

**Agrovoc descriptors:** plants; growth; crop yield, yield forecasting; simulation models; meteorology; water balance; monitoring; maize; Zea mays

**Agris category code:** F01; P40; F62

## WOFOST: model za napovedovanje pridelka – 1. del

Tjaša POGAČAR<sup>1</sup>, Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ<sup>2</sup>

Prispelo 22. januarja 2009, sprejeto 22. junija 2009  
Received January 22, 2009; accepted June 22, 2009

### IZVLEČEK

Model WOFOST je bil odgovor Alterre in centra Plant Research International (oboje Wageningen, Nizozemska) na potrebo po agrometeorološkem simulacijskem modelu za 10-dnevno kvantitativno napovedovanje pridelka na državni ali regionalni ravni in kvalitativni monitoring pogojev za rast različnih poljščin za celotno EU. Celo družino modelov, v katero spada tudi WOFOST, so razvijali v Wageningnu v šoli C. T. de Wita. Prvič je bil dokumentiran leta 1986 (Wolf in sod.), njegov prvotni namen je bil preučevanje potencialnega pridelka različnih poljščin v tropskih državah, s čimer so se ukvarjali van Keulen, Wolf in van Diepen. Uspešne verzije WOFOST-a se že več kot 10 let uporabljajo v različnih raziskavah. Različne aplikacije so bile prilagojene za analizo tveganja pri pridelku, variabilnosti pridelka skozi leto, variabilnosti zaradi različnih tipov tal ali zaradi raznovrstnih agrohidroloških pogojev in razlik med kultivarji, relativne pomembnosti faktorjev, ki določajo rast, za analizo setvenih strategij, vplivov podnebnih sprememb, kritičnih period za uporabo agrikulturne mehanizacije in drugega. Trenutno je dostopna verzija WOFOST 7.1.2.

WOFOST je fizikalni model, ki razlaga rast pridelka na osnovi procesov, ki se dogajajo v rastlini in upošteva, kako na te procese vplivajo okoljske razmere. Osnova za izračune produkcije suhe snovi je stopnja asimilacije CO<sub>2</sub> v rastlinski odeji, ki je odvisna od absorbirane energije sevanja in je funkcija vpadajočega sevanja in listne površine poljščine. Izbiramo lahko med potencialno in dejansko (omejena količina vode) simulacijo. Meteorološke podatke moramo pripraviti v pravilnem formatu.

WOFOST uporablja vodno bilanco, ki v danem časovnem obdobju primerja količino vode, ki pride v koreninsko cono, s tisto, ki gre iz nje, ter določi razliko med njima za spremembo vsebnosti vode v tleh. Upošteva infiltracijo, evaporacijo, transpiracijo, perkolacijo in kapilarni dvig. Pri tem se moramo zavedati, da model ni namenjen natančni fizični obdelavi

gibanja vode v tleh, temveč le oceni dostopnosti vode za rastlino. Vpiv hranil (dušik, fosfor in kalij) na pridelek se računa na letnem nivoju na osnovi dela Janssena in sod. iz leta 1990. WOFOST izračuna fenološko fazo iz dnevne temperature in korekcijskega faktorja. Temperaturne vsote, potrebne za doseganje določene faze, so določene v datotekah, ki opisujejo posamezne poljščine. V posebnih prilogah k opisu modela si lahko natančno preberemo vse o enačbah, ki jih model uporablja, o izračunih energije globalnega obsevanja, Gaussovi integraciji, linearni interpolaciji z AFGEN funkcijo, določanju datuma setve, CGMS (Crop Growth Monitoring System) bazi podatkov, uporabi meteoroloških podatkov ter podatkov o poljščinah in tleh v CGMS-u.

**Ključne besede:** WOFOST, razvoj modela, vhodni podatki, vodna bilanca, pridelek, koruza

### ABSTRACT

#### WOFOST: CROP GROWTH SIMULATION MODEL – 1<sup>ST</sup> PART

The WOFOST crop growth simulation model was selected, when the JRC (i.e. European Commission) requested Alterra (formerly SC-DLO) and Plant Research International (formerly AB-DLO) in Wageningen, The Netherlands, to develop, adapt and calibrate new or existing agrometeorological simulation models for 10-day routine quantitative forecasting of national and regional yields and qualitative monitoring of the growth conditions for the whole EU for different kinds of crops. WOFOST is a member of the family of crop growth models developed in Wageningen by the school of C.T. de Wit. The first WOFOST model has been documented by Wolf et al. (1986) and it was originally developed to assess yield potential of various annual crops in tropical countries (van Keulen & Wolf, 1986; van Diepen et al., 1988; van Keulen & van Diepen, 1990). Over the last ten years, the successive WOFOST versions have been used in

<sup>1</sup> univ. dipl. meteor., ARSO, Ljubljana, tjasa.pogacar@gov.si

<sup>2</sup> prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

many studies. WOFOST has been applied as a tool for the analysis of yield risk and inter-annual yield variability, of yield variability over soil types, or over a range of agro hydrological conditions, of differences between cultivars, of relative importance of growth determining factors, of sowing strategies, effects of climate change, critical periods for use of agricultural machinery and others. Recently, the version WOFOST 7.1.2. is in use.

WOFOST is a mechanistic model that explains crop growth on the basis of the underlying processes, such as photosynthesis, respiration and how these processes are influenced by environmental conditions. Crop growth depends on the daily net assimilation, which on its turn depends on the intercepted light. The intercepted light is determined by the level of incoming radiation and the leaf area of the crop. We can choose between potential and water-limited simulation. We have to prepare meteorological data in the requested format.

WOFOST uses a water balance, which compares for a given period of time, incoming water in the rooted zone with outgoing water and quantifies the difference between the two as a change in the stored soil moisture amount. Several processes are included: infiltration, evaporation, transpiration, percolation and capillary rise. We have to keep in mind that the model is not meant to calculate the water balance in first place. The procedure which calculates the nutrient requirements is based on the work of Janssen et al. (1990). Phenological phase is calculated from daily temperature and correction factor. Temperature sums needed for each phase are determined in crop files. Appendices to the model description include equations, description of the global radiation calculation, Gauss integration, linear interpolation with AFGEN function, sowing date determination, CGMS (Crop Growth Monitoring System) data base, use of meteorological, crop and soil data in CGMS.

