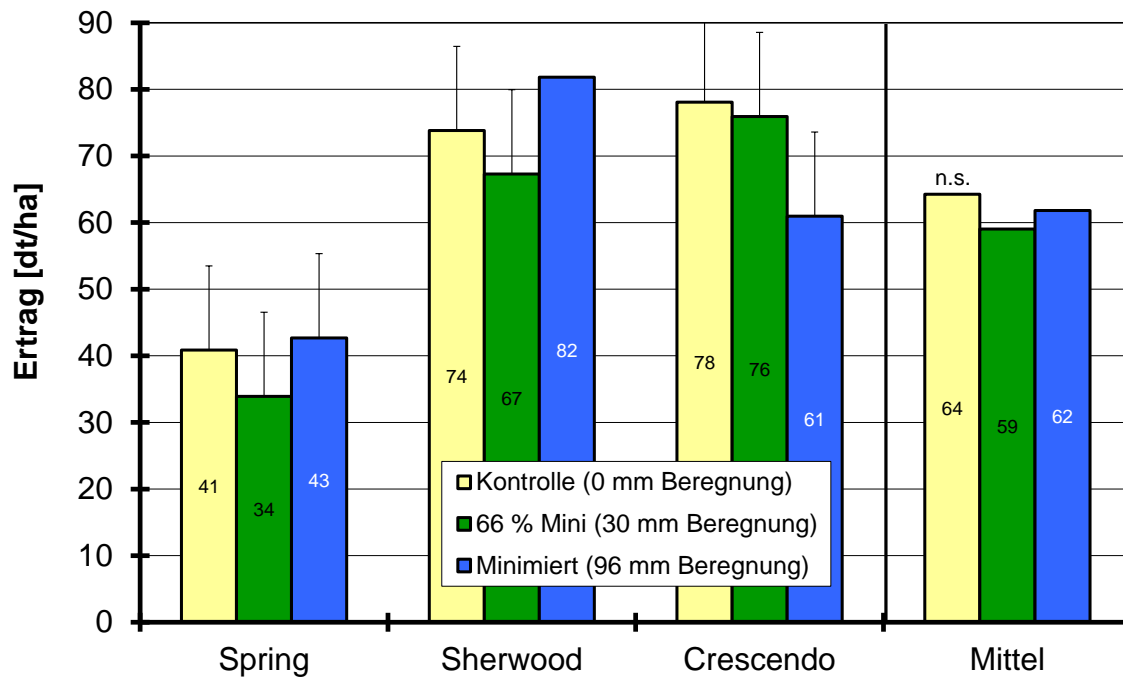


Abbildung 39: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung x Sorte: 12,6 = I) [Erbsenversuch 2014]

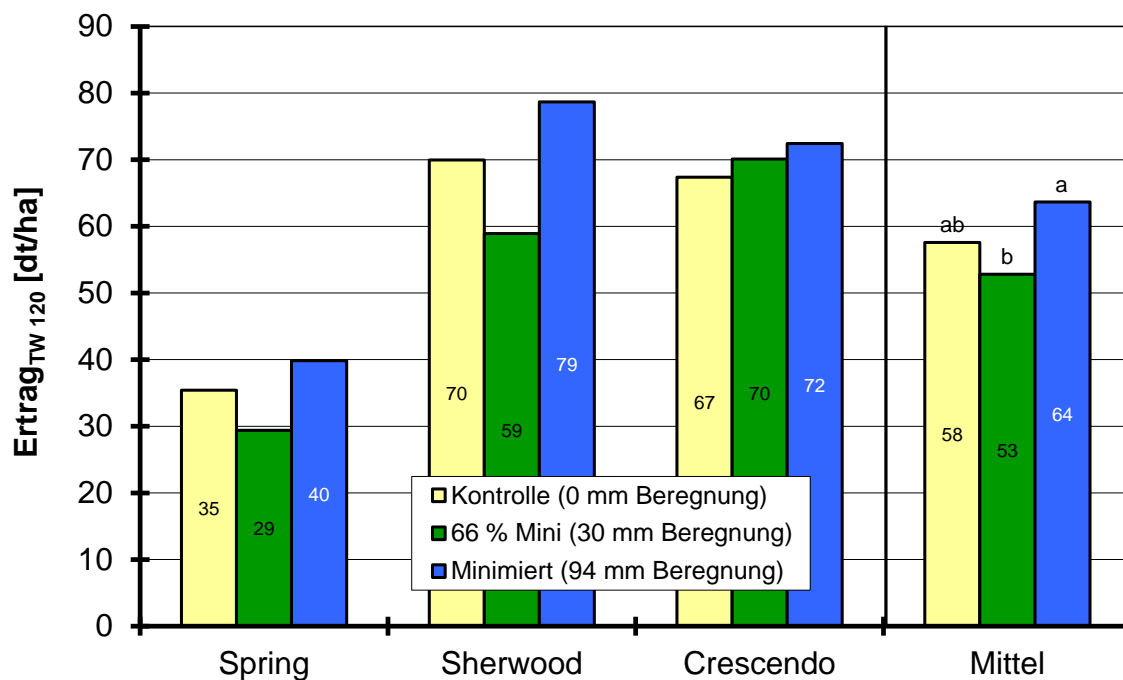


Abbildung 40: Korrigierter Frischmasseertrag (TW 120) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 8,1 dt/ha) [Erbsenversuch 2014]

Die Menge an Ernterückständen (o. Abbildung) wie auch der gesamte Frischmasse-Aufwuchs war in der 'Minimiert'-Variante signifikant gegenüber der 'Kontrolle' und der '66 % Minimiert'-Variante, die sich nicht deutlich unterschieden, erhöht (Abbildung 41).

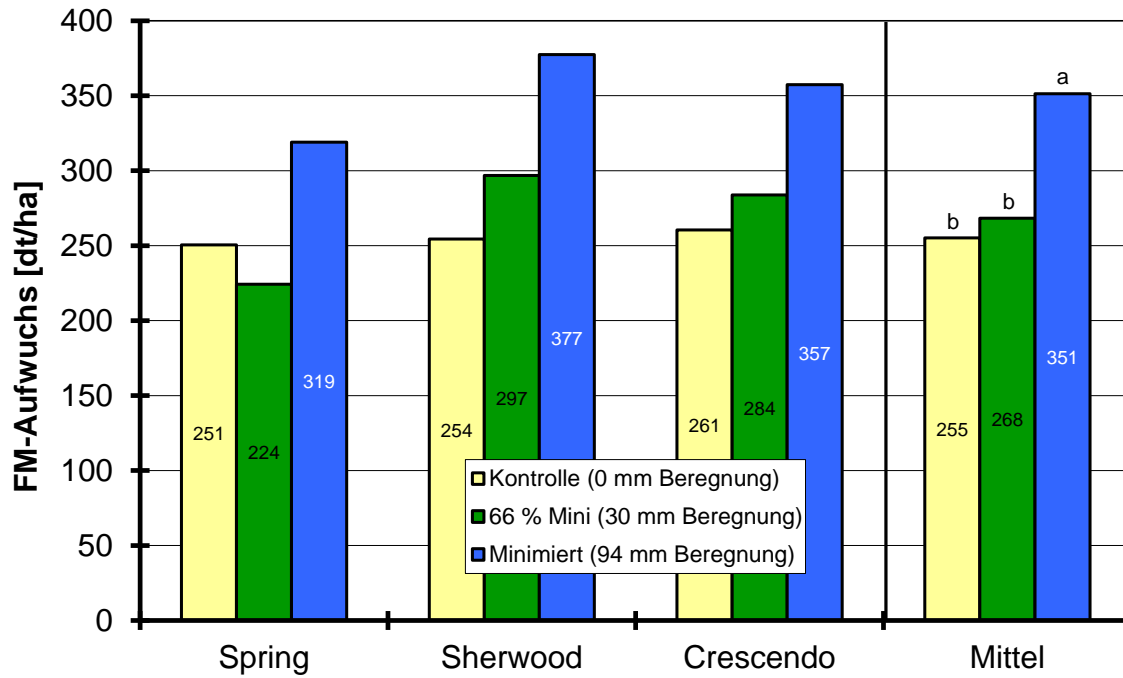


Abbildung 41: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 39,0 dt/ha) [Erb-
senversuch 2014]

Der Ernteindex fiel, je nach Sorte unterschiedlich, mit zunehmender Bewässerungsintensität deutlich ab (Abbildung 42).

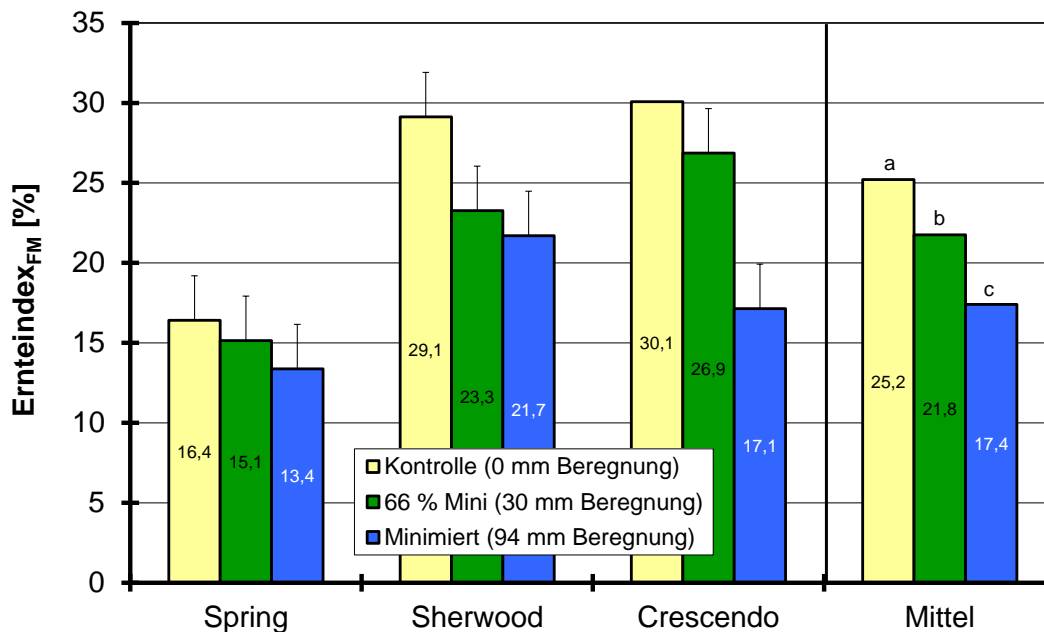


Abbildung 42: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittel-
werte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,4 %; Bewässerung x Sorte: 2,8 % = 1) [Erb-
senversuch 2014]

Tabelle 13: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Erbsenversuch 2014]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Mittel ³⁾		alle	27,2	28,2	28,7	100	100	100
3. April ⁴⁾	09	alle	22,7	24,6	25,3	74	73	76
28. April		Kontrolle + 66 %	20,9	24,9		63	75	
		Minimiert	21,8	24,3		68	71	
20. Mai		Kontrolle	20,4	22,8		61	59	
		66 % Minimiert	22,5	23,9		73	68	
		Minimiert	23,9	24,3		81	71	
10. Juni	76	Kontrolle	16,5	20,1		38	39	
		66 % Minimiert	17,1	20,1		41	39	
		Minimiert	17,1	20,6		42	43	

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 9,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,9 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)
- 4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 14a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2014]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]				
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET ₀ ×		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kC _{PEN}		
				kC _{FAO mini}	kC _{FAO 66 % mini}	Minimiert	66 % Mini	Kontrolle
09-16	52,4	81,3	1,54	31,4	21,0	35,2		
16-61	38,0	57,3	1,46	38,0	22,8	50,0	37,7	
61-76	113,8	163,1	1,42	159,3	113,8	157,2	116,0	93,1
09-76	204,2	301,7	1,45	228,8	157,6	242,4	188,9	166,0

Tabelle 14b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Erbsen [Versuch 2014]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾				
		Minimiert	66 % Mini	Geisenheim ET ₀ ×		Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kC _{PEN}		
				kC _{FAO mini}	kC _{FAO 66 % mini}	Minimiert	66 % Mini	Kontrolle
09-16	17,0	10	0	0,0		0,0		
16-61	16,1	24	0	0,0		0,0		
61-76	79,1	60	30	6,6	0,6	0,0		
09-76	112,2	94	30	6,6	0,6	0,0		

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-60 cm

2.3.6 Zusammenfassung der fünf Versuchsjahre

Witterungsverlauf, Verdunstungsberechnung

Entsprechend der Weiterentwicklung des 'Geisenheimer Modells' während der 5-jährigen Projektlaufzeit und Absprachen mit den Geisenheimer Kollegen wurde die Bewässerung der Varianten auf Basis unterschiedlich berechneter ET_c -Werte kalkuliert (Tabelle 16), die entweder auf ET_0 oder ET_{pPEN} basierten (Tabelle 15). Im Schnitt der Jahre lag ET_{pPEN} in der Bewässerungsphase um den Faktor 1,41 über ET_0 . (Die Höhe der Referenzverdunstung ist neben den Witterungsbedingungen auch von der Länge der Entwicklungsphasen abhängig; beim Anbau der frühen Sorten in den Jahren 2013 und 2014 fiel insbesondere die Phase BBCH 16-61 nur sehr kurz aus.)

Tabelle 15: Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Erbsenversuche]

	Referenzverdunstung [mm]											
	BBCH 09-16			BBCH 16-61			BBCH 61-76			BBCH 09-76		
	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$
2010	46,6	63,7	1,37	74,5	99,0	1,33	104,2	135,3	1,31	225,3	298,0	1,34
2011	63,8	88,4 ²⁾	1,41	79,5	103,02)	1,31	85,0	115,12)	1,38	228,3	306,52)	1,37
2012	60,0	87,2	1,50	75,9	111,2	1,51	87,7	124,7	1,44	223,6	323,1	1,48
2013	54,3	78,3 ²⁾	1,39	28,2	40,82)	1,42	104,9	146,02)	1,38	187,4	265,12)	1,39
2014	52,4	81,3	1,54	38,0	57,3	1,46	113,8	163,1	1,42	204,2	301,7	1,45

1) Mittelwert der täglichen Quotienten

2) Aufgrund fehlerhafter Datenlieferungen wurde ursprünglich (2011/2013) mit geringeren Verdunstungswerten gerechnet.

Wie sich erst im Zuge der Endauswertung herausstellte, wurden seitens des DWD 2011 und 2013 fälschlicherweise statt ET_{pPEN} -Werte die „potentielle Verdunstung über Wasser nach PENMAN/MONTEITH“ bereitgestellt. Weil in beiden Versuchsjahren die Verdunstungs- und damit Bewässerungsberechnung auf Basis der ET_0 -Werte erfolgte (vgl. Tabelle 16), hatte die fehlerhafte Datenlieferung keine Auswirkungen auf den Versuchsablauf. [Alle hier wiedergegebenen Daten bezüglich der ET_{pPEN} -Verdunstung der Jahre 2011 und 2013 bzw. davon abgeleiteter Werte basieren auf den korrekten ET_{pPEN} -Verdunstungswerten.]

Die auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ (kc -Werte Ende 2011 zurückgezogen, im Versuch 2012 aber noch verwendet) berechnete potenzielle Evapotranspiration der Erbsenbestände (ET_c) lag in den Versuchen 2010-2012 bei rund 300 mm (Abbildung 43). Entsprechend der deutlich geringeren ET_0 -Verdunstungswerte fällt die ursprüngliche (und von 'Agrowetter' zunächst übernommene) Berechnung auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ deutlich geringer aus. (Für die Versuche 2013 und 2014 konnte diese Berechnung nachträglich nicht mehr durchgeführt werden, weil der Beginn von BBCH 69 nicht erfasst wurde.)

'Agrowetter' berechnete in den Jahren 2010 und 2011 Verdunstungssummen in Höhe des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes, nach Einbeziehung eines 'windabhängigen Faktors' ab der Saison 2012 (JANSSEN 2012) lagen die 'Agrowetter'-Werte höher. Mit den ab dem Versuchsjahr 2012 aufgenommenen 'minimierten' kc -Werten (2012 bezogen auf ET_{pPEN} , hier einheitlich bezogen auf ET_0 dargestellt) errechnen sich Verdunstungswerte von 208 bis 248 mm, die 2010 und 2011 leicht über, ab 2012 etwas unter dem Niveau von 'Agrowetter' lagen.

Stellt man den Verdunstungswerten (in Abbildung 44 exemplarisch $ET_0 \times kc_{FAO}$ minimiert) die mit 101 bis 288 mm sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen gegenüber, so deuten sich für die Jahre 2010, 2011 und 2014 eher trockenen Witterungsbedingungen an. 2012 (und im 'Extremjahr' 2013) fielen in der Phase 61-76 (108 mm) verglichen mit dem berechneten Verdunstungsanspruch relativ hohe Niederschlagsmengen.

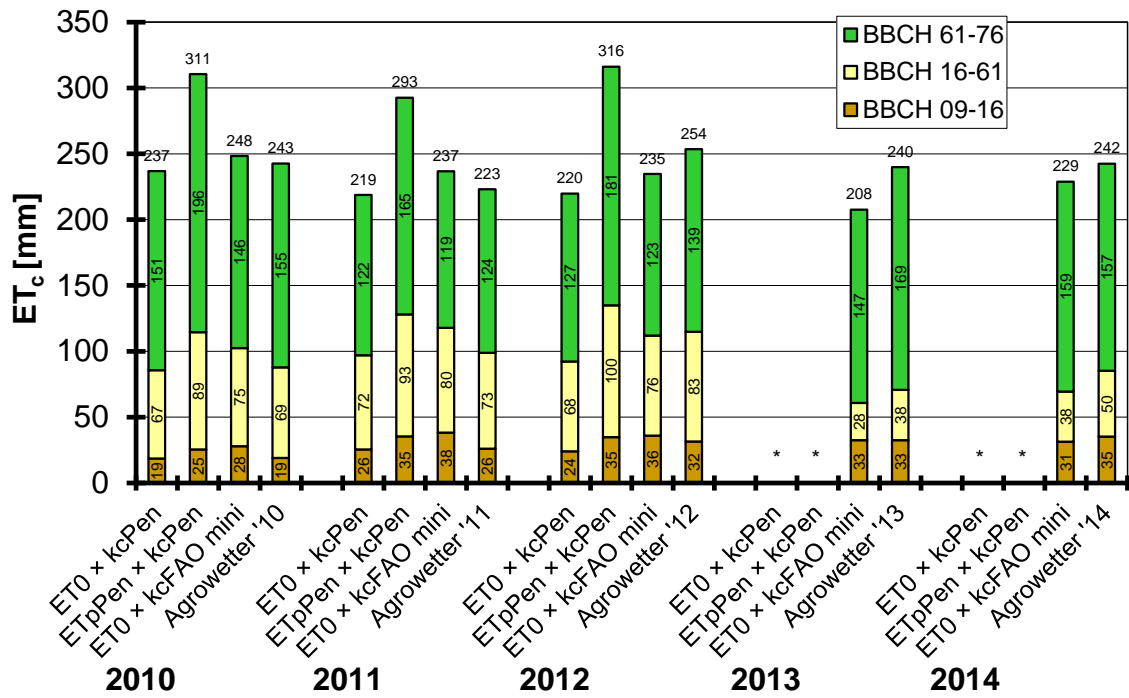


Abbildung 43: Potentielle Evapotranspiration des Erbsenbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (vgl. Tabelle 16) (*: In den Versuchen 2013 und 2014 wurde der Beginn des BBCH-Stadiums 69 nicht erfasst. Damit konnte nachträglich die ET_c nicht auf Basis der kc_{PEN}-Werte berechnet werden.)

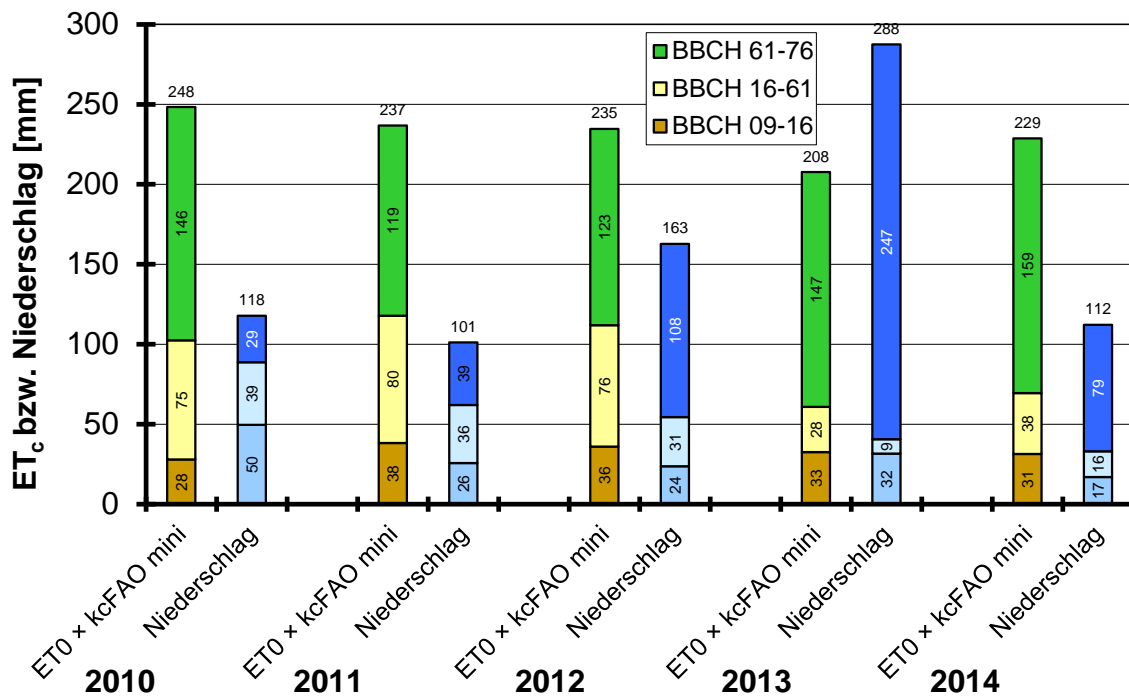


Abbildung 44: Potentielle Evapotranspiration des Erbsenbestandes (ET_c = ET₀ × kc_{FAO} minimiert) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren

Auf Grund der sich aus dem Ansatz $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ ergebenden hohen ET_c musste die Variante 'Intensiv' 2012 mit 170 mm bzw. bei 'minimierten' kc -Werten mit 122 mm berechnet werden (Tabelle 16). Die 'Praxis'- und die '66 % Minimiert'-Varianten erhielten mit 30 bis 44 mm Wassergaben, wie sie als Zusatzwasserbedarf (auf guten Standorten) in Trockenjahren empfohlen werden (LATTASCHKE et al. 2002).

Tabelle 16: Modus zur Berechnung der Verdunstung und die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Erbsenversuche]

	Steuerung der Intensiv- bzw. Minimiert-Varianten auf Basis ¹⁾	Bewässerung [mm]											
		BBCH 09-16			BBCH 16-61			BBCH 61-76			BBCH 09-76		
		Praxis ^{2)/} 66 % Mini ³⁾	Minimiert	Intensiv	Praxis ^{2)/} 66 % Mini ³⁾	Minimiert	Intensiv	Praxis ^{2)/} 66 % Mini ³⁾	Minimiert	Intensiv	Praxis ^{2)/} 66 % Mini ³⁾	Minimiert	Intensiv
2010	$ET_0 \times kc_{PEN}$ ⁴⁾	0	–	0	0	–	20	44	–	118	44	–	138
2011	$ET_0 \times kc_{PEN}$ ^{4, 5)}	0	–	0	0	–	20	40	–	95	40	–	115
2012	$ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ ⁴⁾ $ET_{PEN} \times kc_{PEN\ minimiert}$ ⁶⁾	–	24	24	–	62	74	–	36	72	–	122	170
2013	$ET_0 \times kc_{FAO\ redu}$ ^{7, 8)}	–	0	–	–	0	–	–	16	–	–	16	–
2014	$ET_0 \times kc_{FAO\ mini}$ ⁹⁾ $ET_0 \times kc_{FAO\ 66\ \% \ mini}$ ¹⁰⁾	0	10	–	0	24	–	30	60	–	30	94	–

- 1) Modus zur Berechnung der ET_c im jeweiligen Versuchsjahr
- 2) Versuchsjahre 2010 u. 2011
- 3) Versuchsjahr 2014
- 4) kc_{PEN} : kc_{09-16} : 0,4; kc_{16-61} : 0,9; kc_{61-69} : 1,3; kc_{69-76} : 1,5
- 5) unter Einbeziehung von Bodenprobenergebnissen
- 6) $kc_{PEN\ minimiert}$: kc_{09-16} : 0,4; kc_{16-61} : 0,7; kc_{61-76} : 1,1
- 7) $kc_{FAO\ reduziert}$: kc_{09-16} : 0,5; kc_{16-61} : 1,0; kc_{61-76} : 1,1
- 8) Versuch wurde wegen Starkniederschlägen nicht ertraglich ausgewertet
- 9) $kc_{FAO\ minimiert}$: kc_{09-16} : 0,6; kc_{16-61} : 1,0; kc_{61-76} : 1,4
- 10) $kc_{FAO\ 66\ \% \ mini}$: kc_{09-16} : 0,4; kc_{16-61} : 0,6; kc_{61-76} : 1,0

Kalkulierte versus ermittelte Bodenwassergehalte

Im Versuch 2011 lagen die gravimetrisch gemessenen Bodenwassergehalte der 'Intensiv'-Variante meist deutlich unter den auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ kalkulierten Werten. 2010 war dies zwischenzeitlich auch der Fall, zum Erntetermin hin stimmten Kalkulation und realer Bodenwassergehalt überein. Gleiches gilt für die nahezu identischen Kalkulationswerte von 'Agrowetter'. 2012 ($ET_{PEN} \times kc_{PEN}$) wurde der Bodenwassergehalt anfangs überschätzt, zur Ernte hin unterschätzt.

Berechnet man nachträglich die Verdunstung und daraus abgeleitet die Bodenwassergehalte für die jeweils stärker (2012: aber nicht 'übermäßig') bewässerten Varianten (2010 und 2011: 'Intensiv'; 2012-2014: 'Minimiert') einheitlich mit dem Ansatz $ET_0 \times kc_{FAO\ minimiert}$, so zeigt sich mit einem RSME (Wurzel aus dem Mittel der Abweichungsquadrate) von 13,1 Vol.-% und einer mittleren Abweichung von +4,1 Vol.-% eine relativ gute Übereinstimmung der kalkulierten mit den realen Bodenwassergehalten (Abbildung 45). Dieses ist als Indiz dafür zu werten, dass die reale Verdunstung durch diesen Ansatz relativ gut beschrieben wird.

Bei den von 'Agrowetter' kalkulierten Bodenwassergehalten zeigten sich mit einem RMSE von 18,9 Vol.-% und einer mittleren Abweichung von +6,8 Vol.-% höhere Abweichungen zu den gemessenen Gehalten (Abbildung 46).

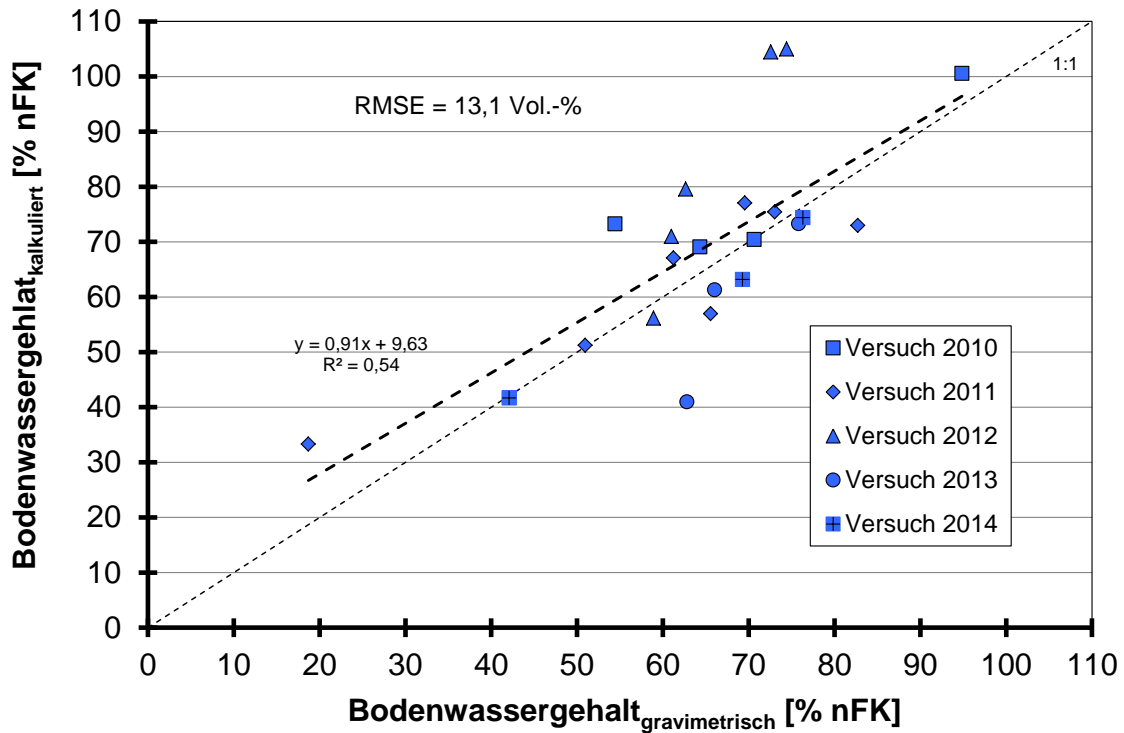


Abbildung 45: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ minimiert kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der stärker bewässerten Varianten [Erbsenversuche]

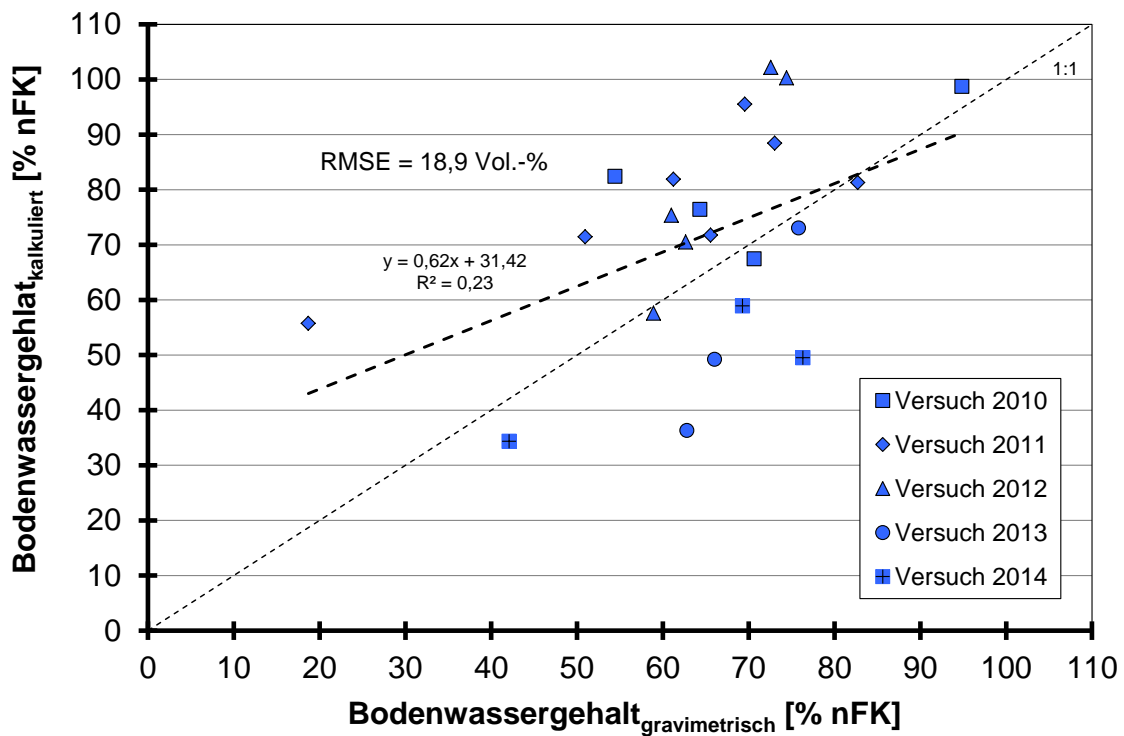


Abbildung 46: Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der stärker bewässerten Varianten [Erbsenversuche]

Frischmasseertrag

Die nicht beregnete 'Kontrolle' erzielte im Mittel der vier beernteten Versuche einen Frischmasseertrag (korrigiert auf TW 120) von 87 dt/ha (Abbildung 47). Der geringste Ertrag (58 dt/ha) wurde 2014 (frühe Sorten) ermittelt. Die bewässerten Varianten erzielten im Mittel Mehrerträge von 4 %, maximal wurden Mehrerträge von 11-12 % (2010: 'Praxis', 'Intensiv'; 2011: 'Intensiv'; 2014: 'Minimiert') gefunden.

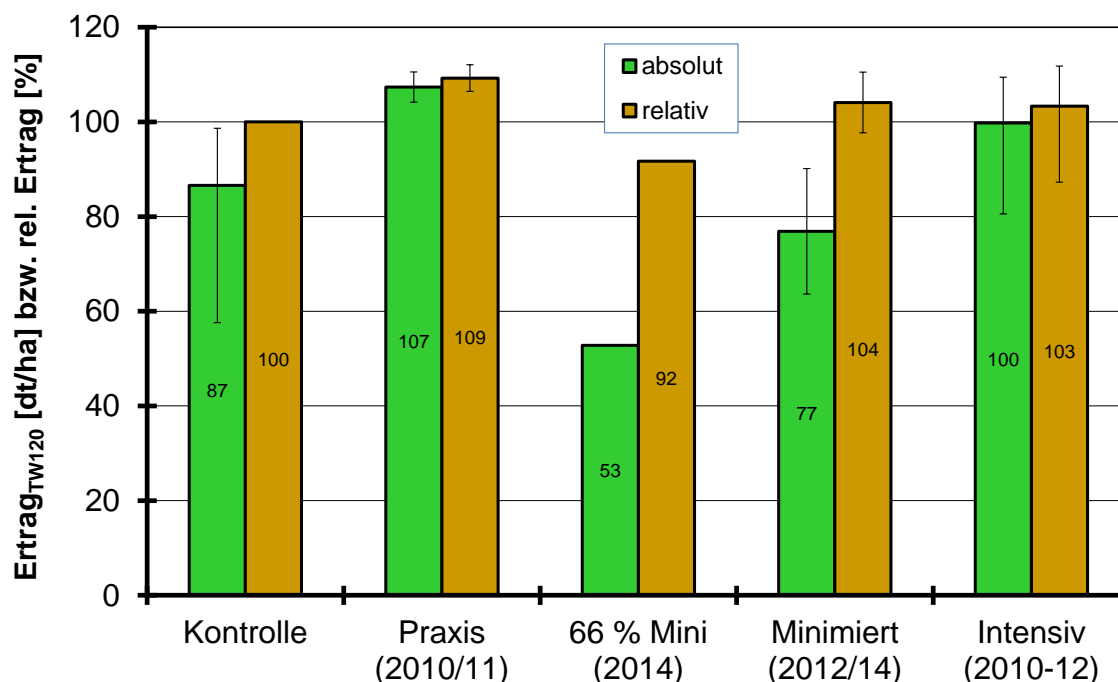


Abbildung 47: Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Marktertrag (korrigiert auf TW 120) in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Erbsenversuche]

PASCHOLD & MAYER (2005) fanden in einem Lysimeterversuch (aus dem die 2010/2011 empfohlenen k_{CPEN} -Werte abgeleitet wurden) deutlich größere Ertragsunterschiede; eine Variante (20-50 % nFK), die mit 156 mm bewässert wurde, erzielte nur einen Ertrag von 18 dt/ha, während eine mit 260 mm bewässerte Variante (60-90 % nFK) 41 dt/ha erreichte. Auch SORENSEN et al. (2003, DK) ermittelten bei einer Variante, die nur zur Blütezeit auf rund 30-40 % nFK abfiel, einen „dramatischen“ Ertragsrückgang von durchschnittlich 56 % ($n = 2$) gegenüber einer Variante, die ständig auf mindestens 70 % nFK gehalten wurde. Fiel der Wassergehalt nur während der Hülsen-Füllungsphase auf 14-33 % nFK ab, so betrug der Ertragsrückgang im Mittel 47 % ($n = 4$). MARTIN & TABLEY (1981, NZ) fanden dagegen in unberegneten Erbsen im Mittel von 3 Versuchsjahren mit bis zu 3 Aussaatterminen und mit bis zu 6 Sorten nur 17 % Ertragsminderung (Spanne: 0-40 %) gegenüber den bis zu 4-mal beregneten Varianten (Angaben zur Beregnungsmenge liegen nicht vor). ANDERSON & WHITE (1974, NZ) verzeichneten in unberegneten Erbsen einen Ertragsverlust von ca. 40 % gegenüber einer 2-mal bewässerten Variante ($n = 1$).

Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte wurde nur im Versuch 2011 festgestellt; hier zeigte eine der Sorten (entsprechend der vermuteten Trockenstresstoleranz) keine Ertragsreaktion auf die Wassergaben, während eine andere 'trockenstresstolerant' eingestufte Sorte dagegen eine sehr deutliche Reaktion zeigte. MARTIN & TABLEY fanden in einem der Versuchsjahre eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte bezüglich der Bestandesdichte [Pfl./m²] und des Hülsenansatzes [Hülsen/Pfl.]. Bei den Erträgen wurde keine Wechselwirkung beobachtet.

Die Abreife der Erbsen, gemessen als Tenderometerwert, verlief in allen Versuchen in der 'Kontrolle' am schnellsten. 2010 wurde (bei sortenspezifischen Erntetermin) die 'Kontrolle' im Mittel der Sorten mit einem TW von 173 geerntet, während die 'Praxis'-Variante (138) und die 'intensiv'-bewässerte Variante (116) noch deutlich zarter waren. Im Versuchsjahr 2014 wies die 'Kontrolle' im Sortenmittel 60 TW-Einheiten mehr auf als die 'minimiert'-beregnete Variante. 2011 wurde versucht, die verschiedenen Sorten bzw. Varianten jeweils mit einem TW von ca. 120 zu ernten. Dazu mussten die 'Intensiv-Varianten' bis zu 3 Tage nach der 'Kontrolle' beerntet werden.

PASCHOLD & MAYER berichteten von einer 5 Tage früheren Ernte in einer Variante mit einer Bewässerung im Bereich von 20-50 % nFK gegenüber der mit 60-90 % nFK. Auch bei ANDERSON & WHITE reiften unberegnete Erbsen 5 Tage vor den berechneten, während MARTIN & TABLEY maximal eine Differenz von 4 Tagen (im Mittel 2 Tage) fanden.

Gesamtaufwuchs und Ernteindex

Die bewässerten Varianten zeigten zumeist eine signifikant höhere Aufwuchsmenge als die 'Kontrolle' (Abbildung 48). In den Versuchen 2011 und 2012 war eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte zu beobachten, weil einzelne Sorten (unterschiedlich zwischen den beiden Jahren) kaum oder auch negativ reagierten.

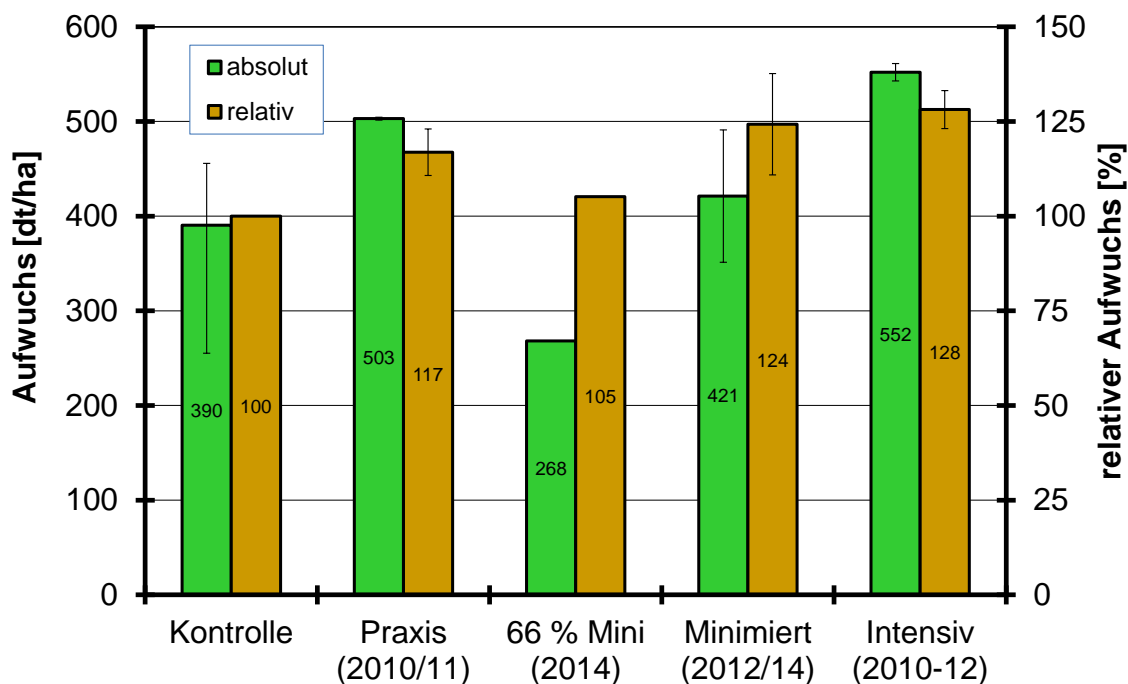


Abbildung 48: Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) **[Erbsenversuche]**

Der frischmassebezogene Ernteindex war in der 'Kontrolle' jeweils am höchsten und fiel jeweils zu den 'Intensiv'- oder 'Minimiert'-Varianten signifikant ab (Abbildung 49). In allen Versuchsjahren war eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte zu beobachten, weil der Ernteindex bei den verschiedenen Sorten unterschiedlich stark absank. Ein Zusammenhang zu einer etwaig eingeschätzten Trockenstresstoleranz zeigte sich aber nicht.

Auch nach den Ergebnissen des Bewässerungsversuches von PASCHOLD & MAYER (2005) ergibt sich eine Abnahme des Ernteindex mit steigendem Wasserangebot von 15 % (20-50 % nFK) auf 11 % (60-90 % nFK).

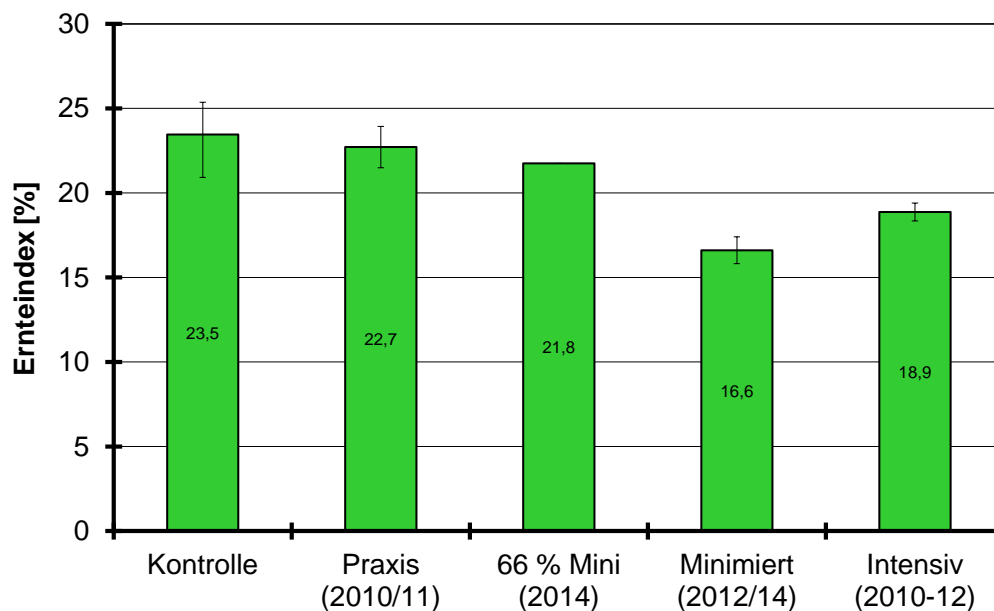


Abbildung 49: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) **[Erbsenversuche]**

Effizienz der Bewässerung

Der Mehrertrag je mm Bewässerung fiel von maximal 16 kg/(ha × mm) mit zunehmender Bewässerungsintensität deutlich ab, 2012 war sogar ein Minderertrag (Druschprobleme) zu beklagen (Abbildung 50). Unklar ist, warum es im Versuch 2014 bei der '66 % Minimiert'-Variante zu einem (statistisch aber auch nicht gesicherten) Ertragseinbruch kam.

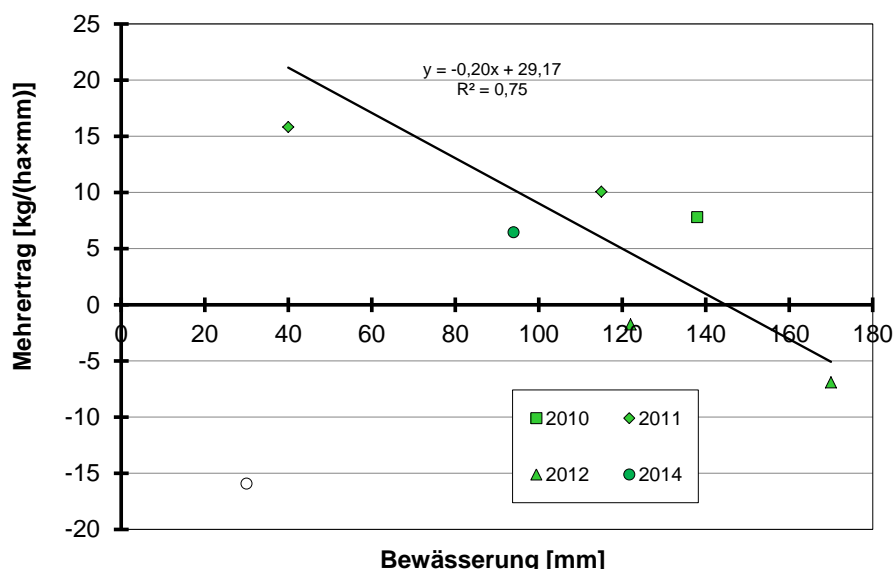


Abbildung 50: Mehrertrag (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) der bewässerten Varianten gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014]) = leeres Symbol) **[Erbsenversuche]**

Zwischen der Bewässerungsmenge und dem relativen Ertrag ('Kontrolle' = 100 %) bestand eine 'lockere' quadratische Beziehung, die ein Optimum im Bereich einer Zusatzwassergabe von 75 mm mit einem Ertragszuwachs von 12,5 % ausweist (Abbildung 51).

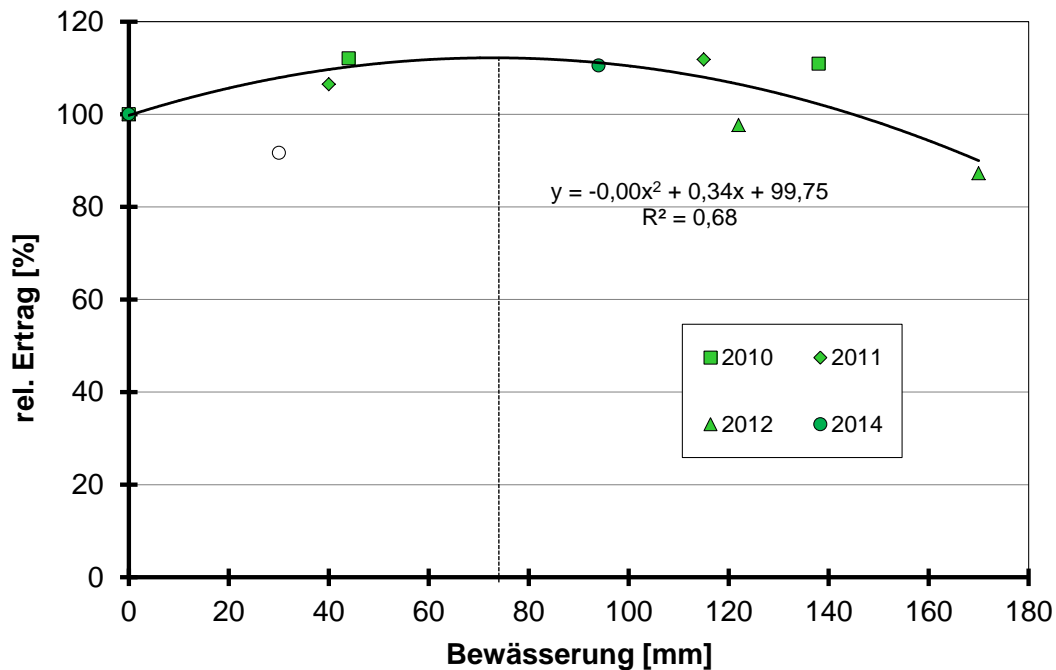


Abbildung 51: Relativer Ertrag ('Kontrolle' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge** (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014] = leeres Symbol) [Erbsenversuche]

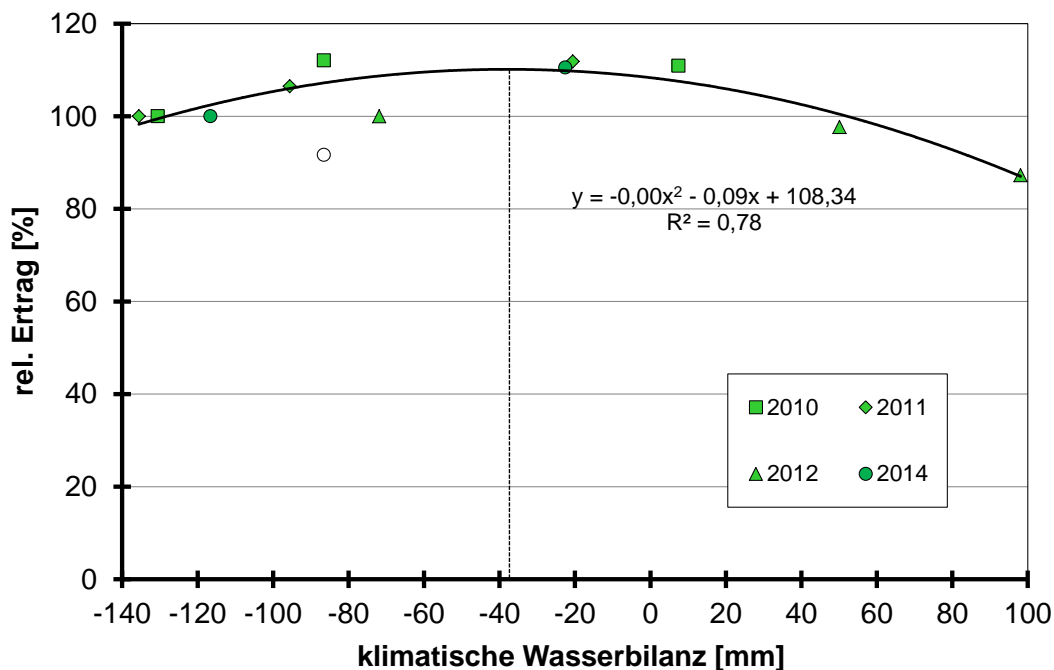


Abbildung 52: Relativer Ertrag ('Kontrolle' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz** (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{C_{FAO \text{ minimiert}}}$) (Regression berechnet ohne '66 % Minimiert'-Variante [2014] = leeres Symbol) [Erbsenversuche]

Klimatische Wasserbilanz und Ertrag

Bei Einbeziehung der Niederschläge und der Verdunstungsbeanspruchung ($ET_0 \times k_{C_{FAO \text{ minimiert}}}$), mithin die klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Bewässerung - ET_c), zeigte sich eine engere Beziehung zum relativen Ertrag (Abbildung 52). Der Regressionsverlauf deutet darauf hin, dass unter den vorgefundenen Bedingungen eine leicht negative Wasserbilanz (auf Basis $ET_0 \times k_{C_{FAO \text{ minimiert}}}$) optimale Ertragsergebnisse lieferte.

Recht eng stellte sich die Korrelation zwischen der klimatischen Wasserbilanz und dem Ernteindex dar (Abbildung 53), sodass für Erbsen (in Verbindung mit den relativ geringen Ertragszunahmen) zu konstatieren ist, dass ein höheres Wasserangebot vor allem das Laubwachstum fördert.

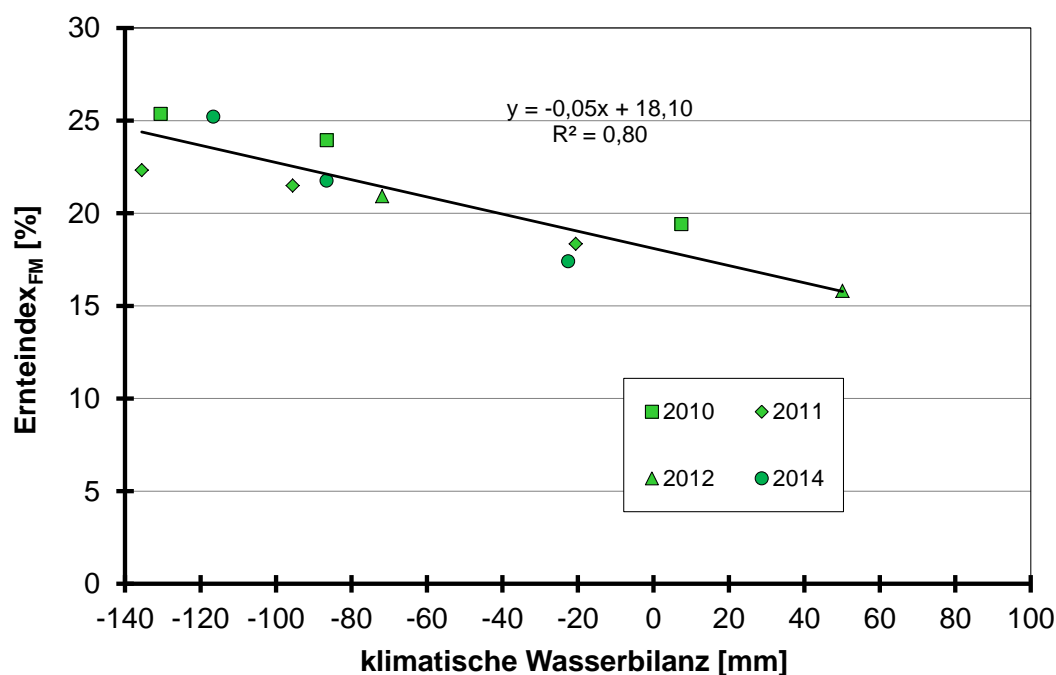


Abbildung 53: Frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times k_{C_{FAO \text{ minimiert}}}$; 2012 war in der 'Intensiv'-Variante keine Ermittlung des Ernteindizes möglich) [Erbsenversuche]

Resümee

Die 2010/2011 empfohlenen (Ende 2011 zurückgezogenen) k_c -Werte für Gemüseerbsen waren deutlich überhöht; bei entsprechender 'intensiver' Bewässerung zeigte sich gegenüber weniger oder nicht bewässerten Varianten im Mittel nur ein geringer Mehrertrag, die 'Intensiv'-Varianten fielen aber zum Teil durch massive Fäulnis negativ auf.

Unter den gegebenen Boden- (relativ hohes Wasserhaltevermögen) und Witterungsbedingungen erscheinen die getesteten 'minimierten' $k_{C_{FAO}}$ -Werte von 0,6 (BBCH 09-16), 1,0 (16-61) und 1,4 (61-76) noch leicht überhöht. Mit einer weiteren (leichten) Reduktion nähert man sich wieder den von ALLEN et al. (1998) empfohlenen k_c -Werten von 0,5 bis maximal 1,15 ('mid-season stage') an, deren Empfehlungen ja 'Ausgangspunkt' des 'Geisenheimer Modells' waren.

3 Versuche mit Buschbohnen

Abstract

Im Rahmen eines fünfjährigen Projektes wurden am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz insgesamt sechs Bewässerungsversuche mit jeweils vier verschiedenen Buschbohnenarten durchgeführt. Nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' waren je nach Witterungsverlauf und Modellansatz Wassergaben von 24 bis 100 mm notwendig. Eine 'Praxis'-Variante (Versuchsjahre 2010 und 2011) bzw. eine Variante mit 'minimierten' kc-Werten (nur 2012) erhielt 29 bzw. 68 mm. In einer Variante, bei der die Bewässerung nach einem SVAT-Modell bemessen wurde (2013 und 2014), wurden je nach Witterungsverlauf und Modellparametrisierung 30 bis 127 mm verabreicht. Die 'Kontrolle' blieb im Wesentlichen unbewässert.

Die 'intensiv' nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' bewässerte Variante erzielte mit einem durchschnittlichen Plus von knapp 40 dt/ha bzw. 31 % mehrfach signifikante Mehrerträge gegenüber der 'Kontrolle'. Die 'SVAT'-Variante und die mit 'minimierten' kc-Werten gesteuerte Variante unterschieden sich zumeist nicht signifikant von der 'Intensiv'-Variante.

In einer Zusammenfassung der sechs durchgeführten Versuche werden die, je nach Modell, auf unterschiedlichen Referenzverdunstungen basierenden Verdunstungsberechnungen dargestellt und die damit kalkulierten Bodenwassergehalte den gemessenen gegenübergestellt.

Dabei zeigte sich häufig eine deutliche Überschätzung der Bodenwassergehalte, mithin eine Unterschätzung der Evapotranspiration, insbesondere für die lange Wachstumsphase bis Blühbeginn. Dennoch deuten die vorliegenden Ertragsergebnisse darauf hin, dass die Buschbohnen ausreichend mit Wasser versorgt wurden. Damit kann die 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung', zumindest für 'gute' Standorte, für den mitteldeutschen Buschbohnenanbau empfohlen werden.

3.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

Im sächsischen Anbaugebiet werden Buschbohnen auf den Lössstandorten 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 Beregnungsmodellen sollten im Rahmen der Untersuchungen spezielle Sorten mit einer ggf. besseren Toleranz gegenüber Trockenstress getestet werden.

3.2 Material und Methoden

Versuchsstandort

Die Versuchsstation befindet sich in südöstlicher Randlage von Dresden (Pillnitz), ca. 120 m über NHN. Der alluviale Boden (Elbe) ist als Parabraunerde anzusprechen. Die genutzten Versuchsfelder (à 1.000 m²) weisen im Mittel in der Schicht 0-90 cm 17,2 % Ton, 36,4 % Schluff und 46,4 % Sand auf, womit die Bodenart nach der Kartieranleitung (BGR 2005) meist im Grenzbereich zwischen schwach (Ls2) bis mittel sandiger Lehm

(Ls3) und stark lehmiger Sand (SI4) bzw. schluffig-lehmiger Sand (Slu) einzuordnen ist (Tabelle 17). Die Feldkapazität (FK) der Versuchsfelder wurde, soweit möglich, jährlich ausgangs des Winters ermittelt (vgl. Versuchsergebnisse).

Tabelle 17: Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Bohnenversuche]

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
Versuchsjahr 2010 und 2014				
0-30 cm	16,4	34,3	49,3	stark lehmiger Sand (SI4)
30-60 cm	17,4	38,3	44,3	mittel sandiger Lehm (Ls3)
60-90 cm	18,1	35,1	46,8	mittel sandiger Lehm (Ls3)
0-60 cm	16,9	36,3	46,8	stark lehmiger Sand (SI4)
Versuchsjahr 2011 und 2013 (Frühsommersatz)				
0-30 cm	15,2	42,6	42,2	schluffig-lehmiger Sand (Slu)
30-60 cm	20,5	41,8	37,7	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	19,1	28,0	52,9	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	17,9	42,2	40,0	schwach sandiger Lehm (Ls2)
Versuchsjahr 2012				
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)
Versuchsjahr 2013, Spätsommersatz				
0-30 cm	17,4	41,7	40,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
30-60 cm	19,4	42,7	37,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	18,5	28,4	53,1	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	18,4	42,2	39,4	schwach sandiger Lehm (Ls2)

Kulturdaten und Versuchsaufbau

In den Versuchen konnten jeweils vier fein- bis mittelfein-sortierende Sorten aufgenommen werden (Tabelle 18). 2010 bis einschließlich des Frühsommersatzes 2013 wurden Sorten angebaut, von denen jeweils zwei Sorten seitens der Züchter/Vertriebspartner als 'eher trockenstresstolerant' bzw. als 'eher wasser- bzw. be-
regnungsbedürftig' eingeschätzt wurden. Weil der Frühsommersatz 2013 durch Starkregenereignisse beeinträchtigt wurde, wurde kurzfristig ein weiterer Versuch (Spätsommersatz) angelegt, bei dem auf vorhandenes Saatgut bzw. entsprechende Sorten zurückgegriffen werden musste. Diese Sorten wurden überwiegend im Versuch 2014 nochmals getestet.

Tabelle 18: Einbezogene Bohnensorten

Versuchsjahre 2010				
Sorte	Paulista	Como	Konza	Bomont
Züchter	Seminis		Syngenta	
Trockenstresstoleranz*)	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein
Versuchsjahr 2011 u. 2012				
Sorte	Paulista	Livorno	Konza	Bomont
Züchter	Seminis		Syngenta	
Trockenstresstoleranz*)	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein
Versuchsjahr 2013 (Frühsommersatz)				
Sorte	Caprika	Stanley	Konza	Bomont
Züchter	Hazera	Holland-Select	Syngenta	
Trockenstresstoleranz*)	eher ja	keine Angaben	eher ja	eher nein
Versuchsjahr 2013 (Spätsommersatz)				
Sorte	Caprika	Wayatt	Stanley	Paloma
Züchter	Hazera		Holland-Select	Nunhems
Trockenstresstoleranz*)	eher ja	keine Angaben		

Versuchsjahr 2014				
Sorte	Caprika	Bartava	Stanley	Paloma
Züchter	Hazera	Seminis	Holland-Select	Nunhems
Trockenstresstoleranz ^{*)}	eher ja		keine Angaben	

^{*)} Einschätzung des Züchters/Vertriebspartners

Die Kultur- und Versuchsdaten sind in Tabelle 19 wiedergegeben. Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen, ggf. einige Jätgänge, waren die Bohnenbestände jeweils unkraut- und befallsfrei. 2012 kam es allerdings bei einer NA-Maßnahme zu einem Herbizidschaden, der insbesondere die Sorte 'Livorno' betraf, sodass diese Sorte nicht ausgewertet werden konnte.

Die Ernte der Bohnen erfolgte, mit Ausnahme des Versuchsjahres 2012, als Einmalernte von Hand. 2010 wurden dazu je Parzelle 5 lfd. m Buschbohnenpflanzen (2,5 m²) direkt über der Bodenoberfläche abgeschnitten und alle Hülsen abgepflückt und, wie auch die dabei angefallenen Ernterückstände, ausgewogen.

Im Versuchsjahr 2012 erfolgte die Ernte an einem Tag mit einer 2-reihig arbeitenden Bohnenpflückmaschine (Pixall 'Trac Pic'). Weil hierbei die Ernterückstände nicht erfasst werden können, wurde die Aufwuchsmenge jeweils an einer weiteren Reihe durch Abschneiden unbeernteter Pflanzen bestimmt.

Weil beim Frühsommersatz 2013 in vielen Parzellen häufig eine der drei Reihen im Wachstum stärker zurückgeblieben war (übersäte Fahrspur?), wurden jeweils nur die beiden besten Reihen beerntet. Dabei wurden auf jeweils 2 mal 5 lfd. m die Pflanzen direkt über dem Erdboden abgeschnitten und der Aufwuchs ausgewogen. An einer Teilprobe von 2 lfd. m wurden die Hülsen von Hand gepflückt und der Ertrag und die Menge an Ernterückständen erfasst. Aus diesen Daten wurde für jede Parzelle separat der Ernteindex (Anteil Erntegut am Gesamtaufwuchs) berechnet. Auf Basis des Gesamtaufwuchses und des an der Teilprobe ermittelten Ernteindex wurde der Ertrag bzw. die Menge an Ernterückständen für jede Parzelle hochgerechnet.

Weil beim Spätsommersatz 2013 und 2014 die Sorten unterschiedlich abreifen, konnte auch hier nicht maschinell geerntet werden. Die Ernte wurde wie bei Frühsommersatz 2013 durchgeführt, die Aufwuchsbestimmung erfolgte aber auf einer Fläche von 7,5 bzw. 9,0 m² (vgl. Tabelle 19).

Mit Ausnahme des ersten Versuchsjahres wurde an Teilproben der gepflückten Hülsen und der Ernterückstände zudem der Trockensubstanzgehalt durch Trocknung bei 105 °C ermittelt. Auf Basis dieser Werte wurde dann ggf. auch der Trockenmasse-Aufwuchs hochgerechnet.

2010 erfolgte an einer Teilprobe von rund 200 g/Parzelle eine Bestimmung der Hülsensortierung mittels Lochschablone. In den Folgeversuchen wurde dieser Parameter aus Kapazitätsgründen nicht mehr erfasst.

Tabelle 19: Kultur- und Versuchsdaten [Bohnenversuche]

Versuchsjahr 2010	
10. Juni	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²); Aufdüngung auf 110 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit KAS
16. Juni	Aufbrauch (BBCH 09)
16. Juli	Beginn der Blüte (BBCH 61)
29. Juli	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71)
16./17. Aug.	Handernte der Sorten 'Paulista' und 'Como'; Ernteparzelle: 2,5 m ² (5,0 m × 0,5 m)
18.-20. Aug.	Ernte der Sorten 'Konza' und 'Bomont'
Versuchsjahr 2011	
7. Juni	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²); Aufdüngung auf 110 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit KAS
14. Juni	Aufbrauch (BBCH 09)
19. Juli	Beginn der Blüte (BBCH 61)
2. Aug.	Abbruch des Versuchs aufgrund von Starkniederschlägen (BBCH 71)
Versuchsjahr 2012	
8. Juni	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²); keine N-Düngung (N _{min} -Vorrat 170 kg N/ha in 0-60 cm)
18. Juni	Aufbrauch (BBCH 09)
23. Juli	Beginn der Blüte (BBCH 61)
6. Aug.	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71)
23. Aug.	maschinelle Ernte (Pixall 'Trac Pix'), Ernteparzelle: 5,0 m ² (5,0 m × 1,0 m), Aufwuchsbestimmung 2,5 m ² (5,0 m × 0,5 m); Bestimmung Bodenwassergehalt
Versuchsjahr 2013 (Frühsommersatz)	
17. Mai	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²)
30. Mai	Aufbrauch (BBCH 09); keine Bestimmung des Ausgangs-Bodenwassergehaltes wegen starker Niederschläge
11. Juni	Bestimmung des Ausgangs-Bodenwassergehaltes
9. Juli	Beginn der Blüte (BBCH 61)
12. Juli	50 kg N/ha als KAS (ohne Berücksichtigung des N _{min} -Vorrates, da dieser vor den Starkniederschlägen ermittelt wurde)
23. Juli	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71)
6./7. Aug.	Ernte; Ernteparzelle: Aufwuchsbestimmung 5,0 m ² (5,0 m × 1,0 m), davon 1 m ² (2,0 m × 0,5 m) Handernte; Bestimmung Bodenwassergehalt
Versuchsjahr 2013 (Spätsommersatz)	
3. Juli	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²)
10. Juli	Aufbrauch (BBCH 09)
25. Juli	Aufdüngung auf 130 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit KAS
6./9. Aug.	Beginn der Blüte (BBCH 61) bei 'Paloma' / bei den anderen Sorten
28. Aug.	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71)
5./6. Sept.	Ernte von 'Stanley' und 'Paloma'; Ernteparzelle: Aufwuchsbestimmung 7,5 m ² (5,0 m × 1,5 m), davon 2 m ² (2 × 2,0 m × 0,5 m) Handernte
10. Sept.	Ernte von 'Wayatt' und 'Caprika'; Bestimmung Bodenwassergehalt
Versuchsjahr 2014	
13. Mai	Einzelkornaussaat: Reihenabstand 50 cm, Kornablageabstand 6,1 cm (32,8 Korn/m ²)
26. Mai	Aufbrauch (BBCH 09)
30. Juni	Beginn der Blüte (BBCH 61) bei 'Bartava' und 'Paloma'
4. Juli	Beginn der Blüte (BBCH 61) bei 'Stanley' und 'Caprika'
16. Juli	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71) bei 'Bartava' und 'Paloma'
19. Juli	10 % der Hülsen haben sortentypische Länge erreicht (BBCH 71) bei 'Stanley' und 'Caprika'
25./28. Juli	Ernte von 'Bartava' und 'Paloma'; Ernteparzelle: Aufwuchsbestimmung 9,0 m ² (6,0 m × 1,5 m), davon 2 m ² (2 × 2,0 m × 0,5 m) Handernte
29./30. Juli	Ernte von 'Stanley' (Bestimmung Bodenwassergehalt)/Ernte von 'Caprika'
alle Versuchsjahre	
Bodenart	s. Tabelle 17, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74; Grundwasserflurabstand > 7 m
Versuchsanlage	zweifaktorielle Spaltanlage (Haupteinheit Beregnung, Untereinheit Sorte) mit 4 Wiederholungen
Parzellengröße	Anlageparzelle: 8,0 m × 1,5 m (12,0 m ²); Randparzellen ohne Auswertung
Beregnung	Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen (Gierhake Maschinenbau)

Bewässerungsvarianten

Neben einer 'Kontrolle', in der in der Regel keine Beregnung durchgeführt wurde, sollten in einer 'Praxis'-Variante (nur 2010 und 2011) nur bei extremer Trockenheit 2-3 Regengaben erfolgen. In der Variante 'Intensiv' (alle Versuchsjahre) wurde nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010) eine klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - ET_c , $ET_c = \text{Referenzverdunstung} \times kc\text{-Wert}$) erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet.

Die veröffentlichten kc -Werte bezogen sich ursprünglich auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) (vgl. PASCHOLD 1999; PASCHOLD et al. 2007 u. 2009). Dieser Ansatz wurde auch an den Deutschen Wetterdienst (DWD) herangetragen und in der 'Agrowetter-Beregnungsberatung' (s. u.) umgesetzt (vgl. hierzu die nahezu identischen Evapotranspirationswerte des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes und der 'Agrowetter'-Werte der Versuchsjahre 2010 und 2011). Ab 2011 (FA-GM 2011c) wurden diese (niedrigeren) kc -Werte auf die sog. PENMAN-Verdunstung (ET_{PEN}) bezogen (daher hier als kc_{PEN} bezeichnet). Für die niedriger ausfallende FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) wurden um Faktor 1,4 höhere kc -Werte (hier als kc_{FAO} bezeichnet) empfohlen (FA-GM 2011b).

Alternativ zur 'Praxis'-Variante wurden im Versuch 2012 in Absprache mit den Geisenheimer Kollegen 'minierte' kc -Werte verwendet. Diese Variante konnte in den Folgeversuchen aber nicht fortgeführt werden, weil stattdessen die 'SVAT'-Variante (s. u.) aufgenommen wurde. Die in den jeweiligen Versuchen verwendeten kc -Werte werden in den Grafiken zum Evapotranspirationsverlauf (z. B. Abbildung 55, Seite 75) dargestellt, Tabelle 34 (Seite 113) gibt einen Überblick über die in den verschiedenen Versuchen zur Anwendung gekommenen Modi zur ET_c -Berechnung.

Anders als in der aktuellen Empfehlung (HS-GM 2013), nach der der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 90 % nFK aufgefüllt wird, sollte der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde zunächst bis Blühbeginn (BBCH 61) nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, danach wurde entsprechend mit 0-60 cm Tiefe kalkuliert.

Abweichend vom 'Geisenheimer Modell', das „nach starken Niederschlägen“ mit einer Überschreitung der 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.

In der ab 2013 aufgenommenen Variante 'SVAT' (Soil-Vegetation-Atmosphäre-Transfer-Modell) erfolgte die Bewässerung nach Berechnungen/Vorgaben einer Arbeitsgruppe des SAPHIR-Projektes (s. Literaturverzeichnis). Hierbei wurde das SVAT-Modell 'Daisy' (HANSEN 2002) anhand der Versuchsdaten (Erträge, Vegetationsdauer, Bodenanalysen) von 2010 bis 2012 kalibriert und anschließend mit dem so kalibrierten Modell der Bewässerungsbedarf wöchentlich berechnet. Im Versuchsjahr 2014 konnte das Modell mit Versuchsdaten (Bodenwasserspannung in drei Tiefen, Blattflächenindex, Pflanzhöhen) von 2013 kalibriert werden.

Jeweils mittwochs (2013) bzw. zu Wochenbeginn wurden die Wassergaben und die Wetterdaten der letzten Woche in das Modell 'Daisy' implementiert und danach der Bedarf für die folgende Woche berechnet. Dabei wurden die Wetterdaten des entsprechenden Zeitraumes aus dem Jahr 2008 (mittelfeuchtes Jahr) als zu erwartender Witterungsverlauf zugrunde gelegt. Der Bewässerungsbedarf beim Erreichen einer Wasserspan-

nung von 200 hPa in 20 cm Tiefe wurde vorab auf 10 mm festgesetzt. Der jeweilige Bewässerungsbedarf wurde um die Menge des in der Woche tatsächlich gefallenen Niederschlags reduziert.

Parallel wurde die Verdunstung/Wasserbilanz mit dem vom DWD angebotenen Modul 'Agrowetter Berechnungsberatung' berechnet, das sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) orientiert. Seit Beginn der Saison 2012 wird diese ET_0 allerdings mit einem windabhängigen Faktor 'korrigiert' (JANSSEN 2012).

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 konnte auch für die 'Kontrolle' und die 'Praxis'-/'Minimiert'-Variante eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden. Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Beregnungsbeginn (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 DWD zurück, in diesen Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche Topografie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicherweise die ET_0 - und $ET_{p_{PEN}}$ -Verdunstungswerte dieser Station zur Verfügung gestellt. 2013 lieferte die Station nach einem Hochwasserschaden in Folge der Starkregenereignisse ab dem 4. Juni allerdings keine Daten mehr, sodass der DWD aus Daten der deutlich weiter entfernten Stationen Dresden-Klotzsche und Hoyerswerda Verdunstungsdaten für die Station Hosterwitz interpolieren musste (JANSSEN 2013).

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.

Die Beregnung der entsprechenden Parzellen (Haupteinheit) erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt anfangs nur 2 mm, später zumeist 4 mm ausgebracht, sodass bis zu 6 Überfahren pro Beregnungsgabe erforderlich waren. Beim Frühsommersatz 2013 wurde auf Grund des durch die anfänglichen Starkniederschläge verschlammten Bodens bis zu 10-mal (à 2 mm) beregnet. Die ausgebrachte Beregnungsmenge wurde 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 zwei (bei der Ernte ggf. nur einer) der vier Sorten je eine Bodenprobe mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60, ggf. 60-90 cm) gezogen, sodass je Variante und Tiefe eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 800 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.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Versuchsjahr 2010

Nach einem niederschlagsreichen Winter (156 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 18. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,9 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 26,9 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 21). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 30 Vol.-% eine etwas höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 11,0 Vol.-% ebenfalls leicht reduziert.

Beim Auflaufen der Bohnen (BBCH 09) Mitte Juni wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-30 cm Tiefe von 73 % nFK ermittelt. Bis etwa zur Kulturmitte herrschten dann sehr trockene Witterungsbedingungen mit bis zu 5-6 mm, teilweise 7 mm ET₀/d (vgl. Abbildung 55). Bei einem Absinken der Bodenfeuchte nach 'Agrowetter' auf 60-65 % nFK wurde in der 'Intensiv'-Variante der Boden mit eine Beregnungsgabe von 10 mm an zwei Terminen jeweils wieder auf 80 % nFK aufgefüllt (Abbildung 54).

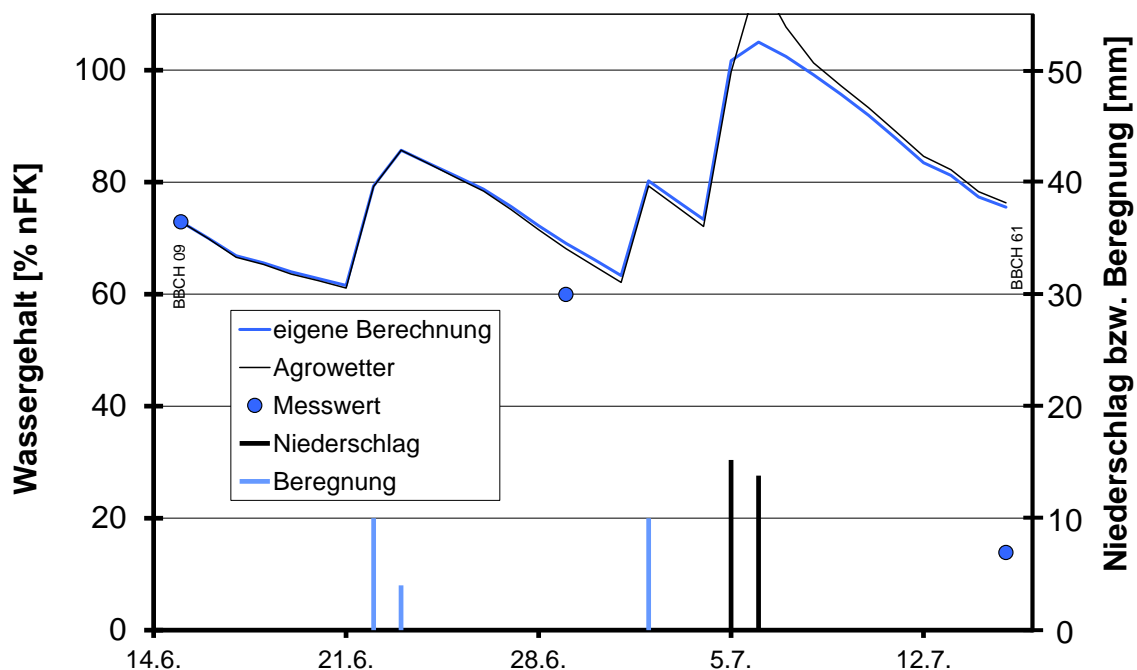


Abbildung 54: Niederschlags- und Beregnungsmengen sowie berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{C_{PEN}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2010]

Weil der direkt nach der Aussaat ausgebrachte N-Dünger vor der ersten Beregnungsgabe nicht vollständig aufgelöst/eingewaschen war (nur 3,5 mm Niederschlag zwischen Saat und Auflauf), wurden am 23. Juni alle Varianten mit 4 mm beregnet. Damit sollte sichergestellt werden, dass in allen Varianten eine einheitliche N-Versorgung gewährleistet war. In der 'Praxis'-Variante wurden wegen der 'augenscheinlich' sehr trockenen Bodenverhältnisse eine 10- und eine 15 mm-Gabe gegeben (wobei sich diese Einschätzung durch die Bodenbeprobung, die nach der 2. Beregnungsgabe erfolgte, auch voll bestätigte). Die 'Kontrolle' blieb (mit Ausnahme der 4 mm am 23. Juni) unberegnet.

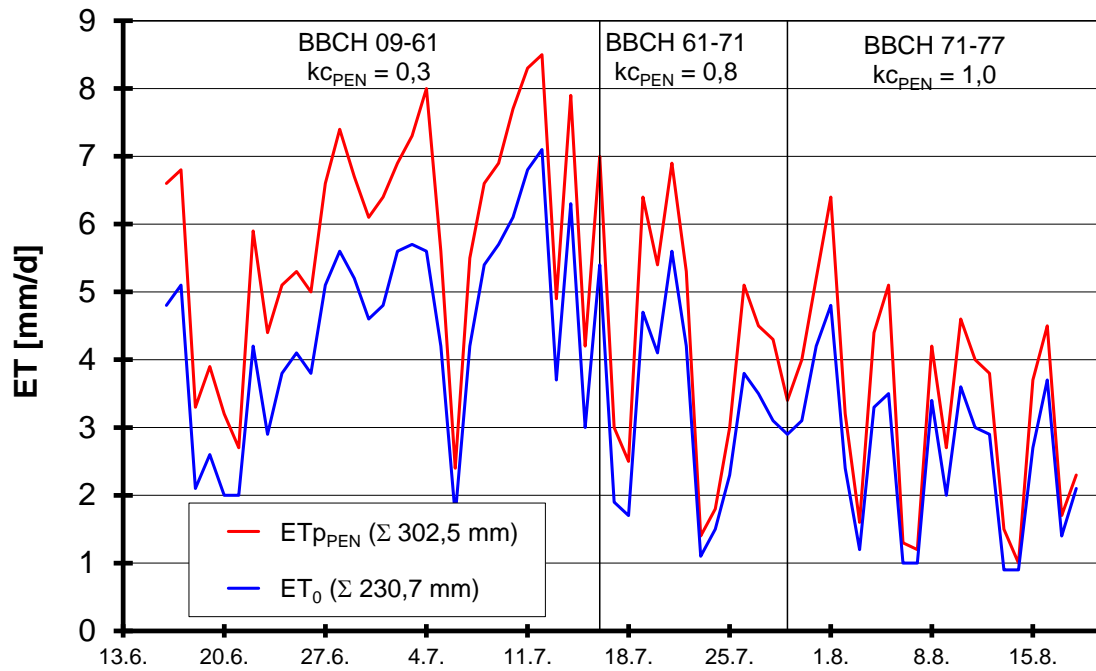


Abbildung 55: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2010]

Eine Woche nach Blühbeginn (BBCH 61) setzen sehr feuchte Witterungsbedingungen mit insgesamt rund 250 mm Niederschlag bis zur Ernte ein, sodass der Boden immer wieder bis auf FK aufgefüllt wurde (Abbildung 56) und ca. 150 mm versickerten (s. u.).

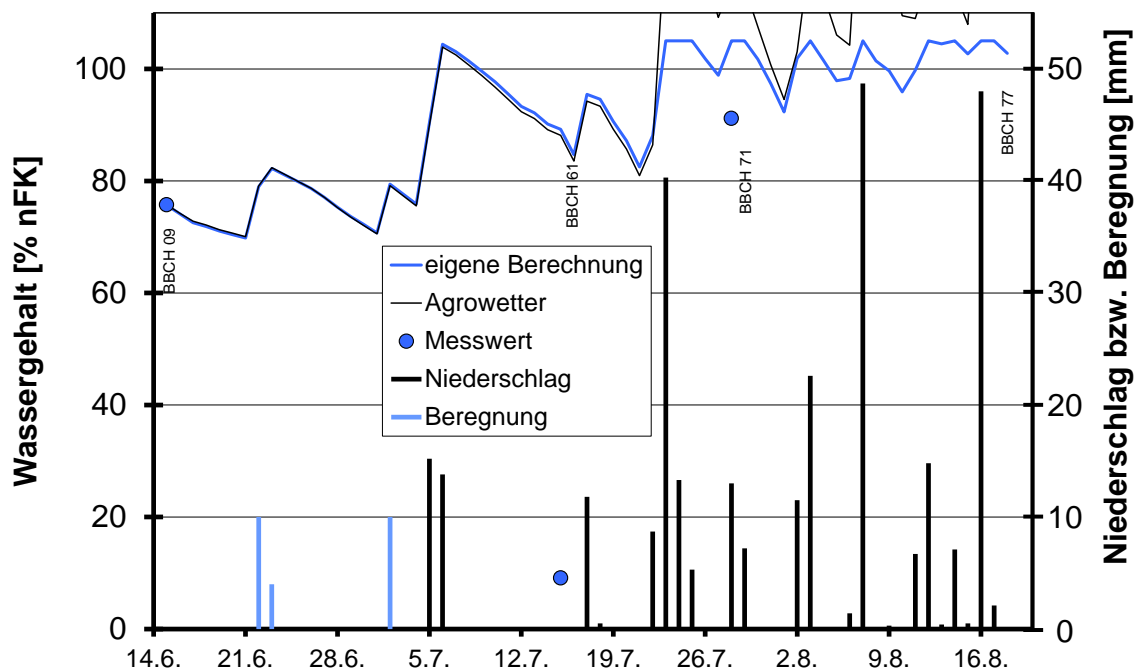


Abbildung 56: Niederschlags- und Beregnungsmengen sowie berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{C_{PEN}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2010]

Die auf Basis der ET_0 -Werte berechneten täglichen Verdunstungswerte nach 'Geisenheim' stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c\text{ adj}} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 131,5 mm wies 'Agrowetter' aber einen geringfügig höheren Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung nach 'Geisenheim', die auf 128,5 mm kam (Tabelle 22a). Auch für die unberechnete 'Kontrolle' berechnete 'Agrowetter' eine Verdunstung von 131,4 mm, obwohl hier die kalkulierte nFK in 0-30 cm Tiefe zeitweise auf deutlich unter 50 % absank (o. Abbildung). Bei 'Agrowetter' wird die Verdunstung aber auch bei geringeren Bodenfeuchtegehalten dann nicht reduziert, wenn die Transpirationsbelastung ($ET_0 \times k_{cPEN}$) nur relativ gering ist (hier in der entsprechende Phase unter 2 mm/d) und so ein ausreichender Wassertransport zu den Wurzeln gewährleistet ist (JANSSEN 2010).

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte bis BBCH 61 nahezu deckungsgleich (Abbildung 54). In der zweiten, feuchten Kulturhälfte führten die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsberechnung aber zu einem etwas unterschiedlichen Verlauf: Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinausgehende Menge von insgesamt 162,9 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' eine Versickerung von 142,6 mm (Tabelle 22b).

Weil der Boden augenscheinlich sehr trocken erschien, wurde zur Überprüfung der berechneten Bodenfeuchte am 29. Juni in der Variante 'Intensiv' eine erste Bodenprobe gezogen. Diese deutete bereits an, dass der Boden tatsächlich etwas trockener war als kalkuliert (Abbildung 54). Die bei Blühbeginn (BBCH 61) gezogene Bodenprobe (Abbildung 54) zeigte dann allerdings einen 'eklatanten' Unterschied zwischen kalkuliertem und tatsächlichem Bodenwassergehalt auf.

Mit Einsetzen der (Stark)Niederschläge füllte sich dann der Boden in allen Varianten wieder auf FK auf, was auch durch die Bodenproben weitestgehend bestätigt wurde (Abbildung 56, Abbildung 57). Auf eine Bodenprobe am Kulturende wurde auf Grund der offensichtlichen Sättigung des Bodens bis auf FK verzichtet. Der Bodenfeuchtigkeitsgehalt (0-30 cm) der 'Kontrolle' wurde vom 'Agrowetter'-Modul auf Basis der berechneten $ET_{c\text{ adj}}$ -Werte zu Blühbeginn (BBCH 61) auf 56 % nFK geschätzt (o. Abbildung). Tatsächlich lag er aber auch hier mit 26 % nFK noch deutlich tiefer (Tabelle 21).

Ganz offensichtlich wurden von allen Varianten aber auch schon vor Blühbeginn Bodenwasser der Schicht 30-60 cm genutzt, denn der Wassergehalt dieser Schicht fiel von 79 % nFK (BBCH 09) auf 46 % ('Praxis') oder sogar bis auf Werte um 0 % ('Kontrolle' und 'Intensiv') bis Blühbeginn ab (Tabelle 21). Bei der 'Kontrolle' und der 'Intensiv'-Variante war sogar eine Abnahme des Wassergehaltes in der Schicht 60-90 cm zu verzeichnen.

Trotz der teilweise massiven Austrocknung des Bodens zeigten die Bohnen bzw. die unterschiedlichen Varianten während der ersten Kulturhälfte keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Weil die Berechnungsmengen in den Varianten 'Praxis' und 'Intensiv' mit 29 bzw. 24 mm sehr ähnlich waren und in der 'Praxis'-Variante zu Blühbeginn der höchste Bodenwassergehalt festgestellt wurde, wurde neben der 'Kontrolle' nur die 'Praxis'-Variante ertraglich ausgewertet. Entsprechend der nur relativ geringen Berechnungsmenge konnte aber beim Frischmasseertrag kein Berechnungseffekt abgesichert werden ($p = 0,27$) (Abbildung 58). Eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung bestand ebenfalls nicht ($p = 0,48$).

(Mit Ausnahme der Menge an Ernterückständen wurden bei allen Parametern signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.)

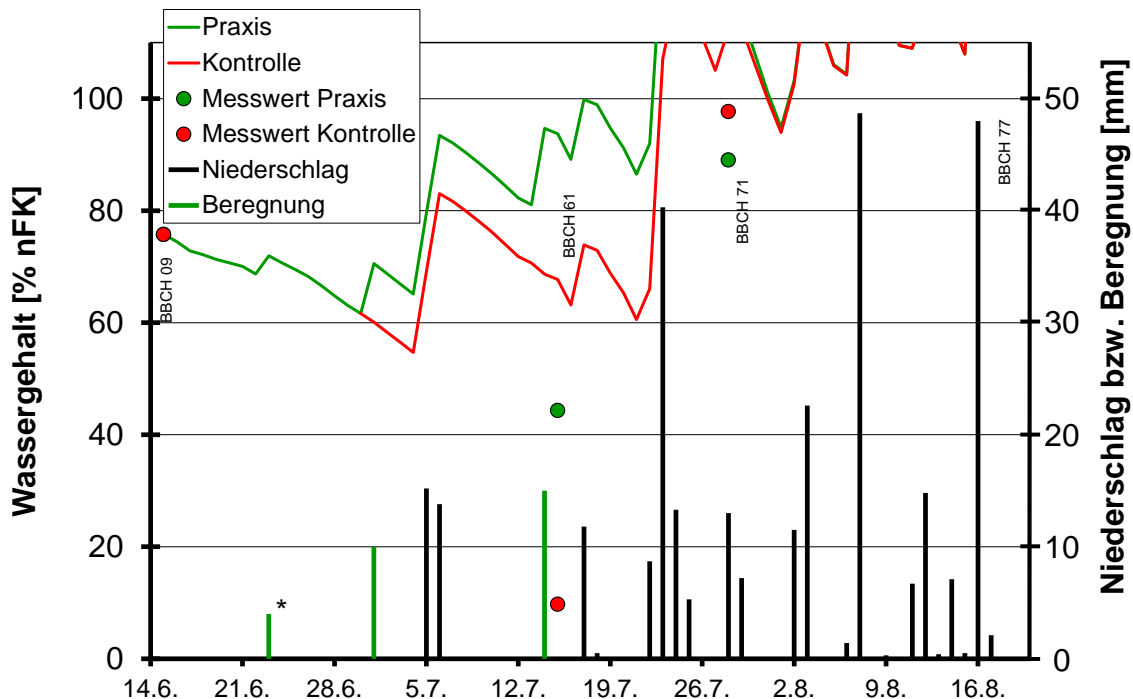


Abbildung 57: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 4 mm Beregnung auch in der 'Kontrolle') [Bohnenversuch 2010]

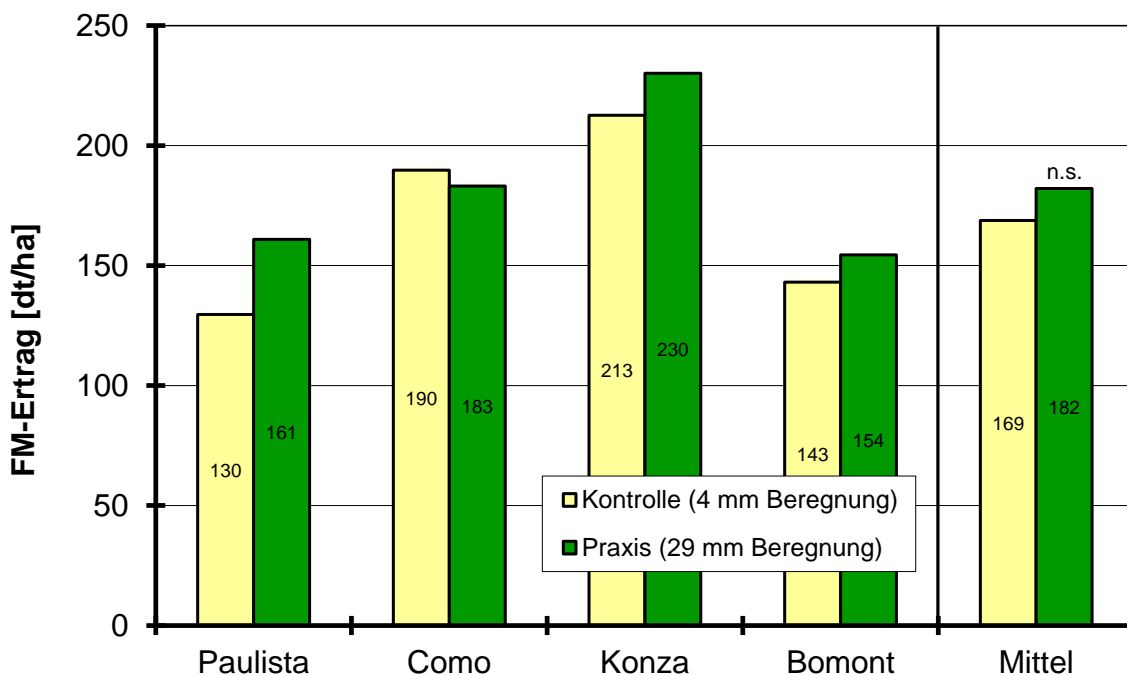


Abbildung 58: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]

Bei der Menge an Ernterückständen zeigten sich weder Sorten- noch Beregnungseffekte (o. Abbildung), so dass auch für die gesamte Aufwuchsmenge kein Bewässerungseffekt abgesichert werden konnte (Abbildung 59). Entsprechend zeigte sich auch kein Einfluss der Bewässerung auf den Ernteindex (Abbildung 60).

