

Dlouhodobá vláhová bilance a kategorizace dostupnosti půdní vody vybraných zemědělských plodin v ČR pro období 1981-2010 a 2009-2018 pomocí metody FAO-56 a hydrogeologického přístupu

Renata Duffková, Jiří Holub a Petr Fučík, VÚMOP, v.v.i.

Úvod

Dostupnost vody v půdě je klíčovým abiotickým faktorem, který limituje růst a vývoj rostlin. Probíhající klimatická změna, která se projevuje nárůstem teploty vzduchu a zvýšením četnosti extrémních jevů počasí (období sucha střídána přívalovými srážkami), nepříznivě ovlivňuje dostupnost vody pro zemědělské plodiny i v České republice (ČR) (Fallon a Betts, 2010; Svoboda a kol., 2016). Zvyšující se teploty vzduchu vedou k nárůstu vláhových potřeb plodin, a ačkoliv celkové roční sumy srážek se v ČR dlouhodobě nemění, jejich časová distribuce není pro vodní režim zemědělských plodin vyhovující (Trnka a kol., 2014; Středová a kol., 2013).

Výsledkem je nárůst deficitu využitelných zdrojů půdní vody ve **vláhové bilanci** (VB). Tato situace nutí zemědělce změnit přístupy v rostlinné výrobě tak, aby vedly ke zvýšení dostupnosti vody v půdě a stabilizaci výnosů (Reidsma a kol., 2010).

Udržitelnost plodinových výnosů v měnícím se klimatu souvisí s postupy zpracování půdy, aplikací organické hmoty do půdy, zaváděním suchovzdorných odrůd a změnou osevních postupů, které respektují lokální půdní a meteorologické podmínky (Trnka a kol., 2004; Daryanto a kol. 2016). Velký potenciál pro zvýšení retence vody v půdě mají v ČR odvodňovací (drenážní) systémy vyskytující se na ca ¼ zemědělské půdy (> 1 mil. ha, Fučík a kol., 2015). Jedná se o jednofunkční systémy, které vedle potenciálu redukovat povrchový odtok a půdní erozi snižují mělkou hladinu podzemní vody (HPV) a odvádí podpovrchovou vodu z krajiny i v době, kdy to není nutné. Přítomnost drenážních systémů také zpravidla zhoršuje jakost souvisejících povrchových vod, neboť odnáší rozpuštěné živiny a další polutanty z půdy (Fučík a kol., 2017; Zajíček a kol., 2018).

Vláhová bilance je v základní podobě vnímána jako agroklimatická charakteristika, která představuje rozdíl mezi úhrnem srážek a potenciální evapotranspirací za určité časové období. Znalost VB je základním předpokladem úspěšného pěstování zemědělských plodin. Během vegetačního období je za účelem zjištění VB porovnávána plodinová evapotranspirace (výpar z povrchu půdy a porostu, tj. evaporace a transpirace) s využitelnými zdroji půdní vody, tj. zásobou vody v půdě na počátku vegetačního období, sumou využitelných srážek a kapilárně vzlínající podzemní vody. Vláhová bilance určité plodiny se plošně mění v závislosti na dynamické změně meteorologických parametrů (teplota a vlhkost vzduchu, rychlost větru, intenzita slunečního záření), georeliéfu (nadmořská výška, sklonitost, expozice) a půdních a hydrogeologických podmínek. Aktuální využití disponibilní vody je na těchto faktorech silně závislé a limituje rajonizaci pěstování plodin. Navíc i vyrovnaná (nulová) VB, kdy celková vláhová potřeba odpovídá veškerým využitelným zdrojům vody, nemusí znamenat, že požadavek plodin na vodu byl

plně uspokojen během jejich vývoje. Jde tedy i o optimální časové rozložení dostupnosti půdní vláhy pro plodiny. V ČR je rajonizace půdně klimatických podmínek pro zemědělskou výrobu a z toho plynoucí zaměření rostlinné výroby provedena pomocí zemědělských výrobních oblastí (ZVO).

Předložená metoda pro zjištění dlouhodobé VB, plodinových vláhových potřeb (V_c) a kategorizace dostupnosti půdní vody (vodního stresu) je vytvořena pro čtyři vybrané zemědělské plodiny (pšenice ozimá, silážní kukuřice, řepka ozimá a brambory polorané) a jednotlivé ZVO pro platný klimatický normál 1981-2010 a dekádu 2009-2018. Metodika je založena na inovativním propojení metody FAO-56 pro zjištění V_c formou plodinové evapotranspirace ET_c (Allen a kol., 1998) a hydrologického přístupu pro zjištění využitelných zdrojů půdní vody.

Metody

Popis zemědělských výrobních oblastí

Zemědělské výrobní oblasti rajonizují zemědělskou půdu ČR podle půdně-klimatických podmínek a vymezují zaměření rostlinné výroby. V ČR jsou od roku 2003 čtyři ZVO: kukuřičná (KVO), řepařská (ŘVO), bramborářská (BVO) a horská (HVO) a jedenáct podtypů (Budňáková, 2009). Meteorologické, půdní a terénní charakteristiky jednotlivých ZVO představují Tab. 1 a 2.

Tabulka 1. Meteorologická data (průměrné teploty vzduchu, srážkový úhrn a referenční evapotranspirace, ET_0) pro platný klimatický normál (1981-2010) a dekádu (2009-2018) v jednotlivých zemědělských výrobních oblastech

ZVO	teplota vzduchu °C		srážkový úhrn mm		ET_0 mm	
	1981-2010	2009-2018	1981-2010	2009-2018	1981-2010	2009-2018
KVO	9,7	10,8	523	504	732	749
ŘVO	9,0	10,2	588	574	666	694
BVO	8,0	9,0	659	648	633	647
HVO	6,6	7,5	815	813	602	589

Tabulka 2. Půdní a terénní parametry (využitelná vodní kapacita, VVK, nadmořská výška, svažitost půdních bloků, plocha půdních bloků se svažitostí > 10 %) pro jednotlivé zemědělské výrobní oblasti

ZVO	Využitelná vodní kapacita %	Nadmořská výška m n. m	Svažitost %	Svažitost >10 % km ² (%)
KVO	19,7	204	3,9	88,5 (5,6)
ŘVO	20,0	272	4,4	483 (4,4)
BVO	18,4	468	6,1	823 (7,1)
HVO	17,8	590	8,7	90,5 (28,4)

Rovnice vláhové bilance

Metoda dlouhodobé VB vychází z rovnice (1), která porovnává V_c vybraných plodin s využitelnými zdroji vody (srážky, zásoba vody v půdě, kapilárně vztlínající podzemní voda) na všech půdních blocích s ornou půdou > 0,5 ha a s informací o půdním druhu zařazených v ČR do LPIS (land-parcel identification system, evidence využití zemědělské půdy). Výpočty byly provedeny pro 479 645 půdních bloků o průměrné velikosti 7,4 ha. Vláhová bilance byla počítána pro celé vegetační období, tzn., že nebyla posuzována vegetační dynamika jednotlivých složek VB.

Meteorologické údaje potřebné pro zjištění VB (referenční evapotranspirace ET_0 , teplota vzduchu, srážkové úhrny) vycházely z denních průměrů platného klimatického normálu 1981-2010 a dekády 2009-2018 devadesáti stanic provozovaných Českým hydrometeorologickým ústavem ČHMÚ (Obr. 1). Z toho vyplývá, že nebylo možné počítat VB jednotlivých let, resp. posuzovat změny mezi počátkem a koncem hodnoceného období.

