

Effecten van vochthuishouding en bodemtemperatuur op de aardappelplant

Postbus 7001
6700 CA Wageningen
Agro Business Park 65
6708 PV Wageningen

Telefoon 0317 49 15 78
Fax 0317 46 04 00

www.delphy.nl

Zetmeelaardappelteelt onder droge en warme condities

Worldwide Expertise for Food & Flowers



De ideeën en voorstellen in dit document zijn, voorzover deze niet al vooraf door de opdrachtgever/financier zijn geformuleerd, eigendom van Delphy. Zonder schriftelijke toestemming van Delphy is het niet toegestaan om in welke vorm ook (delen van) dit document aan derden voor te leggen.

© Delphy, 28 februari 2019.

In opdracht van en gefinancierd door
Brancheorganisatie Akkerbouw
Louis Braillelaan 80
2719 EK Zoetermeer

Datum
28 februari 2019

Projectnummer
18062

Versie
1

Uitgevoerd door
Delphy BV
Jacob Dogterom, Saskia Houben, Johan Wander
Agro Business Park 65
6708 PV Wageningen

Inhoudsopgave

1	Inleiding en doel	5
2	Theoretische achtergrond	6
2.1	Optimale groeiomstandigheden voor <i>Solanum tuberosum</i>	6
2.2	Samenhang tussen omgevings- en bodemtemperatuur en vochthuishouding	11
2.3	Belang van bemesting	16
2.4	Irrigatiemanagement	17
2.5	Irrigatie in het buitenland	18
2.6	Overige teeltmaatregelen	19
3	Kennis en ervaring Delphy huidige praktijk	21
3.1	Zetmeelaardappelen	21
3.2	Eerste berekening	21
3.3	Temperatuur en doorwas	21
3.4	Temperatuur en berekening	22
3.5	Beregeningscapaciteit	22
3.6	Hoeveelheid berekening	22
3.7	Gewasverdamping en capillaire werking	23
3.8	Effect op opbrengst en zetmeel, bijbemesten	23
3.9	Bodemtemperatuur	23
3.10	Drip t.o.v. haspelberegenen	23
3.11	Beregeningsboom	24
3.12	Waterkwaliteit	24
3.13	Bodemsamenstelling / eigenschappen	25
3.14	Andere maatregelen	25
4	Verkenning van oplossingsrichtingen	26
5	Conclusies en aanbevelingen	30
	Referenties	31

Samenvatting

Water is cruciaal voor een goede teelt, zeker in een teelt als zetmeelaardappel waarbij de planten in ruggen groeien, een relatief ondiepe bewortelingsdiepte (40-60 cm) hebben en de vochthuishouding en temperatuur bepalend zijn voor de inhoudsstoffen (suiker- en zetmeelgehalte) van de knollen. Met de klimaatverandering ontstaan hogere temperaturen, langere perioden van droogte en korte perioden van veel neerslag, waardoor goed beheer van het microklimaat belangrijker wordt. Irrigatie voor koeling en vochtvoorziening wordt daarmee belangrijker. Om de zetmeelaardappelteelt onder warmere en drogere groeiomstandigheden op voldoende niveau te houden, wordt in deze literatuurstudie onderzocht wat de effecten van irrigatie, temperatuur, zonnestraling en gerelateerde maatregelen zijn op de aardappelplant. Op basis van deze gegevens en ervaringen uit gebieden waar aardappelen reeds onder warme en/of droge omstandigheden worden geteeld, wordt richting gegeven voor aanpassingen van de Nederlandse zetmeelaardappelteelt. De optimale omgevingstemperatuur voor het bovengrondse deel van de aardappelplant ligt tussen de 20-25°C en de optimale bodemtemperatuur voor de knollen ligt tussen de 15-20°C. Over het algemeen geldt voor zowel een optimale kwaliteit als opbrengst dat de plant in elk stadium voldoende vocht dient te hebben; een tekort leidt tot verminderde kwaliteit en/of opbrengst. Een combinatie van de groei beperkende factoren droogte en hoge temperatuur kunnen bovendien de impact verergeren. De aardappelplant heeft verschillende reacties op deze stressen, afhankelijk van veel factoren zoals het ras. Zo is het ook in staat om een achterstallige groei door droogte te compenseren wanneer er tijdig weer neerslag valt, maar dan kan de kwaliteit wel minder zijn. Droogte wordt beperkt door een gezonde bodem, een goed sluitend bladerdek en de inzet van irrigatie. Irrigatie kan ook worden ingezet om de bodem en het gewas te koelen. Voor zowel droogte als hoge temperaturen is een goede monitoring door het seizoen en afstemming van de watergift hierop van groot belang. Ook de bemesting moet hierop worden aangepast, zodat de plant niet alleen water opneemt en zo een stikstoftekort oploopt. Overige teeltmaatregelen kunnen bijdragen maar zijn in de huidige Nederlandse situatie niet altijd rendabel of het effect is nog niet duidelijk en vereist verder onderzoek. Naast teeltmaatregelen ligt een van de oplossingsrichtingen in veredeling, door te onderzoeken welke eigenschappen van een optimaal presterend ras hieraan bijdragen, en of een dergelijk ras ook goed presteert onder 'normale' omstandigheden.

1 Inleiding en doel

Water is cruciaal voor een goede teelt, zeker in een teelt als zetmeelaardappel waarbij de planten in ruggen groeien, een relatief ondiepe wortelingsdiepte (40-60 cm) hebben en de vochthuishouding en temperatuur bepalend zijn voor de inhoudsstoffen (suiker- en zetmeelgehalte) van de knollen. Met de klimaatverandering ontstaan hogere temperaturen, langere perioden van droogte en korte perioden van veel neerslag, waardoor goed beheer van het microklimaat belangrijker wordt. Tijdens droogte blijkt in de praktijk dat voldoende beregenen niet altijd resulteert in een vitaal en productief aardappelgewas. Zo kunnen enkele dagen van extreem hoge temperaturen als 35°C blijvend nadelige gevolgen hebben voor de ontwikkeling van de knollen. Irrigatie voorziet de plant niet alleen van voldoende vocht maar heeft ook een verkoelende werking op de bodem en activeert fysiologische processen in de plant, zoals koeling via verdamping. Bovendien heeft de vochthuishouding ook weer invloed op de beschikbaarheid van voedingsstoffen en bodemprocessen. Kortom, timing, hoeveelheid en wijze van toediening van zowel water als bemesting en andere teeltmaatregelen zijn bepalend voor opbrengstzekerheid.

Om de zetmeelaardappelteelt onder warmere en drogere groeiomstandigheden op voldoende niveau te houden, wordt in deze literatuurstudie onderzocht wat de effecten van irrigatie, bodemtemperatuur en gerelateerde maatregelen zijn op de aardappelplant. Samenhangende factoren zoals zonnestraling en omgevingstemperatuur worden daarbij meegenomen. Op basis van deze gegevens en ervaringen uit gebieden waar aardappelen reeds onder warme en/of droge omstandigheden worden geteeld, worden alternatieve teelt- en irrigatiesystemen voorgesteld voor integratie in de Nederlandse teelt. Het doel is om passende maatregelen te vinden die bijdragen aan voldoende watervoorziening en beheersing van de temperatuur, om de groeiomstandigheden te optimaliseren, rekening houdend met perioden van droogte en hoge temperaturen.

2 Theoretische achtergrond

2.1 Optimale groeiomstandigheden voor *Solanum tuberosum*

De aardappelplant ontwikkelt zich het best bij een temperatuur van ongeveer 20°C (Rykaczewska, 2015), tijdens koele maar vorstvrije seizoenen en ondervindt nadelen van hitte (Bodlaender 1963; Bodlaender et al. 1964; Hijmans 2003). Een hogere temperatuur kan grote consequenties hebben voor de opbrengst, afhankelijk van het ras. Daarbij moet onderscheid worden gemaakt in de omgevingstemperatuur en de bodemtemperatuur. Zo blijkt uit experimenten in klimaatkamers dat de optimale temperatuur voor het bovengrondse deel van de aardappelplant zo'n 5°C hoger ligt (20-25°C) dan voor de knolontwikkeling (15-20°C) (Marinus and Bodlaender 1975; Struik et al. 1989a; 1989b; Rykaczewska 1993; Van Dam et al. 1996).

In tabel 1 is algemene informatie over optimale en stressvolle groeiomstandigheden met betrekking tot droogte, hitte en verzilting weergegeven, met daarbij het effect op de opbrengst en kwaliteit (George, et al., 2017).

Tabel 1. Optimale en stressvolle condities voor de abiotische stress hitte, droogte en verzilting met daarbij de impact op opbrengst en kwaliteit van aardappelen, aangevuld met reacties van de plant op deze factoren (George et al., 2017).

Stress and impact of climate change	Definition/conditions	Effects on yield and quality	Physiological response	Molecular response	References
Heat					
Extreme heat effects (heat waves)	6 °C required for sprouting, 18 to 20 °C optimum for tuber growth, 27 °C for haulm growth	High temperature reduces tuber bulking rate	Increased temperature leads to greater ET thus decreased WUE	Expression of heat-shock proteins (HSPs, e.g. HSc70) which act as	1. Levy and Veilleux 2007
Basal temperature effects	Temperature optimum of 20 °C for photosynthesis in potatoes, reducing rapidly above this point	Temperature outside the optimum reduces tuberization	Tuberization inhibited at high temperature	molecular chaperones to prevent protein denaturation and aggregation under heat stress	2. Naresh Kumar et al. 2015
(1) General effects on phenology	Optimum soil temperature of 15 to 18 °C.	Low night temperature increases number of tubers per plant.	Increasing temperature leads to quicker development and earlier flowering time.		3. Ahuja et al. 2010
(2) Passing critical thresholds for optimal growth	Soil temperature > 18 °C combined with high atmosphere temperature particularly detrimental	High night time temperature reduces yield	High temperature effects cell anatomy, changing shape of chloroplasts, swelling of stromal lamellae, clumpy vacuoles which effect thylakoid organisation and produce antennae depleted		4. Craufurd and Wheeler 2009
Shifts in temperature of particular seasons or night/day	Interaction with light intensity-low light intensity lower optimum soil temperature	Internal brown spots or chocolate spots are increased at high temperature	PSII reducing photosynthesis and respiration.	Impacts on growth regulators e.g. high ratio of GA:ABA increases haulm growth (e.g. POTH1 transcription factor)	5. Hannapel et al. 2004
Interactions with water stress and salinity	Irreversible loss of photosystem II seen at 38 °C. But, if acclimated to sublethal high temperature (e.g. 35 °C) then > 40 °C is tolerated	Heat necrosis occurs at high soil temperature	Heat sensitive genotypes have faster rates of dark respiration than tolerant.	Impacts on tuber growth (e.g. ADPG pyrophosphorylase stopping tuber growth)	6. Mares et al. 1981
		reduced dry matter content.	Temperature effects assimilate partitioning switching from tubers to roots and haulms above 20 °C	Sucrose synthase depressed more in tubers in heat susceptible genotypes	7. Lafta and Lorenzen 1995
		Tuber cracking noted after short periods of high temperature	Conversion of sugar to starch is inhibited at high temperature leading to		8. Krauss and Marschner 1984
		High temperatures increase level of steroidal glycoalkaloids and bitter taste			9. Hancock et al. 2014
		Mild heat stress shows increased accumulation of amino acids in tubers, which may promote			10. Lipiec et al. 2013
					11. Bita and Gerats 2013
					12. Vollenweider and Günthardt-Goerg 2005
					13. Hua 2009
					14. Tian et al. 2009
					15. Smertenko et al. 1997; Potters et al. 2007
					16. Rasheed 2009