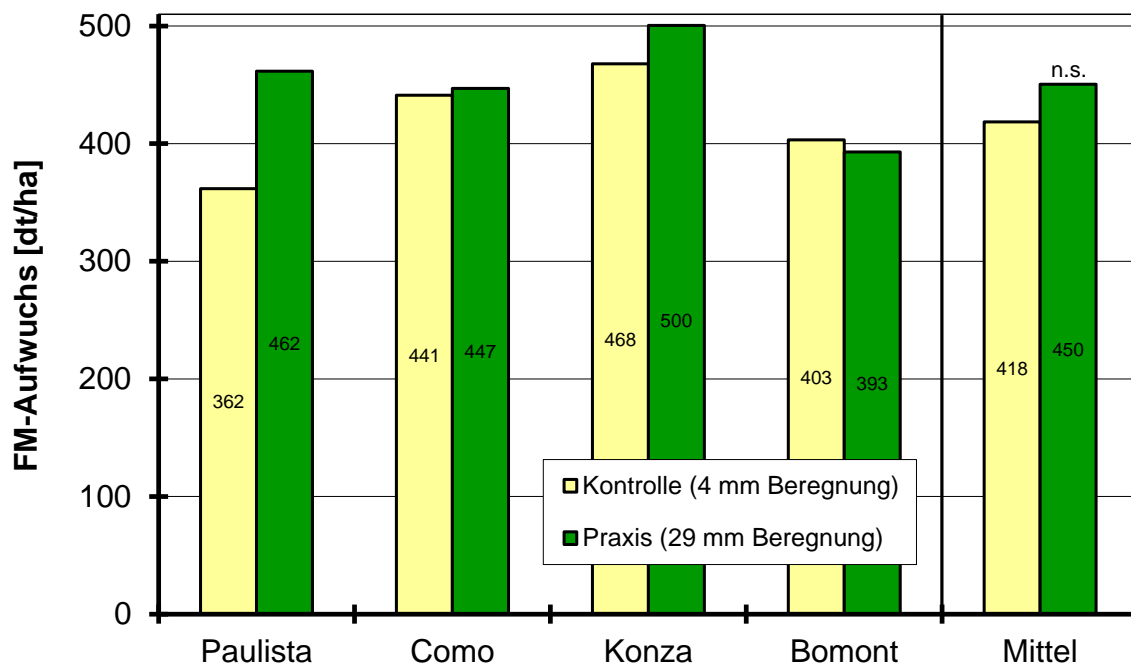


Abbildung 59: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]

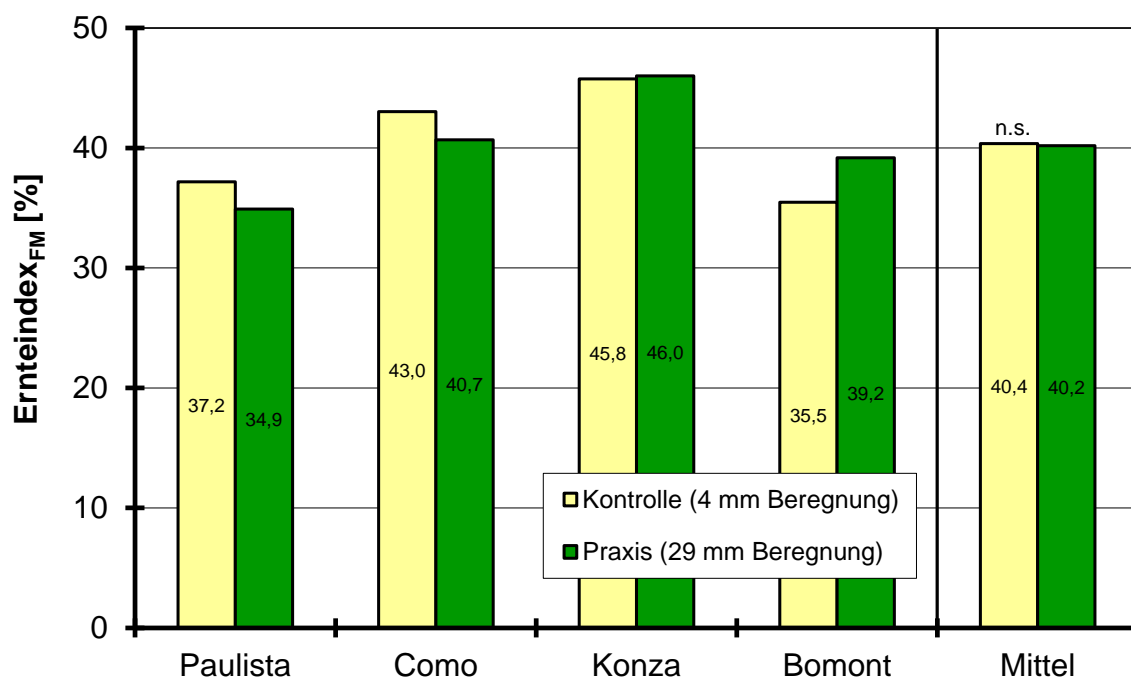


Abbildung 60: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2010]

Eine signifikante Bewässerungswirkung zeigte sich nur bei der Sortierung der Hülsen, wo der Anteil der Größenklasse 8,0-9,0 mm bei der berechneten Variante mit 26,7 % (wenn auch nur unbedeutend) höher als bei der 'Kontrolle' (24,7 %) lag (Tabelle 20).

Tabelle 20: Sortierung der Bohnenhülsen [Bohnenversuch 2010]

Bewässerung Sorte	Kontrolle				Praxis			
	Paulista	Como	Konza	Bomont	Paulista	Como	Konza	Bomont
< 5,0 mm [%] ¹⁾	4	1	2	4	3	1	1	4
5,0-6,5 mm [%] ¹⁾	8	7	17	34	9	6	21	30
6,5-8,0 mm [%] ¹⁾	47	29	51	51	40	30	50	59
8,0-9,0 mm [%] ¹⁾	30	34	24	11	32	45	24	6
Mittel	24,7				26,7 ²⁾			
9,0-10,5 mm [%] ¹⁾	11	26	5	1	16	16	4	1
10,5-12,0 mm [%] ¹⁾	0	3	0	0	2	2	0	0

1) ermittelt mit einer Lochschablone an einer Stichprobe von rund 200 g/Parzelle

2) signifikanter ($\alpha < 0,05$) Bewässerungseffekt

Tabelle 21: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2010]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
18. März ³⁾		alle	27,9	26,9	27,0	100	100	100
15. Juni ⁴⁾	09	alle	23,5	23,6	22,9	73	79	73
29. Juni		Intensiv	21,3			60		
15. Juli	61	Kontrolle	15,7	10,5	16,2	26	0	30
		Praxis	18,4	18,6	22,7	42	46	72
		Intensiv	13,7	12,2	13,1	14	4	10
28. Juli	71	Kontrolle	27,0	27,0	28,5	95	100	109
		Praxis	26,3	25,0	27,9	90	88	106
		Intensiv	26,8	24,5	28,2	99	84	107

1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 11,0 Vol.-%

3) Bestimmung der FK Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET₀): 15.3.: +10,3; 16.3.: +2,5; 17.3.: -0,5

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 22a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2010]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]			
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾	
				ET ₀ × k _{CEN} Intensiv	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-61	176,1	133,8	1,34	40,1	41,0		
61-71	56,6	42,9	1,33	34,3	35,2	35,1	
71-77	69,8	54,0	1,29	54,0	55,3		
09-77	302,5	230,7	1,32	128,5	131,5	131,4	

Tabelle 22b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2010]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]			Versickerung [mm] ⁶⁾			
		Intensiv	Praxis	Kontrolle	Geisenheim ET ₀ × kC _{PEN} Intensiv	Intensiv	Agrowetter ET ₀ × kC _{PEN} Praxis Kontrolle	
09-61	29,1	24	29	4	0,0	0,2	0,0	
61-71	92,9	0			43,5	31,8	36,1	14,9
71-77	171,3	0			119,4	110,6	111,8	107,9
09-77	293,3	24	29	4	162,9	142,6	147,9	122,8

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration des Bestandes berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) aus der Bodenschicht 0-60 cm

3.3.2 Versuchsjahr 2011

Nach einem niederschlagsreichen Winter (190 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 21. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,7 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 28,4 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 23). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen schwach sandigen Lehm (Ls2, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 34 Vol.-% eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%) mit 12,0 Vol.-% ebenfalls reduziert, sodass sich eine nutzbare Feldkapazität von 16 Vol.-% errechnet (Kartieranleitung ebenfalls 16 Vol.-% nFK).

Beim Auflaufen der Bohnen (BBCH 09) Mitte Juni wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 75 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis zum Abbruch des Versuches am 1. August 218 mm Niederschlag, sodass nach allen Kalkulationsmodellen keine Bewässerungsgaben notwendig waren bzw. es zu einer massiven Sickerwasserbildung kam (Abbildung 62 u. Abbildung 63, Tabelle 24b).

Die auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (Abbildung 61) mit ET₀ × kC_{PEN} berechneten täglichen Verdunstungswerte stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein. Mit einer berechneten Gesamt-Verdunstung von 62,9 mm wies 'Agrowetter' praktisch den gleichen Wert aus wie die eigene Berechnung, die auf 61,9 mm kam (Tabelle 24a).

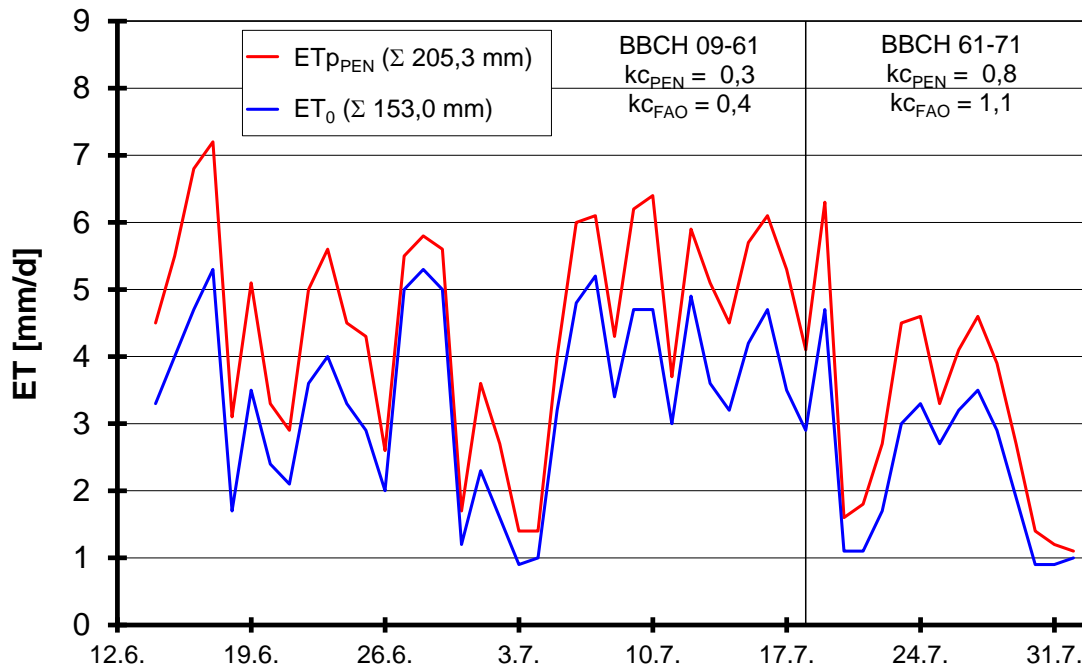


Abbildung 61: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2011]

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' ebenfalls sehr ähnlich (Abbildung 62). 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 hinausgehende Menge von insgesamt 127,6 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' eine Versickerung von nur 97,9 mm (Tabelle 24b). Die Diskrepanz beruht aber vor allem darauf, dass das Starkregenereignis vom 30./31. Juli (74,4 mm) bei der eigenen Berechnung unmittelbar zu einer Versickerung von 59,4 mm führte, während 'Agrowetter' bis zum 1. August (= Ende der Bilanzierung) nur 31,6 mm als versickert angenommen hat. Bis zum 29. Juli wiesen 'Agrowetter' (66,3 mm) und die eigene Berechnung (68,3 mm) eine ähnlich hohe Versickerung aus.

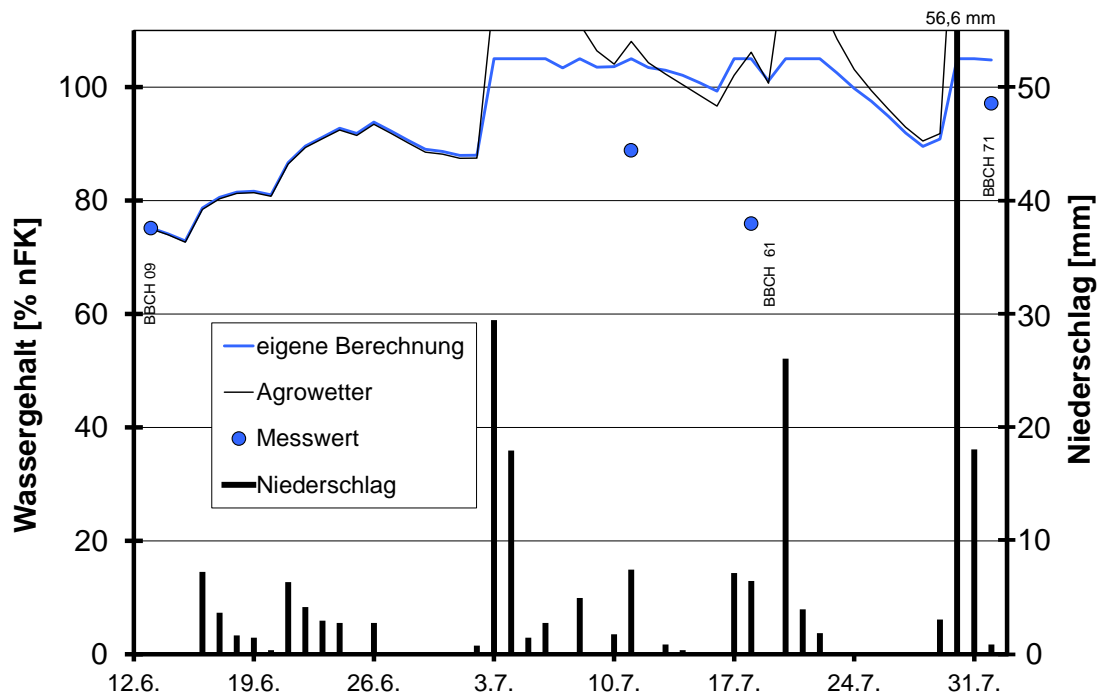


Abbildung 62: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2011]

Berechnet man auf Basis ET_0 die Evapotranspiration der Bohnen mit den dafür vom 'Geisenheimer Modell' vorgesehenen kc_{FAO} -Werten ($ET_0 \times kc_{FAO}$), so ergibt sich insgesamt eine ET_c von 83,5 mm. Die für die PENMAN-Verdunstungswerte geltende Berechnung $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ führte zu einem identischen Wert (Tabelle 24a), entsprechend verliefen die berechneten Bodenwassergehalte fast deckungsgleich (Abbildung 63).

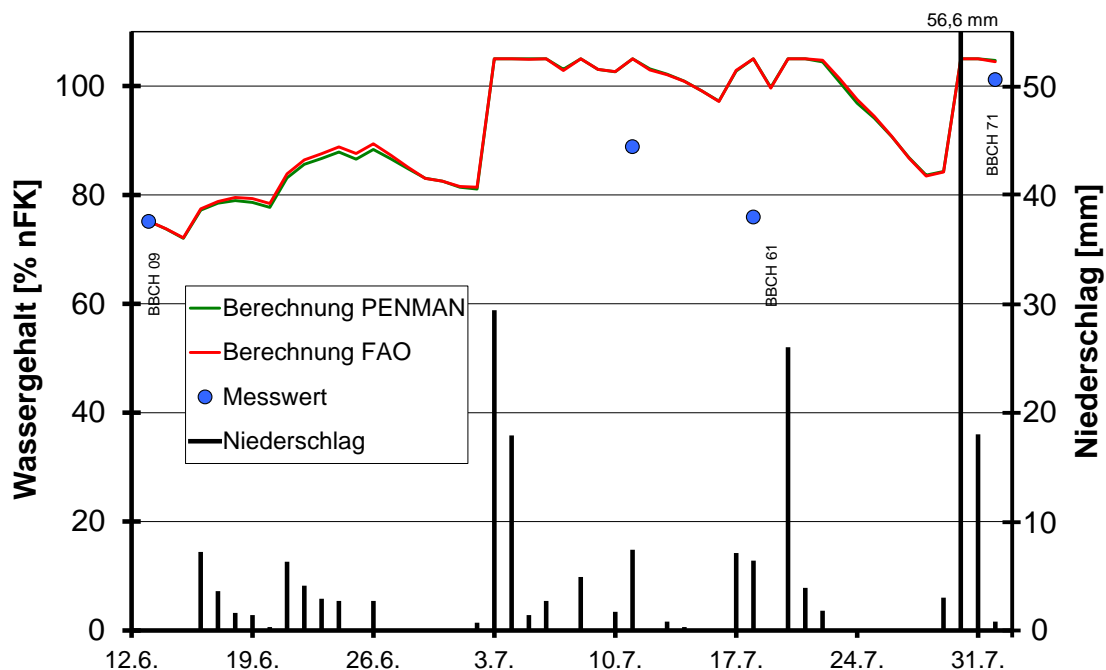


Abbildung 63: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ ('PENMAN') bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ ('FAO') sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2011]

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten (leider wurde aber eine Bodenprobenahme vor dem ersten kräftigen Regenereignis am 3. Juli versäumt) wurde der Bodenwassergehalt von allen Modellen zu Blühbeginn (um den 19. Juli) um annähernd 30 %-Punkte überschätzt. Damit ergibt sich in der Tendenz ein ähnliches Ergebnis wie im Vorjahresversuch, wo ebenfalls eine zwischenzeitliche deutliche Überschätzung der Bodenwassergehalte (und damit Unterschätzung der ET_c) zu konstatieren war. Hierbei muss man sich allerdings vor Augen halten, dass mit den vorgeschlagenen kc-Faktoren nicht zwangsläufig die ET_c (und damit die Bodenfeuchte) 'richtig' berechnet werden soll, sondern (möglicherweise) ein stärkeres Absinken der Bodenfeuchte in Kauf genommen wird, weil dieses durchaus Ertragsvorteile bringen kann (vgl. PASCHOLD & KLEBER 2004).

Tabelle 23: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2011]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ²⁾			% nFK ³⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
21. März ¹⁾		alle	27,7	28,4	28,4	100	100	100
13. Juni ⁴⁾	09	alle	23,4	24,7	26,8	73	77	91
11. Juli	61	alle	25,4	27,1		85	92	
18. Juli		alle	22,2	26,3	26,8	65	87	91
1. Aug.	71	Kontrolle	26,6	28,5	29,7	93	101	108
		Intensiv	27,8	28,6	29,9	101	101	109

1) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET_0): 18.3.: +13,6; 19.3.: -0,9; 20.3.: -0,9

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

3) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 12,0 Vol.-%

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 24a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2011]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bohnenbestandes [mm]					
	ET_0 ¹⁾ [mm]	ET_{PEN} ²⁾	ET_{PEN}/ET_0 ³⁾	Geisenheim: ET_c ⁴⁾			Agrowetter: $ET_{c,adj}$ ⁵⁾		
				$ET_0 \times kc_{PEN}$	$ET_0 \times kc_{FAO}$	$ET_{PEN} \times kc_{PEN}$	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-61	121,1	161,5	1,37	36,3	48,4	48,5	37,1		
61-71	31,9	43,8	1,39	25,5	35,1	35,0	25,8		
09-71	153,0	205,3	1,38	61,9	83,5	83,5	62,9		

Tabelle 24b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2011]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁶⁾					
		Intensiv	Praxis	Geisenheim			Agrowetter		
				$ET_0 \times kc_{PEN}$	$ET_0 \times kc_{FAO}$	$ET_{PEN} \times kc_{PEN}$	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-61	109,1	0		44,1	31,9	31,9	42,2		
61-71	108,9	0		83,6	74,3	74,1	55,7		
09-71	218,0	0		127,6	106,3	106,1	97,9		

1) FAO-Gras-Referenzverdunstung

2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (über Wasser)

3) Mittelwerte der täglichen Quotienten

4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'

5) aktuelle Evapotranspiration des Bohnenbestandes laut 'Agrowetter', hier $\approx ET_c$

6) aus der Bodenschicht 0-60 cm

3.3.3 Versuchsjahr 2012

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 (Tabelle 25). 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 Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 10,7 Vol.-% analog reduziert, sodass sich eine nFK von 16 Vol.-% errechnet (Kartieranleitung 18 Vol.-% nFK).

Kurz nach dem Auflaufen der Bohnen (BBCH 09) wurde Mitte Juni ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 77 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis Blühbeginn 135 mm Niederschlag. Gleichzeitig bestand mit einer $ET_{p_{PEN}}$ von 179,6 mm (durchschnittlich 5,1 mm/d, vgl. Abbildung 65) 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, sodass sich nach beiden Modellen eine Sickerwasserbildung von über 60 mm ergibt (Abbildung 64, Tabelle 26a u. b).

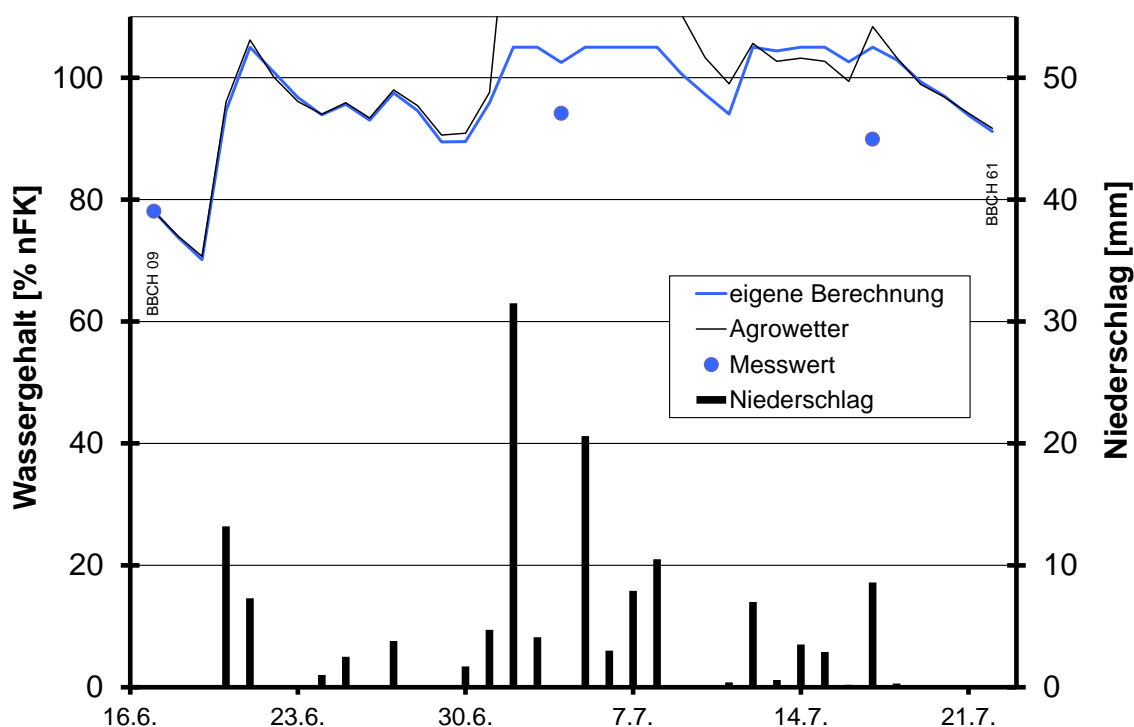


Abbildung 64: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis Blühbeginn auf Basis $ET_{p_{PEN}} \times k_{c_{PEN}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2012]

In der zweiten Kulturhälfte herrschte mit einer durchschnittlichen $ET_{p_{PEN}}$ von 5,2 mm/d (Σ 161,8 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 (Abbildung 66). 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. Abbildung 67).

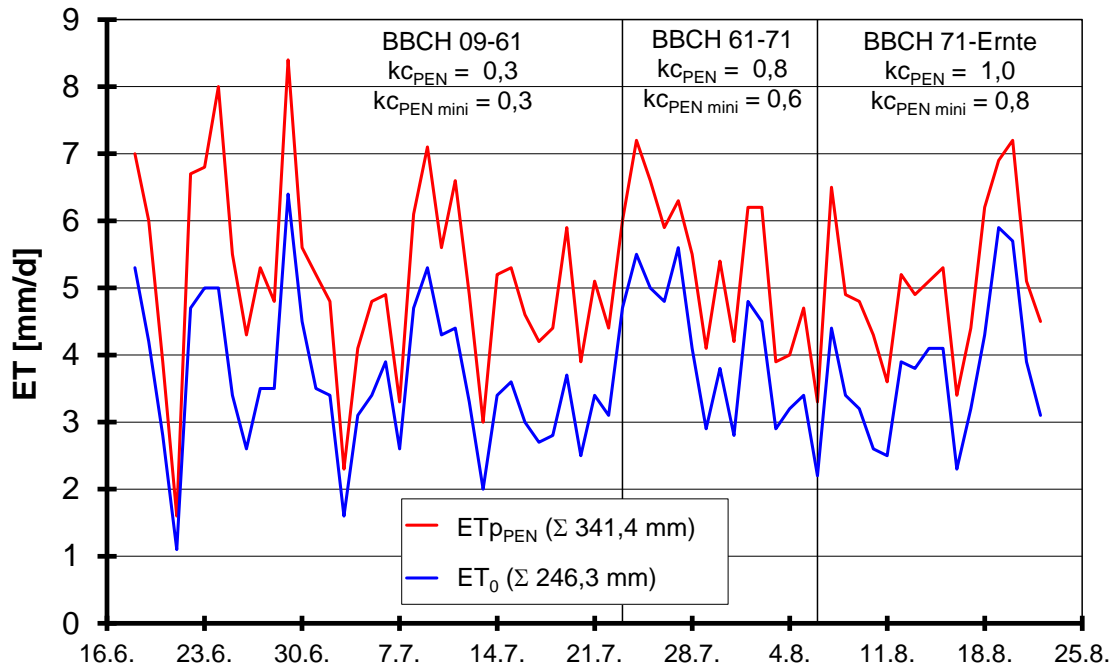


Abbildung 65: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2012]

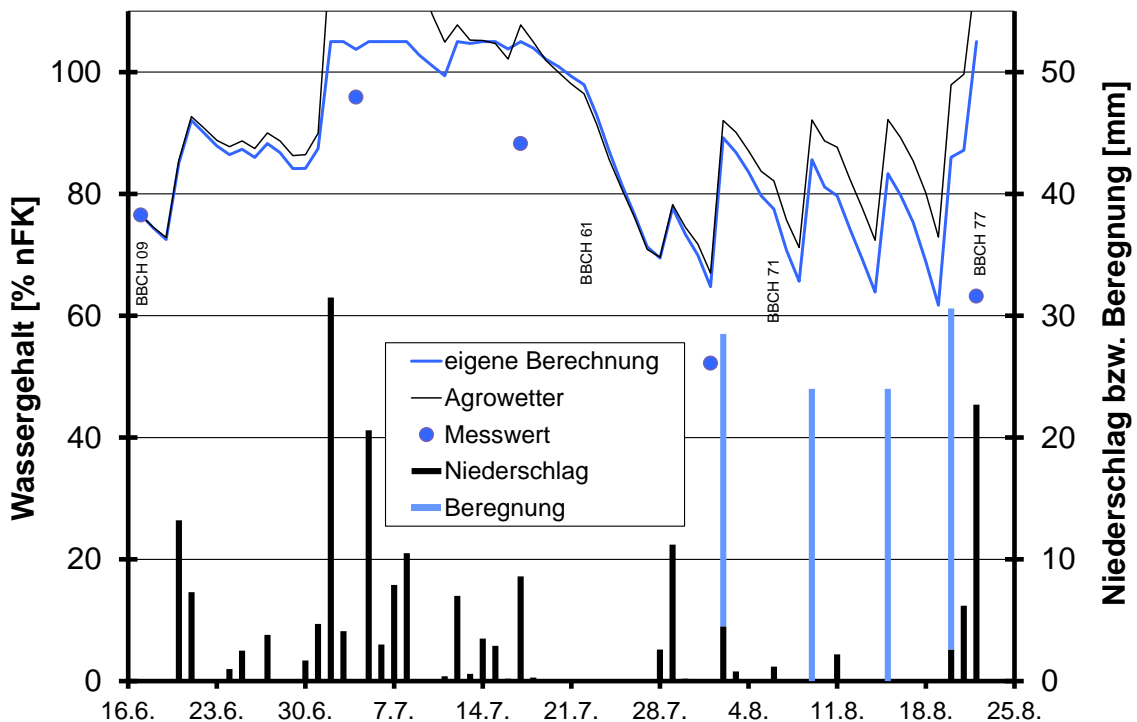


Abbildung 66: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]

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. Tabelle 26a) 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 (Abbildung 64 u. Abbildung 66). 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 hinausgehende 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 (Tabelle 26b). Entsprechend der berechneten Versickerung wies die Bodenschicht 60-90 cm zu Kulturrende einen höheren Wassergehalt auf als zu Kulturbeginn (Tabelle 25).

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt von beiden Modellen zu allen Beprobungsterminen überschätzt (Abbildung 64 u. Abbildung 66). Die Überschätzung der Bodenwassergehalte und damit Unterschätzung der ET_c könnte in der ersten Kulturhälfte noch deutlich größer gewesen sein als dies die Abbildungen andeuten, weil 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, sodass sich unter derartigen Bedingungen Modell und Realität angleichen. Im Versuchsjahr 2010 mit bis zur Blüte trockenen Bedingungen wurde eine große Diskrepanz zwischen kalkuliertem und tatsächlichem Bodenwassergehalt gefunden.

Für die nur moderat beregnete Variante 'Minimiert' berechnete 'Agrowetter' Bodenwassergehalte von kurzzeitig unter 50 % nFK (Abbildung 67). (Die Bemessung der Beregnung 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 (Abbildung 68); dieser Wert dürfte insofern relativ realistisch sein, weil 'Agrowetter' wenige Tage später (Ernte) den tatsächlichen Bodenwassergehalt von 47 % nFK mit einem Wert von 44 % sehr gut prognostizierte.

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 Ernteindizes wurden bei allen Parametern auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.) So wurde der Frischmasseertrag 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 (Abbildung 69). 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), sodass die Einschätzung der Züchter, dass sich bestimmte Sorten durch eine besondere Trockentoleranz auszeichnen, hier (mit allerdings nur 3 im Versuch verbliebenen Sorten) nicht untermauert werden konnte.

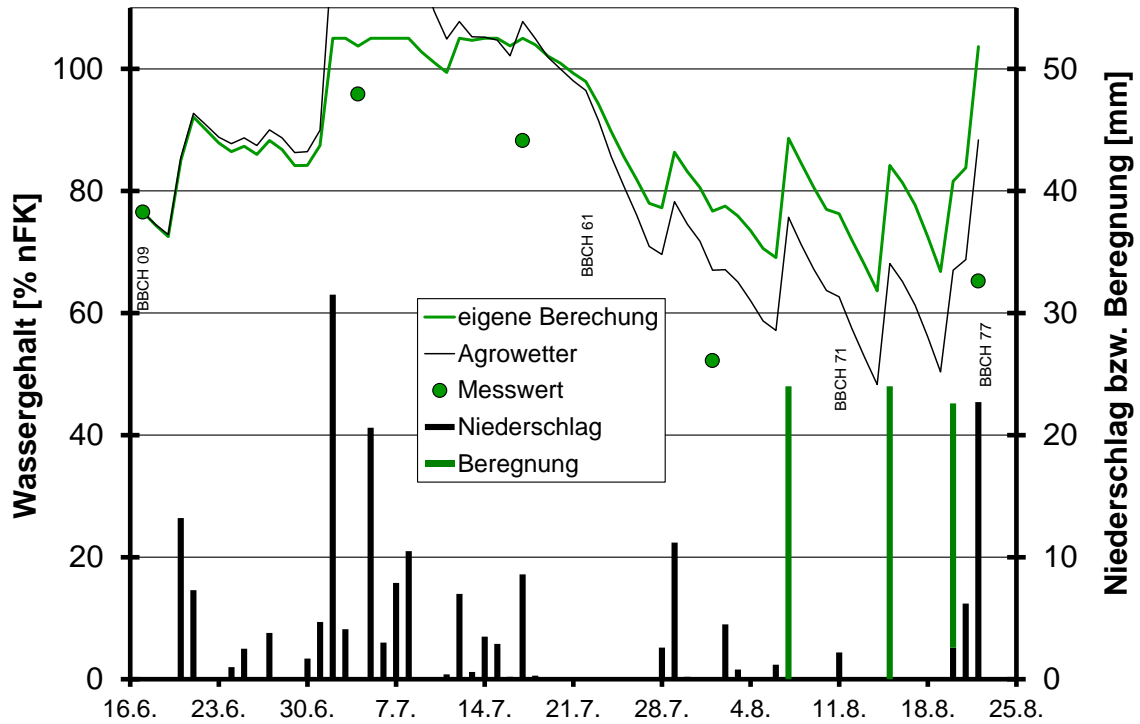


Abbildung 67: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Minimiert' auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN\ mini}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]

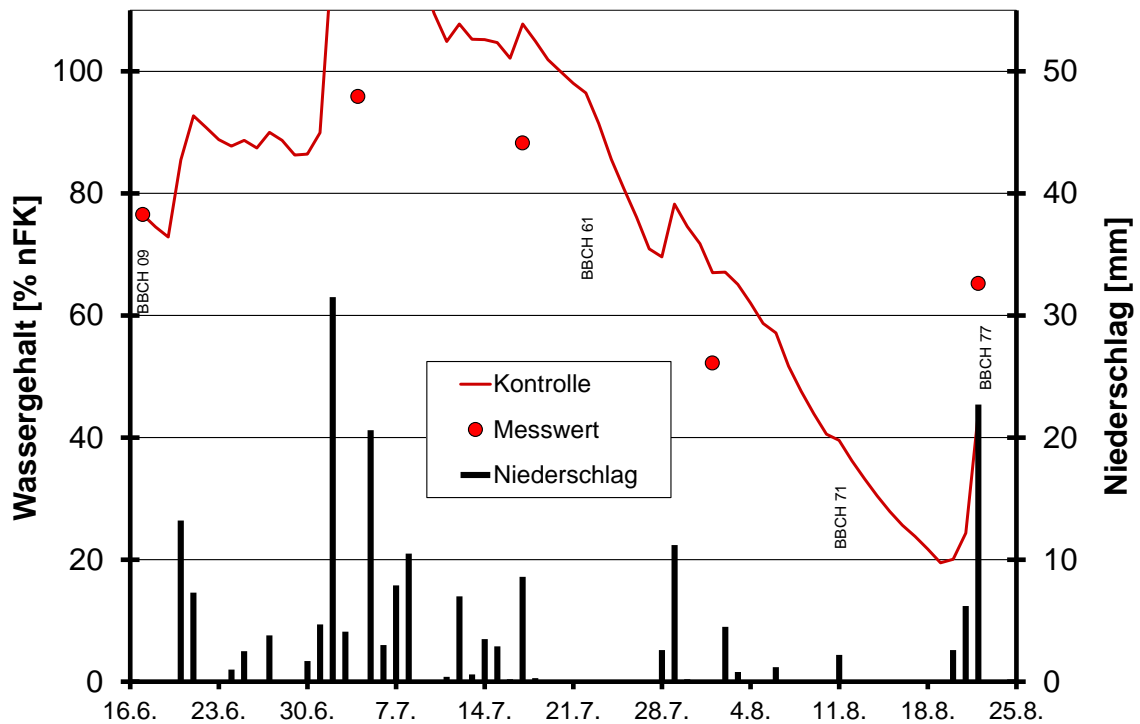


Abbildung 68: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2012]

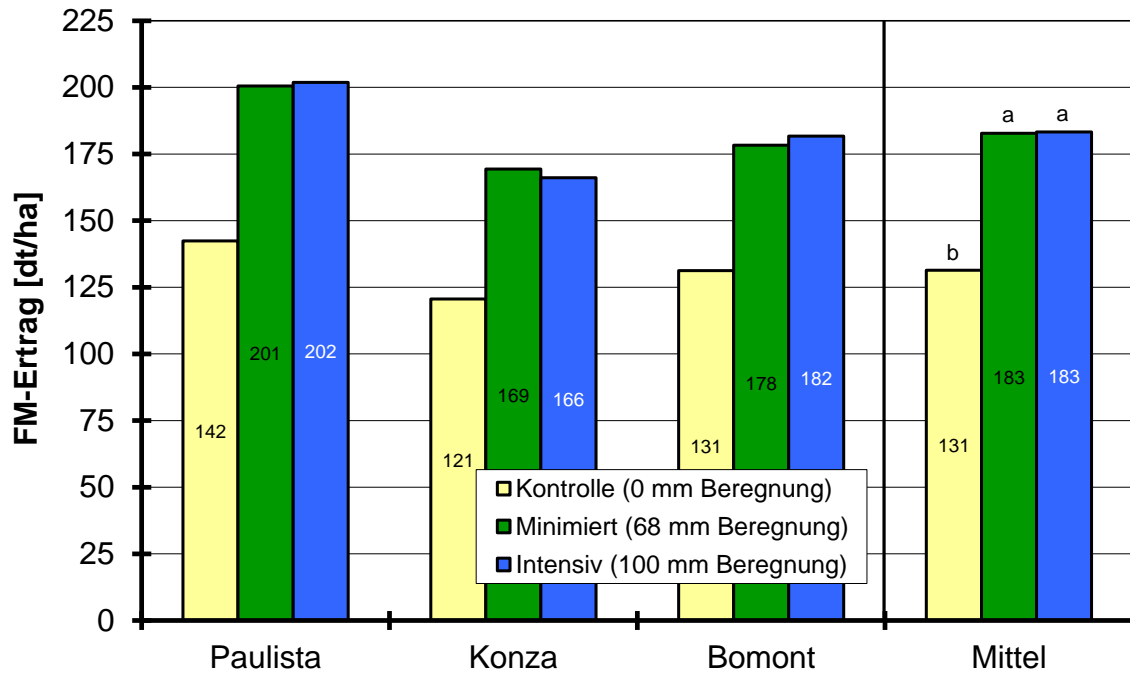


Abbildung 69: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 17,6 dt/ha) [Bohnenversuch 2012]

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 (Abbildung 70).

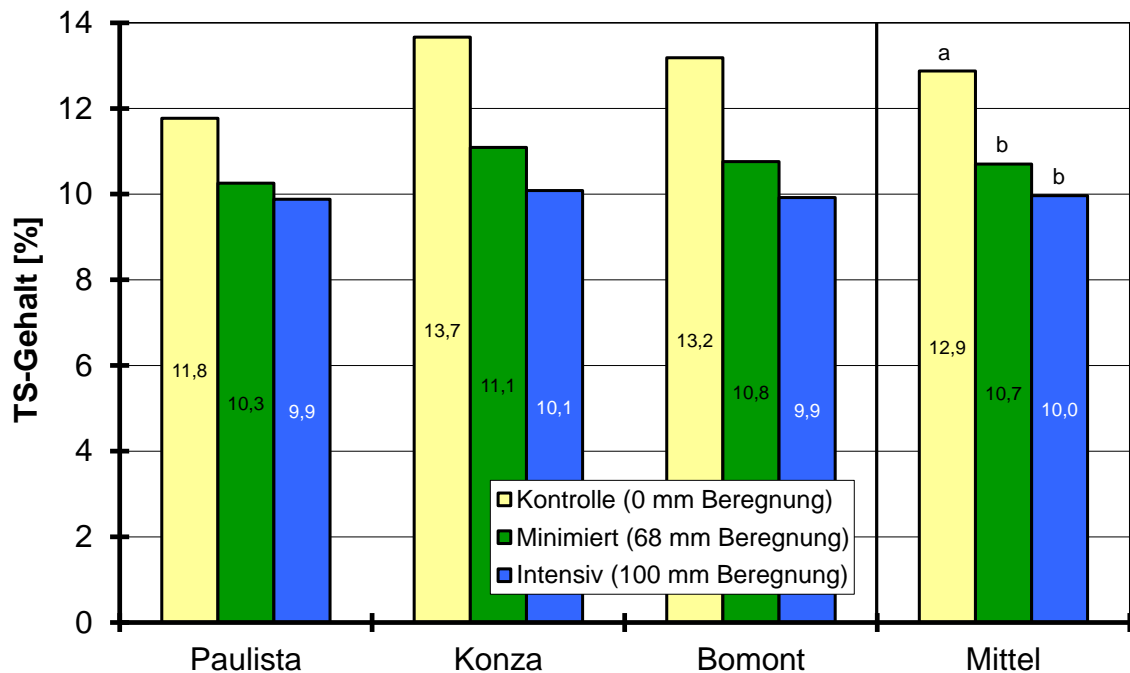


Abbildung 70: Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,1 %) [Bohnenversuch 2012]

Wie zu erwarten, wurde auch der gesamte Aufwuchs durch die Beregnung beeinflusst (Abbildung 71). Obgleich hier die Sorten augenscheinlich etwas unterschiedlich reagierten, war auch hier keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte zu verzeichnen. Die im Vergleich zum Frischmasseertrag etwas geringere Zunahme der Aufwuchsmenge bei Zusatzberegnung spiegelt sich auch beim Ernteindex wider, der in der 'Kontrolle' mit 34,7 % etwas geringer ausfiel als in den bewässerten Varianten (Abbildung 72).

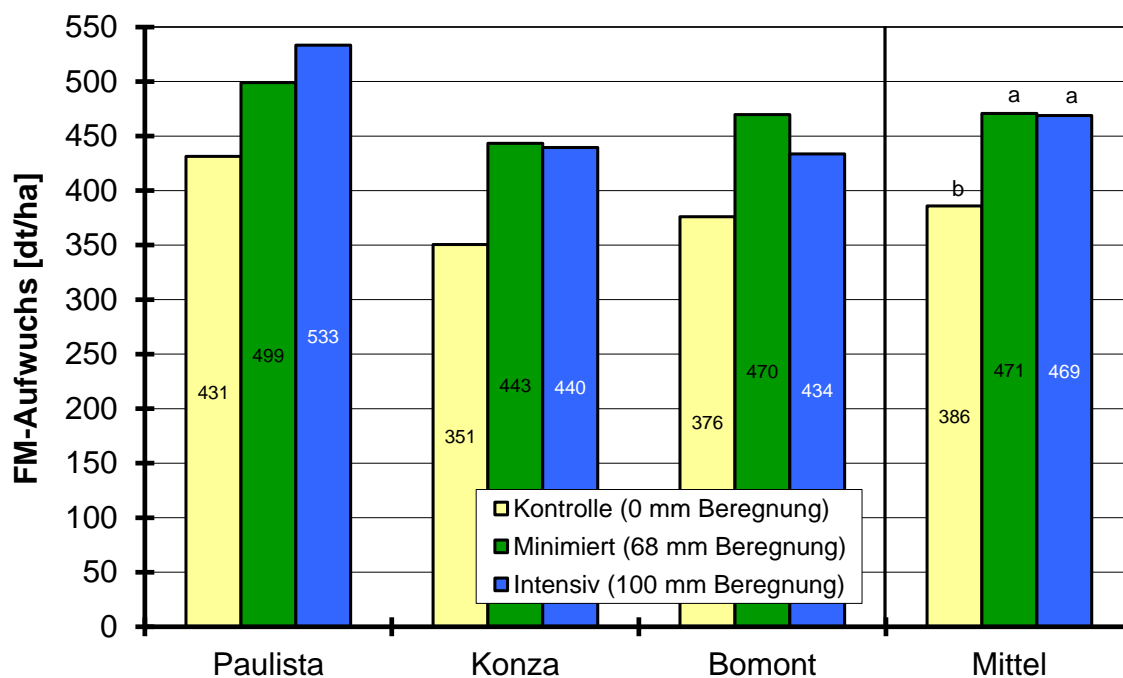


Abbildung 71: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 53,8 dt/ha) [Bohnenversuch 2012]

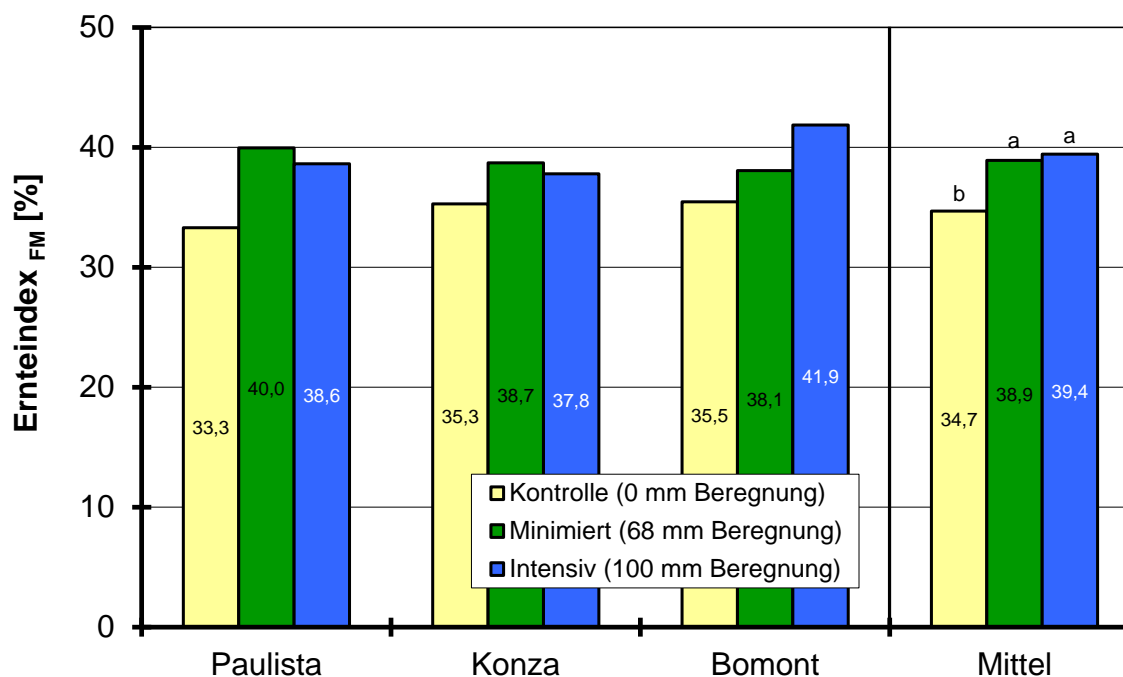


Abbildung 72: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 2,1 %) [Bohnenversuch 2012]

Tabelle 25: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2012]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] 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	27,8	26,0	27,7			
Mittel ⁴⁾		alle	27,3	26,1	28,2	100	100	100
17. Juni ⁵⁾	09	alle	23,7	22,2	22,2	78	75	65
04. Juli		alle	26,4	25,8		94	98	
17. Juli		alle	25,7	24,0		90	87	
01. Aug.		alle	16,9	21,1		36	68	
22. Aug.		Kontrolle	23,6	19,1	23,2	77	49	75
		Minimiert	23,5	19,7	24,5	77	54	82
		Intensiv	19,6	17,6	23,3	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 Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 26a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2012]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]			
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾	
				ET _{PEN} × kc _{PEN} Intensiv	(ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN} 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
71-77	62,6	85,6	1,39	85,6	77,0	74,5	48,8
09-77	246,3	341,4	1,40	200,4	181,3	178,8	153,1

Tabelle 26b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2012]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾			
		Intensiv	Minimiert	Geisenheim ET _{PEN} × kc _{PEN}		Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN}	
				Intensiv	Intensiv	Intensiv	Minimiert
09-61	135,3	0	0	61,9	67,5		
61-71	19,4	24	0	0	0,3	0,3	0,3
71-77	35,0	76	68	0	2,3	0	0
09-77	189,7	100	68	61,9	70,1	67,8	67,8

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle 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

3.3.4 Versuchsjahr 2013, Frühsommersatz

Nach einem Winter mit ausreichenden Niederschlägen (191 mm Niederschlag vom 1. November bis 5. März) wurde am 6. März, zwei Tage nach dem Schmelzen des letzten Schnees, die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde als Mittel der mittlerweile vorliegenden 4 Untersuchungen eine FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 28,2 Vol.-% (30-60 cm), im Mittel 27,7 Vol.-% errechnet (Tabelle 27).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 33 Vol.-% (Slu, Rohdichte 1,5 g/cm³) bzw. 34 Vol.-% (Ls2) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Slu: 12 Vol.-%, Ls2: 18 Vol.-%) mit 9,9 Vol.-% bzw. 14,9 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 15,3 Vol.-% errechnet.

Entsprechend der vorangegangenen Niederschläge wurde am 11. Juni ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 105 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis Blühbeginn 116,6 mm Niederschlag. Gleichzeitig bestand mit einer ET₀ von 111,9 mm (durchschnittlich 4,0 mm/d, vgl. Abbildung 74) aber auch ein relativ hoher Verdunstungsanspruch. Auf Grund des geringen kc-Wertes von 0,4 für diese Wachstumsphase errechnete sich aber nur eine ET_c von 44,8 mm, sodass sich eine Sickerwasserbildung von 85,4 mm ergibt. 'Agrowetter' kommt mit einer ET_c von 43,2 mm und einer Sickerwasserbildung von 87,2 mm zu vergleichbaren Ergebnissen (Abbildung 73, Abbildung 75, Tabelle 28a u. b).

Ab Blühbeginn herrschte mit einer durchschnittlichen ET₀ von 4,5 mm/d (Σ 127,2 mm) weiterhin eine hohe Verdunstung. Bei dann aber nur noch 41,4 mm Niederschlag und steigenden kc-Werten war in der Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' insgesamt eine Bewässerung von 86 mm notwendig (Abbildung 75). In der Variante 'SVAT' wurden entsprechend der Vorgaben 74 mm Zusatzwasser gegeben (vgl. Abbildung 76).

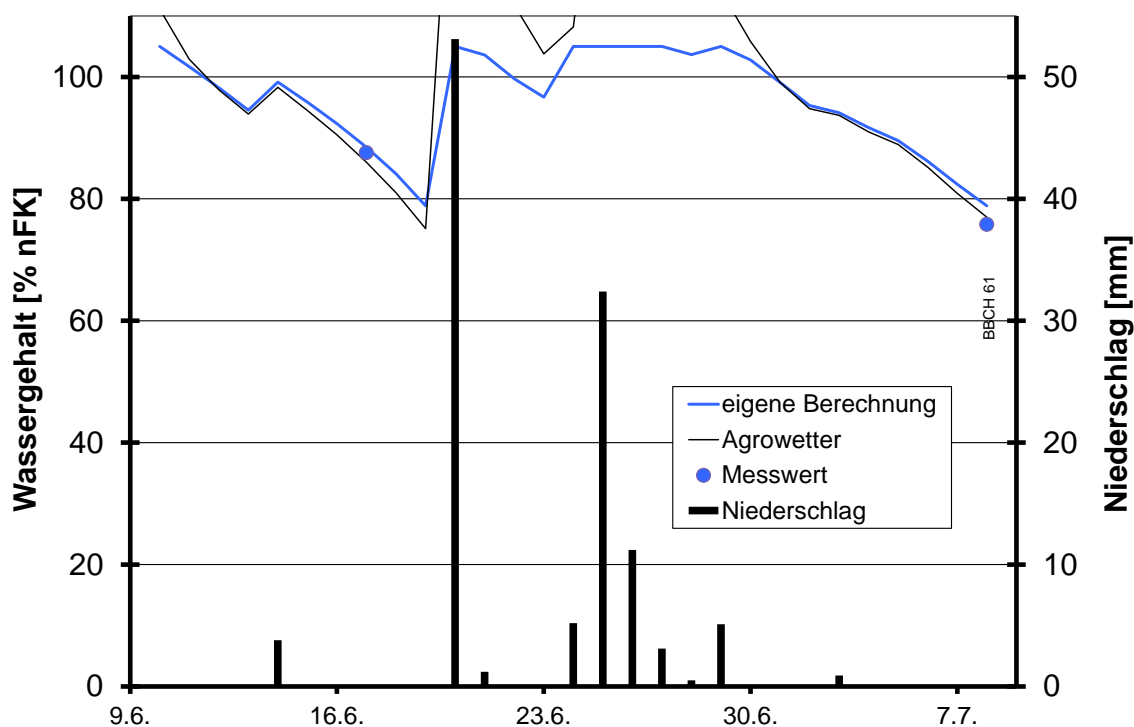


Abbildung 73: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Bohnenversuch 2013a]

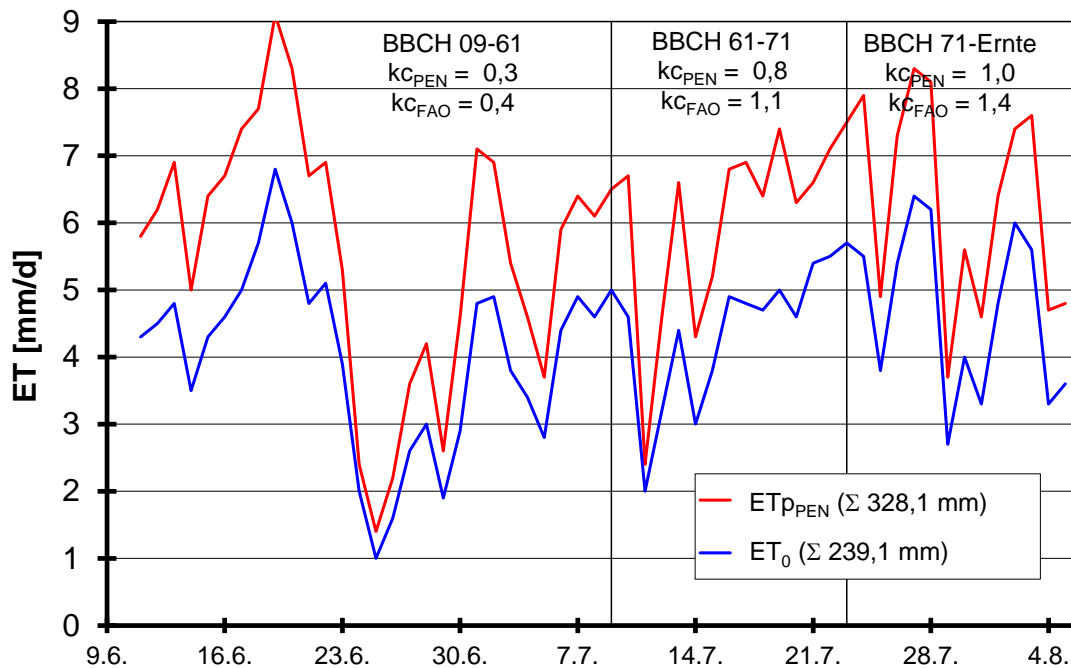


Abbildung 74: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2013a]

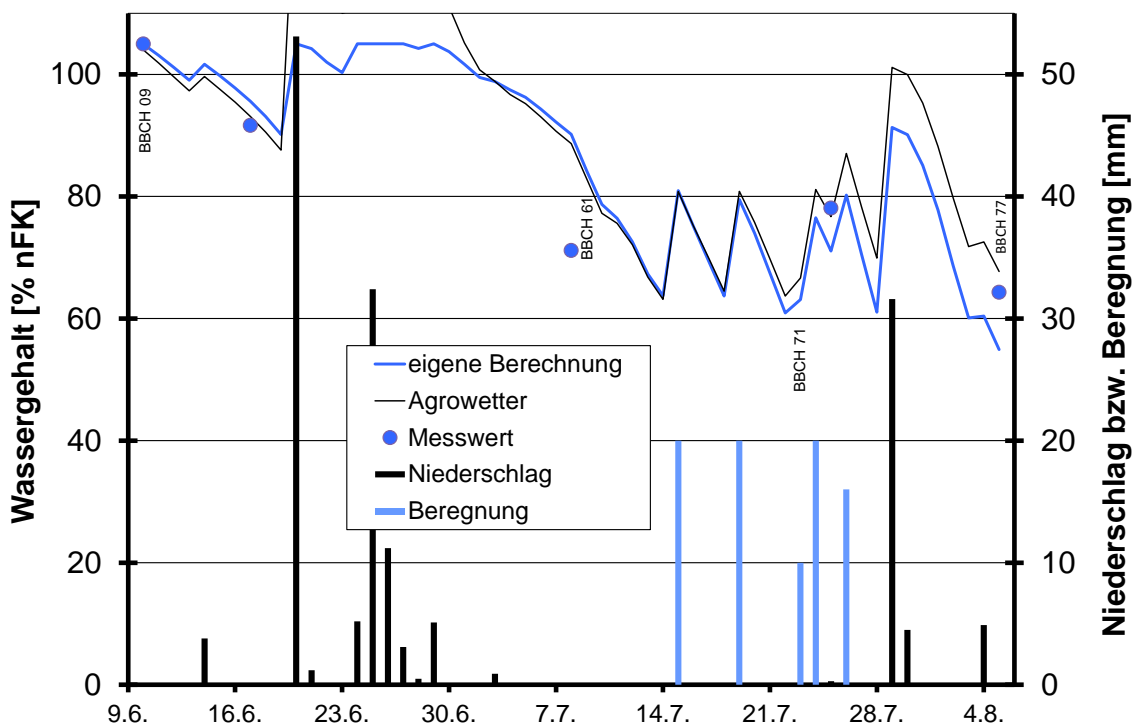


Abbildung 75: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times k_{cFAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013a]

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' auf Basis der ET_0 -Werte eine ET_c von 204,6 mm. 'Agrowetter' berechnete mit 189,4 mm eine etwas geringere Evapotranspiration. Die von den beiden Modellen berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' verliefen zu-

nächst, mit Ausnahme der unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsperiode, sehr ähnlich (Abbildung 75). Mit der 2. Wassergabe setzte dann aber eine leichte Differenzierung ein.

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt von beiden Modellen kurz vor Blühbeginn deutlich überschätzt, in der Reifephase bzw. zur Ernte stimmten Modell und Realität recht gut überein.

Berechnet man mit dem 'Geisenheimer' Modell die ET_c auf Basis der PENMAN-Verdunstungswerte (ET_{pPEN}), so kommt man auf eine Verdunstung von 202,5 mm (Tabelle 28a). Theoretisch wäre hier eine Bewässerung von ca. 92 mm notwendig gewesen (Abbildung 76).

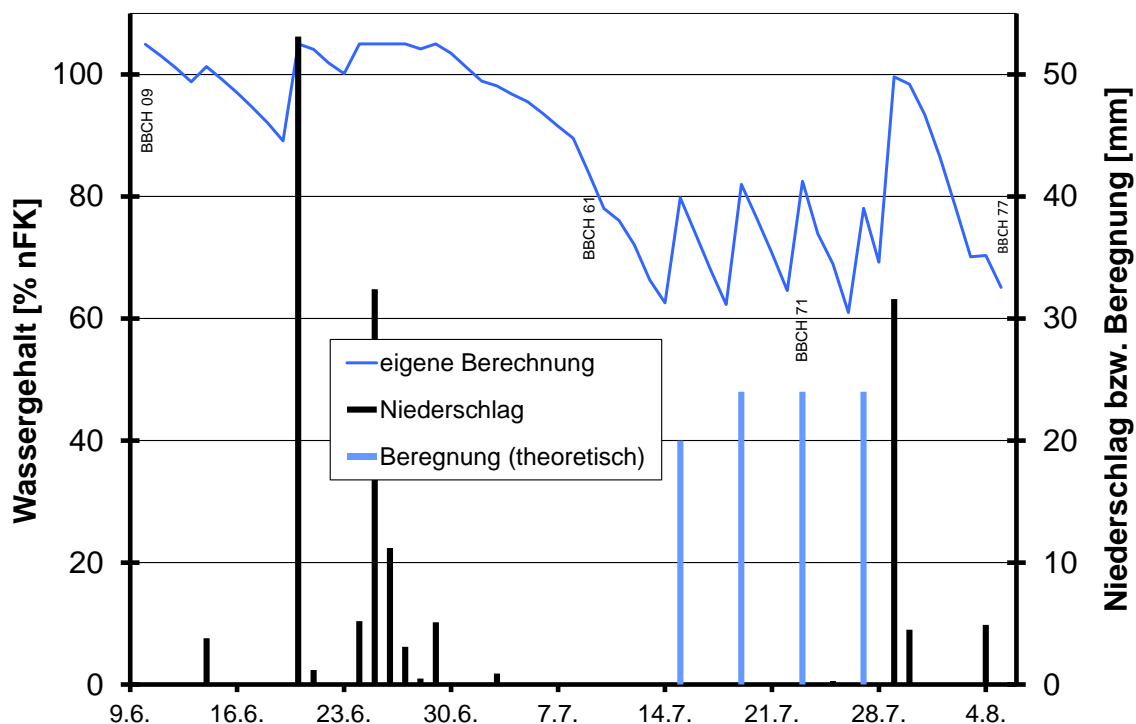


Abbildung 76: Niederschlags- und Beregnungsmengen (theoretisch) und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ [Bohnenversuch 2013a]

Für die Variante 'SVAT' berechnete 'Agrowetter' Bodenwassergehalte von kurzzeitig unter 60 % nFK (Abbildung 77). In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach dem Modell bis auf 20 % nFK aus; tatsächlich dürfte der Wert aber bei rund 30 % nFK gelegen haben, weil die einige Tage vorher gezogene Bodenprobe eine Unterschätzung des Bodenwassergehaltes von rund 12 Vol.-% andeutete.

Wie schon in den Vorversuchen zeigten die Bohnen trotz der offensichtlich massiven Austrocknung des Bodens auch in der 'Kontrolle' keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Bei der Ernte wurden aber wiederum signifikante Beregnungseffekte deutlich. (Bei allen Parametern wurden auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.) So wurde der Frischmasseertrag durch die Beregnung im Mittel um 58 dt/ha bzw. um 72 % gesteigert, wobei zwischen den Beregnungsvarianten 'Intensiv' (86 mm) und 'SVAT' (74 mm) kein Unterschied zu verzeichnen war (Abbildung 78). In der Variante 'SVAT' wurde je mm Wassergabe ein Mehrertrag von 81 kg/ha realisiert, während dieser in der Variante 'Intensiv' mit der um 12 mm höheren Bewässerungsgabe nur 64 kg/ha je mm betrug.

Die Sorten 'Stanley', 'Caprika' und 'Konza' reagierten gleichartig positiv auf die Bewässerungsgaben, bei 'Bomont' fiel die 'Intensiv'-Variante gegenüber der 'SVAT'-Variante (auch bei Einzelauswertung allerdings nicht signifikant) ab. Insgesamt konnte aber wiederum keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte festgestellt werden.

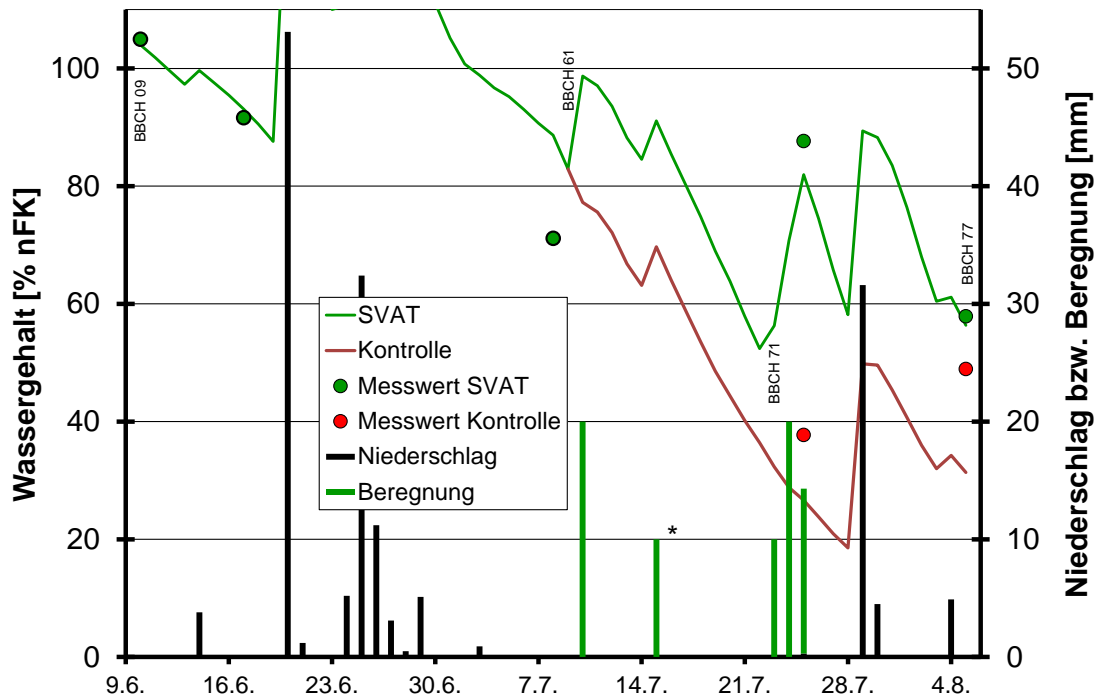


Abbildung 77: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 10 mm Beregnung auch in der 'Kontrolle') [Bohnenversuch 2013a]

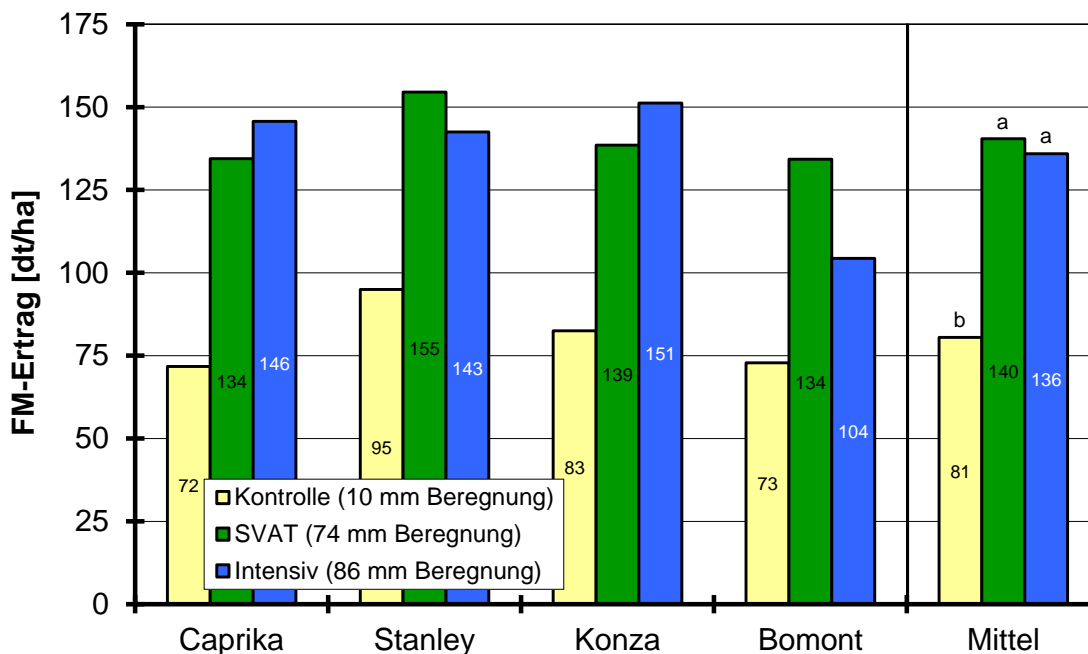


Abbildung 78: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 30,3 dt/ha) [Bohnenversuch 2013a]

Der Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen (ein Kriterium für die [Über]Reife von Buschbohnen) fiel in der unberegneten 'Kontrolle' mit 13,7 % deutlich höher aus als in den beregneten Varianten (Abbildung 79).

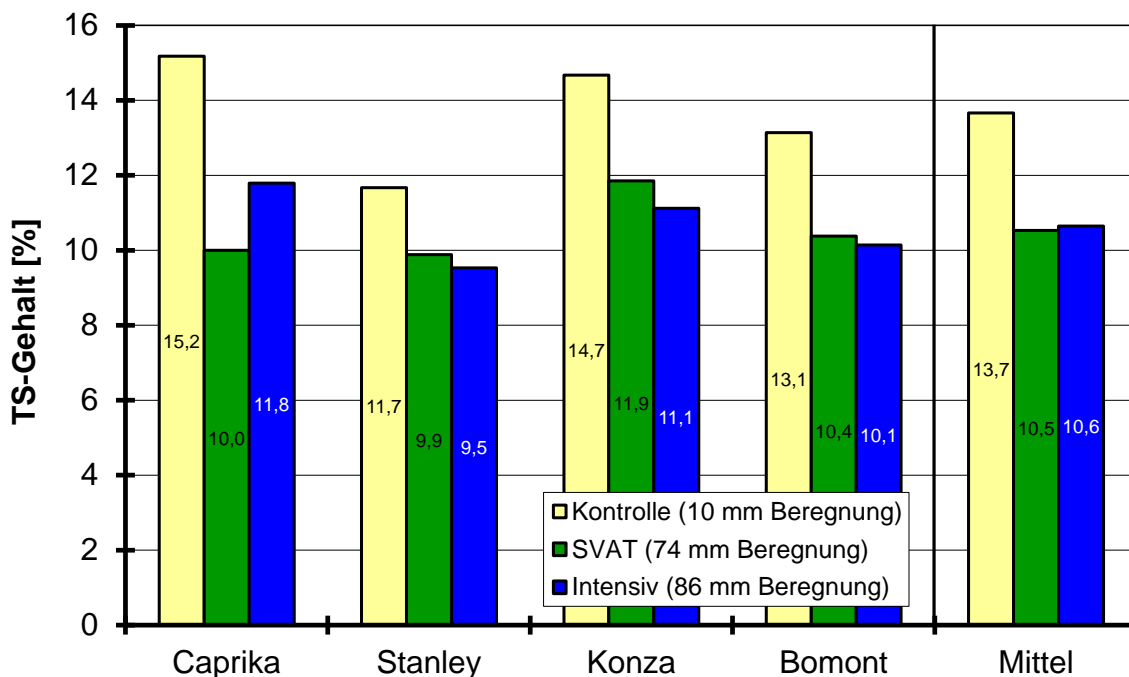


Abbildung 79: Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mischproben über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2013a]

Wie zu erwarten, wurde auch der gesamte Aufwuchs durch die Beregnung beeinflusst (Abbildung 80). Auch war hier keine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte zu verzeichnen. Mit maximal knapp 250 dt/ha wurde nur rund die Hälfte des Frischmasse-Aufwuchses wie im Vorjahresversuch erreicht.

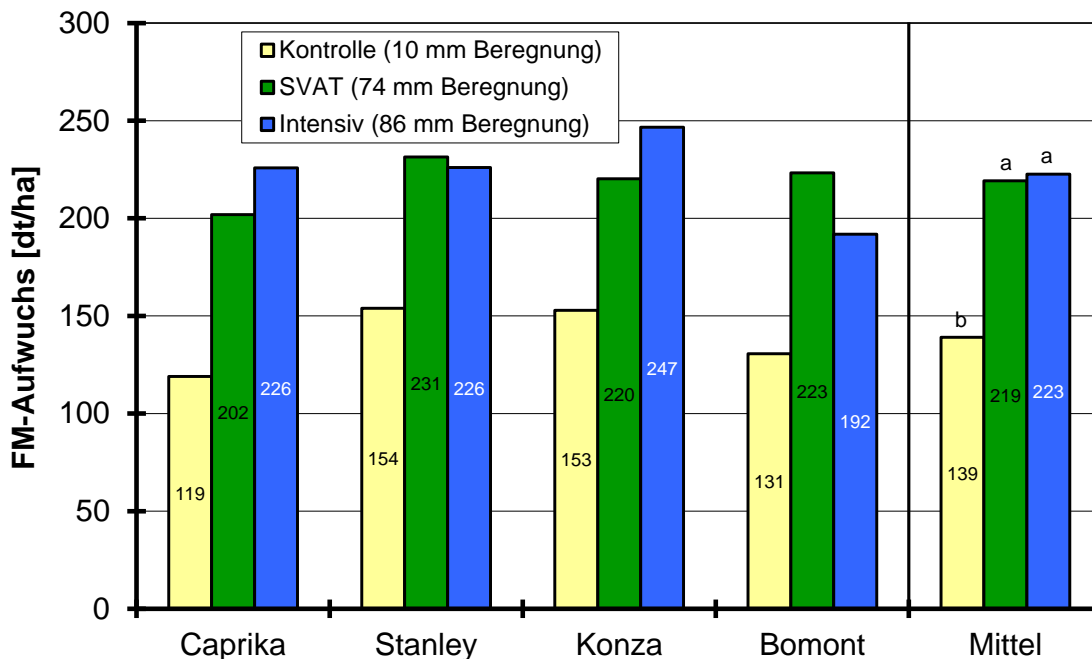


Abbildung 80: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 39,6 dt/ha) [Bohnenversuch 2013a]

Entsprechend der geringen vegetativen Entwicklung fiel der frischmassebezogene Ernteindex mit rund 60 % sehr hoch aus. Tendenziell lag er in der 'SVAT'-Variante am höchsten (Abbildung 81).

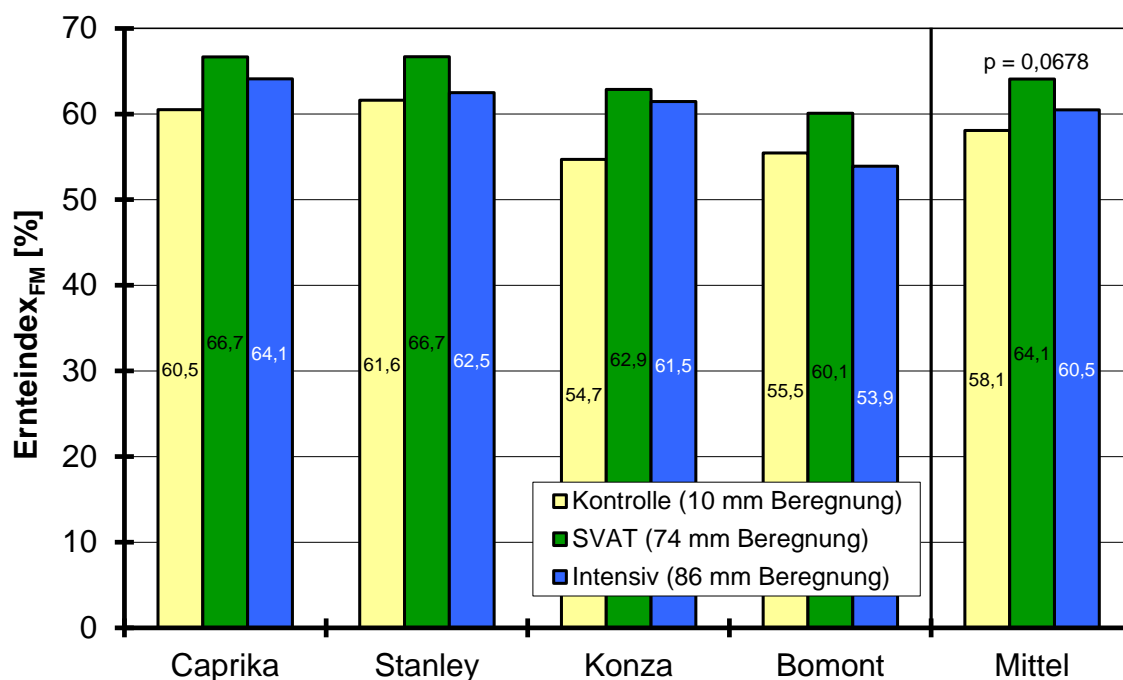


Abbildung 81: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2013a]

Tabelle 27: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2013a]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
6. März ³⁾		alle	27,1	28,6	29,1			
Mittel ⁴⁾		alle	27,2	28,2	28,7	100	100	100
10. Juni ⁵⁾	12	alle	29,2	27,8	27,7	111	97	93
17. Juni		alle	25,1	27,8		88	97	
8. Juli		alle	23,1	23,6		76	65	
25. Juli		Kontrolle	16,1	20,3		35	41	
		SVAT	26,6	25,0		97	76	
		Intensiv	23,9	24,9		81	75	
5. Aug.	77	Kontrolle	18,8	21,1		51	46	
		SVAT	19,8	22,8		57	59	
		Intensiv	20,4	24,2		60	69	

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

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 9,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,9 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)

3) aktuelle Bestimmung der FK

4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)

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

Tabelle 28a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013a]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]				
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾ [mm]	ET _{pPEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × wfak ⁶⁾) × kc _{PEN}		
				ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{pPEN} × kc _P	Intensiv	SVAT	Kontrolle
09-61	111,9	155,5	1,39	44,8	46,7	43,2		
61-71	60,9	83,8	1,37	67,0	67,0	62,5	61,9	57,1
71-77	66,3	88,8	1,35	92,8	88,8	83,7	81,9	45,8
09-77	239,1	328,1	1,37	204,6	202,5	189,4	187,0	146,1

Tabelle 28b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013a]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]			Versickerung [mm] ⁷⁾				
		Intensiv	SVAT	Kontrolle	Geisenheim Intensiv		Agrowetter (ET ₀ × wfak) × kc _{PEN}		
					ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{pPEN} × kc _P	Intensiv	SVAT	Kontrolle
09-61	116,6	0			85,4	84,1	87,2		
61-71	0,1	40	30	10 ⁸⁾	0,0	0,0	0,1	0,9	0,1
71-77	41,3	46	44	0	0,0	0,0			
09-77	158,0	86	74	10	85,4	84,1	87,3	88,1	87,3

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle 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
- 8) Sicherstellung einer einheitlichen N-Versorgung aller Varianten durch die am 12. Juli verabreichte N-Düngung

3.3.5 Versuchsjahr 2013, Spätsommersatz

Nach einem Winter mit ausreichenden Niederschlägen (191 mm Niederschlag vom 1. November bis 5. März) wurde am 6. März, zwei Tage nach dem Schmelzen des letzten Schnees, die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde als Mittel der mittlerweile vorliegenden 4 Untersuchungen eine FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,9 Vol.-% (30-60 cm), im Mittel 27,6 Vol.-% errechnet (Tabelle 29).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 34 Vol.-% (Ls2) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%) mit 14,4 Vol.-% bzw. 14,8 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 13,0 Vol.-% errechnet.

Zum Auflauftermin (10. Juli) wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 85,6 % nFK (0-30 cm: 88,1 %) ermittelt. Bis Ende Juli fielen dann keine nennenswerten Niederschlagsmengen, sodass in der Variante 'Intensiv' zwei Bewässerungsgaben à 10 mm gegeben werden mussten (Abbildung 82). Bis Blühbeginn fielen insgesamt 50,4 mm Niederschlag, gleichzeitig bestand mit einer ET₀ von 133,7 mm (durchschnittlich 4,5 mm/d, vgl. Abbildung 83) aber auch ein relativ hoher Verdunstungsanspruch. Auf Grund des geringen kc-Wertes von 0,4 für diese Wachstumsphase errechnete sich aber nur eine ET_c von 53,5 mm. Für das Niederschlagsereignis am 29. Juli wurde eine Sickerwasserbildung (unterhalb 60 cm, vgl. Abbildung 84) von 4,2 mm errechnet. 'Agrowetter' kommt mit einer ET_c von 51,1 mm und einer Sickerwasserbildung von 9,1 mm zu vergleichbaren Ergebnissen (Tabelle 30a u. b).

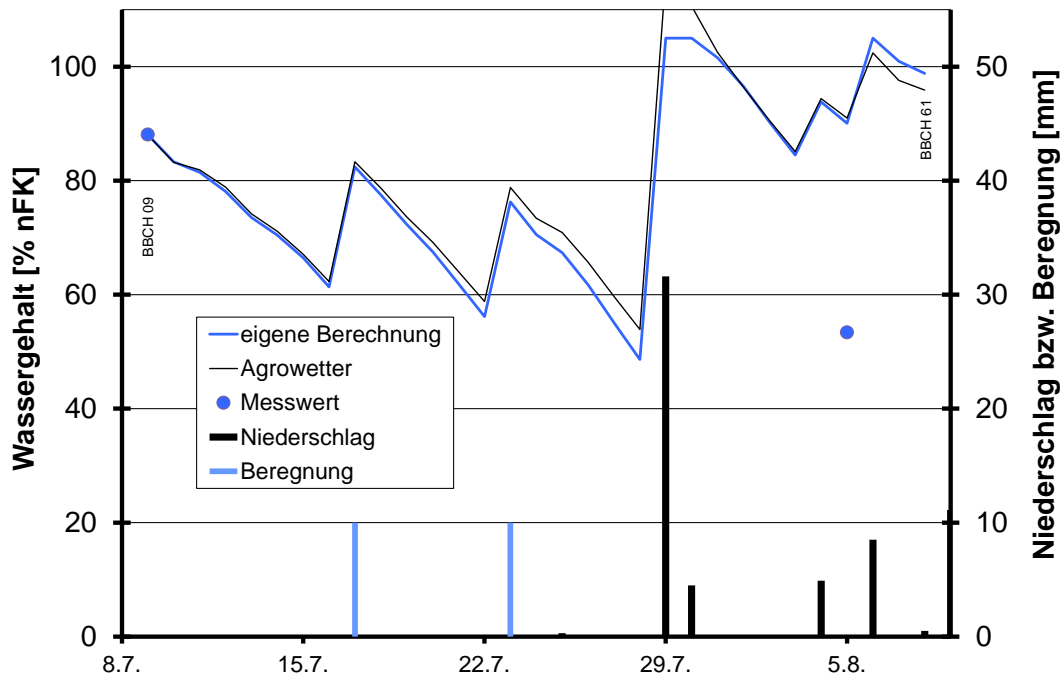


Abbildung 82: Niederschlags- bzw. Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]

Zu Blühbeginn (BBCH 61) errechnete sich aufgrund des hohen (berechneten) Bodenwassergehaltes eine weitere Sickerwasserbildung von 7,2 mm. Danach herrschten bis zur Ernte trockenere Witterungsbedingungen vor. Bei einer durchschnittlichen ET_0 von 3,1 mm/d (Σ 97,8 mm), nur 43,7 mm Niederschlag (davon 20,4 mm am Vortag der letzten Ernte) und steigenden kc -Werten war in der Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' in diesen Phasen eine Bewässerung von 56 mm notwendig (Abbildung 84). In der Variante 'SVAT' wurden entsprechend der Vorgaben 30 mm Zusatzwasser gegeben (vgl. Abbildung 85).

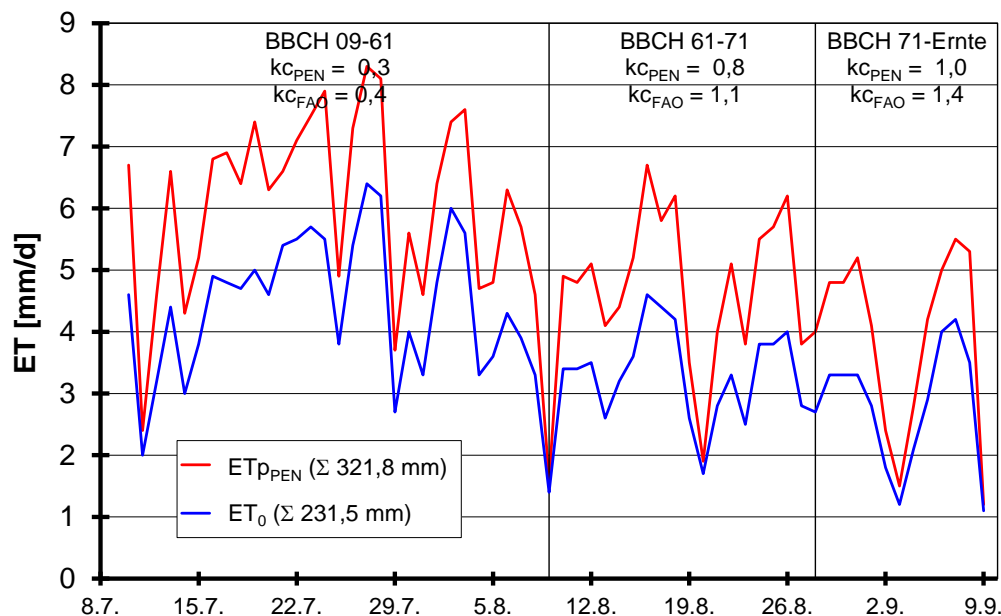


Abbildung 83: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2013b]

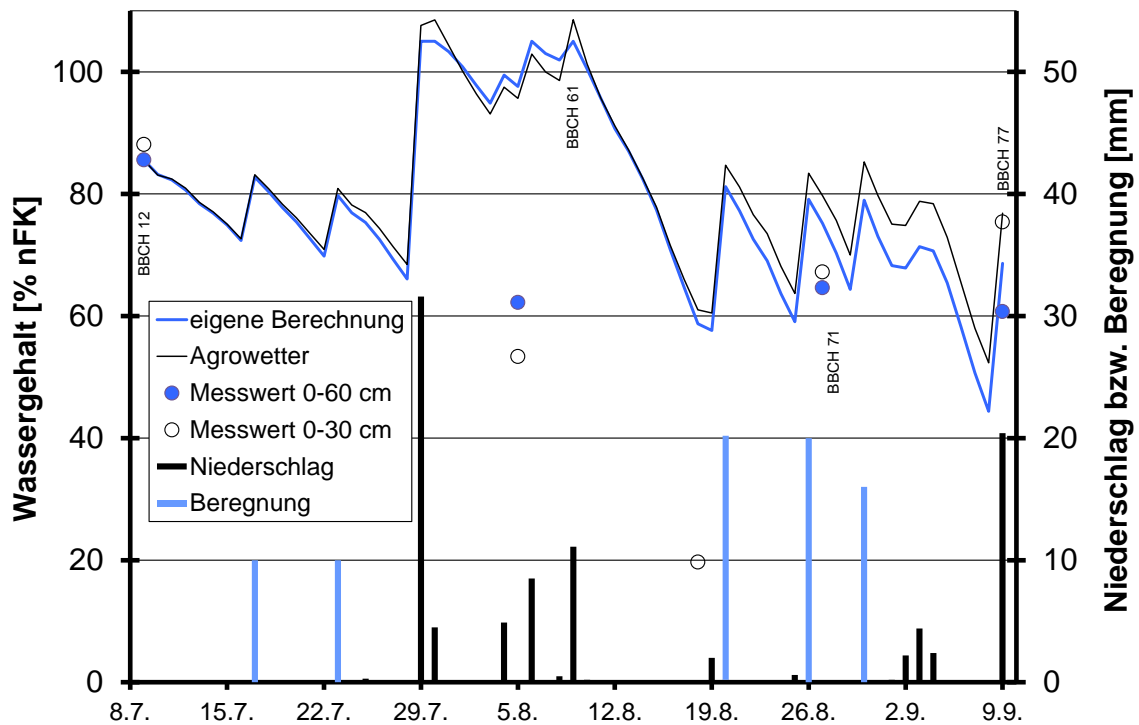


Abbildung 84: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' auf Basis der ET_0 -Werte eine ET_c von 171,9 mm. 'Agrowetter' berechnete mit 162,7 mm eine etwas geringere Evapotranspiration, sodass die von den beiden Modellen berechneten Bodenfeuchtegehalte in der zweiten Kulturhälfte etwas auseinanderliefen.

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt von beiden Modellen kurz vor Blühbeginn (BBCH 61) deutlich überschätzt. Bei einer Beprobung am 19. August wurde in der oberen Bodenschicht sogar nur ein Bodenwassergehalt von 20 % nFK ermittelt (leider liegt für diesen Termin aufgrund eines Fehlers kein Wert für die Schicht 30-60 cm vor). Kurz vor Erreichen des Stadiums BBCH 71 und zur Ernte wurde der Bodenwassergehalt von den Modellen nur noch leicht ('Geisenheim') bzw. mäßig ('Agrowetter') überschätzt.

Berechnet man mit dem 'Geisenheimer Modell' die ET_c auf Basis der PENMAN-Verdunstungswerte, so kommt man auf eine Verdunstung von 176,3 mm (Tabelle 30a).

Für die Variante 'SVAT' berechnete 'Agrowetter' über längere Phasen Bodenwassergehalte von zum Teil deutlich unter 60 % nFK (Abbildung 85). In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach dem Modell bis auf 20 % nFK aus, was mit dem Ergebnis der Bodenwasserprobe vom 27. August korrespondiert.

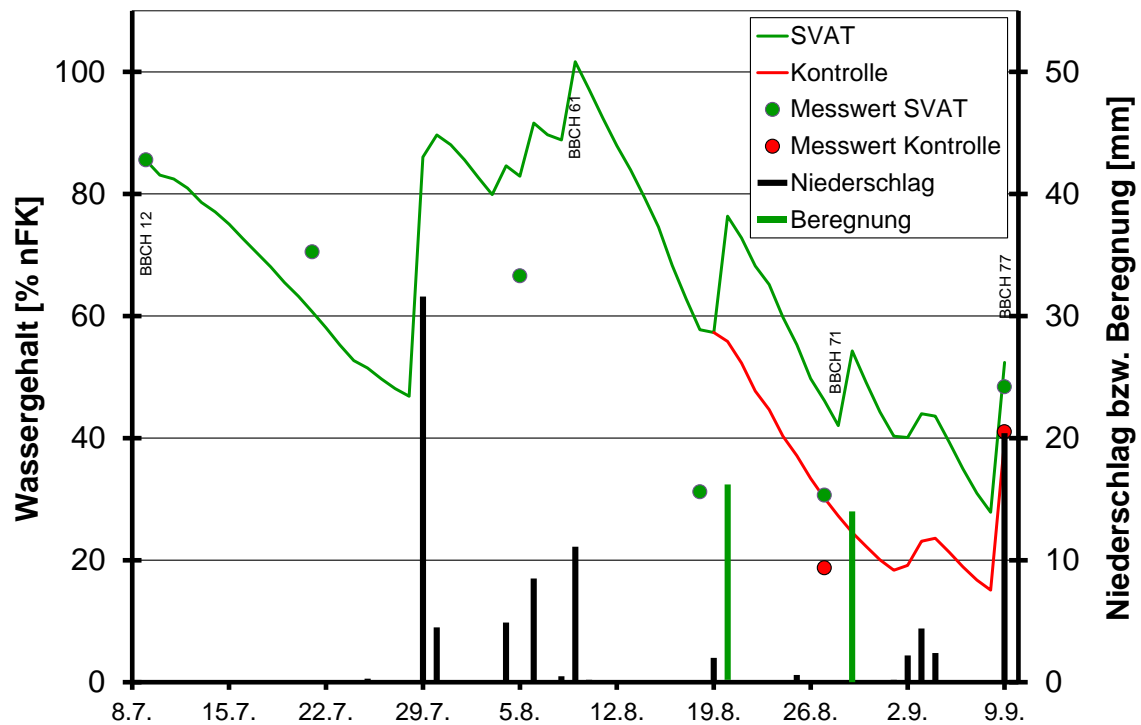


Abbildung 85: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2013b]

Wie schon in den Vorversuchen zeigten die Bohnen trotz der offensichtlich massiven Austrocknung des Bodens auch in der 'Kontrolle' keine auffälligen Trockenstresssymptome.

Bei der Ernte wurden wiederum signifikante Beregnungseffekte deutlich. (Bei allen Parametern wurden auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.) Der Frischmasseertrag wurde, bei hohem Ertragsniveau, durch die Beregnung zwar signifikant, mit 18 bzw. 36 dt/ha aber nur vergleichsweise gering gesteigert (Abbildung 86). Damit lag der Mehrertrag je mm Wassergabe bei 62 (SVAT) bzw. nur 48 kg/ha. Die Sorten reagierten weitestgehend gleichartig auf die Bewässerungsgaben, eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte konnte wiederum nicht abgesichert werden ($p = 0,16$).

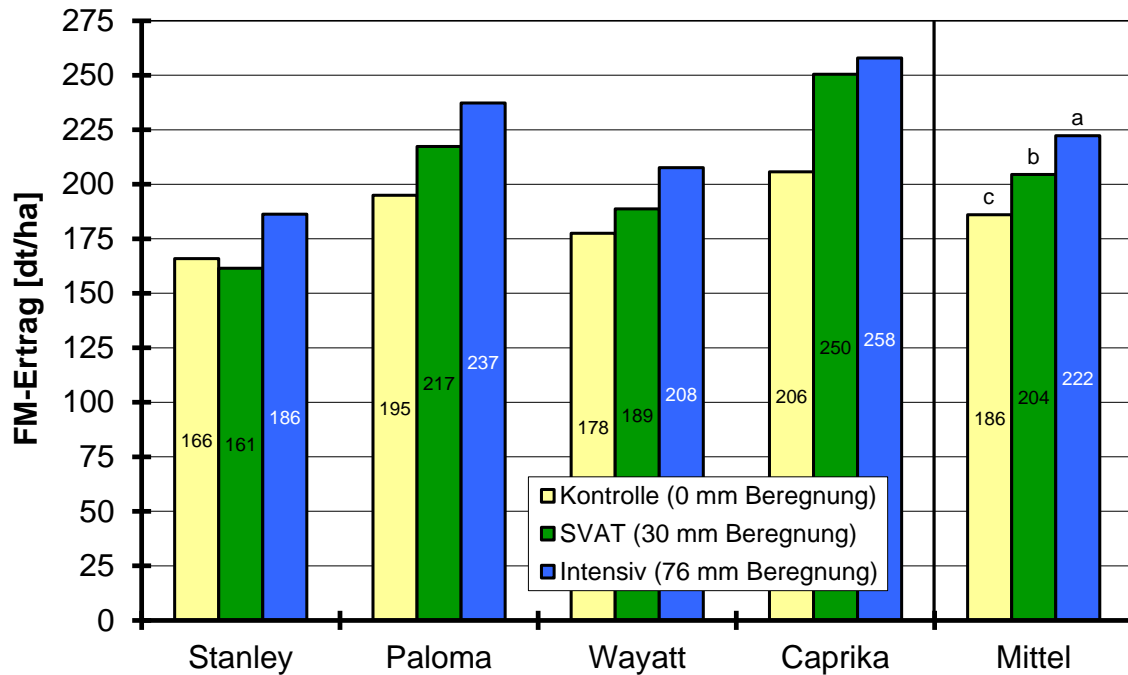


Abbildung 86: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 13,1 dt/ha) [**Bohnenversuch 2013b**]

‘Stanley’ wies mit durchschnittlich 8,3 % den geringsten Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen auf, sodass hier eine im Vergleich zu den anderen Sorten (10,0-10,4 %) etwas zu frühe Ernte zu konstatieren ist, was auch das im Vergleich zu den anderen Sorte relativ geringe Ertragsniveau erklärt. Die Beregnung hatte einen deutlichen Effekt auf den TS-Gehalt, eine Wechselwirkung zur Sorte bestand nicht (Abbildung 87).