Rovnice (1) počítá jednotlivé složky VB dle ČSN 75 0434 (Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu) s modifikacemi součinitele využitelnosti srážek α a využitelného množství vztlínající podzemní vody:

$$VB = r_1\alpha Sr + r_2Wz + Wk - Vc \quad (1)$$

kde:

VB	vláhová bilance vegetačního období [mm]
r_1	redukční součinitel pro úpravu α pro sklon terénu > 10 %
α	součinitel využitelnosti srážek v závislosti na druhu půdy
Sr	srážkový normál vegetačního období [mm]
r_2	redukční součinitel pro úpravu Wz v závislosti na druhu půdy a sklonu terénu
Wz	využitelná zásoba vody v půdě na začátku vegetačního období [mm]
Wk	využitelné množství vztlínající podzemní vody pro vegetační období [mm]
Vc	vláhová potřeba plodiny za vegetační období [mm]

Srážkový normál za vegetační období (S_r) byl vynásoben součinitelem využitelnosti srážek α , který vyjadřuje vsak vody v závislosti na půdním druhu (písčítá = 0,60, hlinitopísčítá = 0,65, písčitohlinitá = 0,70, hlinitá = 0,75, jílovitohlinitá = 0,70, jílovitá = 0,60, velmi těžká - jíl = 0,50) a sklonitosti terénu. Půdní druhy byly zjištěny z 380 000 půdních sond provedených v rámci Komplexního průzkumu půd (KPP), který probíhal v Československu na 7,2 mil. ha zemědělské půdě v letech 1960 – 1972. Navzdory časovému odstupu jsou tato data (nyní v digitální formě) stále považována za velmi přesný zdroj informací. Součinitel α byl dále redukován pro pozemky se sklonitostí > 10 % pomocí součinitele $r_1=0,80$, který byl vhodný pro nízký denní průměr srážek v rozmezí 0-4,9 mm (Spitz a kol., 2011). Pro pozemky se

sklonitostí < 10 % nebyla provedena žádná redukce (tj. $r_1 = 1$). Je předpokládáno, že tato úprava součinitele α lépe odráží proces infiltrace vody pro plodiny ve srovnání s ČSN 75 0434, kde je redukce součinitele α vztažena k nadmořské výšce.

Využitelná zásoba vody v půdě na začátku vegetačního období (W_z) je závislá na půdním druhu a maximální účinné hloubce zakořenění dané plodiny. Pro výpočet VB byly použity tabelované průměrné hodnoty W_z (ČSN 75 0434) rovnající se polovině maximálního obsahu lehce přístupné vody zjištěného z půdních hydrolimitů, tj. polní vodní kapacity (PVK) a bodu snížené dostupnosti (BSD) podle rovnice (2):

$$W_z = 0.5 \cdot (PVK - BSD) \cdot h_u \quad (2)$$

kde:

PVK	polní vodní kapacita (% obj.)
BSD	bod snížené dostupnosti (% obj.)
h_u	maximální účinná hloubka zakořenění (dm)

BSD bylo počítáno podle rovnice (3):

$$BSD = BV + \% VVK \quad (3)$$

kde:

BV	bod vadnutí (% obj.)
VVK	využitelná vodní kapacita, tj. PVK - BV (% obj.)
% VVK	% podíl VVK dané plodiny po vyčerpání snadno dostupné půdní vláhly

Využitelnost W_z byla redukována součinitelem r_2 v závislosti na vzrůstajícím sklonu terénu a obsahu jílnatých částic (ČSN 75 0434).

Využitelné množství vzlínající vody (W_k) bylo odvozeno z tabulek ČSN 75 0434, a to pro jednotlivé plodiny a měsíce vegetačního období a půdní druhy na základě úrovně mělké HPV. V ČSN 75 0434 je uvedena HPV nereálně vysoká a tudíž její autoři ji doporučili snížit podle schopnosti jednotlivých půdních druhů přivádět vzlínající vodu ke kořenům plodin (o 50 % pro půdy písčitohlinité, hlinité, jílovitohlinité, jílovité a jílné; o 75 % pro půdy hlinitopísčité a o 100 % pro půdy písčité). Mělká HPV byla odvozena interpolační metodou kriging z dat KPP jako rastrová vrstva (v drtivé většině se nejednalo o pravou zvoď) v prostorovém rozlišení 100 x 100 m. Pokud v půdních sondách nebyla naměřena žádná HPV, byla použita fixní hodnota 180 cm, která byla pro tyto podmínky považována za pravděpodobnou průměrnou hodnotu.

Plodinová vláhová potřeba (V_c) za celé vegetační období představuje sumu evapotranspirace v podmínkách optimálních pro její vývoj. Odrůdové odlišnosti nebyly zohledněny. Hodnoty V_c byly zjištěny jako ET_c podle FAO-56 Penman-Monteith metody (Allen a kol., 1998) od výsevu/výsadby po sklizeň jako součin ET_0 a

plodinového koeficientu (K_c) v denním kroku a sumarizovány za celé vegetační období (Allen a kol., 1998). Výpočet ET_0 byl odvozen z originální Penman-Monteithovy rovnice (Monteith, 1973). Referenční evapotranspirace čili evapotranspirace srovnávací plodiny či povrchu je definována jako evapotranspirace z hypotetické plodiny s předpokládanou výškou porostu (12 cm) a konstantním odporem porostu (70 s.m^{-1}) a albedem 0,23. Je podobná evapotranspiraci z extenzivního povrchu zelené trávy stejné výšky, aktivně rostoucí, se zcela zastíněným povrchem půdy a netrpící nedostatkem vody a zahrnuje vliv regionálních odlišností klimatu. Plodinový koeficient se mění v průběhu vegetačního období podle vývoje plodiny (např. albedo, aerodynamický odpor, odpor porostu). Tabeľované K_c pro počáteční stadium (K_{cini} , vysázení/vysetí až pokrytí cca 10 % povrchu), střední stadium (K_{cmid} , plná pokryvnost až počátek zrání) a pozdní stadium (K_{cend} , začátek zrání až sklizeň) jsou uvedeny v Allen a kol. (1998). Hodnoty mezi K_{cini} a K_{cmid} byly lineárně interpolovány. Dělení K_c do uvedených čtyř stadií se vztahuje pouze na rok sklizně. Pro rok výsevu u ozimé pšenice a řepky byla V_c počítána pomocí K_{cini} od výsevu do období dosažení průměrné teploty vzduchu zastavující fyziologické aktivity včetně transpirace. V roce sklizně se V_c začala opět počítat pomocí K_{cini} v návaznosti na počátek vegetačního období, tj. na termín dosažení minimální růstové teploty. Pokud byly výsev/výsadba jarních plodin provedeny před dosažením minimální růstové teploty, tak do doby jejich dosažení byla V_c nulová. Termíny pro užití K_{cmid} byly převzaty z plodinové databáze VUMOP, v.v.i. pro jednotlivé ZVO. V ČSN 75 0434 jsou V_c pro jednotlivé plodiny uvedeny pouze jako směrné hodnoty pro dvě nížinné oblasti, které vyžadují doplňkovou závlahu (Polabí a jižní Morava). Pro jiné oblasti jsou V_c redukovány pomocí koeficientu odvozeného z nadmořské výšky.