Table 1 (continued)

Stress and impact of climate change	Definition/conditions	Effects on yield and quality	Physiological response	Molecular response	References
		the Maillard reaction which affects colour, aroma, flavour and acrylamide accumulation upon cooking Tuber quality issues exacerbated by interactions between heat and drought	accumulation of sugar at phloem unloading sites and decline in sink strength and tuber bulking. Heat leads to production of ROS that may interfere with starch synthesis Heat and drought stress impact the function of PSII by decreasing electron transport, removal of external proteins and release of Ca and Mg ions from binding sites. Extreme heat leads to physiological injury—scorching of leaves and stems, leaf abscission, shoot and root growth inhibition. Also elongation of hypocotyls and petioles similar to shade avoidance. By causing cell membrane damage heat leads to reorganisation of microtubules and the cytoskeleton changing cell differentiation elongation and expansion.	(tuberization signal) under mild temperature stress Increased fluidity of membranes activates lipid based signalling cascades and increased Ca influx 5% of the transcriptome is upregulated by heat stress and only a small proportion is heat-shock chaperones. Most proteins are involved in primary and secondary metabolism, translation, transcription and regulation of stress responses; calcium and phytohormone signalling, sugar and lipid signalling or protein phosphorylation Heat stress leads to transient activation of repetitive elements or silenced gene clusters in centromeric regions by downregulating epigenetic gene silencing by remodelling the heterochromatin	17. Larkindale and Vierling, 2008; Saïdi et al. 2011 19. Lang-Mladek et al. 2010; Pecinka et al. 2010 20. Trapero-Mozos et al. 2017

Table 1 (continued)

Stress and impact of climate change	Definition/conditions	Effects on yield and quality	Physiological response	Molecular response	References
Drought					
<i>Direct effects</i>					
Water deficit for transpirational cooling	-45 kPa soil matrix potential is classed as severe water stress,	Drought leads to reduced accumulation of dry matter and tuber yield	Water deficit leads to stomatal closure and reduced CO ₂ fixation and transpiration which will have a knock effect on heat stress	Antioxidant genes—superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase, glutathione peroxidase, peroxiredoxin	1. Levy et al. 2013 2. Schafleitner et al. 2011
Water deficit for cellular function	-25 kPa is adequate	Drought is most critical at emergence and tubenization	Production of larger and altered root system, changes in root length, targeting of wet zones of soil (depth)	NFYA5 and OCP3 are ABA sensitive transcript associated with stomatal closure	3. Levy 1985 4. Wang et al. 2007 5. Martinez and Moreno 1992
<i>Indirect effects</i>					
Water deficit leading to soil strength	Water deficit occurs when tissue water potential is -0.4 to -2.0 MPa	Drought increases the tuber protein and ascorbate content	Suberization of roots in dry zones	SAL1 inactivation results in altered osmoprotectants, leaf RWC and maintenance of viable tissue during drought	6. Lynch and Tai 1989 7. Wang and Frei 2011 8. Monneveux et al. 2013
Water deficit leading to osmotic stress	Water deficit leading to soil strength (> 1 MPa)	Drought has detrimental effects on tuber shape producing dumbbell, knobby or pointy tubers	ABA production in roots and transport to shoots through xylem causing inhibition of shoot growth and stomatal closure	MYB96 involved in ABA Auxin crosstalk and impacts lateral root formation under drought	9. Teixeira and Pereira 2007
Water deficit leading to reduced nutrient delivery	-0.8 MPa is considered an intense drought stress		Root hydraulic conductance - cell permeability and aquaporin expression	DREB2A involved in regulation of a number of drought related genes—overexpression led to enhanced drought tolerance	10. Andre et al. 2009 11. Gandar and Tanner 1976; 12. Ackerson et al. 1977
			Changes with root age, gradually declining	tolerance—associated with post-transcriptional regulation of genes (ubiquitination)	13. Shimshi et al. 1983 14. Lipiec et al. 2013
			Production of aquaporins	Transgenic expression of polyamines as osmoregulating compounds has shown enhanced tolerance to abiotic stress	15. Kondrak et al. 2011 16. Shin et al. 2011
			Change in rhizosphere conditions through production of root exudates and mucilage	Overexpression of ROS scavenging enzymes has shown increased abiotic	17. Eltayeb et al. 2011 18. Ahmad et al. 2010 19. Gawronska et al. 1992
			Greater proline and sucrose accumulation (reduced conversion to starch) in tubers		20. Lafa and Lorenzen 1995

Table 1 (continued)

Stress and impact of climate change	Definition/conditions	Effects on yield and quality	Physiological response	Molecular response	References
Salinity					
<i>Direct effects</i>					
Osmotic effects on plant cells	EC 6 to 9 dS/m produces salt stress	Reduced tuber yield due to impacts on photosynthesis	Reduce leaf number and size Production of epicuticular waxes Cell wall elasticity	stress tolerance (likely effective for heat, drought and salinity)	21. Fleisher et al. 2008b
Impact of toxic elements on cell function	30 to 200 mM NaCl 40 mM Na ₂ SO ₄	Impact on yield reduced if salinity imposed well after establishment Browning and cracking of tuber surface	Generation of toxic metabolites Heat and drought stress impact the function of PSII by decreasing electron transport, removal of external proteins and release of Ca and Mg ions from binding sites		22. Vos and Haverkort 2007
<i>Indirect effects</i>					
Impact on the hydraulic conductivity of roots		Increased tuber protein content Interactions with heat and light intensity impact salt tolerance	Reduced relative leaf water content, leaf stomatal conductance and transpiration rate	Upregulation of ADP ribosylation factor-like proteins Proteins which were also upregulated by cold stress, drought and ABA	1. Shaterian et al. 2005 2. Kim et al. 2003 3. Ryu et al. 1995 4. Pruvot et al. 1996 5. Teixeira and Pereira 2007
Impacts on soil pH and physical conditions effecting nutrient availability and soil structure and water relations		Early maturing types more susceptible to salt stress	Thylakoid swelling and reduced grana stacking Changes in chloroplast structure Suppression of nitrate reductase Yellowing of leaves due to ion (Cl, Na, B) toxicity Restricted water uptake by roots due to osmotic potential Shift from protein and carbohydrate to proline production	Transgenic expression of glyceraldehyde 3 phosphate dehydrogenase gene conferred salt tolerance Expression of DREB1A gene conferred salt tolerance Upregulation of general stress and defence proteins Accumulation of ROS, salt-induced transcription factors, peroxisomes, appoplactic proteins, glycolytic enzymes	6. Jeong et al. 2001 7. Celebi-Toprak et al. 2005 8. Aghaei et al. 2008 9. Ahuja et al. 2010

2.2 Samenhang tussen omgevings- en bodemtemperatuur en vochthuishouding

Verband tussen vochtvoorziening en temperatuur

Zowel vochthuishouding als temperatuur zijn van grote invloed op de plantgezondheid, de opbrengst en kwaliteit. Droogte kan bovendien de negatieve impact van hitte versterken. Naast de rassenkeuze, het moment in het groeistadium en de tijdsduur van de blootstelling aan hitte bepaalt de vochthuishouding in zekere mate de impact van hitte: de negatieve impact van hogere temperaturen blijkt lager te zijn wanneer de vochthuishouding in de bodem goed is. Een combinatie van hitte en droogte tijdens het bloeistadium kan bijvoorbeeld – naast een verminderde productie – resulteren in een tweede knolvorming/doorwas (Rykaczewska, 2015).

Hoofdzakelijk kan het volgende worden geconstateerd met betrekking tot de effecten van droogte en hitte op de aardappelopbrengst en -kwaliteit:

- De temperatuur en waterbeschikbaarheid hoeven niet extreem te zijn om de productie nadelig te beïnvloeden;
- Opbrengst en kwaliteit worden met name beïnvloed tijdens de knolzetting;
- Alle abiotische stressfactoren hebben een grote impact op productie en kwaliteit doordat de fotosynthese wordt beïnvloed;
- Hitte- en droogtestress hebben veel gemeenschappelijke fysiologische en enkele moleculaire reacties;
- Stressreacties van de plant op een stressfactor zoals hitte of droogte kunnen de effecten van andere stressfactoren verergeren;
- Veel stressfactoren werken in de praktijk op elkaar in en planten zullen verschillende soorten stress tegelijkertijd ervaren (George et al., 2017).

Effecten van een verhoogde temperatuur

Een verhoogde temperatuur beïnvloedt veel processen in de fysiologie van de aardappelplant. Een temperatuur boven het optimum (20-25°C) resulteert in een intensievere ontwikkeling van de bovengrondse delen van de plant (Rykaczewska, 2015, 2013b; Bodlaender 1963; Benoit et al. 1983; Struik et al. 1989a; Gawrońska et al. 1992; Kooman and Haverkort 1995; Van Dam et al., 1996) en gemiddelde bodemtemperaturen van boven de 18°C verlagen de knolopbrengst substantieel (George et al., 2017). Onder te hoge temperaturen van 28-33°C, neemt de respiratiesnelheid dermate toe dat de afname in droge stofproductie gelijk staat aan de droge stofaanvoer uit fotosynthese. De plant stopt met groeien en als gevolg daarvan de knollen (Haverkort, 2018). Het fotosynthesevermogen van de plant wordt ook verlaagd door een hogere temperatuur.

Overall in het groeiseizoen leiden hoge temperaturen tot een lagere droge stofproductie. Welke reactie een aardappelplant heeft op hogere temperaturen hangt wel sterk af van het groeistadium waarbij de hogere temperatuur optreedt. Een hoge temperatuur tijdens de knolvulling heeft bijvoorbeeld effect op de kiemrust en kan resulteren in spruiten van de knollen nog voordat ze worden geoogst. Dit geeft doorwas. Over het algemeen kan wel worden gesteld dat hoe eerder in

het seizoen hitte optreedt, hoe negatiever de impact op de groei en uiteindelijk de opbrengst is (Rykaczewska, 2015).