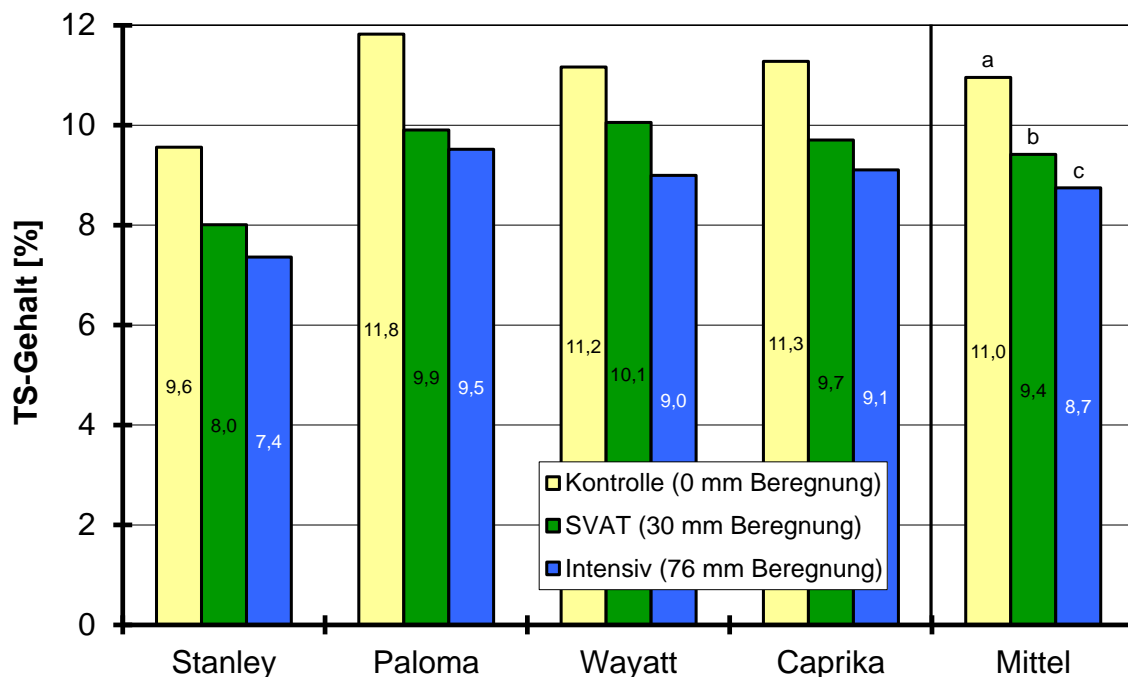


Abbildung 87: Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 0,7 %) [**Bohnenversuch 2013b**]

Wie zu erwarten, wurde auch der gesamte Frischmasse-Aufwuchs durch die Beregnung beeinflusst (Abbildung 88).

Beim Ernteindex zeigte sich eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte, weil bei 'Stanley' und 'Wayatt' der Ernteindex durch die Beregnung vermindert, während bei 'Caprika' und 'Paloma' keine Beeinflussung gefunden wurde (Abbildung 89).

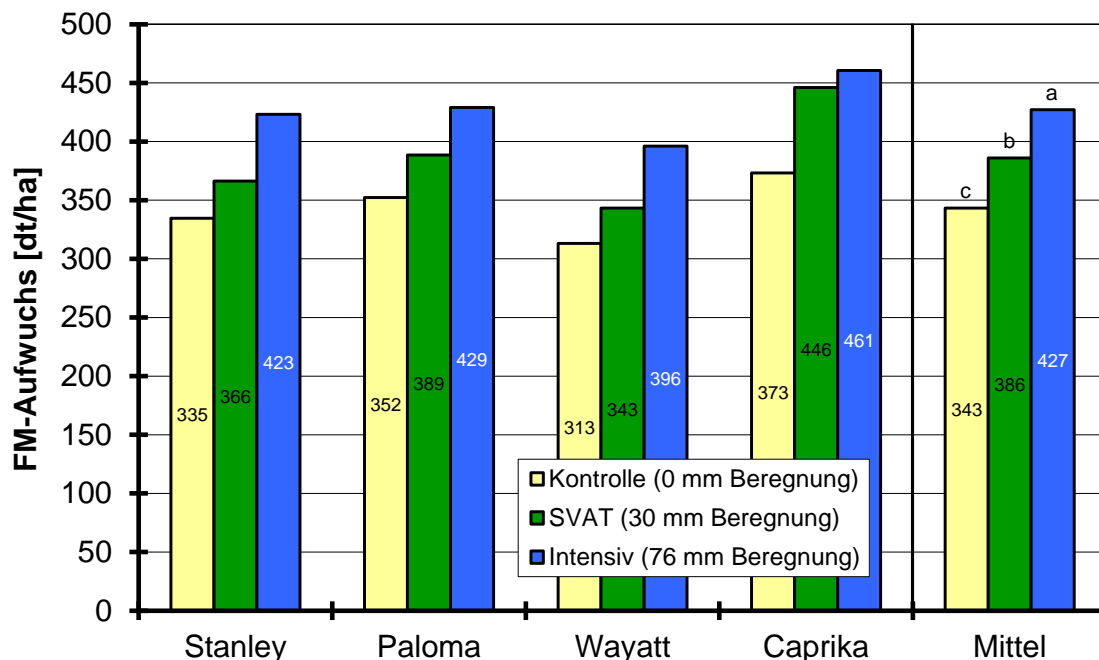


Abbildung 88: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 28,8 dt/ha) [Bohnenversuch 2013b]

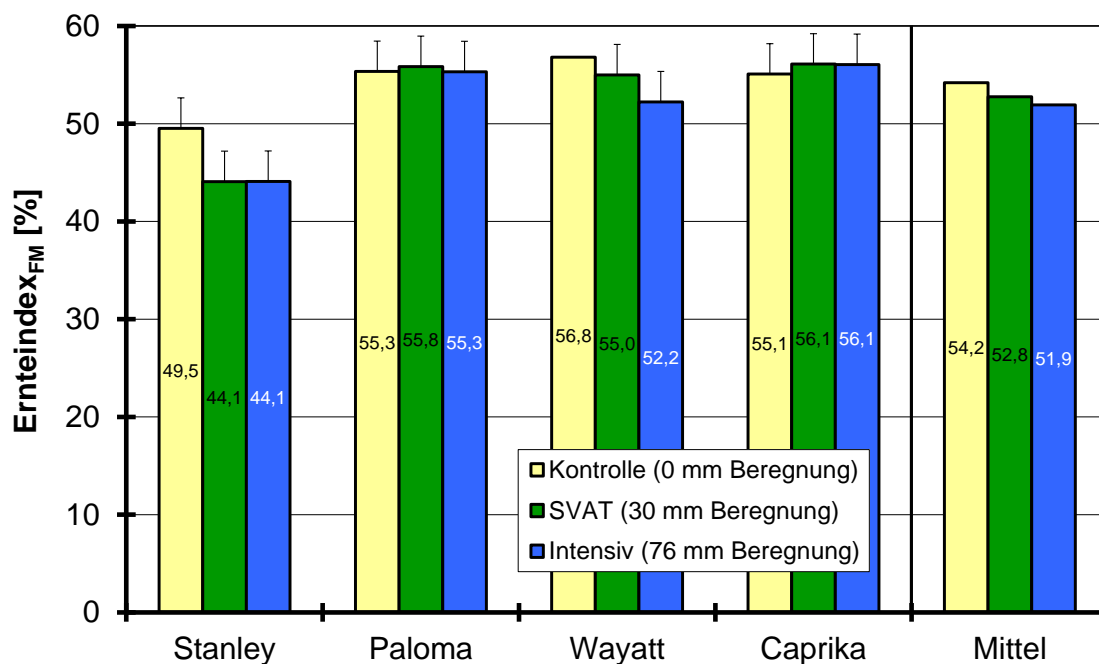


Abbildung 89: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung x Sorte: 3,1 % = I) [Bohnenversuch 2013b]

Beim Trockenmasse-Aufwuchs war auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ kein Beregnungseffekt abzusichern, tendenziell zeigte sich aber auch hier, wie beim Frischmasse-Aufwuchs, eine Zunahme mit steigender Bewässerung (Abbildung 90).

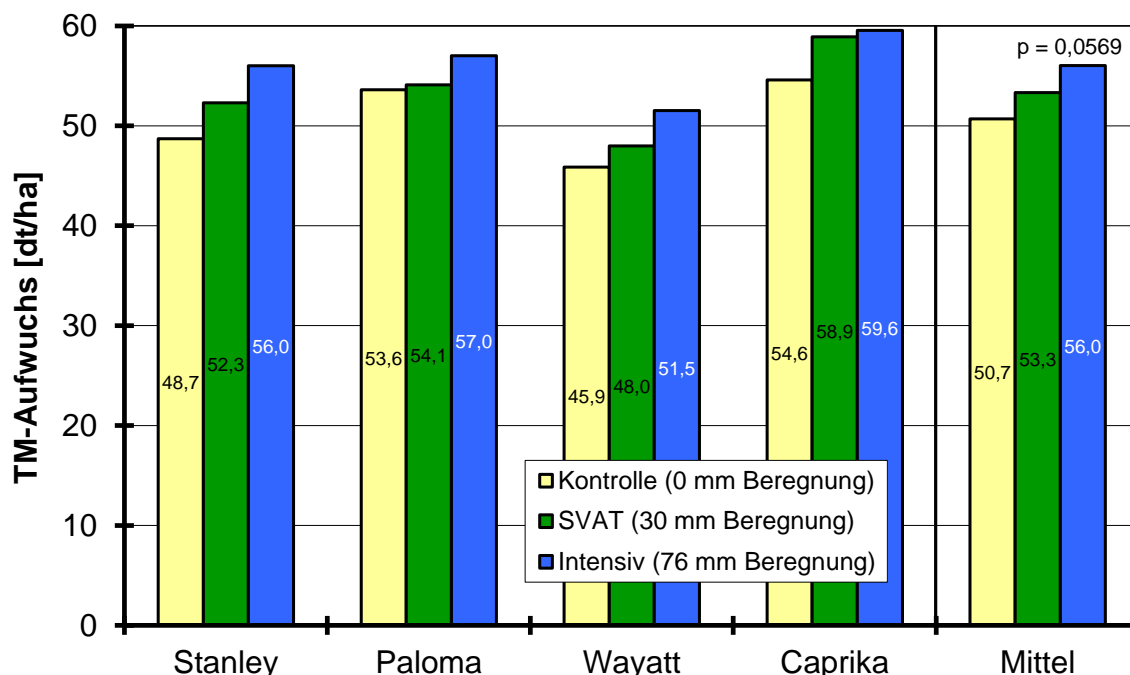


Abbildung 90: Trockenmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 4,2 dt/ha) [Bohnenversuch 2013b]

Tabelle 29: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2013b]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
6. März ³⁾		alle	27,5	27,2	29,3			
Mittel ⁴⁾		alle	27,2	27,9	28,8	100	100	100
9. Juli ⁵⁾	09	alle	25,7	25,7	26,3	88	83	83
21. Juli		Kontrolle/SVAT	23,1	24,3		68	73	
5. Aug.		Kontrolle/SVAT	20,8	25,7		50	83	
		Intensiv	21,2	24,1		53	71	
18. Aug.		Kontrolle/SVAT	17,7	19,6		26	37	
		Intensiv	16,9	- ⁶⁾		20	- ⁶⁾	
27. Aug.	≈71	Kontrolle	16,6	17,4		17	20	
		SVAT	17,4	19,8		23	38	
		Intensiv	23,0	22,9		67	62	
9. Sept.	Ernte	Kontrolle	21,4	18,4	23,0	55	28	60
		SVAT	22,6	19,1	23,7	64	33	64
		Intensiv	24,1	20,9	25,2	75	46	75

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

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 9,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,9 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)

3) aktuelle Bestimmung der FK

4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)

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

6) nicht nachvollziehbarer Fehler bei der Datenerfassung

Tabelle 30a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013b]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]				
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾ [mm]	ET _{pPEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ETC ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN}		
				ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{pPEN} × kc _P	Intensiv	SVAT	Kontrolle
09-61	133,7	182,7	1,37	53,5	54,8	51,1	47,9	
61-71	61,6	88,3	1,42	67,8	70,6	63,9	63,6	60,0
71-Ernte	36,2	50,8	1,38	50,7	50,8	47,7	38,6	22,2
09-Ernte	231,5	321,8	1,39	171,9	176,3	162,7	150,1	130,1

Tabelle 30b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2013b]

Phase BBCH	Nieder-schlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾				
		Intensiv	SVAT	Geisenheim Intensiv		Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN}		
				ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{pPEN} × kc _P	Intensiv	SVAT	Kontrolle
09-61	50,4	20	0	4,2	3,1	9,1	0,0	
61-71	14,1	40	16	7,2	7,2	5,1	0,0	
71-77	29,6 ⁸⁾	16	14	0,0		0,0	0,0	
09-77	94,1 ⁸⁾	76	30	11,4	10,3	14,2	0,0	

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-60 cm
- 8) davon 20,4 mm am 9. September

3.3.6 Versuchsjahr 2014

Aufgrund ausbleibender ergiebiger Niederschläge ausgangs des Winters (Monatssummen Januar bis April max. 17,2 mm) konnte die FK der Versuchsfläche nicht aktuell bestimmt werden. Daher konnte der mittlere Wert der vorliegenden 4 Untersuchungen aus den Jahren 2010-2013 mit einer FK von 27,3 Vol.-% (0-30 cm und 30-60 cm) nicht um eine aktuelle Messung erweitert werden (Tabelle 31).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 30 Vol.-% (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) bzw. 33 Vol.-% (LS3) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%, LS3: 17 Vol.-%) mit 10,9 Vol.-% und 14,0 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 14,8 Vol.-% errechnet.

Kurz vor dem Auflauf der Bohnen fielen am 24. Mai 31 mm Niederschlag, sodass zum Auflauftermin (26. Mai) ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 85,0 % nFK (0-30 cm: 99,0 %) ermittelt wurde. Weitere Niederschläge nach dem Auflaufen füllten den Boden rechnerisch auf FK (und darüber hinaus) auf (Abbildung 91 u. Abbildung 93). Bis Ende Juni fielen dann keine nennenswerten Niederschlagsmengen, sodass in der Variante 'Intensiv' zwei Bewässerungsgaben mit 10 bzw. 12 mm gegeben werden mussten (Abbildung 91). Am 25. Juni wurden versehentlich weitere 8 mm verabreicht, nachfolgende Niederschläge von 14 mm füllten den Boden dann rechnerisch wieder auf FK auf.

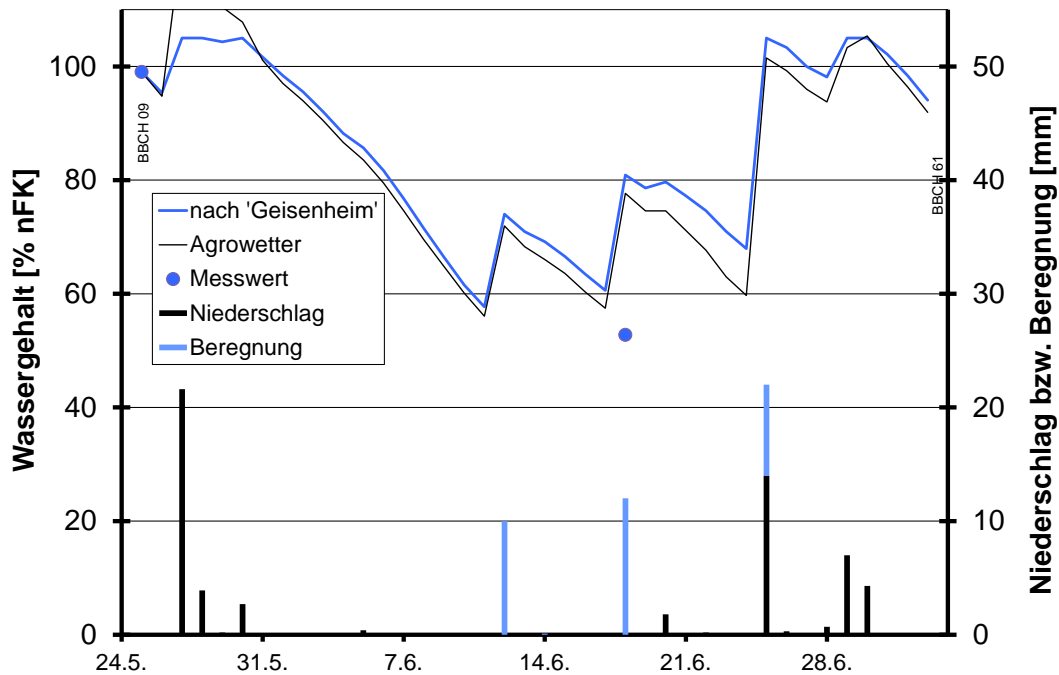


Abbildung 91: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis Blühbeginn auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2014]

Bis Blühbeginn fielen insgesamt 57,2 mm Niederschlag, gleichzeitig bestand mit einer ET_0 von 149,7 mm (durchschnittlich 3,8 mm/d, vgl. Abbildung 92) aber auch ein relativ hoher Verdunstungsanspruch. Auf Grund des geringen kc -Wertes von 0,4 für diese Wachstumsphase errechnete sich aber nur eine ET_c von 59,9 mm. Die Sickerwasserbildung (unterhalb 60 cm, vgl. Abbildung 93) wurde auf 15,0 mm geschätzt. 'Agrowetter' kommt mit einer ET_c von 65,4 mm zu einem geringfügig höheren Wert, entsprechend fällt die Sickerwasserbildung mit 12,0 mm etwas geringer aus (Abbildung 91 u. Abbildung 93, Tabelle 32a u. b).

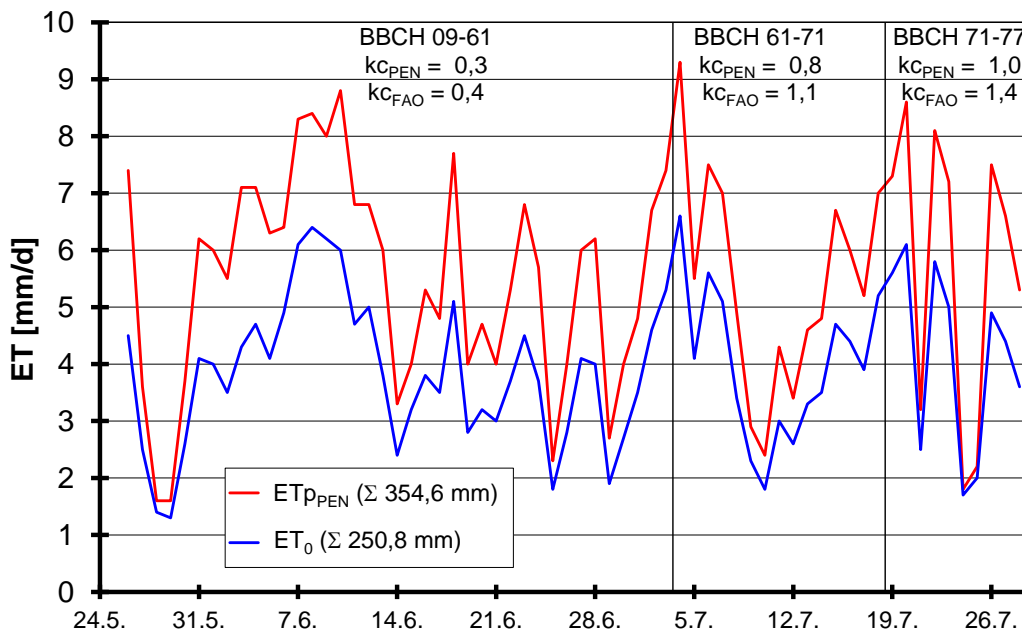


Abbildung 92: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Bohnenversuch 2014]

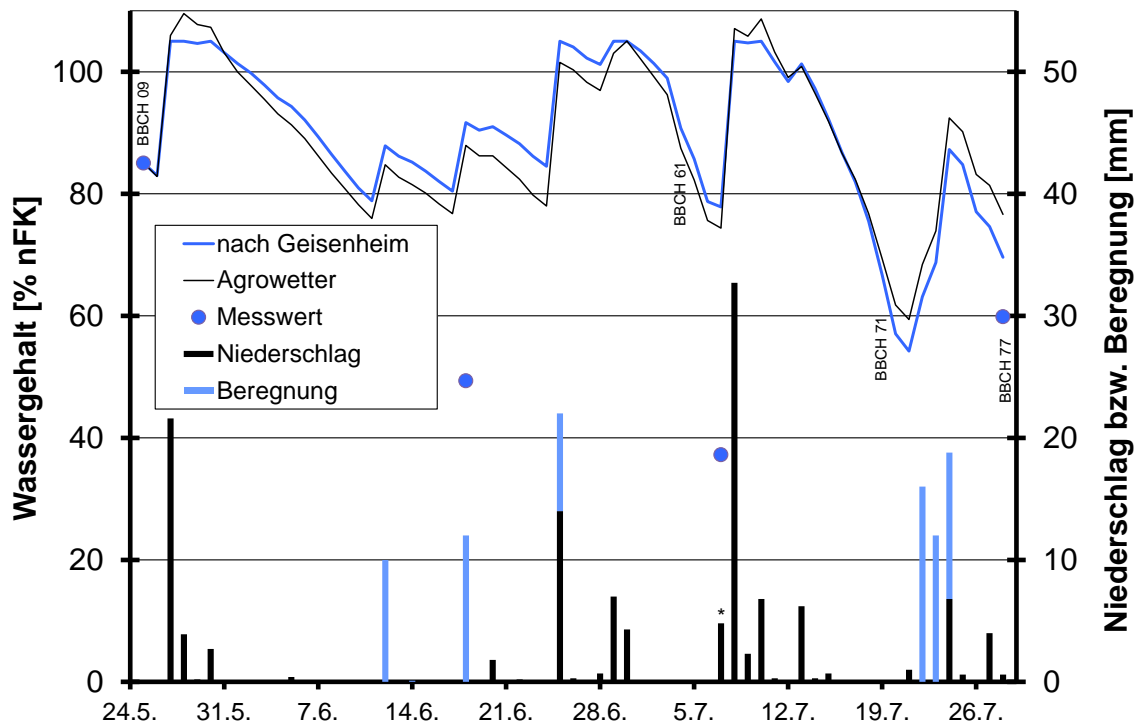


Abbildung 93: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: die Niederschläge in Höhe von 4,8 mm fielen tatsächlich am 08.07. zwischen 02:00 und 03:00 Uhr. Sie wurden hier auf den 07.07. datiert, weil die am Morgen des 08.07. durchgeführte Bodenbeprobung den Wassergehalt am Ende des Vortages wiedergeben soll) [Bohnenversuch 2014]

Bezogen auf die Schicht 0-60 cm (ab BBCH 61 maßgeblich für die Beregnungsbemessung) fiel der Bodenwassergehalt rechnerisch erstmals am 20. Juli (ca. BBCH 71) unter 60 % nFK ab (Abbildung 93). Daraufhin wurden um den 23. Juli insgesamt 40 mm beregnet, sodass die 'Intensiv'-Variante in der Summe eine Zusatzwassergabe von 70 mm erhielt.

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' auf Basis der ET_0 -Werte eine ET_c von 183,6 mm. 'Agrowetter' kam mit 183,1 mm zu einer nahezu identischen Evapotranspiration, sodass die von den beiden Modellen kalkulierten Bodenfeuchtegehalte sehr ähnlich verliefen. Berechnet man mit dem 'Geisenheimer Modell' die ET_c auf Basis der PENMAN-Verdunstungswerte ($ET_{PEN} \times kc_{PEN}$), so kommt man mit 187,6 mm zu einen geringfügig höheren Wert (Tabelle 32a, o. Abbildung).

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Wassergehalt von beiden Modellen lange Zeit deutlich, zur Ernte hin nur noch leicht ('Geisenheim') bzw. mäßig ('Agrowetter') überschätzt.

Im Gegensatz zu den Vorjahresversuchen erhielt die 'SVAT'-Variante (aufgrund einer Modellüberarbeitung) mit 127 mm deutlich höhere Wassergaben als die 'Intensiv'-Variante (Abbildung 94). 'Agrowetter' berechnete für diese Variante über längere Phasen Bodenwassergehalte um/über 100 % nFK (gemessen wurden deutlich geringere Gehalte), erst zu Kulturende hin wurden kurzzeitig auch Wassergehalte von unter 80 % nFK kalkuliert, was mit dem Ergebnis der Bodenwasserprobe zur Ernte korrespondiert. Für die 'Kontrolle' wurden zwischenzeitlich Bodenwassergehalte unter 60 % nFK berechnet (tatsächlich war es auch hier trockener), die Abnahme zur Ernte hin auf rund 40 % nFK deckt sich nahezu exakt mit der gemessenen Bodenfeuchte.

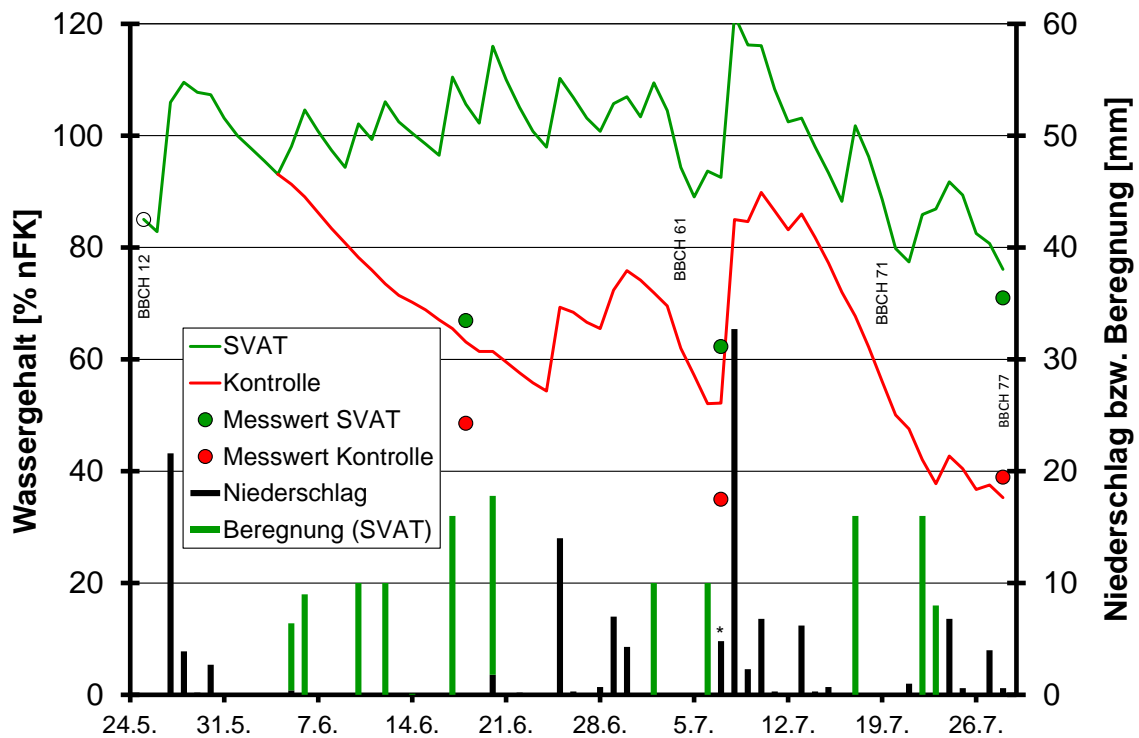


Abbildung 94: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'SVAT' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Bohnenversuch 2014]

Wie schon in den Vorversuchen zeigten die Bohnen wiederum keine auffälligen Trockenstresssymptome. Der Frischmasseertrag wurde, bei hohem Ertragsniveau auch in der 'Kontrolle', durch die Beregnung um 35 ('Intensiv') bzw. 26 dt/ha ('SVAT') nur vergleichsweise gering gesteigert, der Effekt konnte auf dem Niveau $\alpha < 0,05$ nicht abgesichert werden (Abbildung 95). Der Mehrertrag je mm Wassergabe lag bei 50 ('Intensiv') bzw. in der stärker bewässerten 'SWAT'-Variante nur bei 20 kg/ha. Die Sorten reagierten gleichartig auf die Bewässerungsgaben, eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte lag wiederum nicht vor ($p = 0,91$). (Beim Frischmasseertrag, wie auch bei allen anderen unten wiedergegebenen Ertragsparametern, wurden signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.)

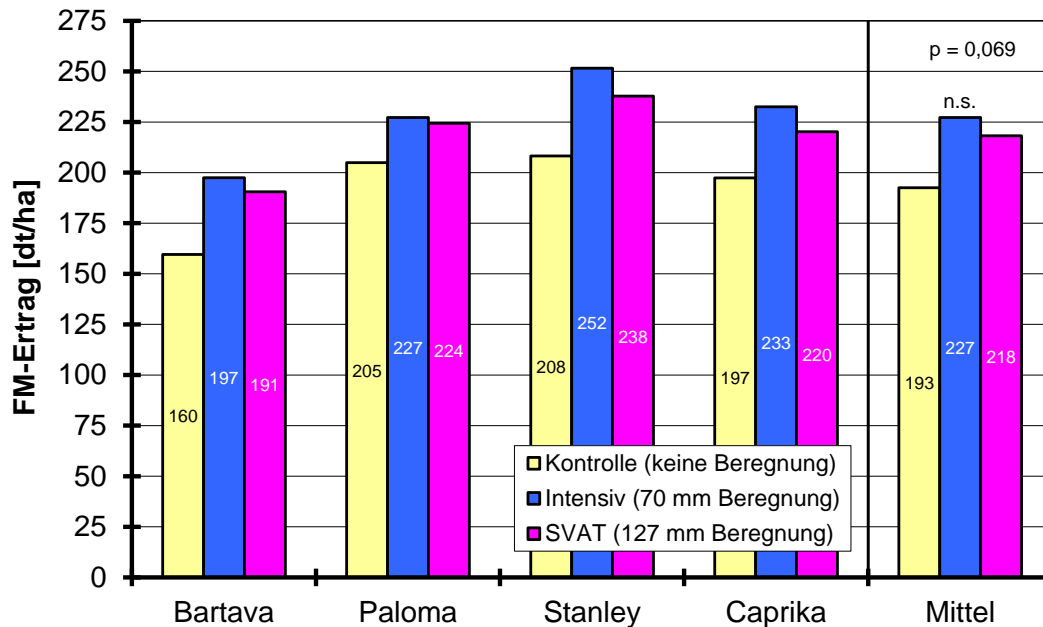


Abbildung 95: Frischmasseertrag in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2014]

‘Bartava’ wies mit durchschnittlich 8,1 % den geringsten Trockensubstanz-Gehalt der Hülsen auf, sodass hier eine etwas zu frühe Ernte zu konstatieren ist, was auch das im Vergleich zu den anderen Sorte relativ geringe Ertragsniveau erklärt (Abbildung 96). ‘Paloma’ war mit durchschnittlich 12,7 % etwas überständig. Die Beregnung hatte einen deutlichen Effekt auf den TS-Gehalt, die sich bezüglich der Sorte ‘Paloma’ andeutende Wechselwirkung zur Sorte war nicht signifikant ($p = 0,14$).

Wie zu erwarten, wurde auch der gesamte Frischmasse-Aufwuchs durch die Beregnung beeinflusst (Abbildung 97).

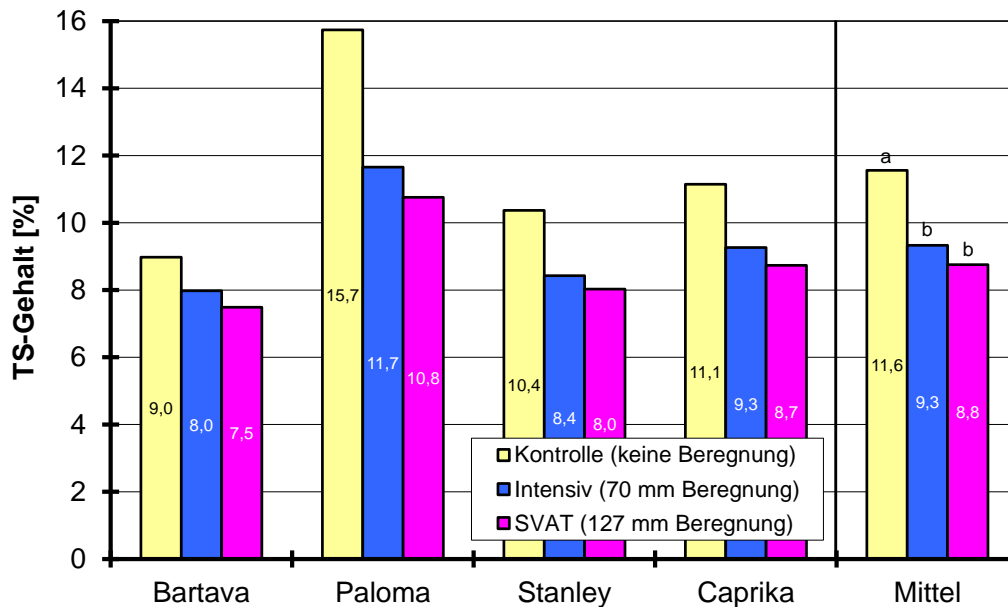


Abbildung 96: Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha < 0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,5 %) [Bohnenversuch 2014]

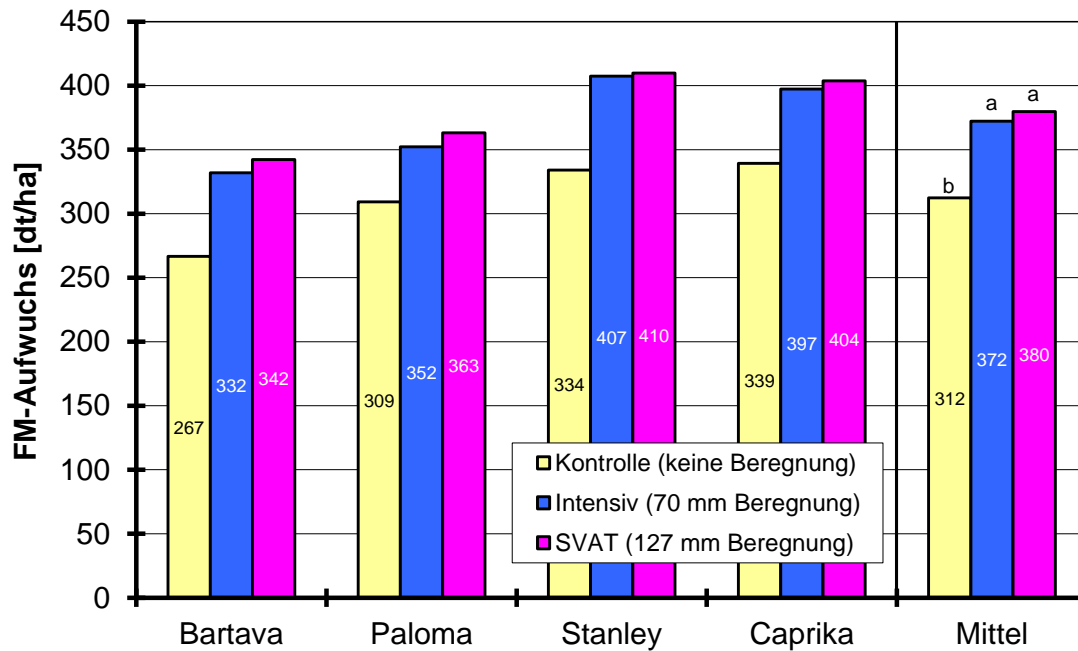


Abbildung 97: Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 46,4 dt/ha) [Bohnenversuch 2014]

Entsprechend dem höchsten Frischmasse-Aufwuchs, aber geringstem Ertrag fiel die 'SVAT'-Variante beim Ernteindex signifikant ab (Abbildung 98). Eine Wechselwirkung Bewässerung × Sorte bestand, im Gegensatz zum Spätsommerversuch 2013, nicht ($p = 0,71$).

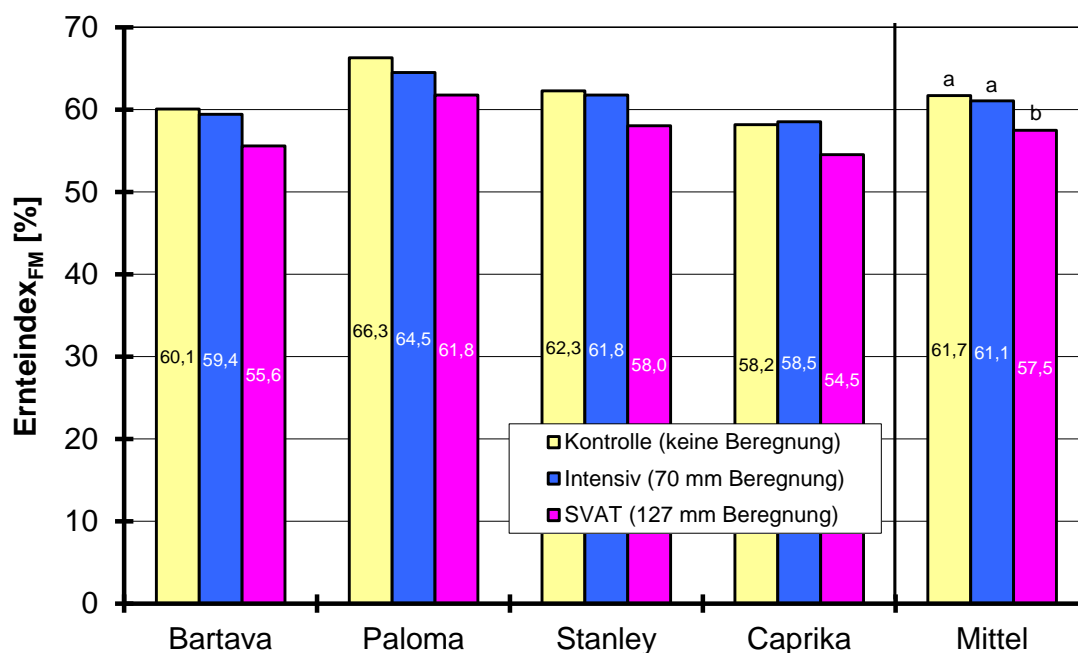


Abbildung 98: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 1,1 %) [Bohnenversuch 2014]

Beim Trockenmasse-Aufwuchs war, im Gegensatz zum Spätsommerversuch 2013, kein Beregnungseffekt zu erkennen, auch eine Wechselwirkung Bewässerung × Sorte bestand nicht (Abbildung 99).

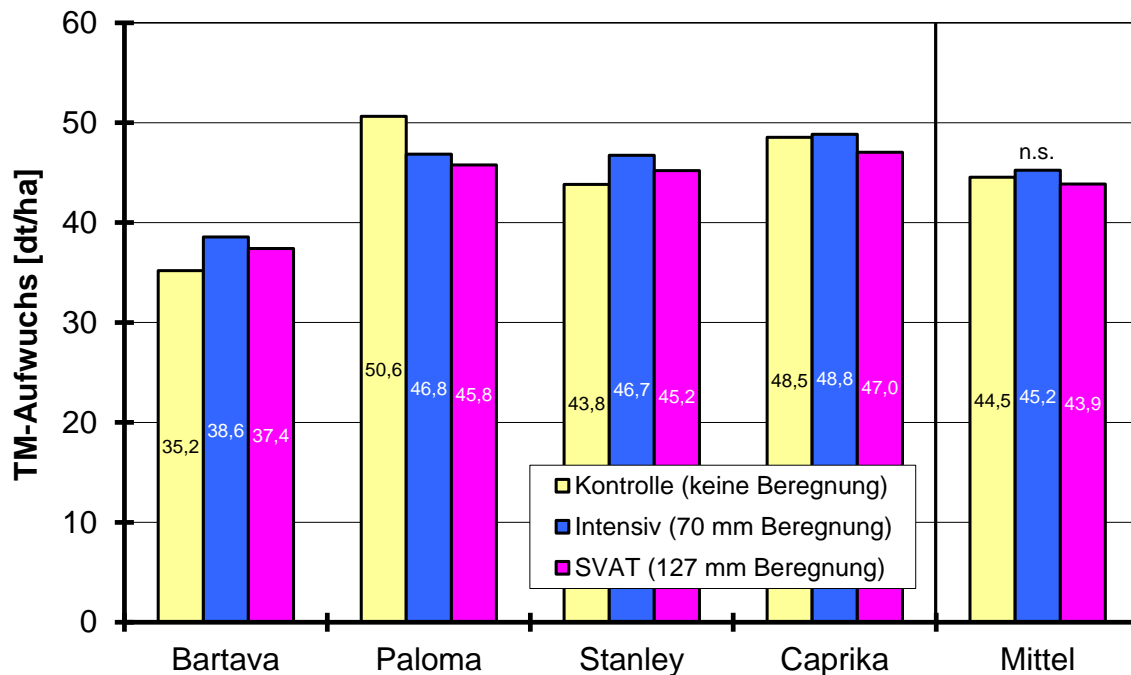


Abbildung 99: Trockenmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Bohnenversuch 2014]

Tabelle 31: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Bohnenversuch 2014]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Mittel ³⁾		alle	27,3	27,3	28,0	100	100	100
25. Mai ⁴⁾	09	alle	27,1	23,0	24,6	99	68	75
18. Juni		Kontrolle	18,3	21,0		45	53	
		Intensiv	19,5	20,0		53	45	
		SVAT	21,7	23,0		66	68	
7. Juli		Kontrolle	16,3	19,0		33	38	
		Intensiv	17,2	18,8		38	36	
		SVAT	22,2	21,1		69	54	
28. Juli	77	Kontrolle	18,2	18,3	24,6	44	32	75
		Intensiv	22,6	20,1	24,9	71	46	77
		SVAT	23,3	22,6	28,7	76	65	105

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

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 10,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,0 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)

3) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 32a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2014]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]				
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN}		
				Intensiv ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{PEN} × kc _P	Intensiv	SVAT	Kontrolle
09-61	149,7	215,3	1,43	59,9	64,6	65,4		64,5
61-71	59,5	81,5	1,36	65,5	65,2	64,7		60,7
71-77	41,6	57,8	1,35	58,2	57,8	53,0	54,9	36,9
09-77	250,8	354,6	1,40	183,6	187,6	183,1	185,0	162,1

Tabelle 32b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Bohnen [Versuch 2014]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁷⁾				
				Geisenheim Intensiv		Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN}		
				Intensiv	SVAT	ET ₀ × kc _{FAO}	ET _{PEN} × kc _P	Intensiv
09-61	57,2	30	77	15,0	10,6	12,0	51,9	6,9
61-71	54,1	0	26	9,4	9,3	6,9	22,9	0,0
71-77	13,0	40	24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
09-77	124,3	70	127	24,4	19,9	18,9	74,8	6,9

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-60 cm

3.3.7 Zusammenfassung der fünf Versuchsjahre

Witterungsverlauf, Verdunstungsberechnung

Entsprechend der Weiterentwicklung des 'Geisenheimer Modells' während der 5-jährigen Projektlaufzeit wurde die Bewässerung der 'Intensiv'-Variante auf Basis unterschiedlich berechneter ET_c-Werte kalkuliert (Tabelle 34), die entweder auf ET₀ oder ET_{PEN} basierten (Tabelle 33). Während 2010 ET_{PEN} in der Bewässerungsphase durchschnittlich nur um Faktor 1,32 über ET₀ lag, betrug dieser Faktor in den anderen Jahren 1,37 bis 1,40.

Tabelle 33: Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Bohnenversuche]

	Referenzverdunstung [mm]											
	BBCH 09-61			BBCH 61-71			BBCH 71-77			BBCH 09-77		
	ET ₀	ET _{PEN}	ET _{PEN} / ET ₀ ¹⁾	ET ₀	ET _{PEN}	ET _{PEN} / ET ₀ ¹⁾	ET ₀	ET _{PEN}	ET _{PEN} / ET ₀ ¹⁾	ET ₀	ET _{PEN}	ET _{PEN} / ET ₀ ¹⁾
2010	133,8	176,1	1,34	42,9	56,6	1,33	54,0	69,8	1,29	230,7	302,5	1,32
2011	121,1	161,5 ²⁾	1,37	31,9	43,8 ²⁾	1,39	³⁾					
2012	125,7	179,6	1,44	58,0	76,2	1,33	62,6	85,6	1,39	246,3	341,4	1,40
2013a	111,9	155,5 ²⁾	1,39	60,9	83,8 ²⁾	1,37	66,3	88,8 ²⁾	1,35	239,1	328,1 ²⁾	1,37
2013b	133,7	182,7 ²⁾	1,37	61,6	88,3 ²⁾	1,42	36,2	50,8 ²⁾	1,38	231,5	321,8 ²⁾	1,39
2014	149,7	215,3	1,43	59,5	81,5	1,36	41,6	57,8	1,35	250,8	354,6	1,40

- 1) Mittelwert der täglichen Quotienten
- 2) aufgrund fehlerhafter Datenlieferungen wurde ursprünglich (2011/2013) mit geringeren Verdunstungswerten gerechnet
- 3) Versuch wurde wegen Starkniederschläge abgebrochen

Wie sich erst im Zuge der Endauswertung herausstellte, wurden seitens des DWD 2011 und 2013 fälschlicherweise statt ET_{PEN}-Werte die „potentielle Verdunstung über Wasser nach PENMAN/MONTEITH“ bereitgestellt. Rechnet man im Nachhinein für das Versuchsjahr 2011 mit den korrekten ET_{PEN}-Verdunstungswerten, ergibt sich auch so aufgrund der hohen Niederschläge keinerlei Beregnungsbedarf. Ohnehin wurde der Versuch später wegen Starkniederschlägen abgebrochen. Im Versuchsjahr 2013 erfolgte die Bewässerungssteuerung auf Basis der ET₀-Verdunstungswerte, sodass auch hier die fehlerhafte Datenlieferung keine Auswirkungen auf den Versuchsablauf hatte.

[Alle hier wiedergegebenen Daten bezüglich der ET_{PEN}-Verdunstung der Jahre 2011 und 2013 bzw. davon abgeleiteter Werte basieren auf den korrekten ET_{PEN}-Verdunstungswerten.]

Die auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ berechnete potenzielle Evapotranspiration der Bohnenbestände (ET_c) lag im Mittel der 5 Versuche bei 187 mm, 2010 zeigte sich mit 168 mm eine leicht unterdurchschnittliche, 2012 und im Frühsommersatz 2013 mit rund 200 mm eine leicht überdurchschnittlich hohe Verdunstung (Abbildung 100).

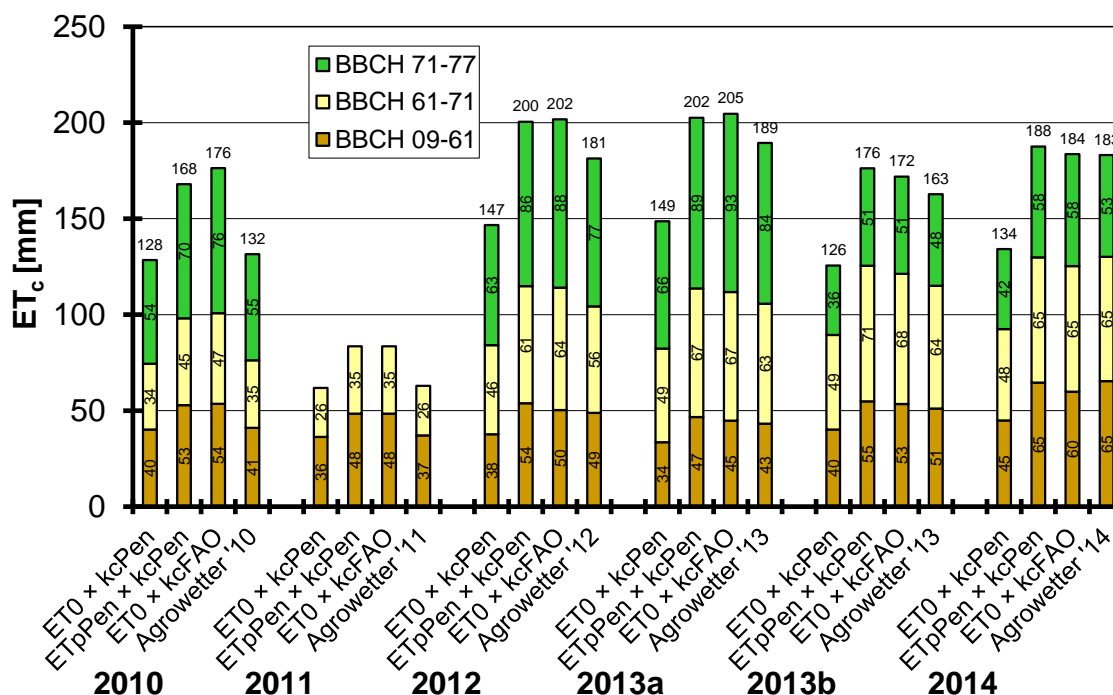


Abbildung 100: Potentielle Evapotranspiration des Bohnenbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (kc_{PEN} : kc_{09-61} : 0,3; kc_{61-71} : 0,8; kc_{71-77} : 1,0; kc_{FAO} : kc_{09-61} : 0,4; kc_{61-71} : 1,1; kc_{71-77} : 1,4)

Die vom 'Geisenheimer Modell' empfohlenen Berechnungen auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ oder $ET_0 \times kc_{FAO}$ führten meist zu jeweils nahezu identischen Verdunstungswerten. Nur 2010 fiel die Berechnung auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ etwas geringer aus als jene auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$; in diesem Versuchsjahr lag ET_{pPEN} nur um dem Faktor 1,32 über ET_0 (vgl. Tabelle 33), sodass die bis um Faktor 1,4 höheren kc_{FAO} -Werte zu entsprechend höheren Verdunstungswerten führten.

'Agrowetter' berechnete in den Jahren 2010 und 2011 Verdunstungssummen in Höhe des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes, nach Einbeziehung eines 'windabhängigen Faktors' ab der Saison 2012 (JANSSEN 2012) lagen die 'Agrowetter'-Werte zwischen dem $ET_0 \times kc_{PEN}$ - und dem $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ -Ansatz, 2014 praktisch auf diesem Niveau.

Stellt man den Verdunstungswerten (in Abbildung 101 exemplarisch $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$) die mit 94 bis 293 mm sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen gegenüber, so wird deutlich, dass 2010 in der ersten Wachstumsphase ein (ausgeprägtes) Wasserdefizit herrschte, das dann aber von sehr feuchten Bedingungen abgelöst wurde. 2011 fielen bis BBCH 71 218 mm Niederschlag, sodass keine Variante bewässert werden musste und der Versuch abgebrochen wurde.

Der Versuch 2012 und der Frühsommersatz 2013 (a) waren geprägt von sehr hohen Niederschlägen in der ersten Wachstumsphase, danach setzten trockene Bedingungen ein. Der Spätsommersatz 2013 (b) war der Versuch mit dem größten Wasserdefizit.

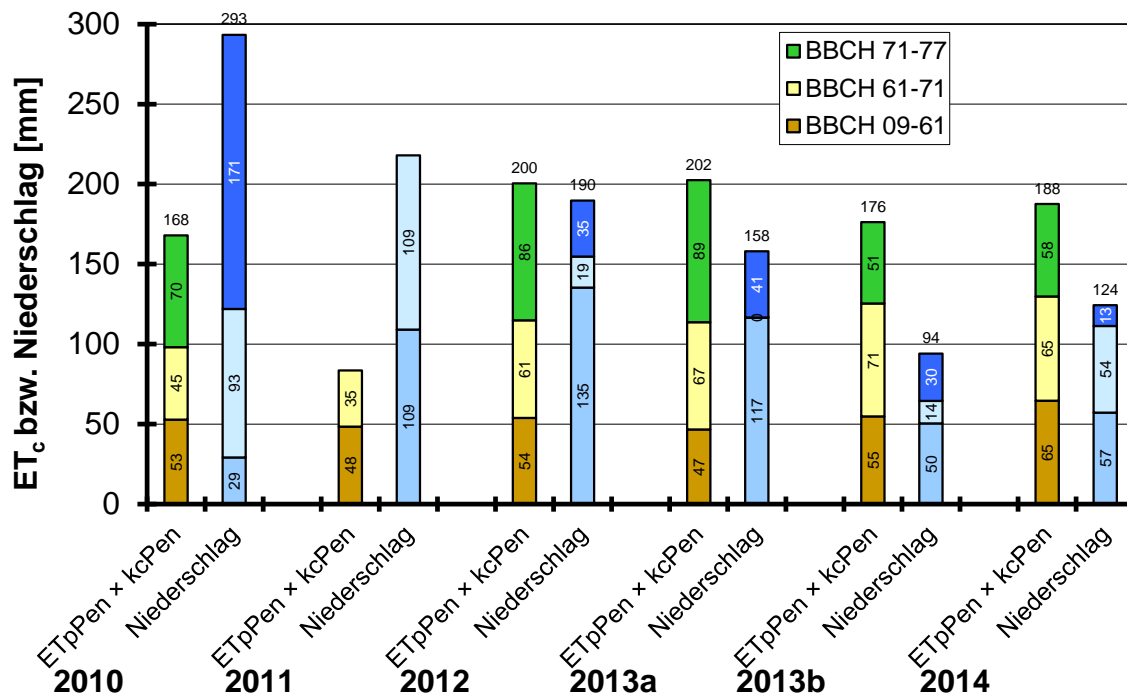


Abbildung 101: Potenzielle Evapotranspiration des Bohnenbestandes ($ET_c = ET_{pPEN} \times k_{cPEN}$) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren

Trotz der anfänglich feuchten Bedingungen musste die Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' 2012 und bei Frühsommersatz 2013 noch mit 100 bzw. 86 mm bewässert werden (Tabelle 34).

Tabelle 34: Modus zur Berechnung der Verdunstung der 'Intensiv'-Variante sowie die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Bohnenversuche]

	Steuerung der 'Intensiv'-Variante auf Basis ¹⁾	Bewässerung [mm]											
		BBCH 09-61			BBCH 61-71			BBCH 71-77			BBCH 09-77		
		Ko ²⁾	P/M ³⁾	Int. ⁴⁾	Ko	P/M	Int.	Ko	P/M	Int.	Ko	P/M	Int.
2010	$ET_0 \times k_{cPEN}$	4	29	24	0			0			4	29	24
2011	$ET_{pPEN} \times k_{cPEN}$	0			0			- ⁵⁾			-		
2012	$ET_{pPEN} \times k_{cPEN}$	0			0			24	68	76	0	68	100
		Ko ²⁾	SVAT	Int. ⁴⁾	Ko ²⁾	SVAT	Int. ⁴⁾	Ko ²⁾	SVAT	Int. ⁴⁾	Ko ²⁾	SVAT	Int. ⁴⁾
2013a	$ET_0 \times k_{cFAO}$	0			0	30	40	0	44	46	0	74	86
2013b	$ET_0 \times k_{cFAO}$	0			20	16	40	0	14	16	0	30	76
2014	$ET_0 \times k_{cFAO}$	0	77	30	0	26	0	0	24	40	0	127	70

1) Modus zur Berechnung der ET_c im jeweiligen Versuchsjahr, k_{cPEN} : k_{c09-61} : 0,3; k_{c61-71} : 0,8; k_{c71-77} : 1,0; k_{cFAO} : k_{c09-61} : 0,4; k_{c61-71} : 1,1; k_{c71-77} : 1,4

2) 'Kontrolle'

3) 'Praxis'- (2010/2011) bzw. 'Minimiert'-Variante (2012)^

4) 'Intensiv'-Variante

5) Versuch wurde wegen Starkniederschlägen abgebrochen

Auf Grund der feuchten Bedingungen des Versuchsjahres 2010 mit drei Starkregenereignissen von jeweils 40-50 mm/d errechnete sich für die 'Intensiv'-Variante eine hohe Sickerwasserbildung insbesondere in der Phase BBCH 71-77, die hier, je nach Kalkulationsansatz, zur Berechnung von ET_c , bei 99 bis 119 mm lag (Abbildung 102). Die, trotz nahezu gleicher ET_c (vgl. Abbildung 100), (auch 2011) etwas geringere Sickerwasserbildung nach 'Agrowetter' als nach der Berechnung auf Basis des $ET_0 \times k_{cPEN}$ -Ansatzes rührt daher, dass in beiden Versuchsjahren kurz vor Bilanzierungsende ein Starkregen mit rund 50 mm auftrat. Dieses führt nach dem eigenen Berechnungsmodus (nach Überschreitung von 105 % nFK) unmittelbar zu einer entsprechend

hohen Sickerwasserbildung. 'Agrowetter' kalkuliert dagegen einen langsameren Verlauf der Sickerwasserbildung, der bis Bilanzierungsende nicht abgeschlossen war.

Die Versuche 2012 und der Frühsommersatz 2013(a) waren geprägt von hohen Niederschlägen in der ersten Wachstumsphase (vgl. Abbildung 101); entsprechend berechneten sich hier hohe Sickerwassermengen.

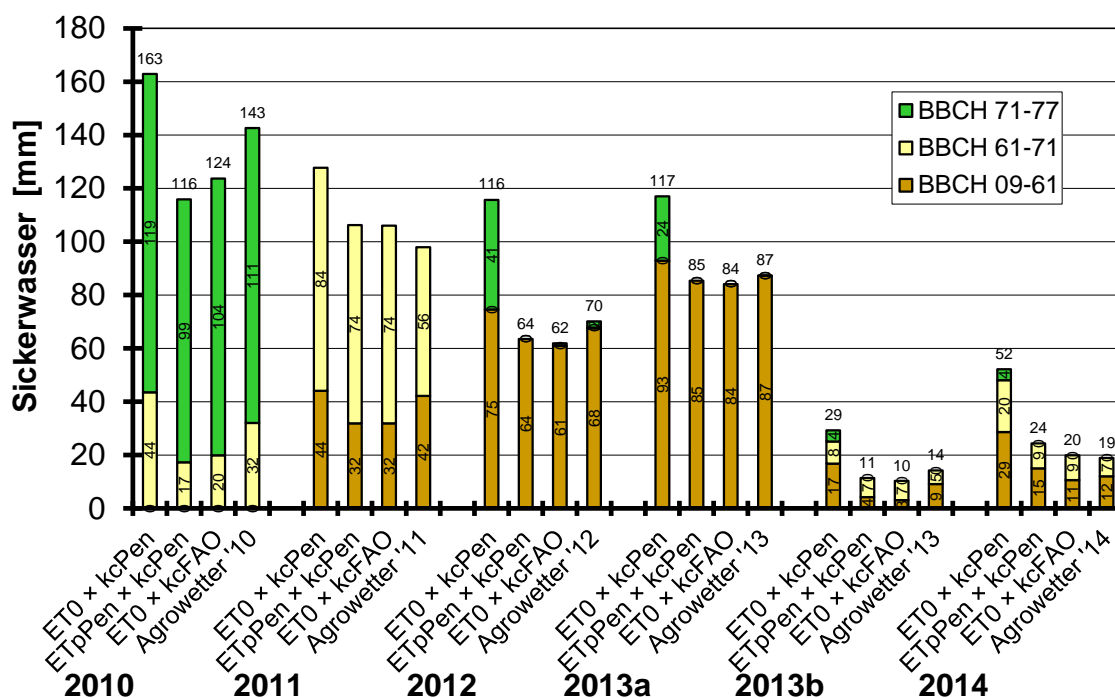


Abbildung 102: Sickerwasserbildung der 'Intensiv'-Variante (aus der Bodenschicht 0-60 cm) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet auf Basis verschiedener Modelle zur Berechnung der Evapotranspiration der Bohnenbestände

Kalkulierte versus ermittelte Bodenwassergehalte

In den Versuchen lagen die für die 'Intensiv'-Variante (mit unterschiedlichen Ansätzen) kalkulierten Bodenwassergehalte zum Teil deutlich über den gravimetrisch gemessenen Werten.

Berechnet man nachträglich die Verdunstung und daraus abgeleitet die Bodenwassergehalte mit einem einheitlichen Ansatz (hier $ET_0 \times kc_{FAO}$), so wird deutlich, dass es insbesondere unter trockenen Bedingungen häufiger zu deutlichen Überschätzungen der Bodenfeuchte (im Mittel 18,2 Vol.-%) kam (Abbildung 103). Geringe Abweichungen unter feuchten Bedingungen sind dadurch zu erklären, dass nach ergiebigen Niederschlägen das Modell (und die Realität) wieder bei FK (bzw. 105 % nFK) 'neu startete'. Mehrfach (in Abbildung 103 markiert) wurde aber auch unter trockeneren Bedingungen eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität gefunden. Dieses waren, mit einer Ausnahme (Versuch 2012; hier Beprobung 5 Tage vor BBCH 71), Beprobungen, die zu oder kurz nach BBCH 71 (2 Proben) oder zur Ernte (3 Proben) durchgeführt wurden. Sehr große Abweichungen betrafen, mit einer Ausnahme (Versuch 2012; hier Beprobung zu Ernte), Beprobungen, die um das BBCH-Stadium 61 durchgeführt wurden. Daraus kann geschlossen werden, dass sich in den bis BBCH 61 geltenden kc-Werten nicht die realen (offensichtlich höheren) Verdunstungsbedingungen widerspiegeln und der Boden stärker austrocknet als kalkuliert, ohne dass sich dies in den Versuchen ertraglich negativ auswirkte.

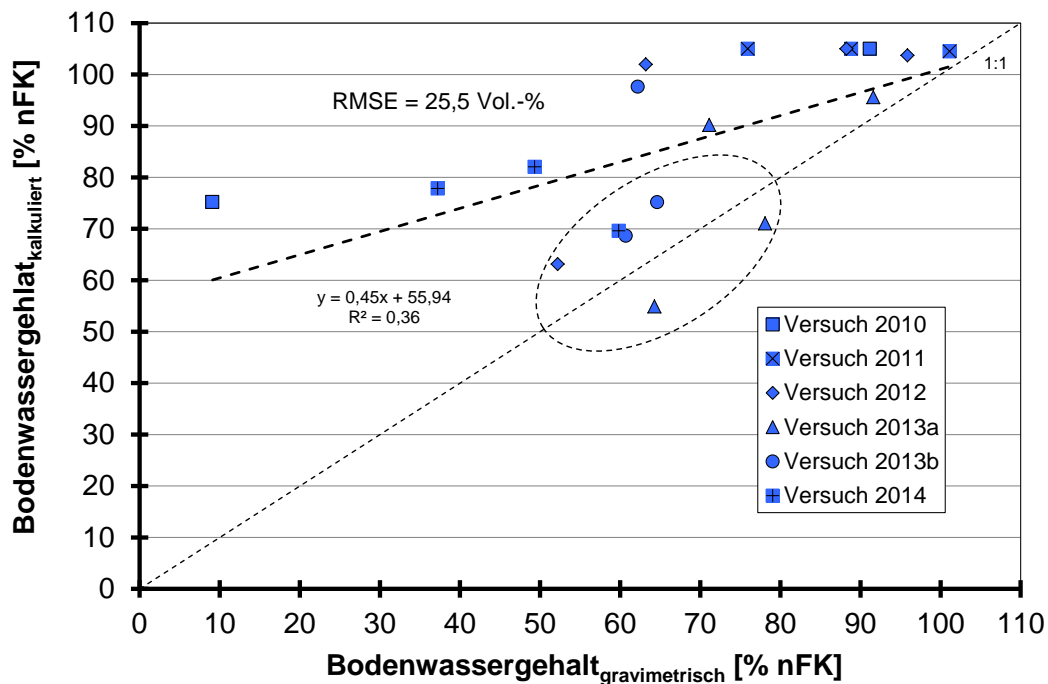


Abbildung 103: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Bohnenversuche]

Die Abweichung zwischen dem kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt fiel bei Berechnung auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ (o. Abbildung.) mit einem RMSE (Wurzel aus dem Mittel der Abweichungsquadrate) von 25,5 Vol.-% bzw. 26,2 Vol.-% ähnlich hoch aus. Der Ansatz von 'Agrowetter', den Bodenwassergehalt bei ergiebigen Niederschlägen deutlich über 100 % nFK ansteigen zu lassen, führte zu einer noch höheren Abweichung (Abbildung 104). Entsprechend der noch geringeren ET_c bei Berechnung auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ lag das RMSE mit 33,9 Vol.-% hier am höchsten (o. Abbildung).

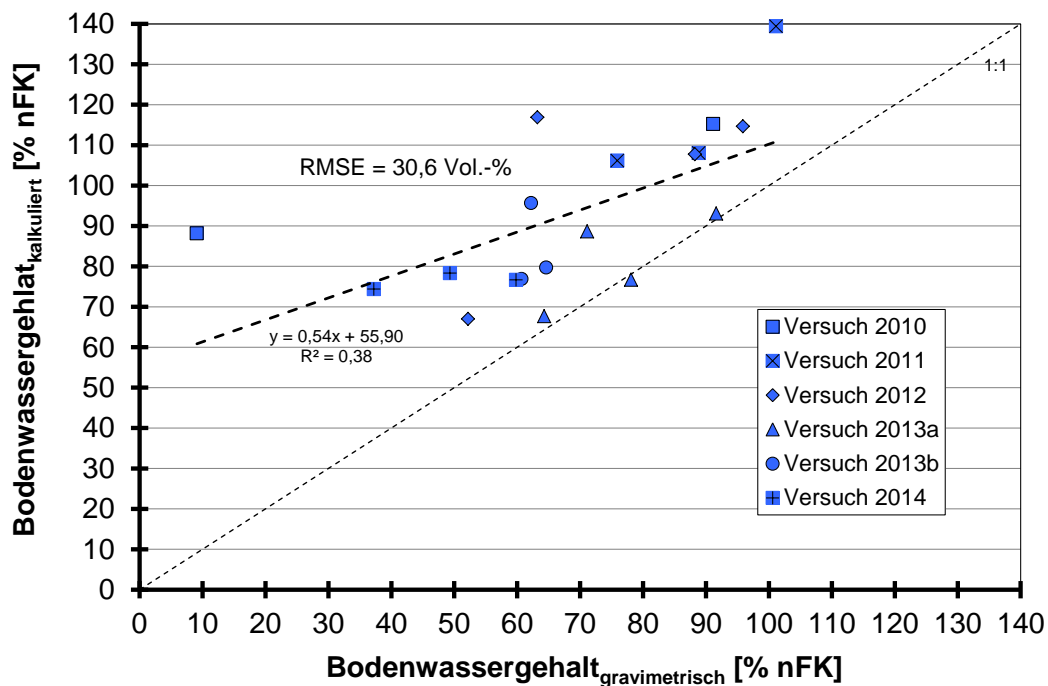


Abbildung 104: Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Bohnenversuche]

Hülsenertrag

Die nicht bzw. nahezu nicht beregnete 'Kontrolle' erzielte im Mittel der fünf Versuche einen marktfähigen Ertrag von gut 150 dt/ha (Abbildung 105). Die 'intensiv' bewässerte Variante (2010 wurde der Ertrag der 'Intensiv'-Variante nicht ermittelt; aufgrund der ähnlichen Bewässerungsgabe [vgl. Tabelle 34] wurde hier der Ertrag der 'Praxis'-Variante übernommen) zeigte im Mittel 38 dt/ha Mehrertrag (+ 31 %) gegenüber der 'Kontrolle'. Die mit 'minimierten' kc-Werten gesteuerte Variante (nur 2012) unterschied sich nicht signifikant von der 'Intensiv'-Variante. Die 'SVAT'-Variante (2013/2014) zeigte im Spätsommerversuch 2013 einen signifikanten Minderertrag gegenüber der 'Intensiv'-Variante, in den anderen beiden Versuchen war kein Unterschied abzusichern.

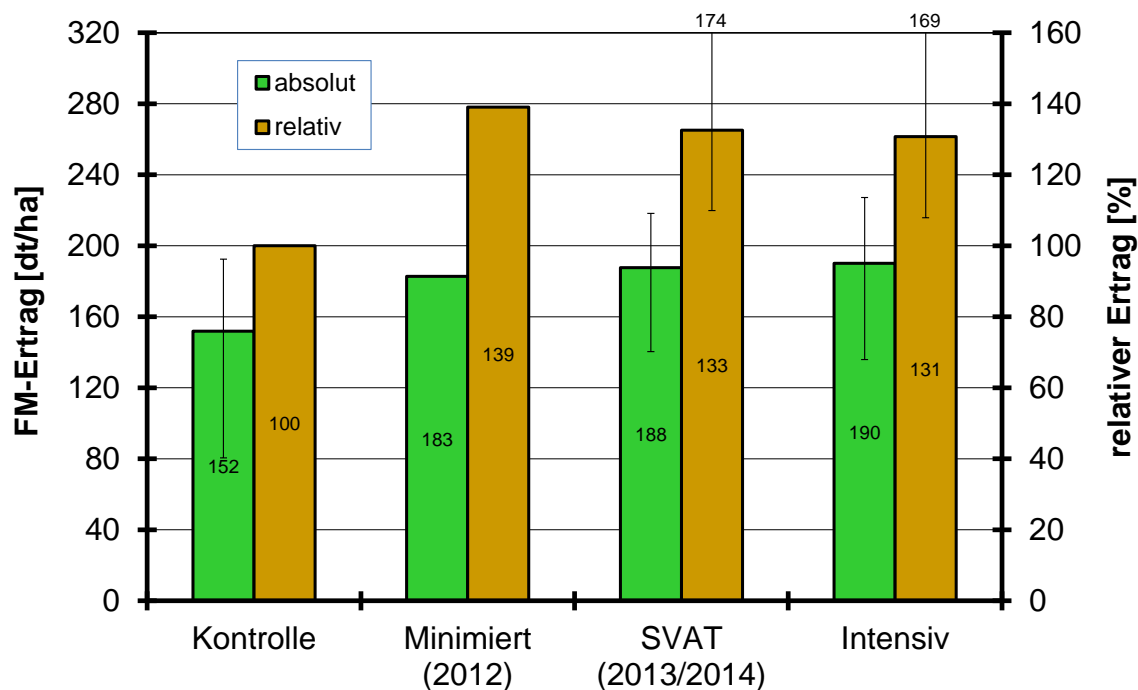


Abbildung 105: Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Hülsenertrag in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) [Bohnenversuche]

PASCHOLD & KLEBER (2005) prüften bei 3-jährigen Versuchen mit jeweils 2 Sätzen die damals geltenden $k_{C_{PEN}}$ -Werte (0,3/0,8/1,0) und fanden in Varianten mit reduzierten kc-Werten (in der am wenigsten bewässerten Variante, die bezüglich der kc-Werte der hier getesteten Variante 'Minimiert' entspricht, wurde aber auch schon ca. 2 Wochen vor Blühbeginn die kc-Werte von 0,3 (BBCH 09-61) auf 0,6 angehoben) Mindererträge von bis zu 18 %. In diesem Fall wurde allerdings laut Versuchsbericht die gleiche Wassermenge wie in der intensiv bewässerten Variante ausgebracht; weil die kc-Werte bis BBCH 71 identisch waren, könnten allenfalls in der Phase BBCH 71-77 Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Wassergaben aufgetreten sein.

PFLEGER et al. (2010) erzielten in ihren 9-jährigen Versuchen (1998-2007) im mitteldeutschen Trockengebiet (Straußfurt, Thüringer Becken) in der unberegneten Variante im Mittel einen Ertrag von 106 dt/ha. Die je nach Versuchsjahr mit 40 bis 95 mm (Mittel 66 mm) bewässerte Variante zeigte im Mittel einen Mehrertrag von 66 dt/ha (+ 79 %).

Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte und damit eine gewisse 'Trockenstresstoleranz' bzw. 'Beregnungsbedürftigkeit' von Sorten konnte bei den eigenen Versuchen in keinem der Versuchsjahre beobachtet werden.

PFLEGER et al. berichteten, dass bestimmte der getesteten Sorten durch den Zusatzwassereinsatz höhere Mehrerträge zeigten als andere. Zur etwaigen statistischen Absicherung dieser Wechselwirkung treffen sie allerdings keine Aussage.

Der Trockensubstanzgehalt der Hülsen lag in der 'Kontrolle' immer (soweit getestet auch signifikant) über den der bewässerten Varianten, die sich jeweils nicht deutlich unterschieden (Abbildung 106). Mit über 12 % TS-Gehalt waren die Hülsen der 'Kontrolle' jeweils überreif, das heißt, sie hätten unter Praxisbedingungen eher geerntet werden müssen, was mit weiteren Ertragseinbußen verbunden gewesen wäre (vgl. LABER 2008b). PFLEGER et al. hoben einen „positiven Einfluss“ der Bewässerung auf die Qualität der Ernteprodukte und eine Sicherung der Markenanteile“ hervor, ohne allerdings etwaig untersuchte Parameter zu nennen.

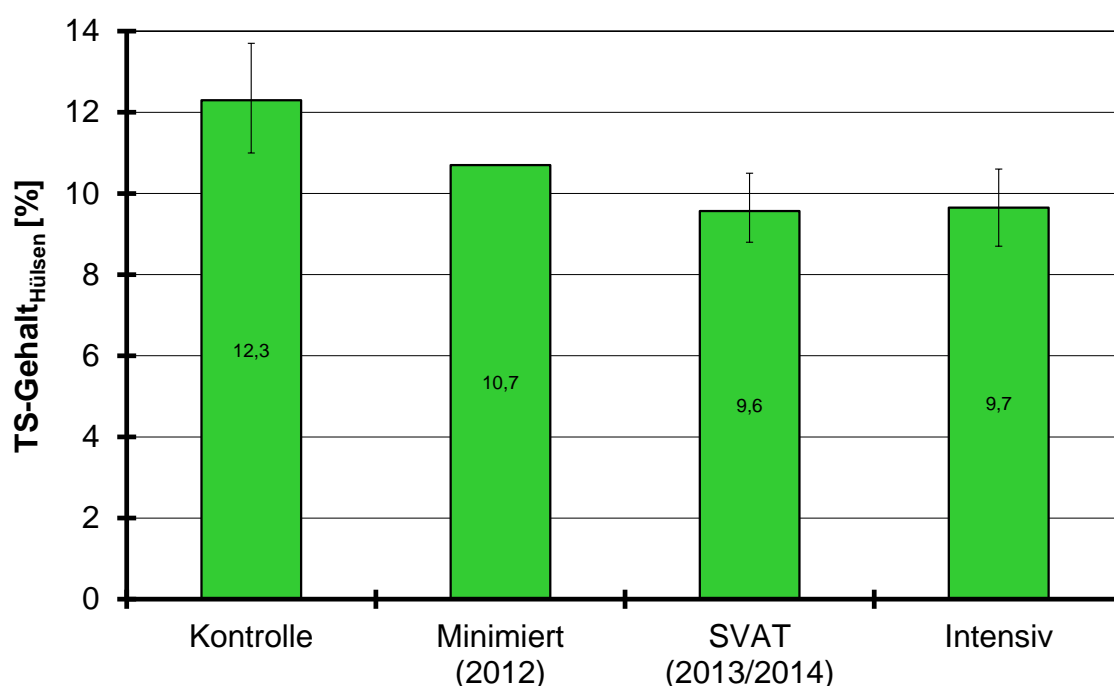


Abbildung 106: Trockensubstanzgehalt der Hülsen in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) **[Bohnenversuche]**

Gesamtaufwuchs und Ernteindex

Bei großen Schwankungen zwischen den Versuchen zeigte die 'Kontrolle' im Mittel einen Aufwuchs von 320 dt/ha (Abbildung 107). Mit Ausnahme des Versuchsjahres 2010 lag der Aufwuchs der bewässerten Varianten immer deutlich über dem der 'Kontrolle'.

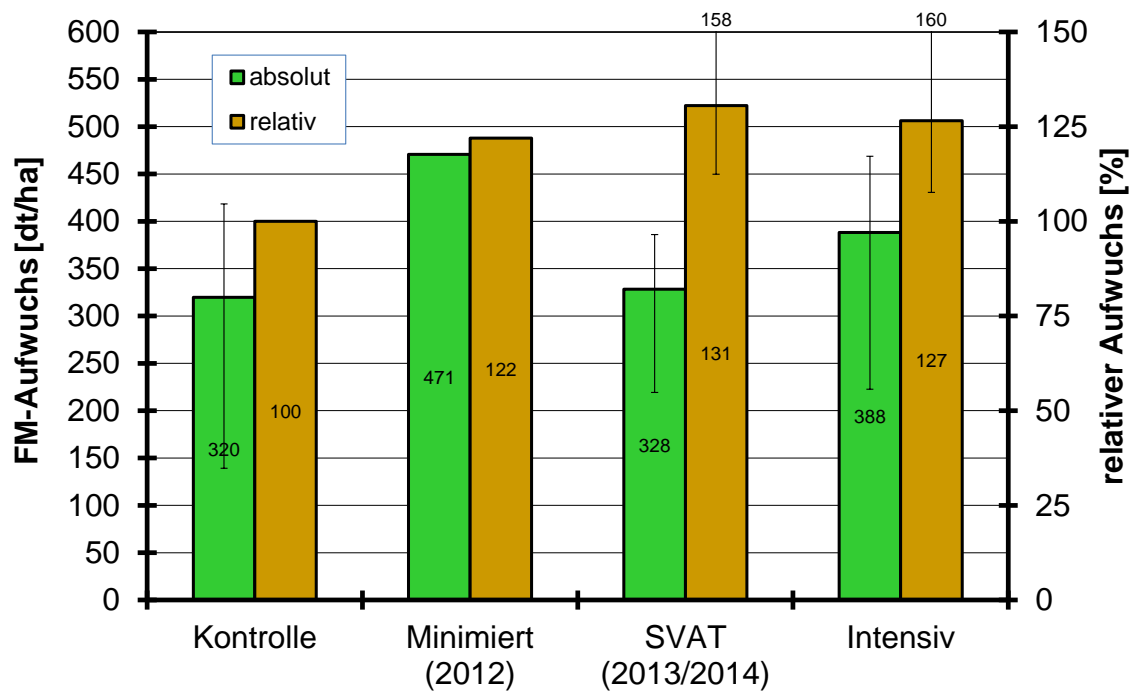


Abbildung 107: Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Frischmasse-Aufwuchs in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) **[Bohnenversuche]**

Auch der frischmassebezogene Ernteindex schwankte stark zwischen den Versuchen (Abbildung 108), 2012 (hohe Niederschläge in der ersten Wachstumsphase) wurden hier mit Werten unter 40 % die geringsten Indizes gefunden.

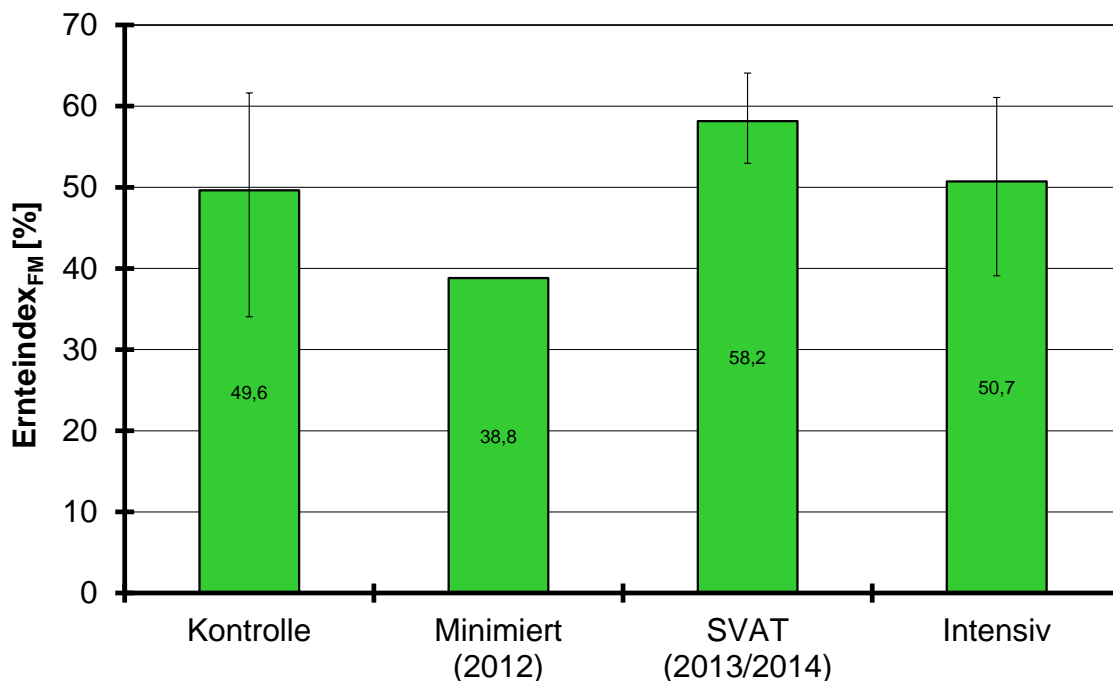


Abbildung 108: Frischmassebezogener Ernteindex in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel]) **[Bohnenversuche]**

Aber auch der Frühsommersatz 2013 war durch hohe Niederschläge in der ersten Wachstumsphase geprägt, dennoch wurden hier mit die höchsten ('SVAT'-Variante: 64 %) Erntegutanteile ermittelt.

Während meist keine (deutlichen) Unterschiede beim Ernteindex zwischen den Bewässerungsvarianten auszumachen waren, fiel die 'Kontrolle' (35 %) im Versuch 2012 signifikant gegenüber den bewässerten Varianten (39 %) ab.

PASCHOLD & KLEBER (2004) berichten, dass bei einem zu hohen Wasserangebot (wie es davor mit höheren kc-Werten empfohlen wurde) „zu viel Laubmasse gebildet“ wird, „die zur Fäulnis der Bohnen führt“.

Effizienz der Bewässerung

Während in der 'Minimiert'-Variante (nur 2012) der Mehrertrag durch die Bewässerung bei 75 kg/(ha x mm) lag, betrug dieser in der 'Intensiv'-Variante (2010: 'Praxis'-Variante) im Schnitt 56 kg/(ha x mm). Die 'SVAT'-Variante mit Berechnungsmengen unter (2013a+b) bzw. über (2014) denen der 'Intensiv'-Variante erzielte 2013 Mehrerträge von durchschnittlich 71 kg/(ha x mm), 2014 von nur 20 kg/(ha x mm). Damit zeigte sich insgesamt (bei allerdings großer Streuung) mit zunehmender Bewässerungsmenge eine Abnahme des Mehrertrags je mm (Abbildung 109).

PFLEGER et al. (2010) fanden Mehrerträge von 21 bis 136 kg/(ha x mm), die damit häufig über den eigenen Ergebnissen lagen. Die Versuche von PFLEGER et al. wurden allerdings auf einer „flachgründigen Ton-Schwarzerde“ mit „stark begrenztem Wurzelraum“ durchgeführt, was möglicherweise die z. T. sehr hohen Mehrerträge erklären könnte.

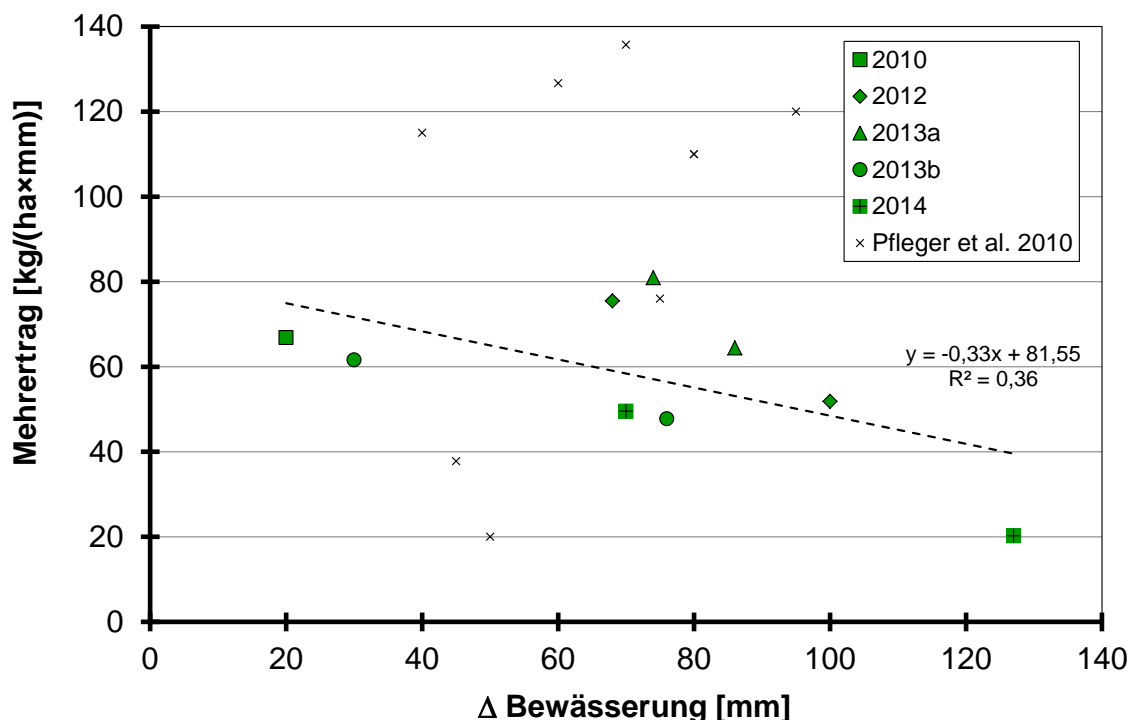


Abbildung 109: Mehrertrag der bewässerten Varianten (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge** (Abzüglich der ggf. in der 'Kontrolle' verabreichten Wassergabe; Regression berechnet ohne Daten von PFLEGER et al. 2010) **[Bohnenversuche]**

PFLEGER et al. kalkulierten die Bewässerungsgaben ebenfalls nach dem 'Geisenheimer Modell' mit den damals aktuellen k_{cPEN} -Werten (diese entsprechen den k_{cPEN} -Werten, Stand 05.09.2013). Die Referenzverdunstung wurde nach TURC, modifiziert nach WENDLING & SCHELLIN (1986), berechnet (RÖßLER 2015). Diese liegt nach langjährigen Vergleichen etwa auf dem Niveau von ET_{pPEN} (je nach Station 1 bis 4 % über ET_{pPEN}) (DVWK 1996), sodass man die Berechnungen der Autoren etwa mit dem Modus $ET_{pPEN} \times k_{cPEN}$ gleichsetzen kann.

Bei den Ergebnissen von PFLEGER et al. zeigt sich eine relativ enge Korrelation der relativen Erträge der jeweiligen unberechneten Variante mit der so bemessenen Bewässerungsmenge (in Abbildung 110 dargestellt als Defizit gegenüber der berechneten Variante) (\Rightarrow bei hohem Zusatzwasserbedarf starker Ertragsabfall in den unberechneten Varianten). In zwei Versuchsjahren (2002, 2007) wurden allerdings nur ein geringer Ertragsabfall in der unberechneten Variante (Δ Bewässerung -50 bzw. -45 mm) festgestellt; die Autoren merkten zu diesen Versuchsjahren an, dass sie sich „durch ein höheres Niederschlagsaufkommen“ auszeichneten (Angaben zur Niederschlagshöhe wurden aber nicht gemacht). Auch die Ergebnisse von PASCHOLD & KLEBER (2005), die allerdings keine unbewässerte 'Kontrolle' in ihren Versuchen aufgenommen hatten, korrespondieren weitestgehend mit den Ergebnissen von PFLEGER et al.

Für die eigenen Ergebnisse zeigt sich ein geringerer Ertragsabfall, lediglich im Frühsommerversuch 2013 fiel der Ertrag der 'Kontrolle' (-86 mm) deutlich stärker ab.

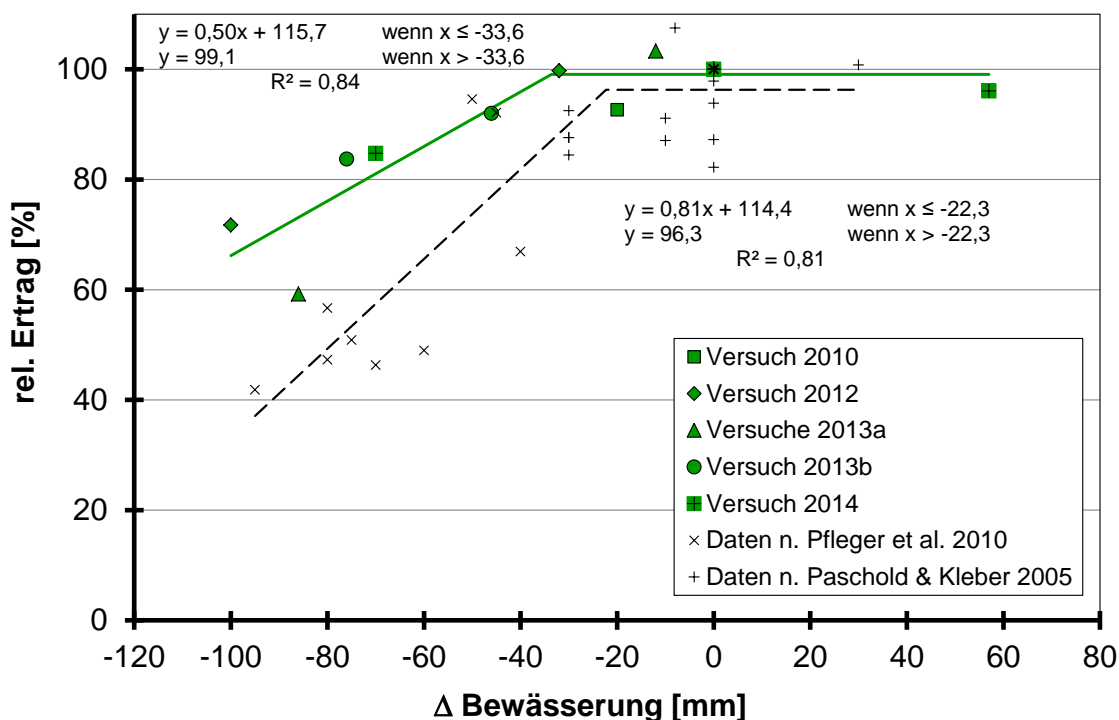


Abbildung 110: Relativer Ertrag ('Intensiv'- bzw. berechnete Variante = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **in Abhängigkeit von dem Bewässerungsdefizit gegenüber der 'Intensiv'- bzw. der berechneten Variante** (Versuche v. PFLEGER et al. 2010 und PASCHOLD & KLEBER 2005) **[Bohnenversuche]**

Klimatische Wasserbilanz und Ertrag

Zwischen der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Bewässerung - ET_c) und dem Ertrag konnte nur ein geringer Zusammenhang gefunden werden, wobei dieser bei Berechnung von ET_c als $ET_0 \times kc_{FAO}$ am engsten ausfiel (Abbildung 111). Bei einer Berechnung von ET_c nach $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ ($R^2 = 0,39$) oder $ET_0 \times kc_{PEN}$ ($R^2 = 0,37$) bzw. bei Verwendung der ET_c (nicht $ET_{c,adj}$) nach 'Agrowetter' ($R^2 = 0,35$) lag das Bestimmtheitsmaß etwas niedriger. Zu den Versuchen von PFLEGER et al. 2010 und PASCHOLD & KLEBER 2005 liegen keine detaillierten Verdunstungs- und Niederschlagsdaten vor, sodass sie nicht in diese Auswertungen einbezogen werden konnten.

Angesichts der für die Versuche 2010, 2012 und 2013a kalkulierten hohen Sickerwasserverluste ist diese geringe Korrelation nachvollziehbar. Bei Einrechnung der Sickerwassermenge verschlechterte sich allerdings das Bestimmtheitsmaß (hier zeigte der Ansatz auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ mit 0,33 das höchste Bestimmtheitsmaß), sodass zu vermuten ist, dass u. a. die Sickerwassermenge mit dem einfachen Rechenansatz nicht ausreichend genau kalkuliert wurde.