Kategorie dostupnosti zdrojů vody

Vypočtené hodnoty VB byly **rozlišeny do čtyř kategorií (1-4)** s různou dostupností zdrojů vody, a to pomocí hydrolimitů (PVK, BSD a BV v % obj.) odvozených z pedotransferových funkcí podle Brežného (ČSN 75 0434) s využitím typických obsahů zrnitostní kategorie $<0,01 \text{ mm}$ pro daný půdní druh. Hodnoty VB byly převedeny z mm na % obj. (tj. /10). Plošné rozložení všech kategorií bylo závislé na dané plodině, resp. její schopnosti využívat půdní vláhu (% VVK, rovnice 3). Ozimá pšenice nejlépe odolávala vodnímu stresu ($BSD = 45 \% \text{ VVK}$). Řepka měla menší schopnost využití půdní vody ($BSD = 50 \% \text{ VVK}$) a nejméně odolné vodnímu stresu byly brambory a silážní kukuřice ($BSD = 55 \% \text{ VVK}$).

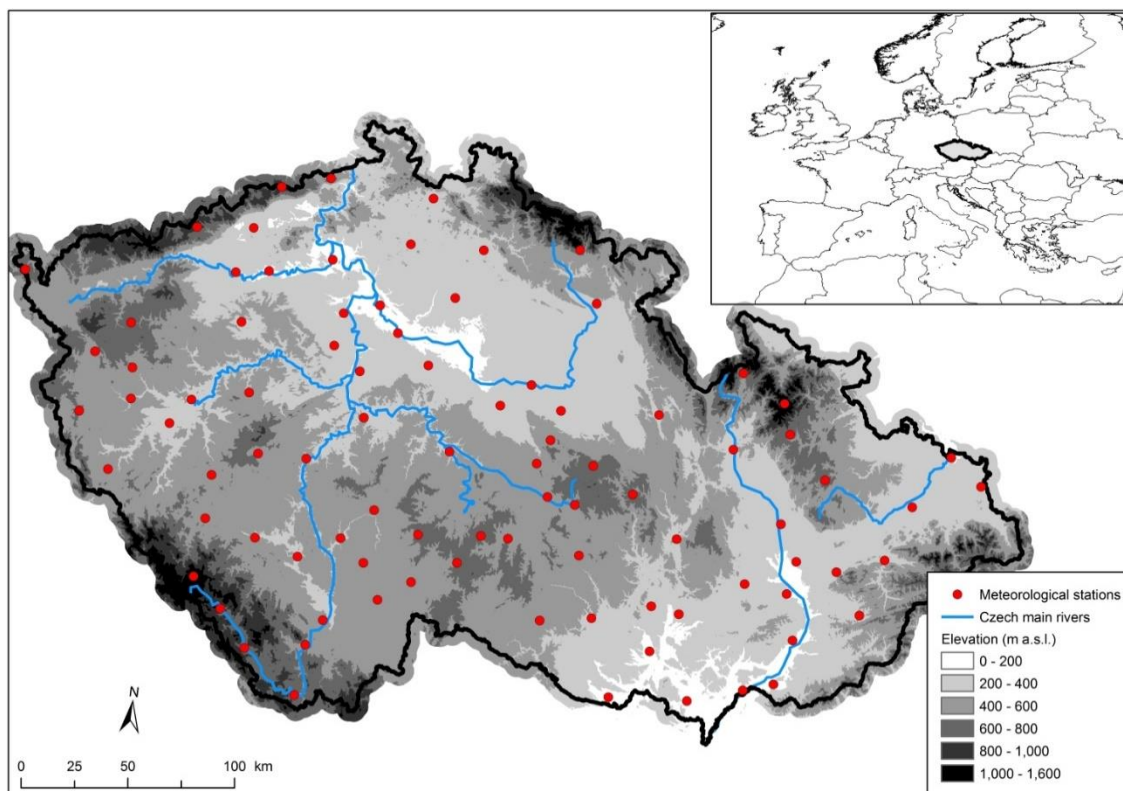
Kategorie 1 představovala kladnou VB, tzn., že množství využitelné vody pro evapotranspiraci bylo vyšší než V_c . Všechny ostatní kategorie měly zápornou VB (tj. nižší množství využitelných zdrojů vody ve srovnání s V_c) a tudíž tyto oblasti vykazovaly pro hodnocené plodiny různou míru vodního stresu. **Kategorie 2** zahrnovala VB s absolutní hodnotou menší než je rozdíl mezi PVK a BSD. Vláhový deficit v půdě by tudíž neměl snižovat výnosy. **Kategorie 3** obsahovala VB s absolutní hodnotou větší než je rozdíl mezi PVK a BSD, ale menší než byla VVK.

Kategorie 4 představovala podmínky s nejhorší zásobeností vodou, kde absolutní hodnota VB byla větší než hodnota VVK. Kategorie 3 a 4 byly navrženy pro doplňkovou závlahu.

Vlastní výpočet jednotlivých kategorií VB proběhl pomocí databázového systému PostgreSQL 9.6 s nadstavbou pro práci s prostorovými informacemi Postgis 2. 2. a pomocí aplikačního striptovacího jazyka PHP. Výsledek VB pro jednotlivé půdní bloky a vybrané zemědělské plodiny byl vizualizován pomocí softwaru ArcGIS verze 10.4.

Další zdrojová data

Bilanční rovnice (1) byla propojena s dalšími datovými zdroji (digitální model terénu, půdní druhy z digitalizace KPP, meteorologická data ČHMÚ, účinné půdní bloky LPIS, hranice ZVO). Pokud byl pozemek půdně heterogenní, tak byla VB stanovena pro převládající půdní druh. Agrotechnické termíny setí a sklizně plodin byly převzaty z databáze protierozní kalkulačky (internetová aplikace pro podporu rozhodování v oblasti protierozní ochrany půdy v ČR), která vychází z regionalizace území podle ZVO. Vliv zemědělského odvodnění (drenáží) vybudovaného na ca 25 % zemědělské půdy ČR nebyl ve výpočtech VB (konkrétně Wk) zohledňován, a to z několika důvodů. Hladina podzemní vody odvozená z KPP nepostihuje 57,7 % výměry odvodněných ploch, na které byly drenážní systémy instalovány až po skončení KPP (po r. 1972) a relevantní údaje o HPV společně s informací o funkčnosti drenážních systémů ve sledovaném období neexistují. Průměrná HPV zjištěná z KPP na pozemcích s odvodněním byla 139 cm, což bylo považováno za přijatelnou hodnotu vstupující do výpočtu Wk. Na odvodněných plochách nebyl rovněž změněn koeficient r_1 . Odvodněné plochy zemědělské půdy se částečně překrývají s vymezeným výskytem středního a silného vodního stresu (kategorie 3 a 4). Pro kategorii 3 se jedná o překryv na 25-27 % plochy a pro kategorii 4 o 26-38 % plochy v závislosti na plodině. Tato informace vypovídá o z dnešního pohledu nadbytečném odvodnění části zemědělských pozemků vyžadujících doplňkovou závlahu a o potřebě nápravných opatření v podobě snížení intenzity odvodnění či uplatnění regulační drenáže (Kulhavý a kol., 2015; Kulhavý a kol., 2017).



Obrázek 1. Meteorologické stanice ČHMÚ použité pro výpočet vláhové bilance

Výsledky

Výsledky VB pro jednotlivé plodiny jsou vztaženy k pozemkům s ornou půdou registrovaným v LPIS o celkové ploše 24 592 km². Z této plochy je největší podíl v BVO (11 607 km²) a ŘVO (11 088 km²); podstatně menší plocha je v KVO (1 579 km²) a HVO (318 km²). Tabulky 3 - 10 obsahují plošné zastoupení, délku vegetačního období, VB, úhrn srážek, Vc a Wk pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a ZVO v období 1981-2010 a 2009-2018.