**Key words:** WOFOST, model development, input data, water balance, crop yield, maize

## 1 UVOD

Slovensko kmetijstvo se bo v prihajajočih letih spopadalo s številnimi izzivi, kot so mednarodna konkurenca, nadaljnja liberalizacija trgovinske politike in upadanje prebivalstva. Zaradi podnebnih sprememb bo stiska še večja, izzivi pa težji in dražji. Predvidene podnebne spremembe bodo prizadele pridelek, živinorejo in lokacijo proizvodnje, kar bo zelo ogrozilo kmetijski prihodek in morda povzročilo opustitev zemljišč v nekaterih predelih. Proizvodnja hrane je lahko ogrožena zaradi vročinskih valov, suše in škodljivcev, vse pogostejši pa bodo tudi izpadi pridelka. Kljub opaženim spremembam se ne izvajajo meritve in opazovanja vodne bilance, od katere je v veliki meri odvisna količina in kakovost kmetijskega pridelka. Na nacionalnem nivoju je trenutno v uporabi vodnobilančni model IRRFIB (ARSO), žal pa nimamo razvitih ali umerjenih modelov za simulacijo in napovedovanje kmetijskega pridelka. V tujini za napoved pridelka že uporabljajo modele, ki temeljijo na vodnih razmerah v tleh, pri simulaciji pa upoštevajo tudi fenološki razvoj rastlin, saj je modeliranje sodoben način kvantificiranja odnosov med biološkimi procesi in dejavniki okolja (Scharrer in Schmidt, 1998). Eno izmed načel pri agrometeoroloških modelih je parsimoničnost ali preprostost modelov (Landau in sod., 2000). Hodges (1991) navaja, da je za učinkovit prenos znanja (modela) do uporabnika, ki bo lahko to znanje uporabil za rešitev praktičnega problema ali načrtovanje kmetijske proizvodnje, potrebno izpolniti nekatere minimalne zahteve:

- program mora biti uporaben za ljudi, katerim je namenjen, to je tistim, ki bi od njega naj imeli koristi. Če je potrebno za učinkovito uporabo modela veliko izkušenj s področja računalništva ali

znanja najnovejših znanstvenih dosežkov agronomske znanosti, potem bo relativno malo številnih potencialnih uporabnikov lahko izkoristilo še tako dober program,

- program mora potrebovati samo tiste vhodne podatke, do katerih bodo uporabniki lahko prišli z relativno malo napora in stroškov glede na koristi, ki jih bodo imeli ob uporabi modela,
- program naj zagotovi natančne in pravočasne uporabne informacije za rešitev problema, za katerega smo iskali modelsko rešitev.

Tekom zadnjih desetletij je agrometeorološko modeliranje doživelo razcvet in v literaturi najdemo tako zelo kompleksne kot tudi preprostejše matematične modele za napovedovanje rasti in razvoja kmetijskih rastlin (Whisler in sod., 1986; Boote in sod., 1996). Teoretične osnove modeliranja sta zelo nazorno povzela Thornley in Johnson (1990). Med najbolj razširjenimi starejšimi modeli so CERES (Ritchie and Otter, 1984), ARCWHEAT (Weir et al., 1984) EPIC: (Williams et al., 1989) in SUCROS (van Keulen and Seligman, 1987), ki so bili verificirani, kalibrirani in uporabljeni za različne regije sveta, tudi Evropo. Model CERES za koruzo smo preizkušali tudi v Sloveniji (Kajfež-Bogataj, 1996). Obstaja tudi kar nekaj generičnih modelov, ki lahko simulirajo rast in razvoj več kmetijskih rastlin hkrati, kar jim omogočajo različni podmodeli in sicer WOFOST, INTERCOM (van Ittersum et al., 2003), STICS (Brisson et al., 2003) in CropSyst (Stöckle et al., 2003).

V članku podrobneje predstavljamo model WOFOST (World FOod STudy), ki je bil razvit na Nizozemskem,

kjer je trenutno v široki uporabi. Mnoge izmed evropskih držav so model prilagodile na svoje razmere. Med drugim je bil na primer uporabljen tudi v študiji vpliva klimatskih sprememb na potencialni pridelek pšenice in koruze na območju Evropske unije (Wolf in van Diepen, 2007). V prvem delu predstavljamo

predvsem razvoj in osnove izračunov modela WOFOST, kar v večini povzemamo po internetni predstavitvi modela, ki sta jo pripravila Supit in van der Goot (2008). V drugem delu (Pogačar in Kajfež Bogataj, 2009) pa bomo predstavili kratka navodila za uporabo in konkreten primer izračunov.

## 2 ZGODOVINA IN RAZVOJ MODELA WOFOST

Vladne službe, podjetja in proizvajalci želijo čim prejšnje informacije o pričakovanem pridelku, kar jim omogoča planiranje transporta, marketinga, uvoza ... Globalno gledano so cene pridelkov odvisne od zaloga in porabe dobrin. Glavno je zanimanje za pšenico, ječmen, koruzo za zrnje, riž, krompir, oves, sladkorno peso, stročnice, sojo, oljčno repico, sončnice, tobak in bombaž. Urad za statistiko pri Evropski Komisiji (EUROSTAT) zbira informacije o rabi tal, spremembah le-te in pridelku, ki pa so dostopne šele po enem ali dveh letih, kar je za uporabnike seveda prepozno.

Tako je Alterra (raziskovalni inštitut Univerze Wageningen na Nizozemskem) v sodelovanju z raziskovalnim centrom Plant Research International (PRI, prav tako Wageningen) za raziskovalni center Evropske Komisije JRC (Ispira) dobila navodilo, da razvije, prilagodi in umeri nov ali obstoječ agrometeorološki simulacijski model za 10-dnevno kvantitativno napovedovanje pridelka na državni ali regionalni ravni in kvalitativni monitoring pogojev za rast pšenice, ovs, koruze, riža, krompirja, sladkorne pese, stročnic, soje, oljčne repice, sončnic, tobaka in bombaža za celotno EU.

Izbrali so WOFOST – model za simulacijo rasti poljščin, ki v kombinaciji z GIS-om in rutino za napoved pridelka tvori CGMS (Crop Growth Monitoring System). Kombiniran je z mapo tal, parametri kultur in prostorsko informacijo o rastiščih ter uporablja dnevne meteorološke podatke za oceno statusa rastlin. Prvo verzijo sta razvila Centre for World Food Studies (CWFS) in Research Institute for

Agrobiology and Soil Fertility (AB-DLO) – sedanjim PRI (van Diepen et al., 1989). Implementacijo v CGMS in strukturo je opisal Supit s sod. (1994). Tehnične opise in navodila za uporabo so pripravili van Raaij in van der Wal (1994), van der Wal (1994) ter Hooijer in sod. (1993). Po ukinitvi CWFS leta 1988 so z razvojem nadaljevali pri DLO-Winand Staring Centre (današnja Alterra) v sodelovanju s PRI in WAU-TPE (Department of Theoretical Production Ecology of the Wageningen Agricultural University).

Celo družino modelov, v katero spada tudi WOFOST, so razvijali v Wageningnu v šoli C. T. de Wita. Sorodni so SUCROS modeli (Simpel and Universal Crop Simulator), Arid Crop, Spring wheat, MACROS in ORYZA1. Prvič je bil WOFOST dokumentiran leta 1986 (Wolf in sod.). Vsi ti modeli sledijo hierarhični razliki med potencialno in omejeno produkcijo in si delijo podobne podmodele za rast poljščin z intercepcijo svetlobe in asimilacijo CO<sub>2</sub> kot gonilnima procesoma ter fenološkim razvojem kot procesom, ki kontrolira rast. Precej pa se razlikujejo pod modeli, ki opisujejo vodno bilanco tal in privzem hranil iz tal – tako v pristopu, kot tudi v stopnji natančnosti.