Wanneer zich eenmaal knollen hebben gevormd, kunnen bij hoge temperaturen twee tegenstrijdige processen spelen in de plant. Een hoge temperatuur kan zorgen voor juist meer bladonderhoud ten opzichte van knolgroei maar kan ook resulteren in verkorting van de levensduur van de bladeren, vooral als er al weinig droge stof naar de nieuwe bladeren is gegaan. Of een hogere temperatuur resulteert in een langere of juist kortere levensduur hangt af van vele factoren, zoals het ras, vochtvoorziening en het groeistadium. Uitlopers en knolontwikkeling worden vooral bepaald door de daglengte en worden vertraagd door temperaturen boven het optimum. Ongeveer 22°C als luchttemperatuur is optimaal voor knolontwikkeling en knolzetting, bij temperaturen hierboven vormen de stammen minder knollen (Haverkort, 2018). De optimale bodemtemperatuur voor knolontwikkeling ligt tussen de 15 en 20°C (Marinus and Bodlaender 1975; Struik et al. 1989a; 1989b; Rykaczewska 1993; Van Dam et al. 1996).

Omdat het signaal voor knolzetting wordt geremd bij hogere temperaturen is vooral de knolontwikkeling gevoelig voor temperatuursverhoging (Ewing, 1981; Hancock et al., 2014). Ook het transport van koolstof naar de verschillende organen in de aardappelplant is temperatuurgevoelig, met als resultaat dat er minder koolstof wordt omgezet in zetmeel in de knollen (Wolf et al., 1991), wat vervolgens ook weer zorgt voor een verlaagd sucrosetransport naar de knollen. Daarnaast resulteert een hogere temperatuur in verschillende knolaandoeningen zoals vreemde vormen, kettingknolzetting of een tweede knolzetting. Hittestress brengt de source-sink relatie in onbalans, vertraagt de knolvorming en bulken, en verlaagt de kwaliteit van de aardappels door bijvoorbeeld necrose (George et al., 2017; Levy en Veillieux, 2007). Bovendien is een hoge temperatuur gerelateerd aan negatieve effecten op de schilvorming (Molteberg 2017) en is de kleur van stammen, huid en vruchtvlees lichter door een verminderde anthocyaninesynthese. Als de knollen na een hittegolf weer beginnen te groeien, kan doorwas plaatsvinden. De secundaire knollen groeien dan deels ten koste van de hoofdknollen waardoor deze (gedeeltelijk) glazig kunnen worden. Deze glazige delen hebben een verhoogde concentratie reducerende suikers, glucose en fructose, nadelig voor de kwaliteit van vooral consumptieaardappelen (Haverkort, 2018). Kortom, een temperatuur boven het optimum heeft een complexe reeks van negatieve effecten op zowel de opbrengst als kwaliteit van aardappelen.

Effecten van droogte

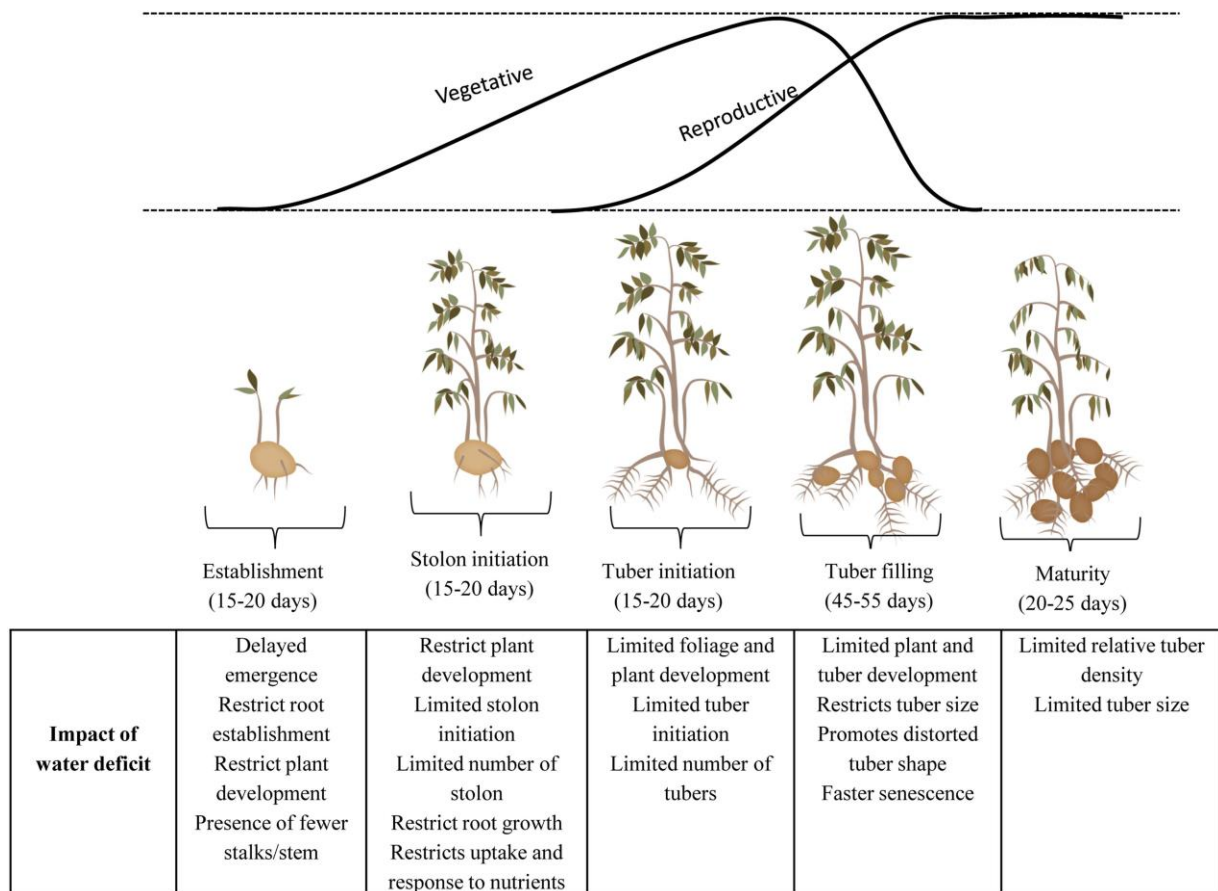
Droogtegevoeligheid van aardappelen is vooral toe te schrijven aan het feit dat de plant met haar oppervlakkige en beperkte wortelstelsel niet goed in staat is om voldoende water op te nemen, en aan het onvermogen van het fotosynthesemechanisme om te herstellen na water- en hittestress (Iwama en Yamaguchi, 2006). Bij droogtestress zal een aardappelplant reageren door het vermijden of tolereren van de droogte.

Net als temperatuur heeft droogte effect op veel fysiologische processen in de plant, alsmede op bodemprocessen. Een verdroogde bodem verandert de morfologie van het wortelstelsel van de aardappelplant (Wishart et al. 2013, 2014), zoals een toename van vertakkingen in de wortels en meer naar de zijkant groeiende wortels, een verminderde wortelgroei en dikkere wortels. In eerste instantie stimuleert een verdrogende bodem de 'hydraulische geleidbaarheid' van de wortel (het vermogen van de wortels om water op te nemen), maar constante wateropname laat de

hydraulische geleidbaarheid later juist weer afnemen (om verlies van vocht aan de bodem te voorkomen) (Maurel et al., 2010). Op de lange termijn neemt de geleidbaarheid verder af en na lange perioden van droogte kan de hydraulische geleidbaarheid in de plant nog verder worden gereduceerd door afsluiting van de xyleemvaten door lucht, wat de sapstroom verstoort (Cruiziat en Cochard, 2002).

Een plant kan een scala aan mechanismen om droogte te tolereren combineren (Ludlow, 1989) maar hieraan kunnen belangrijke trade-offs zijn verbonden. Zo kan een plant de stomata (huidmondjes) sluiten om minder water te verdampen maar dit vermindert eveneens de fotosyntheseassimilatie (Obidiegwu et al., 2015). Bij droogte neemt de temperatuur in de bladeren toe, doordat de plant niet meer kan transpireren. De fotosynthese wordt minder en de plant gaat meer respireren, met een geremde groei als gevolg (Haverkort, 2018). Bovendien geldt dat hoe droger de lucht, hoe meer vocht door de lucht wordt geabsorbeerd van het bladoppervlak, vocht uit de plant dat moet worden gecompenseerd met vocht uit de bodem.