Dlouhodobá VB byla převážně negativní (kategorie 2–4), což znamená, že v průběhu vegetačního období nebyly Vc plně uspokojeny a plodiny byly vystaveny mírnému až silnému vodnímu stresu. I když v KVO a ŘVO byla vyšší VVK (Tab. 2), tak zde byl deficit VB vyšší (zejména v KVO) než v HVO a BVO. V KVO se kategorie 1 nevyskytovala téměř vůbec a kategorie 2 pro jařiny pouze ve velmi malém rozsahu. Důvodem byly obecně nízké srážky a vysoká Vc. V ŘVO byla kategorie 1 pro jařiny zastoupena ve velmi malém rozsahu (< 1 %) ve srovnání s ozimí. Vláhový deficit zde byl způsoben spíše nižšími srážkami. Nejvíce dostupné vody bylo v HVO, kde byly nejvyšší sumy srážek a nejnižší Vc, i když zde dostupnost srážek a zásoby vody v půdě po zimním období byly nejvíce redukovány kvůli svažitosti pozemků (Tab. 2).

Na základě porovnání dvou období 1981-2010 a 2009-2018 bylo zjištěno, že deficit VB se v poslední dekádě většinou prohloubil, nejvíce v KVO a ŘVO. Je to způsobeno

výraznými vlnami sucha 2015 a 2018, které zvýšily průměrnou teplotu vzduchu a ET_0 (Tab. 1). Výjimkou byla řepka v BVO a HVO a pšenice v HVO, kde byl deficit VB snížen, případně úplně odstraněn z důvodu nárůstu srážek. Vláhová potřeba mezi uvedenými obdobími vzrostla u všech plodin a ve všech ZVO o 2-8 %. Srážky v BVO, ŘVO a HVO se zvýšily o 1-10 %, a to více u ozimů z důvodu prodloužení vegetačního období. V KVO zůstaly srážky nezměněny (řepka) nebo klesly o 3,5-5 % (ostatní plodiny).

Během dekády 2009-2018 se výrazně prodloužilo celkové vegetační období ozimů ve všech ZVO (o 14-19 dní), a to tím, že minimální růstová teplota vzduchu ukončila transpiraci na podzim později a na jaře naopak tento fyziologický proces zahájila dříve. V důsledku toho se ve většině ZVO (ŘVO, BVO a HVO) zvýšil úhrn srážek, případně i klesl deficit VB (HVO, pro řepku i v BVO). Délka vegetačního období pro jařiny zůstala stejná jako v období 1981 – 2010.

V dalším popisu výsledků jsou číselné hodnoty pro poslední dekádu uvedeny v závorce nebo zkratkou „resp.“.

Pšenice ozimá

Pšenice ozimá byla pěstována bez vodního stresu (kategorie 1 a 2) v ŘVO, BVO a HVO na 81 (72) % (9 022, resp. 7 963 km²), 81 (80) % (9 427, resp. 9 241 km²) a 76 (76) % (242 km²). Průměrný deficit VB (vážený průměr ze všech kategorií) byl v ŘVO, BVO a HVO 61 (87), 44 (51), resp. 43 (42) mm (Tab. 3 a 4). V KVO bylo 61 (21,5) % (959, resp. 340 km²) pozemků, kde růst a vývoj ozimé pšenice nebyl ovlivněn vodním stresem (kategorie 2) a průměrný deficit VB byl 109 (147) mm. V celé ČR nebylo postiženo vodním stresem 80 (72) % pozemků (19 648, resp. 17 785 km²) a průměrný deficit VB byl 56 (73) mm. Nejvyšší zastoupení kategorie 4 se silným vodním deficitem bylo v KVO (11, resp. 14 % = 172, resp. 218 km²) ve srovnání s ostatními ZVO (ŘVO 3,6, resp. 6 % = 399, resp. 674 km², BVO 2,5, resp. 5 % = 289, resp. 544 km², HVO 4,5, resp. 8,4 % = 14, resp. 27 km²). Nutnost doplňkové závlahy indikované kategoriemi 3 a 4 se projevila celkem na 20,1 (27,7) % pozemků (4 944, resp. 6 808 km²).

V poslední dekádě vzrostl deficit VB v KVO, ŘVO a BVO o 34, 41 a 16 %, neboť celková V_c vzrostla o 6-8 %. Úhrn srážek v KVO klesl o 5%, v ŘVO a BVO vzrostl o 3, resp. 7 %. Naopak v HVO klesl deficit VB o 2 %, neboť V_c vzrostla pouze o 4,5 % a srážky se zvýšily o 8 %.

Tabulka 3. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období **1981-2010: Ozimá pšenice**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²	Dny	Vegetační období (mm)			
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	60,7	959,0	166,8	-83,7	274,8	395,4	86,3
	3	28,4	448,2	166,8	-135,6	274,0	395,8	51,3
	4	10,9	172,1	167,9	-183,7	276,0	396,3	20,0
	Suma/vážený průměr	100	1 579,3	166,9	-109,3	274,7	395,6	69,1
ŘVO	1	10,9	1 213,8	164,3	14,8	338,9	363,5	100,0
	2	70,4	7 808,1	167,7	-51,3	302,6	373,2	78,6
	3	15,0	1 666,5	170,2	-134,4	290,1	379,2	35,9
	4	3,6	399,3	174,2	-181,8	289,5	385,4	8,9
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	167,9	-61,3	304,2	373,5	72,0
BVO	1	16,9	1 957,0	161,8	18,6	357,2	364,3	98,1
	2	64,4	7 469,8	163,1	-37,6	328,3	372,3	86,4
	3	16,3	1 892,0	164,3	-112,5	330,6	375,0	36,3
	4	2,5	288,6	167,6	-168,4	323,9	391,2	20,3
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	163,2	-43,6	333,4	371,9	78,6
HVO	1	30,6	97,2	166,9	27,8	399,8	376,8	95,7
	2	45,1	143,4	168,4	-45,1	382,6	385,0	78,5
	3	19,8	63,1	167,2	-116,5	370,1	385,2	34,3
	4	4,5	14,4	171,5	-169,0	365,4	396,5	20,3
	Suma/vážený průměr	100	318,1	167,9	-42,6	384,6	383,1	72,4

Tabulka 4. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období **2009-2018: Ozimá pšenice**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²	Dny	Vegetační období (mm)			
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	21,5	340,1	181,2	-96,7	273,7	416,7	92,7
	3	64,7	1 021,1	182,2	-148,3	258,3	426,6	71,6
	4	13,8	218,0	182,7	-217,3	262,8	425,7	22,4
	Suma/vážený průměr	100	1 579,3	182,0	-146,7	262,2	424,4	95,47
ŘVO	1	1,6	182,8	180,5	10,4	376,8	397,1	103,7
	2	70,2	7 779,6	181,3	-61,7	317,7	401,9	83,8
	3	22,1	2 451,5	181,8	-142,5	299,2	412,6	46,9
	4	6,1	673,7	183,5	-194,8	302,3	417,0	16,8
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	181,5	-86,5	313,6	405,1	71,9

BVO	1	16,2	1 874,7	176,5	22,9	393,9	382,8	97,4
	2	63,5	7 365,8	178,9	-43,3	352,5	396,1	86,5
	3	15,7	1 822,6	180,3	-116,9	353,3	402,2	43,6
	4	4,7	544,2	183,6	-178,9	332,0	418,1	25,0
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	179,0	-50,5	358,4	396,0	78,6
HVO	1	31,2	99,2	182,0	40,0	447,7	391,5	93,9
	2	44,8	142,4	182,9	-43,2	412,0	398,5	74,1
	3	15,6	49,7	184,6	-118,2	388,7	409,4	45,7
	4	8,4	26,8	187,3	-194,6	345,6	425,1	26,7
	Suma/vážený průměr	100	318,1	183,3	-41,7	413,9	400,2	71,8