Prvotni namen WOFOST-a je bil preučevanje potencialnega pridelka različnih poljščin v tropskih državah, s čimer so se ukvarjali van Keulen, Wolf in van Diepen. Poskušali so ohranjati čim bolj enostavno obliko vhodnih podatkov – uporabljali so povprečja, a so kmalu ugotovili, da je potrebno kljub vsemu upoštevati variabilnost okoljskih parametrov v prostoru in času, povprečuje pa se lahko kvečjemu rezultate.

### 3 APLIKACIJE

Uspešne verzije WOFOST-a se že več kot 10 let uporabljajo v različnih raziskavah. Prilagojen je bil za analizo tveganja pri pridelku, variabilnosti pridelka skozi leto, variabilnosti zaradi različnih tipov tal ali zaradi raznovrstnih agrohidroloških pogojev in razlik med kultivarji, relativne pomembnosti faktorjev, ki določajo rast, setvenih strategij, vplivov podnebnih sprememb in kritičnih period za uporabo agrikulturne mehanizacije. Model so uporabljali tudi za napovedovanje v smislu vrednotenja potencialnega pridelka regionalnih kmetijskih površin, ocen učinkovitosti namakanja in uporabe umetnih gnojil. Nekateri uporabniki so ga prilagodili za uporabo pri gozdnih in travnatih površinah ter zamenjali modul za izračune vode v tleh z bolj razčlenjenim. Celotnega pregleda vseh aplikacij na žalost ni, saj ni nikoli bilo uradne mreže za izmenjavo izkušenj, podatkov in aplikacij. V nadaljevanju na kratko predstavljamo nekaj večjih raziskav.

Z verzijo WOFOST 3.1 so na CWFS na željo FAO preučevali povečanje potencialne produkcije hrane zaradi uporabe umetnih gnojil v treh afriških državah. Raziskava je pokazala, da bi se pridelek v Burkini Faso, Gani in Keniji lahko povečal z uporabo umetnih gnojil brez zahtev po dodatnem namakanju (CWFS, 1985).

V okviru projekta AGRISK je Mellaart (1989) raziskoval tveganja v Burkini Faso – analiziral je strategije za spopadanje s sušo glede na tip tal, poljščino in kultivar, datum setve, površinski odtok in lokacijo polj. Bakker (1992) pa je v okviru ICRISAT-ove študije preučeval razmere glede padavin v Indiji.

Pri projektu MARS (Monitoring Agro-ecological resources with Remote sensing and Simulation) za JRC je bil WOFOST 4.1 predlagan za ocenjevanje pridelka in kot sistem za zgodnje opozarjanje o prehranski varnosti v Zambiji, pri čemer bi uporabljali model v kombinaciji z GIS-om, vhodne podatke pa bi črpali iz meteoroloških satelitov. Zato so WOFOST 4.1 kalibrirali in testirali za koruzo. Isto verzijo so prilagodili za vrednotenje vodnih strategij (namakanje, ohranjanje) kot podpore ruralnega razvoja v majhnih razvodjih v Perujskih Andih.

WOFOST 4.3 je postal referenčni model za analizo pridelka pri NASREC programu, pri katerem sodeluje 11 držav. Leta 1991 so pripravili nov, prijazen uporabniški vmesnik.

Z verzijo WOFOST 4.4 je pripravil Roetter 1.1993 kalibracijsko-validacijsko raziskavo za koruzo v Keniji. Z uporabo podatkov z eksperimentalnih polj je model pridelek napovedal s 15% napako (RMSE), kar je bilo glede na kakovost vhodnih podatkov precej dobro.

Nova verzija, WOFOST 5.3, je bila uporabljena za ocene potencialne regionalne produkcije poljščin na velikih poljih v EU v odvisnosti od tal in klimatskih razmer (De Koning in van Diepen, 1992; van Lanen in sod., 1992). Razvili so jo za pšenico, koruzo, oljčno repico, krompir in sladkorno peso ter dodali ločeno verzijo za travo. Eden od zaključkov je bil ta, da bi v Evropi lahko vsaj 30 % kmetijske zemlje odvzeli, ne da bi ogrozili prehransko varnost ali tvegali večji vpliv na politiko.

Van Diepen in sod. (1987), Wolf in van Diepen (1991) in Wolf (1993) so ocenjevali vpliv podnebnih sprememb na rast poljščin. Model je posebej primeren za določanje kombiniranega vpliva sprememb CO<sub>2</sub>, temperature, padavin in sončnega obsevanja na razvoj in rast poljščin ter porabo vode, saj vse pomembne procese simulira ločeno, a upošteva njihovo medsebojno interakcijo.

Verzijo WOFOST 6.0 so pripravili za novo študijo v okviru projekta MARS: "Modeli za napovedovanje pridelka", katere namen je bil generiranje indikatorjev rasti poljščin za oceno kvalitete trenutne kmetijske sezone po celi EU v primerjavi s kvaliteto preteklih sezon. V tem času je bil WOFOST registriran pri Crop Growth Monitoring (Hooijer and van der Wal, 1994; van Diepen, 1992), samostojna verzija se je obdržala za poučevanje, demonstracije, teste in validacije ter kot izhodišče za nove aplikacije in druge raziskave.

Poleg glavne smeri razvoja različnih verzij pa se je veliko aplikacij razvilo na osnovi verzije WOFOST 4.1. Na primer SWACROP2, pri katerem so WOFOST povezali z modelom SWATRE in transpiracijskim modelom (Huygen, 1992). Groot je leta 1987 vključil dinamiko hranil pri rastlinah in tleh. Poels in Bijker (1993) sta ustvarila model TROPFOR za simulacijo rasti in porabe vode v tropskem deževnem gozdu, De Ruijter in sod. (1993) pa so model pripravili za simulacijo rasti tulipanov. Trenutno je dostopna verzija WOFOST 7.1.2.

## 4 OSNOVE IZRAČUNOV, KI JIH UPORABLJA WOFOST

### 4.1 Splošni pregled

WOFOST je fizikalni model, ki razlaga rast pridelka na osnovi procesov, ki se dogajajo v rastlini (fotosinteza, dihanje ...), in upošteva, kako na te procese vplivajo okoljske razmere. Napovedi takih modelov ne ustrezajo vedno našim pričakovanjem, saj imajo ocene vseh parametrov in formulacije procesov svoje napake, ki se akumulirajo pri končni napovedi pridelka.

Osnova za izračune produkcije suhe snovi je stopnja asimilacije CO<sub>2</sub> v rastlinski odeji, ki je odvisna od absorbirane energije sevanja in je funkcija vpadajočega sevanja in listne površine poljščine. Del nastalih ogljikovih hidratov se porabi za zagotavljanje energije za vzdrževanje že obstoječe žive biomase (bazalni metabolizem), ostali pa se pretvorijo v gradbeni material.

Nastala suha snov se porazdeli med korenine, liste, stebila in založne organe, pri čemer model uporabi porazdelitvene faktorje, ki so funkcija fenološke faze (Spitters in sod., 1989). Del, ki se porazdeli k listom, določa razvoj listne površine in s tem dinamiko intercepcije svetlobe. Suho težo rastlinskih organov dobimo z integracijo njihove stopnje rasti po času.