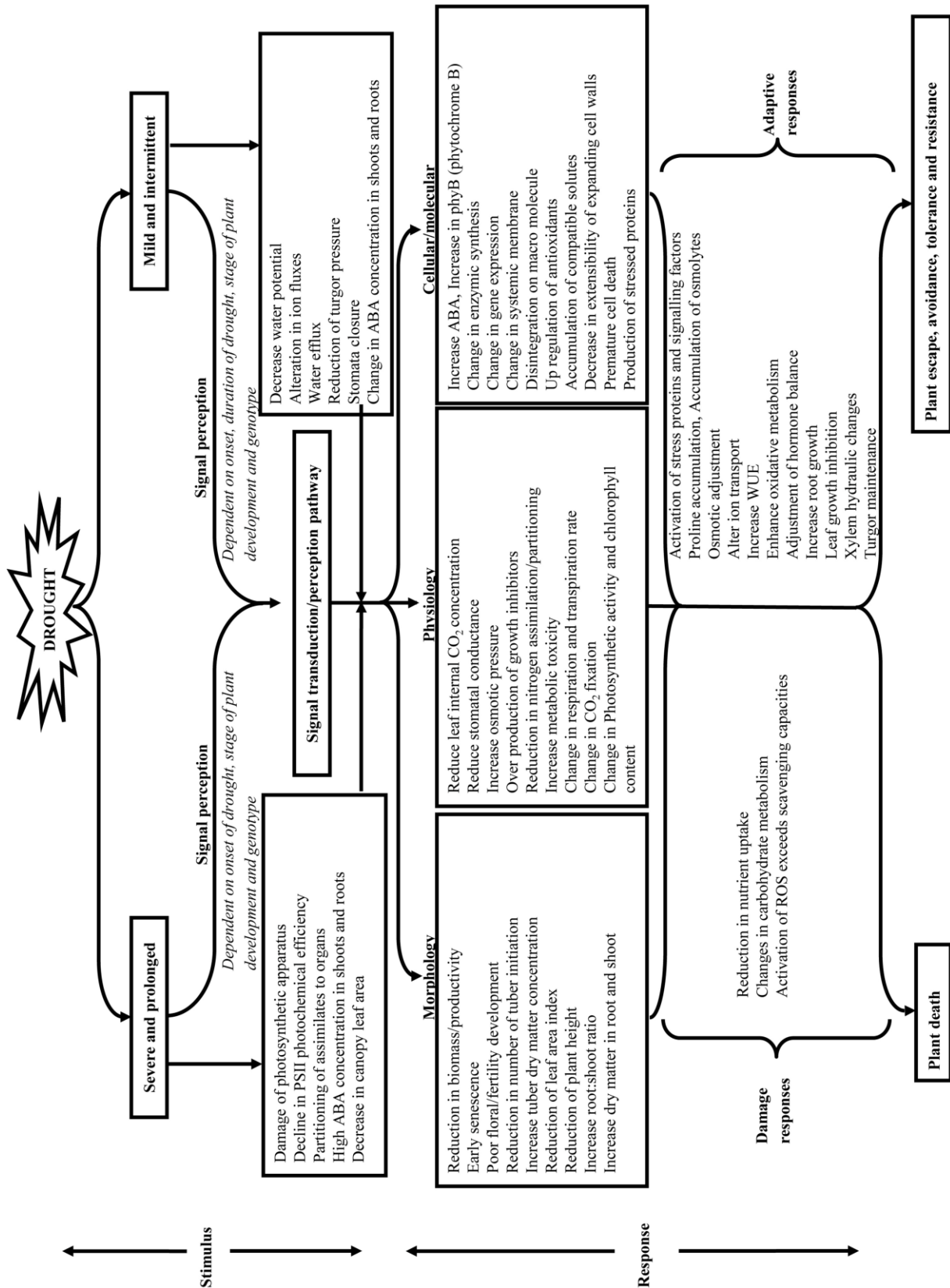
Ook bij droogte geldt weer dat het moment in het groeistadium voor een groot deel de impact bepaalt. In figuur 1 zijn de consequenties van een watertekort tijdens de verschillende groeistadia gegeven. Deze figuur laat zien dat een goede timing en dosering van water belangrijk is. Zo is het bijvoorbeeld tijdens de eerste fase goed om de vochtvoorziening enigszins te beperken zodat de plant gestimuleerd wordt om een goed, diep wortelstelsel te ontwikkelen, maar heeft ook in deze periode een tekort weer negatieve gevolgen. Droogte die optreedt tijdens de knolvullingsfase zorgt over het algemeen voor de grootste opbrengstderving omdat de plant meer transpireert, minder bladeren vormt en waarschijnlijk vroegtijdig bladeren verliest (Haverkort en Goudriaan, 1994). Een tekort aan vocht in de bodem aan het begin van het groeiseizoen leidt tot minder aardappelen; in een vochtige bodem vormen zich meer uitlopers waarvan er bovendien meer een knol produceren. Daar komt bij dat het begin van het groeiseizoen ook voor wat betreft temperatuur een kritieke periode is. Er ontstaan anders defecten zoals suikereinden (hoge suikergehalten in de knol, vooral negatief voor consumptieaardappelen) (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*). Als er na de knolvorming een droogte volgt, sterven relatief veel pas gevormde knollen af met als resultaat grotere knollen. De relatie tussen vochtvoorziening en opbrengst is sterk. Als de hoeveelheid neerslag of irrigatie tijdens de eerste 60 dagen na planten is verdubbeld (tot het optimum), blijkt het aantal knollen per stam ook min of meer te verdubbelen (Haverkort, 2018).



Figuur 1. Effecten van een watertekort tijdens verschillende groeistadia van de aardappelplant (Obidiegwu, 2015)

De *timing* van droogte in het groeiseizoen kan een aanzienlijk grotere impact hebben op de biomassa en opbrengst dan de *intensiteit* van de droogte (Pinheiro and Chaves, 2011). Zie figuur 2 voor de gevolgen van intense, langdurige droogte ten opzichte van milde, kortdurende droogte.

Als vuistregel kan worden aangehouden dat het aardappelgewas ongeveer 1 ton produceert met elke 10 mm vocht dat het verdampt en transpireert; water dat beschikbaar is vanuit de bodem en irrigatie of regenval (Haverkort, 2018).



Figuur 2. Gedetailleerde schematische weergave van de effecten die verschillende soorten droogte hebben en hoe aardappelplanten daarop reageren op moleculair, fysiologisch en morfologisch niveau (Obidiegwu et al. 2015).

Hoewel kan worden verondersteld dat een snelle ontwikkeling van het bladerdek en maximale bedekking gunstig is voor de productiviteit, blijkt uit onderzoek van Struik en Wiersema (1999) en Aliche et al. (2017) dat een snelle algemene groei niet per definitie leidt tot de hoogste opbrengst, onder stresscondities zoals droogte. Wel is een goede bodembedekking van belang om de temperatuur in de bodem laag te houden, door beperking van zonnestraling op de bodem.

Om een verlaagde knolopbrengst door droogte te beperken moet de bladerdekgroei gebalanceerd worden met de knolgroei. Een manier waarop planten dit kunnen bereiken is het vertragen van een exponentiële bladerdekgroeisnelheid en maximale bedekking. In het algemeen zijn genotypen die laat volwassen worden beter in staat om hun bladerdek aan te passen op de knolgroei tijdens droogte (Aliche et al. 2017). Bij het ontwikkelen van droogteresistente rassen is het goed om hier rekening mee te houden.

Invloed van zonnestraling

Zonnestraling kan de temperatuur in zowel het blad als een onbedekte bodem verhogen. Omdat de optimumtemperatuur in de bodem 15-20°C is en de omgevingstemperatuur voor fotosynthese optimaal is bij 20-25°C, wordt gestreefd naar een volledige loofdekking en wordt aanbevolen te irrigeren voor koeling wanneer de temperaturen boven de 30°C komen (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*). Het percentage loofdekking is ook een bepalende factor voor de hoeveelheid lichtinterceptie, wat de fotosynthetische capaciteit van de plant en knolvulling beïnvloedt (Barreda et al., 1996; Li, 2012; Navarre en Pavek, 2014; Steyn et al., 2007).

Wanneer het blad alleen nat is raakt deze niet verbrandt door zonnestraling, maar wanneer er is berekend met een deel stikstof bestaat er wel kans op verbranding bij sterke zonnestraling (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*). Zonnestraling heeft geen effect op de verdeling van de energie naar de verschillende organen maar beïnvloedt wel het droge stofgehalte. Daarnaast beïnvloedt het de bladmorphologie; bladeren worden dikker onder sterke zonnestraling (Haverkort, 2018).

experimenten in klimaatkamers dat de optimale temperatuur voor het bovengrondse deel van de aardappelplant zo'n 5°C hoger ligt (20-25°C) dan voor de knolontwikkeling (15-20°C) (Marinus and Bodlaender 1975; Struik et al. 1989a; 1989b; Rykaczewska 1993; Van Dam et al. 1996).

2.3 Belang van bemesting

Voedingstekort kan de weerstand van de plant tegen hitte en droogte verder beperken. De plant heeft energie en grondstoffen nodig om te acclimatiseren aan abiotische stress, bijvoorbeeld door het ontwikkelen van een groter wortelstelsel. Zo zijn de basis micronutriënten vaak nodig voor de verschillende beschermingsenzymen te laten functioneren (Mittler, 2006).

Uit de WaterSense bemestings- en beregeningsproeven in Valthermond in 2008-2012 blijkt vooral dat beregenen alleen niet altijd voldoende effect heeft om het gewas vitaal te houden. Er moet ook duidelijk de combinatie met bemesting worden gezocht. Omdat er vaak voor wordt gekozen om alleen bij extreme hitte en droogte te beregenen, wordt het toegediende water meteen al door de

plant opgenomen. Dit betekent dat de plant veelal water opneemt, zonder mineralen uit de bodem de tijd krijgen om daarin op te lossen. Het stikstofniveau in de plant daalt waardoor de plant relatief snel verouderd. Dit sluit aan bij ervaringen uit het buitenland (Peter Raatjes, *persoonlijke mededeling*; Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*).

Wanneer besloten is om te irrigeren is het daarom raadzaam om de stikstofgift te verdelen over het seizoen zodat deze net voor een watergift kan worden gegeven. Hierdoor is er minder kans op een stikstoftekort en krijgt het gewas ook niet in één keer een groeistoot. Stel, het gewas heeft 240 kg stikstof in totaal nodig, dan kan 140 kg worden gegeven voor opkomst van het gewas en vanaf de knolzetting 3x alvorens een watergift (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*).

2.4 Irrigatiemanagement

Een optimale vochtvoorziening in de aardappelteelt houdt in dat de bodemvochtigheid in de wortelzone wordt behouden op minimaal 65% water op volumebasis (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*). Tijdens de verschillende groeistadia moet dit hoger zijn, en mag het alleen tijdens de loofdoding iets lager zijn, zoals weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Aangeraden bodemvochtigheid per groeistadium

Groeistadium	Beschikbare bodemvochtigheid in de wortelzone voor optimale groei (op volumebasis)
Planten	70-80%
Actieve groeiperiode	70-85%
Later in het groeiseizoen	65-75%
Loofdoding	60-65%
Oogst	60%

Vooraf met het oog op kwaliteit is een goede timing van irrigeren belangrijk. Tijdens knolzetting en de vroege knolontwikkeling is aardappel gevoelig voor vochttekort. Vochttekort vroeg in het seizoen leidt voornamelijk tot misvormde knollen, minder droge stof en verhoogde suikergehalten in de knollen, terwijl een watertekort tijdens de knolvulling vooral resulteert in een lagere opbrengst en niet zo zeer een verminderde kwaliteit.

Een goede timing van irrigatie wordt bepaald aan de hand van de dagelijkse evapotranspiratie (ET), bij voorkeur met gebruik van bodemsensoren om de vochtigheid te meten. Op basis van deze gegevens kan de frequentie worden bepaald. Vervolgens is het zaak om ook te monitoren tot welke diepte het water van de gift daadwerkelijk reikt, zodat de volgende gift hierop kan worden afgestemd door de frequentie of de hoeveelheid te verhogen. Dit hangt ook af van de infiltratiesnelheid van verschillende bodemsoorten. Vooral in de bovenste 30 cm is het van belang om voldoende vocht in de bodem te houden. Zie hoofdstuk 3 voor praktische informatie om irrigatie te plannen.

Ervaringen uit de praktijk laten zien dat irrigatie tijdens droge, warme perioden er ook voor zorgt dat de plant sneller verouderd (Gerhard Meiborg, *persoonlijke mededeling*). Dit kan worden verklaard doordat de plant dan direct het water opneemt en investeert in groei terwijl de

omgevingstemperatuur niet optimaal is, en doordat de stikstof in de bodem geen tijd heeft om beschikbaar te komen voor de plant, waardoor de plant groeit met een stikstoftekort. Zoals vermeld wordt dit (deels) vermeden door de stikstofgift te verdelen over het seizoen, zodat net voor een watergift stikstof kan worden gegeven wat dan samen met het water wordt opgenomen door het gewas.

In het algemeen geldt dat het goed is om ten alle tijden de bodem voldoende vochtig te houden, vooral om de kwaliteit te waarborgen. Anders ontstaan defecten zoals verhoogde suikergehalten in de knollen (suikereinden), groeischeuren, holle en bruine harten. In het begin van het seizoen is wel extra voorzichtigheid met irrigatie geacht; de jonge plant kan 'lui' worden waardoor het wortelstelsel zich onvoldoende ontwikkeld.