Silážní kukuřice

Dostupnost vláhy pro pěstování silážní kukuřice byla nejvyšší v HVO s průměrným deficitem VB 42 (48) mm a 81 (75) % pozemků (tj. 257, resp. 239 km²) v kategorii 1 a 2 (Tab. 5 a 6). V BVO byl průměrný deficit VB 64 (71) mm a 73 (66) % pozemků (8 470,5, resp. 7 678 km²) nebylo postiženo vodním stresem. V ŘVO bylo zastoupení kategorií 1 a 2 pouze na 55 (31) % pozemků (6 119, resp. 3 463 km²) a průměrný deficit VB dosáhl 93 (111) mm. Silážní kukuřice pěstovaná v KVO byla postižena výrazným deficitem VB (145, resp. 166 mm) v důsledku nízkých srážek (266, resp. 257 mm). Průměrný deficit VB pro všechny ZVO byl 82 (95) mm. V celé ČR se vyskytlo celkem 60 (46) % pozemků (tj. 14 847, resp. 11 383 km²), kde pěstování silážní kukuřice nebylo ovlivněno vodním stresem.

Do kategorie 4 bylo v KVO zařazeno 11,4 (14,8) % pozemků (179, resp. 233 km²), tj. výrazně více než v ostatních ZVO (ŘVO 2, resp. 4,4 % = 243, resp. 493 km², BVO 1, resp. 1,6 % = 107, resp. 184 km² a v HVO 0,2, resp. 1,1 % = 0,7, resp. 3,4 km²). Pěstování silážní kukuřice s doplňkovou závlahou (kategorie 3 a 4) by celkem zahrnovalo 39,6 (53,7) % pozemků (9 746, resp. 11 383 km²).

Vláhová potřeba vzrostla v poslední dekádě o 2 % (HVO) až 5 % (ŘVO). Deficit VB vzrostl o 12 % (BVO) až 20 % (ŘVO). Srážky se téměř nezměnily (v KVO nižší o 3,4 %, v BVO vyšší o 1,6 %, v HVO a ŘVO nezměněny).

Tabulka 5. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 1981-2010: **Silážní kukuřice**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období Dny	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²					
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	0,1	1,1	132,9	-94,6	274,6	390,6	50,5
	3	88,6	1 398,7	133,0	-140,0	266,2	401,3	38,6
	4	11,4	179,4	133,0	-179,2	266,1	399,6	28,3
	Suma/vážený průměr	100	1579,3	133,0	-144,5	266,2	401,1	37,4
ŘVO	1	0,1	8,0	131,0	15,6	362,6	346,3	66,4
	2	55,1	6 110,7	132,7	-69,3	306,7	371,6	41,8

	3	42,6	4 726,3	132,8	-118,4	287,6	381,6	38,6
	4	2,2	242,6	132,8	-180,3	281,2	384,1	13,4
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	132,7	-92,6	298,1	376,1	39,9
BVO	1	1,5	170,2	129,1	14,0	375,2	347,0	49,0
	2	71,5	8 300,3	131,6	-50,7	327,4	354,6	43,0
	3	26,1	3 030,1	131,7	-100,1	317,2	360,8	37,7
	4	0,9	106,8	132,0	-157,8	302,4	379,0	21,1
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	131,6	-63,6	325,2	356,3	41,5
HVO	1	17,0	54,1	122,8	17,9	363,5	322,5	47,5
	2	63,7	202,6	124,5	-41,4	341,9	328,5	40,4
	3	19,1	60,7	126,0	-95,6	327,1	336,5	34,8
	4	0,2	0,7	126,5	-131,1	322,2	344,3	13,6
	Suma/vážený průměr	100	318,1	124,5	-41,9	342,7	329,0	40,5

Tabulka 6. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 2009-2018: **Silážní kukuřice**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období Dny	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²					
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	0,2	3,0	132,5	-88,5	295,6	382,7	41,3
	3	85,0	1342,9	133,0	-160,7	256,8	416,6	38,6
	4	14,8	233,3	133,0	-198,9	258,3	417,2	30,7
	Suma/vážený průměr	100	1579,3	133,0	-166,2	257,1	416,7	37,5
ŘVO	1	0,02	2,2	127,7	4,8	353,5	346,1	73,2
	2	31,2	3460,7	132,5	-73,7	315,2	382,5	42,5
	3	64,3	7132,0	132,8	-123,8	294,1	401,1	39,6
	4	4,4	492,7	132,9	-185,9	289,2	410,2	22,8
	Suma/vážený průměr	100	11087,7	132,7	-110,9	300,5	395,7	39,8
BVO	1	1,4	160,6	130,3	14,4	391,4	356,1	48,5
	2	64,8	7517,5	131,6	-53,8	335,6	363,9	43,1
	3	32,3	3745,8	131,7	-105,8	318,6	373,0	38,5
	4	1,6	183,5	132,0	-164,1	302,1	390,6	28,0
	Suma/vážený průměr	100	11607,4	131,6	-71,4	330,4	367,2	41,4
HVO	1	14,8	47,0	122,0	25,0	382,4	318,4	41,9
	2	60,4	192,3	125,2	-40,1	347,7	334,5	42,0
	3	23,7	75,4	124,7	-107,9	310,3	345,6	35,8
	4	1,1	3,4	129,0	-158,4	296,1	367,8	33,9
	Suma/vážený průměr	100	318,1	124,6	-47,9	343,4	335,1	40,4

Řepka ozimá

V ŘVO, BVO a HVO byly z hlediska VB dobré podmínky pro pěstování řepky, neboť 85 (79) % (9 438, resp. 8 791 km²), 89 (88) % (10 274, resp. 10 238 km²) a 85 (85) % (272, resp. 270 km²) pozemků bylo klasifikováno do kategorií 1 a 2 (Tab. 7 a 8). Průměrný deficit VB zde dosáhl 35 (55), 10 (9) a 1 (6) mm. Nejhorší VB pro pěstování řepky byla opět v KVO s průměrným deficitem 90 (118) mm a se zastoupením kategorie 1 a 2 na 66 (37) % pozemků (1 035, resp. 581 km²). Průměrný deficit VB pro všechny ZVO byl 26 (61) mm. V celé ČR se vyskytovalo celkem 86 (62) % pozemků (21 018, resp. 15 204 km²), kde pěstování řepky ozimé nebylo ovlivněno vodním stresem (kategorie 1 a 2). Do kategorie 4 bylo více pozemků zařazeno opět v KVO (7, resp. 10,5 % = 111, resp. 165 km²) ve srovnání s ostatními ZVO (ŘVO 2,5, resp. 3,8 % = 275, resp. 418 km², BVO 1, resp. 1,6 % = 123, resp. 185 km², HVO 1,2, resp. 4,2 % = 4, resp. 13 km²). Pěstování řepky ozimé by vyžadovalo doplňkovou závlahu (kategorie 3 a 4) celkem na 15 (19) % pozemků (3 575, resp. 4 713 km²).

Deficit VB vzrostl za poslední dekádu v KVO a ŘVO o 32 a 57 %, neboť zde výrazněji vzrostla celková Vc (o 7-8 %). Naopak úhrn srážek se v KVO nezměnil a v ŘVO vzrostl pouze o 5 %. V BVO deficit VB klesl o 9 % a v HVO byla VB kladná (6 mm). Vláhová potřeba vzrostla v BVO a HVO pouze o 5 % a srážky se zvýšily o 8-10 %.