Listna masa je razdeljena v starostne razrede. Tekom razvoja del biomase odmre zaradi starosti. Na nekatere rastne procese (maksimalna fotosinteza, bazalni metabolizem) vpliva temperatura, na druge (porazdelitev asimilatov ...) pa fenološka faza, ki je funkcija okoljske temperature in dolžine dneva. Akumulacija in distribucija suhe snovi po rastlini je simulirana od setve do dozoretnja na bazi fizioloških procesov, kot jih določajo odzivi poljščin na dnevne vremenske situacije, stanje vode v tleh (odraža ga Ta/Tp) in setvena praksa (gostota setve ipd.).

Vodna zaloga v koreninski coni, infiltracija, površinski odtok, perkolacija in prerazporejanje vode v enodimenzionalnem profilu so določeni iz hidravličnih značilnosti in kapacitete tal za vodo.

Izbiramo lahko med potencialno in dejansko (omejena količina vode) simulacijo. Potencialna je definirana s temperaturo, dolžino dneva, sončnim obsevanjem in karakteristikami poljščin (dinamika listne površine, karakteristika asimilacije, porazdeljevanje suhe snovi ...). Dejansko pa določa še dostopnost vode, računana iz značilnosti korenin, fizikalnih lastnosti tal, količine padavin in evapotranspiracije. V obeh primerih predvidevamo optimalno zalogo hranil in računamo

celotno količino nadzemne suhe snovi in suhe snovi v semenih na hektar.

V simulacijo niso vključene morebitne morfološke ali fiziološke prilagoditve rastlin na spremenjene okoljske razmere. Prav tako ni erozije, zmrzali, škodljivcev, bolezni, izgub pri shranjevanju ipd. Zavedati se moramo, da bi moral biti model testiran na širokem naboru različnih okoljskih razmer, vendar pa je meritev še vedno precej malo. Poleg tega pa od neke točke naprej s povečevanjem kompleksnosti modela povečujemo tudi napako. Zato je verjetno bolje, da nepreverljivih, nezanesljivih ali težko določljivih faktorjev ne vključimo.

### 4.2 Meteorološki vhodni podatki

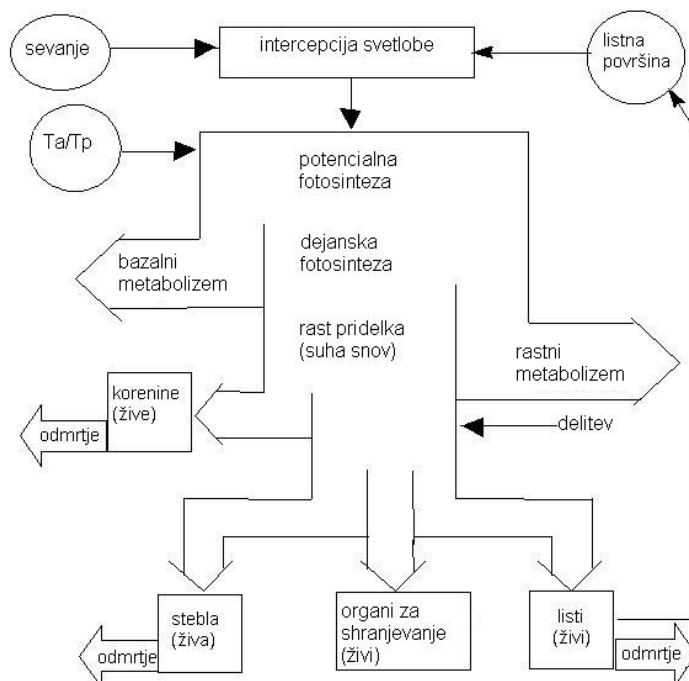
WOFOST izmed meteoroloških parametrov uporablja maksimalno in minimalno temperaturo [°C], globalno obsevanje (ni nujno) [J/m<sup>2</sup>d], povprečno dnevno hitrost vetra na višini 2 m [m/s] – preračunano z logaritemsko transformacijo z višine 10 m, kjer so meritve, povprečni dnevni pritisk vodne pare [hPa] in količino padavin [mm]. Ker se večina podatkov pridobiva na dnevni bazi, je tudi časovni korak v modelu 1 dan.

Evapotranspiracijo računa po Penmanovi metodi. JRC verzija ponuja še druge možnosti za izračun evapotranspiracije, obe pa za oceno obsevanja (ko nimamo meritev) ponujata po Prescottu prirejeno Ångströmovo formulo, pri kateri potrebujemo informacijo o trajanju sončnega obsevanja. Če tudi tega nimamo, lahko pri JRC verziji globalno obsevanje ocenimo po Supitovi (1994) ali malo manj natančni Hargreavesovi formuli (1985). Empirične koeficiente za Ångströmovo formulo mora v splošni verziji zagotoviti uporabnik, v JRC verziji pa so ocenjeni na podlagi meteoroloških postaj z znanimi vrednostmi (Supit, 1994; Supit in van Kappel, 1997) z uporabo interpolacijske metode, ki jo je l. 1997 razvil van der Goot. Za rastlinsko odejo računamo maksimalno evaporacijo iz zasenčenega površja tal, maksimalno evporacijo iz zasenčenega vodnega površja, maksimalno in dejansko transpiracijo poljščin. Uporabljamo Penmanovo metodo, prilagojeno po Choisnelu in sod. (1992). Računa nam referenčne vrednosti, zato uporabljamo še korekcijski faktor za poljščine (koeficient rastline), upoštevati moramo odvisnost od listne površine.

Spremenljivke imamo določene na meteoroloških postajah, zato jih interpoliramo v mrežo 50 x 50 km za EU. Za uporabo na nivoju posameznih držav je mogoče dodati gostejšo mrežo. Pri tem je pomembno, da

izberemo ustrezne meteorološke postaje, ki so reprezentativne za posamezne celice. Dejanska interpolacija je enostavno povprečje, popravljeno zaradi razlik v nadmorski višini. Le pri padavinah vzamemo

kar podatke z najbolj primerne postaje. Izračuni po celicah predstavljajo povprečne pogoje in ne odražajo vrednosti, ki bi bile na primer izmerjene v sredini celice.



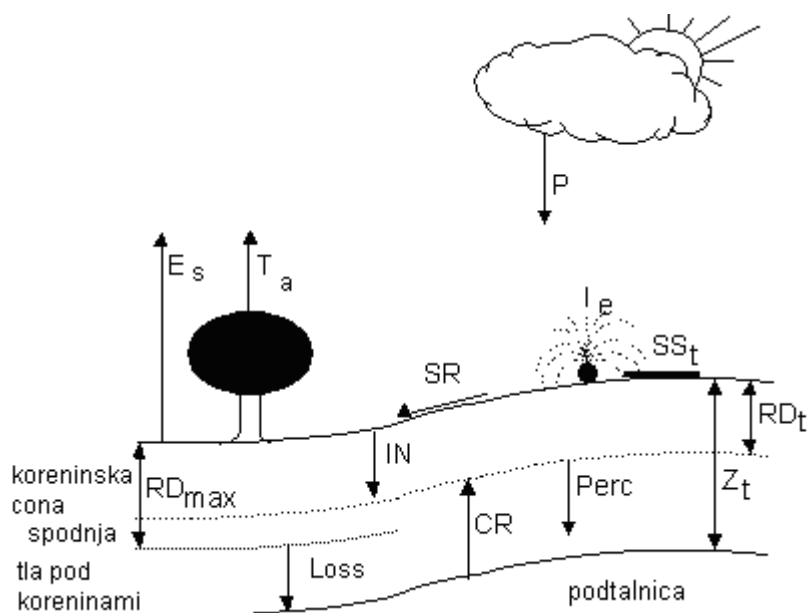
**Slika 1:** Proces rasti poljščin, kot jo simulira WOFOST.  $T_a$  in  $T_p$  sta dejanska in potencialna transpiracija.