Een belangrijke afweging bij het al dan niet beregenen is het vermogen van aardappelplanten om een periode van droogte te compenseren wanneer er weer voldoende water beschikbaar is. In Polen zijn ervaringen waar de opbrengst tussen beregende en niet-beregende percelen tijdens het seizoen 12-15 ton/ha verschilde, waar dit op het eind van het seizoen was teruggebracht tot 7 ton/ha. Ook waren de beregende percelen aan het eind sneller uitgeput. Beregenen tijdens droge perioden is met name van belang voor de kwaliteit, en is voor de teelt van kwaliteitsaardappelen het beste om ten alle tijden te doen, met name bij rassen als Russet Burbank.

Vocht en ziekten

Bij irrigatie moet rekening worden gehouden met ziekten die kunnen ontstaan door overirrigatie en door een vochtig microklimaat of vochtige bladeren. Voor Phytophthora is het belangrijk om bladnatheid zoveel mogelijk te beperken, o.a. door na mistige nachten 's ochtends 2 uur te stoppen met irrigeren zodat de bladeren kunnen drogen (Gerhard Meijborg). Overirrigatie zorgt ervoor dat er te weinig lucht rond de knollen zit, waardoor deze de lenticellen verder open zetten. Deze cellen vormen dan ingangen voor infecties.

2.5 Irrigatie in het buitenland

Doel van irrigeren

In Nederland wordt beregening toegepast ter ondersteuning van natuurlijke regenval terwijl in warme landende, indien mogelijk, de capaciteit van beregening is afgestemd op maximale dagelijkse verdamping en in dagelijkse behoefte kan voorzien. In warme landen wordt irrigatie toegepast om het gewas van voldoende vocht te voorzien maar ook om het gewas en de bodem te koelen. Dat wordt dan vaak met een pivotsysteem gedaan, dat in 12 tot 24 uur het gehele veld rond gaat. Zodoende wordt het hele perceel nat, zodat de temperatuur significant daalt. De haspelberegening die in Nederland doorgaans wordt ingezet is daarvoor minder geschikt.

Druppelirrigatie

De meest efficiënte methode is druppelirrigatie (90% efficiëntie) en deze wordt wereldwijd toegepast in gebieden waar restricties gelden zoals beperkt gebruik van oppervlaktewater en water uit diepe bronnen of uitspoeling van nitraat. Druppelirrigatie kan worden gecombineerd met

bemesting door vloeibare meststoffen aan het water toe te voegen. Het is ook een zeer efficiënte techniek om pesticiden in de wortelzone te krijgen, wat o.a. wordt gedaan in Mexico (Haverkort, 2018).

Sproeiers, beregeningskanon, pivot

Beregening met sproeiers komt het meest in de buurt van natuurlijke regenval en heeft een efficiëntie van 80%. Er bestaan dure versies en mobiele versies met een simpel pijpsysteem waarin elke sprinkler een cirkel beregent. De distributie is vrij ongelijk doordat er water in het midden van de cirkel valt en wind grote invloed heeft. Bij het kanon is wind nog meer van invloed. De efficiëntie hiervan is ook lager doordat het water meer is blootgesteld aan de lucht wat evaporatie veroorzaakt, en er is overlap of tekort, zeker wanneer het waait. Een center pivot of lineaire beregeningsboom is in deze groep het meest efficiënt, voornamelijk omdat de sproeiers ervan dichtbij het gewas zitten, op zo'n 1 of 2 meter erboven. Deze methode is populair in woestijngebieden waar land niet schaars is, en de ronde percelen dus geen probleem zijn. Dit wordt ook wel gecombineerd met een continue toediening van stikstof, om het gewas groen actief te houden, zelfs in een relatief warme omgeving (Haverkort, 2018).

2.6 Overige teeltmaatregelen

Waterbergend vermogen van de bodem

Door de bodemstructuur en -kwaliteit te optimaliseren wordt het waterbergend vermogen van de bodem goed benut, wat zorgt voor meer continuïteit van vochtvoorziening en een efficiënt gebruik van water. Belangrijke aspecten hierbij zijn een rijk bodemleven, voldoende organische stof en het voorkomen van verdichting van de bodem.

Bovengronds microklimaat

Onder echt warme en/of droge omstandigheden is het extra belangrijk om het microklimaat te optimaliseren. Hiermee wordt evapotranspiratie verminderd, kan de temperatuur worden verlaagd en sterke zonnestraling worden ondervangen. Hierbij valt te denken aan windbreaks, schaduw van bomen of schermen en het bedekken van de bodem met mulch.

Ondergronds microklimaat

Mulchen, het bedekken van de bodem met een laag plantaardig of kunstmatig materiaal, reduceert evapotranspiratie, waardoor water wordt bespaard en erosie verminderd, en de bodemtemperatuur daalt. Het heeft altijd effect op bodemtemperatuur, bodemvochtigheid, onkruid en tot op zekere hoogte ook het organische stofgehalte (Haverkort, 2018). Gewasresten of gemaaid gras kan in een laag van 3-10 cm dik op de bodem worden aangebracht na het planten van de aardappelen om de bodemtemperatuur laag te houden.

Waterbeheer

Met kortere perioden van veel regen kan het interessant worden om een deel van de regen die valt, met drainage af te voeren naar een opslag zodat het tijdens droogte kan worden ingezet voor irrigatie.

Monitoring en een goede planning

Welke maatregelen ook gekozen worden, monitoring van de bodem, het klimaat en het gewas maken het mogelijk om maatwerk te leveren en bijtijds te anticiperen op veranderende omstandigheden. Hiermee kan een opbrengstverlies voor een groot deel worden beperkt en de opbrengst mogelijk verhoogd.

3 Kennis en ervaring Delphy huidige praktijk

3.1 Zetmeelaardappelen

Het specifieke van het teeltdoel van zetmeelaardappelen is de zetmeelopbrengst. Daarbij is het een voordeel als het zetmeelgehalte hoog is maar dat is niet essentieel.

3.2 Eerste berekening

Om een plant tot maximale wortelgroei te laten komen moet niet te vroeg begonnen worden met beregenen. Maar bij knolzetting moeten de stolonen wel in vochtige grond zitten want vochtige grond bij knolzetting geeft meer knollen. Vanaf bloei – dat is na de knolzetting – heeft beregening geen nadelige invloed op de wortelgroei omdat deze vanaf dan toch al beperkt is. Uit de praktijkervaring is bekend dat er wat dit betreft verschil is tussen rassen maar hierover is geen harde informatie beschikbaar.

Het advies om te beregenen van zetmeelaardappelen is om eerst te kijken naar de beregeningscapaciteit. Dit bepaalt het areaal wat beregend kan worden. De betere gronden moeten prioriteit krijgen omdat het effect van beregenen op deze gronden optimaal is. Bij zeer erge droogte is beregenen op te droge gronden wel haalbaar maar dan moet er intensiever achterelkaar beregend worden. Dit houdt in dat er na één keer beregenen de tweede keer er direct achteraan moet met maximaal 2 dagen ertussen.

Bij zetmeelaardappelen zijn wortels op diepte ongeveer 6 weken na het poten. Dat kan men controleren in het veld. In de losse grond gaan de wortels ongeveer 45 cm diep. Het startmoment voor beregenen is als de helft van de bewortelingsdiepte droog is. Dit kan bepaald worden door de vochtspanning te meten met bodemvochtsensoren. De bepaling kan ook met de hand door met een gutsboor op verschillende plaatsen grond op te steken tot de bewortelingsdiepte. Als de gemengde grond na kneden tot een bal uit elkaar valt of scheurt dan is het tijd om te starten met beregenen.

3.3 Temperatuur en doorwas

Doorwas is in zetmeelaardappelen niet persé een negatieve eigenschap. Zet de doorwas door tot vorming van nieuwe knollen dan is dat voor de zetmeelaardappel geen belemmering. Het positieve van doorwas is dat een gewas langer groen blijft maar het moet dan wel de tijd krijgen om langer te groeien. Vermoedelijk worden bij doorwas nieuwe wortels gevormd.

3.4 Temperatuur en beregening

Een gewas met een beperkt kort wortelstelsel moet vaker worden beregend dan een gewas met diepere, uitgebreidere beworteling.

Bij sterk oplopende temperaturen zal een gewas met beperkte beworteling niet genoeg vocht op kunnen opnemen om de gewasverdamping optimaal te houden. Onder deze omstandigheden is het – bij een beperkte beregeningscapaciteit – rendabeler om een gewas met uitgebreidere beworteling te beregenen.

Een hoge temperatuur gaat meestal ook samen met sterke zonnestraling. Er wordt wel beweerd dat beregenen dan bladverbranding kan geven maar hier zijn geen praktijkvoorbeelden van geconstateerd. Hier tegenin pleit dat variatie van het tijdstip van beregenen op een perceel geen variatie in schade geeft. Het kanon heeft geruime tijd nodig om door het hele perceel getrokken te worden maar bladverbranding wordt nergens geconstateerd. Wanneer er ook stikstof in het beregeningswater is opgelost, kan het wel voorkomen, maar in Nederland is dat ongebruikelijk.

3.5 Beregeningscapaciteit

De beregeningscapaciteit kan worden berekend zoals in onderstaand voorbeeld.

te beregenen oppervlakte	60 ha
gift per keer	300 m ³ /ha
aantal dagen rond	7 dagen
netto beregeningsuren / dag	20 uur
capaciteit per installatie	80 m ³ /h
aantal ha / dag / installatie	5,3 ha/dag
aantal ha per ronde (week)	37 ha
benodigd aantal installaties	1,6 van 80 m ³ /h

In dit voorbeeld is er met 1 installatie capaciteit om wekelijks 37 ha te beregenen.

3.6 Hoeveelheid beregening

Het is van belang dat per beregening de bodem tot onder de wortelzone bevochtigd wordt. Vaak wordt beregend tot 60% van de wortelzone. Er moet dus in de bodem gekeken worden. Ook is het van belang om de waterafgifte te controleren. De werkelijke gift is vaak lager dan de ingestelde gift. Controle door plaatsen van enkele regenmeters is dus nuttig. Een zwak lemig fijne zandgrond kan bijvoorbeeld maximaal ongeveer 24 mm water per 10 cm worteldiepte bevatten. Als de worteldiepte 25 cm is, dan is er dus $25 / 10 \times 24 = 60$ mm beschikbaar. Bij 40 cm worteldiepte is dat 96 mm. Dit verklaart waarom een ondiep wortelend gewas vaker beregend moet worden want deze 'mist' 36 mm.

De beregeningsgift kan uitgerekend worden door het verschil te nemen tussen de maximale hoeveelheid vocht (veldcapaciteit / V maximaal) in de wortelzone en de actuele hoeveelheid vocht

(V actueel). Wordt er meer gegeven dan vloeit het water onder de wortels weg naar diepere lagen. In de praktijk wordt er ongeveer 25 tot 35 mm water per berekening gegeven. De hoeveelheid wordt vaak iets aangepast naar een gunstige timing voor het verplaatsen van de haspel.