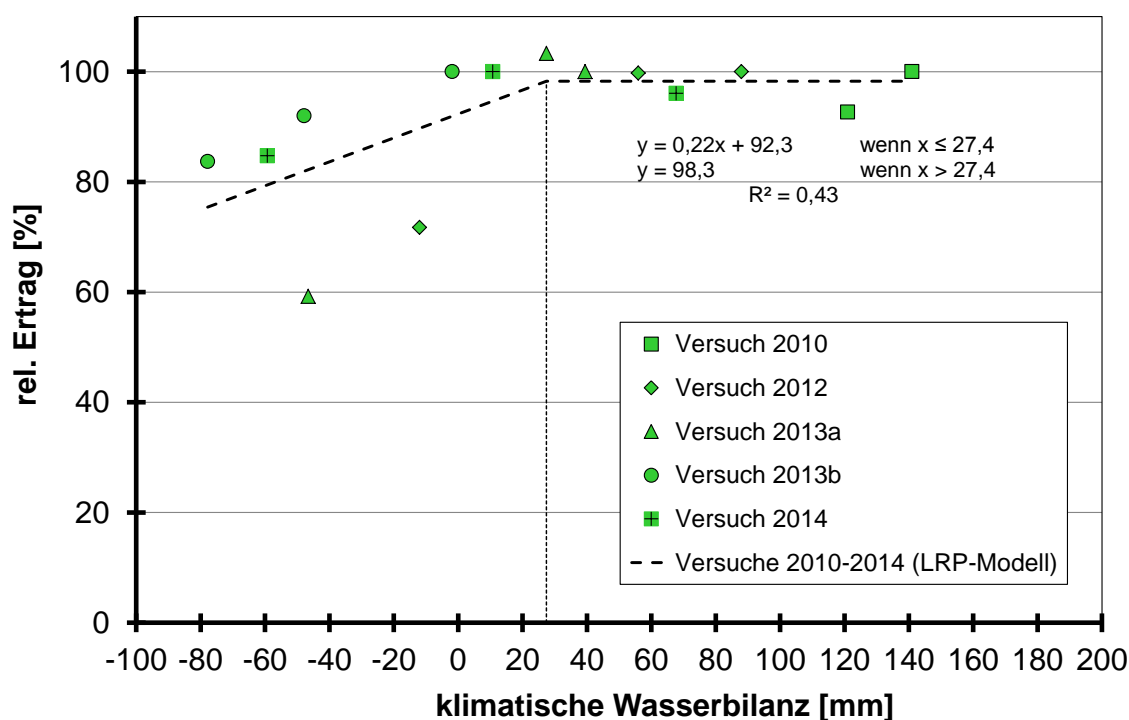


Abbildung 111: Relativer Ertrag ('Intensiv' = 100 %; Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz** (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times kc_{FAO}$) **[Bohnenversuche]**

Resümee

Die für Buschbohnen empfohlenen kc -Werte liegen mit einen bis weit über die Hälfte der Kulturzeit geltenden kc -Wert von 0,3 (kc_{PEN}) bzw. 0,4 (kc_{FAO}) auf sehr niedrigerem Niveau. Die deutlichen Überschätzungen der Bodenwassergehalte insbesondere in dieser Phase deuten darauf hin, dass die Verdunstung mit diesen kc -Werten tatsächlich auch unterschätzt wird. Offensichtlich begünstigt aber ein 'gewisser Trockenstress' die Ertragsbildung bei Buschbohnen; die Versuche von PASCHOLD & KLEBER (2004) zeigen, dass bei höheren Wasserangebot „zu viel Laubmasse gebildet wird“, der Ertrag aber sinkt. Bei den eigenen Versuchen wurde nur im Falle der 'SVAT'-Variante im Jahr 2014 eine über die Empfehlungen hinausgehende Wassergabe verabreicht. Eine deutliche (negative) Ertragswirkung konnte hier zwar nicht beobachtet werden, die signifikante Abnahme des Ernteindizes bestätigt aber die Aussagen von PASCHOLD & KLEBER.

Insgesamt kann damit das 'Geisenheimer Modell' mit den entsprechenden kc-Werten unter den gegebenen Boden- (relativ hohes Wasserhaltevermögen) und Witterungsbedingungen als ressourcenschonende Bewässerungssteuerung für den mitteldeutschen Buschbohnenanbau empfohlen werden. Inwieweit die über einen langen Kulturzeitraum geltenden sehr geringen kc-Werte auch auf sehr sandigen Standorten die Wasserversorgung von Buschbohnen sicherstellen, bedarf einer Überprüfung.

Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte und damit eine gewisse 'Trockenstresstoleranz' bzw. 'Beregnungsbedürftigkeit' von Sorten konnte in keinem der Versuchsjahre beobachtet werden.

4 Versuche mit Speisezwiebeln

Abstract

Im Rahmen eines fünfjährigen Projektes wurde am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz jährlich ein Bewässerungsversuch mit jeweils vier verschiedenen Sommerzwiebelsorten durchgeführt.

Nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' waren, je nach Witterungsverlauf und Modellansatz, Wassergaben von 104 bis 298 mm notwendig. Eine 'Praxis'-Variante (Versuchsjahre 2010 und 2011) erhielt 44 bzw. 20 mm, eine Variante mit 'minimierten' kc-Werten (2012 und 2014) 92 bzw. 120 mm. Die 'Kontrolle' blieb im Wesentlichen unbewässert.

Die 'intensiv' nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' bewässerte Variante erzielte mit einem durchschnittlichen Plus von rund 200 dt/ha bzw. 40 % jeweils signifikante Mehrerträge gegenüber der 'Kontrolle'. Die mit deutlich geringeren Mengen bewässerte 'Minimiert'-Variante fiel mit 35 % Mehrertrag nur leicht gegenüber der 'Intensiv'-Variante ab. Die nur wenig bewässerte 'Praxis'-Variante erzielte mit durchschnittlich 8 % nur geringfügige Mehrerträge. Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte und damit eine 'gewisse Trockenstresstoleranz' bzw. 'Beregnungsbedürftigkeit' von Sorten konnte beim marktfähigen Ertrag (> 40 mm) in keinem der Versuchsjahre festgestellt werden.

In einer Zusammenfassung werden die, je nach Modell, auf unterschiedlichen Referenzverdunstungen basierenden Verdunstungsberechnungen dargestellt und die damit kalkulierten Bodenwassergehalte den gemessenen gegenübergestellt. Trotz relativ guter Übereinstimmung von kalkulierten und gemessenen Bodenwassergehalten ist aber dennoch zu konstatieren, dass die 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' mit den derzeit aktuellen kc-Werten aufgrund der sich ergebenden hohen, kaum noch ertragsrelevanten Wassergaben nicht für den mitteldeutschen Zwiebelanbau empfohlen werden kann.

4.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

Im mitteldeutschen Anbauggebiet werden Sommerzwiebeln auf den Lössstandorten zumeist ohne Beregnung angebaut. Der Klimawandel und dabei insbesondere die prognostizierte Frühsommertrockenheit stellen aber langfristig einen unberechneten Anbau in Frage.

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

4.2 Material und Methoden

Versuchsstandort

Die Versuchsstation befindet sich in südöstlicher Randlage von Dresden (DD-Pillnitz), ca. 120 m über NHN. Der alluviale Boden (Elbe) ist als Parabraunerde anzusprechen. Die genutzten Versuchsfelder (à 1.000 m²) weisen im Mittel in der Schicht 0-90 cm 17,2 % Ton, 36,4 % Schluff und 46,4 % Sand auf, womit die Bodenart nach der Kartieranleitung (BGR 2005) meist im Grenzbereich zwischen schwach (Ls2) bis mittel sandiger Lehm (Ls3) und stark lehmiger Sand (Sl4) bzw. schluffig-lehmiger Sand (Slu) einzuordnen ist (Tabelle 35). Die Feldkapazität (FK) der Versuchsfelder wurde, soweit möglich, jährlich ausgangs des Winters ermittelt (vgl. Versuchsergebnisse).

Tabelle 35: Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Zwiebelversuche]

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
Versuchsjahr 2010 und 2014				
0-30 cm	17,4	41,7	40,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
30-60 cm	19,4	42,7	37,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	18,5	28,4	53,1	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	18,4	42,2	39,4	schwach sandiger Lehm (Ls2)
Versuchsjahr 2011				
0-30 cm	16,4	34,3	49,3	stark lehmiger Sand (Sl4)
30-60 cm	17,4	38,3	44,3	mittel sandiger Lehm (Ls3)
60-90 cm	18,1	35,1	46,8	mittel sandiger Lehm (Ls3)
0-60 cm	16,9	36,3	46,8	stark lehmiger Sand (Sl4)
Versuchsjahr 2012				
0-30 cm	15,2	42,6	42,2	schluffig-lehmiger Sand (Slu)
30-60 cm	20,5	41,8	37,7	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	19,1	28,0	52,9	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	17,9	42,2	40,0	schwach sandiger Lehm (Ls2)

Kulturdaten und Versuchsaufbau

In den Versuchen konnten jeweils vier Sorten aufgenommen werden, von denen jeweils zwei Sorten seitens der Züchter/Vertriebspartner als 'eher trockenstresstolerant' bzw. als 'eher wasser- bzw. beregnungsbedürftig' eingeschätzt wurden (Tabelle 36). 2014 wurden Sorten von Züchtern getestet, von denen vormals keine Sorten in die Versuche aufgenommen waren. Aussagen bezüglich einer etwaigen 'Trockenstresstoleranz' oder 'Beregnungsbedürftigkeit' liegen zu diesen Sorten nicht vor.

Tabelle 36: Einbezogene Sommerzwiebelsorten

Versuchsjahr 2010				
Sorte	Hyfort	Summit	Premito	Orbito
Züchter	Bejo		Seminis	
Trockenstresstoleranz ^{*)}	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein
Reife	mittelfrüh		mittelspät	
Versuchsjahr 2011 und 2012				
Sorte	Hyfort	Summit	Barito	Sunnito
Züchter	Bejo		Seminis	
Trockenstresstoleranz ^{*)}	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein
Reife	mittelfrüh			
Versuchsjahr 2014				
Sorte	Action	Progression	Firmo	Dormo
Züchter	Syngenta		Hazera	
Trockenstresstoleranz ^{*)}	keine Angaben			
Reife	mittelfrüh			

^{*)} Einschätzung des Züchters/Vertriebspartners

Die Kultur- und Versuchsdaten sind in Tabelle 37 wiedergegeben. Der Versuch 2013 wurde durch Starkniederschläge in der Zeit vom 26. Mai bis 4. Juni (knapp 170 mm) und ein Regenereignis am 20. Juni (53 mm) und dem damit verbundenen Wasserüberstau stark geschädigt und musste abgebrochen werden.

Tabelle 37: Kultur- und Versuchsdaten [Zwiebelversuche]

Versuchsjahr 2010	
26. März	Einzelkornaussaat: Beetanbau (1,5 m) mit 5 Reihen, Reihenabstand 22,5 cm, Kornablageabstand 4,8 cm (93 Korn/m ²)
21. April	Auflauf (BBCH 09), ungleichmäßig
27. April	Bodenwasserprobe, Beginn der Bilanzierung
29. April	8 mm Beregnung in allen Varianten ('Aufweichen' des verkrusteten Bodens für noch auflaufende Zwiebelkeimlinge)
10. Juni	Aufdüngung auf 140 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit KAS
21. Juni	5-Blatt-Stadium (BBCH 15); 6 mm Beregnung in allen Varianten (Auflösen des am 10. Juni verabreichten Düngers)
8. Juli	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
25. Aug.	Beginn Schlottenknick (BBCH 47) bei 'Hyfort' und 'Summit'
1. Sept.	Beginn Schlottenknick (BBCH 47) bei 'Premito' und 'Orbito'
Versuchsjahr 2011	
15. März	Einzelkornaussaat (wie 2010)
7. April	Auflauf (BBCH 09)
6. Juni	Aufdüngung auf 130 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit KAS
1. Juni	5-Blatt-Stadium (BBCH 15)
21. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
2. Aug.	Beginn Schlottenknick (BBCH 47, bei allen Sorten relativ einheitlich)
Versuchsjahr 2012	
23. März	Einzelkornaussaat: Beetanbau (1,5 m) mit 5 Reihen, Reihenabstand 22,5 cm, Kornablageabstand 4,1 cm (108 Korn/m ²)
23. April	Auflauf (BBCH 09)
18. Mai	N _{min} -Vorrat (0-60 cm): 145 kg N/ha ⇒ keine N-Düngung
13. Juni	5-Blatt-Stadium (BBCH 15)
27. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
7./9./10. Aug.	Beginn Schlottenknick (BBCH 47) bei 'Kontrolle'/'Minimiert'/'Intensiv'
Versuchsjahr 2014	
20. März	Einzelkornaussaat: Beetanbau (1,5 m) mit 5 Reihen, Reihenabstand 22,5 cm, Kornablageabstand 4,0 cm (111 Korn/m ²)
9. April	Auflauf (BBCH 09)
29. April	4 mm Beregnung in allen Varianten (Wirkungssicherheit Bodenherbizid)
23. Mai	N _{min} -Vorrat 133 kg N/ha; Aufdüngung auf 150 kg N _{min} /ha in 0-60 cm mit ASS (8,3 kg S/ha) ¹⁾
5. Juni	5-Blatt-Stadium (BBCH 15)
20. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
11. Aug.	Beginn Schlottenknick (BBCH 47)
alle Versuchsjahre	
Bodenart	s. Tabelle 35, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74; Grundwasserflurabstand > 7 m
Versuchsanlage	zweifaktorielle Spaltanlage (Haupteinheit Beregnung, Untereinheit Sorte) mit 3 Wiederholungen
Parzellengröße	Anlageparzelle: 7,0 m × 1,5 m (10,5 m ²); Randparzellen ohne Auswertung (vgl. Titelbild: Parzelle links, ohne Schild); Ernteparzelle: 6,0 m × 1,5 m (9,0 Brutto-m ²) ²⁾
Beregnung	Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen (Gierhake Maschinenbau)
Ernte	Rodung mit einem Siebkettengerät nach vollständigem Schlottenknick und beginnendem Absterben des Laubes nach vorherigen Abschlegeln des Laubes; Trocknung für einige Tage im 'Schwad', Nachtrocknung in Kisten 'unter Dach'
Aufbereitung	Sortierung der 'rascheltrockenen' Zwiebeln mit einer Zwiebelsortiermaschine mit 40 und 70 mm Maschensieb

1) zur Sicherstellung der S-Versorgung in der 'Kontrolle' (kein S-haltiges Beregnungswasser)

2) inklusive Fahrspur

Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen, ggf. einige Jätgänge, waren die Zwiebelbestände jeweils unkraut- und befallsfrei. 2010 wurde die Saat versehentlich ziemlich tief abgelegt, sodass sie, in Verbindung mit relativ kühlen Temperaturen, nur 'verhalten' aufblief. Wie im gesamten mitteldeutschen Anbaugebiet wurde auch die weitere Entwicklung der Zwiebeln durch einen kühlen Mai beeinträchtigt, sodass allgemein von einem Entwicklungsrückstand von 14 Tagen gegenüber einem 'Normaljahr' gesprochen wurde. Auf Grund dieser Widrigkeiten lag die Bestandesdichte im Mittel nur bei nicht ganz befriedigenden 77 Pfl./m².

Die ermittelten Erträge wurden auf die Brutto-Fläche (inklusive Fahrspuren) bezogen. An Proben von Zwiebeln der Größenklasse 40-70 mm wurde 2012 (Mischproben über die Wiederholungen) und 2014 der Trockensubstanzgehalt durch Trocknung bei 105 °C ermittelt (Frischeinwaage ca. 500 g).

Bewässerungsvarianten

Neben einer 'Kontrolle', in der ggf. nur zur Verbesserung des Auflaufergebnisses oder der Herbizidwirkung bzw. der Sicherstellung einer einheitlichen N-Versorgung aller Varianten leicht beregnet wurde, sollten in einer 'Praxis'-Variante (nur 2010 und 2011) nur bei extremer Trockenheit 1-2 Regengaben erfolgen.

In der Variante 'Intensiv' (alle Versuchsjahre) wurde nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010) eine klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - ET_c , ET_c = Referenzverdunstung \times kc-Wert) erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet.

Die veröffentlichten kc-Werte bezogen sich ursprünglich auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) (vgl. PASCHOLD 1999; PASCHOLD et al. 2007, 2009). Dieser Ansatz wurde auch an den Deutschen Wetterdienst herangetragen und in der 'Agrowetter-Berechnungsberatung' (s. u.) umgesetzt (vgl. hierzu die nahezu identischen Evapotranspirationswerte des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes und der 'Agrowetter'-Werte der Versuchsjahre 2010 und 2011).

Ab 2011 (FA-GM 2011c) wurden diese (niedrigeren) kc-Werte auf die s.g. PENMAN-Verdunstung (ET_{pPEN}) bezogen (daher hier als kc_{PEN} bezeichnet). Für die niedriger ausfallende FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) wurden um Faktor 1,4 höhere kc-Werte (hier als kc_{FAO} bezeichnet) empfohlen (FA-GM 2011b).

Alternativ zur 'Praxis'-Variante wurden in den Versuchen 2012 und 2014 in Absprache mit den Geisenheimer Kollegen 'minimierte' kc-Werte verwendet. Die in den jeweiligen Versuchen verwendeten kc-Werte werden jeweils in den Grafiken zum Evapotranspirationsverlauf (z. B. Abbildung 113, Seite 129) dargestellt, Tabelle 47 (Seite 164) gibt einen Überblick über die in den verschiedenen Versuchen zur Anwendung gekommenen Modi zur ET_c -Berechnung.

Anders als in der aktuellen Empfehlung (HS-GM 2013), nach der der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 90 % nFK aufgefüllt wird, sollte der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde zunächst bis zum 5-Blatt-Stadium (BBCH 15) nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, danach wurde entsprechend mit 0-60 cm Tiefe kalkuliert.

Abweichend vom 'Geisenheimer Modell', das „nach starken Niederschlägen“ mit einer Überschreitung der 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 DWD angebotenen Modul 'Agrowetter Berechnungsberatung' berechnet, das sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) orientiert. Seit Beginn der Saison 2012 wird diese ET_0 allerdings mit einem windabhängigen Faktor 'korrigiert' (JANSSEN 2012).

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 konnte auch für die 'Kontrolle' und die 'Praxis'-'/Minimiert'-Variante eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden. Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Berechnungsbeginn (70 % bis BBCH 15, danach 50 %) einheitlich auf 60 % geändert, die maximale Durchwurzelungstiefe wurde von 55 cm (Voreinstellung) auf 60 cm erhöht.

Bei der Berechnung greift 'Agrowetter' auf die ET_0 -Werte der auszuwählenden nächstgelegenen Wetterstation des DWD zurück, in diesen Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche Topografie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicherweise die ET_0 - und ET_{PEN} -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.

Die Beregnung der entsprechenden Parzellen (Haupteinheit) erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt anfangs nur 2 mm, später zumeist 4 mm ausgebracht, sodass bis zu 6 Überfahren pro Beregnungsgabe erforderlich waren. Die ausgebrachte Beregnungsmenge wurde 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 zwei (bei der Endernte ggf. nur einer) der vier Sorten je eine Bodenprobe mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60, ggf. 60-90 cm) gezogen, sodass je Variante und Tiefe eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 800 bis 1.500 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.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Versuchsjahr 2010

Nach einem niederschlagsreichen Winter (156 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März.) wurde am 18. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,9 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,3 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 31). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 30 Vol.-% eine etwas höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 11,0 Vol.-% ebenfalls leicht reduziert.

Nachdem die Masse der Zwiebeln aufgelaufen war, wurde Ende April ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-30 cm Tiefe von 93 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis zum 3. Juni 98,6 mm Niederschlag, sodass bis zu diesem Zeitpunkt der Boden praktisch ständig bis auf FK aufgefüllt war (Abbildung 112 und Abbildung 114).

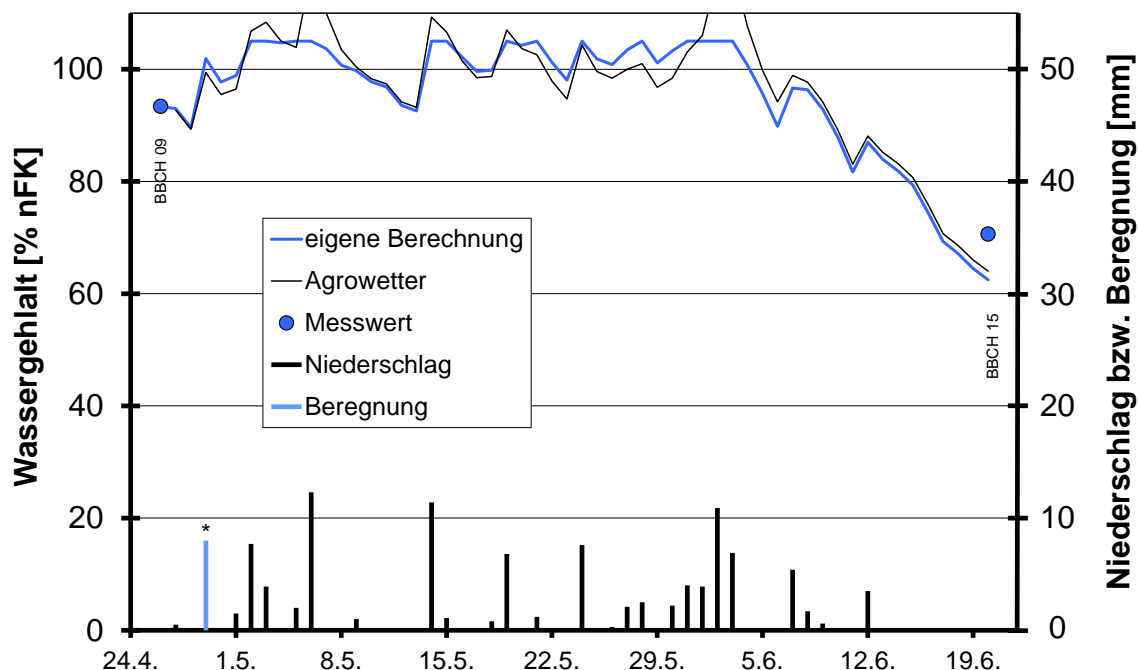


Abbildung 112: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten; *: 8 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]

Anfang Juni setzten dann trockenere Witterungsbedingungen mit bis zu 5-6 mm ET_0/d ein (vgl. Abbildung 113). Weil der am 10. Juni ausgebrachte N-Dünger vor der ersten Beregnungsgabe nicht vollständig aufgelöst/eingewaschen war (nur 3,5 mm Niederschlag zwischen Ausbringung und 1. Beregnungsgabe), wurden am 21. Juni alle Varianten mit 6 mm beregnet. Damit sollte sichergestellt werden, dass in allen Varianten eine einheitliche N-Versorgung gewährleistet war.

Weil nach Erreichen des 5-Blatt-Stadiums (21. Juni) versehentlich noch für einige Zeit mit einer zu berücksichtigenden Bodentiefe von 0-30 cm gerechnet wurde, wurden am 22. und 25. Juni die ersten (variantenspezifischen) Wassergaben von jeweils 10 mm gegeben (Abbildung 114). Auch die Wassergaben am 30. Juni und 2. Juli waren (bezogen auf die Bodenschicht 0-60 cm) zu diesem Zeitpunkt noch 'verfrüht'. Am 12./13. Juli und 20./21. Juli mussten dann 'regulär' jeweils 30 mm (in Teilgaben von à 15 mm) gegeben werden, sodass in der Variante 'Intensiv' insgesamt 119 mm verabreicht wurden.

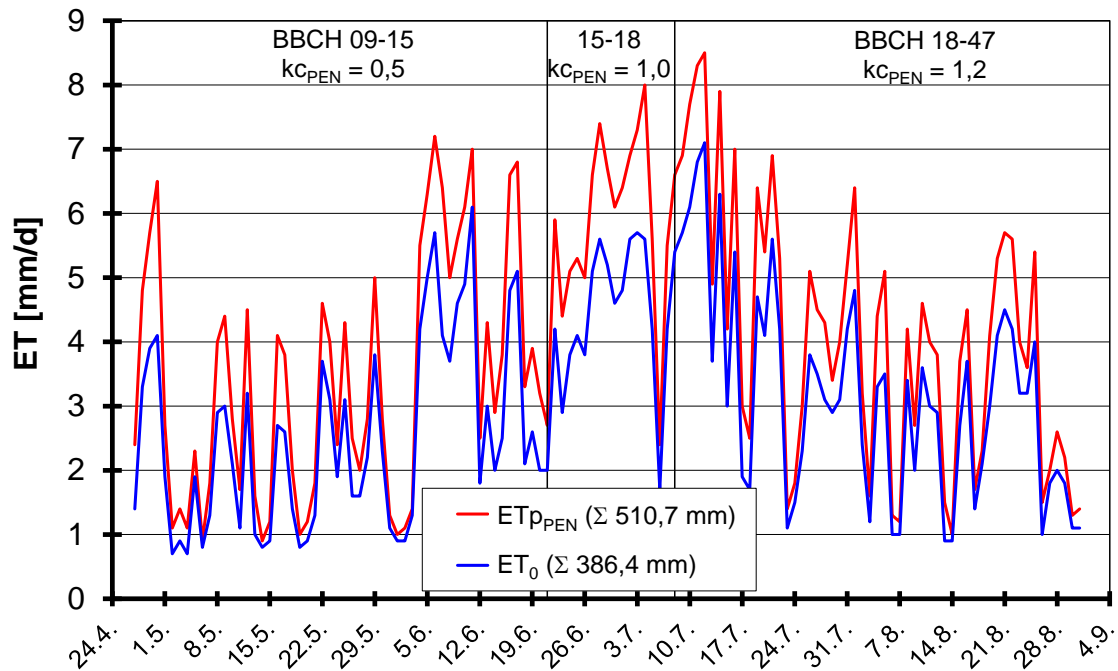


Abbildung 113: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2010]

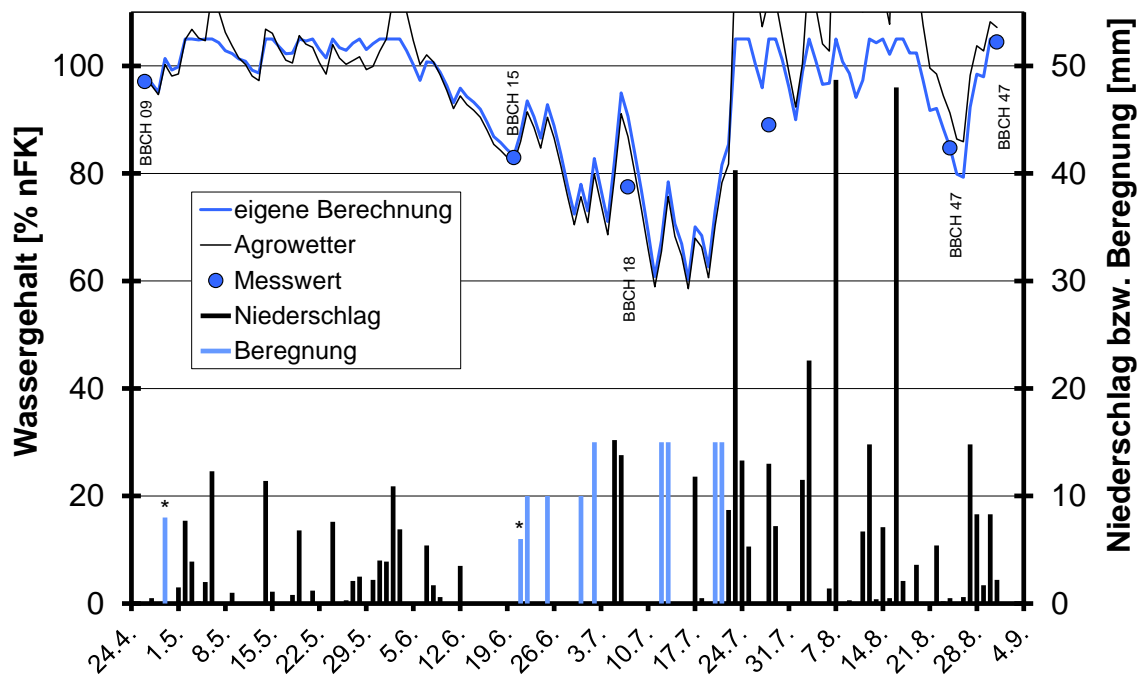


Abbildung 114: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kC_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]

In der 'Praxis'-Variante erfolgte (neben der 8- und 6 mm-Gabe) nur eine Beregnung mit 30 mm am 20./21. Juli. Allerdings setzte unmittelbar danach eine auch den ganzen August andauernde Regenperiode ein (297,5 mm bis Ende August = Schlottenknick), sodass sich die 'Praxis'-Variante praktisch nur durch eine 2 Tage frühere Wiederbefeuchtung des Bodens von der 'Kontrolle' unterschied (vgl. Abbildung 116).

Die auf Basis der ET_0 -Werte berechneten täglichen Verdunstungswerte nach 'Geisenheim' stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch praktisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c\text{adj}} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 359,7 mm wies 'Agrowetter' aber einen geringfügig höheren Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung nach 'Geisenheim', die auf 353,0 mm kam (Tabelle 39a). Auf Grund der eingeschränkten Wasserversorgung wurde seitens 'Agrowetter' für die 'Praxis'-Variante nur eine $ET_{c\text{adj}}$ von 315,3 mm, für die 'Kontrolle' von 309,3 mm berechnet.

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' in der mittleren Kulturphase ebenfalls sehr ähnlich (Abbildung 112 u. Abbildung 114). In den feuchten Kulturphasen führten die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsberechnung aber zu einem etwas unterschiedlichen Verlauf: Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinausgehende Menge von insgesamt 199,5 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' für die 'Intensiv'-Variante eine Versickerung von 190,1 mm (Tabelle 39b).

Bei den jeweils beim Erreichen des nächsten Pflanzenstadiums in der Bewässerungsvariante 'Intensiv' gezogenen Bodenproben zeigte sich zumeist eine recht gute Übereinstimmung der gemessenen und der mit beiden Modellen auf Basis der ET_0 -Werte berechneten Bodenfeuchten (Abbildung 112 und Abbildung 114). Nur zum BBCH-Stadium 18 und einer zwischenzeitlichen Beprobung am 28. Juli wurde der Bodenwassergehalt leicht überschätzt.

Berechnet man (wie vom 'Geisenheimer Modell' vorgesehen) allerdings die Verdunstung auf Basis der $ET_{p_{PEN}}$ -Verdunstungswerte (für die Kulturzeit der Zwiebeln um Faktor 1,33 höher als ET_0), so wird der Bodenwassergehalt immer \pm unterschätzt (Abbildung 115).

Der Bodenfeuchtegehalt der 'Praxis'-Variante wurde vom 'Agrowetter'-Modul ebenfalls recht gut prognostiziert (Abbildung 116). Im Gegensatz zur 'Intensiv'-Variante (vgl. Abbildung 114) wurde hier die Bodenfeuchte zu BBCH 18 aber etwas unterschätzt.

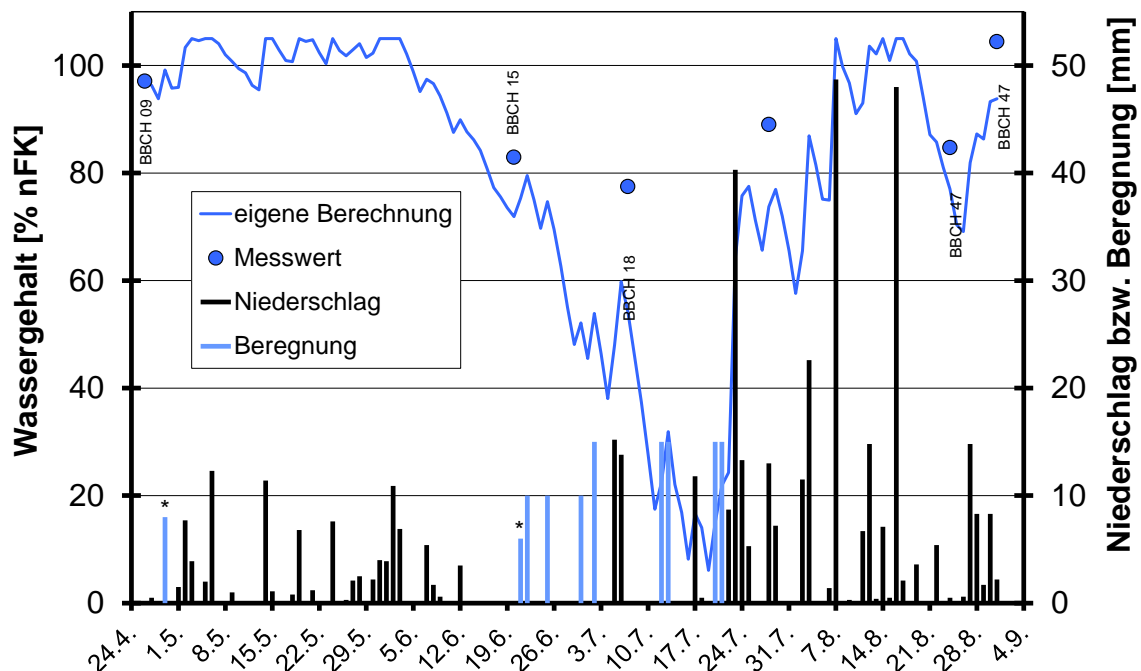


Abbildung 115: Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]

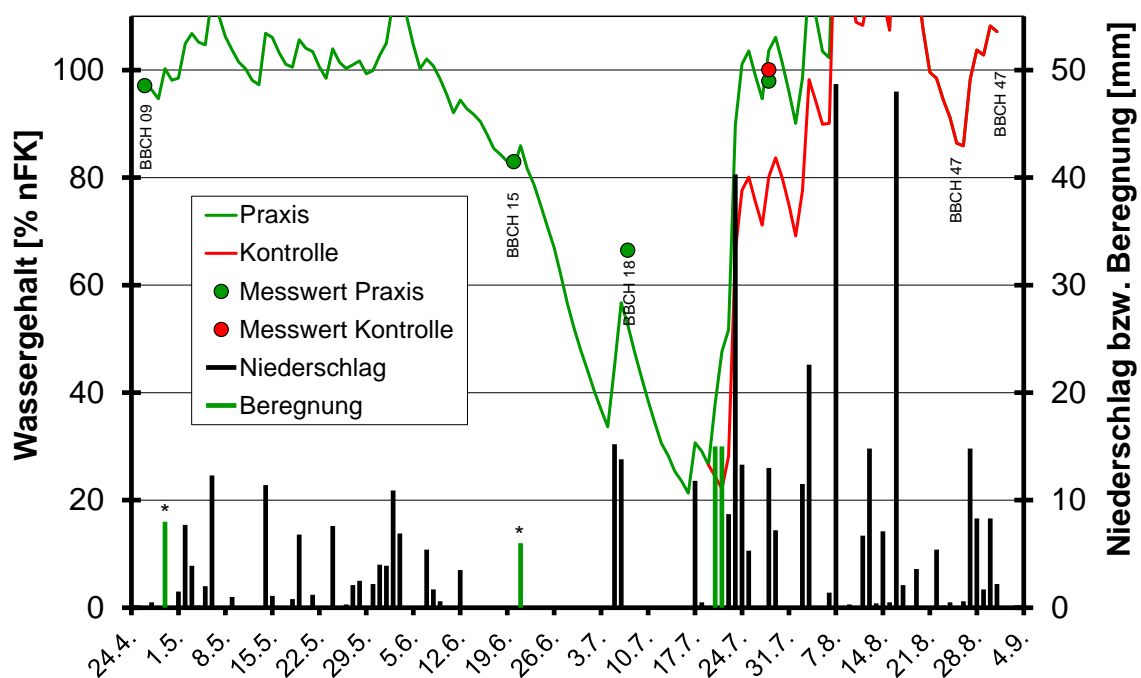


Abbildung 116: Niederschlags- und Berechnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Varianten 'Praxis' und 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (*: 8 bzw. 6 mm Beregnung in allen Varianten) [Zwiebelversuch 2010]

Der Zwiebelbestand bzw. die unterschiedlichen Varianten zeigten während der Kulturzeit keine auffälligen Trockenstresssymptome. Optisch war nur eine etwas größere Bestandeshöhe bei der 'Intensiv'-Variante auszumachen.

Beim Gesamtertrag zeigte sich ein signifikanter Bewässerungseffekt, wobei sich auch die nur um 2 Tage früher 'wiederbefeuchtete' 'Praxis'-Variante signifikant von der 'Kontrolle' unterschied (Abbildung 117). Ein Sorteneffekt oder eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung bestand nicht.

Der Mehrertrag der 'Intensiv'-Variante gegenüber der 'Kontrolle' betrug 178 dt/ha, was bei einer Wassergabe von 105 mm (Differenz zur 'Kontrolle') einem Ertragszuwachs von 170 kg/ha pro mm Wassergabe entspricht.

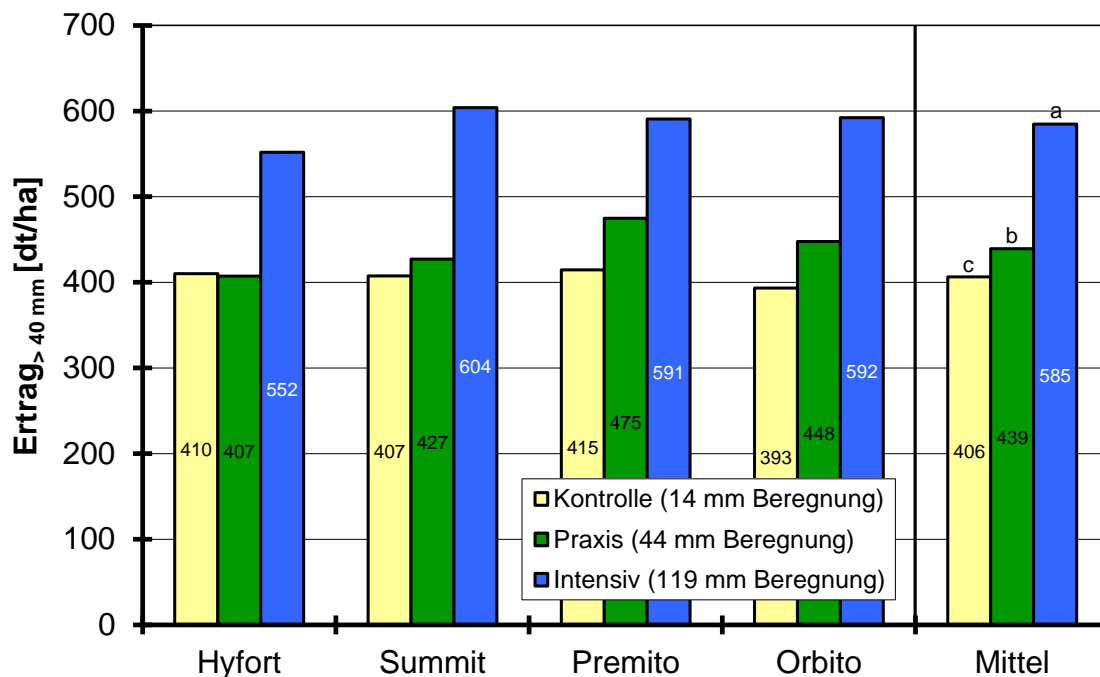


Abbildung 117: Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 23,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]

Der Ertrag an Zwiebel der Sortierung 40-70 mm lag in allen Varianten bei rund 370 dt/ha und wurde nur tendenziell ($p = 0,08$) durch die Sorte beeinflusst (Abbildung 118).

Weil bei der Sortierung < 40 mm keine (in absoluten Erträgen gerechnet) wesentlichen Unterschiede zwischen den Varianten zu verzeichnen waren (Abbildung 119), beruht der Ertragsunterschied vor allem auf den Zwiebeln der Größenklasse > 70 mm, die durch die Bewässerung deutlich beeinflusst wurden (Abbildung 120). Aber auch hier war keine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung zu beobachten.

Im Vergleich zu anderen Jahren waren im Versuch 2010 auch relativ viele Dickhälsen bei den Zwiebeln zu beobachten, wobei tendenziell ($p = 0,09$) diese in der 'Kontrolle' und auch 'Praxis'-Variante verstärkt auftraten (Abbildung 121).

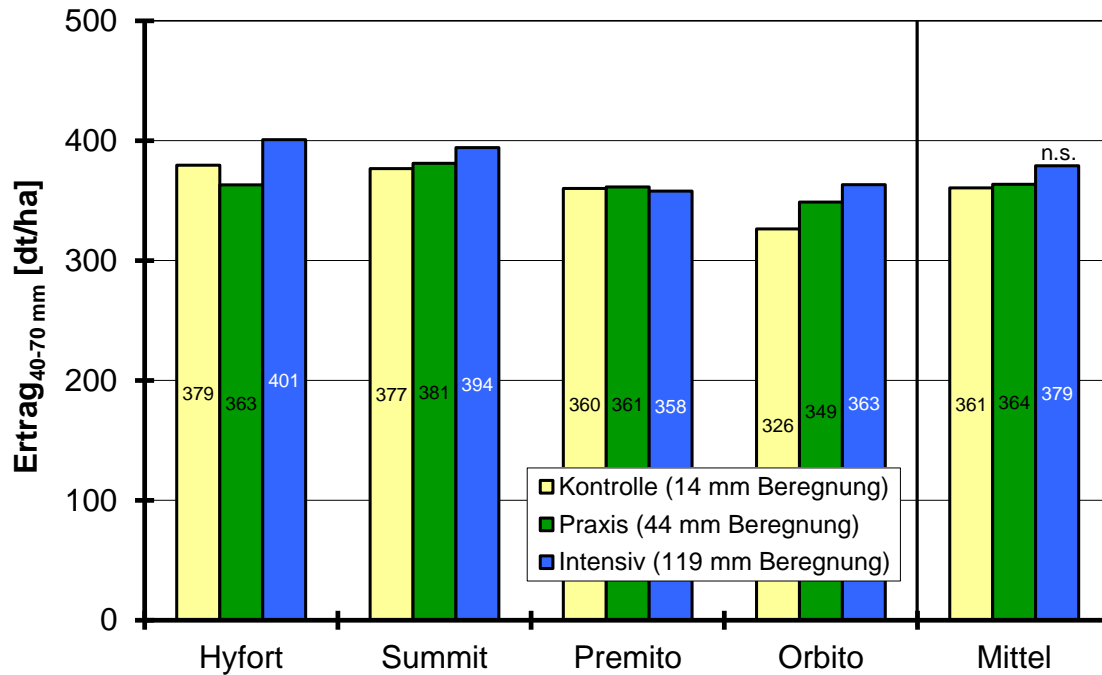


Abbildung 118: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2010]

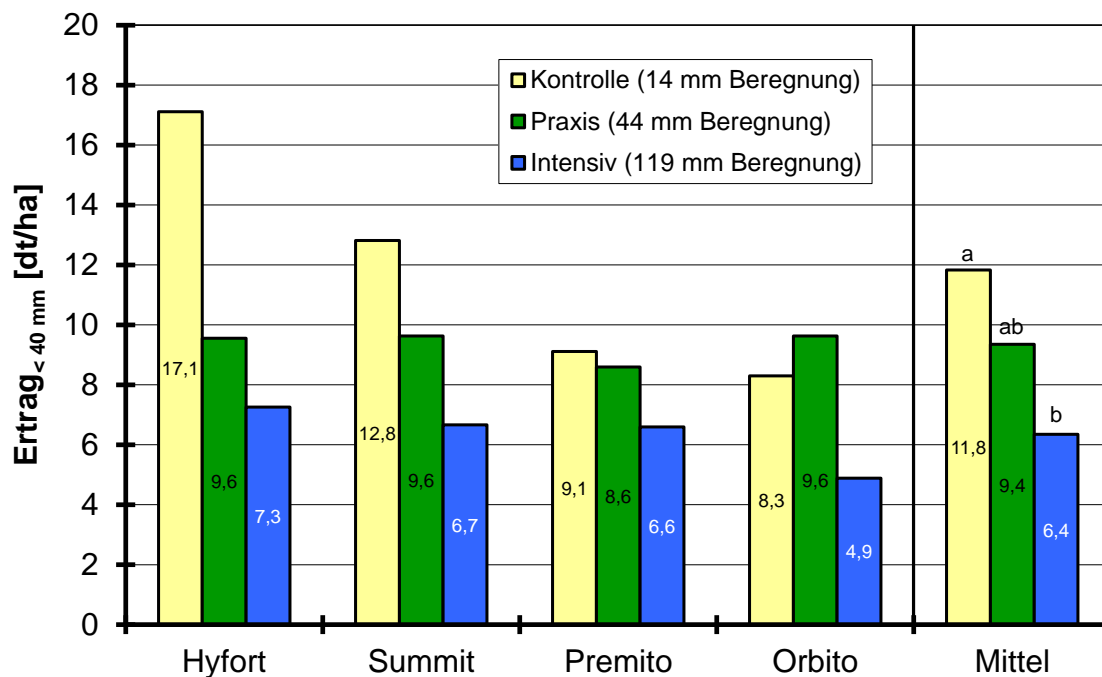


Abbildung 119: Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 3,5 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]

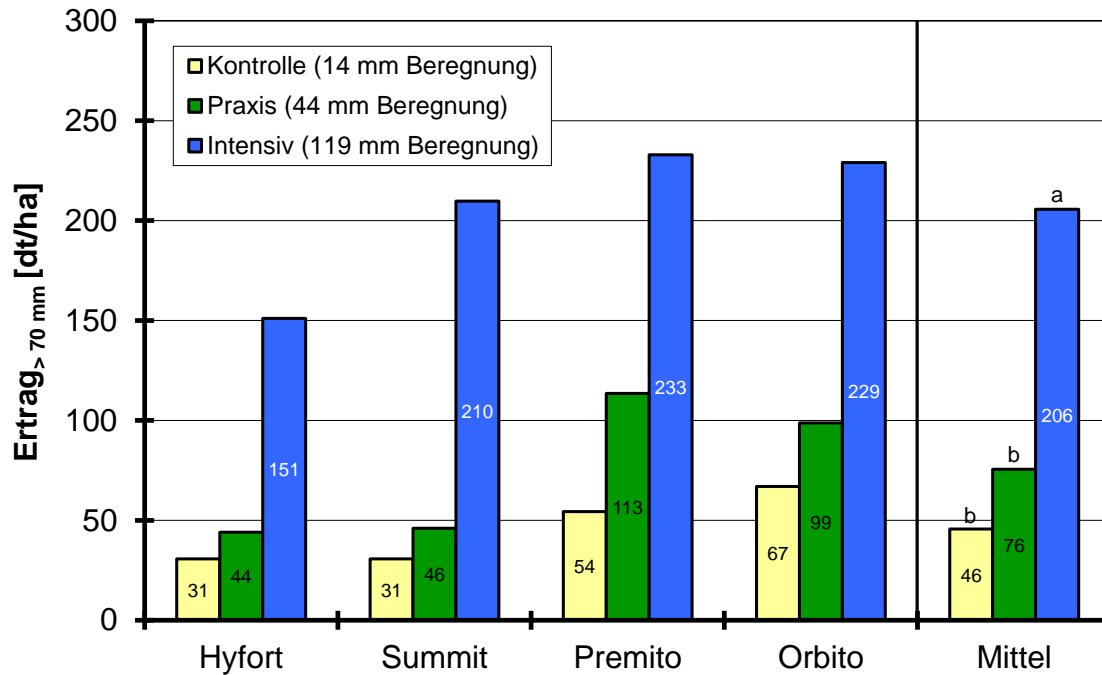


Abbildung 120: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung >70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 30,1 dt/ha) [Zwiebelversuch 2010]

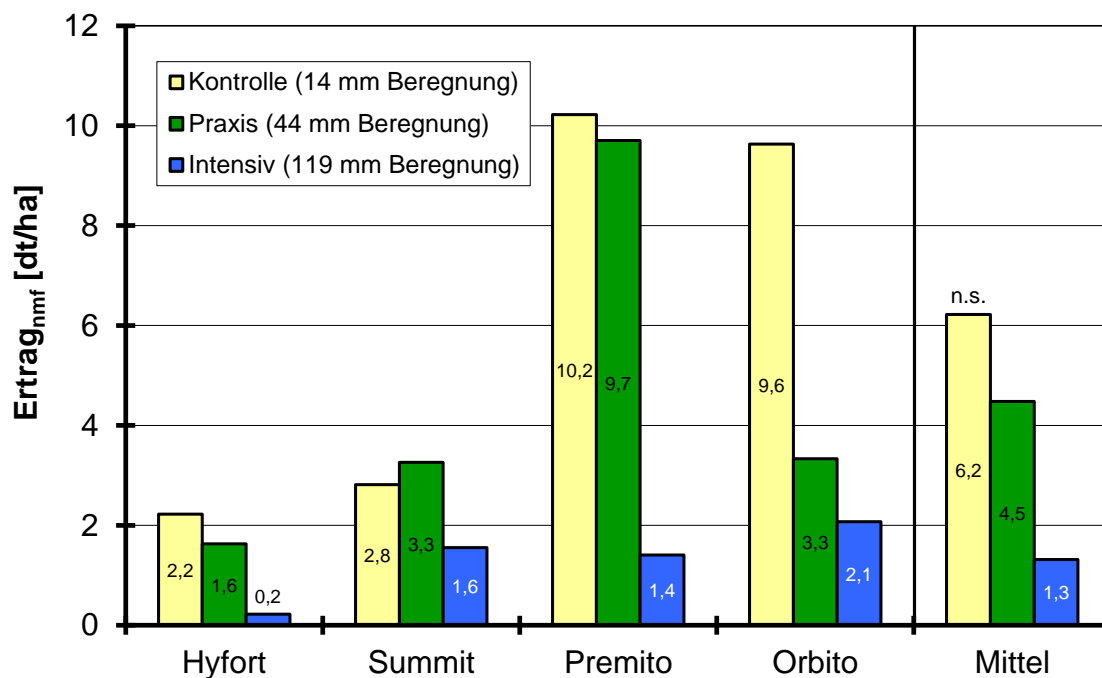


Abbildung 121: Nicht marktfähige Zwiebeln (in erster Linie Dickhäuse) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2010]

Tabelle 38: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2010]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
18. März ³⁾		alle	27,9	27,3	28,2	100	100	100
26. April ⁴⁾	09	alle	26,8	27,5	28,3	93	101	100
20. Juni	15	alle	23,1	26,6	29,1	71	95	105
7. Juli	18	Kontrolle + Praxis	22,6	22,6	26,0	67	66	86
		Intensiv	24,0	24,9	25,2	75	80	82
28. Juli		Kontrolle	27,1	29,4	27,4	93	107	95
		Praxis	27,7	28,1	31,1	97	99	117
		Intensiv	26,0	26,8	27,1	87	91	93
24. Aug. ⁵⁾	47	Intensiv	24,4	26,9	25,7	77	92	85
31. Aug. ⁶⁾	47	Intensiv	28,8	29,1	27,6	103	105	96

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 11,0 Vol.-%
- 3) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET₀): 15.3.: +10,3; 16.3.: +2,5; 17.3.: -0,5
- 4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.
- 5) Sorten 'Hyfort' und 'Summit'
- 6) Sorten 'Premito' und 'Orbito'

Tabelle 39a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2010]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]				
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ Intensiv		Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ ET ₀ × kC _{PEN}		
				ET ₀ × kC _{FAO}	ET _{PEN} × kC _P	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-15	137,3	187,3	1,37	68,7	93,7	70,6		
15-18	73,1	97,3	1,34	73,1	97,3	75,3	65,3	
18-47 ⁷⁾	176,0	226,1	1,29	211,2	271,3	213,8	179,4	173,4
09-47 ⁷⁾	386,4	510,7	1,33	353,0	462,3	359,7	315,3	309,3

Tabelle 39b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2010]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]			Versickerung [mm] ⁶⁾				
		Intensiv	Praxis	Kontrolle	Geisenheim Intensiv		Agrowetter ET ₀ × kC _{PEN}		
					ET ₀ × kC _{FAO}	ET _{PEN} × kC _P	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-15	102,3	8			54,8	40,9	54,7		
15-18	29,1	51	6		0,0		0,0		
18-47 ⁷⁾	309,8	60	30	0	144,7	60,1	135,4	104,7	80,7
09-47 ⁷⁾	441,2	119	44	14	199,5	101,0	190,1	159,4	135,4

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) aus der Bodenschicht 0-60 cm
- 7) Sorten 'Premito' und 'Orbito' (bis 31. August)

4.3.2 Versuchsjahr 2011

Nach einem niederschlagsreichen Winter (190 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 21. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 27,6 Vol.-% (0-60 cm) ermittelt (Tabelle 40). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4) bei einer Rohdichte von 1,5 g/cm³ mit 30 Vol.-% eine etwas höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 11,6 Vol.-% ebenfalls leicht reduziert. Die sich so errechnende nFK von 16 Vol.-% wurde auch in das Agrowetter-Berechnungs-Modul mit einer FK von 27 Vol.-% und einem Totwassergehalt von 11 Vol.-% übertragen.

Zum Auflauffertermin der Zwiebeln Anfang April wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-30 cm Tiefe von 87 % nFK ermittelt. Im weiteren Verlauf fielen dann bis Anfang Mai ausreichend Niederschläge, um nach 'Agrowetter' und den eigenen Berechnungen ($ET_0 \times k_{C_{PEN}}$) den Boden in 0-30 cm Tiefe im Bereich von 80 % nFK zu halten (Abbildung 122).

Der Mai war mit einer FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) von 111 mm recht trocken (vgl. Abbildung 123), die Zwiebeln verbrauchten aber nur 55,5 mm (ET_c), sodass sich bei 55,4 mm Niederschlag über den Monat hinweg eine nahezu ausgeglichene Bilanz ergibt. Mitte Mai kam es nach 'Agrowetter' und eigener Berechnung ($ET_0 \times k_{C_{PEN}}$) aber dennoch zu einem ersten Absinken der Bodenfeuchte auf ca. 60 % nFK, sodass eine Beregnungsgabe von 8 mm in der 'Intensiv'-Variante gegeben wurde. Am 26. Mai war der Schwellenwert von 60 % nFK abermals fast erreicht, worauf hin 16 mm beregnet wurden. Allerdings fielen an diesem Tag entgegen der Wettervorhersage später noch 13 mm Niederschlag, sodass es rechnerisch, bezogen auf die Bodenschicht 0-60 cm, zu einer Sickerwasserbildung von 8,3 mm kam.

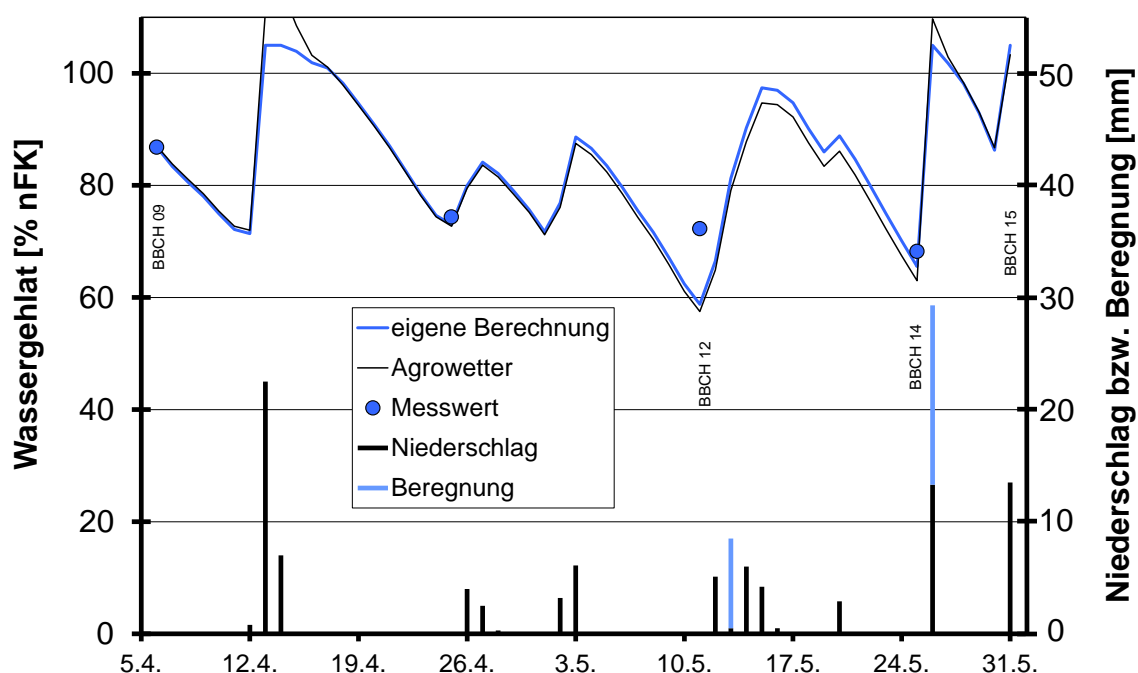


Abbildung 122: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bei der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times k_{C_{PEN}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]

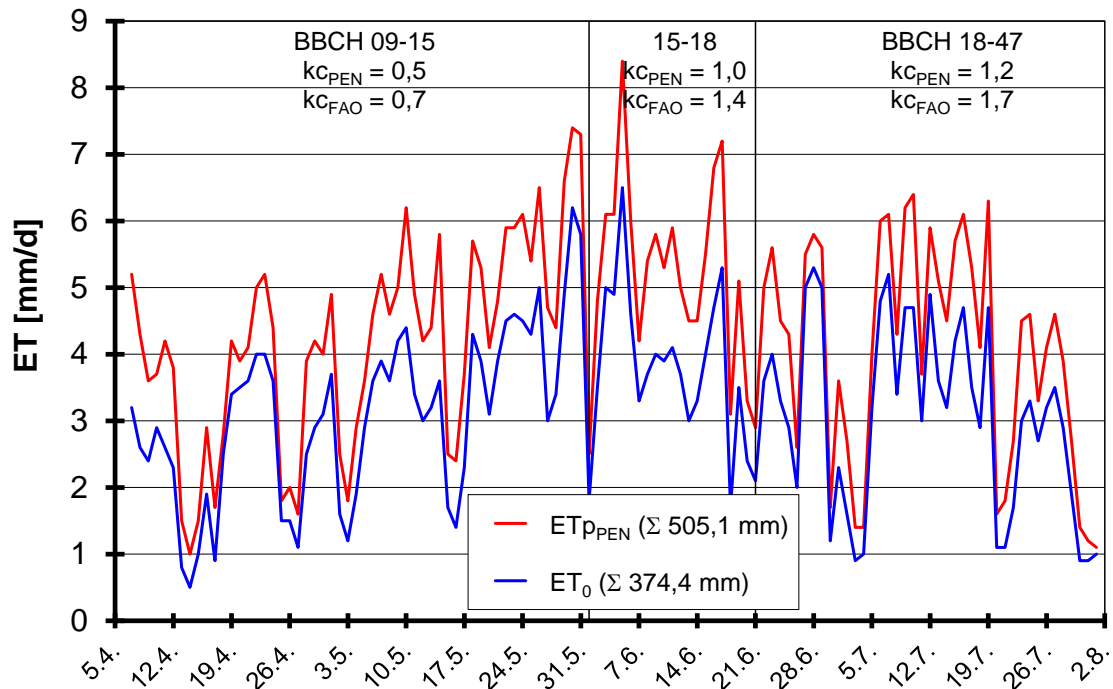


Abbildung 123: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2011]

Etwa Anfang Juni (zusammenfallend mit dem Beginn des 5-Blatt-Stadiums und der Einbeziehung der Bodenschicht 30-60 cm) wurde (entsprechend der Weiterentwicklung des 'Geisenheimer Modells' [vgl. PASCHOLD et al. 2011]) die Bewässerung in erster Linie (unter Einbeziehung von 'Agrowetter'-Empfehlungen) auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{CPEN}$ bemessen. Nach dieser, damals durchgeführten Berechnung näherte sich der Bodenwassergehalt mehrmals dem Schwellenwert von 60 % nFK, sodass in der Phase BBCH 15-47, bei Ausbleiben von Niederschlägen, 4-mal mit insgesamt 80 mm beregnet werden musste (Tabelle 41b).

Wie sich erst im Zuge der Endauswertung herausstellte, wurden seitens des DWD 2011 fälschlicherweise statt ET_{pPEN} die „potentielle Verdunstung über Wasser nach PENMAN/MONTEITH“ (Σ 454,4 mm) bereitgestellt. Tatsächlich lag die ET_{pPEN} -Verdunstung um rund 50 mm höher als damals angenommen. Rechnet man im Nachhinein mit diesen korrekten Verdunstungswerten, so ergeben sich Bodenwassergehalte, die häufiger unter 40 % nFK liegen (Abbildung 125), zum Ausgleich hätte die Beregnung rund 60 mm (Σ 164 mm) höher liegen müssen.

[Alle hier wiedergegebenen Daten bezüglich der ET_{pPEN} -Verdunstung des Jahres 2011 bzw. davon abgeleiteter Werte basieren auf der korrekten ET_{pPEN} -Verdunstung in Höhe von 505,1 mm und der in der 'Intensiv'-Variante verabreichten 104 mm Bewässerung.]

Die auf Basis der ET_0 -Werte mit k_{CPEN} berechneten täglichen Verdunstungswerte stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch praktisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c,adj} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 321,9 mm wies 'Agrowetter' aber einen geringfügig höheren Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung, die auf 315,3 mm kam (Tabelle 41a). Auf Grund der eingeschränkten Wasserversorgung wurde seitens 'Agrowetter' für die 'Praxis'-Variante nur eine $ET_{c,adj}$ von 303,8 mm, für die 'Kontrolle' von 290,4 mm berechnet.

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte für die Variante 'Intensiv' ebenfalls sehr ähnlich (Abbildung 122 und Abbildung 124). Nur die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerung führten zu einem etwas unterschiedlichen Verlauf. Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinausgehende Menge von insgesamt 95,8 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' eine Versickerung von nur 62,0 mm (Tabelle 41b). Diese große Diskrepanz beruht aber vor allem darauf, dass das Starkregenereignis vom 30./31. Juli (74,4 mm) bei der eigenen Berechnung unmittelbar zu einer Versickerung von 50,0 mm führte, während 'Agrowetter' bis zum 1. August (= Ende der Bilanzierung) nur 22,8 mm als versickert angenommen hat. Bis zum 29. Juli wiesen 'Agrowetter' (39,2 mm) und die eigene Berechnung (45,8 mm) eine ähnlich hohe Versickerung aus.

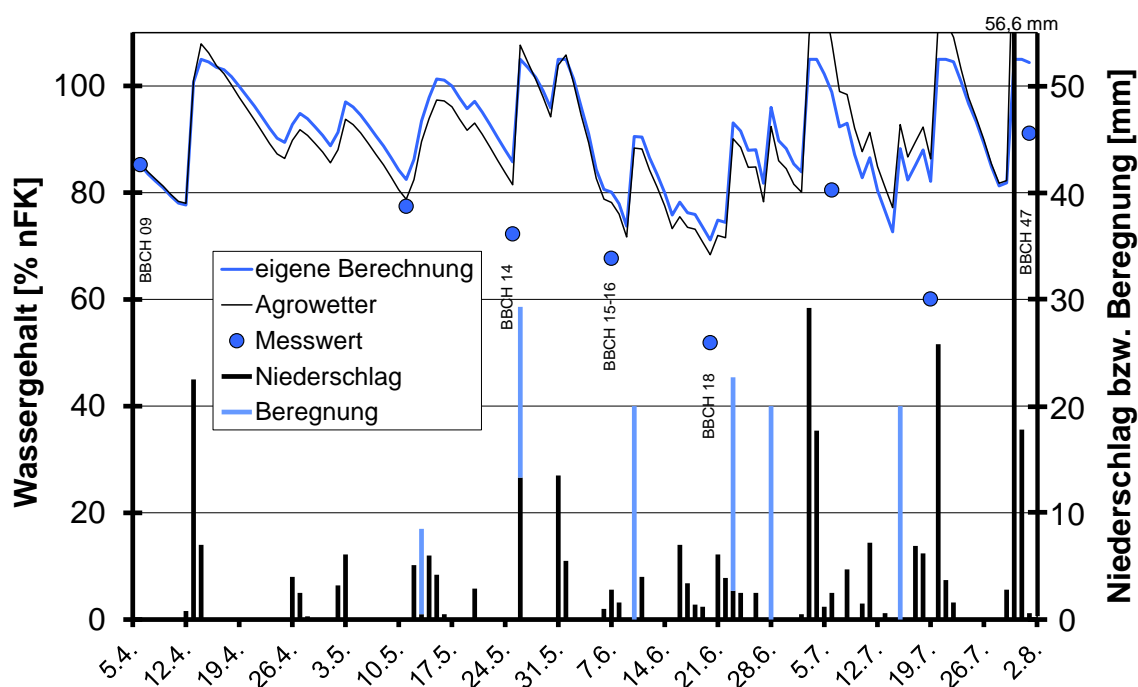


Abbildung 124: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]

Berechnet man auf Basis ET_0 die Evapotranspiration der Zwiebeln mit den dafür vom 'Geisenheimer Modell' vorgesehenen kc_{FAO} -Werten, so ergibt sich insgesamt eine ET_c von 443,9 mm. Schon im Lauf der ersten Kulturphase errechnet sich so ein Absinken der Bodenfeuchte in 0-30 cm auf unter 20 % nFK (o. Abbildung), das sich im weiteren Kulturverlauf selbst für die Schicht 0-60 cm bis zum permanenten Welkepunkt (0 % nFK) ausweitete (Abbildung 125). Mit dem Ansatz $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ errechnete sich eine etwas geringere ET_c (Σ 424,2 mm), sodass die berechneten Bodenwassergehalte 'nur' auf maximal 20 % nFK abfielen. Im Vergleich mit den in rund 14-tägigem Abstand gravimetrisch ermittelten Bodenwassergehalten ist allerdings eine deutliche Überschätzung der ET_c durch die beiden Ansätze zu erkennen.

Im Gegensatz zum Ansatz $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ führte der Ansatz $ET_0 \times kc_{PEN}$ (auch 'Agrowetter') ab BBCH 12 zu einer deutlichen Unterschätzung der ET_c , sodass der Boden häufig 20 %-Punkte und mehr trockener war als kalkuliert (Abbildung 124).

Der Bodenfeuchtigkeitsgehalt der 'Praxis'-Variante wurde vom 'Agrowetter'-Modul im Gegensatz zur 'Intensiv'-Variante relativ gut prognostiziert (Abbildung 126). Die 'Kontrolle', die die Beregnungsgabe in Höhe von 20 mm am 28. Juni nicht erhielt, wurde entsprechend trockener eingeschätzt. Später wurden in dieser Variante aber jeweils sogar etwas höhere Bodenwassergehalte als in der 'Praxis'-Variante festgestellt.

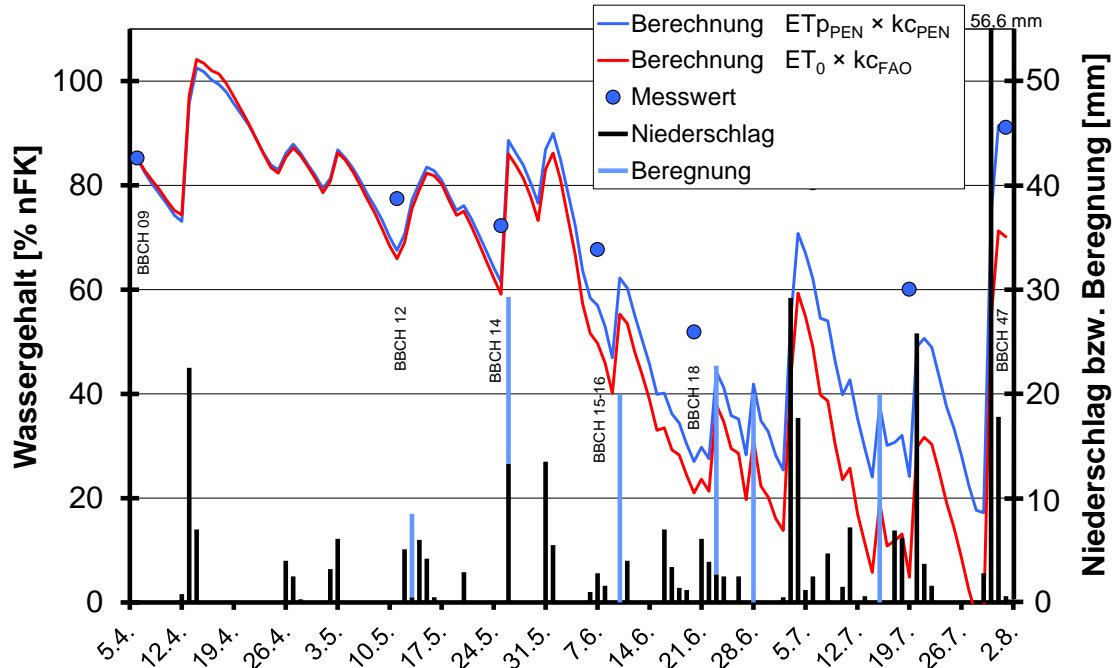


Abbildung 125: Niederschlags- und Beregnungsmengen berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]

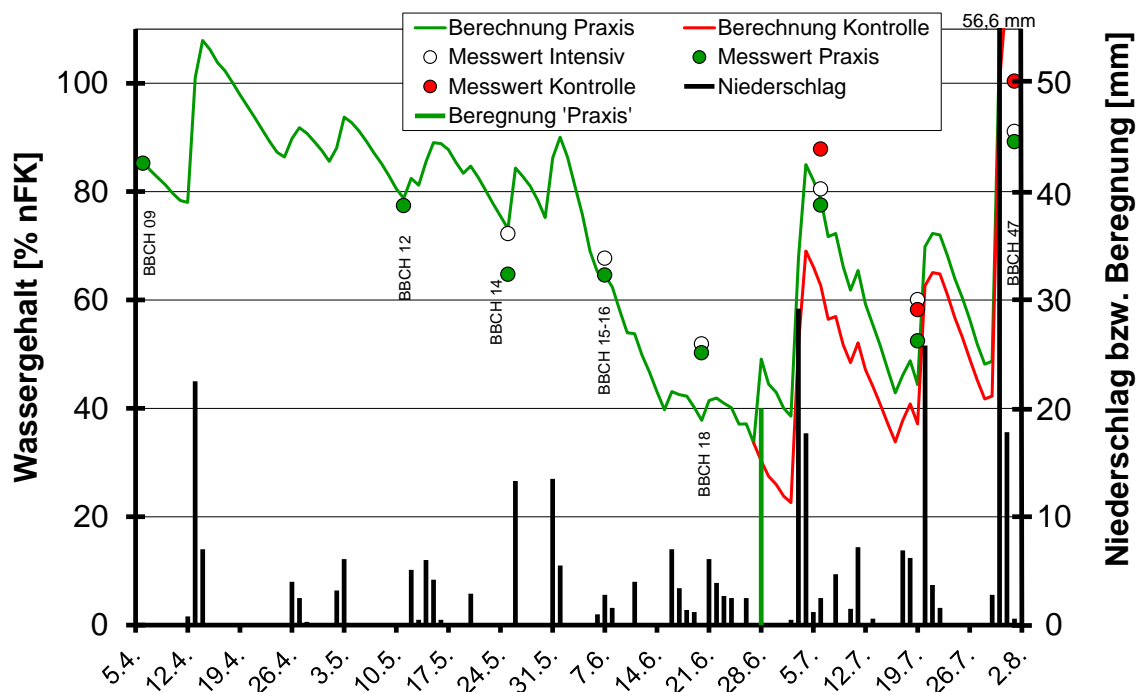


Abbildung 126: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm bei der Variante 'Praxis' bzw. 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2011]

Erstaunlicherweise lagen die gemessenen Bodenfeuchtegehalte der 'Intensiv'- und der 'Praxis'-Variante (bzw. 'Kontrolle') an 4 der 6 Untersuchungstermine auf vergleichbarem Niveau. Daraus ist zu schließen, dass die ET_c der 'Intensiv'-Variante bis zum 20. Juni (= letzter Beprobungstermin vor dem 'nivellierendem' Starkregenereignis am 3./4. Juli, BBCH 18) um ca. 44 mm (= Berechnungsmenge bis zu diesem Termin) höher lag als bei den bis dahin nicht bewässerten Varianten. 'Agrowetter' weist dagegen bis zu diesem Termin nur eine ET_c -Differenz von 3,7 mm aus (vgl. Tabelle 41a).

Trotz der an den Beprobungsterminen festgestellten ähnlichen Bodenfeuchtegehalte (aber zweifellos unterschiedlichen Mengen an transpiriertem Wasser) zeigte sich beim marktfähigen Ertrag ein signifikanter Bewässerungseffekt, wobei zwischen der 'Kontrolle' und der 'Praxis'-Variante kein signifikanter Ertragsunterschied festzustellen war (Abbildung 127). Eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung bestand nicht ($p = 0,66$). Der Mehrertrag der 'Intensiv'-Variante gegenüber der 'Kontrolle' betrug 179 dt/ha, was bei einer Wassergabe von 104 mm einem Ertragszuwachs von 172 kg/ha pro mm Wassergabe entspricht.

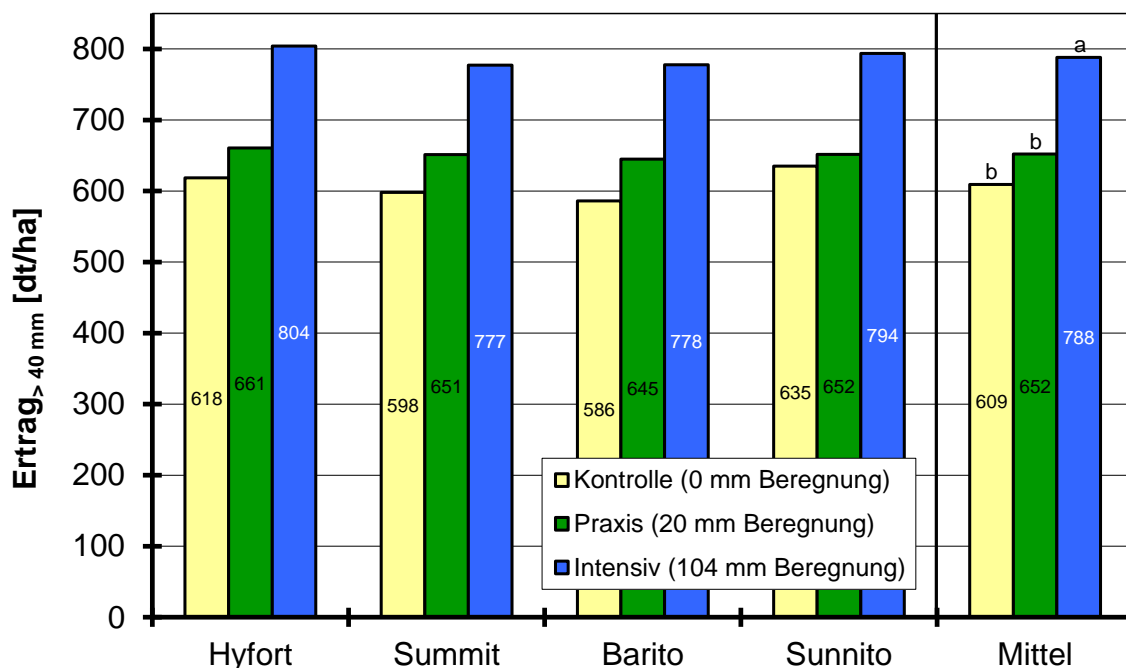


Abbildung 127: Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha < 0,05)}$ Bewässerungseffekt: 83,1 dt/ha) [**Zwiebelversuch 2011**]

Auch der Ertrag an Zwiebel der (Frischmarkt-)Sortierung 40-70 mm wurde durch die intensive Bewässerung um 109 dt/ha (Sortenmittel) signifikant erhöht (Abbildung 128). Eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung bestand auch hier nicht ($p = 0,66$).

Neben einer höheren Menge an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm beruhte der Mehrertrag der 'intensiv' bewässerten Variante auch auf einen um 70 dt/ha höheren Ertrag an Zwiebeln der Größenklasse > 70 mm (Abbildung 129). Aber auch hier war keine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung zu beobachten ($p = 0,58$). Zwiebeln < 40 mm waren kaum vorhanden, die unberegnete 'Kontrolle' wies hier aber etwas größere Mengen auf als die 'Intensiv'-Variante (Abbildung 130).

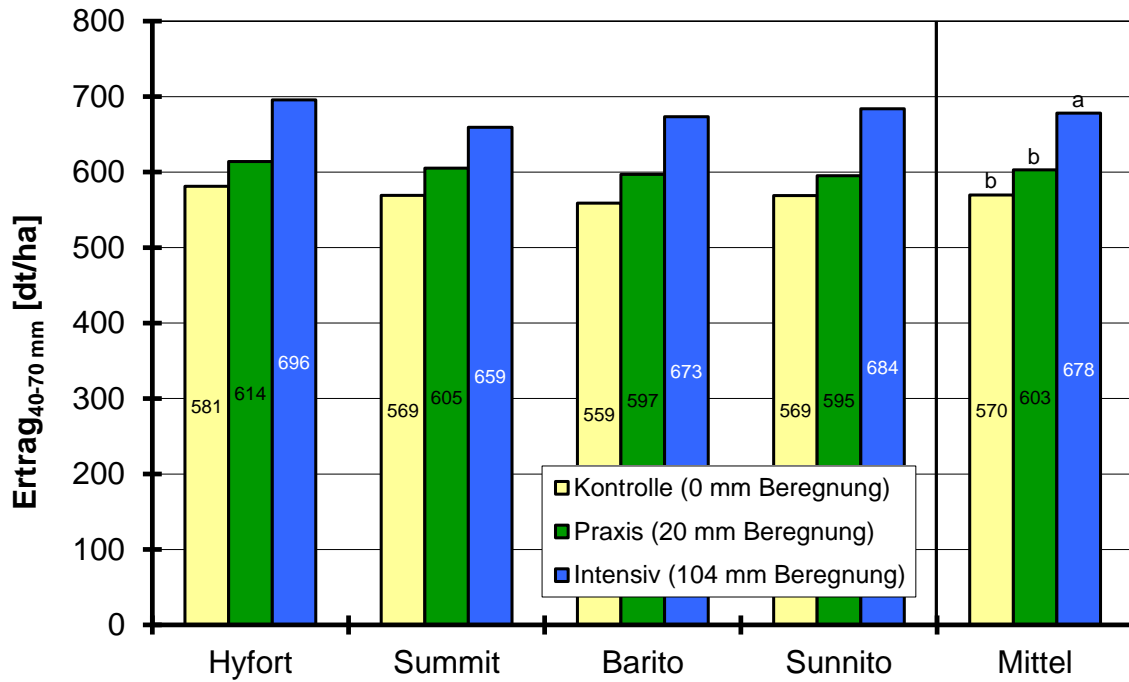


Abbildung 128: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 54,6 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]

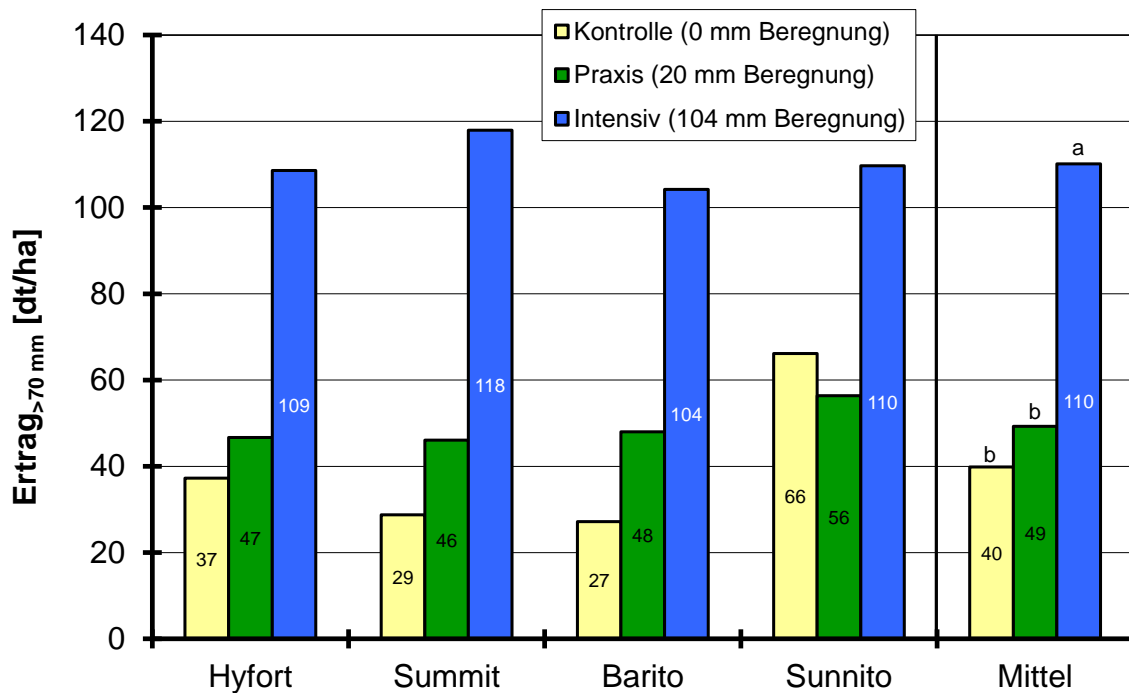


Abbildung 129: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 29,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]

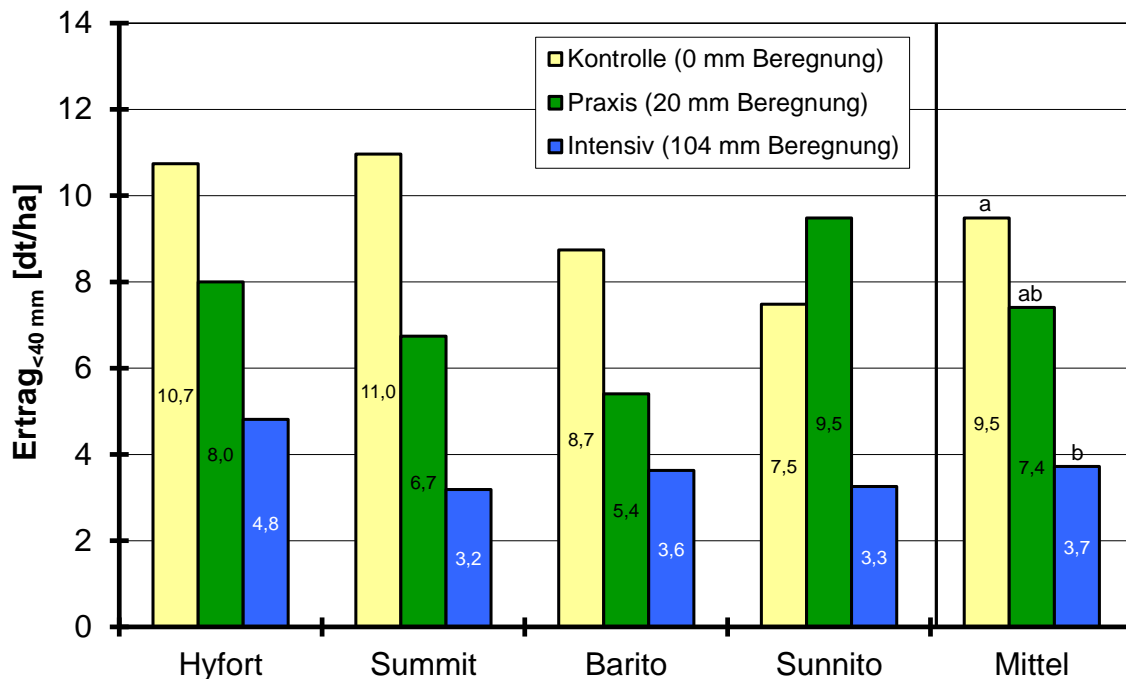


Abbildung 130: Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 4,1 dt/ha) [Zwiebelversuch 2011]

Tabelle 40: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2011]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
21. März ³⁾		alle	27,2	28,0	28,9	100	100	100
6. April ⁴⁾	09	alle	25,1	25,3	28,4	87	84	97
25. April		alle	23,2			74		
11. Mai	12	alle	22,9	25,1		72	83	
25. Mai	14	Kontrolle + Praxis	20,7	23,3		58	71	
		Intensiv	22,2	24,1		68	76	
7. Juni	15-16	Kontrolle + Praxis	20,8	23,1	26,1	59	70	84
		Intensiv	21,4	23,5	26,8	63	73	88
20. Juni	18	Kontrolle + Praxis	18,0	21,4	25,7	41	60	82
		Intensiv	18,7	21,2	25,3	45	58	79
6. Juli		Kontrolle	25,5	25,8		89	87	
		Praxis	24,5	23,5		83	72	
		Intensiv	24,8	24,1		84	76	
19. Juli		Kontrolle	18,8	23,2		46	70	
		Praxis	18,9	21,2		47	58	
		Intensiv	19,8	22,7		53	68	
1. Aug.	47	Kontrolle	27,1	28,2	30,3	99	101	108
		Praxis	26,2	25,5	27,2	94	85	90
		Intensiv	26,9	25,4	29,1	98	84	101

1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm

2) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET_0): 18.3.: +13,6; 19.3.: -0,9; 20.3.: -0,9

3) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 11,6 Vol.-%

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 41a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2011]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]					
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾	ET _{pPEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾			Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾		
				ET ₀ × k _{C PEN}	k _{C FAO}	ET _{pPEN} × k _{C PEN}	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-15	169,3	229,8	1,41	84,7	118,5	114,9	86,5		
15-18	76,9	105,5	1,39	76,9	107,7	105,5	78,3	74,6	
18-47	128,1	169,8	1,36	153,7	217,8	203,8	157,1	142,7	129,3
09-47	374,3	505,1	1,39	315,3	443,9	424,2	321,9	303,8	290,4

Tabelle 41b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2011]

Phase BBCH	Niederschlag [mm]	Beregnung [mm]		Versickerung [mm] ⁶⁾					
		Intensiv	Praxis	Geisenheim			Agrowetter		
				ET ₀ × k _{C PEN}	k _{C FAO}	ET _{pPEN} × k _{C PEN}	Intensiv	Praxis	Kontrolle
09-15	92,5	24	0	12,8	0,0		12,4	5,3	
15-18	28,1	20	0	3,7	0,0		3,9	0,0	
18-47	204,9	60	20	79,3	0,0		45,7	3,2	0,9
09-47	325,5	104	20	95,8	0,0		62,0	8,5	6,2

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (über Wasser)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration der Variante 'Intensiv' berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Zwiebelbestandes laut 'Agrowetter', bei Variante 'Intensiv' ≈ ET_c
- 6) aus der Bodenschicht 0-60 cm

4.3.3 Versuchsjahr 2012

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 angenommen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde als Mittel der mittlerweile vorliegenden 3 Untersuchungen eine FK von 27,3 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 28,1 Vol.-% (30-60 cm), im Mittel 27,7 Vol.-% errechnet (Tabelle 42).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 33 Vol.-% (Slu, Rohdichte 1,5 g/cm³) bzw. 34 Vol.-% (Ls2) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Slu: 12 Vol.-%, Ls2: 18 Vol.-%) mit 9,9 Vol.-% bzw. 14,9 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 15,3 Vol.-% errechnet.

Zum Auflauftermin der Zwiebeln (BBCH 09) wurde am 23. April ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 78 % nFK ermittelt. Ende April und um den 20. Mai herrschten mit ET_{pPEN}-Werten von bis zu 8 mm/d (vgl. Abbildung 132) und nur geringen Niederschlägen trockene Bedingungen, sodass die Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' bis zum 5-Blatt-Stadium mit insgesamt 76 mm beregnet werden musste (Abbildung 131 und Abbildung 133, Tabelle 43a). Anfang Juni füllten Niederschläge dann den Boden bis auf FK auf, nach 'Agrowetter' (mit einer etwas geringeren ET_c) kam es hier zu einer Sickerwasserbildung von rund 9 mm.

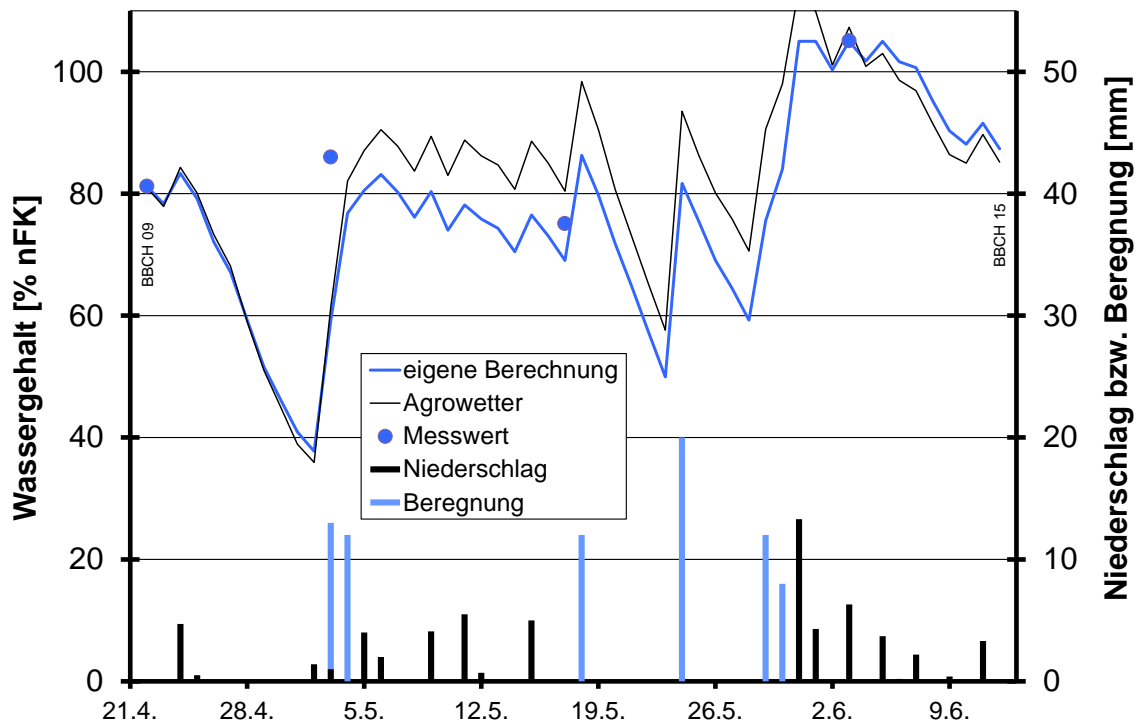


Abbildung 131: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]

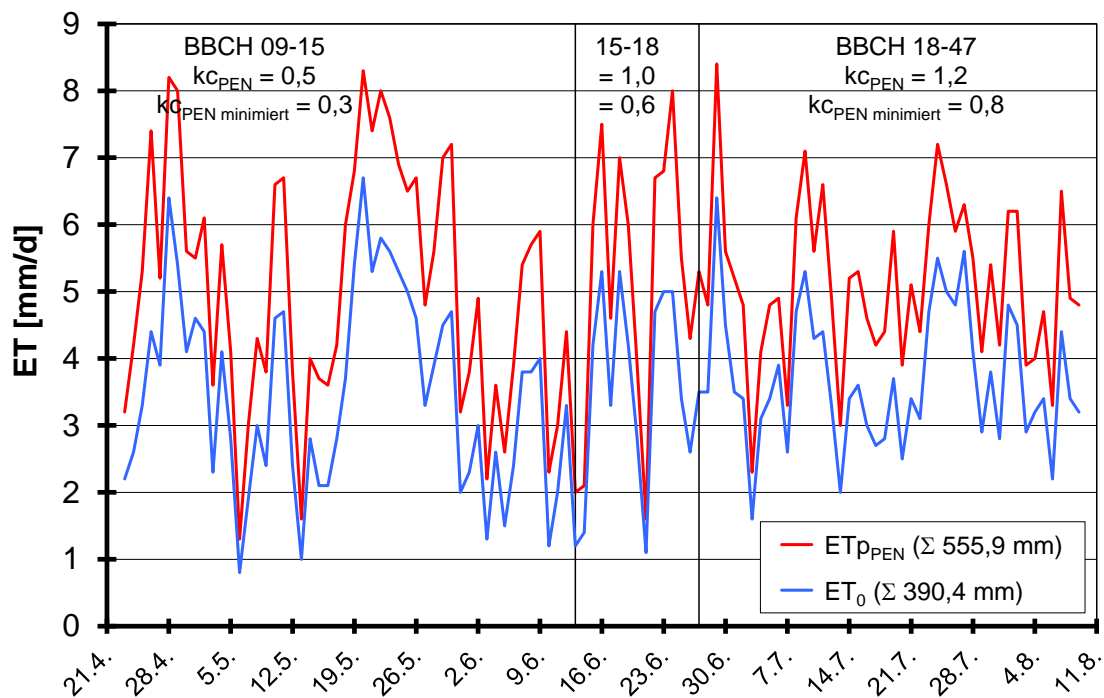


Abbildung 132: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2012]

Ab dem 5-Blatt-Stadium (13. Juni) fielen bis Mitte Juli rund 140 mm Niederschlag, sodass bei einer berechneten ET_c von knapp 190 mm nur 24 mm beregnet werden mussten (Abbildung 133). In der Zeit von Mitte Juli bis zum Schlottenknick (BBCH 47) um den 10. August fiel dann mit 29,7 mm nur wenig Niederschlag. Bei einer ET_c von 153,8 mm mussten so nach dem 'Geisenheimer Modell' 144 mm beregnet werden. Insgesamt wurde die Variante 'Intensiv' mit 244 mm beregnet. 'Agrowetter' berechnete für Zeitraum BBCH 18 bis 47 eine ET_c von 223,1 mm ('Geisenheim': 270,6 mm) und errechnete bei den gegebenen Niederschlags- und Beregnungsmengen eine Bodenfeuchte, die häufig die FK überschritt, sodass rund 42 mm als versickert angenommen wurden.

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' eine ET_c von 471,8 mm. Obgleich 'Agrowetter' die ET_c auf Basis der hier um Faktor 1,46 (vgl. Tabelle 43a) geringeren FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) berechnet, kam das Modell mit 397,0 mm zu einer nur um Faktor 1,19 geringeren ET_c , was auf die 'Windkorrektur' zurückzuführen ist.

Entsprechend der ET_c -Differenz von 74,8 mm drifteten die berechneten Bodenfeuchtegehalte der Variante 'Intensiv' bei den beiden Modellen zunehmend auseinander. Nur zum Ende des Berechnungszeitraumes 'pendelte' sich die Differenz auf einen Wert von knapp 25 %-Punkte nFK ein, weil die sich nach 'Agrowetter' ergebende Sickerung (Σ 52,1 mm) als weitere Verlustgröße für das Bodenwasser größere Bedeutung gewann. Gegen eine Versickerung zu Kulturende spricht allerdings, dass der Bodenfeuchtegehalt der Schicht 30-60 cm zu diesem Zeitpunkt nur 55 % der nFK betrug (Tabelle 42).