**Figure 1:** Simplified general structure of a dynamic, explanatory growth model ( $T_a$  - actual and  $T_p$  - potential transpiration).

#### 4.3 Vodna bilanca

Za simulacijo rasti mora model slediti količini vode v tleh, da lahko določi kdaj in kako zelo je poljščina izpostavljena vodnemu stresu. WOFOST uporablja vodno bilanco, ki v danem časovnem obdobju primerja količino vode, ki pride v koreninsko cono, s tisto, ki gre iz nje, ter določi razliko med njima za spremembo

vsebnosti vode v tleh. Loči tri situacije. Prva se pojavi, ko je voda v tleh dosegla poljsko kapaciteto in pri tem rast dosega svoj potencialni nivo. V drugem primeru pride v poštev vpliv evapo(transpi)racije in perkolacije na vsebnost vode v tleh. Produkcija je zaradi manjše dostopnosti vode zmanjšana. Pri zadnji možnosti pa poleg evapo(transpi)racije in perkolacije upošteva še vpliv podtalnice (te možnosti pri JRC verziji ni).



**Slika 2:** Shematski prikaz različnih komponent vodne bilance tal.

**Figure 2:** Schematic representation of the different components of a soil water balance.

Dejansko količino vode v tleh izračuna model po (Driessen, 1986):

$$\theta_t = \frac{IN_{up} + (IN_{low} - T_a) \Delta t}{RD}$$

$$IN_{up} = P + I_e - E_s + SS_t / \Delta t - SR$$

$$IN_{low} = CR - Perc$$

kjer sta:

**Tabela 1:** Spremenljivke, ki nastopajo v izračunu vode v tleh.

**Table 1:** Variables in the soil moisture equation.

kjer so	$\theta_t$	: dejanska količina vode v koreninski coni ob času t	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]
	$IN_{up}$	: neto pritek skozi zgornjo mejo koreninske cone	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$IN_{low}$	: neto pritek skozi spodnjo mejo koreninske cone	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$T_a$	: dejanska transpiracija poljščine	[cm d <sup>-1</sup> ]
	RD	: dejanska globina koreninske cone	[cm]
	P	: količina padavin	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$I_e$	: efektivno dnevno namakanje	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$E_s$	: evaporacija iz tal	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$SS_t$	: voda na površini	[cm]
	SR	: površinski odtok	[cm d <sup>-1</sup> ]
	CR	: kapilarni dvig	[cm d <sup>-1</sup> ]
	Perc	: perkolacija	[cm d <sup>-1</sup> ]
	$\Delta t$	: časovni korak	[d]
	$Z_t$	: globina podtalnice	[cm]

Procesi, ki direktno vplivajo na količino vode v koreninski coni, so definirani kot:

- Infiltracija: transport vode s površja v koreninsko cono.
- Evaporacija: izguba vode v atmosfero.

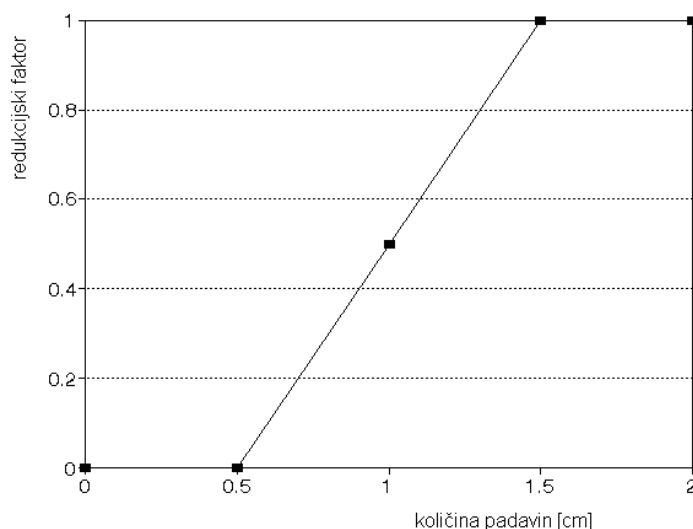
- Transpiracija rastlin: izguba vode iz notranje koreninske cone.
- Perkolacija: transport vode iz koreninske cone v plast pod njo.
- Kapilarni dvig: transport vode navzgor v koreninsko cono.

Zaradi vodnega stresa se transpiracija zmanjša, izračunati moramo dejansko evapotranspiracijo. Težko je oceniti, do katere količine vode v tleh uspejo rastline še vzdrževati potencialno transpiracijo. Po tej kritični točki pa potencialno transpiracijo množimo s faktorjem, manjšim od ena, odvisnim od količine vode v tleh. WOFOST uporablja empirično določeno formulo za izračun lahko dostopnega dela vode v tleh, pri tem pa moramo vedeti, v katero skupino rastlin se uvršča naša poljščina.

Privzeto je, da je na začetku od zadnjega dežja minilo 0 dni, v primeru, da je količina vode v tleh enaka polovici poljske kapacitete, pa 5 dni. Upoštevamo še, da ne dosežejo vse padavine tal (nekaj prestrežejo listi, stebila

...), poleg tega pa nekaj vode tudi odteče po površini (večinoma do 20 %).

WOFOST za določen dan izračuna, kolikšen del padavin se bo infiltriral. Graf (Slika 3) predstavlja faktor redukcije v odvisnosti od količine padavin. Model ponuja dve možni infiltracijski situaciji: delež padavin, ki se infiltrirajo v tla, je lahko konstanten ali pa je odvisen od intenzitete padavin. Delež padavin, ki se ne infiltrira v tla, ostane na površju, izpostavljen kasnejšemu izhlapevanju, odtoku ali infiltraciji. V primeru odvisnosti infiltracije od količine padavin se predpostavlja, da ob močnejših padavinah delež infiltrirane vode upada. Največji delež padavin, ki se ne infiltrira (NOTINF), je tu pomnožen z deležem NINFTB (ta se giblje med 0 in 1), ki je odvisen od količine padavin. Če je količina padavin manjša od 5 mm/dan, potem se vsa voda infiltrira (delež NINFTB je enak 0), če je količina padavin med 5 in 15 mm/dan, delež NINFTB linearno narašča, ob količini padavin nad 15 mm/dan pa je enak 1.