3.7 Gewasverdamping en capillaire werking

Bij de planning van de berekening moet ook rekening worden gehouden met de gewasverdamping. Een rekenvoorbeeld:

- De referentieverdamping is volgens het weerbericht 5 mm
- Het aardappelgewas staat in volle bloei → de gewasfactor is dan 1,3
- De gewasverdamping is dan $5 \times 1,3 = 6,5$ mm / dag
- Een berekening van 26 mm is indien er verder geen neerslag valt in 4 dagen op.

Bij een grond met capillaire werking kan er uit het grondwater 0,5 tot 3 mm / dag geleverd worden naar de wortelzone. Dit is te meten met een bodemvochtsensor. Bij een capillaire werking van 2 mm / dag is de benodigde aanvulling in het voorbeeld niet 6,5 mm maar 4,5 mm / dag. De berekende hoeveelheid is dan na bijna 7 dagen op.

3.8 Effect op opbrengst en zetmeel, bijbemesten

Dankzij berekening kan in jaren als 2018 de opbrengst toenemen van 15 naar 40 ton/ha. Het normale opbrengstniveau van 45 – 50 ton/ha wordt niet gehaald. Het zetmeelgehalte daalt wel door berekening. Het is van belang om voor het beregenen ook wat extra stikstofbemesting te geven. Mogelijk is het ook nuttig om het gewas wat extra kali of andere meststoffen te geven. Na berekening is er een vrij grote variatie in vochtgehalte van de grond in de wortelzone. Zodoende is de benutting van de aanwezige meststoffen minder. Het bijbemesten kan het beste gebaseerd worden op een plantsapanalyse.

3.9 Bodemtemperatuur

Zolang het gewas de bodem goed kan bedekken zal de bodemtemperatuur niet snel te hoog worden. Het gewas vangt de zonnestralen op en geeft schaduw. Ook koelt de plant bij een goede verdamping. Zo is door op tijd te beregenen de doorwas te voorkomen. Door de totale berekening te verdelen over kleinere giften en iets vaker terug te komen zal de vochtigheid bovenin de grond iets hoger en constanter blijven en zodoende de temperatuur iets lager.

3.10 Drip t.o.v. haspelberegenen

Bij druppelirrigatie kan vaker water gegeven worden met kleinere hoeveelheden dan bij berekening. Naast het watergeven kun je de bemesting tijdens het druppelen meegeven en zijn minder voedingsstoffen nodig omdat het precies daar komt waar het gewas het nodig heeft. Een positief effect van druppelirrigatie is dat het gewas droog blijft en dat is bij beregenen niet zo. Hierdoor slijt het gewas minder en is ook minder vatbaar voor bladschimmels. De waterverdeling is veel efficiënter en beter (geen last van verwaaien door de wind) en er is minder tot geen

afspoeling. Door regelmatig te druppelen met lage hoeveelheden water reageert de grond als een spons. Wanneer er dan een lokale bui komt zal de grond dat water ook beter vasthouden. Een ander positieve bijkomstigheid is dat je met druppelirrigatie de gewastemperatuur kunt sturen. Bij hele koude nachten kun je de grond isoleren. Dit werkt beter dan bij beregenen. Bij hitte werkt het omgekeerd, door te druppelen kun je de temperatuur van het gewas continu enkele graden lager houden. Bijvoorbeeld, als de omgevingstemperatuur 28 graden is, dan kun je de gewastemperatuur naar 24°C krijgen. Zo kan beter op temperatuur gestuurd worden.

Bij gebruik van bronwater is een nevenvoordeel van drip dat het ijzerrijke veenkoloniale water niet op de plant komt. Het ijzer op de plant is negatief voor de plantgroei. Gebruik van slootwater geeft geen ijzerproblemen bij druppelirrigatie. Bij gebruik van een bron is het belangrijk om een watermonster te nemen om het ijzergehalte te bepalen. Bij een te hoog gehalte kan een ijzerfilter toegevoegd worden zodat het gewas geen beperking ondervindt in de fosfaatopname. Vooral op gronden waar het fosfaatgehalte van de grond laag is, is het belangrijk om hier rekening mee te houden. Hoogstwaarschijnlijk geeft het ijzer bij druppelirrigatie geen substantiële fosfaatfixatie. Afhankelijk van het water dat wordt ingezet, kan het bij druppelirrigatie nodig zijn om een ijzerfilter te installeren omdat anders het systeem verstopt.

Bij druppelirrigatie in zetmeelaardappelen kan per dag maximaal 4-6 mm toegediend worden. Dit is wel afhankelijk van de grondsoort en rassenkeuze. Soms is 2 mm per dag ook al afdoende. Uit ervaringen met onderzoek door Delphy blijkt een fasering van 2-6 mm per keer voldoende om de 1 à 2 dagen het gewas goed aan de groei te houden. Dit is natuurlijk wel afhankelijk van grondsoort, weer en gewasstadia. De eerste gift bepaalt hoe de dosering gaat worden, dit is afhankelijk van bodemwerking en verdeling van het vocht. Belangrijk bij druppelirrigatie is dat je een waterbel (vochtige zone) krijgt in de grond en deze moet eerst gecreëerd worden voordat je plan van aanpak maakt. Als het plan van aanpak bekend is dan kan het meerwaarde geven om eenmalig een product zoals Transformer aan de watergift toe te voegen zodat de vochtverdeling optimaal is en ook de vochtbeschikbaarheid beter blijft. Voor druppelirrigatie is het belangrijk dat je met bodemvochtsensoren gaat werken, anders is actuele bijsturing niet mogelijk. Vooral percelen met een slechte beworteling en een laag organische stofgehalte komen in aanmerking voor druppelirrigatie. Juist telers van deze percelen beschikken reeds over een beregeningshaspel omdat er ook in normale jaren beregend moet worden.

3.11 Beregeningsboom

De ervaringen met een beregeningsboom in plaats van een beregeningskanon geven niet de indruk dat een boom een beter effect geeft.

3.12 Waterkwaliteit

Diverse aspecten zijn van belang voor de kwaliteit van het gebruikte water. Oppervlaktewater kan besmet zijn met bruinrot en van bronwater mag de temperatuur niet te laag zijn. Voorts is vooral het ijzergehalte van belang en nogal eens problematisch hoog. In onderstaand overzicht staan een aantal normen.

Element	Norm
Natrium	<0,5 mmol/l
Chloor	<1 mmol/l
IJzer	<35 µmol/l
Bicarbonaat	<2 mmol/l

3.13 Bodemsamenstelling / eigenschappen

In het zetmeelaardappelengebied varieert het organische stofgehalte van de bodem van 3 tot meer dan 20%. Op deze gronden is een geslaagde teelt veel minder afhankelijk van beregening. Het beregenen van deze percelen onder droge omstandigheden is echter wel rendabel. Het is nuttig om van elk perceel een pF-curve te laten berekenen om meer inzicht te hebben in het vocht leverend vermogen. Aan de hand van de pF curve kan de ondernemer berekenen hoeveel beschikbaar water er is voor het gewas en hoeveel er beregend moet worden. Aan de hand van dit gegeven kan ook het maximum berekend worden. Beregenen gebeurt nu nog te veel op gevoel, maar dan is het vaak te laat. Daarnaast is ook de vochtlevering uit de ondergrond (capillaire werking), de textuursamenstelling, het leemgehalte en het gehalte organische stof van belang, namelijk bepalend voor het waterbergend vermogen van de bodem.

3.14 Andere maatregelen

Het voordeel van beddenteelt / vlakveldteelt kan zijn dat het waterbergend vermogen groter is, er minder afstroming plaatsvindt, de beregening effectiever is en de bodemtemperatuur iets lager blijft. De wortels groeien goed door het bed en worden niet begrenst door de buitenkant van de rug. Zodoende kunnen de wortels beschikken over iets meer vocht en mineralen. Het effect op doorwas is in zetmeelteelt niet van belang omdat dit geen nadeel hoeft te zijn.

Op droogtegevoelige percelen wordt geadviseerd om dieper te poten. Dit geeft een betere knolzetting.

De toegevoegde waarde van mulchen wordt voor de Nederlandse situatie betwijfeld. De kosten zijn voorsnog te hoog. Mulchen, de bodem bedekken met een laag van organisch of kunstmatig materiaal, kan worden gedaan met plantresten van een voorgaand gewas of met plastic folie.

4 Verkenning van oplossingsrichtingen

Er liggen veel mogelijkheden in de teeltmaatregelen om de negatieve effecten van droogte en hittestress te verlichten. Hierbij valt te denken aan bodemverbetering, irrigatiemanagement, planning, monitoring en afstemming, groeiregulatoren en bladsprays.

Buiten de agronomische maatregelen kunnen grote stappen worden gemaakt in de veredeling en zijn er een aantal producten op de markt die mogelijk kunnen helpen.

In de praktijk komt het erop aan om niet een enkele maatregel maar een combinatie van maatregelen in te zetten die de impact van stress verkleinen, de stress voorkomen of verminderen en maatregelen die gunstige fysiologische processen stimuleren.

Maatregelen moeten zijn gericht op het behouden van een optimale omgevings- (20-25°C) en bodemtemperatuur (15-20°C), een goede vochthuishouding (met name van belang voor kwaliteit) en het afstemmen van de watergift op het groeistadium. Aanvullend kunnen metingen van de vochtbeschikbaarheid in de bodem, gedurende het hele seizoen worden benut om maatregelen goed op elkaar en de omstandigheden af te stemmen. Vooral tijdens de knolzetting moet de temperatuur en vochthuishouding goed in de gaten worden gehouden en zo nodig worden aangepakt. Bij temperaturen boven de 28°C stopt de plant nagenoeg met groeien. De effecten van droogte en hitte op kwaliteit en opbrengst zijn complex en er is interactie tussen beide stressfactoren; ze kunnen elkaars impact vergroten. In het algemeen geldt dat het beter is om vaak weinig dan soms veel te irrigeren.

Rassenkeuze en nieuwe rassen

Genotypen met grotere wortelstelsels zijn beter bestand tegen droogte en beter in staat is om de opbrengst te behouden (Wishart et al. 2013, 2014; Puértolas et al. 2014). Wat wel interessant is, is dat de genotypen met grotere wortelstelsels ook sneller een sluitend bladerdek bereiken. Dat verlengt de periode van optimale fotosynthese en reduceert vroegtijdig vochtverlies door evaporatie van de bodem (George et al., 2017).

Het wordt gesuggereerd dat in veredeling rassen kunnen worden gekweekt met een verhoogd aantal diep wortelende hoofdwortels, langere haarwortels en een hogere hydraulische weerstand van de wortels, zodat deze water minder snel afgeven (Bengough et al. 2011). Lagere transpiratiesnelheid als reactie op verdrogende grond kan ook worden aangezet door een lagere dichtheid van huidmondjes (Yan et al. 2012; Sun et al. 2014).