Tabulka 7. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 1981-2010: **Řepka ozimá**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²	Dny	Vegetační období (mm)			
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	65,5	1 034,7	207,8	-64,7	345,0	417,3	85,1
	3	27,5	434,0	207,9	-126,0	344,3	418,4	47,7
	4	7,0	110,6	208,6	-179,4	346,0	418,7	10,5
	Suma/vážený průměr	100	1 579,3	207,9	-89,5	344,9	417,7	69,6
ŘVO	1	30,3	3 359,0	208,0	28,0	410,8	387,1	94,5
	2	54,8	6 079,0	208,2	-44,1	368,1	394,4	71,1
	3	12,4	1 374,5	208,7	-122,8	356,2	396,8	31,7
	4	2,5	275,2	212,1	-171,0	353,7	403,1	6,0
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	208,3	-35,2	379,2	392,7	71,7
BVO	1	50,9	5 912,2	201,3	31,9	417,9	378,4	94,8
	2	37,6	4 361,4	202,2	-36,6	396,4	385,9	71,1
	3	10,4	1 210,9	202,6	-104,6	391,7	389,0	31,4
	4	1,1	123,0	205,3	-158,4	389,2	400,4	11,4
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	201,8	-10,1	406,8	382,6	78,4
HVO	1	53,3	169,4	195,5	51,0	459,1	374,4	92,4
	2	32,1	102,1	196,2	-37,1	441,0	379,1	60,3
	3	13,4	42,6	196,7	-108,0	426,6	383,5	29,0

	4	1,2	4,0	201,6	-157,0	421,9	399,7	10,8
	Suma/vážený průměr	100	318,1	196,0	-1,1	448,5	377,4	72,6

Tabulka 8. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vztlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 2009-2018: **Řepka ozimá**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období Dny	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²					
KVO	1	0.1	0.8	214.4	16.7	402.1	399.5	99.1
	2	36.8	580.4	222.2	-75.1	354.4	442.1	91.3
	3	52.7	832.8	223.4	-131.4	341.5	450.3	64.6
	4	10.5	165.2	224.0	-200.4	345.0	449.6	19.7
	Suma/vážený průměr	100	1579.3	223.0	-117.8	346.7	447.2	69.7
ŘVO	1	15.4	1 703.3	222.8	23.0	440.6	412.7	94.9
	2	63.9	7 087.5	224.3	-46.6	392.1	424.6	78.1
	3	16.9	1 878.5	224.7	-130.4	379.1	432.7	38.6
	4	3.8	418.4	227.4	-184.5	378.6	441.4	12.0
	Suma/vážený průměr	100	11087.7	224.2	-55.3	396.8	424.8	71.5
BVO	1	50.5	5 861.0	217.7	37.3	454.4	397.6	94.2
	2	37.7	4 376.5	219.0	-37.9	425.0	407.1	71.0
	3	10.2	1 185.3	219.9	-108.1	415.7	411.3	34.5
	4	1.6	184.6	222.5	-170.8	396.9	428.1	18.9
	Suma/vážený průměr	100	11607.4	218.5	-9.2	438.4	403.0	78.2
HVO	1	57.1	181.6	214.4	61.9	516.1	393.4	88.8
	2	27.7	88.1	215.5	-36.4	477.3	399.7	58.1
	3	11.0	35.0	216.2	-109.3	437.0	409.1	38.8
	4	4.2	13.4	218.7	-179.3	403.0	426.3	24.9
	Suma/vážený průměr	100	318.1	215.1	5.6	491.9	398.2	72.1

Brambory polorané

Nejvhodnější podmínky pro pěstování brambor byly v BVO, kde bylo do kategorie 1 a 2 zařazeno 72 (67) % pozemků (8 328,5, resp. 7 813 km²). Průměrný deficit VB zde byl 57 (64) mm (Tab. 9 a 10). V HVO bylo do kategorií 1 a 2 bez vodního stresu zařazeno 70 (66) % pozemků (222, resp. 210 km²) s průměrným deficitem VB 46 (51) mm. V ŘVO bylo do stejných kategorií začleněno 53 (40) % pozemků (5 860, resp. 4 414 km²) a průměrný deficit VB dosáhl 91,5 (106) mm. Nejhorší podmínky pro pěstování brambor byly v KVO, kde pouze 7 (2) % pozemků (105, resp. 30 km²) nebylo zasaženo vodním stresem (kategorie 2) a průměrný deficit VB byl 138 (160) mm. V celé ČR byl průměrný deficit VB 77 (89) mm a 59 (51) % pozemků (14 515,

resp. 12 467,5 km²) nebylo při pěstování poloraných brambor postiženo vodním stresem.

Do kategorie 4 bylo v KVO zařazeno 11 (19) % pozemků (179, resp. 303 km²), v ŘVO se jednalo o 3 (6) % (362, resp. 626 km²), v BVO o 2 (4) % (268, resp. 482 km²) a v HVO o 3 (8) % (10, resp. 26 km²). Pěstování poloraných brambor by v rámci celé ČR vyžadovalo doplňkovou závlahu (kategorie 3 a 4) na 41 (49) % pozemků (10 077, resp. 12 125 km²).

Vláhová potřeba v jednotlivých ZVO vzrostla za poslední dekádu o 1,6 % (HVO) až 5 % (ŘVO). Deficit VB vzrostl výrazněji, a to o 12 % (BVO) až 16 % (ŘVO). Srážky se téměř nezměnily (nižší v KVO o 5 %, vyšší v BVO a ŘVO o 2 a 1,4 %, v HVO nezměněny).

Tabulka 9. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 1981-2010: Polorané brambory

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²	Dny	Vegetační období (mm)			
KVO	1							
	2	6,6	104,7	111,0	-89,6	221,2	343,4	60,5
	3	82,0	1 295,1	111,0	-136,4	216,1	349,2	37,8
	4	11,4	179,4	111,0	-181,1	216,6	347,6	12,1
	Suma/vážený průměr	100	1 579,3	111,0	-138,4	216,5	348,6	36,4
ŘVO	1	0,5	51,3	113,2	6,4	313,5	338,6	86,4
	2	52,4	5 809,1	111,6	-60,2	250,9	327,3	58,4
	3	43,9	4 865,6	111,5	-123,9	234,0	331,3	27,0
	4	3,3	361,7	111,5	-173,2	225,4	334,0	6,3
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	111,6	-91,5	243,0	329,3	43,0
BVO	1	8,6	994,8	123,6	13,0	329,0	353,4	103,0
	2	63,2	7 333,7	120,1	-40,6	294,9	347,6	82,9
	3	25,9	3 011,0	121,9	-108,4	296,7	353,0	38,9
	4	2,3	267,9	125,4	-165,4	294,3	373,7	23,0
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	121,0	-56,5	298,3	350,1	71,8
HVO	1	26,2	83,4	134,1	23,2	377,4	372,5	110,0
	2	43,4	138,1	132,1	-39,2	354,7	368,4	86,4
	3	27,1	86,4	134,2	-109,1	351,4	375,1	41,9
	4	3,2	10,3	136,2	-166,7	343,5	384,1	22,1
	Suma/vážený průměr	100	318,1	133,3	-45,9	359,4	371,8	78,4

Tabulka 10. Plošné zastoupení, délka vegetačního období, vláhová bilance, srážky, vláhová potřeba (Vc) a vzlínající podzemní voda (Wk) pro jednotlivé kategorie dostupnosti půdní vody a zemědělské výrobní oblasti za období 2009-2018: **Polorané brambory**