**Slika 3:** Redukcijski faktor za del padavin, ki se ne infiltrira, v odvisnosti od količine padavin.

**Figure 3:** Reduction factor of the non infiltrating fraction as a function of rainfall.

Če je vode več kot je poljska kapaciteta tal, pride do perkolacije. Na infiltracijo in perkolacijo vpliva tudi hidravlična prevodnost mokrih tal, ki je odvisna od vrste tal. Maksimalna infiltracija je določena iz izgub vode in dostopnega prostora med porami. Ko je presežena meja za zadrževanje vode na površju, se začne površinski odtok. Pri izračunih upoštevamo tudi rast korenin, s čimer se večja dostopnost vode v tleh.

Imamo možnost, da upoštevamo tudi stres zaradi pomanjkanja kisika v koreninski coni ob preobilici vode.

Pri vsem tem se moramo zavedati, da model ni namenjen natančni fizični obdelavi gibanja vode v tleh, temveč le oceni dostopnosti vode za rastlino.

Pri WOFOST-u lahko izbiramo med tremi podrutinami:

- Potencialna produkcija
- Omejena produkcija brez vpliva podtalnice
- Omejena produkcija z vplivom podtalnice

Pri računanju potencialne produkcije ne upoštevamo padavin, namakanja, kapilarnega dviga in drenaže, saj je količina vode v tleh ves čas na poljski kapaciteti in ne



simuliramo vodne bilance tal. Tako prideta v poštev le evaporacija iz površja in transpiracija poljščine.

Ko ne upoštevamo podtalnice, računamo infiltracijo, zadrževanje vode na površju, perkolacijo in izgube vode pod koreninsko cono. Talni profil je sestavljen iz treh plasti: dejanska koreninska cona, spodnja koreninska cona (od dejanske do maksimalne globine korenin) in tla pod koreninsko cono. V tem primeru ne upoštevamo kapilarnega dviga.

Kadar upoštevamo tudi podtalnico, delimo tla na dejansko koreninsko cono, cono med končno globino korenin in podtalnico ter na tla pod podtalnico do globine 10 m. Natančnih izračunov ne bomo opisovali, saj dobrih podatkov o podtalnicah nimamo in teh izračunov ne uporabljamo.

#### 4. 4 Hranila

Vpiv hranil (dušik, fosfat in kalij) na pridelek se računa na letnem nivoju na osnovi dela Janssena in sod. iz leta 1990. Rutino sestavljajo štiri koraki. Najprej izračunamo potencialne zaloge hranil iz razmerja med kemijskimi lastnostmi zgornje plasti tal (0-20 cm) in maksimalno količino tistih hranil, ki jih poljščina lahko absorbira. Predvideva se, da pridelek ni omejen s hranili in rastnimi faktorji. V drugem koraku izračunamo dejansko asimilacijo vsakega hranila kot funkcijo potencialne zaloge tega hranila, upoštevajoč potencialno zalogo ostalih dveh. V tretjem koraku dobimo tri območja možnega pridelka, kot so odvisna od dejanske asimilacije dušika, fosforja in kalija (obravnavano neodvisno). V četrtem koraku pa ta tri območja pridelka združimo po parih in za končno oceno pridelka povprečimo ocene le-teh. Splošna verzija WOFOST-a ponuja še statistiko in izračun dejanske produkcije pri omejeni količini hranil.

#### 4. 5 Rast in razvoj rastlin

Pri fenološkem razvoju je najpomembnejši prehod iz vegetativnega v reproduktivno stanje rastline, pri čemer se suha snov v večini preusmeri v druge organe. Za enoletne poljščine je faze razvoja je najlažje predstaviti brezdimenzijsko kot 0 za vznik, 1 za cvetenje in 2 za zrelost (van Heemst in sod., 1986).

Kot začetek rastne sezone lahko izberemo datum setve ali vznika, vendar v primeru, da izberemo setev, WOFOST sam določi datum vznika in s tem začetek simulacije rasti poljščine. Čas vznika je lahko določen kot funkcija učinkovite dnevne temperaturne vsote od setve dalje. Ko le-ta preseže določen prag, ki mora biti definiran za vsako poljščino posebej, se začne simulacija.

WOFOST izračuna stopnjo razvoja iz dnevne temperature in korekcijskega faktorja. Z integracijo stopnje razvoja po času pa določi razvojno fazo, pri čemer mora pri določenih kulturah upoštevati tudi dolžino dneva. Pri tem naj omenimo, da so novejšje sorte precej manj občutljive na spremembe svetlobe kot tradicionalne, zato večinoma podatkov o dolžini dneva ne potrebujemo. Simulacija se zaključi, ko poljščina doseže razvojno fazo, v kateri bo požeta.

Temperaturne vsote, potrebne za doseganje določene faze, so določene v datotekah, ki opisujejo posamezne poljščine. Tako je na primer za koruzo med setvijo in vznikom potrebna temperaturna vsota 70 °C (za pšenico 0 °C), med vznikom in cvetenjem 750 °C (za pšenico 1000 °C) ter med cvetenjem in zrelostjo 859 °C (za pšenico 950 °C).

Rast je odvisna od neto dnevne asimilacije, ta pa je odvisna od prestrežene svetlobe. Svetlobo določimo iz sevanja, ki ga rastlina prejema, in listne površine poljščine. Dnevne vrednosti potencialne fotosinteze izračunamo iz absorbiranega sevanja in fotosintetskih karakteristik posameznih listov.

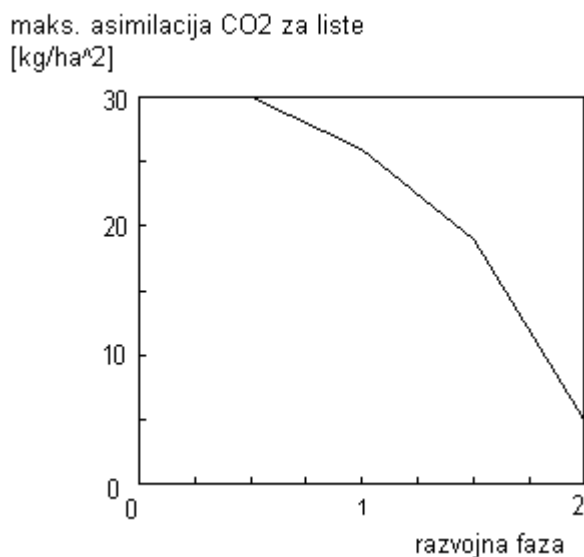
Rastline prilagajajo odprtost listnih rež. Asimilacijski proces je lahko omejen zaradi neoptimalnih temperaturnih pogojev in/ali zmanjšane dostopnosti CO<sub>2</sub> zaradi zaprtosti rež pri težnji po zmanjšanju transpiracije. Na grafu lahko vidimo, kako je maksimalna stopnja asimilacije CO<sub>2</sub> za liste odvisna od razvojne faze.