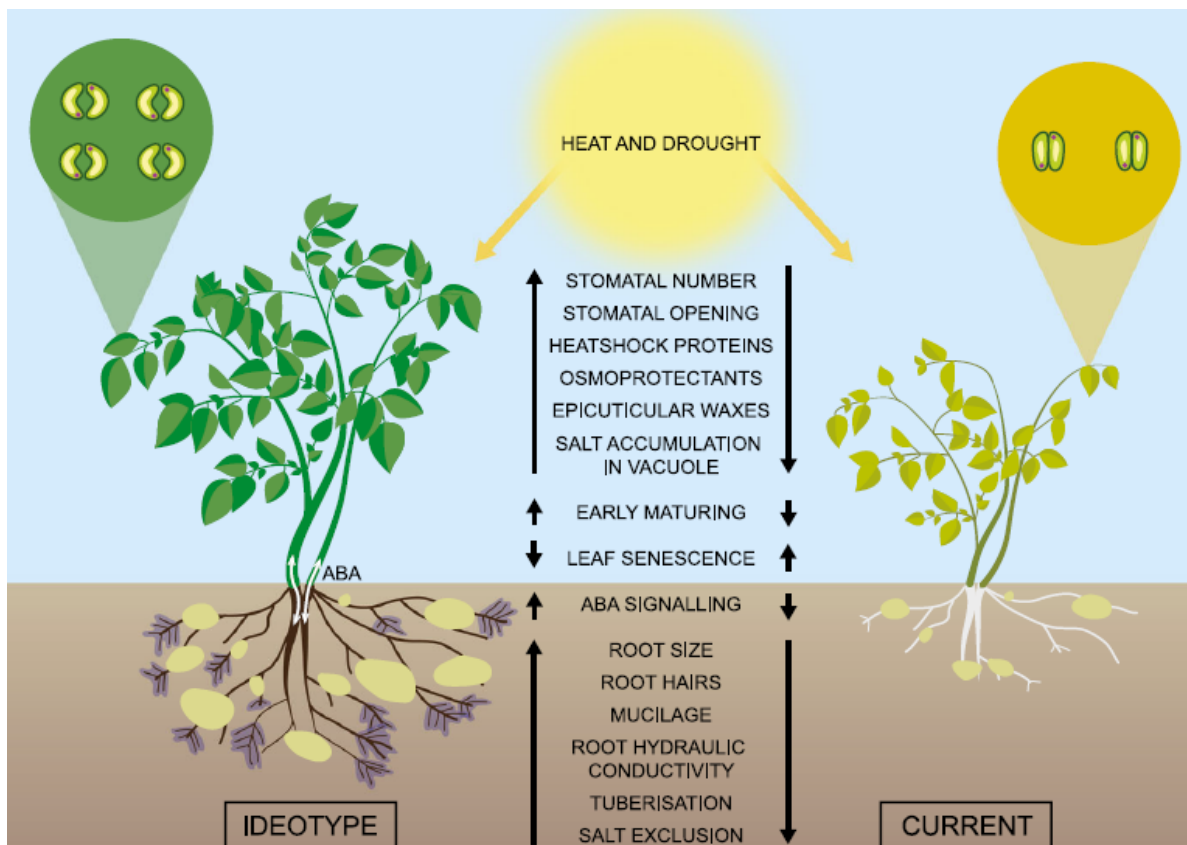
Droogteresistente rassen hebben ongeveer vijf keer minder huidmondjes in de bovenste laag van de bladeren dan droogtegevoelige rassen, evenals grotere wortelstelsels (Boguszewska-Mankowska et al. 2017). Droogteresistente rassen zijn ook meer hittestressresistent, ondanks hun verminderde verkoeling via transpiratie.

Samen met het behoud van chlorophyll fluorescence (graadmeter voor energie uit fotosynthese) in de resistente rassen onder stress, suggereren deze bevindingen dat de resistente rassen in staat zijn om de productie van schadelijke metabolieten en reactieve zuurstofcomponenten effectief

kunnen tegengaan. Deze laatste is belangrijk, omdat tijdens perioden van extreme omstandigheden zoals warmte, de hoeveelheden reactieve zuurstofcomponenten sterk kunnen stijgen wat aanzienlijke schade aan celstructuren veroorzaakt (oxidatieve stress) (George et al., 2017).

Droogteresistente rassen en het ontwikkelen van hierboven beschreven rassen, kunnen een goede oplossing zijn om de aardappelteelt te optimaliseren onder drogere en warmere omstandigheden, vooral omdat hiermee wordt ingespeeld op de gecombineerde stress.

Een andere aanpak is om aan de hand van de fenologie rassen te identificeren die goed presteren onder de gecombineerde stresscondities van droogte en hoge temperaturen; vroege rassen die stress vermijden door hun ontwikkelingsproces te voltooien voordat er grote kans op droogte is. In het algemeen zijn genotypen die laat volwassen worden beter in staat om hun bladerdek aan te passen op de knolgroei tijdens droogte (Aliche et al. 2017). Figuur 3 weergeeft een ideotype zoals deze is voorgesteld in de review van George et al. (2017) naar de tolerantie van abiotische stress bij aardappelen. Bij het ontwikkelen van droogteresistente rassen kan hierop worden ingezet.



Figuur 3. Aardappel ideotype voor gecombineerde hitte-, droogte- en verziltingstolerantie in warmere en drogere condities verwacht van klimaatverandering. Dit ideotype is vergeleken met de huidige genotypen die niet zijn geselecteerd voor stresstolerantie (George et al.,2017).

Naast het ontwikkelen van rassen is het goed om te weten hoe verschillende rassen reageren op bepaalde factoren zoals droogte en hitte. Zo is het o.a. afhankelijk van het ras of een hogere temperatuur resulteert in een langere of juist kortere levensduur van de plant. Wat zijn de eigenschappen van een ras dat optimaal presteert onder droge en/of warme condities en presteert zo'n ras ook nog goed wanneer de omstandigheden minder zwaar zijn?

Beddenteelt, dieper poten en een goede bodembedekking

Door dieper te poten op percelen waar droogte snel een probleem vormt, kan het effect worden verminderd. Ook een aangepaste zaaidatum en aanpassingen in de bemesting zoals een verhoogde stikstofgift kunnen op termijn worden toegepast om de verliezen te beperken. Er wordt minder water verdampt op een vlakke bodem (beddenteelt) dan een perceel met ruggen, het waterbergend vermogen is hoger dan bij ruggen, en vermoedelijk is de bodemtemperatuur in de beddenteelt lager dan bij ruggenteelt.

Met een goede bodembedekking wordt de temperatuur in de bodem laag gehouden en treedt minder evaporatie van vocht uit de bodem op. Voor de huidige situatie betekent dit dat vooral een goed sluitend bladerdek van belang is. Andere maatregelen om de bodem te beschermen tegen straling, hitte en droogte, zoals mulchen, kunnen mogelijk rendabel zijn wanneer omstandigheden extremer worden.

Irrigatiemanagement

Aardappels kunnen vooral voordeel hebben van irrigatie tijdens de knolvorming en knolvulling. De beregeningsystemen zijn minder efficiënt, minder precies maar eenvoudig toe te passen. Druppelirrigatie is efficiënt en biedt het voordeel om de bodem constant vochtig te houden.

Hoewel wordt ervaren dat het goed is om de hele wortelzone altijd van voldoende vocht te voorzien, is er een interessante irrigatiemethode waarbij dit bewust niet met het volledige wortelstelsel wordt gedaan, om gebruik te maken van een plantfysiologisch proces. Deze methode heet 'partial rootzone drying' (PRD) en heeft internationaal veel aandacht (George et al., 2017). Een deel van de wortels wordt voldoende bevochtigd om aan de waterbehoefte van de plant te voldoen en defecten aan het blad te voorkomen door watertekort. Een ander deel van het wortelstelsel wordt bewust droog gehouden, waardoor hier het signaal van wortel-naar-scheut, 'ABA signalling' wordt geactiveerd wat ervoor zorgt dat de plant haar huidmondjes deels sluit. Dat resulteert in minder verdamping en zodoende een verbeterde efficiëntie van waterverbruik (Liu et al., 2006; George et al., 2017). In de praktijk worden de natte en droge delen van de wortelzone frequent gewisseld om wortelgroei en wortel-naar-scheut ABA signalling te stimuleren (Dodd et al., 2015).

Groeiregulatoren en bladsprays

Natuurlijke of synthetische groeiregulatoren kunnen de plant helpen om met stress van droogte en hitte om te gaan. Zo kan de toepassing van het planthormoon gibberellinezuur (Taiz en Zeiger, 2006), het aminozuur ACC (Brownfield et al., 2008) en de stofklasse van het aminozuur glycine (Farooq et al., 2009) de effecten van droogtestress reduceren. Gibberellinezuur is in Nederland toegelaten maar niet in de aardappelteelt, dus dit biedt geen directe oplossing maar wel aanleiding tot onderzoek.

Ook kan het blad bespoten worden met een soort zonnebrandmiddel voor planten, zoals van het merk Purshade. Het is een vloeistof op basis van calciumcarbonaat die een film over de bladeren legt welke de bladeren beschermt tegen schadelijke UV-straling en de celwand verstevigt. Het zou de temperatuur in de planten verlagen door reflectie van de hitte. Een proef met een aantal zonnebrandmiddelen bij wijnstokken in Egypte laat zien dat deze middelen een positieve rol kunnen spelen in het telen van wijnstokken onder hoge temperaturen (Bedrech et al., 2015).

5 Conclusies en aanbevelingen

Timing en monitoren vormen de basis voor een goed beheer van productierisico's als droogte en hitte. Het is daarbij belangrijk om de vochtthuishouding en temperatuur tijdens bepaalde groeistadia nauwlettend in de gaten te houden. Er kan in het algemeen worden gesteld dat hoe eerder in het seizoen hitte optreedt, hoe negatiever de impact op de groei en uiteindelijk de opbrengst is. Dit is zowel betreft temperatuur als vochtvoorziening een kritieke periode: Een tekort aan vocht in de bodem aan het begin van het groeiseizoen leidt tot minder aardappelen (doordat zich minder uitlopers vormen in een droge bodem) en het signaal voor knolzetting wordt geremd door hogere temperaturen. Droogte tijdens de knolvullingsfase zorgt over het algemeen voor de grootste opbrengstderving omdat de plant meer transpireert, minder bladeren vormt en waarschijnlijk vroegtijdig bladeren verliest.

Tijdens lange perioden van droogte en/of hitte is niet alleen irrigatie voor koeling en vochtvoorziening van belang maar ook om de bemesting hierop aan te passen. Het is raadzaam om de stikstofgift te verdelen en af te stemmen op de watergift, door het gewas vlak voor een watergift bij te mesten. Dit geldt in ieder geval voor stikstof, het is nog onvoldoende onderzocht welke bijdrage het bijmesten van andere nutriënten zoals kali en magnesium hebben in het opvangen van hitte- en droogtestress.