Im Vergleich mit den tatsächlich ermittelten Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt vom 'Geisenheimer Modell' über einen langen Zeitraum recht gut abgebildet. Lediglich zu Kulturende hin stieg die Differenz zwischen berechnetem und tatsächlichem Bodenwassergehalt auf über 20 %-Punkte nFK an.

Für die nur moderat mit 92 mm beregnete Variante 'Minimiert' berechnete 'Agrowetter' Bodenwassergehalte von kurzzeitig unter 40 % nFK (Abbildung 134). (Weil hier in der letzten Beregnungsperiode die Wassergaben aus Kapazitätsgründen parallel mit denen der 'Intensiv'-Variante verabreicht wurden, fiel der Wassergehalt meist nicht unter 70 % nFK ab.) Die tatsächlichen Bodenwassergehalte lagen um bis zu 20 %-Punkten über den von 'Agrowetter' berechneten Werten.

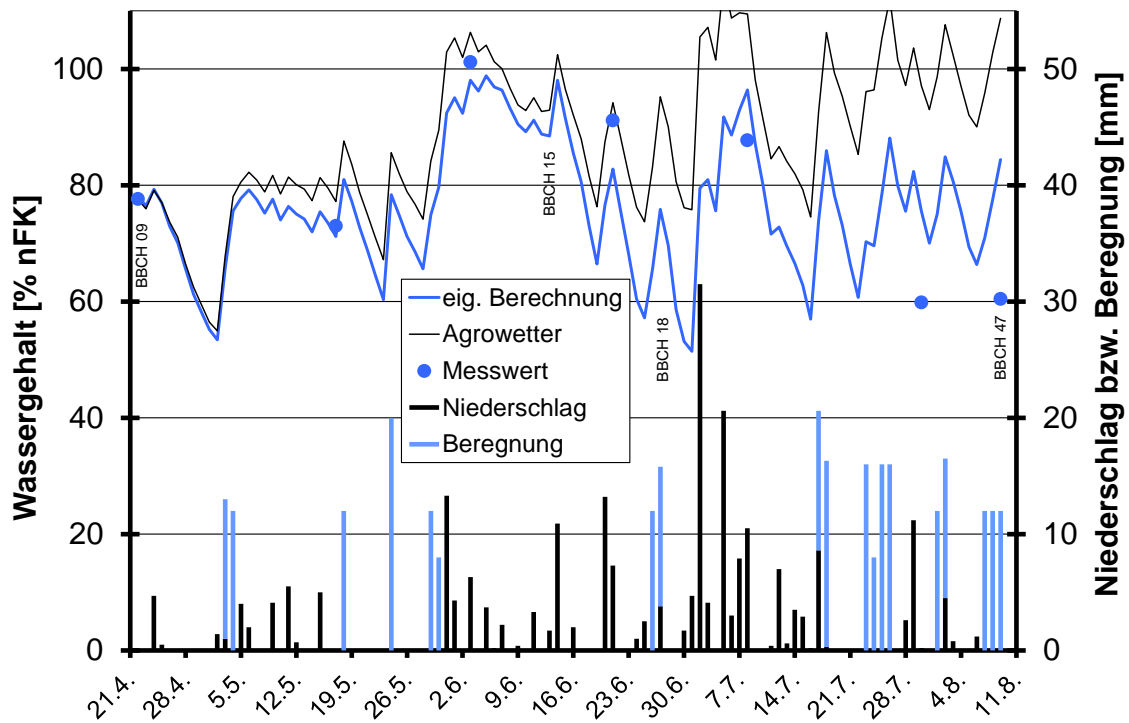


Abbildung 133: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]

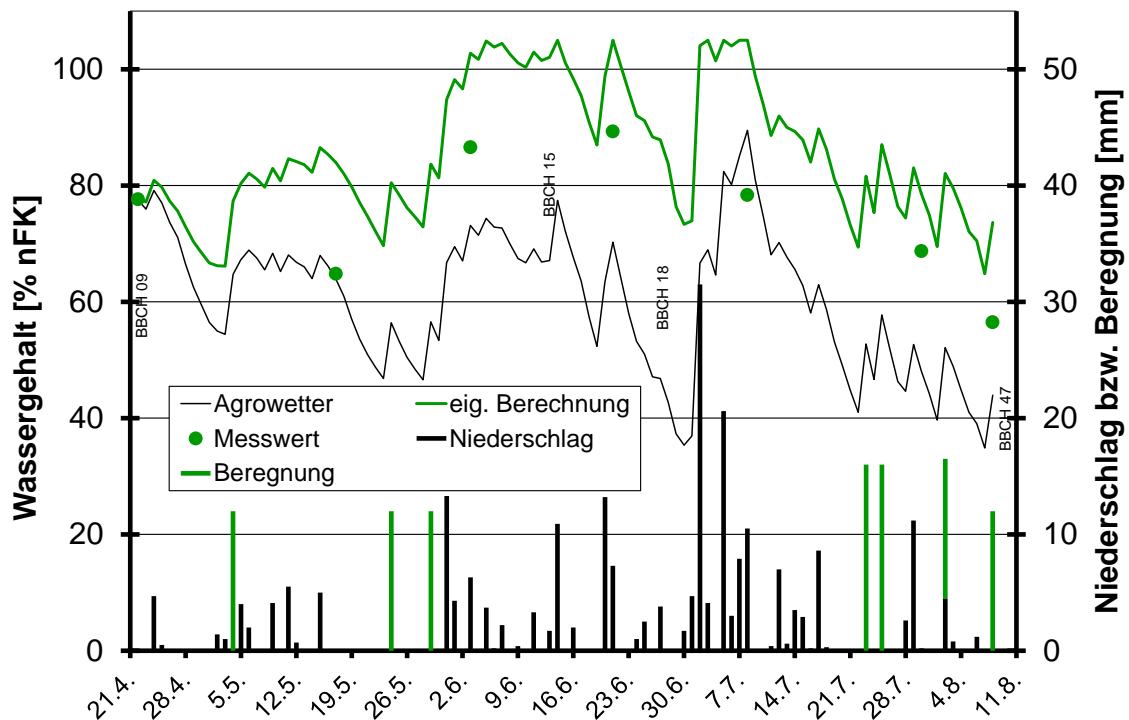


Abbildung 134: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN \text{ minimiert}}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]

In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach 'Agrowetter' zu Kulturende bis auf annähernd 20 % nFK aus. Tatsächlich wurde hier auch ein Bodenwassergehalt von 30 % nFK ermittelt (Abbildung 135). Allerdings wurde insbesondere in der Kulturmitte der Bodenwassergehalt durch das Modell massiv unterschätzt. Damit bildete 'Agrowetter' den Bodenwassergehalt in den nur mäßig oder gar nicht bewässerten Varianten deutlich schlechter ab als in den Vorversuchen.

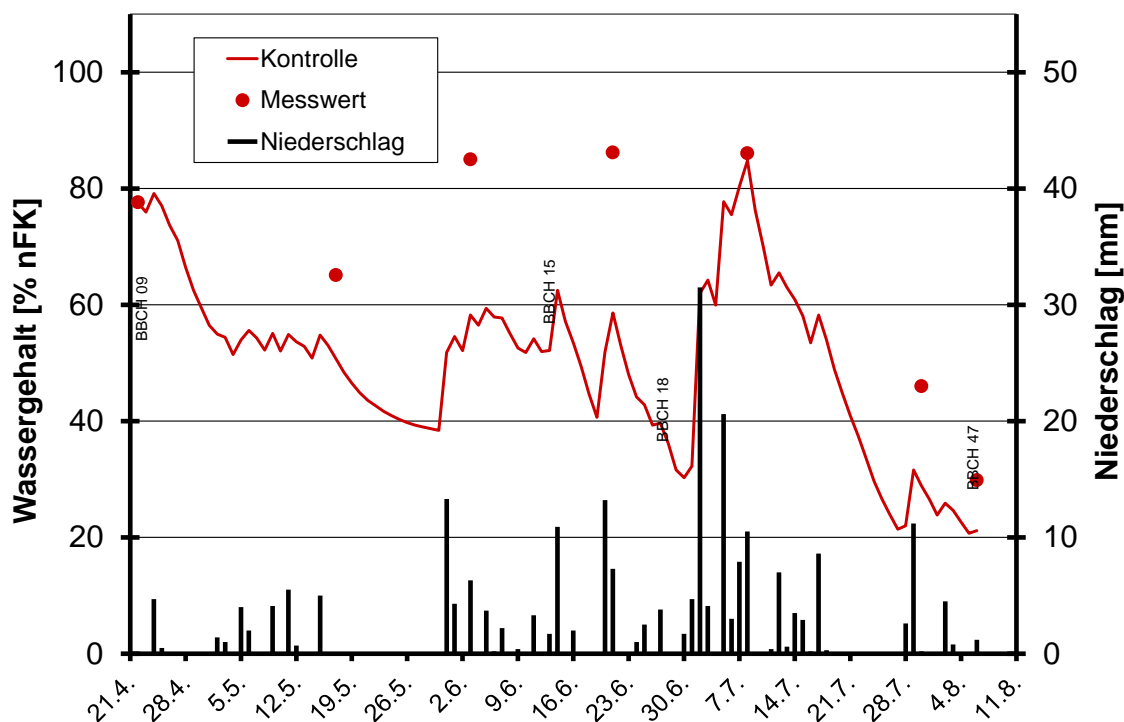


Abbildung 135: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2012]

Wie schon im Vorjahresversuch lagen die gemessenen Bodenwassergehalte der drei Varianten lange Zeit auf vergleichbarem Niveau (Abbildung 136). Nur die 'Kontrolle' fiel zu Kulturende hin deutlich ab und wies auch in der Schicht 60-90 cm mit 42 % nFK einen geringeren Wassergehalt als die beiden bewässerten Varianten auf, bei denen diese Schicht auf Ausgangsniveau lag (Tabelle 42).

Die nahezu identischen Wassergehalte am 21. Juni deuten darauf hin, dass die bis dahin in der Variante 'Intensiv' verabreichten 76 mm Beregnung ('Minimiert': 36 mm) in erster Linie durch eine verstärkte Evaporation (Bodenoberfläche durch Beregnung häufiger/länger feucht) und evtl. auch Versickerung 'verloren' gegangen sind. (Inwieweit die feuchtere Bodenoberfläche und die damit verbundene höhere Luftfeuchtigkeit und Kühlung ertragswirksam wurden, bleibt offen.)

Entsprechend der zu Kulturende hin abfallenden Bodenfeuchtegehalte zeigte die 'Kontrolle' den geringsten marktfähigen Ertrag (Zwiebeln > 40 mm). Zwischen den Varianten 'Intensiv' und 'Minimiert' konnte kein signifikanter Ertragsunterschied festgestellt werden (Abbildung 137). Eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung konnte beim Gesamtertrag nicht festgestellt werden ($p = 0,26$). (Bei allen untersuchten Parametern wurden auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.)

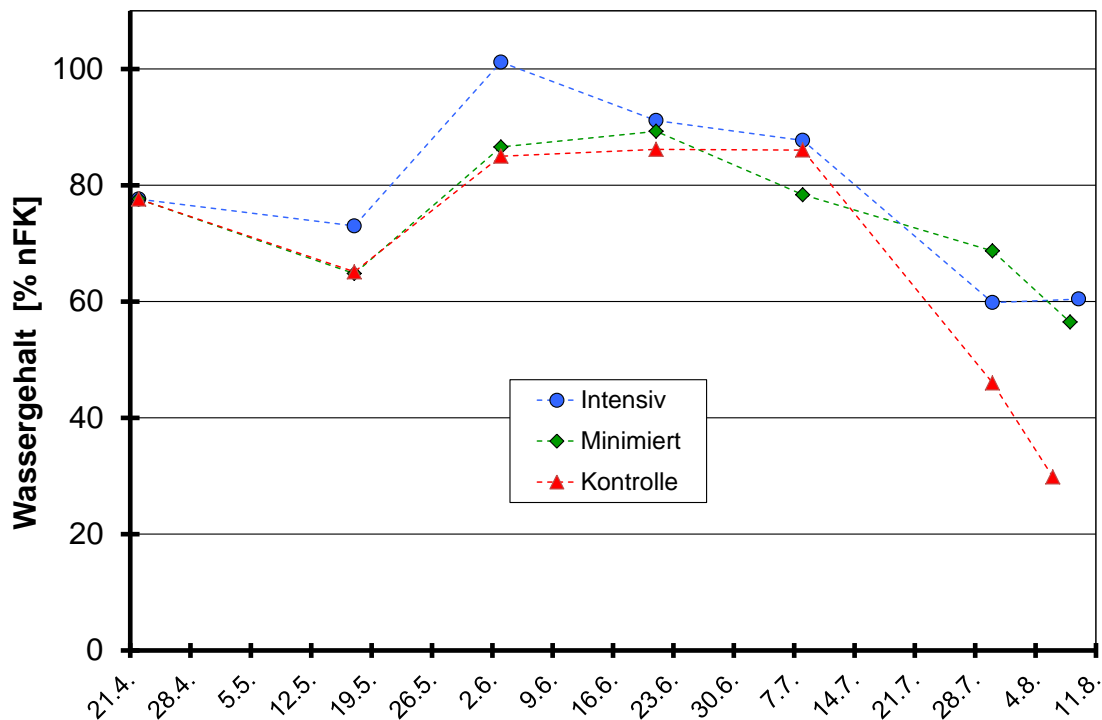


Abbildung 136: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Zwiebelversuch 2012]

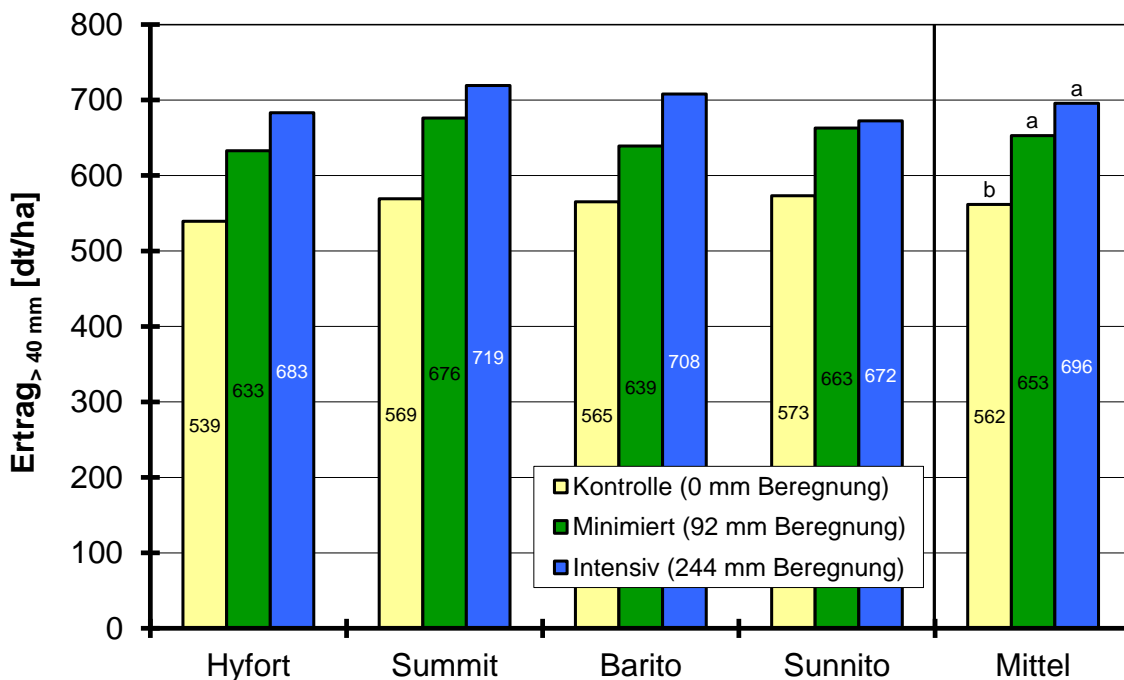


Abbildung 137: Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 74,2 dt/ha) [Zwiebelversuch 2012]

Der Mehrertrag der 'Intensiv'-Variante gegenüber der 'Kontrolle' betrug 134 dt/ha, was bei einer Wassergabe von 244 mm einem Ertragszuwachs von 55 kg/ha pro mm Wassergabe entspricht. Für die Variante 'Minimiert' errechnet sich ein Ertragszuwachs von 99 kg/ha pro mm.

Der Ertrag an Zwiebel der (Frischmarkt-)Sortierung 40-70 mm wurde durch die Beregnung im Mittel über die Sorten nicht deutlich beeinflusst (Abbildung 138). Es bestand allerdings eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung, wobei 'Hyfort' und 'Sunnito' einen signifikanten Mehrertrag durch die 'Minimiert'-Beregnung gegenüber der 'Kontrolle' zeigten. Bei 'Barito' war durch die 'Intensiv'-Beregnung eine Abnahme an Zwiebeln dieser Größenklasse zu verzeichnen.

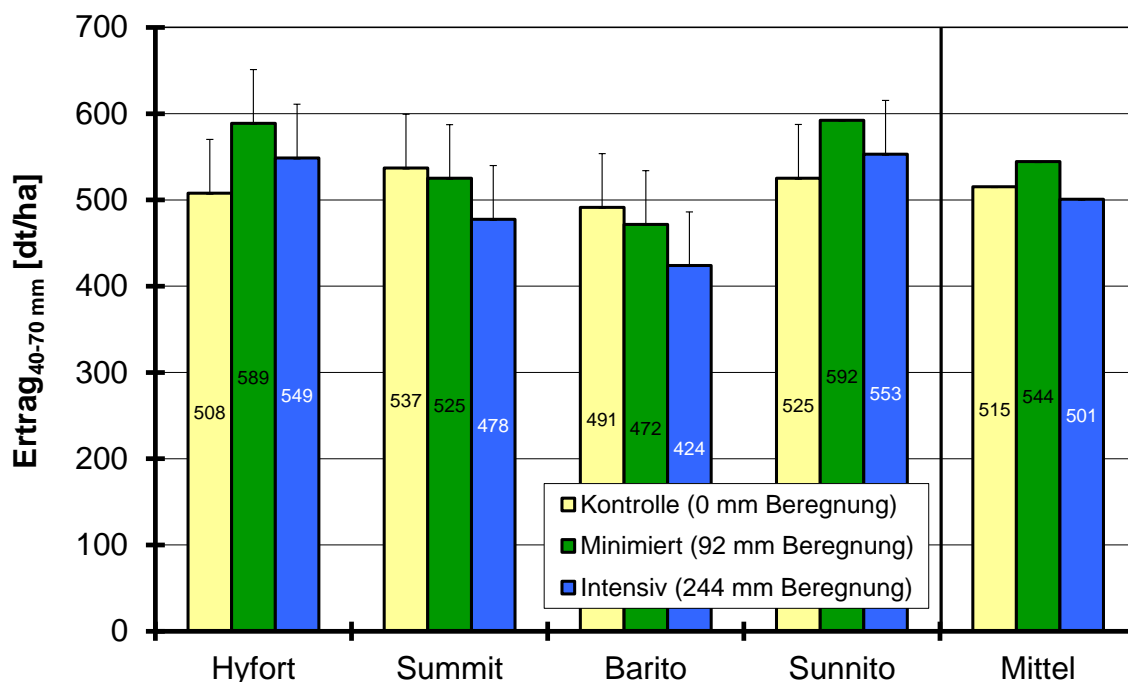


Abbildung 138: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerung x Sorte: 62,3 dt/ha = 1) [Zwiebelversuch 2012]

Diese, tendenziell auch bei den anderen Sorten feststellbare Abnahme an Zwiebeln der Klasse 40-70 mm ging einher mit einer sehr starken Zunahme an Zwiebel > 70 mm (Abbildung 139), wobei hier 'Summit' und 'Barito' die stärkste Zunahme zeigten (signifikante Wechselwirkung). Diese Wechselwirkungen beruhen aber vermutlich 'nur' auf eine bei den Sorten unterschiedlichen Sortierung innerhalb der Größenklasse 40-70 mm, sodass bei einer Zusatzbewässerung und der damit verbundenen Massezunahme die Zwiebeln je nach Sorte zu unterschiedlichen Anteilen in die nächst höhere Größenklasse > 70 mm fielen und sich damit entsprechend geringere Mengen in der Klasse 40-70 mm befanden.

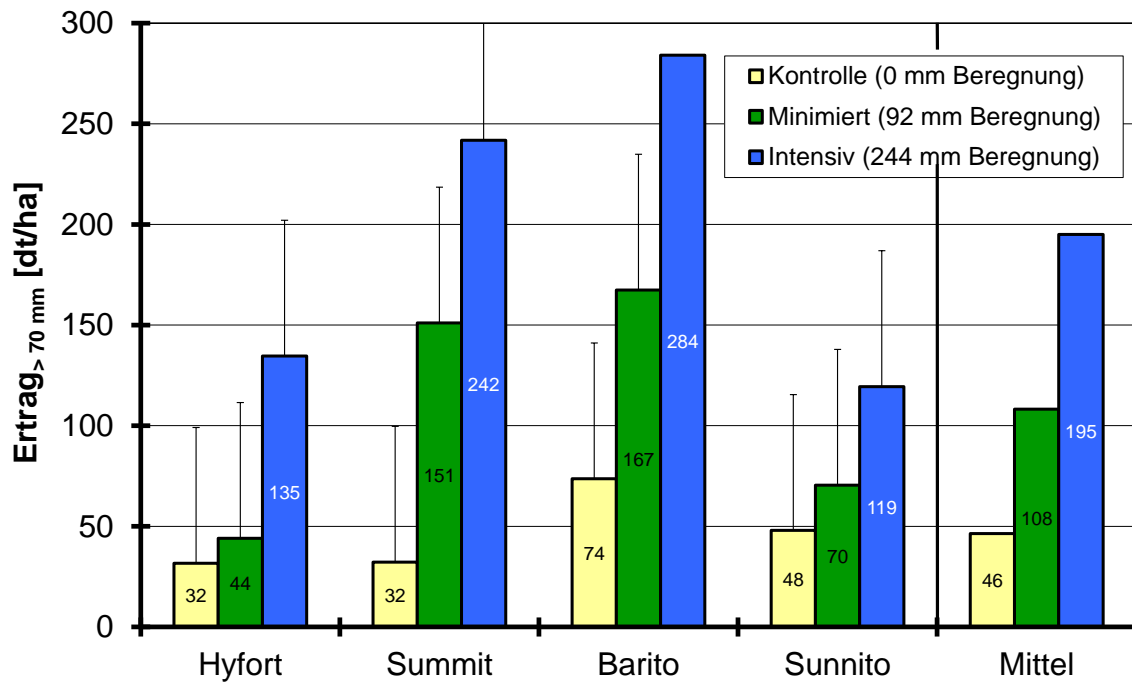


Abbildung 139: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 49,9 dt/ha; Bewässerung x Sorte: 67,5 dt/ha = I) [Zwiebelversuch 2012]

Insgesamt wurden nur relativ geringe Mengen an Zwiebeln < 40 mm Durchmesser geerntet, wobei diese Menge durch eine Beregnung signifikant von 14 dt/ha ('Kontrolle') auf 9 dt/ha ('Minimiert') bzw. 8 dt/ha ('Intensiv') vermindert wurde (Abbildung 140).

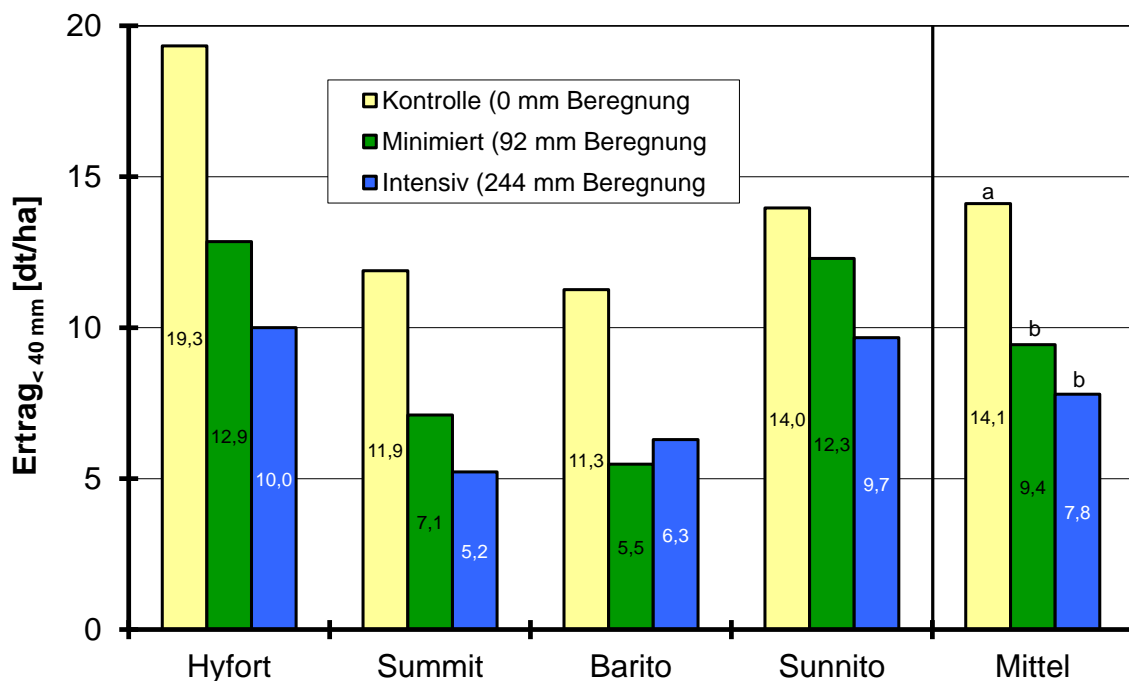


Abbildung 140: Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 3,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2012]

Bei dem an der Größenklasse 40-70 mm ermitteltem Trockensubstanzgehalt zeigte sich kein auffälliger Bewässerungseinfluss (Abbildung 141).

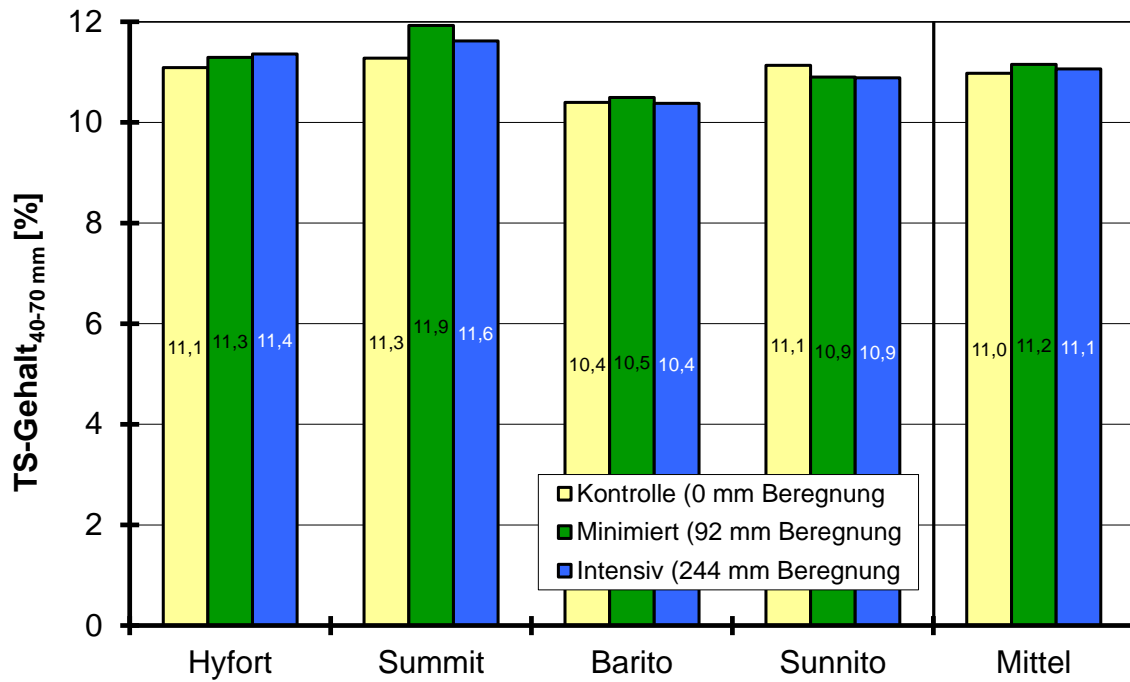


Abbildung 141: Trockensubstanzgehalt der Zwiebeln (Sortierung 40-70 mm) in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mischproben über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2012]

Tabelle 42: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2012]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
5. Februar ³⁾		alle	26,1	28,3	28,1			
Mittel ⁴⁾		alle	27,3	28,1	28,6	100	100	100
22. April ⁵⁾	09	alle	24,0	24,7	24,7	81	74	73
3. Mai		Intensiv	24,9			86		
		Minimiert+Kontrolle	20,7			62		
17. Mai		Intensiv	23,0	24,2		75	71	
		Minimiert	21,8	23,0		68	61	
		Kontrolle	21,3	23,5		65	65	
03. Juni		Intensiv	28,2	27,7		105	97	
		Minimiert	27,4	24,5		101	73	
		Kontrolle	25,6	25,4		90	80	
21. Juni		Intensiv	26,5	26,3		96	87	
		Minimiert	26,4	25,9		95	84	
		Kontrolle	25,2	26,0		88	84	
08. Juli		Intensiv	25,4	26,3		89	87	
		Minimiert	25,2	24,0		88	69	
		Kontrolle	25,1	26,1		87	85	
30. Juli		Intensiv	20,4	22,7		60	60	
		Minimiert	22,3	23,7		71	66	
		Kontrolle	22,1	17,7		70	22	
06. Aug.	47	Kontrolle	16,0	18,1	20,4	35	25	42
08. Aug.		Minimiert	19,9	22,2	27,0	58	55	88
09. Aug.		Intensiv	21,3	22,2	24,3	65	55	70

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 9,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,9 Vol.-% (30-60 cm), 14,3 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) aktuelle Bestimmung der FK
- 4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2012)
- 5) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 43a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2012]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]			
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾ [mm]	ET _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET _{PEN} × kc _{PEN} Intensiv	Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN} Intensiv Minimiert Kontrolle		
09-15	178,1	258,4	1,50	129,2	115,8	108,5	86,0
15-18	49,5	72,0	1,48	72,0	58,1	56,4	49,9
18-47	162,8	225,5	1,40	270,6	223,1	190,4	147,9
09-47	390,4	555,9	1,46	471,8	397,0	355,3	283,8

Tabelle 43b: Niederschläge, Berechnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2012]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Berechnung [mm]		Geisenheim $ET_{PEN} \times k_{PEN}$ Intensiv	Versickerung [mm] ⁷⁾		
		Intensiv	Minimiert		Agrowetter ($ET_0 \times w_{fak}$) $\times k_{PEN}$		Kontrolle
					Intensiv	Minimiert	
09-15	63,0	76	36	0,0	9,3	0,0	0,0
15-18	38,7	12	0	0,0	1,2	0,0	0,0
18-47	131,9	156	56	0,0	41,6	0,0	0,0
09-47	233,6	244	92	0,0	52,1	0,0	0,0

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle 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

4.3.4 Versuchsjahr 2014

Aufgrund ausbleibender ergiebiger Niederschläge ausgangs des Winters (Monatssummen Januar bis April max. 17,2 mm) konnte die FK der Versuchsfläche nicht aktuell bestimmt werden. Daher konnte der mittlere Wert der vorliegenden 4 Untersuchungen aus den Jahren 2010-2013 mit einer FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,9 Vol.-% (30-60 cm) nicht um eine aktuelle Messung erweitert werden (Tabelle 44).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 34 Vol.-% (Ls2) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-60 cm) zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%) mit 14,4 Vol.-% bzw. 14,8 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-60 cm eine mittlere nFK von 13,0 Vol.-% errechnet.

Zum Auflauffertermin der Zwiebeln (BBCH 09) am 9. April wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 69 % nFK ermittelt. Bis etwa Mitte Mai herrschten relativ trockene Witterungsbedingungen, sodass die Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' bis zu diesem Termin mit insgesamt 32 mm berechnet werden musste. (Abbildung 142, Tabelle 45b). Stärkere Niederschläge Ende Mai füllten den Boden bis in 60 cm Tiefe auf FK auf (vgl. Abbildung 144) und es kam (rechnerisch) zu einer Sickerwasserbildung von 15,6 mm (Tabelle 45b). Die Variante 'Minimiert' musste bis zum 5-Blatt-Stadium nicht bewässert werden (o. Abbildung).

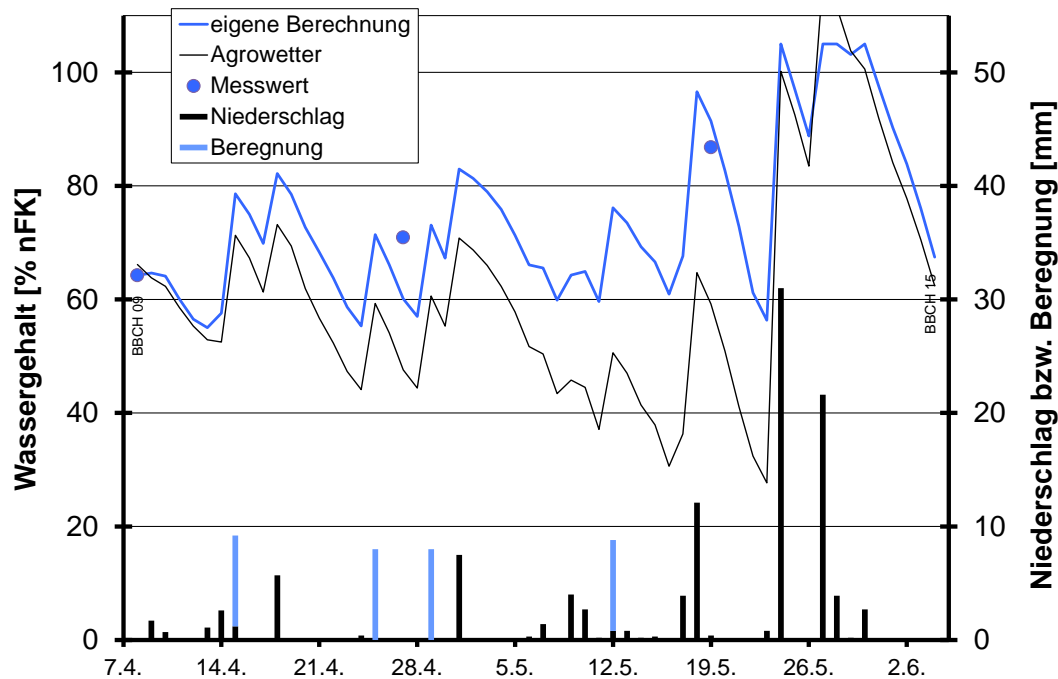


Abbildung 142: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Variante 'Intensiv' bis zum 5-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014]

Zwischen dem 5-Blatt- und 8-Blatt-Stadium (5.-19. Juni) fielen praktisch keine Niederschläge, sodass die Variante 'Intensiv' mit 78 mm bewässert werden musste (Abbildung 144). Aufgrund angekündigter Niederschläge wurde um den 6. Juli trotz Absinkens der Bodenwassergehalte auf unter 60 % nFK auf Beregnungsgaben verzichtet, intensive Niederschläge am 8. Juli füllten dann den Boden bis auf 90 % nFK auf. Insgesamt mussten in der Hauptwachstumsphase (8-Blatt-Stadium bis Beginn Schlottenknick) 188 mm beregnet werden, die Gesamt-Beregnungsmenge belief sich auf 298 mm.

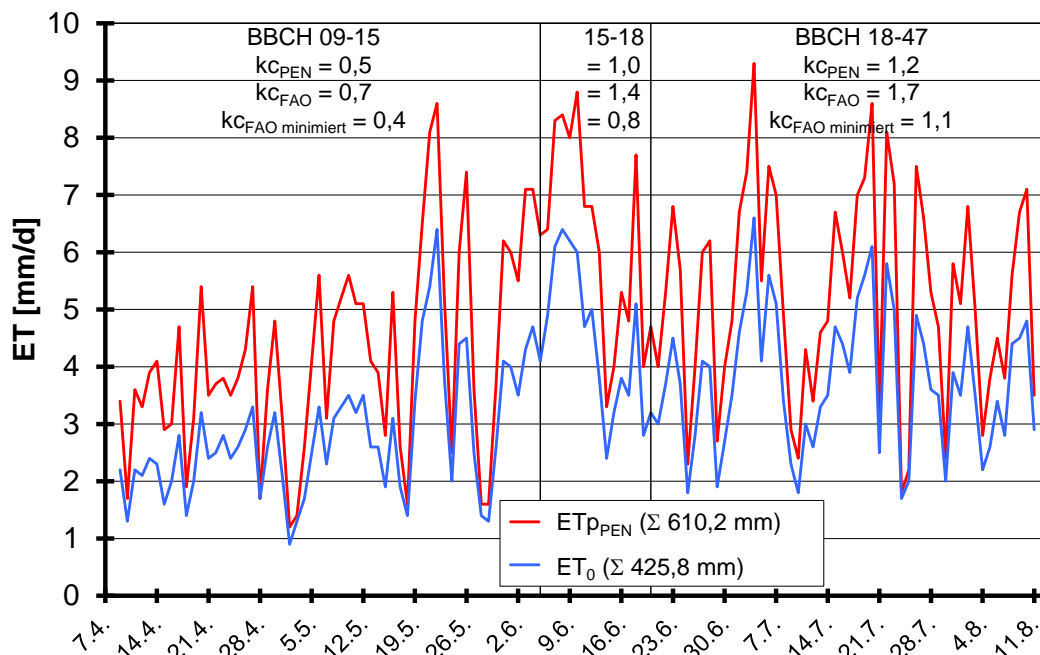


Abbildung 143: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Zwiebelversuch 2012]

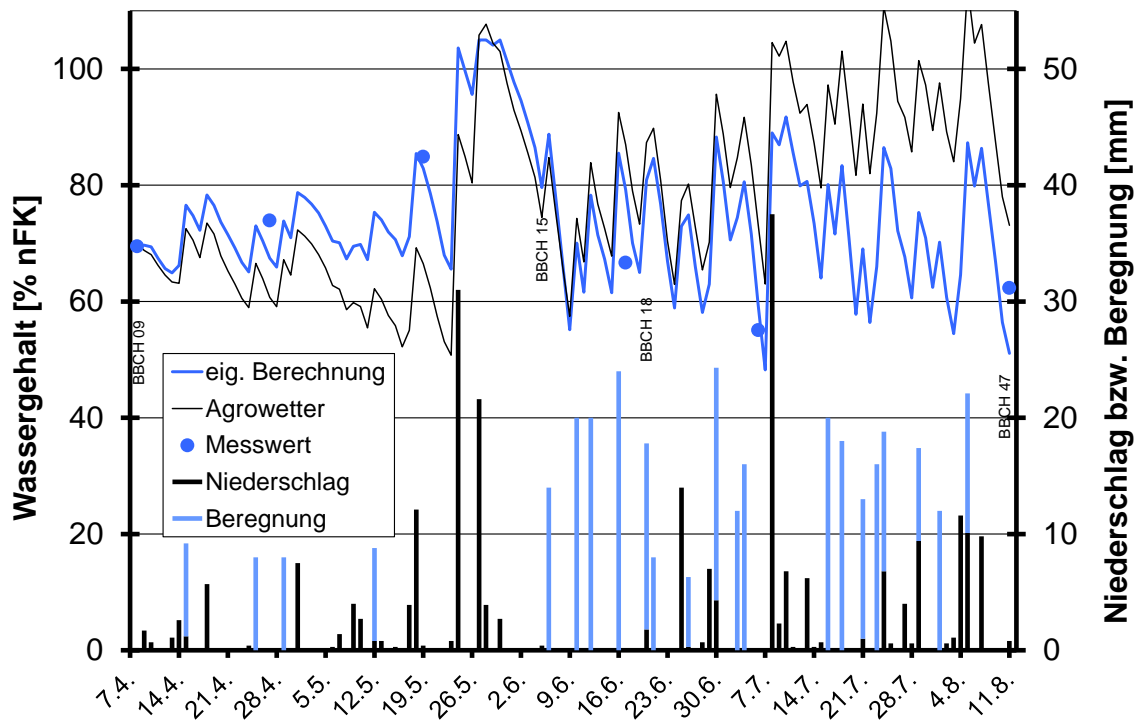


Abbildung 144: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Intensiv' auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$ bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014]

Für die gesamte Kulturzeit errechnete sich für die Variante 'Intensiv' nach 'Geisenheim' eine ET_c von 544,3 mm. Zu einem nahezu identischen Ergebnis (546,8 mm) kommt man, wenn man die ET_c auf Basis der PENMAN-Verdunstungswerte und den entsprechenden kc_{PEN} -Werten (FA-GM 2013b) berechnet. Auch die Versickerung fiel mit 15,6 (ET_0) bzw. 9,7 mm (ET_{PEN}) ähnlich aus (Tabelle 45a u. b).

'Agrowetter' berechnete für die erste Phase (BBCH 09-15) mit 124,7 mm eine etwas höhere Evapotranspiration als das 'Geisenheimer Modell' (111,4 mm), sodass die von den beiden Modellen berechneten Bodenfeuchtegehalte etwas auseinander liefen. Stärkere Niederschläge Ende Mai mit Auffüllung auf FK führten dann beide Modelle wieder zusammen. In der Phase BBCH 18-47 berechnete 'Agrowetter' mit 302,8 mm eine geringere Evapotranspiration als 'Geisenheim' (337,6 mm), sodass die von den beiden Modellen berechneten Bodenfeuchtegehalte wiederum, nun aber entgegengesetzt, auseinander liefen.

Im Vergleich mit den gemessenen Bodenwassergehalten wurde der Bodenwassergehalt vom 'Geisenheimer Modell' zumeist sehr gut abgebildet, 'Agrowetter' unterschätzte (1. Phase) bzw. überschätzte die Bodenwassergehalte relativ stark.

Für die Variante 'Minimiert' errechnete sich bei einer ET_c von insgesamt 336,5 mm ein Zusatzwasserbedarf von 120 mm (inklusive 4 mm-Wassergabe am 29. April). Um den 27. Mai kam es nach der Rechnung zu einer Sickerwasserbildung von 29,2 mm (Abbildung 145, Tabelle 45a und b). Die in der zweiten Kulturhälfte gezogenen Bodenproben wiesen bis zu knapp 20 %-Punkten geringere Wassergehalte als die Kalkulation auf Basis der minimierten kc -Werte aus. 'Agrowetter' berechnete für diese Bewässerungsvariante Bodenwassergehalte, die zunächst deutlich unter den gemessenen Werten lagen. Bei den beiden letzten Messungen lag die Unterschätzung nur noch bei rund 10 bzw. 20 %-Punkten.

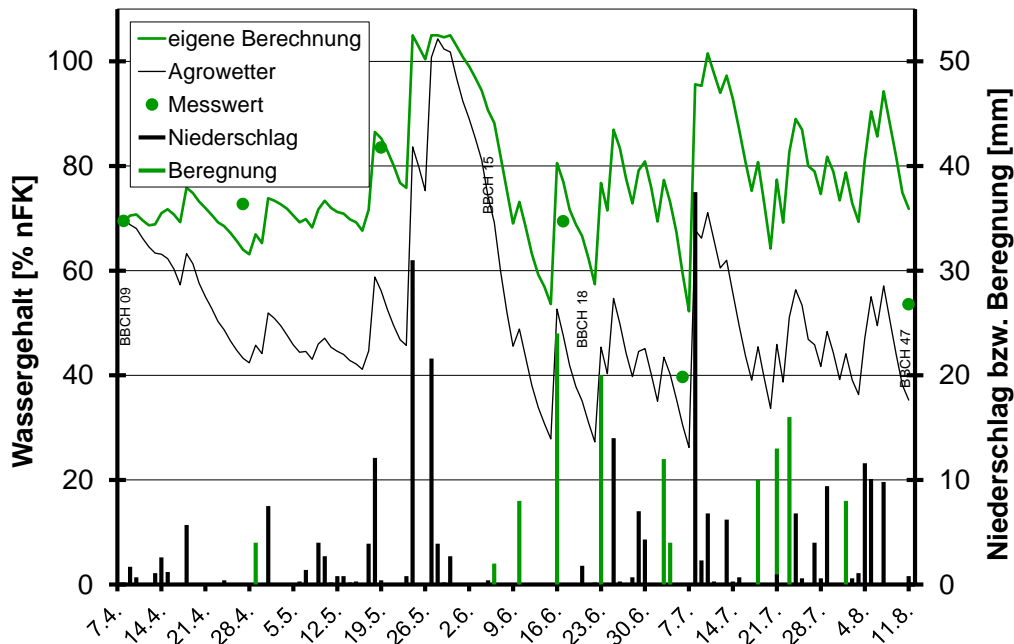


Abbildung 145: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der Variante 'Minimiert' auf Basis $ET_0 \times k_{cFAO}$ minimiert bzw. 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014]

In der 'Kontrolle' trocknete der Boden nach dem 'Agrowetter'-Modell zu Kulturende bis auf annähernd 26 % nFK aus, tatsächlich wurde hier auch ein Bodenwassergehalt von 27 % nFK ermittelt (Abbildung 146). Ähnlich wie im Vorjahresversuch wurde der Bodenwassergehalt zu Kulturbeginn aber deutlich unterschätzt, die stärkeren Niederschläge Ende Mai führten dann aber Modellrechnung und Realität (gemessener Bodenwassergehalt am 19. Mai bereits 84 % nFK) mit Überschreitung der FK wieder zusammen.

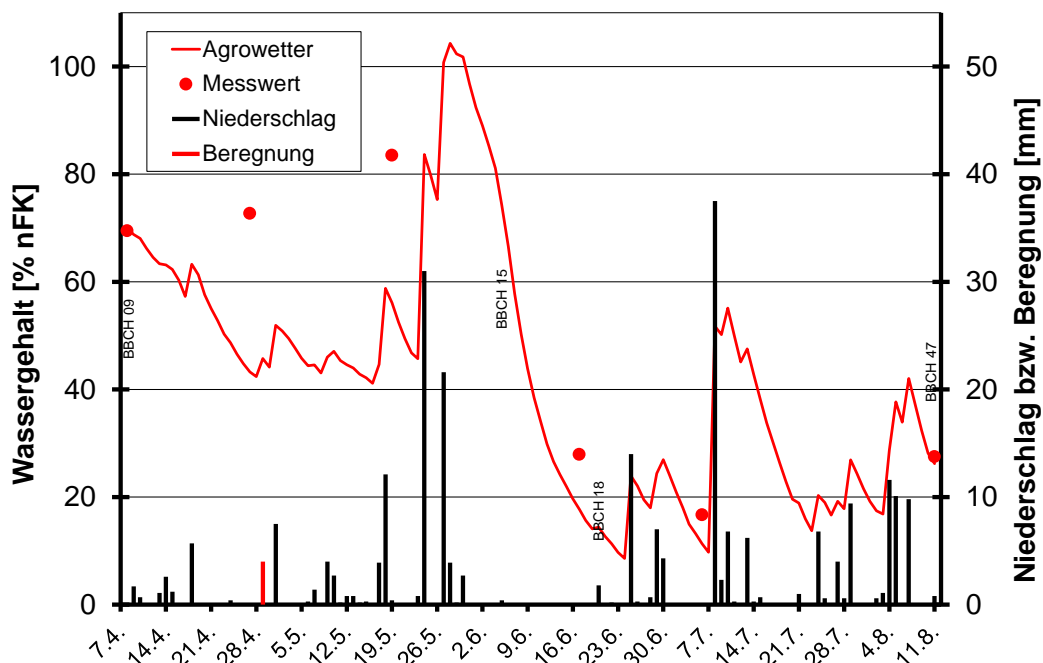


Abbildung 146: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Zwiebelversuch 2014]

Anders als in den Vorversuchen fielen die gemessenen Bodenwassergehalte in der 'Kontrolle' bereits ab etwa Kulturmitte deutlich ab (Abbildung 147). Im letzten Kulturdrittel wurden auch in der Variante 'Minimiert' Wassergehalte von deutlich unter 60 % nFK gemessen. Diese stärkere Unterschreitung des kritischen Schwellenwertes dürfte aber jeweils nur von kurzer Dauer gewesen sein, weil die Beprobungen am 6. Juli und zum 11. August jeweils bei (kalkulierten) relativ trockenen Bodenbedingungen durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 145).

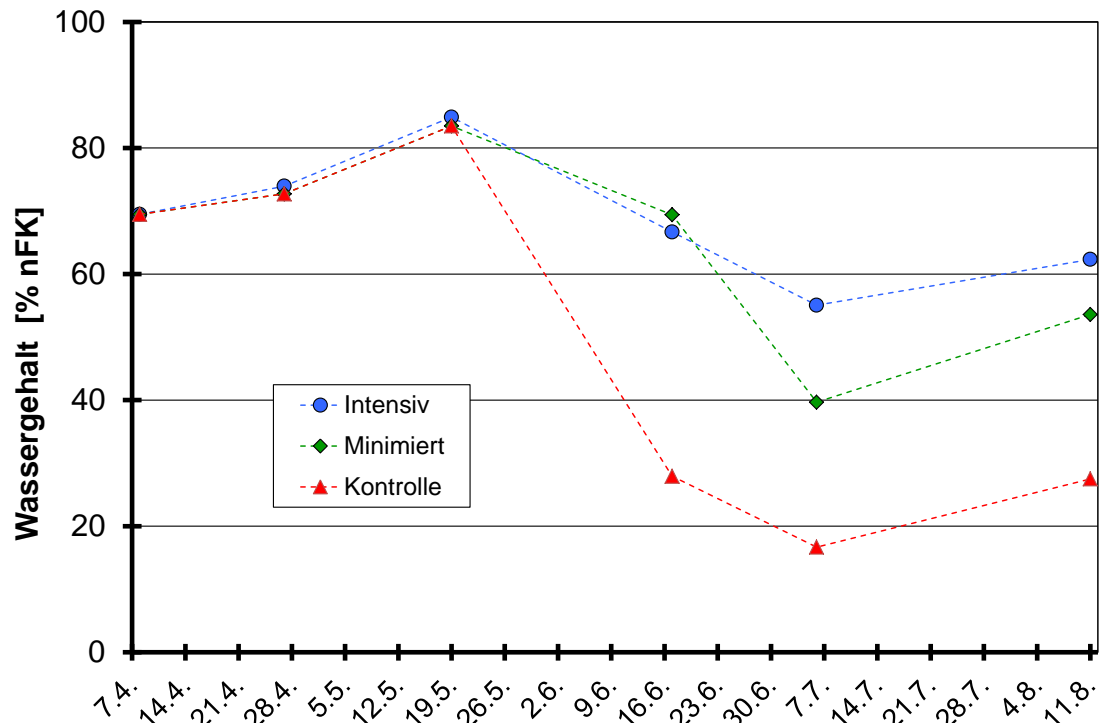


Abbildung 147: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitlichen Wassergehalte wieder) **[Zwiebelversuch 2014]**

Entsprechend der deutlich zu geringen Bodenwassergehalte in der zweiten Kulturhälfte zeigte die 'Kontrolle' den geringsten marktfähigen Ertrag (Zwiebeln > 40 mm). Zwischen den Varianten 'Intensiv' und 'Minimiert' konnte kein signifikanter Ertragsunterschied festgestellt werden (Abbildung 148).

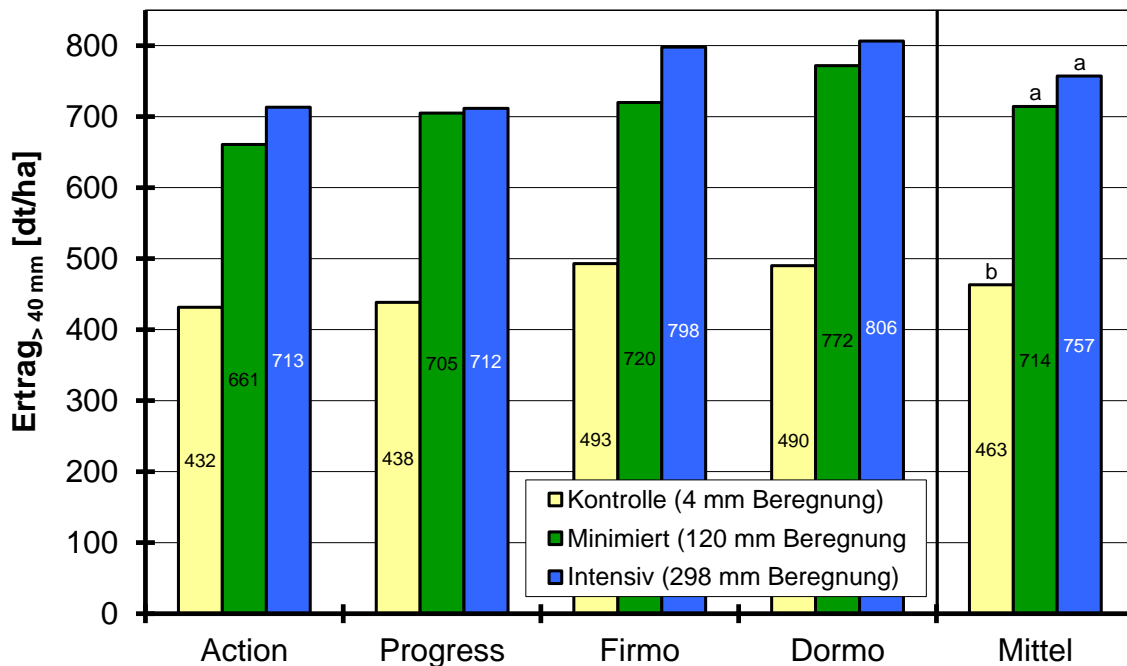


Abbildung 148: Marktfähiger Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 77,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014]

Eine Wechselwirkung zwischen Sorte und Bewässerung konnte, wie auch bei den anderen erfassten Ertragsparametern (s. u.), nicht festgestellt werden. (Beim Gesamtertrag, bei der Menge an Zwiebeln > 70 mm und beim Trockensubstanzgehalt wurden auch signifikante Sorteneffekte festgestellt, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll.)

Der Mehrertrag der 'Intensiv'-Variante gegenüber der 'Kontrolle' betrug 294 dt/ha, was bei einer zusätzlichen Wassergabe von 294 mm (298 mm abzüglich der auch in der 'Kontrolle' gegebenen 4 mm) einem Ertragszuwachs von 100 kg/ha pro mm Wassergabe entspricht. Für die Variante 'Minimiert' errechnete sich ein Ertragszuwachs von 216 kg/ha pro mm. Die Ertragsdifferenz zwischen der 'Intensiv'- und 'Minimiert'-Variante betrug nur 43 dt/ha (nicht signifikant), die durch einen zusätzlichen Wassereinsatz von 178 mm 'erkaufte' wurde.

Der Mehrertrag der 'Intensiv'- gegenüber der 'Minimiert'-Variante beruhte auf einer deutlich größeren Menge an Zwiebeln > 70 mm (Abbildung 149), die Menge an Marktware der Sortierung 40-70 mm fiel dagegen tendenziell eher etwas geringer aus (Abbildung 150).

Insgesamt wurden nur relativ geringe Mengen an Zwiebeln < 40 mm Durchmesser geerntet, mit schwacher Tendenz fiel die Menge 'naturgemäß' in der 'Kontrolle' am höchsten aus (Abbildung 151).

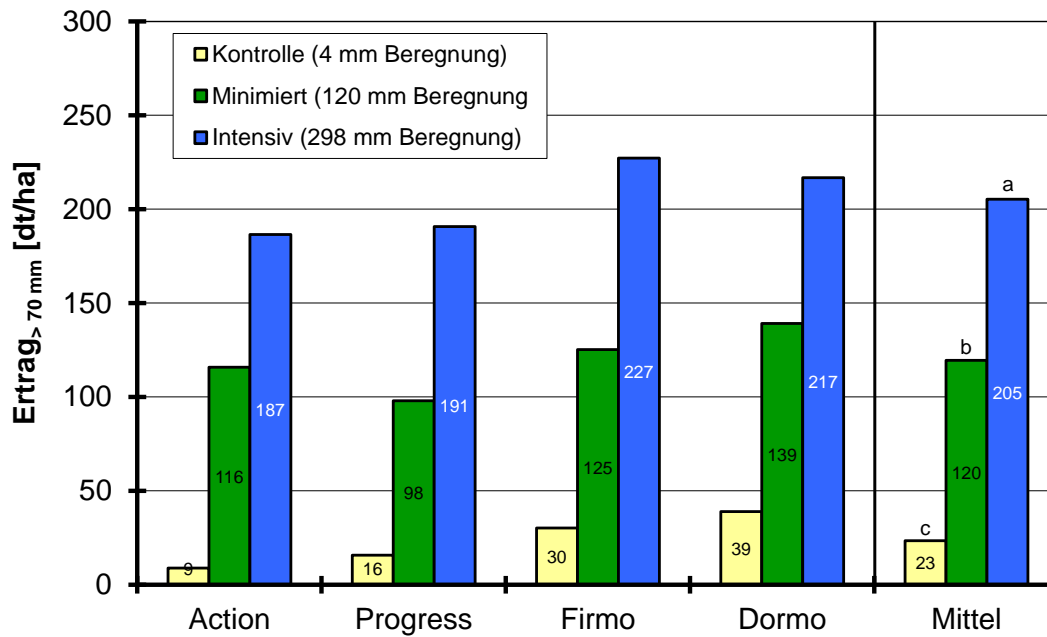


Abbildung 149: Ertrag an Zwiebeln > 70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 24,5 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014]

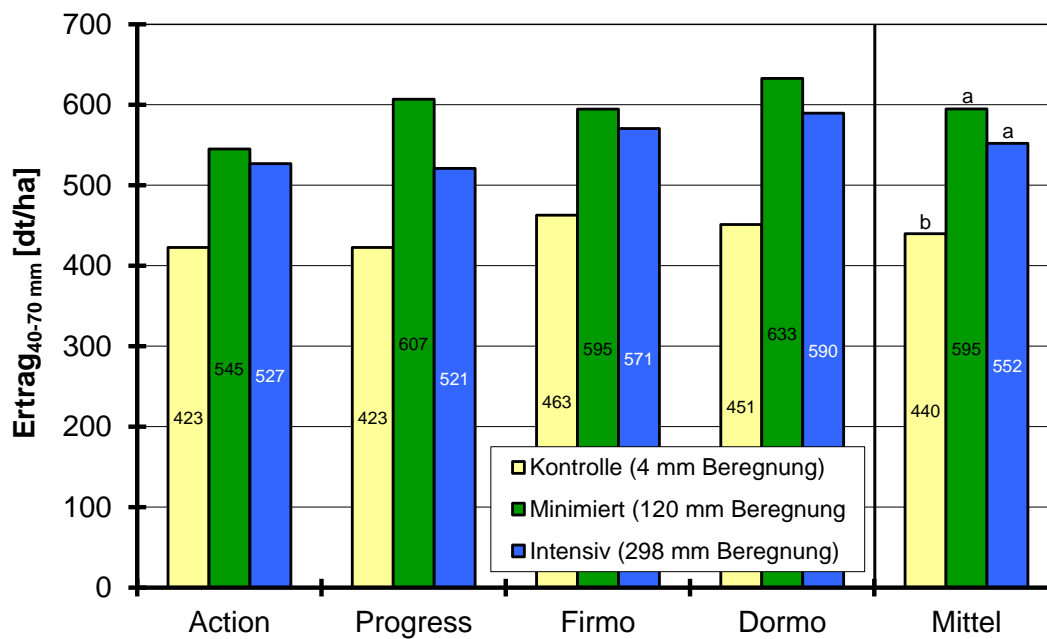


Abbildung 150: Ertrag an Zwiebeln der Sortierung 40-70 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen; $GD_{(\alpha<0,05)}$ Bewässerungseffekt: 62,8 dt/ha) [Zwiebelversuch 2014]

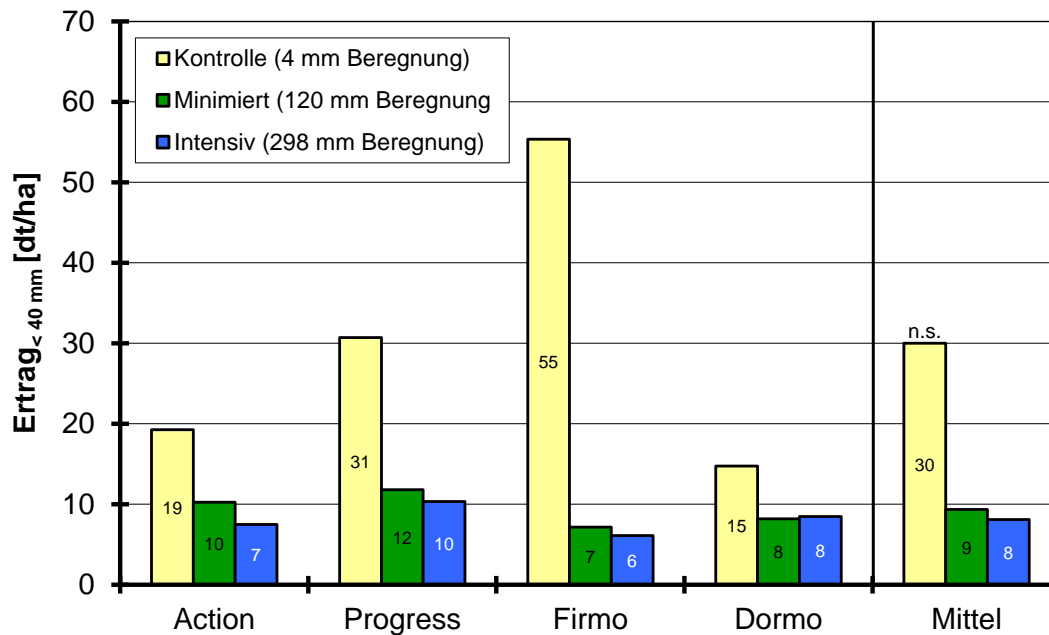


Abbildung 151: Ertrag an Zwiebeln < 40 mm in Abhängigkeit von Bewässerung und Sorte (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2014]

Bei dem an der Größenklasse 40-70 mm ermittelten Trockensubstanzgehalt zeigte sich kein Bewässerungseinfluss (Abbildung 152), sodass sich auch beim Trockenmasseertrag (40-70 mm) praktisch die gleichen Ertragsrelationen wie beim entsprechenden Frischmasseertrag ergaben (o. Abbildung).

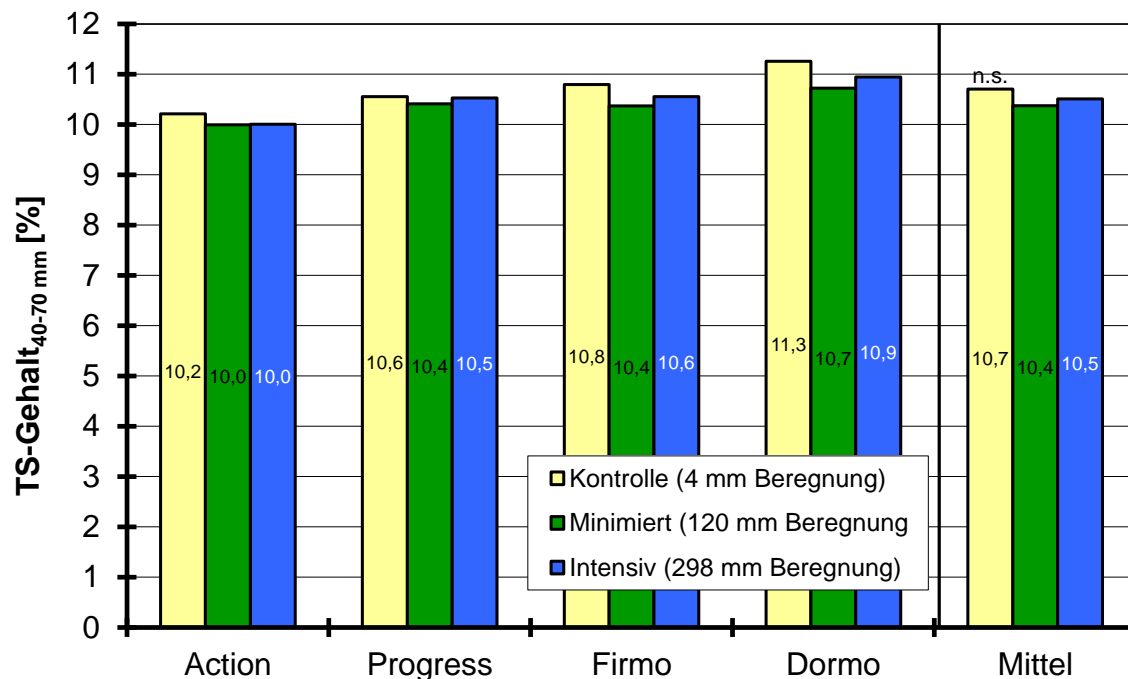


Abbildung 152: Trockensubstanzgehalt der Zwiebeln der Größenklasse 40-70 mm (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Zwiebelversuch 2014]

Tabelle 44: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Zwiebelversuch 2014]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Mittel ³⁾		alle	27,2	27,9	28,8	100	100	100
8. April ⁴⁾	09	alle	22,6	24,6	26,0	64	75	81
27. April		Intensiv	23,5	24,9		71	77	
		Minimiert+Kontrolle	22,0	26,1		59	86	
19. Mai		Intensiv	25,5	25,7		87	83	
		Minimiert+Kontrolle	25,2	25,6		85	83	
17. Juni		Intensiv	21,1	25,3		53	80	
		Minimiert	22,2	25,0		61	78	
		Kontrolle	16,7	19,7		18	37	
6. Juli		Intensiv	19,3	24,2		38	72	
		Minimiert	18,1	21,4		29	50	
		Kontrolle	15,4	18,1		8	25	
11. Aug.	47	Intensiv	21,0	24,3	25,9	52	73	80
		Minimiert	19,4	23,7	23,9	39	68	66
		Kontrolle	16,1	20,2	23,2	14	41	61

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 14,4 Vol.-% (0-30 cm), 14,8 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)
- 4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 45a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2014]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]					
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{PEN} ²⁾	ET _{PEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾			Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN}		
				Intensiv ET ₀ × kc _{FAO}	Minimiert ET ₀ × kc _{Mini}	Kontrolle	Intensiv	Minimiert	Kontrolle
09-15	159,2	237,8	1,48	111,4	118,9	63,7	124,7	100,8	
15-18	68,0	94,9	1,40	95,2	94,9	54,4	85,0	68,2	52,9
18-47	198,6	277,5	1,38	337,6	333,0	218,5	302,8	222,7	129,0
09-47	425,8	610,2	1,43	544,3	546,8	336,5	512,5	391,7	282,7

Tabelle 45b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen der Zwiebeln [Versuch 2014]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]			Versickerung [mm] ⁷⁾					
		Intensiv	Minim.	Kontr.	Geisenheim			Agrowetter (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN}		
					Intensiv ET ₀ × kc _{FAO}	Minimiert ET ₀ × kc _{Mini}	Kontrolle	Intensiv	Minimiert	Kontrolle
09-15	108,3	32		4	15,6	9,7	29,2	7,0	3,2	
15-18	0,5	78	34	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
18-47	138,8	188	82	0	0,0	0,0	0,0	24,3	0,0	
09-47	247,6	298	120	4	15,6	9,7	29,2	31,3	3,2	

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-60 cm
- 8) davon 20,4 mm am 9. September

4.3.5 Zusammenfassung der vier Versuchsjahre

Witterungsverlauf, Verdunstungsberechnung

Entsprechend der Weiterentwicklung des 'Geisenheimer Modells' während der 5-jährigen Projektlaufzeit wurde die Bewässerung der 'Intensiv'-Variante auf Basis unterschiedlich berechneter ET_c -Werte kalkuliert (Tabelle 47), die entweder auf ET_0 oder ET_{pPEN} basierten (Tabelle 46). Während 2010 ET_{pPEN} in der Bewässerungsphase durchschnittlich nur um Faktor 1,33 über ET_0 lag, betrug dieser Faktor in den anderen Jahren 1,39 bis 1,46.

Tabelle 46: Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Zwiebelversuche]

	Referenzverdunstung [mm]											
	BBCH 09-15			BBCH 15-18			BBCH 18-47			BBCH 09-47		
	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$	ET_0	ET_{pPEN}	$ET_{pPEN}/ET_0^{1)}$
2010	137,3	187,3	1,37	73,1	97,3	1,34	176,0	226,1	1,29	386,4	510,7	1,33
2011	169,3	229,8 ²⁾	1,41	76,9	105,5 ²⁾	1,39	128,1	169,8 ²⁾	1,36	374,3	505,1 ²⁾	1,39
2012	178,1	258,4	1,50	49,5	72,0	1,48	162,8	225,5	1,40	390,4	555,9	1,46
2014	159,2	237,8	1,48	68,0	94,9	1,40	198,6	277,5	1,38	425,8	610,2	1,43

1) Mittelwert der täglichen Quotienten

2) Aufgrund fehlerhafter Datenlieferung wurde ursprünglich (2011) mit einer ET_{pPEN} von $209,2 + 92,8 + 152,4 = 454,4$ mm gerechnet.

Die auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ berechnete potenzielle Evapotranspiration der Zwiebelbestände (ET_c) lag im Mittel der vier Versuchsjahre bei 476 mm, 2011 zeigte sich mit 424 mm eine unterdurchschnittliche, 2014 mit 547 mm eine überdurchschnittlich hohe Verdunstung (Abbildung 153).

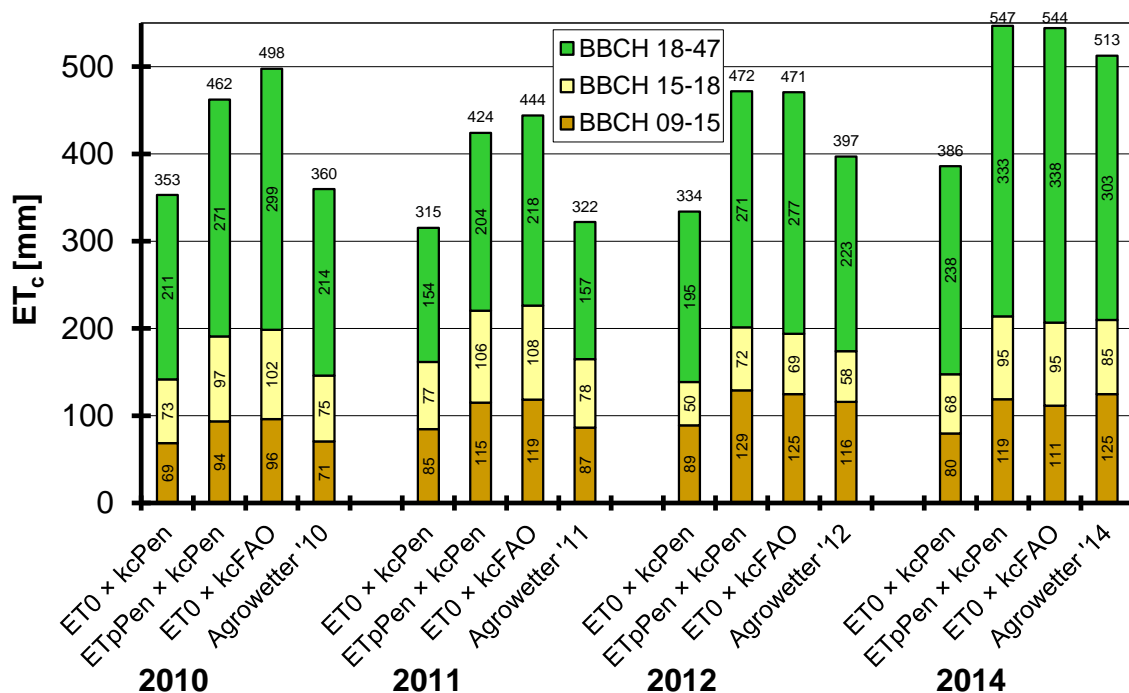


Abbildung 153: Potenzielle Evapotranspiration des Zwiebelbestandes (ET_c) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Kalkulationsansätzen (kc_{PEN} : kc_{09-15} : 0,5; kc_{15-18} : 1,0; kc_{18-47} : 1,2; kc_{FAO} : kc_{09-15} : 0,7; kc_{15-18} : 1,4; kc_{18-47} : 1,7)

Die vom 'Geisenheimer Modell' empfohlenen Berechnungen auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ oder $ET_0 \times kc_{FAO}$ führten in Versuchsjahren 2012 und 2014 jeweils zu nahezu identischen Verdunstungswerten. Insbesondere 2010 fiel die Berechnung auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ geringer aus als jene auf Basis $ET_0 \times kc_{FAO}$; in diesem Versuchsjahr lag ET_{pPEN} nur um dem Faktor 1,33 über ET_0 (vgl. Tabelle 46), sodass die um Faktor 1,4 höheren kc_{FAO} -Werte zu entsprechend höheren Verdunstungswerten führten.

'Agrowetter' berechnete in den Jahren 2010 und 2011 Verdunstungssummen in Höhe des $ET_0 \times kc_{PEN}$ -Ansatzes, nach Einbeziehung eines 'windabhängigen Faktors' ab der Saison 2012 (JANSSEN 2012) lagen die 'Agrowetter'-Werte zwischen dem $ET_0 \times kc_{PEN}$ - und dem $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ -Ansatz. (Zwischenzeitlich wurden die kc -Werte für die FAO-Gras-Referenzverdunstung mit kc_{09-15} : 0,7; kc_{15-18} : 1,3; kc_{18-47} : 1,6 leicht reduziert [HS-GM 2014]. Berechnet man ET_c auf Basis dieser Werte, so liegen die Verdunstungssummen mit 473 mm (2010) und 423 mm (2011) etwa auf dem Niveau von $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$, bzw. mit 450 mm (2012) und 518 mm (2014) unter den $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$ -Ergebnissen.)

Stellt man den Verdunstungswerten (in Abbildung 154 exemplarisch $ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$) die mit 234 bis 441 mm sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen gegenüber, so wird deutlich, dass insbesondere in der Hauptwachstumsphase (BBCH 18-47) große Unterschiede zu verzeichnen waren. Während 2010 und 2011 die Niederschläge in dieser Periode über oder auf dem Niveau von ET_c lagen, fielen die Jahre 2012 und 2014 insbesondere hier 'trocken' aus.

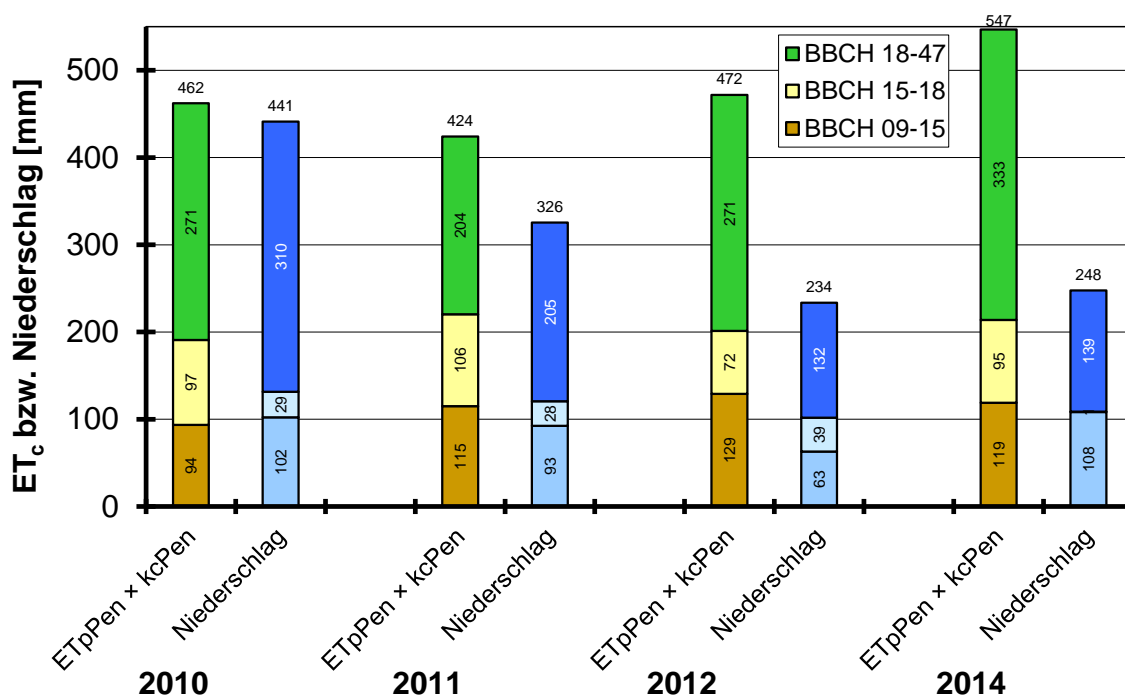


Abbildung 154: Potenzielle Evapotranspiration des Zwiebelbestandes ($ET_c = ET_{pPEN} \times kc_{PEN}$) und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren

Trotz der relativ feuchten Bedingungen der Jahre 2010 und 2011 musste die Variante 'Intensiv' nach dem 'Geisenheimer Modell' noch mit 119 bzw. 104 mm bewässert werden. In den trockenen Jahren 2012 und 2014 musste mit 244 bzw. 298 mm sehr intensiv beregnet werden (Tabelle 47).

Tabelle 47: Modus zur Berechnung der Verdunstung der 'Intensiv'-Variante und die Bewässerungsmenge in den verschiedenen Varianten in den Jahren 2010 bis 2014 [Zwiebelversuche]

	Steuerung der 'Intensiv'-Variante auf Basis ¹⁾	Bewässerung [mm]											
		BBCH 09-15			BBCH 15-18			BBCH 18-47			BBCH 09-47		
		Ko ²⁾	P/M ³⁾	Int. ⁴⁾	Ko	P/M	Int.	Ko	P/M	Int.	Ko	P/M	Int.
2010	$ET_0 \times kc_{PEN}$	8			6			51			14		
2011	$ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ ⁵⁾	0			24			0			20		
2012	$ET_{PEN} \times kc_{PEN}$	0	36	76	0			12			0		
2014	$ET_0 \times kc_{FAO}$	4			32			0			34		

1) Modus zur Berechnung der ET_c im jeweiligen Versuchsjahr, kc_{PEN} : kc_{09-15} : 0,5; kc_{15-18} : 1,0; kc_{18-47} : 1,2; kc_{FAO} : kc_{09-15} : 0,7; kc_{15-18} : 1,4; kc_{18-47} : 1,7

2) 'Kontrolle'

3) 'Praxis'- (2010/2011) bzw. 'Minimiert'-Variante (2012/2014)

4) 'Intensiv'-Variante

5) bis BBCH 15: $ET_0 \times kc_{PEN}$

Auf Grund der feuchten Bedingungen des Versuchsjahres 2010 mit drei Starkregenereignissen von jeweils 40-50 mm/d errechnete sich für die 'Intensiv'-Variante eine hohe Sickerwasserbildung insbesondere in der Phase BBCH 18-47, die hier, je nach Kalkulationsansatz zur Berechnung von ET_c , bei 32 bis 145 mm lag (Abbildung 155). In den anderen Versuchsjahren errechneten sich auf Basis der empfohlenen Kalkulationsansätze ($ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ oder $ET_0 \times kc_{FAO}$) keine bzw. nur eine geringe Sickerwasserbildung.

Für die 'Kontrolle' ergab sich 2010 je nach Ansatz eine Sickerwasserbildung von 40 bis 135 mm, für die 'Praxis'-Variante von 40 bis 159 mm. In den anderen Versuchsjahren lag die berechnete Sickerwassermenge der 'Kontrolle' sowie der 'Praxis'- bzw. 'Minimiert'-Variante bei maximal 15 mm (o. Abbildung).

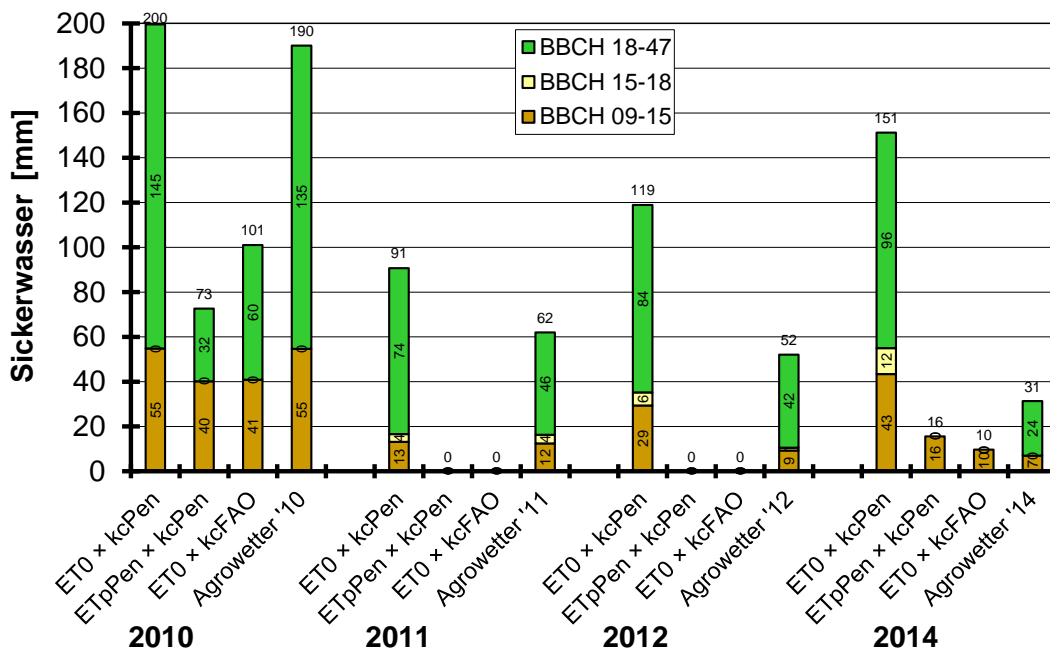


Abbildung 155: Sickerwasserbildung der 'Intensiv'-Variante (aus der Bodenschicht 0-60 cm) in den verschiedenen Versuchsjahren berechnet nach verschiedenen Modi zur Berechnung der Evapotranspiration der Zwiebelbestände

Kalkulierte versus ermittelte Bodenwassergehalte

In den Versuchsjahren 2012 ($ET_{PEN} \times kc_{PEN}$) und 2014 mit vergleichbarem Ansatz ($ET_0 \times kc_{FAO}$) stimmten die für die 'Intensiv'-Variante kalkulierten Bodenwassergehalte mit den gravimetrisch gemessenen Werten gut überein. Allerdings wurde auch 2010 mit dem Ansatz $ET_0 \times kc_{PEN}$, der zu deutlich geringeren Verdunstungswerten und damit höheren Bodenwassergehalten führt, eine gute Übereinstimmung gefunden. Dies ist vermutlich auf die sehr feuchten Bedingungen in diesem Versuchsjahr zurückzuführen, sodass das Modell (und die Realität) häufiger wieder bei FK 'neu startete'.

Berechnet man nachträglich die Verdunstung und daraus abgeleitet die Bodenwassergehalte mit einem einheitlichen Ansatz, so zeigt sich bei $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ mit einem RMSE (Wurzel aus dem Mittel der Abweichungsquadrate) von 14,9 Vol.-% (ohne 2011 [fehlerhafte Verdunstungsdaten] 12,4 Vol.-%) die engste Beziehung zwischen gemessenem und kalkuliertem Bodenwassergehalt (Abbildung 156). Bei ähnlichem Regressionsverlauf beträgt der RMSE bei dem Ansatz $ET_0 \times kc_{FAO}$ 21,6 Vol.-% (o. Abbildung).

Während auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bzw. $ET_0 \times kc_{FAO}$ die Bodenwassergehalte im Mittel um 6,7 bzw. 10,3 Vol.-% (ohne 2011: 2,9 bzw. 3,7 Vol.-%) unterschätzt wurden (weil vermutlich die Verdunstung überschätzt wurde), überschätzt der Ansatz $ET_0 \times kc_{PEN}$ (RMSE 20,6 Vol.-%) den Bodenwassergehalt um 16,6 Vol.-% (ohne 2011: 17,1 Vol.-%) (o. Abbildung).

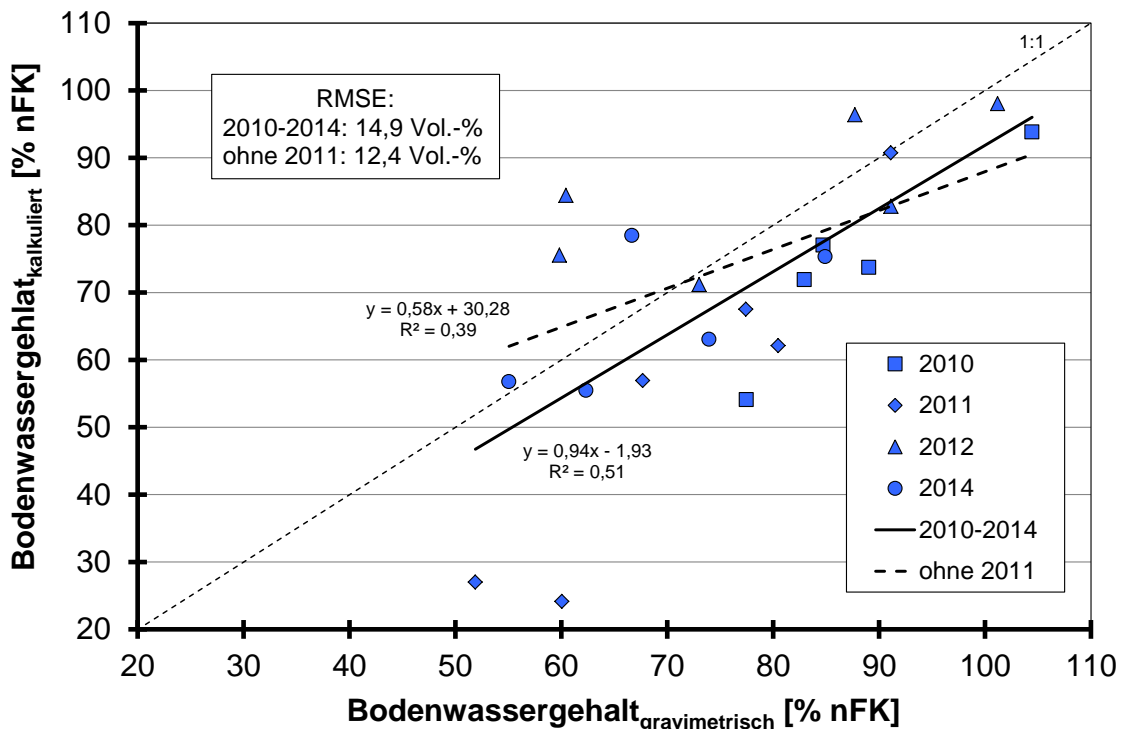


Abbildung 156: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'Intensiv'-Variante [Zwiebelversuche]

Der Ansatz von 'Agrowetter', den Bodenwassergehalt bei ergiebigen Niederschlägen deutlich über 100 % nFK ansteigen zu lassen, führte zu dann deutlich überschätzten Bodenwassergehalten (Abbildung 157). Aber auch sonst tendierte 'Agrowetter' dazu, die Bodenwassergehalte zu hoch zu veranschlagen.

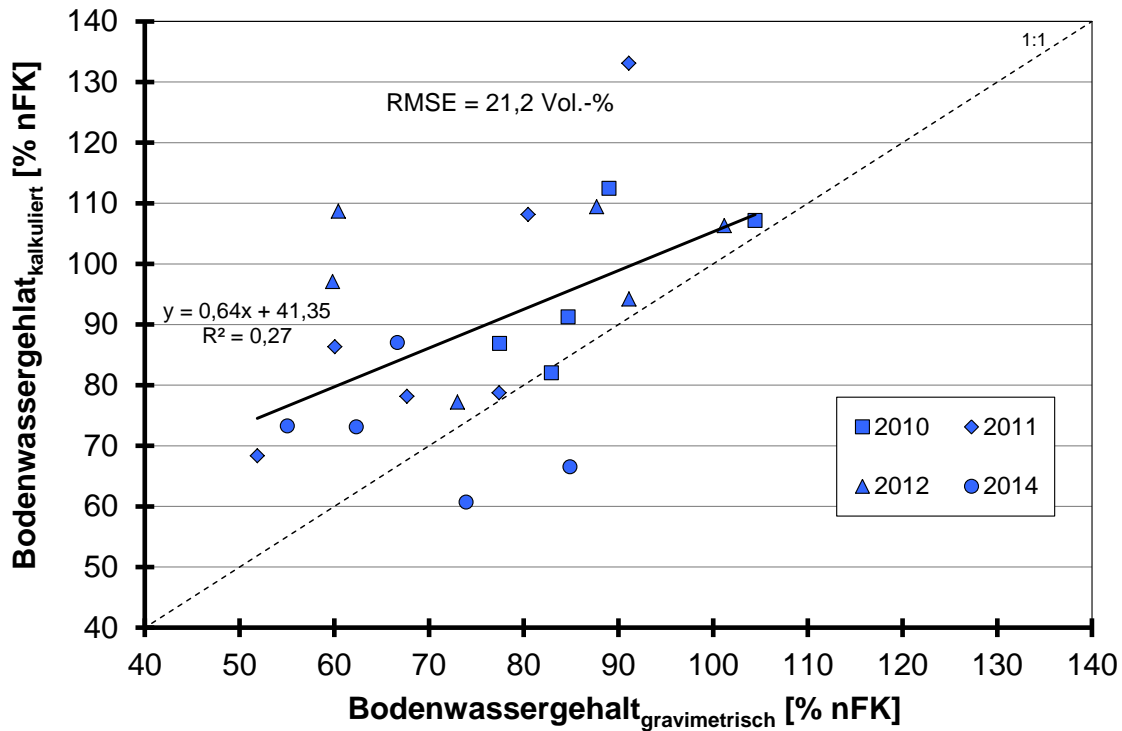


Abbildung 157: Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Intensiv'-Variante [Zwiebelversuche]

Für die 2012 und 2014 angelegte 'Minimiert'-Variante mit deutlich reduzierten k_c -Werten zeigte sich beim Rechenmodus $ET_{PEN} \times k_{cPEN\text{ minimiert}}$ (k_{c09-15} : 0,3; k_{c15-18} : 0,6; k_{c18-47} : 0,8) eine mittlere Überschätzung der Bodenwassergehalte von 10,0 Vol.-% (Abbildung 158). Bei Berechnung der Bodenwassergehalte auf Basis $ET_0 \times k_{cFAO\text{ minimiert}}$ betrug die mittlere Überschätzung 12,6 Vol.-% (RMSE 16,1 Vol.-%; o. Abbildung).

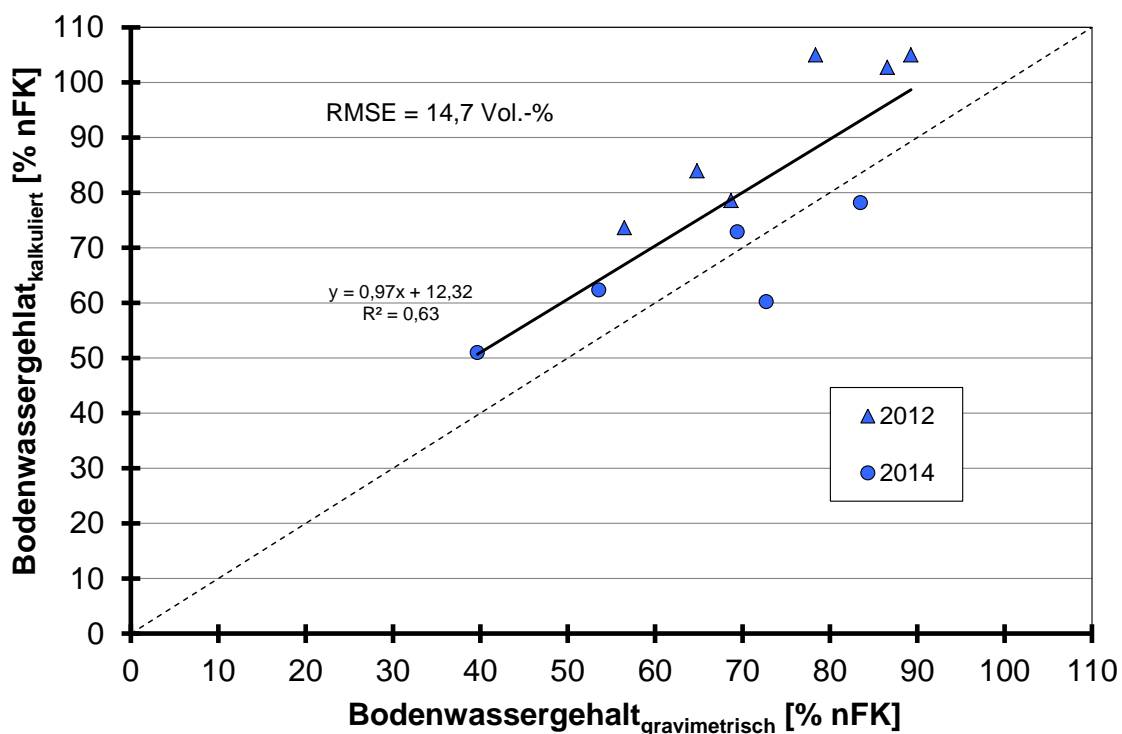


Abbildung 158: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_{PEN} \times k_{cPEN\text{ minimiert}}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt (0-60 cm) der 'Minimiert'-Variante [Zwiebelversuche]

Zwiebelertrag

Die nicht bzw. nahezu nicht beregnete 'Kontrolle' erzielte im Mittel der vier Versuchsjahre einen marktfähigen Ertrag (> 40 mm) von 510 dt/ha (Abbildung 159). Die 'intensiv' bewässerte Variante zeigte im Mittel knapp 200 dt/ha Mehrertrag (+ 40 %) gegenüber der 'Kontrolle'. Die nur in den Jahren 2010 und 2011 mit einer zusätzlichen Bewässerung von 30 mm (44 mm abzüglich 14 mm in der 'Kontrolle') bzw. 20 mm angelegte 'Praxis'-Variante erreichte jeweils nur einen geringen Mehrertrag. In beiden Versuchsjahren wurde erst deutlich nach dem 8-Blatt-Stadium (BBCH 18) mit der Bewässerung (offensichtlich zu spät) begonnen, weitere Bewässerungsgaben waren nicht notwendig, weil in beiden Versuchsjahren im Anschluss hohe Niederschläge auftraten. Die 2012 und 2014 mit deutlich gegenüber der 'Intensiv'-Variante verminderter Bewässerung versehene 'Minimiert'-Variante unterschied sich, auch bei gemeinsamer Auswertung beider Versuchsjahre (jeweils als Sortenmittel), nicht signifikant von der 'Intensiv'-Variante.