ZVO	Kategorie dostupnosti půdní vody	Plocha		Vegetační období	Vláhová bilance	Srážky	Vc	Wk
		%	km ²	Dny	Vegetační období (mm)			
KVO	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	1,9	30,0	111,0	-88,6	222,1	342,1	60,5
	3	78,9	1 246,0	111,0	-152,1	205,8	362,2	40,3
	4	19,2	303,2	111,0	-197,5	205,2	362,7	16,3
	Suma/vážený průměr	100	1 579,3	111,0	-159,6	206,0	361,9	36,1
ŘVO	1	0,05	5,4	115,0	7,4	319,6	341,9	85,6
	2	39,8	4 408,4	111,7	-66,2	255,4	342,8	63,6
	3	54,5	6 047,8	111,5	-127,4	240,6	348,1	31,7
	4	5,6	626,1	111,4	-180,1	235,8	354,8	10,7
	Suma/vážený průměr	100	11 087,7	111,6	-106,0	246,3	346,4	43,3
BVO	1	6,2	719,1	121,8	15,8	345,0	355,4	98,0
	2	61,1	7 094,1	120,1	-43,2	301,7	358,0	84,7
	3	28,5	3 312,5	121,8	-111,0	300,9	365,8	44,4
	4	4,1	481,6	125,5	-171,8	291,2	387,2	26,7
	Suma/vážený průměr	100	11 607,4	120,9	-64,2	303,7	361,3	71,6
HVO	1	22,0	69,8	135,2	33,1	400,7	372,7	106,6
	2	44,2	140,5	131,6	-37,0	358,8	373,2	87,9
	3	25,6	81,5	133,3	-105,6	349,4	381,6	48,9
	4	8,3	26,4	136,9	-184,0	317,7	404,1	32,5
	Suma/vážený průměr	100	318,1	133,2	-51,4	362,2	377,8	77,4

Navržené kategorie VB diferencují dostupnost půdní vody pro jednotlivé plodiny. Zařazení do kategorií 3 a 4 představuje pro plodiny vystavení střednímu a silnému stupni vláhového deficitu, který souvisí s půdní vlhkostí nižší než BSD (vyčerpáno 50-60 % z VVK), resp. nižší než BV (vyčerpáno 80-90 % VVK, tj. stav půdního sucha). Tyto podmínky už vedou k redukci plodinového výnosu. Míra výnosových ztrát závisí na období, intenzitě a délce vodního stresu (Plaut, 1995). Ozimy s celkovým zastoupením kategorií 3 a 4 ve výši 20 (28) % (pšenice) a 14,5 (19)% (řepka) byly méně postiženy vodním stresem a výnosovými ztrátami ve srovnání s jařinami (brambory 41, resp. 49 %, kukuřice 40, resp. 54 %). Ozimá pšenice je více odolná vodnímu stresu, neboť pochází ze sušších oblastí a tudíž dokáže efektivně využít zásoby půdní vody (Daryanto a kol., 2016). I když kořenový systém řepky je při čerpání vody z půdy stejně účinný jako u pšenice, je řepka na nižší obsah vody v půdě citlivější. To znamená, že účinnost využití vody pro tvorbu výnosu je nižší a snižování výnosů při vodním deficitu je intenzivnější (Hess a kol., 2015). Nejnižší vodní stres u řepky zjištěný uvedenou metodou byl vysvětlen nejnižší denní Vc

z vybraných plodin (1,8–2,0 mm ve srovnání s 2,2–2,4 mm pro pšenici, 2,6–3,1 mm pro kukuřici a 2,8–3,1 mm pro brambory). Brambory jakožto plodina mírného pásma jsou ve srovnání s uvedenými ozimí méně odolné vůči vodnímu stresu, neboť mají nižší schopnost využívat zásobu půdní vody a k poklesu jejich výnosu dojde již při vyčerpání 45-50 % VVK (Harris, 1978; Haberle a kol., 2015; Fleisher a kol., 2013). Obdobně kukuřice pocházející z vlhčích oblastí je více citlivá na vodní stres. Vyšší míra vodního stresu u brambor a kukuřice byla způsobena i vyšší Vc. Rozsah kategorie 3 a 4 indikující potřebu doplňkové závlahy byl pro jednotlivé plodiny různý (pšenice 20, resp. 28 %, silážní kukuřice 40, resp. 54 %, polorané brambory 41, resp. 49 %, řepka 15, resp. 19 %). Využití stávajících závlahových systémů je v současné době v ČR neuspokojivé (Novák a kol., 2016). Zatímco v roce 1989 zemědělské podniky využívaly závlahové soustavy na 75–80 % zavlažovatelné plochy, v roce 1994 to bylo na 35–40 % a v roce 1998 pouze na 12–15 % (Potopová a kol., 2018). V současné době je zavlažováno 25–30 % zavlažovatelné plochy (Trnka a kol., 2017). Nejvíce postiženými oblastmi s extrémně vysokými teplotami jsou střední Čechy a jižní Morava. Od 90. let 20. století dochází k plošnému rozšiřování výskytu tohoto jevu do ostatních oblastí ČR s výrazným nárůstem v západních Čechách. S očekávanými nižšími zdroji dostupné vody pro závlahu je vhodné uvažovat o tzv. deficitní závlaze (ca 60-75 % plné závlahy), která nutí rostliny adaptovat se na nižší množství vody při současném zvýšení účinnosti využití vody (Cid a kol., 2018). Nevýhodou deficitní závlahy jsou nižší výnosy a riziko zasolení u kapkové závlahy. Vždy je však důležité vyvarovat se deficitnímu zavlažování v kritických obdobích růstu.

Vláhové potřeby plodin Vc počítané jako ETc podle metody FAO-56 byly pro období 2009 - 2018 vyšší (pšenice o 4-8 %, kukuřice o 2-5%, řepka o 5-8 %, brambory o 2-5 %) ve srovnání s klimatickým normálem (1981-2010). Takto počítaná Vc byla výrazně vyšší ve srovnání s Vc uvedenými v ČSN 75 0434, které vycházejí z výsledků závlahářských československých polních experimentů z 50. až 70. let 20. století. Tato norma uvádí např. pro oblast jižní Moravy Vc pro ozimou pšenici 240 mm, pro silážní kukuřici 310 mm, pro řepku 240 mm a rané brambory 200 mm. I když byl zohledněn fakt, že metoda FAO-56 nadhodnocuje Vc v průměru o 9 % (Cid a kol. 2018), tak přesto byly zjištěné rozdíly Vc pro pšenici, brambory a řepku oproti ČSN 75 0434 vyšší než 100 mm. Tento nárůst Vc lze vysvětlit jak klimatickou změnou, tj. nárůstem ET₀, tak i nárůstem výnosů v důsledku zvýšených dávek hnojiv a vyšlechtěním nových výnosnějších odrůd (např. krátkostébelných obilnin), tj. nárůstem Kc. Pro jižní Moravu (nejteplejší a nejsušší část ČR) uvádějí Žalud a kol. (2013) nárůst deficitu VB v posledních dvou dekádách období 1961-2010 vzestupem teploty vzduchu pro 10 měsíců v roce o 0,5-1,7°C, poklesem srážek v jarních měsících o 3-12 mm a naopak nárůstem srážek v letních měsících o 7-16 mm.