Vooraf met het oog op kwaliteit is een goede timing van irrigeren belangrijk. Tijdens knolzetting en de vroege knolontwikkeling is aardappel gevoelig voor vochttekort. Kennis van het perceel (m.n. het waterbergend vermogen van de bodem) en de actuele vochttoestand in combinatie met weersverwachtingen zijn de basis voor een goed irrigatiemanagement.

Voor wat betreft vervolgonderzoek zijn er interessante aanknopingspunten voor het kiezen alsook ontwikkelen van geschikte rassen en de complexe wisselwerking tussen factoren als droogte en hitte. Hierbij is ook behoefte aan vervolgonderzoek naar de effecten van gecombineerde stress – droogte én warmte. Dit is belangrijk omdat de ene stress de impact van de ander kan vergroten en bovendien de plant verschillend kan reageren op individuele en gecombineerde stress, wat weer gevolgen heeft voor de kwaliteit en opbrengst.

Mogelijke maatregelen om kwaliteit en/of de opbrengst te waarborgen onder warme en/of droge omstandigheden zijn het ontwikkelen van nieuwe rassen, aanpassingen in de teelt zoals beddenteelt i.p.v. ruggenteelt, toepassen van irrigatie en deze afstemmen op metingen gedurende het seizoen, irrigatiemethoden als *Partial rootzone drying* en het gebruik van groeiregulatoren en bladsprays die UV-straling reflecteren. Verder onderzoek van deze mogelijkheden voor toepassing in de Nederlandse zetmeelaardappelteelt in combinatie met onderzoek dat bijdraagt aan een beter begrip van de effecten van hitte en droogte en de reactie van de aardappelplant hierop, biedt perspectief om de Nederlandse zetmeelaardappelteelt onder extremere condities optimaal te houden.

Referenties

- Aliche, E. B., Oortwijn, M., Theeuwen, T. P., Bachem, C. W., Visser, R. G., & Linden, C. G. (2018). Drought response in field grown potatoes and the interactions between canopy growth and yield. *Agricultural Water Management*, 206, 20-30. doi:10.1016/j.agwat.2018.04.013
- Barreda, C., Gavilan, C., Quiroz, R., (1996). Modelling potato growth and development with parameters derived from remotely sensed data. In: Lima: International Society for Tropical Root Crops (ISTRC). 15th Triennial ISTRC Symposium.
- Bedrech S. A. and S. Gh. Farag. Usage of some sunscreens to protect the Thompson Seedless and Crimson Seedless grapevines growing in hot climates from sunburn. *Nat Sci* 2015;13(12):35-41]. (ISSN: 1545-0740).<http://www.sciencepub.net/nature>. 5. doi:10.7537/marsnsj131215.05.
- Boguszewska-Mankowska D, Nykiel M, Zarzyńska K (2017) Physiological and biochemical parameters of potato cultivars evaluation to drought and heat stress. Proceedings of the 20th Triennial EAPR Conference 9th-14th July 2017, Versaille, France
- Brownfield DL, Todd CD, Deyholos MK (2008) Analysis of Arabidopsis arginase gene transcription patterns indicates specific biological functions for recently diverged paralogs. *Plant Mol Biol* 67:429–440
- Bengough AG, McKenzie BM, Hallett PD (2011) Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J Exp Bot* 62:59–68
- Benoit, G.R., C.D. Stanley, W.J. Grant, and D.B. Torrey. 1983. Potato top growth as influenced by temperatures. *American Potato Journal* 60: 489–501
- Bodlaender, K.B.A. (1963). Influence of temperature, radiation and photoperiod on development and yield. *Growth of the potato*, ed. J.D.Ivins and F.L. Milthorpe, 199–210. London: Butterworths.
- Bodlaender, K.B.A., C. Lugt, and J. Marinus. (1964). The induction of second-growth in potato tubers. *European Potato Journal* 7: 57–71.
- Cruiziat P, Cochard H (2002) Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann Forest Sci* 59: 723–752
- Dodd IC, Puértolas J, Huber K, Pérez-Pérez JG, Wright HR, Blackwell MSA (2015) The importance of soil drying and re-wetting in crop phytohormonal and nutritional responses to deficit irrigation. *J Exp Bot* 66: 2239–2252
- Ewing, E.E. (1981). Heat stress and tuberization stimulus. *American Potato Journal* 58: 31–49.
- Farooq M, Aziz T, Wahid A, Lee DJ, Siddique KHM (2009) Chilling tolerance in maize: agronomic and physiological approaches. *Crop Past Sci* 60:501–516
- Gawrońska, H., R.B. Dwelle, and M.K. Thornton. (1992). Influence of heat stress on dry matter production and photoassimilate partitioning by four potato clones. *American Potato Journal* 69: 653–665.
- George, T. S., Taylor, M. A., Dodd, I. C., & White, P. J. (2017). Climate Change and Consequences for Potato Production: A Review of Tolerance to Emerging Abiotic Stress. *Potato Research*, 60(3-4), 239-268. doi:10.1007/s11540-018-9366-3
- Hancock, R.D., W.L. Morris, L.J.M. Ducreux, J.A. Morris, M. Usman, S.R. Verrall, J. Fuller, C.G. Simpson, R. Zhang, P.E. Hedley, and M.A. Taylor. (2014). Physiological, biochemical and molecular

responses of the potato plant to moderately elevated temperature. *Plant, Cell and Environment* 37: 439–450.

Haverkort, A.J., Goudriaan, J., (1994). Perspectives of improved tolerance of drought in crops. *Aspects Appl. Biol.* 38.

Haverkort, A. J. (n.d.) (2018). Potato handbook: Crop of the future / Anton J. Haverkort. Den Haag: Potato World Magazine.

Hijmans, R.J. (2003). The effect of climate change on global potato production. *American Journal of Potato Research* 80: 271–280.

Kooman, P.L., and A.J. Haverkort (1995). Modeling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength. *Potato Ecology and Modeling of Crop under Conditions Limiting Growth*, ed. A.J. Haverkort and D.K.L. MacKerron, 41–59. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Levy D, Veilleux RE (2007) Adaptation of potato to high temperatures and salinity—a review. *Am J Potato Res* 84:487–506

Li, P., (2012). *Potato Physiology*. Elsevier Science.

Ludlow, M.M. (1989). Strategies of response to water-stress. *Structural and Functional Responses to Environmental Stresses: Water Shortage*, eds K.H. Kreeb, H. Richter, en T.M. Hinckley (The Hague: SPB Academic Publishing), 269–281.

Maurel C, Simonneau T, Sutka M (2010). The significance of roots as hydraulic rheostats. *J Exp Bot* 61:3191–3198

Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends Plant Sci.* 11, 15–19. doi:10.1016/j.tplants.2005.11.002

Molteberg EL (2017) Influence of soil characteristics on skin finish of Norwegian potatoes. *Proceedings of the 20th Triennial EAPR Conference* 9th–14th July 2017, Versailles, France

Iwama K, Yamaguchi J (2006) Abiotic stresses. In: Gopal SM, Khurana P (eds) *Handbook of potato production, improvement and post harvest management. Food Product*, New York, pp 231–278

Marinus, J., and K.B.A. Bodlaender. (1975). Response of some potato varieties to temperature. *Potato Research* 18: 189–204.

Navarre, R., Pavek, M.J., (2014). *The Potato: Botany Production and Uses*. CABI. Opena, G.B., Porter, G.A., 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agron. J.* 91, 426–431.

Obidiegwu, J. E. (2015). Coping with drought: Stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6. doi:10.3389/fpls.2015.00542

Pinheiro, C., and Chaves, M.M. (2011). Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? *J. Exp. Bot.* 62, 869–882. doi: 10.1093/jxb/erq340

Puértolas J, Ballester C, Elphinstone ED, Dodd IC (2014) Two potato (*Solanum tuberosum*) varieties differ in drought tolerance due to differences in root growth at depth. *Func Plant Biol* 41:1107–1118

Rykaczewska, K. (1993). Effect of temperature during growing season and physiological age of minitubers on potato plant development and yield. *Bulletin Potato Institution* 42: 39–46.

Rykaczewska, K. (2013b). The impact of high temperature during growing season on potato cultivars with different response to environmental stresses. *American Journal Plant Science* 4: 2386–2393.

Rykaczewska, K. (2015). The Effect of High Temperature Occurring in Subsequent Stages of Plant Development on Potato Yield and Tuber Physiological Defects. *American Journal of Potato Research*, 92(3), 339–349. doi:10.1007/s12230-015-9436-x

Steyn, J.M., Kagabo, D.M., Annandale, J.G., (2007). Potato growth and yield responses to irrigation regimes in constrasting seasons of a subtropical region. Paper presented at the African Crop Science Conference Proceedings, Egypt.

Struik, P.C., J. Geertsema, and C.H.M.G. Custers. (1989a). Effect of shoot, root and stolon temperature on the development of the potato (*Solanum tuberosum* L) plant. I. Development of the haulm. *Potato Research* 32: 133–141.

Struik, P.C., J. Geertsema, and C.H.M.G. Custers. (1989b). Effect of shoot, root and stolon temperature on the development of the potato ((*Solanum tuberosum* L) plant. III. Development of tubers. *Potato Research* 32: 151–158.

Struik, P.C., Wiersema, S.G., (1999). *Seed Potato Technology*. Wageningen Academic Publishers.

Sun YQ, Yan F, Cui XY, Liu F (2014) Plasticity in stomatal size and density of potato leaves under different irrigation and phosphorus regimes. *J Plant Physiol* 171:1248–1255

Taiz L, Zeiger E (2006) *Plant physiology*. Sinauer Associates Press, Sunderland\

Van Dam, P. L. Kooman and P. C. Struik, (1996). Effects of Temperature and Photoperiod on Early Growth and Final Number of Tubers in Potato (*Solanum tuberosum* L). *Potato Research*, Vol. 39, No. 1, 1996, pp. 51-62. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02358206>

Wishart J, George TS, Brown LK, Ramsay G, Bradshaw JE, White PJ, Gregory PJ (2013) Measuring variation in potato roots in both field and glasshouse: the search for useful yield predictors and a simple screen for root traits. *Plant Soil* 368:231–249

Wishart J, George TS, Brown LK, White PJ, Ramsay G, Jones H, Gregory PJ (2014) Field phenotyping of potato to assess root and shoot characteristics associated with drought tolerance. *Plant Soil* 378:351–363

Wolf S, Marani A, Rudich J (1991). Effect of temperature on carbohydrate metabolism in potato plants. *J Exp Bot* 42:619–625

Yan F, Sun YQ, Song FB, Liu FL (2012) Differential responses of stomatal morphology to partial root-zone drying and deficit irrigation in potato leaves under varied nitrogen rates. *Sci Hort* 145:76–83