PFLEGER et al. (2010) erzielten in ihren 12-jährigen Versuchen (1995-2006) im mitteldeutschen Trockengebiet (Straußfurt, Thüringer Becken) in der unberegneten Variante im Mittel einen Ertrag (> 40 mm) von 400 dt/ha. Die je nach Versuchsjahr mit 25 bis 155 mm (im Mittel 87 mm) bewässerte Variante zeigte im Mittel einen Mehrertrag von 185 dt/ha (+ 56 %).

Der Mehrertrag beruhte zumeist nur auf einen höheren Ertrag bei der Sortierung > 70 mm, nur 2011 wurde auch in der Klasse 40-70 mm ein positiver Bewässerungseffekt nachgewiesen. Auch PFLEGER et al. berichteten, dass der „größte Teil des Mehrertrages ... in der Fraktion > 70 mm zu finden“ war.

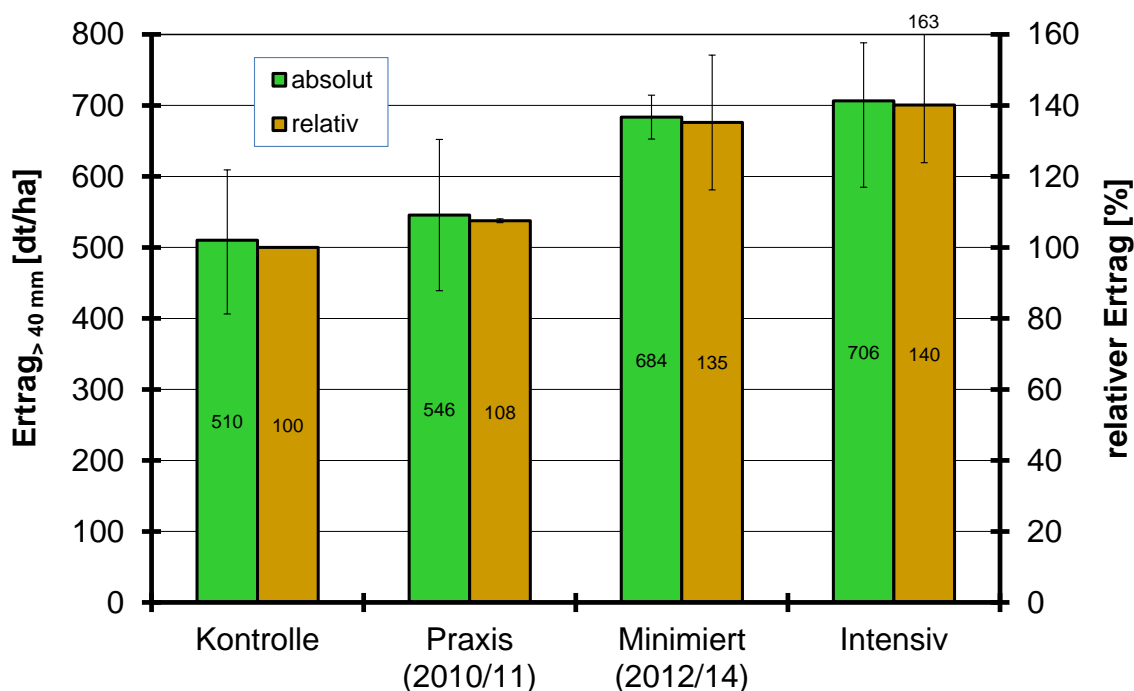


Abbildung 159: Absoluter und relativer ('Kontrolle' = 100 %) Ertrag an Zwiebeln > 40 mm in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen, Sorten und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Sorten-/Wiederholungsmittel])

Eine Wechselwirkung zwischen Bewässerung und Sorte und damit eine 'gewisse Trockenstresstoleranz' bzw. 'Beregnungsbedürftigkeit' von Sorten konnte beim marktfähigen Ertrag (> 40 mm) in keinem der Versuchsjahre festgestellt werden. 2012 wurden bei den Sortierungen 40-70 mm und > 70 mm allerdings signifikante Wechselwirkungen zwischen Sorte und Bewässerungsintensität gefunden; hier gingen, je nach Sorte, bei den

bewässerten Varianten geringere Erträge in der Klasse 40-70 mm mit höheren Erträgen in der Klasse > 70 mm einher.

PFLEGER et al. (2010) berichteten dagegen u. a. am Beispiel eines Versuchsjahres (2005) von „sortenspezifischen Berechnungswirkungen“, wobei der Mehrertrag je nach Sorte bei 196 dt/ha (+ 47 %) bis 405 dt/ha (+ 85 %) lag. Zur etwaigen statistischen Absicherung dieser Wechselwirkung treffen sie allerdings keine Aussage (angegeben ist nur eine Grenzdifferenz für einen Sorten- bzw. Berechnungsstufenvergleich).

Hinsichtlich der Sortierung beschrieben die Autoren (exemplarisch für des Versuchsjahr 2005) „gravierende Sortenunterschiede“ zwischen den getesteten 12 Sorten. So basierte der Mehrertrag bei manchen Sorten ausschließlich auf größere Mengen der Fraktion > 70 mm, während er bei anderen Sorten auch zur Hälfte auf dem in der Klasse 40-70 mm beruhte. Aufgrund größere Streuung („auch unter den Wiederholungen“) konnten nur bei drei Sorten signifikante Differenzen nachgewiesen werden, zu etwaigen Wechselwirkungen wurde wiederum keine Aussage getroffen. [Anmerkung: Die beschriebenen Sortenunterschiede bei der Sortierung könnten auch in unterschiedlichen Bestandesdichten begründet sein und sind damit nicht zwangsläufig ein genetisch bedingter Sorteneffekt.]

Ein Einfluss der Bewässerung auf den Trockensubstanzgehalt der Zwiebeln (nur ermittelt an der Klasse 40-70 mm in den Jahren 2012 und 2014) deutete sich in den eigenen Untersuchungen nicht an.

Effizienz der Bewässerung

Während in der 'Praxis'- und 'Minimiert'-Variante der Mehrertrag je mm Bewässerung im Mittel bei 160 kg/(ha × mm) lag, betrug dieser in der 'Intensiv'-Variante nur 124 kg/(ha × mm). Allgemein zeigte sich mit zunehmender Bewässerungsmenge eine Abnahme des Mehrertrags je mm (Abbildung 160). 2010 errechnete sich allerdings für die 'Intensiv'-Variante eine höhere Effizienz als für die 'Praxis'-Variante; in der 'Praxis'-Variante wurden die 30 mm Bewässerung unmittelbar vor einer bis zum Schlottenknick anhaltenden Regenperiode ausgebracht, was nur zu einem geringen (wenn auch signifikanten) Mehrertrag führte. 2012 zeigte sich insgesamt eine geringere Effizienz der Bewässerung; möglicherweise wurden hier die vor allem in den letzten 2-3 Wochen der Kulturzeit verabreichten Wassergaben nicht mehr voll ertragswirksam.

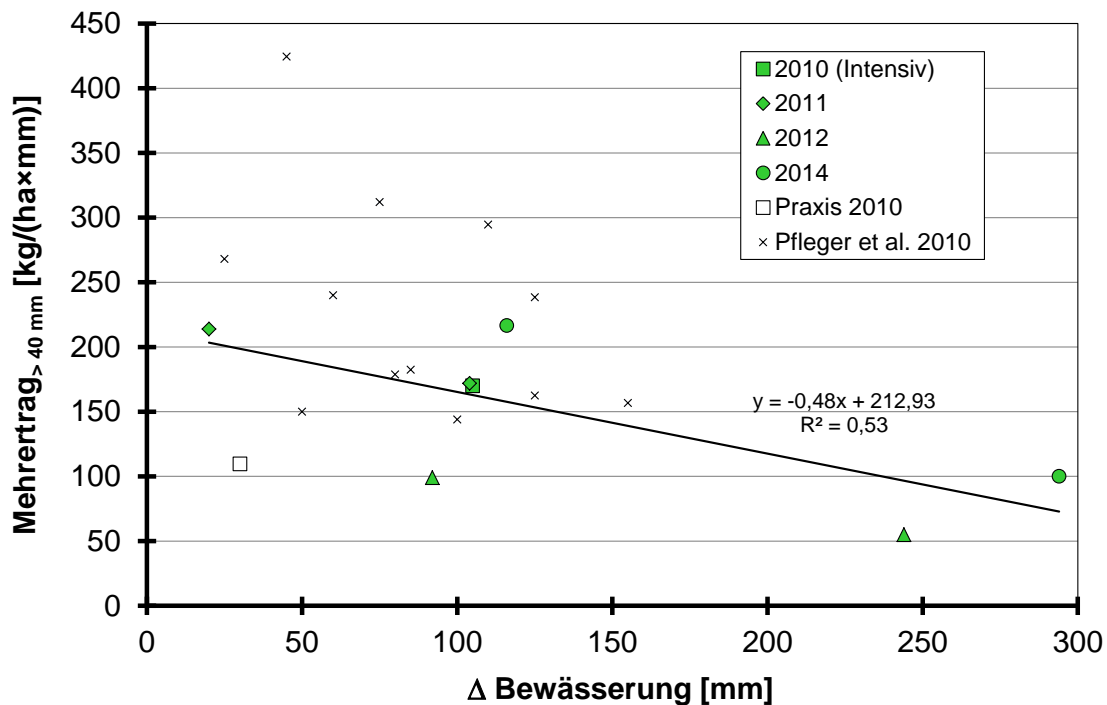


Abbildung 160: Mehrertrag (Mittelwerte über die Wiederholungen und Sorten) **an Zwiebeln > 40 mm der bewässerten Varianten gegenüber der 'Kontrolle' je mm Bewässerung in Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge** (Abzüglich der ggf. in der 'Kontrolle' verabreichten Wassergabe) (Regression berechnet ohne 'Praxis 2010' und 'PFLEGER et al. 2010')

PFLEGER et al. (2010) fanden Mehrerträge von 144 bis 424 kg/(ha x mm), was mit den eigenen Ergebnissen nur teilweise korrespondiert. (Die Versuche von PFLEGER et al. wurden auf einer „flachgründigen Ton-Schwarzerde“ mit „stark begrenztem Wurzelraum“ durchgeführt, was möglicherweise die z. T. sehr hohen Mehrerträge erklären könnte.)

PFLEGER et al. kalkulierten die Bewässerungsgaben ebenfalls nach dem 'Geisenheimer Modell' mit den damals aktuellen k_c -Werten (diese entsprechen den $k_{c_{PEN}}$ -Werten, Stand 05.09.2013). Die Referenzverdunstung wurde nach TURC, modifiziert nach WENDLING & SCHELLIN (1986) berechnet (RÖßLER 2015). Diese liegt nach langjährigen Vergleichen etwa auf dem Niveau von $ET_{p_{PEN}}$ (je nach Station 1 bis 4 % über $ET_{p_{PEN}}$) (DVWK 1996), sodass man die Berechnungen der Autoren etwa mit dem Modus $ET_{p_{PEN}} \times k_{c_{PEN}}$ gleichsetzen kann. Allerdings wurde mit der Bilanzierung bzw. Berechnung („in Anlehnung an die Praxisbedingungen“ [RÖßLER 2015]) in der Regel erst mit Beginn der Bulbenbildung begonnen, sodass selbst im „extrem trockenen Jahr 2003“ 'nur' 155 mm beregnet wurden.

Bei den Ergebnissen von PFLEGER et al. zeigt sich eine relativ enge Korrelation der relative Erträge der jeweiligen unberechneten Variante mit der so bemessenen Bewässerungsmenge (in Abbildung 161 dargestellt als Defizit gegenüber der berechneten Variante). (\Rightarrow bei hohem Zusatzwasserbedarf starker Ertragsabfall in den unberechneten Varianten).

Die eigenen Ergebnisse der Jahre 2010 und 2011 (hier wurden allerdings in der 'Intensiv'-Variante aufgrund der fehlerhaften $ET_{p_{PEN}}$ -Daten 60 mm zu wenig bewässert) reihen sich in diesen Zusammenhang ein, 2012 und 2014 fiel der Ertragsabfall aber deutlich geringer aus als bei den anderen Versuchen.

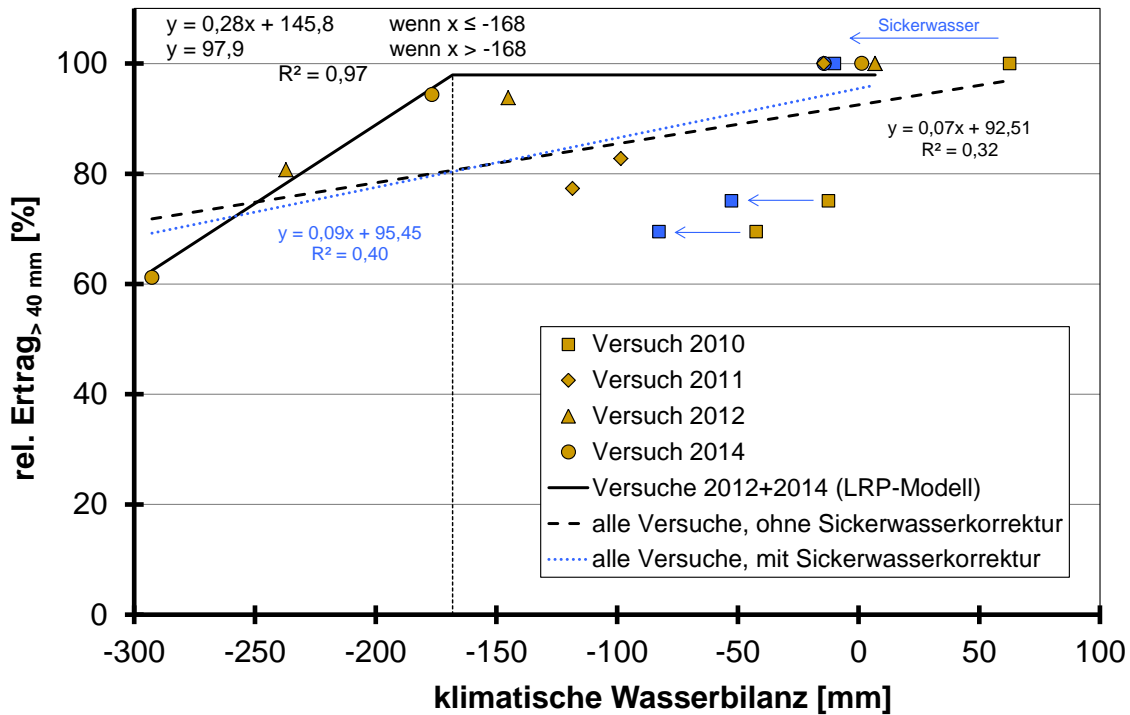


Abbildung 162: Relativer Ertrag an Zwiebeln > 40 mm ('Intensiv' = 100 %) in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag + Beregnung - $ET_0 \times kc_{FAO}$) bzw. um die kalkulierten Sickerwasserverluste erweiterten klimatischen Wasserbilanz (blaue Symbole)

Resümee

Aus der im Mittel nur leichten Unterschätzung der Bodenwassergehalte ist (vereinfachend) zu schließen, dass das 'Geisenheimer Modell' auf Basis der ET_0 - oder ET_{pPEN} -Verdunstungswerte und der entsprechenden kc -Werte die reale Verdunstung relativ genau kalkuliert hat. Unsicherheiten bleiben allerdings u. a. bezüglich der Sickerwasserbildung, die gerade auch auf lehmigen Standorten nach Unterschreitung der FK (deren Definition ja ein Ende der Sickerwasserbewegung zwei Tage nach einer Übersättigung 'unterstellt') in nennenswertem Umfang auftreten, von den verwendeten einfachen (statischen) Modellansätzen aber nicht berücksichtigt werden. Derartige Sickerwasserverluste würden eine Überschätzung von ET_c ausgleichen. Andererseits könnte aber auch Bodenwasser unterhalb der angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm durch kapillaren Aufstieg oder tieferer Durchwurzelung genutzt worden sein. Insofern sind viele der oben anstellten Überlegungen zu Kausalzusammenhängen auch spekulativer Natur, exakte Ergebnisse zum Verdunstungsanspruch sind nur auf Basis von Lysimetermessungen zu erhalten.

Offenkundig ist aber, dass eine um rund 150 (2012) bzw. 180 mm (2014) gegenüber der 'Intensiv'-Variante verminderte ('minimierte') Bewässerungsgabe nur zu geringen, statistisch nicht absicherbaren Mindererträgen führte. Damit kann das 'Geisenheimer Modell' mit den entsprechenden kc -Werten (auch nach aktuell leichter Reduktion der kc -Werte für die FAO-Gras-Referenzverdunstung) unter den gegebenen Boden- und Witterungsbedingungen nicht als 'ressourcenschonende' Bewässerungssteuerung für den mitteldeutschen Sommerzwiebelanbau empfohlen werden. Positiv stellte sich die Steuerung mit den um etwa 40 % 'minimierten' kc -Werten dar.

Eine etwaige 'besondere' Trockenstresstoleranz bzw. 'Wasserbedürftigkeit' konnte unter den geprüften Sorten nicht festgestellt werden.

5 Versuche mit Spinat

Abstract

Im Rahmen eines fünfjährigen Projektes wurden am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz 2010 und 2011 Bewässerungsversuche mit jeweils vier verschiedenen Spinatsorten angelegt.

Der Versuch 2011 musste wegen Starkniederschlägen abgebrochen werden, im Versuch 2010 fielen in der Kulturzeit des Spinats knapp 330 mm Niederschlag, sodass keine Bewässerung notwendig wurde. Der Versuch wurde aber genutzt, um das 'Geisenheimer Modell' zu verifizieren. Gleichzeitig konnte eine FDR-Rohrsonde zur Bodenwassergehaltsbestimmung auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden.

Die mit Hilfe des 'Geisenheimer Modells' prognostizierten Bodenwassergehalte stimmen bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm mit den tatsächlichen vorgefundenen Werten gut überein, wenn die Berechnung auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung erfolgte. Bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm lieferte eine Berechnung auf Basis der PENMAN-Verdunstung sehr gute Prognosen. Die FDR-Rohrsonde erfasste den Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm recht gut, in 30-60 cm fielen die Messwerte gut 7 %-Punkte höher aus als die jeweils gravimetrisch ermittelten Wassergehalte. Für die Schicht 60-90 cm lieferte die Sonde nicht nachvollziehbar hohe Werte.

5.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

Im sächsischen Anbaubereich mit seinen Lössböden wird Frühjahrs- und Herbstspinat nur relativ extensiv bewässert. Durch den Klimawandel dürfte aber langfristig eine intensivere Bewässerung notwendig werden. Neben der Überprüfung von vorhandenen Berechnungsmodellen sollten im Rahmen der Untersuchungen spezielle Sorten mit einer ggf. besseren Toleranz gegenüber Trockenstress getestet werden.

5.2 Material und Methoden

Versuchsstandort

Die Versuchsstation befindet sich in südöstlicher Randlage von Dresden (DD-Pillnitz), ca. 120 m über NHN. Der alluviale Boden (Elbe) ist als Parabraunerde anzusprechen. Das genutzte Versuchsfeld (1.000 m²) weist im Mittel in der Schicht 0-60 cm 17,9 % Ton, 42,2 % Schluff und 40,0 % Sand auf, womit die Bodenart nach der Kartieranleitung (BGR 2005) als schwach sandiger Lehm (Ls2) einzuordnen ist (Tabelle 48). Die Feldkapazität (FK) des Versuchsfeldes wurde ausgangs des Winters ermittelt (vgl. Versuchsergebnisse).

Tabelle 48: Textur und Bodenart des Versuchsstandortes [Spinatversuch 2010]

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
0-30 cm	15,2	42,6	42,2	schluffig-lehmiger Sand (Slu)
30-60 cm	20,5	41,8	37,7	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	19,1	28,0	52,9	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-60 cm	17,9	42,2	40,0	schwach sandiger Lehm (Ls2)

Kulturdaten und Versuchsaufbau

In dem Versuch konnten vier Sorten mit ähnlicher Reifezeit geprüft werden, von denen zwei Sorten seitens der Züchter/Vertriebspartner als 'eher trockenstresstolerant' bzw. als 'eher wasser- bzw. beregnungsbedürftig' eingeschätzt wurden (Tabelle 49).

Tabelle 49: Einbezogene Spinatsorten

Versuchsjahr 2010				
Sorte	Bahamas	RS 1430	Emu	Toucan
Züchter	Seminis		Rijk Zwaan	
Trockenstresstoleranz*)	eher ja	eher nein	eher ja	eher nein

*) Einschätzung des Züchters/Vertriebspartners

Die Kultur- und Versuchsdaten sind in Tabelle 50 wiedergegeben. Die Aussaat des Spinats erfolgte am 5. August. Am 7. August fielen knapp 50 mm Niederschlag, sodass es zu Auflaufproblemen kam. 4 Tage nach dem Auflaufen des Spinats fielen am 16. August nochmals fast 50 mm Niederschlag, sodass später nur bei den Sorten 'Emu' und 'Toucan' ausreichende Bestandesdichten vorgefunden wurden. Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen war der Spinatbestand praktisch unkraut- und befallsfrei.

[Im Jahr 2011 wurde ein ähnlicher Versuch mit Aussaat am 24. Juni angelegt; auch dieser Versuch wurde durch Starkniederschläge beeinträchtigt und musste abgebrochen werden. Ab dem Versuchsjahr 2012 konnten keine Spinatversuche mehr angelegt werden, weil die Versuchsfläche jeweils für die Versuche mit Weißkohl (s. Kapitel 6, Seite 183) benötigt wurden.]

Tabelle 50: Kultur- und Versuchsdaten [Spinatversuch 2010]

Versuchsjahr 2010	
5. Aug.	Aussaat mit 220 Korn/m ² , Beetanbau (1,5 m) mit 10 Reihen, Reihenabstand 11,5 cm
12. Aug.	Auflauf (BBCH 09)
1. Sept.	6-Blatt-Stadium (BBCH 16)
3. Sept.	Aufdüngung auf 150 kg N _{min} /ha mit KAS
7. Nov.	Beendigung des Versuches (keine Ernte)
Bodenart	s. Tabelle 48, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74; Grundwasserflurabstand > 7 m
Versuchsanlage	zweifaktorielle Spaltanlage (Haupteinheit Beregnung, Untereinheit Sorte) mit 4 Wiederholungen
Parzellengröße	Anlageparzelle: 8,0 m × 1,5 m (12,0 m ²); Randparzellen ohne Auswertung
Beregnung	keine

Bewässerungsvarianten

Neben einer 'Kontrolle' sollten in einer 'Praxis'-Variante nur bei extremer Trockenheit 1-2 Regengaben erfolgen. In der Variante 'Intensiv' wurde nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010) eine klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - ET_c, ET_c = Referenzverdunstung × kc-Wert) erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet.

Die veröffentlichten kc-Werte bezogen sich ursprünglich auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET₀) (vgl. PASCHOLD 1999; PASCHOLD et al. 2007 u. 2009). Dieser Ansatz wurde auch an den Deutschen Wetterdienst (DWD) herangetragen und in der 'Agrowetter-Beregnungsberatung' (s. u.) umgesetzt (vgl. hierzu die nahezu identischen Evapotranspirationswerte des ET₀ × kc_{PEN}-Ansatzes und der 'Agrowetter'-Werte).

Ab 2011 (FA-GM 2011c) wurden diese (niedrigeren) kc-Werte auf die s. g. PENMAN-Verdunstung (ET_{pPEN}) bezogen (daher hier als kc_{PEN} bezeichnet). Für die niedriger ausfallende FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET₀)

wurden um Faktor 1,4 höhere k_c -Werte (hier als $k_{c_{FAO}}$ bezeichnet) empfohlen (FA-GM 2011b). [Die veröffentlichten k_c -Werte für Spinat wurden 2011 zunächst mit der Anmerkung „vorläufige Werte ...“ versehen, später dann zurückgezogen (vgl. FA-GM 2011a).]

Anders als in der damaligen Empfehlung (FA-GM 2010), nach der der Boden durch die Berechnungsgaben nach Absinken (auf 60 %) der nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 100 % nFK aufgefüllt wird, sollte der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, parallel wurde das Modell aber auch mit einer maximalen Durchwurzelungstiefe von 60 cm gerechnet.

Abweichend vom 'Geisenheimer Modell', das „nach starken Niederschlägen“ mit einer Überschreitung der 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 DWD angebotenen Modul 'Agrowetter Berechnungsberatung' berechnet, dass sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) orientiert.

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 hätte auch für die 'Kontrolle' und die 'Praxis'-Variante eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden können. Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Beregnungsbeginn (70 % bis BBCH 16, danach 55 %) nicht geändert, die maximale Durchwurzelungstiefe wurde aber von 40 cm (Voreinstellung) auf 30 cm (entsprechend der Bodenprobenschichtdicke) vermindert. Parallel wurde das Modell aber auch mit einer maximalen Durchwurzelungstiefe von 60 cm gerechnet.

Bei der Berechnung greift 'Agrowetter' auf die ET_0 -Werte der auszuwählenden nächstgelegenen Wetterstation des DWD zurück, in diesen Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche Topografie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicherweise die ET_0 - und ET_{PEN} -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.

Während der Kulturzeit wurden Bodenproben im 30 cm-Raster bis 60 cm Tiefe entnommen. Dazu wurden in jeder Haupteinheit in den Parzellen der Sorten 'Emu' und 'Toucan' je eine Bodenprobe mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60 cm) gezogen, sodass je Bodenschicht eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 1.000 bis 1.500 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.

Zur Überprüfung einer FDR-Rohrsonde (Bodenfeuchtemessung in 5, 15, 25, 35, 55 und 95 cm Tiefe) wurde am 8. September je Wiederholung ein Kunststoffrohr mit einem speziellen Installationsset (Nut- und Präzisionsbohrer mit Führung etc.) eingebaut. Ab dem 14. September erfolgten zeitgleich mit der gravimetrischen Feuchtebestimmung Messungen, wobei je Rohr (Wiederholung) 3 Messungen nach Drehung der Sonde um jeweils ca. 120° durchgeführt wurden. Bei späteren Messungen wurde die Sonde auch 10 cm aus dem Rohr herausgezogen, sodass auch für die Tiefe 45 und 85 cm Messwerte vorliegen.

5.1 Ergebnisse

5.1.1 Versuchsjahr 2010

Nach einem niederschlagsreichen Winter (156 mm Niederschlag vom 1. Nov. bis 15. März) wurde am 18. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³ wurde eine FK von 28,1 Vol.-% (0-30 cm) bzw. 27,6 Vol.-% (30-60 cm) ermittelt (Tabelle 51). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen für einen stark lehmigen Sand (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) mit 30 Vol.-% eine etwas höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 11,0 Vol.-% ebenfalls leicht reduziert.

Beim Auflaufen des Spinats (BBCH 09) am 12. August wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-30 cm Tiefe von knapp 100 % nFK ermittelt. Nach einer zunächst feuchten Periode herrschen dann bis Ende September wechselnde Witterungsbedingungen. Um den 27. September fielen insgesamt 110 mm Niederschlag, der Oktober war mit 8,6 mm Niederschlag sehr trocken (Abbildung 163 und Abbildung 164). Weil bis Ende Oktober die Bodenfeuchte nach 'Agrowetter' und eigener Berechnung allenfalls nur kurzzeitig unter 60 % nFK sank, wurden keine Bewässerungsgaben notwendig bzw. durchgeführt. Damit lagen keine unterschiedlichen Bewässerungsvarianten vor, sodass auf eine Ertragsauswertung des Spinates verzichtet wurde. Der Bestand wurde aber bis in den November hinein weiter kultiviert, um die Verdunstung bzw. den Bodenwassergehalt weiterhin zu beobachten.

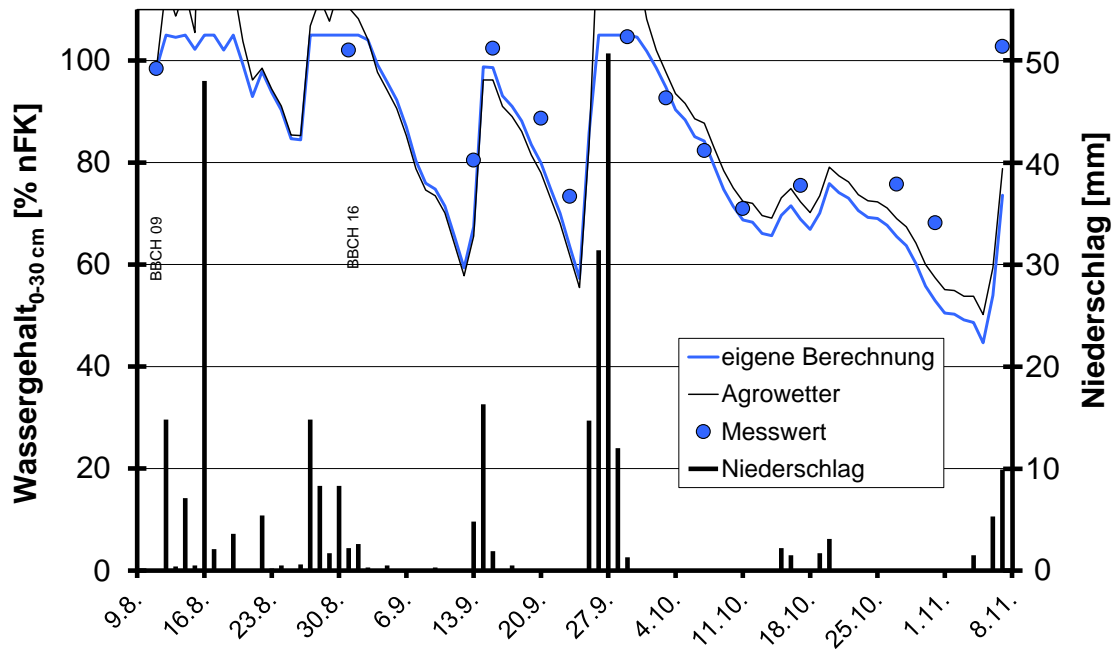


Abbildung 163: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010]

Die auf Basis der ET_0 -Werte berechneten täglichen Verdunstungswerte nach 'Geisenheim' stimmten weitgehend mit dem 'Agrowetter'-Ansatz überein (weil rechnerisch praktisch nie eine Bodenfeuchte von 60 % nFK unterschritten wurde, war hier die berechnete $ET_{c\text{adj}} \approx ET_c$). Mit einer berechneten Verdunstung von 129,3 mm wies 'Agrowetter' einen nahezu identischen Wert für die Kulturzeit aus als die eigene Berechnung nach 'Geisenheim', die auf 129,2 mm kam (Tabelle 52a).

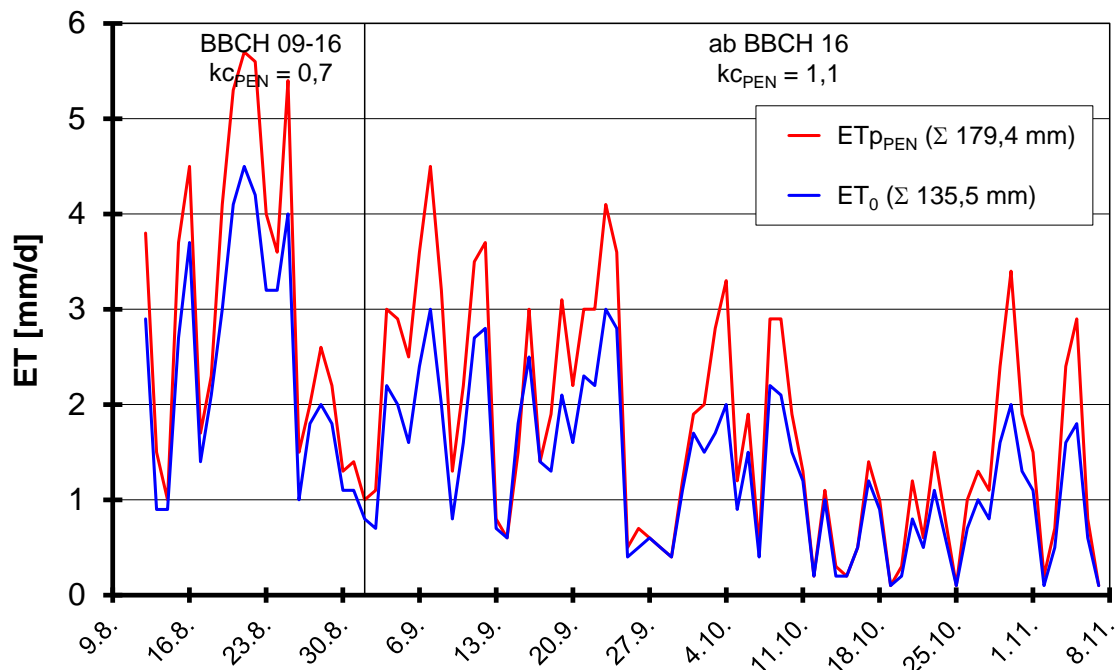


Abbildung 164: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Spinatversuch 2010]

Entsprechend den nahezu identischen Verdunstungswerten verliefen die berechneten Bodenfeuchtegehalte zumeist nahezu deckungsgleich (Abbildung 163). Nur nach starken Niederschlägen führten die unterschiedlichen Modellansätze für die Versickerungsberechnung zu einem unterschiedlichen Verlauf: Während sich nach dem modifizierten 'Geisenheimer Modell' der Boden auf maximal 105 % nFK auffüllte (und die darüber hinausgehende Menge von insgesamt 165,9 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. Insgesamt berechnete 'Agrowetter' eine Versickerung von 163,6 mm (Tabelle 52b).

Die beim Erreichen des 6-Blatt-Stadiums (BBCH 16) gezogene Bodenprobe zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und der mit beiden Modellen auf Basis der ET_0 -Werte berechneten Bodenfeuchte (Abbildung 163). Im weiteren Verlauf bis zur nächsten Sickerperiode Ende September wurde der Bodenwassergehalt aber von beiden Modellen unterschätzt. Nach dem Wiederauffüllen des Bodens Anfang Oktober auf FK (bzw. darüber hinaus) prognostizierten beide Modelle zunächst den Bodenwassergehalt recht gut, nach weiterhin ausbleibenden Niederschlägen ab Mitte Oktober aber wiederum zu gering.

Die Ursache für die Unterschätzung der Bodenfeuchtigkeit liegt möglicherweise in der Beschränkung der Modelle auf eine angenommene Durchwurzelungstiefe von 30 cm (der Feuchtegehalt der Schicht 30-60 cm sinkt bei 'Agrowetter' durch Versickerung auf minimal 100 % nFK ab), während tatsächlich auch der Bodenwassergehalt der Schicht 30-60 cm auf zum Teil unter 80 % nFK abnahm (Abbildung 165; Tabelle 51); der Spinat also offensichtlich auch diese Bodenschicht bereits ab etwa dem 10. September, also 5 Wochen nach der Aussaat, verstärkt nutzte.

Kalkuliert man von daher mit einer Durchwurzelungstiefe von 60 cm, so zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen kalkulierte und tatsächlichem Bodenwassergehalt als bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm (Abbildung 166). Hier wird allerdings sichtbar, dass im Laufe des Oktobers der Bodenwassergehalt etwas überschätzt, die Verdunstung somit etwas unterschätzt wurde.

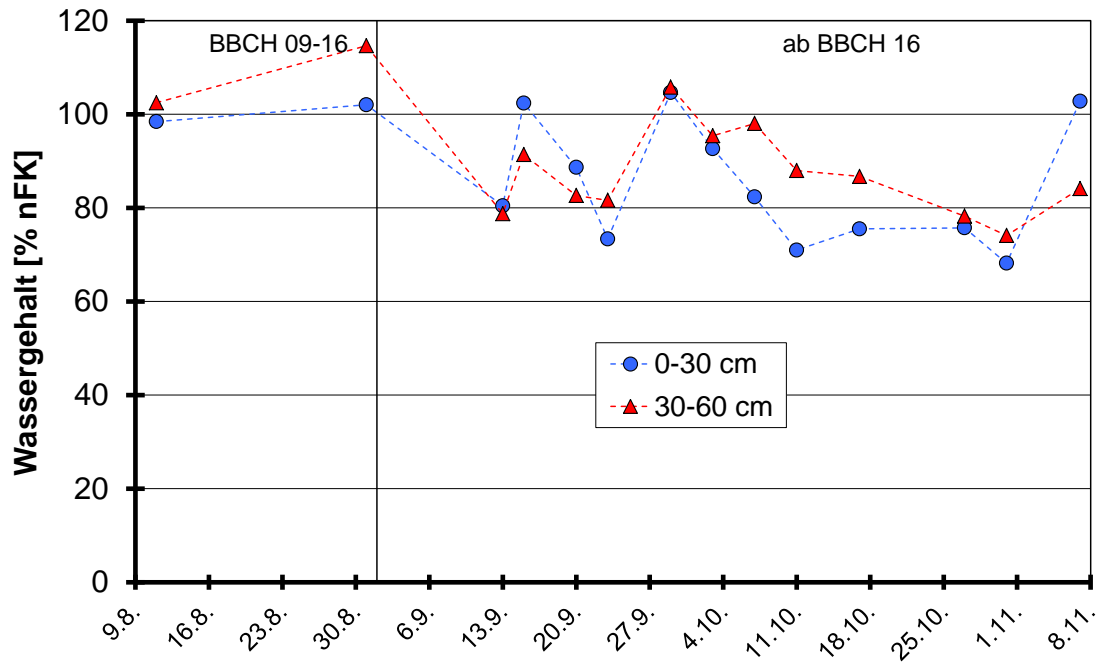


Abbildung 165: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-30 cm und 30-60 cm (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Spinatversuch 2010]

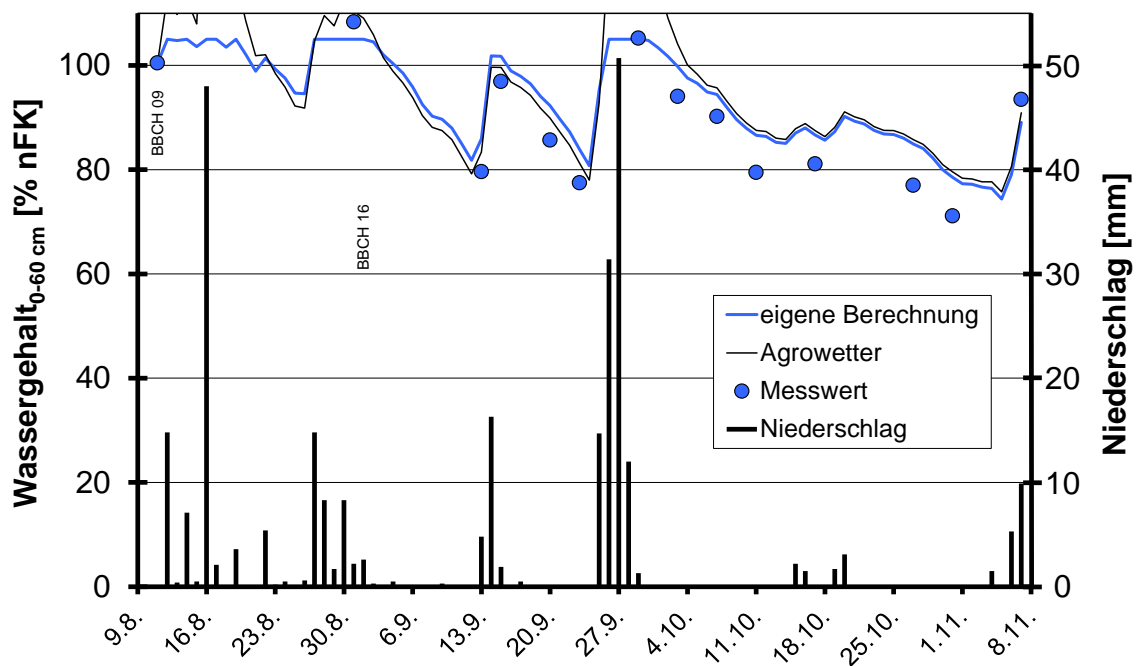


Abbildung 166: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_0 \times kc_{PEN}$ bzw. nach 'Agrowetter' bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010]

Berechnet man die Verdunstung auf Basis der ET_{PEN} -Verdunstungswerte (für die Kulturzeit des Spinates um Faktor 1,31 höher als ET_0), so ergibt sich bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm eine massive Unterschätzung der Bodenwassergehalte (Abbildung 167).

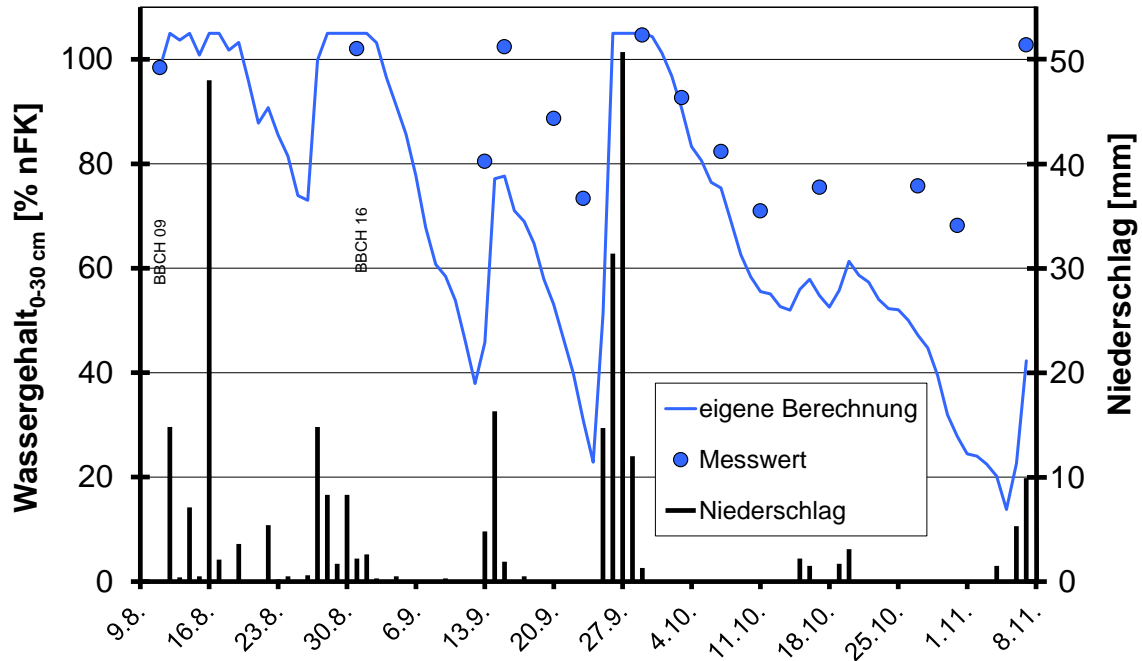


Abbildung 167: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 30 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010]

Bei Einbeziehung der Schicht 30-60 cm zeigt sich entsprechend der um den Faktor 1,3 höheren Verdunstung gegenüber ET_0 zunächst eine leichte Unterschätzung der Bodenwassergehalte (Abbildung 168); im Laufe des Oktobers ergibt sich durch diese höhere Verdunstung dann eine sehr gute Prognose der Bodenwassergehalte.

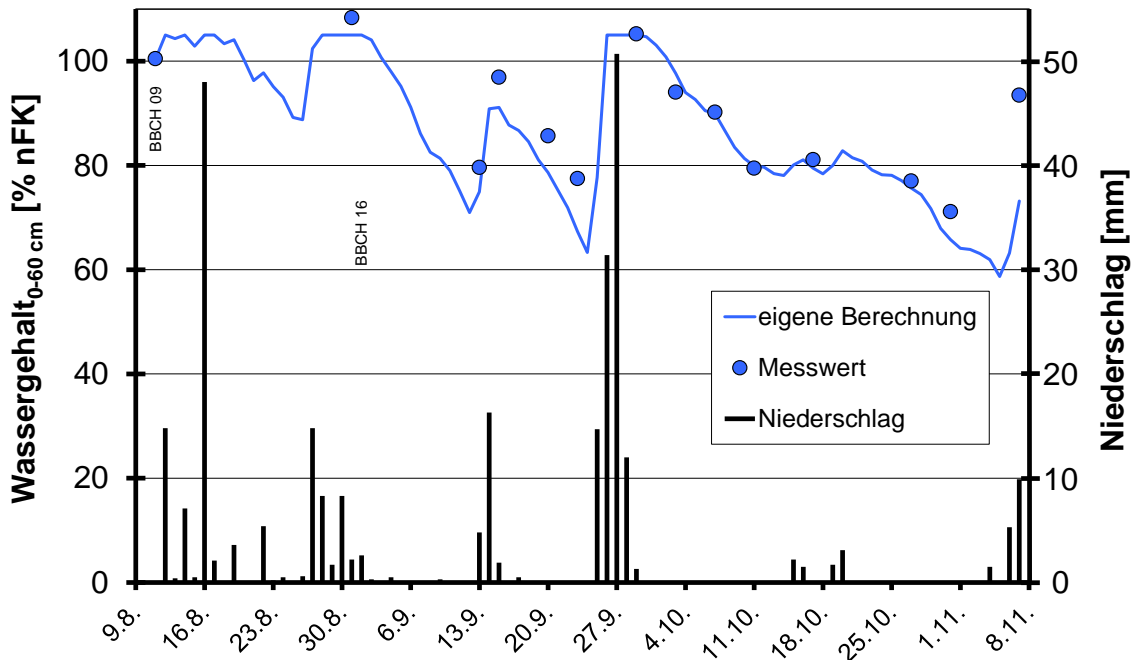


Abbildung 168: Niederschlagsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{PEN}$ bei einer angenommenen Durchwurzelungstiefe von 60 cm sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Spinatversuch 2010]

Bei den ab dem 14. September durchgeführten Messungen der Bodenfeuchte mit der FDR-Rohrsonde zeigten sich für die obere Bodenschicht im Mittel 1,5 Vol.-% höhere Werte als bei der gravimetrischen Bestimmung (Abbildung 169). Dabei betrug die maximale Abweichung 3,2 Vol.-%, sodass die angegebene Messgenauigkeit von ± 4 Vol.-% eingehalten wurde.

Gravierender waren die Abweichungen in der Schicht 30-60 cm, hier wurde im Mittel ein um 7,9 %-Punkte zu hoher volumetrischer Bodenwassergehalt gemessen. (Diese 'Fehlmesung' setzte sich in der Bodentiefe 85 und 95 cm fort, wo mit durchschnittlich 43 Vol.-% und Maximalwerten von über 50 Vol.-% offensichtlich 'überhöhte' Bodenfeuchtegehalte gemessen wurden [gravimetrisch bestimmte Bodenfeuchtegehalte unterhalb 60 cm liegen allerdings nicht vor].)

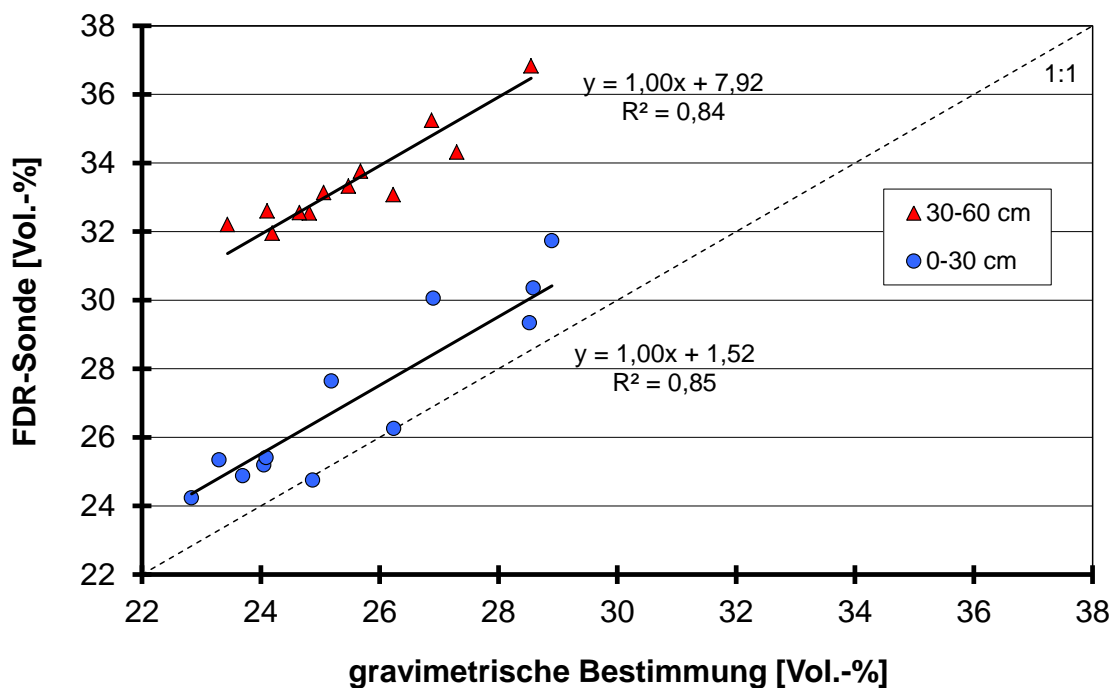


Abbildung 169: Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte versus gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgraden wurde auf 1,0 festgelegt) [Spinatversuch 2010]

Anmerkung

Die 2010 im Spinatversuch getestete FDR-Rohrsonde wurde 2011 nochmals im Erbsenversuch in der Zeit vom 28. April bis 23. Juni getestet [zu den dort gravimetrisch ermittelten Bodenwassergehalten s. Tabelle 7, Seite 38]. Auch dort zeigte sich, bei leichter Unterschätzung der Bodenwassergehalte der Schicht 0-30 cm, eine Überschätzung der Bodenwassergehalte der Schicht 30-60 cm um wiederum mehr als 7 %-Punkte (Abbildung 170). Wie sich schon beim Spinatversuch mit Messwerten im Bereich des Gesamtporenvolumens andeutete, kam es in der Schicht 60-90 cm (Messungen in 75 cm [Sonde 20 cm aus dem Rohr herausgezogen], 85 cm und 95 cm) durch zu einer 'völligen Fehleinschätzung' des volumetrischen Bodenwassergehaltes.

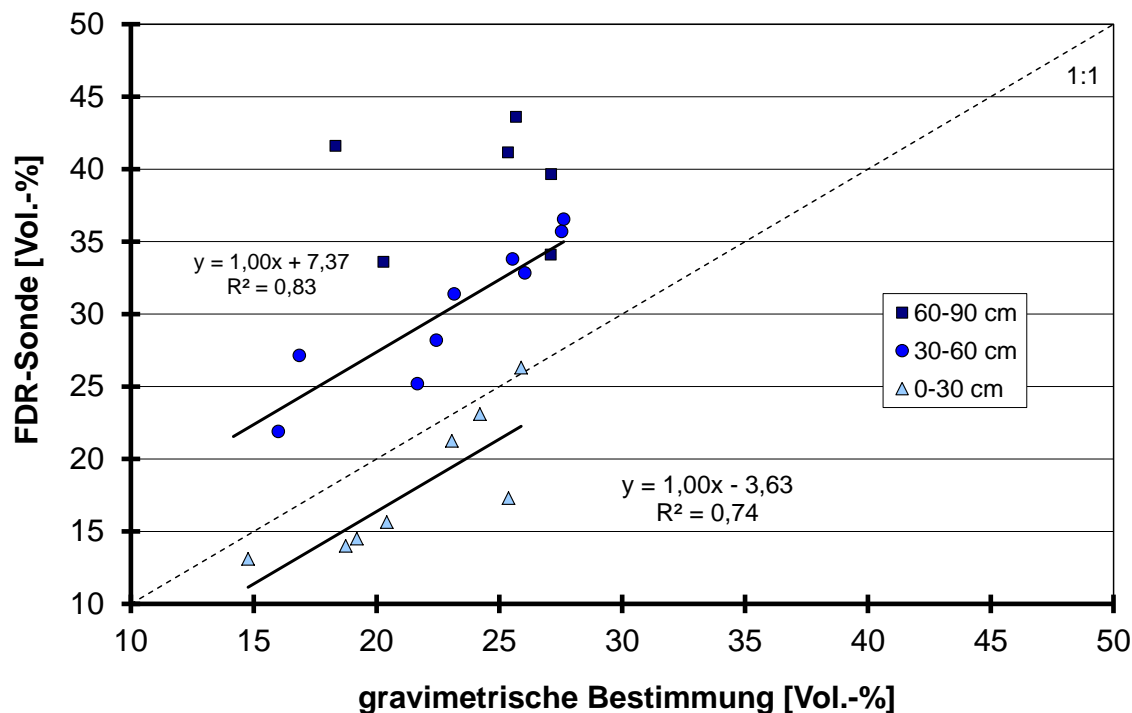


Abbildung 170: Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte versus gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgraden wurde auf 1,0 festgelegt) [Erbsenversuch 2011]

Tabelle 51: Gravimetrisch und mittels FDR-Sonde bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Spinatversuch 2010]

Datum	BBCH	gravimetrische Bestimmung				FDR-Sonde ³⁾	
		Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾		% nFK ²⁾		[Vol.-%]	
		0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
18. März ⁴⁾		28,1	27,6	100	100		
11. Aug. ⁵⁾	09	27,9	28,0	98,4	102		
31. Aug.	16	28,5	30,0	102	115		
13. Sept.		24,9	24,2	80	79	24,8	32,0 ⁶⁾
15. Sept.		28,5	26,2	102	91	29,3	33,1
20. Sept.		26,2	24,8	89	83	26,3	32,5
23. Sept.		23,7	24,7	73	82	24,9	32,6
29. Sept.		28,9	28,5	105	106	31,7	36,8
3. Okt.		26,9	26,9	93	95	30,1	35,2
7. Okt.		25,2	27,3	82	98	27,6	34,3
11. Okt.		23,3	25,7	71	88	25,3	33,8
17. Okt.		24,1	25,5	76	87	25,2	33,3
27. Okt.		24,1	24,1	76	78	25,4	32,6
31. Okt.		22,8	23,4	68	74	24,2	32,2
7. Nov.		28,6	25,1	103	84	30,4	33,1

1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 11,0 Vol.-%

3) Mittelwerte der Messwerte aus 5, 15 und 25 cm bzw. 35, 45 und 55 cm Tiefe mit jeweils 3 Messwinkeln (0°, 120°, 240°) und Wiederholungen

4) Bestimmung der FK. Wasserbilanz der Vortage (Niederschlag - ET₀): 15.3.: +10,3; 16.3.: +2,5; 17.3.: -0,5

5) Die Proben bzw. Messungen wurden jeweils am Morgen des Folgetages durchgeführt und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

6) Mittelwert der Messwerte aus 35 und 55 cm Tiefe

Tabelle 52a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Spinats [Versuch 2010]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]		
	ET_0 ¹⁾ [mm]	ET_{PEN} ²⁾	ET_{PEN}/ET_0 ³⁾	Geisenheim: ET_c ⁴⁾		Agrowetter: $ET_{c\ adj}$ ⁵⁾
				$ET_0 \times k_{C_{PEN}}$	$ET_{PEN} \times k_{C_{PEN}}$	$ET_0 \times k_{C_{PEN}}$
09-16	49,6	63,2	1,28	34,7	44,2	35,1
ab 16	85,9	116,2	1,31	94,5	127,8	94,2
ab 09	135,5	179,4	1,31	129,2	172,1	129,3

Tabelle 52b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Spinats [Versuch 2010]

Phase BBCH	Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]	Versickerung [mm] ⁶⁾			
			Geisenheim $ET_0 \times k_{C_{PEN}}$		Agrowetter $ET_0 \times k_{C_{PEN}}$	
			0-30 cm	0-60 cm	0-30 cm	0-60 cm
09-16	118,5	keine Beregnung	80,5	79,3	78,1	76,6
ab 16	162,7		85,4		85,5	87,9
ab 09	281,2		165,9	164,7	163,6	164,5

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 7) aus der angegebenen Bodenschicht

6 Versuche mit Weißkohl

Abstract

Im Rahmen eines fünfjährigen Projektes am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden-Pillnitz konnte 2012-2014 jährlich ein Bewässerungsversuch mit Weißkohl als Teil eines deutschlandweiten Ringversuches zur Evaluierung der kc-Werte der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' angelegt werden.

Nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (nur 2012 und 2013) waren je nach Witterungsverlauf Wassergaben von 386 bzw. 410 mm notwendig, eine noch intensiver bewässerte Variante (nur 2012) erhielt 480 mm Zusatzwasser. Bei Varianten mit reduzierten kc-Werten lagen die Wassergaben je nach Variante bei rund 290, 150 oder 90 mm. In einer Variante, bei der die Bewässerung nach einem SVAT-Modell bemessen wurde (2013 und 2014), wurden je nach Witterungsverlauf und Modellparametrisierung 106 bzw. 228 mm verabreicht. Die 'Kontrolle' (nur 2014) erhielt insbesondere zur Sicherstellung des Anwachsens insgesamt 32 mm.

Der Weißkohl reagierte in allen drei Versuchen nur relativ wenig auf die Zusatzbewässerung, das mittlere Kopfgewicht fiel nur in den Varianten signifikant gegenüber der Standardvariante ab, die mit rund 100 mm oder weniger bewässert wurden. Je 100 mm Zusatzbewässerung errechnete sich ein Mehrertrag von durchschnittlich nur 25 dt/ha. Als pflanzenbaulich 'optimal' stellte sich eine Bewässerung von rund 225 mm heraus. Während der Trockensubstanzgehalt der Weißkohlköpfe durch die Bewässerung praktisch nicht beeinflusst wurde, war der Trockensubstanzgehalt der Ernterückstände in den wenig bewässerten Varianten erhöht. Der Trockenmasseaufwuchs wurde nur in einem der Versuche durch die Bewässerung beeinflusst.

In einer Zusammenfassung werden die auf unterschiedlichen Modellen basierenden Verdunstungsberechnungen dargestellt und die damit kalkulierten Bodenwassergehalte den gemessenen gegenübergestellt.

6.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

Die kc-Werte der 'Geisenheimer Steuerung' (PASCHOLD et al. 2010) wurden in erster Linie unter den klimatischen Bedingungen des dortigen Versuchsstandortes erarbeitet. In mehreren Versuchen der letzten Jahre deuteten sich Probleme bei der Anwendung des Modells unter abweichenden klimatischen Bedingungen an, wobei nach derzeitigem Diskussionsstand vor allem die an den verschiedenen Standorten anzutreffenden Windbedingungen hierfür ausschlaggebend zu sein scheinen. In einem deutschlandweiten Projekt sollen daher an der Beispielkultur Weißkohl die kc-Werte an verschiedenen Standorten evaluiert werden.

6.2 Material und Methoden

Versuchsstandort

Die Versuchsstation befindet sich in südöstlicher Randlage von Dresden (DD-Pillnitz), ca. 120 m über NHN. Der alluviale Boden (Elbe) ist als Parabraunerde anzusprechen. Die genutzten Versuchsfelder (à 1.000 m²) weisen im Mittel in der Schicht 0-90 cm 16,8 % Ton, 36,1 % Schluff und 47,1 % Sand auf, womit die Bodenart nach der Kartieranleitung (BGR 2005) meist im Grenzbereich zwischen schwach (Ls2) bis stark sandiger Lehm (Ls4) und stark lehmiger Sand (SI4) einzuordnen ist (Tabelle 53). Die Feldkapazität (FK) der Versuchsfelder wurde, soweit möglich, jährlich ausgangs des Winters ermittelt (vgl. Versuchsergebnisse).

Tabelle 53: Textur und Bodenart der Versuchsstandorte [Weißkohlversuche]

Schicht	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Bodenart n. Kartieranleitung (BGR 2005)
Versuchsjahr 2012				
0-30 cm	17,4	41,7	40,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
30-60 cm	19,4	42,7	37,9	schwach sandiger Lehm (Ls2)
60-90 cm	18,5	28,4	53,1	stark sandiger Lehm (Ls4)
0-90 cm	18,4	37,6	44,0	mittel sandiger Lehm (Ls3)
Versuchsjahr 2013				
0-30 cm	16,4	34,3	49,3	stark lehmiger Sand (SI4)
30-60 cm	17,4	38,3	44,3	mittel sandiger Lehm (Ls3)
60-90 cm	18,1	35,1	46,8	mittel sandiger Lehm (Ls3)
0-90 cm	17,3	35,9	46,8	stark lehmiger Sand (SI4)
Versuchsjahr 2014				
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)
0-90 cm	14,8	34,7	50,5	stark lehmiger Sand (SI4)

Kulturdaten und Versuchsaufbau

Die Kultur- und Versuchsdaten sind in Tabelle 54 wiedergegeben. Die Pflanzung der Industrie-Weißkohlsorten erfolgte jeweils Mitte Mai mit 3 Pflanzen/m². Um S-bedingte Ertragswirkungen durch die unterschiedlichen Mengen an dem SO₄-haltigem Beregnungswasser ausschließen zu können, erhielten die Bestände mit der N-Düngung auch rund 50-60 kg S/ha.

Durch praxisübliche Pflanzenschutzmaßnahmen und einige Jätgänge waren die Bestände bis zur Ernte praktisch unkraut- und meist schaderregerfrei. 2012 gab es allerdings zu Kulturbeginn Probleme bei der Bekämpfung der Mehligigen Kohlblattlaus; hier konnte erst verzögert eine weitgehende Befallsfreiheit erreicht werden. Im gleichen Versuchsjahr trat, ausgehend von den sich entwickelnden Köpfen, eine ungewöhnlich starke Fäulnis auf, die vermutlich auf einen Spätbefall (oberirdisch) durch die Kohlflye beruhte, der offensichtlich trotz der praxisüblichen Pflanzenschutzmaßnahmen nicht verhindert werden konnte.

Zur Taubenabwehr wurden die Bestände nach der Pflanzung für einige Wochen mit einem Vogelschutznetz abgedeckt. 2013 musste das Netz verhältnismäßig lange auf dem Kohl verbleiben, weil die Anfangsentwicklung des Kohls (vermutlich durch die anfänglichen Starkniederschläge und relativ strahlungsarmen Bedingungen) schleppend verlief.

Bei der Ernte 2012 musste auf Grund der Fäulnis ein hoher Prozentsatz der Weißkohlköpfe als 'nicht marktfähig' eingestuft werden, in den anderen Versuchsjahren erreichten alle Köpfe die Marktfähigkeit.

Bei der Berechnung der flächenbezogenen Frisch- und Trockenmasseerträge wurden etwaige Pflanzenausfälle (der Anwachsphase) in den Parzellen nicht berücksichtigt, zur Berechnung der durchschnittlichen Einzelkopfmasse wurde der Frischmasseertrag einer Parzelle durch die Anzahl der vorgefundenen Pflanzen dividiert.

Tabelle 54: Kultur- und Versuchsdaten [Weißkohlversuche]

Versuchsjahr 2012	
14. Mai	Bodenprobe Ausgangsbodenwassergehalt, N _{min} -Vorrat (0-30 cm): 51 kg N/ha ⇒ keine N-Grunddüngung
15. Mai	Pflanzung von 'Speedies' 75 cm × 45 cm (3,0 Pfl./m ²), Sorte 'Kilaton' (Syngenta), Abdeckung mit Vogelschutznetz (7 mm Maschenweite; bis 11. Juni)
11. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18); Bodenprobe: N _{min} -Vorrat (0-60 cm) 75 kg N/ha ⇒ Aufdüngung auf 200 kg N _{0-60 cm} /ha mit KAS
27. Juni	11-Blatt-Stadium
9. Juli	Beginn Kopfbildung (BBCH 41)
24. Juli	Bodenprobe: N _{min} -Vorrat (0-90 cm) 3 kg N/ha ⇒ Aufdüngung auf 200 kg N _{0-90 cm} /ha mit 'Sulfan' (S-Düngung: 49 kg S/ha)
10. Okt.	Ernte (BBCH 49)
Versuchsjahr 2013	
16. Mai	Pflanzung von 'Speedies' 75 cm × 45 cm (3,0 Pfl./m ²), Sorte 'Typhoon' (Bejo), Abdeckung mit Vogelschutznetz (7 mm Maschenweite; bis 4. Juli)
17. Mai	Bodenprobe: Ausgangs-Bodenwassergehalt
12. Juni	N _{min} -Probe: 31 kg N/ha (0-30 cm), 19 kg N/ha (30-60 cm), N-Düngung (pauschal): 130 kg N/ha als ASS (65 kg S/ha)
13. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
25. Juni	11-Blatt-Stadium
19. Juli	Beginn Kopfbildung (BBCH 41)
22. Juli	N _{min} -Probe: 17 kg N/ha (0-30 cm), 13 kg N/ha (30-60 cm), 16 kg N/ha (60-90 cm), Aufdüngung auf 200 kg N _{0-90 cm} /ha mit KAS
11. Okt.	Ernte (BBCH 49)
Versuchsjahr 2014	
Vorkultur	Landsberger Gemenge (eingearbeitet Anfang Mai)
9. Mai	S-/N-Düngung: 33 kg S/ha + 65 kg N/ha als ASS
14. Mai	Pflanzung von 'Speedies' 66,7 cm × 50 cm (3,0 Pfl./m ²), Sorte 'Typhoon' (Bejo)
15. Mai	Bodenprobe: Ausgangs-Bodenwassergehalt; Abdeckung mit Vogelschutznetz (7 mm Maschenweite; bis 12. Juni)
26. Mai	N-Düngung: 54 kg N/ha als KAS
7. Juni	8-Blatt-Stadium (BBCH 18)
13. Juni	N _{min} -Probe: 267 kg N/ha (0-30 cm), 63 kg N/ha (30-60 cm) ⇒ keine N-Düngung
17. Juni	11-Blatt-Stadium
6. Juli	Beginn Kopfbildung (BBCH 41)
16. Juli	N _{min} -Probe: 18 kg N/ha (0-30 cm), 6 kg N/ha (30-60 cm), 10 kg N/ha (60-90 cm)
25. Juli	Aufdüngung auf 200 kg N _{0-90 cm} /ha mit KAS u. ASS (33 kg S/ha), 4 mm Beregnung
30. Sept.	Ernte (BBCH 49)
alle Versuchsjahre	
Bodenart	s. Tabelle 53, n. Bodenschätzung: L 3 Al 73/74; Grundwasserflurabstand > 7 m
Versuchsanlage	einfaktorielle Blockanlage mit 4 Wiederholungen
Parzellengröße	Anlageparzelle: 9,0 m × 5,85 m (52,7 m ² = 156 Pfl.) bzw. (2014) 10,0 m × 4,0 m (40,0 m ² = 120 Pfl.) Ernteparzelle: 6,0 m × 3,15 m (18,9 m ² = 56 Pfl.) bzw. (2014) 8,7 × 2,0 m (17,3 m ² = 52 Pfl.)
Beregnung	Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen (Gierhake Maschinenbau)
Ernte	Kopf: praxisüblich geputzt (alle losen Blätter entfernt); Ernterückstände: (Rest)Pflanze direkt über der Bodenoberfläche abgeschnitten, inkl. Putzabfälle

Bewässerungsvarianten

In den Versuchen konnten jeweils drei bis vier der im Rahmen des Ringversuches abgestimmten Bewässerungsvarianten mit ab dem 8-Blatt-Stadium (BBCH 18) differenzierenden kc-Werten geprüft werden (Tabelle 55). Dabei bezogen sich die kc-Werte anfänglich (2012) auf die PENMAN-Verdunstung (ET_{pPEN}), 2013 und 2014 auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0).

In der Variante 'TU' (nur 2014) wurde nach Vorgaben des SAPHIR-Projektes (s. u.) mit phasenweise kontinuierlich ansteigenden kc-Werten gearbeitet. 2014 konnte auch eine 'Kontrolle' aufgenommen werden, die, mit Ausnahme von Berechnungsgaben zur Sicherstellung des Anwachsens, praktisch nicht berechnet wurde.

Tabelle 55: kc-Werte für die verschiedenen Bewässerungsvarianten (ohne 'SVAT'-Variante) [Weißkohlversuche]

	Variante						Wassergabe [mm] ⁴⁾
	1+ ¹⁾	1 ²⁾	2 ¹⁾	3 ¹⁾	4 ¹⁾	TU ³⁾	
Versuchsjahr 2012	$ET_{pPEN} \times$						
ab Pflanzung (BBCH 12-13)	0,5						12
ab 8. Blatt (BBCH 18)	1,0	0,8		0,6	—	—	27
ab 11. Blatt	1,4	1,2	1,0	0,7	—	—	
ab Beginn Kopfbildung (BBCH 41)	1,5	1,3	1,1	0,8	—	—	
Versuchsjahr 2013 und 2014	$ET_0 \times$						
ab Pflanzung (BBCH 12-13)	—	0,7				0,8-1,1 ⁸⁾	10
ab 8. Blatt (BBCH 18)	—	1,1		— ^{6)/0,8}	0,8/0,7 ⁷⁾	1,1 ⁹⁾	20
ab 11. Blatt	—	1,7/— ⁵⁾	1,4	—/1,0	0,8/0,7 ⁷⁾	1,1-1,2 ¹⁰⁾	
ab Beginn Kopfbildung (BBCH 41)	—	1,8/—	1,5	—/1,1	0,8/0,7 ⁷⁾	1,2 ¹¹⁾	30

1) im Rahmen des Ringversuches abgestimmte Bewässerungsstufen

2) empfohlene kc-Werte für PENMAN-Verdunstung (ET_{pPEN}) (FA-GM 2011c) bzw. für FAO-Gras-Referenzverdunstung [HS-GM 2013]

3) kc-Werte nach Vorgaben des SAPHIR-Projektes (nur 2014)

4) je Bewässerungstermin (Richtgröße; ca. 20 % der nFK der Schicht 0-30, 0-60, 0-90 cm)

5) die Variante konnte 2014 aus Kapazitätsgründen nicht in den Versuch aufgenommen werden

6) die Variante konnte 2013 aus Kapazitätsgründen nicht in den Versuch aufgenommen werden

7) 2014 um 0,1 gegenüber dem Vorjahresversuch reduziert

8) 14.5. bis 13.6., täglicher Anstieg der kc-Werte um 0,1

9) 14.6. bis 12.8.

10) 13.8. bis 14.9., täglicher Anstieg der kc-Werte um 0,003

11) ab 15.9.

In der Variante 'SVAT' (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer-Modell; nur 2013 und 2014) erfolgte die Bewässerung nach Berechnungen/Vorgaben einer Arbeitsgruppe des SAPHIR-Projektes (s. Literaturverzeichnis). Hierbei wurde zunächst (2013) das SVAT Modell 'Daisy' (HANSEN 2002) anhand der Versuchsdaten (Erträge, Vegetationsdauer, Bodenanalysen) von 2012 kalibriert und anschließend mit dem so kalibrierten Modell der Bewässerungsbedarf wöchentlich berechnet. 2014 konnte das Modell mit Versuchsdaten (Erträge, Vegetationsdauer, Bodenwasserspannung in drei Tiefen, Blattflächenindex, Pflanzenhöhen) von 2013 kalibriert werden.

Jeweils mittwochs (2013) bzw. zu Wochenbeginn wurden die Wassergaben und die Wetterdaten der letzten Woche in das Modell 'Daisy' implementiert und danach der Bedarf für die folgende Woche berechnet. Dabei wurden die Wetterdaten des entsprechenden Zeitraumes aus dem Jahr 2008 (mittelfeuchtes Jahr) als zu erwartender Witterungsverlauf zugrunde gelegt. Der Bewässerungsbedarf beim Erreichen einer Wasserspannung von 250 hPa in 30 cm Tiefe wurde vorab auf 15 mm festgesetzt. Der jeweilige Bewässerungsbedarf wurde um die Menge des in der Woche tatsächlich gefallenen Niederschlags reduziert.

In der Variante 'TU' erfolgte die Bewässerung entsprechend der 'Geisenheimer Steuerung', jedoch wurde die kc-Kurve von der Arbeitsgruppe des SAPHIR-Projektes vorgegeben. Die kc-Kurve wurde mit Hilfe des Modells 'Daisy' und einem stochastischen Wettergenerator erstellt. Letzterer generiert aus vorhandenen historischen Wetterdaten eines Standortes ein Vielfaches (hier 300 Jahre) an Tageswerten mit denselben statistischen Eigenschaften. Das Pflanzenwachstumsmodell 'Daisy' rechnete 300 Jahre mit den Boden- und Wettereigenschaften des Standorts Pillnitz, in denen Weißkohl voll bewässert wurde. So konnten tägliche kc-Werte (ET_c/ET_0) für 300 Jahre berechnet werden. Diese Kurvenschar gibt Auskunft über die Häufigkeit des Eintretens eines gewissen kc-Wertes. Die für die Bewässerung gewählte kc-Kurve entsprach dem 75 % Quantil, d. h. in 75 % der 300 Jahre lag der kc-Wert unter diesem Wert.

Für die Varianten 1(+) bis 4 und TU wurde jeweils nach der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' (PASCHOLD et al. 2010) auf Basis der PENMAN- (2012; ET_{pPEN}) bzw. FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) eine klimatische Wasserbilanz erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet. (Die auf Basis dieser klimatischen Wasserbilanzen mit ihren unterschiedlichen kc-Werten berechneten Bodenwassergehalte geben naturgemäß nicht den tatsächlichen Bodenwassergehalt wieder.)

Anders als in der aktuellen Empfehlung (Hs-GM 2013), nach der der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer wieder auf den Ausgangswassergehalt von rund 90 % nFK aufgefüllt werden wird, sollte der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde zunächst bis zum 8-Blatt-Stadium (BBCH 18) nur die Bodenschicht 0-30 cm einbezogen, danach wurde mit 0-60 cm Tiefe kalkuliert. 2013 und 2014 wurde mit Beginn der Kopfbildung auch die Schicht 60-90 cm berücksichtigt.

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 (DWD) angebotenen Modul 'Agrowetter Beregnungsberatung' berechnet, das sich ebenfalls weitestgehend am 'Geisenheimer Modell' auf Basis der FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) orientiert. Seit Beginn der Saison 2012 wird diese ET_0 allerdings mit einem windabhängigen Faktor 'korrigiert' (JANSSEN 2012).

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 konnte mit 'Agrowetter' auch für die ggf. nicht ausreichend bewässerten Varianten eine Abschätzung der Bodenwassergehalte vorgenommen werden.

Bei der Berechnung mit 'Agrowetter' wurden die Voreinstellungen bezüglich der Schwellenwerte für den Beregnungsbeginn (70 % bis BBCH 18, danach 45 %) einheitlich auf 60 % geändert, die maximale Durchwurzelungstiefe wurde von 60 cm (Voreinstellung) auf 90 cm erhöht.

Bei der Berechnung greift 'Agrowetter' auf die ET_0 -Werte der auszuwählenden nächstgelegenen Wetterstation des DWD zurück, in diesem Falle Dresden-Hosterwitz (ca. 3 km vom Versuchsstandort entfernt, ähnliche To-

pografie etc.). Für die eigene Berechnung nach 'Geisenheim' wurden seitens des DWD freundlicherweise die ET_0 - und ET_{PEN} -Verdunstungswerte dieser Station zur Verfügung gestellt. 2013 lieferte die Station nach einem Hochwasserschaden in Folge der Starkregenereignisse ab dem 4. Juni allerdings keine Daten mehr, sodass der DWD aus Daten der deutlich weiter entfernten Stationen Dresden-Klotzsche und Hoyerswerda Verdunstungsdaten für die Station Hosterwitz interpolieren musste (JANSSEN 2013).

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.

Die Beregnung der entsprechenden Parzellen erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt zumeist nur 4 mm ausgebracht, sodass bis zu 8 Überfahrten pro Beregnungsgabe erforderlich waren. Beim Versuch 2013 wurde auf Grund des durch die anfänglichen Starkniederschläge verschlammten Bodens bis zu 13-mal (à 2 mm) beregnet. Die ausgebrachte Beregnungsmenge wurde mit Hilfe von bodennah aufgestellten Regenschirmen überwacht.

An mehreren Terminen während der Kulturzeit konnten Bodenproben im 30 cm-Raster bis 60 bzw. 90 cm Tiefe entnommen werden. Dazu wurden in jeder Parzelle zwei Bodenproben mit einem mehrteiligen Bohrsatz (0-30, 30-60, 60-90 cm) gezogen, sodass je Variante und Tiefe eine Mischprobe über die 4 Wiederholungen mit insgesamt 8 Einstichen vorlag. Am jeweils gesamten Probenmaterial (ca. 800 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 $1,5 \text{ g/cm}^3$.

2013 wurden nach Versuchsbeginn in jeweils 2 Wiederholungen jeder Variante spezielle Kunststoffrohre für eine FDR-Rohrsonde (anderes Fabrikat als 2010/2011 in dem Spinat- bzw. Erbsenversuch getesteten Sonde; vgl. 5, Seite 172) eingebaut, sodass jeweils zeitgleich mit Bodenprobenahmen für die gravimetrische Wassergehaltsbestimmung der Bodenwassergehalt mit der Sonde mit einer Auflösung in 10 cm-Schritten gemessen werden konnte.

2013 wurden Mitte Juni in einer Wiederholung der 'SVAT'-Variante Druckaufnehmer-Tensiometer (Model T4e, Firma UMS, München) in etwa 30, 60 und 90 cm Tiefe eingebaut, die zehnmütige Messwerte bis zur Ernte lieferten. Im Versuch 2014 (Einbau der Tensiometer Ende Mai) wurde auch die Tension in der 'TU'-Variante gemessen.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Versuchsjahr 2012

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. Als Mittel der mittlerweile vorliegenden 3 Untersuchungen wurde eine FK von 27,1 Vol.-% (0-30 cm), 28,1 Vol.-% (30-60 cm) und 28,6 Vol.-% (60-90 cm), im Mittel 27,9 Vol.-% errechnet (Tabelle 56).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 34 Vol.-% (Ls2, Rohdichte $1,5 \text{ g/cm}^3$) bzw. 32 Vol.-% (Ls4) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK (0-90 cm) zugrunde

gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Ls2: 18 Vol.-%, Ls4: 16 Vol.-%) mit 14,4 Vol.-%, 14,9 Vol.-% und 14,3 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-90 cm eine mittlere nFK von 13,4 Vol.-% errechnet.

Zum Pflanztermin des Kohls (BBCH 12) wurde am 14. Mai ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-60 cm Tiefe von 78 % nFK ermittelt (Tabelle 56). Eine Bestimmung des Bodenwassergehaltes der Schicht 60-90 cm wurde zu diesem Zeitpunkt leider versäumt; insbesondere für die Berechnung der Versickerung und der $ET_{c\ adj}$ durch 'Agrowetter' wurde hier ein Ausgangsgehalt von 80 % nFK angenommen.

Nach der Pflanzung wurde der Kohl mit einer Beregnungsgabe von 12 mm 'angegossen', zusätzliche Niederschläge in Höhe von 5 mm füllten die oberste Bodenschicht vollständig auf (Abbildung 171). Um den 20. Mai herrschten mit ET_{PEN} -Werten von bis zu 8 mm/d (vgl. Abbildung 172) und nur geringen Niederschlägen trockene Bedingungen, sodass bis zum 8-Blatt-Stadium mit insgesamt 50 mm beregnet werden musste (Tabelle 57a u. b).

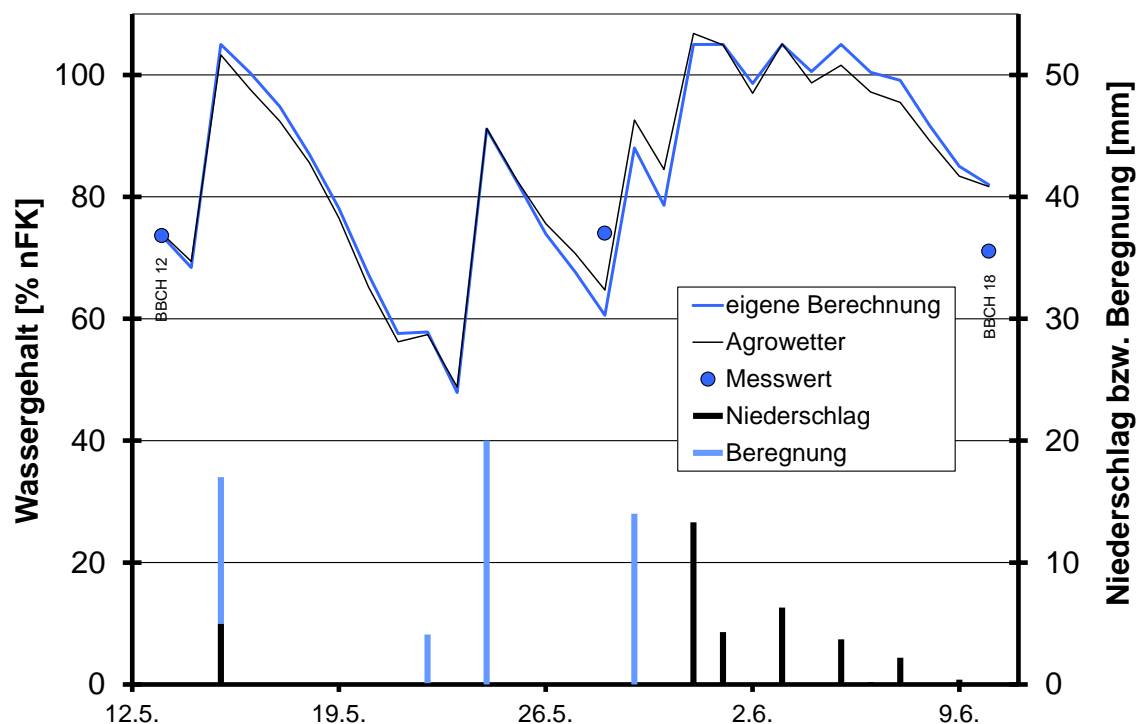


Abbildung 171: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_{PEN} \times kc_{Var\ 1+1/2/3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt (alle Varianten) [Weißkohlversuch 2012]

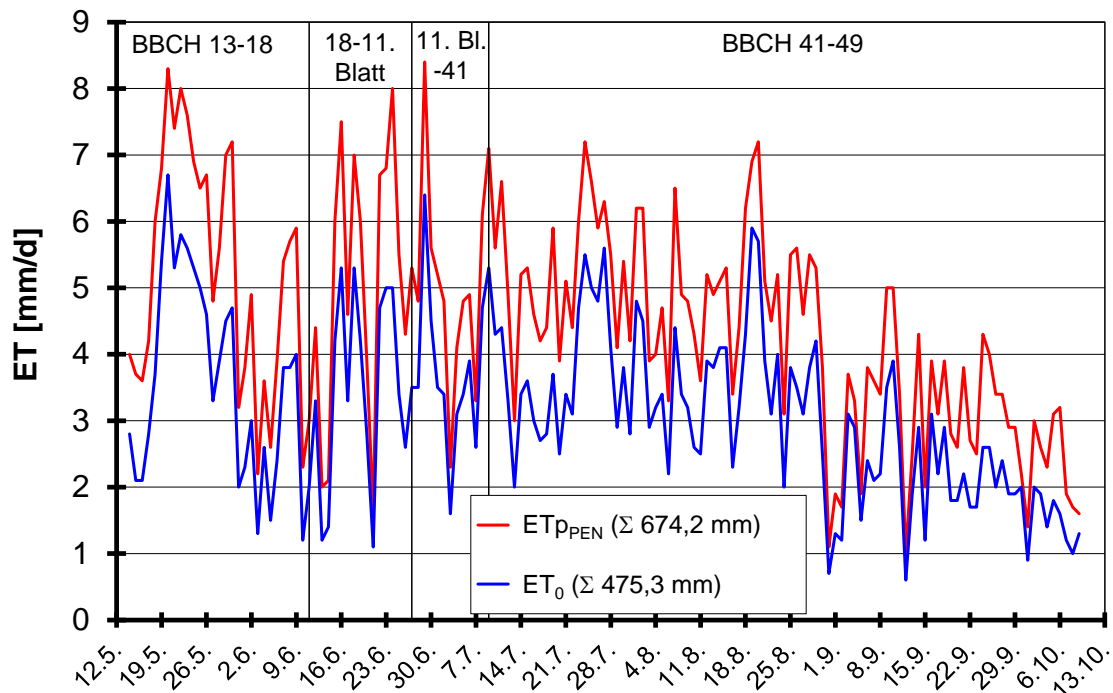


Abbildung 172: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2012]

Mit Beginn des 8-Blatt-Stadiums setzte die Differenzierung der Bewässerung mit den unterschiedlichen k_c -Werten ein. Allerdings beliefen sich die Unterschiede zwischen 'Variante 1+' und 'Variante 3' bis zum Beginn der Kopfbildung (BBCH 41) auf nur 36 mm (Tabelle 57b).

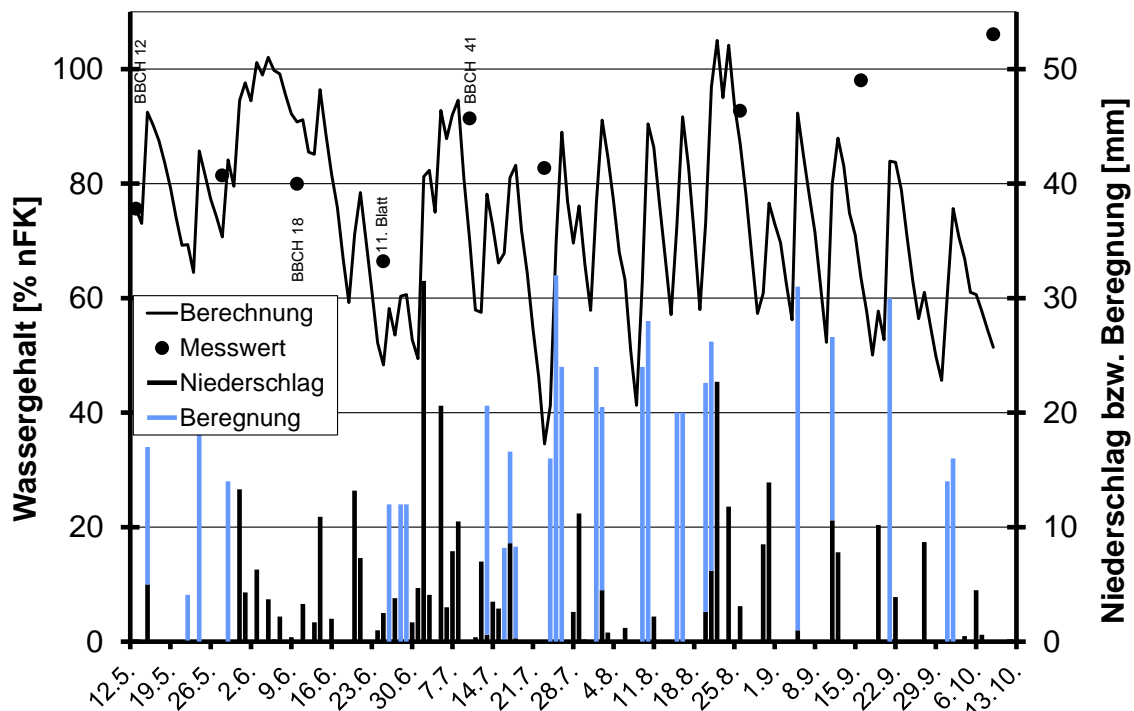


Abbildung 173: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 1+' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{cVar 1+}$ sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]

In der langen Kopfbildungsphase berechnete sich dann für die 'Variante 1+' ein Zusatzwasserbedarf von knapp 400 mm, sodass diese Variante mit insgesamt 480 mm beregnet werden musste. An mehreren Terminen kam es allerdings durch zu späte Beregnungsgaben zu einem Absinken des berechneten Bodenwassergehaltes auf unter 60 % nFK, was einerseits auf die begrenzte Beregnungskapazität, andererseits aber auch auf das Ausbleiben angekündigter Niederschläge zurückzuführen ist (Abbildung 173).

Entsprechend der (zu) hoch angesetzten k_c -Werte wurden ab Ende Juni an fast allen Messterminen deutliche höhere Bodenwassergehalte gemessen als sie die Simulation errechnete. Nur Ende August stimmten nach einer simulierten und wohl auch realen Auffüllung des Bodens auf FK Modell und Realität überein.

Etwa ab Beginn der Kopfbildung (ca. 60 Tage nach der Pflanzung) dürfte der Weißkohl die Schicht unterhalb 60 cm erreicht gehabt haben. Betrachtet man von daher (für diese Phase) die mittleren Wassergehalte der Schicht 0-90 cm, so zeigt sich aber auch hier, wie auf Grund der hohen k_c -Werte zu erwarten, eine Unterschätzung der Bodenwassergehalte (Abbildung 174). Diese Berechnung wies auch keine Sickerwasserverluste aus, weil 105 % FK nie überschritten wurden.

'Agrowetter' (mit einer Verdunstungsberechnung auf Basis geringerer k_c -Werte arbeitend) bildete die hohen Wassergehalte recht gut ab und berechnete für diese Variante eine Versickerung von 190 mm (Tabelle 57b).

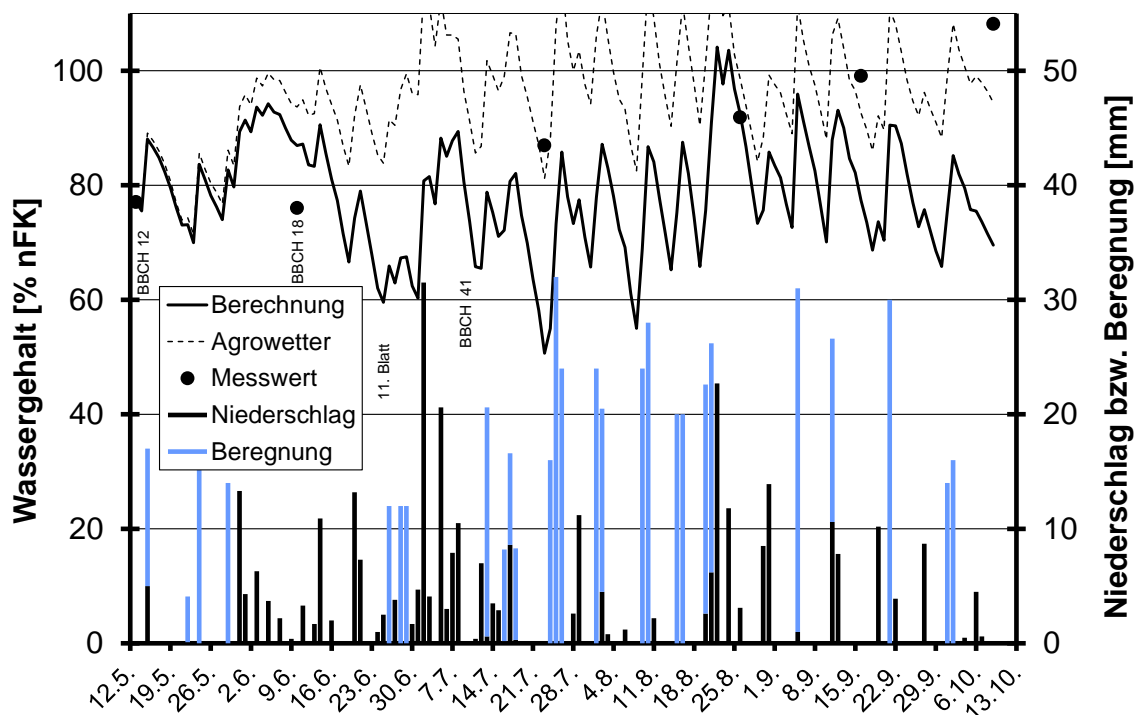


Abbildung 174: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1+' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{cVar 1+}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]

Für die 'Variante 1', die mit den zurzeit aktuellen k_c -Werten berechnet wurde, errechnete sich ein Zusatzwasserbedarf von insgesamt 386 mm, wobei auch hier der Hauptwasserbedarf (324 mm) auf die Kopfbildungsphase fiel (Abbildung 175).

Entsprechend der geringeren k_c -Werte fiel die Differenz zwischen berechnetem und tatsächlichem Bodenwassergehalt bei dieser Variante geringer aus. Hierbei muss man allerdings berücksichtigen, dass die k_c -Werte beim 'Geisenheimer Modell', die ursprünglich aus der Relation zwischen der im Lysimeter-Versuch gemessenen ET_c und der Referenzverdunstung errechnet wurden, im Laufe des 'Evaluierungsprozesses' häufig gesenkt wurden, wenn in Feldversuchen mit entsprechend geringeren Beregnungsgaben gleich hohe oder sogar höhere Erträge erzielt wurden (KLEBER 2012).

Für zwei Termine errechnete sich eine leichte Versickerung, die sich auf insgesamt 6,1 mm belief. 'Agrowetter' berechnete entsprechend der um 94 mm geringeren Wassergabe als bei 'Variante 1+' eine Versickerung von ca. 100 mm.