Maksimalna asimilacija pa mora biti popravljena s korekcijskim faktorjem za neoptimalne dnevne temperature, ki ga dobimo iz dnevni temperatur in značilnosti posameznih poljščin. Poleg tega na asimilacijo vplivajo tudi nizke nočne temperature. Ponoči se asimilati, ki so nastali čez dan, transformirajo v biomaso za izgradnjo, vendar pa nizke temperature ta proces ovirajo. Tudi to upošteva WOFOST z dodatnim korekcijskim faktorjem. Pri vodnem stresu model upošteva zmanjšano asimilacijo v odvisnosti od dejanske transpiracije.

Pri bazalnem metabolizmu se porablja energija iz nastalih ogljikovih hidratov (15 – 30 % vseh) za vzdrževanje obstoječih biostruktur (resinteza razgrajenih proteinov, vzdrževanje protonskih gradientov ...). Večja kot je metabolna aktivnost, višji so stroški. Zaradi precejšnjega deleža ogljikovih hidratov, ki se tu porabi, mora biti proces v modelu dobro opisan. Odvisen je od količine suhe snovi in hranil, razvojne faze, dnevni temperatur (za 10 °C višja temperatura pomeni 2-kratno povečanje respiracije – faktor Q10). To vnaša v model kar nekaj nezanesljivosti.

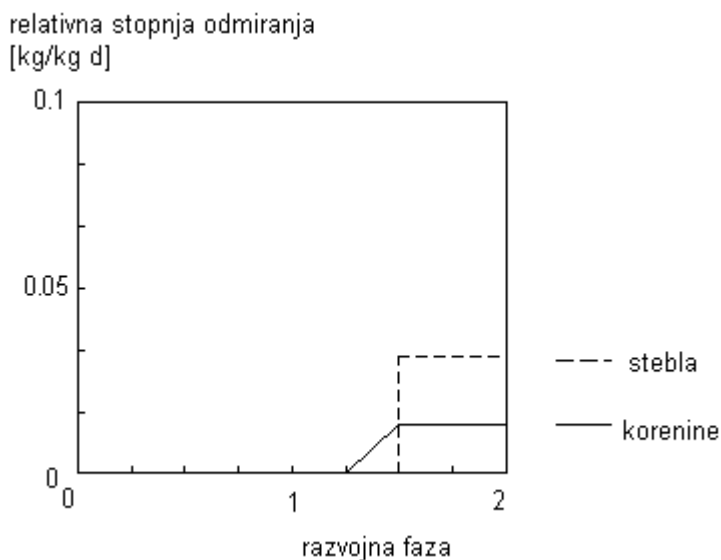
Ostali ogljikovi hidrati se porabijo kot gradbeni material, upoštevati pa je potrebno tudi stroške transporta. Rastni metabolizem tako določimo iz dnevne asimilacijske stopnje, kateri odštejemo bazalni metabolizem. Učinkovitost pretvorbe ogljikovih hidratov v gradbeni material za rastlino izračunamo kot uteženo povprečje učinkovitosti za posamezne organe. Rast suhe snovi določimo nato iz faktorja učinkovitosti in stopnje ravnega metabolizma.

Model upošteva še stopnjo odmiranja posameznih rastlinskih organov, ki je funkcija razvojne faze in je vrstno ter po organih specifična. Pri tem WOFOST predvideva, da založni organi ne odmirajo. Stopnja odmiranja je definirana kot dnevna količina žive biomase, ki ne sodeluje več v rastlinskih procesih. Pri steblih in koreninah jo določimo kot funkcijo razvojne faze.



**Slika 4:** Odvisnost maksimalne asimilacije CO<sub>2</sub> za liste od razvojne faze (0=vzno, 1=cvetenje, 2=zrelost).

**Figure 4:** Maximum leaf CO<sub>2</sub> assimilation rate as a function of development stage.

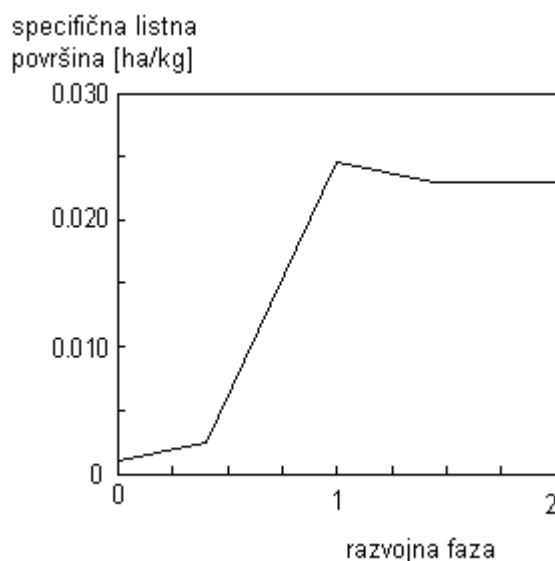


**Slika 5:** Odvisnost relativne stopnje odmiranja od razvojne faze (0=vzno, 1=cvetenje, 2=zrelost).

**Figure 5:** Root and stem death rate as a function of development stage.

Pri listih je nekoliko bolj zapleteno, predvsem zaradi senčenja, vodnega stresa in preseganja življenjske dobe. Listno površino in s tem indeks listne površine računa

model na precej zapleten način, v katerega se tu ne bomo spuščali, lahko pa vidimo potek razvoja na grafu.



**Slika 6:** Odvisnost specifične listne površine od razvojne faze (0=vznik, 1=cvetenje, 2=zrelost).

**Figure 6:** Specific leaf area as a function of development stage.

Poleg tega določa WOFOST še indeks zelene listne površine stebel in založnih organov, ki prav tako absorbirajo določen del sevanja, zaradi česar ga moramo dodati indeksu listne površine.

izračunih energije globalnega obsevanja, Gaussovi integraciji, linearni interpolaciji z AFGEN funkcijo, določanju datuma setve, CGMS bazi podatkov, uporabi meteoroloških podatkov ter podatkov o poljščinah in tleh v CGMS-u.

V posebnih prilogah k opisu modela si lahko natančno preberemo vse o enačbah, ki jih model uporablja, o

## 5 ZAKLJUČEK

Model WOFOST nam omogoča zelo različne izračune, pri katerih imamo tudi precej proste roke, katere vhodne podatke vstavimo. Izračuni so kompleksni, različne komponente se med seboj prepletajo. V model so zajeta tla, vreme in rastline, kar od nas zahteva velik nabor meritev, hkrati pa nam tudi ponuja najrazličnejše izhodne rezultate.

sprememb bi model kasneje (ko bi ga že na umerili ali pa vsaj ocenili napako) lahko uporabili za študijo primernosti različnih poljščin pri pričakovanih novih vremenskih razmerah na slovenskih tleh. Glede na trenutno stanje, ko so izgube v kmetijstvu zaradi suš, toče, neurij ... velike, je takšno raziskovalno delo zelo perspektivno, predvsem pa bi moralo biti tudi podprto in kasneje uporabljeno s strani poljedelcev. Za uresničitev take vizije pa bi potrebovali tudi intenzivno in kvalitetno obveščanje in motiviranje uporabnikov.