Závěr

Popsaný postup zjištění dlouhodobé VB umožňuje kategorizaci dostupnosti půdní vody pro čtyři polní plodiny v měřítku půdního bloku. Plodinové vláhové potřeby zjištěné metodou FAO-56 byly výrazně vyšší ve srovnání s vláhovými potřebami vypočítanými v 50. - 70. letech 20. století. Představená metoda zjištění dlouhodobé VB a kategorizace dostupnosti půdní vody představuje vhodný nástroj pro hodnocení a navrhování plošných změn v osevních postupech a systémech zpracování půdy s cílem zlepšit dostupnost vody pro rostlinnou výrobu. Na základě kategorizace dostupnosti půdní vody je možné navrhnout efektivní umístění zavlažovacích systémů v oblastech postižených vodním deficitem v dlouhodobém horizontu, nebo navrhnout regulaci drenážního odtoku.

Na základě uvedené inovativní metody výpočtu Vc a VB vyvinul Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. volně dostupný nástroj Kalkulačka vláhové potřeby: <https://vlaha.vumop.cz/>, který umožňuje zjistit Vc a závlahová množství pro všechny zemědělské plodiny a pozemky registrované v LPIS pro aktuální klimatický normál (1981 – 2010) a pro dekádu 2009-2018.

Literatura

- Allen, R. G., Pereira, L., S., Raes, D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper, 56, Food and agriculture organization of the united nations, Rome, 300 s. ISBN 92-5-304219-2. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
- Budňáková, M. (Ed.). 2009. Situační a výhledová zpráva Půda. Ministerstvo zemědělství ČR – odbor rostlinné výroby. Praha. ISBN 80-7084-800-5. 91 s.
- Cid, P., Taghvaeian, S., Hansen, N.C. 2018. Evaluation of the FAO-56 methodology for estimating maize water requirements under deficit and full irrigation regimes in semiarid North-eastern Colorado. *Irrig. Drain.* 67: 605–614.
- ČSN 75 0434 Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu. Účinnost od 1. 4. 2017. Česká technická norma, ICS 13.060.10, 65.020.20
- Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.A. 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS ONE* 11, e0156362.
- Falloon, P., Betts, R. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation—the importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment*, 408: 5667-5687.
- Fleisher, D.H., Barnaby, J., Sicher, R., Resop, J.P., Timlin, D.J., Reddy, V.R. 2013. Effects of elevated CO₂ and cyclic drought on potato under varying radiation regimes. *Agric. For. Meteorol.* 171–172: 270–280.
- Fučík P., Zajíček A., Kaplická M., Duffková R., Peterková J., Maxová J., Takáčová Š. 2017. Incorporating rainfall-runoff events into nitrate-nitrogen and phosphorus load assessments for small tile-drained catchments. *Water* 9, 712, doi:10.3390/w9090712.

- Fučík, P., Zajíček, A., Duffková, R. 2015. Water Quality of Agricultural Drainage Systems in the Czech Republic – Options for Its Improvement. In Research and Practices in Water Quality Teang Shui Lee (Ed.): 239-262. InTech. ISBN 978-953-51-2163-3.
- Haberle, J., Vlček, V., Kohut, M., Středa, T., Dostál, J., Svoboda, P. 2015. Bilance a určení dostupné zásoby vody v kořenové zóně plodin. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha, 36 s.
- Harris, P.M. 1978. Water. In The Potato Crop, 1st ed., Harris, P.M., Ed., Chapman & Hall: London, UK: 244–277.
- Hess, L., Meir, P., Bingham, I.J. 2015. Comparative assessment of the sensitivity of oilseed rape and wheat to limited water supply. *Ann. Appl. Biol.* 167: 102–115.
- Kulhavý Z. a kol. 2017. Odvodňovací stavby v povodí, kapitola 1.8 in Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce, Kvítek, T. (Ed.) a kol. Povodí Vltavy, státní podnik, s. 272, ISBN: 978-80-270-2488-9.
- Kulhavý Z. 2015. Regulace drenážního odtoku – rekonstrukce a modernizace odvodňovacích systémů. *Úroda* 7: 72-73.
- Monteith, J.L., 1973: Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, London.
- Novák, P., Kulhavý, Z., Pelíšek, I., Podhrázská, J., Novotný, I., Skokanová, E., Batysta, M., Marval, Š., Podhrázský, A., Berka, M., a kol. Studie ověření stavu závlahových systémů a jejich inventarizace. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha. Studie pro MZe, dle smlouvy o dílo č. 336 - 2016 – 15150. 52 s. + přílohy.
- Plaut, Z. 1995. Sensitivity of crop plants to water stress at specific developmental stages: Re-evaluation of experimental findings. *Isr. J. Plant Sci.* 43: 99–111.
- Potopová, V., Türkott, L., Soukup, J., Zehnálek, P. 2018. Vyhodnocení reakce souboru odrůd řepky olejky na meteorologické faktory. In Rožnovský, J., Litschmann, T. (Eds.): Hospodaření s vodou v krajině, Třeboň 21.-22. 6. 2018, ISBN 978-80-87361-83-2.
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A. O., Leemans, R. a kol. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy* 32: 91-102.
- Spitz, P., Zavadil, J., Duffková, R., Korsuň, S., Nechvátal, M., Hemerka, I. 2011. Metodika řízení závlahového režimu plodin výpočetním programem IRRIPROG. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha. 41 s., ISBN: 978-80-87361-11-5.
- Středová, H., Rožnovský, J., Středa, T. 2013. Predisposition of drought occurrence in selected arid areas of the Czech Republic. *Contrib. Geophys. Geodesy* 43: 237–252.
- Svoboda, V., Hanel, M., Máca, P., Kyselý, J. 2016. Projected changes of rainfall event characteristics for the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64 (4): 415-425. DOI: 10.1515/johh-2016-0036.

- Trnka, M., Drbal, K., Dumbrovský, M., Novotný, I., Žalud, Z., Vizina, A., Chuchma, F., Růžek, P., Trantinová, M. 2017. General vodního hospodářství krajiny České republiky. Státní pozemkový úřad Brno, 423 s.
- Trnka, M., Dubrovský, M., Žalud, Z. 2004. Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Clim. Chang.* 64: 227–255
- Trnka, M., Rötter, R.P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Žalud, Z., Semenov, M.A. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nat. Clim. Chang.* 4, 637–643.
- Zajíček A., Fučík P., Kaplická M., Liška M., Maxová J., Dobiáš J. 2018. Pesticide leaching by agricultural drainage in sloping, mid-textured soil conditions – the role of runoff components. *Water Science and Technology*, 77(7-8): 1879-1890. DOI: 10.2166/wst.2018.068.
- Žalud, Z., Brotan, J., Hlavinka, P., Trnka, M. 2013. Trends in temperature and precipitation in the period of 1961–2010 in Žabčice locality. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun.* 61: 1521–1531.

Zkratky

BSD = bod snížené dostupnosti

BV = bod vadnutí

BVO = bramborářská výrobní oblast

ČHMÚ = Český hydrometeorologický ústav

ET₀ = referenční evapotranspirace

ET_c = plodinová evapotranspirace

HPV = hladina podzemní vody

HVO = horská výrobní oblast

K_c = plodinový koeficient

KVO = kukuřičná výrobní oblast

PVK = polní vodní kapacita

ŘVO = řepařská výrobní oblast

VB = vláhová bilance

V_c = vláhová potřeba

VVK = využitelná vodní kapacita

ZVO = zemědělská výrobní oblast

KPP = komplexní průzkum půd

LPIS = land-parcel identification systém, evidence využití zemědělské půdy

W_z = využitelná zásoba vody v půdě na začátku vegetačního období

W_k = využitelné množství vzlinající podzemní vody pro vegetační období