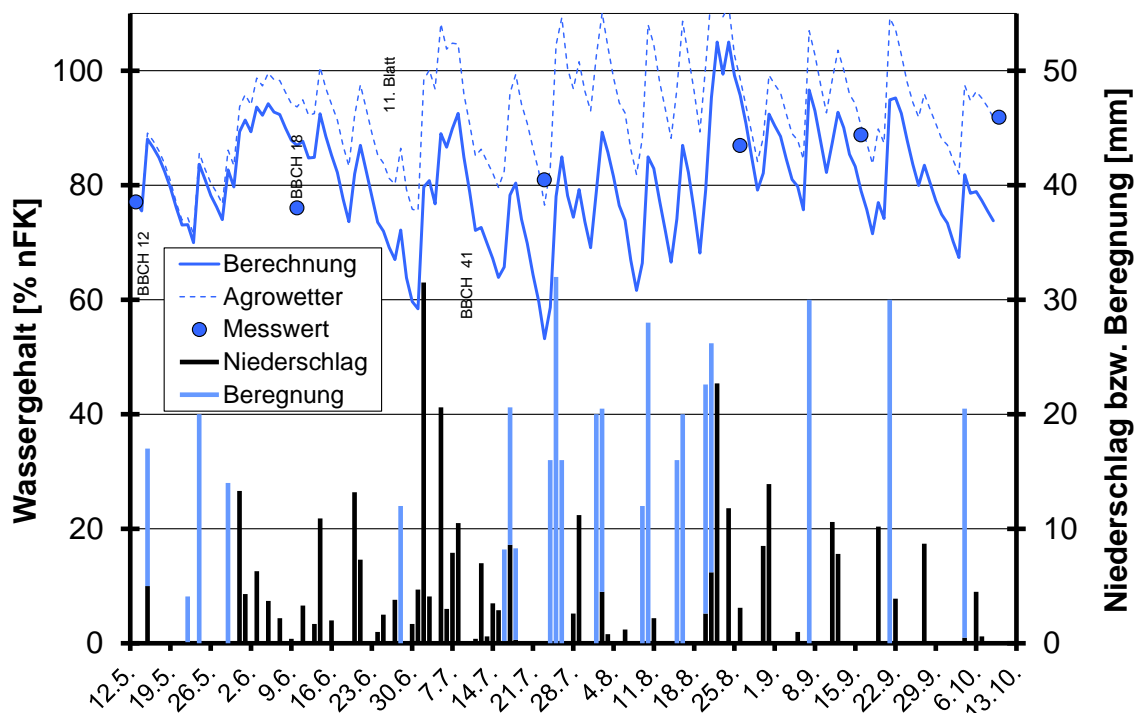


Abbildung 175: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_{pPEN} \times k_{cVar 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]

Bei der 'Variante 2' zeigte sich ab Anfang Juli eine große Übereinstimmung der eigenen, auf reduzierte k_c -Werte basierenden Berechnung und der von 'Agrowetter' berechneten Bodenwassergehalte, die nur selten 70 % der nFK unterschritten (Abbildung 176). (Die Bodenschicht 60-90 cm wurde wie beschrieben bei der Bemessung der Beregnungsgaben nicht berücksichtigt; bei alleiniger Betrachtung der Bodenschicht 0-60 cm errechneten sich vor den Beregnungsgaben Bodenwassergehalte um 60 % nFK.) Auch für diese, mit 288 mm berechnete Variante berechnete 'Agrowetter' noch eine Versickerung von 24 mm.

Die berechneten (eigene Berechnung) und tatsächlich gemessenen Bodenwassergehalte wichen meist nur wenig voneinander ab.

Auch bei der 'Variante 3' stimmten die berechneten und tatsächlich gemessenen Bodenwassergehalte recht gut überein (Abbildung 177). Dagegen unterschätzte 'Agrowetter' die Wassergehalte ab etwa Mitte der Kulturzeit massiv. Bei geschätzten Gehalten von zum Teil deutlich unter 50 % nFK wurde nach dem Modell auch

ET_c eingeschränkt, sodass für diese Varianten eine um 45 mm geringere Verdunstung als bei den anderen drei Varianten berechnet wurde (Tabelle 57a).

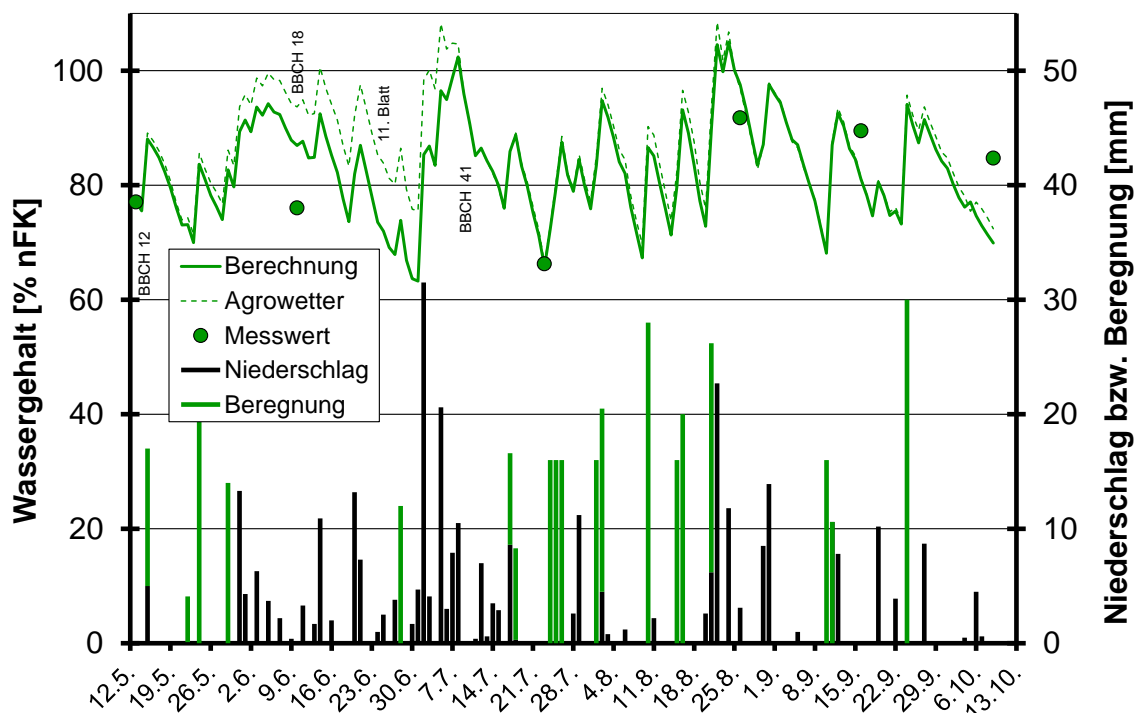


Abbildung 176: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{Var2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]

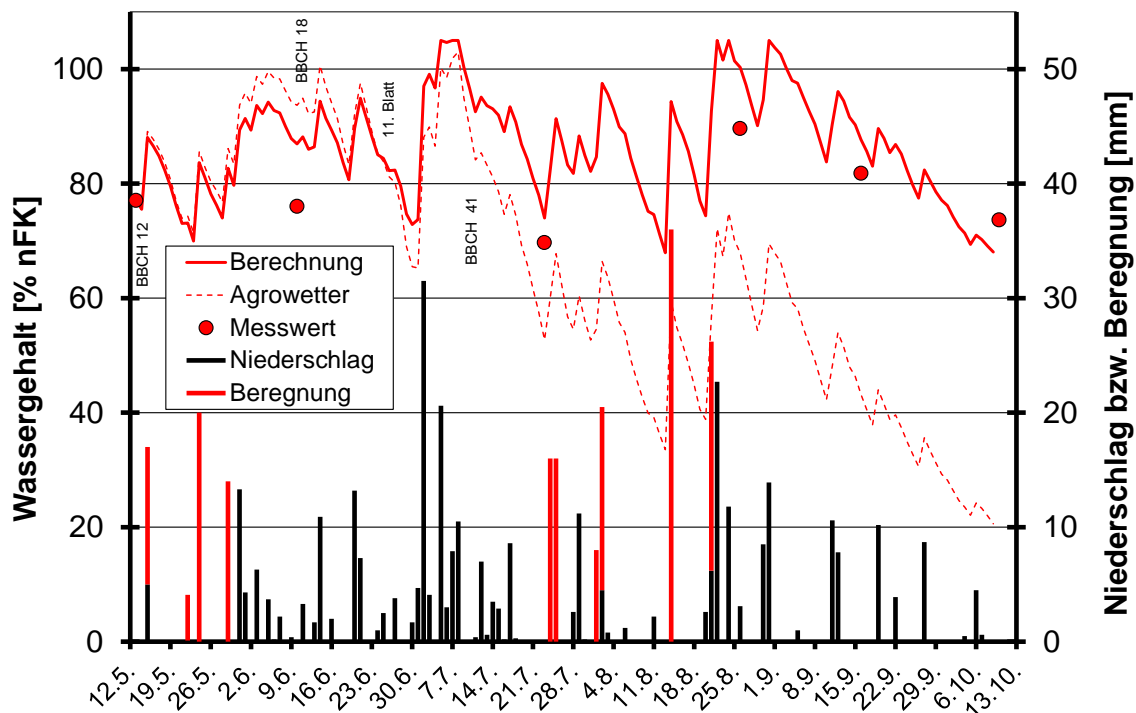


Abbildung 177: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 3' auf Basis $ET_{pPEN} \times kc_{Var3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2012]

Stellt man die gemessenen Bodenwassergehalte der vier Varianten gegenüber, so zeigen sich trotz der ab dem 11-Blatt-Stadium differenzierten Beregnung an mehreren Terminen recht ähnliche Bodenwassergehalte (Abbildung 178). Weil die Bodenproben bewusst zumeist kurz vor Beregnungsgaben bzw. Niederschlägen gezogen wurden, ist davon auszugehen, dass zwischenzeitlich die Bodenwassergehalte die gemessenen Werte nicht deutlich unterschritten haben dürften. Damit dürfte auch in der am wenigsten beregneten 'Variante 3' ein Wassergehalt von 60 % nFK praktisch nie unterschritten worden sein.

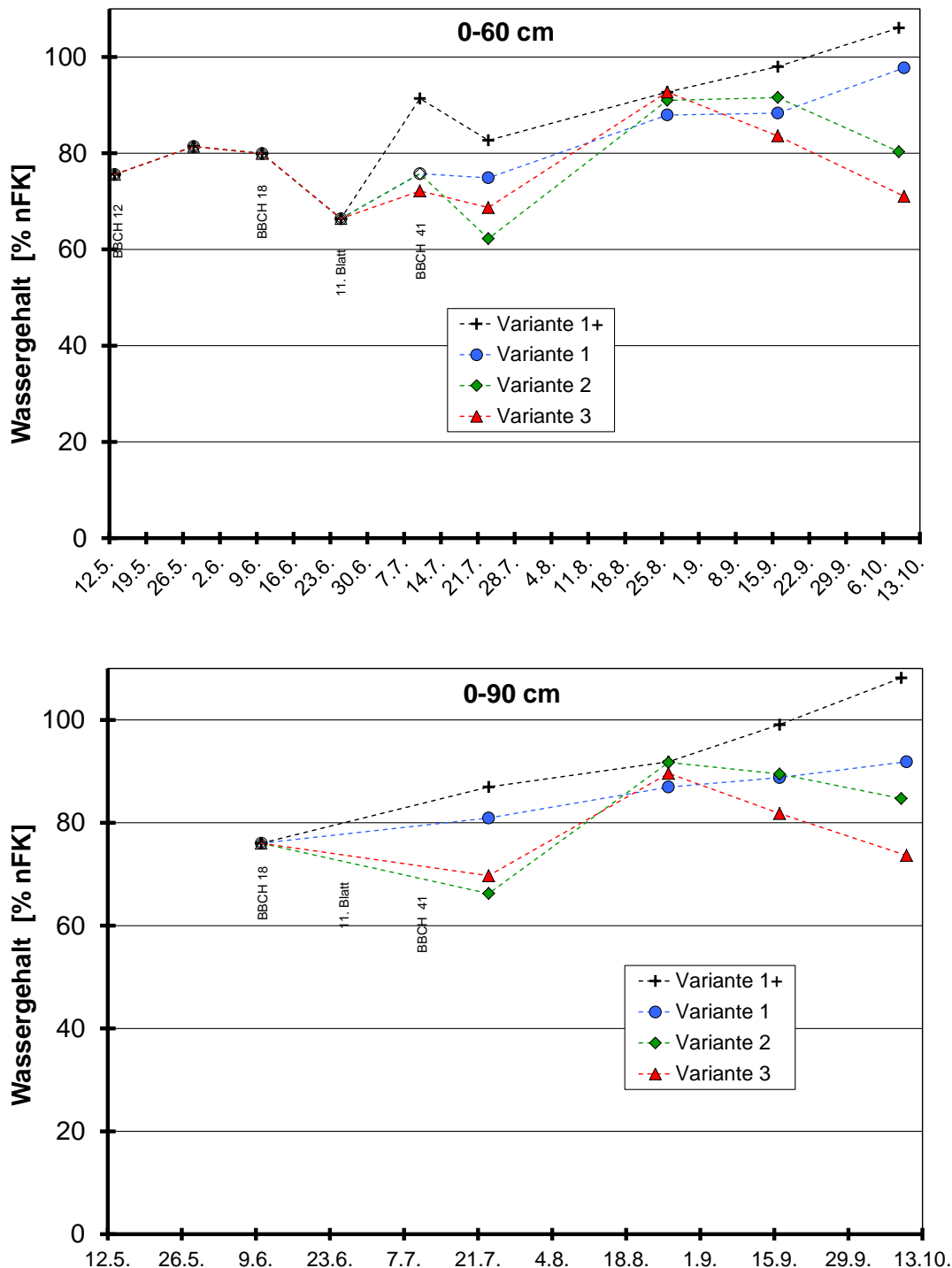


Abbildung 178: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (oben) bzw. 0-90 cm (unten) (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Weißkohlversuch 2012]

Entsprechend der offensichtlich immer ausreichend hohen Bodenwassergehalte waren auf der Versuchsfläche keine deutlichen Unterschiede zwischen den Varianten auszumachen. Auffällig war nur, dass sich in dem gesamten Versuch mit Beginn der Kopffüllung immer mehr Pflanzen zeigten, bei denen fäulnisbedingt der sich bildende Kopf abknickte und die Pflanzen je nach Zeitpunkt des Schadens mehr oder weniger aus Seitenknospen austrieben.

Das ganze Ausmaß des Schadens zeigte sich erst zur Ernte, bei der viele Pflanzen auch im Kopfansatzbereich diese Fäulnis aufwiesen und als nicht marktfähig eingestuft werden mussten. Zurückgeführt wurden die Schäden auf einen (Spät)Befall durch die Kohlflye mit dann sekundär auftretender Fäulnis (Auch in einem parallel durchgeführten Sortenversuch mit nahezu identischem Pflanzenschutzmitteleinsatz traten bei einigen Sorten entsprechende Schäden auf [allerdings nicht in dem Ausmaß], während andere Sorten nahezu keine Schäden zeigten) Tendenziell wurde in der 'Variante 2' die geringste Menge an marktfähigen Köpfen geerntet (Abbildung 179).

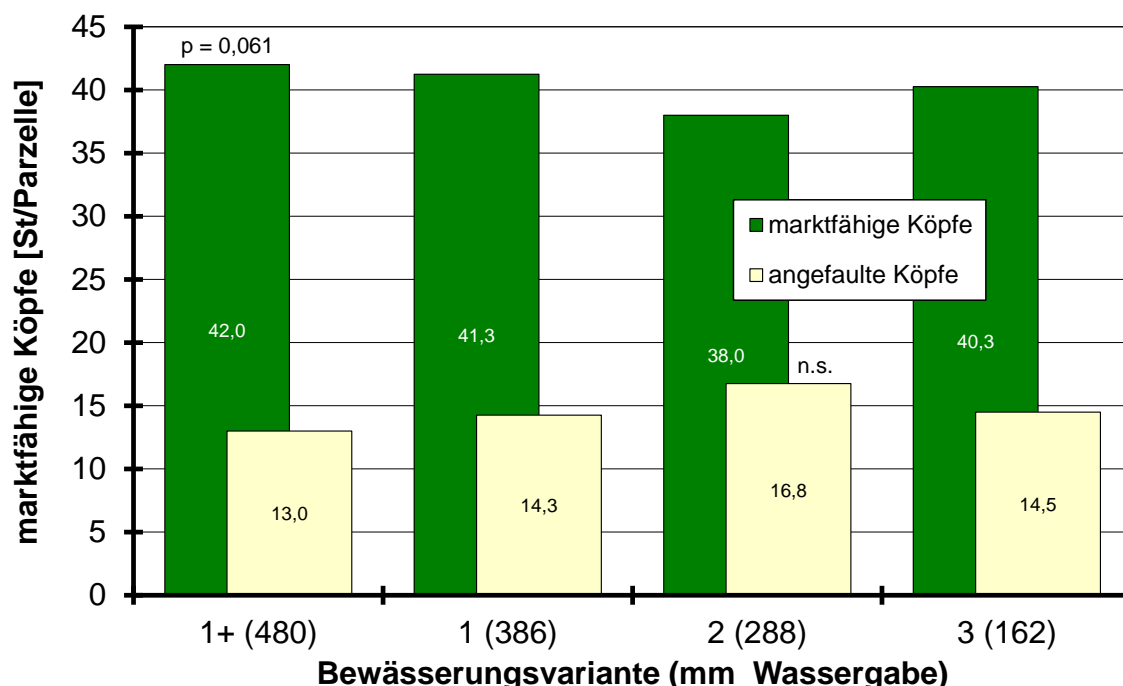


Abbildung 179: Anzahl markt- bzw. nicht marktfähiger Pflanzen je Parzelle (Mittelwerte über die Wiederholungen; Differenz zu 56 möglichen Pflanzen gleich Ausfälle) [Weißkohlversuch 2012]

Durch den mit durchschnittlich 26 % sehr hohen Anteil an angefaulten Köpfen fiel der Ertrag an marktfähiger Ware nur mäßig aus. Mit knapp 950 dt/ha zeigte die 'Variante 1+' aber einen signifikant höheren Ertrag als die reduziert bewässerten Varianten 2 und 3 (Abbildung 180).

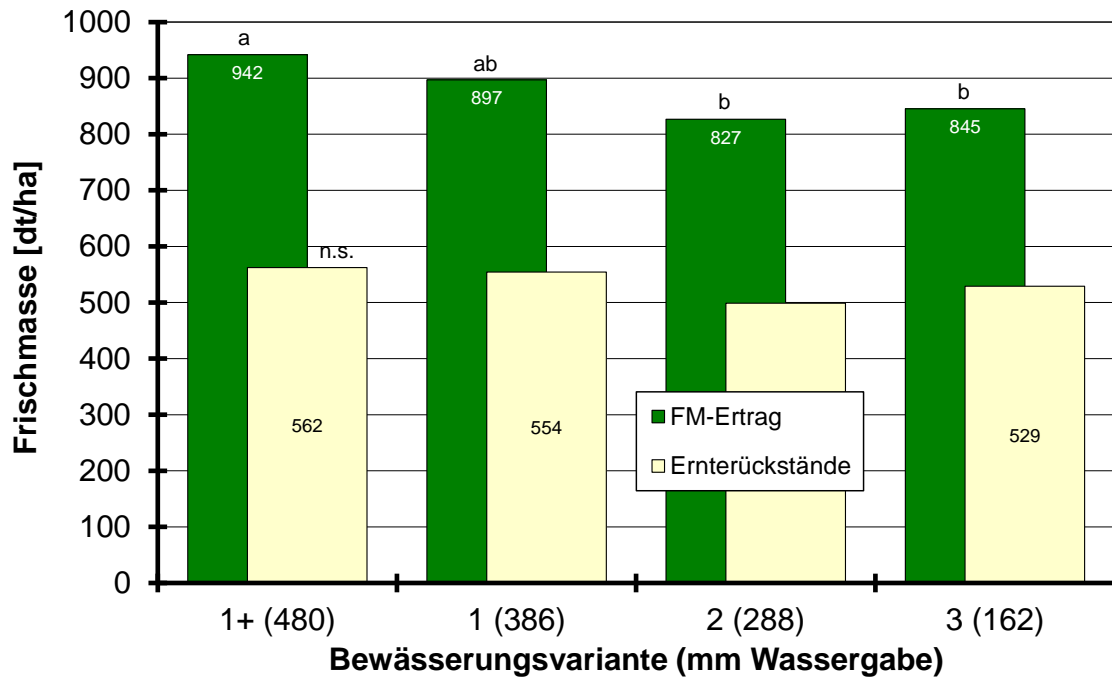


Abbildung 180: Marktfähiger Ertrag ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 80$ dt/ha) und Ernterückstände (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012]

Betrachtet man allerdings die Einzelkopfmasse, so wird deutlich, dass der Mehrertrag der 'Variante 1+' in erster Linie auf den etwas geringeren Anteil an angefaulten Köpfen beruhte, weil die Einzelkopfmasse praktisch nicht durch die Bewässerung beeinflusst wurde (Abbildung 181). (Die Betrachtung der Einzelkopfmasse erscheint insofern gerechtfertigt, als die Pflanzen mit 'faulenden' Köpfen im Bereich des Umblattes praktisch keine Schäden zeigten und diejenigen Pflanzen, die bereits frühzeitig faulten, aus Seitenknospen austrieben, sodass die verbliebenen (Nachbar)Pflanzen nicht wesentlich beeinflusst worden sein dürften.)

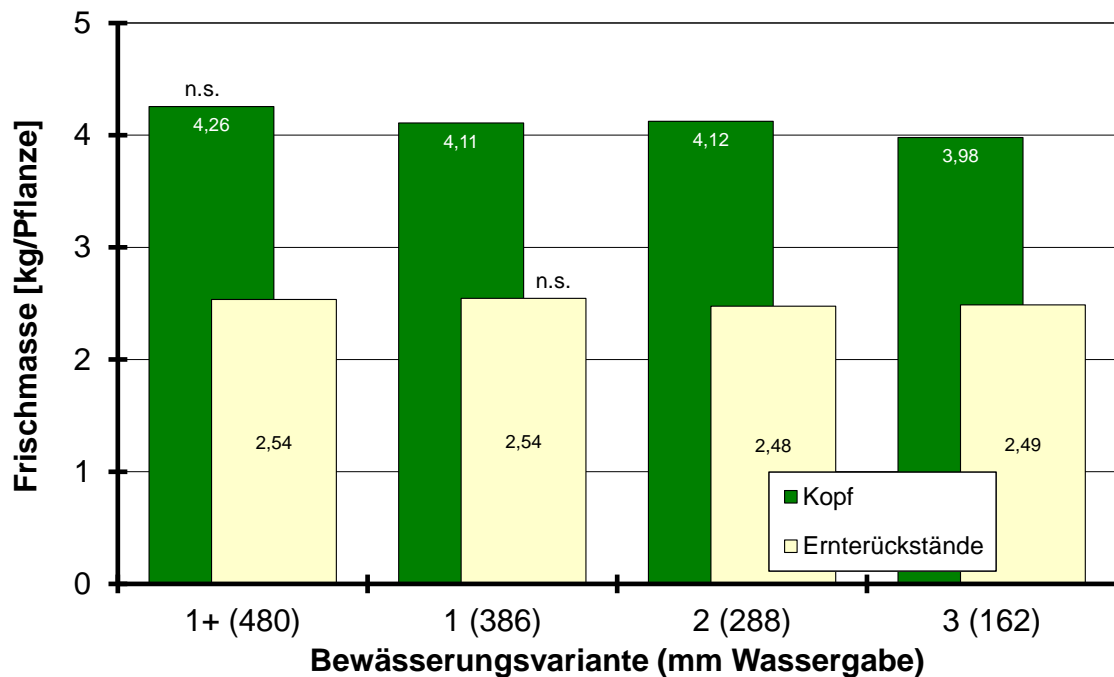


Abbildung 181: Mittlere Kopfmasse und Ernterückstände je Einzelpflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012]

Der Trockensubstanzgehalt der Köpfe und Ernterückstände wurde durch die Bewässerungsintensität nicht signifikant beeinflusst (Abbildung 182). Weil er aber bei den stark bewässerten Varianten 'eher etwas geringer ausfiel', errechneten sich für alle Varianten nahezu identischen Trockenmassen für den Einzelkopf bzw. die Ernterückstände (Abbildung 183).

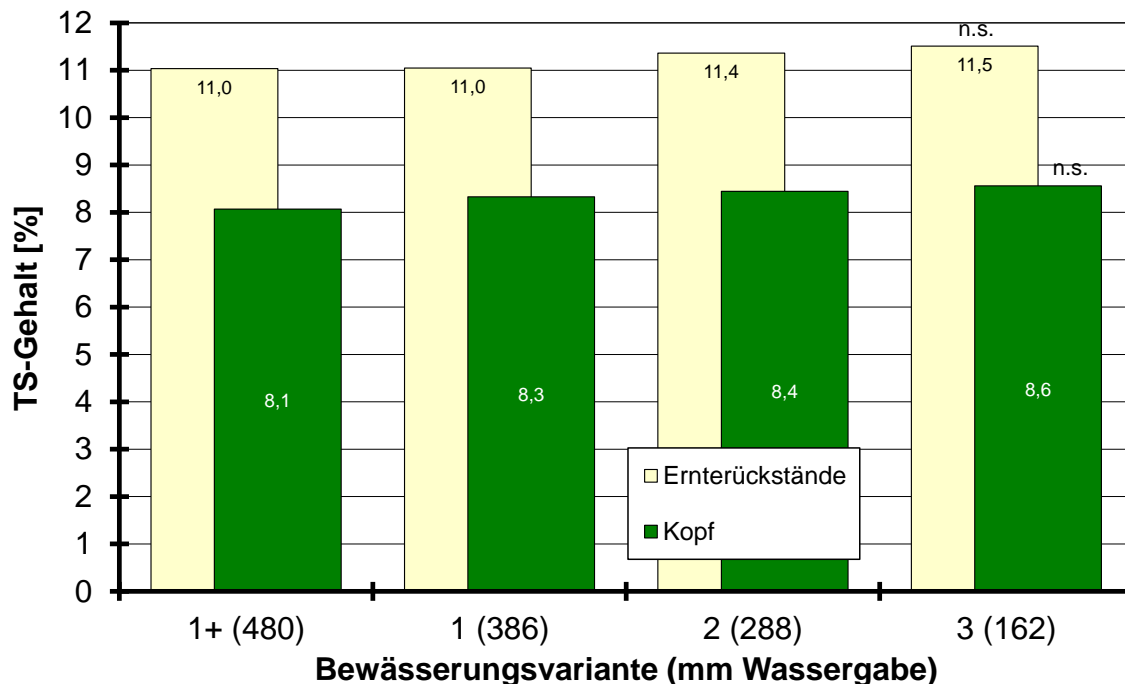


Abbildung 182: Trockensubstanzgehalt von Marktertrag (Köpfe) und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012]

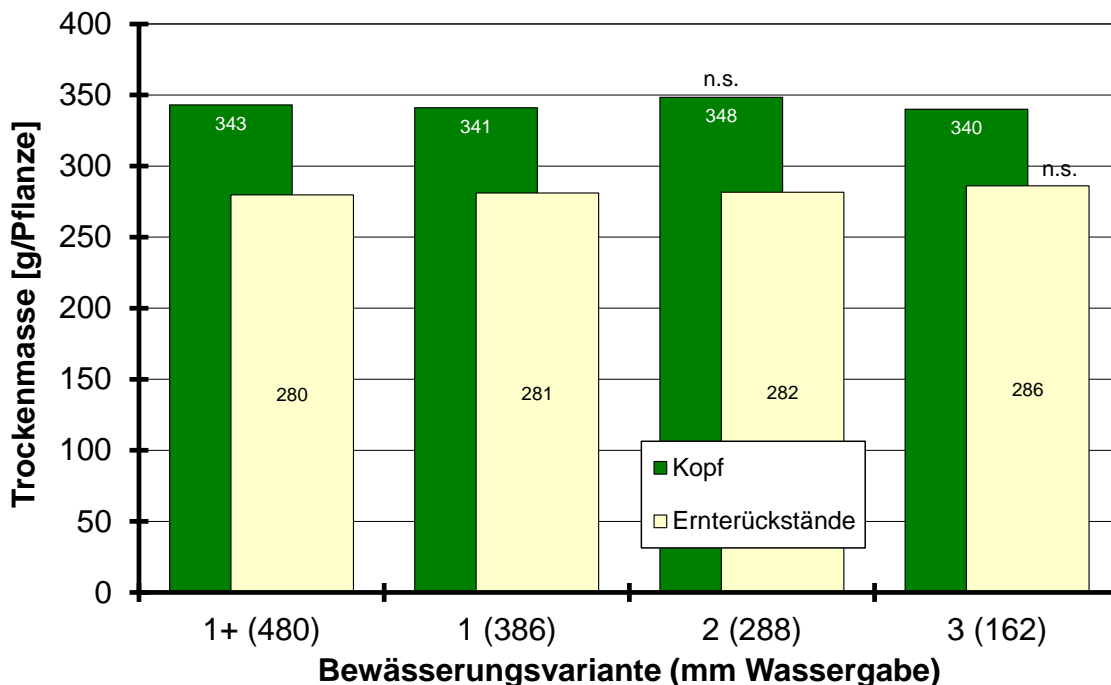


Abbildung 183: Mittlere Trockenmasse der Köpfe und Ernterückstände je Einzelpflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2012]

Tabelle 56: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Weißkohlversuch 2012]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
5. Februar ³⁾		alle	26,0	27,3	27,1			
Mittel ⁴⁾		alle	27,1	28,1	28,6	100	100	100
13. Mai ⁵⁾	12	alle	23,7	25,2		74	78	80 ⁶⁾
28. Mai		alle	23,8	25,7		74	89	
10. Juni	18	alle	23,4	26,7	24,0	71	89	68
25. Juni	11. Blatt	alle	22,1	24,5		61	72	
10. Juli	41	Var 1+	25,3	27,7		86	97	
		Var 1+2	24,0	25,0		75	76	
		Var 3	23,6	24,4		72	72	
23. Juli		Var 1+	24,4	26,4	27,9	79	87	96
		Var 1	23,0	25,8	27,6	68	82	93
		Var 2	21,9	23,5	24,9	59	65	74
		Var 3	22,4	24,7	24,5	63	74	72
26. Aug.		Var 1+	26,3	27,0	27,2	94	92	90
		Var 1	26,4	25,7	26,4	94	82	85
		Var 2	26,6	26,2	27,6	96	86	93
		Var 3	25,9	27,5	26,2	91	95	83
16. Sept.		Var 1+	26,8	28,0	28,8	97	99	101
		Var 1	25,4	26,8	27,1	87	90	90
		Var 2	25,9	27,2	26,5	90	93	85
		Var 3	24,2	26,8	25,5	77	90	78
9. Okt.	49	Var 1+	28,3	28,5	30,4	110	102	112
10. Okt.		Var 1	26,6	28,0	25,7	96	99	80
9. Okt.		Var 2	25,3	24,8	27,7	86	75	94
10. Okt.		Var 3	22,6	25,2	25,6	64	78	79

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 9,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,9 Vol.-% (30-60 cm), 14,3 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) aktuelle Bestimmung der FK
- 4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2012)
- 5) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.
- 6) geschätzt

Tabelle 57a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2012]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]						
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾	ET _{pPEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾			Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{pPEN}			
				Var 1+	Var 1	Var 2	Var 3	Var 1+	Var 1	Var 2
12-18	101,5	147,8	1,51	73,9			66,3			
18-11. Bl.	54,8	79,4	1,47	79,4	63,5		47,6	56,7		
11. Bl.-41	44,1	59,6	1,36	83,4	71,5	59,6	41,7	59,1		
41-49	274,9	387,4	1,44	581,1	503,6	426,1	309,9	415,2		370,1
12-49	475,3	674,2	1,45	817,8	712,6	623,2	473,2	597,3		552,2

Tabelle 57b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2012]

Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]				Versickerung [mm] ⁷⁾							
	Var 1+	Var 1	Var 2	Var 3	Geisenheim $ET_{PEN} \times k_{CPEN}$				Agrowetter $(ET_0 \times w_{fak}) \times k_{CPEN}$			
					Var 1+	Var 1	Var 2	Var 3	Var 1+	Var 1	Var 2	Var 3
35,7	50				0,0				0,0			
42,0	12	0			0,0				0,0			
87,8	24	12		0	0,0			18,6	36,1	13,2		3,1
163,1	394	324	226	112	0,0	6,1	2,1	9,8	154,2	86,4	11,0	1,1
328,6	480	386	288	162	0,0	6,1	2,1	28,5	190,3	99,6	24,2	4,2

- 1) FAO Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration des Bestandes berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-90 cm

6.3.2 Versuchsjahr 2013

Nach einem Winter mit ausreichenden Niederschlägen (191 mm Niederschlag vom 1. November bis 5. März) wurde am 6. März die FK der Versuchsfläche durch Ziehen einer Bodenprobe bestimmt. Als Mittel der vorliegenden 4 Untersuchungen aus den Jahren 2010-2013 wurde eine FK von 27,3 Vol.-% (0-30 cm), 27,3 Vol.-% (30-60 cm) und 28,0 Vol.-% (60-90 cm) errechnet (Tabelle 58).

Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 30 Vol.-% (Sl4, Rohdichte 1,5 g/cm³) bzw. 33 Vol.-% (Ls3) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (Sl4: 12 Vol.-%, Ls3: 17 Vol.-%) mit 10,9 Vol.-%, 14,0 Vol.-% und 14,4 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-90 cm eine mittlere nFK von 14,4 Vol.-% errechnet.

Einen Tag nach der Pflanzung des Kohls wurde ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-90 cm Tiefe von 64 % nFK ermittelt (Tabelle 58). In der ersten Woche nach der Pflanzung fielen, bei anfangs noch recht hoher Transpirationsbelastung (vgl. Abbildung 185), 11,5 mm Niederschlag. Um ein gutes Anwachsen zu gewährleisten, wurden am 21./22. Mai aber dennoch alle Varianten mit insgesamt 12 mm beregnet (Abbildung 184, Tabelle 59b). Am 26. Mai setzte dann eine Regenperiode ein, die bis zum 4. Juni insgesamt knapp 170 mm Niederschlag brachte. Damit wurde der Boden komplett auf FK und darüber hinaus aufgefüllt (vgl. Abbildung 186 und Abbildung 187), zwischenzeitlich kam es auch zu einem Wasserüberstau.

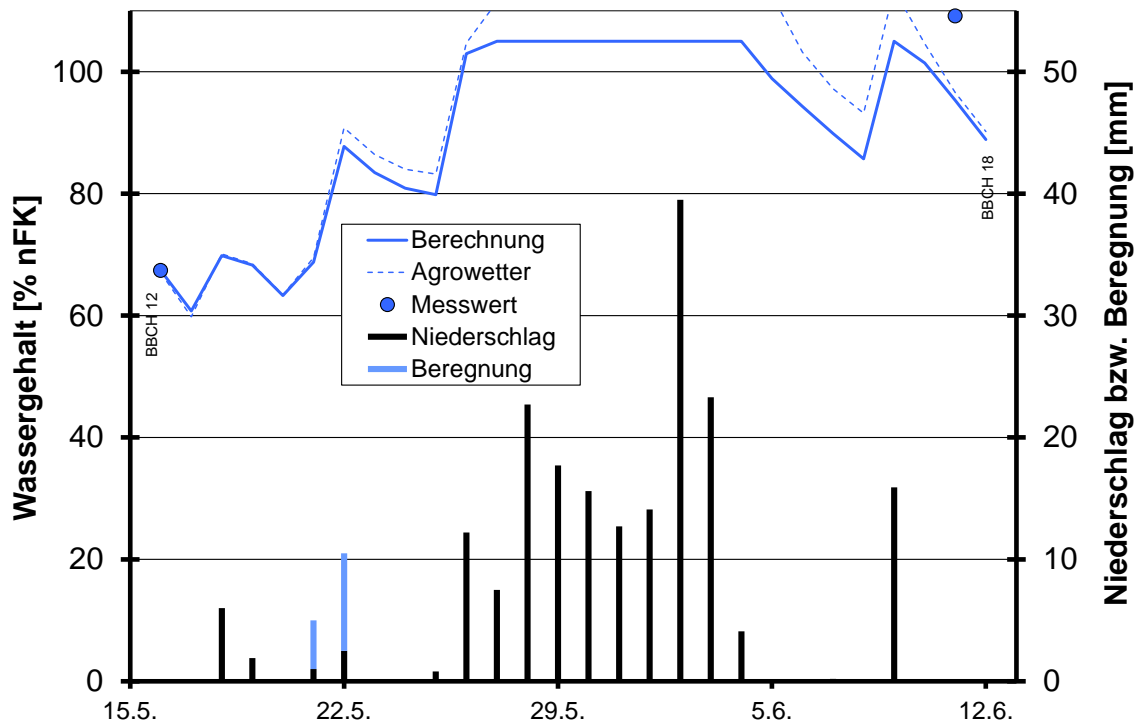


Abbildung 184: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten '1', '2' und '4' bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1/2/4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]

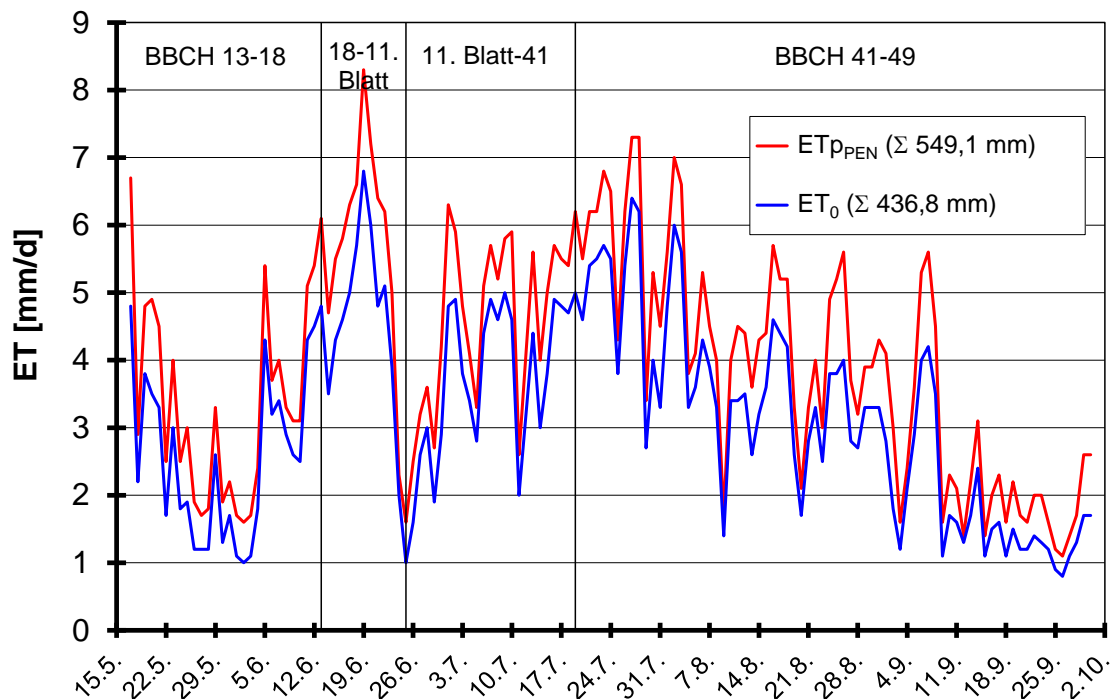


Abbildung 185: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{PEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2013]

Die Phase vom 8- bis 11-Blatt-Stadium war geprägt durch ein Starkregenereignis am 20. Juni mit 53,1 mm, die am Abend binnen weniger Stunden fielen. Weil dieser Niederschlag zunächst nicht angekündigt und der rechnerische Wassergehalt der 'Variante 1' und '2' (in dieser Phase identische kc-Werte) auf 57 % abgesunken war, wurden diese Varianten tagsüber noch mit 20 mm beregnet (Abbildung 186).

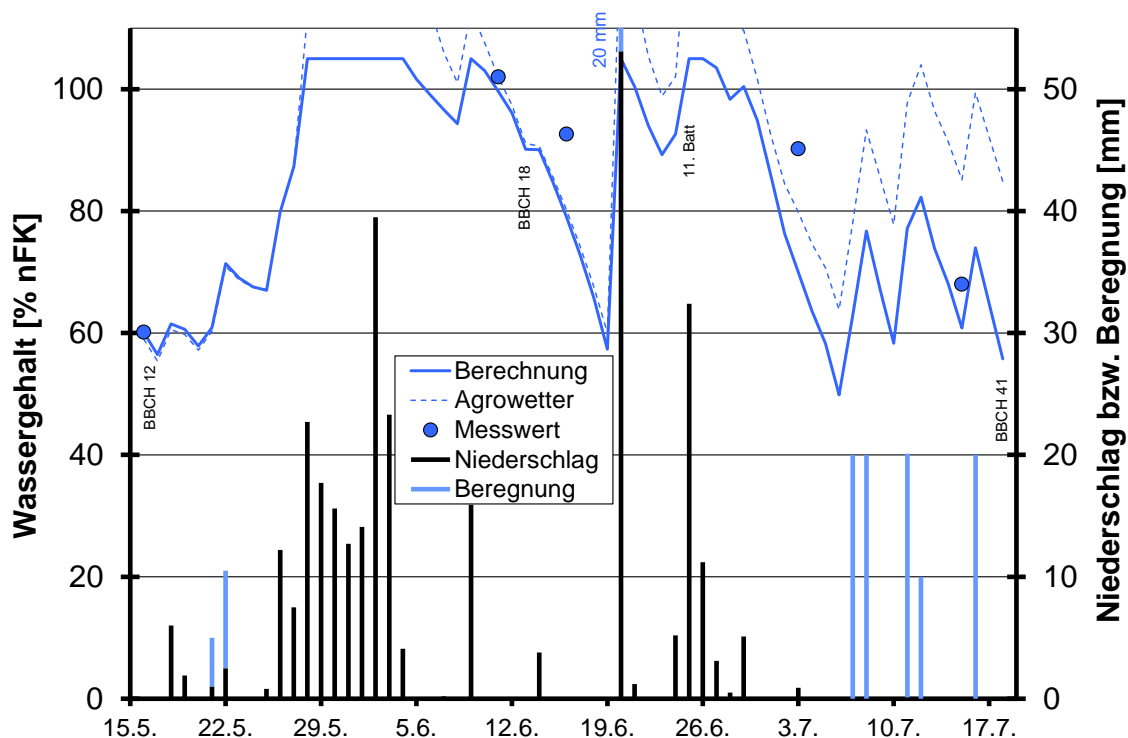


Abbildung 186: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 1' bis zum Beginn der Kopfbildung auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' (Vorgabe: maximale Durchwurzelungstiefe 60 cm) sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlvorsuch 2013]

Zu Beginn des 11-Blatt-Stadiums fielen weitere 52,3 mm Niederschlag, Ende Juni setzte dann eine bis Ende Juli anhaltende Trockenperiode ein. Für die Phase 11-Blatt bis Beginn Kopfbildung (BBCH 41) errechnete sich für die 'Variante 1' ein Zusatzwasserbedarf von 90 mm (Abbildung 186). 'Variante 2' musste mit 70 mm (Abbildung 188), 'Variante 4' (Abbildung 189) mit 20 mm bewässert werden. Die 'SVAT'-Variante (Abbildung 190) erhielt entsprechend der Vorgaben 40 mm (Tabelle 59b).

Mit Beginn der Kopfbildungsphase, 64 Tage nach der Pflanzung, wurde die Schicht 60-90 cm in die Kalkulation einbezogen. In dieser Phase, die mit 74 Tage mehr als die Hälfte der Kulturzeit einnahm, berechnete sich für die 'Variante 1' ein Zusatzwasserbedarf von 288 mm. Insgesamt erhielt damit diese, auf Basis der aktuellen kc-Werte gesteuerte Variante 410 mm.

An mehreren Terminen kam es allerdings durch zu späte Beregnungsgaben zu einem leichten Absinken des berechneten Bodenwassergehaltes auf unter 60 % nFK, was einerseits auf die begrenzte Beregnungskapazität, andererseits aber auch auf das Ausbleiben angekündigter Niederschläge zurückzuführen ist (Abbildung 187).

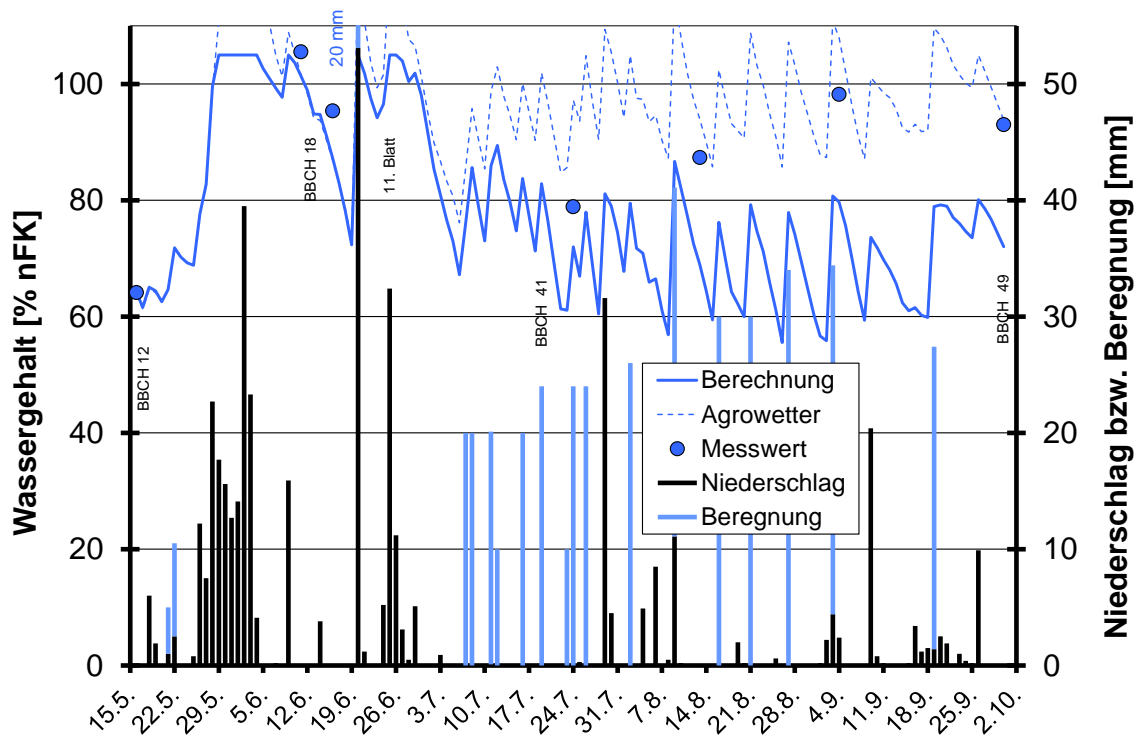


Abbildung 187: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 1}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]

Die Differenz zwischen dem berechneten und dem tatsächlich gemessenen Bodenwassergehalt fiel, im Gegensatz zum Vorjahresversuch (dort Kalkulation auf Basis der ET_{PEN} -Verdunstungswerte), relativ hoch aus. 'Agrowetter' bildete dagegen die gemessenen Bodenwassergehalte recht gut ab. Entsprechend der hohen Wassergehalte berechnete 'Agrowetter' für die 2. Kulturhälfte (ab BBCH 41) eine Sickerwasserbildung von 55,2 mm, während in dieser Phase nach 'Geisenheim' analog der berechneten Wassergehalte von zumeist deutlich unter 90 % nFK keine Sickerung stattfand (Tabelle 59b).

Bei der 'Variante 2' errechnete sich ein Zusatzwasserbedarf von 306 mm. Wie bei der entsprechenden Variante im Vorjahresversuch zeigte sich eine hohe Übereinstimmung der eigenen, auf reduzierte kc -Werte basierenden Berechnung und der von 'Agrowetter' berechneten Bodenwassergehalte. Auch die berechneten Sickerwassermengen stimmen mit 174,6 mm ('Agrowetter') und 170,4 mm (eigene Berechnung) praktisch überein. Ebenfalls wie im Vorjahresversuch deckten sich die kalkulierten Bodenwassergehalte zumeist mit den gemessenen Gehalten, nur zu Kulturende unterschätzten die Modelle den Wassergehalt.

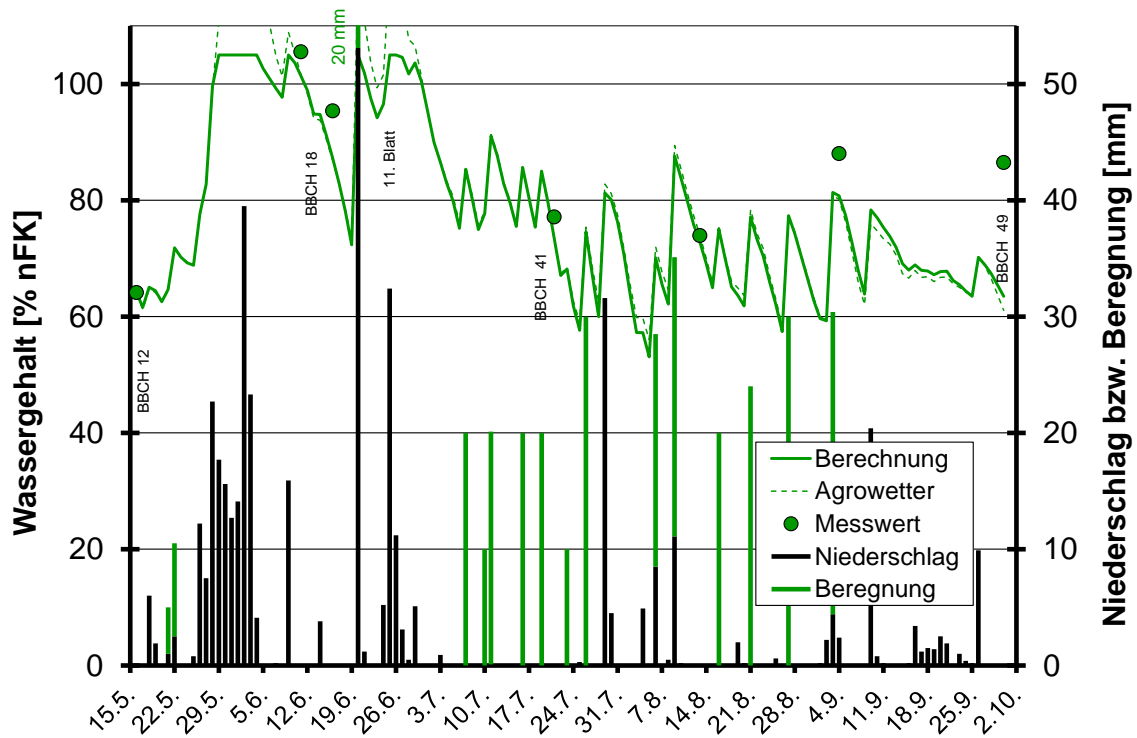


Abbildung 188: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]

Die 'Variante 4' (Abbildung 189) und die 'SVAT'-Variante (Abbildung 190) erhielten mit 108 bzw. 106 mm nahezu identische Mengen an Zusatzwasser. Auch die zeitliche Verteilung der Wassergaben war sehr ähnlich und differierte maximal nur um 5 Tage. Berechnet man für die in der 'SVAT'-Variante verabreichten Zusatzwassergaben auf Basis der kc -Werte der 'Variante 4' die Bodenwassergehalte (Abbildung 190), zeigt sich auch, dass diese nur wenig differieren. Aus diesem Grunde wurde bei den letzten 3 Bodenuntersuchungen darauf verzichtet, auch die 'Variante 4' zu beproben. Die Wassergehalte (gemessen) sanken in der 'SVAT'-Variante (und vermutlich auch in der Variante 4) auf bis zu 37 % nFK ab. Auch das 'Agrowetter'-Modell errechnete diesen starken Abfall, bildete aber nicht die zum Kulturende hin wieder ansteigenden Wassergehalte ab.

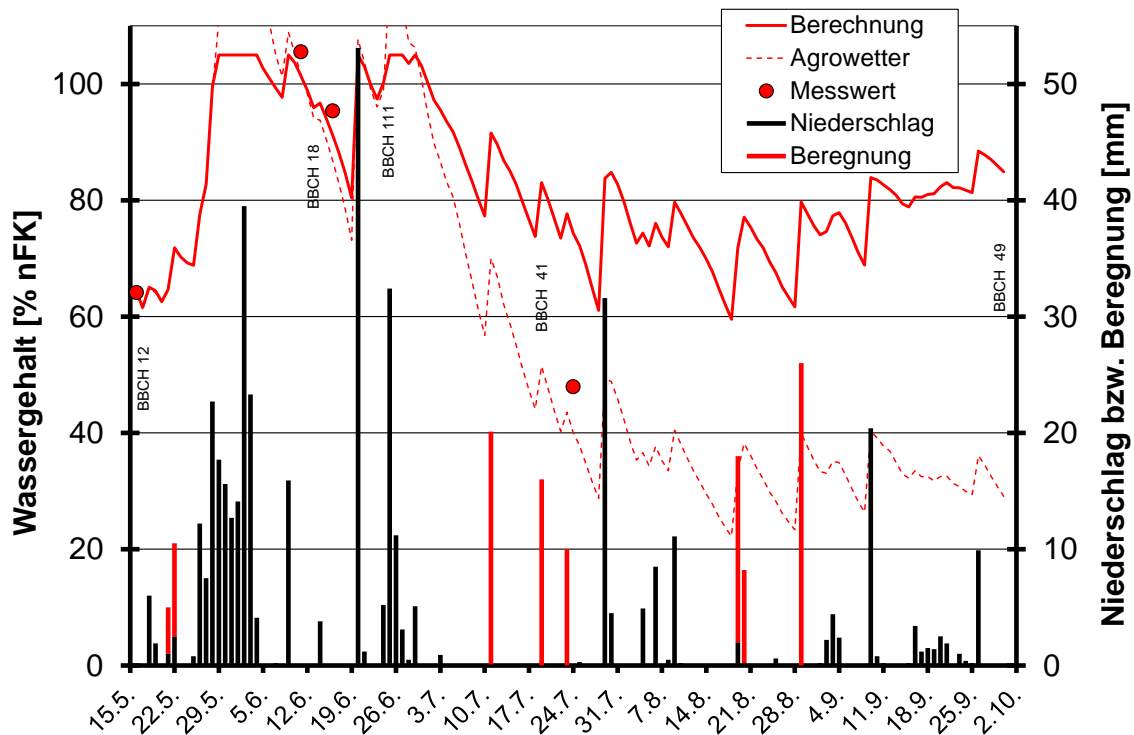


Abbildung 189: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 4' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]

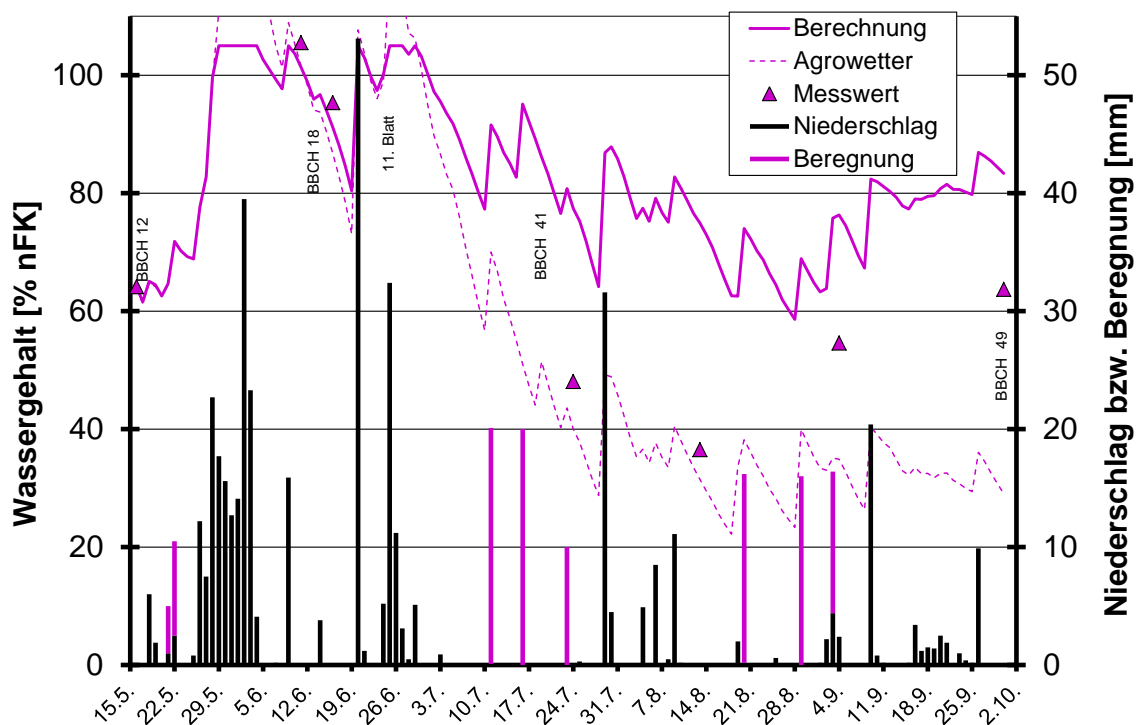


Abbildung 190: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'SVAT'-Variante auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2013]

Die in den vier bzw. drei Varianten gemessenen Bodenwassergehalte sind in Abbildung 191 gegenübergestellt.

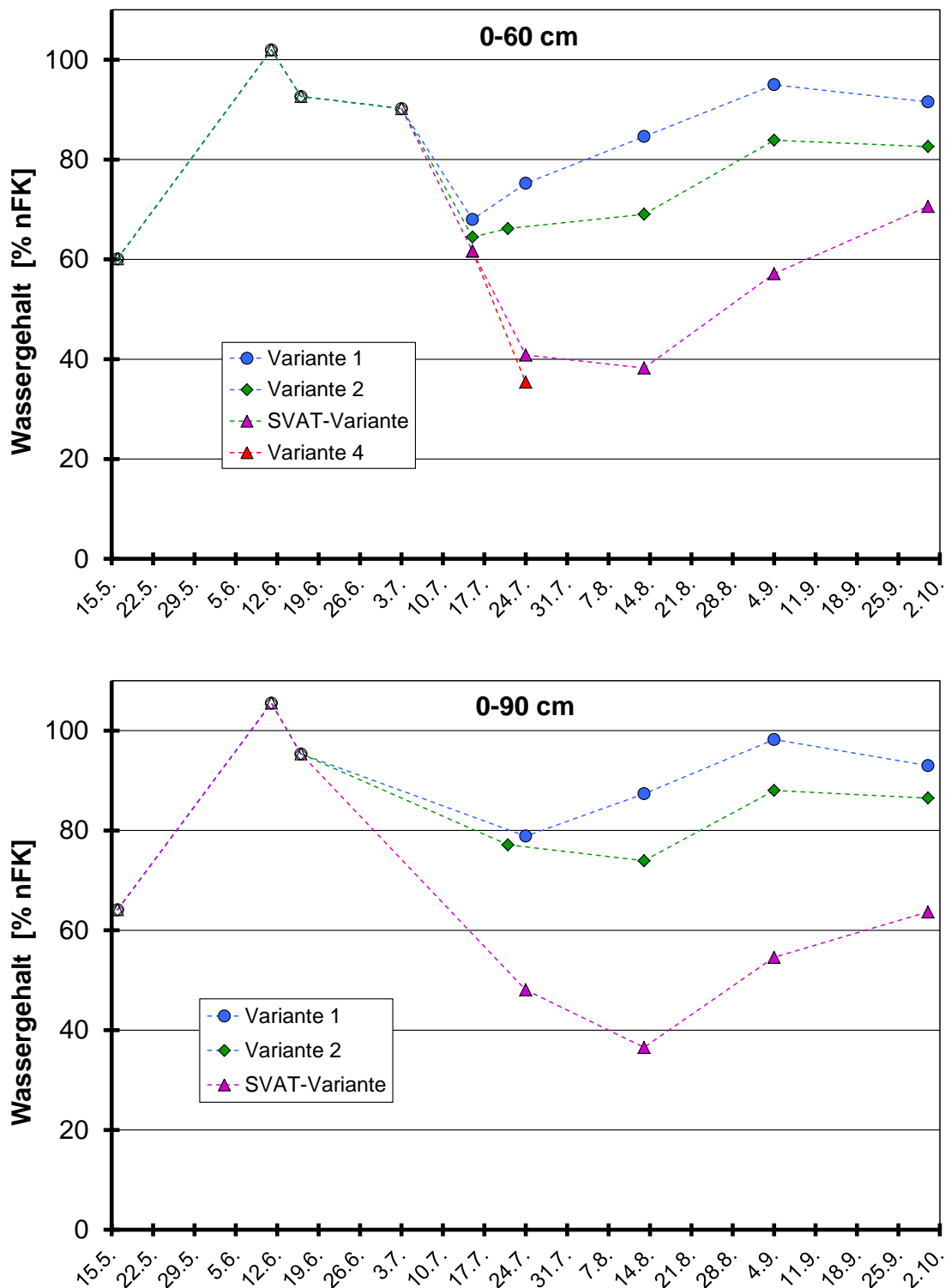


Abbildung 191: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte der Schicht 0-60 cm (oben) bzw. 0-90 cm (unten) (die Verbindungslinien dienen nur der Anschaulichkeit und geben nicht zwischenzeitliche Wassergehalte wieder) [Weißkohlversuch 2013]

Die nur in der 'SVAT'-Variante eingebauten Tensiometer fielen in der Tiefe 30 und 60 cm nach Erreichen einer Wasserspannung von ca. 850 hPa relativ schnell aus und lieferten anschließend, trotz teilweisen Wiederauffüllens, keine verlässlichen Messwerte. Lediglich in der Tiefe von 90 cm konnte kontinuierlich gemessen werden, hier stieg die Tension bis auf 450 hPa an (Abbildung 192).

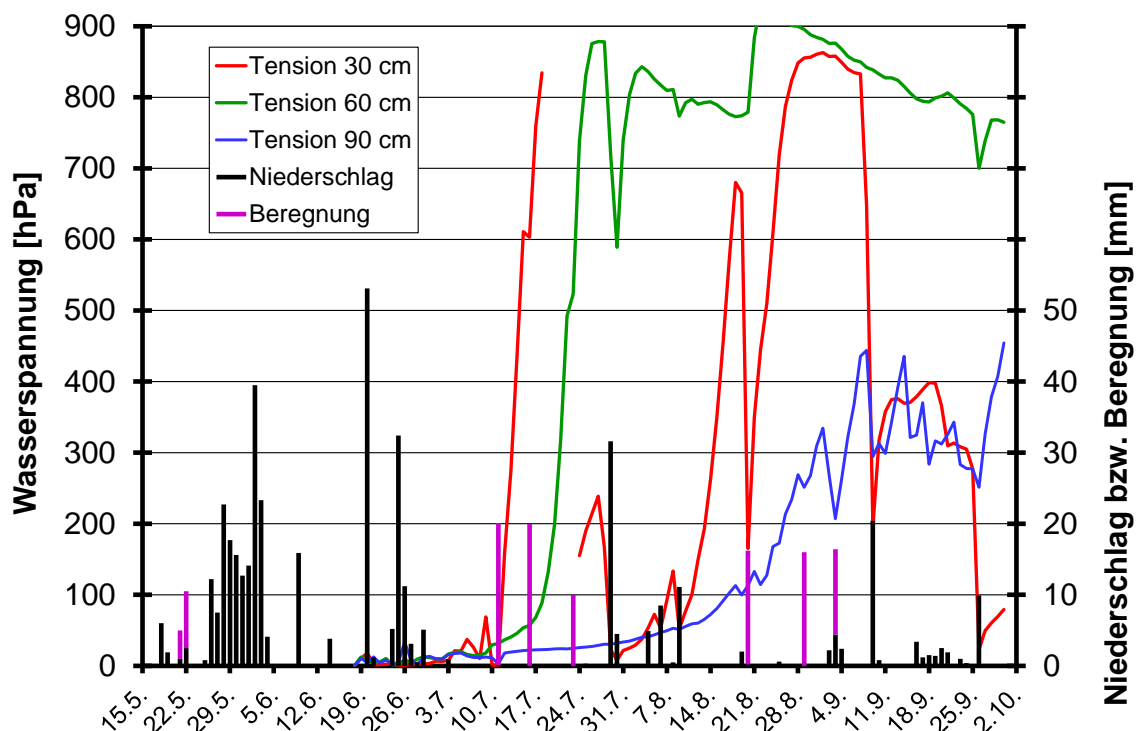


Abbildung 192: Gemessene Wasserspannung in 30, 60 und 90 cm Tiefe in der 'SVAT'-Variante (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe; Tagesmittelwerte: 12⁰⁰ Uhr bis 12⁰⁰ des Folgetages; mit Erreichen einer Tension von ca. 850 hPa sind die Messwerte nicht mehr aussagekräftig) **[Weißkohlversuch 2013]**

Die mit der FDR-Rohrsonde zeitgleich mit den Bodenprobenahmen gemessenen Bodenwassergehalte sind in Abbildung 193 wiedergegeben. Während die Sonde für die Bodenschicht 0-30 cm plausible Messwerte lieferte, die ggf. um einen 'Offset' von 1,75 Vol.-% zu korrigieren sind, wurden in der Schicht 30-60 cm relativ konstant Werte um 34 Vol.-% gemessen, obgleich die gravimetrisch ermittelten Wassergehalte nur im Bereich 18,2 bis 26,6 Vol.-% lagen.

Ein ähnliches Ergebnis wurde bereits 2010 und 2011 bei der Überprüfung einer anderen FDR-Rohrsonde ermittelt, wo in der Schicht 0-30 cm ein Offset von 1,55 Vol.-% gefunden wurde (vgl. Abbildung 169 und Abbildung 170, Seite 180/181). Anders als bei der im aktuellen Versuch getesteten Sonde zeigte sich aber auch in der Schicht 30-60 cm eine Spreizung der Messwerte (32-37 Vol.-%), allerdings lag der Offset mit 7,9 Vol.-% recht hoch. Die Ursachen für diese 'Fehlmessungen' der Sonden sind bisher nicht geklärt.

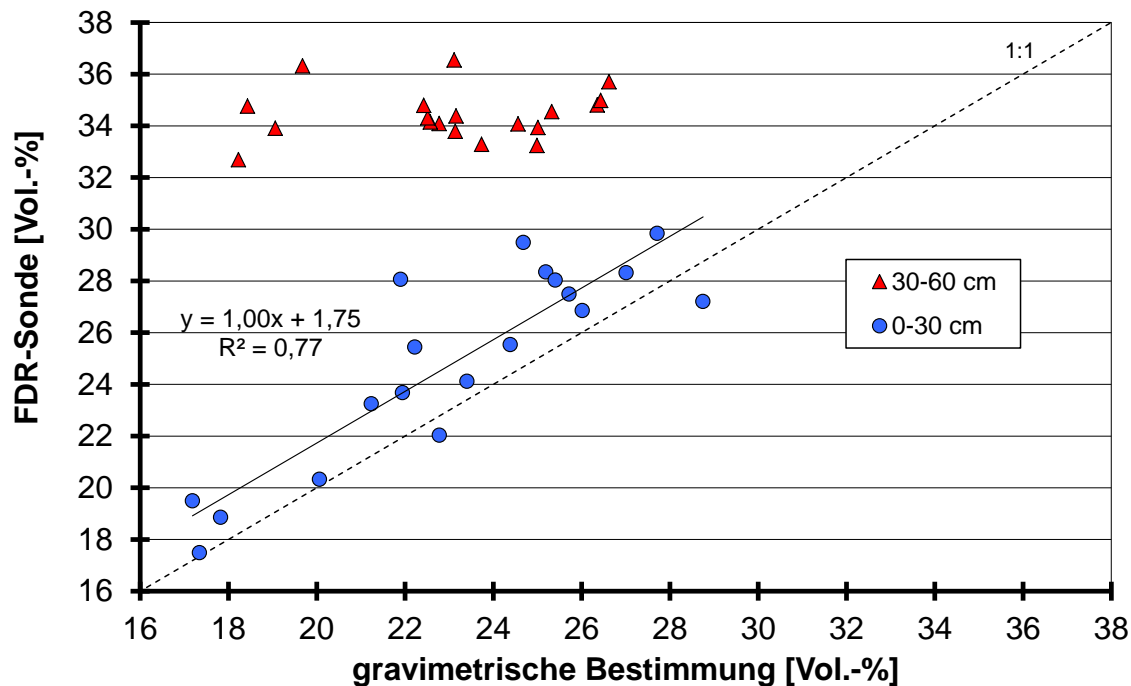


Abbildung 193: Mittels FDR-Rohrsonde ermittelte Bodenwassergehalte (0-30 cm: Mittelwerte der in 5, 15 und 25 cm Tiefe gemessenen Werte; 30-60 cm: 35, 45, 55 cm) versus gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalte (die Steigung der Regressionsgrade wurde auf 1,0 festgelegt) [Weißkohlversuch 2013]

Auf der Versuchsfläche waren die 'SVAT'-Variante und die 'Variante 4' durch ein helleres Aussehen der Pflanzen zu erkennen, das offensichtlich von einer stärker ausgeprägten Wachsschicht auf den Blättern herrührte. Die Varianten zeigten bei der Ernte auch einen signifikant niedrigeren Marktertrag als die Varianten '1' und '2', die sich statistisch nicht unterschieden (Abbildung 194). Die 'SVAT'-Variante wies die geringste Menge an Ernterückständen auf und unterschied sich diesbezüglich auch signifikant von der 'Variante 4'. Die mittlere Kopfmasse lag bei 3,5 kg, auch hier fielen die Varianten 'SVAT' und '4' gegenüber Variante '1' und '2' ab (Abbildung 195). Insgesamt lag damit das Ertragsniveau nur auf einem mäßig hohen Niveau; die Ursache dürften in der anfänglichen Wachstumsverzögerung durch den Wasserüberstau und den relativ strahlungsarmen Bedingungen zu suchen sein.

Während der TS-Gehalt der Marktware nicht durch die Beregnungsintensität beeinflusst wurde, war der TS-Gehalt der Ernterückstände in den Varianten '4' und 'SVAT' signifikant höher als in Variante '1' und '2' (Abbildung 196).

Auch beim Trockenmasseertrag unterschieden sich die Variante '1' und '2' nicht wesentlich, während die Varianten '4' und 'SVAT' gegenüber diesen signifikant abfielen (Abbildung 197). Der Frischmasse-Aufwuchs stieg mit zunehmender Bewässerungsmenge kontinuierlich an, der frischmassebezogene Ernteindex (Anteil Erntegut am gesamten Aufwuchs) wurde nicht signifikant durch die Beregnungsintensität beeinflusst (Abbildung 198). Der Trockenmasse-Aufwuchs war in der 'Variante 4' am geringsten, tendenziell fiel der TM-bezogene Ernteindex in den stärker beregneten Varianten höher aus (Abbildung 199).

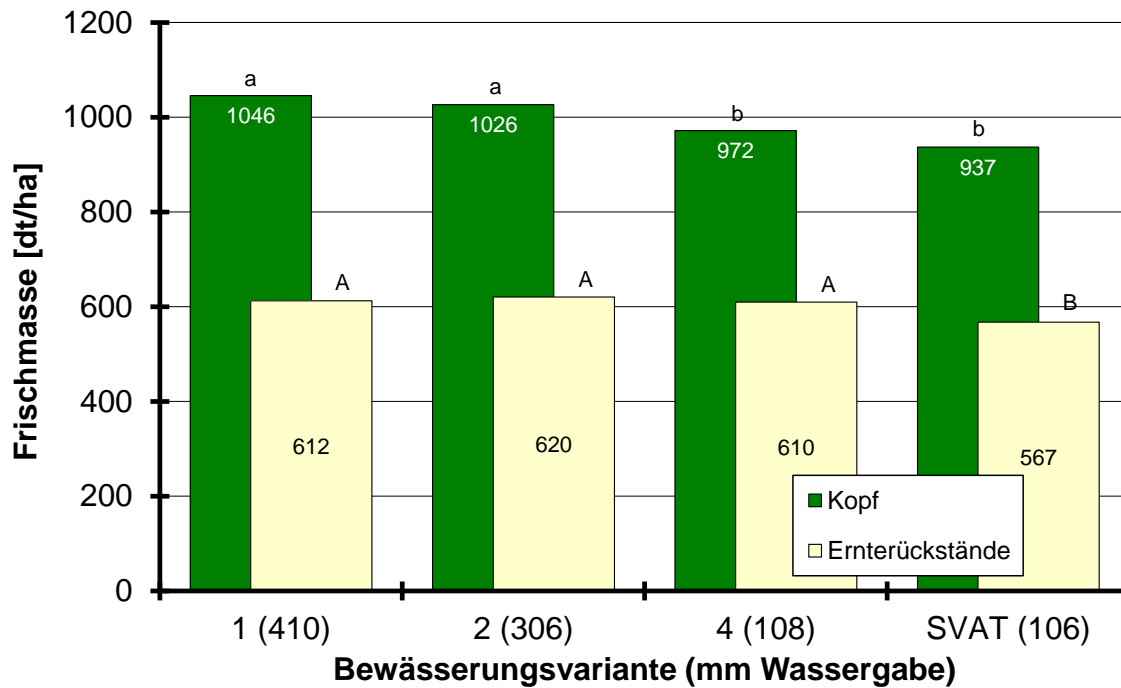


Abbildung 194: Marktertrag ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 35,6$ dt/ha) **und Ernterückstände** ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 28,3$ dt/ha) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

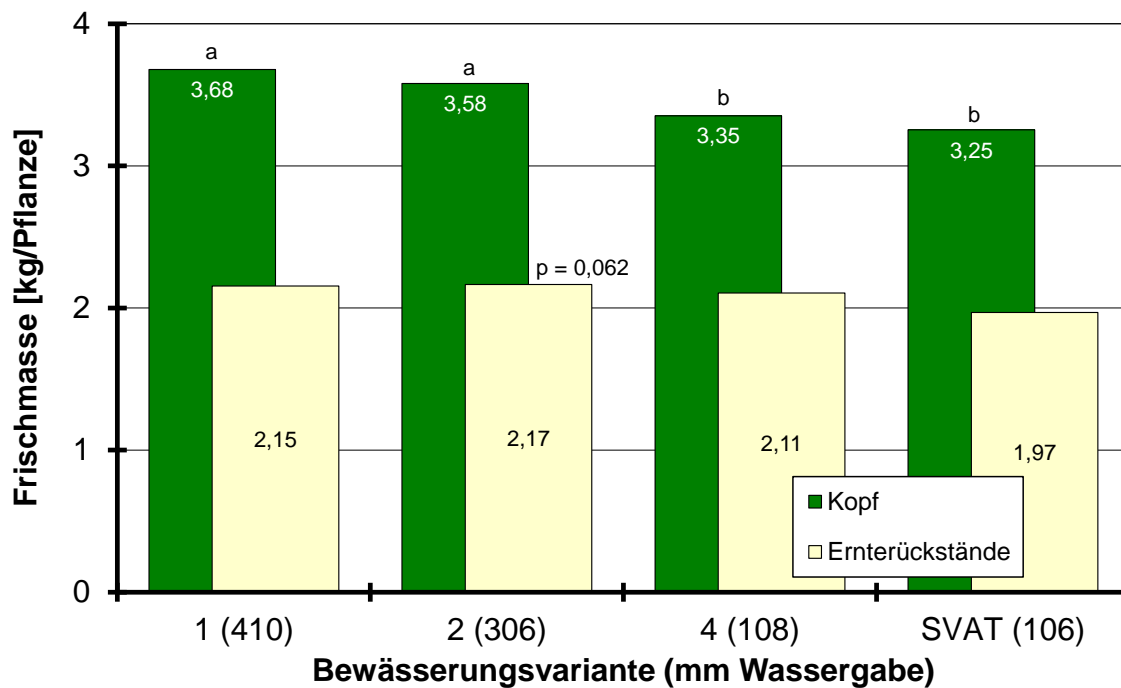


Abbildung 195: Mittlere Kopfmasse ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 0,21$ kg/Pflanze) **und Ernterückstände je Einzelpflanze** (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

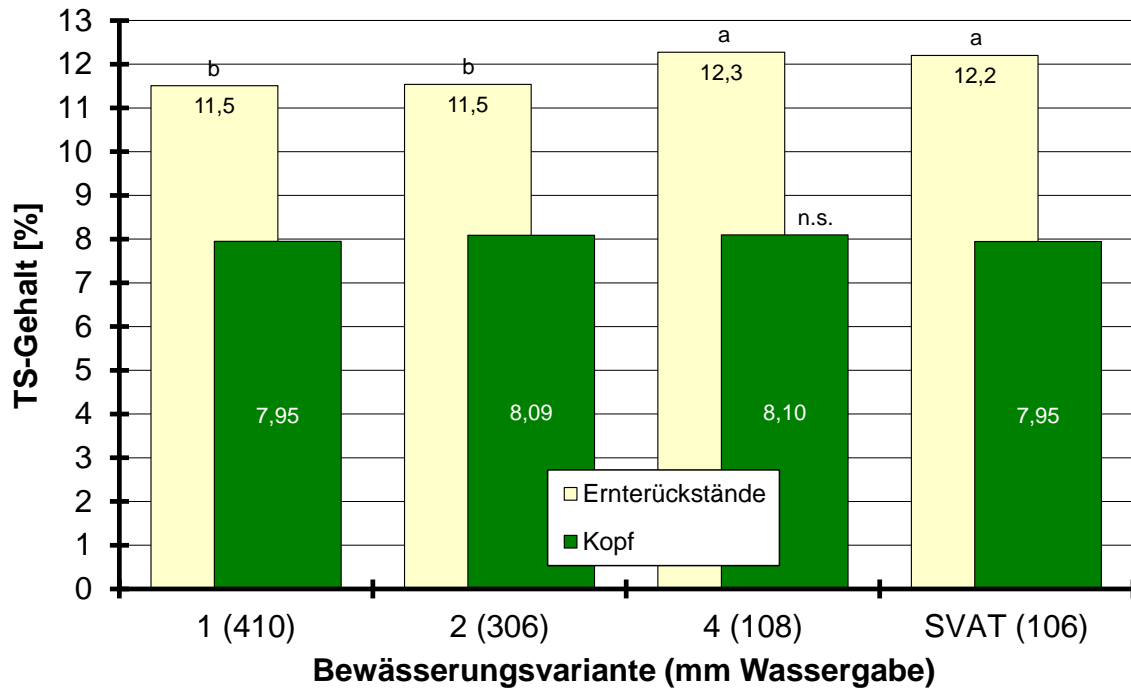


Abbildung 196: Trockensubstanzgehalt von Marktware (Köpfe) und Ernterückständen ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 0,65 \%$) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

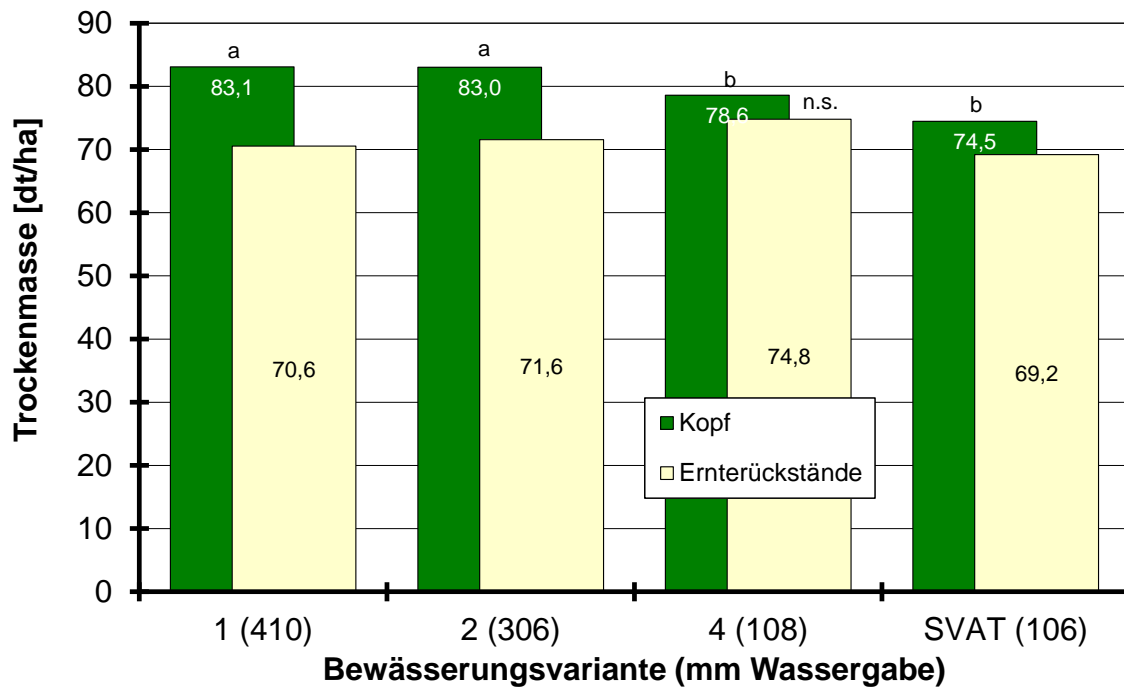


Abbildung 197: Trockenmasse von Marktware ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 4,2 \text{ dt/ha}$) und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

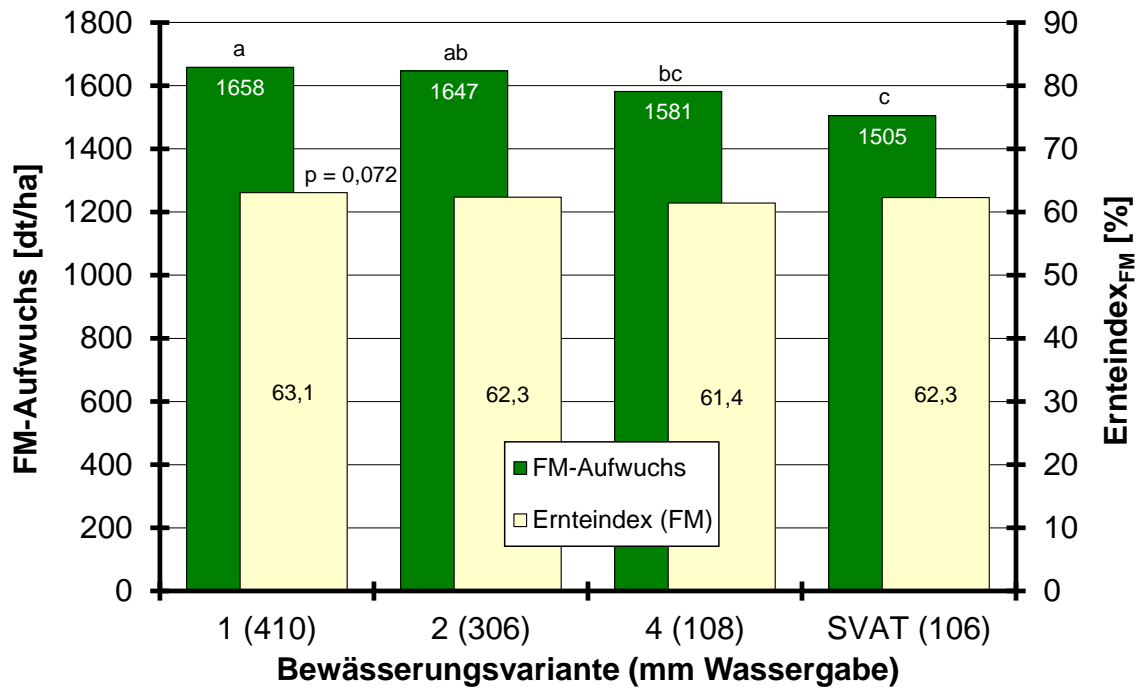


Abbildung 198: Frischmasse-Aufwuchs ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 51,8 \text{ dt/ha}$) und frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

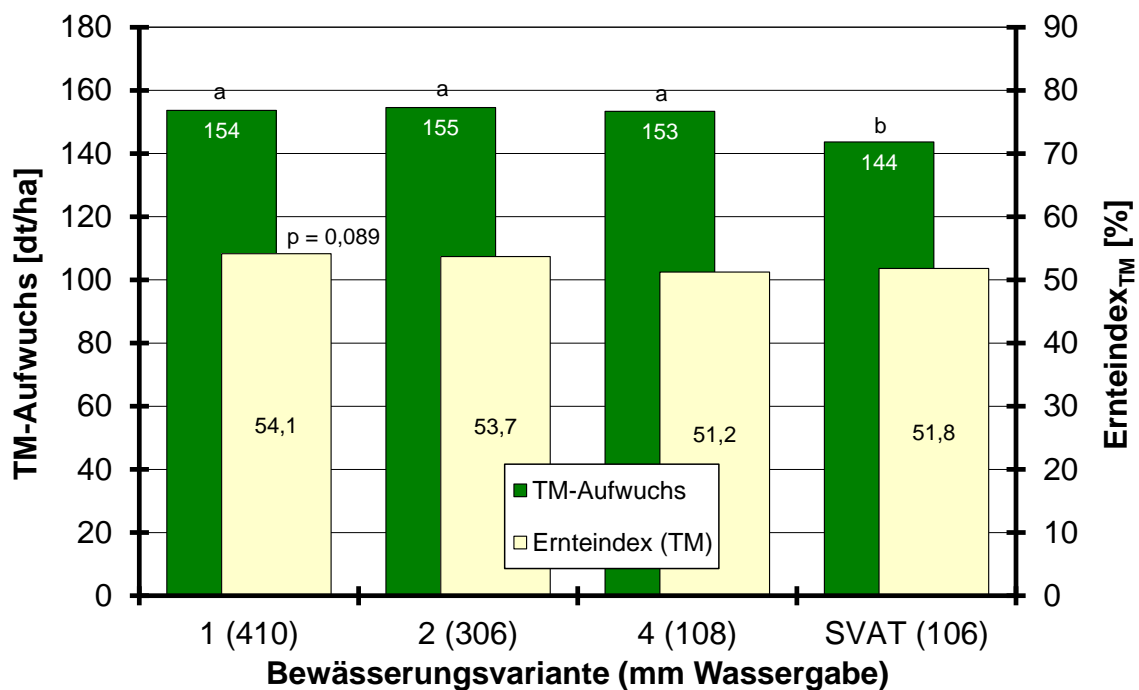


Abbildung 199: Trockenmasse-Aufwuchs ($GD_{(\alpha < 0,05)} = 7,7 \text{ dt/ha}$) und trockenmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2013]

Tabelle 58: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [2013]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
6. März ³⁾		alle	27,9	27,7	28,8			
Mittel ⁴⁾		alle	27,3	27,3	28,0	100	100	100
16. Mai ⁵⁾	12	alle	21,9	20,8	24,3	67	51	73
11. Juni	18	alle	28,8	26,4	29,8	109	93	113
16. Juni		alle	25,7	26,6	28,2	91	95	101
3. Juli		alle	25,2	26,4		87	94	
15. Juli		Var 1	21,9	23,2		67	69	
		Var 2	21,2	22,8		63	66	
		SVAT + Var 4	20,1	23,1		56	69	
21. Juli		Var 2	21,9	22,6	28,2	68	65	101
24. Juli		Var 1	24,7	22,5	26,2	84	64	87
		SVAT	17,3	19,7	23,1	39	43	64
		Var 4	17,2	18,2	24,7	38	32	75
13. Aug.		Var 1	25,4	24,6	27,1	89	80	93
		Var 2	22,2	23,1	25,9	69	69	85
		SVAT	17,8	18,4	18,9	42	33	33
4. Sept.		Var 1	27,7	25,3	28,7	103	85	105
		Var 2	26,0	23,7	27,6	92	73	97
		SVAT	22,8	19,1	21,1	73	38	49
30. Sept.	49	Var 1	27,0	25,0	27,5	99	83	96
		Var 2	24,4	25,0	27,3	82	83	95
		SVAT	23,4	22,4	21,0	76	63	49

- 1) Bodenwassergehalt der Schicht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,5 g/cm³
- 2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 10,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,0 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)
- 3) aktuelle Bestimmung der FK
- 4) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013)
- 5) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 59a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen [2013]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]							
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ET _{pPEN} ²⁾ [mm]	ET _{pPEN} / ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET ₀ × kc				Agrowetter: ET _{c adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾) × kc _{PEN}			
				Var 1	Var 2	Var 4	SVAT	Var 1	Var 2	Var 4	SVAT
12-18	67,9	89,1	1,36	47,5				43,7			
18-11. B.	56,5	70,4	1,25	62,2				58,9			
11. B.-41	87,0	107,8	1,27	147,9	121,8	69,6	–	123,0		115,4	119,4
41-49	225,4	281,8	1,28	405,7	338,1	180,3	–	346,5	341,8	214,6	207,6
12-49	436,8	549,1	1,29	663,3	569,6	342,7	–	572,1	567,4	432,6	429,6

Tabelle 59b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2013]

Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]				Versickerung [mm] ⁷⁾							
					Geisenheim ET ₀ × kc				Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN}			
	Var 1	Var 2	Var 4	SVAT	Var 1	Var 2	Var 4	SVAT	Var 1	Var 2	Var 4	SVAT
197,8	12				117,2				119,3			
63,3	20		0		24,2		16,4		19,8		3,2	
53,4	90	70	20	40	28,2	29,0	38,0	–	35,6	35,5	32,1	
118,7	288	204	76	54	0				–	55,2	0	
433,2	410	306	108	106	169,7	170,4	117,7	–	229,9	174,6	154,6	

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration des Bestandes berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-90 cm

6.3.3 Versuchsjahr 2014

Aufgrund ausbleibender ergiebiger Niederschläge ausgangs des Winters (Monatssummen Januar bis April max. 17,2 mm) konnte die FK der Versuchsfläche nicht aktuell bestimmt werden. Daher konnte der mittlere Wert der vorliegenden 4 Untersuchungen aus den Jahren 2010-2013 mit einer FK von 27,2 Vol.-% (0-30 cm), 26,0 Vol.-% (30-60 cm) und 28,0 Vol.-% (60-90 cm) nicht um eine aktuelle Messung erweitert werden (Tabelle 60). Die Kartieranleitung (BGR 2005) weist dagegen mit 30 Vol.-% (SI4, Rohdichte 1,5 g/cm³) eine höhere FK aus. Dementsprechend wurde der bei der Berechnung der nFK zugrunde gelegte Totwassergehalt gegenüber der Kartieranleitung (SI4: 12 Vol.-%) mit 10,9 Vol.-%, 10,4 Vol.-% und 11,2 Vol.-% jeweils analog reduziert, sodass sich für die Schicht 0-90 cm eine mittlere nFK von 16,2 Vol.-% errechnet.

Einen Tag nach der Pflanzung des Kohls wurde auf Grund der geringen Niederschläge und des vorangegangenen Bewuchses der Fläche mit Landsberger Gemenge nur ein Ausgangs-Bodenwassergehalt in 0-90 cm Tiefe von 49,3 % nFK ermittelt (Tabelle 60).

Um ein gutes Anwachsen zu gewährleisten, wurden nach der Pflanzung alle Varianten zunächst mit 8 mm beregnet. Weil die in den folgenden Tagen gefallenen Niederschläge (16,7 mm) nicht ausreichten, den sehr trockenen Oberboden zu durchfeuchten, wurde am 19. Mai nochmals mit 20 mm beregnet (Abbildung 200, Tabelle 61b). Am 24. und 27. Mai fielen dann ergiebige Niederschläge, sodass bis BBCH 18, mit Ausnahme der Variante 'SVAT' (16 mm am 6. Juni), nicht mehr bewässert werden musste.

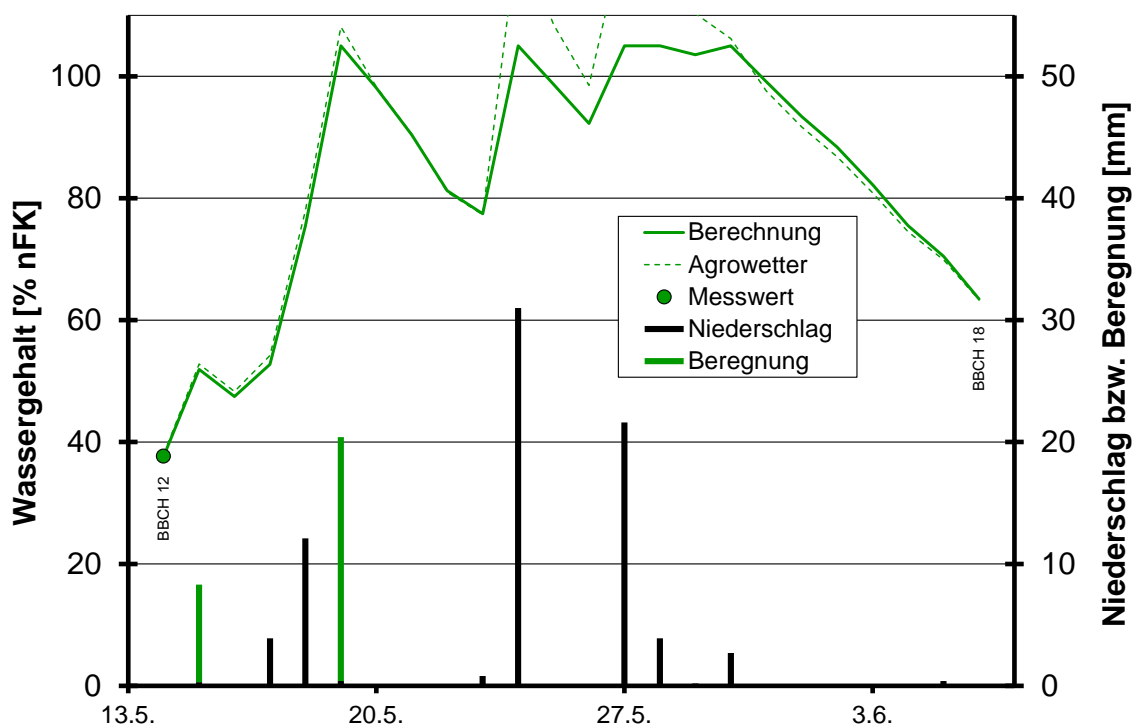


Abbildung 200: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-30 cm der Varianten '2', '3', '4' bis zum 8-Blatt-Stadium auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2/3/4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Ausgangs-Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

In den Phasen vom 8- bis 11-Blatt-Stadium und vom 11-Blatt-Stadium bis Beginn Kopfbildung fielen, bei hohen Verdunstungswerten (vgl. Abbildung 201), insgesamt nur 28,4 mm Niederschlag, sodass alle Varianten (außer 'Kontrolle') mit 44 ('Variante 4') bis 96 bzw. 100 mm ('2' und 'TU') bewässert werden mussten (Abbildung 202, exemplarisch aufgezeigt für 'Variante 2').