V drugem delu bomo predstavili uporabo modela in pripravili nekaj izračunov. Z vidika podnebnih

<sup>1</sup> univ. dipl. meteor., ARSO, Ljubljana, tjasa.pogacar@gov.si

<sup>2</sup> prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

## 5 LITERATURA

- Bakker, E. J., 1992. Rainfall and risk in India's agriculture. An ex-ante evaluation of rainfall insurance. Groningen theses in economics, management & organization (1992).
- Boogaard, H. L., Diepen C. A. van, Rötter R. P., Cabrera J. M. C. A., Van Laar H. H., 1998. WOFOST 7.1; User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Wageningen DLO Winand Staring Centre. Technical Document 52 (1998). 142 str.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering, 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88, 704-716
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B. and Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, pp. 309–332
- Diepen, C. A. van, Wolf, J., Keulen, H. van., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5 (1989):16-24.
- Diepen, C. A. van, Keulen, H. van, Penning de Vries, F. W. T., Noij I. G. A. M., Goudriaan, J., 1987. Simulated variability of wheat and rice in current weather conditions and in future weather when ambient CO<sub>2</sub> has doubled. Simulation reports CABO-TT 14. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen (1987).
- Driessen, P. M. The water balance of the soil. V: Keulen, H. van in Wolf, J. (Eds.), 1986. Modelling of agricultural production: weather, soils and crop. Simulation Monographs (1986): 76-116.
- Hargreaves, G. L., Hargreaves G. H., Riley, J. P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 111, 3 (1985):265-275.
- Heemst, H. D. J. van, 1986a. The distribution of dry matter during growth of a potato crop. *Potato Research*, 29 (1986):55-66.
- Hooijer, A. A., Bulens, J. D., Diepen, C. A. van, 1993. SC technical document 14.1. CGMS version 1.1. System description. Technical document 14.2 CGMS version 1.1. User manual. Technical document 14.3. CGMS version 1.1. Program description. DLO Winand Staring Centre, Wageningen in the Joint Research Centre, Ispra (1993).
- Hooijer, A. A., Wal, T. van der, 1994. CGMS version 3.1, user manual. Technical document 15.1. SC-DLO, Wageningen (1994).
- Huygen, J., 1992. SWACROP2, a quasi-two-dimensional crop growth & soil water flow simulation model. User's guide. WAU, Dept. of water resources, SC-DLO, Wageningen (1992).
- Janssen, B. H, Guilking, F. C. T., Eijk, D. van der., Smaling, E. M. A., Wolf J., Reuler, H. van., 1990. A system for quantitative fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46 (1990):299-318.
- Kajfež-Bogataj, L., 1996. Effects of climate warming on cereals-maize yield in Slovenia : sensitivity study. *Zb. Bioteh. fak. Univ. Ljublj., Kmet.* 1996 (67): 11-18
- Keulen, H. van, Wolf, J., (Eds.), 1986. Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen (1986).
- Koning, G. H. J. de, Diepen, C. A. van., 1992. Crop production potential of the rural areas within the European Communities. IV: Potential, water-limited and actual crop production. Technical working document W68. Netherlands scientific council for government policy, The Hague (1992).
- Lanen, H. A. J, Diepen, C. A. van, Reinds, G. J., Koning, G. H. J. de, Bulens, J. D., Bregt, A. K. 1992. Physicalland evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities. *Agricultural systems*, 39 (1992):307-328.
- Mellaart, E. A. R., 1989. Toepassing van gewasgroei-simulatiemodellen voor risico-studies in sahellanden (The application of crop-growth simulation models for risk-studies in Sahelian countries). V: Huijbers, C.,
- Lingsma, S. P. in Oudkerk, J. C. (Eds.) Informatica toepassingen in de agrarische sector, voordrachten VIAS-Symposium (1989): 141-154.
- Poels, R. L. H., Bijker, W., 1993. TROPFOR, a computer programme to simulate growth and water use of tropical rain forests developed from the "WOFOST" programme. Wageningen University, Dept. of Soil science and geology (1993).
- Pogačar, T. in Kajfež Bogataj, L., 2009. WOFOST: model za napovedovanje pridelka – 2. del. *Acta agric. Slov.* [Tiskana izd.], 2009, let. 93, št. 2, str. 245-257.
- Prescott, J. A. , 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64 (1940):114-118.
- Raaij, B. F. T. van, Wal, T. van der, 1994. CGMS 3.1. technical description. SC technical document 15.3. Q-Ray Agrimatica and DLO Winand Staring Centre, Wageningen in the Joint Research Centre, Ispra (1994).
- Ritchie J.T., Otter, S., 1984. Description and performance of CERES-Wheat a user-oriented wheat yield model USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory Temple TX, 159–175.
- Spitters, C. J. T., Keulen, H. van, Kraalingen, D. W. G. van, 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. V: Rabbinge, R., Ward, S. A. in Laar, H. H. van (Eds.). 1989. Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen (1989).
- Stöckle, C., Donatelli, M. and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, pp. 289–307
- Supit, I., 1994. Global radiation. Publication EUR 15745 EN of the Office for Official Publications of the EU (1994).

- Supit, I., Goot, E. van der, 2008. Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model, dokument za Evropsko komisijo. <http://supit.net/main.php?q=aXRlbV9pZD01OQ==> [Uporabljeno 23. 7. 2008].
- Supit, I., Hooijer, A. A., Diepen, C. A. van, (Eds), 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Publication EUR 15956 EN of the Office for Official Publications of the EU (1994).
- Supit, I., Kappel, R. R. van., 1998. A simple method to estimate global radiation. *Solar Energy*, 63:147-160.
- Thornley, J.H.M. and Johnson, I.R., 1990. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford University Press, 684 p.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L. and Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18, pp. 201–234.
- van Keulen H. and N.G. Seligman, 1987. Simulation of water use nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen (1987).
- Wal, T. van der, 1994. Data installation guide and operators manual. SC technical document 15.2., DLO Winand Staring Centre, Wageningen in Joint Research Centre, Ispra (1994).
- Weir P.L. Bragg, J.R. Porter and J.H. Rayner, 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci. Cambridge* 102 (1984), pp. 371–382.
- Whisler, R., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion and V.R. Reddy, 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40 (1986), pp. 141–208.
- Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry and D.A. Spalton, 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE* 32 (1989), pp. 497–511
- Wolf, J., Diepen, C. A. van, 1991. Effects of climate change on crop production in the Rhine basin. Report 52. RIZA, SC-DLO, Wageningen (1991).
- Wolf, J., Diepen, C. A. van., 2007. Effects of climate change on yield potential of wheat and maize crops in the European Union. *Studies in Environmental Science*, Volume 65, Part 2 (2007): 745-750.
- Wolf, J., 1993. Effects of climate change on wheat and maize production potential in the EC. V: Kenny, G. J., Harrison, P. A. in Parry, M. L. (Eds.). The effect of climate change on agricultural and horticultural potential in Europe. Research report 2. Environmental change unit, University of Oxford (1993).
- Wolf, J., Berkhout, J. A. A., Diepen C. A. van, Immerzeel, C. H. van , 1998. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system. V: Bouma, J. in Brecht, A. K. (Eds.). Land qualities in space and time, proceedings of a symposium organized by the International society of soil science (ISSS), Pudoc, Wageningen (1989): 209-215.