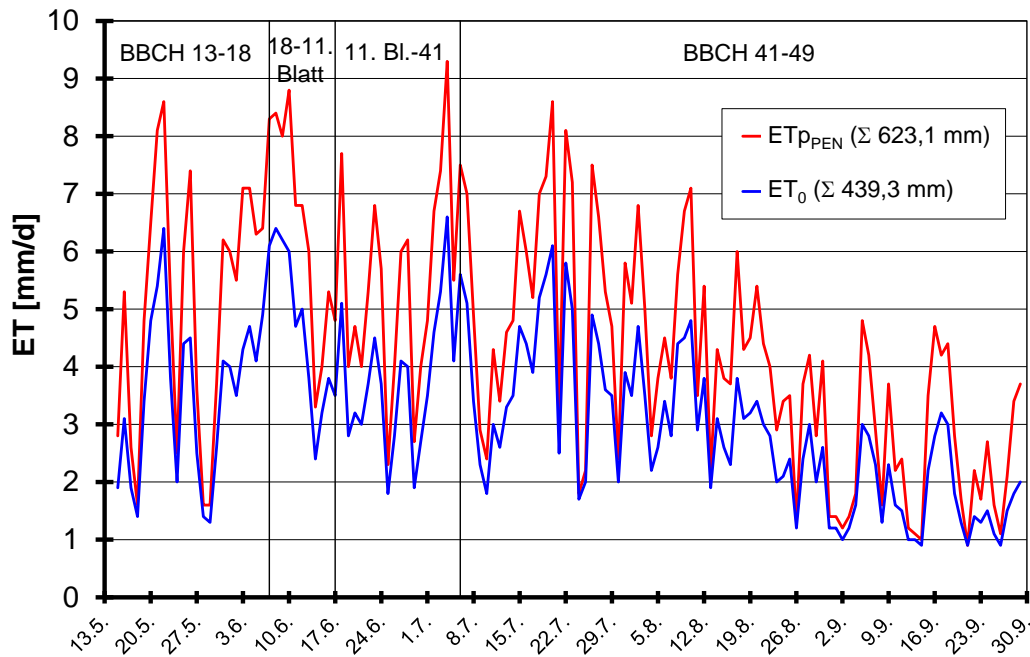


Abbildung 201: Evapotranspiration nach der modifizierten PENMAN-Gleichung (ET_{pPEN}) und FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) für den Standort Dresden-Hosterwitz [Weißkohlversuch 2014]

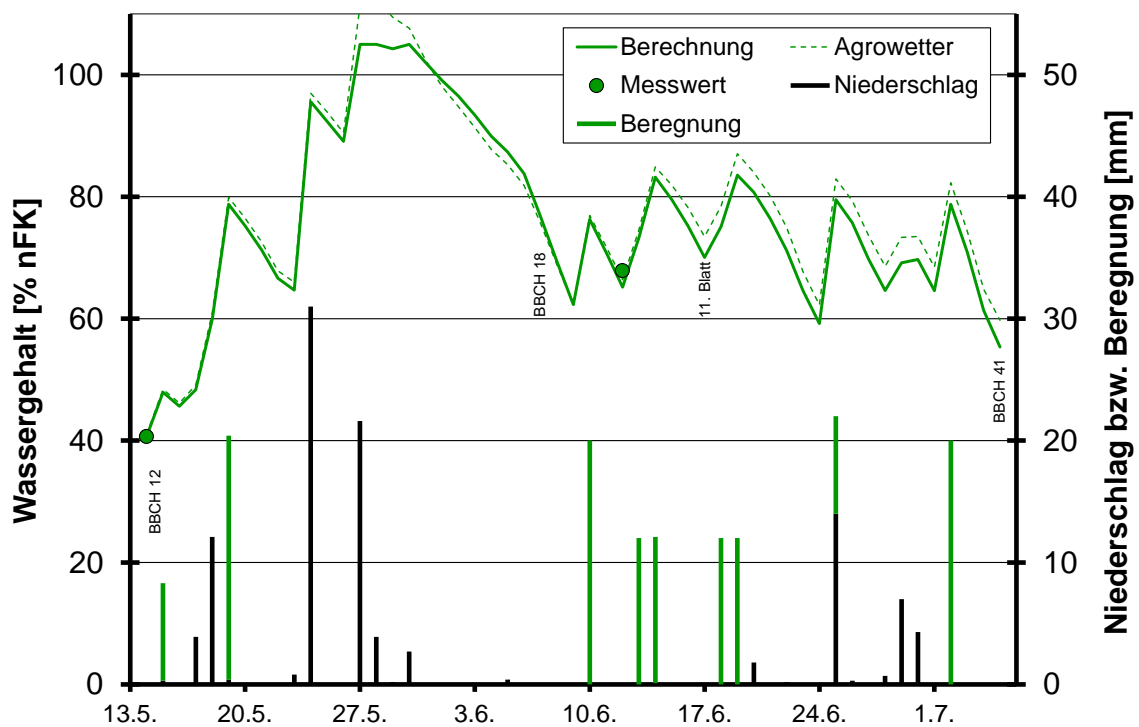


Abbildung 202: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-60 cm der 'Variante 2' bis zum Beginn der Kopfbildung auf Basis $ET_0 \times kc_{var 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

Mit Beginn der Kopfbildungsphase, 52 Tage nach der Pflanzung, wurde die Schicht 60-90 cm in die Kalkulation einbezogen. In dieser Phase, die mit 86 Tage deutlich mehr als 60 % der Kulturzeit einnahm, berechnete sich für die 'Variante 2' ein Zusatzwasserbedarf von 162 mm. Insgesamt erhielt damit diese Variante 286 mm Beregnung (Abbildung 203, Tabelle 61b).

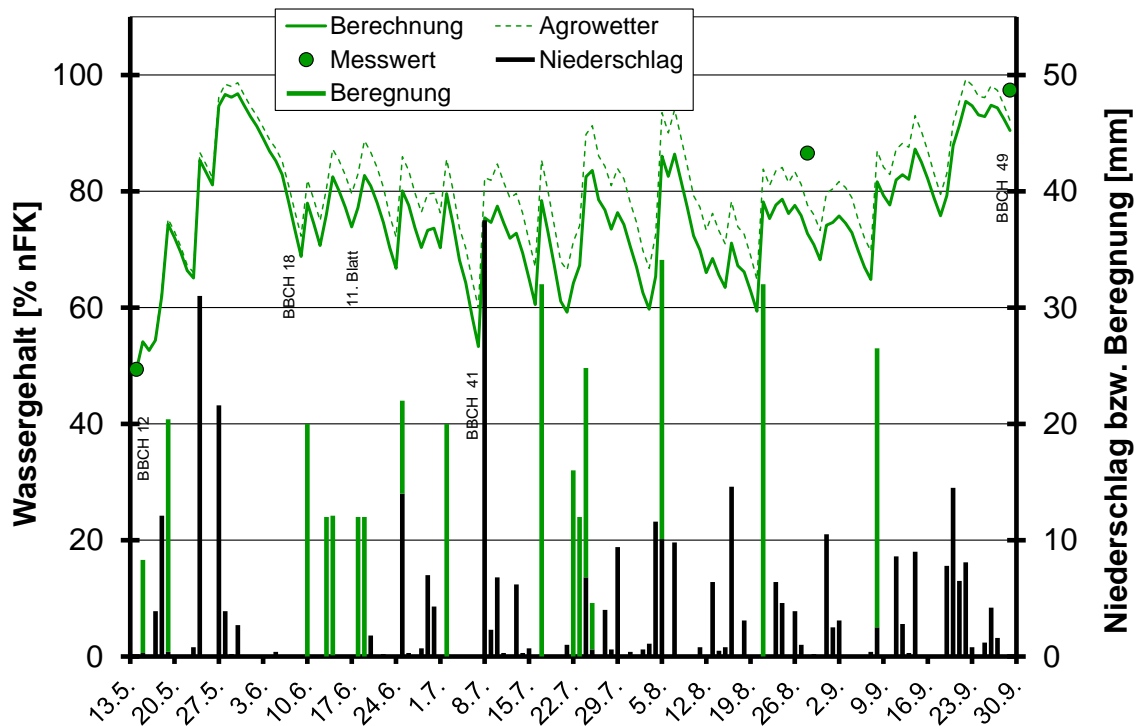


Abbildung 203: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 2' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 2}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

Ähnlich wie im Vorjahresversuch berechnete 'Agrowetter' einen relativ identischen Verlauf der Bodenwassergehalte wie die eigene Berechnung auf Basis der $kc_{Var 2}$ -Werte. Allerdings wurden um den 10. Juni herum durch 'Agrowetter' etwas höhere Bodenwassergehalte errechnet, die sich dann kontinuierlich bis zu Kulturende hin fortschrieben. Die nur am Ende der Kulturzeit ermittelten Bodenwassergehalte wurden (daher) von 'Agrowetter' etwas besser prognostiziert als von der eigenen Berechnung, die den Bodenwassergehalt aber auch nur relativ leicht unterschätzte.

Weil es nach beiden Modellen nie zu einer Überschreitung der FK kam, errechnete sich keine Sickerwasserbildung.

Die auf Basis der von dem SAPHIR-Projekt vorgegebenen kc_{TU} -Werte gesteuerte 'TU'-Variante wurde bei einer berechneten ET_c von 472,7 mm mit insgesamt 172 mm beregnet (Abbildung 204, Tabelle 61b). Nach 'Agrowetter' reichten die gegebene Wassermenge bzw. die Niederschläge (im letzten Kulturdrittel) nicht aus, den Bodenwassergehalt über 60 % nFK zu halten. Aufgrund dieser Unterschreitung errechnete 'Agrowetter' für diese Variante ein $ET_{c,adj}$ von 520,7 mm, während diese bei der Variante 2 567,2 mm betrug (Tabelle 61a).

In der 'TU'-Variante wurde seitens der SAPHIR-Arbeitsgruppe auch kontinuierlich die Bodenwasserspannung (Tension) mittels Tensiometer gemessen. Nach anfänglichen technischen Problemen (Trockenfallen etc.) lagen ab dem 3. Juni Messwerte vor. Diese zeigten, dass in der Tiefe von 29 cm anfänglich nie eine Bodenwasserspannung von 100 hPa überschritten wurde (Abbildung 205). Später stieg die Wasserspannung in dieser Tiefe phasenweise auf bis zu 743 hPa an (Stundenmaxima 767 hPa). In 52 cm Tiefe wurde aber zumeist nie ein Wert von 100 hPa (Stundenmaxima 117 hPa) überschritten, in 76 cm lag die Wasserspannung bei maximal 59 hPa, sodass bei einem Grundwasserflurabstand von über 7 m von einer kontinuierlichen Sickerwasserbildung auszugehen ist.

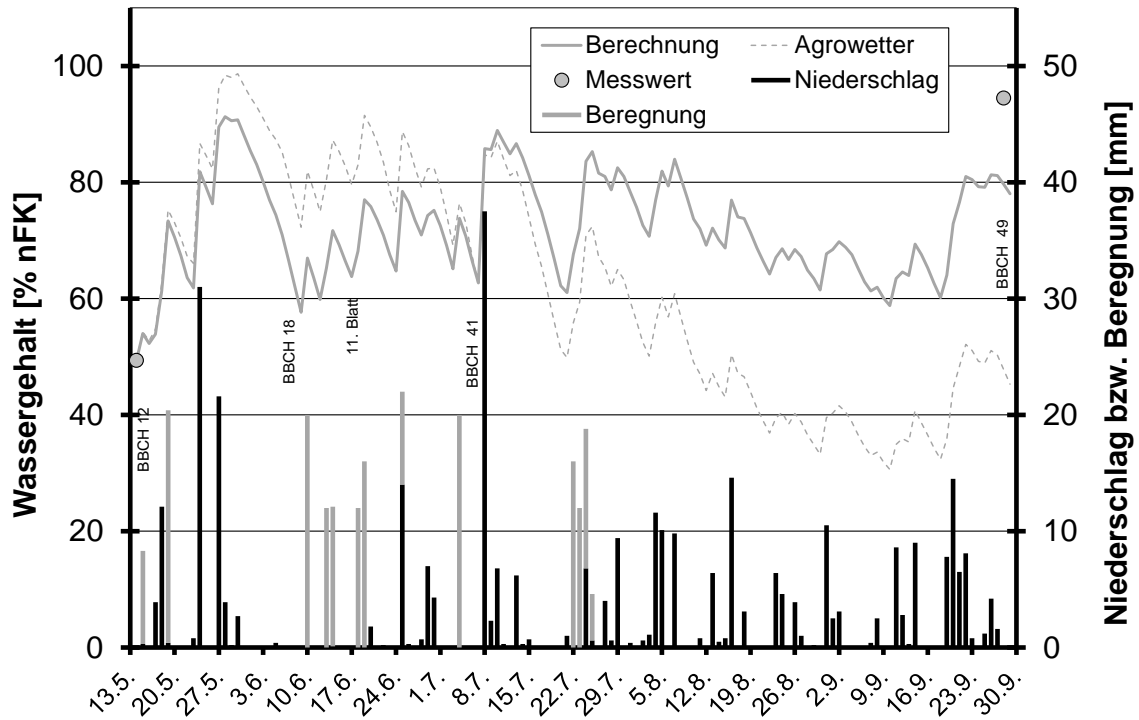


Abbildung 204: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'TU'-Variante auf Basis $ET_0 \times kc_{TU}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

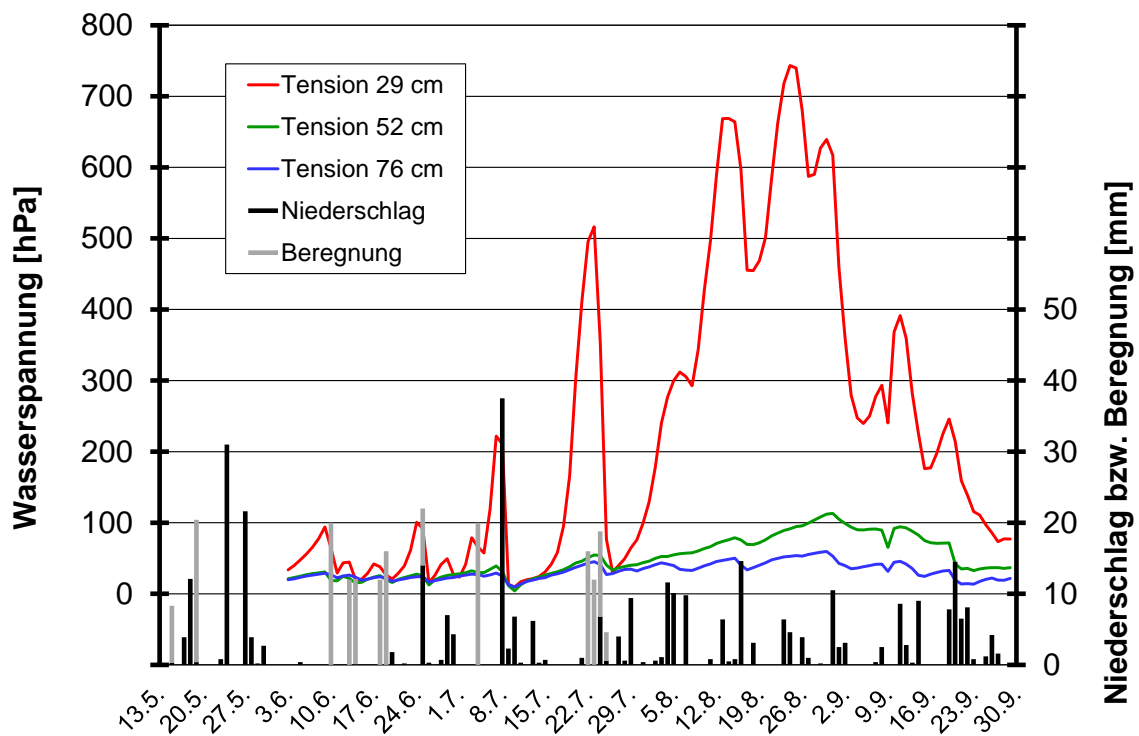


Abbildung 205: Gemessene Bodenwasserspannung (Tagesmittelwerte) der 'TU'-Variante in 29, 52 und 76 cm Bodentiefe (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe) [Weißkohlversuch 2014]

Bei 'Variante 3' errechnete sich eine ET_c von 429,7 mm, sodass insgesamt 134 mm beregnet werden mussten (Tabelle 61b, Abbildung 206). Auch hier noch unterschätze das auf $kc_{Var 3}$ basierende Modell die an drei Terminen ermittelten Bodenwassergehalte. Auf Grund der gegenüber 'Variante 2' (dort sehr gute Übereinstimmung zwischen kc -basiertem Modell und 'Agrowetter') deutlich geringeren Wassergaben berechnete 'Agrowetter' zu Kulturende hin modellgemäß recht geringe Bodenwassergehalte. Im letzten Kulturdr Drittel unterschieden sie sich allerdings nur noch wenig von dem der stärker bewässerten 'TU'-Variante, was auf die 'Selbstregulation' des Modells (bei geringen Bodenwassergehalten wird die $ET_{c,adj}$ immer weiter eingeschränkt) zurückzuführen ist.

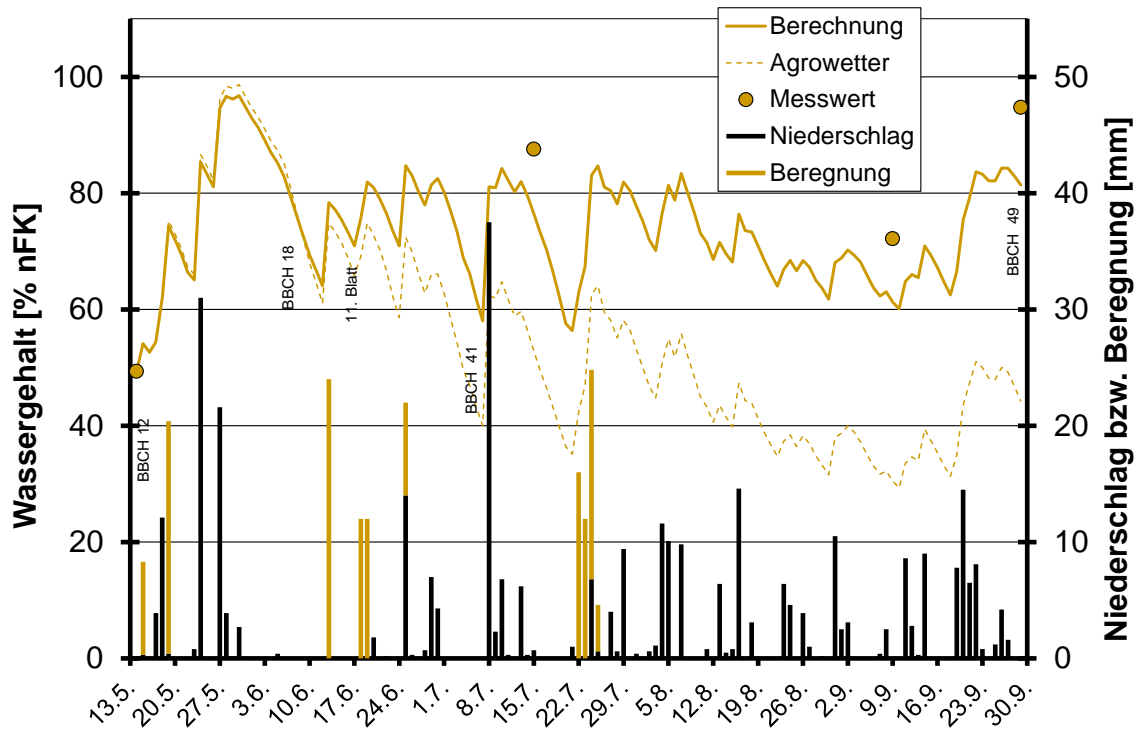


Abbildung 206: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 3' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 3}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

Die 'Variante 4' bekam, bei einer berechneten ET_c von 307,5 mm, nur 76 mm Zusatzbewässerung (Abbildung 207). Bei dieser Variante mit gleichbleibend niedrigem kc -Faktor von 0,7 führten die regelmäßigen Niederschläge in der zweiten Kulturhälfte zu einem kontinuierlichen Anstieg der berechneten Bodenwassergehalte.

Im Gegensatz zu den stärker bewässerten Varianten '2', 'SVAT', 'TU' und '3' mit Bodenwasser-Endgehalten von einheitlich rund 95 bis 100 % nFK wurde bei 'Variante 4' ein deutlich geringerer Bodenwassergehalt gefunden. 'Agrowetter' überschätzte offensichtlich mit 429,7 mm die $ET_{c,adj}$, weil sich der Boden zu Kulturende deutlich feuchter zeigte als berechnet.

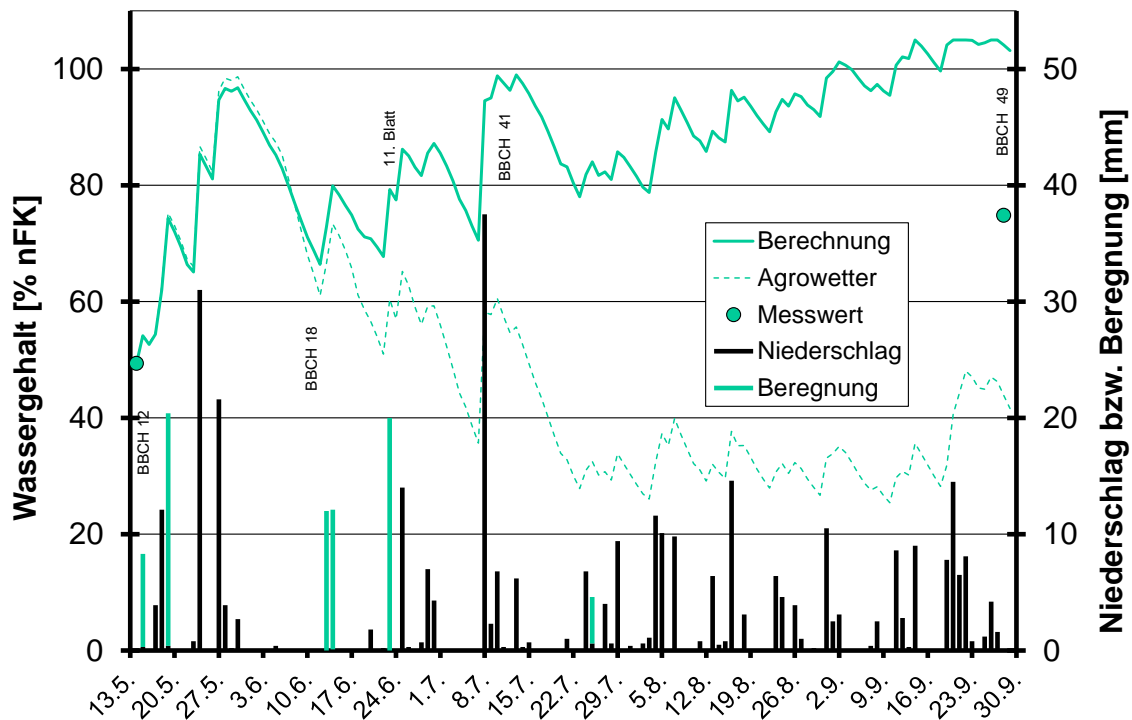


Abbildung 207: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 4' auf Basis $ET_0 \times kc_{Var 4}$ bzw. nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlversuch 2014]

Die 'Kontrolle' musste nach der Pflanzung zur Sicherstellung des Anwachsens mit 28 mm bewässert werden (Abbildung 208). Am 25. Juli wurde sie darüber hinaus, wie auch alle anderen Varianten, mit 4 mm beregnet, weil die angekündigten Niederschläge nahezu ausblieben, die an dem Tag verabreichte Kopfdüngung aber von den Pflanzen abgerechnet werden musste.

Bei deckungsgleicher Bewässerung in der langen Kopfbildungsphase (nur die angesprochenen 4 mm) wurde zu Kulturrende ein nahezu identischer Bodenwassergehalt wie in der 'Variante 4' ermittelt. 'Agrowetter' berechnete für diese Variante eine $ET_{c,adj}$ von 386,1 mm, offensichtlich verdunsteten aber auch hier (insbesondere bis Anfang Juli) deutlich geringere Wassermengen.

Die nach Vorgaben der SAPHIR-Arbeitsgruppe bewässerte 'SVAT'-Variante wurde mit insgesamt 228 mm beregnet. Abbildung 209 gibt die von 'Agrowetter' für diese Beregnungsmengen berechneten Bodenwassergehalte wieder. Auch hier liegen Tensionsmessungen vor, die für die Schichten 52 und 76 cm zumeist noch feuchtere Bedingungen als in der 'TU'-Variante ausweisen (Abbildung 210).

Die nicht in den Versuch aufgenommene 'Variante 1' ($kc: 0,7/1,1/1,7/1,8$) wäre bis zum 11-Blatt-Stadium deckungsgleich wie die Variante 2 bewässert worden. In den Phasen 11.-Blatt bis BBCH 41 und BBCH 41-49 hätte sie mit rund 88 bzw. 196 mm bewässert werden müssen, sodass sie insgesamt, bei einer berechneten ET_c von 661,9 mm, 356 mm Zusatzwasser erhalten hätte (Abbildung 211). (Im Laufe des Jahres 2014 wurde die kc_{FAO} -Werte leicht auf $0,7/1,1/1,6/1,7$ reduziert [Hs-GM 2014]. Mit diesen kc -Werten errechnet sich eine ET_c von 630,8 mm, der Zusatzwasserbedarf hätte bei 324 mm gelegen.)

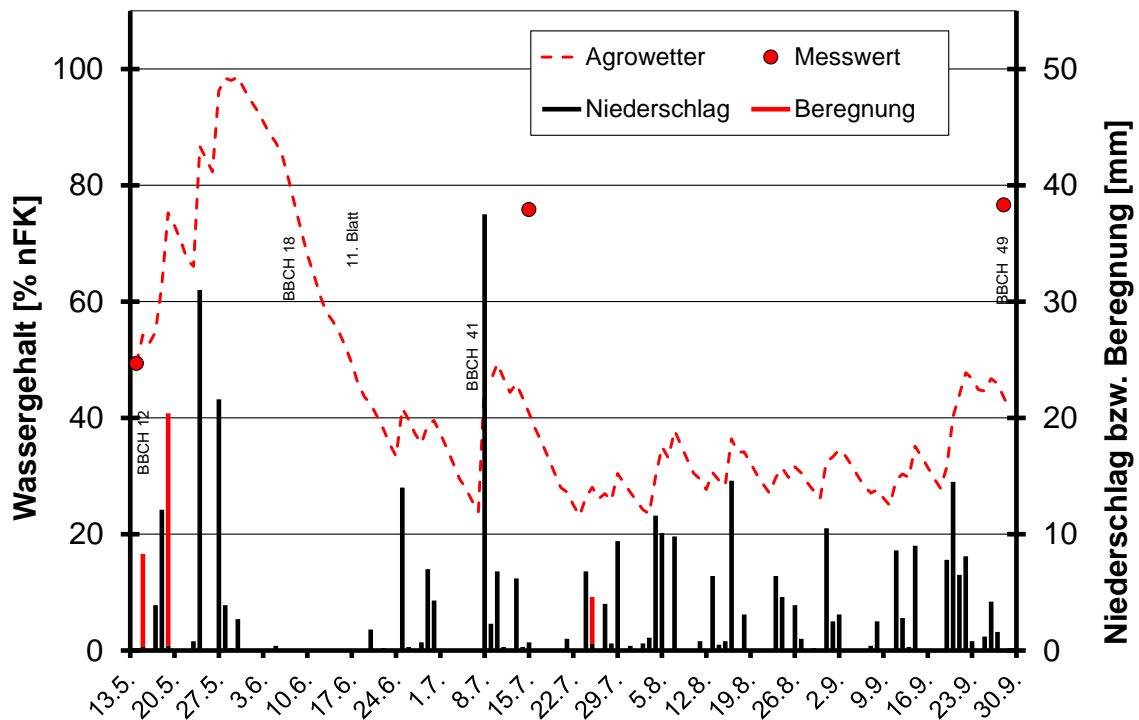


Abbildung 208: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'Kontrolle' nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlvorsuch 2014]

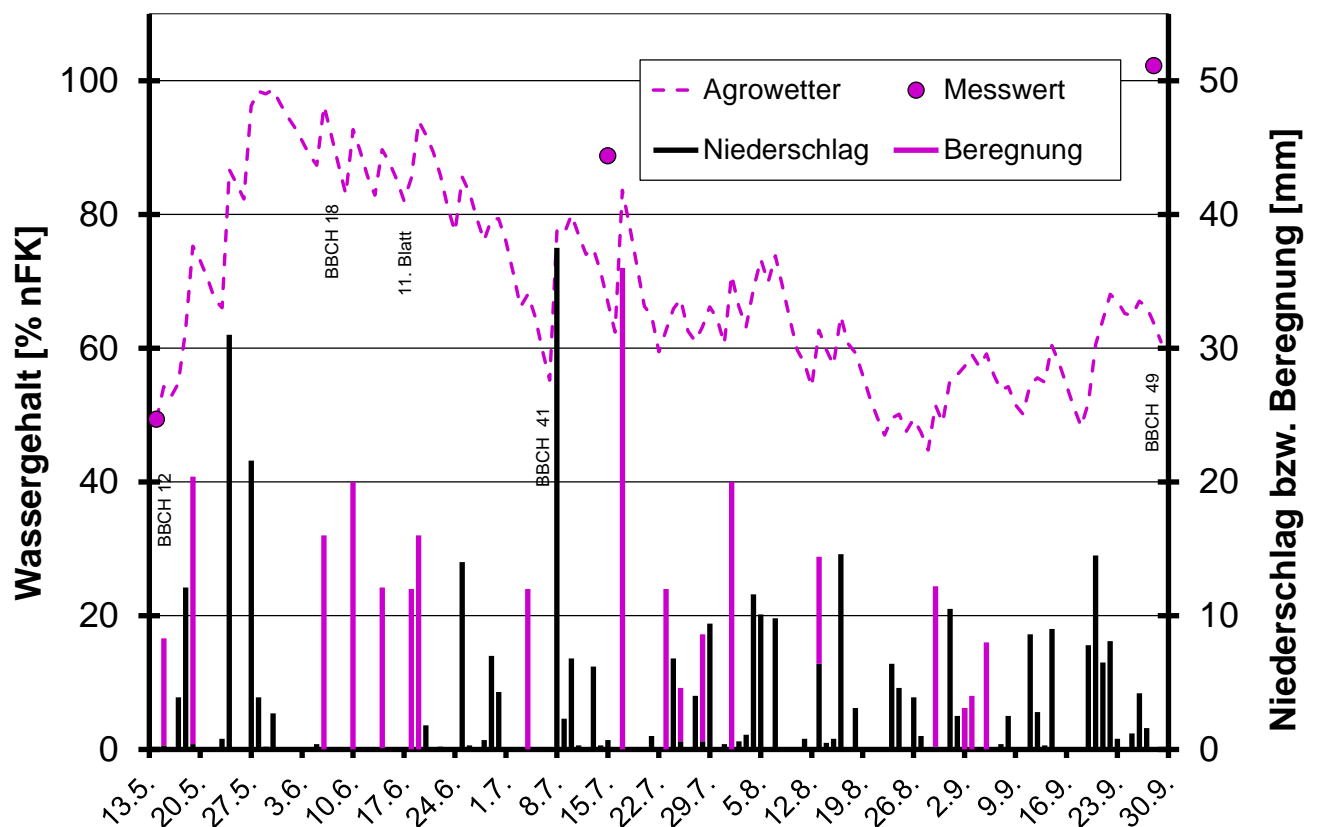


Abbildung 209: Niederschlags- und Beregnungsmengen und berechneter Bodenwassergehalt der Schicht 0-90 cm der 'SVAT'-Variante nach 'Agrowetter' sowie gravimetrisch bestimmter Bodenwassergehalt [Weißkohlvorsuch 2014]

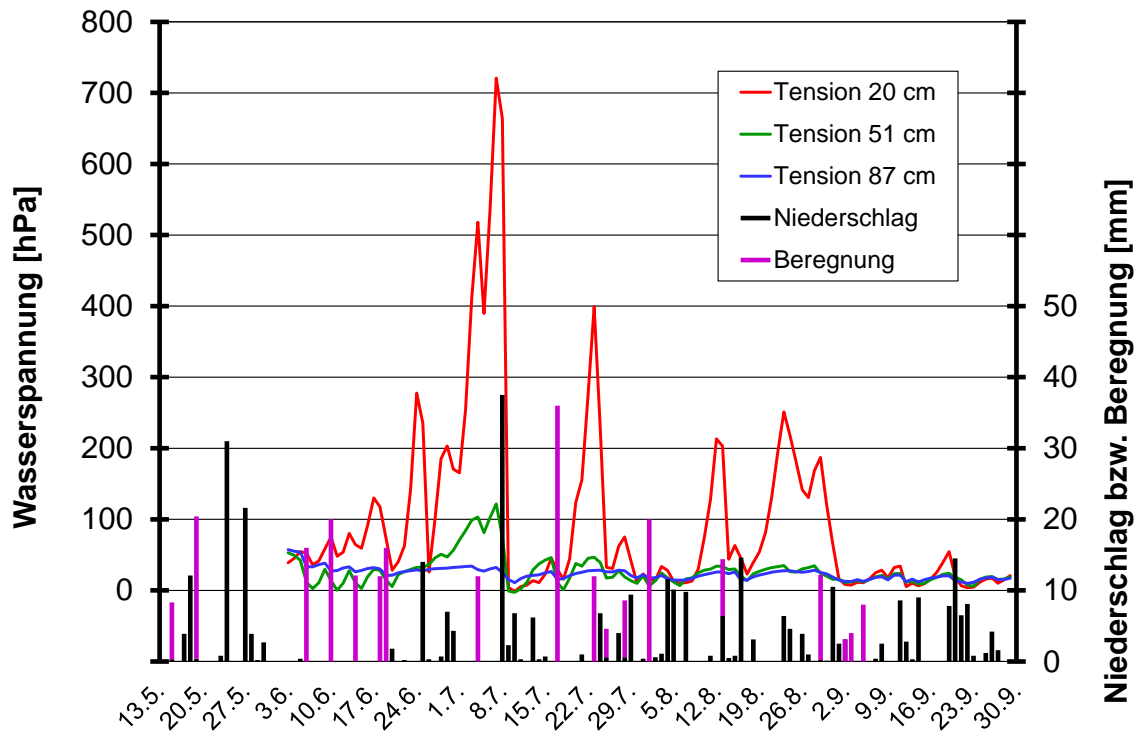


Abbildung 210: Gemessene Bodenwasserspannung der 'SVAT-Variante' in 20, 51 und 87 cm Bodentiefe (Messungen der SAPHIR-Arbeitsgruppe; Tagesmittelwerte: 12:00 bis 12:00 Uhr des Folgetages) [Weißkohlversuch 2014]

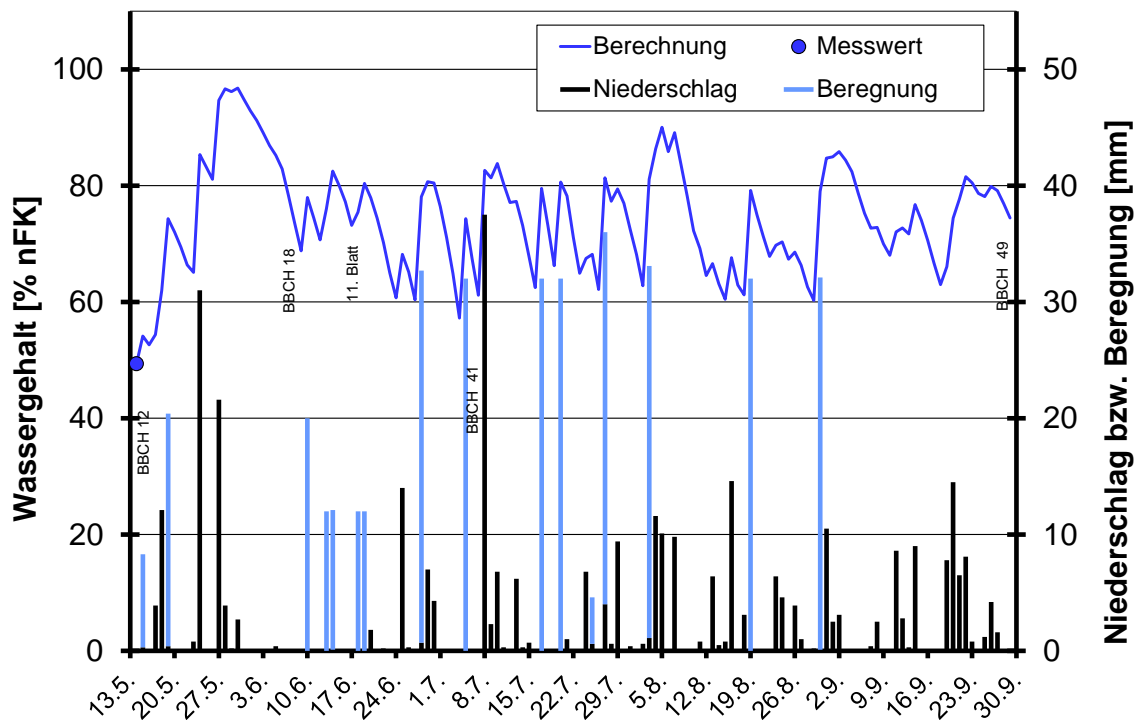


Abbildung 211: Niederschlags- und Beregnungsmengen (theoretisch) und berechneter Bodenwasser-gehalt der Schicht 0-90 cm der 'Variante 1' auf Basis $ET_0 \times kc_{var 1}$ [Weißkohlversuch 2014]

Auf der Versuchsfläche war die 'Kontrolle' längere Zeit durch ein etwas geringeres Wachstum, insbesondere ein etwas kleineres Umblatt und durch ein helleres Aussehen der Pflanzen (das offensichtlich von einer stärker ausgeprägten Wachsschicht auf den Blättern herrührte) zu erkennen. Auch die 'Variante 4' zeigte, wenn auch deutlich abgeschwächt, ähnliche Symptome. Zu Kulturende hin 'verwachsen' sich diese Unterschiede zwischen den Varianten aber zusehends.

Bei der Ertragsauswertung zeigten die 'Kontrolle' und die 'Variante 4' tendenziell den niedrigsten Marktertrag, mit 1.245 dt/ha bzw. 1.270 dt/ha lagen sie aber immer noch auf hohem Niveau (Abbildung 212). Bei den Ernterückständen waren keine Unterschiede festzustellen.

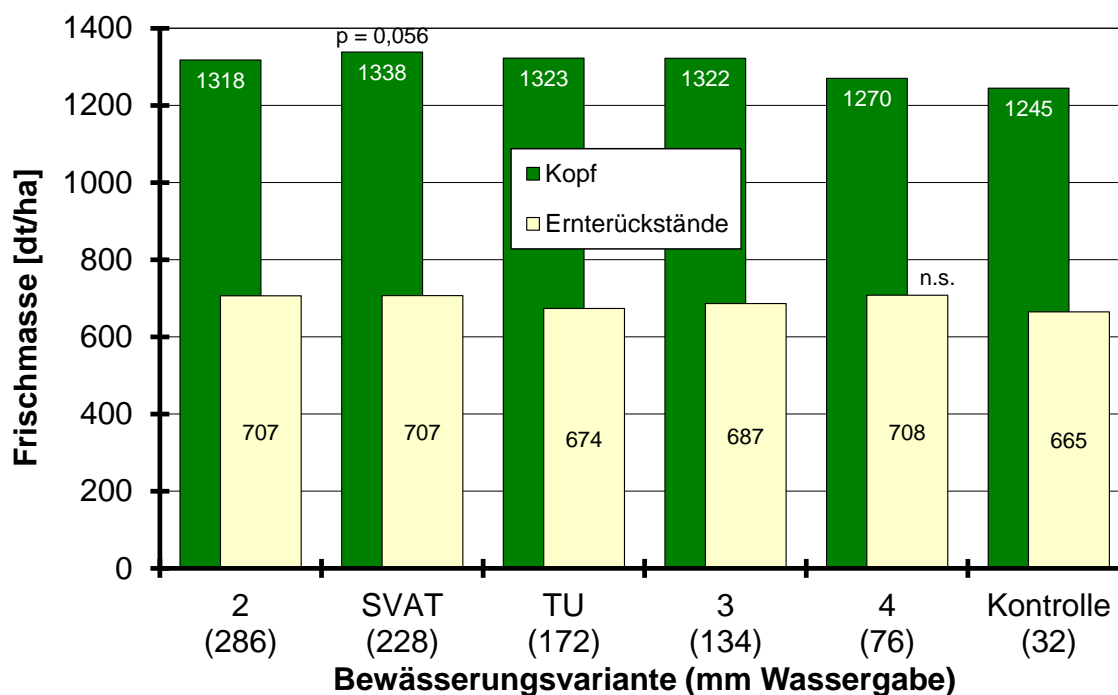


Abbildung 212: Marktertrag und Ernterückstände (Mittelwerte über die Wiederholungen; ohne Berücksichtigung von Fehlstellen) [Weißkohlversuch 2014]

Ogleich auf den Versuchspartellen jeweils nur maximal ein oder zwei Fehlstellen (im Mittel 0,5 Pfl./Parzelle) zu beklagen waren, konnten auf Basis der mittleren Kopfmasse (der geernteten Pflanzen) Unterschiede zwischen den Bewässerungsstufen abgesichert werden (Abbildung 213). Die mittlere Kopfmasse der Varianten '2', 'SVAT', 'TU' und '3' unterschieden sich, trotz einer Beregnungsdifferenz von bis zu 152 mm, aber praktisch nicht.

Ähnlich wie beim Frischmasseertrag konnte beim Frischmasse-Aufwuchs keine Beregnungswirkung abgesichert werden (Abbildung 214), auf Einzelpflanzenniveau ergab sich eine ähnliche Abstufung zwischen den Varianten wie bei der Kopfmasse (o. Abbildung). Der frischmassebezogene Ernteindex fiel mit durchschnittlich 65,3 % etwas geringer als im Vorjahresversuch aus, eine Abhängigkeit von der Beregnungsmenge war nicht zu erkennen.

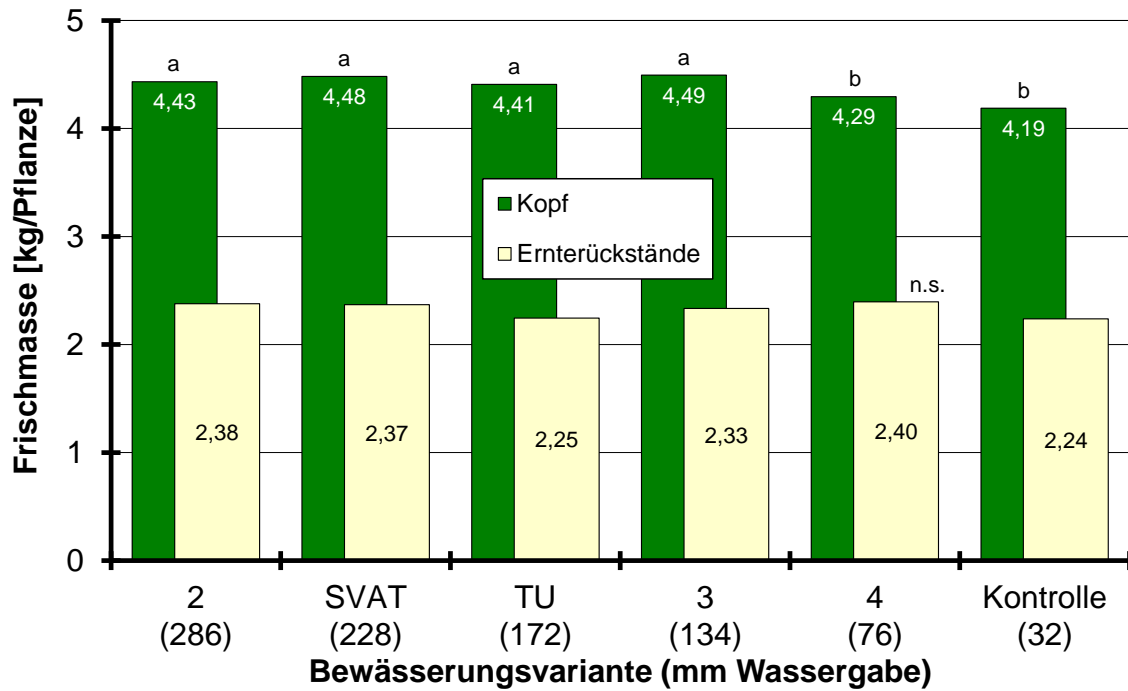


Abbildung 213: Mittlere Kopfmasse ($GD(\alpha < 0,05) = 0,17 \text{ kg}$) und Ernterückstände pro Pflanze (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]

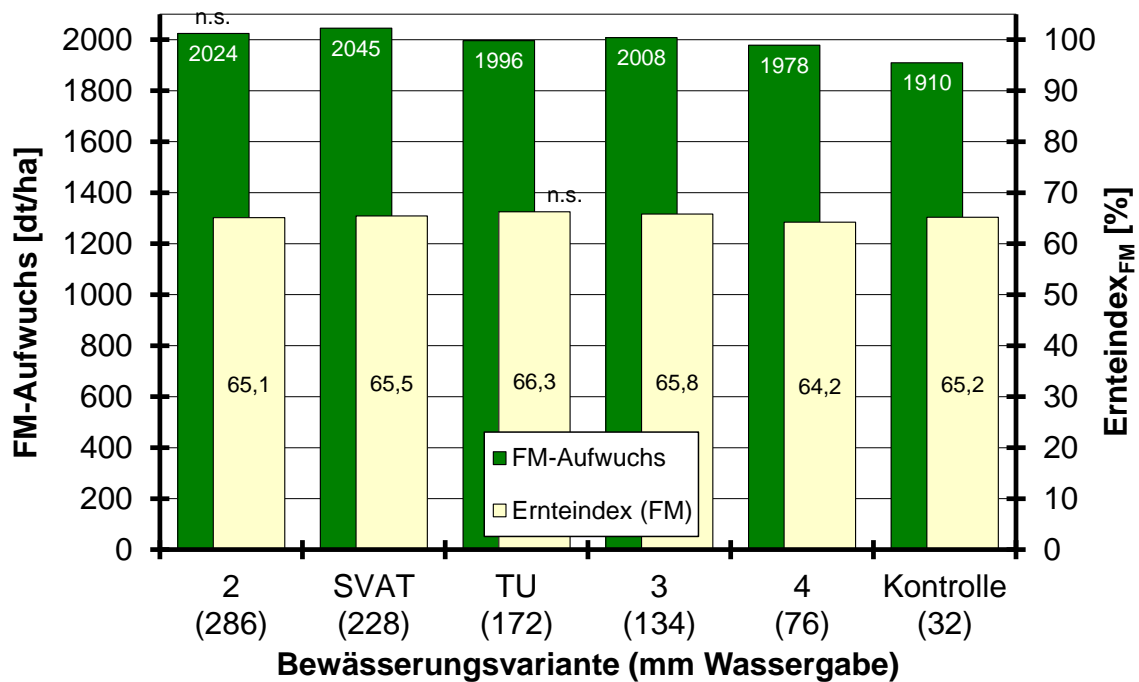


Abbildung 214: Frischmasse-Aufwuchs und frischmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]

Während der Trockensubstanzgehalt der Marktware (Kopf) wie im Vorjahresversuch nicht signifikant durch die Beregnungsintensität beeinflusst wurde, war der TS-Gehalt der Ernterückstände in 'Variante 4' und der 'Kontrolle' am höchsten (Abbildung 215).

Bei den Trockenmasseerträgen (Köpfe) zeigten sich zwischen den Bewässerungsvarianten praktisch keine Unterschiede (Abbildung 216), das heißt, die etwas höheren Frischmasseerträge der intensiv bewässerten Varianten wurden durch die etwas höheren TS-Gehalte bei den wenig beregneten Varianten kompensiert. Während auch bei den Ernterückständen meist keine größeren Differenzen bei der Trockenmasse gefunden wurden, fiel die 'Variante 4' hier mit einer überdurchschnittlich hohen TM-Bildung auf Grund des hohen TS-Gehaltes auf. Dementsprechend zeigte diese Variante auch einen überdurchschnittlich hohen TM-Aufwuchs und den geringsten trockenmassebezogenen Ernteindex (Abbildung 217).

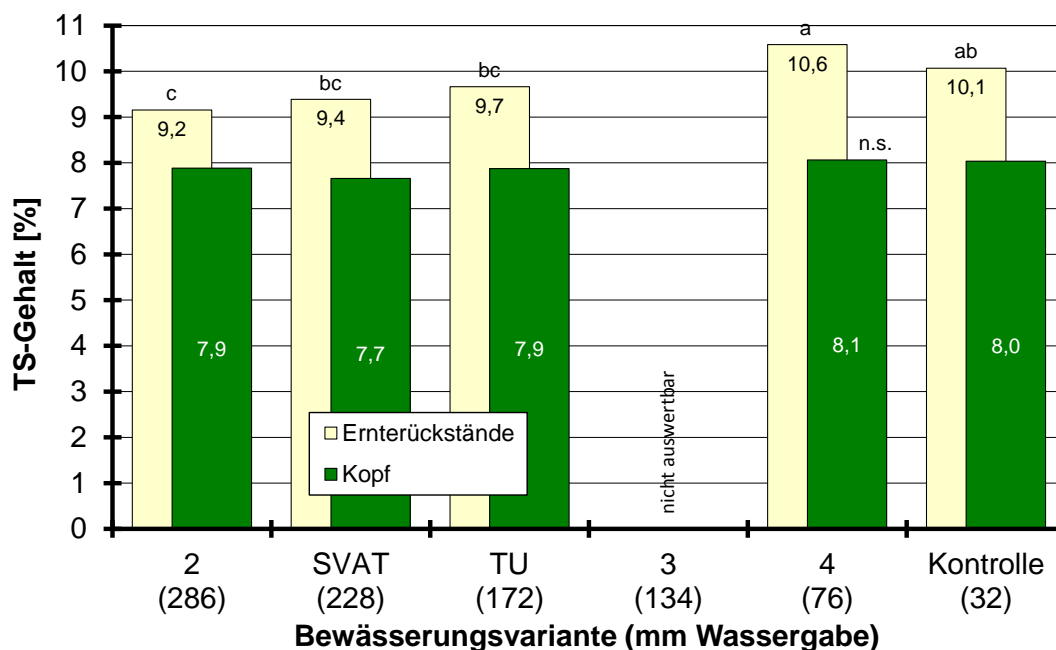


Abbildung 215: Trockensubstanzgehalt von Marktware (Köpfe) und Ernterückständen (GD($\alpha < 0,05$) = 0,9 %) (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]

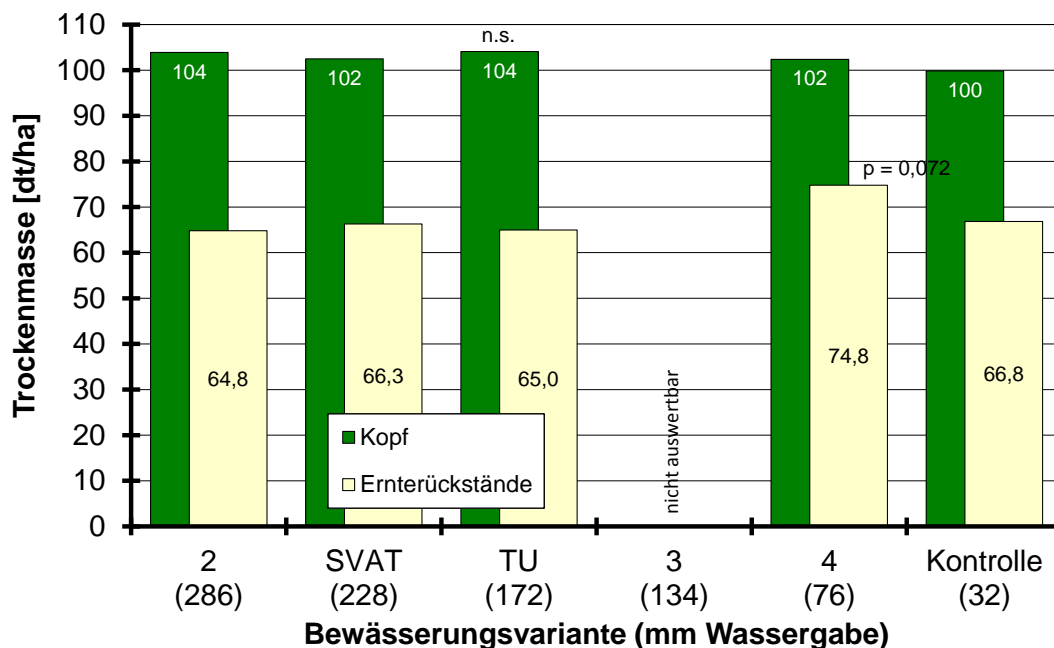


Abbildung 216: Trockenmasse von Marktware und Ernterückständen (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]

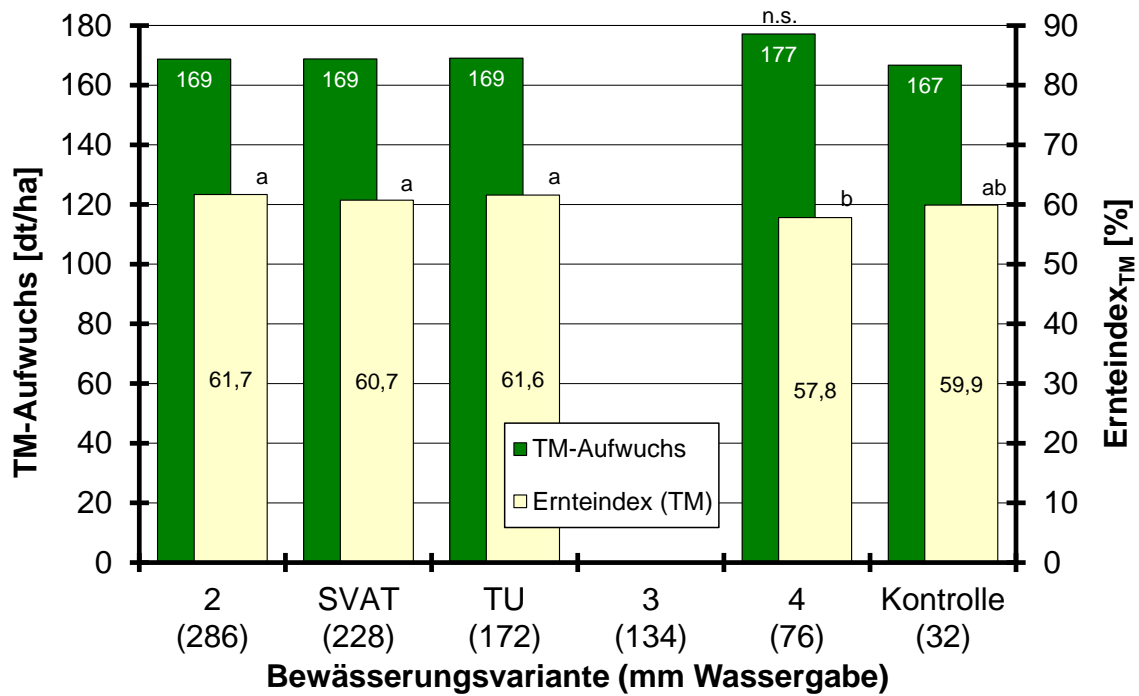


Abbildung 217: Trockenmasse-Aufwuchs und trockenmassebezogener Ernteindex (Mittelwerte über die Wiederholungen) [Weißkohlversuch 2014]

Tabelle 60: Gravimetrisch bestimmte Bodenwassergehalte und % nutzbare Feldkapazität [Weißkohlversuch 2014]

Datum	BBCH	Variante	Bodenwassergehalt [Vol.-%] ¹⁾			% nFK ²⁾		
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Mittel ³⁾		alle	27,2	26,0	28,0	100	100	100
14. Mai ⁴⁾	12	alle	17,0	17,3	22,3	38	44	65,9
13. Juni		Var 2, TU	21,6	21,4		66	70	
		SVAT	22,2	21,8		69	73	
		Var 3, 4, Kontrolle	18,7	19,2		48	56	
15. Juli		SVAT	26,4	23,5	25,9	95	83	87
		Var 3	25,5	22,5	27,1	90	78	95
		Kontrolle	25,5	21,5	22,5	90	71	67
28. Aug.		Var 2	25,5	23,8	25,4	90	86	84
9. Sept.		Var 3	22,4	21,0	24,3	71	68	78
28. Sept.	49	SVAT	28,0	26,4	27,9	105	102	99
		TU	26,4	23,9	28,3	95	86	101
		Var 4	24,9	21,7	22,4	86	72	67
		Kontrolle	25,7	22,4	21,7	91	77	62
29. Sept.	49	Var 2	27,6	26,0	26,4	103	100	90
		Var 3	26,0	24,7	28,0	93	91	100

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

2) zugrunde gelegter Totwassergehalt: 10,9 Vol.-% (0-30 cm), 14,0 Vol.-% (30-60 cm), 14,4 Vol.-% (60-90 cm)

3) Mittelwert der jährlich bestimmten FK (Versuchsjahre 2010-2013). Eine aktuelle Bestimmung der FK konnte auf Grund fehlender Niederschläge ausgangs des Winters nicht durchgeführt werden.

4) Die Proben wurden jeweils am Morgen des Folgetages gezogen und geben somit den Bodenwassergehalt am Ende des angegebenen Tages wieder.

Tabelle 61a: Kalkulierte Verdunstung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2014]

Phase BBCH	Referenzverdunstung			Verdunstung des Bestandes [mm]									
	ET ₀ ¹⁾ [mm]	ETp _{PEN} ²⁾	ETp _{PEN} /ET ₀ ³⁾	Geisenheim: ET _c ⁴⁾ ET ₀ × kc				Agrowetter: ET _{c,adj} ⁵⁾ (ET ₀ × w _{fak} ⁶⁾ × kc _{PEN}					
				Var 2	TU	Var 3	Var 4	Var 2	SVAT	TU	Var 3	Var 4	Ko
12-18	80,4	116,5	1,42	56,3	73,7	56,3		53,5					
18-11. B.	47,6	65,7	1,38	52,4	50,7	38,1	33,3	47,6	48,0	47,6			
11. B.-41	70,9	101,9	1,43	99,3	78,0	70,9	49,6	98,2	97,7	98,2	91,9	87,1	63,3
41-49	240,4	339,0	1,39	360,6	270,2	264,4	168,3	367,9	355,0	321,4	291,3	241,5	221,7
12-49	439,3	623,1	1,40	568,5	472,7	429,7	307,5	567,2	554,2	520,7	484,3	429,7	386,1

Tabelle 61b: Niederschläge, Beregnung und berechnete Versickerung während der verschiedenen Entwicklungsphasen des Weißkohls [Versuch 2014]

Nieder- schlag [mm]	Beregnung [mm]						Versickerung [mm] ⁷⁾		
							Geisenheim ET ₀ × kc	Agrowetter (ET ₀ × w _{fak}) × kc _{PEN}	
	Var 2	SVAT	TU	Var 3	Var 4	Ko	Var 2, 3, TU	Var 4	alle Varianten (außer 1)
77,3	28	44	28	28	28	28	0	0	0
0,1	44	32	44	24	24	0	0	0	0
28,3	52	40	56	32	20	0	0	0	0
236,9	162	112	44	50	4	4	0	32,4	0
342,6	286	228	172	134	76	32	0	32,4	0

- 1) FAO-Gras-Referenzverdunstung
- 2) Verdunstung nach modifizierter PENMAN-Gleichung (nasses Gras)
- 3) Mittelwerte der täglichen Quotienten
- 4) potenzielle Evapotranspiration des Bestandes berechnet nach dem 'Geisenheimer Modell'
- 5) aktuelle Evapotranspiration des Bestandes laut 'Agrowetter'
- 6) windabhängiger Faktor (JANSSEN 2012)
- 7) aus der Bodenschicht 0-90 cm

6.3.4 Zusammenfassung der drei Versuchsjahre

Witterungsverlauf, Verdunstungsberechnung

Die ET_c-Berechnung der Varianten basierte 2012 auf ETp_{PEN}, 2013 und 2014 auf ET₀ (Tabelle 62). Während 2013 ETp_{PEN} in der Bewässerungsphase durchschnittlich nur um Faktor 1,29 über ET₀ lag, betrug dieser Faktor in den anderen beiden Jahren 1,45 bzw. 1,40.

Tabelle 62: Referenzverdunstung in den verschiedenen Versuchsjahren [Weißkohlversuche]

	Referenzverdunstung [mm]														
	BBCH 12-18			BBCH 18 - 11. Blatt			11. Blatt – BBCH 41			BBCH 41- 49			BBCH 12-49		
	ET ₀	ETp _{PEN}	ETp _{PEN} /ET ₀ ^{*)}	ET ₀	ETp _{PEN}	ETp _{PEN} /ET ₀ ^{*)}	ET ₀	ETp _{PEN}	ETp _{PEN} /ET ₀ ^{*)}	ET ₀	ETp _{PEN}	ETp _{PEN} /ET ₀ ^{*)}	ET ₀	ETp _{PEN}	ETp _{PEN} /ET ₀ ^{*)}
2012	101,5	147,8	1,51	54,8	79,4	1,47	44,1	59,6	1,36	274,9	387,4	1,44	475,3	674,2	1,45
2013	67,9	89,1	1,36	56,5	70,4	1,25	87,0	107,8	1,27	225,4	281,8	1,28	436,8	549,1	1,29
2014	80,4	116,5	1,42	47,6	65,7	1,38	70,9	101,9	1,43	240,4	339,0	1,39	439,3	623,1	1,40

*) Mittelwert der täglichen Quotienten

Für die in allen drei Versuchsjahren angelegte 'Variante 2' errechnet sich auf Basis ET₀ × kc_{Var 2} eine ET_c von 569 bis 605 mm. 'Agrowetter' kam jeweils zu nahezu identischen Verdunstungswerten (Abbildung 218). Stellt man den Verdunstungswerten die Niederschlagsmengen gegenüber, so fällt insbesondere der hohe Wasserüberschuss in der ersten Phase des Versuches 2013 auf. 2014 fielen in der Hauptwachstumsphase

(BBCH 41-49) vergleichsweise hohe Niederschlagsmengen, das Versuchsjahr 2013 war hier das niederschlagsärmste.

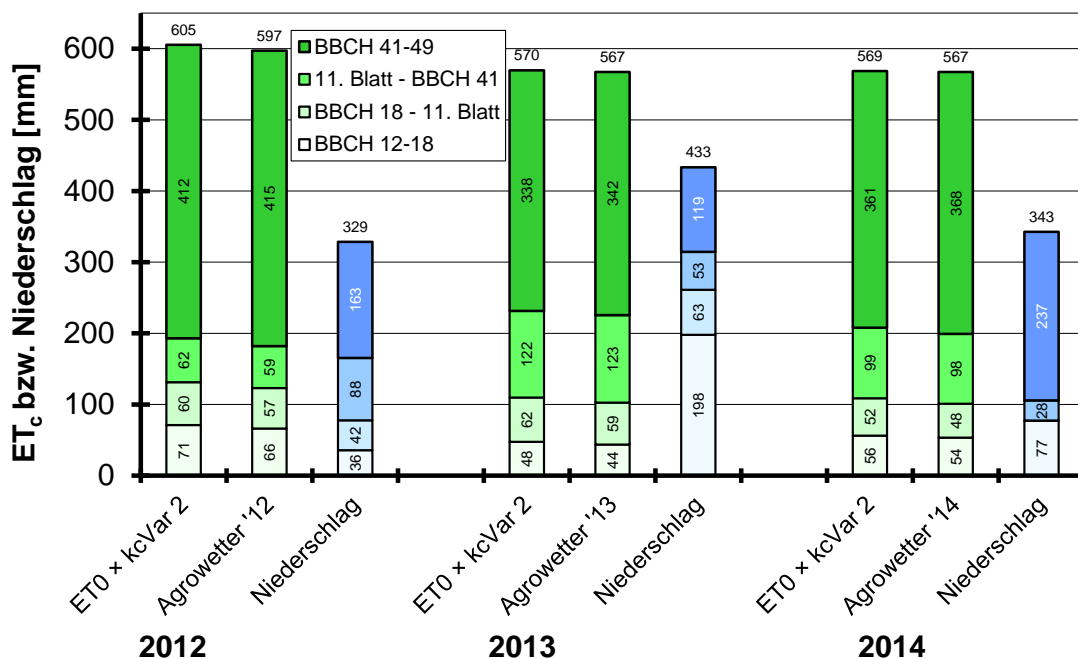


Abbildung 218: Potenzielle Evapotranspiration des Weißkohlbestandes auf Basis $ET_0 \times kc_{VAR 2}$ und nach 'Agrowetter' und Niederschläge in den verschiedenen Versuchsjahren

Die verabreichten Zusatzwassergaben lagen bei der in allen Versuchsjahren angelegten 'Variante 2' bei rund 290 mm, die 'Variante 1' erhielt ca. 100 mm mehr (Tabelle 63). Die 'Variante 3' wurde mit rund 150 mm bewässert, was in etwa der Menge entspricht, die als durchschnittlicher Zusatzwasserbedarf für den sächsischen Anbau genannt wird (vgl. LATTASCHKE et al. 2002).

Tabelle 63: Zusatzbewässerung in den verschiedenen Varianten [Weißkohlversuche]

Versuchsjahr	Variante					SVAT	TU	Kontrolle
	1+	1	2	3	4			
2012	480	386	288	162	—	—	—	—
2013	—	410	306	—	108	106	—	—
2014	—	—	286	134	76	228	172	32

Kalkulierte versus ermittelte Bodenwassergehalte

In den Versuchsjahren 2012 ($ET_{PEN} \times kc$) sowie 2013 und 2014 ($ET_0 \times kc$) stimmten die für die Variante 2 kalkulierten Bodenwassergehalte mit den gravimetrisch gemessenen Werten meist gut überein. Bei 'Variante 3' wurden 2012 die Bodenwassergehalte leicht überschätzt, 2014 leicht unterschätzt.

Berechnet man nachträglich für alle 'intensiver' bewässerten Varianten (2013: ohne 'SVAT' und 'Variante 4'; 2014: ohne 'Variante 4' und 'Kontrolle') die Verdunstung und daraus abgeleitet die Bodenwassergehalte mit einem einheitlichen Ansatz, so zeigt sich bei $ET_0 \times kc_{Var 3}$ mit einem RMSE (Wurzel aus dem Mittel der Abweichungsquadrate) von 11,0 Vol.-% die engste Beziehung zwischen gemessenem und kalkuliertem Bodenwassergehalt (Abbildung 219). Tendenziell, insbesondere mit Ausnahme der Unterschätzung der 'Variante 3' im Versuch 2014, wurden die Wassergehalte aber etwas überschätzt, mithin die ET_c etwas zu gering eingeschätzt.

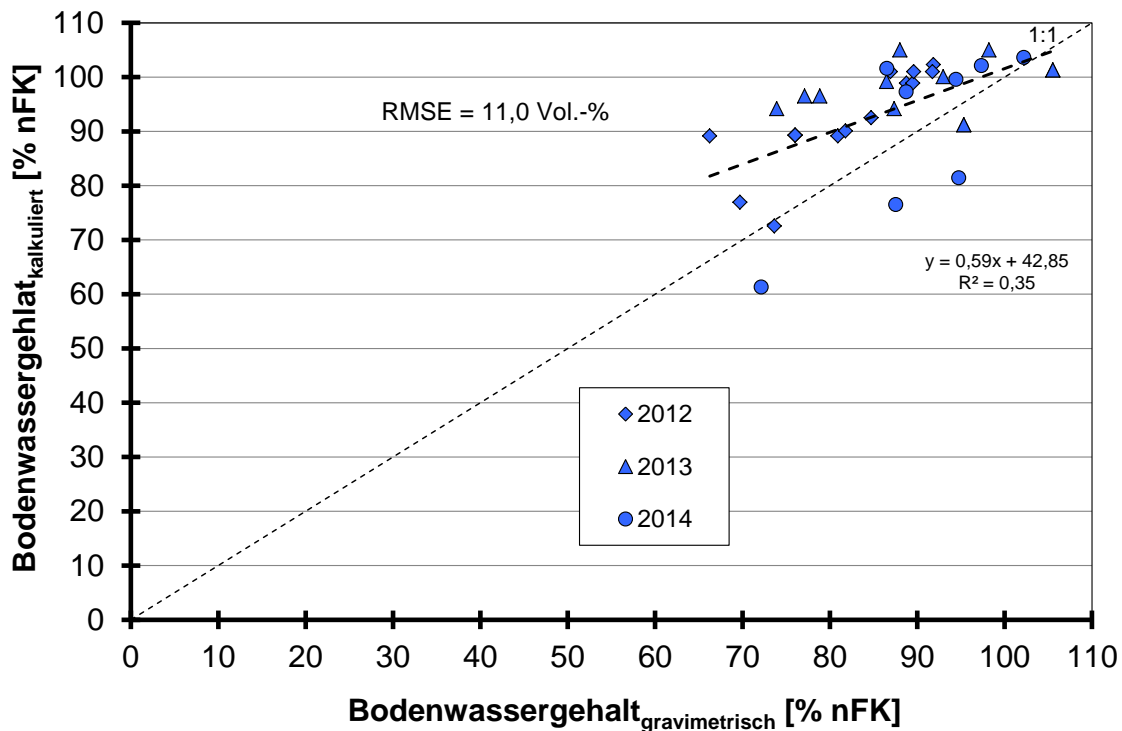


Abbildung 219: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times kc_{Var\ 3}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]

Berechnet man die Bodenwassergehalte auf Basis der höheren $kc_{Var\ 2}$ -Werte, so zeigen sich häufiger sehr starke Unterschätzungen des Bodenwassergehaltes, womit eine Überschätzung von ET_c anzunehmen ist (Abbildung 220). Bei 'Agrowetter' fielen die Unterschätzungen des Bodenwassergehaltes weniger stark aus (Abbildung 221).

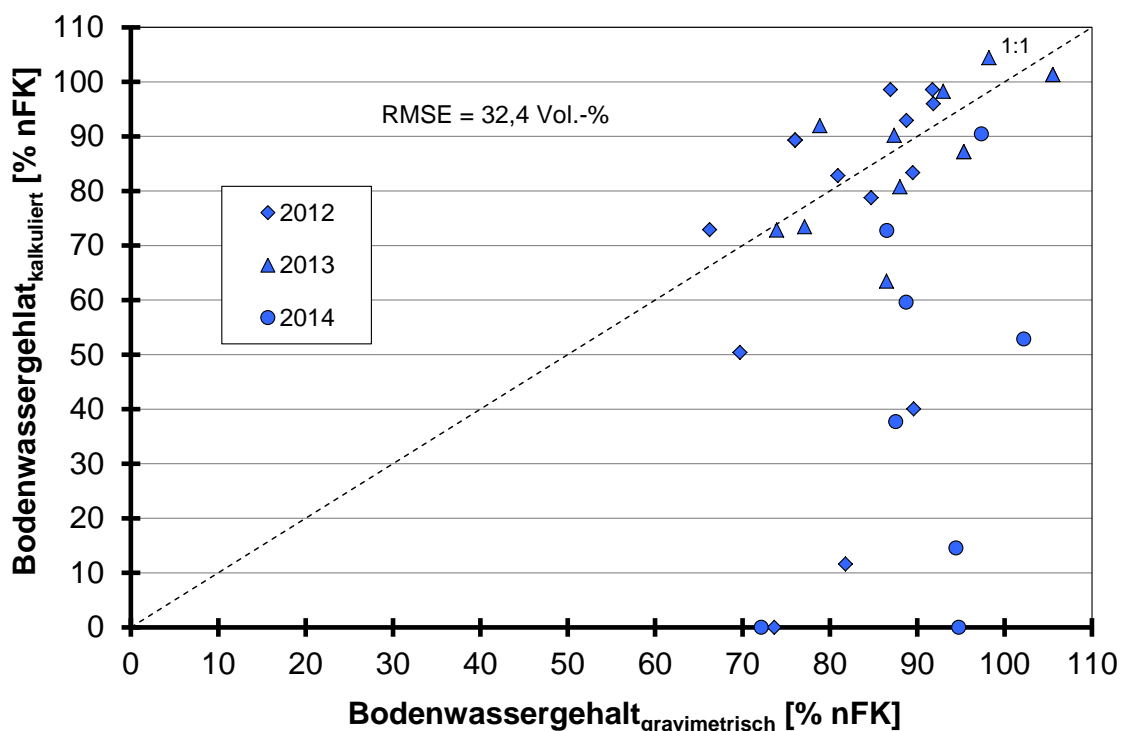


Abbildung 220: Beziehung zwischen dem auf Basis $ET_0 \times kc_{Var\ 2}$ kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]

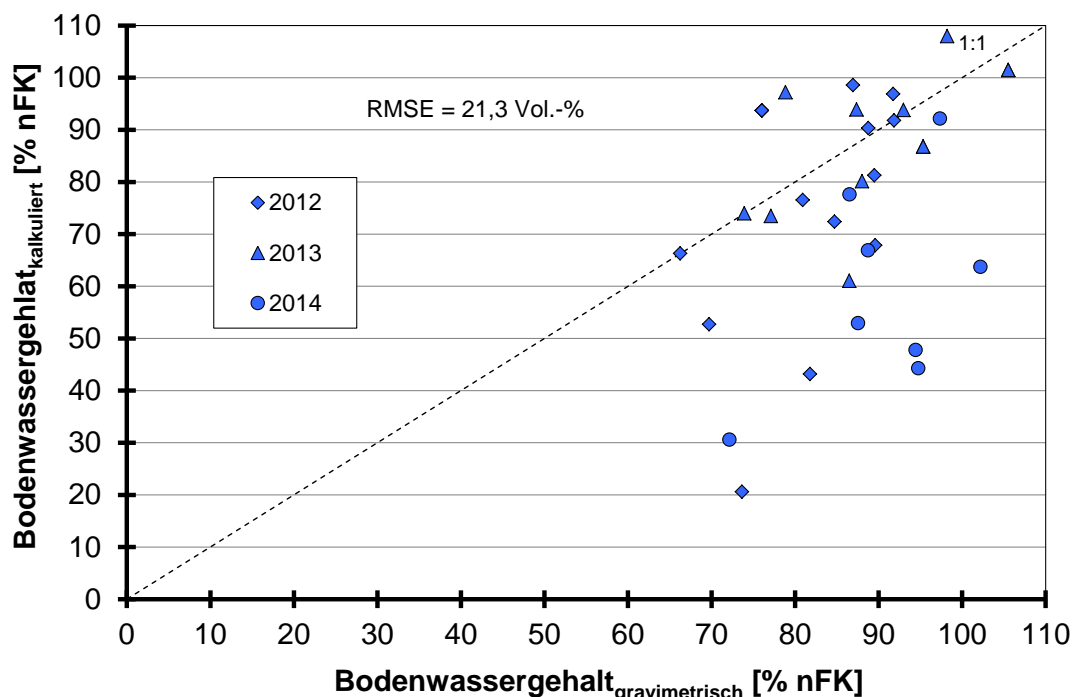


Abbildung 221: Beziehung zwischen dem von 'Agrowetter' kalkulierten und dem gravimetrisch bestimmten Bodenwassergehalt der 'intensiver' bewässerten Varianten [Weißkohlversuche]

Weißkohlträge, Effizienz der Bewässerung

Das mittlere Kopfgewicht lag bei der 'Variante 2' (rund 290 mm Zusatzbewässerung) bei 4,0 kg (Abbildung 222). Die 'Variante 3' (nur 2012 und 2014; ca. 150 mm) zeigte vergleichbare Kopfgewichte. Signifikante Mehrerträge gegenüber diesen beiden Varianten waren in den stärker beregneten Varianten '1' (ca. 400 mm) und '1+' (480 mm) nicht zu verzeichnen. Abzusichernde Mindererträge traten in der Variante 4 (rund 90 mm), 2013 in der 'SVAT'-Variante (106 mm) und in der 'Kontrolle' (32 mm) auf.

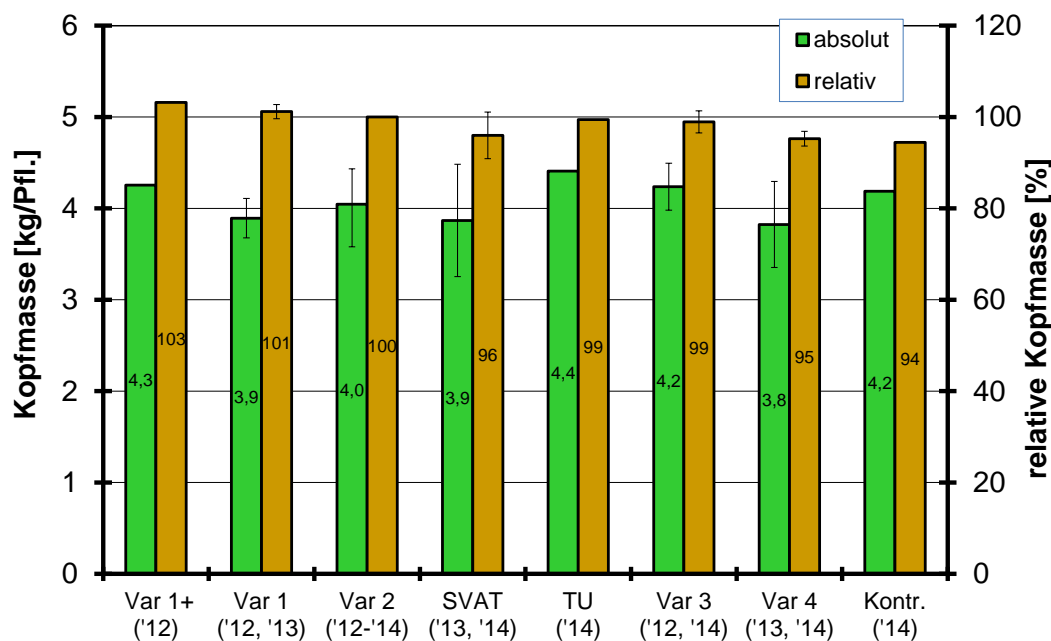


Abbildung 222: Absolutes und relatives ('Variante 2' = 100 %) mittleres Kopfgewicht in Abhängigkeit von der Bewässerungsintensität (Mittelwerte über die Wiederholungen und die Versuchsjahre; I: Spannweite zwischen den Jahren [Wiederholungsmittel]) [Weißkohlversuche]

Insgesamt fielen die Mehr- bzw. Mindererträge aber jeweils nur gering aus; je 100 mm zusätzlicher Bewässerung errechnet sich ein durchschnittlicher Mehrertrag von 2,1 % (Abbildung 223), was bei 4,0 kg/Kopf ('Variante 2') und 3 Pfl./m² einem Mehrertrag von rund 25 dt/ha entspricht.

Bei einer Auswertung der Daten mit einem LRP-Modell (linear response and plateau) kommt man (bei etwas besserer Anpassung an die Daten) zu einer pflanzenbaulich 'optimalen' Bewässerungsmenge, die 65 mm unter der der 'Variante 2' liegt. Bei weiter verminderter Bewässerung ist mit Ertragsverlusten von gut 4 % (ca. 50 dt/ha) je 100 mm Minderbewässerung zu rechnen.

Bei zwei Versuchen von PFLEGER et al. (2010) bzw. KRUMBEIN et al. (2011) auf einem tiefgründigen Lössstandort (65-72 Bodenpunkte) lag die mittlere Kopfmasse in den jeweils mit einem Düsenwagen berechneten Varianten (230 bzw. 180 mm) bei 3,88 bzw. 3,33 kg/Kopf (Mittel über 4 Sorten). In der unberechneten 'Kontrolle' betrug das Kopfgewicht 3,13 bzw. 2,28 kg/Kopf, sodass sich ein prozentualer Ertragsverlust von 12 % je 100 mm Bewässerung errechnet, der damit wesentlich höher lag als in den eigenen Versuchen.

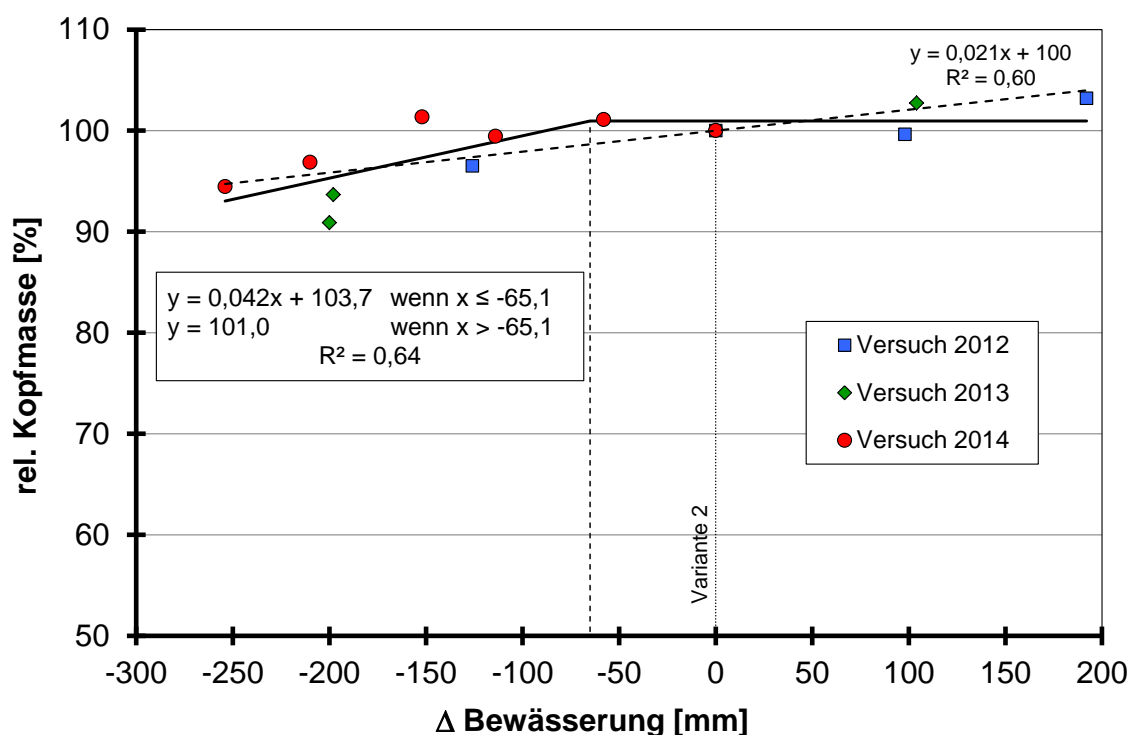


Abbildung 223: Relative Kopfmasse ('Variante 2' = 100 %) in Abhängigkeit vom Bewässerungsdefizit gegenüber der 'Variante 2' [Weißkohlversuche]

Resümee

Der Weißkohl reagierte in allen drei Versuchen nur 'verhalten' auf die Zusatzbewässerung. Deutlich wurde aber, dass mit den reduzierten kc-Werten der 'Variante 2' ($k_{c_{FAO}}$: $k_{c_{12-18}}$: 0,7; $k_{c_{18-11. Bl.}}$: 1,1; $k_{c_{11. Bl.-41}}$: 1,4; $k_{c_{41-49}}$: 1,5), bei einer Wassereinsparung von rund 100 mm gegenüber der 'Standard-Variante 1' (0,7/1,1/1,7/1,8; aktuell [HS-GM 2014] 0,7/1,1/1,6/1,7), sicher Maximalertrag erreicht werden konnte.

Mit einer weiteren Reduktion, wie sie in 'Variante 3' (0,7/0,8/1,0/1,1) mit 'akzeptablen' Ertragsergebnissen und relativ guter Prognose der Bodenwassergehalte zum Tragen kam, nähert man sich wieder den von ALLEN et al. (1998) empfohlenen kc-Werten von 0,7 bis maximal 1,05 ('mid-season stage') an, deren Empfehlungen ja Ausgangspunkt des 'Geisenheimer Modells' waren.

Anmerkung

Für die deutschlandweit durchgeführten Weißkohlversuche im Rahmen des Ringversuchs ist für 2015/2016 eine Auswertung der bisher 3-jährigen Ergebnisse unter Federführung der Hochschule Geisenheim, Institut für Gemüsebau, vereinbart.

Literaturverzeichnis

- Agrowetter (2009): Modellbeschreibung. Online-Hilfe zur Agrowetter Berechnungsberatung.
www.dwd.de (Stand 30.01.2009)
- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES, D. & M. SMITH (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rom (I)
- ANDERSON, J.A.D. & J.G.H. WHITE (1974): The relationship between green pea yield and tenderometer reading. *New Zealand journal of experimental agriculture* **2** (1), S. 31-33
- BGR (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.], Schweizerbart, Stuttgart, 5. Aufl.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn
- FA-GM (2011a): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - für FAO56-Grasverdunstung. Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. www.fa-gm.de (Stand 27.06.2011)
- FA-GM (2011b): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - für FAO56-Grasverdunstung. Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. www.fa-gm.de (Stand 25.01.2011)
- FA-GM (2011c): Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2011 - für Penman-Verdunstung. Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. www.fa-gm.de (Stand 25.01.2011)
- FA-GM (2010): Geisenheimer Bewässerungssteuerung. Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. www.campus-geisenheim.de (Stand 31.03.2010)
- HANSEN, S. (2002): Daisy, a flexible soil-plant-atmosphere system model. Technical paper, URL.
www.dina.kvl.dk/~daisy/ftp/DaisyDescription.doc (18.11.2013).
- HARTMANN, H.D., E. PFÜLB, K.H. ZENGERLE & H. HÜSTER (1989): Steuerung der Bewässerung von Gemüse im Freiland. *Gemüse* **25** (6), S. 304-30
- HS-GM (2014): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - für FAO56-Grasverdunstung. Hochschule Geisenheim, Institut für Gemüsebau. www.hs-geisenheim.de (Stand 12.09.2014)
- HS-GM (2013): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - für FAO56-Grasverdunstung. Hochschule Geisenheim, Institut für Gemüsebau. www.hs-geisenheim.de (Stand 05.09.2013)
- JANSSEN, W. (2013): Mündliche/schriftliche Mitteilungen zum Ausfall der Wetterstation DD-Hosterwitz. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- JANSSEN, W. (2012): Mündliche/schriftliche Mitteilungen zum aktuellen Berechnungsmodus bei der 'Agrowetter Berechnungsberatung'. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- JANSSEN, W. (2010): Mündliche/schriftliche/ Mitteilungen 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 im Rahmen des Weißkohl-Ringversuchs, Erfurt, 24.01.2012
- KLEBER, J. (2010): Schriftliche Mitteilung zur verwendeten Referenzverdunstung bei der 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung. Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Gemüsebau
- KRUMBEIN, M., M. GERMANUS & I. PFLEGER (2011): Prüfung verschiedener Verfahren der Bewässerung von Kopfkohl – Einfluss auf Ertrag, Qualität und Pflanzenschutz. *Versuche im deutschen Gartenbau*.
www.hortigate.de
- LABER, H. (2011): Abreife- und Ertragsverlauf bei normalblättrigen und fiederblattlosen Markerbsen praktisch gleich; TW und AIS eng korreliert. www.hortigate.de
- LABER, H. (2008a): Abreifeverhalten bei den verschiedenen Markerbsen-Sortentypen praktisch gleich.
www.hortigate.de

- LABER, H. (2008b): Trotz relativ enger Reife-Ertrags-Beziehung ist die Prognose des zu erwartenden Ertrag nicht befriedigend möglich. www.hortigate.de
- LATTAUSCHKE, G., H. LABER, B. VOIGTLÄNDER, D. GENTZSCH & K. KRAHNSTÖVER (2002): Hinweise zum umweltgerechten Anbau von Freilandgemüse im Freistaat Sachsen. Managementunterlage, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft [Hrsg.], Dresden, 3. Auflage
- MARTIN, R.J. & F.J. TABLEY (1981): Effects of irrigation, time of sowing, and cultivar on yield of vining peas. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture* **9** (3&4), S. 291-297
- PASCHOLD, P.-J. (1999): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - Aktuelle Empfehlungen. *Gemüse* **35** (2), S. 88-90
- PASCHOLD, P.-J., C. FRÜHAUF, J. SCHALLER, J. KLEBER & N. MAYER (2011): Unterschiedliche Wetterstationen sind für die Geisenheimer Methode nutzbar. *Gemüse* **47** (6), S. 28-29
- PASCHOLD, P.-J., J. KLEBER & N. MAYER (2010): Geisenheimer Bewässerungssteuerung. Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Gemüsebau. www.campus-geisenheim.de (Stand 4.5.2010)
- PASCHOLD, P.-J., J. KLEBER & N. MAYER (2009): Bewässerungssteuerung bei Gemüse im Freiland. *Landbauforschung, Sonderheft* **328**, S. 43-48
- PASCHOLD, P.-J., J. KLEBER & N. MAYER (2007): Geisenheimer Bewässerungssteuerung. Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Gemüsebau. www.campus-geisenheim.de (Stand 12.04.2007)
- PASCHOLD, P.-J. & J. KLEBER (2005): „Geisenheimer Bewässerungssteuerung“ bei Buschbohne. In: Verband der Landwirtschaftskammern [Hrsg.]: *Versuche im Deutschen Gartenbau / Gemüsebau*, S. 29
- PASCHOLD, P.-J. & J. KLEBER (2004): Mit weniger Wasser mehr Buschbohnen. *Gemüse* **40** (4), S. 18- 20
- PASCHOLD, P.-J. & N. MAYER (2005): Wasserbedarf von Erbsen in wägbaren Lysimetern. Tagung der Deutschen Gartenbauwissenschaftlichen Gesellschaft 2005, BHGL-Tagungsband **24/2005**, S. 45
- PFLEGER, I., U. RÖBLER, H. MICHEL, S. KNOBLAUCH, G. NUßBAUM, A. WERNER, M. KRUMBEIN & R. PENZLER (2010): Untersuchungsergebnisse zur Bewässerung in Thüringen. Schriftenreihe Heft 6/2010, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena
- RÖBLER, U. (2015): Mündliche Auskunft (30./31.03.15) zur Vorgehensweise bei der Berechnungsbemessung bei den Versuchen der Jahre 1998 bis 2007 am Standort Straußfurt. Landwirtschaftsamt Bad Frankenhausen
- SORENSEN, J.N., M. EDELENBOS & L. WIENBERG (2003): Drought effects on green pea texture and related physical-chemical properties at comparable maturity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **128** (1), S. 128-135
- WENDLING, U. & H.G. SCHELLIN (1986): Neue Ergebnisse zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. *Zeitschrift für Meteorologie* **36**, S. 214-217

SAPHIR-Projekt: 'Saxonian Platform for High performance Irrigation'. Institut f. Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden. Nähere Erläuterungen s. http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/hydrologie/forschung/ (Stand Sept. 2014)

Danksagung

Die Feld- und Laborarbeiten im Rahmen des 5-jährigen Projektes wurden im Wesentlichen durch die jeweiligen Projektmitarbeiter geleistet. Mein Dank u. a. für die schwere Arbeit der Bodenprobeentnahme und der zeitraubenden Bedienung und Beaufsichtigung des Beregnungswagens gilt daher Sonja Brenner, Silvan Liebsch und Gerd Bäßler. Dank auch den anderen Mitarbeitern des Versuchsfeldes, die die Projektmitarbeiter bei den Bestell-, Pflege- und insbesondere Erntearbeiten tatkräftig unterstützten.

Seit dem ersten Versuchsjahr bestand ein intensiver Daten- und Erfahrungsaustausch mit Wolfgang Janssen ('Agrowetter Beregnungsberatung', DWD). Danken möchte ich ihm auch für die Durchsicht der vielen im Laufe des Projektes erstellten Versuchsberichte und der Mitarbeit im Rahmen des deutschlandweiten Weißkohl-Ringversuches.

Sehr fruchtbar entwickelte sich auch die 2013 angelaufene Zusammenarbeit mit der SAPHIR-Arbeitsgruppe ('Saxonian Platform for High performance Irrigation', Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden), die die (2013 leider teilweise ins Wasser gefallenen) Versuche intensiv messtechnisch begleiteten und mit der Fülle an Daten hochkomplexe Bewässerungs- und Wasserhaushaltsmodelle 'fütterten'. Mein Dank gilt hier insbesondere Dr. Sabine Seidel, auch hier Dank für die kritische Durchsicht der Versuchsberichte.

Den Geisenheimer Kollegen Jürgen Kleber und Norbert Mayer danke ich für zielführende Diskussionen zur 'Geisenheimer Bewässerungssteuerung' und der maßgeblichen Initiierung und Koordinierung des angesprochenen Ringversuches.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autor:

Dr. Hermann Laber
Abteilung Gartenbau, Referat Obst-, Gemüse- und Weinbau
Lohmener Straße 12, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-8115
Telefax: +49 351 2612-8299
E-Mail: hermann.laber@smul.sachsen.de

Redaktion:

siehe Autor

Titel:

Dr. H. Laber

Redaktionsschluss:

12.11.2015

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.